

МЕХАНІЗМИ РОЗСІЮВАННЯ НОСІЇВ ЗАРЯДУ В АНТИМОНІДІ ІНДІЮ, ЛЕГОВАНОМУ ХРОМОМ, ПРИ $T = 296 \text{ K}$

Використовуючи таблиці двопараметричних інтегралів Фермі та дослідивши явища переносу, виконано розрахунок рухливості носіїв заряду та диференціальну термо-ЕРС у кристалах антимоніду індію, легованих хромом, та проаналізовано характер домішкового розсіювання залежно від зміни вмісту домішки ($(0,1 \div 0,25)$ ат. % Cr).

Ключові слова: антимонід індію, легування, механізми розсіювання, рухливість носіїв заряду.

Вступ

Антимонід індію (InSb) — добре вивчений вузькозонний прямозонний напівпровідник типу $A^{III}B^V$ з рекордними значеннями електронної рухливості, малою ефективною електронною масою [1; 2], гігантськими значеннями g -фактора електронів провідності [3]. Унікальні властивості InSb зумовили його широке використання для виготовлення інфрачервоних фотодетекторів. Термоелектричні властивості InSb також досліджувалися [4; 5], але значущого застосування як робочий матеріал у пристроях для термоелектричного перетворення енергії InSb не знайшов, тому що його характеристики поступають параметрам таких термоелектричних матеріалів, як сполуки Bi_2Te_3 , $PbTe$ або сплави Ge-Si.

В останні роки інтерес до InSb відновився як до матеріалу, перспективного для наноелектроніки. Виявлено також лідируючу роль InSb серед сполук типу $A^{III}B^V$ при дослідженні можливості використання напівпровідникових нанодотин як робочого матеріалу в пристроях для термоелектричного перетворення енергії [6; 7].

Придатність тієї чи іншої напівпровідникової речовини для вирішення певних технічних завдань визначається головним чином властивостями носіїв струму (зокрема, їх рухливістю та ефективною масою), детальне дослідження яких є однією з найважливіших проблем фізики напівпровідників.

Одним з ефективних та найбільш поширених методів дослідження властивостей напівпровідників є вимірювання кінетичних коефіцієнтів. Цей метод дозволяє досліджувати як енергетичний спектр носіїв струму, так і їхню взаємодію з кристалічною ґраткою. Дійсно, виявилось, що, вивчаючи гальвано-термомагнітні явища, можна отримати цінні відомості про характер провідності, визначити параметри, що характеризують напівпровідниковий кристал. Так, наприклад, термомагнітний ефект Нерста — Етінгсгаузена є надзвичайно чутливим індикатором механізму розсіювання.

© Решицько Б. А., 2015

Вимірювання термо-ЕРС у сильному (неквантуючому) магнітному полі, коли вона не залежить від механізму розсіювання, дає змогу достовірно визначити ефективну масу електронів провідності.

Слід зазначити, що експериментальне вивчення кінетичних ефектів дасть важливі результати тільки тоді, коли воно ведеться в співдружності з теорією цих явищ. Тому очевидно, наскільки важливим є огляд з теорії кінетичних ефектів у напівпровідниках, у якому містилися б усі типові коефіцієнти, їх залежності від магнітного нуля, механізму розсіювання, ступеня виродження носіїв струму тощо [8].

Методика експерименту

Вивчався механізм розсіювання електронів у зразку InSb, легованому хромом, при $T = 296 \text{ K}$. Зразок був отриманий методом напрямленої кристалізації. Концентрація хрому у шихті становила 0,1 мол. %, концентрація електронів у зразку $n = 2,9 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, диференціальна термо-ЕРС $\alpha = 260 \text{ мкВ/К}$, рухливість $U_n = 59000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ (див. табл. 1).

В антимоніді індію зона провідності сферично симетрична і її мінімум розташований у центрі зони Бріллюена в точці $\mathbf{k} = 0$. Зона непараболічна, і її кривизна швидко зменшується із збільшенням енергії. Це означає, що ефективна маса збільшується із зростанням енергії.

