

МАТЕРІАЛИ ДЛЯ СЕНСОРІВ

SENSOR MATERIALS

УДК 621.315.592

ТЕНЗОЧУТЛИВІСТЬ В Δ_1 – МОДЕЛІ ЗОНИ ПРОВІДНОСТІ КРИСТАЛІВ ГЕРМАНІЮ

С. В. Луньов

*Луцький національний технічний університет
(Вул. Львівська 75, м. Луцьк, 43018, Україна; e-mail: luniovser@mail.ru)*

ТЕНЗОЧУТЛИВІСТЬ В Δ_1 – МОДЕЛІ ЗОНИ ПРОВІДНОСТІ КРИСТАЛІВ ГЕРМАНІЮ

С. В. Луньов

Анотація. На основі теорії анізотропного розсіяння проведено розрахунки рухливості електронів та коефіцієнта тензочутливості для різної структури Δ_1 – зони провідності кристалів германію, утвореної сильним одновісним або гідростатичним тиском. Показано, що для різної концентрації домішки максимальний ефект п'єзоопору та відповідне значення коефіцієнта тензочутливості можна отримати при інверсії типу ($L_1 - \Delta_1$) абсолютного мінімуму, яка обумовлена одновісним тиском кристалів *n-Ge* вздовж кристалографічного напрямку [100].

Ключові слова: анізотропне розсіяння, коефіцієнт тензочутливості, ефективна маса, константи деформаційного потенціалу

TENSOSENSITIVITY IN Δ_1 – MODEL OF THE CONDUCTION BAND GERMANIUM CRYSTALS

S. V. Luniov

Abstract. The calculations of the electrons mobility and tensorsensitivity coefficient for various structure of Δ_1 – conduction band of the germanium crystal were carried out within anisotropic scattering theory. The conduction band was generated under the intense uniaxial or hydrostatic pressure. It was shown that one can obtain the maximum piezoresistance effect and the corresponding value of tensorsensitivity coefficient for the various impurity density under the inversion of bare minimum ($L_1 - \Delta_1$) – type. The inversion was caused by uniaxial pressure of *n-Ge* crystals along the crystallographic direction [100].

Keywords: anisotropic scattering, coefficient of tensorsensitivity, effective mass, deformation potential constants

ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ В Δ_1 – МОДЕЛИ ЗОНЫ ПРОВОДИМОСТИ КРИСТАЛЛОВ ГЕРМАНИЯ

С. В. Лунёв

Аннотация. На основе теории анизотропного рассеяния проведены расчеты подвижности электронов и коэффициента тензочувствительности для различной структуры Δ_1 – зоны проводимости кристаллов германия, созданной сильным одноосевым или гидростатическим давлением. Показано, что для разной концентрации примеси максимальный эффект пьезосопротивления и соответствующее значение коэффициента тензочувствительности можно получить при инверсии типа ($L_1 - \Delta_1$) абсолютного минимума, которая обусловлена одноосевым давлением кристаллов *n-Ge* вдоль кристаллографического направления [100].

Ключевые слова: анизотропное рассеяния, коэффициент тензочувствительности, эффективная масса, константы деформационного потенциала

Науково – технічний прогрес автоматичної та сенсорної техніки вимагає широкого впровадження автоматизованих систем управління та контролю різноманітних технологічних і фізичних процесів. Це в свою чергу висуває нові вимоги до датчиків тиску як первинних засобів отримання інформації [1]. Датчики тиску широко використовуються у машинобудуванні, транспорті, авіакосмічній промисловості, енергетиці, наукових дослідженнях та ін. Надзвичайно важливою особливістю застосування датчиків тиску у цих галузях є жорсткі умови експлуатації: широка амплітуда тисків від 10^{-8} Па до тисяч МПа; робочий діапазон температур – від криогенних до сотень градусів, значні вібрації а також стійкість до агресивного середовища [2, 3].

