

MATERIALI ELETTROTECNICI

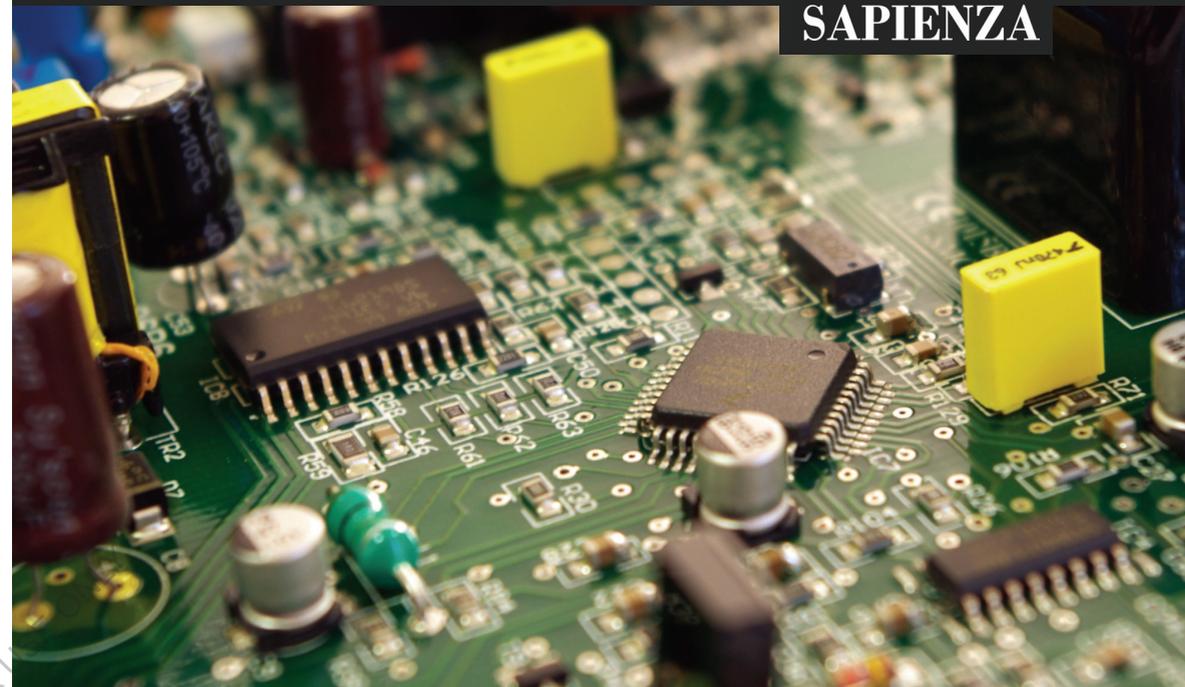
Vengono delineate le questioni relative alla struttura e alle proprietà dei materiali utilizzati nelle apparecchiature elettriche ed elettroniche. Vengono considerati gli effetti e i fenomeni elettrofisici nei conduttori, nei dielettrici, nei semiconduttori e nei materiali magnetici. Una notevole attenzione è dedicata agli effetti cinetici nei semiconduttori, alle proprietà dei materiali semiconduttori di base, ai metalli e ai nanomateriali. Vengono forniti esempi di applicazione pratica dei materiali considerati.

Per gli studenti delle università tecniche specializzate in ingegneria elettrica, ingegneria elettronica, ingegneria dell'automazione e radio.

Mykola Gorbachuk ha conseguito un dottorato di ricerca in fisica e matematica con una specializzazione in fisica dei semiconduttori e dielettrica. Lavora presso il Dipartimento di Fisica Applicata e Matematica Superiore presso l'Università Nazionale di Tecnologia e Design di Kiev, Ucraina.



Mykola Gorbachuk



MATERIALI ELETTROTECNICI

Tutorial

Mykola Gorbachuk

Mykola Gorbachuk

MATERIALI ELETTRTECNICI

FOR AUTHOR USE ONLY

Mykola Gorbachuk

MATERIALI ELETTROTECNICI

Tutorial

FOR AUTHOR USE ONLY

ScienziaScripts

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

This book is a translation from the original published under ISBN 978-620-3-46212-8.

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: 978-620-7-18622-8

Copyright © Mykola Gorbachuk

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

FOR AUTHOR USE ONLY

Introduzione

Materiali elettrotecnici: stato attuale, prospettive di sviluppo

Il progresso scientifico e tecnologico moderno è strettamente legato allo sviluppo e alla padronanza di nuovi materiali. I materiali sono diventati un anello fondamentale che determina il successo di molte soluzioni ingegneristiche nella creazione di apparecchiature elettriche e dispositivi elettronici. Pertanto, lo studio dei materiali occupa un posto di rilievo.

Lo sviluppo intensivo della scienza e della tecnologia è impossibile senza risolvere il problema del miglioramento della qualità e dell'economicità dei materiali, la base materiale di qualsiasi prodotto. I nuovi materiali appaiono come risultato di uno studio preliminare e approfondito delle proprietà economiche, funzionali e di consumo di varie sostanze, nonché della tecnologia della loro produzione e lavorazione.

La pratica propone costantemente requisiti diversi e sempre più severi per le proprietà e la combinazione di proprietà dei materiali. Di conseguenza, il numero e la gamma dei materiali sono in continua crescita. Oggi, il numero di materiali utilizzati in elettrotecnica per vari scopi è di decine di migliaia.

Capitolo 1. Informazioni generali sui materiali elettrici

1.1. Classificazione dei materiali elettrici

I materiali elettrici sono materiali caratterizzati da determinate proprietà in relazione al campo elettromagnetico e utilizzati nella tecnologia basata su tali proprietà. Le diverse proprietà dei materiali sono influenzate dai campi elettrici o magnetici separatamente o in combinazione.

In base al loro comportamento in un campo magnetico, i materiali elettrici si dividono in fortemente magnetici (magneti) e debolmente magnetici. I primi sono particolarmente utilizzati in ingegneria grazie alle loro proprietà magnetiche.

In base al loro comportamento in un campo elettrico, i materiali si dividono in conduttori, semiconduttori e dielettrici. La maggior parte dei materiali elettrici può essere classificata come debolmente magnetica o praticamente non magnetica. Tuttavia, anche tra i magneti, occorre distinguere tra conduttori, semiconduttori e praticamente non conduttori.

I conduttori sono materiali la cui principale proprietà elettrica è una forte conducibilità elettrica. Il loro utilizzo in ambito tecnologico è dovuto principalmente a questa proprietà, che determina l'elevata conducibilità elettrica specifica a temperatura normale. I semiconduttori sono materiali che si collocano tra i conduttori e i dielettrici in termini di conduttività. I dielettrici sono materiali la cui principale proprietà elettrica è la capacità di polarizzarsi e in cui può esistere un campo elettrostatico. Convenzionalmente, i materiali con una resistività di $\rho < 10^{-5}$ Ohm·m sono considerati conduttori, mentre i materiali con una resistività di $\rho > 10^8$ Ohm·m sono considerati dielettrici. A seconda della struttura e della composizione dei materiali, nonché delle condizioni operative, la resistività dei semiconduttori può variare nell'intervallo 10^{-5} - 10^8 Ohm·m. I metalli sono buoni conduttori di corrente elettrica. È difficile tracciare una linea netta tra i valori di resistività dei diversi materiali. Ad esempio, molti semiconduttori si comportano come dielettrici a basse temperature. Allo stesso tempo, i dielettrici possono mostrare le proprietà dei semiconduttori quando vengono riscaldati ad alte temperature. La differenza qualitativa è che per i metalli lo stato di conduzione è lo stato fondamentale, mentre per i semiconduttori e i dielettrici è lo stato eccitato.

Dal punto di vista della teoria delle bande, i metalli sono considerati materiali senza band gap ($E_g = 0$), i semiconduttori con $E_g = 0-2$ eV e i dielettrici con $E_g \geq 2$ eV.

Un dielettrico reale è tanto più vicino al dielettrico ideale quanto più bassa è la sua conducibilità specifica e quanto meno pronunciati sono i

meccanismi di polarizzazione lenta associati alla dissipazione di energia elettrica e alla generazione di calore.

Le proprietà passive e attive dei materiali dielettrici sono utilizzate nella tecnologia. Le proprietà passive dei materiali dielettrici vengono utilizzate come materiali isolanti elettrici e come dielettrici per i condensatori convenzionali. I materiali isolanti elettrici sono dielettrici che impediscono la dispersione di cariche elettriche, cioè vengono utilizzati per separare i circuiti elettrici tra loro o le parti conduttrici di dispositivi, strumenti e apparecchi dalle parti conduttrici. In questi casi, la costante dielettrica del materiale non svolge un ruolo particolare. Se un materiale viene utilizzato come dielettrico per un condensatore di una certa capacità e di dimensioni ridotte, allora, a parità di altre condizioni, è auspicabile che questo materiale abbia una costante dielettrica elevata.

I dielettrici attivi comprendono i ferroelettrici, i piezoelettrici, i piroelettrici, gli elettroluminescenti, i materiali per emettitori e gate nella tecnologia laser e gli elettretti.

Lo sviluppo della radiotecnica ha portato alla creazione di materiali che combinano specifiche proprietà ad alta frequenza con i parametri fisici e meccanici richiesti. Tali materiali sono chiamati materiali ad alta frequenza.

Per comprendere le proprietà elettriche, magnetiche e meccaniche dei materiali, nonché le cause dell'invecchiamento, è necessaria la conoscenza della loro composizione chimica e di fase, della struttura atomica e dei difetti strutturali.

1.2. Tipi di legami chimici nelle sostanze

Una molecola è una particella elementare che possiede le proprietà di una o di un'altra sostanza. Una molecola è composta da atomi. A loro volta, le principali particelle elementari da cui sono costruite tutte le sostanze conosciute (le loro molecole, gli atomi) sono protoni, neutroni ed elettroni. I protoni e i neutroni costituiscono i nuclei atomici; gli elettroni riempiono i gusci dell'atomo, compensando la carica positiva del nucleo.

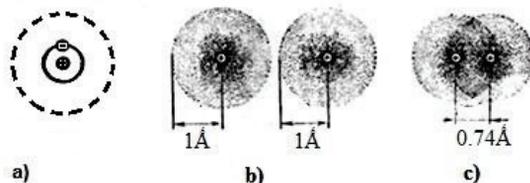


Fig. 1.1. Struttura dell'atomo di idrogeno e della molecola H_2 .

Ad esempio, un atomo di idrogeno è costituito da un protone e da un elettrone. In un semplice modello planetario dell'atomo, questo elettrone orbita intorno al nucleo dell'atomo (fig. 1.1, a). Nella meccanica

quantistica, il moto dell'elettrone è descritto da una funzione d'onda che ha simmetria sferica in un atomo di idrogeno isolato, per cui la carica dell'elettrone è distribuita, formando una nuvola sfocata (fig. 1.1, b).

Esistono diversi tipi di legami chimici tra gli atomi.

Legame **omeopolare (covalente)**. In questo legame, l'unificazione degli atomi in una molecola è ottenuta grazie agli elettroni che diventano comuni alle coppie di atomi. La densità della nube di elettroni con carica negativa tra i nuclei con carica positiva diventa massima.

Un esempio di legame omeopolare o covalente è la molecola H_2 (fig. 1.1, c). La sovrapposizione delle nubi di elettroni, che porta all'affollamento degli elettroni, è accompagnata da una significativa ridistribuzione della densità elettronica e da una variazione dell'energia del sistema. Quando gli elettroni sono socializzati, le nubi di elettroni vengono attratte nello spazio tra i nuclei. L'emergere di uno stato con una maggiore densità di carica elettronica nello spazio inter-nucleare porta alla comparsa di forze attrattive.

Il legame omeopolare si basa su un'interazione di scambio o effetto di scambio causato dallo scambio di elettroni tra atomi e ha una natura puramente quantistica. Le forze di questa interazione sono chiamate forze di scambio e la loro energia è chiamata energia di scambio. La caratteristica più importante delle forze di scambio è la loro forte dipendenza dalla direzione degli spin degli elettroni che creano il legame tra gli atomi interagenti. Il legame sarà forte solo se gli spin sono antiparalleli. I legami omeopolari sono orientati in un certo modo nello spazio e si formano solo tra gli atomi più vicini.

Le molecole con legami omeopolari possono essere rispettivamente non polari o polari (dipolari), con struttura simmetrica o asimmetrica. Le molecole in cui i centri delle cariche positive e negative coincidono sono dette non polari. Se i centri delle cariche di segno opposto non coincidono e si trovano a una certa distanza l'uno dall'altro, tali molecole sono dette polari o dipolari. La figura 1.2 mostra esempi di molecole non polari e polari.

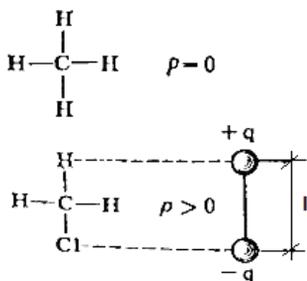


Fig. 1.2. Molecole polari ($p>0$) e non polari ($p=0$) (p è il momento di dipolo).

Il legame omeopolare è tipico delle molecole organiche. Tuttavia, può essere osservato anche nei solidi di origine inorganica, se il loro reticolo cristallino è costituito da atomi. Esempi di tali sostanze sono il diamante, il silicio, il germanio, il carburo di silicio, ecc. La struttura del diamante è illustrata nella Fig. 1.3, che mostra come ogni atomo formi quattro legami con i suoi vicini più prossimi.

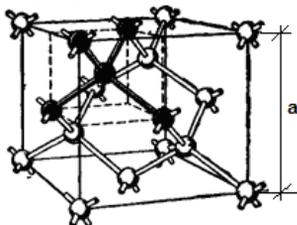


Fig. 1.3. Modello del reticolo del diamante.

Il legame covalente è caratterizzato da un'elevata resistenza. Ciò è confermato dall'elevata durezza e dall'alto punto di fusione di sostanze come il diamante e il carburo di silicio.

Il legame **eteropolare (ionico)** si verifica in seguito al trasferimento di elettroni di valenza da un atomo di metallo a un atomo di metalloide e all'attrazione elettrostatica di ioni di carica diversa tra loro. Questo tipo di legame chimico si realizza nei cristalli ionici. Un tipico esempio di cristalli ionici è rappresentato dai sali di alogenuri dei metalli alcalini. La Fig. 1.4 mostra le strutture dei cristalli di cloruro di sodio e di cloruro di cesio. I reticoli ionici sono caratterizzati da un elevato numero di coordinazione, che indica il numero di ioni più vicini di segno opposto. Ad esempio, per i cristalli di NaCl il numero di coordinazione è 6, mentre per i cristalli di CsCl è 8.

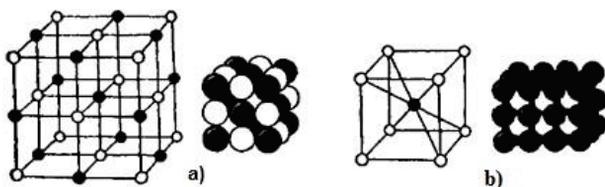


Figura 1.4. Strutture dei cristalli di cloruro di sodio (a) e di cloruro di cesio (b).

La capacità di un atomo di catturare un elettrone quando forma un legame chimico è caratterizzata dalla sua elettronegatività. Una misura approssimativa dell'elettronegatività dell'atomo x è la semisomma dell'energia di ionizzazione E_i e dell'affinità elettronica E_c

$$x = 0,5 (E_i + E_c)$$

Gli atomi dei metalli alcalini hanno l'elettronegatività più bassa, in quanto cedono facilmente un elettrone e hanno una bassa energia di affinità. Al contrario, gli atomi alogeni hanno l'elettronegatività più alta e accettano prontamente un elettrone per completare il guscio elettronico esterno. Maggiore è la differenza di elettronegatività degli atomi coinvolti nella formazione di un legame chimico, maggiore è il grado di ionicità del composto.

Il legame metallico esiste in sistemi costruiti da dorsali atomiche positive in un ambiente di elettroni liberi collettivizzati (fig. 1.5, a). L'attrazione tra i dorsali atomici positivi e gli elettroni determina l'integrità del metallo.

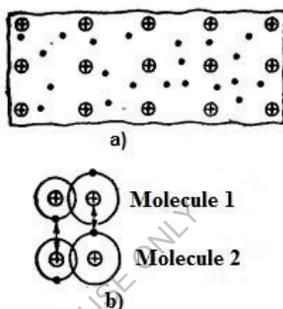


Fig. 1.5. a) legame metallico, b) schema di formazione del legame molecolare.

I legami metallici possono essere considerati in qualche misura come legami covalenti, poiché si basano sulla condivisione di elettroni di valenza esterni. La specificità del legame metallico è che tutti gli atomi del cristallo partecipano alla condivisione degli elettroni e gli elettroni condivisi non sono localizzati vicino ai loro atomi, ma si muovono liberamente all'interno dell'intero reticolo, formando un "gas di elettroni". Non avendo legami localizzati, i cristalli metallici (a differenza di quelli ionici) non collassano quando la posizione dei loro atomi cambia, cioè sono caratterizzati da plasticità (duttilità) sotto deformazione. Grazie alla presenza di elettroni liberi, i metalli hanno un'elevata conducibilità elettrica e termica.

Il legame molecolare, o legame di Van der Waals, si osserva tra le molecole delle sostanze con interazione covalente all'interno delle molecole. In questo caso, la presenza di attrazione intermolecolare è possibile con il movimento coordinato degli elettroni di valenza nelle molecole vicine (fig. 1.5, b). In ogni momento, gli elettroni dovrebbero essere il più lontano possibile l'uno dall'altro e il più vicino possibile alle cariche positive (nuclei). In tal caso, le forze di attrazione degli elettroni

di valenza da parte del nucleo di una molecola vicina sono più forti delle forze di repulsione reciproca degli elettroni dei gusci di queste molecole.

Tale attrazione tra dipoli elettrici fluttuanti è chiamata interazione di dispersione. Il legame di Van der Waals è il più universale, si verifica tra qualsiasi particella, ma è il legame più debole, la sua energia è di circa due ordini di grandezza inferiore all'energia dei legami ionici e covalenti. Poiché l'interazione di dispersione è molto debole, i legami molecolari sono chiaramente visibili solo quando si verificano tra atomi o molecole. I legami molecolari sono facilmente distrutti dal movimento termico. Pertanto, i cristalli molecolari hanno punti di fusione bassi (ad esempio, la paraffina ha un punto di fusione di 50-52° C).

1.3. I cristalli. La struttura del reticolo cristallino. Indici di Miller

Nei cristalli singoli gli atomi sono disposti in modo ordinato. Tale disposizione ordinata degli atomi è chiamata reticolo cristallino. La proprietà più caratteristica del reticolo del cristallo singolo è la simmetria traslazionale. Ogni nodo del reticolo può essere descritto dal vettore \vec{r} .

$$\vec{r} = h\vec{a} + k\vec{b} + l\vec{c} \quad (1.1),$$

dove h, k, l sono numeri interi.

La lunghezza dei vettori $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ dipende dalla struttura del reticolo cristallino. L'area formata dai tre vettori $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ è chiamata cella unitaria. Un cristallo macroscopico è formato dalla ripetizione periodica di numerose celle unitarie. Esistono diversi modi per scegliere le celle unitarie. In base al modo in cui sono disposti i nodi del reticolo cristallino, esistono 14 strutture chiamate reticoli di Bravais. Mentre $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ è la lunghezza dei vettori principali che formano una cella unitaria, i reticoli di Bravais sono classificati in base alla dimensione degli angoli tra questi vettori. La Figura 1.6 mostra due dei più semplici reticoli di Bravais: un reticolo cubico semplice (a) e un reticolo cubico centrato sulla faccia (b):

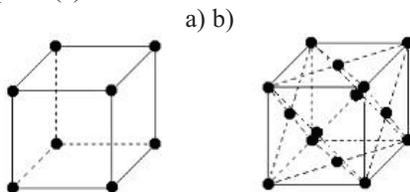


Fig. 1.6. Reticolo coraggioso - cubico semplice (a) e cubico a facce centrate (b).

I principali semiconduttori del 4° gruppo (Si, Ge) del sistema periodico cristallizzano nel cosiddetto reticolo a diamante (fig. 1.3). In

questo caso, i quattro atomi più vicini sono posti alla stessa distanza l'uno dall'altro e formano un tetraedro regolare (fig. 1.7):

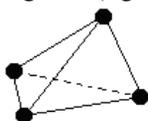


Fig. 1.7. Modello della disposizione degli atomi in un reticolo diamantato.

Poiché i cristalli hanno una struttura periodica, le loro proprietà differiscono per le diverse direzioni e piani cristallografici. Ciò si manifesta nelle proprietà elettriche dei semiconduttori monocristallini, nella loro incisione, epitassia, diffusione, ossidazione, ecc. Per designare le direzioni e i piani cristallografici nei cristalli singoli, si utilizzano gli indici di Miller, definiti come segue (ig. 1.8):

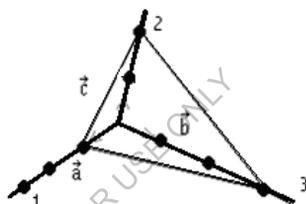


Fig. 1.8. Definizione degli indici di Miller

La posizione di uno degli atomi viene scelta come origine, da cui si tracciano gli assi delle coordinate nelle direzioni dei vettori principali.

I punti di intersezione del piano cristallografico immaginario con questi assi di coordinate sono espressi come numeri interi, prendendo come unità le lunghezze dei vettori principali. Nella figura, questi punti di intersezione sono indicati con i numeri 1, 3 e 2.

L'inverso di questi numeri interi viene moltiplicato per il loro minimo comune denominatore, ottenendo un semplice rapporto di numeri interi.

Se questi numeri sono indicati con h , k , l , la loro espressione tra parentesi (hkl) sarà l'indice di Miller per questo piano. Per la nostra figura otteniamo:

$$\left(\frac{1}{1}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2}\right) \cdot 6 = (623)$$

Per i cristalli (cristalli singoli), ciascuno dei piani, ad esempio (110) , (100) , (111) , in qualsiasi sezione trasversale del cristallo ha le stesse proprietà. La tecnologia di produzione dei dispositivi a semiconduttore, in

particolare le operazioni di incisione, diffusione e ossidazione, ha le sue peculiarità a seconda dell'orientamento. Pertanto, nella produzione di dispositivi a semiconduttore si tiene conto di queste caratteristiche.

1.4. Differenza tra cristalli ideali e reali. Vibrazioni del reticolo e difetti del cristallo

Nei cristalli reali, il reticolo non è perfetto e presenta vari difetti cristallini. Pertanto, in molti casi, le proprietà elettriche e ottiche dei materiali semiconduttori si discostano da quelle calcolate per i cristalli ideali. Nella produzione di dispositivi a semiconduttore, come i transistor, queste deviazioni dal cristallo ideale vengono prese in considerazione e controllate per ottenere le caratteristiche desiderate del dispositivo.

Esistono vari tipi di deviazioni dalla struttura cristallina ideale. Se gli atomi sono collocati nei nodi di un reticolo cristallino ideale, sotto l'influenza dell'energia termica in un certo intervallo di temperatura oscillano rispetto alla posizione di equilibrio stabile. Gli elettroni vengono dispersi da queste vibrazioni termiche. Queste vibrazioni sono chiamate vibrazioni del reticolo o fononi. Se consideriamo le vibrazioni degli atomi di un cristallo come un insieme, allora, a causa della periodicità della struttura cristallina, queste vibrazioni possono essere rappresentate come la sovrapposizione delle vibrazioni di un insieme di oscillatori armonici. Ciascuno di questi oscillatori può essere considerato come una singola quasiparticella chiamata fonone.

Oltre alle vibrazioni del reticolo, i difetti del cristallo comprendono la disposizione non periodica degli atomi in un cristallo - i difetti del reticolo. I difetti puntiformi svolgono un ruolo importante nei meccanismi di conducibilità elettrica dei semiconduttori. I difetti puntiformi possono combinarsi per formare un altro tipo di difetti: le dislocazioni. Oggi sono stati fatti grandi progressi nella produzione di cristalli privi di difetti, in particolare il silicio.

Gli atomi di impurità introdotti in un cristallo semiconduttore determinano il tipo e l'entità della sua conducibilità elettrica e altre proprietà. Controllando l'introduzione di atomi di impurità, si ottengono varie caratteristiche elettrofisiche dei materiali utilizzati per realizzare transistor e circuiti integrati di grandi dimensioni (VLSI).

Se l'atomo di Si nel reticolo cristallino del silicio viene sostituito da un elemento del gruppo V, come il fosforo (P), il guscio esterno dell'atomo di P avrà un elettrone in più che si muoverà liberamente nel cristallo, aumentandone la conducibilità elettrica. Quando un elemento del gruppo III, come il boro (B), viene aggiunto al silicio, manca un elettrone di valenza. Questa mancanza di un elettrone, cioè, dal punto di vista della teoria delle bande, un buco situato vicino al soffitto della banda di valenza e che può muoversi liberamente attraverso il cristallo, influisce anche sulla sua conducibilità elettrica.

Nel primo caso, la conducibilità elettrica è determinata dagli elettroni - particelle che portano una carica negativa; tali semiconduttori sono chiamati semiconduttori di tipo n, e gli atomi della miscela che forniscono al cristallo elettroni extra sono chiamati donatori.

Nel secondo caso, la conducibilità elettrica dei semiconduttori è determinata da buchi che portano una carica positiva e sono chiamati semiconduttori di tipo p, mentre gli atomi di impurità che forniscono i buchi sono chiamati accettori.

In un semiconduttore come il GaAs, ad esempio, i donatori sono elementi del gruppo VI, come lo zolfo (S) e il tellurio (Te), e gli accettori sono elementi del gruppo II, come il berillio (Be) e lo zinco (Zn).

1.5. Struttura delle zone energetiche

È noto che gli elettroni hanno proprietà ondulatorie. La teoria che descrive queste proprietà è stata sviluppata nella meccanica ondulatoria di Schrödinger. In questa teoria, la funzione d'onda ψ è utilizzata per rappresentare un sistema unificato di proprietà delle onde e delle particelle. L'espressione $\psi^* \psi$ è chiamata funzione di densità di probabilità. Il significato fisico della funzione d'onda è che l'espressione $\psi^* \psi \cdot dv$ determina la probabilità di comparsa (o di esistenza) di una particella descritta dalla funzione ψ in un intervallo di tempo t in un volume dv . In altre parole, la probabilità di esistenza di un elettrone in un tempo t in un volume dv è determinata dal quadrato dell'ampiezza della sua funzione d'onda.

Secondo la meccanica ondulatoria, esiste una relazione tra il quasi-momento p di una particella libera e il vettore d'onda k :

$$p = \hbar k \quad , \quad (1.2)$$

dove $\hbar = \frac{h}{2\pi}$.

L'energia di una particella libera è legata alla sua massa dalla formula:

$$E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} \quad . \quad (1.3)$$

Confrontiamo gli elettroni nel vuoto con il loro stato in un singolo cristallo.

In un cristallo singolo ideale, gli atomi sono periodicamente distanziati l'uno dall'altro a una distanza appropriata. Gli atomi sono costituiti da nuclei con carica positiva e da elettroni con carica negativa equivalente. Nei cristalli, come il silicio, gli elettroni del guscio esterno orbitano non solo attorno al proprio nucleo, ma anche attorno agli atomi vicini, formando legami interatomici covalenti. Tali elettroni sono chiamati elettroni di valenza.

A una certa temperatura, alcuni degli elettroni di valenza acquisiscono un'energia di forza aggiuntiva, si liberano dal legame con un atomo e iniziano a muoversi in tutto il cristallo, cioè si verifica la ionizzazione. Tali elettroni sono chiamati elettroni liberi o di conduzione. Per un singolo atomo (solitario), i livelli energetici degli elettroni sono discreti. In un cristallo, tuttavia, il numero di atomi supera i 10^{22} cm^{-3} , quindi si formano bande energetiche continue sotto l'influenza degli atomi vicini. Un diagramma della formazione di bande energetiche quando gli atomi si avvicinano è mostrato nella figura 1.9:

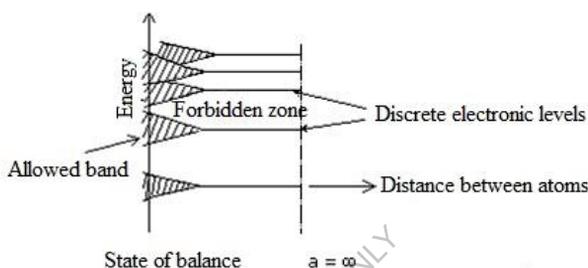


Fig. 1.9. Schema di formazione delle zone energetiche.

I livelli discreti di un singolo atomo si espandono in bande energetiche man mano che le distanze interatomiche nel cristallo diminuiscono.

Le aree ombreggiate possono contenere elettroni, quindi sono chiamate bande permesse. Negli spazi vuoti tra queste aree non ci sono elettroni. Queste regioni energetiche sono chiamate bande proibite. La presenza di bande proibite e permesse è il fattore principale che determina le proprietà elettriche e ottiche dei solidi.

La conclusione sulla presenza di bande energetiche nei cristalli può essere raggiunta da altre considerazioni. Nei cristalli si forma un potenziale che varia periodicamente a causa delle cariche positive dei nuclei atomici disposti in una certa sequenza e delle cariche negative degli elettroni che circondano queste cariche positive. Per gli elettroni in questo potenziale periodico, non esiste più una distribuzione continua dell'energia. È qui che entrano in gioco le proprietà ondulatorie degli elettroni. Il modello più semplice che spiega le proprietà ondulatorie degli elettroni in un potenziale periodico è il modello di Cronig-Penney:

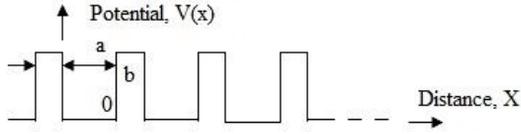


Fig. 1.10. Potenziale periodico rettangolare monodimensionale.

Determiniamo la relazione tra l'energia dell'elettrone e il vettore d'onda (o quantità di moto) in un potenziale periodico rettangolare unidimensionale (fig. 1.10)

L'equazione di Schrödinger per questo caso è scritta nella forma:

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} (E - V(x))\psi(x) = 0 \quad , (1.4)$$

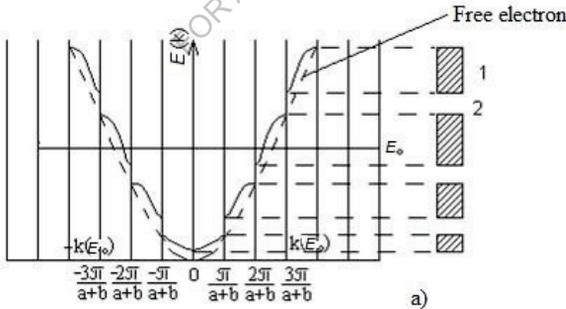
dove $V(x)$ è il potenziale periodico, $\psi(x)$ è la funzione d'onda dell'elettrone.

La funzione d'onda di un elettrone in un potenziale periodico $V(x)$ è espressa dalla funzione di Bloch:

$$\psi(x) = e^{ikx}U(x) \quad , (1.5)$$

dove $U(x)$ varia in modo simile a $V(x)$.

Se risolviamo l'equazione di Schrödinger (1.4) tenendo conto di ciò, otteniamo la relazione tra l'energia dell'elettrone $E(k)$ e il vettore d'onda k (fig. 1.11(a)):



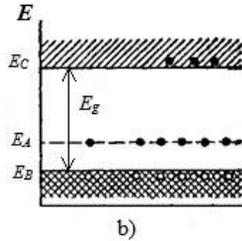


Fig. 1.11. a - dipendenza dell'energia dell'elettrone E dal vettore d'onda k , b - struttura a bande di un semiconduttore di tipo p (accettore)

Nel grafico, le discontinuità nella funzione $E(k)$ appaiono nei punti

$\frac{\pi}{a+b}$, cioè appaiono le bande energetiche permesse e proibite, come mostrato sul lato destro della figura.

Quando si spiegano molte proprietà elettrofisiche dei semiconduttori, si utilizzano gli elementi della struttura a bande nella forma mostrata in Fig. 1.11(b). Qui, E_B è il livello energetico superiore della banda di valenza, E_C è il fondo della banda di conduzione, E_A è il livello energetico formato dall'impurezza accettore e E_g è l'ampiezza del band gap. Nel modello della struttura a bande sopra descritto, la conducibilità e altri effetti cinetici sono spiegati dalla presenza di buchi (assenza di elettroni) nella banda di valenza e di elettroni nella banda di conduzione. Le buche nella banda di valenza si formano a causa della transizione degli elettroni al livello accettore e alla banda di conduzione.

1.6. Zone di Brillouin e zone ridotte

Se si sposta il punto di partenza del grafico della funzione $E(k)$ (vedi fig. 1.11) nei punti di $\frac{2\pi n}{(a+b)}$, $n = \pm 1, \pm 2, \dots$, si ottengono sezioni completamente coincidenti dei grafici corrispondenti. Ciò corrisponde al fatto che il trasferimento di un elettrone nello spazio di un potenziale periodico o di un cristallo reale a una distanza $(a+b)$ è del tutto adeguato al trasferimento a $\frac{2\pi n}{(a+b)}$ nello spazio k . Pertanto, per eliminare l'ambiguità della definizione del vettore d'onda dell'elettrone nel cristallo, assumiamo che la funzione $E(k)$ sia definita solo nella regione $-\frac{\pi}{(a+b)} \leq k \leq \frac{\pi}{(a+b)}$ nella figura. Le sezioni del grafico della funzione $E(k)$ situate al di fuori di questa regione vengono trasferite, con un opportuno cambio di segno, al

centro di questa sezione e si ottiene il grafico della funzione $E(k)$ mostrato nella figura 1.12.

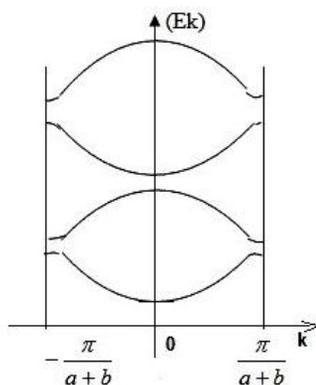


Fig. 1.12. La prima zona di Brillouin

Questa trasformazione è chiamata rappresentazione delle zone ridotte e il dominio $-\frac{\pi}{a+b} \leq k \leq \frac{\pi}{a+b}$ è chiamato prima zona di Brillouin.

Considerazioni simili valgono per i reticoli cristallini bidimensionali e tridimensionali. Nei cristalli tridimensionali reali, dipende dalla loro struttura cristallina, ad esempio dal tipo di simmetria. Ad esempio, il silicio e il GaAs hanno reticoli cubici a facce centrate, quindi le loro bande di Brillouin hanno la stessa forma.

La funzione $E(k)$ per i cristalli reali è tridimensionale e nella maggior parte dei casi si trova solo all'interno della prima banda di Brillouin. Tale funzione tridimensionale $E(k)$ è chiamata struttura di banda energetica.

1.7. Massa effettiva, elettroni e buche

L'energia e la quantità di moto degli elettroni in un cristallo sono legate tra loro da una funzione complessa (la struttura delle bande di energia), che dipende dalla struttura del reticolo cristallino.

La struttura delle bande energetiche determina le proprietà elettroottiche dei cristalli reali. Pertanto, quando si progettano dispositivi a semiconduttore con le caratteristiche desiderate, si deve scegliere un semiconduttore con la struttura delle bande energetiche più appropriata.

Consideriamo il movimento degli elettroni in un campo elettrico in un cristallo - una corrente elettrica. Assumiamo che tutti gli elettroni

localizzati in una certa regione siano descritti da un'unica funzione d'onda, che chiamiamo pacchetto d'onda. La velocità di un pacchetto d'onda di elettroni è la velocità di gruppo V_g :

$$V_g = \frac{dw}{dk} = \frac{1}{\hbar} \cdot \frac{dE}{dk} \quad , (1.6)$$

dove w - frequenza d'angolo, $E = \hbar w$

L'energia acquisita da un elettrone in un campo elettrico di intensità E in un periodo di tempo dt quando si muove a una distanza dx è pari a:

$$dE = -eE dx = -eE V_g \cdot dt \quad . (1.7)$$

Dalle espressioni (1.2), (1.6), (1.7) è possibile ottenere:

$$\frac{dp}{dt} = -eE = F \quad , (1.8)$$

dove F - la forza che agisce su un elettrone in un campo elettrico E .

Dimostriamo che la (1.8) è equivalente alla seconda legge di Newton nella meccanica classica. Differenziamo la 1.6 rispetto a t e, utilizzando la (1.8), otteniamo:

$$\frac{dV_g}{dt} = \left(\frac{1}{\hbar^2} \cdot \frac{d^2E}{dk^2} \right) \cdot F \quad . (1.9)$$

Se si inserisce la notazione $m^* \equiv \frac{\hbar^2}{(d^2E/dk^2)}$. (1.10)

Allora possiamo scrivere (1.9) $m^* \cdot \frac{dV_g}{dt} = F$. (1.11)

Pertanto, la (1.8) corrisponde effettivamente alla seconda legge di Newton. Il valore m^* è chiamato massa effettiva dell'elettrone nel cristallo.

Per i cristalli reali tridimensionali, k è il vettore d'onda del cristallo e m^* è una quantità tensoriale (che dipende dalla direzione nello spazio k).

Supponiamo che il movimento degli elettroni e, di conseguenza, la corrente elettrica avvengano all'interno di una zona consentita. Se la velocità dell'elettrone i esimo è V_i , è possibile determinare la corrente nel volume V :

$$I = -\frac{e}{V} \sum_i V_i \quad , (1.12)$$

dove Σ è l'addizione tra tutti gli elettroni della banda.

Se la zona è completamente piena di elettroni, la corrente che la attraversa $I = 0$. Ciò è dovuto al fatto che la forma della zona è simmetrica rispetto all'asse a $k = 0$, e se integriamo V_i (vedi 1.6) all'interno della zona, le parti positive e negative dell'integrale si annullano a vicenda.

Supponiamo che gli elettroni situati vicino alla parte superiore della banda lascino la banda sotto l'influenza dell'energia termica, formando uno stato privo di elettroni (o vacante). Dalla (1.12) si ottiene:

$$I = -\frac{e}{V} [\sum_i V_i - \sum_h V_h] \quad , (1.13)$$

dove V_h è la velocità degli stati liberi nella zona, Σ è la somma delle velocità di tutti gli stati della zona.

Vale a dire che all'indirizzo $\sum_i V_i = 0$ si ottiene:
$$I = \frac{e}{V} \sum_h V_h$$
 . (1.14)

Dalla (1.14) si deduce che anche gli stati non riempiti di elettroni contribuiscono alla corrente elettrica. Questi stati si muovono come particelle dotate di carica positiva e sono chiamati buchi.

