

## ДЕФОРМАЦІЙНІ ЕФЕКТИ У НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУРАХ

*В статті розглянуто вплив деформаційних ефектів на електрофізичні параметри напівпровідників, зокрема кремнію. Показано, що при малих тисках зміна параметрів напівпровідника відбувається за рахунок зміни рухливості носіїв заряду, а при високих тисках – зміна ширини забороненої зони. Представлено розрахункові залежності рухливості носіїв заряду, концентрації основних і неосновних носіїв заряду, ширини забороненої зони від зміни тиску.*

*Ключові слова: деформаційний ефект, напівпровідникові структури, тиск, частотні перетворювачі тиску*

A.V. OSADCHUK, Y.A OSADCHUK

Vinnitsia National Technical University

## DEFORMATION EFFECTS IN SEMICONDUCTOR STRUCTURES

*Abstract - This paper deals with the influence of deformation effects on electrophysical parameters of semiconductors, including silicon. Application frequency signal as informative parameters of primary transducers including pressure transducers, accompanied by high noise immunity transfer, simplicity and a high degree of conversion to digital code, ease of switching in multi-information-measuring systems*

*Bipolar and field effect transistors act as a strain-sensing element in pressure sensors, so you need more detail to determine the dependence of electrophysical characteristics of semiconductor material of pressure because it is the foundation upon which generated strain-sensing element. Strain dependence of semiconductors serve as a foundation for further development of the mathematical model of pressure transducers with a frequency output signal, based on which we can determine the dependence of current-voltage characteristics of the active and reactive components of the impedance transducer oscillation frequency and sensitivity of the pressure equation.*

*It is shown that at low pressures, changing the electrophysical parameters of the semiconductor is due to changes in carrier mobility, and at high pressures - change the width of the gap. Formulas carrier mobility, concentration of essential and non-carriers, the band gap of the pressure changes.*

*Keywords: deformation effect semiconductor structures, pressure, frequency pressure transducers*

### Вступ

Сучасний рівень розвитку інформаційно-вимірювальної техніки характеризується різноманітністю методів перетворення первинної вимірюваної величини в електричний сигнал. Застосування частотного сигналу в якості інформативного параметру первинних вимірювальних перетворювачів, зокрема перетворювачів тиску, супроводжується високою заводостійкістю передачі, простотою та значною точністю перетворення в цифровий код, зручністю комутації в багатоканальних інформаційно-вимірювальних системах, можливістю відмовитися від застосування аналого-цифрових перетворювачів для обробки вихідного сигналу, що покращує економічні показники вимірювальних пристроїв контролю та керування [1, 2]. Перспективним напрямком вирішення задачі є розробка частотних перетворювачів на основі транзисторних структур, в яких за рахунок позитивних зворотних зв'язків виникає диференційний від'ємний опір [3].

Біполярні та польові транзистори виступають як тензочутливі елементи в перетворювачах тиску, тому необхідно більш детально визначити залежність електрофізичних характеристик напівпровідникового матеріалу від дії тиску, оскільки він є основою, на базі якої створюються тензочутливі елементи. Деформаційні залежності напівпровідників слугують фундаментом подальшої розробки математичної моделі перетворювачів тиску з частотним вихідним сигналом, на основі якої можна визначити залежності вольт-амперної характеристики, активної і реактивної складових повного опору перетворювача, частоти генерації та рівняння чутливості від тиску. Розгляду залежності основних характеристик напівпровідникового матеріалу від дії тиску присвячена дана робота.

## Фізико-математична модель деформаційного ефекту

В якості деформаційних приростів основних електрофізичних параметрів, що обумовлюють зміну параметрів та характеристик напівпровідникових структур під дією тиску, виступають зміщення енергетичних рівнів напівпровідника [4, 5], зміна ефективних мас та рухливостей носіїв струму [6–9]. Вважається, що в домішкових напівпровідниках зміна часу життя носіїв струму під дією тиску відсутня [6].

При деформуванні напівпровідника під дією тиску дно зони провідності та вершина валентної зони зміщуються з відповідним розщепленням їх країв. Таким чином, зміна положення валентної зони  $\Delta E_v$  та розщеплення її вершини під дією тиску визначається за виразом [10]:

$$\Delta E_v(P) = a\Delta \pm \sqrt{\Omega_\varepsilon}, \quad (1)$$

де

$$\Omega_\varepsilon = b^2[(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33})^2 + (\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11})^2] + d^2(\varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{13}^2 + \varepsilon_{23}^2), \quad (2)$$

$a, b, d$  – константи деформаційного потенціалу для валентної зони;  $\Delta$  – зміна об'єму напівпровідникового матеріалу при дії тиску

$$\Delta = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}, \quad (3)$$

$\varepsilon_{ij}$  – компоненти тензора деформації.