Такий напівпровідниковий матеріал, як германій, незважаючи на досить широке практичне використання та всебічну вивченість його властивостей, і надалі залишається в багатьох випадках перспективним матеріалом для створення різного роду приладів та сенсорів сучасної мікро та наноелектроніки [4-8]. Зона структура германію має багатодолинний характер [9]. Найнижчими (основними мінімуми) за шкалою енергій в *n-Ge* є 4 мінімуми із симетрією L_1 , які беруть участь при малих збуреннях в різних кінетичних та оптичних ефектах та визначають роботу багатьох електронних приладів, в яких використовується германій. Тому параметри даних мінімумів на сьогодні є достатньо добре вивченими. Вище

за шкалою енергій на 0,14 eV знаходиться один мінімум із симетрією Γ_2 і на 0,18 eV шість мінімумів із симетрією Δ_1 . Найвищий мінімум (Γ_{15}) знаходиться на відстані приблизно 2,5 eV. Значна віддаленість даних мінімумів від основних як за енергією, так і за квазіімпульсом не сприяла дослідженням їх впливу при малих фізичних збуреннях на властивості матеріалу. Але в екстремальних умовах дії значних електричних, деформаційних, оптичних та температурних полів дані мінімуми можуть вносити суттєвий вклад, а то й визначальний у відповідні ефекти. А це в свою чергу відкриває перспективи створення на основі германію різних електронних приладів та датчиків, які можуть працювати в таких полях. Наприклад, при гідростатичному тиску порядку 6 ГПа [10] або одноосієних тисках $X \approx 2,8$ ГПа, коли $X // J // [100]$, та $X \approx 8$ ГПа, коли $X // J // [110]$ [11], в кристалах *n-Ge* можна реалізувати інверсію типу ($L_1 - \Delta_1$) абсолютного мінімуму. При цьому для випадку гідростатичного тиску отримується шестиеліпсоїдна Δ_1 -модель зони провідності кристалів *n-Ge*, а при одноосієному тиску – двохеліпсоїдна або чотирьохеліпсоїдна.

Як показують експериментальні та теоретичні розрахунки для широкого температурного інтервалу, ефект п'єзоопору в *n-Ge*, який пов'язаний з деформаційним перерозподілом носіїв заряду між мінімумами одного типу (ефект п'єзоопору Смита – Херрінга), буде вже відсутнім при одноосієних тисках $X > 1,5$ ГПа

[12]. Тому тензодатчики на основі кристалів *n-Ge* не можна буде використати для контролю вимірювання тиску при вказаних одновісних деформаціях. Але при одновісних тисках $X // J // [100]$, коли $X > 1,8$ ГПа, та $X // J // [110]$, коли $X > 6$ ГПа, або гідростатичному тискові $X > 4$ ГПа виникає гігантський п'єзоопір, який пов'язаний з радикальною перебудовою зонної структури кристалів германію, а саме деформаційним перерозподілом носіїв заряду між мінімумами типу L_1 та Δ_1 [11]. А це дає можливість отримати значну тензочутливість кристалів *n-Ge* при таких високих тисках.

Тому, враховуючи вище сказане, на основі теорії анізотропного розсіяння [13] з врахуванням знайдених нами раніше компонент тензора ефективної маси [14] та констант деформаційного потенціалу [11] для Δ_1 – мінімуму проводились розрахунки коефіцієнта тензочутливості *n-Ge* для різної концентрації домішки при температурі рідкого азоту. При цьому розглядався випадком невідродженого електронного газу і розсіяння електронів на акустичних фононах та іонах домішки.

Коефіцієнт тензочутливості за деформацією X [15]:

$$S = \frac{\Delta\rho/\rho_0}{\Delta l/l_0} = \frac{\left(\frac{\rho_X}{\rho_0} - 1\right) \cdot E_{ю}}{X}, \quad (1)$$

де $E_{ю}$ - модуль Юнга, ρ_X - питомий опір деформованого зразка, а ρ_0 - недеформованого. В умовах повної іонізації домішкових рівнів при інверсії типу ($L_1 - \Delta_1$) абсолютного мінімуму

$$\frac{\rho_X}{\rho_0} = \frac{\mu^L}{\mu^\Delta} \quad (2)$$

Ізоенергетичні поверхні як для L_1 , так і для Δ_1 – мінімумів є еліпсоїдами обертання. Рухливість носіїв заряду для довільного напрямку можна знайти із співвідношення [13]:

$$\mu = \mu_\perp \sin^2 \theta + \mu_\parallel \cos^2 \theta, \quad (3)$$

де θ - кут між розглядуваним напрямком і головною віссю еліпсоїда; μ_\perp і μ_\parallel - рухливість носіїв заряду поперек і вздовж осі еліпсоїда.

Тоді, згідно з (3), для L_1 – мінімуму

$$\mu^L = \frac{1}{3} \mu_\perp^L + \frac{2}{3} \mu_\parallel^L. \quad (4)$$

Для Δ_1 - мінімуму

$$\mu^\Delta = \mu_\parallel^\Delta, \quad (5)$$

коли $X // J // [100]$, і

$$\mu^\Delta = \frac{1}{2} \mu_\perp^\Delta + \frac{1}{2} \mu_\parallel^\Delta, \quad (6)$$

коли $X // J // [110]$.