Poiché il flusso di corrente elettrica nei semiconduttori coinvolge sia gli elettroni che le buche, entrambi sono portatori di carica.

1.8. Struttura delle bande energetiche del silicio

Alla temperatura dello zero assoluto, gli elettroni riempiono la zona con energia $E \leq 0$, chiamata zona di valenza. La banda con $E > 0$ è completamente libera. Tuttavia, all'aumentare della temperatura, alcuni degli elettroni della banda di valenza vengono eccitati e riempiono parzialmente la banda con $E > 0$. Questi elettroni partecipano alla conducibilità elettrica del semiconduttore, quindi questa zona è chiamata banda di conduzione.

Se si traccia una sezione parallela all'asse k appena sopra il bordo della banda di conduzione, si definiscono due punti che si trovano sull'asse $< 100 >$ nel silicio. Nello spazio k tridimensionale, questi punti vengono trasformati in superfici isoenergetiche. Queste superfici sono ellissoidi di rotazione con l'asse maggiore nelle direzioni $< 100 >$ per il silicio e, ad esempio, $< 111 >$ per il germanio. Il silicio presenta sei minimi energetici equivalenti (valli) e, per un dato valore energetico, sei ellissoidi nello spazio k (fig. 1.13):

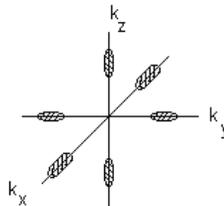


Fig. 1.13. Superfici isoenergetiche della banda di conduzione del silicio

Sezioni simili eseguite vicino al bordo della banda di valenza danno coppie di punti di uguale energia, che nello spazio tridimensionale k si trasformano in sfere ondulate (fig. 1.14) centrate in $k = 0$.

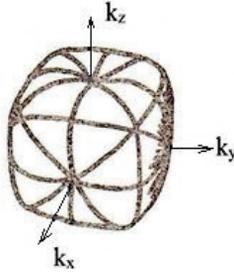


Fig. 1.14. Superfici isoenergetiche nello spazio k in prossimità del soffitto di buchi pesanti nella banda di valenza del silicio e del germanio

Il soffitto della banda di valenza è costituito da due bande energetiche di diversa curvatura, che si chiudono a $k = 0$, e da una terza banda situata più in basso. La figura 1.15 mostra un ingrandimento della regione vicina al soffitto della banda di valenza:

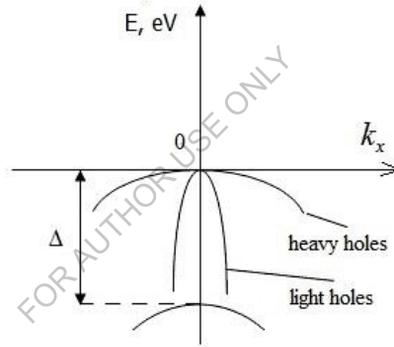


Fig. 1.15. La banda di valenza del silicio. Zone energetiche

La massa effettiva dei portatori nella banda di valenza è costituita da tre quantità scalari. Nella zona con un piccolo raggio di curvatura si trovano le cosiddette buche leggere con una massa efficace m_l^* , mentre nella zona con un raggio di curvatura maggiore si trovano le buche pesanti con una massa efficace m_h^* . La terza zona, separata dalle altre due da un gap energetico Δ , è formata dall'interazione degli spin degli elettroni con i loro momenti magnetici orbitali. Questo effetto è chiamato spin-orbit splitting. Nel silicio, il valore di Δ è di 0,035 eV e, a temperatura ambiente, le buche riempiono questa terza banda.

Nella regione energetica compresa tra il fondo della banda di conduzione e il soffitto della banda di valenza non ci sono elettroni. Questa regione è chiamata band gap. I materiali in cui la banda proibita è assente a causa della sovrapposizione reciproca delle bande energetiche

consentite sono elettricamente conduttivi anche alla temperatura dello zero assoluto, cioè sono metalli.

La struttura delle bande energetiche dipende dalla pressione e dalla temperatura, poiché la pressione e la temperatura modificano la costante di reticolo.

FOR AUTHOR USE ONLY

Capitolo 2. Conduttori. Proprietà elettrofisiche dei conduttori

2.1. Informazioni generali

La corrente elettrica può essere trasportata da solidi, liquidi e, in condizioni appropriate, da gas.

I metalli, le leghe metalliche e alcune modifiche del carbonio sono conduttori solidi. I metalli conducono bene l'elettricità e il calore. Nell'ingegneria elettronica, i metalli svolgono un ruolo importante.

I conduttori liquidi comprendono metalli fusi ed elettroliti. Di norma, il punto di fusione dei metalli è elevato. A temperature normali, solo il mercurio, che ha un punto di fusione di $-39\text{ }^{\circ}\text{C}$, può essere utilizzato come conduttore metallico liquido. Anche il gallio ha un punto di fusione vicino alla norma ($29,8\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Il meccanismo del flusso di corrente attraverso i metalli allo stato solido e liquido è causato dal movimento di elettroni liberi, motivo per cui sono chiamati conduttori con conducibilità elettrica elettronica o conduttori del primo tipo.

Gli elettroliti, o conduttori del secondo tipo, sono soluzioni di acidi, alcali e sali, nonché fusioni di composti ionici. Il passaggio di corrente attraverso questi conduttori è associato al trasferimento di parti di molecole (ioni) insieme a cariche elettriche, per cui la composizione dell'elettrolita cambia gradualmente e i prodotti dell'elettrolisi vengono rilasciati agli elettrodi.

Tutti i gas e i vapori, compresi i vapori metallici, non sono conduttori a basse intensità di campo elettrico. Tuttavia, se l'intensità del campo è superiore a un certo valore critico, che garantisce l'insorgenza di shock e fotoionizzazione, il gas può diventare un conduttore (conducibilità elettronica e ionica). Il gas fortemente ionizzato, in determinate condizioni, diventa un mezzo chiamato plasma.

2.2. Conducibilità elettrica dei metalli

La teoria elettronica classica dei metalli, sviluppata da Drude e Lorentz, si basa sull'idea di un gas di elettroni costituito da elettroni liberi (collettivizzati). Al gas di elettroni vengono attribuite le proprietà di un gas ideale, cioè il movimento degli elettroni obbedisce alle leggi della statistica classica. Se assumiamo che gli atomi di un metallo siano ionizzati una volta, la concentrazione di elettroni liberi sarà uguale alla concentrazione di atomi e può essere calcolata con la formula:

$$n = \frac{\rho}{A} N_0, \quad (2.1)$$

dove ρ è la densità del materiale; A è la massa atomica; N_0 è il numero di Avogadro.

Nel corso di fisica generale, utilizzando la teoria cinetica dei gas ideali per considerare il movimento direzionale degli elettroni in un campo elettrico, si ricava la formula della densità di corrente:

$$J = \frac{e^2 n \bar{l}}{2 m_0 \bar{v}} E = \sigma E, \quad (2.2)$$

dove \bar{l} - è la lunghezza del cammino libero medio di un elettrone, \bar{v} - velocità media.

Cioè, la densità di corrente è proporzionale all'intensità del campo elettrico, che è l'espressione analitica della legge di Ohm.

La derivazione della formula (2.2) non può essere considerata assolutamente rigorosa, poiché è stato preso in considerazione il moto di un solo elettrone e le conclusioni sono state applicate a tutti gli elettroni liberi. Sarebbe più corretto considerare l'effetto del campo elettrico sull'intero insieme di elettroni liberi, la cui quantità di moto totale cambia sia sotto l'azione del campo sia sotto l'azione delle collisioni con i nodi del reticolo cristallino. Tale analisi porta al fatto che la velocità media di deriva degli elettroni è doppia. Tenendo conto di questa correzione, l'espressione per la conduttività specifica assume la forma seguente:

$$\sigma = \frac{e^2 n \bar{l}}{m_0 \bar{v}} \cdot (2.3)$$

Il concetto di elettroni liberi consente di giungere facilmente alla legge sperimentale di Wiedemann-Franz, che stabilisce la relazione tra la conduttività e la conduttività termica di un metallo. Gli elettroni in un metallo non solo trasportano una carica elettrica, ma equalizzano anche la sua temperatura, fornendo un'elevata conduttività termica. A causa dell'elevata concentrazione di elettroni liberi, la conducibilità termica elettronica prevale sugli altri meccanismi di trasferimento del calore. In base alla teoria cinetica atomica di un gas ideale, è possibile determinare la conduttività termica elettronica:

$$\lambda_T = \frac{1}{2} k n \bar{v} \bar{l}, \quad (2.4)$$

dove k è la costante di Boltzmann.

Dividendo l'espressione (2.4) per la conduttività specifica trovata in (2.2) e tenendo conto che, secondo la teoria cinetica molecolare, l'energia cinetica media degli elettroni in uno stato di moto caotico è determinata da

$$\frac{m_0 \bar{v}^2}{2} = \frac{3}{2} k T,$$

otterremo

$$\frac{\lambda_T}{\sigma} = 3 k^2 e^{-2} T = L_0 T \cdot (2.5)$$

Cioè, il rapporto tra la conduttività termica specifica e la conduttività specifica del metallo a una data temperatura è un valore costante, indipendente dalla natura del conduttore. Da ciò deriva, in particolare, che i buoni conduttori di corrente elettrica sono anche buoni

conduttori di calore. La costante $L_o = 3k/e^{22}$ è stata chiamata numero di Lorentz. Un'analisi più rigorosa basata sulla statistica quantistica degli elettroni fornisce un'espressione leggermente diversa per il numero di Lorentz, anche se il suo valore numerico non cambia in modo significativo:

$$L_o = \frac{\lambda_T}{\sigma T} = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{k}{e}\right)^2 = 2,45 \cdot 10^{-8} B^2 K^{-2} \quad (2.6)$$

I valori sperimentali del numero di Lorentz a temperatura ambiente per la maggior parte dei metalli concordano bene con il valore teorico.

Tuttavia, oltre al successo delle spiegazioni dell'esperimento da parte della teoria elettronica classica dei metalli, sono apparse anche delle contraddizioni. In particolare, la teoria classica non riusciva a spiegare la bassa capacità termica del gas di elettroni. La capacità termica molare del reticolo cristallino di qualsiasi corpo solido, che può essere considerato come un sistema di oscillatori armonici, è $3R$ (R è la costante universale dei gas). Questo risultato è noto in fisica come legge di Dulong-Pty, che vale per i corpi solidi a una temperatura relativamente alta.

Nei metalli, gli atomi e gli elettroni liberi devono partecipare al processo di assorbimento dell'energia. Da questo punto di vista, la capacità termica del metallo deve essere significativamente maggiore della capacità termica dei dielettrici che non contengono elettroni liberi. Assumendo che il numero di elettroni liberi in un metallo sia uguale al numero di atomi e tenendo conto che gli elettroni, come particelle di un gas ideale, hanno un'energia termica media di $(3/2) kT$, per la capacità termica molare dei metalli si ottiene

$$C_v = C_{clatice} + C_e = 3R + 3/2 kN_0 = 9/2R \quad (2.7)$$

Tuttavia, in realtà, la capacità termica dei metalli ad alta temperatura differisce di poco dalla capacità termica dei dielettrici cristallini. Ciò indica che il gas di elettroni praticamente non assorbe calore quando si riscalda un conduttore metallico, il che contraddice le opinioni della teoria elettronica classica. La contraddizione descritta è la principale, ma ve ne sono altre. Le difficoltà di spiegazione sono state superate con l'aiuto della teoria quantistica dei metalli, le cui basi sono state sviluppate dallo scienziato sovietico Y. I. Frenkel e dal fisico tedesco A. Sommerfeld.

Le principali carenze della teoria classica non derivano tanto dalle idee sull'esistenza di elettroni liberi nei metalli, quanto dall'applicazione ad essi delle leggi della statistica classica (statistica di Maxwell-Boltzmann), secondo cui la distribuzione degli elettroni per stati energetici è descritta da una funzione esponenziale della forma:

$$F(E) = A \exp \left[-\frac{E}{kT} \right] \quad (2.8)$$

In questo caso, un numero qualsiasi di elettroni può trovarsi in ogni stato energetico.

La statistica quantistica si basa sul principio di Pauli, secondo il quale solo un elettrone può trovarsi in ogni stato energetico. Questo porta immediatamente alla differenza tra la distribuzione classica e quella quantistica degli elettroni in base all'energia. Dal punto di vista classico, l'energia di tutti gli elettroni alla temperatura dello zero assoluto deve essere pari a zero. E secondo il principio di Pauli, anche allo zero assoluto, il numero di elettroni per ogni livello non può essere superiore a due. E se il numero totale di elettroni liberi in un cristallo è n , allora a 0 K essi occuperanno 1/2 dei livelli energetici più bassi.

Nella teoria quantistica, la probabilità di riempire gli stati energetici con gli elettroni è determinata dalla funzione di Fermi:

$$F(E) = \left[1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) \right]^{-1} \quad (2.9)$$

dove E è l'energia del livello di cui si determina la probabilità di occupazione; E_F è l'energia del livello caratteristico rispetto al quale la curva di probabilità è simmetrica. A $T = 0$ K, la funzione di Fermi ha le seguenti proprietà: $F(E) = 1$ se $E \leq E_F$, e $F(E) = 0$ se $E > E_F$.

Pertanto, il valore di E_F determina l'energia massima che un elettrone può avere in un metallo alla temperatura dello zero assoluto. Questa energia caratteristica è chiamata energia di Fermi o livello di Fermi. Il potenziale corrispondente a $\varphi_F = E_F / e$ è chiamato potenziale elettrochimico.

Dalla formula (2.9), è facile vedere che a qualsiasi temperatura, per un livello con energia $E = E_F$, la probabilità di riempirsi di elettroni è 0,5. Tutti i livelli al di sotto del livello di Fermi sono riempiti di elettroni con una probabilità superiore a 0,5. Tutti i livelli al di sopra del livello di Fermi si riempiono di elettroni con una probabilità inferiore a 0,5. Al contrario, tutti i livelli al di sopra del livello di Fermi sono privi di elettroni con una probabilità maggiore di 0,5.

La concentrazione totale di elettroni in un metallo si ottiene integrando tutti gli stati di riempimento.

I sistemi di microparticelle il cui comportamento è descritto dalla statistica di Fermi-Dirac possono trovarsi in uno stato degenerato, caratteristico dei metalli. Nello stato degenerato, l'energia media del gas di elettroni è praticamente indipendente dalla temperatura. Il gas di elettroni in un metallo rimane degenerato fino a quando uno qualsiasi degli elettroni può scambiare energia con il reticolo cristallino, il che, a sua volta, è possibile solo quando l'energia media delle vibrazioni termiche diventa vicina all'energia di Fermi. Per i metalli, la temperatura di rimozione della degenerazione è di 10^4 K, superiore non solo al punto di fusione ma anche alla temperatura di vaporizzazione dei metalli.

A causa della degenerazione, non tutti gli elettroni liberi possono partecipare al processo di conduzione elettrica, ma solo una piccola frazione di essi, che ha un'energia vicina all'energia di Fermi. Solo questi elettroni possono cambiare stato sotto l'influenza di un campo. La corrente elettrica che si verifica in un metallo sotto l'influenza di una differenza di potenziale riflette i cambiamenti nella distribuzione degli elettroni in base alla velocità.

Quando la temperatura cambia, l'energia di Fermi cambia di poco, il che è una caratteristica specifica dello stato degenerato di un gas di elettroni. Ad esempio, quando l'argento viene riscaldato da 0 a 1000 K, la sua energia di Fermi diminuisce solo dello 0,2%. Variazioni così piccole in un intervallo di temperatura così ampio possono essere ignorate. Le concentrazioni di n elettroni liberi nei metalli puri differiscono di poco. Anche la variazione di temperatura di n è molto piccola. Pertanto, la conduttività è determinata principalmente dalla lunghezza media del cammino degli elettroni liberi, che a sua volta dipende dalla struttura del conduttore, cioè dalla natura chimica degli atomi e dal tipo di reticolo cristallino. La dipendenza della conduttività dalla temperatura può essere spiegata anche dalla natura ondulatoria del moto degli elettroni.

2.3 Dipendenza dalla temperatura della resistenza elettrica dei metalli

È noto dalla fisica che le particelle elementari hanno la proprietà della dualità particella-onda. Pertanto, il movimento degli elettroni liberi in un metallo può essere considerato come la propagazione di onde elettroniche piane, la cui lunghezza è determinata dalla relazione di de Broglie:

$$\lambda = \frac{h}{m_0 U} = \frac{h}{\sqrt{2m_0 E}} \quad (2.10)$$

Un'onda di elettroni piani in un campo di potenziale strettamente periodico si propaga senza dissipazione di energia. In altre parole, il reticolo ideale di un solido non ha alcun effetto di dispersione sul flusso di elettroni. Ciò significa che in un cristallo ideale la lunghezza del cammino libero degli elettroni è pari all'infinito e la resistenza alla corrente elettrica è nulla. Ciò è confermato dal fatto che la resistenza dei metalli puri tende a zero quando la temperatura si avvicina allo zero assoluto. La proprietà di un elettrone di muoversi liberamente in un reticolo cristallino ideale non ha analoghi nella meccanica classica. La dispersione e la comparsa di resistenza si verificano quando nel reticolo sono presenti vari tipi di disturbi.

Nei metalli puri con una struttura perfetta, l'unica ragione che limita il percorso libero degli elettroni è l'oscillazione termica degli atomi nei nodi del reticolo. All'aumentare della temperatura, aumentano le ampiezze delle vibrazioni termiche degli atomi e le fluttuazioni associate nel campo

periodico del reticolo. Questo, a sua volta, aumenta la dispersione degli elettroni e provoca un aumento della resistività.

Nella teoria delle vibrazioni atomiche del reticolo, la temperatura viene valutata rispetto a una certa temperatura caratteristica chiamata temperatura di Debye θ_D . La temperatura di Debye determina la massima frequenza delle vibrazioni termiche che possono essere eccitate in un cristallo:

$$\theta_D = h\nu_{max}/k \quad (2.11)$$

Questa temperatura dipende dalle forze di legame tra i nodi del reticolo cristallino ed è un parametro importante di un solido.

Per determinare qualitativamente la natura della dipendenza dalla temperatura della resistività, si utilizza un modello alquanto semplificato di vibrazioni atomiche e moto degli elettroni. Il risultato è una formula che mostra che la resistività dei metalli a $T > \theta_D$ varia linearmente con la temperatura:

$$\rho_T = \frac{1}{\sigma} = \frac{2\pi m_n^* k U_F}{e^2 k_{eb}} T = BT \quad (2.12)$$

dove k_{eb} è il coefficiente di legame elastico che tende a riportare l'atomo nella posizione di equilibrio, U_F è la velocità termica degli elettroni con energia prossima a E_F .

Come mostra l'esperimento, l'approssimazione lineare della dipendenza dalla temperatura di $\rho_T(T)$ è valida fino a temperature dell'ordine di $(2/3)\theta_D$, dove l'errore non supera il 10%. Per la maggior parte dei metalli, la temperatura caratteristica di Debye non supera i 400-450 K. Pertanto, l'approssimazione lineare è generalmente valida a temperature a partire dalla temperatura ambiente. Nella regione a bassa temperatura ($T < \theta_D$), dove la diminuzione della resistività è dovuta alla graduale esclusione di nuove frequenze di vibrazioni termiche (fononi), la teoria prevede una dipendenza dalla legge di potenza $\rho_T \sim T^5$. In fisica, questa relazione è nota come legge di Bloch-Grüneisen. L'intervallo di temperatura in cui si osserva una forte dipendenza dalla legge di potenza di $\rho_T(T)$ è solitamente piuttosto piccolo, con valori sperimentali della legge di potenza che vanno da 4 a 6.

La variazione della resistività di un conduttore metallico in funzione della temperatura è illustrata nella figura 2.1. A basse temperature, alcuni metalli possono raggiungere lo stato di superconduttività e la figura mostra un salto nella resistività alla temperatura T_{sc} .

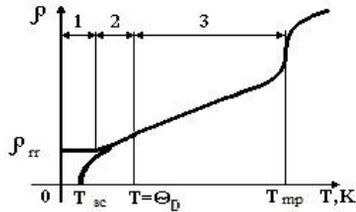


Fig. 2.1. Dipendenza della resistività di un conduttore metallico dalla temperatura. T_{sc} - temperatura di transizione allo stato superconduttivo, T_{mp} - punto di fusione, ρ_{rr} - resistività residua prima della transizione alla superconduttività.

La variazione relativa della resistività quando la temperatura cambia di un kelvin (grado) è chiamata coefficiente di temperatura della resistività:

$$\alpha_\rho = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} \quad (2.13)$$

Il segno positivo corrisponde al caso in cui la resistenza specifica in prossimità di questo punto aumenta con l'aumentare della temperatura. Il valore di α_ρ può anche dipendere dalla temperatura. Nella regione di dipendenza lineare $\rho(T)$, l'espressione è valida:

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha_\rho (T - T_0)] \quad (2.14)$$

dove ρ_0 e α_ρ sono la resistenza specifica e il coefficiente di temperatura della resistenza specifica, riferiti all'inizio dell'intervallo di temperatura, cioè alla temperatura T_0 , ρ - la resistenza specifica alla temperatura T . Di norma, T_0 è considerata 273° K (0° C).

2.4. Film metallici sottili. Effetti dimensionali

I film metallici sono ampiamente utilizzati nella microelettronica come piazzole di contatto, interconnessioni, rivestimenti di condensatori, elementi magnetici e resistivi dei circuiti integrati. Le proprietà elettriche dei film sottili di metalli e leghe possono differire significativamente da quelle dei materiali conduttori iniziali sfusi. Una delle ragioni di questa differenza è la varietà delle caratteristiche strutturali dei film sottili ottenuti, ad esempio, condensando fasci molecolari in alto vuoto. Variando le condizioni di condensazione, la struttura dei film risultanti può variare da uno stato fine estremamente disordinato (stato amorfo) alla struttura di un perfetto strato di cristallo singolo (film epitassiali). Un'altra ragione del cambiamento delle proprietà dei materiali allo stato di film è legata alla manifestazione di effetti dimensionali, cioè al ruolo crescente dei processi di superficie rispetto a quelli di massa. In particolare, nella conducibilità elettrica, l'effetto dimensionale si verifica quando lo spessore del film è commisurato alla lunghezza media del cammino libero degli elettroni. In queste condizioni, l'ipotesi che la resistività del

materiale sia indipendente dalle dimensioni geometriche del campione diventa scorretta.

La struttura dei film subisce cambiamenti significativi nelle diverse fasi della condensazione e ciò influisce anche sulla resistività.

I film sottili nelle prime fasi di condensazione hanno una struttura a isole, cioè con una piccola quantità di metallo depositato, le sue particelle si trovano sul substrato dielettrico sotto forma di grani sparsi separati - isole. La conducibilità elettrica del film si verifica a una certa quantità minima di metallo depositato. Quando viene applicato un campo elettrico, gli elettroni si trasferiscono attraverso le strette lacune dielettriche tra le isole vicine. I meccanismi responsabili del trasferimento di carica sono l'emissione di termoelettroni e il tunneling; in particolare, gli elettroni situati al di sopra del livello di Fermi possono effettuare il tunneling. La transizione degli elettroni è facilitata dall'aumento della temperatura. Inoltre, la resistenza di un film con struttura a isole è in gran parte determinata dalla resistenza superficiale delle aree del substrato in cui non sono presenti grani metallici.

All'aumentare della quantità di strato metallico depositato, le dimensioni degli spazi vuoti tra le isole diminuiscono e la conduttività dei film aumenta. Nel processo di ulteriore condensazione della sostanza sul substrato, le isole si fondono e formano catene conduttive e poi uno strato omogeneo continuo. Tuttavia, anche in un film continuo, la resistività è superiore alla resistività del conduttore originale, conseguenza dell'elevata concentrazione di difetti - vacuità, dislocazioni, confini di grano formati durante la fusione delle isole. Le impurità assorbite dai gas residui hanno un impatto importante sulle proprietà dei film.

La resistività del film aumenta anche per effetto dimensionale, cioè per la riduzione della lunghezza del cammino libero degli elettroni dovuta alla loro riflessione dalla superficie del campione.

A temperatura ambiente, la diffusione superficiale degli elettroni si verifica nei film metallici puri se il loro spessore è inferiore a 200-300 Å. Tuttavia, a basse temperature, quando la lunghezza del percorso libero degli elettroni nel volume del materiale aumenta in modo significativo, l'influenza degli effetti dimensionali si manifesta con spessori di film molto maggiori.

Poiché la natura della nucleazione e della crescita dei film dipende da molti fattori casuali, è difficile ottenere una corrispondenza esatta dei valori di resistività per film dello stesso spessore δ nella pratica. Pertanto, per una valutazione comparativa delle proprietà dei film sottili, si utilizza la resistività del quadrato R_{\square} (resistività della superficie), che è numericamente uguale alla resistenza di una sezione di film la cui lunghezza è uguale alla larghezza quando la corrente passa attraverso le due facce opposte parallele alla superficie del substrato:

$$R_{\square} = \frac{\rho_0}{\delta} \quad (2.15)$$

Dato che R_{\square} non dipende dalle dimensioni del quadrato, la resistenza di un resistore a film sottile può essere facilmente calcolata con la formula:

$$R = R_{\square} \frac{l_0}{d_0} \quad (2.16)$$

dove l_0 è la lunghezza del resistore nella direzione del flusso di corrente; d_0 è la larghezza del film.

Per la produzione di resistenze a film sottile si utilizzano solitamente pellicole con una resistenza superficiale di 500-1000 ohm/quadrato. I materiali resistivi più comunemente utilizzati sono il tungsteno, il molibdeno, il tantalio, il renio, il cromo e la lega nichel-cromo. I resistori a film realizzati con metalli puri hanno il vantaggio di avere una composizione costante e quindi è più facile garantire l'uniformità della loro struttura. Questo, a sua volta, porta a una maggiore stabilità dei parametri elettrici.

2.5. Fenomeni di contatto. Termo EMF

Quando due metalli diversi entrano in contatto, si crea tra loro una differenza di potenziale di contatto. Questo fenomeno è stato scoperto dal fisico italiano A. Volta nel 1797. Secondo la teoria quantistica, la ragione principale della differenza di potenziale al contatto è la diversa energia di Fermi dei metalli in contatto.

Supponiamo che il gas di elettroni nei metalli A e B (fig. 2.2) sia caratterizzato dalle energie di Fermi E_F^A ed E_F^B . Supponiamo che $E_F^A < E_F^B$. Il lavoro termodinamico della resa degli elettroni è pari a A_A e A_B , rispettivamente. L'energia cinetica degli elettroni al livello di Fermi è diversa nei vari metalli. Pertanto, quando i materiali entrano in contatto, si verifica un'intensa transizione di elettroni da una regione con un grande valore dell'energia di Fermi a una regione in cui questa energia è più bassa, cioè dal metallo B al metallo A. Infatti, gli elettroni tendono a occupare uno stato con energia minima. Infatti, la transizione degli elettroni dal metallo B al metallo A è la transizione degli elettroni in questo sistema verso livelli energetici inferiori. Come risultato di questo processo, il metallo B è carico positivamente e il metallo A è carico negativamente; tra loro si crea una differenza di potenziale che impedisce un ulteriore trasferimento di portatori di carica. L'equilibrio si verifica quando il lavoro dell'elettrone per vincere le forze del campo creato diventa uguale alla differenza di energia degli elettroni che passano attraverso il contatto:

$$eU_B = E_F^B - E_F^A$$

Pertanto, la differenza di potenziale di contatto interno è definita come la differenza delle energie di Fermi, calcolate a partire dal fondo della banda di conduzione, per i metalli A e B isolati.

La presenza di un campo di contatto garantisce l'uguaglianza dei flussi di elettroni da un metallo all'altro nello stato di equilibrio. In condizioni di equilibrio stazionario, il livello di Fermi di entrambi i metalli dovrebbe essere lo stesso: i livelli energetici del metallo con carica positiva si abbassano. A causa della carica delle regioni, l'equalizzazione del livello può avvenire durante la transizione di un piccolo numero di elettroni. Il doppio strato elettrico d esistente nell'area di contatto è molto sottile (dell'ordine del periodo del reticolo) e non influisce sul passaggio della corrente elettrica attraverso il contatto. Poiché l'energia di Fermi nei metalli ha un valore di circa pochi elettronvolt, la differenza di potenziale di contatto tra due metalli può variare da pochi decimi a diversi volt.

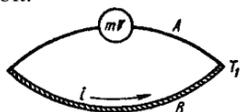


Fig. 2.2 Schema del circuito della termocoppia

Una termocoppia, costituita da due diversi conduttori che formano un circuito chiuso, è chiamata termocoppia (figura 2.2). Quando la temperatura dei contatti nel circuito chiuso è diversa, scorre una corrente detta termoelettrica. Se il circuito viene interrotto in un punto arbitrario, ai capi del circuito aperto compare una differenza di potenziale, chiamata forza termoelettromotrice (EMF). Questo fenomeno è chiamato effetto Seebeck dal nome del suo scopritore. Come mostra l'esperimento, in un intervallo di temperatura relativamente piccolo, la forza termoelettromotrice è proporzionale alla differenza di temperatura tra i contatti (giunzioni):

$$U = \alpha_T(T_2 - T_1). \quad (2.17)$$

In questo caso, il coefficiente di proporzionalità α_T è chiamato EMF termico relativo differenziale o specifico. Il valore di α_T dipende dalla natura dei conduttori a contatto e dalla temperatura. Il CEM termico nel circuito è costituito da tre componenti. La prima è causata dalla dipendenza dalla temperatura della differenza di potenziale di contatto.

La seconda componente della termo-EMF è causata dalla diffusione dei portatori di carica dalle giunzioni calde a quelle fredde. Essi si diffondono in numero maggiore nella direzione del gradiente di temperatura. Il flusso di diffusione, che trasporta la carica negativa dall'estremità calda a quella fredda, crea una differenza di potenziale tra di esse.

La terza componente del termo-EMF si verifica nel circuito a causa della cattura di elettroni da parte di quanti di energia termica (fononi). Il loro flusso si estende anche all'estremità fredda. Tutte le componenti della termo-EMF sono determinate da una piccola concentrazione di elettroni

situati a livelli energetici vicini al livello di Fermi e distanti da esso di un valore dell'ordine di kT . Pertanto, la termo-EMF specifica per i metalli è molto piccola. La teoria quantistica fornisce la seguente espressione per il CEM termico specifico dei metalli monovalenti:

$$\alpha_T = \pi^2 \frac{k}{e} \frac{kT}{E_F} \quad (2.18)$$

A temperatura ambiente, α_T dovrebbe essere di pochi $\mu\text{V}/\text{K}$. Un valore significativamente più alto dell'EMF termico specifico può essere ottenuto quando si utilizzano leghe metalliche con una struttura a bande complessa.

Le termocoppie metalliche sono ampiamente utilizzate per la misurazione della temperatura. Durante il processo di misurazione, la temperatura di una delle giunzioni viene stabilizzata. A questo scopo si utilizzano tabelle di calibrazione standard. Ad esempio, una tabella di questo tipo per una termocoppia chromel-kopel (tipo L) è riportata nell'Appendice 2.

Va notato che anche in un conduttore omogeneo, in presenza di un gradiente di temperatura ai suoi estremi, si genera una differenza di potenziale per le ragioni sopra esposte. Il suo valore, riferito a una differenza unitaria di temperatura ai capi del conduttore, è chiamato EMF termico specifico assoluto. Si può dimostrare che in un circuito a termocoppia il CEM specifico relativo è uguale alla differenza dei CEM specifici assoluti dei conduttori che lo compongono:

$$\alpha_T = \alpha_T^A - \alpha_T^B \quad , \quad (2.19)$$

dove α_T^A e α_T^B sono i campi termici specifici assoluti dei metalli A e B a contatto.

Dall'equazione (2.19) si evince che se il valore assoluto del CEM termico specifico di un materiale, preso come riferimento, è noto, allora per qualsiasi altro materiale questo parametro può essere ottenuto misurandolo (calcolandolo) rispetto a questo riferimento.

Per determinare il CEM termoelettrico assoluto, il più delle volte si utilizza il piombo come riferimento, poiché le sue proprietà termoelettriche sono molto deboli. A basse temperature si utilizzano come standard i superconduttori, poiché questi ultimi hanno sempre un CEM termoelettrico specifico assoluto pari a zero. Il segno dell'EMF termoelettrico è considerato negativo se l'estremità calda del conduttore è carica positivamente, come è tipico per la maggior parte dei metalli semplici. In generale, l'EMF termico assoluto è fortemente dipendente dalla temperatura e può persino cambiare segno durante il riscaldamento.

2.6. Materiali ad alta conducibilità

Questo gruppo di materiali comprende conduttori con una resistività in condizioni normali non superiore a $0,1 \mu\Omega\cdot\text{m}$. I più comuni tra questi materiali sono il rame e l'alluminio.

I vantaggi del rame, che ne garantiscono la diffusione come materiale conduttore, sono la bassa resistività, la resistenza meccanica piuttosto elevata e la soddisfacente resistenza alla corrosione nella maggior parte dei casi (anche in condizioni di elevata umidità, il rame si ossida all'aria molto più lentamente rispetto, ad esempio, al ferro. L'ossidazione intensa del rame si verifica solo a temperature elevate (vedi fig. 2.3), la buona lavorabilità (il rame viene laminato in lastre, strisce e trafilato in fili, il cui spessore può essere portato a millesimi di millimetro), la relativa facilità di saldatura e di deposizione.

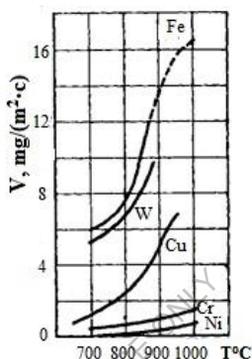


Fig. 2.3. Dipendenza del tasso di ossidazione V in aria dalla temperatura T per ferro Fe, tungsteno W, rame Cu, cromo Cr, nichel Ni.

Il rame viene prodotto dalla lavorazione di minerali solforati, i più comuni in natura. Dopo una serie di fusioni del minerale e di intensi abbattimenti, il rame destinato a scopi elettrici deve essere sottoposto a purificazione elettrolitica. Le piastre catodiche di rame ottenute dopo l'elettrolisi vengono fuse in lingotti di 80-90 kg, che vengono laminati in prodotti della sezione richiesta.

Il metodo di trafilatura a freddo produce rame duro (hard-drawn) che, per effetto della rivettatura, presenta un'elevata resistenza alla trazione e un basso allungamento relativo, nonché durezza ed elasticità alla flessione; il filo di rame duro è leggermente elastico.

Se il rame viene ricotto, cioè riscaldato a diverse centinaia di gradi e poi raffreddato, si ottiene un rame morbido, relativamente duttile, con bassa durezza e bassa resistenza, ma con un allungamento relativo a rottura molto elevato e una maggiore conducibilità specifica. Il rame viene ricotto in forni speciali senza aria per evitare l'ossidazione. Il rame standard a 20°C ha una conducibilità specifica di $58,14 \text{ (M}\Omega\cdot\text{m)}^{-1}$, cioè $\rho = 0,017241 \text{ }\mu\Omega\cdot\text{m}$.

Il rame privo di ossigeno è utilizzato nella tecnologia del vuoto elettrico. Si ottiene dal rame elettrolitico fuso in un'atmosfera protettiva di

gas CO riduttivo. L'ossigeno rilasciato quando il rame viene riscaldato reagisce con il monossido di carbonio e viene eliminato sotto forma di anidride carbonica. Il miglior rame privo di ossigeno contiene il 99,97% di Cu. Un metallo ancora più puro è il rame sottovuoto, fuso in forni a induzione sottovuoto in crogioli di grafite a una pressione di gas residua di circa 10^{-3} Pa. Può contenere il 99,99% di Cu. Il rame senza ossigeno presenta poche differenze in termini di resistenza meccanica e conducibilità elettrica rispetto al rame elettrolitico fuso in modo tradizionale. Il suo vantaggio significativo è l'elevata duttilità.

La conducibilità specifica del rame è molto sensibile alla presenza di impurità. Ad esempio, se il rame contiene lo 0,5% di impurità di Zn, Cd o Ag, la sua conduttività specifica diminuisce del 5%. Con lo stesso contenuto di Ni, Sn o Al, la conduttività specifica del rame diminuisce del 25-40%. Allo stesso tempo, gli additivi di molti metalli aumentano la resistenza meccanica e la durezza del rame sia allo stato trafilato a freddo che a quello ricotto.

Lo svantaggio del rame è la sua suscettibilità alla corrosione atmosferica con la formazione di pellicole di ossido e solfuro. Il tasso di ossidazione aumenta rapidamente con il riscaldamento (vedi fig. 2.3), ma la forza di adesione del film di ossido al metallo è bassa. A causa dell'ossidazione, il rame non è adatto ai contatti a bassa corrente. Alle alte temperature di un arco elettrico, l'ossido di rame si dissocia, esponendo la superficie del metallo. La delaminazione del metallo e la decomposizione termica del film di ossido causano una maggiore usura dei contatti in rame ad alte correnti.

L'idrogeno ha un impatto significativo sulle proprietà meccaniche del rame. Dopo la ricottura con idrogeno, la durezza del rame può diminuire di diverse volte. L'effetto distruttivo dell'idrogeno è particolarmente marcato in presenza di ossigeno, che è presente nel rame industriale sotto forma di Cu_2O . L'idrogeno penetra facilmente in profondità nel metallo a temperature elevate e reagisce.

Il rame viene utilizzato in elettrotecnica per produrre fili, cavi, sbarre di commutazione, avvolgimenti di trasformatori, macchine elettriche, parti conduttive di dispositivi e apparecchi e anodi nella galvanica e nella placcatura galvanica. Le strisce di rame sono utilizzate come schermi per i cavi. Il rame massiccio viene utilizzato nei casi in cui è necessario garantire una resistenza meccanica, una durezza e una resistenza all'abrasione particolarmente elevate, ad esempio per la produzione di fili non isolati. Se sono richieste buona flessibilità e duttilità, e la resistenza alla trazione non è essenziale, è più adatto il rame morbido. Le qualità speciali di rame da vuoto sono utilizzate per la produzione di parti di klystron, magnetron, anodi di potenti generatori di lampade, uscite di potenza di dispositivi a microonde e alcuni tipi di guide d'onda e risonatori. Inoltre, il rame è utilizzato per la produzione di lamine

di getinax ed è impiegato nella microelettronica sotto forma di film depositati su substrati che fungono da interconnessione tra gli elementi funzionali dei circuiti.

