

ХІМІЧНІ СЕНСОРИ

CHEMICAL SENSORS

PACS: 73.20.NB, 73.25.+I

УДК 621.315.592

ВПЛИВ СТРУКТУРИ КРЕМНІЄВИХ P-N ПЕРЕХОДІВ НА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЯК ГАЗОВИХ СЕНСОРІВ

Ф. О. Птащенко¹, О. О. Птащенко², Г. В. Довганюк²

¹Одеська національна морська академія, вул. Дідріхсона, 8, м. Одеса, 65029

²Одеський національний університет імені І. І. Мечникова,
вул. Дворянська, 2, м. Одеса, 65026, aptash@list.ru

ВПЛИВ СТРУКТУРИ КРЕМНІЄВИХ P-N ПЕРЕХОДІВ НА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЯК ГАЗОВИХ СЕНСОРІВ

Ф. О. Птащенко, О. О. Птащенко, Г. В. Довганюк

Анотація. Досліджено вплив рівня легування кремнієвих p-n переходів на їхні характеристики як сенсорів парів аміаку. Проведено чисельні двовимірні розрахунки нерівноважних поверхневих процесів у p-n переходах при адсорбції молекул донорного газу. Встановлено, що при зростанні концентрації легуючих домішок змінюється механізм чутливості сенсорів. При низькому рівні легування газова чутливість обумовлена утворенням поверхневого каналу з електронною провідністю. У сильно легованих структурах значну роль у формуванні поверхневого зворотного струму відіграє тунелювання електронів у поверхневий канал. Підвищення рівня легування веде до зниження фонового прямого струму сенсорів і до суттєвого зниження чутливості при низьких концентраціях парів аміаку.

Ключові слова: газований сенсор, чутливість, p-n перехід, рівень легування, провідний канал, тунелювання

EFFECT OF THE STRUCTURE OF SILICON P-N JUNCTIONS ON THEIR CHARACTERISTICS AS GAS SENSORS

F. O. Ptashchenko, O. O. Ptashchenko, G. V. Dovganyuk

Abstract. Effect of the doping level of silicon p-n junctions was studied on their characteristics as ammonia vapors sensors. Numerical 2-D calculations of the non-equilibrium surface processes in p-n junctions, due to the adsorption of donor gas molecules, were performed. It is established that the mechanism of the sensitivity of sensors is changed with the increase in the impurities concentrations. Under a low doping level the sensitivity is due to the forming of a surface channel with electron conductivity. In highly doped structures the electron tunneling into the surface channel plays a significant role in the reverse surface current forming. The increase in the doping level results in a lowering of the background forward current of sensors and to a significant sensitivity decrease under low ammonia vapors concentrations.

Key words: gas sensor, sensitivity, p-n junction, doping level, conducting channel, tunneling

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ КРЕМНИЕВЫХ P-N ПЕРЕХОДОВ НА ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАК ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ

Ф. А. Птащенко, А. А. Птащенко, Г. В. Довганюк

Аннотация. Исследовано влияние уровня легирования кремниевых p-n переходов на их характеристики как сенсоров паров аммиака. Проведены численные двумерные расчеты неравновесных поверхностных процессов в p-n переходах при адсорбции молекул донорного газа. Обнаружено, что при повышении концентрации легирующих примесей изменяется механизм чувствительности сенсоров. При низком уровне легирования газовая чувствительность обусловлена образованием поверхностного канала с электронной проводимостью. В сильно легированных структурах значительную роль в формировании поверхностного обратного тока играет туннелирование электронов в поверхностный канал. Повышение уровня легирования ведет к снижению фонового прямого тока сенсоров та к существенному снижению чувствительности при низких концентрациях паров аммиака.

