

МАТЕРІАЛИ ДЛЯ СЕНСОРІВ

SENSOR MATERIALS

УДК 621.315.592

ВПЛИВ ІНВЕРСІЇ ($L_1 - \Delta_1$) ТИПУ АБСОЛЮТНОГО МІНІМУМУ В $n - Ge$ НА ЕФЕКТ ЕКРАНУВАННЯ

С.В. Луньов, П.Ф. Назарчук, Л.І. Панасюк, О.В. Бурбан

Луцький національний технічний університет

(Вул. Львівська 75, Луцьк 43018, Україна; e-mail: luniovser@mail.ru)

ВПЛИВ ІНВЕРСІЇ ($L_1 - \Delta_1$) ТИПУ АБСОЛЮТНОГО МІНІМУМУ В $n - Ge$ НА ЕФЕКТ ЕКРАНУВАННЯ

С.В. Луньов, П.Ф. Назарчук, Л.І. Панасюк, О.В. Бурбан

Анотація. Обчислено радіус екранування для L_1 та Δ_1 - мінімумів зони провідності кристалів $n - Ge$ з різною концентрацією домішки. Отримано залежності екрануючого множника від концентрації домішки для відповідних мінімумів. Показано, що інверсія типу абсолютного мінімуму зони провідності $n - Ge$, яка обумовлена одновісним деформуванням ($\approx 2,8$ ГПа) вздовж кристалографічного напрямку [100], змінює як радіус екранування, так і екрануючий множник. Чутливість даних параметрів при переході від недеформованих до сильно деформованих кристалів $n - Ge$ пояснюється різним значенням ефективної маси густини станів для L_1 та Δ_1 - мінімумів.

Ключові слова: радіус екранування, екрануючий множник, одновісна деформація, ефективна маса густини станів

INFLUENCE OF INVERSION OF ABSOLUTE MINIMUM ($L_1 - \Delta_1$)-TYPE ON THE SCREENING EFFECT IN $n - Ge$

S.V. Luniov, P.F. Nazarchuk, L.I. Panasuik, O.V. Burban

Abstract. The screening radius was calculated for the L_1 - and Δ_1 - minimums of the conduction band of $n - Ge$ crystals with different impurity concentration. The dependences of screening factor on the impurity concentration were obtained for the corresponding minimums. It was shown that the absolute minimum type inversion of the $n - Ge$ conduction band, caused by uniaxial stress (≈ 2.8 GPa) along the crystallographic direction [100], changes the radius of screening as well as the screening factor. Sensitivity of the parameters to pressure under the transition from undeformed to strongly deformed $n - Ge$ crystal is explained as being caused by different effective mass values of states density for L_1 - and Δ_1 - minimums.

Keywords: screening radius, screening factor, uniaxial stress, effective mass of states density

ВЛИЯНИЕ ИНВЕРСИИ ($L_1 - \Delta_1$) ТИПА АБСОЛЮТНОГО МИНИМУМА В $n - Ge$ НА ЭФФЕКТ ЭКРАНИРОВАНИЯ

С.В. Лунёв, П.Ф. Назарчук, Л.И. Панасюк, А.В. Бурбан

Аннотация. Определён радиус экранирования для L_1 и Δ_1 - минимумов зоны проводимости кристаллов $n - Ge$ с различной концентрацией примеси. Получены зависимости экранирующего множителя от концентрации примеси для соответствующих минимумов. Показано, что инверсия типа абсолютного минимума зоны проводимости $n - Ge$, обусловленная одноосным деформированием ($\approx 2,8$ ГПа) вдоль кристаллографического направления $[100]$, меняет как радиус экранирования, так и экранирующий множитель. Чувствительность данных параметров при переходе от недеформированных до сильно деформированных кристаллов $n - Ge$ объясняется различным значением эффективной массы плотности состояний для L_1 и Δ_1 - минимумов.

Ключевые слова: радиус экранирования, экранирующий множитель, одноосная деформация, эффективная масса плотности состояний

Відомо, що взаємодія між електронами в напівпровіднику приводить до ефекту екранування неоднорідних електричних полів, що створюються як носіями заряду, так і різними дефектами в кристалі [1]. При цьому потенціальну енергію взаємодії електрона із центром розсіювання слід апроксимувати не кулонівським виразом

$-\frac{e^2}{\epsilon r}$, де ϵ - статична діелектрична стала ґратки, а виразом типу

$$V(r) = -\frac{e^2}{\epsilon r} \exp\left(-\frac{r}{R_0}\right). \quad (1)$$

тут R_0 - так званий радіус екранування, що виражається тим або іншим способом через концентрацію носіїв заряду і температуру. Наприклад [2],

$$R_0 = \left(\frac{4\pi\epsilon\epsilon_0}{e^2 g(E)} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

де $g(E)$ - повна густина станів в зоні.

