

ВПЛИВ ІМПУЛЬСІВ ЗВОРотної НАПРУГИ НА ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ПАРАМЕТРИ КОНТАКТІВ МЕТАЛ-КРЕМНІЙ

У статті розглянуто вплив імпульсів зворотної напруги на електрофізичні параметри контактів $\text{MoSi}_2\text{-n-Si}$. Встановлено, що внаслідок тих впливів відбувається перебудова електронних станів межі поділу, зростає параметр перехідного шару $\frac{d}{\varepsilon}$, змінюється вольт-амперна характеристика.

Останнім часом гостро постала проблема створення та вдосконалення новітніх технологій у різноманітних сферах науково-прикладних досліджень і, зокрема, у твердотільній мікроелектроніці, що є умовою поживлення вітчизняної напівпровідникової індустрії. На особливу увагу заслуговують контакти метал-напівпровідник, які є основою для створення приладів з бар'єром Шотки, що дозволяють вирішувати багато задач напівпровідникової електроніки. У зв'язку з цим вивчаються питання створення стабільних контактних структур з наперед заданими параметрами [1-3], деградації електрофізичних параметрів під дією зовнішніх чинників [4, 5], вплив δ -шарів на параметри вольт-амперної характеристики при проходженні струму через локальні рівні [6], роль поверхневих станів при перенесенні струму [7], а також гетерування домішків та дефектів субмікронними шарами [8-9].

Незважаючи на інтенсивне вивчення властивостей контактів метал-напівпровідник, питання зміни електрофізичних параметрів цих контактів під дією зовнішніх чинників вивчене недостатньо. Метою даної роботи є вивчення впливу імпульсів напруги на електрофізичні параметри контактів дисиліцид молібдену-кремній.

Експериментальні зразки та одержані результати.

Досліджувані контакти виготовлялись термообробкою плівок металу, нанесених на пластину кремнію КЭФ-1 Омсм, орієнтовану гранню $\langle 111 \rangle$. Безпосередньо перед нанесенням металу стандартні пластини кремнію травили в освіжаючому травнику $\text{HF} : \text{H}_2\text{O} = 1 : 50$, промивали в бідистильованій воді та сушили.

Конденсацію плівок металу здійснювали у вакуумній камері для напилення металів УВП-2М-1 з модернізованою електронною системою [10]. Тиск у камері становив $(3-6) \times 10^{-4}$ Па, конструкція камери давала можливість проводити відпалювання зразків у вакуумі за температур, необхідних для утворення силіциду молібдену [11]. Контроль температури кремнієвої пластини здійснювали за допомогою плівкової та дротяної платина-платинородієвої термопари з точністю $\pm 10^0\text{C}$. Нагрівання металу проводили резистивним випаровувачем. Після проведення фото-літографічних операцій та нанесення омичного контакту отримані таким чином контактні структури піддавались дії імпульсів зворотної напруги тривалістю від 100 нс до 120 мкс і амплітудою від 10 до 40 В. Кількість імпульсів змінювалась від 1 до 10^3 . Досліджувані структури піддавались вказаним імпульсним навантаженням, знаходячись як за кімнатної температури, так і за температури скрапленого азоту ($T=77\text{ K}$).

Внаслідок імпульсної дії відбувалося покращення випрямляючих властивостей досліджуваних структур. Сила зворотного струму зменшується на порядок, а прямого – змінюється мало. ВАХ характеризувались параметром α та α^* , які визначались за формулами $\alpha = \frac{d \ln I}{dV}$ та $\alpha^* = \frac{d}{dV} (\ln I^*)$ [12].

Максимальне значення параметрів α та α^* лежали в межах $(25-28)\text{V}^{-1}$ та $(7,1-9,0)\text{V}^{-1}$ відповідно. Внаслідок дії імпульсів зворотної зміщення вказані параметри

α та α^* набували значень $(29,0-32,0)\text{В}^{-1}$ та $(5,5-8,0)\text{В}^{-1}$ і зменшувались внаслідок зростання прикладеної напруги. Дослідження показали, що покращення випрямляючих властивостей відбувалось стрибкоподібно за відповідної тривалості імпульсу та його амплітуди. Внаслідок зниження температури досліджуваних зразків до 77 К такий же результат отримуємо під дією імпульсів, амплітуда яких становила 10 В, а тривалість становила 5×10^{-6} с. Це означає, що зниження температури дає можливість отримати такий же результат під дією імпульсів меншої амплітуди. Кількість імпульсів не відіграла помітної ролі, оскільки зміна електрофізичних параметрів відбувалась стрибкоподібно, якщо параметри імпульса набували вказаних значень.