Дослідження явищ переносу

Явища переносу, або кінетичні явища, які відбуваються внаслідок дії на носії заряду зовнішніх сил (електричне чи магнітне поля, температура тощо), дають відомості про зонну структуру напівпровідників, про характер взаємодії носіїв заряду з ґраткою, а також дозволяють визначити такі параметри, як концентрація, рухливість, ступінь виродження та ефективні маси носіїв заряду. Комплексне вимірювання кінетичних ефектів на одному й тому самому зразку за однакових умов дає змогу

Таблиця 1. Результати розрахунків кінетичних коефіцієнтів InSb(Cr) з концентрацією хрому 0,1 та 0,25 %

	$n, \text{см}^{-3}$	$U, \text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	$\alpha, \text{мкВ}/\text{К}$	$\sigma, \text{Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$	$T, \text{К}$
InSb:0,1%Cr	$2,9 \times 10^{16}$	59240	260	273	296
InSb:0,25%Cr	$2,4 \times 10^{16}$	56100	300	215	296

одержати найбільш повні та достовірні дані про досліджуваний матеріал.

При дослідженні явищ переносу в InSb:Cr експериментально вивчалися такі кінетичні ефекти:

- питома електропровідність (σ);
- ефект Холла (R_H);
- диференціальна термо-ЕРС (α).

З експериментально визначених величин σ , R_H , α визначались основні параметри InSb:Cr:

- концентрація носіїв заряду n ;
- холлівська рухливість носіїв заряду u ;
- приведений рівень Фермі μ^* ;
- ефективна маса носіїв заряду m^* .

Для дослідження σ , R_H зразки закріплювалися в спеціальному тримачі. Надійні омичні контакти на бічних гранях зразка створювалися шляхом електричної формовки вольфрамових зондів. Відстань між зондами становила не менше 1/3 довжини зразка. Вимірювання проводилось при постійному струмі в постійному магнітному і тепловому полях.

Дослідження електричних властивостей InSb:Cr в інтервалі температур 78–300 К проводилося за допомогою азотного кріостата, який давав змогу розміщувати зразки в рідкому азоті або його парах.

Блок-схему установки, яка використовувалася для дослідження кінетичних ефектів у зразках InSb:Cr, показано на рис. 1. Установка складається з кількох функціонально незалежних блоків. Це блок живлення зразка, до складу якого входить стабілізоване джерело живлення ИПС-1 (0–15 В), магазин опорів Р-33 та цифровий прилад Щ4300, призначений для контролю сили струму в зразку. Інший блок призначено для живлення обмоток електромагніту. Він складається з трифазного випрямляча, зібраного за схемою Ларіонова, магнітного пускача та комутуючого пристрою К-2, призначеного для зміни напрямку струму в обмотках магніту.

Ще один блок установки складає комутуючий пристрій К-1. Він дозволяє подавати на вимірювальний блок, яким є вольтметр Щ 1516, напругу з будь-якої пари контактів, розташованих на протилежних гранях зразка або ж на одній з граней. За допомогою К-1 можна вимірювати вольтметром ЕРС хромель-алюмелевої термопари і визначити

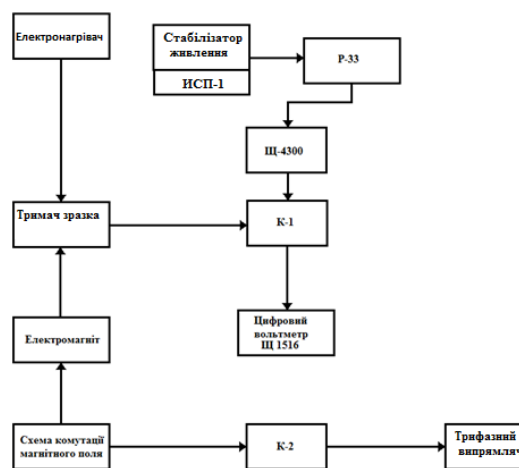


Рис. 1. Блок-схема установки для дослідження кінетичних ефектів

температуру зразка, а також міняти напрям струму у зразку.

Вимірювання термо-ЕРС

Усі існуючі на сьогодні установки, які дозволяють вимірювати термо-ЕРС напівпровідникових матеріалів, можна розподілити на кілька типів як за метою, що ставиться при створенні установки, так і за діапазоном температур, за яких проводиться вимірювання коефіцієнта термо-ЕРС. Зазвичай вони потребують складної підготовки зразка для вимірювання і значного часу для проведення експерименту. В основі конструювання інших установок лежить вимога простоти та швидкості вимірювань у порівняно широкому інтервалі температур.

Диференціальна термо-ЕРС вимірювалася за допомогою сконструйованої на кафедрі фізики установки для вимірювання термо-ЕРС (рис. 2). Зразок розміщували між двома латунними основами і фіксували пружиною, котра притискувала нижню основу.