Зміна положення зони провідності у відсутність деформації зсуву та її розщеплення під дією тиску описується виразом, записаним у загальному вигляді

$$\Delta E_{ci}(P) = \Xi_d \Delta + \Xi_u \varepsilon_{ii}, \quad (4)$$

де  $\Xi_d$  та  $\Xi_u$  – константи деформаційного потенціалу для зони провідності; індекс  $i = 1, 2, 3$  (індекс  $i = 1$ , відповідає енергетичним мінімумам, розміщеним у напрямках  $\langle 100 \rangle$  та зворотному до нього, аналогічно індекс  $i = 2$  -  $\langle 010 \rangle$  та зворотному,  $i = 3$  -  $\langle 001 \rangle$  та зворотному).

При наявності деформації зсуву зміна положення зони провідності та її розщеплення під дією тиску описується загальним виразом

$$\Delta E_{ci}(P) = \Xi_d \Delta + \Xi_u \varepsilon_{ii} + \Delta E / 4 - 2|\Xi'_u \varepsilon_{ff}|, \quad (5)$$

де  $\Delta E$  – різниця енергій між тими рівнями, які є нижніми у відсутність тиску;  $\Xi'_u$  – константа деформаційного потенціалу, яка характеризує вплив зсуву;  $f \neq j \neq i$  – індекси ( $f = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3$ ).

Ефективна ширина забороненої зони в деформованому напівпровіднику  $E_g(P)$  – це відстань між розщепленими найближчими рівнями валентної зони та зони провідності, а величина її зміни під дією тиску  $\Delta E_g(P)$ , тобто деформаційний приріст визначатиметься за формулою [39]

$$\Delta E_g(P) = \Delta E_c(P) - \Delta E_v(P), \quad (6)$$

де  $\Delta E_v(P)$  – зсув того рівня валентної зони, який в результаті деформації під впливом тиску виявився верхнім;  $\Delta E_c(P)$  – зсув мінімуму зони провідності, що виявився нижнім.

При достатньо великих значеннях тиску (для кремнію  $P > 10^7$  Па) відбувається перетікання електронів тільки на нижні мінімуми зони провідності, отже ефективна маса електронів фактично залишається незмінною. Величини ефективних мас дірок при великих значеннях тиску обумовлюються тим значенням ефективної маси,

що відповідає верхній валентній зоні, при умові, що при даному значенні тиску здійснюється нерівність  $\Delta E_v \gg E(k)$ , де  $E(k)$  – енергія носіїв струму в недеформованому напівпровіднику. Так, при виконанні цієї умови для кремнію ефективні маси дірок рівні  $m_{||}/m_0 = 0,31$ ,  $m_{\perp}/m_0 = 0,21$ .

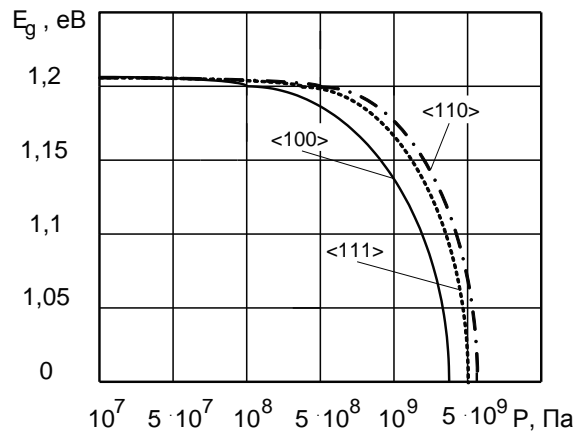


Рис.1. Залежність ширини забороненої зони від тиску

При невеликих тисках (для кремнію  $P < 10^7$  Па) в процесі провідності приймають участь всі енергетичні мінімуми та змінюється рухливість носіїв струму [6], але при достатньо великих значеннях тиску рухливість перестає змінюватися, та всі зміни характеристик напівпровідникових приладів відбуваються за рахунок суттєвої залежності концентрацій неосновних носіїв струму  $N_{неосн}(n_p, p_n)$  і власної концентрації носіїв струму  $n_i$  від тиску.