Il secondo materiale conduttore più importante è l'alluminio, un metallo bianco-argento, il più importante dei cosiddetti metalli leggeri. La resistività dell'alluminio è 1,6 volte superiore a quella del rame, ma l'alluminio è 3,5 volte più leggero del rame. Grazie alla sua bassa densità, offre un'elevata conduttività per unità di massa; in altre parole, a parità di resistenza e di lunghezza, i fili di alluminio sono due volte più leggeri di quelli di rame, nonostante la sezione trasversale maggiore. Inoltre, rispetto al rame, l'alluminio è molto più comune in natura ed è caratterizzato da un costo inferiore. Questi fattori contribuiscono alla diffusione dell'alluminio nell'ingegneria elettrica.

Lo svantaggio dell'alluminio è la sua bassa resistenza meccanica. L'alluminio ricotto ha una resistenza alla trazione tre volte inferiore a quella del rame ricotto.

L'alluminio viene prodotto per elettrolisi dell'allumina Al_2O_3 in una colata di criolite Na_3AlF_6 alla temperatura di $950^\circ C$.

Per scopi elettrici, si utilizza alluminio di purezza tecnica AE, contenente non più dello 0,5% di impurità. I fili di alluminio ricotti a $350 \pm 20^\circ C$ hanno una resistività a $20^\circ C$ non superiore a $0,0280 \mu\Omega \cdot m$. L'alluminio di elevata purezza A97 (non più dello 0,03% di impurità) è utilizzato per produrre fogli di alluminio, elettrodi e alloggiamenti di condensatori elettrolitici. L'alluminio di elevata purezza A999 ha impurità non superiori allo 0,001%. La sua purezza è controllata dal valore della resistività residua alla temperatura dell'elio liquido, che non deve superare $4 \cdot 10^{-6} \mu\Omega \cdot m$.

Diverse impurità riducono la conduttività specifica dell'alluminio in misura variabile. L'aggiunta di impurità come nichel, silicio, zinco, ferro, arsenico, antimonio, piombo e bismuto nella misura dello 0,5% riduce la conduttività specifica dell'alluminio di non più del 2-3%. Le impurità di rame, argento e magnesio hanno un effetto più evidente, riducendola del 5-10% a parità di peso. Anche gli additivi di vanadio, titanio e manganese riducono significativamente la conduttività specifica dell'alluminio. Le principali impurità dell'alluminio tecnico sono il silicio e il ferro.

L'alluminio viene laminato, trafilato e ricotto allo stesso modo del rame. La laminazione dell'alluminio può essere utilizzata per produrre fogli molto sottili (6-7 micron) utilizzati come rivestimento dei condensatori di carta o delle piastre dei condensatori a capacità variabile.

La dipendenza di alcune proprietà fisiche dell'alluminio dalla temperatura è mostrata nella fig. 2.4. È interessante notare che alla temperatura dell'azoto liquido, l'alluminio è quasi paragonabile al rame in termini di resistività, e a temperature ancora più basse diventa addirittura

migliore del rame. Pertanto, l'uso dell'alluminio come crioconduttore è promettente.

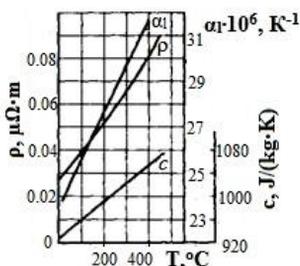


Fig. 2.4. Dipendenza dalla temperatura della resistività ρ , della capacità termica specifica c e del coefficiente di espansione lineare α per l'alluminio.

L'alluminio viene ossidato attivamente e ricoperto da una sottile pellicola di ossido ad alta resistenza elettrica. Tale pellicola protegge l'alluminio dalla corrosione, ma crea un'elevata resistenza transitoria nei punti di contatto dei fili di alluminio, rendendo impossibile la brasatura dell'alluminio con i metodi convenzionali. Per questo motivo, per brasare l'alluminio si utilizzano paste saldanti speciali o ferri da saldatura a ultrasuoni. Uno strato di ossido più spesso, che crea un isolamento elettrico affidabile per tensioni relativamente elevate, si ottiene con un trattamento elettrochimico dell'alluminio.

L'isolamento in ossido è meccanicamente forte e resistente al calore. Può essere relativamente sottile (uno strato di ossido di 0,03 mm di spessore ha una tensione di rottura di circa 100 V, mentre uno strato di 0,04 mm di spessore ha una tensione di rottura di circa 250 V).

Diverse bobine sono realizzate in alluminio ossidato. Gli svantaggi dell'isolamento in ossido sono la sua limitata flessibilità (soprattutto quando lo strato di ossido è spesso) e la notevole igroscopicità (nei casi in cui non è richiesta un'elevata resistenza al calore, l'isolamento in ossido viene verniciato).

L'isolamento all'ossido è il più utilizzato nei condensatori elettrolitici. Viene utilizzato anche in alcuni tipi di raddrizzatori e scaricatori.

In pratica, è importante proteggere dalla corrosione galvanica le aree di contatto tra alluminio e rame. Se l'area di contatto è esposta all'umidità, si forma una coppia galvanica locale con un valore di emf sufficientemente elevato e la polarità di questa coppia è tale che la corrente viene diretta dall'alluminio al rame sulla superficie esterna del contatto, con il risultato che il conduttore di alluminio può essere gravemente danneggiato dalla corrosione. Pertanto, le giunzioni tra i conduttori di

rame e alluminio devono essere accuratamente protette dall'umidità (verniciate, ecc.).

I film di alluminio sono ampiamente utilizzati nei circuiti integrati come contatti e connessioni conduttive. I film sono solitamente depositati su wafer di silicio mediante evaporazione e condensazione nel vuoto. Il modello di connessione richiesto viene creato con la fotolitografia. I vantaggi dell'alluminio come materiale di contatto sono la facilità di spruzzatura, la buona adesione al silicio e la buona risoluzione in fotolitografia. Inoltre, l'alluminio forma buoni contatti ohmici con il silicio.

Lo svantaggio dell'alluminio è la sua significativa tendenza all'elettromigrazione, che porta a un aumento della resistenza o addirittura alla rottura dei collegamenti.

2.7. Superconduttori

Il fenomeno della superconduttività. Molti metalli e leghe mostrano una forte diminuzione della resistività a temperature prossime allo zero assoluto. Questo fenomeno è chiamato superconduttività e la temperatura T_{sc} alla quale avviene la transizione allo stato superconduttivo è chiamata temperatura critica di transizione. La superconduttività è stata scoperta per la prima volta nel mercurio ($T_{sc} = 4,2$ K) dal fisico olandese X. Kammerling-Onnes.

Se una corrente elettrica viene indotta in un anello di superconduttore, non decadrà per molto tempo. La velocità di diminuzione del campo magnetico della corrente indotta nell'anello è stata utilizzata per stimare la resistività dei materiali allo stato superconduttore. Il suo valore era di circa 10^{-25} Ohm·m, che è 10^{17} volte inferiore alla resistenza del rame a temperatura ambiente.

Il fenomeno della superconduttività può essere compreso e dimostrato solo con l'aiuto di rappresentazioni quantistiche. Per quasi mezzo secolo dalla sua scoperta, l'essenza di questo fenomeno è rimasta irrisolta perché i metodi della meccanica quantistica non sono ancora stati pienamente utilizzati nella fisica dello stato solido. La teoria microscopica della superconduttività fu proposta nel 1957 dagli scienziati americani Bardeen, Cooper e Schrieffer (teoria BCS). Lo scienziato sovietico N. N. Bogolyubov ha dato un contributo significativo allo sviluppo della teoria della superconduttività.

Il fenomeno della superconduttività si verifica quando gli elettroni di un metallo sono attratti l'uno dall'altro. L'attrazione degli elettroni è possibile solo in un ambiente contenente ioni con carica positiva, il cui campo indebolisce le forze di repulsione di Coulomb tra gli elettroni. Solo gli elettroni che partecipano alla conduzione elettrica, cioè quelli che si trovano vicino al livello di Fermi, possono essere attratti. Se si verifica questa attrazione, gli elettroni con direzioni opposte di quantità di moto e

spin si legano in coppie, chiamate coppie di Cooper. Nella formazione delle coppie di Cooper, l'interazione degli elettroni con le vibrazioni termiche del reticolo - i fononi - gioca un ruolo fondamentale. In un solido, gli elettroni possono sia assorbire che generare fononi. L'interazione di scambio dei fononi provoca forze attrattive tra gli elettroni che superano le forze repulsive di Coulomb. Lo scambio di fononi che coinvolge il reticolo è continuo.

Poiché le forze attrattive sono piccole, gli elettroni accoppiati sono scarsamente localizzati nello spazio. Il diametro effettivo di una coppia di Cooper è dell'ordine di 10^{-7} m, cioè copre migliaia di celle elementari. Queste formazioni di coppie si sovrappongono l'una all'altra, si disintegrano e si riformano continuamente, ma in generale tutte le coppie formano un condensato di elettroni la cui energia è inferiore a quella di un insieme di elettroni normali disconnessi a causa dell'interazione interna. Di conseguenza, nello spettro energetico del superconduttore compare un gap energetico di 2Δ , una regione di stati energetici proibiti. Gli elettroni accoppiati si trovano in fondo al gap energetico. La dimensione del gap energetico dipende dalla temperatura, raggiungendo un valore massimo allo zero assoluto e scomparendo completamente a $T = T_{sc}$. La teoria BCS fornisce la seguente relazione tra l'ampiezza del band gap e la temperatura critica di transizione

$$2\Delta = 3,52kT_{sc} \quad (2.20)$$

La formula (2.20) è ben confermata sperimentalmente. Per la maggior parte dei superconduttori, il gap energetico è di 10^{-4} - 10^{-3} eV.

Come è stato dimostrato, la resistenza elettrica di un metallo è dovuta alla dispersione degli elettroni sulle vibrazioni termiche del reticolo e sulle impurità. Tuttavia, in presenza di una lacuna energetica, la transizione degli elettroni dallo stato fondamentale allo stato eccitato richiede una porzione sufficiente di energia termica, che a basse temperature gli elettroni non possono ricevere dal reticolo, poiché l'energia delle vibrazioni termiche è inferiore all'ampiezza della lacuna. Per questo motivo gli elettroni accoppiati non si disperdono sui difetti della struttura. La peculiarità delle coppie di Cooper è il loro ordine di quantità di moto, il che significa che tutte le coppie hanno la stessa quantità di moto e non possono cambiare stato indipendentemente l'una dall'altra. Le onde elettroniche che descrivono il moto delle coppie hanno la stessa lunghezza e fase. Infatti, il moto di tutte le coppie di elettroni può essere considerato come la propagazione di un'unica onda di elettroni che non viene dispersa dal reticolo e "scorre intorno" ai difetti della struttura. Questa coerenza nel comportamento delle coppie è dovuta all'elevata mobilità del condensato di elettroni: gli insiemi di coppie cambiano continuamente e c'è un costante cambiamento di partner.

Allo zero assoluto, tutti gli elettroni situati vicino al livello di Fermi sono legati a coppie. Quando la temperatura aumenta per effetto

dell'energia termica, alcune coppie di elettroni si rompono, con conseguente diminuzione dell'ampiezza del band gap. Il movimento degli elettroni non accoppiati che passano dal livello di massa a quello eccitato è ostacolato dallo scattering sui difetti del reticolo. Alla temperatura di $T = T_{sc}$, tutte le coppie si rompono completamente, il band gap diventa nullo e la superconduttività scompare.

La caratteristica più importante dei superconduttori è che il campo magnetico esterno non penetra affatto nello spessore del campione, smorzandosi nello strato più sottile. Le linee del campo magnetico si piegano intorno al superconduttore. Questo fenomeno, chiamato effetto Meissner, è dovuto al fatto che nello strato superficiale del superconduttore, quando viene introdotto in un campo magnetico, si genera una corrente circolare non smorzata che compensa completamente il campo esterno nello spessore del campione. La profondità di penetrazione del campo magnetico è solitamente di 10^{-7} - 10^{-8} m. Pertanto, in termini di proprietà magnetiche, i superconduttori sono diamagneti ideali con una permeabilità magnetica di $\mu = 0$. Come qualsiasi diamagnete, i superconduttori sono spinti fuori dal campo magnetico. In questo caso, l'effetto di espulsione è così forte che è possibile trattenere un carico nello spazio con l'aiuto di un campo magnetico. In modo simile, un magnete permanente può essere appeso sopra un anello di materiale superconduttore, in cui circolano correnti indotte magneticamente e non smorzate.

Lo stato superconduttivo può essere distrutto se l'intensità del campo magnetico supera un certo valore critico, H_{sc} . In base alla natura della transizione del materiale dallo stato superconduttivo allo stato di ordinaria conducibilità elettrica sotto l'influenza di un campo magnetico, si distinguono superconduttori di I e II tipo. Nei superconduttori del primo tipo, questa transizione avviene bruscamente non appena l'intensità del campo raggiunge un valore critico. I superconduttori del secondo tipo passano gradualmente da uno stato all'altro; per essi esistono intensità di campo critiche inferiori H_{sc1} e superiori H_{sc2} . Nell'intervallo tra questi, il materiale si trova in uno stato eterogeneo intermedio in cui coesistono fasi normali e superconduttrici. Il rapporto tra i loro volumi dipende da H . Pertanto, il campo magnetico penetra gradualmente nel superconduttore del secondo tipo. Tuttavia, il materiale mantiene una resistenza nulla fino all'intensità di campo critica superiore.

L'intensità del campo magnetico critico dipende dalla temperatura. A $T = T_{sc}$, diventa zero, ma aumenta monotonicamente quando la temperatura tende a 0 K. Per i superconduttori di tipo I, la dipendenza dalla temperatura di H_{sc} è descritta con buona approssimazione dall'espressione:

$$H_{sc}(T) = H_{sc}(0)[1 - (T/T_{sc})^2] \quad (2.21)$$

dove $H_{sc}(0)$ è l'intensità di campo critica alla temperatura dello zero assoluto.

L'intensità del campo magnetico critico per i superconduttori di tipo I è di circa 10^5 A/m, mentre per i superconduttori di tipo II il valore dell'intensità critica superiore può superare 10^7 A/m

La superconduttività può essere distrutta non solo da un campo magnetico esterno, ma anche dalla corrente che scorre attraverso il superconduttore, se supera un certo valore critico di I_{sc} . Per i superconduttori di tipo I, la densità di corrente limite è limitata dall'intensità del campo magnetico critico raggiunto sulla superficie del campione. Nel caso di un lungo filo rettilineo di sezione circolare con raggio r , la corrente limite è determinata dalla formula:

$$I_{sc} = 2\pi r H_{sc}(T) \quad (2.22)$$

Poiché negli elementi superconduttori la corrente scorre in un sottile strato superficiale, la densità media di corrente, riferita all'intera sezione trasversale, diminuisce all'aumentare del diametro del filo. Per i superconduttori del secondo tipo, la relazione (2.22) non è soddisfatta e la relazione tra I_{sc} e N_{sc} è più complessa.

Il fenomeno della superconduttività a temperature criogeniche è piuttosto diffuso in natura. Esistono 26 metalli con superconduttività. La maggior parte di essi sono superconduttori del primo tipo con temperature critiche di transizione inferiori a 4,2 K. Questo è uno dei motivi per cui la maggior parte dei metalli superconduttori non può essere utilizzata per scopi elettrici. Altri 13 elementi presentano proprietà superconduttive ad alte pressioni. Tra questi ci sono semiconduttori come il silicio, il germanio, il selenio, il tellurio, l'antimonio, ecc. Va notato che i metalli che sono i migliori conduttori in condizioni normali non hanno la superconduttività. Si tratta di oro, rame e argento. La bassa resistenza di questi materiali indica una debole interazione degli elettroni con il reticolo. Questa debole interazione non crea un'attrazione di elettroni sufficiente vicino allo zero assoluto per superare la repulsione di Coulomb. Pertanto, la loro transizione allo stato superconduttore non avviene.

Oltre ai metalli puri, molti composti intermetallici e leghe presentano superconduttività. Il numero totale di superconduttori attualmente conosciuti è di circa 2000. Tra questi, le leghe e i composti di niobio presentano i parametri critici più elevati (Tabella 2.1). Alcuni di essi consentono di utilizzare un refrigerante più economico, l'idrogeno liquido, invece dell'elio liquido, per raggiungere lo stato superconduttivo. Recentemente sono stati scoperti materiali superconduttori con $T_{sc} > 77$ K (vedi sotto).

Tabella 2.1. Proprietà di base di alcune leghe superconduttrici

Material	T _{sc} , K	Features
V ₃ Ga	14,8	Satisfactory mechanical properties
V ₃ Si	17,0	Same
Ni ₃ Sn	18,3	High current density, manufacturability
Nb ₃ Ga	20,3	High transition temperature, manufacturability
Nb ₃ Ge	21-24,3	The highest transition temperature

Tutti i composti intermetallici e le leghe sono classificati come superconduttori di tipo II. Tuttavia, la divisione delle sostanze in due tipi in base alle loro proprietà superconduttive non è assoluta. Qualsiasi superconduttore di tipo I può essere trasformato in un superconduttore di tipo II creando una concentrazione sufficiente di difetti reticolari nel cristallo. La superconduttività non è mai stata osservata in sistemi con ferro- o antiferromagnetismo. La formazione di uno stato superconduttore nei semiconduttori e nei dielettrici è impedita dalla bassa concentrazione di elettroni liberi. Tuttavia, nei materiali con un'elevata costante dielettrica, le forze di repulsione coulombiana tra gli elettroni sono notevolmente indebolite. Pertanto, alcuni di essi presentano anche proprietà superconduttive a basse temperature. Un esempio è il titanato di stronzio (SrTiO₃), che appartiene al gruppo dei ferroelettrici. Alcuni semiconduttori possono essere trasformati in uno stato superconduttore aggiungendo una grande concentrazione di impurità di lega (GeTe, SnTe, CuS, ecc.).

Oggi l'industria produce un'ampia gamma di fili e nastri superconduttori per diversi scopi. La produzione di questi conduttori è associata a grandi difficoltà tecnologiche. Queste sono dovute alle scarse proprietà meccaniche di molti superconduttori, alla loro bassa conducibilità termica e alla complessa struttura dei fili. Le giunzioni intermetalliche con parametri critici elevati sono particolarmente fragili. Pertanto, invece di semplici fili e nastri, è necessario creare composizioni di due (di solito un superconduttore con il rame) o addirittura più metalli. Per produrre fili a trefoli da intermetalli fragili, è particolarmente promettente il cosiddetto metodo del bronzo, già sperimentato dall'industria. Questo metodo utilizza la pressatura e la trafilatura per creare una composizione di sottili filamenti di niobio in una matrice di stagno-bronzo. Quando viene riscaldato, lo stagno si diffonde nel niobio, formando una sottile pellicola superconduttiva sulla sua superficie. Tale imbracatura può essere piegata, ma le pellicole rimangono intatte.

Gli elementi e i dispositivi superconduttori sono sempre più utilizzati in un'ampia varietà di campi della scienza e della tecnologia.

Sono stati sviluppati programmi a lungo termine su larga scala per l'uso industriale della superconduttività.

Una delle principali applicazioni dei superconduttori è legata alla generazione di campi magnetici superforti. I solenoidi superconduttori consentono di ottenere campi magnetici omogenei con un'intensità superiore a 10^7 A/m in un'area abbastanza ampia dello spazio, mentre il limite degli elettromagneti convenzionali con nuclei di ferro è di circa 10^6 A/m. Inoltre, i sistemi magnetici superconduttori fanno circolare una corrente non smorzata, quindi non è necessaria una fonte di alimentazione esterna. Per la ricerca scientifica sono necessari forti campi magnetici. I solenoidi superconduttori possono ridurre significativamente le dimensioni e il consumo energetico dei sincrofasotroni e di altri acceleratori di particelle. È promettente l'uso di sistemi magnetici superconduttori per il contenimento del plasma nei reattori a fusione controllata, nei convertitori magnetoidrodinamici (MHD) da calore a elettricità e come dispositivi di accumulo di energia induttiva per coprire i picchi di potenza su scala di grandi sistemi di alimentazione. Lo sviluppo di macchine elettriche con avvolgimenti di eccitazione superconduttori è in fase di sviluppo. La creazione di trasformatori superconduttori progettati per alti livelli di potenza è economicamente giustificata. In diversi Paesi si presta molta attenzione allo sviluppo di linee elettriche superconduttrici in corrente alternata e continua. Sono stati sviluppati prototipi di bobine superconduttrici pulsate per l'alimentazione di cannoni al plasma e sistemi di pompaggio per laser a stato solido. I risonatori bulk superconduttori con proprietà superconduttive sono utilizzati nella radiotecnica. Il principio dell'espulsione meccanica dei superconduttori da un campo magnetico è alla base della creazione di un trasporto ferroviario ad altissima velocità su un "cuscinetto magnetico".

L'uso dei superconduttori apre ampie prospettive per la tecnologia di misura. Integrando le capacità degli strumenti di misura esistenti, gli elementi superconduttori consentono di registrare effetti fisici molto sottili, di misurare con elevata precisione e di elaborare grandi quantità di informazioni.

Sulla base della superconduttività sono già stati creati bolometri altamente sensibili per la registrazione della radiazione infrarossa, magnetometri per la misurazione di deboli flussi magnetici e indicatori di tensioni e correnti bassissime.

Nel 1986, Karl Müller e Georg Bednorz hanno scoperto il primo composto della classe dei superconduttori ad alta temperatura della cuprite $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$. Per questa scoperta hanno ricevuto il premio Nobel nel 1987. I superconduttori ad alta temperatura sono una famiglia di materiali (ceramiche superconduttrici) con una caratteristica strutturale comune, piani di rame-ossigeno relativamente ben separati. Sono anche chiamati superconduttori a base di cuprite. La temperatura di transizione

superconduttiva che può essere raggiunta in alcune composizioni di questa famiglia è la più alta di tutti i superconduttori conosciuti. Attualmente, il valore record della temperatura critica $T_c = 135$ K (sotto pressione $T_c = 165$ K) è detenuto dalla sostanza $HgBa_2Ca_2CuO_{38+x}$, scoperta nel 1993. S. N. Putilin e E. V. Antipov dell'Università Statale di Mosca. Gli stati normali (e superconduttori) mostrano molte caratteristiche comuni tra le diverse composizioni di cuprati. Molte di queste proprietà non possono essere spiegate nell'ambito della teoria di BKS. Attualmente non esiste una teoria coerente della superconduttività nei cuprati. Tuttavia, il problema ha portato a molti risultati sperimentali e teorici.

2.8. Metalli e leghe per vari scopi. Leghe ad alta resistenza.

Le leghe ad alta resistenza sono materiali conduttori il cui valore ρ in condizioni normali è di almeno $0,3 \mu\Omega\cdot m$. Sono utilizzate nella produzione di strumenti di misura elettrici, resistenze di riferimento, reostati e dispositivi di riscaldamento elettrico. Quando le leghe sono utilizzate negli strumenti di misura elettrici, è necessario che non solo abbiano un'elevata resistività, ma anche un valore $\alpha\rho$ più basso possibile, nonché un basso coefficiente di espansione termica rispetto al rame. Nei dispositivi di riscaldamento elettrico, i materiali conduttori devono funzionare a lungo in aria a temperature di circa $1000^\circ C$. Tra i numerosi materiali utilizzabili a questo scopo, i più comuni nella pratica sono le leghe a base di rame, come il manganese e la costantana, nonché le leghe di cromo-nichel e ferro-alluminio.

Il manganese è la principale lega a base di rame per gli strumenti di misura elettrici e le resistenze di riferimento. Il manganese è caratterizzato da una tonalità giallastra ed è ben trafilato in fili sottili fino a un diametro di $0,02$ mm. Il manganese viene utilizzato anche per produrre nastri con uno spessore di $0,01-1$ mm e una larghezza di $10-300$ mm.

Il costantano è una lega di rame e nichel. Il contenuto di nichel nella lega corrisponde approssimativamente al massimo ρ e al minimo $\alpha\rho$ per le leghe Cu-Ni. Il costantano è facile da lavorare; può essere trafilato in fili e laminato in nastri delle stesse dimensioni del manganese. Il valore $\alpha\rho$ del costantano è prossimo allo zero e di solito ha un segno negativo.

Il costantano viene utilizzato per la produzione di reostati ed elementi riscaldanti elettrici nei casi in cui la temperatura di esercizio non superi i $400-450^\circ C$.

Se riscaldata a una temperatura sufficientemente elevata, sulla superficie della costantana si forma una pellicola di ossido che ha proprietà di isolamento elettrico. Il filo di costantana rivestito di tale isolamento può essere avvolto strettamente, bobina per bobina, senza molto isolamento tra le bobine, a meno che la tensione tra le bobine adiacenti non superi 1 V. È così che vengono realizzati, ad esempio, i reostati. L'ossidazione di un filo di costantana, che produce una pellicola

di ossido abbastanza flessibile e durevole, richiede un riscaldamento rapido (non più di 3 secondi) del filo a una temperatura di 900°C, seguito da un raffreddamento ad aria.

Il costantana accoppiato al rame o al ferro presenta un'elevata emf termica. Questo è uno svantaggio quando si utilizzano resistenze in costantana nei circuiti di misura. A causa della differenza di temperatura nei punti di contatto dei conduttori di costantana con il rame, si verificano emf termiche che possono essere fonte di errori, soprattutto nelle misure di zero nei ponti e nei circuiti potenziometrici.

Il costantana viene utilizzato con successo per realizzare termocoppie che misurano la temperatura se quest'ultima non supera le diverse centinaia di gradi.

Le leghe di cromo-nichel (nichromi) sono utilizzate per produrre elementi riscaldanti per forni elettrici, piastrelle, saldatori, ecc. Queste leghe sono utilizzate per produrre fili di diametro pari o superiore a 0,02 mm e nastri di sezione pari o superiore a 0,1 x 1,0 mm.

L'elevata resistenza al calore del nichelcromo si spiega con la notevole resistenza di questa lega all'ossidazione progressiva in aria ad alte temperature.

La resistenza delle leghe di cromo-nichel alle alte temperature in aria è spiegata dai valori vicini dei coefficienti di temperatura di espansione lineare delle leghe e dei loro film di ossido. Pertanto, questi ultimi non si incrinano o si separano dal filo quando questo viene riscaldato ed espanso. Tuttavia, sebbene i coefficienti di espansione termica della lega e degli ossidi di cromo e nichel siano vicini, non sono gli stessi. Di conseguenza, lo strato di ossido può incrinarsi in caso di bruschi cambiamenti di temperatura. Durante il successivo riscaldamento, l'ossigeno penetra nelle crepe e provoca un'ulteriore ossidazione della lega. Di conseguenza, in caso di ripetute accensioni di breve durata, un elemento di riscaldamento elettrico in lega di cromo-nichel può bruciarsi più rapidamente rispetto al caso di un riscaldamento continuo (la temperatura di riscaldamento è la stessa in entrambi i casi, e la durata può differire di un fattore 20-30).

La durata degli elementi riscaldanti può essere aumentata inserendo le spirali in un mezzo solido inerte, come la chamotte di argilla, che le protegge dalle sollecitazioni meccaniche e impedisce l'accesso all'ossigeno.

Le pellicole sottili di nichelcromo X20N80 prodotte per evaporazione termica e condensazione nel vuoto sono ampiamente utilizzate per la produzione di resistenze a film sottile, in particolare di resistenze per circuiti integrati. La composizione chimica dei film può differire in modo significativo da quella della lega originale evaporata, a causa delle differenze significative nella pressione di vapore del nichel e del cromo alle temperature di evaporazione. Pertanto, la composizione del

condensato dipende da molti fattori tecnologici: velocità di deposizione, temperatura e materiale del substrato, pressione di vapore residua nella camera, ecc.

Leghe per termocoppie. La maggior parte delle termocoppie è costituita da leghe metalliche. Va notato che esistono materiali con valori di emf termoelettrici molto più elevati. Questi materiali includono principalmente i semiconduttori. Tuttavia, la tecnologia per la produzione di termocoppie da semiconduttori è molto complessa e imperfetta.

Le leghe più comunemente utilizzate per la produzione di termocoppie sono le seguenti:

1) copel (56% Cu e 44% Ni); 2) allumel (95% Ni, il resto è Al, Si e Mn); 3) chromel (90% Ni e 10% Cr); 4) platinum (90% Pt e 10% Rh).

La dipendenza della FEM termica dalla differenza di temperatura tra le giunzioni calde e fredde per diverse termocoppie è illustrata nella Fig. 2.5.

Una variazione, anche piccola, della composizione della lega può portare a cambiamenti significativi nei valori di termo-EMF. In questi casi, per ottenere un'elevata precisione di misura con le termocoppie, è necessaria una calibrazione preliminare invece di utilizzare le tabelle standard.

Limiti superiori di temperatura per le termocoppie: platino - platino fino a 1600°C; rame - costante e rame - rame fino a 350°C; ferro - costante, ferro - rame e cromo - cromo fino a 600°C; cromo - allumel fino a 900-1000°C.

Tra le termocoppie metalliche conosciute, la termocoppia chromel-copel presenta l'emf termoelettrica più elevata a parità di differenza di temperatura. Il segno termoelettrico delle termocoppie mostrate in fig. 2.5 è il seguente: nella giunzione fredda, la corrente è diretta dal primo materiale nominato nella coppia al secondo (da chromel a copel, da rame a costante, ecc.), e nella giunzione calda - viceversa.

La maggior parte delle termocoppie funziona in modo stabile in un ambiente ossidante. Durante il funzionamento a lungo termine, si può osservare una graduale variazione dell'emf termica. Le ragioni di questa instabilità sono la contaminazione con impurità provenienti dall'atmosfera circostante, l'ossidazione del filo, la volatilità dei componenti, le curve strette e le deformazioni meccaniche che introducono stress interno e creano eterogeneità strutturale. Le termocoppie in platino-rodio presentano la massima stabilità, precisione e riproducibilità, nonostante il basso valore di emf termica. Ciò è dovuto all'inerzia chimica del materiale e all'elevato grado di purezza del materiale ottenuto.

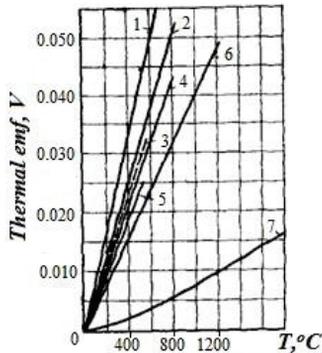


Fig. 2.5. Dipendenza del termoEMF dalla differenza di temperatura delle giunzioni calde e fredde per le termocoppie: 1 - cromel - copel, 2 - ferro - copel, 3 - rame - copel, 4 - ferro - costantana, 5 - rame - costantana, 6 - cromel - allumel, 7 - platinorodio - platino

Materiali non metallici che conducono corrente. Oltre ai metalli e alle leghe metalliche, vari materiali compositi, alcuni ossidi e modifiche del carbonio sono ampiamente utilizzati come elementi resistivi, di contatto e conduttori. Di norma, questi materiali hanno uno scopo altamente specializzato.

Tra i conduttori solidi non metallici, la grafite, una delle forme allotropiche del carbonio puro, è la più utilizzata nell'ingegneria elettrica. Oltre alla bassa resistività, le preziose proprietà della grafite includono una notevole conducibilità termica, la resistenza ad ambienti chimicamente aggressivi, un'elevata resistenza al calore e la facilità di lavorazione. La grafite naturale, l'antracite e il carbonio pirolitico sono utilizzati per produrre prodotti di carbonio elettrico.

La grafite naturale è un materiale cristallino di grandi dimensioni con un punto di fusione molto elevato (circa 3900°C). In condizioni di libero accesso all'ossigeno e ad alta temperatura, si ossida formando ossidi gassosi di C e CO₂.

Il carbonio pirolitico viene prodotto per decomposizione termica di vapori di idrocarburi nel vuoto o in un ambiente con gas inerte (pirolisi). I composti del metano sono solitamente scelti come sostanze da pirolizzare. Per ottenere una struttura densa, è necessaria una temperatura di pirolisi di almeno 900°C. I film di carbonio pirolitico sono ampiamente utilizzati per produrre resistenze lineari di tipo superficiale.

Il nerofumo è una forma fine di carbonio. Si ottiene come prodotto della combustione incompleta o della decomposizione termica di sostanze contenenti carbonio. Quando viene incorporato in un legante, il nero di carbonio tende a formare delle strutture.

La produzione della maggior parte dei prodotti in carbonio prevede la macinazione delle materie prime in polvere, la miscelazione con leganti, lo stampaggio e la cottura, al termine dei quali il prodotto presenta una resistenza meccanica e una durezza sufficienti e può essere lavorato.

La grafite è ampiamente utilizzata nella tecnologia dei materiali per semiconduttori per produrre vari tipi di riscaldatori e schermi, navette, crogioli, cassette, ecc. In ambienti sotto vuoto o con gas protettivo, i prodotti in grafite possono funzionare a temperature fino a 2500°C.

Una speciale modifica della grafite è il carbonio vetroso, che si ottiene dalla polimerizzazione di resine polimeriche organiche come la bachelite, effettuata in un'atmosfera di gas neutri per lungo tempo. I prodotti ottenuti hanno una superficie lucida, un aspetto vetroso e una frattura a guscio. Il carbonio vetroso si differenzia dalla grafite ordinaria per la maggiore resistenza chimica.

Esistono materiali compositi che conducono corrente. I materiali compositi sono una miscela meccanica di un riempimento conduttivo e di un legame dielettrico. Modificando la composizione e la distribuzione dei componenti, le proprietà elettriche di tali materiali possono essere controllate entro un intervallo piuttosto ampio. Una caratteristica di tutti i materiali compositi è la dipendenza dalla frequenza della conduttività e l'invecchiamento sotto carico prolungato. In alcuni casi, la non linearità delle proprietà elettriche è notevolmente pronunciata. Come componenti della fase conduttiva vengono utilizzati metalli, grafite, nerofumo, alcuni ossidi e carburi. I dielettrici organici e inorganici possono fungere da legante.

Tra i vari materiali conduttivi combinati, i più importanti sono i contattori e i cermet.

I contattanti sono utilizzati come adesivi conduttivi, vernici, rivestimenti e smalti. Si tratta di composizioni polimeriche a bassa viscosità o simili a paste. Come leganti si utilizzano varie resine sintetiche e come riempitivi conduttivi polveri metalliche fini (argento, nichel, palladio). La viscosità richiesta del contactol è assicurata dall'uso di solventi (acetone, alcol, ecc.) prima di applicarlo alla superficie. I materiali di contatto sono utilizzati per creare contatti tra metalli, metalli e semiconduttori, per creare elettrodi su materiali dielettrici, per schermare stanze e dispositivi dalle interferenze, per comunicazioni conduttive su substrati dielettrici, in guide d'onda flessibili e altri prodotti elettronici.

I cermet sono composizioni metallo-dielettriche con un legante inorganico. Vengono utilizzati per realizzare resistenze a film sottile. Un vantaggio significativo dei film di cermet è la possibilità di variare la loro resistività in un ampio intervallo. Il più utilizzato è la microcomposizione Cr-SiO₂, i cui film sottili sono realizzati per evaporazione termica e condensazione sotto vuoto, seguiti da un trattamento termico per stabilizzarne le proprietà.

I microcircuiti a film spesso utilizzano resistenze realizzate con una composizione di vetro con palladio e argento.

Materiali basati su ossidi conduttori. Il biossido di stagno è quello di maggiore interesse pratico. Nella radioelettronica viene utilizzato principalmente sotto forma di film sottili. Tali film sono prodotti con vari metodi: evaporazione e condensazione termica sotto vuoto seguita da ricottura in aria, sputtering catodico o al plasma ionico, ecc. L'ossido è caratterizzato da un'adesione molto forte ai substrati di ceramica o vetro. La forza di adesione raggiunge i 20 MPa, molto più alta di quella dei film metallici. La resistività dei film dipende dal grado di disturbo stechiometrico e può raggiungere i 10^{-5} Ohm·m. Il riscaldamento dei film di SnO₂ al di sopra dei 240°C porta a un cambiamento irreversibile della resistenza come risultato di un'ossidazione più completa. Allo stesso tempo, i film sono resistenti a molti ambienti chimici: vengono distrutti solo dall'acido fluoridrico e dagli alcali bollenti. Gli strati sottili di biossido di stagno possiedono una preziosa proprietà ottica: un'elevata trasparenza nelle parti visibili e infrarosse dello spettro. L'assorbimento intrinseco dei film di SnO₂ fino a 2 micron di spessore nella parte visibile dello spettro non supera il 3%.

La combinazione di elevata trasparenza ottica e maggiore conducibilità elettrica delle pellicole di biossido di stagno le rende adatte all'uso come rivestimenti conduttivi delle pareti interne dei cilindri di vetro dei dispositivi elettrici a vuoto, degli elettrodi dei condensatori elettroluminescenti e degli indicatori a cristalli liquidi, dei tubi di trasmissione televisiva, ecc.

Oltre al biossido di stagno, i film di ossido di indio In O₂₃ hanno un'elevata conducibilità elettrica e trasparenza nello spettro visibile. Hanno applicazioni simili.

Saldatori. I saldatori sono leghe speciali utilizzate per la brasatura. La brasatura viene eseguita per creare un giunto meccanicamente forte o per creare un contatto elettrico con una bassa resistenza transitoria. Durante la brasatura, i giunti e la saldatura vengono riscaldati. Poiché la saldatura ha un punto di fusione significativamente più basso del metallo da unire, essa si scioglie, mentre il metallo di base rimane solido. All'interfaccia tra la saldatura fusa e il metallo solido si verificano diversi processi fisici e chimici. La saldatura bagna il metallo, si diffonde su di esso e riempie gli spazi tra le parti da unire. Allo stesso tempo, i componenti della saldatura si diffondono nel metallo di base, quest'ultimo si dissolve nella saldatura, dando luogo alla formazione di uno strato intermedio che, dopo la solidificazione, unisce le parti in un unico insieme.

Le saldature si dividono solitamente in due gruppi: morbide e dure. Le saldature morbide sono quelle con un punto di fusione fino a 300°C, mentre quelle dure sono quelle con un punto di fusione superiore a 300°C.

Inoltre, le saldature differiscono in modo significativo per quanto riguarda la resistenza meccanica. Le saldature morbide hanno una resistenza alla trazione di 16-100 MPa, mentre quelle dure hanno una resistenza alla trazione di 100-500 MPa.

La scelta della saldatura viene effettuata tenendo conto delle proprietà fisiche e chimiche dei metalli da unire, della resistenza meccanica richiesta per il giunto, della resistenza alla corrosione e del costo. Quando si saldano parti conduttive, si deve tenere conto della conduttività specifica della saldatura.

Le saldature morbide e dure sono utilizzate in vari campi della radioelettronica.

Le saldature morbide sono leghe stagno-piombo con un contenuto di stagno compreso tra il 10 e il 90%, mentre il resto è piombo. La conducibilità di queste saldature è pari al 9-15% di quella del rame puro. Un gran numero di saldature stagno-piombo contiene una piccola percentuale di antimonio.

Le saldature solide più comuni sono rame-zinco e argento con vari additivi.