Дослідження залежності електроємності контактів від прикладеної напруги на частотах (1-30)МГц показало, що її характер не залежав від імпульсної дії. Електроємність контактних структур монотонно зростала внаслідок прикладання прямої напруги і досягала насичення за певних значень прямого зміщення і монотонно зменшувалась під дією напруги зворотного зміщення. Висоту потенціального бар'єру (φ_0) контактів та параметр перехідного шару ($\frac{d}{\varepsilon_1}$) визначали із аналізу залежності електроємності від

прикладеної напруги [12]. Було встановлено, що внаслідок імпульсної дії параметр $\frac{d}{\varepsilon_1}$ зростає на 15-20% від початкового значення, яке становило $(1,1-1,3) \times 10^{-7}$ см, а φ_0 не змінювалось з точністю до $\pm 0,05\text{eВ}$.

Спеціальні дослідження однорідності дисиліциду металу на площі контактного вікна проводились шляхом селективного пошарового травлення дисиліциду металу з наступним дослідженням контактного вікна за допомогою оптичного металографічного мікроскопу із 400-кратним збільшенням.

Вказані дослідження не виявили суттєвих неоднорідностей, які могли появиться внаслідок імпульсної дії.

Аналіз експериментальних результатів.

Для аналізу отриманих результатів досліджено енергетичний розподіл електронних станів межі поділу в забороненій зоні кремнію за методикою, розробленою в [12]. Дослідження переважаючого механізму обміну зарядів електронних станів межі поділу показало, що в усіх випадках спостерігається переважаючий обмін зарядів з зоною провідності напівпровідника. На рис.1 (а,б) показано результати досліджень диференційної густини заряду на межі поділу дисиліцид молібдену-п-кремній до і після імпульсної дії відповідно. Як видно із рис.1, для контактних структур на фоні неперервного розподілу диференційної густини заряду спостерігаються дискретні рівні, енергетичне положення та концентрація яких змінюється приблизно на порядок внаслідок імпульсної дії, але зменшення концентрації відбувалось неоднаково для рівнів з різним енергетичним положенням.

Згідно з [12, 13], зменшення концентрації електронних станів на межі поділу повинно призвести до зміни потенціального бар'єру, але згідно з отриманими результатами, висота бар'єру φ_0 залишається сталою і не залежить від дії імпульсів зворотного зміщення. Згідно з [13], висота потенціального бар'єру φ_0 залежить від параметрів напівпровідника (n_0, ε_2), властивостей перехідного шару між металом та напівпровідником ($\frac{d}{\varepsilon_1}$), властивостей поверхневих станів ($\sigma_{i,j}^0 - \sigma_{i,j}^{00}$) і контактної різниці потенціалів

V_k :

$$\frac{\varphi_0}{l} = \left\{ -\frac{a_n l^{1/2}}{2} + \sqrt{\left[\frac{a_n l^{1/2}}{2} + \left(\frac{\varphi_0^0}{l} \right)^{1/2} \right]^2 + V_{1,0}^{i,j} - V_k} \right\}^2, \quad (1)$$

де $a_n = (8\pi\epsilon_0\epsilon_2)^{1/2} \times \frac{d}{\epsilon_1}$; $v_{1,0}^{i,j} = v_{1,0}^i + v_{1,0}^j$,

де $v_{1,0}^i = 4\pi \frac{d}{\epsilon_1} \times (\sigma_i^0 - \sigma_i^{00})$, $v_{1,0}^j = 4\pi \frac{d}{\epsilon_1} \times (\sigma_j^0 - \sigma_j^{00})$

Як видно із (1), відсутність залежності висоти потенціального бар'єру від зміни концентрації електронних станів межі поділу можна пояснити зростанням параметра перехідного шару $\frac{d}{\epsilon_1}$, припустивши, що контактна різниця потенціалів, діелектрична проникність напівпровідника та початковий вигин зон на поверхні напівпровідника не залежать від імпульсної дії.