При дії тиску ширина забороненої зони змінюється на величину за формулою (6), тоді концентрація носіїв у власному напівпровіднику дорівнює [6]

$$n_i(P) = n_{i0} \exp[-\Delta E_g(P)/kT], \quad (7)$$

де  $n_{i0}$  – концентрація носіїв заряду у власному напівпровіднику в недеформованому стані.

Отже, деформаційний приріст  $\Delta n_i$  визначається за виразом

$$\Delta n_i(P) = n_{i0} (\exp[-\Delta E_g(P)/kT] - 1), \quad (8)$$

Концентрації носіїв заряду в області n-типу провідності при концентрації донорної домішки  $N_D \gg n_i$  під дією тиску дорівнюють [6]

$$n_n(P) = N_D + n_{i0}^2 / N_D \exp[-\Delta E_g(P)/kT], \quad (9)$$

$$p_n(P) = n_{i0}^2 / N_D \exp[-\Delta E_g(P)/kT]. \quad (10)$$

Оскільки у відсутність деформації  $n_n(0) = N_D + n_{i0}^2 / N_D$  та  $p_n(0) = n_{i0}^2 / N_D$ , то деформаційні прирости концентрацій  $n_n$  та  $p_n$  визначаються за загальним виразом

$$\Delta n_n(P) = \Delta p_n(P) = n_{i0}^2 / N_D (\exp[-\Delta E_g(P)/kT] - 1), \quad (11)$$

Аналогічні виразам (9), (10) можуть бути записані вирази для концентрацій носіїв заряду в області р-типу провідності, в якій концентрація акцепторної домішки  $N_A \gg n_i$ . Таким чином, концентрації носіїв заряду під дією тиску дорівнюють

$$p_p(P) = N_A + n_{i0}^2 / N_A \exp[-\Delta E_g(P) / kT], \quad (12)$$

$$n_p(P) = n_{i0}^2 / N_A \exp[-\Delta E_g(P) / kT], \quad (13)$$

Отже, деформаційні прирости концентрацій електронів  $n_p$  та дірок  $p_p$  визначаються за загальним виразом

$$\Delta p_p(P) = \Delta n_p(P) = n_{i0}^2 / N_A (\exp[-\Delta E_g(P) / kT] - 1). \quad (14)$$

На рис. 2 графічно зображені залежності концентрацій основних та неосновних носіїв струму для р- та n-областей кремнієвої біполярної транзисторної структури від тиску.

При малих тисках зміна рухливості пов'язана з п'езорезистивних ефектом, а при великих залежність більш складна. Зміну рухливості звичайно пов'язують з зміною маси відповідного носія струму [6]. Кожний еліпсоїд постійної енергії характеризується двома різними масами – вздовж вісі еліпсоїда  $m_{||}$  та перпендикулярно до неї  $m_{\perp}$ . Відповідно до цього існують різні рухливості: вздовж вісі  $\mu_{||}$  та перпендикулярно до вісі  $\mu_{\perp}$ . Перерозподіл носіїв струму між рівнями при деформації призводить до зміни вкладу цих двох компонент в загальну рухливість по відношенню до недеформованого напівпровідника.

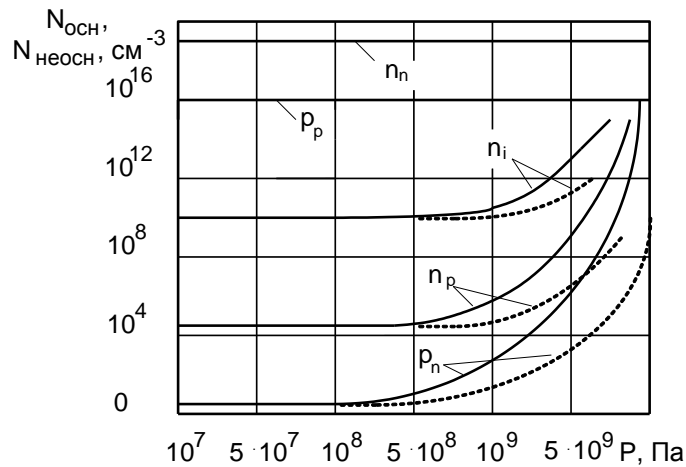


Рис. 2. Концентрації носіїв струму в залежності від тиску, який діє в напрямках ———— - <100> та ..... - <111>

Ефективна рухливість електронів дорівнює

$$\mu_n = \sum_{i=1}^N \frac{n_{pi}}{n_p} \mu_i, \quad (15)$$

де  $\mu_i$  - рухливість електрону в і-тому мінімумі вздовж напрямку струму. Величина  $\mu_i$  виражається через  $\mu_{||}$  та  $\mu_{\perp}$ .

