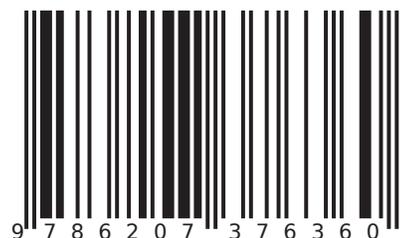


# Transductores y sensores de medición

Se estudian los principios físicos de funcionamiento y los principios de construcción de transductores de medición de diversos parámetros físicos. Se presta especial atención a los sensores semiconductores de temperatura, deformación mecánica y campos magnéticos. Se consideran ciertas cuestiones del funcionamiento de sensores de humedad, dispositivos de ionización, diversos fototransductores, medidores de caudal, niveles de llenado, presión, etc. Se presentan los resultados de un estudio de las características de los sensores considerados y la influencia de diversas influencias externas sobre ellos. Dirigido a ingenieros y técnicos implicados en el desarrollo y uso de transductores y sensores de medida, investigadores, estudiantes de postgrado y estudiantes universitarios.

Nikolay Gorbachuk Profesor asociado del Departamento de Física Aplicada y Matemáticas Superiores de la Universidad Nacional de Tecnología y Diseño de Kiev, Ucrania.



EDICIONES  
NUESTRO CONOCIMIENTO 

Sensores, transductores, mediciones

Nikolay Gorbachuk

EDICIONES  
NUESTRO CONOCIMIENTO



# Transductores y sensores de medición

*Monografía*

---

**Nikolay Gorbachuk**

**Nikolay Gorbachuk**

**Transductores y sensores de medición**

FOR AUTHOR USE ONLY

**Nikolay Gorbachuk**

# **Transductores y sensores de medición**

**Monografía**

FOR AUTHOR USE ONLY

**SciencaScripts**

## **Imprint**

Any brand names and product names mentioned in this book are subject to trademark, brand or patent protection and are trademarks or registered trademarks of their respective holders. The use of brand names, product names, common names, trade names, product descriptions etc. even without a particular marking in this work is in no way to be construed to mean that such names may be regarded as unrestricted in respect of trademark and brand protection legislation and could thus be used by anyone.

Cover image: [www.ingimage.com](http://www.ingimage.com)

This book is a translation from the original published under ISBN 978-620-7-47057-0.

Publisher:

Scientia Scripta

is a trademark of

Dodo Books Indian Ocean Ltd. and OmniScriptum S.R.L publishing group

120 High Road, East Finchley, London, N2 9ED, United Kingdom

Str. Armeneasca 28/1, office 1, Chisinau MD-2012, Republic of Moldova, Europe

Printed at: see last page

**ISBN: 978-620-7-37636-0**

Copyright © Nikolay Gorbachuk

Copyright © 2024 Dodo Books Indian Ocean Ltd. and OmniScriptum S.R.L publishing group

FOR AUTHOR USE ONLY

# ÍNDICE

Introducción .....	2
Capítulo 1. Temperatura. Temperatura. Transductores, medición.....	3
Capítulo 2. Magnitudes mecánicas. Magnitudes mecánicas. Transductores, sensores, medición .....	37
Capítulo 3. Campos magnéticos. Campos magnéticos. Transductores, sensores, medición .....	94
Capítulo 4. Humedad, gases. Métodos de medida de la humedad. Higrómetro .....	116
Capítulo 5. La luz. La luz. Transductores, fotocélulas .....	120
Capítulo 6. Transductores de ionización. Transductores de ionización. Sensores .....	141
Anexo.....	152

## Introducción

Es difícil imaginar las técnicas y tecnologías modernas sin diversos tipos de transductores de medición, sensores, transductores, elementos sensores. Muchos trabajos se dedican al desarrollo de tales dispositivos, los principios y métodos de medición, el diseño de transductores y sensores se mejoran constantemente.

Los transductores de medida incluyen dispositivos que convierten un cambio en una magnitud en un cambio en otra magnitud. Por regla general, un transductor de este tipo convierte una magnitud física no eléctrica, denominada magnitud física medida, en una señal eléctrica. Los transductores de medida se utilizan en sistemas electrónicos que muestran el resultado de mediciones u observaciones. Los principales generadores de señales eléctricas sobre una magnitud física no eléctrica son los sensores (transductores, elementos sensibles).

La monografía presenta los resultados del desarrollo de diversos transductores y sensores de medición. Se describen tanto los métodos y medios de medición del autor como otros conocidos en la literatura. Se presta atención a los medios de medición de temperatura en una amplia gama de temperaturas - desde criogénica hasta temperatura ambiente y temperaturas de fusión de algunos materiales sólidos. Se consideran métodos de medición de parámetros mecánicos - deformaciones, presiones, desplazamientos, velocidades de flujo, etc., medición de campos magnéticos por diversos medios, parámetros de gases - humedad, etc., convertidores de energía solar, dispositivos de ionización.

# Capítulo 1. Temperatura. Temperatura. Transductores, medición

Existe una gran variedad de métodos y medios para medir la temperatura. Para crear un sensor de temperatura (termómetro), se puede utilizar cualquier propiedad de las sustancias sólidas, líquidas o gaseosas que dependa de la temperatura. Por ejemplo, estados físicos y químicos, dimensiones, características eléctricas, etc. Al mismo tiempo, los termómetros (sensores) que utilizan un número bastante limitado de propiedades electrofísicas de los materiales y métodos de medición han encontrado una amplia aplicación práctica.

## 1.1. Termómetros mecánicos de contacto

Estos termómetros se basan en la dilatación térmica de las sustancias. Se caracterizan por su bajo coste y su precisión satisfactoria. Se destinan principalmente al uso práctico cotidiano y al trabajo de laboratorio.

En un termómetro de contacto, el elemento sensor puede ser una varilla metálica cuya elongación depende de la temperatura (termómetros dilatométricos):

$$l = l_0 (1 + \alpha t), \quad (1.1)$$

donde  $l_0$  - longitud a  $0^\circ\text{C}$ ,  $\alpha$  - coeficiente de dilatación térmica,  $t$  - temperatura  $^\circ\text{C}$ .

Aún más a menudo se utiliza la diferencia en la expansión térmica de dos metales diferentes - termómetros bimetálicos. Tales termómetros se pueden hacer en tamaños pequeños, fáciles de fabricar, de bajo costo.

Los termómetros de líquido de vidrio son muy utilizados. La mayor parte del líquido se concentra en un depósito volumétrico, que es prácticamente un sensor (elemento sensor). Para el llenado se puede utilizar cualquier líquido, en función de las condiciones de funcionamiento. Lo más frecuente es utilizar mercurio o alcohol. Estos termómetros no son muy precisos, pero son los más comunes en los hogares y laboratorios. En la industria, se están sustituyendo gradualmente por termómetros que permiten automatizar la producción.

Los termómetros mecánicos de contacto tienen una gran desventaja: su información (señal) no puede transmitirse a distancia para su procesamiento. Por eso, en la industria se utilizan termómetros que aprovechan los cambios eléctricos en las propiedades de una sustancia con un cambio de temperatura.

## 1.2. Termómetros basados en el efecto termorresistivo

La resistencia eléctrica de la mayoría de las sustancias cambia significativamente con la temperatura. Esta dependencia se aprovecha para crear termómetros: los termistores. Un termistor es un dispositivo formado por un conductor de corriente cuya resistencia eléctrica depende de la temperatura y al que se conectan cables eléctricos.

La dependencia de la temperatura de la resistencia eléctrica de los metales se debe a la dependencia de la movilidad de los portadores de corriente (electrones), en los semiconductores el papel principal lo desempeña la dependencia de la temperatura de la concentración de portadores de corriente.

El rango de medición de los termómetros está limitado principalmente por las altas temperaturas, que afectan a la linealidad de la característica del sensor, así como a las propiedades mecánicas del material del elemento sensor y de la carcasa.

La dependencia de la temperatura de la resistencia de los metales puede expresarse como:

$$R = R_0 (1 + \gamma t) \quad (1.2),$$

donde  $R_0$  - resistencia a 0 °C,  $\gamma$  - coeficiente de temperatura de la resistencia,  $t$  - temperatura en °C.

Como materiales para el elemento sensible del termómetro termistor se utilizan: platino, níquel, cobre y otros. Los elementos sensibles de los termómetros metálicos son hilos muy finos enrollados en una armadura o en una película depositada sobre un sustrato aislante.

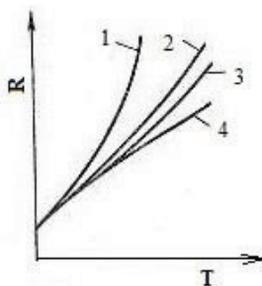


Fig. 1.1. Dependencias características de la resistencia  $R$  de algunos metales con la temperatura  $T$ : 1 - níquel, 2 - tungsteno, 3 - cobre, 4 - platino.

En la Fig. 1.1 se muestran las dependencias típicas de la resistencia de algunos metales con respecto a la temperatura. Indican la posibilidad de obtener un alto grado de linealidad de la relación entre resistencia y temperatura.

### 1.3. Termómetros de resistencia de semiconductores

Son sensores de temperatura (termistores) que utilizan la dependencia de la resistencia eléctrica de un semiconductor con la temperatura. Esta dependencia puede expresarse como:

$$R=R_o \cdot e^{B/T} \quad (1.3),$$

donde  $R_o$  es la resistencia a temperatura  $T$  tendiendo a infinito,  $B$  es el coeficiente que determina la sensibilidad  $t_o$  temperatura.

La dependencia exponencial muestra una fuerte no linealidad de la característica de tal termómetro y ésta es una de las principales desventajas de tal sensor. Por otra parte, estos termómetros son los más sensibles a los cambios de temperatura. A temperaturas de helio líquido su sensibilidad puede alcanzar el 100-200 %/K. Además, la alta resistencia (hasta 1 megaohmio) permite despreocuparse de las interferencias en los puntos de conexión de los cables del circuito eléctrico. Para fabricar estos termómetros se utilizan semiconductores como el silicio, el germanio, el arseniuro de galio, etc., así como óxidos metálicos.

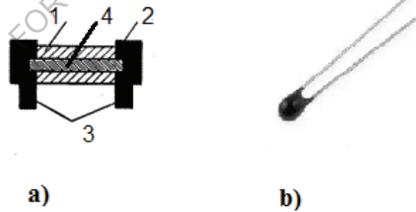


Fig. 1.2. a) - uno de los diseños típicos de termómetro semiconductor - termistor. 1 - vidrio, 2 - acero, 3 - plata, 4 - elemento sensor, b) - muestra de termistor semiconductor en miniatura.

Los termómetros semiconductores pueden ser de varios tipos. Con la ayuda de la tecnología microelectrónica, el elemento sensor del termistor puede hacerse micro-miniatura. La figura 1.2 muestra algunos diseños de termómetros semiconductores.

El uso de termistores semiconductores está muy extendido. Un semiconductor en forma de película sobre un sustrato aislante o en un diseño a granel sirve como conductor de la corriente eléctrica. El tamaño total de los termistores puede ser inferior a 1 mm<sup>3</sup>, la resistencia eléctrica de varios Ohm a 100 kOhm, las corrientes de alimentación, por regla general, de 10 - 100 μA, la sensibilidad del 3 %/K en la zona de temperatura ambiente al 100 %/K en la zona de temperaturas criogénicas, la inercia puede alcanzar varias decenas de milisegundos y menos.

Los termistores semiconductores se utilizan ampliamente para medir y controlar la temperatura en un amplio rango, pero, por regla general, no por encima de 200 °C, ya que a alta temperatura llega la conductividad intrínseca y la dependencia de la temperatura de la resistencia cae bruscamente, se vuelve no monotónica, no estable. En un amplio rango de temperaturas, la dependencia de la temperatura de la resistencia del semiconductor  $R(T)$  tiene un carácter complejo y depende del tipo de impureza de dopaje y del nivel de dopaje. Por lo tanto, es imposible expresar la dependencia de  $R(T)$  mediante una fórmula sencilla que permita realizar la calibración con gran precisión. Por regla general, todo el intervalo de temperatura se divide en secciones separadas, en las que la dependencia  $R(T)$  se describe mediante su fórmula de interpolación.

El grupo de transductores semiconductores sensibles a la temperatura que se utilizan en los termómetros suele denominarse termistores. Tienen una característica muy poco lineal, pero pueden utilizarse eficazmente en sistemas para medir la temperatura.

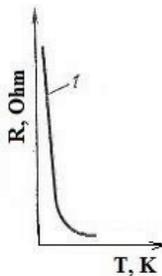


Fig. 1.3. Dependencia de la temperatura de la resistencia de un termistor típico.

En la fig. 1.3 se muestra una característica típica de un termistor. La comparación de las características de los transductores resistivos metálicos con las de un termistor permite concluir que este último:

- 1) son más pronunciadas, es decir, su coeficiente de resistencia a la temperatura es significativamente mayor que el de los metales, al menos en la parte principal de la curva;
- 2) disminuyen al aumentar la temperatura, es decir, su coeficiente de resistencia a la temperatura es negativo.

Los termistores con un coeficiente de resistencia de temperatura negativo son más conocidos como termistores NTC. Cabe señalar que también existen termistores con un coeficiente de resistencia positivo, que se denominan termistores PTC. Estos últimos se utilizan más a menudo no para medir la temperatura sino, por ejemplo, para evitar el sobrecalentamiento.

Los termistores tienen un tamaño mucho menor que los transductores resistivos metálicos y, por tanto, reaccionan más rápidamente a los cambios de temperatura. Por otra parte, el pequeño tamaño de los termistores significa que se necesita una corriente pequeña para el autocalentamiento. En consecuencia, cabe suponer que la corriente afecta a la precisión de la medición.

La metodología para calibrar un termistor semiconductor puede examinarse mediante el siguiente ejemplo. Por ejemplo, en la región de temperatura ambiente, la dependencia de  $R(T)$  para los termistores semiconductores puede expresarse mediante la fórmula (1.3).

Para la calibración de termistores (obtención de tablas de dependencia de la resistencia eléctrica con la temperatura), transformamos la fórmula (1.3):

$$\ln R = \ln R_0 + B(1/T) \quad (1.4),$$

La expresión obtenida (1.4) es la ecuación de una recta en coordenadas  $1/T$  y  $\ln R$ .  $\ln R_0$  es el valor del logaritmo de la resistencia cuando  $T$  tiende a infinito. El coeficiente  $B$  es igual a la tangente del ángulo  $\alpha$  de la pendiente de la recta al eje  $1/T$ . Si a dos temperaturas fijas  $T_1$  y  $T_2$  medimos las resistencias del termistor  $R_1$  y  $R_2$  respectivamente, podemos trazar la dependencia de  $\ln R(1/T)$  en los dos puntos:

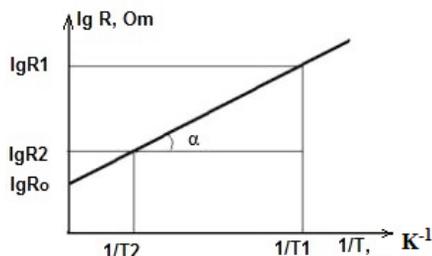


Fig. 1.4 Dependencia de la temperatura de la resistencia  $R$  del termistor semiconductor

Utilizando la fórmula (1.4) y el gráfico obtenido es posible encontrar para cualquier valor de  $R$  del intervalo de  $R_1$  a  $R_2$  el valor de temperatura correspondiente - para hacer tablas de calibración.

Para realizar mediciones precisas de la temperatura, la calibración de los termistores se lleva a cabo en laboratorios especializados con el uso de mediciones apropiadas de alta precisión y fórmulas de aproximación para el intervalo de temperatura requerido, tratamiento informático de datos, etc. En un amplio rango de temperaturas, la dependencia de la temperatura de la resistencia de los termistores semiconductores tiene un carácter bastante complejo.

Los termómetros de resistencia se utilizan en dispositivos de medición, control y regulación automática de la temperatura. En ellos, además del elemento sensor, hay una fuente de corriente y un circuito de medición. El circuito de medida, por ejemplo, de un puente de corriente continua equilibrado se muestra en la fig. 1.5.

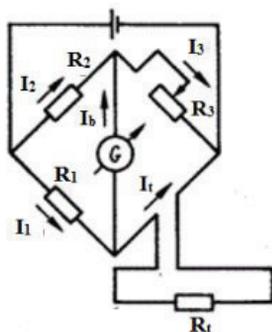


Fig. 1.5. Diagrama esquemático del puente de CC equilibrado

Moviendo la corredera del reóstato  $R_3$ , llevar el puente al estado de equilibrio, en el que el galvanómetro  $G$  fija la ausencia de corriente en la diagonal del puente ( $I_t = 0$ ). Así, el valor de  $R_3$  es proporcional a la resistencia medida  $R_t$ , que depende de la temperatura. El equilibrado del puente puede realizarse automáticamente. Para ello, por ejemplo, la resistencia de la resistencia cambia bajo la influencia de la flecha cero del galvanómetro  $G$ .

Además de los puentes de medición equilibrados, también se utilizan puentes desequilibrados, que se caracterizan por una mayor fiabilidad pero una menor precisión debido a la influencia de las fluctuaciones de la tensión de la fuente.

#### **1.4. Ejemplos de algunos termistores industriales**

Por ejemplo, podemos considerar los conocidos termistores industriales de las series MMT y KMT. Los tipos de termistores MMT-1 y KMT-1 representan una varilla semiconductor recubierta de pintura esmaltada, con tapas de contacto y cables. Los cables de estos termistores sólo pueden utilizarse en espacios secos. Los termistores de los tipos MMT-4 y KMT-4 están montados en una caja metálica y sellados. Se pueden utilizar en cualquier humedad y en cualquier ambiente que no sea agresivo para la carcasa. El sellado se realiza mediante vidrio y estaño. El núcleo del termistor de tipo MMT-4 está envuelto con una lámina metálica. El disipador de corriente está hecho de alambre de níquel. Estos termistores se fabrican para valores nominales de resistencia de 1 a 200 kOhm (a 20°C) y pueden utilizarse para el funcionamiento en la gama de temperaturas de -100 a 129°C.

Los metales puros también se utilizan como materiales para termómetros de resistencia: por ejemplo, el platino en forma de alambre fino con un diámetro de 0,05-0,07 mm para medir temperaturas de hasta 630°C. Cobre, níquel o hierro para medir temperaturas de 100-150°C. Se utilizan en forma de alambre con un diámetro de 0,1 mm o en forma de películas de los respectivos materiales.

Existen las siguientes formas de bobinar el material de los termómetros de resistencia:

- en una placa de cristal
- en un tubo de vidrio
- en una cruz de mica o porcelana.

Los más utilizados en la fabricación de elementos metálicos sensibles de los termistores son el platino, el níquel y el cobre.

### 1.5. Termómetros de resistencia de platino

Estos transductores utilizan el cambio de resistencia de un hilo o una película de platino para determinar la temperatura. También se denominan detectores de temperatura resistivos. Esto no significa que no se puedan utilizar otros metales para medir la temperatura, pero los elementos detectores de platino son los más utilizados en este tipo de transductores.

La sensibilidad de estos detectores de temperatura resistivos es bastante baja y la respuesta dinámica es bastante lenta (debido al diseño del dispositivo). También son bastante susceptibles a la destrucción por vibraciones y golpes.

Existen dos tipos básicos de transductores resistivos de hilo de platino: la sonda sumergida y el elemento sensor montado en superficie. Los elementos de alambre suelen montarse sobre una base cerámica con una tensión mínima y suelen estar recubiertos de un material protector para evitar que queden expuestos al entorno.

El diseño de una sonda de hilo de platino típica se muestra en la fig. 1.6(a), y el elemento sensor de temperatura montado en superficie en la fig. 1.6(b). Los transductores con elementos sensores de película (fig. 1.6,c), que utilizan una lámina metálica sobre un sustrato aislante, no son tan comunes como las sondas de alambre, aunque su uso está en constante expansión debido a su pequeño tamaño, respuesta dinámica mejorada, mayor sensibilidad y coste relativamente bajo.

Los transductores resistivos de platino suelen incluirse en uno de los brazos de un puente de Wheatstone, mediante el cual se garantiza una gran precisión de medición. Por supuesto, la baja resistencia del dispositivo (unos 100 ohmios) crea problemas al conmutarlo con equipos de medición, ya que la resistencia de los cables que conectan el transductor al circuito de medición puede ser proporcional a la resistencia del transductor.

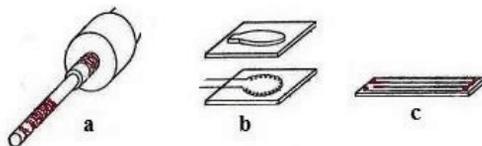


Fig. 1.6. Diseños de transductores resistivos de alambre de platino: a - sonda de alambre, b - transductor de alambre montado en la superficie del elemento sensor, c - transductor de película fina montado en la superficie del elemento sensor.

### 1.6. Calentamiento propio de termómetros de resistencia

El calentamiento intrínseco de los elementos sensores de resistencia se entiende como un aumento de temperatura  $\Delta T$  sobre la temperatura ambiente medida debido a la liberación de calor joule en ellos durante el paso de la corriente de medida. Este exceso de temperatura es un error de medición adicional, que depende no sólo de la corriente, sino principalmente de la cantidad de calor que puede disiparse en el ambiente.

La transferencia de calor viene determinada por el material y las dimensiones del elemento sensor, así como por el estado y las propiedades termodinámicas del entorno. Los fabricantes de elementos sensores de termómetros suelen indicar para cada tipo de elemento la corriente y la caída de tensión máximas admisibles a través de él en forma de diagrama, por ejemplo (fig. 1.7). El elemento sensor puede utilizarse sólo en la rama ascendente izquierda de la característica, de modo que en determinadas condiciones límite no se produzcan interferencias debidas a su calentamiento por la corriente de medición. Por ejemplo, un elemento sensor de platino (Pt 100) sobre un armazón cerámico en un tubo metálico se calienta aproximadamente 0,01-0,02 K en agua en calma y 0,1 K en aire en calma cuando pasa por él una corriente de 3 mA. La corriente máxima no debe superar los 10 mA. Con termistores NTC pequeños, la corriente máxima admisible puede ser de sólo unos pocos microamperios.

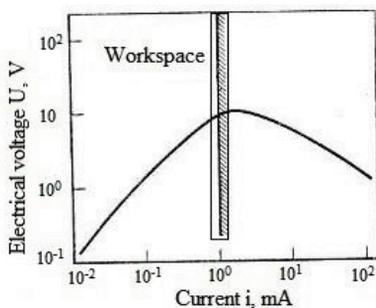


Fig. 1.7. Diagrama de ejemplo de los valores admisibles de la corriente que circula por el termistor y de la caída de tensión en él.

### **1.7. Termómetros de resistencia de baja temperatura (criogénicos) - termistores. Medición de la temperatura en la región criogénica**

Para medir la temperatura en la región criogénica se utilizan sensores semiconductores y metálicos: termómetros de resistencia (termistores) y termopares con características adecuadas.

Muy a menudo, las mediciones a bajas temperaturas deben realizarse en presencia de campos magnéticos bastante intensos. Por lo tanto, los termómetros (sensores) de baja temperatura, además de una buena sensibilidad a la temperatura y estabilidad de las características, deben tener una sensibilidad débil a la influencia de los campos magnéticos. Organizaciones tan conocidas como VNIIFTRI (Rusia), LakeShore (EE.UU.), Instituto de Física de Semiconductores (Ucrania), etc. se dedican al desarrollo, la investigación y la fabricación de termistores criogénicos (así como otros sensores para el rango criogénico).

Entre los termómetros de resistencia metálica conocidos podemos mencionar los termistores de platino, que se caracterizan por unas elevadas características metrológicas. Sin embargo, por ejemplo, el campo magnético  $B=2$  Tesla a una temperatura de 12 K provoca el crecimiento de la resistencia equivalente a 5 K. Se considera posible tener en cuenta la influencia del campo magnético sólo a temperaturas superiores a las del nitrógeno líquido (77 K).

Los termistores de rodio-hierro son menos sensibles a los campos magnéticos. A una temperatura de 4,2 K, un campo de 3 Tesla provoca un aumento de la resistencia del 3% (equivalente a unos 0,5 K).

De los termistores semiconductores, los termistores de germanio son los más utilizados. Tienen buena estabilidad a largo plazo, alta sensibilidad ( $\cong 100$  %/K a 4,2 K) pueden proporcionar una precisión de aproximadamente 0,01 K. Los termómetros de resistencia de germanio están hechos de germanio a granel, germanio disperso, películas de germanio sobre sustratos aislantes. Se conocen termistores de germanio que, debido a su bajo valor de magnetorresistencia y en campos magnéticos de hasta 6 Tesla, proporcionan una precisión del orden de 0,01 K.

Además del germanio, también se utilizan otros materiales semiconductores, como el arseniuro de galio, para los termistores criogénicos. Sin embargo, se considera que las características metrológicas

de tales termómetros, por regla general, son peores que las de los termómetros de germanio.

También hay sensores de carbono - termómetros de resistencia, que se utilizan a menudo en la medición de temperaturas en la región criogénica en presencia de campos magnéticos. Estos son los termómetros Allen-Bradley, Spear, Mitsushita, TSU (fabricante VNIIFTRI), así como TVO. En la literatura se señala que, por ejemplo, los termómetros TCU proporcionan una reproducibilidad de  $\Delta T/T$  con un error no superior a 0,0002. En un campo magnético de 6 Tesla a una temperatura de 4,2 K, su error es de 0,35 K. Los termómetros TBO en el campo de 6 Tesla proporcionan una precisión no peor de 0,12 K.

### **1.8. Termistores criogénicos basados en germanio disperso**

Para mejorar las características técnicas de los dispositivos microelectrónicos semiconductores y crear sus variedades, se utilizan tanto nuevas soluciones de diseño con materiales conocidos como nuevas tecnologías de obtención de materiales con propiedades electrofísicas prometedoras. A la hora de crear termómetros, cuyo funcionamiento se basa en el efecto termoresistivo, es de vital importancia la estabilidad de la dependencia de la temperatura de la resistencia eléctrica del material utilizado y el diseño del convertidor térmico, la sensibilidad suficiente, el error mínimo de la influencia de influencias externas extrañas. La inestabilidad de los termistores semiconductores conocidos comienza a aparecer especialmente a temperaturas criogénicas.

A temperaturas inferiores a 20 K, la falta de repetibilidad hace que muchos termómetros de resistencia no sean adecuados para mediciones de precisión. La práctica demuestra que estos inconvenientes son menos inherentes a los termómetros de germanio. Sin embargo, el germanio puro no se utiliza en termometría porque a bajas temperaturas tiene una resistencia muy alta y una sensibilidad baja. A menudo, las mediciones deben realizarse en condiciones de diversas influencias externas (presencia de campos magnéticos, etc.) que, al afectar a la resistencia del germanio puro, pueden dar lugar a errores importantes. En la actualidad, para obtener propiedades electrofísicas adecuadas del germanio a granel, se utilizan diversos métodos de dopaje bastante caros y laboriosos. También se utiliza el germanio en forma de película. En algunos trabajos se han investigado termistores criogénicos basados en películas de germanio sobre arseniuro de galio

semiaislante. A 4,2 K pueden tener una sensibilidad de alrededor del 20 %/K, algunos son resistentes a la irradiación de neutrones a 77 K a dosis del orden de  $10^{15} \text{ cm}^{-2}$ .

Se conocen estudios de muestras experimentales de termistores basados en germanio disperso a granel obtenido por prensado mecánico a diferentes temperaturas y presiones de polvo finamente disperso de germanio monocristalino. El objetivo del estudio era crear termistores para el intervalo de temperaturas de 4,2-300 K resistentes a influencias externas extrañas. Se estudió la dependencia de la temperatura de la resistencia eléctrica en el rango de temperaturas mencionado, la magnetorresistencia a  $T=4,2 \text{ K}$  y el efecto de la irradiación de neutrones sobre la resistencia eléctrica a temperatura ambiente.

El germanio disperso se obtuvo a partir de polvo de germanio monocristalino de conductividad tipo p con una resistividad de 15 Ohm.cm. Las muestras se produjeron por exposición a altas presiones y temperaturas. Se comprobó que la presión y la temperatura a las que se prensó el polvo determinan las propiedades electrofísicas del germanio disperso obtenido. Para la creación de termorresistencias para temperaturas criogénicas se utilizaron las muestras más adecuadas. El germanio disperso obtenido tenía conductividad *de tipo p*, resistencia específica a temperatura ambiente  $\rho = (1-4) \text{ Ohm.cm}$ . Cabe suponer que los niveles de aceptor se deben a las peculiaridades de la estructura cristalina del material obtenido. Se sabe que el tipo de conductividad puede estar determinado por varios tipos de defectos estructurales. Las peculiaridades de la estructura del germanio disperso (en polvo) también pueden explicar el aumento de la resistencia a la radiación de dicho material. Las muestras experimentales de termistores tenían un elemento sensible con unas dimensiones de aproximadamente  $1 \text{ mm}^3$  (fig. 1.8).

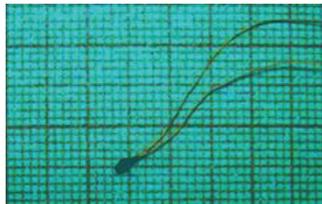


Fig. 1.8. Muestra experimental de un termistor basado en germanio disperso.

Los resultados de las mediciones de la dependencia de la temperatura de la resistencia eléctrica se presentan en la fig. 1.9. Aquí se muestra la dependencia de la temperatura de la resistencia del germanio monocristalino a granel de conductividad tipo p (curva 1) y los termistores experimentales de germanio disperso (curvas 2,3).

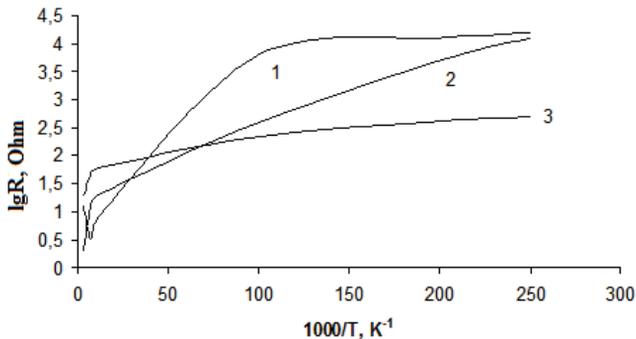


Fig. 1.9. Dependencia de la temperatura de la resistencia eléctrica: 1 - germanio monocristalino inicial a granel, 2- termistor a base de germanio disperso tipo A, 3- termistor a base de germanio disperso tipo B. Los tipos A y B difieren principalmente en el valor de temperatura y presión en la obtención del germanio disperso.

La dependencia de temperatura de la resistencia eléctrica de los termistores de germanio disperso (en polvo) tipo A (curva 2) a bajas temperaturas es más pronunciada que la dependencia del germanio inicial monocristalino y en toda la gama de temperaturas tiene un carácter más monótono. El carácter suave de la dependencia de temperatura de la resistencia eléctrica permite aproximarla con fórmulas matemáticas de forma bastante sencilla y con buena precisión. Para una muestra del tipo A, por ejemplo, incluso para el rango de temperaturas 77-300 K utilizando un polinomio de la forma:

$$\ln R = \sum_{i=0}^n A_i (\ln T) \quad (1.5),$$

(donde  $A_i$  - coeficientes constantes determinados por el método de mínimos cuadrados,  $n$  - determinado a partir de la condición del menor error de aproximación) ya para  $n=3$  obtenemos la dependencia:

$$\ln R = 15,1077031 + 1,6552736 * \ln T - 1,7901811 * (\ln T)^2 + 0,193233 * (\ln T)^3$$

con un coeficiente de correlación  $r^2 = 0,9995$  y un error de aproximadamente 0,1 K en la región de 77K.

La sensibilidad de los termistores de tipo A en la región de temperatura del helio líquido (4,2 K) alcanza valores superiores al 100 %/K. La sensibilidad de los termistores fabricados con material de tipo B es de aproximadamente 20 %/K y a 4,2 K tienen una resistencia eléctrica que, por regla general, no supera los 500 Ohm.

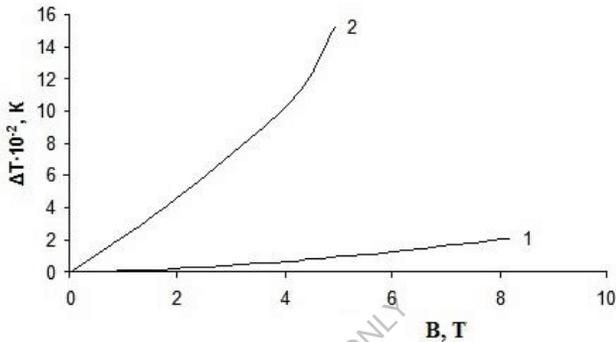


Fig. 1.10. Dependencia del error de medición de la temperatura  $\Delta T$  en la región de 4,2 K del valor del campo magnético  $B$  para termistores del tipo A (curva 1) y del tipo B (curva 2).

La Fig. 1.10 muestra la dependencia del error  $\Delta T$  de la medición de la temperatura en la región del helio líquido en presencia de campos magnéticos con la magnitud del campo magnético. El error de los termistores fabricados con material de tipo A (curva 1) en el campo de 8 T es de aproximadamente 0,02 K, y el de los termistores de tipo B en el campo de 4 T alcanza 0,15 K. Cabe señalar que la magnetorresistencia  $\Delta R/R$  (donde  $\Delta R$  es el cambio de resistencia bajo la influencia del campo magnético,  $R$  es la resistencia inicial) en ambos tipos de termistores es aproximadamente la misma. Por ejemplo, en un campo de 4 T, la magnetorresistencia de ambos está dentro de (2,5 - 3,0) %. Pero la precisión de la medición en campos magnéticos de los termistores de tipo A es mayor debido a su mayor sensibilidad a la temperatura.

Para eliminar los errores inducidos por el campo magnético, se ha empleado una configuración especial. El esquema se presenta en la fig. 1.11. Los cables de medición se fijan al cabezal sensor de forma que los contactos eléctricos estén a la distancia

$$l = aR_H / \rho M, (1.6)$$

donde  $a$  es la anchura de la placa;  $R_H$ , es la constante de Hall;  $\rho$  es la resistividad;  $M = \Delta\rho/\rho B$  es la magnetorresistencia en el campo  $B$ .

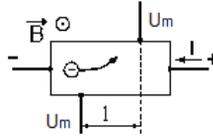


Fig. 1.11. Sensor de temperatura de campo compensado:  $U_m$  - tensión medida;  $l$  - distancia entre los contactos.

Como resultado, las tensiones generadas en los contactos debido al efecto Hall y a la magnetorresistencia se compensan mutuamente para minimizar el efecto de campo en la precisión de la medición.

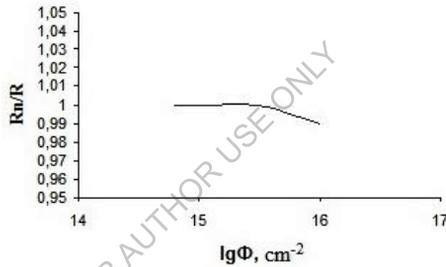


Fig. 1.12. Dependencia del cambio relativo de la resistencia eléctrica de un termistor (tipo A) después de la irradiación de neutrones con el valor de los flujos de neutrones  $\Phi$ .  $R$  - resistencia inicial,  $R_n$  - resistencia después de la irradiación.

Se ha estudiado la influencia de la irradiación de radiación en las características de los termistores basados en germanio disperso. La Fig.1.12 muestra la dependencia de la resistencia de los termistores de tipo A de la exposición a la radiación. El efecto de la radiación sobre el valor de la resistencia se ha investigado hasta ahora de forma evaluativa y sólo a temperatura ambiente. Las características se midieron a una temperatura de 300 K antes de la irradiación y después de la irradiación con flujos de neutrones  $\Phi$  de  $8 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  a  $1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ . La temperatura durante las mediciones se estabilizó con una precisión de 0,1 K. La energía del neutrón fue de 1 MeV y la intensidad del flujo de  $(2-4) \cdot 10^8 \text{ fl/s}$ . La figura muestra que la resistencia eléctrica de los termistores empieza a cambiar

notablemente al acercarse a niveles de irradiación de neutrones de  $10 \text{ cm}^{-2}$ .

### 1.9. Termiodiodos y termotransistores

Los termiodiodos y termotransistores se utilizan en sensores de temperatura que funcionan en el rango de  $-80$  a  $+150$  °C. El límite superior del rango de temperatura está limitado por la rotura térmica de la unión  $p-n$  y para algunos tipos de sensores de germanio alcanza los  $200$  °C, y para los sensores de silicio hasta los  $500$  °C. El límite inferior del rango de temperatura de los termiodiodos y termotransistores está determinado por la disminución de la concentración de los portadores principales y puede alcanzar para los sensores de germanio  $-(240 - 260)$  °C, para los sensores de silicio  $-200$  °C.

Las principales ventajas de los termiodiodos y los termotransistores son sus reducidas dimensiones, su intercambiabilidad y, lo que es más importante, su bajo coste, lo que permite utilizarlos en sensores de un solo uso.

La relación entre la corriente  $I$  que atraviesa una unión  $p-n$  (diodo o transistor) y la caída de tensión  $U$  a través de ella viene definida por una determinada ecuación. Esta ecuación define la corriente a través de la unión, tanto en polarización directa como inversa de la unión. A partir de las ecuaciones y fórmulas conocidas podemos ver que tanto la corriente directa como la inversa de una unión  $p-n$  son funciones de la temperatura. Las uniones  $p-n$  abiertas se utilizan sobre todo para medir la temperatura. La teoría muestra que la caída de tensión a través de una unión  $p-n$  abierta a una corriente  $I$  a través de la unión viene determinada por una fórmula aproximada, de la que se deduce que la caída de tensión depende linealmente de la temperatura y disminuye al aumentar la temperatura. La sensibilidad a la temperatura de la unión  $p-n$  en términos de tensión es  $\approx 1,5 \text{ mV/K}$ . Comparando los coeficientes de sensibilidad a la temperatura para la caída de tensión a través de la unión  $p-n$  y el termo-EMF de los termopares que operan en el mismo rango de temperatura (por ejemplo, cromel - copel), podemos decir que la sensibilidad de la unión  $p-n$  es unas 100 veces mayor que la sensibilidad de los termopares.

### 1.10. Transductores termoeléctricos (termopares). Principio de funcionamiento, esquemas de conexión y utilización del termopar.

El principio de funcionamiento de un termopar se basa en el efecto termoeléctrico, que consiste en que en un circuito cerrado formado por dos conductores distintos se produce una FEM térmica (tensión) si los puntos de unión de los conductores tienen temperaturas diferentes. Si tomamos un circuito cerrado (ver fig. 1.13) formado por conductores disímiles (termoelectrodos), entonces en sus uniones aparecerán los CEM térmicos  $E(t)$  y  $E(t_0)$ , que dependen de las temperaturas de estas uniones  $t$  y  $t_0$ . Dado que los termoelectrodos considerados están incluidos en una contramedida, el CEM termoeléctrico resultante que actúa en el circuito se definirá como  $E(t) - E(t_0)$ .

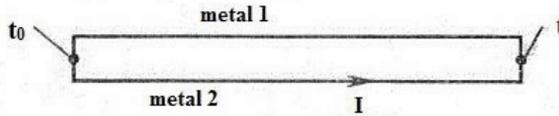


Fig. 1.13. Esquema de un circuito cerrado de dos conductores

En el caso de igual temperatura de ambas uniones, el CEM térmico resultante será igual a cero. En la práctica, una de las uniones del termopar se sumerge en un termostato (por regla general, hielo fundido) y la diferencia de temperatura y la temperatura de la otra unión se determinan en relación con ella. La unión que está sumergida en el medio controlado (investigado) se denomina extremo de trabajo del termopar, y la segunda unión (en el termostato) se denomina extremo libre.

En cualquier par de conductores homogéneos, la magnitud del CEM termoeléctrico resultante no depende de la distribución de la temperatura a lo largo de los conductores, sino que depende únicamente de la naturaleza de los conductores y de la temperatura de la unión. Si se desconecta un circuito termoeléctrico en cualquier lugar y se incluyen en él conductores disímiles, entonces, siempre que todos los puntos de unión resultantes estén a la misma temperatura, el CEM térmico resultante en el circuito no cambiará. Este fenómeno se utiliza para medir el CEM térmico de un termopar. El CEM resultante en los termopares es pequeño: es inferior a 8 mV por cada 100 °C y, por regla general, no supera los 70 mV en valor absoluto.

Los termopares pueden utilizarse para medir temperaturas comprendidas entre -270 y 2200 °C. Para medir temperaturas de hasta 1100 °C, se utilizan termopares fabricados con metales comunes; para medir

temperaturas entre 1100 y 1600 °C, se utilizan termopares fabricados con metales nobles y aleaciones del grupo del platino. Para medir temperaturas aún más altas, se utilizan termopares fabricados con aleaciones resistentes al calor a base de tungsteno.

En la actualidad, los termopares más utilizados son los de platino, platino-rodio, cromel y alumel.

Cuando se mide la temperatura en un rango amplio, es necesario tener en cuenta la no linealidad de la función de conversión del termopar. Por ejemplo, la función de conversión de los termopares de cobre-constantano para el rango de temperatura de -200 a 300 °C con un error de aproximadamente  $\pm 2 \mu\text{V}$  se describe mediante la fórmula

$$E = At^2 + Bt + C \quad (1.7),$$

donde  $A$ ,  $B$  y  $C$  son constantes que se determinan midiendo la FEM térmica a tres temperaturas,  $t$  es la temperatura de trabajo de la unión en °C.

La constante de tiempo (inercia) de los convertidores termoelectrónicos depende del diseño del termopar y de la calidad del contacto térmico entre la unión de trabajo del termopar y el objeto estudiado. En el caso de los termopares industriales, la constante de tiempo es de varios minutos. Sin embargo, también existen termopares de baja inercia, cuya constante de tiempo se sitúa entre 5 y 20 segundos e incluso menos.

El instrumento de medida se conecta al circuito del termopar por el extremo libre del termopar y uno de los termoelectrodos.

Como ya se ha indicado, el extremo libre del termopar debe estar a una temperatura constante cuando se mide la temperatura. Si la longitud del propio termopar es insuficiente, para llevar este extremo a una zona de temperatura constante se utilizan hilos formados por dos núcleos de materiales (metales) que tienen las mismas propiedades termoelectrónicas que los electrodos del termómetro.

En el caso de los termopares fabricados con metales comunes, los alambres de extensión suelen estar fabricados con los mismos materiales que los termoelectrodos principales. En el caso de los termopares fabricados con metales nobles, los alambres de extensión se fabrican con otros materiales (no caros) que desarrollan el mismo EMF térmico que los electrodos del termopar en el rango de temperatura de 0 a 150 °C. Por ejemplo, para el termopar de platino - platino-rodio, los termoelectrodos de extensión están hechos de cobre y de una aleación especial. Estos metales forman un termopar idéntico al termopar de platino - platino - rodio en el rango de 0 -

150 °C. Para el termopar de cromo-aluminio los termoelectrodos de extensión están hechos de cobre y constantán, y para el termopar de cromo-copel los termoelectrodos de extensión pueden ser los principales termoelectrodos hechos en forma de alambres flexibles. Si los termoelectrodos de extensión se conectan incorrectamente, puede producirse un error significativo.

En condiciones de laboratorio, la temperatura del extremo libre del termopar se mantiene a 0 °C colocándolo en un recipiente Dewar lleno de hielo picado y agua. En condiciones industriales, la temperatura del extremo libre del termopar suele ser diferente de 0 °C y suele ser igual a la temperatura ambiente (temperatura ambiente). Dado que los termopares se calibran a una temperatura del extremo libre de 0 °C y que las tablas de calibración se dan relativas a 0 °C, esta diferencia puede ser una fuente de error importante. Para reducir este error, por regla general, introduzca una corrección en las lecturas del termómetro (termopar). Al seleccionar la corrección, se tienen en cuenta tanto la temperatura de los extremos libres del termopar como el valor de la temperatura medida (esto se debe a que la función de conversión del termopar no es lineal); esto dificulta la corrección precisa del error.

Para eliminar el error, se utiliza mucho la corrección automática de la temperatura de los extremos libres del termopar. Para ello, en el circuito del termopar y del milivoltímetro se incluye un puente, uno de cuyos brazos es un termistor de cobre, y los otros brazos están formados por termistores de manganina. A la temperatura de los extremos libres del termopar, igual a 0 °C, el puente está en equilibrio; cuando la temperatura de los extremos libres del termopar se desvía de 0 °C, la tensión a la salida del puente no es igual a cero y se añade a la FEM térmica del termopar, efectuando así una corrección en las lecturas del aparato (el valor de la corrección puede ajustarse mediante una resistencia especial). Debido a la no linealidad de la función de conversión del termopar, no se puede lograr una compensación total del error, pero éste se reduce significativamente.

En función de la precisión requerida en la práctica al utilizar un termopar, lo más frecuente es utilizar los siguientes esquemas de conexión (véase la fig. 1.14). Por ejemplo, se toma el termopar cobre (M) - constantán (K):

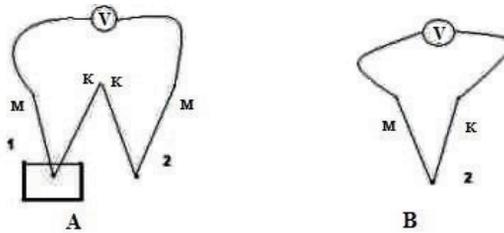


Fig. 1.14. Esquemas de conexión de termopares.

A) circuito diferencial. B) en este esquema, la temperatura del extremo libre puede considerarse igual a la temperatura ambiente (temperatura en los puntos de conexión del dispositivo de medición al termopar).

En el esquema de conexión diferencial (fig. 1.14.A), el extremo libre 1 está a temperatura constante (hielo en fusión, 0°C). El EMF térmico se forma debido a la diferencia de temperatura entre la unión de trabajo 2 y libre 1. En el esquema de conexión mostrado en la fig. 1.14.B, la temperatura del extremo libre puede considerarse igual a la temperatura ambiente (temperatura en los puntos de conexión del dispositivo de medición al termopar) y la temperatura en la zona de la unión de trabajo 2 se calcula (corrige) en relación con ella. En este caso, el EMF térmico en el termopar se forma debido a la diferencia de temperatura entre la unión de trabajo y la temperatura ambiente.

Para medir el CEM térmico se utilizan voltímetros con entrada de alta impedancia u otro tipo de galvanómetros. Para determinar la temperatura se utilizan tablas de calibración (véase el APÉNDICE), que se construyen para la condición de que el extremo libre del termopar esté a cero grados centígrados. Algunas tablas de calibración, por ejemplo, para termopares de cromel-alumel, etc., se presentan en las tablas al final de la monografía.