На рис.2 наведена ВАХ досліджуваних контактів після дії імпульсного перевантаження. Як видно із рисунка, струм через контакт описується (як і для контактів, які не піддавались імпульсній дії) сумарним струмом через електронні стани межі поділу. У перенесенні струму беруть участь три електронні стани.

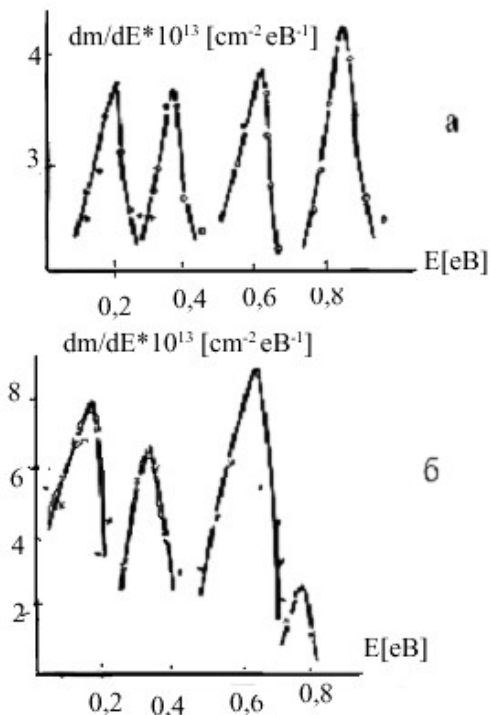


Рис.1. Залежність диференційної густини заряду на електронних станах межі поділу дисиліцид молібдену-кремній:
а) до імпульсної дії,
б) після імпульсної дії

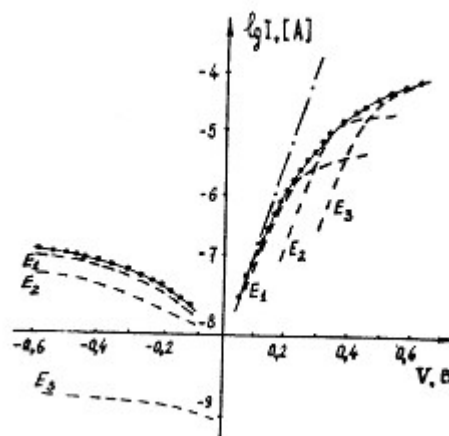


Рис.2. Вольт-амперні характеристики контактів дисиліцид молібдену-кремній після дії імпульсного перевантаження:
крапки – експериментальні значення;
пунктир – струми через електронні рівні межі поділу; суцільна лінія – сумарний струм через електронні рівні; штрих-пунктирна лінія – надбар'єрний струм

Перетин захоплення C_n^m носіїв заряду на електронний стан, який бере участь в перенесенні заряду, та енергетичне положення цих станів визначали методикою, розробленою в [12]. Знаючи енергетичне положення станів і перетин захоплення, можна розрахувати енергетичну модель контакту. Припустивши, що прозорість бар'єра пропорційна перетину захоплення, для прямокутного бар'єра можна записати:

$$C_n^m = \alpha \exp(-\beta \sqrt{E_0 - E_i}), \tag{2}$$

де α - деякий коефіцієнт; $\beta = \frac{2d(m^*)^{1/2}}{\hbar}$; E_0 - висота бар'єра; E_i - енергетичне положення стану, на який іде захоплення електронів; m^* - ефективна маса електрона, d - товщина перехідного шару. Оскільки в процесі переносу струму беруть участь три стани, то, нехтуючи залежністю ефективної маси електрона від глибини залягання стану E_i , можна записати співвідношення (2) для кожного з них і одержати систему рівнянь, розв'язавши яку, визначимо коефіцієнт α , ефективну масу електрона m^* та висоту бар'єра E .

