УДК 621.382

В. С. Осадчук, д. т. н., проф.; О. В. Осадчук, д. т. н., проф.;
Н. Л. Білоконь, к. т. н., доц.; А. О. Кривошея

ВПЛИВ ТИСКУ НА ПАРАМЕТРИ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР

Показано вплив дії тиску на напівпровідникові структури. Визначено теоретичні залежності цього впливу на електрофізичні параметри напівпровідникових структур.

***Ключові слова**: тиск, деформація, сенсори, напівпровідник.*

Вступ

Інтенсивний розвиток різноманітних за будовою та властивостями сенсорів пов'язаний з автоматизацією систем керування, контролем різноманітних технологічних процесів. При цьому дослідження в області створення таких сенсорів спрямовані на покращення їх основних параметрів: підвищення чутливості, лінійності, стабільності, економічності, зменшення часу спрацьовування, габаритів, ефективності інтеграції з мікропроцесорними засобами обробки вимірювальної інформації.

У цій роботі досліджено деформаційні ефекти в напівпровідникових структурах під дією тиску. Визначено теоретичні залежності описаного впливу на електрофізичні параметри напівпровідникових структур. За допомогою цих залежностей може бути змодельована поведінка напівпровідникових приладів під дією тиску.

Теоретичні дослідження

В якості основних електрофізичних параметрів, що змінюються під впливом тиску, виступають зміщення енергетичних рівнів напівпровідника [1, 2] та зміна ефективних мас і рухливостей носіїв струму [3, 4]. У домішкових напівпровідниках час життя носіїв струму мало залежить від тиску [3].

При деформації напівпровідника під дією тиску відбувається зміщення дна зони провідності та вершини валентної зони з відповідним розщепленням їх країв. Зміна положення валентної зони ΔE_v та розщеплення її вершини під дією тиску визначаються виразом [5]:

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

де

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

a, b, d – константи деформаційного потенціалу для валентної зони; Δ – зміна об'єму напівпровідникового матеріалу під дією тиску.

$$\Delta = \varepsilon_{11}+\varepsilon_{22}+\varepsilon_{33}\,, \tag{3}$$

де ε_{ij} – компоненти тензора деформації.

Зміна положення зони провідності при відсутності деформації зсуву та її розщеплення під дією тиску описується виразом:

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

де Ξ_d та Ξ_u – константи деформаційного потенціалу для зони провідності; індекс i = 1, 2, 3 (індекс i = 1 відповідає енергетичним мінімумам, розміщеним у напрямках <100> та зворотньому до них, аналогічно індекси i = 2 та i = 3 – напрямки <010> та <001> відповідно і зворотні до них).

При наявності деформації зсуву зміна положення зони провідності та її розщеплення під дією тиску описуються виразом:

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

де ΔE – різниця між нижніми рівнями за відсутності тиску; Ξ_u – константа деформаційного потенціалу, яка характеризує вплив деформації зсуву; $f \neq j \neq i$ – індекси ($f = 1, 2, 3$).

Ефективна ширина забороненої зони в деформованому напівпровіднику $E_g(P)$ визначається як відстань між розщепленими найближчими рівнями валентної зони та зони провідності. Величина її зміни під дією тиску $\Delta E_g(P)$ дорівнюватиме [4]:

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

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

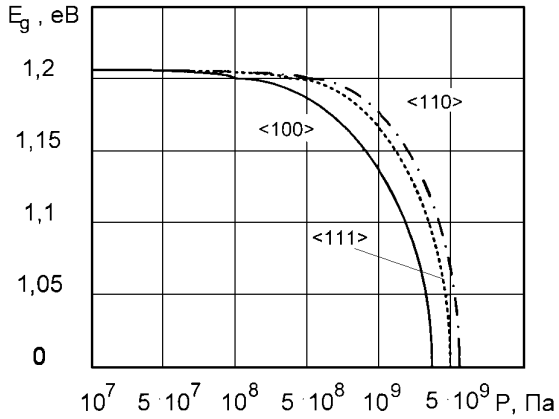

Рис. 1. Залежність ширини забороненої зони від тиску

При досить великих значеннях тиску (для кремнію $P>10^7$ Па) відбувається перетікання електронів тільки на нижні мінімуми зони провідності, тому ефективна маса електронів фактично залишається незмінною. Величини ефективних мас дірок при великих значеннях тиску зумовлюються значенням ефективної маси верхніх рівнів валентної зони за умови, що при такому значенні тиску виконується нерівність $\Delta E_v >> E(k)$, де $E(k)$ – енергія носіїв струму в недеформованому напівпровіднику. Так, при виконанні цієї умови, для кремнію ефективні маси дірок дорівнюють $m||/m_0 = 0{,}31$, $m^{\perp}/m_0 = 0{,}21$.