### 1.11. Fabricación de termopares

Para mediciones e investigaciones en condiciones de laboratorio (domésticas) se pueden fabricar termopares de forma independiente. Para ello se utilizan alambres producidos industrialmente a partir de materiales adecuados para la fabricación de termopares. El diámetro del hilo es importante cuando se miden procesos térmicos en volúmenes pequeños (investigación de objetos pequeños). Cuanto menor sea el diámetro del alambre del termopar, menor será el error en la determinación de la temperatura y en la determinación de los parámetros de los procesos

térmicos, ya que se reduce la influencia del propio termopar en el intercambio de calor. El material del termopar se selecciona en función del rango previsto de temperaturas de funcionamiento, la sensibilidad requerida, la presencia de equipos secundarios, etc. Los termopares más utilizados son los de cromo-aluminio, cobre-constantano, etc.

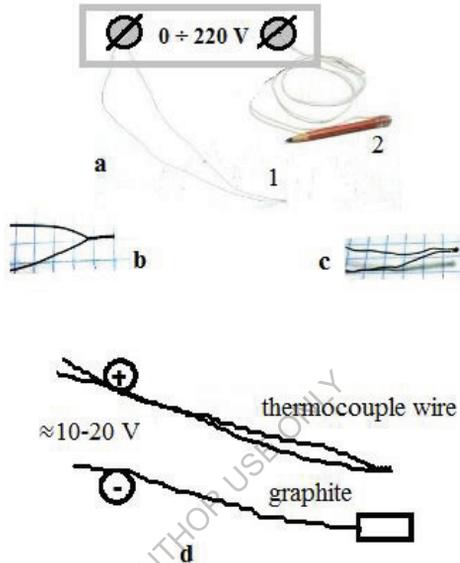


Fig. 1.15. Soldadura de termopares: a - uso de transformador de laboratorio, 1 - hilos de termopar conectados, 2 - grafito (lápiz), b - hilos preconectados, c - conexión soldada, d - esquema general de conexión durante la soldadura.

La fabricación de un termopar consiste en crear una conexión fuerte (soldadura, fig. 1.15) de dos materiales (hilos). Para ello, se puede utilizar una fuente de tensión de potencia suficiente (por ejemplo, LATR - autotransformador de laboratorio (a), batería de automóvil). A un polo de la fuente de tensión se conecta un termopar (ambos extremos libres) - fig. 1.15.a (1), d con hilos preconectados mecánicamente - fig. 1.15.b, y al otro polo se conecta una mina conectada a un trozo de grafito (por ejemplo, un lápiz fig. 1.15.a (2)).

Cuando los extremos conectados del termopar tocan el grafito, se genera un arco eléctrico de potencia suficiente y los hilos del termopar se sueldan. La tensión necesaria para la soldadura se selecciona experimentalmente, empezando con tensiones pequeñas de 3-5 V.

La tensión óptima para soldar depende del material del termopar, el diámetro, la longitud y, por regla general, no supera los 30-40 V. Al trabajar, es necesario garantizar el cumplimiento de las precauciones de seguridad: no utilizar tensiones demasiado altas, no tocar partes descubiertas del circuito eléctrico. Para mayor comodidad, se puede cubrir (aislar) una pequeña sección de los cables del termopar con cinta aislante, tubo cerámico, etc.

También se puede obtener una conexión suficientemente buena calentando los hilos del termopar mediante una descarga de arco encendida entre ellos y una solución acuosa fuerte de sal de mesa.

### 1.12. Graduación del termopar

La graduación de un termopar consiste en establecer la dependencia de la fuerza termoelectromotriz de la diferencia de temperatura entre los hilos de unión del termopar. Esto se hace, por regla general, para no utilizar en el futuro tablas de calibración estándar, etc. La graduación se puede hacer, por ejemplo, de la siguiente manera.

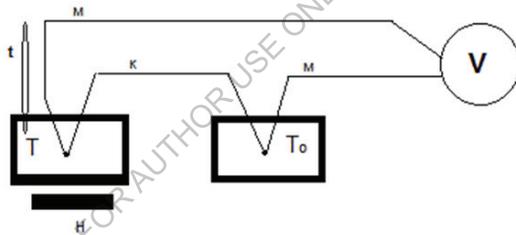


Fig. 1.16. Esquema de conexiones en la calibración del termopar

En la fig. 1.16 se muestra un montaje experimental sencillo, en el que queda clara la esencia de la técnica de graduación. Una unión (de trabajo) del termopar (por ejemplo, cobre (m) - constantan (k)) se sumerge en un recipiente con aceite (con temperatura  $T$ ), la otra libre - en un recipiente con hielo  $T_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Dado que las tablas de calibración en la literatura se dan relativas a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , es mejor atenerse a esta condición, porque en el futuro será fácil comparar los resultados experimentales obtenidos con los tabulares. Además, la fusión del hielo permite fijar de forma sencilla y precisa una de las temperaturas con respecto a la cual se realiza la calibración y, posteriormente, las mediciones con este termopar. Un recipiente con aceite se calienta mediante un calentador eléctrico H, y la temperatura  $T$  se mide con un termómetro  $t$  de la precisión requerida. La FEM térmica resultante

del calentamiento de la unión del termopar se mide con un potenciómetro de corriente continua V. Haga una tabla o un gráfico de la dependencia de la FEM de la temperatura  $T$ .

Si no se requiere una gran precisión de graduación y medición, es posible graduar con respecto a la temperatura ambiente. En este caso, la unión libre puede colocarse en aceite a temperatura ambiente ( $T_0$  unos 20 °C).

### 1.13. Aleaciones para termopares

Para la fabricación de termopares se utilizan principalmente aleaciones basadas en metales, aunque existen materiales con valores de emf térmica muy superiores a la emf térmica de los metales. A este tipo de materiales se pueden referir los semiconductores. Sin embargo, es muy difícil fabricar termopares a partir de semiconductores y debido a sus características técnicas y de diseño tales termopares no se utilizan ampliamente.

Las aleaciones más utilizadas para los termopares son:

- 1) copel (56% Cu y 44% Ni);
- 2) alumel (95% Ni, el resto - Al, Si y Mn);
- 3) cromel (90% Ni y 10% Cu);
- 4) platino-rodio (90% Pt y 10% Rh).

La Fig. 1.17 muestra las dependencias de la FEM térmica de la diferencia de temperatura entre la unión caliente y fría para diferentes termopares.

La incoherencia de las composiciones de las aleaciones puede provocar cambios significativos en los valores de la emf termoeléctrica. En tales casos, es necesaria una calibración preliminar para lograr una gran precisión en lugar de utilizar tablas estándar.

Dependiendo de la composición, los termopares se utilizan para medir temperaturas en los siguientes rangos: platino - rodio - platino hasta 1600°C; cobre - constantan y cobre - copel hasta 350°C; hierro - constantan, hierro - copel y cromel - copel hasta 600°C; cromel - alumel hasta 900-1000°C.

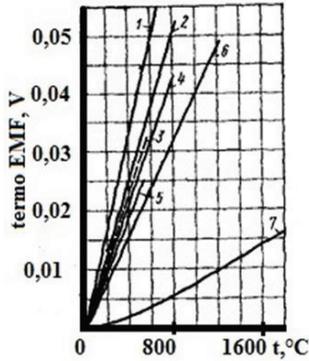


Fig. 1.17. Dependencia del CEM térmico de la diferencia de temperatura entre la unión caliente y fría para los termopares: 1 - cromel - copel, 2 - hierro - copel, 3 - cobre - copel, 4 - hierro - constantan, 5 - cobre - constantan, 6 - cromel - alumel, 7 - platino-rodio - platino.

De los termopares metálicos el mayor EMF térmico a la misma diferencia de temperatura tiene un termopar chromel - copel. El signo del EMF térmico de los termopares mostrados en la fig. 1.17 es el siguiente: en la unión fría la corriente se dirige del primer material nombrado en el par al segundo (del cromel al copel, del cobre al constantan, etc.), y en la unión caliente - viceversa.

La mayoría de los termopares funcionan de forma estable en un entorno oxidante. En el proceso de funcionamiento a largo plazo, puede observarse un cambio gradual en la emf térmica del termopar. Las razones de tal inestabilidad son la contaminación por impurezas de la atmósfera circundante, la oxidación de los alambres, la volatilidad de los componentes, las curvas cerradas y las deformaciones mecánicas, que introducen tensiones internas y crean una falta de homogeneidad de la estructura. Los termopares de platino-rodio tienen la mayor estabilidad, precisión y reproducibilidad, a pesar del bajo valor del EMF térmico. Esto se debe a la inercia química del material y a un alto grado de pureza del material obtenido.

#### 1.14. Ejemplos de medición y cálculo de la temperatura mediante termopares

a) Cálculo a partir del valor de emf termoeléctrica de un termopar de cobre-constantan.

En función de la precisión requerida, la temperatura puede calcularse de forma diferente a partir del valor de la emf termoeléctrica del termopar.

En las mediciones, cuando es suficiente precisión en unas pocas fracciones de grados, puede utilizar las tablas de calibración y de acuerdo con sus datos y lecturas del voltímetro (galvanómetro), midiendo el valor de la EMF térmica, para determinar la temperatura. En este caso, si el termopar se incluye en el esquema de la fig. 1.14.A y el extremo libre está a  $0^{\circ}\text{C}$ , la temperatura determinada por el método anterior por el valor de la termoEMF entre el trabajo y la unión libre debe coincidir con la temperatura real (dentro del error determinado por la calidad del termopar, el método de uso de las tablas) en el área de la unión de trabajo del termopar.

Si se utiliza un esquema más simple de inclusión del termopar fig.1.14.B (condicionalmente hablando, el extremo libre del termopar está a temperatura ambiente y se genera EMF en el termopar debido a la diferencia de temperatura entre la unión de trabajo y la temperatura ambiente), es necesario hacer una corrección al utilizar las tablas.

Por ejemplo, la temperatura en la región de la unión de trabajo puede determinarse mediante el valor del CEM térmico medido ( $E_i$ ) sumado con el CEM térmico tabulado ( $E_{t0}$ ) para una temperatura ambiente determinada (la temperatura a la que se encuentra el dispositivo de medición):  $E = E_i + E_{t0}$ . Si, por ejemplo, la temperatura ambiente es de  $20^{\circ}\text{C}$ , el valor de  $E_{t0} = 0,790\text{ mV}$  para el termopar de cobre-constantan para esta temperatura - véase la tabla de calibración. Supongamos que la lectura (CEM medido) del termopar de cobre-constantan  $E_i = 2,119\text{ mV}$ . En este caso, la FEM que debe utilizarse para determinar la temperatura de la unión de trabajo a partir de las tablas es  $E = 0,790 + 2,119 = 2,909\text{ (mV)}$ . Utilizando las tablas obtenemos el valor de la temperatura en la zona de la unión de trabajo  $t = 70^{\circ}\text{C}$ . La figura 1.18 muestra la dependencia del valor del CEM medido ( $E_i$ ) y el valor de la tabla ( $E_t$ ) con la temperatura para este caso.

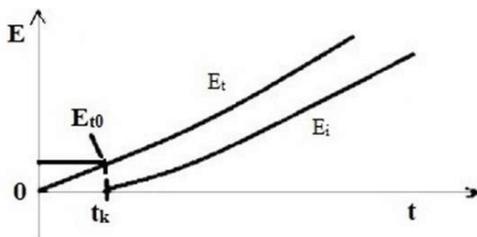


Fig. 1.18. Esquema gráfico de la dependencia de la temperatura del CEM térmico  $E$  de un termopar diferencial  $E_i$  y un termopar de unión simple  $E_j$ .

Al mismo tiempo, a veces el CEM térmico de los termopares puede diferir significativamente de los valores tabulados, incluso cuando se utiliza un termopar diferencial y se conecta según el esquema en el que una unión está a 0 °C. Esto puede deberse a la presencia de impurezas, inhomogeneidades, deformaciones mecánicas, desviación de la proporción de materiales de la aleación en el hilo del termopar. Por lo tanto, si se necesitan mediciones más precisas, se lleva a cabo una graduación especial del termopar (véase graduación). También es posible, por ejemplo, seleccionar varios puntos del rango de temperatura de trabajo, en los que la temperatura pueda estabilizarse y determinarse de forma suficientemente precisa e independiente. Entonces, habiendo trazado la dependencia de la diferencia  $\Delta E$  de los valores del CEM térmico (según los datos de la tabla y los medidos) con la temperatura, es posible hacer correcciones - sumar o restar el valor de  $\Delta E$  del CEM térmico medido. De esta manera es posible lograr la precisión de la medición de la temperatura en el nivel de 0,05 °C. Si se requiere una precisión aún mayor, la calibración se lleva a cabo en laboratorios de metrología especializados.

#### **b) Medición y cálculo de la temperatura con un termopar de aleaciones de cromo y cobre.**

Aquí describimos la medición de temperatura con un termopar fabricado con nuestras propias manos, pero la información facilitada también es útil para comprender el funcionamiento de los termopares fabricados comercialmente.

Si necesita la precisión de la medición de la temperatura en el nivel de 0,5 K (puede ser mayor; el error depende de las capacidades del dispositivo de medición  $V$ ), es necesario hacer y utilizar un termopar diferencial (ver fig. 1.19.a).  $m_1, m_2$  - metal 1 y 2 del alambre del termopar, respectivamente.

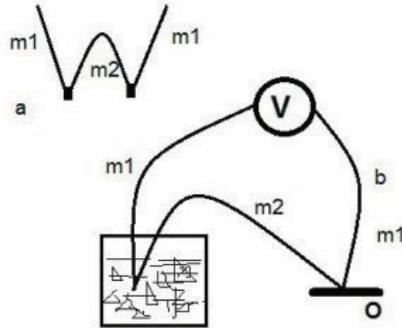


Fig. 1.19. Termopar diferencial - a, y el esquema de medición de la temperatura del objeto **O** - b.

Aquí observamos que para la medición de la temperatura en el rango climático (temperaturas ambiente) es más adecuado el termopar de cromo-cobre, cuya principal ventaja es la alta sensibilidad en el área de las temperaturas ambiente. Para mediciones en el área de bajas temperaturas es posible utilizar termopares cromo-aluminio, cobre-constantan etc. (ver tablas de calibración). (véanse las tablas de calibración). Para altas temperaturas se utilizan termopares a base de platino, termopares de cromel-alumel, etc.

Recordemos que las tablas de calibración de termopares se realizan para la condición en la que una de las uniones del termopar diferencial se encuentra a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Para utilizar esta condición en la práctica, una de las uniones del termopar se sumerge en un recipiente (termo) con hielo derretido, cuya temperatura se sabe que es de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

El esquema de tal medición de la temperatura del objeto **O** por un termopar diferencial se muestra en la fig. 1.19.b.

Para el ejemplo, consideramos que las mediciones se llevan a cabo utilizando un termopar de cromo-cobre. La temperatura del objeto **O** se determina por las lecturas del voltímetro (galvanómetro) **V**. Por ejemplo, sabemos que el objeto está a una temperatura superior a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la lectura del voltímetro  $U = 6,43\text{ mV}$ . Nos fijamos en la tabla y determinar que tal valor de la EMF térmica corresponde a una temperatura de  $+93\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Hay que tener en cuenta que el signo de la EMF térmica depende de la polaridad de la conexión del termopar al dispositivo de medición **V** y en la transición de la temperatura del objeto a través de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  se invertirá.

Si las condiciones técnicas se adaptan a la precisión de la medición a nivel de unidades de grados, es posible utilizar un termopar con una unión (véase la fig. 1.20).

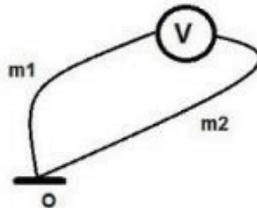


Fig. 1.20. Esquema de medición de la temperatura del objeto **O** con un termopar de unión simple.

Si analizamos los procesos físicos en un circuito de medición de este tipo, podemos ver que en este caso (como se señaló anteriormente) el papel de la temperatura, en relación con el cual se forma el termo-EMF, juega la temperatura ambiente (la temperatura a la que los terminales del dispositivo de medición - voltímetro). En consecuencia, esto se tiene en cuenta al utilizar tablas de calibración y determinar la temperatura del objeto. El valor del CEM térmico  $U$ , mediante el cual, utilizando las tablas, se determina la temperatura del objeto, será igual a:

$$U = U_k + U_v \quad (1.8),$$

donde  $U_k$  - valor de tabla del EMF del termopar diferencial (con dos uniones) a temperatura ambiente  $t_k$  (temperatura del dispositivo - por ejemplo,  $t_k = 24^\circ \text{C}$ , en este caso  $U_k = 1,57 \text{ mV}$ ),  $U_v$  - EMF térmico medido (lectura del voltímetro **V**).

Tomamos, por ejemplo, la temperatura en la habitación  $24^\circ \text{C}$  ( $U_k = 1,57 \text{ mV}$ ), si las lecturas del voltímetro, por ejemplo,  $3,05 \text{ mV}$ , entonces, respectivamente,  $U = 4,62 \text{ mV}$  y el uso de las tablas de determinar que la temperatura del objeto **O** -  $68^\circ \text{C}$ .

Para simplificar el cálculo (si es aceptable una pequeña disminución de la precisión) cuando se determina la temperatura utilizando un termopar con una sola unión se puede aproximar la dependencia de la FEM del termopar con la temperatura mediante una dependencia lineal. En este caso, se determina la temperatura del objeto a:

$$t_o = t_k + U_v / j \quad (1.9),$$

donde  $j = \Delta U / \Delta t$  es la sensibilidad media a la temperatura del termopar en un determinado rango de temperaturas.

Por ejemplo, para un termopar de clavija cromada en el intervalo de temperatura (0 - 200) °C, la sensibilidad media  $j$  es de aproximadamente 0,074 mV/°C.

### 1.15. Pirómetros

Los pirómetros son instrumentos que utilizan la radiación electromagnética de los cuerpos para determinar su temperatura.

Las superficies de todos los cuerpos de sustancias cuya temperatura es superior al cero absoluto emiten ondas electromagnéticas. La naturaleza de esta radiación y sus características dependen de la temperatura.

La gama de longitudes de onda de la radiación térmica se sitúa entre 0,1 y 1000  $\mu\text{m}$ . Además de la radiación, los cuerpos también absorben la radiación de otros cuerpos. En general, un cuerpo absorbe parte de la energía, otra parte la refleja y otra parte la transmite. Todo ello se caracteriza por coeficientes apropiados. En la física de la radiación térmica existe el concepto de cuerpo absolutamente negro. Un cuerpo absolutamente negro es un cuerpo que absorbe toda la radiación que incide sobre él. La absorción y la radiación de los cuerpos se consideran en relación con un cuerpo de este tipo.

En la práctica, ningún cuerpo absorbe e irradia como un cuerpo absolutamente negro. Un modelo de cuerpo absolutamente negro puede ser la abertura de una cámara cuya superficie interior tenga una buena capacidad de absorción y la misma temperatura.

La emisividad de un cuerpo absolutamente negro y su dependencia de la temperatura se muestra en la fig. 1.21:

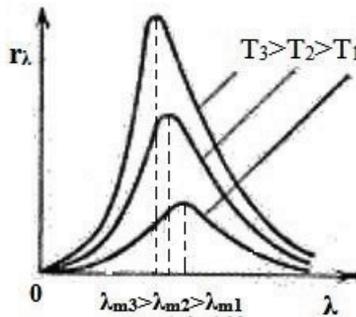


Fig.1. 21. Dependencia de la emisividad  $r_\lambda$  de un cuerpo completamente negro con la temperatura  $T$  y la longitud de onda  $\lambda$ .

La longitud de onda de la intensidad máxima de la radiación viene determinada por la ley de Wien:

$$\lambda_m = b/T \text{ (10),}$$

$b$  es la constante de Wien,  $T$  es la temperatura absoluta.

Conociendo las leyes de la radiación es posible determinar la temperatura de la superficie irradiada mediante el flujo de radiación medido que incide sobre una superficie determinada.

Existen los siguientes receptores de radiación:

A) Receptores negros y grises (térmicos). Estos receptores incluyen sensores de temperatura (termoresistencias, termopares) fijados en placas ennegrecidas que reciben la radiación. Su sensibilidad es independiente de la longitud de onda.

B) Elementos de detección selectiva. Se trata de fotocélulas, fotorresistencias, fotodiodos, fototransistores. La sensibilidad absoluta de los elementos sensibles selectivos es mucho mayor.

Los receptores de radiación provocan un cambio de corriente, resistencia y tensión en los circuitos de procesamiento de señales eléctricas correspondientes.

A altas temperaturas de la superficie radiante (por encima de 650 °C), cuando el color empieza a cambiar, el ojo del observador también puede servir como receptor de la radiación.

*Se distingue entre pirómetros:*

**Pirómetros ópticos.** Los pirómetros ópticos sólo son sensibles en una estrecha gama de longitudes de onda. Esto se consigue utilizando un filtro especial.

La radiación del objeto estudiado se analiza mediante un receptor de radiación o por comparación con una fuente de radiación de referencia. Los pirómetros más utilizados son los que tienen un filamento que desaparece. Cuando se trabaja con este tipo de pirómetros, el investigador compara en un estrecho rango de longitudes de onda del espectro visible el brillo de la radiación medida y la radiación de control (filamento de tungsteno incandescente). Cuando ambos brillos son iguales, el filamento desaparece.

La potencia calorífica (corriente) del filamento es una indicación de la temperatura óptica del objeto vigilado. La temperatura se determina mediante una curva de graduación o el pirómetro puede disponer ya de una escala. La temperatura de brillo (espectral, óptica) medida por un pirómetro

es igual a la temperatura real si el coeficiente de emisión espectral de la superficie del objeto controlado es igual a uno (cuerpo absolutamente negro). En la práctica, la temperatura medida es siempre inferior a la temperatura verdadera y es necesario introducir una corrección en el valor medido, que se determina en función de la temperatura medida y el coeficiente de emisión espectral  $k_i$  (determinado por tablas) (por ejemplo, para una longitud de onda  $\lambda = 0,65 \text{ nm}$  - porcelana  $k_i = 0,78$  a  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ , hierro  $k_i = 0,35$  a  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Los pirómetros de filamento desapareado son pirómetros muy cómodos y sencillos. La desventaja es la limitación del límite inferior de temperatura, así como cierta subjetividad de los resultados de la medición. Al mismo tiempo, la corrección efectuada en el resultado de la medición para objetos radiantes no negros es más precisa que en el caso de los pirómetros de radiación. También se han desarrollado pirómetros ópticos con un receptor de radiación objetivo - elemento fotoeléctrico, etc.

Las mediciones con un pirómetro de filamento desapareado se realizan desde una distancia de 2 m hasta el infinito. La distancia puede corregirse con ayuda de una óptica especial. El límite inferior de temperatura es de  $650 \text{ }^\circ\text{C}$  o  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  para el receptor objetivo. El límite superior no suele superar los  $2500 \text{ }^\circ\text{C}$ . Los pirómetros se gradúan en un emisor negro o una lámpara de filamento de tungsteno.

**Pirómetros de radiación (radiación completa).** Se trata de pirómetros que detectan la radiación en toda la gama espectral. Se consideran como tales si en el pirómetro se utiliza al menos el 90% de la radiación del objeto. Para este tipo de pirómetros, sólo pueden utilizarse receptores térmicos (termopares, termistores). Tales pirómetros pueden medir la temperatura en el rango de  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$  -  $2000 \text{ }^\circ\text{C}$  y superiores. La corrección de las lecturas al coeficiente de radiación en muchos pirómetros se realiza automáticamente y el pirómetro muestra inmediatamente la temperatura verdadera, si se fija de antemano un valor conocido del coeficiente de radiación.

### **Bibliografía**

1. Orlova M.P., Pogorelova O.F., Ulybin S.A. *Nizkotemperaturnaya termometriya* [Termometría de baja temperatura]. M.: *Energoatomizdat*, 1987.-280 p.
2. P. Profos. *Spravochnik "Izmereniya v promyshlennosti"* [Directorio "Mediciones en la industria"] 1-3 volúmenes. M.: *Metallurgiya*, 1990.

3. N.Gorbachuk, M.Larionov, A.Firsov, N.Shatil Sensores semiconductores para un amplio rango de temperaturas. *Sensors & Transducers Journal and Magazine*, Vol. 162, Issue 1, January 2014, pp.1-4.
4. N.S. Boltovets, V.K. Dugaev, V.V. Kholechuk y otros, New Generation of Resistance Thermometers Based on Ge Films on GaAs Substrates, *Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry 7*, 399-404 (2003).
5. Zarubin L.I., Nemish I.Yu. *Miniatyurnyy termometr soprotivleniya na 1,3-200K*. [Termómetro de resistencia en miniatura para 1,3-200K]. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 1971, No. 4, p. 260.
6. Astrov D.I., Abilov G.S., Alshin B.I. *Izmerenie nizkikh temperatur v prisutstvii sil'nykh magnitnykh poley*. [Medición de bajas temperaturas en presencia de fuertes campos magnéticos]. *Izmeritel'naya tekhnika*, 1977, No. 4, p. 39.
7. V. F. Mitin. *Termometriya soprotivleniya na osnove plenok germaniya*. [Termómetros de resistencia basados en las películas de germanio]. *Fizika poluprovodnikov, kvantovaya elektronika i optoelektronika*. 1999. V. 2, N 1. P. 115-123.
8. Medvedeva L.A., Orlova M.P., Rabinkin A.G. *Termopara dlya izmereniya nizkikh temperature* [Termopar para medir temperaturas bajas]. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 1970, No. 5, p. 208.
9. Gorbachuk N.T., Shybyryn V. S. "SEMICONDUCTOR TEMPERATURE SENSORS - THERMORESISTORS", *Modern engineering and innovative technologies, Germany*, issue No16. April, 2021.
10. N. T. Gorbachuk, *Sposob izmereniya temperatury*. [Método de medición de la temperatura], Patente de la Federación de Rusia. No. 2025736, No. 24, 1994.
11. Kiknadze G.I., Plesh A.G., Safronov A.N., Gorbachuk N.T. y otros. *Rezultaty eksperimental'nogo issledovaniya protsessa okhlazhdeniya model'noy sektiisii i eksperimental'nogo bloka sverkhprovodyashchey obmotki toroidal'nogo polya ustanovki T-15 na komplekse SIMS* [Resultados de un estudio experimental del proceso de enfriamiento de la sección modelo y del bloque experimental del bobinado superconductor del campo toroidal de la instalación T-15 en el complejo SIMS]. *Preprint IAE-4320/10*, M., 1986, 24 p.
12. Belyakov V.A., Gorbachuk N.T., Didenko P.I., Filatov O.G., Sychevskiy S.E., Firsov A.A. etc. *Poluprovodnikovyye izmeritel'ne*

*preobrazovately deformatsii, temperatury i magnitnogo polya dlya primeneniya v usloviyakh radiatsionnogo vozdeystviya, shirokom diapazone temperatur i magnitnykh poley* [Transductores semiconductores de medición de la deformación, la temperatura y el campo magnético para su uso en condiciones de exposición a la radiación, una amplia gama de temperaturas y campos magnéticos]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki*, Seriya: *Elektrofizicheskaya apparatura*, v.3(29), 2005, p.46-54.

13. Mykola Gorbachuk. MATERIALES ELECTROTÉCNICOS. LAP LAMBERT Academic Publishing. 120 High Road, East Finchley, Londres, N2 9ED, Reino Unido, 2024, 112p. ISBN: 978-620-3-46212-8.

14. N. Stefan, S. A. Mulenko, N. T. Gorbachuk. "Laser Synthesis of Nanometric Chromium Oxide Films with High Seebeck Coefficient and High Thermoelectric Figure of Merit: An Experimental Study". Current Overview on Science and Technology Research Vol. 4, Capítulo 1, p. 1-22. ISBN impreso: 978-93-5547-861-0, ISBN eBook: 978-93-5547-862-7, DOI: 10.9734/bpi/costr/v4/6196F

15. S.A.Mulenko, N.T.Gobachuk. Synthesis of nanometric iron oxide films by RPLD and LCVD for thermo-photo sensors. Applied Physics B: Lasers and Optics, v.105, #3, p.517-523, 2011.

16. Gorbachuk N.T., Didenko P.I. *Izmeritel'nye preobrazovately na osnove GaAs, polikremniya i dispersnogo germaniya i perspektivy ikh ispol'zovaniya* [Transductores de medición basados en GaAs, polisilicio y germanio disperso y perspectivas de su uso]. *Perspektivnye materialy*, 2004, N 5, p.93-97.

17. Gorbachuk N.T., Didenko P.I. *Vliyaniye neytronnogo oblucheniya na kharakteristiki poluprovodnikovyykh izmeritel'nykh preobrazovatelyey temperatury, deformatsii, magnitnogo polya* [La influencia de la irradiación de neutrones en las características de los transductores semiconductores de medición de temperatura, deformación y campo magnético]. *Poverkhnost'*, 2005, 4, pp.57-58.

18. N.T.Gorbachuk , S.A. Mulenko, Yu.N.Petrov . Photon synthesis of iron oxide thin films for thermo-photo-chemical sensors. Applied Surface Science. Volume 258, Issue 23, 15 September 2012, Pages 9186-9191.

19. Sergii Mulenko, Nicolaie Stefan, Floralice Miroiu, Nikolay Gorbachuk.

Laser Synthesis of Transitional Metal Oxides in 2D Structure and Heterostructure for Thermo Sensors with High Seebeck Coefficient. *Frontiers in Sensors (FS) Volume 4*, 2016, p.16-26.

20. Sominskiy M.S. *Poluprovodniki* [Semiconductores].- *L. Nauka* 1967. 439p.

21. Kucheruk I.M., Gorbachuk I.T., Lutsik P.P. *Zagal'niy kurs fiziki: Navchal'niy posibnik* [Curso general de física: Guía de estudio],T. 1-3. - K.: Tekhnika, 2001.

FOR AUTHOR USE ONLY

## Capítulo 2. Magnitudes mecánicas. Magnitudes mecánicas. Transductores, sensores, medición

### 2.1. Células de carga

Dado que la resistencia de un conductor viene definida por la relación

$$R = \rho l/S \text{ (2.1),}$$

donde  $\rho$  es la resistividad del material;  $l$  es la longitud  $S$  es el área de la sección transversal, entonces la resistencia puede cambiar en cualquier fluctuación del valor medido, lo que afecta a uno o más de los argumentos incluidos en esta expresión.

Esta relación se utiliza en las galgas extensométricas, que son transductores que convierten un cambio en la fuerza aplicada en un cambio en la resistencia. Normalmente, este tipo de transductor se utiliza junto con un puente de Wheatstone, en el que uno, dos o incluso los cuatro brazos son células de carga y la tensión de salida cambia en respuesta a las variaciones de la fuerza que se mide.

Las galgas extensométricas utilizan, por ejemplo, elementos transductores metálicos que, al aplicarles una carga mecánica, modifican su longitud y su sección transversal. Esto, a su vez, provoca un cambio en la resistencia. Algunos materiales para galgas extensométricas, como los materiales semiconductores, presentan un efecto piezoeléctrico en el que una carga aplicada al material provoca un gran cambio en su resistividad. Las galgas extensométricas de este tipo tienen una sensibilidad dos órdenes de magnitud mayor que las metálicas anteriormente mencionadas.

En general, cualquier parámetro que siga el movimiento o la fuerza puede utilizarse para crear transductores de galgas extensométricas.

**Las galgas extensométricas de alambre** (fig. 2.1) se fabrican en forma de conductores unidos rígidamente con una base de papel o película 2. El conductor 3 es un alambre fino en zigzag de 0,02-0,05 mm de diámetro, a cuyos extremos se conectan los cables (conductores de cobre 4) mediante soldadura. Los conductores se cubren con papel, película o barniz 1. Tras pegar el sustrato de la galga extensométrica a la superficie deformable objeto de estudio, la deformación de esta superficie se transmite a los conductores y provoca un cambio en su resistencia.

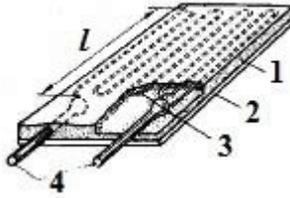


Fig. 2.1. Diseño de una resistencia de galgas extensométricas de alambre.

La resistencia  $R$  de la resistencia fabricada en forma de hilo de longitud  $l$  viene determinada por la expresión anterior (2.1).

El efecto de deformación se caracteriza por la señal de salida asociada al cambio relativo de la resistencia de la resistencia  $\Delta R/R$ . La relación entre el cambio relativo de la señal de salida y la deformación relativa  $\epsilon$  que la ha provocado a valores fijos de corriente, temperatura, etc., se denomina coeficiente de sensibilidad a la deformación de la galga extensométrica.

$$k = \Delta R/R\epsilon \quad (2.2).$$

La relación  $\Delta R/R$  se determina (matemáticamente se puede obtener diferenciando (2.1)) por  $\Delta R/R = \Delta\rho/\rho + \Delta l/l - \Delta S/S$ , donde  $\Delta R$ ,  $\Delta\rho$ ,  $\Delta l$ ,  $\Delta S$  - cambios de resistencia, resistividad, longitud y área de resistencia transversal del conductor, respectivamente.

En el campo de las deformaciones elásticas, utilizando la teoría para cuerpos sólidos, podemos obtener una expresión para el coeficiente de sensibilidad a la deformación en forma de:

$$k = 1 + 2\mu + \nu \quad (2.3).$$

Para los conductores, los componentes  $\mu$  (coeficiente de Poisson) y  $\nu$  (coeficiente de elastoresistencia) no difieren mucho en magnitud. En el caso de los semiconductores, el valor de  $\nu$  puede ser dos órdenes de magnitud mayor que  $\mu$  y depende de la temperatura, la deformación y la dirección cristalográfica. Por lo tanto, las galgas extensométricas de semiconductores tienen una sensibilidad a la deformación mucho mayor, pero también son más susceptibles a las influencias externas.

La calidad de las galgas extensométricas viene determinada por sus coeficientes de sensibilidad a la deformación  $k$  y el valor del coeficiente de temperatura de resistencia (TCR) -  $\Delta R/R\Delta T$ . Cuanto mayor sea el coeficiente de sensibilidad a la deformación  $k$  y menor el coeficiente de resistencia a la temperatura (TCR) del material del que está fabricada la galga extensométrica, mayor será su calidad.

Por ejemplo, para las galgas extensométricas de alambre fabricadas con aleaciones de constantán y manganina  $k \approx 2$ ,  $TCR = 30 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  y  $10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , respectivamente. Para las galgas extensométricas semiconductoras  $k$  alcanza el valor de 100 y más (por ejemplo, el silicio).

En las galgas extensométricas de lámina, el elemento sensible está hecho de una lámina con un grosor de 3-6 micras. Las principales ventajas de las galgas extensométricas de lámina son la posibilidad de formar galgas extensométricas de cualquier forma y la disipación eficaz del calor durante las mediciones, lo que permite obtener una señal de salida más elevada. Las galgas extensométricas de lámina son insensibles a las deformaciones transversales y pueden fabricarse en tamaños a partir de 0,3 mm.

Entre las principales características metrológicas de las galgas extensométricas figuran la sensibilidad a la deformación, la fluencia, la histéresis mecánica y la inestabilidad térmica.

La sensibilidad a la deformación viene determinada principalmente por las propiedades de resistencia a la deformación del material del elemento sensor. La sensibilidad a la deformación es el principal parámetro por el que se determina el valor de la deformación medida:

$$\varepsilon = \Delta R / Rk \quad (2.4).$$

La fluencia se manifiesta como un cambio en la señal de salida a un valor dado e invariable de  $\varepsilon$ . La fluencia está causada principalmente por imperfecciones elásticas en el sustrato y el adhesivo.

La histéresis mecánica, al igual que la fluencia, está causada por la imperfección elástica del sustrato y del adhesivo y se determina numéricamente mediante la diferencia de los valores de resistencia de salida para el mismo valor de deformación, siempre que el valor de deformación dado se alcance con su aumento suave y su disminución suave.

La inestabilidad térmica, consiste en el cambio de resistencia de la galga extensométrica debido a su TCR, y también por la aparición de tensiones mecánicas adicionales debidas a la diferencia de los coeficientes de temperatura de dilatación lineal del material de la galga extensométrica y de la pieza en estudio.

Un parámetro importante de las galgas extensométricas es la potencia admisible que puede disipar la galga, siempre que su sobrecalentamiento no supere el valor admisible. La potencia admisible de una galga extensométrica depende de sus dimensiones geométricas.

## 2.2. Galgas extensométricas de láminas

En las galgas extensométricas de lámina, el elemento sensible está hecho de una lámina con un grosor de 3...6 micras.

El grosor de las galgas extensométricas de lámina es inferior al de las galgas extensométricas de alambre y es de 30...50 micras. Las principales ventajas de las galgas extensométricas de lámina son la posibilidad de formar galgas extensométricas de cualquier forma y la disipación eficaz del calor durante las mediciones, lo que permite obtener una señal de salida más alta con las mismas deformaciones. Las galgas extensométricas de láminas son insensibles a las deformaciones transversales y permiten diseños de base pequeña a partir de 0,3 mm.

Las galgas extensométricas de lámina suelen fabricarse con lámina de constantano. Las propiedades electromecánicas de la lámina son menos constantes dentro de un mismo lote que las del alambre de galga extensométrica de constantanio. Su tratamiento térmico es menos eficaz, por lo que el rango de funcionamiento de las galgas extensométricas de lámina no supera  $\pm(3-5)10^{-3}$  deformaciones relativas ( $\pm 3000...5000$  URD, donde  $1\text{URD} = 1\text{mIn}^{-1} = 10^{-6}$  - una unidad de deformación relativa)), y el rango de temperatura es de 75...575 K. La tecnología de fabricación de galgas extensométricas de lámina, por regla general, se basa en el uso de procesos fotoquímicos. Esta tecnología es la más adecuada para la producción en serie. Dependiendo de la forma de las rejillas tensoriales, las galgas extensométricas de lámina se dividen en las siguientes modificaciones típicas (fig. 2.2):

- rectangular de un solo elemento para mediciones lineales;
- Galgas extensométricas rectangulares o en roseta de dos o tres elementos para mediciones en zonas con estado de tensiones plano;
- especiales utilizadas como galgas extensométricas en elementos sensores de membrana;
- etc.

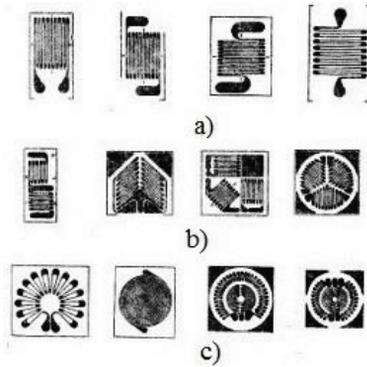


Figura 2.2. Formas de algunas redes tensoriales de galgas extensométricas de lámina.

a - rectangular de un solo elemento; b - rectangular de varios elementos y roseta; c - membrana.

### 2.3. Medición de tensiones mecánicas mediante cuerda vibrante.

#### Tenzómetro

Este método de medición de tensiones mecánicas (deformaciones, alargamientos) utiliza como elemento sensor un cordón de acero tensado entre dos abrazaderas fijadas en la estructura cuyas deformaciones se estudian. Un cambio en la tensión mecánica de la cuerda provoca un cambio  $v$  en la frecuencia de su oscilación, y la medición de  $\Delta v$  permite determinar las deformaciones. Una de las ventajas del método considerado es una larga vida útil del sensor (transductor, galga extensométrica), fiabilidad, débil susceptibilidad a las influencias externas (humedad, radiación, etc.). Estas ventajas vienen dadas por la resistencia de la cuerda y la construcción de la galga extensométrica. En este método, el portador de la información es la frecuencia de la señal de salida, lo que crea ventajas adicionales en términos de resistencia a las interferencias en forma de ruido, interferencias, influencias de las líneas de transmisión. Además, dicha señal puede convertirse fácilmente en forma digital.

La frecuencia fundamental  $v$  de las vibraciones mecánicas de una cuerda extensométrica tensada entre dos puntos a una distancia  $l$  y sometida a una fuerza  $F$  se expresa mediante la fórmula

$$v = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F}{S\rho}} \quad (2.5),$$

donde  $S$  es la sección transversal de la cuerda,  $\rho$  es su densidad.

Bajo la influencia de la tensión mecánica  $F/S$ , la cuerda del tensómetro experimenta un alargamiento  $\Delta l$ . Analizando el estado de tensión-deformación de la cuerda, podemos obtener una expresión para el alargamiento relativo (deformación relativa) mediante el cambio de frecuencia:

$$\Delta l/l = (4l^2 \rho/E)(v_1^2 - v_0^2) \quad (2.6),$$

donde  $E$  es el módulo de Young. Conociendo  $v_0$  (frecuencia inicial) y midiendo  $v_1$  (frecuencia tras la deformación de la estructura), es posible determinar la deformación de la estructura.

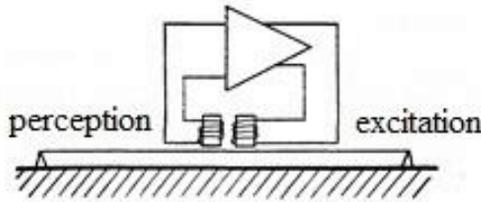


Fig. 2.3 Galga extensométrica con cuerda vibrante

La Fig. 2.3 muestra una galga extensométrica (esquema) con una cuerda vibrante. La cuerda de acero vibra con frecuencia  $v$  delante de la bobina de señal, provocando oscilaciones periódicas de la resistencia magnética de su circuito magnético, lo que genera una señal eléctrica de la misma frecuencia  $v$ . Esta señal se amplifica y se transmite a la bobina de excitación, que mantiene la vibración. La frecuencia  $v$  puede medirse con un frecuencímetro. Las características de este tipo de galgas extensométricas pueden encontrarse en la bibliografía. Por ejemplo, una galga extensométrica fabricada por "Telemac" tiene las siguientes características: frecuencia máxima  $\sim 1200$  Hz, frecuencia mínima  $\sim 400$  Hz, rango de medida  $4000\mu\text{m}/\text{m}$ , resolución  $1\mu\text{m}/\text{m}$ , precisión 1 a 2% del rango de medida.

El tipo descrito de medidor de alargamiento (extensómetro) se utiliza para el control de deformaciones y tensiones mecánicas en la construcción (presas, puentes, túneles, etc.), en la medición de pesos, etc.

#### 2.4. Adhesivos, aglutinantes para el montaje de galgas extensométricas

Los adhesivos, aglutinantes utilizados para el montaje de las galgas extensométricas en la superficie investigada deben cumplir los siguientes requisitos básicos:

A) Garantizar la transferencia de la deformación de la superficie estudiada a la galga extensométrica y la menor fluencia posible de las lecturas en el intervalo operativo de temperaturas y deformaciones. La fluencia se debe a la plasticidad del adhesivo.

B) Garantizar el aislamiento eléctrico de la galga extensométrica con respecto a la superficie sometida a prueba.

Por regla general, los proveedores de galgas extensométricas facilitan en su documentación una lista de adhesivos con características óptimas para este tipo de galgas extensométricas y una descripción de la tecnología de su aplicación.

A continuación se describen brevemente los adhesivos que se utilizan con más frecuencia en las galgas extensométricas.

Para galgas extensométricas de lámina:

Adhesivo Cyacrine EO. Se trata de adhesivos de fraguado en frío y fraguado rápido. Se utilizan para pegar materiales no porosos y metales. Endurecen en 48 horas sin fuerzas de compresión. Rango de temperatura de uso  $-80 - +80$  °C.

Cola UVS-10T. Curado en caliente, monocomponente. Une materiales no metálicos no porosos y metales. Rango de temperatura de funcionamiento  $-70 - +200$  °C. Polimerización (curado) del adhesivo se lleva a cabo de la siguiente manera: galgas extensométricas pegadas deben mantenerse durante 0,5 horas en condiciones normales. Luego mantener 5 horas a temperatura  $180$  °C con presión de prensado  $0,1 - 0,3$  MPa ( $1 - 3$  atm) en las condiciones del termo-closet. A continuación, curar durante 5 horas a  $215$  °C en condiciones de curado abierto.

Cola BFR-2K. Se refiere a los adhesivos monocomponentes de fraguado en caliente, fenol-formaldehído. Las condiciones de polimerización y la tecnología de uso son similares a las de la cola UVS-10T.

## **2.5. Certificación, calibración y verificación de las galgas extensométricas**

Para la atestación, calibración (determinación de las características de calibración) de las galgas extensométricas, se utilizan elementos elásticos de referencia (vigas). La viga, por regla general, tiene unas dimensiones (forma) que ofrecen igual resistencia a la flexión (fig. 2.4.a) o tiene una sección transversal constante (fig. 2.4.b). La viga tiene una sección (zona de

trabajo, sombreada en la figura) dentro de la cual la deformación es prácticamente constante.

El valor de la deformación de la superficie de la viga de igual resistencia se determina mediante la fórmula:

$$\varepsilon = \frac{6PL}{EB(h+\Delta h)^2} \quad (2.7)$$

donde:  $P$  es el valor de la fuerza de carga (carga),  $H, L$  es la distancia desde la línea de fijación de la viga hasta el punto de aplicación de la fuerza,  $E$  es el módulo de elasticidad del material de la viga,  $B$  es la anchura de la viga en el punto de fijación,  $h$  es el espesor de la viga,  $\Delta h$  es la distancia desde la superficie de la viga hasta la mitad del espesor de la galga extensométrica.

La magnitud de la deformación de la superficie de la viga de sección constante se calcula a través de la deformación  $f$  mediante la fórmula:

$$\varepsilon = \frac{4(h+2\Delta h)f}{l^2+4f^2 \pm 4fh} \quad (2.8),$$

donde:  $h$  - espesor de la viga,  $\Delta h$  - distancia desde la superficie de la viga hasta la mitad del espesor de la galga extensométrica,  $l$  - base del dispositivo con ayuda del cual se determina la deflexión,  $f$  - pluma de deflexión en la base  $l$ .

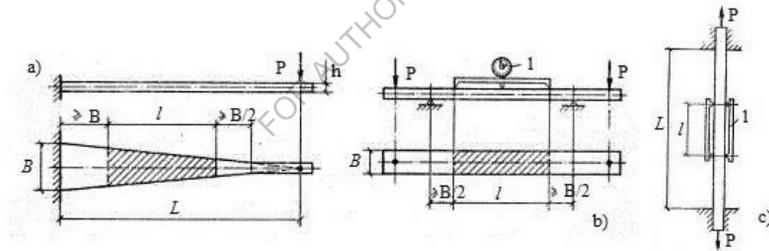


Fig. 2.4. Elementos elásticos de referencia: a - de igual resistencia a la flexión, b - de sección constante, c - viga trabajando a tracción. 1- dispositivo para medir la deformación real.