У випадку виродження електронного газу, для довільного його ступеня, радіус екранування в розгорнутому записі має вигляд [3]:

$$R_0^2 = \frac{h^3 \epsilon}{16\pi^2 e^2 (m^*)^{\frac{3}{2}} (2kT)^{\frac{1}{2}} \Phi_{\frac{1}{2}}(E_F^*)}, \quad (3)$$

де m^* - ефективна маса густини станів;

$\Phi_{\frac{1}{2}}(E_F^*)$ - інтеграл Фермі індексу $-\frac{1}{2}$.

Із виразу (3) видно, що існує сильна залежність дебаївської довжини екранування від ефективної маси густини станів. Саме ця обставина змушує звернути увагу на поведінку величини радіуса екранування при реалізації інверсії типу абсолютного мінімуму в $n - Ge$, оскільки названий параметр не завжди можна вважати тривіальним:

а) ефект екранування при певних умовах визначає енергетичний спектр локальних рівнів домішки. Скінчене значення радіуса екранування обмежує, або навіть і забороняє, число дискретних рівнів [1];

б) екранування суттєво впливає на розсіювання носіїв заряду кулонівськими центрами [4];

в) процеси екранування електричного поля визначають ступінь згину енергетичних зон поблизу поверхні напівпровідника на межі контакту напівпровідника з металом, в області $p - n$ -переходів, а отже, визначають роботу МДН структур, бар'єрів Шоткі і т.д. [5];

г) енергія активації домішок залежить від умов екранування [6].

Тому вивчення ефектів екранування в недеформованих і особливо в сильно деформованих кристалах $n - Si$, коли відбувається деформаційна перебудова зонної структури даних матеріалів, є цікавим з теоретичної та актуальним з практичної точок зору. Зокрема створення кріогенних германієвих детекторів для реєстрації частинок темної матерії вимагає глибоких знань процесів електронного переносу та анізотропних характеристик в кристалах германію [7, 8]. Як показано в роботі [9], інтенсивність розсі-

юючого поля домішок стає меншою при збільшенні їх концентрації, що пов'язано з особливостями ефектів екранування носіїв заряду при наявності компенсуючих центрів з глибокими енергетичними рівнями. Використання технологій створення одновісних деформацій каналів NMOSFET електронних приладів при заміні кристалів $n-Si$ на $n-Ge$ дозволяє збільшити як коефіцієнт підсилення [10, 11], так і тунельний струм [12]. Дослідження кінетичних ефектів в сильно деформованих кристалах $n-Ge$ є актуальним також з точки зору вивчення властивостей наноструктур. В роботі [13] показано, що в наноструктурах з $n-Ge$ розмірами до 20 нм за рахунок значних внутрішніх напруг відбувається перебудова зонної структури матеріалів з домінуючими вкладками Γ_1 - та Δ_1 -мінімумів. Внаслідок цього виникає гігантське збільшення рухливості порівняно з недеформованими кристалами $n-Ge$ та $n-Si$, яке має широке практичне використання в CMOS приладах та датчиках тиску.

В роботі [14] нами був запропонований спосіб визначення компонент тензора ефективної маси носіїв заряду для Δ_1 -мінімуму в $n-Ge$ на основі вимірювань при $T = 4,2$ K одного тільки ефекту поздовжнього п'єзоопору. За знайденими їх величинами m_{\parallel}^{Δ} та m_{\perp}^{Δ} для $n-Ge$ з концентрацією домішки Sb $n = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ легко отримується значення ефективної густини станів N_C цього мінімуму, що стає "робочим" в зоні провідності при сильних одновісних деформаціях:

$$N_C = 2 \left(\frac{2\pi m^* kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (4)$$

$$m^* = N^{\frac{2}{3}} (m_{\parallel} \cdot m_{\perp}^2)^{\frac{1}{3}},$$

де N - число еквівалентних долин: для L - мінімуму $N = 4$, для Δ_1 - мінімуму $N = 2$. Знаючи N_C із співвідношення [1]

$$n = \frac{2N_C}{\sqrt{\pi}} \Phi_{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

легко знаходиться інтеграл Фермі індексу

$$\Phi_{\frac{1}{2}} = \int_0^{\infty} \frac{x^{\frac{1}{2}} dx}{e^{x-E_F^*} + 1}, \quad (6)$$

$$\text{де } x = \frac{E}{kT}, \quad E_F^* = \frac{E_F}{kT}$$

- зведений значення енергії Фермі.