Ключевые слова: газовый сенсор, чувствительность, p-n переход, уровень легирования, проводящий канал, туннелирование

Газові сенсори на основі p-n переходів [1, 2] мають переваги у порівнянні з іншими сенсорами на основі оксидів полікристалічних плівок [3] і діодами Шоттки [4, 5]. P-n переходи на основі широкозонних напівпровідників мають високий потенціальний бар'єр для носіїв заряду і, як результат, малий фоновий струм. Сенсори на p-n переходах мають кристалічну структуру, високу чутливість при кімнатній температурі, селективність до компонентів газу, і можуть бути виготовлені за мікроелектронною технологією. Кремнієві p-n переходи можна використовувати як складові компоненти сенсорів на основі біполярних транзисторів [6]. Чутливість сенсорів на основі p-n переходів до парів аміаку, етанолу, води та ін. обумовлена формуванням поверхневого каналу з електронною провідністю під впливом електричного поля, створеного іонізованими донорними молекулами, адсорбованими на поверхні природного оксидного шару [7–9].

Метою даної роботи було вивчення впливу рівня легування кремнієвих p-n переходів на їхні характеристики як газових сенсорів. Вимірювання проведено на серії плавних p-n переходів з градієнтом концентрації домішок від $a_m = 1,5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-4}$ до $a_M = 4,5 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-4}$. Досліджено вплив складу газового середовища на електричні характеристики кремнієвих p-n переходів. Виконано чисельні двовимірні розрахунки розподілу потенціалу, концентрації носіїв заряду та густини струму в p-n переходах, вольт-амперних характеристик (ВАХ) p-n структур, а також кусково-аналітичні одновимірні роз-

рахунки розподілу електронів у p-області при адсорбції донорних молекул та ВАХ p-n переходів.

Вимірювались стаціонарні ВАХ та кінетика прямого і зворотного струмів у p-n переходах при зміні складу навколишньої атмосфери. Вимірювання проводилися в сухому повітрі, в насичених парах води і етанолу над відповідними рідинами, в насичених парах аміаку над його водними розчинами різних концентрацій.

На рис. 1 наведено ВАХ прямого струму двох p-n переходів з градієнтом концентрації домішок $1,5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-4}$ (рис. 1а) і $4,5 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-4}$ (рис. 1б). Криві 1 і 1' виміряні в сухому повітрі. В області струмів 10 нА — 1 мА вказані ВАХ відповідали виразу

$$I(V) = I_0 \exp[qV / (n_i kT)], \quad (1)$$

де I_0 — стала; q — заряд електрона; k — стала Больцмана; T — температура; n_i — коефіцієнт неідеальності ВАХ. Для досліджених p-n переходів при зростанні градієнта концентрації від a_m до a_M коефіцієнт неідеальності зменшувався від $n_{im} \approx 2,3$ до $n_{iM} \approx 1,6$. Значення $n_i > 1$ свідчить про значну роль рекомбінації через глибокі рівні у механізмі проходження струму [10]. Зменшення коефіцієнта неідеальності ВАХ при зростанні градієнта концентрації a домішок свідчить про зменшення впливу вказаного механізму рекомбінації. При зростанні величини a суттєво зменшується прямий струм p-n переходів. Так, при $V=0,3\text{В}$ величини струму на кривих 1 і 1' рис. 1а і 1б відрізняються в 49 разів. Зменшення рекомбінаційного струму (компоненти