При невеликих тисках (для кремнію $P<10^7$ Па) в процесі провідності беруть участь всі енергетичні мінімуми, тому рухливість носіїв струму змінюється з тиском [3]: при досить великих тисках ця залежність зникає і всі зміни характеристик напівпровідникових приладів визначаються суттєвою залежністю концентрацій неосновних носіїв струму $N_{неосн}(n_p, p_n)$ і власної концентрації носіїв струму n_i від тиску.

При дії тиску зміна ширини забороненої зони $\Delta E_g(P)$ визначається за формулою (6), тоді концентрація носіїв у власному напівпровіднику дорівнює [3]:

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

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

Деформаційний приріст Δn_i визначається за виразом:

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

Концентрації носіїв заряду в області n-типу провідності при концентрації донорної домішки $N_D >> n_i$ під дією тиску дорівнюють [3]:

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

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

Оскільки за відсутності 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 виразом:

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

Аналогічно концентрації носіїв заряду в області р-типу провідності ($N_A >> n_i$) під дією тиску дорівнюють:

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

$$n_p(P) = n_{i0}^2 / N_A \exp\left[-\Delta E_g(P)/kT\right]. \tag{13}$$

Деформаційні прирости концентрацій електронів n_p та дірок p_p визначаються за виразом:

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

На рисунку 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’єзорезистивним ефектом, а при великих залежність більш складна. Зміну рухливості зазвичай пов'язують зі зміною маси відповідного носія струму [3]. 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 осі $\mu\|$ та перпендикулярно до вісі $\mu^{\perp}$. Перерозподіл носіїв струму між рівнями при деформації призводить до зміни внеску цих двох компонент в загальну рухливість по відношенню до недеформованого напівпровідника.

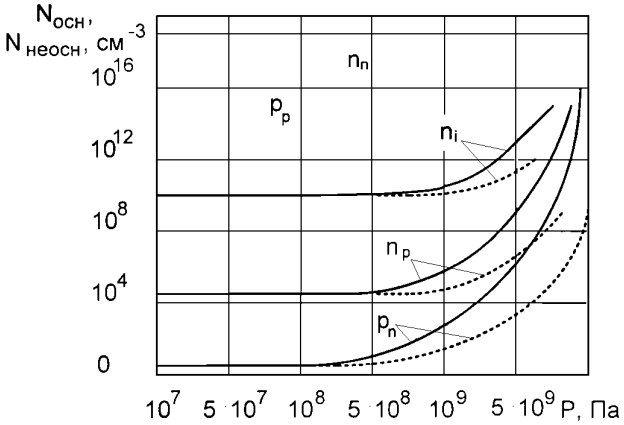

Рис. 2. Концентрації носіїв струму в залежності від тиску, який діє в напрямках —— – <100> та - - - - – <111>

Ефективна рухливість електронів дорівнює:

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

де μ_i – рухливість електрона в i-му мінімумі вздовж напрямку струму. Величина μ_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 осі <100> дорівнює [6]:

$$\Delta\mu_{n0} = \frac{1}{3}\mu_{\parallel} + \frac{2}{3}\mu_{\perp}. \tag{16}$$

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

$$\Delta\mu_n(P) = \mu_{no}\left[\frac{\left(1+2K\exp\left(\frac{\Delta E_{c1}(P)-\Delta E_{c2}(P)}{kT}\right)\right)}{2(1+2K)\left(1+2\exp\left(\frac{\Delta E_{c1}(P)-\Delta E_{c2}(P)}{kT}\right)\right)}-1\right], \tag{17}$$

де $K = \mu\| / \mu^{\perp} = 0{,}87$. $\mu\| / \mu^{\perp}$ – фактор анізотропії рухливості.

У недеформованому напівпровіднику рухливість дірок дорівнює [3]:

$$\mu_{p0} = \frac{q\tau}{m_e^{3/2}\left(m_л^{1/2}+m_m^{1/2}\right)}, \tag{18}$$

де q – заряд електрону; $m_л$ та m_m – ефективні маси легких і важких дірок; τ – час релаксації, однаковий для обох типів дірок.

При дії тиску рухливість дірок визначається за виразом [6]:

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

де p_1 та p_2 – концентрації дірок у верхній та нижній зонах, що розщепилися; μ_1 та μ_2 – відповідні рухливості.

Тоді деформаційний приріст рухливості дірок дорівнюватиме:

$$\Delta\mu_n(P) = \frac{q\tau}{m_e^{3/2}}\left[m_л^{\frac{1}{2}}\frac{\left(1+\left(\frac{m_m}{m_л}\right)^2\exp\left(\frac{\Delta E_{v-}(P)-\Delta E_{v+}(P)}{kT}\right)\right)}{\left(1+\left(\frac{m_m}{m_л}\right)^{\frac{3}{2}}\exp\left(\frac{\Delta E_{v-}(P)-\Delta E_{v+}(P)}{kT}\right)\right)}-\left(m_л^{\frac{1}{2}}+m_m^{\frac{1}{2}}\right)\right], \tag{20}$$

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.