Для випадку гідростатичного тиску

$$\mu^\Delta = \frac{1}{3} \mu_\perp^\Delta + \frac{2}{3} \mu_\parallel^\Delta \quad (7)$$

З іншої сторони компоненти тензорів рухливості можна виразити через компоненти тензорів часів релаксації і ефективної маси для відповідних мінімумів:

$$\mu_\parallel^{L,\Delta} = \frac{e}{m_\parallel^{L,\Delta}} \langle \tau_\parallel^{L,\Delta} \rangle, \quad (8)$$

На основі теорії анізотропного розсіяння на акустичних фононах та іонах домішки [13]:

$$\tau_\parallel = \frac{a_\parallel}{\sqrt{k_B T^{\frac{3}{2}}}} \cdot \frac{x^{\frac{3}{2}}}{x^2 + b_0}, \quad \tau_\perp = \frac{a_\perp}{\sqrt{k_B T^{\frac{3}{2}}}} \cdot \frac{x^{\frac{3}{2}}}{x^2 + b_1}. \quad (9)$$

$$\text{Тут } a_\parallel = \frac{\pi C_{11} \hbar^4}{k \Xi_d^2 \sqrt{2 m_\parallel m_\perp}} \cdot \frac{1}{\Phi_{0a}}, \quad a_\perp = \frac{\pi C_{11} \hbar^4}{k \Xi_d^2 \sqrt{2 m_\parallel m_\perp}} \cdot \frac{1}{\Phi_{1a}}, \quad (10)$$

$$b_0 = \frac{a_\parallel \cdot \Phi_{0i}}{\sqrt{k T^{\frac{3}{2}} \tau_{0i}(kT)}}, \quad b_1 = \frac{a_\perp \cdot \Phi_{1i}}{\sqrt{k T^{\frac{3}{2}} \tau_{0i}(kT)}}, \quad (11)$$

$$\tau_{0i}(kT) = \frac{\sqrt{2} m_\perp \varepsilon^2 (kT)^{\frac{3}{2}}}{\pi N e^4 \sqrt{m_\parallel}}, \quad (12)$$

$$\Phi_{1a} = 1 + \frac{1 + \beta^2}{\beta^2} \left(2 + \frac{3}{\beta^2} - \frac{3(1 + \beta^2)}{\beta^3} \alpha \right) \frac{\Xi_u}{\Xi_d} + \frac{(1 + \beta^2)}{\beta^4} \frac{\Xi_u^2}{\Xi_d^2} \left((1 + \beta^2) \left(1 + \frac{15}{4\beta^2} - \frac{3}{4\beta^3} (5 + 3\beta^2) \alpha \right) + \frac{C_{11}}{4C_{44}} \left(-13 - \frac{15}{\beta^2} + \frac{3(1 + \beta^2)}{\beta^3} (5 + \beta^2) \alpha \right) \right) \quad (13)$$

$$\Phi_{0a} = 1 + \frac{2(1 + \beta^2)}{\beta^2} \left(1 - \frac{3}{\beta^2} + \frac{3}{\beta^3} \alpha \right) \frac{\Xi_u}{\Xi_d} + \frac{(1 + \beta^2)}{\beta^4} \frac{\Xi_u^2}{\Xi_d^2} \left((1 + \beta^2) \left(1 - \frac{6}{\beta^2} - \frac{3}{2\beta^2(1 + \beta^2)} + \frac{15\alpha}{2\beta^3} \right) + \frac{C_{11}}{C_{44}} \left(2 + \frac{15}{2\beta^2} - \frac{3}{2\beta^3} (5 + 3\beta^2) \alpha \right) \right) \quad (14)$$

$$\Phi_{0i} = \frac{3}{2\beta^3} \left(\left(\frac{\beta}{1+\beta^2} - \alpha \right) \ln \gamma^2 - \alpha \ln(1+\beta^2) + 2L(a) + \frac{\beta\gamma^2}{2} \left(\frac{\beta^2-1}{\beta^2+1} + \frac{\alpha(\beta^2+1)}{\beta} \right) \right) \quad (15)$$

$$\Phi_{1i} = \frac{3}{4\beta^3} \left(((1-\beta^2)\alpha - \beta) \ln \gamma^2 + 2(\beta^2-1)L(a) - 2\beta^2\alpha - (\beta^2-1)\alpha \ln(1+\beta^2) + \frac{\gamma^2}{2} (\beta(1+3\beta^2) + \alpha(3\beta^4 + 2\beta^2 - 1)) \right)$$

$$\text{де } \alpha = \text{arctg } \beta, \quad \beta = \frac{m_{\parallel} - m_{\perp}}{m_{\perp}}, \quad \gamma = \sqrt{\frac{\pi \hbar^2 e^2 N}{2m_{\parallel} \varepsilon_0 k T}},$$