I materiali ausiliari per una saldatura affidabile sono chiamati flussanti. Devono:

- 1) dissolvere e rimuovere ossidi e contaminanti dalla superficie dei metalli da saldare;

- 2) proteggere la superficie e la saldatura fusa dall'ossidazione durante il processo di brasatura

- 3) ridurre la tensione superficiale della saldatura fusa;

- 4) migliorare la bagnabilità della saldatura sulle superfici da unire.

I flussanti si dividono in diversi gruppi a seconda del loro effetto sul metallo da saldare.

I fondenti attivi, o acidi, sono preparati sulla base di sostanze attive come l'acido cloridrico, cloruri e fluoruri metallici, ecc. Questi flussanti dissolvono intensamente le pellicole di ossido sulla superficie del metallo, garantendo una buona adesione e, di conseguenza, un'elevata resistenza meccanica del giunto. Il flusso residuo dopo la brasatura causa un'intensa corrosione del giunto e del metallo di base. Pertanto, questi disossidanti sono utilizzati solo quando è possibile un lavaggio accurato e la rimozione completa dei loro residui.

L'uso di flussanti attivi è severamente vietato per la saldatura di assemblaggio di dispositivi elettrici e radio.

I fondenti privi di acidi sono colofonia e fondenti preparati sulla sua base con l'aggiunta di sostanze inattive (alcol, glicerina).

I fondenti attivati sono preparati a base di colofonia con l'aggiunta di attivatori - piccole quantità di acido cloridrico o fosforico, anilina, acido salicilico, acido cloridrico dietilammina, ecc. L'elevata attività di alcuni

fondenti attivati consente di saldare senza la rimozione preliminare degli ossidi dopo lo sgrassaggio.

I flussanti anticorrosione sono prodotti a base di acido fosforico con l'aggiunta di vari composti organici e solventi, nonché a base di acidi organici. I residui del flussante non causano corrosione.

2.9. Materiali nanotecnologici e nanotecnologie.

I nanomateriali sono materiali creati con l'impiego di nanoparticelle grazie alle nanotecnologie. I nanomateriali comprendono oggetti con una dimensione caratteristica compresa tra 1 e 100 nm. Esiste una divisione dei nanomateriali: strutture nanoporose, nanoparticelle, nanotubi e nanofibre, nanodispersioni (colloidi), nanocristalli e nanocluster.

In base al loro scopo, i nanomateriali si dividono in funzionali, compositi e strutturali. In base al numero di dimensioni: zero-dimensionale, unidimensionale, bidimensionale, tridimensionale.

Le proprietà dei nanomateriali sono solitamente diverse da quelle di materiali simili allo stato massivo. Ad esempio, nei nanomateriali si possono osservare cambiamenti nelle proprietà magnetiche, termiche ed elettriche. Per i materiali particolarmente piccoli, si può notare una variazione del punto di fusione verso una diminuzione.

I nanomateriali devono affrontare il problema dello stoccaggio e del trasporto. Avendo una superficie sviluppata, i materiali sono molto attivi e interagiscono facilmente con l'ambiente, soprattutto i nanomateriali metallici. L'uso dei nanomateriali non è ancora ampiamente sviluppato, poiché il loro studio dettagliato è appena iniziato e le conoscenze su questi materiali sono ancora in fase di accumulo.

I primi elementi di nanostrutture sono stati gli ammassi stabili di carbonio multiatomici C_n scoperti nel 1960, dove $n = 60, 70$ rappresenta il numero di atomi di carbonio negli ammassi più stabili. Furono chiamati fullereni in onore dell'architetto e inventore americano Richard Fuller, che propose di costruire strutture a forma di semisfere costituite da frammenti di superfici poliedriche. I fullereni sono stati ottenuti per la prima volta analizzando i prodotti ottenuti dalla radiazione laser sulla grafite.

A differenza della grafite e del diamante, che hanno reticoli periodici di atomi, i fullereni sono molecole. La struttura della molecola di C_{60} , ad esempio, è costituita da 12 pentagoni regolari (pentagoni) e 20 esagoni disuguali (fig. 2.6).

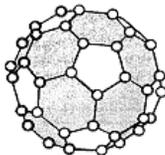


Fig. 2.6 Fullerene

Si è scoperto che alcune configurazioni di cluster sono altamente stabili e che tutti gli atomi esterni in essi contenuti sono tenuti molto stretti. Tali cluster sono chiamati cluster magici e il numero di atomi che li compongono è chiamato numero magico. Per esempio, per gli atomi di metalli alcalini, i numeri magici sono 8, 20, 40, e per gli atomi di metalli nobili, 13, 55, 137, 255. Anche il C60, il C70 e altri fullereni sono numeri magici.

A causa della varietà di additivi, il numero di varianti di materiali fullereni, semiconduttori con proprietà di metalli, ferromagneti e polimeri è stimato in migliaia.

Le molecole di C60 possono formare cristalli di cosiddette fulleriti con un reticolo di FCC e legami intermolecolari piuttosto deboli. Le cavità interatomiche dei fullereni possono essere riempite con atomi di impurità (metalli alcalini, ecc.). Come si è visto, nanomateriali con proprietà diverse, spesso uniche, sono ottenuti sulla base di fulleridi drogate con K, Rb, Cs, ecc.

Pertanto, i composti di fullerene e fulleride possono essere considerati elementi costitutivi di nanoblocchi tridimensionali.

I fullereni sono stati utilizzati nella nanoelettronica come resistenze meccanicamente forti e ad alta risoluzione. L'aggiunta di fullereni consente di aumentare la resistenza dei resistori all'incisione al plasma e di ridurre l'assorbimento ottico a una lunghezza d'onda di 0,193 micron. Nel 2000 sono stati prodotti nanotransistor basati su cluster di fullerene C60.

Nanotubi. I nanotubi sono lunghe strutture costituite da reticoli esagonali arrotolati con atomi di carbonio nei nodi. Sono stati scoperti nel 1991 dal ricercatore giapponese Sumio Iijima come sottoprodotti della sintesi dei fullereni C40, C60, C70, ecc. Lo scienziato ha studiato il precipitato che si forma sul catodo quando la grafite viene spruzzata in un arco elettrico nel vuoto o in un gas inerte. Le catene di atomi di carbonio depositate si arricciano in tubi con un diametro di alcuni nm e una lunghezza fino a diversi micron. Le estremità dei tubi sono chiuse da molecole emisferiche a uno o più strati che assomigliano alla struttura dei fullereni. È stato scoperto che i nanotubi sono molecole contenenti più di 106 atomi di carbonio e hanno la forma di tubi a parete singola con un diametro di 1,1 nm e una lunghezza di diverse decine di micrometri. Tuttavia, la lunghezza dei nanotubi di carbonio è mille volte o più del loro diametro. In linea di principio, ciò consente di utilizzare i tubi come conduttori per l'assemblaggio tridimensionale di nanocircuiti.

La struttura di un nanotubo di carbonio a parete singola è un nastro arrotolato cilindricamente con un impacchettamento di atomi simile alla grafite. I nanotubi di carbonio sono magici. Questa circostanza ha portato a prospettare la tecnologia di creazione preliminare di nanostrutture

magiche in reattori speciali e il loro successivo utilizzo nell'assemblaggio di nanotransistor.

La dipendenza delle proprietà elettriche dei nanotubi dai parametri geometrici è stata prevista sulla base di calcoli chimici quantistici della loro struttura a bande. I nanotubi di carbonio rappresentano conduttori quantistici con proprietà meccaniche quantistiche. In particolare, il band gap per gli elettroni di un conduttore quantistico aumenta con l'intensità del campo elettrico trasversale applicato. In questo caso, il band gap è inversamente proporzionale al diametro del tubo: $\Delta W_g \sim 1/d$. La progettazione di un transistor nanoelettronico a effetto di campo si basa su questi principi. Queste relazioni sono state confermate sperimentalmente nel 1998.

Nel 2004 è stato creato un nanotransistor funzionante alla frequenza di 2,6 GHz sulla base di un nanotubo di carbonio a singolo strato con elettrodi d'oro. Nello stesso anno è stato creato un nanotransistor di dimensioni record sulla base di nanotubi di carbonio più piccoli: il diametro del tubo è di 0,7-1,1 nm con una lunghezza del canale di 50 nm. Gli elettrodi di drain e source sono stati realizzati in palladio. Il transistor ha anche un rapporto di resistenza record nelle modalità chiusa e aperta - circa 10^6 .

I nanotubi hanno una serie di proprietà uniche. I nanotubi a parete singola possono essere allungati fino al 16% della loro lunghezza. La loro elevata resistenza meccanica, cento volte superiore a quella dell'acciaio, li rende adatti a essere utilizzati come sonde nei microscopi a scansione tunnel. I nanotubi possono essere utilizzati per produrre tessuti ultrasensibili ed elastici. I nanotubi con estremità aperte presentano un effetto capillare e sono in grado di attirare liquidi e metallo fuso. Ciò consente di produrre filamenti superconduttori con un diametro di diversi nanometri sulla base dei nanotubi. I nanotubi metallici possono sopportare densità di corrente molto elevate (100-1000 volte superiori a quelle dei metalli convenzionali).

Una proprietà specifica dei nanotubi è la chiralità. La chiralità è l'angolo di orientamento del piano di grafite rispetto all'asse del tubo. A seconda della chiralità, un tubo monostrato può presentare le proprietà della grafite, un semimetallo che non ha un band gap. Il nanotubo può anche avere le proprietà di un semiconduttore con un band gap di 0,01-0,70 eV. I nanotubi semiconduttori hanno la capacità di passare allo stato di isolante sotto l'influenza di un campo elettrico esterno.

Se si uniscono due nanotubi con chiralità diverse, si può creare una giunzione p-n. La dimensione di tale giunzione è di diversi nanometri e apre la possibilità di assemblare dispositivi elettronici.

Un esempio di modello della struttura di un componente elettronico con proprietà rettificanti è mostrato nella figura 2.7. Il contatto è ottenuto unendo due nanotubi di diversa chiralità. Il contatto metallo-

semiconduttore in una struttura a diodo di questo tipo può essere ottenuto riempiendo e drogando selettivamente il nanotubo di carbonio con impurità che creano conducibilità di tipo metallico e semiconduttore o dielettrico.

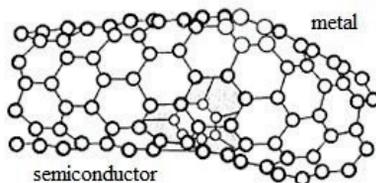


Fig. 2.7. Modello di tubo di carbonio curvo - diodo

I nanotubi hanno elevate caratteristiche emissive. Con una tensione di 500 V a temperatura ambiente, la lacuna di emissione autoelettronica raggiunge $0,1 \text{ A/cm}^2$.

Sulla base dei nanotubi di carbonio, si stanno sviluppando pannelli di visualizzazione ultrasottili, che nei loro parametri superano quelli dei cristalli rari.

Una delle caratteristiche dei nanotubi di carbonio è l'elevato valore negativo della suscettibilità diamagnetica. Il diamagnetismo aumenta a basse temperature.

L'applicazione pratica dei nanotubi porta alla soluzione di una serie di problemi. Le tecnologie per la produzione di nanotubi non sono sufficienti e non consentono di produrre nanotubi di un determinato diametro e lunghezza e di una determinata chiralità. Per un utilizzo pratico dei nanotubi è necessario fornire energia, collegata alla quantizzazione dei campi elettrici e magnetici. Identificazione e altri problemi.

Capitolo 3. Materiali semiconduttori

3.1 Semiconduttori intrinseci e impurità

La corrente nei semiconduttori è il movimento di elettroni e buche e contiene componenti di deriva e di diffusione. La componente di deriva della corrente è proporzionale alla concentrazione di portatori, mentre la componente di diffusione è proporzionale al gradiente della distribuzione spaziale di questa concentrazione.

Il metodo statistico della distribuzione energetica dei portatori in un semiconduttore porta a quanto segue. La concentrazione di elettroni in un semiconduttore la cui energia di Fermi (livello) si trova nella zona proibita ed è più di kT al di sotto del fondo della banda di conduzione è determinata dalla seguente formula:

$$n = N_c \cdot \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right), \quad (3.1)$$

dove N_c è la densità effettiva di stati nella banda di conduzione, E_c è l'energia al fondo della banda di conduzione e E_F è l'energia di Fermi.

Tali semiconduttori sono detti non degenerati.

Quando la concentrazione di portatori aumenta, può arrivare il momento in cui $E_c < E_F$ e tali semiconduttori passano in uno stato detto degenerato. Per questi semiconduttori, la concentrazione di portatori è determinata da calcoli numerici secondo la formula:

$$n = N_c \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot F_{1/2}\left(\frac{E_F - E_c}{kT}\right) \quad (3.2)$$

La funzione $F_{1/2}$ è l'integrale di Fermi-Dirac, che viene visualizzato in forma tabellare.

Le seguenti formule sono valide per la concentrazione di buche nella banda di valenza:

- per un semiconduttore non degenerato: $p = N_v \cdot \exp\left(\frac{E_v - E_F}{kT}\right) \quad (3.3)$

- per un semiconduttore degenerato: $p = N_v \frac{2}{\sqrt{\pi}} F_{1/2}\left(\frac{E_v - E_F}{kT}\right) \quad (3.4)$

La concentrazione limite di buche nei semiconduttori di tipo p non degenerati e degenerati è determinata in modo simile alla concentrazione di elettroni ed è, ad esempio, $3,75 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ per il silicio.

I semiconduttori privi di impurità sono detti intrinseci. Nei semiconduttori intrinseci, gli elettroni situati vicino al limite della banda di valenza sono eccitati dall'energia termica e possono entrare nella banda

di conduzione, lasciando buchi nella banda di valenza. Pertanto, le concentrazioni di elettroni nella banda di conduzione e di buchi nella banda di valenza sono uguali $n = p \equiv n$, dove n è la concentrazione di portatori intrinseci.

Supponiamo che al semiconduttore intrinseco vengano aggiunte impurità, ad esempio atomi di fosforo (P) (donatori) al silicio. L'energia di ionizzazione del fosforo è piccola, 0,012 eV, quindi a temperatura ambiente tutti gli atomi di P sono ionizzati. Di conseguenza, la concentrazione di elettroni è uguale alla concentrazione di P. Se la temperatura viene abbassata, le impurità vengono ionizzate solo parzialmente e la concentrazione di elettroni diminuisce. Questo fenomeno è chiamato effetto di congelamento del portatore. Processi simili si verificano quando viene aggiunta un'impurità accettore. Quando si introducono sia donatori che accettori a temperatura ambiente, entrambi i tipi di impurità vengono ionizzati e la quantità di portatori è determinata dalla differenza tra donatori e accettori. Questo effetto è chiamato compensazione delle impurità.

Viene determinata la dipendenza dalla temperatura della concentrazione di elettroni ai livelli donatori in un semiconduttore *di tipo n*:

$$n_d = N_d \left\{ 1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{g} \exp\left(\frac{E_d - E_F}{kT}\right)} \right\}, \quad (3.5)$$

dove N_d è la concentrazione dei donatori, E_d è il livello energetico dei donatori, $\Delta E_d = E_d - E_F$ è l'energia di ionizzazione dei donatori e g è il fattore di degenerazione, pari a 2, che tiene conto dello spin degli elettroni.

Una formula simile può essere ottenuta per un semiconduttore accettore.

3.2. Dipendenza dalla temperatura della concentrazione di portatori di corrente e della conduttività specifica nei semiconduttori

In un ampio intervallo di temperature e per diversi contenuti di impurità, esistono dipendenze dalla temperatura della concentrazione di portatori di carica in un semiconduttore *di tipo n*, mostrate in Fig. 3.1. Si consideri la natura delle curve corrispondenti a una concentrazione relativamente bassa di donatori N_{D1} . Nella regione a bassa temperatura, l'aumento della concentrazione di elettroni quando il semiconduttore viene riscaldato è dovuto a un aumento del grado di ionizzazione dei donatori (la sezione della curva tra i punti 1 e 4).

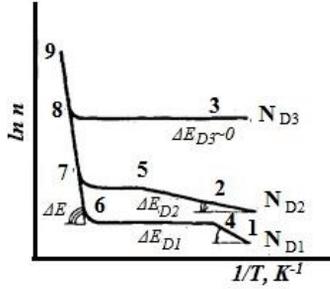


Fig. 3.1. Dipendenze caratteristiche della concentrazione di portatori di carica in un semiconduttore dalla temperatura a diverse concentrazioni di impurità donatrici $N_{D1} < N_{D2} < N_{D3}$

Ogni donatore ionizzato può essere considerato come un centro che ha catturato una buca. Considerando che il numero totale di stati energetici ai livelli del donatore per unità di volume è pari a N_{D1} , per la concentrazione di donatori ionizzati p_D si scrive

$$p_D = N_{D1} \exp\left(\frac{E_{D1} - E_F}{kT}\right), \quad (3.6)$$

dove E_{D1} è la posizione del livello donatore sulla scala energetica.

A bassa temperatura, la concentrazione di donatori ionizzati è uguale alla concentrazione di elettroni:

$$p_D = n_o \approx N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right), \quad (3.7)$$

Ne consegue che

$$p_D n_o = n_o^2 \approx N_c N_{D1} \exp\left(\frac{E_{D1} - E_F}{kT}\right) \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right), \quad (3.8)$$

e di conseguenza

$$n_o = \sqrt{N_c N_{D1}} \exp\left(-\frac{\Delta E_{D1}}{2kT}\right), \quad (3.9)$$

dove $\Delta E_{D1} = E_c - E_{D1}$.

Dall'espressione (3.9), segue che la pendenza della linea nel tratto 1-4 della fig. 3.1 caratterizza l'energia di ionizzazione delle impurità. Nel processo di ulteriore riscaldamento a una certa temperatura corrispondente al punto 4, tutti gli elettroni dei livelli di impurità vengono trasferiti nella banda di conduzione. Allo stesso tempo, la probabilità di ionizzazione degli atomi del semiconduttore è ancora trascurabile. Pertanto, in un intervallo di temperatura abbastanza ampio (regione 4-6), la concentrazione di portatori di carica rimane costante e quasi uguale alla concentrazione di donatori. Questa sezione della dipendenza dalla temperatura viene comunemente chiamata regione di impurezza.

A temperature relativamente elevate (sezione della curva oltre il punto 6), il trasferimento di elettroni attraverso il band gap inizia a giocare un ruolo dominante, ovvero si verifica la transizione verso la conducibilità

elettrica intrinseca, dove la concentrazione di elettroni è uguale alla concentrazione di buche e la ripidità della curva è determinata dal band gap del semiconduttore.

Per la maggior parte dei semiconduttori con impurità, la temperatura T_i della transizione alla conducibilità elettrica intrinseca è significativamente più alta della temperatura ambiente. Ad esempio, per il germanio di tipo n con una concentrazione di donatori di $N_D \sim 10^{22} \text{ m}^{-3}$, la temperatura T_i è di circa 450 K. Il valore di T_i dipende dalla concentrazione di impurità e dall'ampiezza del band gap del semiconduttore.

All'aumentare della concentrazione di impurità, le parti delle curve corrispondenti alla conducibilità elettrica delle impurità si spostano verso l'alto. La ragione di questo spostamento può essere facilmente compresa utilizzando la formula (3.9). Inoltre, occorre considerare che, all'aumentare della concentrazione di atomi di impurità, la distanza tra di essi diminuisce. Questo porta a una maggiore interazione dei gusci di elettroni degli atomi di impurità e alla suddivisione dei livelli energetici discreti in zone di impurità. Di conseguenza, l'energia di ionizzazione delle impurità diminuisce. Per questo motivo, $\Delta E_{D1} > \Delta E_{D2} > \Delta E_{D3}$. Più alta è la concentrazione di impurità, più alta è la temperatura di esaurimento.

A una concentrazione sufficientemente elevata di donatori (N_{D3}), la loro energia di ionizzazione diventa nulla, poiché la banda delle impurità si sovrappone alla banda di conduzione. Un semiconduttore di questo tipo diventa degenerato. In questo caso, la dipendenza dalla temperatura della concentrazione dei portatori di carica è caratterizzata da una linea spezzata con due segmenti rettilinei 3-8 e 8-9. La concentrazione di elettroni in un semiconduttore degenerato di tipo n è costante nell'intero intervallo di conducibilità delle impurità. Un semiconduttore degenerato è in grado di condurre corrente elettrica anche a temperature molto basse. Queste proprietà rendono i semiconduttori degenerati simili ai metalli. Per questo motivo, a volte vengono chiamati semimetalli.

Il livello di Fermi è uno dei principali parametri che caratterizzano il gas di elettroni nei semiconduttori. La posizione del livello di Fermi in un semiconduttore non degenerato a basse temperature può essere trovata logaritmizzando l'equazione (3.7):

$$\ln p_D = \ln N_{D1} + \frac{E_D - E_F}{kT} = \ln n_o = \ln N_C - \frac{E_C - E_F}{kT}, \quad (3.10)$$

ne consegue che

$$E_F = (E_C + E_D)/2 + kT/2 \cdot \ln(N_D/N_C) \quad (3.11)$$

Come si può notare, a temperature molto basse, il livello di Fermi di un semiconduttore di tipo n si trova a metà strada tra il fondo della banda di conduzione e il livello del donatore. All'aumentare della temperatura, la probabilità di riempire gli stati donatori diminuisce e il

livello di Fermi si sposta verso il basso. Ad alte temperature, il semiconduttore ha proprietà vicine alle sue e il livello di Fermi tende al centro del band gap (fig. 3.2, a).

Tutte le regolarità considerate si manifestano in modo simile nei semiconduttori di tipo p. La dipendenza dalla temperatura del livello di Fermi per un semiconduttore a buchi è mostrata in fig. 3.2, b.

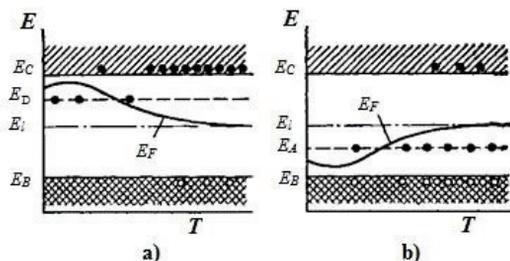


Fig. 3.2. Variazione di temperatura della posizione del livello di Fermi in un semiconduttore con impurità: a - tipo n, b - tipo p

Dopo aver considerato l'effetto della temperatura sulla concentrazione e sulla mobilità dei portatori di carica, è possibile presentare l'andamento generale della variazione della conduttività specifica con la temperatura. Nei semiconduttori con reticoli atomici (così come nei semiconduttori ionici a temperature elevate), la mobilità cambia relativamente poco con la temperatura (secondo una legge di potenza), mentre la concentrazione cambia molto fortemente (secondo una legge esponenziale). Pertanto, la dipendenza dalla temperatura della conduttività specifica è simile alla dipendenza dalla temperatura della concentrazione (fig. 3.3).

Nell'intervallo di temperatura corrispondente alla deplezione delle impurità, quando la concentrazione dei portatori di carica principali rimane praticamente invariata, le variazioni di temperatura della conduttività specifica sono dovute alla dipendenza dalla temperatura della mobilità. Una diminuzione della conduttività specifica nella regione delle basse temperature è associata, da un lato, a una diminuzione della concentrazione dei portatori di carica forniti dagli atomi di impurità (donatori o accettori) e, dall'altro, a una diminuzione della mobilità dovuta allo scattering sulle impurità ionizzate. Il forte aumento della conduttività specifica a temperature elevate corrisponde alla regione di conduttività intrinseca, caratterizzata dall'uguaglianza delle concentrazioni di elettroni e buche. La pendenza della linea nella regione di conduttività intrinseca può essere utilizzata per determinare l'ampiezza del band gap del semiconduttore.

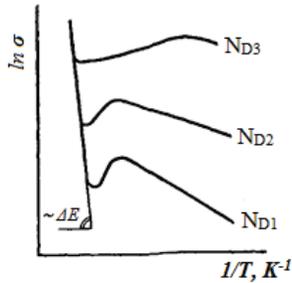


Fig. 3.3. Dipendenza dalla temperatura della conduttività specifica di un semiconduttore a diverse concentrazioni di impurità: $N_{D1} < N_{D2} < N_{D3}$

In fig. 3.3 sono riportate le curve per diversi valori di concentrazione di impurità, fino alla degenerazione del semiconduttore. Più alta è la concentrazione di donatori, più elettroni vengono consegnati alla banda di conduzione a questa temperatura e più alto è il valore della conduttività specifica. Al variare del contenuto di impurità, cambia anche la temperatura di transizione verso la conduttività intrinseca. Aumentando la purezza del materiale, è possibile raggiungere l'inizio della conducibilità elettrica intrinseca anche a temperatura ambiente.

In un semiconduttore degenerato, la concentrazione di portatori di carica è indipendente dalla temperatura e la dipendenza dalla temperatura della conduttività specifica nella regione di conduttività delle impurità è qualitativamente simile alla variazione di temperatura della conduttività specifica dei metalli.

Nei semiconduttori reali, la variazione di temperatura della conduttività può discostarsi significativamente dalle dipendenze discusse per una serie di motivi. Una di queste è legata al fatto che, in pratica, i materiali contengono non uno ma più tipi di impurità con diverse energie di ionizzazione. Un'altra ragione per la comparsa di alcune anomalie nella dipendenza dalla temperatura della conduttività può essere dovuta alla differenza nella mobilità di elettroni e buchi.

3.3. Mobilità dei portatori di corrente nei semiconduttori

Come si è detto, sotto l'influenza di un campo elettrico esterno, i portatori di carica acquisiscono una certa velocità di movimento direzionale e generano una corrente elettrica. Il rapporto tra la velocità direzionale media e l'intensità del campo elettrico è chiamato mobilità dei portatori di carica:

$$\mu = \bar{U}/E \quad (3.12)$$

Nei semiconduttori, occorre distinguere tra mobilità degli elettroni e mobilità delle buche. Tenendo conto dei due tipi di portatori di carica, l'espressione (2.2) per la densità di corrente assume la forma:

$$J = en_o\mu_n E + ep_o\mu_p E \quad , (3.13)$$

dove n_o e p_o sono le concentrazioni di equilibrio di elettroni e buche nel semiconduttore.

Utilizzando la legge di Ohm dalla (3.13), possiamo ottenere la formula per la conduttività specifica di un semiconduttore:

$$\sigma = en_o\mu_n + ep_o\mu_p \quad . \quad (3.14)$$

Nei semiconduttori con impurità, di norma, uno dei termini dell'espressione (3.14) può essere trascurato. Ad esempio, a una concentrazione sufficientemente alta di donatori in un semiconduttore, il contributo delle buche alla conducibilità elettrica è molto piccolo. Nella maggior parte dei casi, la mobilità delle buche è inferiore a quella degli elettroni.

Secondo i dati sperimentali, in alcuni semiconduttori la mobilità dei portatori di carica può essere di diversi ordini di grandezza superiore a quella dei metalli.

È stato dimostrato che la velocità di deriva, e quindi la mobilità dei portatori di carica, è strettamente correlata alla lunghezza del loro cammino libero nel cristallo:

$$\mu = \frac{e}{m^*} \tau_o = \frac{e \bar{l}}{m^* \bar{v}} \quad , (3.15)$$

dove m^* è la massa effettiva dei portatori di carica; \bar{v} è la velocità termica.

Un'elevata mobilità può essere causata da una piccola massa effettiva del portatore di carica m^* e da un grande valore del tempo di corsa libera o, più precisamente, del tempo di rilassamento τ_o . Nei semiconduttori, la massa effettiva dei portatori di carica può essere maggiore o minore della massa di un elettrone libero.

Il tempo di rilassamento caratterizza la diminuzione della corrente dopo la rimozione del campo ed è determinato dai processi di diffusione degli elettroni. Più alta è la frequenza delle collisioni e più intense sono, più breve è il tempo di rilassamento e, di conseguenza, la mobilità.

Le cause della dispersione dei portatori di carica nei semiconduttori che influenzano la dipendenza dalla temperatura della mobilità sono: le vibrazioni termiche degli atomi o degli ioni nel reticolo cristallino, le impurità e i difetti del reticolo. Lo scattering reciproco degli elettroni, dovuto alla bassa concentrazione di gas di elettroni, è trascurato nella teoria dei semiconduttori.

Nei semiconduttori con reticoli atomici, la diffusione dei portatori di carica avviene a causa delle vibrazioni termiche del reticolo e delle impurità ionizzate. Questi due meccanismi di diffusione portano alla comparsa di due sezioni della dipendenza dalla temperatura della mobilità. Lo scattering da vibrazioni termiche del reticolo gioca un ruolo dominante

a temperature elevate. Nella regione delle basse temperature, lo scattering sugli atomi di impurità ionizzate è di primaria importanza.

A causa della bassa energia di ionizzazione, la maggior parte degli atomi di impurità si trova in uno stato ionizzato anche a una temperatura piuttosto bassa. Ogni atomo ionizzato crea un campo di Coulomb intorno a sé. I portatori di carica in movimento, che rientrano nel campo di questo campo, subiscono l'attrazione o la repulsione di Coulomb e, di conseguenza, distorcono la loro traiettoria originale. Maggiore è la velocità totale del portatore di carica, minore è il tempo in cui rimane vicino all'atomo carico e minore è l'efficienza di diffusione.

Pertanto, se predomina lo scattering dei portatori di carica sulle impurità ionizzate, la mobilità aumenta con la temperatura.

Se entrambi i meccanismi sono coinvolti nella dispersione dei portatori di carica, la mobilità risultante può essere trovata utilizzando la relazione:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_T} + \frac{1}{\mu_i} \quad (3.16)$$

La sua dipendenza dalla temperatura è espressa da una curva con un massimo distinto, come mostrato nella Fig. 3.4 per diverse concentrazioni di atomi di impurità. All'aumentare della concentrazione di impurità, la mobilità massima diminuisce e si sposta verso temperature più elevate.

A temperature molto basse, quando le impurezze sono debolmente ionizzate, lo scattering dei portatori di carica avviene su atomi neutri di impurità. In presenza di questo solo meccanismo di scattering, la mobilità non dipende dalla temperatura, ma è determinata solo dalla concentrazione di impurità.

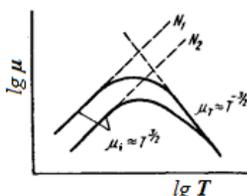


Figura 3.4. Dipendenza dalla temperatura della mobilità dei portatori di carica per un semiconduttore non degenerato a diverse concentrazioni di impurezze

La mobilità dei portatori di carica in un semiconduttore può variare notevolmente da un campione all'altro, a seconda della sua composizione e della perfezione della sua struttura cristallina.

3.4. Effetti cinetici nei semiconduttori

a) Conduttività elettrica

In assenza di un campo elettrico esterno, gli elettroni compiono solo un moto termico con velocità V_t . Questo moto è simile al moto degli atomi considerato nella teoria cinetica dei gas. A causa del moto termico disordinato in un gas di elettroni in equilibrio termico, non esistono direzioni di moto preferite e quindi la velocità termica media è nulla.

Quando viene applicato un campo elettrico esterno, gli elettroni acquisiscono velocità aggiuntive sotto l'influenza del campo. Appare il moto ordinato degli elettroni. La velocità media del moto ordinato è chiamata velocità di deriva V_d . Di norma, la velocità di deriva è proporzionale all'intensità del campo elettrico E . Tenendo conto di ciò, si introduce il concetto di mobilità di deriva delle particelle cariche μ , che per definizione è la velocità di deriva ottenuta da una particella in un campo di intensità uno. Oppure si può scrivere:

$$V_d = \mu \cdot E. \quad (3.17)$$

Per gli elettroni la mobilità μ è negativa, per le particelle positive è positiva.

Se le cariche sono dello stesso tipo, la densità di corrente elettrica è uguale:

$$j = enV_d = en\mu \cdot E, \quad (3.18)$$

dove: n è la concentrazione di cariche in movimento (particelle).

D'altra parte, secondo la legge di Ohm:

$$j = \sigma \cdot E, \quad (3.19)$$

dove σ è la conducibilità elettrica specifica di una sostanza. Quindi

$$\sigma = e \cdot n \cdot \mu. \quad (3.20)$$

Nelle sostanze isotrope, la velocità di deriva è parallela al campo e i vettori \vec{j} e \vec{E} coincidono in direzione. Nelle sostanze anisotrope non è più così e la relazione tra \vec{j} e \vec{E} ha una forma più generale, che definisce e tiene conto della relazione tra le direzioni della corrente e del campo elettrico nello spazio:

$$\begin{aligned} \vec{J}_x &= \sigma_{xx} \cdot \vec{E}_x + \sigma_{xy} \cdot \vec{E}_y + \sigma_{xz} \cdot \vec{E}_z \\ \vec{J}_y &= \sigma_{yx} \cdot \vec{E}_x + \sigma_{yy} \cdot \vec{E}_y + \sigma_{yz} \cdot \vec{E}_z \\ \vec{J}_z &= \sigma_{zx} \cdot \vec{E}_x + \sigma_{zy} \cdot \vec{E}_y + \sigma_{zz} \cdot \vec{E}_z \end{aligned}$$

b) Effetto Hall

Gli elettroni (portatori di carica elettrica) che si muovono in un campo magnetico esterno sono soggetti alla forza di Lorentz perpendicolare alla direzione della loro velocità e all'induzione magnetica.

L'effetto Hall consiste nel fatto che in un conduttore portatore di corrente situato in un campo magnetico compaiono forze elettromotrici aggiuntive e, di conseguenza, un campo elettrico aggiuntivo. La ragione di questo fenomeno è da ricercarsi nelle forze di Lorentz che agiscono sul

portatore di corrente. L'essenza dell'effetto può essere immaginata come segue (fig. 3.5):

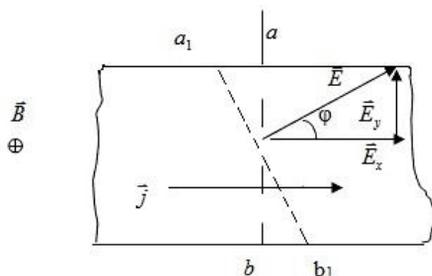


Fig. 3.5. Schema di formazione del campo di Hall \vec{E}_y

In assenza di induzione di campo magnetico \vec{B} , l'intensità del campo elettrico nel conduttore \vec{E} coincide con la direzione della densità di corrente \vec{j} e tra due contatti trasversali simmetrici a e b , situati in un piano perpendicolare a \vec{j} , la differenza di potenziale è nulla.

Quando si attiva il campo magnetico trasversale, tra i contatti aperti a e b compare una differenza di potenziale U (tensione, emf di Hall). Questa differenza di potenziale cambia segno quando cambia la direzione della corrente o del campo magnetico ed è causata dall'azione della forza di Lorentz sui portatori di corrente, dalla loro deviazione e dalla creazione di una differenza di concentrazione (e di carica elettrica) dei portatori di corrente in direzione $a-b$.

La comparsa di questa differenza di potenziale dimostra che, in presenza di un campo magnetico, nel conduttore compare un campo elettrico \vec{E}_y , aggiuntivo. La direzione del campo elettrico risultante \vec{E} ora non coincide con la direzione di \vec{j} , ma è ruotata \vec{j} di un certo angolo φ , chiamato angolo di Hall.

Considerando il moto dei portatori di carica in un campo elettrico e in un campo magnetico perpendicolare per un campione di dimensioni finite, è possibile ottenere una relazione tra l'intensità del campo dell'effetto Hall \vec{E}_y , la tensione di Hall U e altri parametri:

$$E_y = \frac{U}{d} = R \cdot B \cdot J = R \cdot B \cdot \frac{i}{a \cdot d} \quad , (3.21)$$

dove: d è lo spessore del campione, a è la larghezza del campione, i è l'intensità di corrente totale, R è il coefficiente di proporzionalità, che nei campi magnetici deboli non dipende dall'induzione magnetica e caratterizza solo le proprietà della sostanza. È chiamato costante di Hall.

L'effetto Hall è ampiamente utilizzato in ingegneria. Può essere utilizzato per misurare l'intensità di un campo magnetico o, se quest'ultimo è noto, per misurare la corrente e la potenza. L'effetto Hall può essere utilizzato per generare, modulare e demodulare oscillazioni elettriche, per rilevare oscillazioni, per amplificare segnali elettrici e così via.

c) Variazione della resistenza in un campo magnetico

I campi magnetici esterni non solo causano la comparsa del campo di Hall, ma modificano anche la corrente. Ciò significa che la resistenza di un conduttore in un campo magnetico trasversale cambia. La variazione della conduttività $\Delta\delta$ e della resistività $\Delta\rho$ è descritta dalla formula:

$$\frac{\Delta\delta}{\delta} = -\frac{\Delta\rho}{\rho} \alpha \cdot B^2, \quad (3.22)$$

dove δ e ρ sono i valori a $B = 0$ e α è il coefficiente di magnetoresistenza trasversale, che dipende dalle proprietà del materiale.

Le formule fornite per l'effetto Hall e la magnetoresistenza sono valide solo per un mezzo infinito. Nei campioni reali di dimensioni finite, la presenza di contatti metallici conduttivi provoca distorsioni nelle linee di corrente e di campo. Questo deve essere tenuto in considerazione nelle misurazioni. Per mantenere bassa l'influenza degli effetti di bordo, la lunghezza dei campioni (nella direzione della corrente) deve essere molto maggiore delle loro dimensioni trasversali.

d) Effetto piezoresistenza

La variazione della resistenza elettrica di un semiconduttore in seguito a una sollecitazione meccanica uniassiale esterna o a una pressione idrostatica è chiamata effetto piezoresistenza. La piezoresistenza è caratterizzata dal coefficiente

$$\pi = \frac{\Delta\rho}{\rho\chi}$$

dove χ è il valore della pressione meccanica (stress).

La relazione tra $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ e χ sotto pressione idrostatica è descritta dalle componenti del tensore π_{ik} :

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = -\frac{\Delta\delta}{\delta} = (\pi_{11} + 2\pi_{12})\chi. \quad (3.23)$$

Queste componenti, così come π_{44} , sono necessarie per la descrizione matematica e la determinazione dello stress meccanico relativo nei semiconduttori a reticolo cubico quando la direzione $\vec{\chi}$ e la

densità di corrente \vec{j} formano un angolo arbitrario. La tabella 3.1 mostra varie combinazioni di queste componenti per le direzioni $\vec{\chi}$ e \vec{j} che coincidono con diversi assi cristallografici. Il vettore $\vec{\chi}$ è considerato positivo nel caso di tensione e negativo nel caso di compressione. Tutte e tre le componenti del tensore possono essere determinate da tre misure in direzioni diverse.