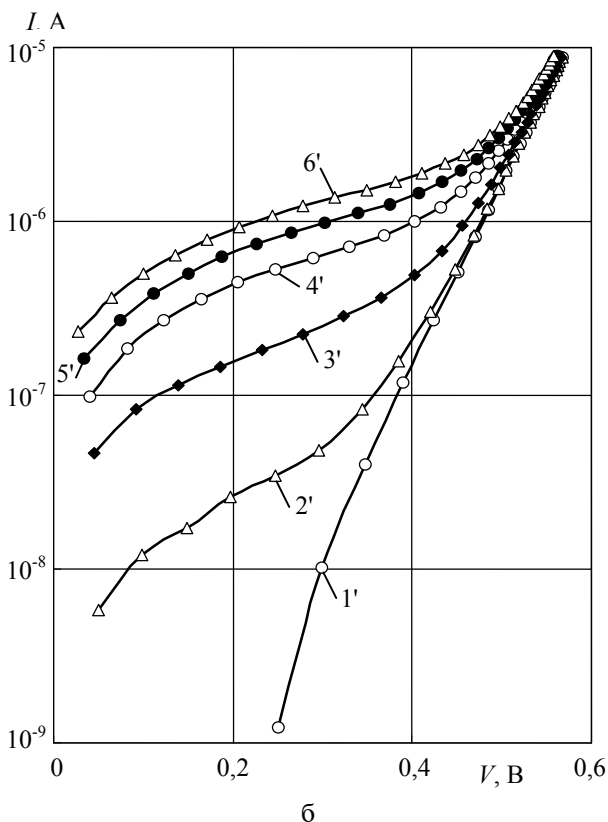
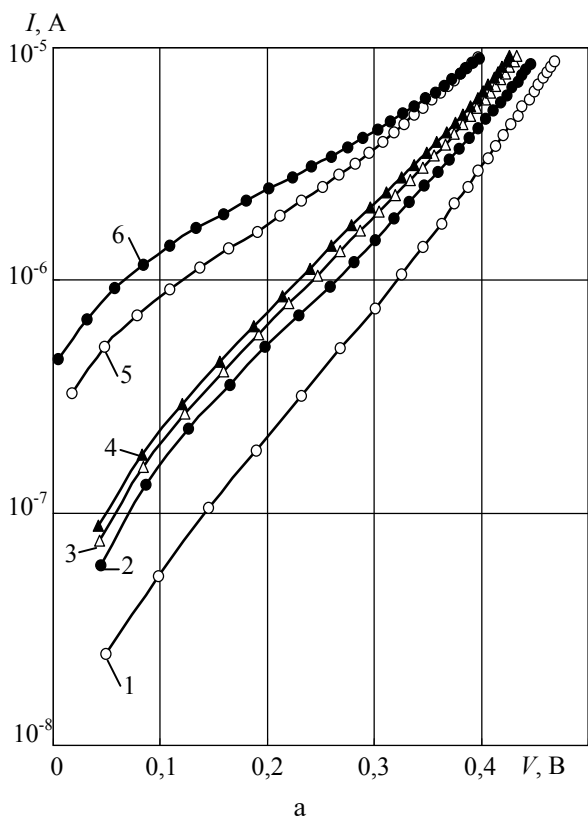


Рис. 1. ВАХ прямого струму р-п переходів з градієнтом концентрації домішок $1,5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-4}$ (а) і $4,5 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-4}$ (б). Вимірювання проведено в сухому повітрі (криві 1, 1') та в парах аміаку при парціальному тиску: 2, 2' – 5 Па; 3, 3' – 20 Па; 4, 4' – 50 Па; 5, 5' – 100 Па; 6, 6' – 200 Па

струму, пов'язаної з рекомбінацією через глибокі рівні у збідненому шарі) при зростанні градієнта концентрації домішок у р-п переході обумовлено двома причинами: збільшенням висоти потенціального бар'єру в області просторового заряду і зменшенням товщини шару, що дає основний внесок у даний струм [10].

Домішки парів аміаку, води та етанолу в навколишній атмосфері вели до значного зростання прямого і зворотного струмів у досліджених р-п переходах. Чутливість р-п переходів як газових сенсорів оцінювалась за виразом

$$S = \Delta I / \Delta P, \quad (2)$$

де ΔI – зміна струму в р-п переході при зміні парціального тиску даних парів на ΔP . Чутливість р-п структур до парів аміаку була приблизно в 1000 разів вища, ніж до парів води.

Криві 2–6 на рис. 1а ілюструють зміни ВАХ прямого струму при зміні парціального тиску аміаку в навколишній атмосфері для р-п переходу з низьким рівнем легування, у якому градієнт концентрації домішок складав a_m . Криві 2–6 мають лінійні ділянки, які відповідають експоненціальній залежності $I(V)$, що дається виразом (1), причому коефіцієнт неідеальності зростає від 2,7 до 6,7 при збільшенні тиску аміаку від 5 до 200 Па.