$L(a) = -\int_0^a \ln \cos \varphi d\varphi$ – функція Лобачевського, N – концентрація домішки.

Тоді остаточно вирази для компонент тензора часів релаксації будуть мати вигляд:

$$\langle \tau_{\parallel} \rangle = \frac{4}{3\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} dx x^2 e^{-x} \tau_{\parallel}, \quad \langle \tau_{\perp} \rangle = \frac{4}{3\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} dx x^2 e^{-x} \tau_{\perp} \quad (16)$$

Враховуючи значення констант деформаційного потенціалу та компонент тензора ефективної маси для L_i -мінімуму ($\Xi_d = -6,4$ эВ, $\Xi_u = 11,6,4$ эВ, $m_{\parallel} = 1,58m_0$, $m_{\perp} = 0,082m_0$) [9], і відповідні параметри, які були знайдені в роботах [11, 14], для Δ_i -мінімуму ($\Xi_d = -1,7$ эВ, $\Xi_u = 12$ эВ, $m_{\parallel} = 1,65$, $m_{\perp} = 0,32m_0$), можна, використовуючи вирази (1) та (4-7), з врахуванням (8-16), отримати концентраційні залежності рухливості електронів для L_i та Δ_i -мінімумів та коефіцієнта тензочутливості для різних випадків Δ_i – моделі зони провідності кристалів германію (рис. 1 та рис. 2, суцільні криві).

Проведені теоретичні розрахунки та експериментальні дослідження дозволяють сформулювати наступні висновки:

1. Розширення області гідростатичних та одновісних тисків більше, ніж 2 ГПа, при яких вже традиційний ефект п'єзоопору Сміта – Херрінга відсутній, дозволяє отримати для кристалів n -Ge значний за величиною п'єзоопір та коефіцієнт тензочутливості, який пов'язаний з радикальною перебудовою зонної структури даного матеріалу з домінуючим вкладом Δ_i – мінімуму.

2. Максимальне значення коефіцієнта тензочутливості для різної концентрації домішки можна досягнути при інверсії типу ($L_i - \Delta_i$) абсолютного мінімуму, яка обумовлена одновісним тиском кристалів n -Ge вздовж кристалографічного напрямку $[100]$. Це пояснюється тим, що такого типу інверсія призводить до суттєвого зменшення рухливості носіїв заряду, яке пов'язано, перш за все, зменшенням часу релаксації, оскільки ефективні маси для електронів різних мінімумів мало відрізняються.
3. Отриманні результати можуть бути використанні для конструювання сенсорів тиску, які працюватимуть в значних деформаційних полях.

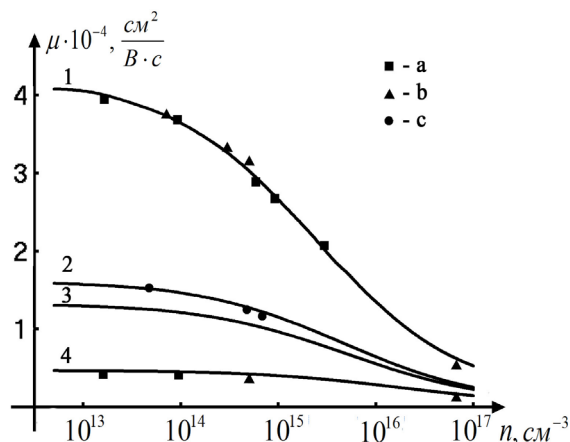


Рис. 1. Залежності рухливості електронів від концентрації домішки для L_i та Δ_i – мінімумів зони провідності кристалів n -Ge при $T=77$ K:

- 1 – для L_i -мінімуму;
 - 2 – для Δ_i -мінімуму (гідростатичний тиск);
 - 3 – для Δ_i -мінімуму (одновісний тиск $X // J // [110]$);
 - 4 – для Δ_i -мінімуму (одновісний тиск $X // J // [100]$);
- a** – експериментальні результати роботи [16];
b – наші експериментальні результати;
c – експериментальні результати роботи [10].