Tabella 3.1. Diverse combinazioni di componenti per direzioni con assi cristallografici diversi

	$\vec{\chi}$	\vec{j}	$\frac{\Delta\rho}{\rho\chi}$
Longitudinale componenti	<100>	<100>	π_{11}
	<110>	<110>	$\frac{\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44}}{2}$
	<111>	<111>	$\frac{\pi_{11} + 2\pi_{12} + 2\pi_{44}}{3}$
Trasversale componenti	<100>	<010>	π_{12}
	<110>	<111>	$\frac{\pi_{11} + \pi_{12} - \pi_{44}}{2}$

I valori determinati sperimentalmente dei coefficienti di piezoresistenza, ad esempio per il p-Si con una resistività di $p = 7,8$ Ohm·cm, sono i seguenti:

$$\pi_{11} = 6,6 \cdot 10^{-11} Pa^{-1}$$

$$\pi_{12} = -1,1 \cdot 10^{-11} Pa^{-1}$$

$$\pi_{44} = 138 \cdot 10^{-11} Pa^{-1}$$

e) Termo-EMF

Nei semiconduttori, come nei metalli, si verifica una differenza di potenziale sotto l'influenza di una differenza di temperatura, chiamata forza termoelettromotrice. In un circuito chiuso costituito da due materiali conduttori diversi (ad esempio, un semiconduttore e un metallo), scorre una corrente elettrica se la temperatura dei contatti non è la stessa.

Il riscaldamento non uniforme di un semiconduttore omogeneo porta a un gradiente nell'energia media dei portatori di carica nelle diverse parti del cristallo. Inoltre, la differenza di temperatura può influenzare la variazione della concentrazione dei portatori di carica, cosa che non si osserva nei metalli. Per questi motivi, si verifica un flusso di diffusione dei portatori di carica dalla regione riscaldata a quella più fredda del

cristallo. Il campo elettrico interno che ne deriva impedisce un'ulteriore distribuzione delle cariche e favorisce l'equilibrio.

Nei semiconduttori, in generale, i portatori di carica di due tipi - elettroni e buche - sono coinvolti nella creazione della termoelettrica. Le componenti dell'emf termoelettrica causate da questi ultimi sono di segno opposto. In assenza di degenerazione del gas di elettroni, il valore dell'emf termoelettrica differenziale, cioè riferita a una differenza di temperatura unitaria, è determinato dall'espressione:

$$\alpha_T = \frac{k}{\sigma} \left\{ n\mu_n \left[2 + \ln \frac{2(2\pi m_n^* kT)^{3/2}}{nh^3} \right] - p\mu_p \left[2 + \ln \frac{2(2\pi m_p^* kT)^{3/2}}{ph^3} \right] \right\}, \quad (3.24)$$

dove il primo termine caratterizza il contributo degli elettroni e il secondo quello delle buche. Per i semiconduttori con impurità, la formula è semplificata perché uno dei termini può essere trascurato.

In un semiconduttore *di tipo n*, gli elettroni sono i principali portatori di carica. Il loro flusso dall'estremità calda a quella fredda sarà maggiore che nella direzione opposta. A seguito della diffusione, all'estremità fredda si accumula una carica negativa di elettroni in eccesso e all'estremità calda si forma una carica positiva di donatori ionizzati, che non viene compensata. In un semiconduttore *di tipo p*, le buche sono coinvolte nel processo di diffusione, quindi la polarità della termo-EMF risultante avrà un segno opposto. La diversa risposta dei semiconduttori di impurità alle disomogeneità del campo termico consente di utilizzare l'effetto termoelettrico per determinare rapidamente il tipo di conducibilità elettrica di un materiale. Un semplice dispositivo progettato a questo scopo è chiamato termosonda. Il valore numerico dell'emf termoelettrica differenziale dei semiconduttori, a seconda della temperatura e della concentrazione di atomi di impurità, varia da 10^2 a 10^4 $\mu\text{V/K}$, cioè 2-4 ordini di grandezza superiore a quello dei metalli. Questa differenza nelle proprietà dei materiali porta al fatto che in un circuito chiuso composto da un semiconduttore e da un metallo, l'emf termoelettrica dipende debolmente dalla natura del conduttore metallico. Pertanto, quando si cita il valore di α , per un semiconduttore, di solito non si indica rispetto a quale metallo è determinato.

L'elevato emf termoelettrico dei semiconduttori consente di utilizzarli come efficienti convertitori di energia termica in energia elettrica. La base di tali convertitori sono le termocoppie composte da semiconduttori *di tipo p* e *n* in serie. In questo caso, l'emf termoelettrica relativa derivante dalla differenza di temperatura tra le giunzioni è pari alla somma delle emf termoelettriche assolute differenziali di entrambi i rami.

3.5. Classificazione dei materiali semiconduttori

I semiconduttori sono una classe di materiali molto ampia. Comprende centinaia di sostanze diverse, sia singoli elementi che composti chimici. Sia le sostanze inorganiche che quelle organiche, cristalline e amorfe, solide e liquide, non magnetiche e magnetiche, possono avere proprietà semiconduttrici. Nonostante le notevoli differenze nella struttura e nella composizione chimica, i materiali di questa classe hanno una qualità in comune: la capacità di cambiare significativamente le loro proprietà elettriche sotto l'influenza di piccoli effetti energetici esterni.

La classificazione dei materiali semiconduttori è la seguente (fig. 3.6):

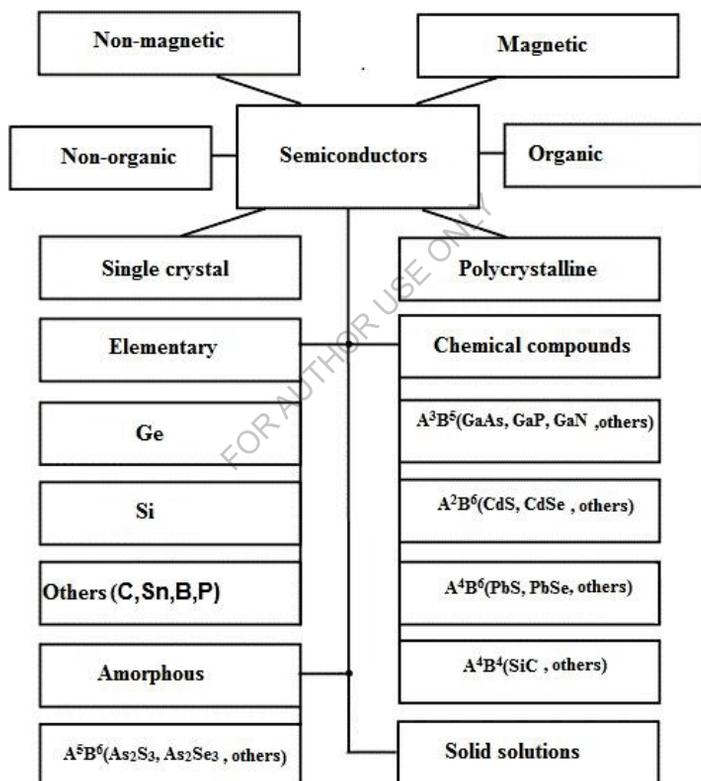


Fig. 3.6. Classificazione dei materiali semiconduttori

I semiconduttori cristallini inorganici costituiscono la base dell'elettronica moderna. Le proprietà dei semiconduttori sono esibite da 12 elementi chimici situati nella parte centrale della tavola periodica di D. I. Mendeleev. I valori del band gap dei semiconduttori elementari sono

riportati in vari libri di riferimento sulla fisica dei semiconduttori (tabella 3.2). Disponendo gli elementi nell'ordine della loro posizione nella Tavola Periodica, è possibile individuare alcune regolarità nella variazione del band gap: esso aumenta in ogni periodo quando si passa da un elemento all'altro da sinistra a destra, ma diminuisce in ogni gruppo quando si passa dall'alto al basso.

Tabella 3.2 Band gap dei semiconduttori elementari (a 300 K)

Elemento	ΔE_z , eV	Elemento	ΔE_z , eV
Boro	1,1	Arsenico	1,2
Carbonio (diamante)	5,6	Antimonio	0,12
Silicio	1,12	Zolfo	2,5
Germanio	0,665	Selenio	1,8
Stagno (α -Sn)	0,08	Tellurio	0,36
Fosforo	1,5	Iodio	1,25

Alcune modifiche dello stagno e del carbonio hanno anche proprietà semiconduttive. Quest'ultimo esiste in due forme allotropiche: il diamante e la grafite. La grafite è vicina ai conduttori in termini di proprietà elettriche (band gap $\Delta E_z < 0,1 \text{ eV}$), mentre i diamanti puri sono dielettrici. Tuttavia, i diamanti artificiali acquisiscono le proprietà dei semiconduttori grazie alle impurità introdotte.

In condizioni normali, lo stagno è un buon conduttore, ma a temperature inferiori a $13,2^\circ\text{C}$ si trasforma nella modifica grigia dello stagno. Il processo di trasformazione in fase solida è molto lento, il che rende difficile ottenere cristalli di interesse pratico.

Il silicio e il germanio sono i principali materiali semiconduttori in termini di proprietà elettrofisiche, controllo dei processi, numero e gamma di dispositivi prodotti.

Un gruppo molto ampio di composti inorganici semiconduttori che possono essere costituiti da due, tre o più elementi. Esempi di tali composti sono InSb , V_2Te_3 , ZnSiAs_2 , CuAlS_2 , e CuGeP_3 . La struttura cristallina di molti composti è caratterizzata dalla coordinazione nel reticolo del diamante. Tali composti semiconduttori sono chiamati semiconduttori simili al diamante. Tra questi, i composti binari del tipo $\text{A B}^{\text{IIIIV}}$ e A B^{IIVI} rivestono il massimo interesse scientifico e pratico, essendo i materiali più importanti per l'optoelettronica a semiconduttore.

La maggior parte dei semiconduttori diamantati con proprietà affini forma soluzioni solide isovalenti tra loro.

Nelle soluzioni solide, le proprietà più importanti dei semiconduttori, come l'ampiezza del band gap e la mobilità dei portatori di carica, possono essere controllate in modo fluido ed entro un intervallo abbastanza ampio modificando la composizione. Ciò apre ulteriori opportunità per l'ottimizzazione dei parametri dei dispositivi a semiconduttore e consente una migliore corrispondenza delle caratteristiche fisiche dei vari componenti delle apparecchiature elettroniche.

Per la produzione di dispositivi semiconduttori si utilizzano sia cristalli singoli che materiali policristallini. I cristalli singoli sono sistemi più semplici con una struttura più perfetta rispetto ai materiali policristallini. Sono i più studiati, i loro fenomeni fisici sono meglio calcolabili e garantiscono una maggiore affidabilità e parametri identici dei dispositivi semiconduttori.

Le proprietà dei semiconduttori amorfi, organici e magnetici non sono state studiate a sufficienza, sebbene l'importanza pratica di queste sostanze sia in costante crescita. Sono state identificate alcune caratteristiche comuni nel meccanismo della conducibilità elettrica dei semiconduttori amorfi inorganici e cristallini organici. L'interesse per i semiconduttori organici è dovuto al fatto che alcuni di essi combinano le proprietà dei semiconduttori con l'elasticità, il che consente di produrre elementi di lavoro sotto forma di nastri e fibre flessibili.

3.6. I materiali semiconduttori più comuni sono il silicio, il germanio, l'arseniuro di gallio, ecc.

Silicio. Il silicio è uno degli elementi più abbondanti nella crosta terrestre, con una percentuale del 29,5% (in peso). In termini di abbondanza, il silicio è il secondo elemento più abbondante dopo l'ossigeno. Numerosi composti del silicio si trovano nella maggior parte delle rocce e dei minerali. Anche la sabbia e l'argilla, che costituiscono la parte minerale del suolo, contengono composti di silicio. Il composto più comune di questo elemento è il biossido di silicio SiO_2 . Il biossido di silicio libero si trova principalmente sotto forma di quarzo. In alcuni depositi, la purezza della sabbia di quarzo raggiunge il 99,9%. Il silicio allo stato libero non si trova in natura. Nella sua forma elementare è stato ottenuto per la prima volta nel 1811, molto prima del germanio. Tuttavia, il silicio è diventato ampiamente utilizzato come materiale elettronico semiconduttore solo nella seconda metà del secolo scorso, dopo lo sviluppo di metodi efficaci per la sua purificazione.

Il silicio cristallizza nella struttura del diamante con un periodo reticolare leggermente più corto rispetto al germanio. Le minori distanze

tra gli atomi nel reticolo rispetto al germanio determinano un legame chimico covalente più forte e, di conseguenza, un band gap più ampio.

Dal punto di vista chimico, il silicio cristallino è una sostanza relativamente inerte a temperatura ambiente. È insolubile in acqua e non reagisce con molti acidi in nessuna concentrazione. Si scioglie bene solo in una miscela di acido nitrico e fluoridrico e in alcali bollenti.

Il silicio è stabile in aria se riscaldato fino a 900°C. Al di sopra di questa temperatura, inizia a ossidarsi intensamente per formare SiO_2 . Quando viene riscaldato, il silicio interagisce facilmente con gli alogeni e a temperature di 1100-1300°C può combinarsi direttamente con l'azoto per formare Si_3N_4 nitruro. Il silicio si scioglie bene in molti metalli fusi (Al, Ga, Sn, Au, Ag, ecc.). Con alcuni metalli (Cr, Mo, Fe, Cu, Mg, ecc.) forma composti chimici stabili, i siliciuri.

Il silicio ha un punto di fusione relativamente alto ed è altamente reattivo allo stato fuso. Per questo motivo, la scelta del materiale del crogiolo per la crescita dei cristalli singoli presenta notevoli difficoltà. I materiali più puri (quarzo e grafite), comunemente utilizzati per la fabbricazione di barche e crogioli, interagiscono con il silicio ad alte temperature. La reazione del silicio con il carbonio porta alla formazione del carburo di silicio, un composto chimico molto stabile con proprietà di semiconduttore.

A causa del suo band gap più ampio, la resistività del silicio è più di tre ordini di grandezza superiore a quella del germanio. Per osservare la conduttività elettrica intrinseca a temperatura ambiente, il contenuto di impurità residue nel silicio non dovrebbe superare i 10^{16} m^{-3} . I moderni metodi di purificazione dei semiconduttori non consentono un grado di purezza così elevato.

Il comportamento delle impurità nel silicio segue sostanzialmente le stesse leggi del germanio. Gli atomi degli elementi dei gruppi III e V della tavola periodica, essendo rispettivamente accettori e donatori, creano livelli fini nel band gap. Tuttavia, a causa della costante dielettrica più bassa e della maggiore massa effettiva dei portatori di carica, l'energia di ionizzazione di piccoli donatori e accettori nel silicio è significativamente più alta che nel germanio e per la maggior parte delle impurità è di circa 0,05 eV. Tuttavia, in questo caso, la temperatura ambiente corrisponde alla regione di esaurimento delle impurità.

Le impurità degli elementi dei gruppi I, II, VI e VII introducono livelli profondi nel band gap e limitano fortemente la vita dei portatori di carica non in equilibrio. Rispetto al germanio, il silicio presenta una solubilità limite più elevata di piccoli donatori e una solubilità più bassa di accettori. Allo stesso tempo, la maggior parte delle impurezze ha una solubilità massima a temperature di 1200-1300°C.

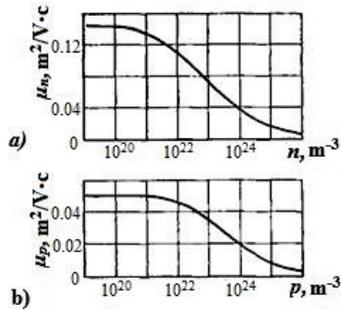


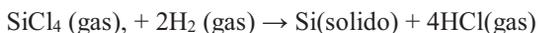
Fig. 3.7. Dipendenza della mobilità dei principali portatori di carica nel silicio dalla concentrazione di elettroni e buche

La Figura 3.7, *a* e *b*, illustra l'effetto della concentrazione di impurità elettricamente attive (*n* - donatori, *p* - accettori) sulla mobilità μ dei portatori di carica nel silicio. Lo scattering dei portatori di carica sulle impurezze ionizzate gioca un ruolo significativo a temperatura ambiente se il contenuto di drogante supera i 10^{22} m^{-3} . Nei cristalli di silicio puro, la mobilità degli elettroni è circa tre volte superiore a quella delle buche. La diminuzione della mobilità dei portatori di carica con l'aumento del livello di drogaggio dei cristalli è la causa della dipendenza non lineare della conduttività specifica dalla concentrazione di droganti. La bassa mobilità dei portatori di carica e la limitata solubilità delle impurità rendono difficile ottenere cristalli singoli di silicio con una resistività inferiore a $10^{-5} \text{ Ohm}\cdot\text{m}$. Quando il contenuto di atomi di impurità supera i 10^{25} m^{-3} in un semiconduttore, è possibile la formazione di vari complessi e microsecrezioni di seconda fase, accompagnata da un cambiamento nell'attività elettrica delle impurità. Ciò si esprime nella discrepanza tra la concentrazione di portatori di carica e la concentrazione di donatori e accettori introdotti.

La principale purificazione del silicio dalle impurità viene effettuata con metodi chimici. I metodi di cristallizzazione sono utilizzati per trasformare il silicio policristallino prodotto chimicamente in cristalli singoli con determinate proprietà elettrofisiche. I cristalli singoli di silicio sfusi vengono coltivati mediante estrazione per fusione e fusione in zona senza crogiolo. Il primo metodo è solitamente utilizzato per produrre cristalli singoli di grandi dimensioni con una resistività inferiore a $2,5 \text{ ohm}\cdot\text{m}$. Il secondo metodo è utilizzato per produrre cristalli singoli ad alta resistenza (con resistività fino a $200 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$) con un basso contenuto di impurità residue, soprattutto ossigeno.

La deposizione epitassiale di strati sottili svolge un ruolo importante nella tecnologia planare dei dispositivi al silicio e dei circuiti integrati. Il termine "epitassi" si riferisce alla crescita orientata di una sostanza

cristallina sulla superficie di un altro cristallo che funge da substrato. La tecnologia industriale più comune per la produzione di strati epitassiali di silicio si basa sulla riduzione con idrogeno del tetracloruro di silicio secondo una reazione:



La reazione avviene in reattori di quarzo o a temperature di circa 1200°C. I substrati sono wafer di silicio monocristallino tagliati da lingotti e sottoposti a lucidatura meccanica e chimica. La velocità di crescita è controllata dal rapporto tra i flussi di gas reagenti e la temperatura. In condizioni ottimali, è di 15-20 nm/s. In pratica, si utilizzano strati di spessore compreso tra 2 e 20 micron. Gli strati sono drogati con una coppia di composti contenenti elementi di impurità (ad esempio, PCl_3 , BBr_3 , AsH_3 , ecc.).

Le temperature operative relativamente basse e i bassi tassi di cristallizzazione determinano un'elevata purezza e perfezione strutturale degli strati epitassiali. La crescita epitassiale di strutture con giunzioni p-n è diventata molto diffusa per isolare gli elementi dei circuiti integrati da una regione di carica massiva, la cui lunghezza aumenta quando si applica una polarizzazione inversa alla giunzione p-n.

In alcuni casi, gli strati epitassiali di silicio vengono depositati su substrati dielettrici monocristallini nella produzione di circuiti integrati. Come materiale di tali substrati vengono utilizzate diverse sostanze: zaffiro (Al_2O_3), spinello, ossido di berillio (BeO), quarzo, ecc. L'epitassia del silicio su substrati dielettrici apre la possibilità di creare circuiti integrati con un isolamento quasi perfetto degli elementi.

Nella produzione di circuiti integrati di grandi dimensioni, si sta diffondendo sempre più un metodo basato sull'uso del silicio policristallino. La particolarità di questo metodo è che uno strato di silicio policristallino viene depositato sulla superficie di wafer di silicio rivestiti con un film dielettrico SiO_2 , che può fungere da resistenza, connessioni e aree di contatto con l'emettitore e il collettore del transistor. Il più delle volte, la deposizione viene effettuata con il metodo della decomposizione termica del silano. Il metodo al silano consente di ottenere una struttura a strati densa e a grana fine a basse temperature (700-1000°C).

I film di silicio policristallino non legato sono tipicamente caratterizzati da un contenuto di impurità residue fino a 10^{20} m^{-3} e da una resistività di $10^4 - 10^6 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$, che è di diversi ordini di grandezza superiore a quella del silicio monocristallino non legato. La maggiore resistività del materiale policristallino è dovuta all'influenza dei confini tra i singoli grani.

Il silicio è un materiale di base per la produzione di transistor e circuiti integrati planari. Lo sviluppo della tecnologia planare per i dispositivi al silicio ha determinato un salto di qualità nella produzione di semiconduttori. I circuiti integrati a semiconduttore, caratterizzati da

dimensioni molto ridotte e da una configurazione complessa delle regioni attive, sono particolarmente utilizzati nelle apparecchiature di ricezione e amplificazione e nella tecnologia informatica.

Nonostante l'intenso sviluppo della microelettronica integrata, i dispositivi discreti al silicio rappresentano una quota significativa della produzione totale di semiconduttori. I diodi raddrizzatori, a impulsi e a microonde, i transistor bipolari a bassa e alta frequenza, ad alta e bassa potenza, i transistor a effetto campo e i dispositivi ad accoppiamento di carica sono realizzati in silicio. Le frequenze operative dei transistor planari raggiungono i 10 GHz.

I diodi raddrizzatori planari al silicio possono sopportare tensioni inverse fino a 1500 V e passare una corrente in avanti fino a 1500 A, superando in modo significativo i diodi al germanio in questi parametri.

La maggior parte dei diodi Zener e dei tiristori sono realizzati in silicio. A seconda del grado di drogaggio del materiale, i diodi Zener al silicio hanno una tensione di stabilizzazione compresa tra 3 e 400 V.

I dispositivi fotosensibili al silicio, in particolare i fotodiodi, sono ampiamente utilizzati nella tecnologia e sono caratterizzati da un'elevata velocità. Lo spettro di fotosensibilità dei fotodiodi al silicio (0,3-1,1 micron) corrisponde bene allo spettro di emissione di molte sorgenti luminose a semiconduttore. Le fotocellule al silicio utilizzate per convertire l'energia solare in elettricità sono chiamate celle solari. Sono utilizzate nei sistemi di alimentazione dei veicoli spaziali. La loro efficienza nella maggior parte dei casi è del 10-12%.

Come il germanio, il silicio è utilizzato per produrre rivelatori di radiazioni nucleari, sensori di Hall e estensimetri. Questi ultimi sfruttano la forte dipendenza della resistività dalla deformazione meccanica.

Poiché il silicio ha un band gap più ampio rispetto al germanio, i dispositivi al silicio possono funzionare a temperature più elevate rispetto a quelli al germanio. Il limite superiore di temperatura dei dispositivi al silicio raggiunge i 180-200 °C.

Germanio. Il germanio (Ge) è comune in natura, ma è presente in quantità molto ridotte in vari minerali. Il suo contenuto nella crosta terrestre è di circa il $7 \cdot 10^{-4}$ %, che è approssimativamente uguale alle riserve naturali di metalli comuni come lo stagno e il piombo, e significativamente superiore alla quantità di argento, cadmio, mercurio, antimonio e una serie di altri elementi. Tuttavia, ottenere il germanio nella sua forma elementare è molto difficile. I minerali con un'alta concentrazione di germanio sono molto rari e non possono servire come materie prime per la produzione di semiconduttori. Attualmente, le principali fonti di produzione industriale di germanio sono i sottoprodotti della produzione di zinco, la cokizzazione del carbone e i concentrati di

germanio ottenuti da minerali di rame-piombo-zinco. La Tabella 3.3 mostra alcuni parametri fisici del germanio e del silicio.

Tabella 3.3. Proprietà di base del germanio e del silicio.

Proprietà	Ge	Si
Periodo del reticolo, nm	0,566	0,542
Densità a 20°C, g/cm ³	5,3	2,3
Coefficiente di temperatura di espansione lineare (0-100°C),	$6 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$
Conduttività termica specifica W/(m·K)	55	80
Capacità termica specifica (0 - 100°C), J/(kg·K)	333	710
Punto di fusione, °C	936	1414
Coefficiente di tensione superficiale al punto di	0,6	0,72
Resistività a 20 °C, Ohm·m	0,47	$2 \cdot 10^3$
Concentrazione intrinseca di portatori di carica, m ⁻³	$2,5 \cdot 10^{19}$	10^{16}
Band gap, eV:		
a 0 K	0,746	1,165
a 300 K	0,665	1,12
Mobilità degli elettroni, m ²	0,39	0,14
Mobilità del foro, m ² /(V·s)	0,19	0,05
Lavoro in uscita degli	4,8	4,3
Costante dielettrica	16	12,5

Il germanio puro ha una lucentezza metallica ed è caratterizzato da durezza e fragilità relativamente elevate. Come il silicio, cristallizza nella struttura di un diamante, la cui cella unitaria contiene otto atomi. Un reticolo cristallino di tipo diamantato può essere visto come la sovrapposizione di due reticoli cubici a facce centrate sfalsati l'uno dall'altro nella direzione della diagonale del volume di un quarto della sua lunghezza. Ogni atomo del reticolo è circondato da quattro vicini situati ai vertici di un tetraedro regolare.

Il germanio cristallino è chimicamente stabile in aria a temperatura ambiente. Se riscaldato in aria a temperature superiori a 650°C, si ossida formando GeO₂.

A temperatura ambiente, il germanio è insolubile in acqua, acido cloridrico e acido solforico diluito. In condizioni normali, i solventi attivi del germanio sono una miscela di acidi nitrico e fluoridrico, una soluzione di perossido di idrogeno e agenti mordenzanti contenenti reagenti ossidanti. Se riscaldato, il germanio reagisce intensamente con alogeni, zolfo e composti dello zolfo.

Il germanio ha un punto di fusione relativamente basso (936°C) e una pressione di vapore saturo trascurabile a questa temperatura. Questa circostanza semplifica notevolmente la tecnica di purificazione della cristallizzazione e la crescita di cristalli singoli. Anche allo stato fuso, il germanio non interagisce praticamente con la grafite e il vetro di quarzo, il che rende possibile il loro utilizzo come crogioli e navette nei processi metallurgici. Il germanio liquido ha la capacità di assorbire intensamente l'idrogeno, la cui solubilità massima nella fase solida non supera i $4 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$, e l'idrogeno è un'impurezza elettricamente neutra.

In condizioni normali, il germanio puro è trasparente alle radiazioni elettromagnetiche con lunghezza d'onda superiore a 1,8 micron.

A temperatura ambiente, la mobilità degli elettroni è circa doppia rispetto a quella delle buche. Tuttavia, questo rapporto non rimane invariato al variare della temperatura.

Per la produzione di dispositivi semiconduttori, il germanio viene utilizzato con determinate aggiunte di impurità elettricamente attive. Il processo di aggiunta di impurità al materiale di base è chiamato lega. Gli elementi dei gruppi V e III della tavola periodica sono più spesso utilizzati rispettivamente come donatori e accettori. Queste impurità creano piccoli livelli nel band gap con un'energia di ionizzazione di circa 0,01 eV. Le impurità di elementi dei gruppi I, II, VI, VII e VIII hanno un comportamento più complesso. Quando vengono introdotte nel reticolo del germanio, gli atomi della maggior parte di questi elementi mostrano le proprietà dei centri multicarica, cioè creano diversi livelli piuttosto profondi nel band gap, a causa delle forti differenze nelle valenze degli atomi dell'impurità e della base.

I piccoli donatori e accettori a temperature superiori a 90 K sono completamente ionizzati, quindi in condizioni normali la concentrazione di portatori di carica nel germanio è determinata dalla concentrazione dell'impurità.

Nel germanio a bassa lega si osserva un coefficiente di temperatura positivo della resistività in un intervallo di temperature piuttosto ampio, ossia una diminuzione della conduttività quando si riscalda, dovuta a una diminuzione della mobilità dei portatori di carica a causa della loro dispersione, che aumenta, sulle vibrazioni termiche dei nodi reticolari.

La temperatura alla quale inizia a manifestarsi la conduttività elettrica intrinseca dipende dalla concentrazione dell'impurità di lega. Così, con un contenuto di piccoli donatori di $8 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$, la conducibilità

elettrica intrinseca si manifesta a 50°C , mentre se la concentrazione di donatori è di $7 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3}$, per osservare la conducibilità elettrica intrinseca, il germanio deve essere riscaldato oltre i 200°C .

Affinché il germanio abbia la sua conducibilità elettrica intrinseca a temperatura ambiente, deve essere purificato in modo da non contenere più di 10^{19} m^{-3} impurità.

Di interesse pratico è la dipendenza della resistività del germanio dalla concentrazione di atomi di impurità (donatori o accettori). Questa dipendenza, stabilita sperimentalmente, è mostrata in fig. 3.8.a). Viene utilizzata per calcolare la quantità di impurità di lega necessaria per far crescere cristalli singoli di germanio con la resistività richiesta.

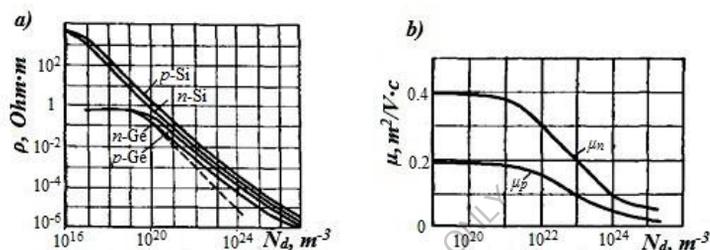


Fig. 3.8. a) - Dipendenza della resistività del silicio e del germanio dalla concentrazione di impurità a 20°C , b) - Dipendenza della mobilità dei portatori di carica principali nel germanio dalla concentrazione di impurità di lega.

La dipendenza dalla concentrazione della mobilità degli elettroni e delle buche nel germanio è mostrata in fig. 3.8.b). Se la concentrazione di atomi di impurità supera i 10^{22} m^{-3} , lo scattering sulle impurità ionizzate inizia a svolgere un ruolo significativo anche a temperatura ambiente. A parità di drogaggio, la mobilità delle buche in un materiale di tipo p è sempre inferiore alla mobilità degli elettroni in un materiale di tipo n. Pertanto, la dipendenza della resistività dalla concentrazione di droganti per il germanio di tipo p è maggiore rispetto all'analoga dipendenza per il germanio di tipo n (vedi fig. 3.8.a)). A concentrazioni di impurità inferiori a 10^{19} m^{-3} , la resistività del germanio è determinata dalla sua stessa conducibilità elettrica.

Il trattamento termico del germanio può portare a un cambiamento significativo delle sue proprietà elettriche. Ad esempio, se un campione di tipo n viene riscaldato a una temperatura superiore a 550°C , mantenuto per un certo tempo e poi raffreddato rapidamente (quenched), si può osservare un cambiamento nel tipo di conducibilità elettrica del semiconduttore. Un trattamento termico simile del germanio di tipo p porta a una diminuzione della resistività senza modificare il tipo di

conducibilità elettrica. La ricottura dei campioni temprati a una temperatura di 500-550°C ripristina non solo il tipo di conducibilità elettrica, ma anche il valore di resistività originale. Il cambiamento delle proprietà durante l'indurimento dei campioni è associato alla formazione di cosiddetti accettori termici in essi a causa di difetti strutturali.

A base di germanio viene prodotta un'ampia gamma di dispositivi per vari scopi, principalmente diodi e transistor. I più utilizzati sono i diodi raddrizzatori planari e i transistor bipolari in lega.

Il germanio viene utilizzato anche per creare diodi a valanga e a tunnel, varicap, diodi puntuali ad alta frequenza, a impulsi e a microonde. Nei diodi a impulsi, per ottenere un'elevata velocità di commutazione è necessario un materiale con una breve vita dei portatori di carica non in equilibrio. Questo requisito è soddisfatto dal germanio drogato con oro. Le impurità d'oro creano centri di ricombinazione efficaci nel germanio.

Grazie alla mobilità relativamente elevata dei portatori di carica, il germanio viene utilizzato per produrre sensori di Hall e altri dispositivi magneticamente sensibili.

Le proprietà ottiche del germanio consentono di realizzare fototransistor e fotodiodi, lenti ottiche ad alto rendimento luminoso (per i raggi infrarossi), filtri ottici, modulatori di luce e onde radio corte e contatori di particelle nucleari. L'intervallo di temperatura operativa dei dispositivi al germanio va da (-60°C) a (+70°C). Il basso limite superiore della temperatura operativa è uno svantaggio significativo del germanio.

Composti semiconduttori del tipo A B^{IIIIV} . I composti A B^{IIIIV} sono gli analoghi elettronici più vicini al silicio e al germanio. Si formano come risultato dell'interazione di elementi del III sottogruppo della Tavola Periodica (boro, alluminio, gallio, indio) con elementi del V sottogruppo (azoto, fosforo, arsenico e antimonio). Il bismuto e il tallio non formano composti di questa serie. A B^{IIIIV} composti sono solitamente classificati in base all'elemento metallico. Di conseguenza, si distinguono nitruuri, fosfuri, arsenuri e antimonuri.

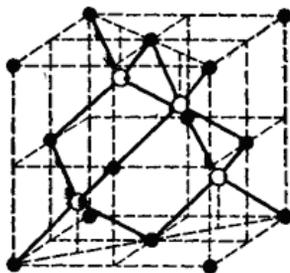


Fig. 3.9. Struttura della sfalerite dei composti del tipo $A^{III} B^V$: sfere nere - atomi A^{III} ; bianche - atomi B^V

Ad eccezione del nitruro, tutti i composti $A B^{IIIIV}$ cristallizzano in reticoli cubici di zinco (vedi fig. 3.9). Il nitruro è caratterizzato da una struttura esagonale (wurtzite). Nei reticoli di entrambi i tipi, ogni atomo di un elemento del gruppo III è circondato da un tetraedro di quattro atomi di un elemento del gruppo V e viceversa. A differenza della struttura del diamante, la struttura della sfalerite non presenta un centro di simmetria. Questa caratteristica porta a una differenza nelle proprietà delle superfici (111) e $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$, che sono composte interamente da atomi di nomi diversi. Il diverso comportamento delle facce (111) e $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ si manifesta durante l'incisione, l'ossidazione e la crescita del cristallo.

I composti $A B^{IIIIV}$ sono caratterizzati da un tipo particolare di legame chimico, il cosiddetto legame donatore-accettore. Dei quattro legami covalenti che ogni atomo utilizza per costruire il reticolo, tre sono formati dalla condivisione degli elettroni di valenza degli atomi A^{III} e B^V e il quarto legame è costituito da una coppia non condivisa di elettroni di valenza degli atomi B^V . In ogni legame covalente, la densità massima di elettroni è spostata verso l'atomo con l'elettronegatività più alta, cioè le nuvole di elettroni sono tirate verso i nodi del reticolo dove si trovano gli atomi B^V . A causa di questa polarizzazione dei legami, gli atomi A^{III} acquisiscono una certa carica positiva effettiva e gli atomi B^V una carica negativa. Il valore di questa carica efficace ($\pm q$) determina il grado di ionicità del composto, che naturalmente cambia quando si passa da un composto all'altro in base alla posizione degli elementi chimici nella tavola periodica di D. I. Mendeleev.

Una proprietà preziosa di molti semiconduttori $A B^{IIIIV}$ è l'elevata efficienza di ricombinazione radiativa dei portatori di carica non in equilibrio. Per generare radiazioni nella regione spettrale del visibile, il band gap di un semiconduttore deve superare 1,7 eV. Tra i composti del tipo $A B^{IIIIV}$ tecnologicamente sviluppati, il fosfuro di gallio GaP e il nitruro di gallio GaN soddisfano questa condizione. I materiali con un band gap più stretto sono in grado di irradiare in modo efficiente nella regione dell'infrarosso. Tra questi, in particolare, l'arseniuro di gallio, $\Delta E_g = 1,43$ eV.

La tecnologia per la produzione di composti semiconduttori si differenzia da quella per la produzione di semiconduttori elementari in quanto prevede un'operazione di sintesi. Per ottenere composti $A B^{IIIIV}$ non degradabili (antimoniidi), la sintesi avviene per fusione diretta dei componenti iniziali, ad esempio indio e antimONIO. Le ulteriori operazioni tecnologiche (cristallizzazione, purificazione, drogaggio e crescita di un singolo cristallo) non differiscono sostanzialmente da quelle utilizzate per la produzione di germanio.

Quando si ottengono cristalli di composti degradabili, l'apparecchiatura di processo è più complicata. Il metodo più efficace per la crescita di cristalli singoli di composti degradabili consiste nell'estrarli da sotto uno strato di flusso inerte. Uno strato di flusso liquido trasparente, un gas inerte sotto pressione, assicura la completa sigillatura del crogiolo e sopprime l'evaporazione dei componenti volatili dalla fusione. Come fluido sigillante, si utilizza una fusione di anidride di boro B_2O_3 , che ha una bassa attività chimica e un basso punto di rammollimento. Lo spessore dello strato di flusso è solitamente di circa 1 cm.

I cristalli singoli ottenuti per estrazione dalla fusione hanno una purezza chimica non sufficientemente elevata, contengono un numero significativo di difetti puntiformi nella struttura, che sono efficaci trappole di ricombinazione e causano una breve durata dei portatori di carica non in equilibrio. Per questo motivo, la maggior parte dei dispositivi semiconduttori è realizzata sulla base di strati epitassiali depositati dalla fase liquida o gassosa. Come substrati si utilizzano wafer tagliati da lingotti monocristallini in una determinata direzione cristallografica. Nei processi di epitassi in fase liquida, il metodo più utilizzato è lo shuttle multicamera.

La diversità delle proprietà dei semiconduttori $A B^{IIIIV}$ determina la loro ampia applicazione in strumenti e dispositivi per vari scopi tecnici. Un particolare interesse per questo gruppo di materiali è stato suscitato dalle esigenze dell'optoelettronica per le sorgenti e i ricevitori di radiazioni ad alta velocità. I laser a iniezione e i LED basati sui semiconduttori $A B^{IIIIV}$ sono caratterizzati da un'elevata efficienza di conversione dell'energia elettrica in radiazione elettromagnetica. Tra i vantaggi significativi di questi dispositivi vi sono le dimensioni ridotte, la semplicità di progettazione, la possibilità di modulare internamente la radiazione modificando la tensione di controllo e la compatibilità con gli elementi dei circuiti integrati in termini di parametri operativi e operazioni tecnologiche.

Grazie a ciò, i laser e i LED a semiconduttore sono utilizzati con successo nei settori dell'informatica, dell'informazione e della misurazione, della tecnologia della difesa, dell'aeronautica e delle comunicazioni, nonché negli elettrodomestici. L'arseniuro di gallio è stato il primo semiconduttore a produrre un laser a iniezione nel 1962, cioè a generare una radiazione coerente utilizzando una giunzione $p-n$.

L'ampia gamma di valori di bandgap dei semiconduttori $A B^{IIIIV}$ consente di utilizzarli per creare vari tipi di fotorivelatori che coprono un'ampia gamma di spettri. Tra questi, i fotodiodi e le fotocelle sono i più utilizzati. L'arseniuro di gallio è potenzialmente uno dei migliori materiali fotosensibili da utilizzare nelle celle solari. L'antimoniuro di indio è di grande importanza tecnica per la produzione di ricevitori di radiazioni infrarosse.