На рис. 2 наведена схема р-п переходу, що знаходиться в парах аміаку. На поверхні напівпровідника знаходиться шар власного оксиду 1. Адсорбовані молекули NH_3 іонізуються, так що на поверхні оксиду утворюється шар позитивних іонів. Під дією електричного поля іонів викривлюється збіднений шар 3 і формується канал 4 з електронною провідністю.

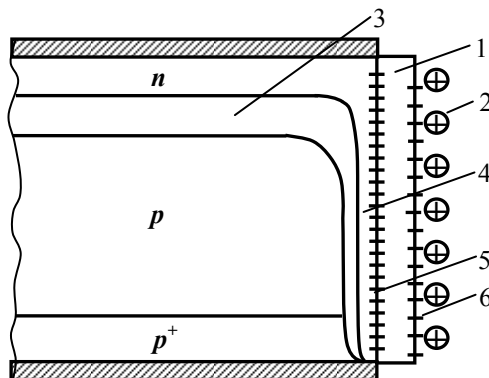


Рис. 2. Схема р-п структури в донорному газі: 1 – шар оксиду; 2 – іони; 3 – збіднений шар; 4 – провідний канал; 5 – поверхневі (швидкі) центри; 6 – стани на поверхні оксиду (повільні центри)

Проведено комп'ютерні розрахунки розподілу електричного поля, концентрацій електронів і дірок, темпу рекомбінації, густини струму та додаткового струму, зумовленого адсорбцією молекул NH_3 . Використовувалися рівняння Пуассона для електричного поля та рівняння неперервності для електронів і дірок, а також граничні умови для потенціалу і для електронної та діркової компонент струму [7]. Для напруженості поля на поверхні напівпровідника використовували вираз

$$E = e / (\varepsilon\varepsilon_0)(Q_s + \Delta Q_s), \quad (3)$$

де ε_0 — електрична стала; ε — діелектрична проникність напівпровідника; ΔQ_s — поверхнева густина заряду адсорбованих іонів. Густина заряду на поверхневих рівнях визначалась як

$$Q_s = eN_s(p - n) / (p + n + 2n_i), \quad (4)$$

де N_s — поверхнева густина даних рівнів; p , n — концентрації електронів і дірок на поверхні; n_i — концентрація власних носіїв заряду.

Розрахунки велися з використанням методу скінченних елементів. Чисельні параметри моделі наведено в [7]. На відміну від [7], де розглянуто випадок малих значень густини адсорбованих іонів, тобто $\Delta Q_s \ll Q_s$, розрахунки виконано для широкого інтервалу значень даної величини $\Delta Q_s \leq 3Q_s$.

Двовимірні чисельні розрахунки показали, що наявність експоненціальної ділянки на ВАХ р-п переходів, які знаходились в парах NH_3 при порушенні сильної нерівності $\Delta Q_s \ll Q_s$, не пов'язана з поверхневою рекомбінацією носіїв заряду. Поверхневий канал з електронною провідністю, який утворюється в р-області внаслідок адсорбції молекул аміаку, перешкоджає руху дірок до поверхні, так що темп поверхневої рекомбінації зменшується.

Наявність, при певних умовах, експоненціальної ділянки ВАХ поверхневого струму пояснюється взаємодією інжекційних процесів на бар'єрі між об'ємною п-областю і каналом та на бар'єрі між каналом і приконтактним шаром р-області. Перший бар'єр можна представити, як n^+ -п перехід, у якому струм визначається виразом

$$I(\Delta\varphi_1) = I_1^0 \exp[-\Delta\varphi_1 / (n_1 kT)], \quad (5)$$

де I_1^0 — стала; $\Delta\varphi_1$ — зміна висоти даного потенціального бар'єру внаслідок прикладення напруги (вважається $\Delta\varphi_1 > kT$); $n_1 = 1$. Струм