Las vigas que trabajan a tracción (fig. 2.4.c) también pueden utilizarse para el calibrado. En este caso, se utiliza la medición directa del valor de la deformación en la zona de trabajo. La desventaja de este método es la dificultad de crear una carga axial estable.

## 2.6. Medición de las deformaciones mecánicas (tensiones) con ayuda de una galga extensométrica

Como se ha indicado anteriormente, una galga extensométrica es un dispositivo cuya resistencia eléctrica cambia cuando se deforma. Este cambio de resistencia está relacionado con la magnitud de la deformación mecánica  $\epsilon$  a través del coeficiente de sensibilidad a la deformación (véase 2.2).

En la actualidad, las galgas extensométricas más utilizadas para medir deformaciones mecánicas son las de lámina (el material de la lámina es metálico) y, para resolver determinados problemas, las galgas extensométricas semiconductoras. Las ventajas e inconvenientes de ambos tipos de galgas extensométricas están bien expuestos en la bibliografía. La principal ventaja de las galgas extensométricas semiconductoras es su mayor sensibilidad a la deformación (hasta 100 veces), pero al mismo tiempo son más frágiles, rígidas y sus parámetros dependen en mayor medida de la temperatura. La alta sensibilidad a la deformación de las galgas extensométricas semiconductoras se explica por los cambios en la estructura zonal del material semiconductor bajo la influencia de tensiones mecánicas y, en consecuencia, una fuerte dependencia de la conductividad (resistencia) de la deformación. Mientras que en las galgas extensométricas metálicas la sensibilidad a la deformación viene dada por los cambios en el tamaño del elemento sensible (lámina).

Las galgas extensométricas de láminas se diferencian por su finalidad: para medir deformaciones uniaxiales, deformaciones distribuidas, para diferentes rangos de temperatura, por el tamaño y la forma de la red (forma de la lámina conductora de electricidad), por los valores de resistencia eléctrica, así como por algunos otros parámetros.

En la figura 2.5 se muestra una de las galgas extensométricas de lámina más sencillas. El diseño de la galga extensométrica es tal que reacciona (cambia su resistencia) prácticamente sólo cuando la deformación se dirige (aplica) a lo largo del eje de la red de la galga extensométrica o existe una componente de deformación distribuida compleja en esta dirección (esto se denomina "sensibilidad a la deformación longitudinal").

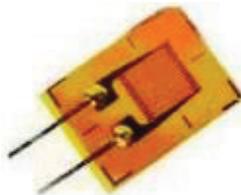


Fig. 2.5. Típica galga extensométrica de lámina

Además, la variación de la resistencia es proporcional a la magnitud de la deformación longitudinal (o componente del complejo) y está relacionada con su magnitud a través del coeficiente k. Cabe señalar que también existe sensibilidad a la deformación transversal, es decir, sensibilidad a la deformación dirigida perpendicularmente a la base (eje longitudinal) de la galga extensométrica, pero es insignificante, por regla general, para las galgas extensométricas de lámina es cercana a cero, y para las galgas extensométricas de hilo no supera el 1% de la longitudinal.

La razón principal del cambio en la resistencia de la galga extensométrica de lámina bajo la influencia de la deformación es el cambio en el tamaño de la red eléctricamente conductora. Como es sabido, la resistencia eléctrica de los materiales viene determinada por la dependencia (2.1). Bajo tensión de tracción la resistencia aumentará, bajo compresión disminuirá. En el proceso de utilización de galgas extensométricas, esto se tiene en cuenta para determinar el signo de deformación del objeto.

Para las galgas extensométricas de lámina, el coeficiente de sensibilidad a la deformación depende del material de la lámina. Su valor se sitúa en el intervalo  $k = 2-4$  y se indica en los pasaportes y descripciones adjuntos al lote de galgas extensométricas. El valor de la resistencia eléctrica, por regla general, es a partir de 50 Ohm.

Para medir la magnitud de la deformación del objeto estudiado, la galga extensométrica se monta (se pega) en el punto del objeto en el que es necesario medir la deformación. Para medir la deformación del objeto con la mayor precisión posible, es necesario garantizar que la deformación se transfiera del objeto al conjunto de galgas extensométricas casi sin pérdidas. Esto se consigue seleccionando el aglutinante (adhesivo) y la tecnología de montaje adecuados. El requisito principal para el aglutinante es la ausencia de deformación plástica en el rango de funcionamiento de la galga extensométrica. El aglutinante óptimo y la tecnología de trabajo con él se especifican en las descripciones técnicas de los lotes de galgas extensométricas. Muy a menudo se utilizan como aglutinante colas del tipo BF-2.

La resistencia indicada en la ficha técnica y medida después de montar la galga extensométrica en el objeto puede diferir ligeramente - en el proceso de polimerización del aglutinante pueden producirse deformaciones de la red

de la galga extensométrica. Es necesario tener esto en cuenta durante las mediciones precisas.

Además, después de montar la galga extensométrica en el objeto durante la prueba mecánica del objeto, se mide la resistencia eléctrica de la galga extensométrica. Si, por ejemplo, el coeficiente de sensibilidad de la galga extensométrica  $k = 2$ , la resistencia inicial (especificada en el pasaporte o medida después de montar la galga extensométrica en el objeto)  $R_o = 200,1$  Ohm, y durante la carga mecánica del objeto  $R_e = 200,9$  Ohm, entonces la cantidad de deformación mecánica (en este caso, estiramiento) en el punto de montaje de la galga extensométrica y en la dirección de su base es igual:

$$\varepsilon = \Delta R/kR_o = (R_e - R_o)/kR_o = 0,002 = 2 \cdot 10^3 \text{ mln}^{-1} = 2 \cdot 10^3 \text{ URD.}$$

Es decir, el valor de la deformación relativa es igual a 0,002. Los valores de la deformación relativa se expresan a veces en URD - unidad de deformación relativa, que es igual a 1/1000000 (una millonésima parte -  $\text{mln}^{-1}$ ) de la unidad de deformación.

En la práctica, se utilizan equipos especiales para medir las deformaciones con el fin de automatizar las mediciones, las tecnologías de medición son más complejas para lograr la máxima precisión, el cálculo de los errores según determinados métodos, etc.

Si es necesario determinar las tensiones mecánicas del objeto en el punto de medición de la deformación, se utiliza la relación conocida entre la deformación mecánica  $\varepsilon$  y las tensiones mecánicas  $\sigma$ :

$$\sigma = \varepsilon E \quad (2.9),$$

donde  $E$  es el módulo de Young (elasticidad) del material del objeto.

La técnica y la secuencia de medición de las deformaciones mecánicas con una galga extensométrica semiconductora es básicamente la misma que la descrita anteriormente para una galga extensométrica de lámina.

## **2.7. Materiales hidrotectores para galgas extensométricas**

La impermeabilización de las galgas extensométricas tras su instalación en el objeto de medición se realiza, por regla general, en todos los casos en que la humedad del ambiente puede aumentar por encima del 50%.

El más extendido es el método de impermeabilización relativa, que consiste en aplicar composiciones hidrófobas y sellantes en los lugares de instalación de las galgas extensométricas. Por lo general, tales composiciones tienen una buena adherencia a la base de galgas

extensométricas y la superficie en estudio, de modo que, así como adhesivos, después del curado hacer un todo con la galga extensométrica.

Las composiciones hidrófobas y los sellantes no deben deformarse como consecuencia de la contracción o de cambios en las condiciones ambientales y no deben reforzar visiblemente los lugares de medición y deben conservar la capacidad de deformación elastoplástica. Tampoco deberán atacar químicamente los materiales de las galgas extensométricas y los cables de parcheo.

Los revestimientos impermeables utilizados para medir la deformación se subdividen en:

- recubrimientos peliculares aplicados en varias capas con un espesor total de 50... 100 micras;

- sellantes blandos con módulo de elasticidad de hasta 100 MPa, normalmente aplicados en una capa con un grosor de 2...3 mm.

- duro con módulo de elasticidad superior a 100 MPa, aplicado en una o varias capas con espesor total de 0,5 a 2...3 mm.

Los revestimientos de película fina están hechos de soluciones adhesivas como BF-2 y otras. Los revestimientos blandos impermeables están hechos de vaselina técnica, mezclas de parafina y vaselina, grasas de cera y lubricantes, así como plastilina escultórica.

Las mezclas y grasas o compuestos de cera incluyen, además de la cera de abejas, una serie de componentes plastificantes y sellantes, ya que la cera tiene una adherencia insuficiente y es propensa a agrietarse a temperaturas bajo cero.

Los revestimientos sólidos impermeables están hechos de compuestos poliméricos y bituminosos. Por ejemplo, carbinol-cemento y epoxi, masillas epoxi y otros.

Los compuestos epoxídicos y las masillas se preparan con resinas epoxídicas ED-5 y ED-6 a las que se añaden endurecedores. Se añaden plastificantes al compuesto para reducir la rigidez. Los compuestos epoxídicos se caracterizan por un bajo coeficiente de absorción de humedad (menos del 0,05% en 24 horas), buena adherencia a la mayoría de los materiales y suficiente resistencia a los medios agresivos. Sus desventajas son la fragilidad, la tendencia al agrietamiento y la ruptura de las uniones adhesivas en la superficie de contacto durante la deformación, así como su toxicidad.

## 2.8. Montaje de galgas extensométricas de uso general

El montaje de las galgas extensométricas, en función de su tipo y de las condiciones de ensayo, se realiza por adherencia o soldadura a la superficie sometida a ensayo, así como por incrustación en el interior de los elementos sometidos a ensayo de materiales adhesivos, por ejemplo, plásticos de fibra de vidrio.

El encolado de las galgas extensométricas de uso general destinadas a mediciones de deformación de hasta  $\pm 1$  % en el intervalo de temperaturas climáticas se realiza en la mayoría de los casos con adhesivos de curado en frío de los grupos nitrocelulosa y cianoacrilato. El pegado de las galgas extensométricas termocompensadas utilizadas en el rango de 175...475 K se realiza con adhesivos termoendurecibles de los grupos fenólico, viniflex y furano en función del material del objeto de medición y del rango de temperatura de funcionamiento. Cuando se montan galgas extensométricas de alta temperatura que funcionan a temperaturas de 525...575 K, se utilizan aglutinantes organosilícicos.

La tecnología del encolado con adhesivos de todos los grupos enumerados, excepto los adhesivos exprés del grupo del cianoacrilato, se reduce a las siguientes operaciones:

- inmediatamente antes de pegar los lugares de montaje de las galgas extensométricas se limpian de polvo y se pasan un bastoncillo humedecido con alcohol etílico o éter para eliminar la condensación de agua;

- se aplica con pincel una fina capa de pegamento en las zonas preparadas del objeto de medición; al mismo tiempo se aplica la misma capa en la superficie de contacto de la base de la galga extensométrica y se seca durante 10-15 min;

- la segunda capa, más gruesa, de cola se aplica a la galga extensométrica y se mantiene durante 2-3 minutos hasta que espese;

- la galga extensométrica se orienta según las marcas del lugar de instalación y se presiona firmemente contra la superficie;

- Se coloca una película de fluoroplástico o triacetato sobre la galga extensométrica, tras lo cual se retira el exceso de pegamento con un dedo o un rodillo de goma;

- la galga extensométrica encolada se mantiene durante 1-2 horas bajo presión (carga) a razón de unos 0,2...0,3 MPa;

- una vez eliminada la presión, la galga extensométrica se libera de la película y se seca hasta la eliminación completa del exceso de disolvente,

normalmente en 1-2 días. Un signo objetivo de la finalización del secado es la estabilización de su resistencia de aislamiento en relación con la superficie sometida a prueba (para materiales conductores);

- en caso de que el pegado de las galgas extensométricas se realice con adhesivo termoendurecible, después del secado se realiza un tratamiento térmico normal según el modo recomendado para este adhesivo; durante el periodo de tratamiento térmico las galgas extensométricas deben estar bajo una presión de hasta 0,3...0,5 MPa;

- tras el secado o la polimerización de las galgas extensométricas encoladas, comprobar la calidad del encolado y la posición correcta de las galgas extensométricas con respecto a las marcas de marcado; comprobar también la rectitud de los hilos de la rejilla, la presencia de un circuito eléctrico, la resistencia y el nivel de aislamiento de las galgas extensométricas con respecto a la superficie sometida a ensayo.

El encolado de las galgas extensométricas con cianocrilato adhesivo exprés cyacrin-30 puede realizarse tras una imprimación previa de la base de papel con algún adhesivo para galgas extensométricas, seguida de secado o polimerización. Las galgas extensométricas con base de película no requieren imprimación previa. La ampolla de polietileno con pegamento se saca del frigorífico y se mantiene a una temperatura de  $295 \pm 10$  K durante  $15 \pm 20$  min. A continuación, se perfora en la ampolla un orificio de unos 0,3 mm de diámetro y se aplica una fina capa de cola a la superficie de contacto de la base de la galga extensométrica. Inmediatamente después de aplicar el pegamento, se coloca la galga extensométrica con la mayor precisión posible en el lugar marcado y se mantiene bajo presión durante 1 minuto. El secado posterior se lleva a cabo a temperatura y humedad normales del 50...80% durante 6 horas.

En todos los casos es necesario utilizar material didáctico con una descripción detallada de la tecnología de pegado con un adhesivo de montaje determinado. En las descripciones se indican los requisitos tecnológicos generales para el encolado de galgas extensométricas.

Al mismo tiempo que se pegan las galgas extensométricas, instale y pegue almohadillas de montaje de material aislante con conductores terminados para soldar las galgas extensométricas y los cables de conexión. Las almohadillas se pegan cerca del borde transversal de la base de la galga extensométrica desde el lado de los cables conductores. Las almohadillas de

montaje protegen las galgas extensométricas de roturas durante el montaje y eliminan la posibilidad de cortocircuitos durante las mediciones.

El nivel de aislamiento de las galgas extensométricas encoladas no debe ser inferior a 50...100 Mohm si las mediciones se realizan en condiciones normales y las deformaciones previstas no superan el 1%.

## **2.9. Galgas extensométricas semiconductoras**

En la actualidad, los principales materiales para las galgas extensométricas semiconductoras son el silicio y el germanio, siendo el silicio el más utilizado debido a su menor sensibilidad a la temperatura. También se utilizan compuestos semiconductores como el arseniuro de galio GaAs y otros.

En función de los materiales utilizados, las galgas extensométricas semiconductoras pueden dividirse en dos grupos: monocristalinas y policristalinas. Entre las galgas extensométricas monocristalinas se incluyen las obtenidas por corte a partir de un monocristal; los cristales de aguja obtenidos por crecimiento a partir de la fase gaseosa; las películas epitaxiales y las dendritas. Las policristalinas incluyen las tensolitas, que son mezclas artificiales de, por ejemplo, carbono (o negro de humo) y barniz de baquelita.

Los materiales para las galgas extensométricas semiconductoras deben tener el coeficiente de sensibilidad a la deformación (SSC) más alto posible y el coeficiente de resistencia a la temperatura (TCR) más bajo, así como garantizar la estabilidad de los parámetros de las galgas extensométricas.

Una operación muy importante en la fabricación de galgas extensométricas semiconductoras es la creación del contacto metal-semiconductor, que se obtiene por diversos métodos: soldadura, fusión, soldadura, pulverización catódica, recubrimiento electroquímico o químico.

De cierto interés son las galgas extensométricas semiconductoras hechas de cinta dendrítica de germanio, que se han generalizado gracias a una tecnología de fabricación sencilla y asequible. Las dendritas son cristales en forma de árbol, de aguja o laminares de estructura gemela compleja formados por cristalización en fundido sobreenfriado o a partir de fase gaseosa sobresaturada.

Las galgas extensométricas dendríticas de germanio se caracterizan por una resistencia mecánica reducida en comparación con las galgas extensométricas fabricadas con lingote monocristalino. Entre las ventajas de

las galgas extensométricas dendríticas cabe citar su sencillez de fabricación y su relativo bajo coste (en comparación con otras galgas extensométricas de semiconductores, las galgas extensométricas dendríticas son las más baratas). La fabricación de las galgas extensométricas dendríticas de germanio no requiere equipos especiales (por ejemplo, máquinas para esmerilar y cortar) y se reduce a cortar transversalmente la cinta dendrítica de la aguja de corindón, romper la galga extensométrica y soldarle los cables eléctricos con soldadura especial. Para la fabricación de galgas extensométricas se utiliza principalmente cinta dendrítica de germanio con resistencia específica  $\rho = 1 \pm 0,2 \text{ ohm} \cdot \text{cm}$ . Los parámetros de estas galgas extensométricas dependen en gran medida de la temperatura.

Por su diseño, las galgas extensométricas semiconductoras pueden dividirse en adheridas y no adheridas. Las galgas extensométricas semiconductoras adheridas pueden utilizarse con o sin sustrato.

Las galgas extensométricas semiconductoras sin sustrato difieren en la forma de la sección transversal, el material y el método de establecimiento del contacto óhmico. Su diseño viene determinado en gran medida por la tecnología de fabricación. El tipo más común de galga extensométrica es una barra.

Las galgas extensométricas obtenidas por crecimiento a partir de la fase gaseosa son agujas monocristalinas con un diámetro de 10 - 100 micras. El diseño de una galga extensométrica de este tipo con un sustrato se muestra en la fig. 2.6.a. La construcción de una galga extensométrica de película se muestra en la fig. 2.6.b; las galgas extensométricas se fabrican en forma de una sola tira conductora, que se cubre con una capa de barniz. En la tabla 2.1 se indican los parámetros de algunas galgas extensométricas semiconductoras.

La principal aplicación de las galgas extensométricas de semiconductores son los sensores de presión, fuerza y tensión. La aplicación de galgas extensométricas semiconductoras en acelerómetros es prometedora.

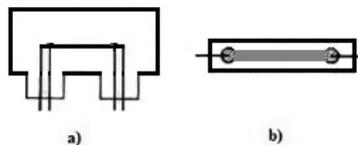


Fig. 2.6. Diseños de algunas galgas extensométricas semiconductoras: a - galga extensométrica de cristal de aguja con sustrato, b - galga extensométrica de película.

Tabla 2.1. Especificaciones de algunas galgas extensométricas semiconductoras.

Parameter	Strain gauge type				
	p-Si	p-Si	n-Si	n-Ge (dendrite)	n-Ge
$\rho$ , Ohm $\cdot$ cm	0,017	0,02	0,35	0,25	0,8
Dimensions, mm					
length	12,7; 4,4	5	5	10	3,5
thickness	0,017	0,03-0,05	0,1	0,15-0,22	0,5
width	0,5	0,3	0,8	0,7-2,0	0,2
Nominal resistance at 20 °C	350;120	100-200	150-400	50-200	350
Strain sensitivity coefficient at 20 °C	130	135	-133	-100	-
Operating current, mA	20;35	20-40	10-20	20-35	5
Maximum operating temperature, °C	+300	+500	-	+150	-

## 2.10. Efecto piezoresistivo en semiconductores y galga extensométrica basada en él

Utilizando los métodos del análisis matemático, consideraremos la física del efecto piezoresistivo en materiales sólidos. Nos centraremos en semiconductores como el Si a granel y en forma de películas de silicio sobre sustratos aislantes. Consideraremos el uso práctico del efecto para crear transductores de medición de deformaciones mecánicas: galgas extensométricas. Se dan ejemplos de diseños de sensores y de sus principales características y capacidades. Analizaremos las ventajas e inconvenientes de las galgas extensométricas semiconductoras.

Aquí se presentan los resultados de estudios experimentales para películas de silicio implantadas con iones sobre sustratos de silicio semiaislante con una capa de SiO<sub>2</sub> en la superficie. La mayoría de los resultados obtenidos pueden utilizarse en el desarrollo de galgas extensométricas basadas en otros semiconductores.

Se sabe que las propiedades electrofísicas de los semiconductores son entre 10 y 100 veces más sensibles a la tensión mecánica que las de los metales. Al mismo tiempo, una serie de razones impiden el uso práctico generalizado de los materiales semiconductores en la medición de la deformación. Las principales son la dependencia de la temperatura de los parámetros electrofísicos de dichas galgas extensométricas (transductores de

medición), la escasa resistencia mecánica y rigidez, que provoca la fluencia en las lecturas, y la importante sensibilidad a la deformación transversal.

El desarrollo de la ciencia y la tecnología es imposible sin la mejora de los medios de control de diversos parámetros físicos. Esto también se aplica a la galga extensométrica, que ahora es necesaria en condiciones tales como temperaturas criogénicas, campos magnéticos intensos, exposición a radiaciones, etc.

Como es sabido, el efecto piezorresistivo es un cambio en la resistencia eléctrica de un material sometido a tensión mecánica. Se sabe que el cambio en la resistencia eléctrica en este caso se produce por dos razones - debido a los cambios en las dimensiones geométricas y debido a los cambios en la movilidad de los portadores de carga y, en consecuencia, la conductividad del material. La primera razón se refiere a los metales, en los que la movilidad de los portadores de corriente bajo impacto mecánico prácticamente no cambia, y la resistencia cambia debido a los cambios de tamaño durante la deformación - fig. 2.7.

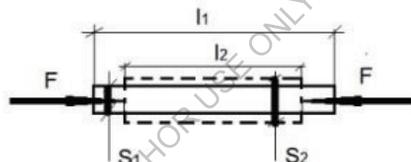


Fig. 2.7. Variación de las dimensiones  $l$  - longitud,  $S$  - sección transversal de la muestra bajo la acción mecánica sobre ella de una fuerza  $F$ .

La resistencia eléctrica  $R$  del material viene determinada por la expresión anterior (2.1):

$$R = \rho l / S,$$

donde  $\rho$  es la resistividad,  $l$  es la longitud de la muestra y  $S$  es el área de la sección transversal.

Como puede deducirse de la fig. 2.7 y de la expresión (2.1), la resistencia eléctrica de la muestra disminuirá bajo compresión debido a una disminución de la longitud  $\Delta l = l_1 - l_2$  y a un aumento del área de la sección transversal  $\Delta S = S_2 - S_1$ , y aumentará bajo tensión.

En semiconductores con red cúbica, para el caso general en que la dirección de la tensión mecánica  $\sigma$  y la densidad de corriente  $j$  son ángulos arbitrarios, el efecto piezorresistivo se describe teóricamente mediante coeficientes piezorresistivos  $\pi_{ij}$  ( $\pi = \Delta\rho/\rho_0 X$ , donde  $\Delta\rho$  es el cambio de resistividad,  $\rho_0$  es la resistividad inicial,  $X$  es la tensión mecánica) o

elastorresistivos  $m_{ij}$ , que son tensores de cuarto rango. Estos coeficientes están relacionados entre sí a través de los coeficientes de maleabilidad y los módulos elásticos. Para los cristales de la clase de simetría a la que pertenece el silicio, basta con conocer tres coeficientes en el sistema de ejes cristalográficos para describir el efecto piezorresistivo:  $\pi$ ,  $\pi_{1112}$ , y  $\pi_{44}$ , que a veces se denominan coeficientes piezorresistivos principales. Los principales coeficientes piezorresistivos dependen de muchos factores: material, tipo de conductividad, resistividad, nivel de dopaje, temperatura y cantidad de deformación mecánica (tensión).

Por ejemplo, en la bibliografía se conocen varias combinaciones de coeficientes de piezorresistencia para direcciones de tensión mecánica y densidad de corriente que coinciden con determinados ejes cristalográficos. Los tres principales coeficientes de piezorresistencia pueden determinarse mediante tres mediciones en diferentes direcciones. El tensor completo de piezorresistencia  $\pi_{ijkl}$  se define como sigue:

$$\frac{\Delta\rho_{ij}}{\rho_0} = \sum_{kl}^3 \pi_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (2.10),$$

donde  $\sigma_{kl}$  es el tensor de tensión,  $\Delta\rho_{ij}$  es el tensor de resistividad. Se sabe que el tensor de tensión es un tensor simétrico y tiene seis componentes independientes. Lo mismo ocurre con el tensor de resistividad.

Teniendo esto en cuenta, en un espacio de seis dimensiones, podemos obtener:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = \sum_{j=1}^6 \pi_{ij} \sigma_j, i=1,2,\dots,6 \quad (2.11)$$

Para *n-Si* a granel con dopaje uniforme y  $\rho = 11,7$  Ohm-cm, se dan los siguientes valores en artículos científicos:  $\pi_{11} = -102,2 \cdot 10^{-112}$  /N,  $\pi_{12} = 53,7 \cdot 10^{-112}$  m /N,  $\pi_{112} = -13,6 \cdot 10^{-112}$  /N, y para *p-Si* con  $\rho = 7,8$  Ohm-cm,  $\pi_{11} = 6,6 \cdot 10^{-11}$  m<sup>2</sup> /N,  $\pi_{12} = -1,1 \cdot 10^{-11}$  m<sup>2</sup> /N,  $\pi_{44} = 138,1 \cdot 10^{-11}$  m /N.<sup>2</sup>

En las capas de silicio con dopaje por difusión, los coeficientes piezorresistivos vienen determinados por la concentración de la impureza en la superficie de la capa  $N_n$  y casi no dependen de la ley de distribución de impurezas. De los resultados obtenidos en diversos trabajos se desprende que, para las capas *n-Si*, el coeficiente  $\pi_{11}$  a temperatura ambiente varía de  $17 \cdot 10^{-112}$  /N ( $N_n = 1 \cdot 10^{21-3}$ ) a  $88 \cdot 10^{-11}$  m<sup>2</sup> /N ( $N_n = 1,8 \cdot 10^{18}$  cm<sup>-3</sup>). Una notable dependencia de la temperatura de  $\pi_{11}$  comienza con  $N_n = 9 \cdot 10^{19-3}$  (aproximadamente 0,1 %/K).

Debido a las peculiaridades de la estructura de bandas *del n-Si*, las hipótesis para el silicio poco dopado son válidas:

$$\pi_{44} \approx 0; \pi_{11} \approx -2 \pi_{12} .$$

A medida que aumenta la concentración de impurezas, se produce una violación de estos supuestos, que debe tenerse en cuenta al analizar las características de los efectos de deformación. En el caso de las capas de difusión, las violaciones se producen en  $N_n \geq 5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  .

Dependiendo de la orientación cristalográfica de la muestra de silicio, se obtienen diferentes combinaciones de coeficientes de piezorresistencia longitudinal y transversal. Esto es importante tenerlo en cuenta a la hora de diseñar galgas extensométricas, especialmente aquellas cuyo elemento sensible operará bajo deformación uniaxial y cuyos componentes del elemento sensible estarán orientados tanto en dirección longitudinal como transversal. Utilizando los datos de la bibliografía, puede calcularse que para las *p-Si de baja aleación*, las relaciones óptimas entre las orientaciones longitudinal y transversal son  $110 \perp 110$ , y para las *n-Si*  $100 \perp 010$ . Para muestras de *p-Si débilmente aleado* con una orientación longitudinal  $\langle 110 \rangle$ , por ejemplo, podemos obtener  $\pi_{11} \approx 72 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 / \text{N}$ , y  $\pi_{\perp} \approx -65 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 / \text{N}$  ( $\pi_{11}$  es el coeficiente de piezorresistencia longitudinal,  $\pi_{\perp}$  es el coeficiente de piezorresistencia transversal).

Analizando los datos conocidos en la literatura, se observa que las relaciones válidas para el *p-silicio puro* se violan para el *p-Si* en un material fuertemente aleado. Al mismo tiempo, la sensibilidad a la deformación para determinadas direcciones puede aumentar en comparación con el silicio puro, lo que puede explicarse por un aumento de la contribución de los agujeros pesados.

Se conocen otros factores que determinan significativamente las características de la galga extensométrica. Por ejemplo, la influencia de sus dimensiones geométricas en los parámetros de la galga extensométrica es significativa. Algunos estudios han demostrado que no toda la deformación se transmite desde el objeto deformado objeto de estudio hasta el elemento sensor de la galga extensométrica, incluso con un aglutinante rígido. La deformación transmitida depende del tamaño de la galga extensométrica, de sus propiedades elásticas y de las propiedades del ligante con el que se fija el sensor a la viga. Este efecto puede tenerse en cuenta mediante el coeficiente de transmisión, cuyo valor (para el caso en que la galga extensométrica esté situada en el centro de la muestra) puede determinarse mediante la fórmula:

$$k_{nep} = 1 - \frac{2}{bl} \left( 1 - e^{-bl/2} \right) \quad (2.12)$$

donde,  $b = \sqrt{GC/EQ}$ ,  $G$  es el módulo de cizallamiento del aglutinante,  $E$  es el módulo elástico del elemento sensible (muestra),  $Q$  es el área de la sección transversal de la muestra,  $C = \frac{2\pi}{\ln 4h_c/h}$ ,  $h$  es el espesor de la muestra,  $h_c$  es el espesor del aglutinante,  $l$  es la longitud de la muestra.

Para el estudio y desarrollo de transductores de medición, se utilizaron finas películas de silicio policristalino dopadas con fósforo y boro mediante implantación iónica en el plano (100) de silicio monocristalino con una capa aislante de  $\text{SiO}_2$ . Tales estructuras pueden ser más avanzadas tecnológicamente cuando se utilizan tecnologías planares para fabricar transductores de medición.

Se midieron experimentalmente la resistividad  $\rho$ , los coeficientes de sensibilidad a la deformación longitudinal  $k_{II} = \Delta\rho_{II}/\rho \cdot \varepsilon_{III}$  (donde  $\Delta\rho_{II}$  es el cambio de resistividad a lo largo de la dirección de deformación  $\varepsilon_{II}$ ), y transversal  $k_{\perp} = \Delta\rho_{\perp}/\rho \cdot \varepsilon_{II}$  (donde  $\Delta\rho_{\perp}$  es el cambio de resistividad perpendicular a la dirección de deformación  $\varepsilon_{II}$ ), coeficientes de piezorresistencia  $\pi_{II} = (\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44})/2$  y  $\pi_{\perp} = (\pi_{11} + \pi_{12} - \pi_{44})/2$ , dependencia de la temperatura y la deformación de los parámetros de los transductores experimentales.

Los coeficientes de piezorresistencia se midieron utilizando una viga de acero en voladizo de igual resistencia a la flexión, sobre la que se pegó la muestra con adhesivo BF-2, y cargando directamente las muestras. Comparando los resultados obtenidos, es posible calcular el valor del coeficiente de transferencia de deformación y evaluar su coincidencia con el calculado teóricamente mediante la fórmula (2.12). Las películas utilizadas son del tipo n sobre un plano de silicio (100). El espesor de las películas es de 0,6  $\mu\text{m}$ , la concentración de la impureza de fósforo aleante es de  $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . La resistividad es de 0,013 ohm-cm. Las mediciones se realizaron en muestras (galgas extensométricas) con unas dimensiones de  $8 \times 0,6 \times 0,4$  mm con una película en la superficie.

Cuando se mide con una viga y se utiliza el valor de la deformación calculado mediante la conocida fórmula  $\varepsilon_b = h\delta / l_b^2$  (donde  $h$  es el espesor de la viga,  $l_b$  es la longitud de la viga,  $\delta$  es el desplazamiento del extremo libre de la viga), los valores de los coeficientes de sensibilidad a la deformación  $k_{II}^{b_{II}} (\varepsilon_{II} <110>; J_{II} <110>)$  i  $k_{\perp}^{b_{\perp II}} (\varepsilon_{\perp II} <110>; J_{\perp} <110>)$  -27,3 y -2.8, respectivamente.

Al medir la sensibilidad a la deformación mediante el método de carga directa, la muestra se colocó en voladizo y se aplicó una carga de flexión. El error de medición de los coeficientes por este método no superó el 4%. A temperatura ambiente se obtuvieron los siguientes valores:  $\pi_{\parallel} = -24,9$  y  $\pi_{\perp} = -2,4$ . Si utilizamos los coeficientes de elasticidad conocidos para el silicio y calculamos  $k$ , obtenemos  $k_{\parallel} = -39,1$ ,  $k_{\perp} = -3,8$ . Comparando, obtenemos el coeficiente de transmisión experimental  $k_{tr}^e = 0,71$

A título comparativo, se realizaron mediciones utilizando el método de carga directa. Sustituyendo los parámetros de las condiciones de medición en la fórmula (2.12) (para  $h_c = 0,15$  mm), obtenemos el valor teórico  $k_{tr} = 0,68$ . Así pues, los parámetros de transferencia de deformación determinados experimentalmente y teóricamente coinciden prácticamente.

También se comprobó que en las películas *de p-Si* implantadas con iones con una concentración de impurezas de  $N_p = (10 \cdot 10^{18}) \text{ cm}^{-3}$ , por ejemplo, los coeficientes de sensibilidad a la deformación longitudinal y transversal  $k$  ( $k = \Delta\rho/\rho_0 \varepsilon$ ,  $\varepsilon$  es la deformación mecánica relativa) para la orientación longitudinal  $\langle 100 \rangle$  tenían un valor próximo y eran como mínimo  $k = 30$ . Esto puede explicarse por la policristalinidad de la película y las peculiaridades de la estructura de bandas *del silicio p*, que pueden determinar el efecto de deformación mediante agujeros ligeros en un material débilmente aleado, mientras que su contribución disminuye en un material fuertemente aleado.

El mecanismo de transmisión de la deformación conduce al hecho de que, como establece la relación entre la anchura  $d$  del sensor y la altura  $h$   $d/h < 2$ , la deformación transversal del objeto prácticamente no se transmite a su superficie. Esta propiedad se utiliza para la fabricación de galgas extensométricas experimentales (transductores de medición).

Para la fabricación de transductores mecánicos de deformación se utilizaron películas de polisilicio de conductividad *tipo n* y tipo *p*, de  $0,6 \mu\text{m}$  de espesor y con niveles de dopaje  $(1 \cdot 10^{17} - 5 \cdot 10^{19}) \text{ cm}^{-3}$ . Básicamente, en el experimento se utilizaron muestras con películas tipo *p* de orientación longitudinal  $\langle 100 \rangle$  y transversal  $\langle 010 \rangle$ , ya que para el *silicio p* policristalino altamente dopado los coeficientes transversal y longitudinal para esta orientación se muestran cercanos en valor. La impureza de aleación para *el p-silicio* fue el boro.

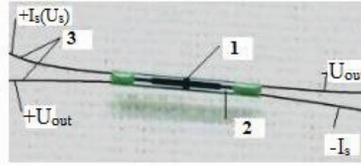


Fig. 2.8. Sensor de deformación. 1 - microcircuito sensible a la deformación; 2 - sustrato; 3 - terminales eléctricos;  $I_s (U_s)$  - corriente o tensión de alimentación,  $U_{out}$  - tensión de salida.

La Fig. 2.8 muestra una imagen de un tipo de transductor de deformación (tensión) y la polaridad de la fuente de alimentación y los dispositivos de medición. Consiste en un elemento sensor integral 1 fabricado a base de una película de silicio depositada sobre un sustrato de silicio monocristalino 2 con una capa de óxido en la superficie.

Los conductores eléctricos 3 están hechos de alambre de aluminio  $d=80 \mu\text{m}$ , cuyos extremos están equipados con tiras de metal que se pueden soldar con soldadura convencional. El diseño y la ejecución integral del elemento sensor de detección proporcionan la compensación térmica de los parámetros principales, la compensación de la influencia del campo magnético y la ausencia de sensibilidad a la deformación transversal. El tamaño de la base del sensor es de 8 mm, las resistencias eléctricas de entrada  $R_{in}$  y de salida  $R_{out}$  dependen del nivel de dopaje y del grosor de la película y están en el rango de (200 - 3000) Ohm, la corriente de alimentación depende del valor de la resistencia y suele estar en el rango de (1 - 10) mA. La diferencia en la resistencia eléctrica de los sensores de un lote no supera el 5%, y si es necesario, se puede formar un lote de sensores de características técnicas casi idénticas.

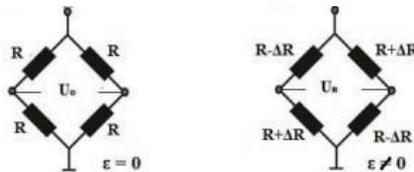


Fig. 2.9. Diagrama esquemático del elemento sensor de galgas extensométricas.

El principio de funcionamiento de la galga extensométrica consiste en modificar la resistencia eléctrica de los elementos resistivos del circuito integrado cuando se aplica una deformación mecánica a lo largo del eje del

sensor (fig. 2.9), compensar el circuito y, como resultado, generar una tensión eléctrica  $U_{out}$  en los contactos de medición cuando el sensor se alimenta con corriente o tensión (véase fig. 2.9). Tras preprogramar el sensor, es decir, obtener la dependencia de la tensión de salida  $U_{out}$  del valor de la deformación mecánica, la deformación del objeto se determina mediante el valor de la tensión de salida del sensor fijado rígidamente al objeto:

$$\varepsilon = (U_{out} - U_o)/k \quad (2.13)$$

donde  $U_{out}$  es la señal de salida del sensor tras la aparición de la deformación  $\varepsilon$  del objeto en estudio,  $U_o$  es la señal de salida inicial medida tras montar el sensor en el objeto,  $k = \Delta U_{out} / \Delta \varepsilon$  es la sensibilidad a la deformación del sensor.

Para montar el sensor en el objeto de ensayo, se pueden utilizar los adhesivos BF-2, BC-350 y otros, que se utilizan ampliamente en la medición de la deformación y proporcionan suficiente rigidez de montaje. La permisibilidad de utilizar este aglutinante puede comprobarse por el valor de la fluencia de las lecturas del sensor tras cargar la viga de ensayo, que no debe superar el error de medición admisible.

A continuación se presentan los resultados de un estudio más detallado de los transductores de medición con  $R_{in} = 1,7 \text{ k}\Omega$  ( $N_p = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ). La sensibilidad a una corriente de alimentación de 2 mA es de aproximadamente  $42 \text{ }\mu\text{V/mln}^{-1}$  ( $42 \text{ }\mu\text{V/URD}$ ). El valor de la señal de salida cero (inicial) del sensor  $U_o$  es de  $\sim 6,2 \text{ mV}$  y puede ajustarse cerca de cero si es necesario. La dependencia de la temperatura de la sensibilidad a la deformación es ligeramente superior a  $0,02 \text{ \% /K}$ ,  $U_o \sim 8 \text{ }\mu\text{V/K}$ ,  $R \sim 0,03 \text{ \% /K}$ . Las características pueden modificarse, por ejemplo, aumentando la corriente de alimentación (sin sobrecalentamiento ni ruidos inaceptables), para aumentar la sensibilidad.

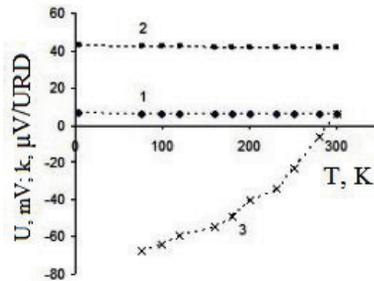


Fig. 2.10. Dependencias de temperatura de la señal de salida cero (deformación relativa  $\varepsilon = 0$ ) (1), sensibilidad a la deformación  $k = \Delta U_{out} / \Delta \varepsilon$  (2) y la señal de salida del sensor pegado a una placa de acero (3).

La Fig. 2.10 muestra la dependencia de la temperatura de la señal de salida cero (deformación  $\varepsilon = 0$ ) (1), la sensibilidad a la deformación  $k = \Delta U_{out} / \Delta \varepsilon$  (2), y la señal de salida del sensor pegado a la placa de acero (3). Este último controla las tensiones térmicas.

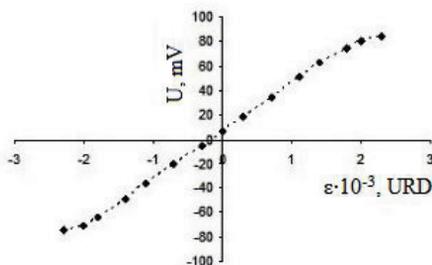


Fig. 2.11. Dependencia de la tensión de salida  $U_{out}$  del valor de la deformación aplicada.

La Fig. 2.11 muestra la dependencia de la tensión de salida  $U_{out}$  del valor de la deformación aplicada. El gráfico indica una buena linealidad de la característica hasta deformaciones de aproximadamente  $1 \cdot 10^3$  URD. La sensibilidad a la deformación del sensor investigado, como puede verse en el gráfico, es igual a  $42 \mu\text{V}/\text{URD}$ .

Si consideramos el funcionamiento de una galga extensométrica de tipo puente, en la que un par de resistencias tiene un signo del efecto de deformación y el otro tiene el signo contrario (siempre que las resistencias sean iguales), podemos obtener la siguiente expresión para la tensión en la diagonal del puente:

$$U = I R_{o0} [(k_{\parallel} + k_{\perp})/2] \varepsilon \quad (2.14).$$

Si  $|k_{\parallel}| = |k_{\perp}| = k$ , entonces  $U = I_o R_o k \varepsilon$ ,

donde  $k$  es el coeficiente de sensibilidad a la deformación del brazo del puente (resistencia),  $I_o$  es la corriente de alimentación del circuito del puente,  $R_o$  es la resistencia inicial de la resistencia del circuito.

Es decir, la tensión de salida a una corriente de alimentación constante es lineal en la región de linealidad de la dependencia de  $k(\varepsilon)$  de la galga extensométrica o la constancia del valor de  $k$ . La no linealidad experimental observada después de  $\varepsilon > 1 \cdot 10^3$  URD ( $\text{mln}^{-1}$ ) puede relacionarse tanto con

las propiedades electrofísicas de la película de silicio sensible como con las propiedades del aglutinante.

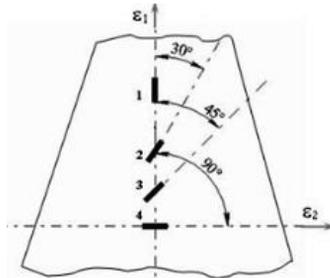


Fig. 2.12. Disposición de la galga extensométrica en el estudio del caso de divergencia del eje del sensor y la dirección de la deformación principal  $\epsilon_1$ .

También estudiamos el error de las mediciones de deformación mediante galgas extensométricas en condiciones en las que el eje de la base del sensor no coincide con la dirección de la deformación principal del objeto. La Fig. 2.12 muestra la dirección de la deformación principal  $\epsilon_1$  de la viga y la disposición de los sensores en la viga. Los sensores se fijaron con pegamento BF-2. El eje base del sensor 1 coincide con la dirección de la deformación principal  $\epsilon_1$ , el sensor 2 está situado en un ángulo de  $30^\circ$  con respecto a  $\epsilon_1$ , el sensor 3 en un ángulo de  $45^\circ$  y el sensor 4 en un ángulo de  $90^\circ$  (coincidiendo con la deformación principal  $\epsilon_2$ ). Todos los sensores se tomaron del mismo lote producido en el mismo modo tecnológico.

El valor de la deformación medida  $\epsilon_e$  se determinó mediante la fórmula (2.13). Las deformaciones calculadas utilizadas para la comparación con las obtenidas experimentalmente se determinaron mediante la fórmula:

$$\epsilon_\varphi = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} \cos 2\varphi \quad (2.15)$$

donde  $\varphi$  es el ángulo entre la dirección  $\epsilon_1$  y la dirección para la que se calcula la deformación.

La deformación  $\epsilon_2$  se calculó mediante la fórmula  $\epsilon_2 = -\mu\epsilon_1$  (donde  $\mu$  es la relación de Poisson). Los resultados del estudio se muestran en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Dependencias de las deformaciones  $\epsilon_\varphi$  calculada y  $\epsilon_e$  experimental con respecto a la orientación del sensor en relación con el eje principal.

$\varphi$	$0^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$	$90^\circ$
$\varepsilon_\varphi$ , URD	$1 \cdot 10^3$	$0,68 \cdot 10^3$	$0,37 \cdot 10^3$	$-0,25 \cdot 10^3$
$\varepsilon_\varepsilon$ , URD	$1 \cdot 10^3$	$0,64 \cdot 10^3$	$0,36 \cdot 10^3$	$-0,24 \cdot 10^3$

La mayor diferencia entre  $\varepsilon_\varphi$  y  $\varepsilon_\varepsilon$  se observa para  $\varphi = 30^\circ$  y es del 6%, lo que está al nivel del error experimental. Los resultados indican que la sensibilidad a la deformación transversal de los sensores es insignificante.

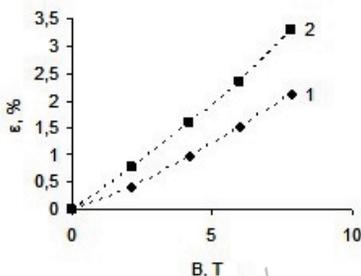


Fig. 2.13. Dependencia del error de medición que surge en un campo magnético a 4,2 K: 1 - sensor sin deformar, 2 - deformado a  $\varepsilon = 10^3$  URD.

La Fig. 2.13 muestra los resultados del estudio de uno de los sensores en un campo magnético a  $T = 4,2$  K. La curva (1) corresponde al valor de deformación que parece producirse cuando un campo magnético actúa sobre un sensor no deformado ( $\varepsilon = 0$ ), y la curva (2) sobre un sensor predeformado a  $\varepsilon = 1 \cdot 10^3$  URD. Un campo de 7 T conduce a un error de aproximadamente el 3%.

Se sabe que la precisión de las mediciones depende en gran medida de un parámetro como la fluencia de las lecturas. La fluencia viene determinada por la rigidez de la estructura del sensor y del aglutinante y está causada por la deformación plástica del aglutinante (pegamento) bajo deformación mecánica. Por regla general, en los sensores semiconductores, la fluencia es significativamente mayor que en los sensores de láminas metálicas.

Para los sensores considerados, la fluencia es probablemente el principal inconveniente y se debe al diseño más bien rígido del transductor. La miniaturización y la optimización de la forma del sensor, así como la selección de un aglutinante, pueden ser formas de reducir la fluencia.

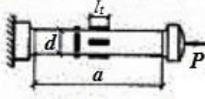
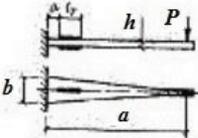
## **2.11. Transductores de deformación y presión para medir la fuerza y la presión**

Los transductores de fuerza y presión con bandas extensométricas se utilizan en una gran variedad de aplicaciones, ya que pueden medir fuerzas y presiones en el rango de varios mili- a varios MN utilizando elementos elásticos (vigas) de diversas formas y tamaños. Al diseñar galgas extensométricas (transductores de presión y fuerza), se presta especial atención a garantizar la menor deformación posible del sistema que percibe la fuerza y la presión, y a compensar la influencia de los componentes laterales de la fuerza que surgen de las excentricidades. Para evitar las excentricidades, se suelen utilizar soportes intermedios de bolas y segmentos y diafragmas elásticos flexibles a lo largo y rígidos a lo ancho del eje de fuerza. Para reducir la histéresis en los puntos de acoplamiento de los elementos en los transductores de fuerza y presión, se recomienda utilizar juntas elásticas.