L'arseniuro di gallio e l'antimoniuro di indio sono utilizzati per realizzare diodi a tunnel. Rispetto ai diodi al germanio, i dispositivi all'arseniuro di gallio sono caratterizzati da una temperatura di esercizio più elevata, mentre i diodi all'InSb presentano migliori proprietà di frequenza a basse temperature.

I magnetoresistori e i trasduttori di Hall sono realizzati sulla base di semiconduttori a banda stretta come $A B^{IIIIV}$ (InSb, InAs).

I progressi nella tecnologia dell'arseniuro di gallio nell'ultimo decennio hanno aperto ampie prospettive per l'uso di questo materiale per creare transistor a effetto campo e circuiti integrati ad alte prestazioni. Rispetto al silicio, l'arseniuro di gallio è un materiale tecnologicamente più complesso. È difficile far crescere su di esso un ossido nativo stabile e non consente il drogaggio per diffusione con impurità donatrici. La decomposizione ad alte temperature crea difficoltà nelle operazioni di ricottura. Tuttavia, i miglioramenti nelle tecniche di epitassia, lo sviluppo del drogaggio ionico, la ricottura laser, la litografia a fascio di elettroni e lo sviluppo di nuovi metodi di deposizione di strati protettivi rendono possibile realizzare il potenziale dell'arseniuro di gallio per aumentare il grado di integrazione e le prestazioni dei circuiti integrati.

Carburo di silicio. Il carburo di silicio SiC è l'unico composto binario formato da elementi semiconduttori del gruppo IV della tavola periodica. Questo materiale è estremamente raro in natura e si presenta in quantità limitate.

Per quanto riguarda il tipo di legame chimico, il carburo di silicio è un cristallo covalente. La percentuale di legame ionico, dovuta alla differenza di elettronegatività degli atomi di Si e C, non supera il 10-12%. I forti legami chimici tra gli atomi di silicio e di carbonio determinano un'elevata stabilità chimica e termica del SiC, nonché un'elevata durezza.

La modificazione esagonale del SiC consiste in molti politipi, cioè strutture cristalline che differiscono nell'ordine degli atomi. Il politipismo è causato dalla diversa orientazione di uno strato di atomi dello stesso nome rispetto a un altro, sebbene tutti i politipi mantengano lo stesso ordine a corto raggio, ovvero ogni atomo di silicio nel reticolo cristallino è circondato da un tetraedro di atomi di carbonio e viceversa. Attualmente sono noti più di 100 diversi politipi di SiC. Le proprietà elettrofisiche dei più comuni politipi di carburo di silicio sono sistematizzate nella tabella. 3. 4.

Come si può notare dalla Tabella. 3.4, i valori del band gap e della mobilità elettronica differiscono significativamente tra i diversi politipi. La variazione delle proprietà elettrofisiche di base nei diversi politipi ci permette di considerare il carburo di silicio come un gruppo di materiali semiconduttori con la stessa composizione chimica.

La conducibilità elettrica dei cristalli a temperatura normale è impura. Il tipo di conducibilità elettrica e il colore dei cristalli di carburo di silicio dipendono dalle impurità estranee o sono determinati dall'eccesso di atomi di Si o C rispetto alla composizione stechiometrica. Il carburo di silicio puro di composizione stechiometrica è incolore.

Tabella 3.4. Proprietà elettrofisiche dei principali politipi di carburo di silicio (T=300 K)

Modifica	β - SiC	α - SiC			
		15 R	6H	4H	2H
Simbolo del politopo	3C	15 R	6H	4H	2H
Periodo del reticolo x10, nm	4,359	3.073 (a) 37,3(c)	3,081 15.12	3,076 10.05	-
Larghezza della zona proibita, eV	2,39	2,986	3,023	3,265	3,333
Mobilità degli elettroni, m ² /(V·s)	0,1	0,05	0,033	0,07	-
Mobilità dei fori, m ² /(V·s)	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006

Il carburo di silicio è di interesse pratico per la produzione di potenti diodi raddrizzatori, estensimetri ad alta temperatura e contatori di particelle ad alta energia che possono operare in ambienti chimicamente aggressivi. Vengono illustrate le possibilità di utilizzare il carburo di silicio per creare transistor a effetto campo con buone proprietà di frequenza, diodi a microonde, termistori e alcuni altri dispositivi.

I varistori (resistenze non lineari a semiconduttore), i riscaldatori ad alta temperatura e gli assorbitori a guida d'onda sono prodotti sulla base di carburo di silicio in polvere legato a un legante. I varistori sono utilizzati nei sistemi di automazione, nei computer e negli apparecchi elettrici per stabilizzare correnti e tensioni, proteggere i circuiti da sovratensioni, regolare e convertire i segnali. Grazie alla sua elevata durezza, il carburo di silicio viene utilizzato per la lavorazione di vari materiali.

Capitolo 4. Dielettrici

4.1 Informazioni generali

I dielettrici sono sostanze la cui principale proprietà elettrica è la capacità di polarizzarsi in un campo elettrico. Nei dielettrici gassosi, liquidi e solidi, le cariche elettriche sono fortemente legate agli atomi, alle molecole o agli ioni e possono muoversi solo in presenza di un campo elettrico, con la conseguente separazione dei centri di carica positiva e negativa, cioè la polarizzazione. I dielettrici contengono anche cariche libere che, muovendosi in un campo elettrico, causano la conducibilità elettrica. Tuttavia, il numero di tali cariche libere in un dielettrico è piccolo, quindi la corrente è bassa. I dielettrici utilizzati come materiali isolanti sono detti passivi. Esistono dielettrici attivi i cui parametri possono essere regolati modificando l'intensità del campo elettrico, la temperatura e le sollecitazioni meccaniche. In base alla loro composizione chimica, si dividono in composti organici di carbonio con idrogeno, azoto, ossigeno e altri elementi; organici elementari, le cui molecole includono atomi di silicio, magnesio, alluminio, titanio e altri elementi; e inorganici, quelli che non contengono carbonio. Tra le varie proprietà dei dielettrici che ne determinano l'applicazione tecnica, le principali sono la conducibilità elettrica, la polarizzazione, le perdite dielettriche, la resistenza elettrica e l'invecchiamento elettrico. Le principali proprietà che determinano l'uso dei dielettrici nelle apparecchiature elettriche e radiotecniche sono le loro qualità isolanti e la capacità di creare capacità elettrica grazie all'esistenza di un campo elettrico interno, cioè la polarizzazione. Per svolgere la funzione di isolamento elettrico, i materiali dielettrici devono impedire il passaggio della corrente elettrica attraverso percorsi indesiderati per il funzionamento del dispositivo. Da questo punto di vista, la caratteristica principale dei dielettrici è il valore della conduttività elettrica specifica o resistività.

4.2. Polarizzazione dei dielettrici

Il fenomeno fondamentale che determina la possibilità di utilizzare un dielettrico per creare capacità nei condensatori delle apparecchiature elettroniche è la polarizzazione.

Sotto l'influenza di un campo elettrico, la polarizzazione elettrica si manifesta con un limitato spostamento elastico delle cariche legate, l'orientamento delle molecole di dipolo, in conseguenza del quale un certo volume o superficie del dielettrico acquisisce un momento elettrico. Una volta rimosso il campo elettrico, le cariche legate tornano al loro stato originale.

Per confrontare dielettrici con diversi gradi di polarizzazione, si utilizza il concetto di permittività relativa ϵ . Questo valore è il rapporto tra la carica Q di un condensatore con un particolare dielettrico e la carica Q_0

di un condensatore della stessa dimensione e tensione con il vuoto tra i suoi rivestimenti:

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_0}, \quad (4.1)$$

ε è una quantità adimensionale ed è sempre maggiore di uno, poiché i dielettrici reali, a differenza del vuoto, contengono sempre cariche elettriche.

I dielettrici si dividono in due classi: polari e non polari. Nelle molecole di sostanze non polari, i centri di attrazione delle cariche positive e negative totali coincidono. Le molecole dei materiali polari hanno la forma di dipoli elettrici che possono orientarsi in un campo elettrico.

La polarizzazione elettronica è uno spostamento e una deformazione elastica dei gusci elettronici di atomi e ioni. Il tempo per l'instaurazione della polarizzazione elettronica è molto breve (circa 10-15 s) e il processo avviene praticamente senza perdita di energia. La polarizzazione elettronica si osserva in tutti i dielettrici, senza eccezioni, poiché tutti i dielettrici hanno elettroni in uno stato legato.

La polarizzazione ionica è caratteristica dei dielettrici solidi con struttura ionica (mica, corindone, salgemma) e si manifesta con lo spostamento elastico degli ioni legati sotto l'azione di un campo elettrico. In questo caso, lo spostamento degli ioni avviene a una distanza inferiore alla costante di reticolo cristallino (la distanza minima tra ioni identici). Il tempo di instaurazione della polarizzazione è di circa 10-13 s e non si verifica alcuna perdita di energia.

Le polarizzazioni di rilassamento degli elettroni e degli ioni sono accompagnate da perdite dielettriche. La polarizzazione di rilassamento degli elettroni si verifica a causa dell'eccitazione di elettroni o buchi in eccesso (difettosi) da parte dell'energia termica. La polarizzazione di rilassamento ionico è caratteristica dei materiali a struttura ionica con impacchettamento lasco di ioni (ad esempio, nei vetri inorganici). In questo tipo di polarizzazione, gli ioni debolmente legati si spostano di una o più distanze atomiche sotto l'influenza di un campo e si fissano in una nuova posizione, creando un'asimmetria nella distribuzione della carica e un momento elettrico per unità di volume. Il tempo di rilassamento è di 10^{-11} - 10^{-8} s.

La polarizzazione dipolo-rilassamento si osserva solitamente nei dielettrici organici polari (polimetilmetacrilato, cloruro di polivinile, ecc.) e consiste nell'orientamento e nella rotazione di molecole dipolo, gruppi dipolo sotto l'azione di un campo elettrico. Questo tipo di polarizzazione è accompagnato da perdite di energia. Più bassa è la temperatura e maggiore è il numero di dipoli, più lungo è il tempo di rilassamento, che varia tra 10^{-10} e 10^{-6} s.

La polarizzazione strutturale è causata dal movimento di cariche libere (ioni positivi e negativi, elettroni) e dalla loro fissazione su difetti e

interfacce di diversi componenti del materiale isolante. Questo tipo di polarizzazione si osserva nei dielettrici eterogenei (plastiche composite, getinax, textoliti, ceramiche, ecc.), i cui componenti hanno proprietà elettriche diverse. Il tempo di rilassamento può raggiungere le decine di minuti e la polarizzazione è accompagnata da perdite dielettriche.

I meccanismi di polarizzazione discussi sopra sono caratteristici dei cosiddetti dielettrici lineari, la cui dipendenza della carica (polarizzabilità) dall'intensità del campo elettrico è una funzione lineare e il valore di ϵ è indipendente dal campo. Un gruppo speciale di dielettrici, chiamati dielettrici non lineari o attivi, è costituito dai ferroelettrici, che presentano una polarizzazione spontanea.

A una temperatura caratteristica del materiale, chiamata punto di Curie, le singole cellule unitarie di un cristallo ferroelettrico acquisiscono un momento elettrico di dipolo dovuto allo spostamento di un catione verso un anione, ossia alla creazione di una distribuzione asimmetrica di cariche di nome diverso. Un insieme di celle unitarie vicine è una regione con cariche positive e negative separate, cioè una regione con un momento elettrico di dipolo interno. Tali regioni hanno una dimensione di $\sim 0,1\text{-}1\text{ mm}^3$ e sono chiamate domini. Pertanto, in determinate condizioni, il materiale è spontaneamente polarizzato.

Prima dell'azione di un campo elettrico esterno, le direzioni dei momenti di dipolo delle singole regioni del dominio sono caotiche e la loro somma è pari a zero, quindi il ferroelettrico è generalmente neutro, non polarizzato. Sotto l'azione di un campo elettrico esterno, i processi di spostamento dei confini dei domini e di orientamento dei vettori del momento elettrico dei domini principalmente nella direzione del campo esterno si verificano in una ferroelettricità, cioè la polarizzazione aumenta. La dipendenza della carica (polarizzabilità) di un ferroelettrico dall'intensità del campo elettrico è non lineare e in un campo alternato è un ciclo di isteresi dielettrica (fig. 4.1a). Pertanto, durante la polarizzazione spontanea, anche la permittività relativa del materiale dipende in modo non lineare dall'intensità del campo elettrico (fig. 4.1b).

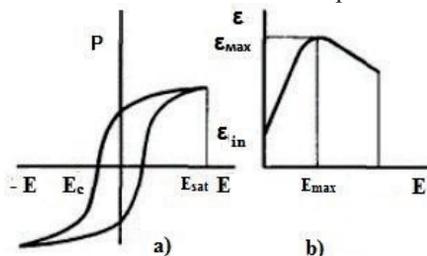


Fig. 4.1. Dipendenza della polarizzazione P (a) e della permittività relativa ϵ (b) di un ferroelettrico dall'intensità del campo elettrico E .

La polarizzazione spontanea è accompagnata da perdite dielettriche e l'area dell'anello di isteresi dielettrica è proporzionale alla potenza di perdita.

La natura della dipendenza di $\varepsilon(T)$ di un particolare dielettrico è determinata dal tipo di polarizzazione predominante. Nei materiali non polari (polietilene, paraffina), ε diminuisce con l'aumentare della temperatura a causa della diminuzione della densità e, di conseguenza, della concentrazione di oggetti di polarizzazione. Quando la temperatura sale fino al punto di Curie, l' ε dei ferroelettrici aumenta a causa della facilitazione della polarizzazione del dominio, mentre al di sopra del punto di Curie diminuisce a causa dell'interruzione della struttura del dominio.

4.3. Correnti di polarizzazione e conducibilità elettrica dei dielettrici

I processi di polarizzazione di qualsiasi carica in una sostanza, che procedono nel tempo fino al momento in cui si stabilisce e si ottiene lo stato di equilibrio, causano la comparsa di correnti di polarizzazione, o correnti di spostamento J_{dc} nei dielettrici. Le correnti di spostamento delle cariche legate elasticamente nelle polarizzazioni elettroniche e ioniche hanno una durata così breve che di solito non possono essere rilevate da un dispositivo. Le correnti di spostamento a diversi tipi di polarizzazione ritardata, che si osservano in molti dielettrici tecnici, sono chiamate correnti di assorbimento J_{ab} .

A tensione costante, le correnti di assorbimento, che cambiano direzione, si verificano solo durante i periodi di accensione e spegnimento della tensione. A tensione alternata, invece, si verificano per tutto il tempo in cui il materiale si trova nel campo elettrico.

La presenza di un piccolo numero di cariche libere nei dielettrici tecnici, così come la loro iniezione dagli elettrodi, porta alla comparsa di piccole correnti di conduzione J_c .

Pertanto, la densità di corrente totale nel dielettrico, detta corrente di dispersione, è la somma delle densità di corrente di assorbimento e trasmissiva:

$$J_{lc} = J_{dc} + J_c \quad (4.2)$$

I dielettrici utilizzati, come detto, contengono una piccola quantità di cariche libere nel loro volume che si muovono nel campo elettrico. Questa corrente è chiamata corrente di dispersione. Nei dielettrici, le cariche libere che si muovono in un campo elettrico possono essere ioni (positivi e negativi), elettroni e vacuità di elettroni (buche) e polaroni. Gli elettroni possono acquisire energia sufficiente per spostarsi nella banda di conduzione a seguito del riscaldamento del dielettrico o di un'irradiazione

ionizzante. In campi forti, è possibile iniettare cariche (elettroni, buche) nel dielettrico da elettrodi metallici; è possibile formare cariche libere (ioni ed elettroni) come risultato della ionizzazione da impatto, quando l'energia delle cariche libere è sufficiente a ionizzare gli atomi in una collisione.

I dielettrici solidi sono caratterizzati da una conducibilità elettrica ionica. Quando tali dielettrici vengono riscaldati o illuminati, esposti a radiazioni o a un forte campo elettrico, i difetti e le impurità in essi contenuti vengono prima ionizzati. Gli ioni così formati determinano la regione delle impurità a bassa temperatura della conducibilità elettrica del dielettrico. Con un'esposizione più intensa al dielettrico, le particelle principali del materiale vengono ionizzate. In questo caso, la conduttività specifica varia con la temperatura a un tasso più elevato, poiché il numero di ioni che si formano durante la ionizzazione delle particelle principali è maggiore rispetto alla ionizzazione dei difetti e delle impurità. L'energia di attivazione delle particelle principali è più alta; questa regione di conducibilità elettrica è chiamata intrinseca ad alta temperatura. La conducibilità elettrica superficiale dei dielettrici è determinata dalla capacità della superficie del materiale di adsorbire gli inquinanti, in particolare l'umidità contenuta nell'atmosfera circostante. I dielettrici polari sono ben bagnati, sono detti idrofili in contrasto con i dielettrici idrofobici, che non sono bagnati dall'acqua. I dielettrici non polari sono idrofobici. Un sottile strato di umidità sulla superficie riduce la resistenza superficiale.

4.4. Perdite dielettriche nei dielettrici

La perdita dielettrica è la potenza dissipata in un dielettrico sotto l'influenza di un campo elettrico applicato ad esso, che ne provoca il riscaldamento. Consideriamo le perdite dielettriche totali causate da tensioni CA e CC dovute a correnti di conduzione.

La natura delle perdite dielettriche nei materiali isolanti è diversa e dipende dallo stato aggregato della sostanza: gassoso, liquido e solido. Quando si studiano le perdite dielettriche associate al fenomeno della polarizzazione dielettrica, si considerano le curve di dipendenza della carica Q sui rivestimenti dei condensatori con un dato dielettrico dalla tensione del campo elettrico. Le perdite causate da polarizzazioni istantanee non riscaldano il dielettrico e sono rappresentate graficamente da una dipendenza lineare. Le perdite causate da qualsiasi polarizzazione ritardata sono espresse dall'area di un ovale proporzionale all'energia dissipata in calore per periodo di tensione. Per i dielettrici con polarizzazione spontanea, la perdita di energia per periodo è determinata dall'area delimitata dall'anello di isteresi. Consideriamo le perdite in un dielettrico utilizzando i diagrammi vettoriali dei circuiti di sostituzione.

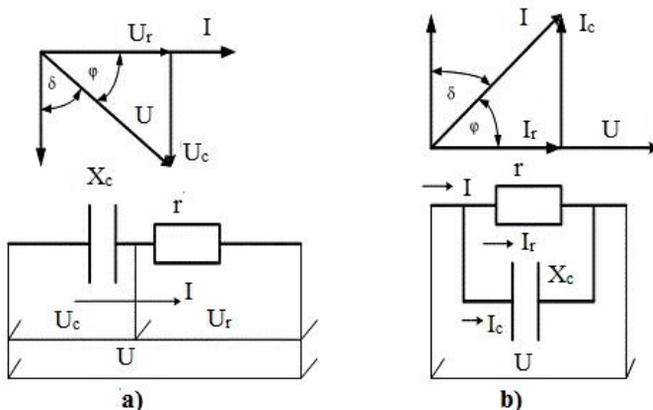


Fig. 4.2. Diagrammi vettoriali degli schemi di sostituzione sequenziale (a) e parallelo (b)

Con una tensione U costante sulla sezione di isolamento con una resistenza R , il valore della perdita attiva P_a è determinato come segue

$$P_a = U^2 / R = U I = I^2 R, \quad (4.3)$$

dove I è la corrente di dispersione attraverso il dielettrico o l'isolamento.

Con una forma d'onda di tensione variabile, si ha il valore dell'energia di dissipazione del calore W_a o delle perdite attive P_a , sulla sezione di isolamento con capacità C , al valore attuale della tensione applicata U , alla frequenza f , $\omega = 2\pi f$ (frequenza circolare). In questo caso, è necessario trovare l'angolo di fase φ tra la corrente totale e la tensione totale dai diagrammi vettoriali degli schemi di sostituzione dell'isolamento in serie e in parallelo e, sommandolo a 90° , trovare l'angolo δ - l'angolo delle perdite dielettriche, secondo le figure 4.2. a), b). Inoltre, maggiore è la dissipazione di potenza nel dielettrico, che si trasforma in calore, minore è l'angolo di fase φ e maggiore è l'angolo δ e, di conseguenza, la sua funzione $\text{tg} \delta$ - la tangente dell'angolo di perdita dielettrica. Quindi

$$W_a = P_a = U I \cos \varphi = U I \text{tg} \delta = U \omega C \text{tg} \delta. \quad (4.4)$$

Possiamo esprimere $\text{tg} \delta$ dai diagrammi vettoriali di fig. 4.2. a), b):

$$\text{tg} \delta = U_a / U_c \text{ e } \text{tg} \delta = I_a / I_c. \quad (4.5)$$

Il fattore di perdita δ è un parametro del materiale stesso e del prodotto dielettrico. Spesso si usa il termine "fattore di qualità dell'isolamento", che è l'inverso della tangente dell'angolo di perdita dielettrica.

$$Q = 1 / \text{tg} \delta = U_c / U_r \text{ o } Q = 1 / \text{tg} \delta = I_c / I_r. \quad (4.6)$$

Per i materiali di alta qualità, i valori di $tg\delta$ sono dell'ordine delle migliaia e persino delle decine di migliaia di frazioni di unità, ma possono essere più elevati per i materiali elettrici di qualità inferiore (diversi centesimi di unità).

Il prodotto della permittività relativa e della tangente di perdita dielettrica ($\varepsilon tg\delta$) è chiamato fattore di perdita dielettrica di un materiale.

In presenza di tensioni alternate, le perdite sono di solito maggiori rispetto alle tensioni costanti, come dimostrato dalla disuguaglianza

$$f\rho\varepsilon tg\delta > 1,8 \cdot 10^{10}.$$

Questa disuguaglianza mette in relazione la resistività ρ misurata a una tensione costante con i parametri ε e $tg\delta$ a una tensione alternata a una frequenza f .

4.5. Ripartizione elettrica dei dielettrici

L'affidabilità e la durata dell'isolamento elettrico dei fili, del dielettrico dei condensatori e di altre parti delle apparecchiature elettroniche dipendono dalla cosiddetta resistenza elettrica del dielettrico. Il breakdown è la perdita delle proprietà dielettriche del materiale nel canale formato tra gli elettrodi sotto l'influenza di un campo elettrico. La tensione alla quale si verifica la rottura è chiamata tensione di rottura (U_b).

La resistenza elettrica del dielettrico E_b in un campo elettrico omogeneo è determinata dal valore della tensione di breakdown U_b , correlata allo spessore d del dielettrico (distanza tra gli elettrodi):

$$E_b = U_b / d. (4.7)$$

Nel caso di un campo disomogeneo, E_b si riferisce al valore medio della forza di rottura.

Il valore di E_b caratterizza la capacità di un dielettrico di resistere all'effetto distruttivo di un campo elettrico.

Il fenomeno del breakdown è associato alla rottura dei legami chimici tra le molecole (atomi), alla ionizzazione degli atomi della sostanza con un flusso di elettroni a valanga che aumenta sotto l'influenza della ionizzazione d'urto. La resistenza elettrica di un materiale è determinata dalla lunghezza del percorso libero degli elettroni, ovvero dalla densità della sostanza e dal suo stato di aggregazione.

4.6. Scomposizione dei dielettrici solidi

Nei dielettrici solidi si distinguono tre tipi principali di rottura: elettrica, elettrotermica ed elettrochimica. Il verificarsi di uno o dell'altro tipo di rottura in un dielettrico dipende dalle sue proprietà, dalla forma dell'elettrodo e dalle condizioni. Un breakdown elettrico è un breakdown causato dalla ionizzazione dell'urto o dalla rottura dei legami tra le particelle dielettriche direttamente sotto l'influenza di un campo elettrico.

La resistenza elettrica E_b dei dielettrici solidi alla rottura elettrica si trova entro limiti relativamente stretti: 100 - 1000 MV/m, che è vicina alla E_b dei gas altamente compressi e dei liquidi molto puri. Il valore di E_b è determinato principalmente dalla struttura interna del dielettrico (densità di impacchettamento degli atomi, forza dei loro legami) e dipende debolmente da fattori esterni come la temperatura, la frequenza della tensione applicata, la forma e le dimensioni del campione (ad eccezione di spessori molto ridotti). È caratteristico un tempo di rottura elettrica molto breve, inferiore a un microsecondo.

Il breakdown elettrotermico è causato da una violazione dell'equilibrio termico del dielettrico a causa delle perdite dielettriche.

Si determina la potenza rilasciata in un campione dielettrico con una capacità C quando gli viene applicata una tensione U con una frequenza angolare ω :

$$P_n = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta. \quad (4.8)$$

La potenza termica dissipata dal campione è proporzionale all'area del dissipatore S e alla differenza di temperatura tra il campione T e l'ambiente T_o :

$$P_p = kS(T - T_o), \quad (4.9)$$

dove k è il coefficiente di trasferimento del calore.

La condizione di equilibrio termico è determinata dall'uguaglianza delle potenze assorbite e dissipate: $P_n = P_p$. Poiché la $\operatorname{tg} \delta$ di solito aumenta con l'aumentare della temperatura, a partire da una certa temperatura critica T_k , il valore di $P_n > P_p$ (fig. 4.3); un altro punto di uguaglianza tra P_n e P_p (T_1) corrisponde a un equilibrio stabile. Come risultato dell'eccesso di generazione di calore rispetto al trasferimento di calore, il dielettrico viene riscaldato a valanga, il che porta alla sua distruzione (fusione, combustione).

In base alla condizione di equilibrio termico, la tensione di breakdown:

$$U_{bd} = \sqrt{\frac{kS(T_k - T_o)}{2\pi f C \cdot \operatorname{tg} \delta}}, \quad (4.10)$$

dove $\operatorname{tg} \delta$ corrisponde alla temperatura critica T_k .

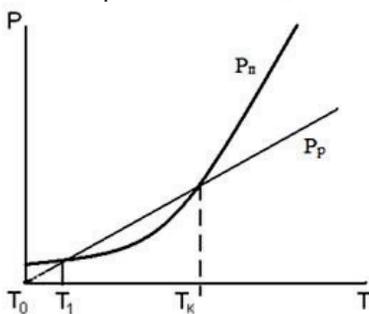


Fig. 4.3. Dipendenza della potenza assorbita da P_n e dissipata dal campione dielettrico P_p dalla sua temperatura.

Pertanto, a una determinata frequenza operativa, è possibile realizzare un isolamento in questo materiale con una tensione di rottura non superiore al valore specificato. Questa tensione dipende dal fattore di perdita dielettrica e da altri parametri.

A differenza della rottura elettrica, la tensione della rottura elettrotermica, come si può vedere dalla (4.10), dipende dalla frequenza:

$$U_{bd} = \frac{A}{\sqrt{f}}, \quad (4.11)$$

dove A è una costante (se si trascura la dipendenza dalla frequenza delle perdite dielettriche).

Di conseguenza, U_{bd} diminuisce alle alte frequenze. Analogamente, U_{bd} al breakdown termico dipende dalla temperatura, diminuendo con il suo aumento a causa della crescita di $\operatorname{tg} \delta$ [vedere (4.10)]. Per questi motivi, all'aumentare della frequenza f o della temperatura T , quando la tensione di breakdown termico $U_{bd,T}$ è grande, si verifica un breakdown elettrico, mentre ad alte f o T , quando $U_{bd,T}$ diminuisce fino a valori inferiori alla tensione di breakdown elettrico $U_{bd,E}$, il breakdown diventa un breakdown elettrotermico (fig. 4.4).

La frequenza critica f_k o la temperatura T_k alla quale si verifica la transizione da rottura elettrica a rottura termica dipende dalle proprietà del dielettrico, dalle condizioni di dissipazione del calore dell'isolamento, dal tempo di applicazione della tensione e dalla natura degli impulsi.

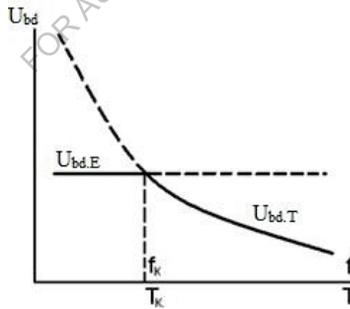


Fig. 4.4. Dipendenza tipica della tensione di breakdown dalla frequenza e dalla temperatura.

La tensione di breakdown diminuisce con la durata della tensione applicata a causa dell'ulteriore riscaldamento del dielettrico, dell'invecchiamento chimico e di altri fenomeni. Con un'applicazione di tensione di breve durata (ad esempio, pulsata), la probabilità di breakdown termico è bassa anche con una conduttività relativamente elevata, poiché il campione non ha il tempo di riscaldarsi.

La resistenza elettrica di un guasto termico diminuisce con lo spessore del dielettrico a causa dell'aumento della sua eterogeneità e del deterioramento del trasferimento di calore.

Nei dielettrici esposti a lungo a un campo elettrico, può verificarsi una rottura elettrochimica a causa dell'elettrolisi, della ionizzazione delle inclusioni gassose e così via. Questi processi portano all'invecchiamento chimico del dielettrico. Lo stadio finale della rottura elettrochimica è spesso la rottura termica.

I dielettrici solidi hanno la massima resistenza elettrica, hanno una struttura omogenea, una bassa conducibilità elettrica, un'elevata conducibilità termica e resistenza al calore (film fluoroplastici, polietilene, lamsan, mica, ecc.). Il campo di rottura elettrica di questi materiali raggiunge i 100-300 MV/m.

4.7. Dielettrici passivi. Applicazione dei materiali dielettrici passivi

Oggi i materiali dielettrici sono utilizzati per la produzione di numerosi prodotti tecnici e domestici. Le proprietà fisiche dei materiali dielettrici che ne determinano l'applicazione pratica sono state discusse in precedenza.

I dielettrici comprendono una gamma estremamente ampia di materiali di origine sia organica (resine sintetiche, gomme, materiali fibrosi) sia inorganica (vetro, ceramica). I materiali dielettrici allo stato solido, liquido e gassoso, nonché sotto forma di plasma (in caso di rottura del gas), sono ampiamente utilizzati nella pratica. I materiali sintetici sono quelli ottenuti per sintesi, cioè per reazione di polimerizzazione di sostanze monomeriche. Questi materiali sono chiamati anche polimeri, plastiche e resine sintetiche. I materiali artificiali comprendono quelli ottenuti dalla lavorazione chimica di materie prime di origine naturale (cellophane, carta, viscosa, acetato). Esistono anche molti materiali compositi di varia composizione, che includono sia componenti sintetici che artificiali (celluloide, laminati, plastiche fenoliche, aminoplastiche).

Esistono diversi gruppi principali di materiali dielettrici allo stato solido: resine sintetiche (plastiche, polimeri), elastomeri, materiali fibrosi, plastiche laminate, vetri, ceramiche e dielettrici inorganici naturali.

Plastica. La sostanza principale che forma la plastica è la resina sintetica. Per produrre le materie plastiche si utilizzano due tipi di resine: termoplastiche e termoindurenti. Le resine che mantengono la capacità di fondere quando vengono riscaldate e di indurire quando vengono raffreddate sono chiamate termoplastiche.

Le resine termoindurenti sono quelle che induriscono a temperature elevate e si trasformano in uno stato non fuso e insolubile, cioè irreversibile.

Il polietilene (CH_2-CH_2) è una resina sintetica ed è il prodotto della polimerizzazione dell'etilene, un gas ottenuto dalla decomposizione termica degli idrocarburi o dalla pirolisi di materie prime petrolifere liquide. A seconda delle proprietà del polimero risultante, esistono tre gruppi principali di polietilene: a bassa densità, a media densità e ad alta densità.

Il polietilene è caratterizzato da un'elevata resistenza chimica agli ambienti aggressivi, ad eccezione degli acidi minerali. L'acqua non viene praticamente assorbita dal polietilene.

Il peso molecolare, il grado di cristallinità, il grado di ramificazione del polimero lineare e il tipo di struttura supramolecolare hanno un impatto importante sulle proprietà del polietilene. Attualmente esistono diversi gradi di polietilene con pesi molecolari che vanno da 20.000 a 6.500.000. Il polietilene con un peso molecolare superiore a 100.000 è chiamato polietilene ad alto peso molecolare.

Con l'aumento del peso molecolare, la densità e la rigidità del materiale diminuiscono, ma le proprietà antifrizione, la resistenza all'usura e la resistenza agli urti migliorano. Le proprietà ottimali del polietilene ad alto peso molecolare come materiale strutturale antifrizione si ottengono con un peso molecolare di 1.000.000. Le proprietà di resistenza dei polietilene con peso molecolare superiore a 1.000.000 rimangono praticamente invariate.

Il polietilene è un dielettrico non polare ed è caratterizzato da elevate proprietà isolanti: $\rho \approx 10^{14}$ ohm-m; $\varepsilon = 2,3 - 2,4$; $\tan \delta \sim 10^{-4}$; $E_{bd} = 15 - 20$ MV/m

Il polietilene è resistente agli acidi e agli alcali e viene utilizzato per produrre utensili chimici, tappi e coperchi. L'elevato allungamento relativo θ prima della rottura (300 - 750 %, vedi Tabella 4.1 con dati approssimativi per resine sintetiche senza cariche) crea vantaggi tecnologici nello stampaggio di prodotti con forme complesse. Il polietilene viene utilizzato per isolare cavi a radiofrequenza, telefonici e di potenza. Il film di polietilene è utilizzato come materiale da imballaggio.

Molte proprietà del polipropilene sono simili a quelle del polietilene, ma ci sono differenze fondamentali che lo rendono più comunemente utilizzato. Il modulo elastico, la resistenza alla flessione, la resistenza alla trazione e le proprietà plastiche del polipropilene sono migliori di quelle del polietilene ad alta densità (l'allungamento relativo prima della rottura è del 400-700%).

La resistenza chimica alla maggior parte delle sostanze è abbastanza elevata, ad eccezione degli acidi solforico e cloridrico a temperature elevate. La resistenza alle radiazioni ultraviolette è insufficiente, ma vengono utilizzati stabilizzatori per migliorarla.

Tabella 4.1 Proprietà delle resine sintetiche

Resine	Densità, mg/m ³	σ , MPa	Θ , %	Resistenza al calore, °C	Assorbimento d'acqua in 24 ore, % in peso
Polietilene	0,91-	10-15	300-750	80-90	0,01
Polipropilene	0,90-	30-40	400 -	170	0,005
Polistirolo	1,05	35-60	1-4	70-80	0,04
Politetrafluoroetilene	2,30	15-30	250-300	250	0,01
Cloruro di	1,40-	30-50	50-150	60-70	0,10
Polimetilmetacrilato	1,20	40-70	2-10	70-90	0,35
Poliammidi	1,10-	70-90	90	70-90	0,35

Il polistirene (Tabella 4.1) ha una plasticità inferiore rispetto al polietilene, cioè un valore significativamente più basso di allungamento relativo prima della rottura. Pertanto, il polistirene presenta una certa fragilità (soprattutto a basse temperature) e una tendenza alla formazione graduale di cricche superficiali. La mancanza di resistenza del polistirene viene eliminata nel cosiddetto polistirene resistente agli urti, che si ottiene copolimerizzando lo stirene con varie gomme. Maggiore è la quantità di gomma presente nel materiale, maggiore è la sua forza e resistenza agli urti. Le proprietà dielettriche del polistirene sono caratterizzate dai seguenti parametri: $\rho \approx 10^{14} - 10^{15}$ ohm-m; $\varepsilon = 2,4 - 2,6$; $tg \delta \sim 10^{-4}$; $E_{bd} = 20 - 35$ MV/m

Il polistirene è caratterizzato da una bassa resistenza ai solventi (in particolare agli idrocarburi liquidi) e da una bassa resistenza al calore. I vantaggi di questo materiale, come il polietilene, includono una bassa igroscopicità. Può essere facilmente verniciato in vari colori e sfumature.

Il polistirene e i suoi polimeri sono ampiamente utilizzati per produrre elementi strutturali di apparecchiature elettroniche.

Politetrafluoroetilene (PTFE). I fluoroplastici (o fluorofluorocarburi, fluoropolimeri), che includono il PTFE, sono polimeri e copolimeri di alogenuri di etilene e propilene. Il fluoroplastico-4 è un prodotto della polimerizzazione in sospensione del tetrafluoroetilene, mentre il fluoroplastico-4D è un prodotto della polimerizzazione in emulsione del tetrafluoroetilene. Il fluoroplastico-4 e il fluoroplastico-4DM modificato rappresentano oltre il 90% della produzione totale di fluoroplastici e sono i principali rappresentanti dei fluoropolimeri. Vengono lavorati con metodi simili a quelli utilizzati nella metallurgia delle polveri. I prodotti in PTFE sono realizzati mediante lavorazione meccanica. Il PTFE presenta un'eccezionale resistenza chimica, superando in questo senso persino l'oro e il platino: non viene intaccato dagli acidi cloridrico, solforico e fluoridrico, nonché dagli alcali.

L'uso diffuso di questo materiale è limitato dal suo costo relativamente elevato. La vetreria chimica in PTFE-4 viene utilizzata per conservare solo i reagenti chimicamente più attivi. Il politetrafluoroetilene non è igroscopico e non si bagna con l'acqua, ha un'elevata resistenza all'usura e duttilità (Tabella 4.1). È assolutamente non infiammabile e ha un intervallo di temperature di utilizzo estremamente ampio. Può essere riscaldato a una temperatura di 90-200 °C e raffreddato a temperature negative all'interno dello stesso intervallo. Sebbene il PTFE-4 sia un materiale termoplastico, non si ammorbidisce ad alte temperature grazie al suo elevato peso molecolare. A una temperatura di 280-300 °C, rilascia fluoro gassoso velenoso.

Le caratteristiche del PTFE-4 sono le sue elevate proprietà antifrizione e la capacità autolubrificante, che ne rende possibile l'uso in assenza di accesso al lubrificante. A basse velocità di scorrimento e a bassi carichi, il coefficiente di attrito del polimero sull'acciaio è pari a 0,04. Tuttavia, il PTFE-4, a differenza di altri materiali antifrizione, è soggetto a un'usura significativa a carichi superiori a 1 MPa. In termini di resistenza all'usura, il PTFE è significativamente inferiore ad altri materiali termoplastici, sebbene abbia il più basso coefficiente di attrito.

In termini di proprietà di isolamento elettrico, il PTFE è uno dei dielettrici più noti: il suo $\epsilon = 1,9-2,1$ a frequenze da 50 a 10^{10} Hz; $tg \delta \sim 10^{-4}$; resistività $\rho \approx 10^{16}$ Ohm-m; $E_{bd} = 20-30$ MV/m.