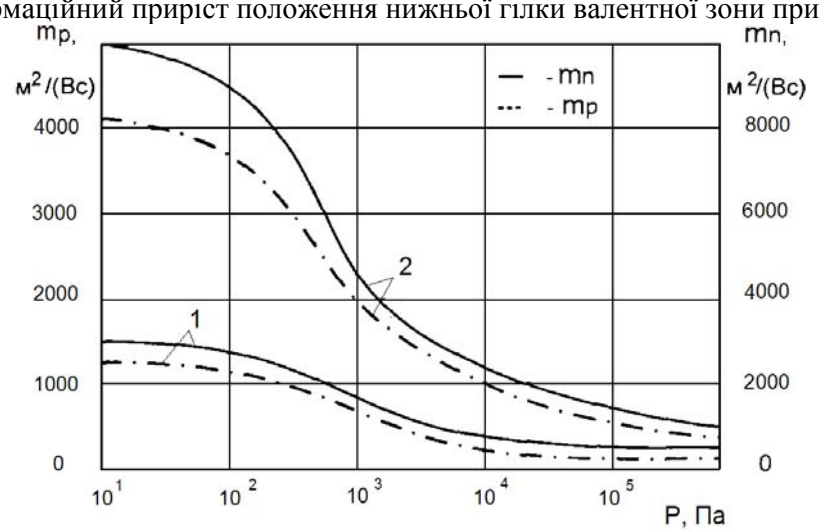

Рис. 3. Залежність рухливостей носіїв заряду від тиску

Якщо електричне поле E, щільність струму j та механічне напруження ξ спрямовані вздовж однієї кристалографічної осі <100>, то відношення E/j дорівнює [7]

$$E / j = \rho_0 + \Delta\rho = \rho_0(1 + \tau_1\xi), \tag{21}$$

де ρ_0 – питомий опір матеріалу при $\xi = 0$; τ_1 – повздовжній коефіцієнт п'єзоопору, який залежить від кристалографічного напрямку в напівпровідниковому матеріалі

$$\tau_1 = \tau_{11} + 2(\tau_{44} + \tau_{12} - \tau_{11}) \cdot (l^2m^2 + l^2n^2 + m^2n^2), \tag{22}$$

де τ_{11}, τ_{12}, τ_{44} – коефіцієнти п'єзоопору для кубічних кристалів; l, m, n – направляючі косинуси кутів між напрямком дії тиску P та обраними кристалографічними осями Ox_1, Ox_2, Ox_3 відповідно.

Отже, деформаційний приріст питомого опору напівпровідникового матеріалу $\Delta\rho$ визначається на основі виразу [8]:

$$\Delta\rho(P) = \rho_1\tau_1\xi. \tag{23}$$

Висновки

Досліджено деформаційні ефекти в напівпровідникових структурах під дією тиску. Визначено теоретичні залежності описаного впливу на електрофізичні параметри напівпровідникових структур, за допомогою яких може бути змодельована поведінка напівпровідникових приладів під дією тиску.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Блейкмор Дж. Физика твердого тела: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 608 с.

2. Маделунг О. Теория твердого тела: Пер с нем. / Под ред.. А.И. Ансельма. – М.: Наука, 1980. – 416 с.

3. Полякова А.Л. Деформация полупроводников и полупроводниковых приборов. – М.: Энергия, 1979. – 168 с.

4. Захаров Н.П., Багдасарян А.В. Механические явления в интегральных структурах. – М.: Радио и связь, 1992. – 144 с.

5. Багдасарян А.В., Шермергор Г.Д., Захаров Н.П., Сергеев В.С. Оценка влияния напряжено деформированного состояния кремниевых пластин на смещение экстремумов энергетических зон // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. – 1986. – № 5. – С. 21 – 30.

6. Баранский П.И., Клочков В.П., Потыкевич И.В. Полупроводниковая электроника. Свойства материалов. Справочник. – К.: Наукова думка, 1975. – 704 с.

7. Ваганов В.И. Интегральные тензопреобразователи. – М.: Знергоатомиздат, 1983. – 136 с.

8. Ильинская Л.С., Подмарьков А.Н. Полупроводниковые тензодатчики. – М.: Энергия, 1974. – 185 с.

Осадчук Володимир Степанович – д. т. н., професор, завідувач кафедри електроніки.

Осадчук Олександр Володимирович – д. т. н., професор, завідувач кафедри радіотехніки.

Білоконь Наталія Леонідівна – к. т. н., доцент кафедри електроніки.

Кривошея Андрій Олександрович – аспірант кафедри електроніки.
Вінницький національний технічний університет