у другому переході (між каналом і приконтактним шаром), що визначається рекомбінаційними процесами, можна описати аналогічною формулою

$$I(\Delta\varphi_2) = I_2^0 \exp[-\Delta\varphi_2 / (n_2 kT)], \quad (6)$$

де I_2^0 — стала; $\Delta\varphi_2$ — зміна висоти даного потенціального бар'єру внаслідок прикладення напруги (при цьому $\Delta\varphi_2 > kT$); параметр $n_2 \geq 1$ характеризує рекомбінацію носіїв заряду в даному переході. Врахувавши рівність

$$\Delta\varphi_2 + \Delta\varphi_2 = -q(V - \Delta V), \quad (7)$$

де V — прикладена до р-п переходу напруга; ΔV — падіння напруги на каналі, при виконанні нерівності

$$\Delta V \ll V \quad (8)$$

отримаємо для ВАХ поверхневого струму вираз (1), у якому треба покласти

$$n_i = (n_1 + n_2) / n_1. \quad (9)$$

Із виразу (9) видно, що ВАХ поверхневого струму, обумовленого формуванням провідного каналу, може мати експоненціальну ділянку з коефіцієнтом неідеальності $n \geq 2$.

Експоненціальна ділянка ВАХ відповідає інжекційному підсиленню поверхневого струму, обумовленого адсорбцією молекул аміаку. Електричне поле іонів індукує створення поверхневого каналу з електронною провідністю. Інкєкція електронів із п-області в канал веде до експоненціального зростання концентрації електронів у каналі при підвищенні напруги. Інкєкційне підсилення прямого поверхневого струму спостерігалось на р-п переходах з градієнтом концентрації домішок від $1,5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-4}$ до $5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-4}$.

Двовимірні розрахунки дають більш точні залежності $I(V)$, що узгоджуються з вимірними ВАХ, а також визначають межі застосовності виразу (1) для опису ВАХ поверхневого струму в р-п переході. Нижня межа пов'язана зі збільшенням опору каналу, що веде до порушення сильної нерівності (8) при зменшенні щільності адсорбованих позитивних іонів та прикладеної напруги. Верхня межа обумовлена зростанням ролі падіння напруги ΔV на каналі при достатньо малій висоті бар'єру між п-областю і каналом при високій щільності адсорбованих позитивних іонів та достатньо високій прикладеній напрузі.

Таким чином, розрахунки показують, що ВАХ поверхневого струму в р-п переходах повинні відхилятися від експоненти при низьких і високих значеннях напруги, а також при високих концентраціях донорних молекул у навколишньому середовищі. Дані висновки якісно пояснюють хід кривих 2–6 на рис. 1а.

Криві 2' – 6' на рис. 1б ілюструють зміни ВАХ прямого струму при зміні парціального тиску аміаку в навколишній атмосфері для сильно легованого р-п переходу, в якому градієнт концентрації домішок складав a_M . Порівняння кривих 2'–6' на рис. 1б з кривими 2–6 на рис. 1а показує, що при підвищенні рівня легування поверхневий струм в р-п переході, індукований адсорбцією аміаку, зменшується. Розрахунки пояснюють причину даної закономірності. Із схеми р-п переходу, наведеної на рис. 2, видно, що в однорідній частині поверхневого провідного каналу виконується рівність

$$N_{ns} = N_i - N_{sf} - N_{ss} - N_{sA}, \quad (10)$$

де N_{ns} – число вільних електронів у каналі на 1см^2 поверхні; N_i – поверхнева щільність адсорбованих іонів; N_{sf} і N_{ss} – значення щільності швидких і повільних акцепторних поверхневих центрів; N_{sA} – число акцепторів у приповерхневому шарі просторового заряду 1см^2 поверхні, тобто

$$N_{sA} = N_A w_s, \quad (11)$$

де N_A – концентрація акцепторів у р-області; w_s – товщина поверхневого шару просторового заряду. Із формул (10) і (11) видно, що підвищення концентрації акцепторів у р-області веде до зменшення числа вільних електронів у каналі, а значить, і поверхневого струму при фіксованій щільності адсорбованих іонів.

Криві 2'–6' на рис. 1б не мають експоненціальних ділянок. Як указано вище, це можна пояснити впливом високого опору каналу, зумовленого низькою концентрацією електронів у каналі.