Il cloruro di polivinile (Tabella 4.1) è resistente all'acqua, agli alcali, agli acidi diluiti, agli oli, alla benzina e all'alcol. Ha una bassa resistenza, motivo per cui non viene utilizzato quando è sottoposto a sollecitazioni meccaniche. Inoltre, il PVC presenta un'instabilità delle proprietà sotto l'influenza del calore e della luce. Con l'aggiunta di vari plastificanti, viene utilizzato per produrre materie plastiche e materiali simili alla gomma. Il cloruro di polivinile è caratterizzato dai seguenti parametri dielettrici: $\rho \approx 10^{13} - 10^{14}$ ohm-m; $\epsilon = 3,0-5,0$; $tg \delta \sim 10^{-4}$; $E_{bd} = 15-20$ MV/m. Le proprietà del materiale dipendono dai parametri dei vari additivi (coloranti, stabilizzanti, plastificanti, ecc.). Sulla base del PVC sono state sviluppate numerose plastiche (plastiche viniliche) di vario grado di elasticità, trasparenti e colorate.

Le poliammidi sono polimeri con una struttura lineare di molecole contenenti gruppi amidici - CO - NH - nella catena. Questi materiali presentano un'elevata resistenza chimica. Parametri dielettrici delle poliammidi: $\rho = 10^{11} - 10^{12}$ Ohm-m; $\epsilon = 3,0 - 4,0$; $tg \delta \sim 10^{-2}$; $E_{bd} = 15 - 20$ MV/m. Le poliammidi più comuni sono il nylon e il nylon.

Le poliammidi sono ampiamente utilizzate per la produzione di fibre sintetiche, film flessibili, ecc.

I poliuretani (PU), che sono poliammidi, sono prodotti dell'interazione di diisocianati con alcoli poliatomici. Un numero

significativo di poliuretani viene prodotto in una varietà di forme fisiche, tra cui schiuma dura, schiuma morbida ed elastomeri duri.

Le proprietà dielettriche dei poliuretani dipendono dalla tecnologia di produzione e variano in un intervallo piuttosto ampio: $\rho = 10^{11} - 10^{14}$ ohm-m; $\varepsilon = 3,0 - 4,5$; $tg \delta = 0,002 - 0,020$; $E_{bd} = 15 - 25$ MV/m.

I poliuretani sono utilizzati per la smaltatura dei fili. Lo svantaggio è la tendenza ad ammorbidire la pellicola di smalto a temperature superiori a 150 °C.

Il polietilene tereftalato (lavsan, terilene, ecc.) (PET) appartiene alla classe degli esteri e si ottiene dalla transesterificazione del dimetil tereftalato con etilglicole in presenza di catalizzatori e dalla successiva policondensazione del tereftalato diglicolato risultante. Una caratteristica distintiva del PET è la sua capacità di cristallizzare: il rapido raffreddamento della colata produce un polimero amorfo, mentre il riscaldamento a una temperatura di 190-200 °C produce un polimero con un tasso di cristallizzazione del 55-75%.

I seguenti parametri dielettrici sono tipici del PET: $\rho = 10^{12}$ ohm-m; $\varepsilon = 3,5 - 4,5$; $tg \delta = 10^{-2}$; $E_{bd} = 20 - 25$ MV/m.

I prodotti elastici (elastomeri) sono realizzati con gomme naturali o sintetiche, che sono il componente principale della gomma. La gomma naturale (un materiale di origine vegetale) deriva dal lattice, la linfa dell'albero Hevea, che cresce nei paesi equatoriali. A causa della sua scarsa resistenza alle alte e basse temperature e ai solventi, la gomma naturale pura non viene utilizzata. Per eliminare questi svantaggi, la gomma viene vulcanizzata, cioè riscaldata a 140 °C dopo l'aggiunta di zolfo (1-3%), che produce una gomma morbida con un'estensibilità e un'elasticità molto elevate. Il suo allungamento relativo prima della rottura è del 700-800%. La gomma naturale è praticamente non polare: ha $\rho \approx 10^{14}$ ohm-m; $\varepsilon = 2,4$; $tg \delta = 0,002$. La vulcanizzazione porta a un aumento delle proprietà polari del materiale a causa dell'influenza degli atomi di zolfo. Per le gomme isolanti elettriche convenzionali, $\rho \approx 10^{13}$ Ohm-m; $\varepsilon = 3 - 7$; $tg \delta = 0,02 - 0,10$; $E_{bd} = 20 - 30$ MV/m.

I laminati sono materiali termoindurenti. Si tratta di materie plastiche in cui il riempimento è costituito da un foglio di materiale fibroso (carta, tessuto, non tessuto) a strati paralleli, che determina l'anisotropia delle loro proprietà.

A seconda della destinazione d'uso, i laminati possono essere suddivisi in strutturali, isolanti e decorativi.

A seconda della natura chimica del legante e del riempitivo, le proprietà elettriche dei laminati isolanti possono variare notevolmente ($\rho = 10^8 - 10^{14}$ ohm-m; $\varepsilon = 6-8$; $tg \delta = (2-10)10^{-2}$; $E_{bd} = 8-33$ kV/mm a uno spessore di $h = 1$ mm). Le plastiche stratificate hanno un elevato livello di proprietà meccaniche e possono essere utilizzate per lungo tempo a

temperature fino a 180 °C. I laminati più comuni sono il getinax e la textolite.

Il Getinax viene prodotto pressando diversi strati di carta impregnati con resine fenoliche o cresol-formaldeide o loro miscele. A una temperatura di 150-160 °C e a una pressione di 6-10 MPa, l'oligomero si scioglie, riempie i pori tra le fibre di carta e i singoli fogli e si indurisce.

Il getinax in lamina è utilizzato per la produzione di circuiti stampati per dispositivi elettronici a bassa frequenza. È un materiale in fogli rivestito su uno o entrambi i lati con lamina di rame elettrolitico (99,9%).

La textolite è una plastica laminata composta da diversi strati di tessuto pre-impregnati con un oligomero di resina fenolo-formaldeide. Come riempitivo si possono utilizzare cotone, vetro, amianto, tessuti non tessuti, ecc.

La più comune è la textolite a base di tessuto di cotone. Rispetto al getinax, è molto più costosa, ma ha proprietà meccaniche superiori. Le proprietà elettriche della textolite sono più o meno le stesse del getinax, tranne che per la minore resistenza elettrica. La textolite viene utilizzata in prodotti soggetti a urti o abrasioni (parti di interruttori, ecc.).

La fibra di vetro elettrica viene prodotta utilizzando un tessuto in fibra di vetro. Viene prodotta anche la fibra di vetro in fogli, che ha una maggiore resistenza all'umidità e al calore rispetto alla fibra di vetro rinforzata con poliestere. La resistenza elettrica dei tessuti in fibra di vetro è quasi tre volte superiore a quella dei tessuti in cotone.

Le sostanze vetrose (vetri inorganici) sono caratterizzate dal fatto che si induriscono al raffreddamento senza cristallizzare, formando un solido non sedimentato. Le proprietà di questo corpo sono costanti indipendentemente dalla direzione spaziale.

I vetri hanno una struttura eterogenea, eterogenea. Possono contenere pori e inclusioni di altre sostanze. In questo caso, i pori costituiscono fino al 60% del volume del vetro, quindi il campo elettrico al suo interno è eterogeneo, il che comporta una significativa diminuzione della resistenza elettrica.

I vetri tecnici più comuni sono i vetri silicati a base di SiO_2 . I vetri si dividono in 1) alcalini (per finestre, bottiglie, ecc.) contenenti ossidi di sodio e potassio; 2) alcalini con un alto contenuto di ossidi di metalli pesanti (PbO , BaO). I vetri con un alto contenuto di PbO sono chiamati vetri di selce e quelli con un alto contenuto di BaO sono chiamati vetri a corona; 3) vetri privi di alcali - vetro di quarzo, che è puro biossido di silicio SiO_2 . Questi ultimi due tipi sono utilizzati come vetri isolanti e ottici. Hanno valori elevati di ϵ e ρ e un basso $\text{tg } \delta$. Ad esempio, per il vetro di quarzo, $\epsilon = 3,8$; $\rho = 10^{15}$ Ohm-m; $\epsilon = 6 - 8$; $\text{tg } \delta = 2 \cdot 10^{-4}$; $E_{bd} = 60$ MV/m.

Il vetro ottico è utilizzato nella produzione di lenti per occhiali e dispositivi medici. Esistono sette gradi di classe crown e sette gradi di

flint, che consentono di scegliere occhiali con il giusto indice di rifrazione da 1,47 (crown leggero) a 1,75 (flint pesante). Gli occhiali colorati sono utilizzati per realizzare filtri di luce per la protezione degli occhi di saldatori, metallurgisti, ecc.: blu con ossidi di cobalto e ferro, giallo-verde con ossidi di ferro con diversi coefficienti di trasmissione della luce. La maggior parte dei vetri è altamente assorbente dei raggi ultravioletti grazie al contenuto di una miscela di ossidi di ferro.

A seconda dello scopo, esistono diversi tipi principali di vetro elettrico: vuoto elettrico, isolante, condensatore, vetro smaltato e fibra di vetro.

I vetri elettro-vuoto sono utilizzati per realizzare palloni e gambe di lampade per l'illuminazione e vari dispositivi elettronici. Il requisito più importante per questi vetri è che i coefficienti di espansione termica del vetro e del metallo saldati insieme siano molto vicini.

I vetri isolanti sono utilizzati nella produzione di vari isolatori: isolatori lineari, compresi quelli a perno e a sospensione, isolatori di stazione, come quelli di supporto e passanti, isolatori per telegrafi, isolatori per antenne, ecc. La capacità elettrica degli isolatori in vetro, compresi quelli a sospensione, è superiore a quella degli isolatori in porcellana. I vetri isolanti sono anche ampiamente utilizzati come boccole sigillate in alcuni tipi di condensatori, termistori, transistor al silicio e al germanio, ecc.

I vetri per condensatori sono utilizzati per produrre condensatori elettrici impiegati nei generatori di impulsi e come filtri ad alta tensione. Per questi prodotti, è necessario che i vetri abbiano valori elevati di E_{bd} e ϵ , e per i vetri per condensatori ad alta frequenza, inoltre, valori bassi di $tg \delta$.

Per realizzare le guide di luce si utilizzano fibre di vetro di 20-30 micron. Il diametro della guida di luce stessa raggiunge i 5-6 mm. Una fibra a guida di luce è costituita da un nucleo e da una guaina, il cui materiale è selezionato in modo che l'indice di rifrazione del nucleo sia maggiore dell'indice di rifrazione della guaina. Per questo motivo, per realizzare il nucleo della fibra a guida luminosa si utilizzano selce pesante, selce baritica e vetri a corona extra-pesanti, mentre per realizzare la guaina si utilizzano vetri a corona o a corona leggera. I vetri di questo tipo sono realizzati a partire da quarzo puro. Un fascio di luce incidente sull'estremità di ingresso della fibra si propaga lungo di essa a causa di molteplici riflessioni interne totali dall'interfaccia nucleo-guscio ed esce dall'estremità opposta. La qualità della guida luminosa (perdita di energia luminosa) dipende principalmente dalla purezza dei materiali di partenza e dalla sterilità in tutte le fasi della produzione. Ad esempio, per l'illuminazione si utilizzano fibre polimeriche più economiche in polimetilmetacrilato, polistirene, ecc.

I sintali sono materiali opachi policristallini ottenuti dalla cristallizzazione diretta di vetri di composizione speciale. Il grado di cristallinità dei sintali può essere del 30-95% e la dimensione dei cristalliti è di 0,01-2 micron, con una contrazione durante la cristallizzazione che raggiunge il 2%. Il nome "setaccio" deriva dall'abbreviazione delle parole "silicato" e "cristallo". Nella fabbricazione dei setacci, speciali additivi vengono introdotti nella massa di vetro per formare centri di cristallizzazione (nuclei). A seconda della natura dell'additivo e del successivo processo di cristallizzazione, si distinguono termosintetici e fotosintetici.

Le proprietà elettriche dei setacci sono solitamente superiori a quelle dei vetri della stessa composizione e, rispetto alle ceramiche, i setacci della stessa composizione hanno una permittività più elevata: $\epsilon = 5-7$, $\rho = 10^{10} - 10^{12}$ Ohm-m; $tg \delta = (1 - 80) \cdot 10^{-3}$; $E_{bd} = 20-80$ MV/m, intervallo di temperatura operativa da -50 a 700 °C.

I sitali sono utilizzati come substrati per microcircuiti a film sottile e ibridi e come supporti per il montaggio di scaricatori.

I materiali ceramici (porcellana e terracotta) si ottengono dalla cottura ad alta temperatura di un impasto a base di argilla con l'aggiunta di quarzo (sabbia) e feldspato. Il processo di produzione della ceramica si svolge in tre fasi principali: 1) preparazione della massa ceramica pulendo i suoi componenti dalle impurità, macinandoli accuratamente e mescolandoli con acqua in una massa omogenea; 2) formazione di un prodotto di una determinata configurazione e dimensione mediante pressatura, estrusione o colata; 3) essiccazione e cottura.

I materiali ceramici possono essere molto diversi in termini di proprietà e applicazioni. I prodotti in porcellana sono altamente resistenti all'invecchiamento termico. La porcellana ha un'elevata resistenza alla compressione (400-700 MPa), una resistenza alla trazione (45-70 MPa) e alla flessione (80-150 MPa) molto più bassa e una maggiore fragilità agli urti.

Il principale rappresentante della ceramica a bassa frequenza è l'elettroporcellana, ampiamente utilizzata per la produzione di isolanti. A differenza di altri tipi di ceramica, l'elettroporcellana ha proprietà elettriche e meccaniche inferiori. I vantaggi sono la capacità di fabbricare prodotti di configurazione complessa utilizzando processi tecnologici semplici e materie prime a bassa scarsità.

Il policoro (Al_2O_3) ha una struttura particolarmente densa e, a differenza delle ceramiche di corindone convenzionali (opache), è trasparente, per cui viene utilizzato per realizzare i palloni di alcune speciali sorgenti di luce elettrica. Ha un ρ di un ordine di grandezza superiore a quello della ceramica di allumina opaca.

I dielettrici ceramici sono caratterizzati da un'elevata resistività ($\rho \approx 10^{14}$ Ohm-m) e da una bassa perdita dielettrica tangente ($tg \delta = 10^{-4} - 10^{-3}$

) anche a temperature elevate (fino a 1000 °C). Il valore di $\varepsilon = 6 - 10$. Nella produzione di condensatori si utilizzano materiali ceramici - ferroelettrici con un elevato ε (fino a 10.000 e oltre).

I dielettrici minerali naturali inorganici includono la mica e l'amianto. La mica ha elevate proprietà di isolamento elettrico, resistenza al calore, forza meccanica e flessibilità. In strati sottili, molti tipi di mica sono trasparenti.

La mica si presenta sotto forma di cristalli che possono essere facilmente divisi in lastre sottili lungo piani paralleli. Per composizione chimica, la mica è un alluminosilicato acquoso.

La composizione reale della mica naturale è molto più complessa a causa della presenza di impurità.

La temperatura di esercizio della mica (500-900) °C è limitata dal rilascio dell'acqua contenuta nella sua composizione, che è associato a una perdita di trasparenza, a un aumento dello spessore ("rigonfiamento") e alla distruzione della struttura cristallina; la mica disidratata fonde a una temperatura di 1250 - 1300°C. Il valore ε della mica è 6 - 8; $\tan \delta \sim 10^{-4}$; $\rho = 10^{11} - 10^{14}$ Ohm-m.

4.8. Dielettrici attivi

a) Classificazione dei dielettrici attivi

I dielettrici attivi sono dielettrici le cui proprietà possono essere controllate da effetti energetici esterni e utilizzate per creare elementi elettronici funzionali. I dielettrici attivi consentono la generazione, l'amplificazione e la modulazione di segnali elettrici e ottici, nonché la memorizzazione o la conversione di informazioni. Con la crescente complessità delle apparecchiature elettroniche e la transizione verso l'elettronica funzionale, il ruolo e l'importanza dei materiali attivi nella soluzione dei più importanti problemi scientifici e tecnici sono in costante crescita.

I dielettrici attivi includono ferroelettrici, piezoelettrici, piroelettrici, elettro-, materiali per l'elettronica quantistica, cristalli liquidi, materiali elettro-, magneto- e acusto-ottici, cristalli dielettrici con proprietà ottiche non lineari, ecc.

I dielettrici attivi possono essere utilizzati non solo per i solidi, ma anche per i liquidi e persino per i gas (ad esempio, il mezzo attivo dei laser a gas). In termini di composizione chimica, possono essere materiali organici e inorganici. In base alla loro struttura e alle loro proprietà, possono essere suddivisi in cristallini e amorfi, dielettrici polari e non polari. Alcuni materiali mostrano la loro attività solo grazie alla presenza di una polarizzazione residua spontanea o stabile. Tuttavia, lo stato iniziale polarizzato non è un prerequisito perché il materiale sia attivo sotto le influenze esterne. Una classificazione rigorosa dei dielettrici attivi, che comprende molte caratteristiche di questi materiali, è molto difficile.

Inoltre, non esiste una linea netta tra dielettrici attivi e passivi. Lo stesso materiale può svolgere le funzioni passive di un isolante o di un condensatore, oppure quelle attive di un elemento di controllo o di un trasduttore, in condizioni operative diverse.

A seconda dell'applicazione tecnica, anche i requisiti dei materiali variano in modo significativo. Ad esempio, uno dei requisiti principali dei dielettrici passivi è quello di mantenere la stabilità delle loro proprietà sotto le influenze esterne. Allo stesso tempo, i requisiti di un materiale attivo sono opposti: più le sue proprietà cambiano sotto le influenze esterne, meglio l'elemento attivo può svolgere le funzioni di gestione dell'energia o di trasformazione delle informazioni in entrata.

Nella maggior parte dei casi, i dielettrici attivi sono classificati in base al tipo di effetti fisici che possono essere utilizzati per controllare le proprietà dei materiali. Tuttavia, tale classificazione, pur essendo abbastanza logica e ragionevole, non consente di separare chiaramente un gruppo di materiali dall'altro.

b) Ferroelettrico

Un ferroelettrico è una sostanza che presenta una polarizzazione spontanea la cui direzione può essere invertita da un campo elettrico esterno.

In assenza di un campo elettrico esterno, i ferroelettrici hanno tipicamente una struttura a dominio. I domini sono regioni macroscopiche che presentano una polarizzazione spontanea che si verifica sotto l'influenza di processi interni al dielettrico. Le direzioni dei momenti elettrici nei diversi domini sono diverse. Pertanto, la polarizzazione totale del campione nel suo complesso può essere pari a zero. In linea di principio, se un cristallo è piccolo, può essere costituito da un solo dominio. Tuttavia, i campioni di grandi dimensioni sono sempre suddivisi in molti domini, poiché uno stato a dominio singolo è energeticamente svantaggioso. La divisione in domini riduce l'energia elettrostatica del ferroelettrico.

In un cristallo singolo, l'orientamento relativo dei momenti elettrici dei domini è determinato dalla simmetria del reticolo cristallino. La struttura energeticamente più vantaggiosa è quella che assicura la neutralità elettrica dei confini dei domini, cioè la proiezione del vettore di polarizzazione sul confine da un dominio deve essere uguale in lunghezza e opposta in direzione alla proiezione del vettore di polarizzazione dal dominio vicino.

Il campo elettrico esterno modifica le direzioni dei momenti elettrici dei domini, creando un effetto di polarizzazione molto forte. Questo spiega l'altissima costante dielettrica (fino a centinaia di migliaia) propria dei ferroelettrici. La polarizzazione dei domini è associata ai processi di nucleazione e crescita di nuovi domini dovuti allo spostamento dei confini

dei domini, che alla fine causano un riorientamento del vettore di polarizzazione spontaneo nella direzione del campo elettrico esterno.

Se l'intensità del campo viene ridotta a zero in un campione polarizzato a saturazione, l'induzione non si azzerava, ma acquisisce un valore residuo. Sotto l'azione di un campo di polarità opposta, l'induzione diminuisce rapidamente e a una certa intensità di campo cambia direzione. Un ulteriore aumento dell'intensità di campo porta nuovamente il campione a uno stato di saturazione tecnica. Ne consegue che la ripolarizzazione di un ferroelettrico in campi alternati è accompagnata da isteresi dielettrica. L'intensità di campo alla quale l'induzione passa a zero è chiamata forza coercitiva.

L'isteresi dielettrica è causata dallo spostamento irreversibile dei confini del dominio sotto l'influenza di un campo e indica un ulteriore meccanismo di perdite dielettriche associate al dispendio di energia per l'orientamento del dominio. L'area dell'anello di isteresi è proporzionale all'energia dissipata nel dielettrico durante un periodo. La non linearità della polarizzazione rispetto al campo e la presenza di isteresi determinano la dipendenza della costante dielettrica e della capacità del condensatore ferroelettrico dalla modalità operativa. Per caratterizzare le proprietà del materiale in diverse condizioni operative di un elemento non lineare, si utilizzano i concetti di costante dielettrica statica, reversibile, efficace e di altro tipo.

Le proprietà specifiche dei ferroelettrici si manifestano solo entro un certo intervallo di temperatura. Se riscaldato al di sopra di una certa temperatura, la struttura del dominio si rompe e il materiale ferroelettrico diventa paraelettrico. La temperatura T_c di questa transizione di fase è chiamata punto di Curie ferroelettrico. Al punto di Curie, la polarizzabilità spontanea scompare e la costante dielettrica raggiunge il suo valore massimo.

Attualmente sono note diverse centinaia di ferroelettrici. Il gruppo è notevolmente integrato e ampliato da soluzioni solide basate su vari composti. Pertanto, la ferroelettricità è un fenomeno abbastanza diffuso nei dielettrici. Allo stesso tempo, i cristalli ferroelettrici sono caratterizzati da una varietà di tipi strutturali, il che indica una differenza nei meccanismi molecolari della polarizzazione spontanea. La temperatura di transizione allo stato spontaneamente polarizzato (punto di Curie) per i diversi ferroelettrici varia da alcuni kelvin a un migliaio e mezzo di kelvin.

In base al tipo di legame chimico e alle proprietà fisiche, tutti i ferroelettrici si dividono in due gruppi: 1) cristalli ionici; 2) cristalli dipolari.

Nei composti del primo gruppo, l'elemento strutturale caratteristico del reticolo cristallino è un ottaedro di ossigeno, motivo per cui questi materiali sono chiamati ferroelettrici di tipo ossigeno-ottaedrico. I

ferroelettrici ionici comprendono il titanato di bario (BaTiO_3), il titanato di piombo (PbTiO_3), ecc.

Per la prima volta sono state scoperte peculiarità nel comportamento dei dielettrici in cristalli di sale di selenio dovute alla polarizzazione spontanea. Da qui il nome dell'intero gruppo di materiali con proprietà specifiche: ferroelettrici.

La grande maggioranza dei ferroelettrici del primo gruppo ha una temperatura di Curie molto più alta e un valore di polarizzabilità spontanea più elevato rispetto ai ferroelettrici del secondo gruppo. Per una parte significativa dei ferroelettrici a dipolo, il punto di Curie è molto più basso della temperatura ambiente.

c) Piezoelettrici

I piezoelettrici sono dielettrici che hanno un forte effetto piezoelettrico. L'effetto piezoelettrico diretto è il fenomeno della polarizzazione dielettrica sotto sforzo meccanico. Questo fenomeno è stato scoperto dai fratelli Curie nel 1880. La carica elettrica generata su ciascuna superficie di un dielettrico varia secondo una legge lineare in funzione della forza meccanica:

$$Q = kF; Q/S = kF/S, \text{ o } q_s = P = k\sigma, \quad (8.1)$$

dove Q è la carica; k è il piezomodulo; F è la forza; S è l'area; q_s è la carica per unità di area; P è la polarizzabilità; σ è la sollecitazione meccanica nella sezione dielettrica.

L'effetto piezoelettrico inverso è un fenomeno in cui si verifica una deformazione meccanica di un dielettrico sotto l'azione di un campo elettrico. La deformazione del piezoelettrico dipende dalla direzione del campo elettrico e cambia segno quando cambia la direzione di quest'ultimo. Esistono anche effetti piezoelettrici longitudinali e trasversali. Il primo è inteso come un effetto in cui la comparsa di cariche su facce opposte della piastra è determinata nella stessa direzione della forza meccanica, mentre il secondo è inteso come una deformazione misurata nella direzione del campo elettrico applicato. Con l'effetto piezoelettrico trasversale, le cariche o le deformazioni risultanti sono misurate nella direzione perpendicolare alla direzione della forza meccanica o del campo elettrico, rispettivamente.

L'effetto piezoelettrico si osserva solo nelle sostanze con legame chimico eteropolare, cioè sia i dielettrici ionici che quelli fortemente polari possono essere piezoelettrici. La seconda condizione necessaria per l'esistenza dell'effetto piezoelettrico è l'assenza di un centro di simmetria nella struttura dielettrica. In caso contrario, la deformazione provoca uno spostamento simmetrico delle cariche positive e negative e non si verifica alcun momento elettrico. Solo le sostanze ad alta resistività possono essere piezoelettriche. Nei mezzi conduttivi, la polarizzazione piezoelettrica viene rapidamente compensata dai portatori di carica liberi. Poiché

qualsiasi dielettrico ha una certa corrente di dispersione, tutte le applicazioni dell'effetto piezoelettrico sono associate a processi variabili.

Sono note più di mille sostanze con proprietà piezoelettriche, tra cui tutti i ferroelettrici. Tuttavia, solo un numero limitato di materiali viene utilizzato nella pratica. Uno dei più importanti è il quarzo monocristallino. Si tratta di una modifica del biossido di silicio.

I grandi cristalli di quarzo naturali trasparenti sono chiamati cristalli di rocca. Di solito, i cristalli naturali hanno la forma di un prisma esagonale, che riflette la simmetria della struttura interna.

Una lastra di quarzo lucidata piano-parallela con elettrodi e un supporto è un risonatore piezoelettrico, cioè un circuito oscillante con una certa frequenza di risonanza. Quest'ultima dipende dallo spessore della lastra e dalla direzione del taglio cristallografico. I vantaggi dei risonatori al quarzo sono il loro basso $tg \delta$ e l'elevato fattore di qualità meccanica (cioè perdite meccaniche molto basse). Nei migliori cristalli di quarzo, il fattore Q meccanico può essere di $10^6 - 10^7$. Un elemento piezoelettrico di quarzo inserito nel circuito di ingresso di un generatore elettrico impone ad esso la propria frequenza di risonanza.

Grazie alla loro elevata qualità, i risonatori al quarzo sono utilizzati come filtri ad alta selettività, oltre che per stabilizzare e standardizzare la frequenza degli oscillatori (nelle stazioni radar, negli orologi elettronici, ecc.).

Date le limitate riserve di quarzo naturale, le principali esigenze dell'ingegneria piezoelettrica sono soddisfatte da cristalli cresciuti artificialmente. Questi vengono prodotti con il metodo idrotermale. La cristallizzazione avviene a partire da soluzioni acquose alcaline in autoclavi di acciaio di grande capacità, a una temperatura di 350-400°C e a una pressione di circa 10^8 Pa. A causa della bassa solubilità della silice nelle soluzioni acquose, la durata di un ciclo di crescita è di diversi mesi.

Oltre al quarzo, diversi trasduttori piezoelettrici utilizzano cristalli di solfato di litio, sale di selenio, diidrogenofosfato di ammonio, nonché niobato di litio e tantalato. Questi ultimi sono un concorrente significativo del quarzo, superandolo in termini di fattore di qualità nella gamma delle alte e altissime frequenze.

Il materiale piezoelettrico più utilizzato è la ceramica ferroelettrica. Allo stato normale, le ceramiche ferroelettriche non mostrano attività piezoelettrica perché sono un mezzo isotropo a causa della disposizione caotica dei singoli grani di cristallo e della loro divisione in domini con diverse direzioni di polarizzazione spontanea. Tuttavia, se la ceramica ferroelettrica è sottoposta a un forte campo elettrico, la polarizzazione dei domini sarà prevalentemente orientata in una direzione. Dopo la rimozione del campo, rimane una polarizzazione residua stabile. In termini di proprietà, il campione di ferroceramica polarizzata è vicino a un cristallo a singolo dominio, cioè ha un'elevata piezoelettricità.

Le ceramiche ferroelettriche polarizzate destinate all'uso in trasduttori piezoelettrici sono chiamate ceramiche piezoelettriche. Le piezoceramiche hanno il vantaggio, rispetto ai cristalli singoli, di poter essere utilizzate per realizzare un elemento attivo di quasi tutte le dimensioni e forme (ad esempio, un cilindro cavo che fa parte di un sonar).

Il materiale principale per la produzione di elementi piezoelettrici è lo zirconato di piombo titanato. Questa ceramica è ampiamente utilizzata per creare potenti emettitori di ultrasuoni in un'ampia gamma di frequenze ai fini dell'idroacustica, del rilevamento di difetti e della lavorazione dei materiali. Tali generatori di ultrasuoni sono utilizzati anche nell'industria chimica per accelerare vari processi (emulsionanti, polimerizzatori, sterilizzatori, ecc.) e nella tecnologia dei semiconduttori per lavare e sgrassare efficacemente i wafer di semiconduttori utilizzando un bagno a ultrasuoni. Microfoni di piccole dimensioni, telefoni, altoparlanti (ad alta frequenza), apparecchi acustici, detonatori e vari dispositivi di accensione nei sistemi a gas sono realizzati in piezoceramica. Gli elementi piezoceramici possono essere utilizzati come sensori di pressione, deformazione, accelerazione e vibrazione. La doppia conversione di energia (elettrica a meccanica e viceversa) è alla base del funzionamento dei filtri piezoresonanti, delle linee di ritardo e dei trasformatori piezoelettrici.

I trasformatori piezoelettrici sono progettati per produrre alta tensione. Un campo elettrico alternato applicato ai morsetti dell'eccitatore provoca vibrazioni meccaniche risonanti lungo la lunghezza della barra. A loro volta, le vibrazioni meccaniche che si verificano nella parte del generatore portano alla comparsa della tensione elettrica in uscita. I trasformatori possono essere progettati per funzionare in un intervallo di frequenza compreso tra 10 e 500 kHz.

d) Piroelettrica

L'effetto piroelettrico è una variazione della polarizzabilità spontanea dei dielettrici con la temperatura. I piroelettrici sono dielettrici che presentano un effetto piroelettrico molto pronunciato.

La qualità di un materiale piroelettrico è solitamente caratterizzata dai seguenti parametri fisici

$$R_B = p/(\epsilon c) , (4.12)$$

dove p è il coefficiente piroelettrico, ϵ è la costante dielettrica e c è la capacità termica specifica di volume.

Più alto è il valore di R_B , maggiore è la differenza di potenziale che si può ottenere sul campione a parità di potenza assorbita.

Alcuni dielettrici lineari (ad esempio, tormalina, solfato di litio) e tutti i materiali ferroelettrici hanno proprietà piroelettriche. La particolarità dei piroelettrici lineari è che, a differenza dei ferroelettrici, la

direzione della polarizzazione spontanea non può essere modificata da un campo elettrico esterno.

I ferroelettrici presentano proprietà piroelettriche solo nello stato monodominio, caratterizzato dallo stesso orientamento della polarizzazione spontanea di tutti i domini. In un campione a polidominio, la polarizzabilità totale è pari a zero e quindi non vi è alcun effetto piroelettrico. La monodomizzazione di un ferroelettrico avviene mantenendolo in un campo elettrico costante a una temperatura leggermente inferiore al punto di Curie. La creazione e il consolidamento di uno stato monodominato nei cristalli ferroelettrici è uno dei problemi più importanti quando li si utilizza come piroelettrici.

La variazione di temperatura nella polarizzabilità spontanea è dovuta a due ragioni principali. Da un lato, l'aumento della temperatura altera l'ordine della disposizione dei momenti di dipolo elementari (effetto piroelettrico primario o vero e proprio) e, dall'altro, il riscaldamento provoca una variazione delle dimensioni lineari della polarizzazione dielettrica e piezoelettrica dovuta alla deformazione.

Il significativo effetto piroelettrico dei ferroelettrici viene utilizzato per creare sensori termici e ricevitori di energia radiante.

I valori massimi dei coefficienti piroelettrici si ottengono per i ferroelettrici con un punto di Curie vicino alla temperatura ambiente. Tra questi vi sono i cristalli di niobato di bario-stronzio ($\text{Sr}_x \text{Ba}_{1-x} \text{Nb}_2 \text{O}_{1-x/26}$), che hanno $p = (4-28)10^{-4} \text{ Cl/m}^2 \cdot \text{K}$. Il valore più alto di R_B ($8,5 \cdot 10^{-12} \text{ m/V}$) si osserva per i cristalli di triglicina solfato. Grazie alla buona combinazione di proprietà e alla relativa semplicità della tecnologia per ottenere cristalli di grandi dimensioni, questo materiale è ampiamente utilizzato nei rivelatori di radiazioni a bassa frequenza. L'igroscopicità è un po' scomoda, il che rende necessaria una speciale sigillatura nei dispositivi pratici.

I cristalli LiNbO_3 e LiTaO_3 sono caratterizzati da una maggiore sensibilità alle alte frequenze e si distinguono per le proprietà piroelettriche stabili. Grazie alla loro elevata temperatura di Curie, non richiedono tecniche speciali per fissare lo stato di monodominio e possono funzionare stabilmente fino a temperature di circa 500°C .

L'effetto piroelettrico si manifesta anche nelle ceramiche ferroelettriche polarizzate, sebbene le proprietà piroelettriche dei campioni policristallini siano notevolmente peggiori di quelle dei cristalli singoli. Tutti i tipi di piezoceramica possono essere utilizzati per produrre fotorivelatori, ma il materiale più adatto a questi scopi è la ceramica ferroelettrica a base di zirconato di piombo e titanato. L'introduzione dell'additivo ossido di lantanio consente di avvicinare la temperatura di Curie alla temperatura ambiente e di ottenere coefficienti piroelettrici più elevati.

e) Cristalli liquidi

I cristalli liquidi sono sostanze che si trovano in uno stato intermedio (mesomorfo) tra un liquido isotropo e un corpo solido cristallino. Da un lato, hanno fluidità e la capacità di trovarsi allo stato di goccioline, dall'altro sono caratterizzati da anisotropia delle proprietà e, soprattutto, da anisotropia ottica.

Le piccole forze intermolecolari che garantiscono la struttura ordinata di un cristallo liquido sono la base fondamentale della forte dipendenza delle proprietà da fattori esterni (temperatura, pressione, campo elettrico, ecc.). Questa dipendenza, a sua volta, apre ricche opportunità per lo sviluppo di dispositivi indicatori per vari scopi. I cristalli liquidi sono stati scoperti nel 1888 dal botanico austriaco F. Reintzer. Tuttavia, queste sostanze hanno trovato un'ampia applicazione pratica in tempi relativamente recenti. La specificità dei cristalli liquidi risiede nel limitato intervallo di temperatura della mesofase (stato di cristallo liquido). Lo stato cristallino liquido è formato principalmente da composti organici con molecole a forma di bastoncino allungato. Una parte significativa dei cristalli liquidi è costituita da composti della serie aromatica, ossia composti le cui molecole contengono anelli di benzene.

Attualmente si conosce l'esistenza di oltre 3000 composti organici allo stato mesomorfo. Tra questi, vi sono anche sostanze in cui l'intervallo di temperatura della mesofase comprende la temperatura ambiente.

In base alla loro simmetria generale, tutti i cristalli liquidi si dividono in tre tipi: smectici, nematici e colesterici.

La fase smectica è caratterizzata da una struttura a strati (fig. 4.5, a). I centri di gravità delle molecole allungate si trovano su piani equidistanti tra loro. In ogni strato, le molecole sono orientate in parallelo a causa dell'interazione di dispersione elastica. La fluidità è fornita solo dallo scorrimento reciproco degli strati, quindi la viscosità del mezzo è piuttosto elevata. A causa della loro elevata viscosità, i cristalli liquidi smectici non sono molto utilizzati in ingegneria.

Nella fase nematica, gli assi lunghi delle molecole sono orientati lungo una direzione comune, detta direttrice nematica. Tuttavia, i centri di gravità delle molecole sono disposti in modo casuale, per cui si verifica una simmetria di ordine inferiore rispetto ai cristalli smectici (fig. 4.5, b). Con questa struttura della sostanza, è possibile lo scorrimento reciproco delle molecole lungo la direttrice nematica.

La fase del colesterolo è simile alla fase nematica a livello molecolare. Tuttavia, la sua intera struttura è ulteriormente ritorta attorno all'asse di Witt, che è perpendicolare agli assi molecolari. Il risultato è una struttura elicoidale stratificata con un passo dell'elica di circa 300 nm (fig. 4.5, c). Una fase di questo tipo si comporta rispetto alla radiazione incidente come un filtro di interferenza, cioè i raggi luminosi vengono

riflessi selettivamente. Il fenomeno è per molti versi analogo a quello della diffrazione dei raggi X sui reticoli cristallini dei solidi.

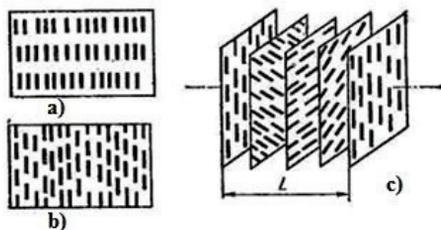


Fig. 4.5. Rappresentazione schematica della struttura dei cristalli liquidi:
a - smectico; b - nematico; c - colesterico

Se uno strato piatto di un cristallo liquido di colesterolo viene illuminato con luce bianca, apparirà colorato nella luce riflessa, e il colore può variare a seconda dell'angolo di osservazione.

Il passo di una spirale elicoidale dipende fortemente dalle influenze esterne. Al variare della temperatura, cambia la distanza tra gli strati molecolari e di conseguenza la lunghezza d'onda di massima diffusione a un determinato angolo di osservazione. Il risultato è un termometro a colori che ha trovato diverse applicazioni. Il cambiamento del colore della texture con la temperatura è chiamato effetto termocromico. I termometri a colori sono utilizzati con successo per la diagnostica tecnica e medica. Permettono di ottenere facilmente un'immagine del campo termico sotto forma di grafico a colori.

Per il controllo di un fascio di luce e per la visualizzazione di informazioni, gli effetti elettro-ottici nei cristalli liquidi nematici sono di grande interesse pratico. Come nel caso dei ferroelettrici, l'intero volume di un cristallo liquido nematico è diviso in piccole regioni - domini - che differiscono nella direzione del loro orientamento preferito, con conseguente eterogeneità ottica del mezzo e forte dispersione della luce. Un cristallo liquido di questo tipo appare torbido nella luce riflessa e trasmessa. Per l'uso pratico, sono necessari strati sottili e orientati in modo omogeneo. In questo caso, si distingue tra orientamento omogeneo (orizzontale) e omeotropo (verticale) delle molecole rispetto ai substrati di vetro. L'orientamento richiesto si ottiene mediante uno speciale trattamento superficiale dei substrati di vetro (incisione, sfregamento, incisione, deposizione di rivestimenti organici e inorganici, ecc).