Отримане із (6) значення енергії Фермі E_F^* , дозволяє визначити інтеграл Фермі

$$\text{індексу } -\frac{1}{2}$$

$$\Phi_{\frac{1}{2}} = \int_0^{\infty} \frac{x^{\frac{1}{2}} dx}{e^{x-E_F^*} + 1}, \quad (7)$$

а, отже і радіус екранування (3).

Для досліджуваного матеріалу в інвертованому стані радіус екранування, наприклад, для концентрації домішки $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ виявився рівним $R_0 = 1.41 \cdot 10^{-7} \text{ см}$, що приблизно на 20 % менше, ніж до зміни головного енергетичного мінімуму зони провідності. Цю обставину потрібно враховувати при розгляді актів розсіяння носіїв заряду в сильно легованому матеріалі, оскільки завдяки (1) вона вносить значний вклад в залежність $\tau = f(E)$. Визначальна роль цієї залежності в процесах розсіяння вимагає відомостей про положення рівня фермі E_F . Отримані раніше значення компонент тензора ефективних мас дозволяють визначити енергетичні положення рівня Фермі відносно дна відповідного мінімуму. Ці дані для різних значень концентрації домішки при $T = 4,2$ K приведені в табл.1.

Поряд з таким важливим параметром, як радіус екранування, важливо мати відомості про екрануючий множник [15], який також враховує екранування іонізованих домішок носіями заряду.

Час релаксації при розсіянні електронів на іонізованих домішках визначається за формулою Дінгла [15]:

$$\tau_i = \frac{\varepsilon^2 m_0^2 g^2}{2\pi e^4} \cdot \frac{1}{g(b)}, \quad (8)$$

$$\text{де } g(b) = \ln(1+b) - \frac{b}{1+b}$$

- екрануючий множник;

$$b = \frac{8m^* \bar{E}}{\hbar^2} R_0^2; \quad g = \sqrt{\frac{2\bar{E}}{m_i^*}}; \quad m_0 -$$

маса вільного електрона; n - концентрація іонізованих домішок;

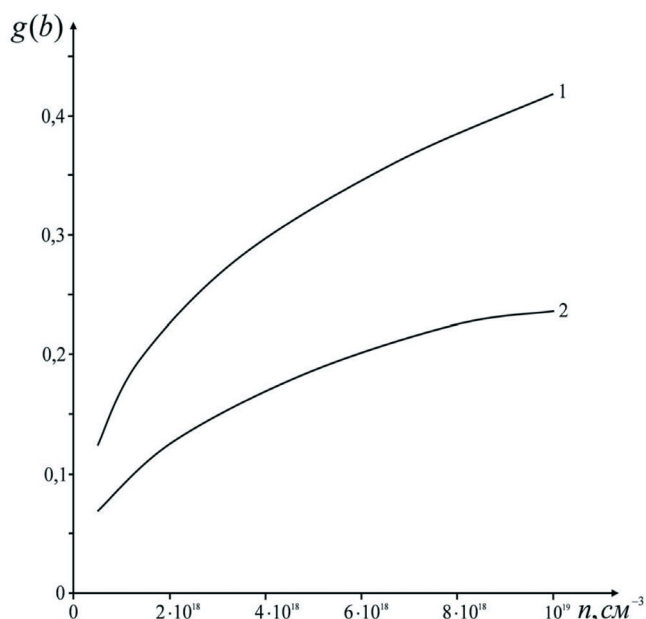


Рис.1. Розраховані залежність екрануючого множника від концентрації домішки:
1 – L_1 – мінімум; 2 – Δ_1 – мінімум.

$$\bar{E} = kT \frac{\Phi_{\frac{3}{2}}(E_F^*)}{\Phi_{\frac{1}{2}}(E_F^*)} - \text{середня енергія електронів;}$$

m_i^* – ефективна маса електрона відповідного мінімуму (для L_1 – мінімуму $m_{L_1}^* = 0,55m_0$).