На рис. 3 наведено ВАХ зворотного струму двох р-п переходів зі значеннями градієнта концентрації домішок $a_m = 1,5 \cdot 10^{21} \text{см}^{-4}$ і $a_M = 4,5 \cdot 10^{23} \text{см}^{-4}$, відповідно. Криві 1 і 1' на рис. 3а і 3б виміряні в сухому повітрі. Крива 1, отримана на слабо легованому зразку, має ділянку насичення при $V > 1\text{В}$. На даному зразку спостерігався лавинний пробій при $V = -30\text{В}$. Крива 1', отримана на сильно легованому

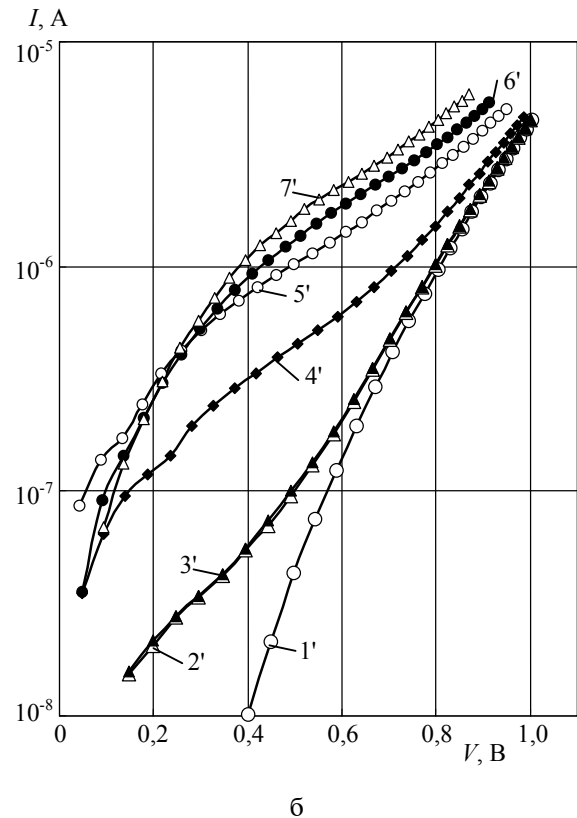
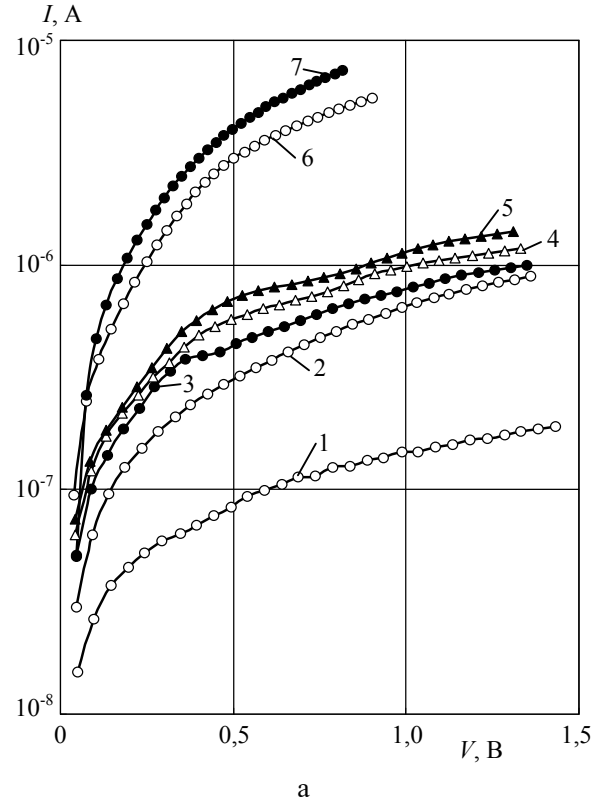