Долини <010> та <001> мають в напрямку <100> рухливість  $\mu_{\perp}$ , а долина <100> - рухливість  $\mu_{||}$ . Отже, в недеформованому напівпровіднику (кремнії) р-типу провідності рухливість електронів вздовж кристалографічної вісі <100> дорівнює [10]

$$\mu_{n0} = \frac{1}{3} \mu_{||} + \frac{2}{3} \mu_{\perp}. \quad (16)$$

При наявності деформації напівпровідника внесок різних долин зміниться, і деформаційний приріст рухливості електронів з врахуванням проведення перетворень на основі виразів (13), (15) та (16) становитиме

$$\Delta\mu_n(P) = \mu_{n0} \left[ \frac{\left(1 + 2K \exp\left(\frac{\Delta E_{c1}(P) - \Delta E_{c2}(P)}{kT}\right)\right)}{2(1 + 2K) \left(1 + 2 \exp\left(\frac{\Delta E_{c1}(P) - \Delta E_{c2}(P)}{kT}\right)\right)} - 1 \right], \quad (17)$$

де  $K = \mu_{\perp}/\mu_{\parallel} = 0,87 m_{\perp}/m_{\parallel}$  - фактор анізотропії рухливості.

В недеформованому напівпровіднику рухливість дірок дорівнює [4]

$$\mu_{p0} = \frac{q\tau}{m_g^{3/2}} (m_n^{1/2} + m_m^{1/2}), \quad (18)$$

де  $q$  – заряд електрону;  $m_n$  та  $m_m$  – ефективні маси легких та тяжких дірок;  $\tau$  – час релаксації, однаковий для обох типів дірок.

При дії тиску рухливість дірок визначається за виразом [10]

$$\mu_p(P) = \frac{p_1\mu_1 + p_2\mu_2}{p_1 + p_2}, \quad (19)$$

де  $p_1$  та  $p_2$  – концентрації дірок у верхній та нижній зонах, що розщепилися;  $\mu_1$  та  $\mu_2$  - відповідні рухливості.

Тоді, деформаційний приріст рухливості дірок буде дорівнювати

$$\Delta\mu_p(P) = \frac{q\tau}{m_g^{3/2}} \left[ \frac{m_n^{1/2} \left(1 + \left(\frac{m_m}{m_n}\right)^2 \exp\left(\frac{\Delta E_{v-}(P) - \Delta E_{v+}(P)}{kT}\right)\right)}{\left(1 + \left(\frac{m_m}{m_n}\right)^2 \exp\left(\frac{\Delta E_{v-}(P) - \Delta E_{v+}(P)}{kT}\right)\right)} - \left(m_n^{1/2} + m_m^{1/2}\right) \right], \quad (20)$$

де  $\Delta E_{v+}(P)$  – деформаційний приріст положення вершини валентної зони при деформації;  $\Delta E_{v-}(P)$  – деформаційний приріст положення нижньої гілки валентної зони при деформації.

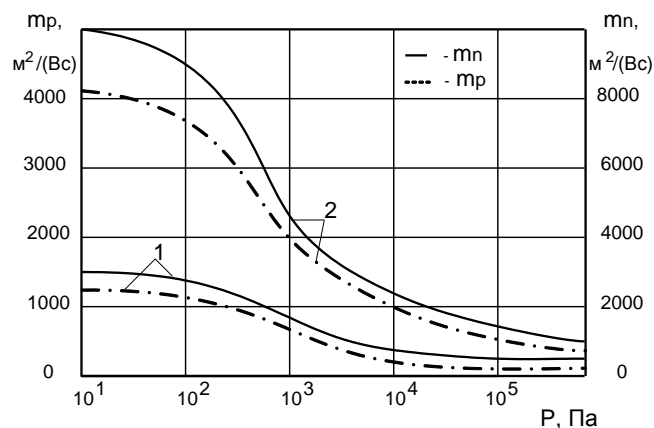


Рис. 3. Залежність рухливостей носіїв заряду від тиску, який діє в напрямках 1 - <100> та 2 - <111>

## Висновки

На основі отриманих залежностей електрофізичних параметрів кремнієвих напівпровідників від дії тиску можна констатувати, що при малих тисках ( $\Delta E_3(P) < kT$ ) основний вклад в зміну характеристик вносить залежність рухливості від тиску, а при великих тисках ( $\Delta E_3(P) > kT$ ) зміна ширини забороненої зони.