Cuando se miden grandes fuerzas de 10 kN a 10 MN, se utilizan diversas formas de diseño de elementos elásticos (vigas) en los transductores de fuerza y presión. El más sencillo es el elemento elástico de barra utilizado para medir fuerzas de 50 kN a 5 MN. Para garantizar una distribución uniforme de las tensiones a lo largo de la sección transversal del elemento elástico en la zona de la galga extensométrica, la relación entre la altura y la dimensión transversal debe ser como mínimo de 3. El aumento de esta relación por encima de 5 puede provocar una pérdida de estabilidad. Para aumentar la estabilidad, se utiliza un diafragma elástico de centrado o un sistema de juntas elásticas.

Los transductores de fuerza y presión para medir fuerzas pequeñas (hasta 10 kN) tienen, por regla general, elementos elásticos de viga. También están muy extendidos los dinamómetros de deformación en forma de anillos curvables que funcionan con una deformación de dos dígitos. Los elementos elásticos en forma de anillo tienen una sensibilidad relativamente alta con una rigidez suficiente respecto al plano de acción de la fuerza.

Tabla 2.3. Esquemas de cálculo y fórmulas de caracterización de algunos elementos elásticos simples de transductores de fuerza y presión.

Type of elastic element	Elastic element diagram	Calculation formula
Rods	 <p><math>a &gt; 5d; l_t &lt; a/5</math></p>	$\frac{4P10^6}{\pi d^2 E}$
Beam	 <p><math>a_t &gt; b; l_t &lt; a/2</math></p>	$\frac{6Pa10^6}{bh^2 E}$

## 2.12. Transductores electromecánicos

Los transductores electromecánicos se fabrican en forma de dispositivo de contacto mecánico que funciona bajo la acción de una magnitud física cambiante, que se mide. Pueden fabricarse en diferentes diseños. Normalmente, los contactos tienen una forma simple y funcionan de modo discreto, como, por ejemplo, un interruptor bimetalico (fig. 2.13)

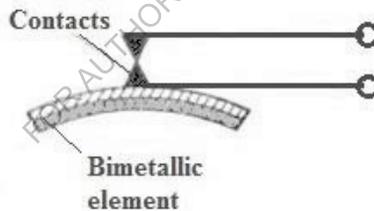


Fig. 2.13. Ejemplo de elemento bimetalico que funciona como transductor electromecánico.

Cuando el valor de la magnitud medida supera el punto de conmutación, el contacto se abre o se cierra, dando lugar a una señal de salida del transductor en el circuito cerrado o abierto.

Los transductores electromecánicos suelen ser digitales (discretos) porque sus contactos sólo pueden estar en dos posiciones y representan un elemento on-off.

## 2.13. Transductores de aceleración. Acelerómetros.

Los acelerómetros son transductores que miden la aceleración que adquiere un objeto cuando se desplaza respecto a su posición inicial. Los acelerómetros se utilizan para medir la aceleración de desplazamientos horizontales, aceleraciones causadas por la gravedad terrestre y otras. Hoy en día, los acelerómetros se fabrican en serie sobre la base de sistemas microelectromecánicos (MEMS).

Veamos los principios de funcionamiento de los principales circuitos de acelerómetros. La Fig. 2.14 muestra algunos diseños de acelerómetros de galgas extensométricas. El acelerómetro más sencillo (a) consta de una base, un elemento sensor en voladizo con galgas extensométricas y una masa inercial en el extremo. El cálculo de un acelerómetro de este tipo se reduce a determinar la sección transversal y la envergadura de la viga en voladizo para la acción de una fuerza igual al producto de la masa por la aceleración medida. Los acelerómetros de este tipo se utilizan para medir aceleraciones en los rangos de 0...20g a 0...20000g con un rango de frecuencia de 0...15 a 1500 Hz. La frecuencia natural de los acelerómetros de tipo voladizo viene determinada por la rigidez del voladizo y la masa inercial. La gama de frecuencias puede ampliarse utilizando elementos elásticos sin masa concentrada. La fuerza que actúa sobre un acelerómetro de este tipo viene determinada por el producto de la aceleración medida por la masa del voladizo.

El acelerómetro mostrado en la fig. 2.14.b) difiere en que tiene un elemento sensor de bastidor con una masa inercial apoyada entre dos vigas en voladizo. En comparación con los acelerómetros de tipo voladizo, en este caso se puede conseguir un factor de conversión más elevado a las mismas frecuencias naturales. El elemento de bastidor está diseñado para sujetarse rígidamente a los puntales en ambos extremos. Los acelerómetros de baja frecuencia suelen tener amortiguación líquida, para lo cual el elemento sensor se encuentra en una carcasa sellada rellena, por ejemplo, de líquido de polixiloxano.

Los acelerómetros de alta frecuencia tienen una masa inercial, que está conectada a la base a través de un medidor de fuerza de sección sólida o tubular. El acelerómetro está orientado de forma que la aceleración medida actúe a lo largo del eje del elemento sensor. El cálculo de un acelerómetro de este tipo se reduce a determinar las dimensiones del medidor de fuerza cargado con una fuerza igual al producto de la aceleración y la masa.

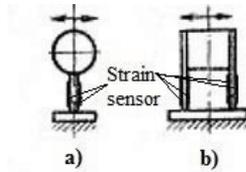


Fig. 2.14. Ejemplos de algunos diseños de acelerómetros.

#### 2.14. Acelerómetro de haz semiconductor integral

Las tecnologías de la microelectrónica moderna permiten crear acelerómetros miniaturizados con características metrológicas estables. Esto hace posible aplicarlos en una amplia variedad de dispositivos técnicos y resolver diversos problemas científicos, técnicos y de producción.

Como ejemplo, consideremos el conocido **acelerómetro de silicio de haz integrado (transductor MEMS)**. Se trata de un diseño micro-miniatura que se muestra en la fig. 2.15. El acelerómetro consiste en un cristal de silicio orientado en el plano cristalográfico óptimo en términos de propiedades tensométricas. En el cristal se fabrica, mediante grabado anisotrópico, una viga con un concentrador de tensiones mecánicas y galgas extensométricas y una parte masiva, la masa inercial, que puede estar hecha del mismo silicio junto con la viga o de otro material. La viga está separada de la base por un orificio ranurado. El cristal de silicio está cerrado en la parte superior e inferior por cubiertas de vidrio con cavidades grabadas, que forman una cámara cerrada que protege la viga y la célula de deformación del entorno exterior y limita el movimiento libre de la viga bajo sobrecargas. Las cubiertas están unidas al silicio mediante un ajuste anódico. Además, en la cubierta superior se fabrican almohadillas de contacto a las que se conectan los cables externos. Según informan los autores, las dimensiones del acelerómetro de ejemplo considerado son  $2 \times 3 \times 0,6$  mm, masa 0,02 g, rango de aceleraciones medidas de 0,1 a  $500 \text{ m/s}^2$ , en el rango de frecuencias de 0 a 100 Hz.

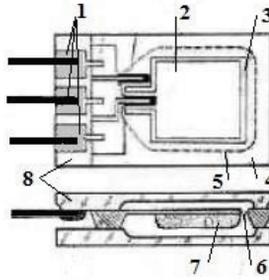


Fig. 2.15. Ejemplo de construcción del acelerómetro de viga integral. 1 - almohadillas de contacto; 2 - haz; 3 - entrehierro; 4 - silicón; 5 - muesca en la cubierta; 6 - entrehierro; 7 - masa inercial; 8 - cubierta de cristal

### 2.15. Transductores de medición de vibraciones. Vibrómetros

Los transductores inerciales tensores de medición de vibraciones (vibrómetros) pueden construirse según los esquemas de los acelerómetros y se diferencian de estos últimos únicamente por la relación entre las frecuencias naturales y las frecuencias de los procesos estudiados. Dado que las masas inerciales de los vibrómetros son relativamente mayores y que el rango de amplitud debe corresponder a la amplitud de las vibraciones medidas, el diseño de los vibrómetros de baja frecuencia y de los acelerómetros es también algo diferente.

La figura 2.16 muestra un esquema de un vibrómetro inercial en el que la masa inercial se apoya sobre cojinetes. La masa se mantiene en estado de equilibrio mediante un muelle de un elemento elástico (suspensión) y sus movimientos provocan la deflexión de una viga con galgas extensométricas del transductor de desplazamiento 4. Los vibrómetros de este diseño pueden tener una frecuencia natural del orden de varios hercios. Los vibrómetros de baja frecuencia se caracterizan por una cierta inestabilidad de la referencia cero debido a la influencia de las fuerzas de fricción en los cojinetes, lo que provoca un rango de medición limitado.

También existen vibrómetros con masa inercial en forma de péndulo. En él, la masa inercial en la palanca se mantiene en la posición de equilibrio mediante dos muelles o elementos sensores elásticos de transductores de desplazamiento.

En los vibrómetros de contacto, la vibración se transmite al elemento sensor a través de una varilla. Durante las mediciones, el cuerpo del vibrómetro se sujeta con las manos o se refuerza sobre un soporte fijo.

Los vibrómetros en forma de sondas de vibración de contacto se utilizan en el estudio de estructuras, que conectan el objeto de estudio y algún soporte fijo. Como sondas de vibración es posible utilizar transductores tensores de desplazamientos de cualquier tipo, cuyo rango de medición corresponde a los desplazamientos de vibración del objeto de investigación. Una variante de los palpadores de contacto son los palpadores manuales. Durante la medición, el operador sujeta el cuerpo del palpador con las manos, presionando la punta contra el objeto de forma que el transductor de desplazamiento de galgas extensométricas se encuentre en el centro del rango de medición.

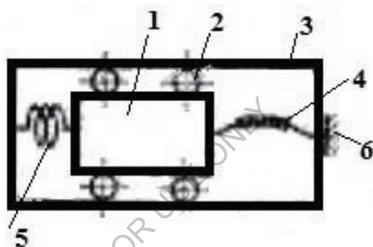


Fig. 2.16. Ejemplo de diseño de un vibrómetro. 1- masa inercial, 2 - cojinetes, 3 - carcasa, 4 - viga con galgas extensométricas, 5 - muelle, 6 - montaje de la viga.

### 2.16. Transductor de presión de galga extensométrica de silicona

Las membranas de silicio para la creación de transductores de presión se utilizan de forma bastante generalizada, se han estudiado bien los efectos de tensión en dichas membranas con diferentes orientaciones cristalográficas, se han elaborado tecnologías de trabajo con ellas, de creación de elementos sensibles a la tensión en ellas y de su conexión en circuitos integrados. El uso del silicio y las modernas tecnologías microelectrónicas permiten crear sensores de presión en miniatura para aplicaciones médicas y otras tareas especiales en diversos campos de la ciencia y la tecnología.

Consideremos uno de los transductores integrados de presión absoluta de galgas extensométricas conocidos y descritos en la bibliografía. Tiene la estructura que se muestra en la fig. 2.17. El diseño consiste en una cubierta

plana de vidrio, en la que se ha grabado un rebaje, y un cristal de silicio con una fina membrana, en la que se han realizado cuatro galgas extensométricas, conectadas en un circuito de puente. La membrana está rodeada por una gruesa base anular de silicio. Debajo de la membrana hay un rebaje en la placa de vidrio, y la propia placa está unida al cristal de silicio mediante un ajuste anódico. La unión anódica se lleva a cabo calentando las placas de vidrio y silicio hasta 400 °C y aplicando posteriormente una tensión de 600 V al silicio en relación con la placa de vidrio conectada a tierra. El ajuste anódico proporciona una conexión completamente hermética, de modo que el hueco de la placa de vidrio junto con la membrana forman una cámara hermética cerrada.

Según los autores las dimensiones externas del transductor pueden ser: 1,5x2,0x0,2 mm. La sensibilidad es de 0,2 mV/ (kPa· V). La deriva térmica es equivalente a 250 Pa por 1 °C, y la tensión de salida varía linealmente hasta una presión de 40 kPa.

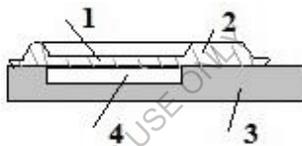


Fig. 2.17. Ejemplo de estructura de transductor de presión absoluta integral de silicio: 1 - membrana de silicio; 2 - base; 3- placa de vidrio; 4 - cámara hermética.

## 2.17. Algunos sensores de presión disponibles en el mercado. Sapphire, Motorola

Sensor de presión (transductor) Sapphire. El transductor de presión del complejo Sapphire 22 está diseñado para la conversión continua del valor del parámetro medido - absoluto, manométrico, vacío, presión hidrostática y diferencia de presión de medios neutros y agresivos, así como la conversión de nivel en una señal de salida de corriente unificada. El transmisor de presión está diseñado para funcionar en sistemas de control automático, regulación y gestión de procesos tecnológicos en diversas industrias, incluida la aplicación en la producción de explosivos de la industria del petróleo y el gas, en instalaciones de energía nuclear (EAU) y para la exportación.

El transmisor de presión consta de unidades de medición y electrónica. Todos los convertidores tienen una unidad electrónica unificada y solo difieren en el diseño de la unidad de medición.

El principio de funcionamiento de los sensores de presión Sapphire 22 se basa en el efecto de la presión medida (diferencia de presión) sobre las membranas de la unidad de medición, lo que provoca la deformación del elemento sensor elástico y un cambio en la resistencia de las resistencias de las galgas extensométricas. El cambio en la resistencia se convierte en una señal eléctrica, que se transmite desde la galga extensométrica al convertidor electrónico. Además en forma de señal unificada de corriente estándar.

El transmisor de presión tiene versión de protección contra explosiones. Transmisor de presión a prueba de explosión está diseñado para su instalación en zonas peligrosas de los locales y las instalaciones al aire libre, de acuerdo con los documentos que regulan el uso de equipos eléctricos en zonas peligrosas.

**Sensores de presión Motorola.** Motorola es ampliamente conocida por la creación y producción de diversos tipos de sensores. Los últimos desarrollos son sensores de presión semiconductores. Los sensores se caracterizan por su pequeño tamaño, facilidad de uso. El diseño utiliza membranas desarrollado un nuevo elemento sensor patentado. Este elemento sensor funciona según el principio de un sensor Hall. En ella, bajo la acción de la tensión mecánica en los terminales de salida del sensor aparece una tensión eléctrica proporcional a la presión. La tensión aparece debido a la deformación no homogénea de elementos resistivos del sensor de presión. Como se ha señalado, el sensor de presión con el diseño propuesto del elemento sensor tiene ventajas tales como la mejora de la linealidad, la simplicidad en la compensación térmica, etc. Según el tipo de presión a medir, se fabrican sensores de presión diferencial, relativa y absoluta.

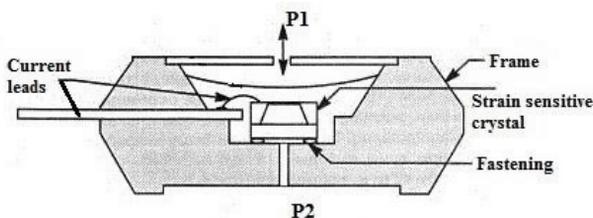


Fig. 2.18. Diseño general de uno de los transductores de presión Motorola.

Transductor de presión piezoeléctrico. Esquema general del dispositivo. El efecto piezoeléctrico, que se utiliza en los transductores, es la aparición de cargas eléctricas en la superficie de algunos dieléctricos cristalinos (cuarzo, titanato de bario) bajo la acción de una tensión mecánica o deformación.

La Fig. 2.19 muestra el esquema de un dispositivo para medir la presión de un gas utilizando un transductor piezoeléctrico. La presión medida  $P$  actúa sobre el diafragma 1- inferior del cuerpo del transductor. Dos placas de cuarzo 2 están intercaladas entre tres separadores metálicos 3. Una bola 4 se coloca entre la tapa y la parte superior para garantizar una distribución homogénea de la presión medida. A la almohadilla central -el electrodo negativo- se fija un cable 5 que pasa a través de un manguito aislante.

La diferencia de potencial entre el electrodo negativo y la carcasa es proporcional a la presión medida. La presión viene determinada por la diferencia de potencial medida.

Dado que las cargas desaparecen cuando se elimina la presión, deben utilizarse circuitos de medición adecuados para que la carga no tenga tiempo de cambiar significativamente.

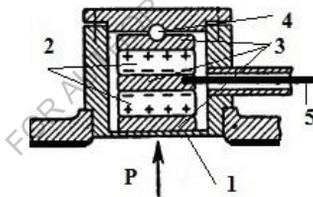


Fig. 2.19. Dispositivo de transductor piezoeléctrico para la medición de la presión del gas. Esquema general del dispositivo.

## 2.18. Transductores de desplazamiento

Uno de los transductores de desplazamiento sencillos es un divisor potenciométrico resistivo, en el que el contacto deslizante o deslizador del potenciómetro se desplaza a lo largo del elemento resistivo (fig. 2.20). El deslizador está conectado mecánicamente a un rodillo sensible (clavija), que sigue los movimientos del objeto de medición. Cuando se aplica tensión al elemento resistivo, la tensión eliminada del deslizador del potenciómetro indica el valor del movimiento.

Los transductores de desplazamiento angular lineales y rotativos basados en el principio de división de tensión son bastante comunes. Los transductores angulares se utilizan para medir desplazamientos angulares de unos pocos grados a unas pocas vueltas de disco, mientras que los transductores lineales trabajan en el rango de unos pocos milímetros a unos pocos metros.

La forma del elemento resistivo determina la resolución del transductor. Cuando este elemento es de alambre, la resolución depende del número de vueltas de alambre por unidad de longitud del elemento. Otros tipos de transductores basados en la división de tensión utilizan una película de metal, carbono, etc. para crear el elemento resistivo, lo que permite una resolución teóricamente infinita.

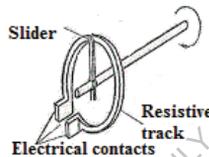


Fig. 2.20. El dispositivo potenciométrico más sencillo para la detección del desplazamiento angular

**Transductores de desplazamiento capacitivos.** Los transductores de desplazamiento capacitivos funcionan según el principio de un condensador, formado por dos placas separadas por un dieléctrico. Un cambio en el tamaño de las placas, la distancia entre ellas o entre ellas y el dieléctrico provoca un cambio en la capacitancia.

La figura 2.21 muestra uno de los principios de funcionamiento de un transductor de desplazamiento capacitivo. En él, la capacitancia se modifica moviendo el dieléctrico entre las dos placas del condensador. También existen otros principios: mover una placa respecto a la otra, cambiar el área de superposición de las placas... También se conoce un diseño en el que el dieléctrico, permaneciendo inmóvil, cambia sus características.

En este principio se basan los sensores de proximidad capacitivos y los interruptores de proximidad capacitivos, capaces de detectar el objetivo a cierta distancia del dispositivo. El mismo principio subyace en el transmisor capacitivo de nivel de líquido. Varía la constante dieléctrica como resultado de los cambios en el nivel del líquido.

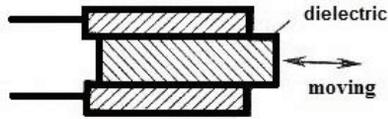


Fig. 2.21. Principio de funcionamiento del transductor de desplazamiento capacitivo

**Transductores inductivos de desplazamiento.** La autoinductancia de una bobina cambia cuando un cuerpo magnéticamente permeable se acerca a ella, por lo que el desplazamiento del cuerpo con respecto a la bobina puede determinarse utilizando una bobina de detección con autoinductancia. Los transductores de medición que utilizan este principio suelen ser sin contacto (fig. 2.22.a). También existen transductores de desplazamiento inductivos acoplados (fig. 2.22.b), en los que el núcleo de la bobina está acoplado mecánicamente al cuerpo cuyo desplazamiento se está midiendo. Los transductores sin contacto del tipo descrito se utilizan como base para la construcción de sensores de proximidad inductivos e interruptores de proximidad inductivos.

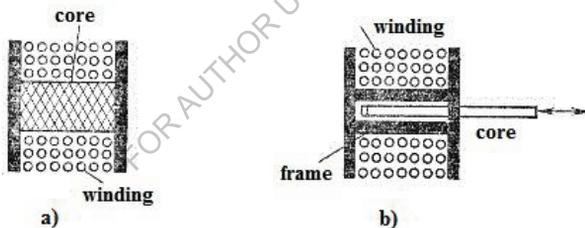


Fig. 2.22. Transductores inductivos de desplazamiento: a - sin contacto; b - conectados

**Transductores magnéticos de desplazamiento.** Los transductores de este tipo se basan en la utilización del cambio de resistencia magnética entre dos o más bobinas magnéticas, en función del desplazamiento del cuerpo. El desplazamiento provoca un cambio en la tensión de salida del transductor. También pueden utilizarse campos magnéticos constantes o alternos, cuya magnitud varía linealmente. En este caso, un sensor de campo magnético colocado en el cuerpo que se desliza seguirá el desplazamiento.

**Transductores inductivos de desplazamiento.** El principio de funcionamiento de los transductores inductivos se basa en la dependencia de

la inductancia o inductancia mutua de los devanados de la posición, las dimensiones geométricas y el estado magnético de los elementos constitutivos de su circuito magnético.

De la teoría (y las fórmulas matemáticas) se desprende que la inductancia y la inductancia mutua pueden modificarse influyendo en las dimensiones geométricas (longitud, sección transversal) de la sección de aire del circuito magnético, la permeabilidad magnética y las pérdidas en el núcleo magnético.

La corriente alterna que circula por la bobina crea un campo magnético alterno. Cuando se coloca en él un material conductor de la electricidad (metal, etc.), parte de la energía del campo magnético se transfiere al objeto metálico. Esta energía transferida induce corrientes parásitas (corrientes de Foucault) en la superficie del objeto. Su magnitud depende del tamaño, la composición del metal y la ubicación del objeto con respecto al campo magnético. Las corrientes de Foucault en el objeto crean su propio campo magnético, que interactúa con el campo primario generado por la bobina. Debido a este efecto, la inductancia efectiva de la bobina disminuye y, en consecuencia, cambia la frecuencia de resonancia del circuito en el que está incluida la inductancia.

### **2.19. Instrumentos de medición del caudal. Caudalímetros**

**Mecánica.** En la práctica, se conocen bastantes métodos de determinación del caudal. Los métodos más sencillos y, por tanto, los más comunes de medición de caudal son los que utilizan elementos sensores mecánicos, en los que el caudal desplaza o hace girar un cuerpo sólido. Este desplazamiento o rotación del sólido resulta así proporcional al caudal.

La figura 2.23 muestra un esquema de uno de los métodos mecánicos de medición de caudal. Muestra una paleta con resorte y pivote suspendido que se desvía para abrir un orificio a medida que el fluido pasa a través del transductor. Cuanto mayor es el caudal, más se desvía la paleta.

Existen otras variedades de métodos mecánicos de medición de caudal. En un transductor de caudal, se puede realizar el método de una hélice que gira cuando fluye una sustancia. Y la velocidad de rotación de la hélice es proporcional al caudal de esta sustancia.

El transductor de caudal mecánico más común es un caudalímetro de turbina con una hélice giratoria (o, en este caso, una turbina). La turbina se monta en el flujo de la sustancia mediante cojinetes. En general, los álabes

de la turbina son de material ferromagnético. Por lo tanto, se utiliza una bobina montada en el cuerpo del caudalímetro para determinar la velocidad de la turbina. El elemento sensor electromagnético del caudalímetro crea un efecto de frenado de la turbina, que puede afectar a la velocidad angular de la turbina a caudales bajos. Otros diseños de elementos sensores, como los electroópticos, se utilizan para mediciones de bajo caudal.

Para obtener mediciones precisas, es importante que no se produzcan remolinos en la sustancia que fluye, ya que esto afecta directamente a la velocidad de la turbina. Por este motivo, en la entrada del caudalímetro suelen instalarse álabes enderezadores del flujo. Estas paletas forman también uno de los puntos de referencia de la turbina. Por supuesto, también son posibles diseños de caudalímetros considerablemente más sencillos cuando la precisión de la medición no es esencial, es decir, cuando se pueden ignorar el frenado y el remolino del flujo.

Una de las ventajas de los caudalímetros de turbina frente a otros tipos de caudalímetros es la dependencia lineal de su señal de salida respecto a la velocidad del caudal en el rango establecido para el dispositivo.



Fig. 2.23. Ejemplo de diseño de un dispositivo mecánico de medición de caudal.

Medición de caudal basada en fenómenos térmicos. Los caudalímetros térmicos funcionan según el principio de que el calor transportado por una sustancia de un punto a otro es proporcional al caudal másico de dicha sustancia. Por ejemplo, la fig. 2.24.a muestra cómo dos transductores de temperatura (T) determinan la temperatura de una sustancia antes y después del calentamiento, que se lleva a cabo mediante un elemento calefactor situado entre dichos transductores.

La figura 2.24.b muestra un termoanemómetro que mide el flujo de una sustancia mediante un único elemento calefactor situado en su flujo. El efecto de enfriamiento de la sustancia que fluye a través de este elemento caracteriza el caudal másico, es decir, se controla el enfriamiento debido al cambio de resistencia de los hilos del elemento calefactor. A menudo se utiliza una película metálica o semiconductor en lugar de un elemento de

alambre en el transductor. Con el termoanemómetro es posible medir fluctuaciones extremadamente rápidas en el caudal de sustancias.

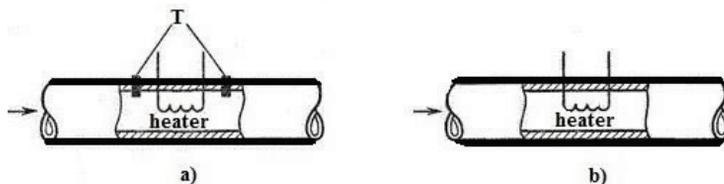


Fig. 2.24. Métodos de realización del principio térmico de medición del caudal utilizando un elemento calefactor.

### Método termoanemométrico de determinación del caudal.

**Principio de medición.** El método permite determinar el caudal mediante el cambio de temperatura de un alambre o una película metálica calentada eléctricamente (transductor de caudal) colocada en el flujo de gas controlado. El enfriamiento del transductor depende de la velocidad del flujo, de las propiedades físicas del gas (conductividad térmica, temperatura y densidad) y de la diferencia de temperatura entre el transductor y el gas.

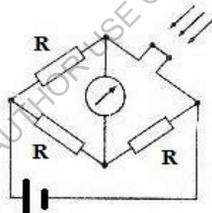


Fig. 2.25. Termoanemómetro alimentado por tensión continua

#### Se conocen dos métodos:

**A. Método de la corriente constante.** La corriente (o tensión) que calienta el hilo se mantiene constante y se mide por el cambio de resistencia provocado por su enfriamiento:  $R = f(V)$ . Los parámetros y la alimentación del circuito puente (fig. 2.25) se seleccionan de forma que esté en equilibrio a velocidad  $V$  del gas. La desviación de la flecha del galvanómetro sirve como medida de la velocidad del flujo.

El método sólo tiene sensibilidad suficiente a bajas velocidades de flujos controlados y es inadecuado para medir altas velocidades ( $V > 0,5$  cm/s).

**B. Método de temperatura constante.** La resistencia del transductor refrigerado por flujo se mantiene constante ajustando la tensión de calentamiento (tensión de alimentación del puente). Esta tensión o corriente de alimentación del puente sirve como medida de la velocidad del flujo monitorizado. Como en el caso anterior, la sensibilidad del termoanemómetro disminuye a medida que aumenta la velocidad del flujo monitorizado, pero esta disminución es sustancialmente menor que con un circuito termoanemométrico de tensión de calentamiento constante.

**Evaluación del método termoanemométrico.** El método termoanemométrico presenta una serie de ventajas:

- alta sensibilidad;
- dimensiones miniaturizadas del elemento sensor;
- Para las mediciones se aplican esquemas y dispositivos sencillos.

Las desventajas del método incluyen:

- sensibilidad decreciente con el aumento de la velocidad del flujo;
- necesidad de calibrar individualmente los transductores primarios;
- inestabilidad de la característica de calibración.

El uso de alambre recocido reduce el índice de envejecimiento. La baja temperatura de funcionamiento del alambre aumenta la influencia de la temperatura del gas. Esta influencia puede eliminarse mediante compensación de temperatura. Los flujos de gas autoconvectivos alrededor del alambre calentado (a velocidad cero del flujo monitorizado) también distorsionan las lecturas, lo que es especialmente importante para mediciones a baja velocidad. Debido a su baja inercia, los termoanemómetros de hilo se utilizan en estudios de flujos turbulentos.

**Método de medición del caudal por inducción magnética.** Cuando un conductor se mueve en un campo magnético, según la ley de inducción electromagnética, se genera una fuerza electromotriz en el conductor y se induce una corriente eléctrica. Este efecto se utiliza en el caudalímetro de inducción para determinar el caudal. El líquido que fluye debe tener una determinada conductividad mínima. Según la ley de Faraday, se genera un campo eléctrico en un fluido conductor de la electricidad que fluye a través de un campo magnético. El flujo controlado circula por un tubo recubierto de aislante, en cuyas paredes se instalan dos electrodos situados diametralmente y perpendiculares a la dirección del campo magnético y del flujo del fluido (medio), del que se extrae la tensión. El valor de la tensión es proporcional a la velocidad media del flujo del medio. Esta tensión,

generada por una fuente de alta impedancia (líquido), se lleva por medio de un cable hasta el transductor de medición, que la amplifica y efectúa el tratamiento posterior. El valor de la señal suele ser de unos pocos milivoltios.

La teoría del caudalímetro de inducción se basa en las ecuaciones de Maxwell. Un líquido conductor que fluye tiene un cierto número (concentración) de cargas eléctricas. La fuerza de Lorentz actúa sobre las cargas en movimiento y las desvía en dirección perpendicular, lo que provoca la aparición de una diferencia de potencial eléctrico (tensión eléctrica). El valor de la tensión es proporcional a la velocidad del flujo y a las propiedades electrofísicas del fluido (caudal).

La señal útil de salida de un caudalímetro de este tipo es pequeña. En tal esquema de medición de flujo hay interferencias significativas. Para eliminar estas desventajas en la industria en los medidores de flujo de este tipo utilizan un campo magnético variable o conmutable. Esta técnica permite aislar la señal útil y lograr una precisión de medición aceptable.

## **2.20. Interruptores y sensores para la detección de proximidad (detectores de movimiento)**

Los sensores de proximidad no tienen conexión física con los objetos. Juzgan la presencia de un cuerpo mediante algún principio de detección física implementado en los respectivos transductores,

**Un sensor de proximidad inductivo** utiliza un oscilador sintonizado. Cuando un cuerpo conductor se acerca al sensor, se produce una amortiguación de las oscilaciones detectadas por los circuitos de acoplamiento. Otros dispositivos más generales y sencillos son los interruptores de proximidad inductivos, en los que se utiliza un circuito de interfaz para encenderlos o apagarlos cuando un cuerpo conductor se acerca a ellos.

**Los detectores de proximidad capacitivos** tienen forma de transductores de medida o de interruptores. Su principio de funcionamiento consiste en que un cuerpo cercano modifica la constante dieléctrica de un condensador, lo que desequilibra el puente en uno de los brazos en los que está colocado el condensador. Los sensores capacitivos son capaces de detectar la proximidad de cuerpos de distintos materiales en una amplia gama de distancias.

También existe un gran número de **sensores ópticos** para la detección de proximidad. Constan de un elemento sensor básico y un esquema para su

conexión al sistema de medición. Los siguientes métodos de detección de proximidad pueden funcionar en los dispositivos considerados (fig. 2.26). Los sensores pueden tener un diseño (fig. 2.26.a) en el que la fuente de luz y el elemento sensor se colocan juntos y la luz emitida se refleja y recorre el mismo camino que la luz incidente. En otros dispositivos (fig. 2.26.b), el haz de la fuente y el haz de luz reflejado forman un cierto ángulo entre sí y se reflejan en la superficie del cuerpo como en un espejo. También son posibles los sensores en los que se utiliza el paso de la luz a través de la superficie del cuerpo.

**Los sensores magnéticos de proximidad** son dispositivos muy comunes e incluyen relés reed o sensores Hall.

**Los sensores de proximidad por radar** constan de un generador de señales de radar y un mezclador en el que interactúan las señales reflejada y de sondeo. Utilizando el efecto Doppler (la frecuencia de la señal reflejada difiere de la frecuencia de la señal de sondeo cuando el cuerpo se mueve), la frecuencia de la salida del mezclador es cero cuando el cuerpo no se mueve y diferente de cero cuando se mueve. La mayoría de estos sensores de proximidad funcionan en el rango de *los rayos X*.

La aplicación de estos dispositivos (sensores de proximidad) no se limita únicamente a la medición del desplazamiento. Los sensores también pueden registrar la distancia, y por tanto la velocidad, determinando el tiempo entre los impulsos transmitidos y reflejados y realizando los cálculos necesarios con los resultados de estas mediciones.

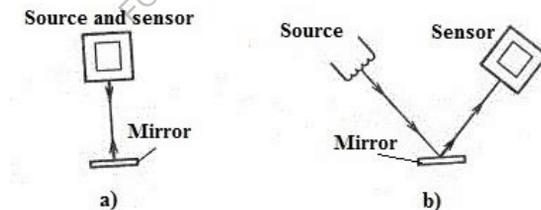


Fig. 2.26. Principios de funcionamiento de algunos dispositivos ópticos (sensores, transductores) para la detección de proximidad.

## 2.21. Sensores de peso. Métodos y medios de conversión

**Sensores de peso electromecánicos. Sensores de peso con galgas extensométricas.** Los sensores de peso con galgas extensométricas se encuentran entre los dispositivos de medición de fuerza más precisos utilizados para el pesaje. Junto con las galgas extensométricas en los sensores

de peso se incorporan resistencias diseñadas para ajustar el circuito de puente, lo que proporciona intercambiabilidad de sensores, así como la posibilidad de incluir varios sensores en un circuito común si es necesario. La característica del sensor de peso de galgas extensométricas indica el valor de la tensión de salida en milivoltios a carga nominal, referida a una tensión de alimentación de 1 V. Típicamente, este valor es de 1-2 mV/V. Las sobrecargas superiores al 150% nominal no provocan un desplazamiento del cero. Las sobrecargas de hasta el 500 % del valor nominal tampoco provocan daños mecánicos.

**Sensores de pesaje con cuerda vibrante.** El principio de funcionamiento prevé la excitación de la vibración de frecuencia constante de una cuerda pretensada mediante un sistema electromagnético y la transferencia a la cuerda de la fuerza desarrollada por la carga en la balanza. Esta fuerza aumenta la tensión de la cuerda y, como consecuencia, la frecuencia de su vibración. El cambio de frecuencia es una medida de la masa determinada de la carga. Con este tipo de sensores se puede conseguir una gran precisión en la medición del peso.

**Sensores de peso magnetoelásticos.** El efecto magnetoelástico hace que algunos materiales (por ejemplo, la permaleación) sometidos a una carga cambien su susceptibilidad magnética. Dicho material se utiliza como núcleo de un bobinado cuya resistencia total disminuye al aumentar la carga debido a la disminución de la susceptibilidad magnética. Estos elementos sensores tienen una potencia de salida relativamente alta, lo que permite utilizar su señal de salida sin amplificación. Sin embargo, la pequeña gama de linealidad de la característica es insuficiente para realizar mediciones precisas.

**Sensores de peso inductivos.** En los sensores de peso inductivos, el cambio en la inductancia del bobinado se debe al desplazamiento del núcleo de hierro por la fuerza medida.

En el campo de la tecnología de medición del peso son especialmente importantes los siguientes dispositivos:

- a) Con dos o cuatro inductancias variables (inductor doble con inductancia de tracción o cruzada);
- b) con inductancia mutua variable (transformador diferencial con inducido de tracción).

En comparación con las galgas extensométricas, los sensores de peso inductivos tienen tensiones de salida más elevadas, menor sensibilidad a la

temperatura y la humedad y mayores desplazamientos de la armadura. Estas propiedades permiten utilizar muelles blandos, lo que a su vez posibilita la medición de fuerzas pequeñas. Sin embargo, la precisión de los sensores inductivos de peso es inferior a la de las galgas extensométricas.

**Sensores de peso con dispositivo de compensación de fuerza electromagnética.** En este dispositivo, el plato de la balanza está conectado mediante una palanca a una bobina de compensación, que se encuentra en el campo de un imán permanente. La corriente en el bobinado de esta bobina está controlada por un sensor de posición conectado a un amplificador. El cambio de corriente en el bobinado de la bobina de compensación se produce hasta que se alcanza el equilibrio. A medida que la carga cambia en la balanza, la corriente en la bobina, que es una medida del peso de la carga, cambia en consecuencia.

**Sensores de peso hidráulicos.** La fuerza se determina midiendo la presión desarrollada por la carga sobre el pistón o la membrana del sistema hidráulico. La presión del fluido se mide mediante un manómetro. El diseño de salida del diafragma de goma elimina la fricción. Además, los sensores de este tipo permiten desviaciones de la dirección de la fuerza actuante de hasta unos pocos grados con respecto a la vertical sin errores adicionales. El error se estima en  $\pm 0,2$  % dentro del rango de pesaje. Los límites de pesaje más amplios van de 50 kg a 500 toneladas.

**Sensores de peso que utilizan métodos de medición por ionización.** El pesaje con isótopos radiactivos puede realizarse por dos métodos: el método de transmisión y el método de dispersión.

Cuando se utiliza el método de transmisión, se mide la absorción de la radiación por el peso que se está pesando. El uso de radiación dura permite considerar el valor del coeficiente de atenuación de la masa independiente de la composición química del material. En el método de dispersión, la radiación directa está blindada. La radiación lateral es dispersada por el material y dirigida al detector. El método de pesaje permite utilizar este tipo de básculas como básculas transportadoras o básculas de camiones que operan en condiciones ambientales duras, en las que las básculas con sistemas de medición convencionales se desgastan rápidamente. Los márgenes de error pueden alcanzar varios porcentajes.

## **2.22. Sensores de nivel de llenado. Medición del nivel de llenado**

Dependiendo de la industria y de las condiciones en las que se vayan a utilizar los sensores de nivel, se les imponen distintos requisitos. Al planificar el uso de un sensor de nivel, es necesario conocer las propiedades físicas y químicas de los materiales de relleno (viscosidad, conductividad eléctrica, radiactividad, abrasividad, etc.), las condiciones externas de medición -temperatura, presión, agresividad del entorno, etc.-.

Existen bastantes efectos físicos y propiedades de los materiales, en función de los cuales se pueden diseñar y fabricar sensores (transductores de medición) de nivel de llenado.

**Medición con flotador.** Como elemento sensor de un sensor de nivel de líquido se utiliza un flotador. Por regla general, se utilizan como flotador cuerpos esféricos con una densidad inferior a la densidad del líquido. La transmisión de la información del sensor sobre el nivel de llenado puede realizarse mecánicamente con la ayuda de diversos rodillos, engranajes, cables o utilizar sistemas eléctricos de transmisión de datos (conectando el movimiento con una resistencia variable, etc.). Para la transmisión de datos también se pueden utilizar interruptores de paso, el envío de impulsos, la transmisión magnética del movimiento del flotador, sensores de desplazamiento inductivo.

Los errores de medición en estos dispositivos se deben principalmente a cambios en la densidad del líquido a llenar o a cambios en las condiciones de transmisión de datos (fricción, holguras, etc.).

**Método capacitivo de medición de nivel. Sensores de nivel capacitivos.** El método capacitivo de medición de nivel permite medir el llenado de materiales en polvo, viscosos y granulares. El método capacitivo mide los niveles de alimentos en polvo, grano, detergente en polvo, cemento, arena, polvo de carbón, fuel-oil, fuel-oil, agua, ácidos, álcalis, etc. El método capacitivo permite medir de forma continua el nivel de alimentos en polvo, grano, detergente en polvo, cemento, arena, polvo de carbón, fuel oil, fuel oil, agua, ácidos, álcalis, etc. El método capacitivo permite realizar mediciones continuas. El método de funcionamiento de los sensores se basa en la medición de la capacitancia eléctrica (principio de funcionamiento del condensador). El condensador está formado por la pared del depósito y una sonda que se sumerge en el contenido del depósito. La capacitancia suele medirse aplicando una tensión eléctrica de alta frecuencia. La capacitancia varía con el nivel de llenado. La capacitancia es igual a la suma de las capacitancias de la sección sumergida y de la sección en el aire. Las dos

capacitancias se conectan en paralelo y se suma la capacitancia total. La precisión depende del diseño de la sonda. La sonda consiste en un cable, una varilla o un tubo. Si es necesario, se aplica un revestimiento aislante.

Si el depósito es de material dieléctrico, debe preverse un electrodo opuesto separado. A veces se utiliza un condensador cilíndrico en el diseño de los indicadores de nivel, con el extremo abierto sumergido en el medio.

**Medición del nivel de llenado basada en la conductividad.** Los sensores y el método de medición de nivel basado en la conductividad sólo pueden utilizarse para la medición de nivel de materiales líquidos conductores.

El principio de medición se basa en el cambio de resistencia eléctrica entre dos electrodos cuando se sumergen en el material de relleno. La resistencia disminuye con la inmersión. Este método y los sensores han encontrado aplicación para la medición del nivel de llenado en calderas de vapor. La desventaja del método es que sólo puede utilizarse para medir el nivel de materiales líquidos conductores de la electricidad.

**Métodos hidrostáticos y neumáticos de medición de nivel.** Estos métodos pueden utilizarse para medir el nivel de cualquier líquido. El método hidrostático utiliza la presión del líquido en el fondo del recipiente y su cambio a medida que varía el nivel. La presión en el fondo de un recipiente de líquido puede medirse en tanques abiertos utilizando un manómetro convencional o diferencial. En depósitos cerrados, donde el líquido puede estar presurizado, sólo mediante un manómetro diferencial. La presión depende de la altura de la columna de líquido y de su densidad. Si el manómetro no está instalado al nivel del fondo, hay que hacer una corrección.

En el método neumático de medición de nivel, hay que forzar la entrada de aire o gas protector en el depósito. Este método se utiliza en calderas de vapor, reactores, etc.

El método neumático de medición de nivel consiste en sumergir un tubo hasta un cierto nivel en el líquido cuyo nivel se desea medir. El aire (o cualquier gas) se introduce en el tubo a través de un estrangulador especial. La presión en el tubo y, respectivamente, por encima del estrangulador es igual a la presión de la columna de líquido (y depende, respectivamente, del nivel del líquido) con respecto al borde inferior del tubo.

Las ventajas de estos métodos y sensores de nivel son su alto grado de fiabilidad.

**Método de medición de nivel por ultrasonidos** El método de medición de llenado por ultrasonidos puede utilizarse para líquidos y sólidos a granel. No puede utilizarse sólo si el líquido contiene partículas sólidas, lo que puede dar lugar a grandes errores de medición. Este método de medición permite automatizar fácilmente el proceso de medición.

Para realizar el método ultrasónico de medición del nivel de llenado es necesario disponer de una fuente de ondas ultrasónicas (transmisor) y un receptor. Normalmente, se utilizan frecuencias de 20 kHz a varios megahercios. Hay dos formas de producir vibraciones ultrasónicas: la piezoeléctrica y la magnetoestrictiva.

Una medida del nivel puede ser, por ejemplo, el tiempo de tránsito de un haz ultrasónico. La velocidad del haz depende del medio de propagación. Esta forma de medir el nivel puede servir para señalar los límites del nivel de llenado (véase la fig. 2.27). Cuando se llena un espacio determinado, el dispositivo ultrasónico envía una señal.

Pero para los líquidos, el método de medición del nivel por ultrasonidos basado en el principio de la ecosonda es más cómodo y preciso. Los ultrasonidos se propagan en el espacio por encima del líquido, se reflejan en la superficie (interfaz aire-líquido) y por el tiempo de retorno al receptor se determina el nivel.

Una de las principales ventajas del sensor de nivel ultrasónico es la posibilidad de su aplicación en lugares de difícil acceso.

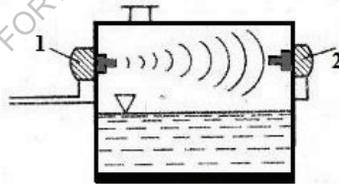


Fig. 2.27. Diseño de un medidor de nivel ultrasónico. 1 - emisor, 2 - receptor

**Indicadores de nivel basados en isótopos radiactivos. Método de medición.** Los sensores de nivel basados en isótopos radiactivos se utilizan allí donde es imposible realizar mediciones con sensores convencionales. Lo más frecuente es que el método de medición de nivel basado en isótopos radiactivos se utilice para medir el nivel de materiales agresivos, en depósitos con alta temperatura, en plantas metalúrgicas, materiales como carbón, mineral, etc. La aplicación más común de los sensores de nivel basados en isótopos radiactivos es la medición del nivel de materiales agresivos.

El funcionamiento de los sensores se basa en el fenómeno de absorción de la radiación radiactiva por los materiales contenidos en el depósito. En la práctica, suelen medirse capas gruesas de materiales, por lo que los rayos  $\gamma$  son los más utilizados en este tipo de sensores. El haz de rayos  $\gamma$  atraviesa el depósito en línea recta. En la pared opuesta del tanque se encuentra un receptor de radiación. La intensidad de los rayos que inciden en el receptor depende del grado de absorción del material. El diseño de los sensores y sistemas de medición de nivel que utilizan isótopos radiactivos puede variar en función de las condiciones y requisitos técnicos.

Si se requiere un sensor de nivel que funcione según el principio de un dispositivo de señalización, su diseño es aproximadamente el mismo que sobre la base de la radiación ultrasónica (véase la fig. 2.27). Cuando el nivel cambia y el material se solapa con el haz, el sensor y el sistema de medición se activan.

Si se requiere una medición continua del nivel, se utilizan otros diseños de sensores. Por ejemplo, cuando se colocan varios emisores en la pared del depósito, cuyos haces se dirigen al receptor situado al otro lado. Cuando cambia el nivel del material, parte de los haces se solapan y cambia la intensidad de la radiación que llega al receptor.

Las ventajas del método considerado de medición de nivel son: ausencia de contactos, posibilidad de medición en condiciones especialmente difíciles, fiabilidad de funcionamiento.

**Otros métodos y sensores para la medición de nivel.** Medición de nivel mediante sensores de temperatura - termopares, termistores. Este método de medición es posible para materiales líquidos que no son agresivos. El principio de medición se basa en la diferencia entre la temperatura del material en el depósito y la temperatura exterior. El diseño de estos transductores de medición depende de los requisitos y las condiciones de medición.