Рис. 3. ВАХ зворотного струму р-п переходів з градієнтом концентрації домішок $1,5 \cdot 10^{21} \text{см}^{-4}$ (а) і $4,5 \cdot 10^{23} \text{см}^{-4}$ (б). Вимірювання проведено в сухому повітрі (криві 1, 1'), в парах води (2, 2') та аміаку при парціальному тиску: 3, 3' – 5Па; 4, 4' – 20Па; 5, 5' – 50Па; 6, 6' – 100Па; 7, 7' – 200Па

p-n переході, має чітко виражену експоненціальну ділянку, яка пов'язана з тунельним пробоєм. Криві 2 і 2' отримані на тих же зразках, поміщених у пари води з парціальним тиском 2500Па. Видно, що адсорбція молекул води набагато сильніше впливає на поверхневий струм у слабо легovanому p-n переході, ніж у сильно легovanому. Зіставлення кривих 3–7 на рис. 3а і кривих 3'–7' на рис 3б показує, що зворотний струм суттєво більше зростає при адсорбції молекул аміаку у слабо легovanому p-n переході, ніж у сильно легovanому зразку. Криві 2' – 7' мають експоненціальні ділянки, які свідчать, що зворотний поверхневий струм, індукований адсорбцією донорних молекул, у сильно легovanому p-n переході має тунельну природу.

На рис. 4 показана залежність зворотного поверхневого струму δI в двох p-n переходах, індукованого адсорбцією молекул аміаку, від парціального тиску парів NH_3 . Криві 1 і 2 отримані на слабо легovanому p-n переході при двох значеннях напруги, а криві 3 і 4 — на сильно легovanому зразку. Криві $\delta I(P)$ мають три ділянки: а) область слабкої залежності $\delta I(P)$ при низьких значеннях парціального тиску аміаку; б) проміжну ділянку різкого зростання струму; в) ділянку слабкої залежності $\delta I(P)$ при високих значеннях тиску.

Двовимірні розрахунки показали, що на першій ділянці залежності $\delta I(P)$ відбувається заповнення електронами поверхневих рівнів. Якщо дані рівні (квазі)дискретні, значне зростання концентрації електронів у поверхневому каналі, що відповідає другій ділянці залежності $\delta I(P)$, можливе тільки після заповнення цих рівнів, тобто при виконанні нерівності

$$N_i > N_{sf} + N_{ss}. \quad (12)$$

При одночасному виконанні даної нерівності та умови

$$n_s \ll N_A, \quad (13)$$

де n_s — поверхнева концентрація електронів у каналі, друга ділянка кривої $\delta I(P)$ відповідає експоненті. Межа між першою і другою ділянками кривої $\delta I(P)$ відповідає точці А на рис. 4.

Третя ділянка залежності $\delta I(P)$ відповідає нерівності

$$n_s > N_A. \quad (14)$$

У даному випадку основний внесок у приповерхневий просторовий заряд дають електрони в с-зоні, і рівність (10) спрощується до

$$N_{ns} \approx N_i. \quad (15)$$

Межа між другою і третьою ділянками кривої $\delta I(P)$ відповідає точці В на рис. 4.