Вираз для визначення висоти бар'єра, відрахованої від деякого рівня E_0 , можна записати у вигляді:

$$E = \frac{[E_1 - E_0^1 - B^2(E_2 - E_0^1)]^2}{4B[E_1 - E_0^1 - B(E_2 - E_0^1)](1 - B)}, \quad (3)$$

де $B = \frac{\ln(C_0/C_1)}{\ln(C_0/C_2)}$; E_0, E_1, E_2 - енергетичне положення електронних станів межі розподілу; C_0, C_1, C_2 - перетин захоплення цих станів.

Для одержаних нами значень $E_0 = 0,28$ еВ; $E_1 = 0,45$ еВ; $E_2 = 0,68$ еВ; $C_0 = 1,1 \times 10^{-21}$ см⁻²; $C_1 = 4,1 \times 10^{-20}$ см⁻²; $C_2 = 0,5 \times 10^{-18}$ см⁻² одержимо, що висота бар'єра становить 1,08 еВ. Припустивши, що рівень Фермі в перехідному шарі лежить посередині забороненої зони, визначили її ширину. Виявилось, що ширина забороненої зони перехідного шару знаходиться в межах 1,45-1,52 еВ, що добре корелює з шириною забороненої зони аморфного кремнію. Таким чином, одержаний результат може бути основою для припущення того, що природою перехідного шару контактів дисиліцид молібдену-п-кремній після імпульсної дії є аморфізований кремній.

Згідно з [13], якщо $\varepsilon_1 \neq \varepsilon_2$, то необхідно враховувати сили зображення, які призводять до зміни потенціальної енергії носіїв заряду і підвищення або пониження висоти потенційного бар'єру. Виявилось, що коли $\varphi_0 = 0,35$ еВ, $n_0 = 3,6 \times 10^{16}$ см⁻³, то $\Delta\varphi = 0,025$ еВ. Тут φ_0 - висота потенційного бар'єру, n_0 - концентрація основних носіїв у напівпровіднику. Як бачимо, $\Delta\varphi$ набагато менше, ніж φ_0 . Отже, зміною висоти бар'єра внаслідок дії сил зображення можна знехтувати.

Прийнявши діелектричну проникність аморфного кремнію $\varepsilon_1 = 15$, оцінимо товщину перехідного шару. Виявилось, що товщина перехідного шару становить $d = 5,2 \times 10^{-7}$ см.

Оцінивши товщину перехідного шару, можна провести оцінку ефективної маси електронів, які беруть участь у перенесенні струму через електронні стани межі поділу. Для проведення даних оцінок із співвідношення (2) отримали вираз (4)

$$m^* = \left[\frac{\left(\ln C_0 / C_1 \right) \hbar}{2d \left[(E - E_0)^{1/2} - (E - E_1)^{1/2} \right]} \right]^2. \quad (4)$$

Відповідні розрахунки показали, що $m^* = 4,41 \times 10^{-31}$ кг або $m^* = 0,49 m_0$, де m_0 - маса спокою електрона, що добре корелює із значенням ефективної маси електрона в кристалічному кремнії.

Проведені дослідження показали, що під дією імпульсів зворотного зміщення відбувається покращення випрямляючих властивостей досліджуваних структур, але механізм перенесення електричного заряду через межу поділу не змінюється. Проведені оцінки висоти бар'єра за допомогою отриманої нами формули (3) і припущення про те, що рівень Фермі в перехідному шарі лежить посередині забороненої зони перехідного шару, дало можливість визначити її ширину, яка виявилась близькою до ширини забороненої зони аморфного кремнію. Значення ефективної маси електрона в перехідному шарі, обчислене за допомогою формули (4), отриманої в даній роботі, добре корелює із значенням ефективної маси електрона кремнію, що підтверджує правомірність зроблених припущень. Оцінка зміни висоти бар'єра внаслідок дії сил зображення показала, що $\Delta\phi$ набагато менше, ніж ϕ_0 і цією зміною можна знехтувати. Покращення випрямляючих властивостей досліджуваних структур можна пояснити перебудовою спектру електронних станів межі поділу, яка відбувається під дією імпульсів зворотного зміщення. Незалежність висоти потенціального бар'єру від зміни заряду на електронних станах, можливо, обумовлена зміною параметру перехідного шару $\frac{d}{\varepsilon}$, а зростання товщини перехідного шару може бути обумовлене захопленням дефектів [4] межею поділу, що призводить до аморфізації перехідного шару, який служить стоком дефектів. Таким чином, під дією збудження електронної підсистеми імпульсами напруги зворотного зміщення можуть відбуватись процеси гетерування субмікронними шарами межі поділу, що в кінцевому випадку приводить до покращення електрофізичних параметрів контактів і аморфізації перехідного шару.