**Mediciones con dinamómetros.** Básicamente, se pesa el depósito y el material que contiene. El método es adecuado para medir el nivel de llenado de materiales a granel, materiales agresivos. Los diseños de los sistemas de medición pueden ser diferentes y se desarrollan en función de los requisitos técnicos.

La medición del nivel de llenado también puede realizarse mediante interruptores de fin de carrera con elementos sensores vibratorios, etc. Existen sensores de nivel basados en el método interferométrico.

**Métodos mecánicos de medición del nivel de llenado. Medición del nivel de llenado de líquido mediante un flotador.** El principio físico de la medición puede explicarse mediante la figura 2.28. Sobre el flotador actúan tres fuerzas: el peso  $P$ , la fuerza de empuje (fuerza de Arquímedes)  $F_a$  y la fuerza de reacción del sistema de transmisión de lectura  $F_r$ . Las magnitudes de las fuerzas dependen principalmente de la densidad del aire, de la densidad del líquido y del tipo de sistema de comunicación entre el flotador y el dispositivo de medición. En estado de equilibrio, la suma de estas fuerzas es igual a 0. Cuando cambia el nivel del líquido, se rompe el equilibrio de fuerzas y el flotador se desplaza hacia arriba o hacia abajo. El desplazamiento determina la altura del líquido con respecto a la posición inicial.

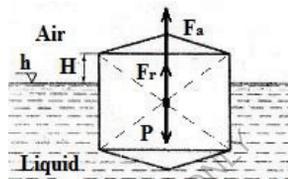


Fig. 2.28. Método del flotador para medir el nivel de líquido

Como flotadores en los sensores se utilizan principalmente cuerpos huecos esféricos o esférico-cilíndricos, cuya densidad es menor que la densidad del líquido, por lo que pueden flotar en su superficie. La modificación de la densidad del líquido o de las condiciones de fricción en el sistema de transmisión del sensor provoca una distorsión del resultado de la medición. Este efecto es menos pronunciado con respecto a la altura de elevación cuanto más plano es el flotador del sensor.

En el caso más sencillo, el flotador del sensor está unido a una cuerda o cadena, que pasa por encima de un rodillo o rueda dentada. En este caso, el valor medido se transmite mecánicamente. Para garantizar el funcionamiento continuo del sensor, se fija un contrapeso al otro extremo del cable o la cadena.

En este método de medición del nivel de líquido, el ángulo de giro del rodillo se corresponde con la variación del nivel de líquido. El eje del rodillo guía puede conectarse a la corredera del potenciómetro sensor para realizar la transmisión eléctrica del valor medido.

Es bastante sencillo transmitir mecánicamente los datos de nivel en tanques abiertos mediante un sistema de cables o, en tanques cerrados,

mediante una entrada de prensaestopas si las distancias para la transmisión de datos son cortas.

Sin embargo, en la mayoría de los casos, tanto en depósitos abiertos como cerrados, se utilizan sistemas eléctricos de transmisión de datos en los sensores de nivel, especialmente si el resultado de la medición se transmite a un dispositivo de cálculo.

**Un ejemplo de sensor de nivel de flotador es el sensor de nivel de combustible de un automóvil (fig. 2.29).** Aquí se utiliza el llamado método potenciométrico de transferencia de información sobre el nivel de líquido (sensor de nivel potenciométrico). El flotador 1 está conectado mecánicamente con el reóstato 2. El flotador, moviéndose en función del nivel del líquido, mueve mecánicamente la corredera del potenciómetro (reóstato) 2. De este modo, cambia la resistencia eléctrica de salida del potenciómetro (reóstato), que es procesada y emitida por el sensor al indicador de nivel de combustible correspondiente.

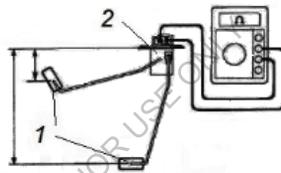


Fig. 2.29. Diagrama esquemático del funcionamiento del sensor de nivel de combustible de un automóvil.

Las ventajas de los sensores potenciométricos de nivel de combustible son la sencillez del dispositivo y su bajo coste. La desventaja es el desgaste de los contactos eléctricos móviles del sensor. Esto es especialmente cierto en vehículos que utilizan combustibles agresivos como etanol, metanol y biodiésel. En tales condiciones, se utiliza un diseño de sensor de nivel de combustible sin contacto que utiliza la interacción de elementos magnéticos.

### 2.23. Medición de la velocidad. Tacómetros

Los transductores de este tipo se utilizan para medir la velocidad lineal o angular. Los medidores de velocidad angular suelen ser dispositivos electromagnéticos y se denominan tacómetros. Los tacómetros del tipo electrónico-óptico, se denominan estroboscopios. La velocidad lineal suele determinarse indirectamente convirtiendo la velocidad lineal de giro del volante o del engranaje. La velocidad angular se mide entonces con un

codificador angular (tacómetro). La determinación directa de la velocidad lineal se realiza mediante transductores electromagnéticos, transductor de radar de microondas Doppler sin contacto, etc.

**Tacómetros de impulsos.** El método más común de conversión es aquel en el que la bobina receptora de diseño conocido permite determinar la velocidad de rotación del eje. Por regla general, dicho eje está fabricado con muescas o protuberancias, formando así una rueda dentada (fig. 2.30). Cuando la protuberancia o muesca atraviesa la bobina, cambia la tensión de la corriente de salida. El cálculo de la variación de la tensión de salida en un determinado intervalo de tiempo, y da el valor de la velocidad angular.

En los tacómetros de impulsos es posible utilizar, por ejemplo, el efecto Hall, las corrientes parásitas inductivas, los fenómenos ópticos (en los transductores sin contacto), pero el más común en los tacómetros es el principio electromagnético.

El rotor ferromagnético con elemento sensor se fabrica aquí en forma de imán permanente o bobina. El imán crea un campo magnético alrededor del elemento sensor. Cuando el diente del rotor atraviesa el campo, cambia el flujo magnético y se induce una FEM en la bobina del tacómetro. La ventaja de este principio de conversión es la dependencia de la señal de salida de la configuración del diente del rotor. En la fig.2.30 se muestran algunos tipos conocidos de impulsos de salida para diferentes formas de dientes de rotor de tacómetro.

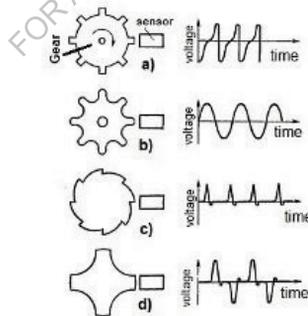


Fig. 2.30. Dependencia de la señal de salida del tacómetro de impulsos electromagnéticos de la configuración de los dientes del rotor: a- dientes rugosos, b- dientes del tacómetro del rotor mecanizados con precisión, c- y d- forma especial de los dientes.

**Generadores de tacómetros.** Cuando la medición de la velocidad se refiere a un oscilador concreto, la velocidad angular puede juzgarse a partir de la amplitud o frecuencia de su tensión de salida. Los generadores utilizados para este fin se denominan tacómetros.

Debe seleccionarse una energía tan pequeña del cuerpo móvil para el transductor de medición como para eliminar la influencia del tacogenerador en la velocidad angular del eje.

**Estroboscopios.** Los estroboscopios son tacómetros electroópticos de tipo especial en los que el eje giratorio se ilumina mediante destellos de luz. La velocidad de los destellos se ajusta manualmente mientras la imagen del eje permanezca inmóvil. Esto ocurre cuando cada destello cae una revolución del eje del tacómetro.

### Bibliografía

1. Klokova N.P. *Tenzorezistory* [Galgas extensométricas]. - M.Mashinostroenie, 1990.-224p.
2. Daychik M.L., Prigorovskiy N.I., Khurshudov G.Kh. *Metody i sredstva naturnoy tenzometrii. Spravochnik* [Métodos y medios de medición de la deformación a escala natural. Directorio] M. Mashinostroenie, 1989.-240p.
3. Vaganov V. I. *Integral'nye tenzopreobrazovateli* [Galgas extensométricas integrales]. -M.: Energoatomizdat, 1983. - 136 p.
4. Gridchin V.M., Lyubimsky V.M. *P'ezosoprotivlenie v plenkakh polikristallicheskogo kremniya p-tipa* [Piezorresistencia en películas de silicio policristalino tipo p]. *FTP*, 2004, v.38, №8, 38-46p.
5. Klokova N.P. *Tenzorezistory* [Galgas extensométricas]. *Datchiki i sistemy* [Sensores y sistemas] 2004, №3, p.10-12.
6. Nikolay Gorbachuk, Mikhail Larionov, Aleksey Firsov, Nikolay Shatil. Sensores semiconductores para un amplio rango de temperaturas. *Sensors & Transducers Journal and Magazine*, Vol. 162, Issue 1, January 2014, pp.1-4
7. Gorbachuk N.T., Didenko P.I. *Issledovanie nekotorykh elektrofizicheskikh svoystv plenok n-Si, legirovannykh ionnoy implantatsiy* [Estudio de algunas propiedades electrofísicas de las películas n-Si dopadas por implantación iónica]. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neytronnye issledovaniya*, 2006, №4, p.104-106.

8. Druzhinin A.A., Mar'yamova I.I., Kubrakov A.P., Pavlovskiy I.V. *Tenzorezistory dlya nizkikh temperatur na osnove nitevidnykh kristallov kremniya* [Galgas extensométricas para bajas temperaturas a base de bigotes de silicio]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*. 2008, №4, s. 26-30.

9. Terston R. *Primeneniye poluprovodnikovyykh preobrazovateley dlya izmereniya deformatsiy, uskoreniy i smeshcheniy* [Aplicación de transductores semiconductores para medir deformaciones, aceleraciones y desplazamientos]. -V kn.: *Fizicheskaya akustika/ Pod red. U. Mezona, t.1, chast' B -Metody i pribory ul'trazvukovykh issledovaniy. Per. s angl.* - M.: Mir, 1967, p.187-209.

10. Mykola Gorbachuk. MATERIALES ELECTROTÉCNICOS. LAP LAMBERT Academic Publishing. 120 High Road, East Finchley, Londres, N2 9ED, Reino Unido, 2024, 112p. ISBN: 978-620-3-46212-8.

11. Zeeger K. *Fizika poluprovodnikov* [Semiconductor physics]. *Per. s angl. pod red. Yu.K. Pozhely.* -M.: Mir, 1977, p. 615.

12. Smith C.S. Piezoresistance effect in germanium and silicon. - *Phys. Rev.* 1954, v. 94, 1, p. 42-49.

13. Tufte O.N., Stelzer E.L. Piezoresistive properties of silicon diffused lauers. - *J. Appl. Phys.*, 1963, v. 34, 9, p. 313-318.

14. Patente RF 2043671. *Poluprovodnikovyy tenzorezistor* [Galga extensométrica semiconductor]. *Avt. Gorbachuk N.T. / B.I.* 1995, №25.

15. A.B.Renskiy y etc. *Tenzometrirovaniye stroitel'nykh konstruksiy i materialov* [Medición de la deformación de estructuras y materiales de construcción]. M.- Stroyizdat, 1977, 239p.

16. Gorbachuk N.T., Mitin V.V. Thorik Yu.A. Schwartz Yu.M. Piezo-Hall effect in p-germanium. *Phys. Stat. Sol.(c)* 100. 1980, p.309.

17. Gorbachuk N.T., Mitin V.V. Thorik Yu.A. Schwartz Yu.M. On determining the deformation potential constants of semiconductors of the p-germanium type from the temperature dependence of the piezoresistance. *FTP*, vol. 15, v. 14, p. 649, 1981.

18. Gorbachuk N.T., Shvarts Yu.M. *Vliyaniye deformatsii na velichinu magnitosoprotivleniya v ob "emnom p-Ge i plenkakh p-Ge na arsenide galliya* [Efecto de la deformación sobre la magnitud de la magnetorresistencia en películas a granel de p-Ge y p-Ge sobre arseniuro de galio]. *OPT*, 1984, №6, s.88.

19. Gorbachuk N.T., Mitin V.V. Thorik Yu.A. Schwartz Yu.M.

*Poluprovodnikovyy termotenzodatchik* [Medidor de deformación térmica semiconductor]. *PSU*, 1984, No. 9, p. 21.

20. Gorbachuk N.T., Mitin V.V. Thorik Yu.A. Schwartz Yu.M. *P'ezogal'vanomagnitnye svoystva plenok germaniya na arsenide galliya i perspektivy ispol'zovaniya ikh v kachestve tenzorezistorov* [Propiedades piezogalvanomagnéticas de las películas de germanio sobre arseniuro de galio y perspectivas de su uso como galgas extensométricas]. *UFZh*, 1984, No. 12, p. 1850.

21. Gorbachuk N.T., Mitin V.V. Thorik Yu.A. Schwartz Yu.M. *Sposob opredeleniya temperatury i deformiruyushhego usiliya*. [Método para determinar la temperatura y la fuerza de deformación.] *A.s.* No. 932282, 05/30/82 Boletín. No. 20.

22. Gorbachuk N.T., Sakidon P.A., Thorik Yu.A., Shvarts Yu.M. *Poluprovodnikovyy tenzorezistor* [Galga extensométrica semiconductor]. *A.s.* No. 11 16305 1984.

23. Gorbachuk N.T., Didenko P.I. *Izmeritel'nye preobrazovateli na osnove GaAs, polikremniya i dispersnogo germaniya i perspektivy ikh ispol'zovaniya* [Transductores de medición basados en GaAs, polisilicio y germanio disperso y perspectivas de su uso]. *Perspektivnye materialy*, 2004, N 5, p.93-97.

24. Gorbachuk N.T., Didenko P.I. *Vliyanie neytronnogo oblucheniya na kharakteristiki poluprovodnikovyykh izmeritel'nykh preobrazovateley temperatury, deformatsii, magnitnogo polya* [La influencia de la irradiación de neutrones en las características de los transductores semiconductores de medición de temperatura, deformación y campo magnético]. *Poverkhnost'*, 2005, 4, pp.57-58.

25. P. Profos. *Spravochnik "Izmereniya v promyshlennosti"* [Directorio "Mediciones en la industria"] 1-3 volúmenes. M.: *Metallurgiya*, 1990.

26. Kiknadze G.I., Plesh A.G., Safronov A.N., Gorbachuk N.T. y otros. *Rezultaty eksperimental'nogo issledovaniya protsessa okhlazhdeniya model'noy seksii i eksperimental'nogo bloka sverkhprovodyashchey obmotki toroidal'nogo polya ustanovki T-15 na komplekse SIMS* [Resultados de un estudio experimental del proceso de enfriamiento de la sección modelo y del bloque experimental del bobinado superconductor del campo toroidal de la instalación T-15 en el complejo SIMS]. *Preprint IAE-4320/10*, M., 1986, 24 p.

27. Belyakov V.A., Gorbachuk N.T., Didenko P.I., Filatov O.G., Sychevskiy S.E., Firsov A.A. etc. *Poluprovodnikovye izmeritel'ne preobrazovateli deformatsii, temperatury i magnitnogo polya dlya primeneniya v usloviyakh radiatsionnogo vozdeystviya, shirokom diapazone temperatur i magnitnykh poley* [Transductores semiconductores de medición de la deformación, la temperatura y el campo magnético para su uso en condiciones de exposición a la radiación, una amplia gama de temperaturas y campos magnéticos]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki*", *Seriya: Elektrofizicheskaya apparatura*, v.3(29), 2005, p.46-54.

21. Kucheruk I.M., Gorbachuk I.T., Lutsik P.P. *Zagal'niy kurs fiziki: Navchal'niy posibnik* [Curso general de física: Guía de estudio], T. 1-3. - K.: Tekhnika, 2001.

FOR AUTHOR USE ONLY

## Capítulo 3. Campos magnéticos. Campos magnéticos. Transductores, sensores, medición

### 3.1. Sensores Hall. Principio de funcionamiento, descripción, dispositivo.

Un sensor Hall es un dispositivo que mide la magnitud de un campo magnético utilizando el efecto Hall. El sensor Hall consiste en una placa rectangular semiconductora a la que se conectan cuatro cables eléctricos. Esquemáticamente, el elemento sensor de un sensor Hall se muestra en la fig. 3.1.

Efecto Hall. Supongamos que la muestra tiene la forma de una placa rectangular de longitud  $l$ , anchura  $d$ , espesor  $b$  (ver fig.3.1).

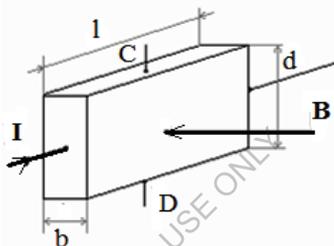


Fig. 3.1 Efecto Hall en una placa con una corriente longitudinal  $I$  y un campo magnético  $B$  perpendicular al plano de la placa.

Si se hace pasar una corriente eléctrica  $I$  a lo largo de la muestra y se crea un campo magnético  $B$  perpendicular al plano de la placa, aparecerá un campo eléctrico, que se denomina campo Hall, en los planos laterales de la placa en la dirección  $CD$ . En la práctica, por regla general, el campo Hall se caracteriza por una diferencia de potencial, que se mide entre los puntos simétricos  $C$  y  $D$  de la superficie lateral de la muestra. Esta diferencia de potencial se denomina diferencia de potencial Hall  $U_{hal}$  o CEM Hall  $\epsilon_{hal}$ .

En la teoría clásica de la conducción, el efecto Hall se explica por el hecho de que en un campo magnético la fuerza de Lorentz actúa sobre cargas eléctricas en movimiento, cuya magnitud y dirección vienen determinadas por la ecuación vectorial:

$$F = e [\mathbf{VB}] \quad (3.1),$$

donde  $\mathbf{B}$  es el vector de inducción del campo magnético,  $\mathbf{V}$  es el vector de velocidad de carga,  $e$  es la carga de los portadores de corriente teniendo en cuenta el signo.

Debido a esta fuerza en la dirección CD, hay una diferencia en la concentración de portadores de corriente y, en consecuencia, un campo eléctrico. En nuestro caso,  $V$  es perpendicular a  $B$  y, basándonos en las leyes conocidas de la electrofísica, se define el campo eléctrico Hall:

$$E_{hal} = F/e = VB \quad (3.2),$$

El campo está relacionado con el EMF Hall  $\varepsilon_{hal}$ , o la diferencia de potencial Hall  $U_{hal}$ , de la siguiente manera:

$$\varepsilon_{hal} \approx U_{hal} = E_{hal} d = VBd \quad (3.3).$$

La fuerza de la corriente que fluye a través de una unidad de área transversal de la muestra es igual a la densidad de corriente:

$$J = I/S = enV \quad (3.4),$$

donde  $n$  es el número de portadores de corriente en una unidad de volumen de la muestra (concentración de portadores de corriente).

De ahí la fuerza actual:

$$I = jbd = enVbd \quad (3.5).$$

Lo que permite escribir:

$$V = I / enbd \quad (3.6).$$

Por lo tanto:

$$\varepsilon_{hal} = IB / enb \quad (3.7).$$

Así, el CEM Hall (o  $U_{hal}$ ) es proporcional a la intensidad de la corriente, a la inducción del campo magnético, e inversamente proporcional al espesor de la muestra y a la concentración de portadores de corriente en ella.

Suele escribirse:

$$\varepsilon_{hal} = R \cdot IB/b \quad (3.8).$$

Donde el coeficiente  $R = 1/ne$  es la constante de Hall, que, por ejemplo, para los semiconductores tiene un valor de  $10$  a  $10^5 \text{ cm}^3 / \text{Kl}$ .

### 3.2. Principio de funcionamiento de un sensor Hall

La figura 3.2 muestra la forma típica del elemento sensor de un sensor Hall. Este tipo de elemento sensor puede fabricarse a partir de material a granel o a base de materiales en forma de película.

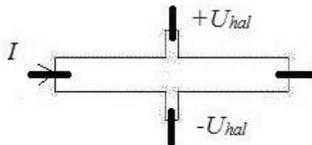


Fig. 3.2 Representación esquemática de la forma del elemento sensor del sensor Hall.

La fig. 3.3 muestra la dependencia característica de  $U_{hal}$  (diferencia de potencial en la dirección de los contactos CD - fig. 3.1) del campo magnético a corriente de alimentación constante.

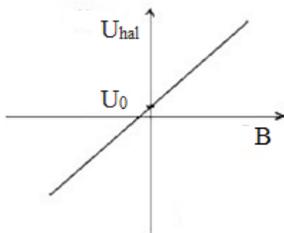


Fig. 3.3. Dependencia de la tensión eléctrica en los contactos Hall  $U_{hal}$  del valor de la inducción del campo magnético  $B$

En ausencia de campo magnético, la FEM Hall (diferencia de potencial) debería ser igual a cero. Pero como resultado de diversos fenómenos secundarios (por ejemplo, una colocación insuficientemente simétrica de los electrodos de medición del sensor), el dispositivo de medición puede mostrar cierta diferencia de potencial  $U_0$  a la salida del sensor Hall incluso en ausencia de campo magnético. Para eliminar los errores asociados, el valor de  $U_0$  debe restarse de la diferencia de potencial medida en el campo magnético.

Una de las principales características de un sensor Hall es su sensibilidad:

$$\gamma = \Delta U_{hal} / \Delta B \quad (3.9).$$

La sensibilidad del sensor Hall, especificada en su ficha técnica, se utiliza para determinar la magnitud de la inducción del campo magnético medido:

$$B = U_{hal} / \gamma \quad (3.10).$$

Tenga en cuenta que el sensor Hall mide la componente perpendicular (al plano del sensor) del vector del campo magnético. Por lo tanto, si se desea medir el valor máximo del campo magnético, el sensor Hall debe orientarse en consecuencia.

Los semiconductores InP, InSb, GaAs, Ge, Si son los más utilizados para la fabricación de sensores Hall. El uso de semiconductores se debe al hecho de que debido a la alta movilidad de los portadores de corriente tienen

una alta sensibilidad a la influencia del campo magnético. El elemento sensor del sensor Hall puede estar hecho de material a granel o sobre la base de películas semiconductoras sobre sustratos aislantes. Sensor Hall puede tener una forma diferente, que afecta a la linealidad de la dependencia de la señal de salida en el campo magnético, la sensibilidad. Las dimensiones de los sensores Hall modernos no pueden exceder de  $1 \times 1 \times 0,5$  mm, las corrientes de alimentación son generalmente 1- 100 mA (depende de la resistencia de entrada del sensor), la sensibilidad puede alcanzar 1000 mV/T y más, el rango de temperatura de funcionamiento de  $-270$  °C a  $200$  °C. Además de la sensibilidad, uno de los principales parámetros de los sensores Hall son la dependencia de la temperatura de la sensibilidad, la resistencia de entrada, la señal de salida inicial  $U_o$  . En los buenos sensores Hall deben ser insignificantes.

### 3.3. Sensores modernos de efecto Hall

Los sensores Hall son producidos por muchas empresas en el mundo, por ejemplo, por Honeywell. Los sensores DHC-0.5A son conocidos en Rusia.

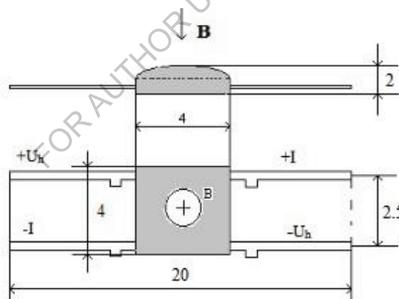


Fig. 3.4. Representación esquemática de uno de los sensores DHC-0.5A

El sensor Hall DHC-0.5A está diseñado para medir el valor de inducción magnética sobre la base de la conversión de inducción magnética en tensión de salida. El sensor se fabrica sobre la base de una estructura topológica plana formada en la superficie de un cristal de silicio.

#### **Principales características técnicas:**

La corriente nominal de control es de 3 mA;

Tensión Hall a inducción magnética 0,25 T y corriente nominal de control - 70 mV (sensibilidad  $\gamma = 280$  mV/T);

Tensión residual a la corriente nominal de control - no más de 7 mV  
Resistencia de entrada - 1,8 ... 3 kOhmios (resistencia entre pines I);  
Resistencia de salida - no más de 3 kOhm (resistencia entre los pines  $U_h$ );

Peso: no más de 2,5 g.

$-I_h$  y  $+I_h$  - clavijas para la conexión de la fuente de corriente de control (clavijas de corriente);

$-U_h$  y  $+U_h$  son pines de señal de salida (pines Hall); la resistencia entre los pines de corriente es menor que entre los pines Hall.

El sensor DHC-0.5A es sensible tanto a la dirección de la inducción magnética como a la polaridad de la corriente de control.

**Sensores de campo magnético (sensores Hall) basados en láminas de GaAs.** Las características técnicas de los sensores de campo magnético basados en el efecto Hall (sensores Hall) dependen tanto del material utilizado como de las dimensiones geométricas y la forma del elemento sensible. Los materiales más utilizados para los elementos sensibles de los sensores Hall son el InSb y el GaAs, cuyas principales ventajas son la elevada movilidad de los portadores de carga, lo que se traduce en una alta sensibilidad de los sensores.

A continuación se presentan los resultados del desarrollo y estudio experimental de las características metrológicas de los transductores de campo magnético (sensores) y el efecto de la irradiación de neutrones sobre los principales parámetros.

Para crear sensores se utilizaron películas de GaAs sobre arseniuro de galio semiaislante. El propósito del desarrollo era crear sensores con bajos niveles de ruido, alta linealidad de dependencia de la señal útil con el campo magnético, débil dependencia de los parámetros con la temperatura, así como miniaturización del área de trabajo. La Fig. 3.2 muestra un esquema aproximado del elemento sensor de detección.

El grosor de las películas de GaAs variaba entre 0,1-5  $\mu\text{m}$ , y la concentración de portadores de corriente  $\cong 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . El tamaño del área de trabajo era de  $100 \times 100 \mu\text{m}$ . Dependiendo del grosor de las películas y de la concentración de portadores de corriente, las resistencias eléctricas de entrada y salida de los sensores variaron en el rango de 15 - 1500 ohmios. Las corrientes de alimentación eran de 3 - 150 mA. La señal de salida inicial  $U_o$  estaba dentro de 0,01 - 5 mV, la dependencia de la temperatura de  $U_o$  era inferior a 0,1 %/K,  $R \sim 0,08$  %/K, la sensibilidad al campo magnético estaba

dentro de 80 - 500 mV/T. Linealidad de la señal de salida en el campo de hasta 2 Tesla no es peor que 0,1%.

Los sensores pueden funcionar en la gama de temperaturas de 4,2 - 400 K.

Se sabe, por ejemplo, que la resistencia de los dispositivos semiconductores a la irradiación de radiación depende del nivel de dopaje, la defectividad del material semiconductor, etc. Las propiedades electrofísicas de los semiconductores son las más afectadas por la irradiación de neutrones. La irradiación de neutrones es la que más influye en las propiedades electrofísicas de los semiconductores. Y el mecanismo de influencia radica principalmente en la formación de defectos estructurales y la transformación radiactiva de los átomos. Con el aumento del nivel de dopaje, la influencia de la irradiación se debilita.

Las características de los sensores se midieron a una temperatura de 300 K antes de la irradiación y después de la irradiación con flujos de neutrones  $\Phi$  de  $8 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  a  $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ . La temperatura durante las mediciones se estabilizó con una precisión de 0,1 K. La energía neutrónica fue de 1 MeV, la intensidad del flujo fue de  $(2-4) \cdot 10^8 \text{ fl/s}$ .

La Fig. 3.5 muestra la dependencia del cambio relativo de la resistencia de entrada de los transductores de medición del campo magnético (sensores Hall) con el valor del flujo de neutrones  $\Phi$ . La resistencia de entrada de los sensores es de 1,1 kOhm, la señal de salida inicial no es superior a 4,5 mV, la sensibilidad es de 350 mV/T.

Los cambios de resistencia comienzan a flujos de  $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  y ascienden al 15-20 %, y a  $1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  la resistencia aumenta 3,3 veces. Al mismo tiempo, la señal de salida inicial a una tensión de alimentación constante de 4,5 V no cambió más de un 15 %, lo que equivale al efecto de un campo magnético de hasta 1 mT. Con una tensión de alimentación constante, la sensibilidad tras la irradiación disminuyó aproximadamente 1,4 veces. Tras la irradiación con flujos de  $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$  la resistencia de los sensores crece hasta el infinito.

Así, los sensores de campo magnético son operables en un amplio rango de temperaturas, tienen una débil dependencia de la temperatura de la sensibilidad y la señal de salida inicial (menos del 0,1%). La no linealidad de la señal de salida no supera el 0,1% en el campo hasta 2T, la sensibilidad puede alcanzar 500 mV/T.

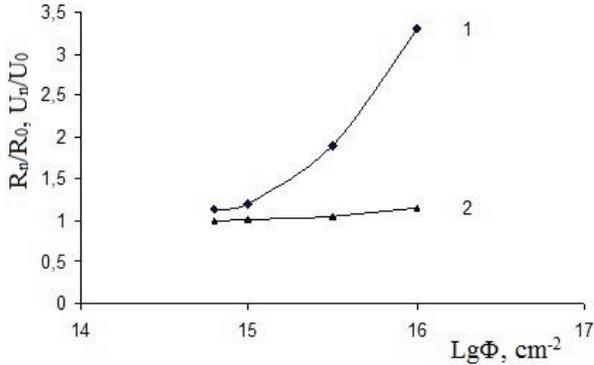


Fig. 3.5. Dependencia del cambio relativo de la resistencia de entrada  $R_n / R_0$  (1) (donde  $R_n$  - valor de la resistencia después de la irradiación,  $R_0$  - resistencia inicial) y de la señal de salida inicial  $U / U_{n0}$  (2) (donde  $U_n$  - valor de la señal de salida después de la irradiación,  $U_0$  - señal de salida inicial) del transductor de medición del campo magnético con el valor de la irradiación del flujo de neutrones.

Los estudios han demostrado que a 300 K los transductores desarrollados son operables hasta niveles de irradiación de neutrones de  $10 \text{ cm}^{15-2}$ . Los cambios resultantes en las características de los transductores hasta niveles de  $1 \cdot 10 \text{ cm}^{16-2}$  pueden explicarse hasta cierto punto, debido a que se observó una buena repetibilidad de los resultados. Los transductores pueden utilizarse tanto para el diagnóstico de dispositivos técnicos de ingeniería de energía nuclear, equipos criogénicos, y, debido a la alta sensibilidad, en ecología para el control de parámetros ambientales, tales como campos electromagnéticos, etc.

***Algunas características de sensores experimentales de campo magnético (sensores Hall) basados en películas de GaAs para temperaturas criogénicas y rango climático:***

- material - GaAs
- Temperatura de funcionamiento 4,2 - 400 K
- corriente de alimentación 1 - 100 mA
- sensibilidad 60 - 500 mV/T
- señal inicial dentro de 0,010 - 5 mV
- área activa del sensor  $100 \times 100 \mu\text{m}$
- dimensiones totales - al menos  $1 \times 1 \times 0,4 \text{ mm}$

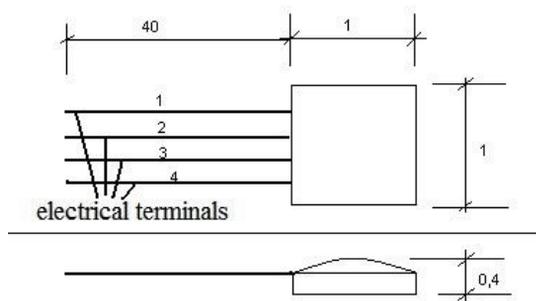


Fig. 3.6: Representación esquemática del sensor Hall. Salidas: 1,4 - tensión de alimentación(corriente); 2,3 - tensión de salida ( $U_h$ )

### 3.4. Una serie de generadores Hall EMF de precisión (sensores Hall)

Aquí se presentan los resultados de la investigación y las características de los sensores Hall de alta precisión basados en InSb y GaAs (Zhelamsky M.V., Gorbachuk N.T. et al.). Las mediciones magnéticas son una de las principales en el desarrollo de equipos electrofísicos que utilizan campos magnéticos. El pequeño tamaño de los generadores Hall de f.e.m. (HG) es una ventaja innegable entre otros dispositivos magnetométricos, lo que determina su amplia aplicación para mediciones magnéticas en electrofísica.

Cuando se miden campos intensos, una de las principales fuentes de error es la influencia de la temperatura en la señal de salida del HG, que es insignificante en el contexto de una señal de salida relativamente grande. Por ejemplo, en un campo de 2 Tesla, la señal de salida del HG puede alcanzar los 200 mV, mientras que un cambio de temperatura de 1 °C modifica la señal de salida en unos pocos microvoltios. Además, a tal nivel de señales la influencia de la temperatura es aditiva con la señal principal y puede compensarse metódicamente, especialmente en la región criogénica, donde el helio líquido es un estabilizador ideal de la temperatura y los campos son suficientemente altos. Cuando se miden campos intensos, debe prestarse especial atención a minimizar los componentes planares y de gradiente de la señal de salida del HG.

En campos magnéticos débiles, a nivel de pequeñas señales de salida HG, son más pronunciadas las fuentes de error adicionales, como los efectos

termoeléctricos (Seebeck, Peltier), los efectos de campo propio, las propiedades y la homogeneidad del material aplicado. Por lo tanto, por ejemplo, se requieren medidas especiales para medir la distribución del campo magnético en la zona central de un imán cuadrupolar.

En ambos casos, también es importante minimizar el error, la calibración y la direccionalidad.

El objetivo del trabajo era tanto obtener la máxima sensibilidad absoluta de los generadores Hall en la medición de campos magnéticos débiles como maximizar la precisión y estabilidad en la medición de campos fuertes.

Se describen los resultados del desarrollo de dispositivos magnetométricos basados en generadores Hall para la medición de campos magnéticos débiles a nivel del campo terrestre, incluyendo tanto la optimización del diseño, la tecnología de fabricación y las propiedades electrofísicas de los HG, como un conjunto de circuitos, diseño, medidas metodológicas destinadas a lograr una alta precisión y sensibilidad absoluta de las mediciones.

También se describen los sensores de campo magnético de tres componentes desarrollados.

**Se analizan las principales propiedades y características de los dispositivos desarrollados.**

Se utilizaron dos materiales semiconductores: arseniuro de galio dopado (GaAs) y antimoniuro de indio (InSb). El primero se utiliza para obtener la máxima estabilidad de temperatura y linealidad, el segundo - para la máxima sensibilidad de las mediciones.

Para mejorar la precisión de la medición, se elige una forma óptima de cristal en forma de cruz, mostrada en la fig. 3.7.



Fig. 3.7. Cristal (chip) del oscilador Hall.

Las dimensiones de la zona activa del generador son  $100 \times 100 \mu\text{m}$  y pueden reducirse aún más si es necesario. La determinación de la posición central de la zona de trabajo se realiza en un equipo especial con una

precisión no peor que  $\pm 0,5 \mu\text{m}$ , la determinación de la posición angular de la normal al plano HG - con una precisión no peor que  $\pm 0,1^\circ$ .

Una amplia gama de variación de la resistencia de entrada (5-1500 ohmios) ofrece la posibilidad de seleccionar el valor nominal de la corriente dentro de 1-200 mA con una sensibilidad magnética invariable para obtener la resolución y velocidad requeridas en las mediciones del campo magnético.

El valor del offset inicial de HG determinado por la tecnología es de -500  $\mu\text{V}$ . La reducción de la desviación al valor  $< 100 \mu\text{V}$  se proporciona mediante un ajuste adicional. La variación de los parámetros en un lote no supera el 10%. El coeficiente de temperatura de la tensión de offset inicial está determinado por el diseño del HG y se puede llevar a un valor inferior a 1-2  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ .

La termoestabilización activa del HG proporciona una estabilidad de los resultados de  $\pm 0,05 \text{Gs}$  a lo largo de 8 h de funcionamiento. El intervalo de temperatura de funcionamiento es de 4,2-450 K.

Para los HG de precisión, la sensibilidad magnética a la corriente de alimentación nominal es de  $8 \pm 2 \mu\text{V/Gs}$  para GaAs y  $25 \pm 3 \mu\text{V/Gs}$  para InSb. La alta sensibilidad absoluta de las mediciones se consigue gracias a la minimización del ruido del HG y del equipo, a las medidas de diseño y los circuitos adoptados, así como a un algoritmo especial.

Se crearon conjuntos termoestabilizados de tres componentes a partir de los HG descritos. Cada conjunto consta de tres HG de un componente montados en los planos ortogonales del cubo de cobre de soporte. En los planos libres se montan un termómetro y un calentador que se utilizan para estabilizar la temperatura del conjunto. El cubo de soporte de la placa de circuito impreso está cubierto con aislamiento térmico externo y montado sobre un soporte aislante del calor. Los principales parámetros de los conjuntos HG de tres componentes se indican en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Parámetros básicos de los conjuntos HG de tres componentes

Parameter	Value
Assembly size	Cube with a side of 7 mm
Accuracy of determining the spatial and angular coordinates of single-component GH	0.5 $\mu\text{m}$ , 0.1 corner radius
Rated supply current	30 mA
Assembly stabilization accuracy in the range $\pm$ 60	No worse 0,05 $^{\circ}\text{C}$
Absolute sensitivity with special equipment	<1 mGs
Assembly dimensions without equipment	20x20x15 mm

### 3.5. Mediciones estimadas de campos magnéticos alternos en el entorno

Son muchos los trabajos dedicados a los problemas de medición de los campos magnéticos y electromagnéticos alternos. Analizando la bibliografía podemos decir que los métodos más utilizados para medir campos magnéticos se basan en el fenómeno de la inducción electromagnética y el efecto Hall.

El método de medición por inducción se basa en el fenómeno de la inducción electromagnética, que consiste en que en un circuito conductor situado en un campo magnético, en determinadas condiciones, surge una fuerza electromotriz (FEM), que viene determinada por la expresión conocida:

$$\varepsilon_i = -N d\Phi/dt \quad (3.11),$$

donde  $N$  es el número de espiras del circuito,  $\Phi$  es el flujo magnético que penetra en el circuito,  $t$  es el tiempo.

El método de inducción puede utilizarse para medir campos magnéticos variables y constantes.

Para medir los campos magnéticos permanentes, es necesario modificar directamente en el tiempo uno o varios parámetros de la bobina de inducción (circuito): el ángulo  $\alpha$  entre la normal al plano del circuito y el vector de inducción magnética, el área del circuito  $S$ , la permeabilidad magnética relativa del núcleo  $\mu_c$ , el coeficiente de desmagnetización del núcleo  $k$ . El valor de la inducción EMF para estas condiciones puede determinarse mediante la expresión

$$\varepsilon_i = -N \left( X \frac{dB}{dt} + B \frac{dX}{dt} \right) \quad (3.12),$$

donde  $X = S \cdot \mu \cdot \cos \alpha / [1 + N(\mu_c - 1)]$  es el llamado parámetro generalizado de la bobina de inducción, cuyos detalles no son importantes para este trabajo.

La precisión de la medición de campos magnéticos mediante un sensor de inducción depende tanto de las características de diseño del propio sensor como, en gran medida, del esquema de medición y del equipo secundario que determina la magnitud de la señal de salida.

Aquí hay que señalar que en la práctica la señal medida, por regla general, no tiene una forma sinusoidal correcta, a menudo en forma de impulsos separados, etc.

La esencia del método de medición con ayuda de transductores (sensores) Hall consiste en la utilización del efecto Hall, que consiste en la aparición de EMF  $\varepsilon_{hal}$  en la dirección perpendicular a la corriente  $I$  en la placa conductora colocada en el campo magnético  $B$ . A un valor constante de corriente en la placa, el valor de EMF viene determinado por la expresión:

$$\varepsilon_{hal} = A \cdot I \cdot B / n \cdot e \cdot d \quad (3.13),$$

donde  $A$  es una constante que varía entre 1...2 dependiendo de los mecanismos de dispersión de los portadores de corriente,  $n$  es la concentración de portadores de corriente en el material de la placa,  $e$  es la carga del electrón,  $d$  es el espesor de la placa.

Los materiales semiconductores se utilizan para fabricar convertidores Hall, ya que en ellos el efecto considerado es de la mayor importancia. Y recientemente se han utilizado semiconductores en forma de películas sobre sustratos aislantes, lo que simplifica la tecnología de fabricación, permite la miniaturización, etc.

Los transductores Hall basados en InSb, GaAs tienen la mayor sensibilidad. Además, se utilizan diversos métodos tecnológicos para aumentar la sensibilidad: diseño integrado, uso de concentradores ferromagnéticos y otros.

La evaluación experimental de los valores de los campos magnéticos alternos en el entorno que surgen durante el funcionamiento de diversos equipos domésticos e industriales se llevó a cabo utilizando una bobina de inducción fabricada y, en algunos casos, un transductor Hall basado en InSb.

Las mediciones con ayuda de la bobina de inducción se realizaron tras su calibración según el esquema de conexión simplificado. Durante la calibración, la bobina se colocó en un campo magnético alterno creado por una corriente sinusoidal  $I$  en el conductor. Para ello se utilizó un generador

de corriente alterna. La señal de salida de la bobina se midió con un voltímetro de tensión alterna.

La magnitud del campo magnético a una cierta distancia  $r$  del conductor se calculó sobre la base de la ley de Bio-Savard-Laplace:

$$B = -N\mu\mu_0 I/2\pi r \quad (3.14),$$

donde  $\mu$  es la permeabilidad magnética relativa del medio,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Gn/m es la constante magnética.

Durante la calibración se variaron la distancia al conductor, la magnitud de la corriente y su frecuencia. Los resultados se promediaron y se representaron gráficamente.

La Fig. 3.8 muestra la dependencia de la fuerza electromotriz resultante en la bobina (tensión  $U$  medida con un voltímetro) de la frecuencia del campo magnético alterno (corriente en el conductor). El gráfico muestra el recálculo de  $U$  en sensibilidad al campo magnético.

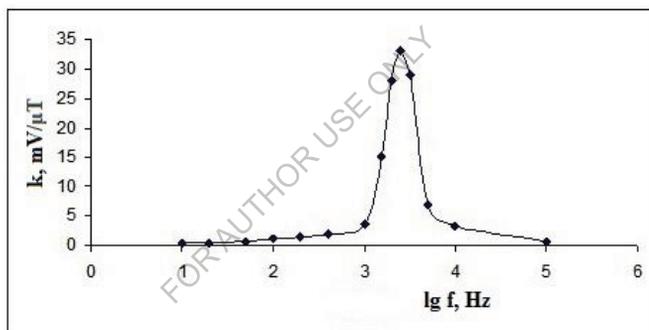


Fig. 3.8. Dependencia de la sensibilidad  $k = \Delta U / \Delta B$  de la bobina de inducción fabricada con la frecuencia del campo magnético  $f$ .

En la posterior aplicación práctica de la bobina, se midió la señal de salida y su frecuencia. Se utilizó el mismo voltímetro para las graduaciones y las mediciones prácticas, ya que sus características técnicas pueden influir en los resultados obtenidos. De acuerdo con los datos obtenidos y la curva de calibración, se determinó el valor del campo magnético alterno.

Para las mediciones con el transductor Hall basado en InSb se utilizó un concentrador ferromagnético. Como resultado, la sensibilidad fue de aproximadamente  $1 \cdot 10^4$  mV/T y puede aumentarse con mejoras en el diseño. Los datos obtenidos con los transductores Hall coincidieron con las mediciones de la bobina de inducción con una precisión del 20%.

Los valores determinados de los campos magnéticos alternos emitidos por diversos dispositivos eléctricos se resumen en el cuadro 3.2.

Tabla 3.2. Resultados de las mediciones de los campos magnéticos de diferentes fuentes de radiación

<b>Object</b>	<b>Distance</b>	<b>Magnetic field value, <math>\mu\text{T}</math></b>
Supra TV	1.5 m from the screen	1-2
	3.5 m from the screen	0.03
	1.5 m from the side	5
TV Slavutich (big screen)	3 m from the screen	4
	0,2 m from the side	50
computer monitor	0,1-0,2 m from the screen	3-5
high-voltage power line (110 kV)	70-100	2-5
in - off household appliances (iron, lamp)	0.1-1.0	up to 2 (pulses)

Las normas sanitarias existentes para niveles permisibles de campos magnéticos, tomados de diversas fuentes, son valores de 0,2-0,5  $\mu\text{T}$ . Cabe señalar aquí que en la bibliografía conocida no se indican las frecuencias de radiación, aunque desde el punto de vista físico pueden no afectar de la misma manera a los objetos biológicos.

A pesar del enfoque bastante simplificado, los resultados obtenidos concuerdan bastante bien con otros datos conocidos de la literatura. Esto nos permite hablar de la posibilidad de utilizar los métodos descritos para la indicación y evaluación de los niveles de radiación electromagnética, la creación de indicadores económicos (domésticos) de radiación electromagnética, así como la creación de dispositivos de medición de alta precisión basados en transductores Hall.

### **3.6. Sensor Hall de automoción. Sensor Hall en el sistema de encendido**

Actualmente, los sensores Hall se utilizan mucho en la industria del automóvil. Se utilizan para controlar el movimiento y la rotación de diversos

componentes del coche, las vibraciones del motor, en el sistema de encendido y otros.

Probablemente, el más famoso es el sensor Hall de automoción que se utiliza para controlar y garantizar el funcionamiento del sistema de encendido del automóvil. El esquema de su dispositivo se muestra en la fig. 3.9.

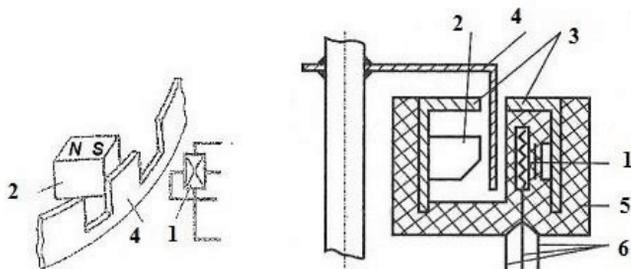


Fig. 3.9. Representación esquemática del dispositivo del sensor Hall del automóvil. 1- elemento sensible del sensor Hall, del cual salen los cables al chip de procesamiento de la señal de salida, 2 - imán permanente, 3 - conductores magnéticos, 4 - palas del rotor, 5 - carcasa de plástico, 6 - cables del sensor.

