

Острожинський В.Є., студент, Горбачук М.Т., доц.

Київський національний університет технологій та дизайну

**АНАЛІЗ І ПОРІВНЯННЯ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ І
ХАРАКТЕРИСТИК ДЕЯКИХ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ
НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ З МЕТОЮ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ
ДЛЯ СТВОРЕННЯ ДАТЧИКІВ ХОЛЛА**

Анотація. Проведено аналіз електрофізичних властивостей відомих напівпровідникових електротехнічних матеріалів, таких як арсенід галію GaAs, германій Ge, антимонід індію InSb, кремній Si з метою виявлення переваг, для створення датчиків магнітного поля – датчиків Холла. Проведено аналіз на основі фізики ефекту Холла і математичного аналізу, що визначає величину ефекту Холла в тому чи іншому матеріалі. Наведено характеристики датчиків Холла на основі різних матеріалів, зроблено висновки про переваги того чи іншого матеріалу в певних умовах і перспективності розглянутих матеріалів.

Ключові слова: напівпровідники; магнітні поля; датчики Холла.

Ostrozhinsky V., Gorbachuk N.

Kyiv National University of Technologies and Design

**ANALYSIS AND COMPARISON OF ELECTROPHYSICAL PROPERTIES AND
CHARACTERISTICS OF SOME ELECTROTECHNICAL SEMICONDUCTOR
MATERIALS FOR THEIR APPLICATION TO CREATE HALL SENSORS**

Abstract. The electrophysical properties of well – known semiconductor electrical materials, such as gallium arsenide GaAs, germanium Ge, indium antimonide InSb, Silicon Si, were analyzed in order to identify advantages for creating magnetic field sensors-Hall sensors. The analysis is based on the physics of the Hall effect and mathematical analysis that determines the magnitude of the Hall effect in a particular material. The characteristics of Hall sensors based on various materials are presented, conclusions are drawn about the advantages of a particular material in certain conditions and the prospects of the materials under consideration.

Keywords: semiconductors; magnetic fields; Hall sensors.

Вступ. Основними вимогами до будь-яких датчиків фізичних параметрів є їх висока чутливість до вимірюваного параметру, стабільність, мінімальна залежність від інших (сторонніх) фізичних впливів [1–4]. Орієнтуючись на ці вимоги, і підбирають відповідний матеріал і конструкцію для створення вимірювального перетворювача – датчика.

Що стосується датчиків Холла, які використовуються для вимірювання величин магнітних полів в широкому діапазоні температур, для створення різних електровимірювальних приладів, вбудованих перемикачів в сучасній електроніці, лічильників та ін., то тут основними вимогами є висока чутливість відповідно до впливу магнітних полів, слабка залежність параметрів датчика від температури і, в ряді умов застосування, важлива мініатюризація габаритних розмірів, як самого датчика, так і мікромініатюризація розмірів робочої області чутливого елемента датчика Холла [5, 6].

Постановка завдання. Як дещо уже вище відмічено, основними характеристиками датчиків Холла є чутливість, температурна залежність чутливості і вхідного електричного опору, лінійність залежності вихідного сигналу від величини магнітного поля, розміри робочої зони чутливого елемента і габаритні розміри датчика.

Для того щоб максимально оптимізувати характеристики датчиків для роботи в тих чи інших умовах, необхідно проводити аналіз фізичних властивостей існуючих та

нових електротехнічних матеріалів, порівнювати їх та визначати матеріали які дадуть змогу максимально наблизитись до виконання поставлених задач та умов.

Виходячи з того, що враховуючі загальні властивості відомих матеріалів для створення датчиків Холла на теперішній час найбільш підходять і використовуються такі матеріали як арсенід галію GaAs, германій Ge, антимонід індію InSb та кремній Si [3, 7–11] то і порівняльний аналіз доцільно зробити саме вказаних матеріалів.

Результати досліджень. В основі роботи датчика Холла, як відомо лежить фізичний ефект – ефект Холла, який полягає в появі електричної напруги (електрорушійної сили (ЕРС) Холла) в напрямку перпендикулярному напрямку протікання струму в зразку відповідного матеріалу, поміщеного в магнітне поле (рис. 1).