При цьому в торці зразка впаювалися «холодні» спаї термопар мідь-константан. Для покращення теплового контакту між зразком і латунними основами використовували гліцерин. У тримачі передбачені нагрівники для створення градієнта температури в зразку, а також, у разі потреби, для випаровування азоту з кріостата. Як кріостат

Таблиця 2. Відповідні параметру розсіювання r відношення двопараметричних інтегралів Фермі, які перевіряються, та експериментальні величини цих відношень (зразки 1, 2)

r	Зразок 1 (InSb:0,1мол. %Cr)		Зразок 2 (InSb:0,25мол. %Cr)	
	відношення інтегралів, що перевіряються	експериментальні відношення величин інтегралів	відношення інтегралів, що перевіряються	експериментальні відношення величин інтегралів
0	$\frac{I_{1,2}^1}{I_{1,2}^0} = 2,0$	$\frac{I_{1,2}^1}{I_{1,2}^0} = 1,8$	$\frac{I_{1,2}^1}{I_{1,2}^0} = 2,4$	$\frac{I_{1,2}^1}{I_{1,2}^0} = 1,8$
2	$\frac{I_{3,2}^1}{I_{3,2}^0} = 2,0$	$\frac{I_{3,2}^1}{I_{3,2}^0} = 4,1$	$\frac{I_{3,2}^1}{I_{3,2}^0} = 2,4$	$\frac{I_{3,2}^1}{I_{3,2}^0} = 4,1$

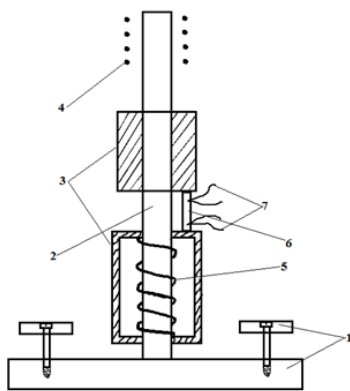


Рис. 2. Схема тримача зразків: 1 – тефлонові диски; 2 – холодопровід; 3 – латунні основи; 4 – нагрівник; 5 – пружина; 6 – зразок; 7 – термопари

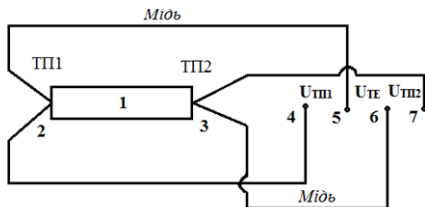


Рис. 3. Загальна схема для вимірювання температури і термо-ЕРС: 1 – зразок; 2 – перша термопара; 3 – друга термопара; 4, 5 – клеми для вимірювання $U_{ТП1}$; 6, 7 – клеми для вимірювання $U_{ТЕ}$; 8, 9 – клеми для вимірювання $U_{ТП2}$

використовували посудину Д'юара. Загальну схему вимірювання температури і термо-ЕРС показано на рис. 3.

На рис. 2 зафіксовано зразок із під'єднаннями до нього двома термопарами мідь-константан, за допомогою яких фіксувався перепад температури ΔT . Мідні провідники термопар використовували як зонд для вимірювання електрорушійної сили.

Термо-ЕРС термопар та різниця потенціалів між мідними провідниками вимірювалися цифровим вольтметром постійного струму ЦС-300.

Результати дослідження

У випадку проміжного виродження концентрація носіїв заряду в зоні провідності

$$n = \frac{(2m^*k_{\alpha}T)^{\frac{3}{2}}}{3\pi^2\hbar^3} I_{\frac{3}{2},0}^0(\mu^*, \beta), \quad (1)$$

диференціальна термо-ЕРС

$$\alpha = \frac{k}{e} \left[\frac{I_{r+1,2}^1}{I_{r+1,2}^0} - \mu^* \right], \quad (2)$$

де m^* – ефективна маса електрона в InSb, k – стала Больцмана, e – заряд електрона, $\mu^* = \frac{\mu}{kT}$ – приведений рівень Фермі, $\beta = \frac{k_0T}{\varepsilon_g}$ (ε_g – ширина забороненої зони), $I_{\frac{3}{2},0}^0(\mu^*, \beta)$, $I_{r+1,2}^1$, $I_{r+1,2}^0$ – двопараметричні інтеграли Фермі, r – параметр розсіювання [8].

Якщо носії заряду розсіюються на акустичних фонах, то $r = 0$; якщо ж на іонізованих домішках, то $r = 2$, у разі розсіювання на оптичних фонах при $T > T_{\theta}$ $r = 1/2$.