El sensor consta de un elemento sensor 1 (sensor Hall directamente) y un microcontrolador 1 integrado con él (microcircuito para procesar la señal de salida del sensor Hall). Como resultado, el sensor Hall de automoción tiene tres contactos 6 (terminales) para la conexión en el circuito eléctrico (circuito) del vehículo. El sensor Hall del automóvil para el sistema de encendido también tiene un imán permanente 2, que está separado por un espacio del elemento sensor del sensor Hall, y cables magnéticos. El campo magnético del imán permanente es capaz de inducir una señal de salida del sensor Hall, y las láminas metálicas 4 del eje giratorio, superponiéndose (derivación) el flujo magnético dará lugar a un cambio correspondiente (oscilación) de la señal de salida. Además, la señal de salida se conecta con el sistema de suministro de chispa de encendido en el momento deseado de la posición del eje.

### ¿Cómo compruebo el sensor Hall?

Hay varias formas de comprobar si el sensor Hall de tu coche funciona correctamente. Una de las más sencillas es la siguiente. Conecte el sensor Hall del automóvil según el diagrama que se muestra en la fig. 3.10. El sensor Hall extraído puede alimentarse con una pila Krona (9 V). Para medir la señal de salida (tensión)  $V$ , lo mejor es utilizar un multímetro digital compacto. Si

el flujo magnético que atraviesa el elemento sensor del sensor Hall cambia (por ejemplo, al girar el eje del rotor o simplemente al puentear el hueco con una placa metálica), la señal de salida del sensor también cambiará, lo que indicará su operatividad. La señal de salida puede variar en función del modelo de sensor, pero suele estar comprendida entre 0,5 y 1,0 V.

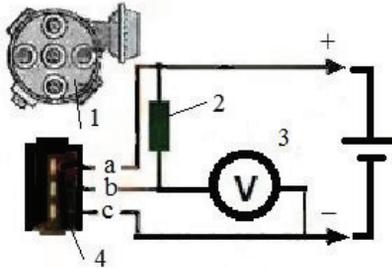


Fig. 3.10. Comprobación del sensor Hall. General chem. 1 - sensor del distribuidor, 2 - resistencia de 2 kOhm, 3 - voltímetro (multímetro digital), 4 - conector del sensor del distribuidor (sensor Hall).

### 3.7. Transductores magnetorresistivos. Efecto magnetorresistivo

La modificación de la resistencia al campo magnético de un conductor (semiconductor) por el que circula una corriente eléctrica se denomina efecto magnetorresistivo. El aumento de la resistencia eléctrica bajo la acción de un campo magnético se produce tanto en el caso de perpendicularidad del vector de inducción magnética a la superficie de las placas semiconductoras (magnetorresistencia transversal) como en el caso de paralelismo (magnetorresistencia longitudinal). Sin embargo, la resistencia cambia en el segundo caso, por regla general, de forma insignificante.

La variación de la resistencia del semiconductor en un campo magnético  $B$  es proporcional al cuadrado de la movilidad  $\mu$  de los portadores de corriente:

$$\Delta\rho/\rho = c \mu^2 \cdot B^2 \quad (3.15),$$

donde  $c$  es el coeficiente de proporcionalidad relacionado con la dispersión de los portadores de carga.

En una placa semiconductor situada en un campo magnético, una fuerza de Lorentz proporcional al campo Hall eléctrico actúa sobre los portadores de carga en movimiento. Sin embargo, el campo Hall sólo equilibra los portadores que viajan a velocidades medias. En medios más lentos el campo Hall es mayor, en medios rápidos la fuerza de Lorentz es

mayor. La trayectoria se curva y la longitud efectiva del camino libre disminuye, lo que provoca un aumento del arrastre. Obviamente, cuanto menor es el efecto Hall en un semiconductor, mayor es la resistencia. En un semiconductor con dos tipos de portadores, el campo Hall es menor, por lo que las líneas de corriente no son paralelas a las caras, y el efecto de magnetorresistencia es correspondientemente mayor.

Para eliminar la influencia del efecto Hall, es posible utilizar formas geométricas especiales de muestras en un semiconductor con predominio de un tipo de portadores. El ejemplo más evidente de la influencia de la estructura en el efecto de magnetorresistencia es el disco Corbino, que es una placa semiconductor con una disposición concéntrica de contactos: uno en el centro y el segundo en la circunferencia a igual distancia del primero. Si se aplica tensión a los electrodos de un disco de este tipo, las trayectorias de los electrones parecerán rayos radiales que salen del centro. Cuando se coloca en un campo magnético perpendicular al plano de la placa, los portadores se desvían a lo largo de la superficie, las líneas de corriente se alargan, pero no se produce la acumulación de cargas ni surge el EMF de Hall. En esta estructura se observa el máximo efecto de magnetorresistencia, pero debido a las dificultades técnicas, la aplicación práctica del disco Corbino es muy difícil.

### **3.8. Diseños de magnetorresistencias**

El efecto de aumento de la magnetorresistencia debido a la geometría de la resistencia también puede conseguirse en una oblea semiconductor cuya longitud  $L$  sea mucho menor que su anchura  $W$ . Cuando la placa se somete a un campo magnético cuya dirección es perpendicular al plano de la placa, la tensión Hall se atenúa debido al efecto de derivación de los electrodos de corriente. Geométricamente, el efecto de magnetorresistencia en este caso es más fuerte cuanto menor es la relación  $L/W$ . Para aumentar aún más el efecto, se conectan resistencias con una relación  $L/W$  pequeña.

La base del material del magnetorresistor suele ser el antimonio de indio, que tiene una elevada movilidad de los portadores de corriente, al que se añade un 1,8% de NiSb. Tras la fusión y posterior enfriamiento, el antimonio de níquel cristaliza en antimonio de indio en forma de agujas con un grosor de  $1\ \mu\text{m}$  y una longitud de unos  $50\ \mu\text{m}$ , dispuestas paralelas entre sí y perpendiculares a la dirección de la corriente. La conductividad de

la aguja de NiSb es de unos  $10^4 \text{ ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ , mientras que la del InSb es dos órdenes de magnitud menor.

Así, las agujas desempeñan el papel de buenos electrodos conductores que dividen el grueso del semiconductor en regiones separadas con una relación  $L/W$  pequeña. Esto conduce a una fuerte supresión del campo Hall y, en consecuencia, a la curvatura de las trayectorias de los electrones bajo la acción del campo magnético, es decir, a un aumento del efecto de magnetorresistencia.

Otra forma de realizar este principio se basa en la tecnología microelectrónica. Su esencia reside en la formación de magnetorresistencias basadas en una película epitaxial de silicio que contiene secciones de derivación de baja resistencia de silicio policristalino (PS) situadas perpendicularmente a la dirección de la corriente.

La tecnología de fabricación de este material magnetorresistivo se basa en el crecimiento simultáneo de películas de silicio monocristalino y policristalino (PS). Mediante procesos de oxidación y fotolitografía, se forman regiones locales de SiO<sub>2</sub> en las que crecen películas de PC durante el crecimiento epitaxial de la película.

Para cerrar el EMF Hall, las regiones PS se dopan con átomos de fósforo hasta una concentración de  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$ , y, teniendo en cuenta la mayor velocidad de difusión de los átomos dopantes en PS en comparación con el silicio monocristalino, el dopaje se lleva a cabo simultáneamente con el proceso de creación de la película en las regiones n+ - monocristalinas bajo contactos óhmicos.

## Bibliografía

1. O.K.Homeriki. *Poluprovodnikovye preobrazovateli magnitnogo polya* [Transductores semiconductores de campo magnético]. M.-Energatomizdat, 1986, 136 pp.
2. Vikulin I.M., Staféev V.I. *Fizika poluprovodnikovyykh priborov* [Física de los dispositivos semiconductores]. M.: *Radio i svyaz'*, 1990. 264 p.
3. Belyakov V.A., Gorbachuk N.T., Didenko P.I., Filatov O.G., Sychevskiy S.E., Firsov A.A. etc. *Poluprovodnikovye izmeritel'ne preobrazovateli deformatsii, temperatury i magnitnogo polya dlya primeneniya v usloviyakh radiatsionnogo vozdeystviya, shirokom diapazone*

temperatur i magnitnykh poley [Transductores semiconductores de medición de la deformación, la temperatura y el campo magnético para su uso en condiciones de exposición a la radiación, una amplia gama de temperaturas y campos magnéticos]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki*", Seriya: Elektrofizicheskaya apparatura, v.3(29), 2005, p.46-54.

4. N.Gorbachuk, M.Larionov, A.Firsov, N.Shatil Sensores semiconductores para un amplio rango de temperaturas. *Sensors & Transducers Journal and Magazine*, Vol. 162, Issue 1, January 2014, pp.1-4.

5. Kulakov V.M., Ladygin E.A., Shekhovtsov V.I. et al. *Deystvie pronikayushchey radiatsii na izdeliya elektronnoy tekhniki*. Moskva [Acción de la radiación penetrante en productos de equipos electrónicos]. Moscú: *Sov. radio*, 1980. 224 p.

6. Gorbachuk N.T., Didenko P.I. *Izmeritel'nye preobrazovateli na osnove GaAs, polikremniya i dispersnogo germaniya i perspektivy ikh ispol'zovaniya* [Transductores de medición basados en GaAs, polisilicio y germanio disperso y perspectivas de su uso]. *Perspektivnye materialy*, 2004, N 5, p.93-97.

7. Gorbachuk N.T., Didenko P.I. *Vliyaniye neytronnogo oblucheniya na kharakteristiki poluprovodnikovyykh izmeritel'nykh preobrazovateley temperatury, deformatsii, magnitnogo polya* [La influencia de la irradiación de neutrones en las características de los transductores semiconductores de medición de temperatura, deformación y campo magnético]. *Poverkhnost'*, 2005, 4, pp.57-58.

8. Henrichsen K. N. Clasificación de los métodos de medición magnética //CERN acceleration schol. Medición magnética y alineación. Montreux. Switzerland. March, 1992 , p.70-83.

9. Berkes B. Generadores Hall /Escuela de aceleración del CERN. Medición y alineación magnética. Montreux. Switzerland. March, 1992 , p.167-192.

10. Afanasyev Yu. V., Sludentsov N. V., Shchelkin A. P. *Magnitometricheskie preobrazovateli, pribory, ustanovki*. L.: [Transductores magnetométricos, dispositivos, instalaciones]. L.: *Energiya. Leningradskiy filial*. 1972.- 272p.

11. Knoopers H. G. et.al. Third round of the ITER strand bench mark test // *Proceedings of EUCAS-97*. P. 1271-1274.

12. Zhelamskii M.V., Sychevskii S.E., Filatov O.G., Gorbachuk N.T. et al. *Ryad pretsizionnykh generatorov E.D.S. Kholla* [A Range of Precision

E.D.S. Hall Oscillators]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Elektrofizicheskaya apparatura*, v. 1(27), 2002, pp.9-14.

13. V.V.Panin, B.M.Stepanov. *Izmerenie impul'snykh magnitnykh i elektricheskikh poley* [Medición de campos magnéticos y eléctricos pulsados]. - *Moskva: Energoatomizdat*, 1987. - 120 p.

14. I.A.Bolshakova, M.R.Gladun, R.L.Golyaka y otros. *Mikroelektronnye sensornye ustroystva magnitnogo polya: Monografiya / Pod red. Z.Ya. Gotri* [Dispositivos sensores microelectrónicos del campo magnético: Monografía / Editado por Z.Y. Gotry]. - *L'vov: Izdatel'stvo Natsional'nogo universiteta "L'vovskaya politekhnika"*, 2001. - 412 p.

15. Gorbachuk N.T., Firsov A.A.. *Datchiki magnitnogo polya (datchiki Kholla) na osnove plenok GaAs* [Sensores de campo magnético (sensores Hall) basados en láminas de GaAs].

Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Perspektivnye innovatsii v nauke, obrazovanii, proizvodstve i transporte '2010" [Conferencia científica y práctica internacional "Perspectivas de las innovaciones en la ciencia, la educación, la producción y el transporte '2010"]. *Sbornik nauchnykh trudov*, vol.6, pp.24-25, 21-30 de junio de 2010, Odessa.

16. N.T. Gorbachuk, P.I. Didenko. *Otsenochnye izmereniya peremennykh magnitnykh poley v okruzhayushchey srede* [Mediciones estimadas de campos magnéticos alternos en el medio ambiente]. *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Nauchnye issledovaniya i ikh prakticheskoe primeneniye. Sovremennoe sostoyaniye i puti razvitiya '2010"* [Conferencia científica y práctica internacional "La investigación científica y su aplicación práctica. Estado moderno y vías de desarrollo '2010"]. *Sbornik nauchnykh trudov*, vol.3,p.40-41, 4-15 de octubre de 2010, Odessa.

17. Amoskov V.M., Vasiliev V.N., Gorbachuk N.T., Sychevsky S.E. et al. 16. *Pretsizionnyy trekhkomponentnyy magnetometr na generatorakh e.d.s. Kholla dlya izmereniya slabykh magnitnikh poley* [Magnetómetro de precisión de tres componentes en generadores Hall e.d.s. para la medición de campos magnéticos débiles]. // *Giroskopiya i navigatsiya* [Giroscopia y navegación], No. 4(31), 2000. p. 56.

18. Filatov, O.G.; Soldatenkov, V.A.; Sychevskiy, S.E.; Gorbachuk, N.T., et al. *Sistema elektromagnitnogo pozitsionirovaniya dlya sistemy pritselivaniya i indikatsii, ustanovlennoy na shleme* [Sistema de

posicionamiento electromagnético para sistema de puntería e indicación montado en casco]. *Elektronika: Nauka, tekhnologii, biznes*. Elektronika: Nauka, tekhnologii, biznes [Electrónica: ciencia, tecnología, negocios]. 5/2003, p.62-67.

19. Filatov O.G., Sychevskiy S.E., Gorbachuk N.T., et al. *Razrabotka pretsizionnykh datchikov fizicheskikh velichin na osnove optimizirovannykh magnitnykh tsepey* [Desarrollo de sensores de precisión de magnitudes físicas sobre la base de circuitos magnéticos optimizados]. *Nauchno-tekhnicheskii zhurnal "Aviakosmicheskoe priborostroenie"* [Revista científica y técnica "Ingeniería de instrumentos aeronáuticos"], 2004, N 5, pp. 7-13.

20. Zhelamskiy M.V., Konstantinov A.B., Sychevskiy S.E., Gorbachuk N.T., et al. *Odnokomponentnyy pervichnyy preobrazovatel', odnokomponentnyy datchik, trekhkomponentnyy pervichnyy preobrazovatel' i trekhkomponentnyy datchik magnitnogo polya, rabotayushchie na effekte Kholla*. [Transductor primario de un componente, sensor de un componente, transductor primario de tres componentes y sensor de campo magnético de tres componentes que funcionan según el efecto Hall]. Patente de la Federación de Rusia №2001115570.

21. Gorbachuk N.T., Mitin V.V., Thorik Yu.A. Schwartz Yu.M. Piezo-Hall effect in p-germanium. *Phys. Stat. Sol.(c)* 100. 1980, p.309.

22. Gorbachuk N.T. *Chuvstvitel'nost' magnitosoprotivleniya i khollovskoy podvizhnosti v slabolegirovannom p-Ge k izmeneniyu kontsentratsii primesi* [Sensibilidad de la magnetorresistencia y la movilidad de Hall en p-Ge ligeramente dopado a los cambios en la concentración de impurezas]. *UFZh*, 1984, No. 6, P.92.

23. Gorbachuk N.T., Shvarts Yu.M. *Vliyanie deformatsii na velichinu magnitosoprotivleniya v ob "emnom p-Ge i plenkakh p-Ge na arsenide galliya* [Effect of deformation on the magnitude of magnetoresistance in bulk p-Ge and p-Ge films on gallium arsenide]. *OPT*, 1984, No. 6, p. 88.

24. Mykola Gorbachuk. MATERIALES ELECTROTÉCNICOS. LAP LAMBERT Academic Publishing. 120 High Road, East Finchley, Londres, N2 9ED, Reino Unido, 2024, 112p. ISBN: 978-620-3-46212-8.

25. Sominskiy M.S. *Poluprovodniki* [Semiconductores].- L. Nauka 1967. 439p.

26. Kucheruk I.M., Gorbachuk I.T., Lutsik P.P. *Zagal'niy kurs fiziki: Navchal'niy posibnik* [Curso general de física: Guía de estudio], T. 1-3. - K.:

*Tekhnika*, 2001.

27. Baranochnikov M.L. *Mikromagnitoelektronika*  
[Micromagneto-electronica]. *Tom 1. DMK.-M.*:2001.

FOR AUTHOR USE ONLY

## Capítulo 4. Humedad, gases. Métodos de medida de la humedad. Higrómetro

El aire que nos rodea contiene cierta cantidad de vapor de agua (moléculas de agua). La cantidad máxima posible de vapor de agua en el aire (saturación del aire con vapor de agua) depende de la temperatura. El número de moléculas del vapor de agua de saturación aumenta con el incremento de la temperatura. El vapor de agua de saturación se forma, por ejemplo, en la superficie del agua cuando las temperaturas del agua y del aire son iguales - se produce el equilibrio: el número de moléculas de agua que se evaporan es igual al número de moléculas que se condensan.

En general, el aire normal a una temperatura determinada no contiene vapor de agua saturado. Pero cuando la temperatura del aire cambia (desciende, por ejemplo, por la noche), el vapor de agua no saturado puede convertirse en vapor de agua saturado: el punto de rocío. El punto de rocío es la temperatura a la que el vapor de agua del aire se satura.

Según el nivel de contenido de vapor de agua, el aire se caracteriza por su humedad. La humedad absoluta  $\rho$  es la cantidad de vapor de agua contenida en 1 metro cúbico a una temperatura dada. La humedad relativa del aire  $f$  es la relación entre la humedad absoluta y la cantidad de vapor  $\rho_o$ , necesaria para saturar 1 metro cúbico de aire a una temperatura dada (es decir, la cantidad correspondiente a la condición de punto de rocío para una temperatura dada. el valor de  $\rho_o$  puede consultarse en las tablas correspondientes):

$$f = (\rho/\rho_o)100\% \quad (4.1).$$

Los instrumentos para medir la humedad se denominan higrómetros. En la actualidad, se utilizan principalmente los siguientes métodos e instrumentos para medir la humedad del aire.

### 4.1. Higrómetros

**Higrómetros de punto de rocío.** Se coloca un pequeño espejo refrigerado (por ejemplo, mediante un elemento Peltier) en el flujo del gas investigado. Con ayuda de una fotocélula, que detecta la formación de rocío en el espejo, se regula su temperatura. Una vez medida la temperatura, se determina el punto de rocío. Hay higrómetros que utilizan electrodos en lugar de un espejo, cuya conductividad cambia como consecuencia del rocío.

**Psicrómetro.** Instrumento que consta de dos termómetros, uno humidificado y otro ordinario. Analizando la diferencia en las lecturas de los

termómetros, se determina el punto de rocío. Cuanto menor sea la saturación del aire con vapor de agua, más intensamente se evaporará el agua de la superficie del termómetro humidificado y menor será su temperatura y mayor la diferencia entre las lecturas de los dos termómetros.

**Higrómetro de electrólisis.** Se hace pasar una corriente medida de aire (gas) cerca de electrodos de platino con pentóxido de fósforo, que absorbe agua. Cuando se aplica un voltaje a los electrodos, el agua se descompone en hidrógeno y oxígeno. La corriente de electrólisis es proporcional a la cantidad de agua absorbida, es decir, a la humedad absoluta.

**Higrómetro de infrarrojos.** Midiendo la absorción de radiación infrarroja, se determina la humedad absoluta.

**Higrómetros eléctricos con una película conductora.** Dependiendo de la cantidad de vapor de agua absorbido, cambia la resistencia eléctrica de la película conductora. Una vez calibrada la película, es posible determinar la humedad absoluta del gas estudiado.

**Higrómetros de cabello.** En estos higrómetros se mide la elongación del cabello humano desengrasado y se determina la humedad del aire. La elongación bajo la influencia de la humedad puede alcanzar hasta el 2,5%.

**Higrómetros con elemento bimorfo.** La base de un higrómetro de este tipo es un muelle metálico en espiral, recubierto por un lado con una sustancia que absorbe la humedad. Bajo la influencia del agua absorbida, la sustancia se expande y modifica los parámetros geométricos del muelle. Calibrándolo es posible determinar la humedad del aire (gas).

**Higrómetro de película conductora.** El agua absorbida por ciertos materiales puede afectar a sus propiedades electrofísicas. Este fenómeno es la base del higrómetro de película conductora. Dependiendo del nivel de humedad del aire (gas) en los higrómetros con película conductora, cambia la resistencia eléctrica de la película, que es el elemento sensible del higrómetro.

Este tipo de higrómetro mide la humedad relativa del aire, lo que constituye una de sus principales ventajas, ya que la humedad relativa depende muy poco de la temperatura. La desventaja es la necesidad de calibrar cada higrómetro y la poca estabilidad de dicha calibración. La calibración puede variar como consecuencia de los depósitos de iones en la película cuando ésta entra en contacto con el polvo y otros componentes gaseosos. Además, el higrómetro no tiene una gran potencia de señal de

salida, lo que también es una desventaja. La potencia de señal del higrómetro puede aumentarse incrementando el tamaño del elemento sensor, pero al mismo tiempo pierde velocidad y aparece la histéresis.

Un higrómetro de película conductora consta de un elemento sensor: una capa de sustancia higroscópica aplicada a un sustrato aislante. Como sustancia higroscópica (elemento sensor del higrómetro) suelen utilizarse óxidos de algunos metales y otros materiales. Los contactos eléctricos se realizan, por regla general, en forma de peine. A medida que aumenta la humedad del gas y, en consecuencia, de la película sensora, disminuye su resistencia eléctrica. La dependencia en la mayoría de los casos es exponencial.

Un higrómetro con una película conductora tiene una inercia suficientemente baja y suele utilizarse para determinar pequeños valores de humedad del aire (gas).

#### **4.2. Análisis resistivo de gases. Transductor de concentración de gas**

**Un transductor resistivo de concentración de oxígeno, como un** transductor basado en óxido de titanio, puede servir de base para un analizador (sensor) de gases de escape. El óxido de titanio es una sustancia cuya resistencia varía en función del número de moléculas de oxígeno adsorbidas en su superficie.

El transductor está hecho, por ejemplo, de alambre de platino o de una resistencia de película fina, cuya superficie está recubierta de óxido de titanio. En función del contenido de oxígeno de los gases de escape, la capa de óxido de titanio modifica su resistencia y, por tanto, la resistencia global del dispositivo.

En los analizadores de gases resistivos se utilizan otras sustancias para determinar el contenido de otros gases. También existen transductores resistivos para la detección de propano y metano. Los transductores resistivos suelen tener dos elementos sensores, uno recubierto con una sustancia y el otro sin recubrir. Éste se utiliza como elemento compensador de la temperatura cuando las mediciones se realizan con el transductor incluido en un circuito de puente.

Existen analizadores de gas resistivos y elementos sensores de gas basados en su sensibilidad a los cambios en las características termofísicas de los gases circundantes.

Por ejemplo, un elemento sensible basado en el cambio de la resistencia eléctrica de los metales con la temperatura. El elemento sensible de un transductor de este tipo (catarómetro) está formado por un alambre metálico suficientemente largo conectado a una fuente de tensión eléctrica. El alambre se encuentra en el flujo del gas analizado. La cantidad de corriente que fluye y calienta el alambre se controla con gran precisión. A medida que cambia la concentración del gas circundante, la conductividad térmica del gas cambia en consecuencia. Como resultado, cambia la transferencia de calor entre el alambre y el gas circundante. En consecuencia, la temperatura del hilo y su resistencia eléctrica cambian. Esto provoca un cambio en el valor de la corriente eléctrica, que es detectado por el dispositivo de medición.

### **Bibliografía**

1. Jan F.Kreider. Manual de calefacción, ventilación y aire acondicionado. -Taylor & Francis, 2019, 680p.
2. Kucheruk I.M., Gorbachuk I.T., Lutsik P.P. Zagal'niy kurs fiziki: Navchal'niy posibnik [Curso general de física: Guía de estudio],T. 1-3. - K.: Tekhnika, 2001.
3. Sominskiy M.S. *Poluprovodniki* [Semiconductores].- L. Nauka 1967. 439p.
4. P. Profos. *Spravochnik "Izmereniya v promyshlennosti"* [Repertorio "Mediciones en la industria"] 1-3 volúmenes. M.: *Metallurgiya*, 1990.

## Capítulo 5. La luz. La luz. Transductores, fotocélulas

### 5.1. Fotoconductividad

Mientras que en los metales - la conducción se observa a distintas temperaturas, la conductividad de los semiconductores en condiciones ordinarias surge sólo por movimiento térmico. Sin embargo, es posible crear condiciones que garanticen la aparición de conductividad en un semiconductor y sin aumentar su temperatura. Dado que la conductividad eléctrica del semiconductor surge sólo por el hecho de que los electrones caen en la zona de conducción, basta con dar a los electrones la energía necesaria para lanzarlos a la zona libre para que aparezca la conductividad. Esta energía en condiciones normales los electrones la reciben de otras partículas que intervienen en el movimiento térmico, pero la energía también puede proceder del exterior, en particular, por ejemplo, en forma de radiación.

Ya en el siglo pasado se descubrió que la resistencia de una varilla de selenio cambia drásticamente en función de su iluminación. Estudios minuciosos han demostrado que la resistencia del selenio disminuye con la iluminación.

Más tarde se estableció que esta propiedad no sólo la posee el selenio, sino también algunos otros semiconductores. La aparición de conceptos de mecánica cuántica permitió explicar este fenómeno, que la ciencia denominó fotoconductividad o fotoefecto interno.

La naturaleza física de la fotoconductividad es la siguiente. A una cierta temperatura, en un semiconductor oscurecido, un cierto número de electrones  $n$  se encuentra en la zona libre. Estos electrones son responsables de la conductividad eléctrica normal de la sustancia, también llamada conductividad oscura. Si el semiconductor se expone entonces a la luz, en la zona libre, además de los electrones oscuros existentes anteriormente, aparecerá un nuevo número  $n_1$  de electrones ligeros y el número total de electrones en la zona será igual a  $n + n_1$ . La conductividad eléctrica en esta conexión aumentará y será igual a:

$$\sigma = neU + n_1 eU_1, (5.1)$$

donde el primer sumando corresponde a la conducción oscura, y el segundo - a la fotoconductividad,  $e$  - carga del electrón,  $U$  - movilidad de los portadores de corriente (electrones).

A partir de las ideas generales sobre la naturaleza de los semiconductores, queda clara la razón de la aparición de fotoelectrones en la zona libre. No hay duda de que el proveedor de electrones tanto oscuros como claros en un semiconductor libre de impurezas es una zona llena. Está claro que tanto esos como otros electrones llegaron a la zona libre sólo porque recibieron la energía necesaria para superar la zona prohibida

" con una anchura de  $\Delta E$ . En consecuencia, la fotoconductividad ha surgido debido al hecho de que los fotones que caen sobre la superficie del semiconductor y son absorbidos por él han cedido toda su energía a los fotoelectrones. Cada fotón lleva una energía  $h\nu$ . Si esta energía es mayor que la energía  $\Delta E$  o al menos igual a ella, entonces el electrón de la zona llena puede pasar a la zona de conducción. De aquí se deduce una consecuencia indispensable: la fotoconductividad es posible cuando  $h\nu > \Delta E$ . Así, para cada sustancia fotosensible existe un límite diferente de fotoconductividad, que corresponde a la siguiente condición:

$$h\nu_0 = \Delta E \quad (5.2).$$

Si la frecuencia  $\nu$  de la radiación que incide sobre el semiconductor es inferior a  $\nu_0$ , no se produce fotoconductividad.

Sólo la radiación con frecuencia  $\nu > \nu_0$  puede crear fotoconductividad.

El límite del fotoefecto (límite rojo), es decir, el valor de  $\nu_0$ , depende del propio semiconductor en el que se observa el fotoefecto, esté libre de impurezas o no.

La fotoconductividad, o fotoefecto interno, no se produce en todos los semiconductores. Independientemente de ello, la condición indispensable para que surja la fotoconductividad es la absorción de la radiación incidente sobre la materia. Sólo en este caso, en principio, puede surgir el fotoefecto.

Los experimentos de los físicos han establecido que en su comportamiento los fotoelectrones no difieren de los electrones térmicos hasta la coincidencia casi completa de su movilidad.

Un cuidadoso estudio del fotoefecto interno ha demostrado que el cambio de resistencia en diferentes sustancias se produce bajo la acción de radiaciones de diferente composición espectral: en algunas sustancias se observa cuando la sustancia es iluminada por rayos ultravioleta, en otras - cuando es iluminada por rayos visibles o infrarrojos.

Los electrones liberados por la luz se encuentran en la zona libre durante un periodo de tiempo muy corto. Durante este tiempo vagan por los huecos interatómicos y, en presencia de una diferencia de potencial entre dos

puntos del semiconductor, se mueven principalmente en una dirección, formando así una corriente eléctrica. A continuación, los fotoelectrones se desplazan a niveles inferiores de impurezas o a la zona llena. Sin embargo, con la iluminación continua del semiconductor, aparecen cada vez más fotoelectrones y, al mismo tiempo, algunos de ellos regresan. Como resultado, se establece un equilibrio dinámico, es decir, el número de fotoelectrones emergentes llega a ser igual al número de electrones que regresan.

En estado libre, los fotoelectrones están en estado libre durante un tiempo muy corto (del orden de  $10^{-3}$  a  $10^{-7}$  segundos). Pero durante este corto periodo de vida son electrones conductores de pleno derecho. Las sustancias semiconductoras aumentan considerablemente su conductividad eléctrica no sólo bajo la acción de la radiación. Cualquier otra partícula que entre en el átomo y aporte toda su energía al electrón, en principio es capaz de transferir el electrón a un estado libre. Y de hecho, numerosos y repetidos experimentos han demostrado que la conducción también se produce cuando la superficie de una sustancia es bombardeada por electrones rápidos, partículas alfa, protones y otras partículas. Es evidente que para ello la energía de la partícula bombardeadora debe ser mayor que la energía de transferencia del electrón al estado libre.

En los semiconductores, la concentración de electrones de conducción a temperatura ambiente es mucho menor que en los metales, y el número de fotoelectrones que aparecen bajo la influencia de la luz es relativamente grande. Bajo una iluminación adecuada, en algunas sustancias, como el sulfuro de cadmio (CdS), el número de fotoelectrones puede superar en cuatro órdenes de magnitud al número de electrones de conducción oscuros. En otras sustancias menos fotosensibles, el número de fotoelectrones, aunque no esté sometido a una irradiación demasiado intensa, puede alcanzar el 20-30% del número total de electrones de conducción. Esta propiedad de algunos semiconductores los hace importantes y necesarios en diversas tecnologías de conversión.

## **5.2. El fotoefecto de la capa de confinamiento**

En el apartado 5.1 se demostró que, bajo la acción de la luz absorbida, los electrones pueden pasar de la zona llena a la zona libre, creando así fotoconductividad. En este caso, sólo se produce conducción adicional en el semiconductor, pero no se generan fuerzas electromotrices intrínsecas. Sin

embargo, existe otro fenómeno abierto y conocido: la aparición de fuerzas electromotrices como resultado de la iluminación del semiconductor. Por ejemplo, si sometemos el semiconductor a una iluminación desigual, de modo que algunas partes de la muestra se iluminen mucho más intensamente y otras mucho menos, en algunos casos es posible detectar cierta diferencia de potencial entre las zonas claras y las oscuras. Este fenómeno se explica por el hecho de que en el momento de la iluminación los electrones comienzan a difundirse desde las partes iluminadas hacia las oscuras en mayor número que en sentido contrario. Tal difusión preferencial conduce al hecho de que las zonas oscuras en el caso del mecanismo de conducción electrónica se cargan gradualmente de forma negativa, mientras que las zonas iluminadas se cargan de forma positiva. Como consecuencia, se forma un campo eléctrico gradualmente creciente en el interior del semiconductor, que acabará estableciendo un estado de equilibrio caracterizado por el hecho de que los flujos electrónicos en ambas direcciones son iguales.

Cuando se produce el equilibrio, entre las partes claras y oscuras del semiconductor existirá una cierta diferencia de potencial, de hasta décimas de voltio.

**Además, la manifestación del efecto de la luz sobre el semiconductor existe en el llamado fotoefecto de capa de bloqueo.**

Si creamos la estructura mostrada en la fig. 5.1, es posible observar experimentalmente el fotoefecto de la capa de bloqueo.

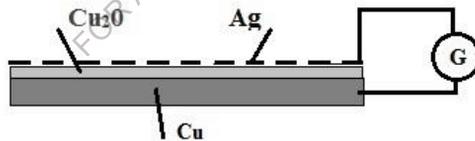


Fig. 5.1. Fotoefecto de la capa barrera. Esquema de la estructura del material

Si oxidamos una placa de cobre Cu y formamos sobre ella una capa de óxido de cobre Cu<sub>2</sub>O, obtenemos un semiconductor clásico. A continuación, pongamos una fina capa de plata sobre el semiconductor Cu<sub>2</sub>O. La fina capa de plata será transparente a la luz. Si conectamos un galvanómetro entre la capa plateada y una placa de cobre (véase la fig. 5.1), circulará una corriente en el circuito cuando se ilumine la superficie plateada. Este fenómeno se explica por la existencia de la llamada capa barrera en el sistema metal-semiconductor.

En este caso, bajo la influencia de la luz, los electrones pasan del óxido de cobre al cobre a través de la capa barrera. Como resultado, la placa de cobre se carga negativamente y el electrodo de plata transparente se carga positivamente. Cuando el circuito se cierra, se induce una corriente en el circuito. Un fenómeno similar puede observarse en otros semiconductores. Este efecto es especialmente pronunciado en sistemas que contienen semiconductores como azufre-talio, azufre-plata, selenio, germanio, silicio y otros.

El fotoefecto de válvula (fotoefecto de capa de bloqueo) se refiere a la aparición de fuerza electromotriz a la absorción de luz en un sistema que contiene el contacto de dos semiconductores de impurezas de diferente conductividad o en el sistema semiconductor-metal (fig. 5.2).

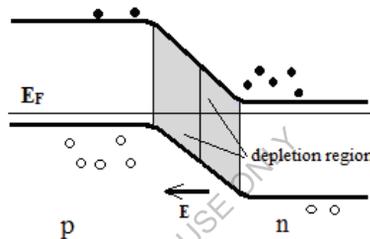


Fig. 5.2. Diagrama energético general de una unión  $p-n$  (capa de bloqueo)

Cuando se ilumina un sistema de este tipo, la luz absorbida transfiere electrones de la banda de valencia a la banda de conducción. En ese momento, se forman huecos en la zona de valencia, es decir, se generan pares electrón-hueco. El comportamiento de los portadores en desequilibrio depende de la región del sistema en la que se absorbe la radiación. Si la radiación se absorbe en la región  $p$ , los electrones cercanos a la unión  $p-n$  pueden alcanzarla y bajo la acción del campo eléctrico de contacto se desplazarán a la región  $n$ .

Si la radiación se absorbe en la región  $n$ , sólo se expulsan agujeros a través de la unión  $p-n$  hacia la región  $p$ .

Si los pares se generan en la región de carga masiva (unión  $p-n$ ), el campo "distribuye" los portadores de carga de tal forma que acaban en la región donde son básicos.

En este caso, los electrones se concentran en el *semiconductor*  $n$ , mientras que los huecos se concentran en el *semiconductor*  $p$ .

El campo eléctrico creado por ellos crece, lo que impide la transición ulterior de portadores no básicos a través de la capa de confinamiento.

Se llega a un equilibrio dinámico, en el que el número de portadores no básicos que se desplazan por unidad de tiempo a través de la capa de bloqueo es igual al número de los mismos portadores que se desplazan durante el mismo periodo de tiempo en sentido contrario.

Con el inicio del equilibrio, se establece una diferencia de potencial entre los *semiconductores p* y *n*, que representa la fuerza fotoelectromotriz.

El fenómeno de la aparición de la válvula foto-EMF a la iluminación de la unión *p-n* se utiliza para crear fotodetectores y convertidores de energía fotovoltaica - baterías solares.

Este es el mecanismo de la fuerza fotoelectromotriz en un sistema formado por semiconductores *p* y *n* y una capa de bloqueo entre ellos.

El fotoefecto válvula es especialmente activo en sistemas semiconductores con una gran longitud de difusión de portadores de corriente "no principales" y, en consecuencia, un gran tiempo de vida de los mismos.

De la consideración del mecanismo de aparición de la fuerza fotoelectromotriz de la válvula se desprende que el electrodo que contacta directamente con el semiconductor de electrones siempre está cargado negativamente, mientras que el electrodo que contacta directamente con el semiconductor de huecos está cargado positivamente. Por lo tanto, en diferentes tipos de células de válvula, el electrodo translúcido superior puede estar cargado positiva o negativamente.

El descubrimiento del fotoefecto de capa de bloqueo amplió las posibilidades de uso práctico de los semiconductores y constituyó la base del dispositivo de las células fotovoltaicas de válvula, dispositivos que convierten la energía de la luz en energía eléctrica.

### **5.3. Batería solar**

La célula solar fue el nombre dado a la primera célula fotovoltaica basada en silicio. La fotocélula es un convertidor de energía solar (luz) en energía eléctrica.

La conductividad eléctrica del silicio, dependiendo del grado y del número de impurezas introducidas en él, varía dentro de un rango bastante amplio. Durante muchos años, el silicio ha sido objeto de exhaustivas investigaciones físicas. Como resultado de muchos años de trabajo de

investigación se han obtenido resultados de gran valor tanto para la teoría como para la práctica.

Un resultado importante debe ser considerado el desarrollo de la tecnología para la introducción de impurezas de átomos extraños en monocristales de silicio, lo que permite obtener en un cristal  $p-n$  unión, sobre la base de los cuales se creó una fotocélula de silicio con una capa de bloqueo. Sobre la base de tales fotocélulas se creó una batería solar.

La tecnología de fabricación de fotocélulas de silicio es bastante complicada. Hoy en día se utilizan para ello modernas tecnologías de microelectrónica planar.

Las células fotovoltaicas individuales pueden conectarse entre sí en serie y en paralelo, obteniéndose así una batería fotovoltaica (solar). Una batería solar de este tipo puede utilizarse para alimentar electrodomésticos, aparatos electrónicos portátiles, etc. Ya se han creado las primeras células solares.

Prácticamente ya las primeras células fotovoltaicas de silicio creadas tenían una eficiencia de alrededor del 6%. A modo de comparación se puede traer que las máquinas de vapor tienen una eficiencia de alrededor del 6-8%. Además, hay que tener en cuenta que, a diferencia de otros convertidores de energía, la vida útil de las células semiconductoras puede ser muy larga.



Fig. 5.3. Batería solar portátil moderna - batería (cargador solar)

#### 5.4. Bolómetros

Un bolómetro es un dispositivo mediante el cual se puede medir la energía de radiación con un alto grado de precisión. La mayoría de los bolómetros se basan en el principio de convertir la energía radiante en energía térmica. Con el descubrimiento de las propiedades electrofísicas de los semiconductores, éstos se utilizaron para la tecnología de los bolómetros y aumentaron en gran medida el límite de sensibilidad de los bolómetros.

Los bolómetros se utilizan ampliamente para una gran variedad de fines. Los bolómetros tienen un valor excepcional cuando es necesario realizar cualquier estudio espectrométrico.

El circuito principal de un bolómetro ordinario es un puente, uno de cuyos brazos incluye una resistencia térmica sensible. Cuando alguna radiación térmica incide sobre el termistor, aumenta su temperatura, como resultado de lo cual se altera el equilibrio del puente y la flecha del instrumento de medida, preprogramada en las unidades adecuadas, se desviará en el número apropiado de divisiones. El termistor suele colocarse en un cilindro de vacío de metal o vidrio con una ventana de algún material transparente. En la parte exterior del cilindro se colocan los cables del termistor para incluirlo en el circuito.

La sensibilidad de los bolómetros modernos es de  $10^{-5} \cdot 10^{13}$  V/W. Los bolómetros se utilizan para registrar la radiación óptica de la gama infrarroja. Son muy sensibles a la radiación térmica y se utilizan principalmente para registrar la radiación IR con longitudes de onda de 10 a 5000  $\mu\text{m}$ .

### **5.5. Fotocélulas de selenio**

La primera fotocélula se fabricó con óxido de cobre y se utilizó durante varios años. Casi al mismo tiempo se descubrió la célula de selenio, mucho más extendida y que no ha perdido su importancia en la actualidad.

La tecnología de fabricación de una fotocélula de selenio ha experimentado cambios significativos.

Cualquier fotocélula con capa de bloqueo es un sistema formado por un sustrato metálico, una capa semiconductor y un electrodo semitransparente metálico superior.

El sustrato de la futura fotocélula cumple dos funciones. Por un lado, sirve de soporte a la frágil capa de selenio, protegiéndola de daños mecánicos, y por otro, sirve para establecer un contacto eléctrico fiable. El lado en forma de disco del sustrato sobre el que se aplica la capa de selenio está rectificando para que la capa de selenio se adhiera bien al disco de acero. El sustrato esmerilado se suspende en el interior de la unidad de vacío.

La capa de selenio se aplica por evaporación al vacío.

Para obtener células fotovoltaicas con buenos parámetros es necesario que el grosor de la capa semiconductor sea igual a 0,1 mm.

El selenio depositado se encuentra en modificación amorfa, tiene una resistividad muy alta y aún no posee las propiedades fotovoltaicas requeridas. Por lo tanto, en la siguiente fase del proceso tecnológico el selenio se convierte de modificación amorfa a cristalina, que tiene una alta fotosensibilidad. Para ello, se extrae un disco con selenio depositado y se introduce en un horno especial. Con la ayuda de un determinado proceso tecnológico en el horno, el selenio amorfo se transforma en selenio cristalino.

El electrodo metálico translúcido superior suele aplicarse mediante pulverización catódica.

Los discos acabados de la fotocélula se montan en un mandril de ebonita o plástico con dos abrazaderas conducidas al exterior.

### **5.6. Fotorresistencias de selenio**

La resistencia eléctrica de una muestra de material semiconductor disminuye bajo la influencia de la radiación luminosa, pero no se genera en ella ningún CEM ni corriente eléctrica.

Así, la fotorresistencia es un dispositivo semiconductor que cambia su resistencia eléctrica bajo la acción de la luz.

A partir de la consideración anterior de la esencia física del fotoefecto interno, queda clara la estructura fundamental de la fotorresistencia. Una fotorresistencia es una placa (en la mayoría de los casos, una fina capa de semiconductor), en cuyos bordes se aplican electrodos metálicos para garantizar un contacto eléctrico fiable. Dicha fotorresistencia se incluye en un circuito en serie con la fuente de alimentación.

Cuando la fotorresistencia se oscurece, fluye una corriente eléctrica en todo el circuito y, por tanto, en la propia fotorresistencia, cuyo valor viene determinado por la resistencia óhmica de la fotorresistencia y la diferencia de potencial que se le aplica. Dicha corriente se denomina corriente oscura. Al iluminar la fotorresistencia, la corriente aumenta y este aumento es tanto mayor cuanto mayor es el flujo luminoso. La diferencia entre las corrientes luminosa y oscura nos da el valor de la fotocorriente.

En función de su finalidad, las fotorresistencias se fabrican con distintos materiales semiconductores. La sensibilidad de las fotorresistencias es mucho mayor que la de las fotocélulas de vacío con fotoefecto externo. Esto significa que con la misma iluminación la fotorresistencia proporciona varias veces más aumento de corriente en el circuito en comparación con una fotocélula con fotoefecto externo. La desventaja esencial de la mayoría de

las primeras fotorresistencias creadas era una inercia significativa, mientras que la fotocélula de vacío con fotoefecto externo es un dispositivo prácticamente sin inercia.

La segunda desventaja importante de las fotorresistencias es la dependencia no lineal del aumento de la fotocorriente con el aumento de la intensidad del flujo luminoso. La Fig. 5.4 muestra la dependencia de la fotocorriente del flujo luminoso.

En la actualidad, se obtienen nuevos materiales semiconductores que carecen en gran medida de estos inconvenientes y se diseñan nuevos tipos de fotorresistencias con parámetros mejorados. Más recientemente, los físicos han logrado resolver muchas dificultades y obtener fotorresistores en gran medida libres de las desventajas inherentes a sus predecesores.

Dependiendo de la sustancia de la que estén hechos los fotorresistores, tienen diferentes características espectrales y diferente sensibilidad integral. La sensibilidad espectral caracteriza la cantidad de fotocorriente que surge de la acción de una unidad de flujo de energía luminosa de una determinada longitud de onda. Así, si la sensibilidad integral de una fotocélula puede determinarse mediante un número - el valor de la fotocorriente atribuida a la unidad de energía incidente, la sensibilidad espectral de cada fotocélula suele representarse en forma de gráfico. La primera fotorresistencia fue de selenio, que desempeñó un papel importante en la historia de la ciencia y la tecnología.

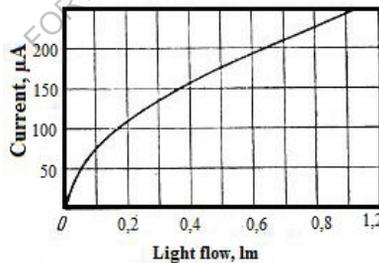


Fig. 5.4. Dependencia de la fotocorriente con el flujo luminoso. Ejemplo de característica luminosa de la fotorresistencia de selenio.

### 5.7. Transductores fotoeléctricos. Principios generales de funcionamiento

Los transductores fotoeléctricos son transductores primarios de medición que reaccionan a la radiación electromagnética que incide sobre la

superficie del elemento convertidor. La radiación puede ser visible, es decir, luz, así como tener una longitud de onda mayor o menor y ser invisible.

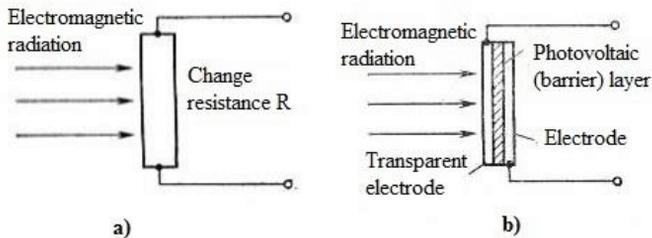


Fig. 5.5. Ejemplos de fotoconvertidores. a) - conversión fotoconductora, b) - célula solar como ejemplo de conversión fotovoltaica.

**Convertidores fotoconductores.** Estos convertidores transforman el cambio de la magnitud medida en el cambio de resistencia del material utilizado (fig. 5.5.a). Este tipo de convertidores se denominan pasivos, es decir, requieren alimentación externa. A menudo su nombre caracteriza el tipo de conversión utilizado, como las resistencias fotosensibles.