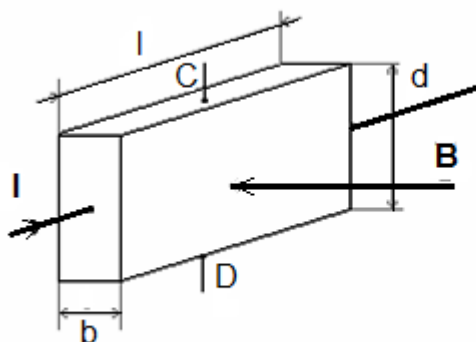


Рис. 1. Ефект Холла в зразку (пластинці), в якій протікає електричний струм I і яка розміщена в магнітному полі B

Якщо уздовж зразка пропустити електричний струм I , а перпендикулярно площині пластинки (зразка) створити магнітне поле B , то на бічних площинах пластинки в напрямку CD виникне електричне поле, яке називають полем Холла. На практиці, як правило, поле Холла характеризують різницею потенціалів, яку вимірюють між симетричними точками C і D на бічній поверхні зразка. Ця різниця потенціалів називається холловською різницею потенціалів $U_{хол}$ або ЕРС Холла $\epsilon_{хол}$.

У класичній теорії провідності [1–3, 8] ефект Холла пояснюється тим, що в магнітному полі на рухомі електричні заряди діє сила Лоренца, величина і напрямок якої визначаються векторним рівнянням:

$$F = e [VB], \quad (1)$$

де B – вектор індукції магнітного поля;
 V – вектор швидкості руху зарядів;
 e – заряд носіїв струму з урахуванням знака.

У нашому випадку V перпендикулярно B і електричне поле Холла визначається:

$$E_{хол} = VB. \quad (2)$$

Поле пов'язане с ЕРС Холла $\epsilon_{хол}$, або холловської різницею потенціалів $U_{хол}$ наступним чином:

$$\epsilon_{хол} \approx U_{хол} = E_{хол} d = VBd. \quad (3)$$

Сила струму, який протікає через одиницю площі поперечного перерізу зразка, дорівнює густині струму

$$J = enV, \quad (4)$$

де n – кількість носіїв струму в одиниці об'єму зразка (концентрація носіїв струму).

Звідси сила струму:

$$I = Jbd = enVbd. \quad (5)$$

Що дає можливість записати:

$$V = I / enbd, \quad (6)$$

$$\varepsilon_{хол} = IB / enb. \quad (7)$$

Таким чином, ЕРС Холла (або $U_{хол}$) пропорційна силі струму, індукції магнітного поля, і обернено пропорційна товщині зразка і концентрації носіїв струму в ньому.

Часто записують:

$$\varepsilon_{хол} = R \cdot IB / b, \quad (8)$$

де коефіцієнт $R = I/ne$ – постійна Холла, яка, наприклад, для напівпровідників має величину від 10 до 10^5 см³/Кл.

Однією з основних характеристик датчика Холла є чутливість:

$$\gamma = \Delta U_{хол} / \Delta B.$$

Чутливість датчика Холла, зазначену в його паспортних даних, використовують при визначенні величини індукції вимірюваного магнітного поля:

$$B = U_{хол} / \gamma.$$

Як можна побачити з аналізу ефекту Холла і наведених вище формул чутливості датчика Холла можна домогтися більш високою, якщо використовувати матеріал з більш високою швидкістю руху V (рухливостю) носіїв струму. Слід мати на увазі, що на практиці на величину чутливості можуть впливати і розміри самого елемента Холла, його конструкція та ін.

Для виготовлення датчиків Холла найчастіше використовують напівпровідники антимонід індію InSb, арсенід галію GaAs, германій Ge, кремній Si [3, 7–11]. Використання напівпровідників, а не металів обумовлено тим, що завдяки високій рухливості носіїв струму вони мають набагато більшу чутливість до впливу магнітного поля.

Чутливий елемент датчика Холла може виготовлятися як з об'ємного матеріалу, так і на основі напівпровідникових плівок на ізолюючих підкладках. Завдяки розвитку матеріалознавства і напівпровідникових технологій, технологій мікроелектроніки та методів отримання досконалих тонких напівпровідникових плівок на ізолюючих підкладках, на теперішній час основним способом виготовлення датчиків Холла є планарна мікроелектронна технологія. Сучасні технології мікроелектроніки дозволяють отримувати як мікромініатюрні розміри чутливої області датчика Холла – на рівні десятків мікрометрів, так і загальні розміри перетворювача на рівні міліметрів.

Наведемо і розглянемо основні електрофізичні характеристики вищевказаних напівпровідникових електротехнічних матеріалів (табл. 1). Наведені параметри взято з [7–9], або розраховано на основі відомих даних.