Методика ідентифікації механізму розсіювання полягала в такому. З (1) визначалася величина інтеграла $I_{\frac{3}{2},0}^0(\mu^*, \beta)$, після чого за допомогою таблиць для двопараметричних інтегралів Фермі [8] знаходили величину μ^* . Далі з формули (2) визначали відношення $\frac{I_{r+1,2}^1}{I_{r+1,2}^0}$, яке виявилось рівним 2, і перевіряли його для різних r . Як показали обчислення, для $r = 0$ вказане вище відношення узагальнених інтегралів Фермі дорівнює 1,8, тоді як для $r = 2$ це відношення дорівнює 4,1 (див. табл. 2).

Висновок

Результати розрахунків кінетичних коефіцієнтів InSb(Cr) з концентрацією хрому 0,1 та 0,25 %, виконаних у цій роботі, добре узгоджуються з наявними експериментальними даними в широких

діапазонах температур і концентрацій донорних домішок.

Отриманий результат, на перший погляд, свідчить про те, що розсіювання відбувається на акустичних коливаннях ґратки ($r = 0$). Саме такий висновок впливав з ранніх робіт з вивчення температурної залежності рухливості в n-InSb. При $T > 200$ К рухливість $U_n \sim T^{-1.6}$, що дуже близько до $U_n \sim T^{-1.5}$, як це має бути у випадку акустичного розсіювання.

Розрахунок величини рухливості для розсіювання на акустичних коливаннях дає значення $U_n = 10^7$ см²/В·с [1]. Така величезна рухливість свідчить про те, що розсіювання відбувається, головним чином, не на акустичних коливаннях. З іншого боку, розсіювання електронів у даному зразку на оптичних коливаннях ґратки разом з розсіюванням на іонізованих домішках та дірках дає цілком прийнятні величини рухливості при $T = 296$ К.

Список літератури

1. Madelung O. Group IV elements, IV-IV and III-V compounds. Part b. Electronic, transport, optical and other properties / O. Madelung, U. Rössler, M. Schulz. — Berlin : Springer, 2002. — Vol. 41A1b of Landolt-Börnstein — Group III Condensed Matter. — 347 p.
2. New semiconductor materials. Characteristics and properties [Electronic resource]. — Mode of access: URL: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/index.html>. — Title from the screen.
3. Isaacson R. A. Electron spin resonance in n-type InSb / R. A. Isaacson // Phys. Rev. — 1968. — Vol. 169. — P. 312.
4. InAs and InSb as thermoelectric materials / R. Bowers, R. W. Ure, J. E. Bauerle, A. J. Cornish // Appl. Phys. — 1959. — Vol. 30. — P. 930–935.
5. Busch G. Wärmeleitfähigkeit, elektrische Leitfähigkeit, Hall-Effekt und Thermospannung von InSb / G. Busch, E. Steigmeier // Helv. Phys. Acta. — 1961. — Bd. 34, H. 1. — S. 1–28.
6. Mingo N. Das Verhalten von Atomen im magnetischen Drehfeld / N. Mingo // Appl. Phys. Lett. — 2006. — Bd. 88, H. 149. — S. 902.
7. Mingo N. Thermoelectric figure of merit and maximum power factor in III-V semiconductor nanowires / N. Mingo // Appl. Phys. Lett. — 2004. — Vol. 84. — P. 2652.
8. Аскеров Б. М. Кинетические эффекты в полупроводниках / Б. М. Аскеров. — М. : Наука, 1970. — 303 с.
9. Хилсум К. Полупроводники типа А_{III}В_V / К. Хилсум, А. Роуз-Инс. — М. : ИЛ, 1963. — 323 с.
10. Маделунг О. Физика полупроводниковых соединений элементов III и V групп / О. Маделунг. — М. : Мир, 1967. — 477 с.

B. Reshytko

SCATTERING MECHANISMS OF CARRIERS IN INDIUM ANTIMONIDE DOPED WITH CHROMIUM AT T = 296 K

Using the table two-parameter Fermi integrals and reviewed the transport phenomena. Calculation of carrier mobility and differential thermo-EMF in crystals of indium antimonide doped with chromium and analyzed the nature of the impurity scattering, depending on changes in the content of impurities ((0,1÷0,25) atm. % Cr).

Keywords: indium antimonide, doping, scattering, charge carrier mobility.

Матеріал надійшов 13.10.2014