La resistencia de un material es función de la densidad de portadores de carga básicos, y como la densidad aumenta al aumentar la intensidad de irradiación, la conductividad aumenta. Dado que la conductividad es inversamente proporcional a la resistencia, se puede concluir que la resistencia es una función inversa de la intensidad de irradiación. El valor de la resistencia a plena irradiación es generalmente de 100 a 200 ohmios, y en la oscuridad total esta resistencia es de megaohmios. En el diseño de resistencias dependientes de la luz se utilizan sulfuro de cadmio, seleniuro de cadmio, etc.

**Células solares.** Las células solares son convertidores fotovoltaicos que transforman la energía electromagnética en energía eléctrica (fig. 5.5.b).

El diseño del convertidor incluye una capa de material fotosensible de alta resistividad colocada entre dos electrodos conductores. Uno de los electrodos está hecho de un material transparente a través del cual pasa la radiación e incide en el material fotosensible. Cuando está totalmente iluminada, una sola célula produce una tensión de salida de unos 0,5 V entre los electrodos.

Como norma general, se utilizan células fotovoltaicas de válvula semiconductor (células fotovoltaicas con una capa de bloqueo) como capa fotovoltaica (fig. 5.5.b).

Uno de los parámetros más importantes de una célula fotovoltaica utilizada como fuente de energía eléctrica es el factor de eficiencia (EF). La eficiencia de una célula solar es la relación entre la potencia máxima de corriente eléctrica que se puede obtener de la célula y la potencia de radiación luminosa que incide sobre la célula. La eficiencia será tanto mayor cuanto mayor sea la parte del espectro de radiación luminosa que interviene en la generación de portadores de corriente. Una de las formas de aumentar la eficiencia de las células solares es crear fotocélulas con las características espectrales más amplias posibles. Las fotocélulas fabricadas con silicio tienen una eficiencia de hasta el 12%. Las fotocélulas basadas en compuestos de arseniuro de galio tienen una eficiencia de hasta el 20%.

**Fotodetectores.** Los transductores semiconductores diseñados para medir cambios en los parámetros de la radiación luminosa se denominan fotodetectores. Un transductor fotoeléctrico, que es el tipo más simple de fotodetectores, es un diodo semiconductor. Uno de los principales entre estos transductores es el fotodiodo, que utiliza el efecto de irradiar una unión  $p-n$  con polarización negativa con luz (visible u otras longitudes de onda). En presencia de irradiación, la corriente que fluye a través de la unión cambia. El tiempo de respuesta de un fotodiodo de este tipo es de sólo unos pocos nanosegundos.

Para proporcionar una respuesta más rápida a los cambios en los parámetros de radiación, se han desarrollado diodos PIN en los que hay una capa de semiconductor sin impurezas entre las capas *de tipo p y n*.

**Fototransistores.** En algunos dispositivos, los fotodiodos se utilizan junto con amplificadores para aumentar la sensibilidad. Pero hay dispositivos que combinan estas propiedades: los fototransistores. Están fabricados en una carcasa transparente que permite el paso de la radiación luminosa. La luz que incide sobre la unión colector-base del fototransistor (unión  $p-n$  con polarización negativa) provoca una fotocorriente en la base, que se amplifica con la ganancia del transistor, dando lugar a una corriente de emisor muy grande.

Dado que los fotodetectores son dispositivos semiconductores, su corriente de saturación depende de la temperatura. En ausencia de radiación

luminosa, fluye en ellos una corriente oscura, lo que limita las mediciones de niveles bajos de radiación luminosa.

**Fotorresistencias. Características de la fotorresistencia.** El valor de la resistencia oscura depende de la forma, el tamaño, la temperatura y la naturaleza fisicoquímica de la capa fotosensible de la fotorresistencia. Muy alta resistencia oscura (de  $10^4$  a  $10^9$  Ohm a  $25^\circ\text{C}$ ) poseen los fotorresistores basados en PbS, CdS, CdSe. La resistencia oscura de InSb, InAs, CdHgTe (de  $10$  a  $10^3$  Ohm a  $25^\circ\text{C}$ ) no es muy alta. La resistencia de la fotorresistencia irradiada disminuye rápidamente con el aumento de la irradiación (fig. 5.6).

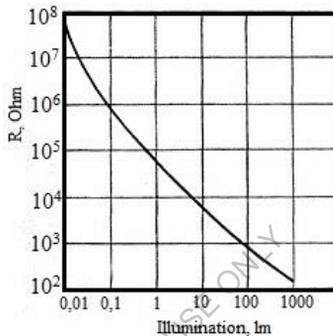


Fig. 5.6. Ejemplo de dependencia de la resistencia de la fotorresistencia con la iluminación

### 5.8. Fotocélulas de válvula. Diseños

La construcción de todas las fotocélulas con capa de bloqueo es prácticamente la misma. Puede haber algunas diferencias, pero no cambian el carácter general de la construcción de la fotocélula. Pueden variar la forma de la fotocélula, sus dimensiones, los métodos de aplicación del electrodo superior, la salida de dichos electrodos, etc.

Por lo general, la fabricación de la fotocélula de válvula (fig. 5.7) comienza con el llamado electrodo inferior: una placa metálica de 1-2 mm de grosor, sobre la que se aplica una fina capa de semiconductor. A continuación, la capa de semiconductor se trata para crear una unión  $p-n$  en su espesor. Después, en la mayoría de los casos, se aplica a la superficie exterior un electrodo metálico superior, que es una fina capa translúcida de metal que transmite la luz.

Una fotocélula de válvula incluye un electrodo metálico inferior, una capa semiconductor de electrones (o huecos), una capa de bloqueo, una

capa de huecos (o electrones) y un electrodo metálico semitransparente superior (fig. 5.7).

La fotocélula se coloca en una caja de plástico con cables eléctricos y una ventana para la luz.

El flujo radiante que incide sobre la superficie de la fotocélula se refleja parcialmente en el electrodo metálico semitransparente y se absorbe parcialmente en él. Parte del flujo que ha atravesado el electrodo es absorbido por la capa semiconductor adyacente. Como resultado, surgen pares electrón-hueco en esta capa. Los electrones se concentran en el electrodo que cubre la capa semiconductor, que tiene un mecanismo de conducción electrónica, y los huecos se concentran en el electrodo del semiconductor de huecos.

Entre el electrodo inferior y el superior aparece una diferencia de potencial, cuyo valor hasta un cierto límite será tanto mayor cuanto mayor sea la intensidad del flujo radiante. Cerrando los electrodos de la fotocélula mediante un circuito externo, creamos las condiciones para que fluya corriente eléctrica en ella. Esto será así mientras la fotocélula esté iluminada, y en el rango de pequeños flujos luminosos con un valor límite de 1 lumen, la corriente de cortocircuito de la fotocélula depende casi linealmente de la intensidad del flujo luminoso. Cuando se incluye una resistencia externa en el circuito de la fotocélula, esta linealidad se rompe.

Los científicos investigan y se esfuerzan constantemente por obtener fotocélulas de nuevos materiales con una sensibilidad integral significativa y conseguir que la fotocélula detecte no sólo toda la parte visible del espectro, sino también posiblemente otras más invisibles: infrarrojos y ultravioleta.

Los procesos fotovoltaicos que tienen lugar en las fotocélulas de válvula presentan una notable inercia, que afecta a la forma de sus características de frecuencia. La fuerte disminución del rendimiento de la mayoría de las células de válvula con el aumento de la frecuencia limita su utilización en casos de flujos luminosos variables de frecuencia relativamente elevada.

Las células fotovoltaicas de válvula están fabricadas con distintos materiales semiconductores fotosensibles. Las fotocélulas de selenio son muy utilizadas. La característica espectral de la fotocélula de selenio se aproxima a la sensibilidad del ojo humano, el máximo de sensibilidad espectral se encuentra en la región de 5500-6000 Å (0,55 - 0,6 µm), es decir,

se sitúa en la parte visible del espectro (fig. 5.8). La sensibilidad integral de la fotocélula de selenio alcanza  $600 \mu\text{A}/\text{lm}$ , es decir, supera la sensibilidad de las fotocélulas con fotoefecto externo.

Las fotocélulas de sulfuro de plata ( $\text{Ag}_2\text{S}$ ) - PCSS - están aún más extendidas. La sensibilidad integral de las PCSS alcanza los  $9000 \mu\text{A}/\text{lm}$ , característica espectral bastante amplia (de  $0,4$  a  $1,4 \mu\text{m}$ ) con sensibilidad máxima en la región del infrarrojo cercano ( $0,8 - 0,9 \mu\text{m}$ ). Las fotocélulas de azufre-plata tienen una gran estabilidad de funcionamiento.

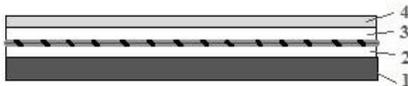


Fig. 5.7. Estructura esquemática de una fotocélula de válvula: 1 - electrodo metálico inferior; 2 - capa semiconductor de electrones (huecos); 3 - capa semiconductor de huecos (electrones); 4 - electrodo semiconductor metálico superior. La zona con guiones es la capa de bloqueo.

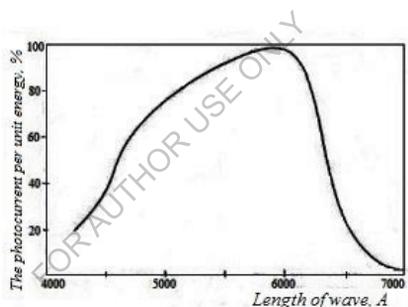


Fig. 5.8. Característica espectral de una fotocélula de selenio. Selenio puro.

### 5.9. LEDs

La emisión en los LED se debe a la recombinación de los portadores inyectados en una parte de la unión  $p-n$ . La recombinación se produce cuando los portadores pasan de los niveles superiores a los inferiores. Las transiciones entre zonas entre el mínimo de la banda de conducción y el máximo de la banda de valencia van acompañadas de emisión efectiva si las transiciones son directas, es decir, el mínimo y el máximo están situados en el mismo valor del vector de onda  $k$ . Tales transiciones se realizan, por ejemplo, en el arseniuro de galio en  $k = 0$ .

La principal característica de los LED es la eficiencia cuántica interna  $\eta_{i\text{qec}}$  (la relación entre el número de fotones generados y el número de portadores inyectados en la base) y externa  $\eta_{\text{eqe}}$  (la relación entre el número de fotones que salen del LED y el número total de portadores de carga que fluyen a través de él).

La disminución de  $\eta_{\text{eqe}}$  se debe a la recombinación sin radiación en los defectos de la estructura y a la absorción de fotones en el propio semiconductor (autoabsorción), ya que la energía del fotón es cercana a  $E_g$ .

Los LED más extendidos en la actualidad, creados por acumulación epitaxial de arseniuro de galio dopado con silicio (*tipo p*) sobre *n-GaAs*, poseen importantes  $\eta_{\text{vnt}}$  (hasta el 20-28%). Esto se debe tanto a la mayor perfección de la estructura cristalina como al hecho de que la región del semiconductor altamente compensada con silicio emite cuantos de luz con energías de 1,31 ... 1,34 eV, inferiores a  $E_g$  del arseniuro de galio no compensado, lo que reduce la autoabsorción cuando se emite radiación a través de la *región n*.

Muchos problemas de los LED también se resuelven con el uso de las modernas heterouniones.

En la Tabla 1 se resumen los principales materiales utilizados actualmente para crear LED con el mejor rendimiento en las regiones espectrales correspondientes. Parámetro  $\eta_{\text{eqe}}$  depende significativamente de la tecnología y con el crecimiento de su nivel puede ser significativamente mayor.

Los LED se utilizan ampliamente en indicadores digitales y pantallas luminosas para instrumentos de medición y dispositivos de salida de ordenador, así como en dispositivos optoelectrónicos. En comparación con las fuentes de luz convencionales, los LED tienen dimensiones reducidas, bajas tensiones de funcionamiento, alta velocidad (hasta  $10^{-9}$  s) y larga vida útil.

Tabla 5.1. Algunos materiales utilizados para crear LED

Material	Impurity or composition	Glow color	$\lambda_{max}$ , nm	$\eta_{liqe}$
GaAs	Si, Zn	IR	950	12-50
			900	
GaP	Zn, O, N	Red green	690	7
			550	0,7
GaAs <sub>1-x</sub> P <sub>x</sub>	x=0,39 x=0,5-0,75	Red amber	660	0,5
			610	0,04
Ga <sub>1-x</sub> Al <sub>x</sub> As	x=0,05-0,1 x=0,3	IR red	800	12
			675	1,3
In <sub>1-x</sub> Ga <sub>x</sub> P	x=0,58	Red Amber yellow-green	659	0,2
			617	0,1
			570	0,02

### 5.10. Láseres semiconductores. Láser de unión P-n

El principio de funcionamiento de un láser semiconductor es el siguiente. En un semiconductor intrínseco, siempre hay electrones abandonados térmicamente de la banda de valencia en la banda de conducción. Cuando la luz atraviesa el semiconductor, los electrones de la banda de valencia absorben cuantos de luz y pueden pasar a la banda de conducción si la frecuencia de la luz incidente es:

$$\nu \geq E_g / h \quad (5.3),$$

donde  $E_g$  es la anchura de la zona prohibida,  $h$  es la constante de Planck. Por lo tanto, la intensidad de la luz disminuirá después de atravesar el semiconductor. Simultáneamente, la radiación que incide sobre el semiconductor estimula las transiciones de electrones excitados de la banda de conducción a la banda de valencia y la emisión de cuantos de luz (fig. 5.9.a). Estos cuantos se añaden a la radiación externa cuando ésta atraviesa el semiconductor, es decir, se produce una amplificación de la luz.

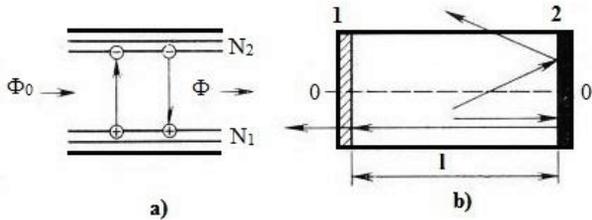


Fig. 5.9. Transiciones entre zonas bajo la acción de la radiación en un semiconductor - a, diagrama de un láser semiconductor - b.

Las transiciones que se producen bajo la influencia de una radiación externa se denominan inducidas, en contraste con las transiciones espontáneas que se producen independientemente de la radiación externa. En un estado de equilibrio termodinámico, el número de electrones en la banda de valencia es muchas veces mayor que en la banda de conducción. De ahí que la absorción de la luz domine sobre la amplificación. Para la amplificación de la luz, es necesario crear unas condiciones en las que la concentración de electrones cerca del fondo de la zona de conducción sea mayor que su concentración cerca del techo de la zona de valencia ( $N_2 > N_1$ ). Tal estado del semiconductor se denomina estado con inversión de población de nivel.

El factor de amplificación de la luz  $\alpha$  cuando ésta atraviesa un semiconductor depende de la diferencia entre las poblaciones de los niveles superior e inferior. Dado que las probabilidades de las transiciones electrónicas ascendentes y descendentes son iguales, la amplificación se produce cuando la diferencia de población entre los niveles superior e inferior  $N - N_{21} > 0$ .

La atenuación de la luz que atraviesa un semiconductor se debe no sólo a las transiciones de electrones de la banda de valencia a la banda de conducción, sino también a la dispersión de la luz en diversas inhomogeneidades del cristal. Como resultado, la intensidad de la luz cambia con la distancia  $x$  dentro del semiconductor según la ley:

$$\Phi = \Phi_0 \exp(\alpha - \chi_{ls})x \quad (5.4),$$

donde  $\alpha$  es el coeficiente de ganancia, el coeficiente  $\chi_{ls}$  caracteriza las pérdidas,  $x$  es la distancia.

Así, un cristal semiconductor amplifica la radiación externa si existe en él una inversión de la población de niveles y la ganancia supera al coeficiente de pérdidas ( $\alpha > \chi_{ls}$ ).

Para convertir un amplificador en un generador de radiación, es necesario introducir una realimentación positiva, es decir, hacer pasar una parte de la radiación de la salida a la entrada. En los láseres, para crear realimentación, el cristal de trabajo se coloca entre dos espejos paralelos (1 y 2 en la fig. 5.9.b). La luz que pasa por el cristal se amplificará  $\exp(\alpha - \chi_{ls})^l$  veces, luego se reflejará en el espejo, volverá a pasar por el cristal y se amplificará de nuevo por el mismo factor, etc. Los cuantos primarios de luz surgen debido a transiciones espontáneas, y luego se produce una

amplificación de la luz durante su propagación en el cristal debido a transiciones inducidas.

La inversión poblacional de los niveles de un semiconductor puede crearse por varios métodos. Uno de ellos consiste en irradiar el propio semiconductor con luz intensa (bombeo óptico). Los electrones de la banda de valencia se desplazan a la banda de conducción y se acumulan allí. Si la intensidad de bombeo es suficientemente alta, puede producirse una inversión de la población de niveles. Otro método es la transferencia de electrones de la banda de valencia a la banda de conducción bombardeando el semiconductor con electrones rápidos. Con ambos métodos es posible obtener elevadas potencias de emisión, pero en general la eficiencia de los dispositivos es baja.

El láser de unión p-n es el de mayor eficacia y sencillez de diseño. La acción del láser se basa en el hecho de que en polarización directa se inyectan electrones en la *región p*, donde tiene lugar su recombinación radiativa con los huecos allí presentes. Para crear un estado con inversión de población, se requiere una gran concentración de huecos en la banda de valencia, lo que se consigue aumentando la concentración de impureza aceptora dopante. Para que la inyección de electrones en la *región p* supere a la inyección de huecos en la *región n* (donde la recombinación es sin radiación), es necesario que la concentración de impureza donante en la *región n* sea mayor que la concentración de impureza aceptora en la *región p*, es decir,  $n_n > p_p$ .

Así, para obtener un estado con inversión de población en la *región p*, se requiere un alto grado de dopaje de ambas regiones de la unión p-n con impurezas.

El mejor material para los diodos láser es el arseniuro de galio. El grosor de la parte emisora de la *región p* es del orden de  $2 \mu\text{m}$ . El diodo láser es el primer láser en el que fue posible realizar la conversión directa de energía eléctrica en energía de radiación luminosa coherente. También es el de mayor eficacia y velocidad.

Básicamente, la razón principal de la disminución de la eficiencia del diodo láser es la necesidad de un fuerte dopaje de las *regiones p* y *n* de la transición. Simultáneamente a la introducción de impurezas en el semiconductor, se forma un gran número de defectos en la *región activa*, lo que provoca importantes pérdidas de radiación. Además, los defectos pueden formar niveles de energía en la zona prohibida del semiconductor. Dado que la concentración de impurezas en ambas partes de la unión p-n es grande, la

anchura de la unión  $p-n$  es pequeña y, en consecuencia, los portadores de corriente pueden pasar de la banda de conducción a estos niveles y luego hacer un túnel hacia la banda de valencia de la *región p*. La corriente de túnel no se acopla a la radiación y esto también degrada la eficiencia.

Los diodos láser pueden utilizarse en localizadores luminosos para observación y fotografía en la oscuridad, en telémetros y para comunicaciones, entre otros.

FOR AUTHOR USE ONLY

## Bibliografía

1. John Kimbala, Mehmet Kanoglu. Fundamentos y aplicaciones de las energías renovables. - McGraw-Hill, 2019, 416p.
2. David L. Greenaway, Gunter Harbeke. Optical properties and band structure of semiconductors. Pergamon Press Ltd., Headington Hill Hall, Oxford 4&5 Fitzroy Square, Londres W.I. 1968, 172p.
3. Paul Holmes, Shalve Mohile, Shantanu Mohile. Energía Solar para Principiantes: Cómo diseñar e instalar el mejor sistema de energía solar para su hogar (DIY Solar Power) Kindle Edition. 2020, 179p, ISBN-13979-8642013625
4. Nsakalagos L., Balch J., Fronheiser J., Korevaar B.A., Sulima O., Rand J. Silicon nanowire solar cells//Appl. Phys. Lett. - 2007. - Vol. 91. - P. 233117(1)-233117(3).
5. Vikulin I.M., Stafeyev V.I. *Fizika poluprovodnikovykh priborov* [Física de los dispositivos semiconductores]. M.: *Radio i svyaz'*, 1990. 264 p.
6. Sominskiy M.S. *Poluprovodniki* [Semiconductores].- L. *Nauka* 1967. 439p.
7. P. Profos. *Spravochnik "Izmereniya v promyshlennosti"* [Directorio "Mediciones en la industria"] 1-3 volúmenes. M.: *Metallurgiya*, 1990.
8. Mykola Gorbachuk. MATERIALES ELECTROTÉCNICOS. LAP LAMBERT Academic Publishing. 120 High Road, East Finchley, Londres, N2 9ED, Reino Unido, 2024, 112p. ISBN: 978-620-3-46212-8.
9. Kucheruk I.M., Gorbachuk I.T., Lutsik P.P. *Zagal'niy kurs fiziki: Navchal'niy posibnik* [Curso general de física: Guía de estudio], T. 1-3. - K.: *Tekhnika*, 2001.

## Capítulo 6. Transductores de ionización. Transductores de ionización. Sensores

### 6.1. Transductores de pH

Los transductores de ionización convierten un cambio en una magnitud medida en un cambio en, por ejemplo, una corriente de ionización que fluye a través de un líquido colocado entre dos electrodos (fig. 6.1). Un ejemplo típico del uso del principio de ionización es un instrumento para medir la acidez de una solución. El grado de acidez de una solución viene determinado por la concentración de iones de hidrógeno cargados positivamente en ella, denominada potencial de hidrógeno (más conocido por la abreviatura *pH*). Además:

$$pH = -\log[H^+],$$

donde  $H^+$  es la concentración de iones hidrógeno en gramos por litro.

El valor del *pH* es 0 para una solución puramente ácida, 7 para una solución neutra (como el agua pura) y 14 para una solución puramente alcalina.

Una sonda de *pH* típica tiene electrodos de gelatina con un valor conocido de potencial de hidrógeno. Están formados por una membrana de vidrio especial que, está en contacto con la solución cuyo valor de *pH* se está midiendo. La diferencia de potencial entre los dos electrodos refleja el valor de *pH* de la solución (unos 59 mV por unidad de *pH*).

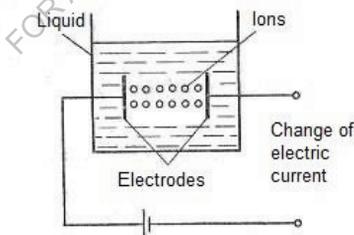


Fig. 6.1 Transformación de ionización, en la que los iones migran en los líquidos hacia los electrodos y actúan como portadores de carga, creando una corriente eléctrica.

### 6.2. Cámaras de ionización. Principios generales de funcionamiento

Un instrumento (sensor) con cámara de ionización consta de una cámara K con un electrodo interior y otro exterior, una fuente de tensión, un sistema de indicación (dispositivo indicador) G y una resistencia de medida

R o un condensador de medida C (fig.6.2). La corriente de ionización (densidad de flujo o tasa de dosis) se mide por el valor de la caída de tensión a través de la resistencia de alta resistencia R. La medición de la carga como integral de la corriente en el tiempo (medición del flujo o de la dosis) viene determinada por la carga del condensador C.

Dependiendo de la sensibilidad requerida y de la adecuación geométrica a la tarea de medición en cuestión, se utilizan diversas cámaras de ionización. El rango de medición de los detectores basados en el principio de la cámara de ionización abarca valores desde fracciones de micrograys hasta miles de grays ( $\mu\text{Gy/h}$  a  $\text{kGy/h}$ ).

Cuando están llenas de aire, las cámaras de ionización son adecuadas por definición para la medición de dosis de iones. Sin embargo, para ello es necesario utilizar construcciones especiales que excluyan o compensen la influencia de las paredes de la cámara de ionización que limitan el volumen de aire. Se han desarrollado muchas cámaras de medición para mediciones prácticas. Al utilizarlas, además de la sensibilidad, el rango de medición y la reproducibilidad de los resultados obtenidos, deben tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

1. La dependencia energética de la sensibilidad muestra en qué medida el valor medido depende de la energía de radiación. En la Fig. 6.3 se muestran ejemplos típicos de esta dependencia energética para diferentes tipos de detectores de radiación.

2. La dependencia de la sensibilidad de la dirección de vuelo de las partículas (rayos) se debe al propio diseño del detector. Dependiendo de la dirección de incidencia de los rayos es necesario introducir correcciones, que a su vez pueden depender de la energía de la radiación.

3. La dependencia de la sensibilidad con respecto a la temperatura y la presión se manifiesta en el hecho de que, en el caso de los sistemas de cámara de ionización no sellados, la masa calculada cambia con la temperatura y la presión del aire. Esto también hace necesario un factor de corrección por el que debe multiplicarse la lectura para obtener el valor correcto de la magnitud medida, si no se ha ajustado previamente la sensibilidad del sistema de medición mediante una corriente de referencia.

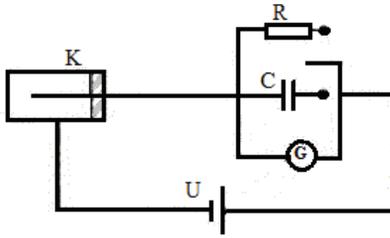


Fig. 6.2. Esquema de principio de la cámara de ionización para medir la tasa de dosis o la dosis absorbida

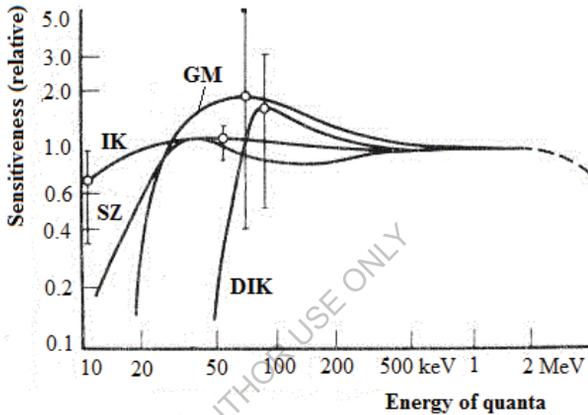


Fig. 6.3. Dependencias típicas de la sensibilidad de diferentes detectores de radiación en el nivel de energía (valores medios para un gran número de detectores individuales) y máximas extensiones en la región crítica. GM: contador Geiger-Muller; IK: cámara de ionización; SZ: contador de centelleo; DIK: cámara de ionización de alta presión.

### 6.3. Transductores de medición de ionización

La Fig. 6.4 muestra el esquema estructural de uno de los transductores de ionización con isótopo radiactivo. El dispositivo está diseñado para la medición continua del espesor de una cinta en movimiento o, por ejemplo, de acero laminado.

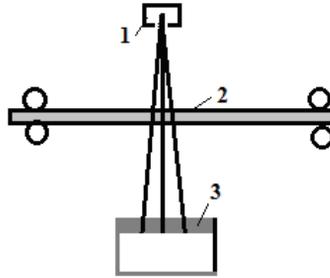


Fig. 6.4. Esquema del transductor de ionización para la medición del espesor de la cinta.

El principio de funcionamiento del dispositivo es el siguiente. La radiación radiactiva del isótopo 1 es parcialmente absorbida por el producto 2. La cantidad de energía recibida por el indicador 3 depende del material y del grosor del producto. Indicador 3 a través de un amplificador está conectado al sistema de medición calibrado en valores del valor medido.

La Fig. 6.5 muestra esquemas de dispositivos de medidor de nivel y medidor de presión de gas que funcionan según el principio de ionización.

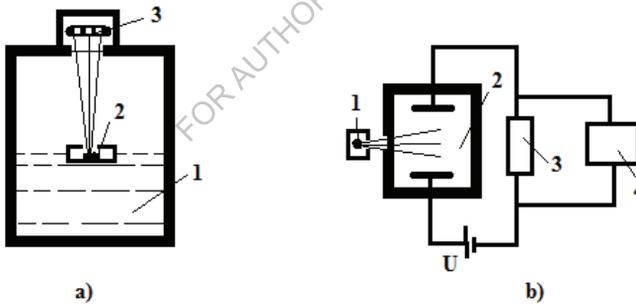


Fig. 6.5. a - esquema del medidor de nivel de ionización, b - esquema del dispositivo de medición de la presión del gas.

El flotador 2 con isótopo radiactivo flota en la superficie del líquido 1 (fig. 6.5.a). El indicador 3, que percibe la radiación, está situado encima del flotador. Cuando cambia el nivel del líquido, cambia la distancia entre la fuente de radiación y el indicador y, en consecuencia, la cantidad de energía recibida por el indicador. De este modo, se controla el nivel del líquido.

La Fig. 6.5.b muestra el diagrama estructural del medidor de presión de gas de ionización. Bajo la influencia de la radiación radiactiva del isótopo 1, en el recipiente 2 se produce la ionización del gas. Dependiendo de la presión del gas, cambia la intensidad de ionización. En consecuencia, cambia la corriente de ionización que fluye por el circuito bajo la acción de la tensión  $U$  aplicada. El dispositivo de medición está conectado a la resistencia 3, en la que se produce una caída de tensión debida a la corriente de ionización.

Los analizadores de gas por ionización tienen un dispositivo similar.

#### 6.4. Cámara de ionización. Radiación radiactiva. Contadores

En el caso más sencillo, la cámara de ionización es un dispositivo formado por dos placas metálicas aisladas entre sí y separadas por un espacio de gas (fig. 6.6).

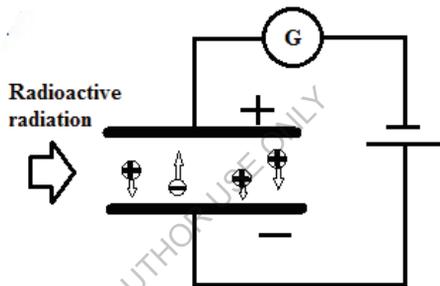


Fig. 6.6. Esquema y principio de funcionamiento de una cámara de ionización.

Cualquier condensador de aire puede actuar como cámara de ionización. El espacio entre las placas se denomina volumen de trabajo de la cámara. Si se aplica una tensión constante a una placa, se forma un espacio con un campo eléctrico cuyas líneas de fuerza se dirigen de la placa positiva a la negativa. Una fuerza actuará sobre una partícula cargada eléctricamente colocada en el campo eléctrico y se moverá a lo largo de una trayectoria que coincide con la dirección de las líneas del campo eléctrico. La dirección del movimiento de las partículas cargadas positivamente coincide con la dirección de las líneas de campo. Las partículas negativas se mueven en sentido contrario.

Consideremos los procesos que tienen lugar en el volumen de trabajo de la cámara de ionización. En ausencia de tensión en los electrodos de la cámara, los iones y electrones formados en el volumen de trabajo como

resultado de la radiación radiactiva se mueven al azar junto con los átomos neutros, algunos de los cuales alcanzarán los electrodos. Si ahora se aplica una pequeña tensión constante a los electrodos, bajo la influencia del campo eléctrico los iones y electrones adquieren un movimiento dirigido correspondiente a las líneas de campo (fig. 6.6). Los electrones se mueven hacia la placa anódica cargada positivamente y los iones positivos hacia la placa catódica cargada negativamente. La velocidad de movimiento de los iones positivos pesados es miles y decenas de miles de veces menor que la velocidad de los electrones ligeros.

A baja tensión, el campo de los electrodos es débil y las partículas se mueven lentamente. Por lo tanto, la mayoría de ellas se recombinan y no llegan a los electrodos. Se convierten en partículas de gas neutro. Como resultado, la corriente en el circuito externo será muy pequeña.

La intensidad de la corriente de ionización es igual a la carga eléctrica total aportada por las partículas cargadas a la superficie del electrodo durante un segundo. Cuantos más iones vayan al electrodo, mayor será la corriente. Esta corriente se registra con cualquier instrumento eléctrico conectado al circuito de la cámara.

A medida que aumenta la tensión aplicada a las placas, aumenta la intensidad del campo eléctrico, y un número creciente de partículas cargadas, que no han tenido tiempo de recombinarse, caen sobre los electrodos. La intensidad de corriente en el circuito externo aumenta (fig. 6.7, de O a A).

Entonces, a cierta tensión  $U_1$  la intensidad del campo eléctrico aumenta, de modo que todas las partículas cargadas formadas por el ionizador externo en el volumen de trabajo de la cámara caerán sobre los electrodos. En este caso, la corriente en el circuito externo viene determinada únicamente por la capacidad de ionización de la radiación. Si la capacidad de ionización de la radiación no cambia, la corriente en la cámara no cambia (curva A-B). Esta corriente se denomina corriente de saturación de la cámara.

Cuando se sigue aumentando la tensión hasta  $U_2$ , la corriente que circula por el circuito de la cámara empieza a aumentar de nuevo, lentamente al principio y luego cada vez más rápido (parte de la curva sobre el punto). Esto se debe al hecho de que a tensiones superiores a  $U_2$  la intensidad del campo eléctrico en el interior de la cámara aumenta de forma que los electrones adquieren velocidades suficientes para ionizar los átomos de gas neutro cuando se encuentran. Por lo tanto, la corriente en el circuito externo

viene determinada por la cantidad total de cargas formadas bajo la influencia del ionizador externo y bajo la acción de los electrones ionizantes atrapados en el interior del volumen de trabajo de la cámara.

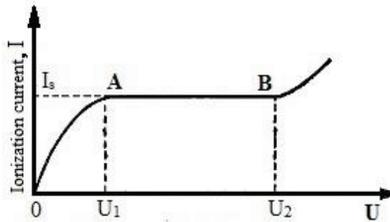


Fig. 6.7. Característica voltio-amperio de una cámara de ionización.

La curva de dependencia de la corriente de ionización de la cámara con la magnitud de la tensión aplicada se denomina característica voltio-amperio.

Las cámaras de ionización suelen funcionar en la región de saturación de la corriente. Dado que la magnitud de esta corriente es proporcional al número de iones producidos, puede servir como medida de la capacidad de ionización de la radiación.

Según su uso, las cámaras de ionización son de dos tipos:

- Una cámara utilizada para medir la ionización total causada por el paso a través de ella de un número significativo de partículas ionizantes se denomina cámara de ionización integradora. La magnitud de la corriente de saturación es igual al producto del número de pares de iones producidos por segundo por centímetro cúbico de la cámara, su polarización y la carga de cada ion. En consecuencia, el valor de la corriente de saturación puede servir como medida de la dosis de radiación.

- El segundo tipo son las cámaras de ionización de recuento, que pueden utilizarse para probar y determinar la capacidad de ionización de cualquier partícula ionizante individual (por ejemplo, una partícula  $\alpha$ ) capturada en el volumen de trabajo de la cámara.

**Cámara de ionización Geiger-Muller.** La figura 6.8 muestra un dispositivo consistente en un cilindro metálico, en cuyo eje se estira un filamento de alambre sobre unos aislantes. Este dispositivo se denomina contador de descarga de gas. La figura 6.8 muestra la sección transversal del contador. El cilindro está conectado al borne negativo de la pila y se denomina cátodo. El ánodo se conecta a través de la resistencia de carga.

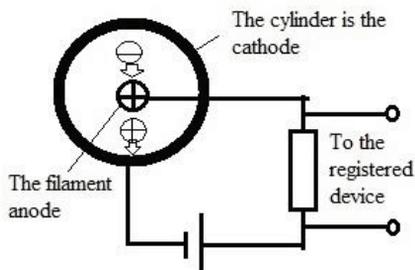


Fig. 6.8. Esquema y funcionamiento del contador de ionización

Si una partícula ionizante atraviesa el volumen de trabajo del contador, aparecerán en la cámara iones y electrones positivos, que bajo la acción del campo eléctrico se desplazan hacia los electrodos: los electrones hacia el filamento, los iones hacia el cilindro. En el circuito externo fluirá un impulso de corriente, que forma un impulso de caída de tensión en la resistencia de carga. Este pulso de tensión puede registrarse con un dispositivo de grabación.

La cantidad de electricidad en el impulso de corriente depende de la magnitud de la tensión aplicada. En general, esta dependencia se muestra en la fig. 6.7, y los principios físicos de funcionamiento del medidor son similares a los de la cámara de ionización (fig. 6.6).

Dependiendo de la tensión aplicada, el contador puede funcionar como una cámara de ionización, un contador proporcional y un contador Geiger-Muller de descarga de gas. Sin embargo, en la práctica son tres tipos de dispositivos diferentes con diseños distintos y dependiendo del uso previsto aplican uno u otro dispositivo.

**Diseño de contadores. Diseño de contadores gamma.** Los diseños de los contadores de descarga de gas se mejoran y cambian constantemente. Los contadores se pueden dividir en varios grupos: contadores gamma, los llamados contadores beta-gamma, contadores para partículas  $\beta$  blandas, que en su diseño deben tener una ventana para el paso de partículas  $\beta$  blandas, contadores de fotones (cuantos de luz) y otros.

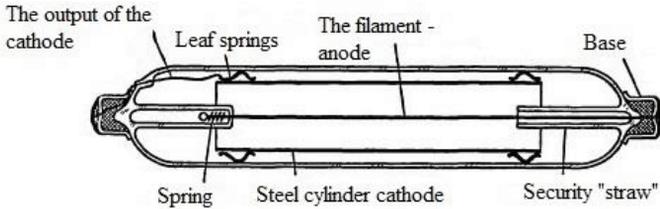


Fig. 6.9. Vista esquemática del contador gamma en sección

El dispositivo contador gamma es bastante simple. En la figura 6.9 se muestra un contador gamma con contenido de argón. Aquí se inserta un cilindro de paredes delgadas - cátodo de acero inoxidable en un cilindro de vidrio. El contacto se conduce fuera del cilindro con un alambre de molibdeno. En el eje se fija un filamento metálico (ánodo). El medidor está lleno de una mezcla de halógenos (neón-argón-bromo) y puede utilizarse tanto en modo de impulsos (recuento) como en modo de corriente. Este medidor pertenece a la serie STM (medidor de acero).

En el modo de impulsos, el contador tiene una vida útil muy larga. Los contadores de la serie STM permitirán tasas de recuento de cien mil impulsos por minuto y superiores; esto mantiene la proporcionalidad entre la intensidad de irradiación y la tasa de recuento hasta doscientos mil impulsos por minuto.

Esta característica de la tasa de recuento corresponde a una dosis de aproximadamente  $0,25 (R/h)$ . La tasa de dosis hasta la cual la tasa de recuento se mantiene directamente proporcional, así como el valor de la dosis máxima de funcionamiento del contador en el modo de corriente, dependen de las dimensiones geométricas. Cuanto menor sea el diámetro del cátodo y la longitud de funcionamiento, mayor será el límite de dosis y más tiempo se mantendrá la proporcionalidad entre la tasa de recuento y la tasa de dosis de radiación.

Al seleccionar la longitud de trabajo, las relaciones de longitud de trabajo se ajustan en el medidor para que sean al menos dos veces el diámetro del cátodo. Con una longitud de trabajo menor, el medidor también funciona, pero el valor potencial de descarga de la chispa aumenta drásticamente.

Por ejemplo, para un contador con un diámetro de cátodo de 10 mm a una longitud de trabajo igual a 5 diámetros (50 mm), a un determinado llenado de gas, la tensión de arranque es de 400 V, a una longitud de trabajo igual a dos diámetros de cátodo - 405, a una longitud de trabajo igual a un

diámetro de cátodo - 450 V, y a una longitud de trabajo igual a 0,5 diámetros de cátodo, el potencial de encendido aumenta a 500 V.

A medida que disminuye la longitud de trabajo del filamento, disminuyen tanto la longitud de la meseta de recuento como las características.

FOR AUTHOR USE ONLY

## Bibliografia

1. Radiation Technologies and Applications in Materials Science. Editado por Subhendu Ray Chowdhuru. -Taylor & Francis, 2022, 396p. ISBN 9781032343945
2. Mykola Gorbachuk. MATERIALES ELECTROTÉCNICOS. LAP LAMBERT Academic Publishing. 120 High Road, East Finchley, Londres, N2 9ED, Reino Unido, 2024, 112p. ISBN: 978-620-3-46212-8.
3. Kucheruk I.M., Gorbachuk I.T., Lutsik P.P. *Zagal'niy kurs fiziki: Navchal'niy posibnik* [Curso general de física: Guía de estudio], T. 1-3. - K.: *Tekhnika*, 2001.
4. Vikulin I.M., Stafeev V.I. *Fizika poluprovodnikovyykh priborov* [Física de los dispositivos semiconductores]. M.: *Radio i svyaz'*, 1990. 264 p.
5. Sominskiy M.S. *Poluprovodniki* [Semiconductores].- L. *Nauka* 1967. 439p.
6. P. Profos. *Spravochnik "Izmereniya v promyshlennosti"* [Directorio "Mediciones en la industria"] 1-3 volúmenes. M.: *Metallurgiya*, 1990.