## Література

1. Шмидт Н. Измерительные преобразователи давления и температуры / Н. Шмидт // Экспресс-информация: Контрольно-измерительная техника. – М.: ВИНТИ. – 1990. – № 23. – С. 5–10.
2. Верчутский Р. Состояние и тенденции развития пьезорезисторных преобразователей давления / Р. Верчутский // Экспресс-информация: Контрольно-измерительная техника. – М.: ВИНТИ. – 1990. – № 30. – С. 13–17.
3. Осадчук В.С. Дослідження тензочутливого елемента на основі біполярного транзистора / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук // Вісник технологічного університету Поділля. – 2004. – №2. – С. 115–121.
4. Киреев П. С. Физика полупроводников / П. С. Киреев. – М. : Высшая школа, 1975. – 583 с.
5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В2-х книгах. Кн.1 / С Зи. – М. : Мир, 1984. – 456 с.
6. Блейкмор Дж. Физика твёрдого тела: Пер. с англ. – М. : Мир, 1988. – 608 с.
7. Маделунг О. Теория твёрдого тела: Пер. с нем. / Под ред. А.И. Ансельма. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1980. – 416 с.
8. Полякова А.Л. Деформация полупроводников и полупроводниковых приборов / Л.А. Полякова. – М. : Энергия, 1979. – 168 с.
9. Захаров Н.П. Механические явления в интегральных структурах / Н.П. Захаров, А.В. Багдасарян. – М. : Радио и связь, 1992. – 144 с.
10. Оценка влияния напряжённо деформированного состояния кремниевых пластин на смещение экстремумов энергетических зон / [Багдасарян А.В., Шермергор Г.Д., Захаров Н.П., Сергеев В.С.] // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. – 1986. – Вып. 5 (184). – С. 21 - 30.

## References

1. N. Schmidt pressure transmitters and temperature // Express Information: Testing and measuring equipment. – Moscow: – VINITI. – 1990. – № 23. – P. 5–10. [in Russian]
2. Verchutsky R. Status and trends of piezoresistive pressure transducers // Express Information: Testing and measuring equipment. – Moscow: – VINITI. – 1990. – № 30. – P. 13–17. [in Russian]
3. Osadchuk V.S., Osadchuk A.V. Investigation of strain-sensing element composed of bipolar transistors // Bulletin of the University of Technology skirts. – 2004. – № 2. – P. 115–121. [in Ukrainian]
4. Kireev P.S. Semiconductor Physics. - Moscow: Higher School, 1975. – 583 p. [in Russian]
5. S. Sze, Physics of Semiconductor devices : B2 - books. Kn.1. – New York: Wiley, 1984. – 456 p. [in Russian]
6. Blakemore J. Solid State Physics: Per. from English. – New York: Wiley, 1988. – 608 p. [in Russian]
7. O. Madelung. Solid State Theory: Per. with it. / Ed. AI Anselm . – Moscow: Nauka, Home Edition physical and mathematical literature, 1980. – 416 p. [in Russian]
8. A.L. Polyakova. Deformation of semiconductors and semiconductor devices. – Moscow: Energiya, – 1979. – 168 p. [in Russian]
9. Zakharov N.P., A.V. Bagdasarian. Mechanical phenomena in integrated structures. – Moscow: Radio and communication, – 1992. – 144 p. [in Russian]
10. Baghdasaryan A.V., G.D. Shermergor, N.P. Zakharov, Sergeev V.S. Assessing the impact of stress-strain state of the wafer on the shift of the extrema of the energy bands // Electronic Engineering. Ser. 2. Semiconductors. – 1986. –Vol. 5 (184). – P. 21–30. [in Russian]

Надіслана / Written: 15.02.2014 p.

Надійшла / Received:

Рецензент: д.т.н., проф., завідувач кафедри промислової автоматики та метрології Вінницького національного технічного університету Кучерук В.Ю.