Оскільки інверсія типу абсолютного мінімуму в $n-Ge$ реалізується, коли $X // J // [100]$, то тензор рухливості носіїв заряду буде визначати лише одна компонента $\mu_{||}$, якій відповідає поздовжня складова ефективної маси $m_{||}$. Тому для Δ_1 – мінімуму у формулі для розрахунку середньої швидкості \mathcal{Q} руху електрона необхідно врахувати, що $m_{\Delta_1}^* = m_{||}$. Це дає можливість за табличними даним для радіуса екранування знайти залежність екрануючого множника від концентрації домішки для L_1 та Δ_1 – мінімумів зони провідності $n-Ge < Sb >$ (рис. 1), а також оцінити рухливість електронів

$$\mu_i = \frac{e}{m_i^*} \tau_i \text{ для } L_1 \text{ та } \Delta_1 - \text{мінімумів зони}$$

провідності $n-Ge$.

Враховуючи експериментальні значення поздовжнього p -зопору кристалів $n-Ge$ з концентрацією домішки $Sb 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, коли $X // J // [100]$, було одержано відповідні залежність рухливості електронів від одновісної деформації (рис. 2). При деформації $n-Ge$ вздовж кристалографічного

напрямку $[100]$ чотири L_1 -долини будуть зміщуватись вгору, а дві Δ_1 -долини вниз за шкалою енергій. Рухливість носіїв заряду в недеформованих, так і одновісно деформованих кристалах $n-Ge < Sb >$ до тисків $X < 1,6 \text{ ГПа}$, як видно з рис. 2, визначається лише параметрами L_1 -мінімумів, а при $X > 2,8 \text{ ГПа}$ – Δ_1 -мінімумів. Отримані експериментальні значення рухливості носіїв заряду для L_1 та Δ_1 -мінімумів добре узгоджуються з їх теоретичними значеннями для даної концентрації домішки Sb

$$Sb \left(\mu_{L_1} = 760 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}, \mu_{\Delta_1} = 195 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}} \right).$$

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження дозволяють сформулювати наступні висновки:

1. Показано, що такий важливий параметр в напівпровідникових матеріалах, як радіус екранування, зазнає змін в результаті інверсії абсолютного мінімуму зони провідності $n-Ge$, обумовленої одновісним деформуванням ($\approx 2,8 \text{ ГПа}$) вздовж кристалографічного напрямку $[100]$, що пояснюється різними значеннями ефективної маси густини станів для L_1 та Δ_1 -мінімумів в $n-Ge$.

2. Різні залежності екрануючого множника від концентрації домішки для L_1 та Δ_1 -мінімумів зони провідності $n-Ge$ вказують на різний характер екранування і відповідно розсіяння електронів для різних типів мінімумів.

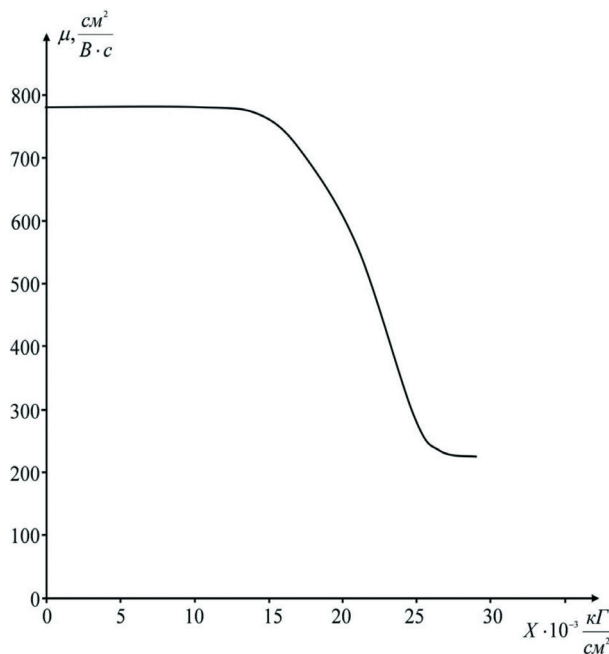


Рис.2. Залежність рухливості носіїв заряду від одновісної деформації $X // J // [100]$ для кристалів $n-Ge$ з концентрацією домішки $Sb 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при $T = 4,2 \text{ К}$.

Табл. 1

Значення радіуса екранування та енергії Фермі при $T = 4,2$ К для L_1 та Δ_1 - мінімумів $n - Ge$.