## Anexo

**Cuadro 1.**

Dependencia de la FEM de un termopar diferencial de cromo-cobre (Тип L) de la temperatura de la unión de trabajo (tabla de calibración). Gama de temperaturas de  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $+200^{\circ}\text{C}$

t, °C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	EMF, mV									
-20	-1,27	-1,35	-1,39	-1,46	-1,52	-1,58	-1,64	-1,70	-1,77	-1,83
-10	-0,64	-0,70	-0,77	-0,83	-0,89	-0,96	-1,02	-1,08	-1,14	-1,21
0	0	-0,06	-0,13	-0,19	0,26	-0,32	-0,38	0,45	-0,51	-0,58
+0	0	0,07	0,13	0,20	0,26	0,33	0,39	0,46	0,52	0,59
10	0,65	0,72	0,78	0,85	0,91	0,98	1,05	1,11	1,18	1,24
20	1,31	1,38	1,44	1,51	1,57	1,64	1,70	1,77	1,84	1,91
30	1,98	2,05	2,12	2,18	2,25	2,32	2,38	2,45	2,52	2,59
40	2,66	2,73	2,80	2,87	2,94	3,00	3,07	3,14	3,21	3,28
50	3,35	3,42	3,49	3,56	3,63	3,70	3,77	3,84	3,91	3,98
60	4,05	4,12	4,19	4,26	4,33	4,41	4,48	4,55	4,62	4,69
70	4,76	4,83	4,90	4,98	5,05	5,12	5,20	5,27	5,34	5,41
80	5,48	5,56	5,63	5,70	5,78	5,85	5,92	5,99	6,07	6,14
90	6,21	6,29	6,36	6,43	6,51	6,58	6,65	6,73	6,80	6,87
100	6,95	7,03	7,10	7,17	7,25	7,32	7,40	7,47	7,54	7,62
110	7,69	7,77	7,84	7,91	7,99	8,06	8,13	8,21	8,28	8,35
120	8,43	8,50	8,58	8,65	8,73	8,80	8,88	8,95	9,03	9,10
130	9,18	9,25	9,33	9,40	9,48	9,55	9,63	9,70	9,78	9,85
140	9,93	10,00	10,08	10,16	10,23	10,31	10,38	10,46	10,54	10,61
150	10,69	10,77	10,85	10,92	11,00	11,08	11,15	11,23	11,31	11,38
160	11,46	11,54	11,62	11,69	11,77	11,85	11,93	12,00	12,08	12,16
170	12,24	12,32	12,40	12,48	12,55	12,63	12,71	12,79	12,87	12,93
180	13,03	13,11	13,19	13,27	13,36	13,44	13,52	13,60	13,68	13,76
190	13,84	13,92	14,00	14,08	14,16	14,23	14,33	14,42	14,50	14,58
200	14,66	14,74	14,82	14,90	14,98	15,06	15,14	15,22	15,30	15,38

**Tabla 2.**

Dependencia de la FEM de un termopar diferencial de cromel-alumel (tipo K) de la temperatura de la unión de trabajo (tabla de calibración).  
Gama de temperaturas de -270 °C a 1370 °C.

t, °C	EMF, mV											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	
-270	-6.458											
-260	-6.441	-6.444	-6.446	-6.448	-6.450	-6.452	-6.453	-6.455	-6.456	-6.457	-6.458	
-250	-6.404	-6.408	-6.413	-6.417	-6.421	-6.425	-6.429	-6.432	-6.435	-6.438	-6.441	
-240	-6.344	-6.351	-6.358	-6.364	-6.370	-6.377	-6.382	-6.388	-6.393	-6.399	-6.404	
-230	-6.262	-6.271	-6.280	-6.289	-6.297	-6.306	-6.314	-6.322	-6.329	-6.337	-6.344	
-220	-6.158	-6.170	-6.181	-6.192	-6.202	-6.213	-6.223	-6.233	-6.243	-6.252	-6.262	
-210	-6.035	-6.048	-6.061	-6.074	-6.087	-6.099	-6.111	-6.123	-6.135	-6.147	-6.158	
-200	-5.891	-5.907	-5.922	-5.936	-5.951	-5.965	-5.980	-5.994	-6.007	-6.021	-6.035	
-190	-5.730	-5.747	-5.763	-5.780	-5.797	-5.813	-5.829	-5.845	-5.861	-5.876	-5.891	
-180	-5.550	-5.569	-5.588	-5.608	-5.624	-5.642	-5.660	-5.678	-5.695	-5.713	-5.730	
-170	-5.354	-5.374	-5.395	-5.415	-5.435	-5.454	-5.474	-5.493	-5.512	-5.531	-5.550	
-160	-5.141	-5.163	-5.185	-5.207	-5.228	-5.250	-5.271	-5.292	-5.313	-5.333	-5.354	
-150	-4.913	-4.936	-4.960	-4.983	-5.006	-5.029	-5.052	-5.074	-5.097	-5.119	-5.141	
-140	-4.669	-4.694	-4.719	-4.744	-4.768	-4.793	-4.817	-4.841	-4.865	-4.889	-4.913	
-130	-4.411	-4.437	-4.463	-4.490	-4.516	-4.542	-4.567	-4.593	-4.618	-4.644	-4.669	
-120	-4.138	-4.166	-4.194	-4.221	-4.249	-4.276	-4.303	-4.330	-4.357	-4.384	-4.411	
-110	-3.852	-3.882	-3.911	-3.939	-3.968	-3.997	-4.025	-4.054	-4.082	-4.110	-4.138	
-100	-3.554	-3.584	-3.614	-3.645	-3.675	-3.705	-3.734	-3.764	-3.794	-3.823	-3.852	
-90	-3.243	-3.274	-3.306	-3.337	-3.368	-3.400	-3.431	-3.462	-3.492	-3.523	-3.554	
-80	-2.920	-2.953	-2.986	-3.018	-3.050	-3.083	-3.115	-3.147	-3.179	-3.211	-3.243	
-70	-2.587	-2.620	-2.654	-2.688	-2.721	-2.755	-2.788	-2.821	-2.854	-2.887	-2.920	
-60	-2.243	-2.278	-2.312	-2.347	-2.382	-2.416	-2.450	-2.485	-2.519	-2.553	-2.587	
-50	-1.889	-1.925	-1.961	-1.996	-2.032	-2.067	-2.103	-2.138	-2.173	-2.208	-2.243	
-40	-1.527	-1.564	-1.600	-1.637	-1.673	-1.709	-1.745	-1.782	-1.818	-1.854	-1.889	
-30	-1.156	-1.194	-1.231	-1.268	-1.305	-1.343	-1.380	-1.417	-1.453	-1.490	-1.527	
-20	-0.778	-0.816	-0.854	-0.892	-0.930	-0.968	-1.006	-1.043	-1.081	-1.119	-1.156	
-10	-0.392	-0.431	-0.470	-0.508	-0.547	-0.585	-0.624	-0.663	-0.701	-0.739	-0.778	
0	0.000	-0.039	-0.079	-0.118	-0.157	-0.197	-0.236	-0.275	-0.314	-0.353	-0.392	
0	0.000	0.039	0.079	0.119	0.158	0.198	0.238	0.277	0.317	0.357	0.397	
10	0.397	0.437	0.477	0.517	0.557	0.597	0.637	0.677	0.718	0.758	0.798	
20	0.798	0.838	0.879	0.919	0.960	1.000	1.041	1.081	1.122	1.163	1.203	
30	1.203	1.244	1.285	1.326	1.366	1.407	1.448	1.489	1.530	1.571	1.612	
40	1.612	1.653	1.694	1.735	1.776	1.817	1.858	1.899	1.941	1.982	2.023	
50	2.023	2.064	2.105	2.147	2.188	2.230	2.271	2.312	2.354	2.395	2.436	
60	2.436	2.478	2.519	2.561	2.602	2.644	2.685	2.727	2.768	2.810	2.851	
70	2.851	2.893	2.934	2.976	3.017	3.059	3.100	3.142	3.184	3.225	3.267	
80	3.267	3.308	3.350	3.391	3.433	3.474	3.516	3.557	3.599	3.640	3.682	
90	3.682	3.723	3.765	3.806	3.848	3.889	3.931	3.972	4.013	4.055	4.096	
100	4.096	4.138	4.179	4.220	4.262	4.303	4.344	4.385	4.427	4.468	4.509	
110	4.509	4.550	4.591	4.633	4.674	4.715	4.756	4.797	4.838	4.879	4.920	
120	4.920	4.961	5.002	5.043	5.084	5.124	5.165	5.206	5.247	5.288	5.328	
130	5.328	5.369	5.410	5.450	5.491	5.532	5.572	5.613	5.653	5.694	5.735	
140	5.735	5.775	5.815	5.856	5.896	5.937	5.977	6.017	6.058	6.098	6.138	
150	6.138	6.179	6.219	6.259	6.299	6.339	6.380	6.420	6.460	6.500	6.540	
160	6.540	6.580	6.620	6.660	6.701	6.741	6.781	6.821	6.861	6.901	6.941	
170	6.941	6.981	7.021	7.060	7.100	7.140	7.180	7.220	7.260	7.300	7.340	
180	7.340	7.380	7.420	7.460	7.500	7.540	7.579	7.619	7.659	7.699	7.739	
190	7.739	7.779	7.819	7.859	7.899	7.939	7.979	8.019	8.059	8.099	8.138	

Continuación del cuadro 2

200	8.138	8.178	8.218	8.258	8.298	8.338	8.378	8.418	8.458	8.499	8.539	200
210	8.539	8.579	8.619	8.659	8.699	8.739	8.779	8.819	8.860	8.900	8.940	210
220	8.940	8.980	9.020	9.061	9.101	9.141	9.181	9.222	9.262	9.302	9.343	220
230	9.343	9.383	9.423	9.464	9.504	9.545	9.585	9.626	9.666	9.707	9.747	230
240	9.747	9.788	9.828	9.869	9.909	9.950	9.991	10.031	10.072	10.113	10.153	240
250	10.153	10.194	10.235	10.276	10.316	10.357	10.398	10.439	10.480	10.520	10.561	250
260	10.561	10.602	10.643	10.684	10.725	10.766	10.807	10.848	10.889	10.930	10.971	260
270	10.971	11.012	11.053	11.094	11.135	11.176	11.217	11.259	11.300	11.341	11.382	270
280	11.382	11.423	11.465	11.506	11.547	11.588	11.630	11.671	11.712	11.753	11.795	280
290	11.795	11.836	11.877	11.919	11.960	12.001	12.043	12.084	12.126	12.167	12.209	290
300	12.209	12.250	12.291	12.333	12.374	12.416	12.457	12.499	12.540	12.582	12.624	300
310	12.624	12.665	12.707	12.748	12.790	12.831	12.873	12.915	12.956	12.998	13.040	310
320	13.040	13.081	13.123	13.165	13.206	13.248	13.290	13.331	13.373	13.415	13.457	320
330	13.457	13.498	13.540	13.582	13.624	13.665	13.707	13.749	13.791	13.833	13.874	330
340	13.874	13.916	13.958	14.000	14.042	14.084	14.126	14.167	14.209	14.251	14.293	340
350	14.293	14.335	14.377	14.419	14.461	14.503	14.545	14.587	14.629	14.671	14.713	350
360	14.713	14.755	14.797	14.839	14.881	14.923	14.965	15.007	15.049	15.091	15.133	360
370	15.133	15.175	15.217	15.259	15.301	15.343	15.385	15.427	15.469	15.511	15.554	370
380	15.554	15.596	15.638	15.680	15.722	15.764	15.806	15.849	15.891	15.933	15.975	380
390	15.975	16.017	16.059	16.102	16.144	16.186	16.228	16.270	16.313	16.355	16.397	390
400	16.397	16.439	16.482	16.524	16.566	16.608	16.651	16.693	16.735	16.778	16.820	400
410	16.820	16.862	16.904	16.947	16.989	17.031	17.074	17.116	17.158	17.201	17.243	410
420	17.243	17.285	17.328	17.370	17.413	17.455	17.497	17.540	17.582	17.624	17.667	420
430	17.667	17.709	17.752	17.794	17.837	17.879	17.921	17.964	18.006	18.049	18.091	430
440	18.091	18.134	18.176	18.218	18.261	18.303	18.346	18.388	18.431	18.473	18.516	440
450	18.516	18.558	18.601	18.643	18.686	18.728	18.771	18.813	18.856	18.898	18.941	450
460	18.941	18.983	19.026	19.068	19.111	19.154	19.196	19.239	19.281	19.324	19.366	460
470	19.366	19.409	19.451	19.494	19.537	19.579	19.622	19.664	19.707	19.750	19.792	470
480	19.792	19.835	19.877	19.920	19.962	20.005	20.048	20.090	20.133	20.175	20.218	480
490	20.218	20.261	20.303	20.346	20.389	20.431	20.474	20.516	20.559	20.602	20.644	490
500	20.644	20.687	20.730	20.772	20.815	20.857	20.900	20.943	20.985	21.028	21.071	500
510	21.071	21.113	21.156	21.199	21.241	21.284	21.326	21.369	21.412	21.454	21.497	510
520	21.497	21.540	21.582	21.625	21.668	21.710	21.753	21.796	21.838	21.881	21.924	520
530	21.924	21.966	22.009	22.052	22.094	22.137	22.179	22.222	22.265	22.307	22.350	530
540	22.350	22.393	22.435	22.478	22.521	22.563	22.606	22.649	22.691	22.734	22.776	540
550	22.776	22.819	22.862	22.904	22.947	22.990	23.032	23.075	23.117	23.160	23.203	550
560	23.203	23.245	23.288	23.331	23.373	23.416	23.458	23.501	23.544	23.586	23.629	560
570	23.629	23.671	23.714	23.757	23.799	23.842	23.884	23.927	23.970	24.012	24.055	570
580	24.055	24.097	24.140	24.182	24.225	24.267	24.310	24.353	24.395	24.438	24.480	580
590	24.480	24.523	24.565	24.608	24.650	24.693	24.735	24.778	24.820	24.863	24.905	590
600	24.905	24.948	24.990	25.033	25.075	25.118	25.160	25.203	25.245	25.288	25.330	600
610	25.330	25.373	25.415	25.458	25.500	25.543	25.585	25.627	25.670	25.712	25.755	610
620	25.755	25.797	25.840	25.882	25.924	25.967	26.009	26.052	26.094	26.136	26.179	620
630	26.179	26.221	26.263	26.306	26.348	26.390	26.433	26.475	26.517	26.560	26.602	630
640	26.602	26.644	26.687	26.729	26.771	26.814	26.856	26.898	26.940	26.983	27.025	640
650	27.025	27.067	27.109	27.152	27.194	27.236	27.278	27.320	27.363	27.405	27.447	650
660	27.447	27.489	27.531	27.574	27.616	27.658	27.700	27.742	27.784	27.826	27.869	660
670	27.869	27.911	27.953	27.995	28.037	28.079	28.121	28.163	28.205	28.247	28.289	670
680	28.289	28.332	28.374	28.416	28.458	28.500	28.542	28.584	28.626	28.668	28.710	680
690	28.710	28.752	28.794	28.835	28.877	28.919	28.961	29.003	29.045	29.087	29.129	690

Continuación del cuadro 2

700	29.129	29.171	29.213	29.255	29.297	29.338	29.380	29.422	29.464	29.506	29.548
710	29.548	29.589	29.631	29.673	29.715	29.757	29.798	29.840	29.882	29.924	29.965
720	29.965	30.007	30.049	30.090	30.132	30.174	30.216	30.257	30.299	30.341	30.382
730	30.382	30.424	30.466	30.507	30.549	30.590	30.632	30.674	30.715	30.757	30.798
740	30.798	30.840	30.881	30.923	30.964	31.006	31.047	31.089	31.130	31.172	31.213
750	31.213	31.255	31.296	31.338	31.379	31.421	31.462	31.504	31.545	31.586	31.628
760	31.628	31.669	31.710	31.752	31.793	31.834	31.876	31.917	31.958	32.000	32.041
770	32.041	32.082	32.124	32.165	32.206	32.247	32.289	32.330	32.371	32.412	32.453
780	32.453	32.495	32.536	32.577	32.618	32.659	32.700	32.742	32.783	32.824	32.865
790	32.865	32.906	32.947	32.988	33.029	33.070	33.111	33.152	33.193	33.234	33.275
800	33.275	33.316	33.357	33.398	33.439	33.480	33.521	33.562	33.603	33.644	33.685
810	33.685	33.726	33.767	33.808	33.848	33.889	33.930	33.971	34.012	34.053	34.093
820	34.093	34.134	34.175	34.216	34.257	34.297	34.338	34.379	34.420	34.460	34.501
830	34.501	34.542	34.582	34.623	34.664	34.704	34.745	34.786	34.826	34.867	34.908
840	34.908	34.948	34.989	35.029	35.070	35.110	35.151	35.192	35.232	35.273	35.313
850	35.313	35.354	35.394	35.435	35.475	35.516	35.556	35.596	35.637	35.677	35.718
860	35.718	35.758	35.798	35.839	35.879	35.920	35.960	36.000	36.041	36.081	36.121
870	36.121	36.162	36.202	36.242	36.282	36.323	36.363	36.403	36.443	36.484	36.524
880	36.524	36.564	36.604	36.644	36.685	36.725	36.765	36.805	36.845	36.885	36.925
890	36.925	36.965	37.006	37.046	37.086	37.126	37.166	37.206	37.246	37.286	37.326
900	37.326	37.366	37.406	37.446	37.486	37.526	37.566	37.606	37.646	37.686	37.726
910	37.726	37.766	37.806	37.846	37.885	37.925	37.965	38.005	38.044	38.084	38.124
920	38.124	38.164	38.204	38.243	38.283	38.323	38.363	38.402	38.442	38.482	38.522
930	38.522	38.561	38.601	38.641	38.680	38.720	38.760	38.799	38.839	38.878	38.918
940	38.918	38.958	38.997	39.037	39.076	39.116	39.155	39.195	39.235	39.274	39.314
950	39.314	39.353	39.393	39.432	39.471	39.511	39.550	39.590	39.629	39.669	39.708
960	39.708	39.747	39.787	39.826	39.865	39.905	39.944	39.984	40.023	40.062	40.101
970	40.101	40.141	40.180	40.219	40.259	40.298	40.337	40.377	40.415	40.455	40.494
980	40.494	40.533	40.572	40.611	40.651	40.690	40.729	40.768	40.807	40.846	40.885
990	40.885	40.924	40.963	41.002	41.042	41.081	41.120	41.159	41.198	41.237	41.276
1000	41.276	41.315	41.354	41.393	41.431	41.470	41.509	41.548	41.587	41.626	41.665
1010	41.665	41.704	41.743	41.781	41.820	41.859	41.898	41.937	41.976	42.014	42.053
1020	42.053	42.092	42.131	42.169	42.208	42.247	42.286	42.324	42.363	42.402	42.440
1030	42.440	42.479	42.518	42.556	42.595	42.633	42.672	42.711	42.749	42.788	42.826
1040	42.826	42.865	42.903	42.942	42.980	43.019	43.057	43.096	43.134	43.173	43.211
1050	43.211	43.250	43.288	43.327	43.365	43.403	43.442	43.480	43.518	43.557	43.595
1060	43.595	43.633	43.672	43.710	43.748	43.787	43.825	43.863	43.901	43.940	43.978
1070	43.978	44.016	44.054	44.092	44.130	44.169	44.207	44.245	44.283	44.321	44.359
1080	44.359	44.397	44.435	44.473	44.512	44.550	44.588	44.626	44.664	44.702	44.740
1090	44.740	44.778	44.816	44.853	44.891	44.929	44.967	45.005	45.043	45.081	45.119
1100	45.119	45.157	45.194	45.232	45.270	45.308	45.346	45.383	45.421	45.459	45.497
1110	45.497	45.534	45.572	45.610	45.647	45.685	45.723	45.760	45.798	45.836	45.873
1120	45.873	45.911	45.948	45.986	46.024	46.061	46.099	46.136	46.174	46.211	46.249
1130	46.249	46.286	46.324	46.361	46.398	46.436	46.473	46.511	46.548	46.585	46.623
1140	46.623	46.660	46.697	46.735	46.772	46.809	46.847	46.884	46.921	46.958	46.995
1150	46.995	47.033	47.070	47.107	47.144	47.181	47.218	47.256	47.293	47.330	47.367
1160	47.367	47.404	47.441	47.478	47.515	47.552	47.589	47.626	47.663	47.700	47.737
1170	47.737	47.774	47.811	47.848	47.884	47.921	47.958	47.995	48.032	48.069	48.105
1180	48.105	48.142	48.179	48.216	48.252	48.289	48.326	48.363	48.399	48.436	48.473
1190	48.473	48.509	48.546	48.582	48.619	48.656	48.692	48.729	48.765	48.802	48.838
1200	48.838	48.875	48.911	48.948	48.984	49.021	49.057	49.093	49.130	49.166	49.202
1210	49.202	49.239	49.275	49.311	49.348	49.384	49.420	49.456	49.493	49.529	49.565
1220	49.565	49.601	49.637	49.674	49.710	49.746	49.782	49.818	49.854	49.890	49.926
1230	49.926	49.962	49.998	50.034	50.070	50.106	50.142	50.178	50.214	50.250	50.286
1240	50.286	50.322	50.358	50.393	50.429	50.465	50.501	50.537	50.572	50.608	50.644
1250	50.644	50.680	50.715	50.751	50.787	50.822	50.858	50.894	50.929	50.965	51.000
1260	51.000	51.036	51.071	51.107	51.142	51.178	51.213	51.249	51.284	51.320	51.355
1270	51.355	51.391	51.426	51.461	51.497	51.532	51.567	51.603	51.638	51.673	51.708
1280	51.708	51.744	51.779	51.814	51.849	51.885	51.920	51.955	51.990	52.025	52.060
1290	52.060	52.095	52.130	52.165	52.200	52.235	52.270	52.305	52.340	52.375	52.410
1300	52.410	52.445	52.480	52.515	52.550	52.585	52.620	52.655	52.690	52.724	52.759
1310	52.759	52.794	52.828	52.863	52.898	52.932	52.967	53.002	53.037	53.071	53.106
1320	53.106	53.140	53.175	53.210	53.244	53.279	53.313	53.348	53.382	53.417	53.451
1330	53.451	53.486	53.520	53.555	53.589	53.623	53.658	53.692	53.727	53.761	53.795
1340	53.795	53.830	53.864	53.898	53.932	53.967	54.001	54.035	54.069	54.104	54.138
1350	54.138	54.172	54.206	54.240	54.274	54.308	54.343	54.377	54.411	54.445	54.479
1360	54.479	54.513	54.547	54.581	54.615	54.649	54.683	54.717	54.751	54.785	54.819
1370	54.819	54.852	54.886								1370

**Tabla 3.**

Dependencia de la FEM de un termopar diferencial de cobre - constantan (**Tipo T**) de la temperatura de la unión de trabajo (tabla de calibración).

Gama de temperaturas de -270 °C a 400 °C.

t, °C	EMF, mV										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
-270	-6.258										
-260	-6.232	-6.236	-6.239	-6.242	-6.245	-6.248	-6.251	-6.253	-6.255	-6.256	-6.258
-250	-6.180	-6.187	-6.193	-6.198	-6.204	-6.209	-6.214	-6.219	-6.223	-6.228	-6.232
-240	-6.105	-6.114	-6.122	-6.130	-6.138	-6.146	-6.153	-6.160	-6.167	-6.174	-6.180
-230	-6.007	-6.017	-6.028	-6.038	-6.049	-6.059	-6.068	-6.078	-6.087	-6.096	-6.105
-220	-5.898	-5.901	-5.914	-5.926	-5.938	-5.950	-5.962	-5.973	-5.985	-5.996	-6.007
-210	-5.753	-5.767	-5.782	-5.795	-5.809	-5.823	-5.836	-5.850	-5.863	-5.876	-5.888
-200	-5.603	-5.619	-5.634	-5.650	-5.666	-5.680	-5.695	-5.710	-5.724	-5.739	-5.753
-190	-5.439	-5.456	-5.473	-5.489	-5.506	-5.523	-5.539	-5.555	-5.571	-5.587	-5.603
-180	-5.261	-5.279	-5.297	-5.316	-5.334	-5.351	-5.369	-5.387	-5.404	-5.421	-5.439
-170	-5.070	-5.089	-5.109	-5.128	-5.148	-5.167	-5.186	-5.205	-5.224	-5.242	-5.261
-160	-4.865	-4.886	-4.907	-4.928	-4.949	-4.969	-4.989	-5.010	-5.030	-5.050	-5.070
-150	-4.648	-4.671	-4.693	-4.715	-4.737	-4.759	-4.780	-4.802	-4.823	-4.844	-4.865
-140	-4.419	-4.443	-4.466	-4.489	-4.512	-4.535	-4.558	-4.581	-4.604	-4.626	-4.648
-130	-4.177	-4.202	-4.226	-4.251	-4.275	-4.300	-4.324	-4.348	-4.372	-4.395	-4.419
-120	-3.923	-3.949	-3.975	-4.000	-4.026	-4.052	-4.077	-4.102	-4.127	-4.152	-4.177
-110	-3.657	-3.684	-3.711	-3.738	-3.765	-3.791	-3.818	-3.844	-3.871	-3.897	-3.923
-100	-3.379	-3.407	-3.435	-3.463	-3.491	-3.519	-3.547	-3.574	-3.602	-3.629	-3.657
-90	-3.089	-3.118	-3.148	-3.177	-3.206	-3.235	-3.264	-3.293	-3.322	-3.350	-3.379
-80	-2.788	-2.818	-2.849	-2.879	-2.910	-2.940	-2.970	-3.000	-3.030	-3.059	-3.089
-70	-2.476	-2.507	-2.539	-2.571	-2.602	-2.633	-2.664	-2.695	-2.726	-2.757	-2.788
-60	-2.153	-2.186	-2.218	-2.251	-2.283	-2.316	-2.348	-2.380	-2.412	-2.444	-2.476
-50	-1.819	-1.853	-1.887	-1.920	-1.954	-1.987	-2.021	-2.054	-2.087	-2.120	-2.153
-40	-1.475	-1.510	-1.545	-1.579	-1.614	-1.648	-1.683	-1.717	-1.751	-1.785	-1.819
-30	-1.121	-1.157	-1.192	-1.228	-1.264	-1.299	-1.335	-1.370	-1.405	-1.440	-1.475
-20	-0.757	-0.794	-0.830	-0.867	-0.904	-0.940	-0.976	-1.013	-1.049	-1.085	-1.121
-10	-0.383	-0.421	-0.459	-0.496	-0.534	-0.571	-0.608	-0.646	-0.683	-0.720	-0.757
0	0.000	-0.039	-0.077	-0.116	-0.154	-0.193	-0.231	-0.269	-0.307	-0.345	-0.383
0	0.000	0.039	0.078	0.117	0.156	0.195	0.234	0.273	0.312	0.352	0.391
10	0.391	0.431	0.470	0.510	0.549	0.589	0.629	0.669	0.709	0.749	0.790
20	0.790	0.830	0.870	0.911	0.951	0.992	1.033	1.074	1.114	1.155	1.196
30	1.196	1.238	1.279	1.320	1.362	1.403	1.445	1.486	1.528	1.570	1.612
40	1.612	1.654	1.696	1.738	1.780	1.823	1.865	1.908	1.950	1.993	2.036
50	2.036	2.079	2.122	2.165	2.208	2.251	2.294	2.338	2.381	2.425	2.468
60	2.468	2.512	2.556	2.600	2.643	2.687	2.732	2.776	2.820	2.864	2.909
70	2.909	2.953	2.998	3.043	3.087	3.132	3.177	3.222	3.267	3.312	3.358
80	3.358	3.403	3.448	3.494	3.539	3.585	3.631	3.677	3.722	3.768	3.814
90	3.814	3.860	3.907	3.953	3.999	4.046	4.092	4.138	4.185	4.232	4.279
100	4.279	4.325	4.372	4.419	4.466	4.513	4.561	4.608	4.655	4.702	4.750
110	4.750	4.798	4.845	4.893	4.941	4.988	5.036	5.084	5.132	5.180	5.228
120	5.228	5.277	5.325	5.373	5.422	5.470	5.519	5.567	5.616	5.665	5.714
130	5.714	5.763	5.812	5.861	5.910	5.959	6.008	6.057	6.107	6.156	6.206
140	6.206	6.255	6.305	6.355	6.404	6.454	6.504	6.554	6.604	6.654	6.704
150	6.704	6.754	6.805	6.855	6.905	6.956	7.006	7.057	7.107	7.158	7.209
160	7.209	7.260	7.310	7.361	7.412	7.463	7.515	7.566	7.617	7.668	7.720
170	7.720	7.771	7.823	7.874	7.925	7.977	8.029	8.081	8.133	8.185	8.237
180	8.237	8.289	8.341	8.393	8.445	8.497	8.550	8.602	8.654	8.707	8.759
190	8.759	8.812	8.865	8.917	8.970	9.023	9.076	9.129	9.182	9.235	9.288

Continuación del cuadro 3

200	9.288	9.341	9.395	9.448	9.501	9.555	9.608	9.662	9.715	9.769	9.822	200
210	9.822	9.876	9.930	9.984	10.038	10.092	10.146	10.200	10.254	10.308	10.362	210
220	10.362	10.417	10.471	10.525	10.580	10.634	10.689	10.743	10.798	10.853	10.907	220
230	10.907	10.962	11.017	11.072	11.127	11.182	11.237	11.292	11.347	11.403	11.458	230
240	11.458	11.513	11.569	11.624	11.680	11.735	11.791	11.846	11.902	11.958	12.013	240
250	12.013	12.069	12.125	12.181	12.237	12.293	12.349	12.405	12.461	12.518	12.574	250
260	12.574	12.630	12.687	12.743	12.799	12.856	12.912	12.969	13.026	13.082	13.139	260
270	13.139	13.196	13.253	13.310	13.368	13.423	13.480	13.537	13.595	13.652	13.709	270
280	13.709	13.766	13.823	13.881	13.938	13.995	14.053	14.110	14.168	14.226	14.283	280
290	14.283	14.341	14.399	14.456	14.514	14.572	14.630	14.688	14.746	14.804	14.862	290
300	14.862	14.920	14.978	15.036	15.095	15.153	15.211	15.270	15.328	15.386	15.445	300
310	15.445	15.503	15.562	15.621	15.679	15.738	15.797	15.856	15.914	15.973	16.032	310
320	16.032	16.091	16.150	16.209	16.268	16.327	16.387	16.446	16.505	16.564	16.624	320
330	16.624	16.683	16.742	16.802	16.861	16.921	16.980	17.040	17.100	17.159	17.219	330
340	17.219	17.279	17.339	17.399	17.458	17.518	17.578	17.638	17.698	17.759	17.819	340
350	17.819	17.879	17.939	17.999	18.060	18.120	18.180	18.241	18.301	18.362	18.422	350
360	18.422	18.483	18.543	18.604	18.665	18.725	18.786	18.847	18.908	18.969	19.030	360
370	19.030	19.091	19.152	19.213	19.274	19.335	19.396	19.457	19.518	19.579	19.641	370
380	19.641	19.702	19.763	19.825	19.886	19.947	20.009	20.070	20.132	20.193	20.255	380
390	20.255	20.317	20.378	20.440	20.502	20.563	20.625	20.687	20.748	20.810	20.872	390
400	20.872											400

FOR AUTHOR USE ONLY

**Tabla 4.**

Dependencia de la FEM de un termopar diferencial c platino-30% rodio/platino-6% rodio (**Tipo B**) de la temperatura de la unión de trabajo (tabla de calibración).

Gama de temperaturas de 0 °C a 1820 °C.

t, °C	EMF, mV										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
0	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002	-0.002
10	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.003	-0.003
20	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002
30	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.000
40	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002
50	0.002	0.003	0.003	0.003	0.004	0.004	0.004	0.005	0.005	0.006	0.006
60	0.006	0.007	0.007	0.008	0.008	0.009	0.009	0.010	0.010	0.011	0.011
70	0.011	0.012	0.012	0.013	0.014	0.014	0.015	0.015	0.016	0.017	0.017
80	0.017	0.018	0.019	0.020	0.020	0.021	0.022	0.022	0.023	0.024	0.025
90	0.025	0.026	0.026	0.027	0.028	0.029	0.030	0.031	0.031	0.032	0.033
100	0.033	0.034	0.035	0.036	0.037	0.038	0.039	0.040	0.041	0.042	0.043
110	0.043	0.044	0.045	0.046	0.047	0.048	0.049	0.050	0.051	0.052	0.053
120	0.053	0.055	0.056	0.057	0.058	0.059	0.060	0.062	0.063	0.064	0.065
130	0.065	0.066	0.068	0.069	0.070	0.072	0.073	0.074	0.075	0.077	0.078
140	0.078	0.079	0.081	0.082	0.084	0.085	0.086	0.088	0.089	0.091	0.092
150	0.092	0.094	0.095	0.096	0.098	0.099	0.101	0.102	0.104	0.106	0.107
160	0.107	0.109	0.110	0.112	0.113	0.115	0.117	0.118	0.120	0.122	0.123
170	0.123	0.125	0.127	0.128	0.130	0.132	0.134	0.135	0.137	0.139	0.141
180	0.141	0.142	0.144	0.146	0.148	0.150	0.151	0.153	0.155	0.157	0.159
190	0.159	0.161	0.163	0.165	0.166	0.168	0.170	0.172	0.174	0.176	0.178
200	0.178	0.180	0.182	0.184	0.186	0.188	0.190	0.192	0.195	0.197	0.199
210	0.199	0.201	0.203	0.205	0.207	0.209	0.212	0.214	0.216	0.218	0.220
220	0.220	0.222	0.225	0.227	0.229	0.231	0.234	0.236	0.238	0.241	0.243
230	0.243	0.245	0.248	0.250	0.252	0.255	0.257	0.259	0.262	0.264	0.267
240	0.267	0.269	0.271	0.274	0.276	0.279	0.281	0.284	0.286	0.289	0.291
250	0.291	0.294	0.296	0.299	0.301	0.304	0.307	0.309	0.312	0.314	0.317
260	0.317	0.320	0.322	0.325	0.328	0.330	0.333	0.336	0.338	0.341	0.344
270	0.344	0.347	0.349	0.352	0.355	0.358	0.360	0.363	0.366	0.369	0.372
280	0.372	0.375	0.377	0.380	0.383	0.386	0.389	0.392	0.395	0.398	0.401
290	0.401	0.404	0.407	0.410	0.413	0.416	0.419	0.422	0.425	0.428	0.431
300	0.431	0.434	0.437	0.440	0.443	0.446	0.449	0.452	0.455	0.458	0.462
310	0.462	0.465	0.468	0.471	0.474	0.478	0.481	0.484	0.487	0.490	0.494
320	0.494	0.497	0.500	0.503	0.507	0.510	0.513	0.517	0.520	0.523	0.527
330	0.527	0.530	0.533	0.537	0.540	0.544	0.547	0.550	0.554	0.557	0.561
340	0.561	0.564	0.568	0.571	0.575	0.578	0.582	0.585	0.589	0.592	0.596
350	0.596	0.599	0.603	0.607	0.610	0.614	0.617	0.621	0.625	0.628	0.632
360	0.632	0.636	0.639	0.643	0.647	0.650	0.654	0.658	0.662	0.665	0.669
370	0.669	0.673	0.677	0.680	0.684	0.688	0.692	0.696	0.700	0.703	0.707
380	0.707	0.711	0.715	0.719	0.723	0.727	0.731	0.735	0.738	0.742	0.746
390	0.746	0.750	0.754	0.758	0.762	0.766	0.770	0.774	0.778	0.782	0.787
400	0.787	0.791	0.795	0.799	0.803	0.807	0.811	0.815	0.819	0.824	0.828
410	0.828	0.832	0.836	0.840	0.844	0.849	0.853	0.857	0.861	0.865	0.870
420	0.870	0.874	0.878	0.883	0.887	0.891	0.896	0.900	0.904	0.909	0.913
430	0.913	0.917	0.922	0.926	0.930	0.935	0.939	0.944	0.948	0.953	0.957
440	0.957	0.961	0.966	0.970	0.975	0.979	0.984	0.988	0.993	0.997	1.002
450	1.002	1.007	1.011	1.016	1.020	1.025	1.030	1.034	1.039	1.043	1.048
460	1.048	1.053	1.057	1.062	1.067	1.071	1.076	1.081	1.086	1.090	1.095
470	1.095	1.100	1.105	1.109	1.114	1.119	1.124	1.129	1.133	1.138	1.143
480	1.143	1.148	1.153	1.158	1.163	1.167	1.172	1.177	1.182	1.187	1.192
490	1.192	1.197	1.202	1.207	1.212	1.217	1.222	1.227	1.232	1.237	1.242

Continuación del cuadro 4

500	1.242	1.247	1.252	1.257	1.262	1.267	1.272	1.277	1.282	1.288	1.293	500
510	1.293	1.298	1.303	1.308	1.313	1.318	1.324	1.329	1.334	1.339	1.344	510
520	1.344	1.350	1.355	1.360	1.365	1.371	1.376	1.381	1.387	1.392	1.397	520
530	1.397	1.402	1.408	1.413	1.418	1.424	1.429	1.435	1.440	1.445	1.451	530
540	1.451	1.456	1.462	1.467	1.472	1.478	1.483	1.489	1.494	1.500	1.505	540
550	1.505	1.511	1.516	1.522	1.527	1.533	1.539	1.544	1.550	1.555	1.561	550
560	1.561	1.568	1.572	1.578	1.583	1.589	1.595	1.600	1.606	1.612	1.617	560
570	1.617	1.623	1.629	1.634	1.640	1.646	1.652	1.657	1.663	1.669	1.675	570
580	1.675	1.680	1.686	1.692	1.698	1.704	1.709	1.715	1.721	1.727	1.733	580
590	1.733	1.739	1.745	1.750	1.756	1.762	1.768	1.774	1.780	1.786	1.792	590
600	1.792	1.798	1.804	1.810	1.816	1.822	1.828	1.834	1.840	1.846	1.852	600
610	1.852	1.858	1.864	1.870	1.876	1.882	1.888	1.894	1.901	1.907	1.913	610
620	1.913	1.919	1.925	1.931	1.937	1.944	1.950	1.956	1.962	1.968	1.975	620
630	1.975	1.981	1.987	1.993	1.999	2.006	2.012	2.018	2.025	2.031	2.037	630
640	2.037	2.043	2.050	2.056	2.062	2.069	2.075	2.082	2.088	2.094	2.101	640
650	2.101	2.107	2.113	2.120	2.126	2.133	2.139	2.146	2.152	2.158	2.165	650
660	2.165	2.171	2.178	2.184	2.191	2.197	2.204	2.210	2.217	2.224	2.230	660
670	2.230	2.237	2.243	2.250	2.256	2.263	2.270	2.276	2.283	2.289	2.296	670
680	2.296	2.303	2.309	2.316	2.323	2.329	2.336	2.343	2.350	2.356	2.363	680
690	2.363	2.370	2.376	2.383	2.390	2.397	2.403	2.410	2.417	2.424	2.431	690
700	2.431	2.437	2.444	2.451	2.458	2.465	2.472	2.479	2.485	2.492	2.499	700
710	2.499	2.506	2.513	2.520	2.527	2.534	2.541	2.548	2.555	2.562	2.569	710
720	2.569	2.576	2.583	2.590	2.597	2.604	2.611	2.618	2.625	2.632	2.639	720
730	2.639	2.646	2.653	2.660	2.667	2.674	2.681	2.688	2.695	2.703	2.710	730
740	2.710	2.717	2.724	2.731	2.738	2.746	2.753	2.760	2.767	2.775	2.782	740
750	2.782	2.789	2.796	2.803	2.811	2.818	2.825	2.833	2.840	2.847	2.854	750
760	2.854	2.862	2.869	2.876	2.884	2.891	2.898	2.906	2.913	2.921	2.928	760
770	2.928	2.935	2.943	2.950	2.958	2.966	2.973	2.980	2.987	2.995	3.002	770
780	3.002	3.010	3.017	3.025	3.032	3.040	3.047	3.055	3.062	3.070	3.078	780
790	3.078	3.085	3.093	3.100	3.108	3.116	3.123	-3.131	3.138	3.146	3.154	790
800	3.154	3.161	3.169	3.177	3.184	3.192	3.200	3.207	3.215	3.223	3.230	800
810	3.230	3.238	3.246	3.254	3.261	3.269	3.277	3.285	3.292	3.300	3.308	810
820	3.308	3.316	3.324	3.331	3.339	3.347	3.355	3.363	3.371	3.379	3.388	820
830	3.388	3.394	3.402	3.410	3.418	3.426	3.434	3.442	3.450	3.458	3.466	830
840	3.466	3.474	3.482	3.490	3.498	3.506	3.514	3.522	3.530	3.538	3.546	840
850	3.546	3.554	3.562	3.570	3.578	3.586	3.594	3.602	3.610	3.618	3.626	850
860	3.626	3.634	3.643	3.651	3.659	3.667	3.675	3.683	3.692	3.700	3.708	860
870	3.708	3.716	3.724	3.732	3.741	3.749	3.757	3.765	3.774	3.782	3.790	870
880	3.790	3.798	3.807	3.815	3.823	3.832	3.840	3.848	3.857	3.865	3.873	880
890	3.873	3.882	3.890	3.898	3.907	3.915	3.923	3.932	3.940	3.949	3.957	890
900	3.957	3.965	3.974	3.982	3.991	3.999	4.008	4.016	4.024	4.033	4.041	900
910	4.041	4.050	4.058	4.067	4.075	4.084	4.093	4.101	4.110	4.118	4.127	910
920	4.127	4.135	4.144	4.152	4.161	4.170	4.178	4.187	4.195	4.204	4.213	920
930	4.213	4.221	4.230	4.239	4.247	4.256	4.265	4.273	4.282	4.291	4.299	930
940	4.299	4.308	4.317	4.326	4.334	4.343	4.352	4.360	4.369	4.378	4.387	940
950	4.387	4.396	4.404	4.413	4.422	4.431	4.440	4.448	4.457	4.466	4.475	950
960	4.475	4.484	4.493	4.501	4.510	4.519	4.528	4.537	4.546	4.555	4.564	960
970	4.564	4.573	4.582	4.591	4.599	4.608	4.617	4.626	4.635	4.644	4.653	970
980	4.653	4.662	4.671	4.680	4.689	4.698	4.707	4.716	4.725	4.734	4.743	980
990	4.743	4.753	4.762	4.771	4.780	4.789	4.798	4.807	4.816	4.825	4.834	990

Continuación del cuadro 4

1000	4.834	4.843	4.853	4.862	4.871	4.880	4.889	4.898	4.908	4.917	4.928
1010	4.926	4.935	4.944	4.954	4.963	4.972	4.981	4.990	5.000	5.009	5.018
1020	5.018	5.027	5.037	5.046	5.056	5.065	5.074	5.083	5.092	5.102	5.111
1030	5.111	5.120	5.130	5.139	5.148	5.158	5.167	5.176	5.186	5.195	5.205
1040	5.205	5.214	5.223	5.233	5.242	5.252	5.261	5.270	5.280	5.289	5.299
1050	5.299	5.308	5.318	5.327	5.337	5.346	5.356	5.365	5.375	5.384	5.394
1060	5.394	5.403	5.413	5.422	5.432	5.441	5.451	5.460	5.470	5.480	5.489
1070	5.489	5.499	5.508	5.518	5.528	5.537	5.547	5.556	5.566	5.576	5.585
1080	5.585	5.595	5.605	5.614	5.624	5.634	5.643	5.653	5.663	5.672	5.682
1090	5.682	5.692	5.702	5.711	5.721	5.731	5.740	5.750	5.760	5.770	5.780
1100	5.780	5.789	5.799	5.809	5.819	5.828	5.838	5.848	5.858	5.868	5.878
1110	5.878	5.887	5.897	5.907	5.917	5.927	5.937	5.947	5.956	5.966	5.976
1120	5.976	5.986	5.996	6.006	6.016	6.026	6.036	6.046	6.056	6.066	6.076
1130	6.075	6.085	6.095	6.105	6.115	6.125	6.135	6.145	6.155	6.165	6.175
1140	6.175	6.185	6.195	6.205	6.215	6.225	6.235	6.245	6.255	6.266	6.276
1150	6.276	6.286	6.296	6.306	6.316	6.326	6.336	6.346	6.356	6.367	6.377
1160	6.377	6.387	6.397	6.407	6.417	6.427	6.438	6.448	6.458	6.468	6.478
1170	6.478	6.488	6.499	6.509	6.519	6.529	6.539	6.550	6.560	6.570	6.580
1180	6.580	6.591	6.601	6.611	6.621	6.632	6.642	6.652	6.663	6.673	6.683
1190	6.683	6.693	6.704	6.714	6.724	6.735	6.745	6.756	6.766	6.776	6.786
1200	6.786	6.797	6.807	6.818	6.828	6.838	6.849	6.859	6.869	6.880	6.890
1210	6.890	6.901	6.911	6.922	6.932	6.942	6.953	6.963	6.974	6.984	6.995
1220	6.995	7.005	7.016	7.026	7.037	7.047	7.058	7.068	7.079	7.089	7.100
1230	7.100	7.110	7.121	7.131	7.142	7.152	7.163	7.173	7.184	7.194	7.205
1240	7.205	7.216	7.226	7.237	7.247	7.258	7.269	7.279	7.290	7.300	7.311
1250	7.311	7.322	7.332	7.343	7.353	7.364	7.375	7.385	7.396	7.407	7.417
1260	7.417	7.428	7.439	7.449	7.460	7.471	7.482	7.492	7.503	7.514	7.524
1270	7.524	7.535	7.546	7.557	7.567	7.578	7.589	7.600	7.610	7.621	7.632
1280	7.632	7.643	7.653	7.664	7.675	7.686	7.697	7.707	7.718	7.729	7.740
1290	7.740	7.751	7.761	7.772	7.783	7.794	7.805	7.816	7.827	7.837	7.848
1300	7.848	7.859	7.870	7.881	7.892	7.903	7.914	7.924	7.935	7.946	7.957
1310	7.957	7.968	7.979	7.990	8.001	8.012	8.023	8.034	8.045	8.056	8.066
1320	8.066	8.077	8.088	8.099	8.110	8.121	8.132	8.143	8.154	8.165	8.176
1330	8.176	8.187	8.198	8.209	8.220	8.231	8.242	8.253	8.264	8.275	8.286
1340	8.286	8.298	8.309	8.320	8.331	8.342	8.353	8.364	8.375	8.386	8.397
1350	8.397	8.408	8.419	8.430	8.441	8.453	8.464	8.475	8.486	8.497	8.508
1360	8.508	8.519	8.530	8.542	8.553	8.564	8.575	8.586	8.597	8.608	8.620
1370	8.620	8.631	8.642	8.653	8.664	8.675	8.687	8.698	8.709	8.720	8.731
1380	8.731	8.743	8.754	8.765	8.776	8.787	8.799	8.810	8.821	8.832	8.844
1390	8.844	8.856	8.866	8.877	8.889	8.900	8.911	8.922	8.934	8.946	8.956
1400	8.956	8.967	8.979	8.990	9.001	9.013	9.024	9.035	9.047	9.058	9.069
1410	9.069	9.080	9.092	9.103	9.114	9.126	9.137	9.148	9.160	9.171	9.182
1420	9.182	9.194	9.205	9.216	9.228	9.239	9.251	9.262	9.273	9.285	9.296
1430	9.296	9.307	9.319	9.330	9.342	9.353	9.364	9.376	9.387	9.398	9.410
1440	9.410	9.421	9.433	9.444	9.456	9.467	9.478	9.490	9.501	9.513	9.524
1450	9.524	9.536	9.547	9.558	9.570	9.581	9.593	9.604	9.616	9.627	9.639
1460	9.639	9.650	9.662	9.673	9.684	9.696	9.707	9.719	9.730	9.742	9.753
1470	9.753	9.765	9.776	9.788	9.799	9.811	9.822	9.834	9.845	9.857	9.868
1480	9.868	9.880	9.891	9.903	9.914	9.926	9.937	9.949	9.961	9.972	9.984
1490	9.984	9.995	10.007	10.018	10.030	10.041	10.053	10.064	10.076	10.088	10.099

1500	10.099	10.111	10.122	10.134	10.145	10.157	10.168	10.180	10.192	10.203	10.215	1500
1510	10.215	10.226	10.238	10.249	10.261	10.273	10.284	10.296	10.307	10.319	10.331	1510
1520	10.331	10.342	10.354	10.365	10.377	10.389	10.400	10.412	10.423	10.435	10.447	1520
1530	10.447	10.458	10.470	10.482	10.493	10.505	10.516	10.528	10.540	10.551	10.563	1530
1540	10.563	10.575	10.586	10.598	10.609	10.621	10.633	10.644	10.656	10.668	10.679	1540
1550	10.679	10.691	10.703	10.714	10.726	10.738	10.749	10.761	10.773	10.784	10.796	1550
1560	10.796	10.808	10.819	10.831	10.843	10.854	10.866	10.877	10.889	10.901	10.913	1560
1570	10.913	10.924	10.936	10.948	10.959	10.971	10.983	10.994	11.006	11.018	11.029	1570
1580	11.029	11.041	11.053	11.064	11.076	11.088	11.099	11.111	11.123	11.134	11.146	1580
1590	11.146	11.158	11.169	11.181	11.193	11.205	11.216	11.228	11.240	11.251	11.263	1590
1600	11.263	11.275	11.286	11.298	11.310	11.321	11.333	11.345	11.357	11.368	11.380	1600
1610	11.380	11.392	11.403	11.415	11.427	11.438	11.450	11.462	11.474	11.485	11.497	1610
1620	11.497	11.509	11.520	11.532	11.544	11.555	11.567	11.579	11.591	11.602	11.614	1620
1630	11.614	11.626	11.637	11.649	11.661	11.673	11.684	11.696	11.708	11.719	11.731	1630
1640	11.731	11.743	11.754	11.766	11.778	11.790	11.801	11.813	11.825	11.836	11.848	1640
1650	11.848	11.860	11.871	11.883	11.895	11.907	11.918	11.930	11.942	11.953	11.965	1650
1660	11.965	11.977	11.988	12.000	12.012	12.024	12.035	12.047	12.059	12.070	12.082	1660
1670	12.082	12.094	12.105	12.117	12.129	12.141	12.152	12.164	12.176	12.187	12.199	1670
1680	12.199	12.211	12.222	12.234	12.246	12.257	12.269	12.281	12.292	12.304	12.316	1680
1690	12.316	12.327	12.339	12.351	12.363	12.374	12.386	12.398	12.409	12.421	12.433	1690
1700	12.433	12.444	12.456	12.468	12.479	12.491	12.503	12.514	12.526	12.538	12.549	1700
1710	12.549	12.561	12.572	12.584	12.596	12.607	12.619	12.631	12.642	12.654	12.666	1710
1720	12.666	12.677	12.689	12.701	12.712	12.724	12.736	12.747	12.759	12.770	12.782	1720
1730	12.782	12.794	12.805	12.817	12.829	12.840	12.852	12.863	12.875	12.887	12.898	1730
1740	12.898	12.910	12.921	12.933	12.945	12.956	12.968	12.980	12.991	13.003	13.014	1740
1750	13.014	13.026	13.037	13.049	13.061	13.072	13.084	13.095	13.107	13.119	13.130	1750
1760	13.130	13.142	13.153	13.165	13.176	13.188	13.200	13.211	13.223	13.234	13.246	1760
1770	13.246	13.257	13.269	13.280	13.292	13.304	13.315	13.327	13.338	13.350	13.361	1770
1780	13.361	13.373	13.384	13.396	13.407	13.419	13.430	13.442	13.453	13.465	13.476	1780
1790	13.476	13.488	13.499	13.511	13.522	13.534	13.545	13.557	13.568	13.580	13.591	1790
1800	13.591	13.603	13.614	13.626	13.637	13.649	13.660	13.672	13.683	13.694	13.706	1800
1810	13.706	13.717	13.729	13.740	13.752	13.763	13.775	13.786	13.797	13.809	13.820	1810
1820	13.820											1820

FOR AUTHOR USE ONLY

**More  
Books!**



yes  
**I want morebooks!**

Buy your books fast and straightforward online - at one of world's fastest growing online book stores! Environmentally sound due to Print-on-Demand technologies.

Buy your books online at  
**[www.morebooks.shop](http://www.morebooks.shop)**

¡Compre sus libros rápido y directo en internet, en una de las librerías en línea con mayor crecimiento en el mundo! Producción que protege el medio ambiente a través de las tecnologías de impresión bajo demanda.

Compre sus libros online en  
**[www.morebooks.shop](http://www.morebooks.shop)**



[info@omniscryptum.com](mailto:info@omniscryptum.com)  
[www.omniscryptum.com](http://www.omniscryptum.com)

OMNIScriptum