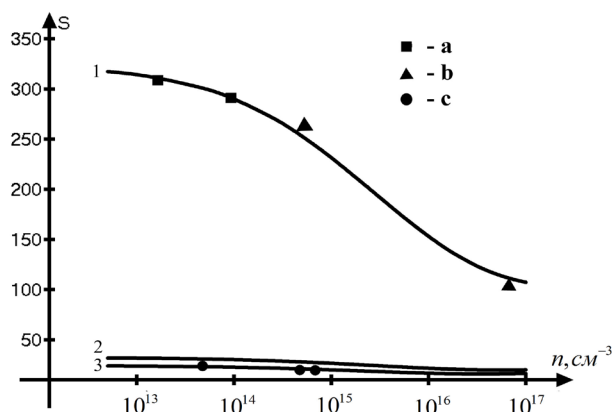


Рис. 2. Залежності коефіцієнта тензочутливості від концентрації домішки при $T=77\text{ K}$ для різної структури Δ_1 – зони провідності кристалів германію:

1 – Δ_1 – зона утворена при одновісному тиску $X//[100]$;

2 – Δ_1 – зона утворена при одновісному тиску $X//[110]$;

3 – Δ_1 – зона утворена при гідростатичному тиску;

a, b, c – експериментальні результати, які отримані, відповідно до даних рис. 1.

Література

1. Озаренко А. В. Разработка полупроводниковых тензочувствительных элементов для систем неразрушающего контроля напряженно-деформированного состояния материалов: Дис. канд. техн. наук, 05.11.13. – Тамбов, Тамбовский государственный технический университет, 2008. – 131 с.
2. Клокова Н. П. Тензорезисторы: теория, методики расчета, разработки. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
3. Кутраков О. П. Тензорезистивні датчики тиску на основі ниткоподібних кристалів кремнію для широкого діапазону температур і частот: Автореф. дис. на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук, 05.27.01 – Львів, Національний університет “Львівська політехніка”, 2012 – 23 с.
4. 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.
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.
6. 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.
7. 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.
8. Новиков А. Г., Наливайко О. Ю. Влияние ионного легирования на электрофизические свойства МОП структур с нанокристаллами германия // Матер. 9 – й Междунар. конф. “Взаимодействие излучений с твердым телом”. – Минск: Издательский центр БГУ. – 2011. – с. 259 – 260.
9. П. И. Баранский, В. П. Клочков, И. В. Потыкевич. Полупроводниковая электроника. – К.: Наукова думка, 1975. – 704 с.
10. Ahmad C., Adams A., Pitt Ahmad G. J. Temperature dependence of the electron mobility in the Δ_{1c} minima of Germanium // J. Phys. C: Sol. State Phys.- 1979, v.12, № 10.- p. 1379 -1383.
11. Луньов С. В., Назарчук П. Ф., Бурбан О. В. Деформаційні потенціали Δ_1 – мінімуму зони провідності кристалів n -Ge // Матер. 6-ої Міжнар. наук. конф. “Релаксаційні, нелінійні й

- акустооптичні процеси та матеріали РНАОПМ'2012” – Луцьк: ПФ “Сма-рагт”. – 2012. – с. 42–45.
12. Баранский П. И. Коломоец В. В., Федосов А. В. Отличительные особенности пьезосопротивления германия и кремния n – типа, обусловленные различием механизмов рассеяния электронов в этих кристаллах // ФТП. – 1981. – Т. 15, № 4. – С. 698–701.
 13. Баранский П. И., Буда И. С., Даховский И. В., Коломоец В. В. Электрические и гальваномагнитные явления в анизотропных полупроводниках. – К.: Наукова думка, 1977. – 269 с.
 14. Луньов С. В., Назарчук П. Ф., Панасюк Л. І. Про параметри Δ_1 – мінімумів в n -Ge // Тези доповідей V Української наукової конференції з фізики напівпровідників (УНКФН-5). Ужгород.– 2011. – с. 249.
 15. Савчин В. П., Шувар Р. Я. Електронне перенесення в напівпровідниках та напівпровідникових структурах. – Львів: Видавничий центр ЛНУ Імені Івана Франка, 2008. – 687 с.
 16. Баранський П. І., Федосов А. В., Гайдар Г. П. Фізичні властивості кристалів кремнію та германію в полях ефективного зовнішнього впливу. – Луцьк: Надстир'я, 2000. – 280 с.