Як видно з наведених електрофізичних параметрів найбільшою рухливістю носіїв володіє InSb і висока чутливість датчиків Холла на його основі підтверджується

результатами розробки і дослідження характеристик датчиків [10, 11]. Наприклад, показано, що магнітна чутливість при номінальному струмі живлення складає 8 ± 2 мкВ/Гс для GaAs і 25 ± 3 мкВ/Гс для InSb [11]. У той же час потрібно відзначити, що при цьому в таких датчиках використовуються більш високі струми живлення, ніж, наприклад, в датчиках на основі GaAs. І якраз висока рухливість носіїв струму дозволяє отримати більш високі струми живлення і більш високу чутливість. У датчиках на основі GaAs можна отримати досить високу чутливість при значно менших струмах живлення. Така можливість пов'язана з технологічними особливостями отримання структур для виготовлення датчиків і можливістю отримання більш тонких плівок арсеніду галію з прийнятними характеристиками для застосування при виготовленні датчиків. Крім того при розробці датчиків для широкого діапазону температур важливу роль відіграє ширина забороненої зони напівпровідника. Враховуючі цей параметр можна стверджувати, що, наприклад, датчики на основі GaAs будуть працювати до значно вищих температур чим датчики на основі InSb.

Таблиця 1

**Основні електрофізичні властивості напівпровідникових матеріалів
Ge, Si, GaAs, InSb**

<i>Властивості</i>	<i>Ge</i>	<i>Si</i>	<i>GaAs</i>	<i>InSb</i>
Температура плавлення, °С	936	1414	1238	525
Власний питомий опір при температурі 20°С, Ом·м	0,47	$2 \cdot 10^3$	$0,7 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^{-5}$
Власна концентрація носіїв струму, м ⁻³	$2,5 \cdot 10^{19}$	10^{16}	$1,1 \cdot 10^{13}$	$2 \cdot 10^{22}$
Ширина забороненої зони, еВ при 300 К	0,665	1,12	1,424	0,17
Рухливість електронів при 300К, м ² /(В·с)	0,39	0,14	0,85	7,7
Рухливість дірок при 300К, м ² /(В·с)	0,19	0,05	0,04	0,08

Слід зазначити, що крім чутливості важливим параметром є і температурна її залежність і температурна залежність електричного опору датчика. Мінімізація температурних залежностей здійснюється підбором рівнів легування напівпровідникових матеріалів.

Датчики на основі Si і Ge як правило використовують в пристроях і вимірювальних системах, де не так важлива висока чутливість, а важливіше технологічність виготовлення, вартість та ін.

Висновки. На основі аналізу фізичних процесів при виникненні ефекту Холла в електротехнічних матеріалах, аналізу електрофізичних властивостей застосовуваних матеріалів показано, що для виготовлення датчиків Холла і досягнення їх максимальної чутливості найбільш підходить антимонід індію InSb. Для інших цілей, наприклад використання у широкому діапазоні температур, деякими перевагами володіють арсенід галію GaAs та кремній Si.

Список використаної літератури

1. Большакова І. А., Гладун М. Р., Голяка Р. Л. та ін. Мікроелектронні сенсорні пристрої магнітного поля: монографія. За редакцією З. Ю. Готри. Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2001. 412 с.
2. Афанасьев Ю. В., Слуденцов Н. В., Щелкин А. П. Магнитометрические преобразователи, приборы, установки. Л.: Энергия. Ленинградское отделение. 1972. 272 с.
3. Хомерики О. К. Полупроводниковые преобразователи магнитного поля. М.: Энергоатомиздат. 1986. 136 с.
4. Бараночников М. Л. Микромагнитоэлектроника. М., 2001. Том 1. ДМК.
5. Беляков В. А., Горбачук Н. Т., Диденко П. И., Илясов О. В., Ламзин Е. А., Ларионов М. С., Максимов Б. П., Сычевский С. Е., Филатов О. Г., Фирсов А. А., Шатиль Н. А. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Электрофизическая аппаратура. 2005. 3(29). С. 46–54.

6. Gorbachuk N., Larionov M., Firsov A., Shatil N. Semiconductor Sensors for a Wide Temperature Range. *Sensors & Transducers Journal and Magazine*. 2014. Vol. 162, Issue 1, January 2014. P. 1–4.
7. Шалимова К. В. Физика полупроводников. 4-е изд. СПб.: Издательство "Лань", 2010. 400 с.
8. Горбачук М. Т. Електротехнічні матеріали: навчальний посібник. LAP LAMBERT Academic Publishing. 17 Meldrum Street, Beau Bassin 71504, Mauritius, 2017. 110 с.
9. Викулин И. М., Стафеев В. И. Физика полупроводниковых приборов. М.: Радио и связь, 1990. 264 с.
10. Амосков В. М., Васильев В. Н., Горбачук Н. Т. и др. Прецизионный трехкомпонентный магнитометр на генераторах э.д.с. Холла для измерения слабых магнитных полей. *Гироскопия и навигация*. 2000. № 4 (31). С. 56.
11. Желамский М. В., Сычевский С. Е., Филатов О. Г., Горбачук Н. Т. и др. Ряд прецизионных генераторов Э.Д.С. Холла. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Электрофизическая аппаратура*. 2002. 1(27). С. 9–14.