In termini di proprietà elettriche, i cristalli liquidi nematici appartengono al gruppo dei dielettrici polari con una bassa resistività ($\rho = 10^6 - 10^{10}$ Ohm·m), il cui valore può essere facilmente regolato sciogliendo composti ionici. L'anisotropia ottica e dielettrica sono caratteristiche

importanti dei cristalli liquidi nematici. Una misura dell'anisotropia ottica è la differenza $\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp}$ (dove n_{\parallel} e n_{\perp} sono indici di rifrazione per un'onda luminosa il cui vettore elettrico è parallelo o perpendicolare alla direzione dell'orientamento predominante delle molecole. Rispettivamente, un raggio insolito e un raggio ordinario).

Nella creazione di dispositivi di visualizzazione delle informazioni sui cristalli liquidi, i più utilizzati sono l'effetto di diffusione dinamica della luce e l'effetto di "torsione" del campo (srotolamento della fase nematica).

La diffusione dinamica della luce si osserva nei cristalli liquidi con anisotropia dielettrica negativa e bassa resistività (circa 10^6 Ohm·m). L'orientamento omeotropo delle molecole della mesofase corrisponde allo stato iniziale. Grazie all'ordine interno, il mezzo è trasparente alla luce incidente. Sotto l'influenza di una tensione esterna, i dipoli ruotano (il loro momento elettrico è perpendicolare agli assi lunghi delle molecole) e l'orientamento cambia in omogeneo. Allo stesso tempo, un forte campo elettrico dà inizio a un flusso di ioni, che interrompe la disposizione statica ordinata delle molecole. Quando gli assi molecolari sono allineati nella direzione del flusso di ioni, nella mesofase si verifica una turbolenza che porta a variazioni locali dell'indice di rifrazione, ovvero alla comparsa di centri di diffusione della luce. Esternamente, ciò si manifesta come una torbidità del mezzo. L'intensità della diffusione della luce, e quindi il contrasto della risposta ottica, aumenta con l'incremento della tensione di controllo. La geometria del carattere illuminato è determinata dalla forma dell'elettrodo. Quando il campo viene spento, il mezzo ritorna allo stato trasparente originale.

Per ottenere immagini a colori, le molecole di colorante vengono introdotte nei cristalli liquidi, che hanno anch'essi una forma allungata a bastoncino e sono orientati parallelamente alle molecole di mesofase a causa dell'interazione di dispersione elastica. Lo spettro di assorbimento di queste molecole è funzione del loro orientamento rispetto alla direzione di polarizzazione della luce incidente. L'assorbimento è massimo se gli assi lunghi delle molecole sono paralleli alle oscillazioni del vettore elettrico dell'onda luminosa. Un campo esterno modifica l'orientamento statico delle molecole, cambiando lo spettro di assorbimento della luce polarizzata linearmente e il conseguente contrasto cromatico della cella elettro-ottica.

I cristalli liquidi utilizzati nei dispositivi indicatori sono solitamente una miscela di due o più composti. Nei sistemi misti è possibile ottenere un intervallo di temperatura più ampio della mesofase.

Il campo di applicazione dei cristalli liquidi nematici è ancora limitato principalmente ai dispositivi di visualizzazione. Tali dispositivi includono display, tabelloni di grande formato, indicatori digitali per microcomputer, quadranti di orologi elettronici e strumenti di misura

digitali. I principali vantaggi di questi indicatori sono: a) buon contrasto in piena luce; b) basso consumo energetico; c) compatibilità con i circuiti integrati in termini di parametri operativi e di design; d) facilità di produzione e basso costo. I cristalli liquidi utilizzano la luce ambientale per la visualizzazione, quindi il loro consumo energetico è molto più basso rispetto ad altri dispositivi di visualizzazione e ammonta a 10^{-4} - 10^{-6} W/cm². Si tratta di un valore di diversi ordini di grandezza inferiore a quello dei LED, dei fosfori in polvere e in pellicola e degli indicatori a scarica di gas. I principali svantaggi dei dispositivi a cristalli liquidi sono la bassa velocità e la suscettibilità all'invecchiamento elettrochimico e fotochimico.

FOR AUTHOR USE ONLY

Capitolo 5. Materiali magnetici

5.1. Concetti generali del magnetismo

In base alla natura dell'interazione con il campo magnetico, i materiali vengono solitamente suddivisi in materiali a debole interazione e materiali a forte interazione. Una misura dell'interazione dei materiali con un campo magnetico è l'induzione magnetica (B), cioè l'intensità media del campo magnetico all'interno del materiale quando si trova in un campo magnetico esterno di intensità H . L'induzione magnetica è la sovrapposizione dell'intensità del campo magnetico esterno e della magnetizzazione:

$$B = \mu_o (H + M), \quad (5.1)$$

dove M è la magnetizzazione del materiale, cioè il rapporto tra la somma vettoriale dei momenti magnetici elementari e il volume del materiale, $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Gn/m è la costante magnetica.

Nelle sostanze che interagiscono debolmente con il campo, la magnetizzazione è piccola $B \approx \mu_o H$. Tali sostanze comprendono i diamagneti e i paramagneti. Nei diamagneti l'induzione è inferiore all'intensità del campo esterno, mentre nei paramagneti l'induzione è superiore all'intensità del campo esterno. Le sostanze che interagiscono fortemente con il campo hanno un'elevata magnetizzazione. Tali sostanze includono ferromagneti, antiferromagneti (ferriti), supermagneti e vetri di spin.

5.2. Classificazione dei materiali magnetici

In base alla reazione a un campo magnetico esterno e alla natura del loro ordinamento magnetico interno, tutte le sostanze in natura possono essere suddivise in cinque gruppi: diamagneti, paramagneti, ferromagneti, antiferromagneti e ferromagneti. Questi tipi di magneti corrispondono a cinque diversi tipi di stati magnetici della materia: diamagnetismo, paramagnetismo, ferromagnetismo, antiferromagnetismo e ferromagnetismo.

I diamanti sono sostanze la cui suscettibilità magnetica è negativa e non dipende dall'intensità del campo magnetico esterno.

Il diamagnetismo è causato da una leggera variazione della velocità angolare della rotazione orbitale degli elettroni quando un atomo viene posto in un campo magnetico. L'effetto diamagnetico è una manifestazione della legge dell'induzione elettromagnetica a livello atomico. L'orbita degli elettroni può essere considerata come un circuito chiuso senza resistenza attiva. Sotto l'influenza di un campo esterno, la corrente nel circuito cambia e si genera un momento magnetico aggiuntivo. Secondo la legge di Lenz, questo momento è diretto verso il campo esterno. L'effetto diamante è universale, insito in tutte le sostanze.

Tuttavia, nella maggior parte dei casi è mascherato da effetti magnetici più forti. Il diamagnetismo dei gusci di elettroni emerge quando il momento magnetico intrinseco degli atomi è pari a zero.

I diamagneti comprendono i gas inerti, l'idrogeno, l'azoto, molti liquidi (acqua, petrolio e derivati), alcuni metalli (rame, argento, oro, zinco, mercurio, gallio, ecc.), la maggior parte dei semiconduttori (silicio, germanio, ecc.) e i composti organici, i cristalli alcalino-alcalini, i vetri inorganici, ecc. I diamanti sono tutte le sostanze con legami chimici covalenti e le sostanze allo stato superconduttore.

Il valore numerico della suscettibilità magnetica dei diamagneti è 10^{-6} - 10^{-7} . Poiché i diamagneti sono magnetizzati contro la direzione del campo, la disuguaglianza $\mu < 1$ è soddisfatta per loro. Tuttavia, la permeabilità magnetica relativa si discosta pochissimo dall'unità (ad eccezione dei superconduttori). La suscettibilità magnetica dei diamagneti varia molto poco con la temperatura. Ciò è dovuto al fatto che l'effetto diamagnetico è causato da processi intra-atomici che non sono influenzati dal movimento termico delle particelle. Una manifestazione esterna del diamagnetismo è l'espulsione di diamagneti da un campo magnetico disomogeneo.

I paramagneti sono sostanze con una suscettibilità magnetica positiva che non dipende dall'intensità di un campo magnetico esterno. In paramagnetismo, gli atomi hanno un momento magnetico elementare anche in assenza di un campo esterno, ma a causa del moto termico, questi momenti magnetici sono distribuiti in modo casuale, cosicché la magnetizzazione della sostanza è generalmente nulla. Un campo magnetico esterno fa sì che i momenti magnetici degli atomi siano orientati prevalentemente in una direzione. L'energia termica contrasta la creazione di un ordine magnetico. Pertanto, la suscettibilità paramagnetica è fortemente dipendente dalla temperatura.

A temperatura ambiente, la suscettibilità magnetica dei paramagneti è compresa tra 10^{-3} e 10^{-6} . Pertanto, la loro permeabilità magnetica è leggermente diversa dall'unità. A causa della loro magnetizzazione positiva, i paramagneti posti in un campo magnetico disomogeneo ne sono attratti. In campi molto forti e a basse temperature, i paramagneti possono raggiungere uno stato di saturazione magnetica, in cui tutti i momenti magnetici elementari sono orientati parallelamente a H .

I paramagneti comprendono ossigeno, ossido nitrico, metalli alcalini e alcalino-terrosi, alcuni metalli di transizione, sali di ferro, cobalto, nichel ed elementi delle terre rare. L'effetto paramagnetico è fisicamente simile alla polarizzazione dipolo-rilassamento dei dielettrici.

I ferromagneti sono sostanze con una grande suscettibilità magnetica positiva (fino a 10^6), che dipende fortemente dall'intensità del campo magnetico e dalla temperatura. I ferromagneti sono caratterizzati da un ordinamento magnetico interno, che si esprime nell'esistenza di

regioni macroscopiche con momenti magnetici degli atomi orientati parallelamente. La caratteristica più importante dei ferromagneti è la loro capacità di essere magnetizzati fino alla saturazione in campi magnetici relativamente deboli.

Gli antiferromagneti sono sostanze in cui l'orientamento antiparallelo dei momenti magnetici elementari di atomi o ioni identici nel reticolo cristallino si verifica spontaneamente al di sotto di una certa temperatura. Gli antiferromagneti sono caratterizzati da una piccola suscettibilità magnetica positiva ($\chi = 10^{-3} - 10^{-5}$), fortemente dipendente dalla temperatura. Quando viene riscaldato, l'antiferromagnete subisce una transizione di fase verso lo stato paramagnetico. La temperatura di questa transizione, alla quale l'ordinamento magnetico scompare, è chiamata punto di Neel (o punto di Curie antiferromagnetico). L'antiferromagnetismo si trova nel cromo, nel manganese e in alcuni elementi delle terre rare. Gli antiferromagneti tipici sono composti chimici semplici a base di metalli del gruppo di transizione, come ossidi, alogenuri, solfuri, carbonati e simili.

I ferromagneti sono sostanze le cui proprietà magnetiche sono dovute all'antiferromagnetismo non compensato. Come i ferromagneti, hanno un'elevata suscettibilità magnetica, che dipende in modo significativo dall'intensità del campo magnetico e dalla temperatura. Allo stesso tempo, i ferromagneti sono caratterizzati da una serie di differenze significative rispetto ai materiali ferromagnetici. Alcune leghe metalliche ordinate hanno proprietà ferromagnetiche, ma soprattutto vari composti di ossido, tra i quali le ferriti sono di maggiore interesse pratico.

Dia-, para- e antiferromagneti possono essere raggruppati in un gruppo di sostanze debolmente magnetiche, mentre i ferro- e i ferromagneti sono materiali fortemente magnetici.

Tutti i materiali magnetici sono convenzionalmente suddivisi in magneticamente morbidi e magneticamente duri. I materiali magneticamente morbidi sono quelli che vengono facilmente magnetizzati da un campo magnetico esterno. Tali materiali sono caratterizzati da bassi valori di forza coercitiva e alti valori di permeabilità magnetica. Vengono utilizzati per concentrare un campo magnetico. Nella maggior parte dei casi, i materiali magneticamente morbidi operano in campi magnetici alternati, per cui un'elevata resistività è importante per loro. Storicamente, il primo materiale magneticamente morbido è stato il ferro a basso tenore di carbonio, che ha una bassa durezza meccanica. Per questo motivo, tali materiali sono chiamati magneticamente morbidi.

I materiali magnetoresistivi sono materiali con un'elevata forza coercitiva e un'alta induzione residua. Vengono utilizzati per realizzare magneti permanenti, fonti di un campo magnetico costante. Storicamente, i primi materiali magneticamente duri sono stati gli acciai al carbonio

induriti meccanicamente. Per questo motivo, tali materiali sono chiamati magnetoresistenti.

5.3. Ferromagneti

Secondo l'ipotesi di Ampère, le correnti molecolari scorrono all'interno degli atomi e delle molecole e quindi esistono i dipoli magnetici. In realtà, l'ipotesi di Ampère è stata brillantemente confermata quando è stata compresa la struttura elettronica dell'atomo. Il movimento degli elettroni intorno ai nuclei degli atomi è la corrente elementare che crea i momenti magnetici. Una considerazione più rigorosa dei momenti magnetici elementari mostra che un atomo ha momenti magnetici dei nuclei, momenti magnetici orbitali degli elettroni e momenti magnetici di spin degli elettroni. I momenti magnetici dei nuclei atomici sono trascurabili rispetto ai momenti magnetici degli elettroni, quindi la loro influenza sulle proprietà magnetiche dei materiali può essere trascurata. Anche i momenti magnetici orbitali degli elettroni sono molto più piccoli dei momenti magnetici di spin. Pertanto, le proprietà magnetiche dei materiali sono determinate principalmente dai momenti magnetici di spin degli elettroni.

Secondo la regola di Hund, gli orbitali degli elettroni sono riempiti in modo da massimizzare i momenti magnetici e meccanici degli elettroni. Nei metalli di transizione, gli orbitali elettronici interni (3d o 5f) non sono completamente riempiti. Pertanto, gli atomi di questi elementi hanno un momento magnetico significativo. L'interazione di scambio può portare a un orientamento reciproco dei momenti magnetici degli atomi vicini. In base all'orientamento dei momenti magnetici degli atomi vicini, tutte le sostanze si dividono in ferromagneti, antiferromagneti e paramagneti.

Affinché una sostanza sia ferromagnetica, devono essere soddisfatte due condizioni:

1) Il materiale deve contenere atomi di metalli di transizione con grandi momenti magnetici;

2) Il rapporto tra la distanza tra gli atomi e il raggio dei gusci degli elettroni non riempiti deve essere superiore a 3.

I momenti magnetici degli atomi ferromagnetici vicini sono orientati in parallelo, ma in un cristallo di dimensioni sufficientemente grandi, tutti i momenti magnetici non possono essere orientati in parallelo. In caso contrario, si creerebbe un campo magnetico intorno al cristallo e l'energia del sistema aumenterebbe. Per ridurre l'energia del sistema, il cristallo viene diviso in domini - regioni di magnetizzazione spontanea, e la divisione viene effettuata in modo che non ci sia un campo magnetico esterno.

Ai confini dei domini, l'energia degli atomi aumenta. Pertanto, affinché l'energia del materiale sia minima, è necessario che la lunghezza dei confini del dominio sia minima, o la dimensione del dominio, che è la

deformazione del reticolo cristallino sotto l'influenza di un campo magnetico. L'interazione di scambio tra gli atomi porta all'emergere di forze di interazione aggiuntive e il reticolo cristallino si deforma. La crescita del dominio porta a un aumento dell'intensità del campo locale all'interno del dominio e a un aumento della deformazione del reticolo. Allo stesso tempo, l'energia del sistema aumenta. Pertanto, l'opposizione tra anisotropia magnetica e magnetostrizione porta a stabilire la dimensione ottimale dei domini magnetici.

Quando un ferromagnete viene posto in un campo magnetico esterno, i vettori di magnetizzazione di alcuni domini saranno uguali o quasi uguali al vettore dell'intensità del campo magnetico esterno. L'energia di questi domini sarà minima, mentre l'energia di tutti gli altri domini aumenterà. La dipendenza dell'induzione dall'intensità del campo magnetico esterno è chiamata curva di magnetizzazione (fig. 5.1).

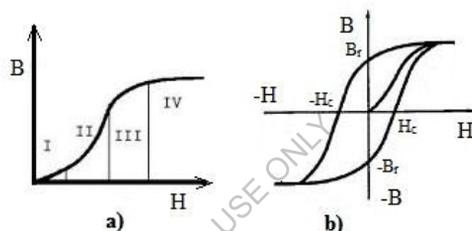


Fig. 5.1. Curva di magnetizzazione (a) e anello di isteresi (b).

Nella parte iniziale della curva di magnetizzazione, un aumento dell'intensità del campo esterno porta a un leggero aumento dell'induzione e, quando il campo esterno viene spento, l'induzione diminuisce fino a zero. Questa sezione è chiamata sezione di magnetizzazione inversa o regione di Rayleigh (I) (fig. 5.1. a). Nella seconda sezione, una leggera variazione dell'intensità del campo esterno porta a notevoli cambiamenti nell'induzione. Questa sezione è chiamata zona di forte aumento dell'induzione o regione del salto di Barkhausen (II). Nella terza sezione della curva di magnetizzazione, la dipendenza dell'induzione dall'intensità del campo esterno si indebolisce nuovamente. Questa sezione è chiamata sezione di magnetizzazione lenta o regione di magnetizzazione dovuta a processi di rotazione (III). Nella quarta regione, l'induzione aumenta in proporzione all'intensità del campo magnetico. Questa regione è chiamata regione di saturazione o regione di paraprocesso (IV).

Quando un ferromagnete è esposto a un campo magnetico esterno, inizia la crescita di domini orientati in modo favorevole, cioè i loro confini si spostano. Tuttavia, le disomogeneità strutturali del materiale impediscono lo spostamento dei confini del dominio (cioè sono i punti di ancoraggio dei confini del dominio) e i confini si piegano sotto l'influenza di un campo esterno.

La curvatura dei confini non è energeticamente vantaggiosa, in quanto porta a un aumento della loro superficie, quindi quando il campo esterno viene spento, i confini si raddrizzano di nuovo e la magnetizzazione scompare. Così, a bassi valori dell'intensità del campo esterno, si realizza una regione di magnetizzazione inversa o regione di Rayleigh. Con un ulteriore aumento dell'intensità del campo esterno, la flessione dei confini diventa così grande che l'energia dei confini piegati coincide con l'energia dei confini che si sono staccati dai punti di ancoraggio. Un'ulteriore flessione dei confini diventa energeticamente svantaggiosa, i confini si staccano dai punti di ancoraggio e si spostano a salti verso la fila successiva di punti di ancoraggio. Allo stesso tempo, si osserva una regione di forte aumento dell'induzione o una regione di salti di Barkhausen.

Una volta spostati i confini del dominio, i domini orientati favorevolmente riempiono l'intero volume del cristallo e la magnetizzazione inizia ad aumentare a causa della rotazione dei momenti magnetici degli atomi dalla direzione della magnetizzazione leggera a quella della magnetizzazione pesante. Poiché la rotazione dei momenti magnetici non è energeticamente vantaggiosa, richiede un'elevata intensità di campo esterno. Si realizza così un'area di magnetizzazione lenta o una regione di magnetizzazione dovuta a processi di rotazione. Quando tutti i momenti magnetici degli atomi sono diretti dal campo esterno, non si verifica alcun aumento della magnetizzazione e l'aumento dell'induzione avviene grazie all'aumento dell'intensità del campo magnetico, come nei paramagneti. Si osserva una zona di saturazione o regione di paraprocesso.

Se, dopo aver magnetizzato il ferromagnete fino alla saturazione, il campo magnetico esterno viene spento, la magnetizzazione del ferromagnete non viene completamente rimossa e l'induzione residua B_r viene mantenuta (fig. 5.1, b). Ciò è dovuto al fatto che i difetti strutturali che impediscono il movimento dei confini del dominio durante la magnetizzazione impediscono lo spostamento inverso dei confini del dominio durante la smagnetizzazione. Per eliminare l'induzione residua, è necessario applicare un campo di polarità inversa. A un certo valore dell'intensità di campo, chiamato forza coercitiva H_c , l'induzione scompare. Un ulteriore aumento dell'intensità di campo in direzione opposta porterà alla magnetizzazione del ferromagnete. Naturalmente, il segno del vettore induzione magnetica cambierà. La disattivazione del campo magnetico esterno porterà nuovamente alla comparsa di un'induzione residua, che dovrà essere eliminata applicando una forza coercitiva. Così, quando un ferromagnete viene posto in un campo magnetico alternato, appare un ciclo di isteresi (fig. 5.1.b). Più il materiale presenta difetti strutturali e confini di grano che ne rendono difficile il movimento, più alta è la forza coercitiva e più ampio è il ciclo di isteresi.

5.4. Materiali magneticamente morbidi

I materiali magneticamente morbidi più comuni sono il ferro e le sue leghe con il silicio. Vengono utilizzati per far funzionare i nuclei magnetici nei campi a corrente continua e a bassa frequenza. Il materiale più economico è il ferro tecnicamente puro, con un contenuto totale di impurità fino allo 0,1%. A causa della sua resistività elettrica relativamente bassa ($0,1 \mu\Omega\cdot\text{m}$), il ferro puro viene utilizzato principalmente per nuclei magnetici a flusso magnetico costante. Uno svantaggio significativo del ferro tecnicamente puro è il suo invecchiamento, cioè l'aumento della forza coercitiva nel tempo a causa del rilascio di particelle di carburo e nitruro finemente disperse.

La purificazione del ferro dalle impurità porta a un aumento della permeabilità magnetica e a una diminuzione della forza coercitiva. Questi vantaggi sono particolarmente pronunciati nei campi deboli, cioè nei campi utilizzati nell'elettronica e nei dispositivi di misura. A seconda della tecnologia di purificazione del ferro, si distinguono ferro elettrolitico, ridotto e carbonile. Poiché la purificazione aumenta notevolmente il costo del materiale, il suo utilizzo è estremamente limitato. Il ferro carbonilico è il più utilizzato. Ciò è dovuto al fatto che la decomposizione del pentacarbonile di ferro produce una polvere metallica. Mescolando questa polvere con una vernice, si può ottenere un materiale che combina un'alta resistività con un'alta permeabilità magnetica.

La bassa resistenza elettrica del ferro comporta elevate perdite per correnti parassite in campi alternati e una ridotta permeabilità magnetica. Quando il ferro è legato al silicio, la resistività aumenta notevolmente. Ad esempio, in una lega contenente il 5% di silicio, la resistività raggiunge $0,7 \mu\Omega\cdot\text{m}$, cioè aumenta di oltre 7 volte rispetto al ferro puro. Inoltre, la presenza di silicio nel ferro riduce l'anisotropia magnetica e la magnetostrizione. È importante notare che l'interazione del silicio con le dislocazioni porta a una diminuzione della mobilità di queste ultime, riducendo la duttilità delle leghe. A questo proposito, le leghe industriali ferro-silicio, come gli acciai elettrici, non contengono più del 5% di Si.

Poiché gli acciai elettrici mantengono l'anisotropia magnetica, per migliorare le proprietà magnetiche si ricorre all'acciaio testurizzato, cioè all'acciaio con alcune direzioni cristallografiche coincidenti in grani vicini. Per ottenere un acciaio con elevata permeabilità magnetica e basse perdite, è necessaria una coincidenza di direzioni del tipo [111]. Per ottenere una struttura magnetica, si ricorre alla laminazione a freddo con grande compressione e alla successiva ricottura a una temperatura di $900\text{-}1000^\circ\text{C}$.

Per i materiali che operano in campi deboli, un valore elevato della permeabilità magnetica iniziale è di estrema importanza. In altre parole, per questi materiali è importante un'elevata mobilità dei confini del

dominio in condizioni di bassa intensità del campo magnetico esterno. Di conseguenza, tali materiali dovrebbero essere monofase e avere una bassa anisotropia magnetica e magnetostrizione. Per ottenere la massima permeabilità magnetica, si utilizzano leghe fortemente legate. Ne sono un esempio l'alsifer e la permalloy.

L'Alsifer è una lega del sistema Fe - Si - Al contenente circa il 9,5% di silicio e il 5,5% di alluminio. Con questa composizione, l'anisotropia magnetica è minima e la lega ha una permeabilità magnetica molto elevata. La lega ha una resistività elettrica piuttosto elevata ($\rho = 0,81 \mu\Omega \cdot m$), che riduce le perdite per correnti parassite. Allo stesso tempo, la lega non è plastica e dura. I pezzi che la compongono sono prodotti con la metallurgia delle polveri e la lavorazione finale dei pezzi è possibile solo con metodi anodici-meccanici e a scintilla elettrica, oltre che con la rettifica. La complessità della lavorazione aumenta il costo dei prodotti, ma poiché la lega non contiene componenti costosi, è ampiamente utilizzata per la produzione di schermi magnetici e nuclei magnetici.

Una lega di ferro e nichel è chiamata permalloy. Si distingue tra permalloy a basso tenore di nichel e permalloy ad alto tenore di nichel. La permalloy a basso tenore di nichel contiene il 45-65% di Ni, mentre la permalloy ad alto tenore di nichel contiene il 76-80% di Ni. Le permalloy a basso nichel sono caratterizzate da una resistività più elevata e da una maggiore induzione di saturazione; tuttavia, la permeabilità magnetica delle permalloy a basso nichel è inferiore a quella delle permalloy ad alto nichel.

Nei campi ad alta frequenza, le perdite per correnti parassite aumentano notevolmente. Per questo motivo, nei campi ad alta frequenza si utilizzano materiali ad alta resistività, come i magnetodielettrici, i ferromagneti con struttura amorfa e le ferriti.

I magnetodielettrici sono prodotti mescolando ferromagneti in polvere e un legante organico o inorganico. La permalloy di ferro carbonile, alsifero o molibdeno, ulteriormente drogata con zolfo, viene utilizzata come ferromagnete. Lo zolfo viene aggiunto alla permalloy per renderla più fragile. I ferromagneti con struttura amorfa si ottengono con un raffreddamento ultraveloce della massa fusa, con velocità di raffreddamento che vanno da 10^6 a 10^8 gradi al secondo. Con un raffreddamento così rapido, il reticolo cristallino non ha il tempo di formarsi e il materiale è un liquido superraffreddato. L'assenza di un reticolo cristallino porta a una completa isotropia delle proprietà magnetiche e, in assenza di anisotropia magnetica, la mobilità dei confini di dominio diventa elevata. Pertanto, i materiali con struttura amorfa sono magneticamente morbidi.

Le ferriti sono composti ionici del tipo $MeOFeO_{23}$, che sono sali chimici dell'acido $MeFeO_{24}$, dove Me è un catione di qualsiasi metallo divalente o due cationi di un metallo monovalente. La maggior parte delle

ferriti ha un reticolo cristallino cubico simmetrico. Le ferriti nichel-zinco, litio-zinco e manganese-zinco sono i materiali magneticamente morbidi più utilizzati.

In base alle loro proprietà elettriche, le ferriti sono semiconduttori o dielettrici, quindi le perdite dovute alle correnti parassite nelle ferriti sono trascurabili. Inoltre, hanno un'elevata costante dielettrica, che porta a una diminuzione della velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche nelle ferriti. Questa circostanza rende possibile la produzione di linee di ritardo, valvole magnetiche, ecc. sulla base di ferriti. I cristalli singoli di ferriti magneticamente morbide sono utilizzati per produrre testine magnetiche per la registrazione e la riproduzione di segnali audio e video nei registratori a nastro.

5.5. Materiali magneticamente duri

I materiali magneticamente duri sono utilizzati per produrre magneti permanenti, la cui energia magnetica immagazzinata è stimata come il prodotto dell'induzione residua e della forza coercitiva.

$$E_{mag} = H B_{cr} \quad (5.2)$$

Per aumentare la forza coercitiva, è necessario rendere difficile il movimento dei confini del dominio. A tal fine, l'anisotropia magnetica deve essere massimizzata, la dimensione dei grani deve essere minima e il materiale deve contenere particelle che impediscano il movimento dei confini di dominio.

I materiali magneticamente duri sono acciai al carbonio induriti in martensite. Ne risulta una struttura ideale dal punto di vista dei materiali magneticamente duri: una miscela dispersa di fasi ferromagnetiche e non ferromagnetiche, con la fase ferromagnetica che presenta un'ampia anisotropia magnetica. Tuttavia, le proprietà degli acciai temprati martensitici sono ben lungi dall'essere ideali, poiché un ampio volume degli acciai temprati è occupato dalla fase non ferromagnetica, l'austenite, per cui la loro magnetizzazione e, di conseguenza, l'induzione residua sono basse. Un altro svantaggio degli acciai martensitici è la loro bassa temprabilità, cioè la capacità di resistere alla tempra fino a una profondità considerevole, impedendo la trasformazione martensitica negli strati più profondi del materiale. Per aumentare la temprabilità, gli acciai vengono ulteriormente legati con cromo, tungsteno, molibdeno e cobalto. La lega con il cobalto è particolarmente efficace perché gli atomi di cobalto hanno un momento magnetico e l'induzione residua aumenta in presenza di cobalto.

I materiali magneticamente duri sono non duttili, poiché le particelle disperse delle emissioni che impediscono lo spostamento dei confini di dominio impediscono il movimento delle dislocazioni. Tuttavia, in alcuni casi, è necessario disporre di materiali magneticamente duri sotto forma di nastri, fogli, fili per la fabbricazione di elementi di stampaggio

di sistemi di misura, lancette di bussole e perline, nastri di registrazione magnetica e così via. Tali materiali devono avere una notevole plasticità.

I materiali magneticamente deformabili includono leghe dei sistemi Cu-20% Ni-20% Fe-cunife, Cu-20% Ni-20% Co-cunico e Fe-52% Co-(4-14)%V-vicaloy. Nelle leghe a base di rame, si verifica una grande forza coercitiva dopo una compressione significativa e un successivo rinvenimento a 600 °C. Le elevate proprietà magnetiche di questi materiali sono dovute al rilascio di particelle a singolo dominio della fase ferromagnetica durante il raffreddamento della soluzione solida supersatura. È importante notare che durante la deformazione preliminare, nel materiale appare una texture netta, per cui le particelle rilasciate sono orientate. Le leghe del sistema Co - V - Fe sono caratterizzate da un'elevata induzione (fino a 1,8 T). Sono utilizzate per produrre piccoli magneti, bussole e lancette di perline e fili magnetici.

La più famosa delle ferriti magneticamente dure è la ferrite di bario $BaO_6 Fe O_{23}$ (FB, ferroxdur). A differenza delle ferriti magneticamente morbide, presenta un reticolo esagonale con anisotropia uniaassiale anziché un reticolo cubico. L'elevata forza coercitiva è dovuta alle piccole dimensioni dei grani e alla forte anisotropia cristallografica. Oltre alla ferrite di bario, si utilizzano anche la ferrite di cromo-bario (CB) e la ferrite di cobalto. I materiali ferritici sono molto più economici dei materiali metallici. Allo stesso tempo, hanno un peso specifico significativamente inferiore. L'elevata forza coercitiva consente di produrre magneti con un rapporto lunghezza/sezione ridotto.

Gli svantaggi della ferrite magneticamente dura sono la bassa resistenza meccanica, la fragilità e l'elevata sensibilità alle variazioni di temperatura.

Appendice

Tabella 1. Proprietà di Ge, Si, GaAs (a 300 K).

Proprietà	Ge	Si	GaAs
1	2	3	4
Numero di atomi in 1 cm^3	$4,42 \cdot 10^{22}$	$5,0 \cdot 10^{22}$	$2,21 \cdot 10^{22}$
Massa atomica	72,6	28,08	144,63
Campo di rottura, V/cm	$\sim 10^5$	$\sim 3 \cdot 10^5$	$\sim 4 \cdot 10^5$
Struttura cristallina	Diamante	Diamante	Zinco inganni
Densità, g/cm^3	5,3267	2,328	5,32

Costante dielettrica relativa permeabilità	16	11,8	10,9
Densità effettiva di stati nella banda di conduzione N_c , cm^{-3}	$1,04 \cdot 10^{19}$	$2,8 \cdot 10^{19}$	$4,7 \cdot 10^{17}$
Densità effettiva di stati nella banda di valenza N_v , cm^{-3}	$6,1 \cdot 10^{18}$	$1,02 \cdot 10^{19}$	$7,0 \cdot 10^{18}$
Masse effettive m^* : elettroni buchi	0,22 m_e 0,39 m_e	1,06 m_e 0,56 m_e	0,07 m_e 0,5 m_e
Affinità per l'elettrone, eV	4,0	4,05	4,07
Band gap a 300 K, eV	0,66	1,11	1,43
Concentrazione intrinseca, cm^{-3}	$2,5 \cdot 10^{13}$	$1,6 \cdot 10^{10}$	$1,1 \cdot 10^7$
Costante di reticolo, nm	0,565748	0,543086	0,56534
Coefficiente di temperatura dell'espansione lineare di espansione lineare $\Delta L/L \Delta T$, $^\circ\text{C}^{-1}$	$5,8 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$5,9 \cdot 10^{-6}$
Punto di fusione, $^\circ\text{C}$	937	1420	1238
Durata dei supporti non di base, s	10^{-3}	$2,5 \cdot 10^{-3}$	10^{-8}
La mobilità è una deriva $\text{cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$: elettroni μ_n fori μ_p	3900 1900	1500 600	8500 400

Continuazione della Tabella 1

Proprietà	Ge	Si	GaAs
1	2	3	4
Energia dei fononi Raman Er, eV	0,037	0,063	0,035

Calore specifico, J/(g·°C)	0,31	0,7	0,35
Conduttività termica (a 300 K), W/(cm·°C)	0,64	1,45	0,46
Coefficiente di diffusione termica, cm ² /s	0,36	0,9	0,44
Pressione del vapore, Pa	0,133 a 1270°C $1,33 \cdot 10^{-6}$ a 800 °C	0,133 a 1600 °C $1,33 \cdot 10^{-6}$ a 930 °C	$1,01 \cdot 10^5$ a 1050°C $1,01 \cdot 10^7$ a 1220 °C
Lavoro in uscita, eV	4,4	4,8	4,7

FOR AUTHOR USE ONLY

Tabella 2.

Dipendenza del CEM di una termocoppia differenziale in rame-cromo (Tipo L) dalla temperatura della giunzione di lavoro (tabella di calibrazione).

Intervallo di temperatura da -20°C a $+200^{\circ}\text{C}$

t, °C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	ЭДС, мВ									
-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

Continuazione della Tabella 3

200	8.154	8.178	8.218	8.258	8.298	8.338	8.378	8.418	8.458	8.498	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	15.848	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	19.368	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

Continuazione della Tabella 3

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	29.985	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	33.849	33.889	33.930	33.971	34.012	34.053	34.094
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	34.828	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	37.725
910	37.725	37.765	37.805	37.845	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	39.668	39.708
960	39.708	39.747	39.787	39.826	39.866	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	40.376	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	44.511	44.550	44.588	44.626	44.664	44.702	44.740
1090	44.740	44.778	44.816	44.854	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	47.255	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	52.654	52.689	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

Bibliografia

1. R.K. Rajput. Libro di testo sui materiali per l'ingegneria elettrica. Firewall Media, 2004, 449 p.
2. Ian Jones. Scienza dei materiali per ingegneri elettrici ed elettronici, broccura. Oxford University Press; 6a edizione (1 gennaio 2007) 360 p.. ISBN-10 : 9780195691634
3. Gorbachuk MT. Materiali elettrotecnici. Tutorial. (UA). LAP LAMBERT Academic Publishing. 17 Meldrum Street, Beau Bassin 71504, Mauritius, 2017. ISBN: 978-620-2-05432-4, 110 c.
4. Vasylenko I.I., Shirokov V.V., Vasylenko Yu.I. Materiali strutturali ed elettrici. Guida allo studio. - Lviv: Magnolia, 2008 - 242 p.
5. Gorbachuk, M.Larionov, A.Firsov, N.Shatil. Sensori a semiconduttore per un ampio intervallo di temperatura. Sensors & Transducers Journal and Magazine, Vol. 162, Issue 1, Gennaio 2014, pp.1-4
6. S.A.Mulenko, N.T.Gobachuk. Sintesi di film nanometrici di ossido di ferro mediante RPLD e LCVD per sensori termofotografici. Applied Physics B: Lasers and Optics, v.105, #3, p.517-523, 2011.
7. Gorbachuk N.T., Mitin V.V., Tkhorik Yu.A., Shvarts Yu.M. Effetto Piezo-Hall nel p-germanio. Phys. Stat. Sol.(c) 100. 1980, p.309
8. Gorbachuk N.T., Mitin V.V., Tkhorik Yu.A., Shvarts Yu.M. Sulla determinazione delle costanti di potenziale di deformazione dei semiconduttori del tipo p-germanio dalla dipendenza dalla temperatura della piezoresistenza. FTP, vol. 15, v. 14, p.649, 1981
9. Belyakov V.A., Gorbachuk N.T., Didenko P.I. ecc. Trasduttori di misura a semiconduttore di deformazione, temperatura e campo magnetico da utilizzare in condizioni di esposizione alle radiazioni, in un'ampia gamma di temperature e campi magnetici. Questioni di scienza e tecnologia atomica, Serie: Apparecchiature elettrofisiche, v.3(29), 2005, p.46-5.
10. Didenko P.I., Gorbachuk N.T. L'influenza dell'irradiazione neutronica sulle caratteristiche dei trasduttori di misura a semiconduttore di temperatura, deformazione e campo magnetico. Surface, 2005, 4, pp.57-58.
11. M.T. Gorbachuk, A.P. Klimenko. Fondamenti fisici delle tecnologie avanzate. /Sinossi delle lezioni/. Kyiv, DALPU, 1999, 39p.

12. M.T. Gorbachuk, A.P. Klimenko, M.T. Stepashko, L.M. Khanat. Basi teoriche delle tecnologie avanzate. /Sinossi delle lezioni/. Kyiv, DALPU, 1997, 44p.

FOR AUTHOR USE ONLY

INDICE DEI CONTENUTI

Capitolo 1. Informazioni generali sui materiali elettrici.....	2
Capitolo 2. Conduttori. Proprietà elettrofisiche dei conduttori.....	19
Capitolo 3. Materiali semiconduttori	51
Capitolo 4. Dielettrici	79
Capitolo 5. Materiali magnetici	107
Appendice	116
Bibliografia	123

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

Compra i tuoi libri rapidamente e direttamente da internet, in una delle librerie on-line cresciuta più velocemente nel mondo!
Produzione che garantisce la tutela dell'ambiente grazie all'uso della tecnologia di "stampa a domanda".

Compra i tuoi libri on-line su
www.morebooks.shop



info@omniscryptum.com
www.omniscryptum.com

OMNIScriptum