$n, \text{см}^{-3}$	$R^{\Delta_1} \cdot 10^7, \text{см}$	$R^{L_1} \cdot 10^7, \text{см}$	$E_F^{\Delta_1}, \text{meV}$	$E_F^{L_1}, \text{meV}$
$5 \cdot 10^{17}$	1,78	2,22	2,6	4,1
$8 \cdot 10^{17}$	1,63	2,05	3,6	5,7
10^{18}	1,57	1,98	4,2	6,6
$2 \cdot 10^{18}$	1,41	1,76	6,6	10,5
$4 \cdot 10^{18}$	1,25	1,57	10,5	16,6
$6 \cdot 10^{18}$	1,16	1,46	13,8	21,8
$8 \cdot 10^{18}$	1,11	1,4	16,7	26,4
10^{19}	1,05	1,35	19,3	30,7

3. Значна зміна рухливості кристалів $n - Ge$ в умовах інверсії типу абсолютного мінімуму порівняно з Смітовським перерозподілом носіїв заряду між долинами може бути використана для конструювання різного роду електронних приладів та датчиків.

Література

- Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Фізика напівпровідників. – М.: Наука, 1977. – 688 с.
- Чуйко Г.П., Концентрационная зависимость дебаевской длины экранирования в сильно вырожденном Cd_3As_2 . Теория и опыт // ФТП. – 1985. – Т.19, №11. – С. 2075-2077.
- Фистуль В.И. Сильно легированные полупроводники. – М.: Наука, 1967. – 416с.
- Григорьев В.К., Казанцев О.И., Мурыгин В.И., Рубин В.С., Стафеев В.И., Длина экранирования статического поля в компенсированных полупроводниках и ее влияние на подвижность // ФТП. – 1969. – Т.3, №12. – С. 1861-1864.
- Пенин Н.А., О длине экранирования в примесном полупроводнике // ФТП. – 1983. – Т.17, №3. – С. 431-436.
- Буджак Я.С., Екранування домішкових атомів носіями струму та його вплив на властивості кристалів // Фізика і хімія твердого тіла. – 2004. – Т.5, №1. – С. 77 – 80.
- Leman S. W., Hertel S. A., Kim P., Cabrera B., Do Couto E Silva E., Figueroa-Feliciano E., McCarthy K. A., Resch R., Sadoulet B. and Sundqvist K. M., Comparison of CDMS [100] and [111] Oriented Germanium Detectors // Journal of Low Temperature Physics, - 2012. – Volume 166, DOI: 10.1007/s10909-011-0427-0.
- Phipps A., Sundqvist K. M., Lam A. and Sadoulet B., Optically Induced Measurement of Electron and Hole Drift Velocities in a Germanium [100] CDMS Detector at 50 mK // Journal of Low Temperature Physics. – 2011. – Volume 165, DOI: 10.1007/s10909-012-0472-3.
- Broniatowski A., Carrier Anisotropy and Impurity Scattering in Ge at mK Temperatures: Modeling and Comparison to Experiment // Journal of Low Temperature Physics. – 2012.- Volume 166, DOI: 10.1007/s10909-012-0543-5.
- Kobayashi M., Irisawa T., Magyari-Kope B., Saraswat K., Wong H.-S.P., Nishi Y. Uniaxial Stress Engineering for High-Performance Ge NMOSFETs. - Electron Devices. -2010, Volume 57, Issue 5, p. 1037 – 1046.
- Kobayashi M., Irisawa T., Kope B.M., Yun Sun, Saraswat K., Wong H. -S.P., Pianetta, P., Nishi Y. High quality GeO_2/Ge interface formed by SPA radical oxidation and uniaxial stress engineering for high performance Ge NMOSFETs.- VLSI Technology, 16-18 June 2009, p. 76 - 77
- Choi Youn Sung, Lim Ji-Song, Numata Toshinori, Nishida Toshikazu, Thompson Scott E., Mechanical stress altered electron gate tunneling current and extraction of conduction band deformation potentials for germanium // Journal of Applied Physics. – 2007. – Volume 102, Issue 10, p. 104507 - 104507-5.
- Murphy-Armando F. and Fahy S., Giant enhancement of n-type carrier mobility in highly strained germanium nanostructures // Journal of Applied Physics. – 2011. – Volume 109, Issue 11, p. 113703 – 113703-5.
- Луньов С.В., Назарчук П.Ф., Панасюк Л.І. Про параметри мінімумів в $n-Ge$ // Тези доповідей V Української наукової конференції з фізики напівпровідників. УАКФН5. Ужгород. – 2011. – С. 249.
- Журкин Б.Г., Земсков В.С., Юркина К.В., Холловская подвижность электронов в сильно легированном германии n -типа // ФТП. – 1961. – Т.3, №11. – С. 3509 -3513.