The article analyzes the influence of the impulses of the revers tension on the electrophysical parameters of MoSi₂-n-Si contacts. It has been revealed that as a result of this influence there is rearrangement of the electronic conditions of the division border, the parameter of transitional layer $\frac{d}{\varepsilon}$ increases, and the volt-ampere characteristic changes.

Література

1. Царенко О.М., Ткачук А.І., Рябець С.І. Одержання та дослідження діодних структур на основі багатокомпонентних твердих розчинів сполук A⁴B⁶/ Фізичний збірник НТШ. – 2001. – Т.4. – С. 142-147.
2. Царенко О.М., Ткачук А.І. Форування та дослідження бар'єрних структур Ag / тонкий проміжний тунельно-прозорий діелектричний шар оксиду / p – Pb_{1+x} Sn_x Te_{1+y} Se_y / Pt // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2001. – Вип.2(11). – С. 254-259.
3. Царенко О.М., Ткачук А.І. Особливості формування та властивості діодів Шотки на основі твердих розчинів сполук A⁴B⁶/ Наукові записки КДПУ. Сер. фіз.-мат. науки. – 2002. – Вип.43. – С.122-138.
4. Ветров А.П., Ильченко В.В., Лисняк П.Г. и др. О возможности изменения свойств контактов силицид молибдена-кремний при импульсных воздействиях / Радиотехника и электроника. – 1993. – Т.38, Вып.4. – С.760-764.
5. Ильченко В.В., Лисняк П.Г., Стриха В.И. и др. О влиянии гамма-радиации на механизм переноса заряда контакта дисилицид платины-кремний // Физические основы надежности и деградации полупроводниковых приборов. Тезисы докладов. Кишинев. – 1991. – Т.1. – С.45.
6. Стриха В.І., Скришевський В.А., Козинець О.В. та ін. Вплив δ - шарів на темнові вольт-амперні характеристики кремнієвих р-п-переходів при проходженні струму через локальні рівні. / УФЖ. – 2000. – Т. 45, вип. 12. – С. 1458-1463.
7. Бойко Ю.В., Кильчицька С.С., Кильчицька Т.С. та ін. Про роль поверхневих станів у перенесенні фотоструму в структурах метал-тунельний діелектрик-напівпровідник. / УФЖ. – 1994. – Т.39. Вип.6. – С. 723-726.
8. Волков. С.Г., Євтух А.А., Литовченко В.Г. та ін. Гетерування рекомбінаційно-активних домішок у мультикристалічному кремнії при швидких термічних обробках. / УФЖ. – 2002. – Т.47. Вип.7. – С.684-689.
9. Кричер Д., Литовченко В.Г., Романюк Б.М. та ін. Планарне гетерування домішок металів в шарах Si та SiGe, вирощених методом МПЕ на підкладках Si. / УФЖ. – 2002. – Т.45. Вип.7. – С. 873-877.
10. Комашко В.А., Попов В.И, Белоусов В.И и др. Электрофизические свойства пленок ниобия, полученных конденсацией в вакууме / Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. – 1976. – 4. – С.105-110.

11. Бузанева Е.В., Стриха В.И., Чайка Г.В. Об образовании поверхностного заряда на границе раздела металл – полупроводник / УФЖ -1983. – Т. 28. – N 4. – С.575-581,
12. Стриха В.И., Бузанева Е.В., Радзиевский И.А. Полупроводниковые приборы с барьером Шоттки. – М.: Сов. Радио, 1974. – 248с.
13. Стриха В.И. Теоретические основы работы контакта металл – полупроводник. – К. : Наукова думка, 1974. – 263с.

Одержано 04.02.2003 р.