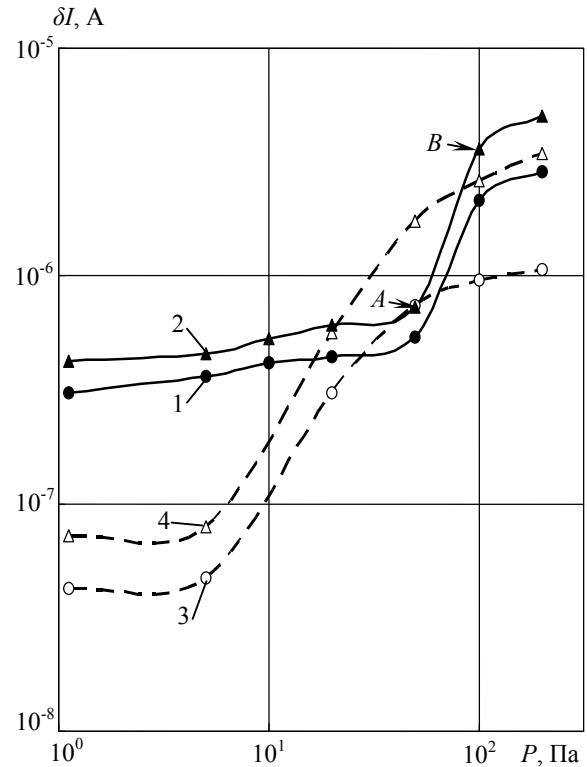


Рис. 4. Залежність поверхневого струму p-n переходів з градієнтом концентрації домішок $1,5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-4}$ (1, 2) і $4,5 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-4}$ (3, 4) від парціального тиску аміаку. Вимірювання проведено при значеннях напруги $V = -0,4 \text{ В}$ (1, 3) і $V = -0,8 \text{ В}$ (2, 4)

Слід відзначити, що на третій ділянці кривої $\delta I(P)$, у відповідності з нерівністю (14) і рівністю (15), поверхневий струм не повинен залежати від рівня легування p-області. Зіставлення кривих 1 і 2 з кривими 3 і 4 рис. 4 показує, що в області високих значень тиску аміаку значення $\delta I(P)$ для сильно і слабо легованих зразків знаходяться в межах одного порядку величини, в той час як градієнт концентрації домішок відрізняється в 300 разів.

Перехід від другої до третьої ділянки кривої $\delta I(P)$ відповідає рівності

$$n_s = N_A. \quad (16)$$

Дана рівність справедлива для різкого p-n переходу. Для плавного p-n переходу можна отримати деякі приблизні оцінки, підставивши в формулу (16) концентрацію акцепторів на межі шару просторового заряду. Для кремнієвого p-n переходу з градієнтом концентрації домішок $a_m = 1,5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-4}$ отримаємо

$N_A = 2,4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. При товщині провідного каналу $w_c \approx 20 \text{ нм}$ оцінка поверхневої щільності адсорбованих іонів дає $N_i \approx 0,5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ при парціальному тиску аміаку $P=200 \text{ Па}$. Точка A кривої 2 на рис. 4 відповідає рівності

$$N_i = N_{sf} + N_{ss}. \quad (17)$$

Якщо вважати, що при низьких концентраціях парів аміаку поверхнева щільність адсорбованих іонів пропорціональна до парціального тиску NH_3 , то отримуємо для щільності поверхневих центрів $N_{sf} + N_{ss} \approx 1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Слід відзначити, що поверхня досліджених зразків піддавалась травленню для зменшення щільності поверхневих центрів.

Проведені розрахунки не враховували тунельних струмів і тому не застосовні до кривих 3 і 4 рис. 4. Дані криві мають протяжну ділянку сильної залежності $\delta I(P)$. Різке, надлінійне зростання зворотного струму з тиском аміаку, як і експоненціальне зростання даного струму з напругою (на кривих 2'–7' рис. 3) можна пояснити тунельним підсиленням поверхневого струму: при підвищенні парціального тиску NH_3 , або ж напруги товщина переходу канал–р-контакт зменшується, що веде до різкого зростання тунельного струму.

Проведені дослідження дозволяють зробити такі висновки:

1. Чутливість кремнієвих р-п переходів з градієнтом концентрації домішок у дослідженому діапазоні від $1,5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-4}$ до $4,5 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-4}$ як газових сенсорів обумовлена формуванням поверхневого каналу з електронною провідністю під впливом електричного поля адсорбованих позитивних іонів.

2. У р-п переходах з градієнтом концентрації до $5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-4}$ при прямому зміщенні відбувається інжекційне підсилення поверхневого струму, індукованого адсорбцією іонів. У р-п структурах з більшим градієнтом концентрації роль інжекційного підсилення незначна внаслідок великого падіння напруги на високоомному поверхневому каналі.

3. У р-п переходах з градієнтом концентрації понад $1 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-4}$ при зворотному зміщенні відбувається тунельне підсилення поверхневого струму.

Результати дослідження дозволяють оптимізувати параметри структури кремнієвих р-п переходів як газових сенсорів.

Література

1. Птащенко А. А. Влияние газовой среды на поверхностный ток в р-п гетероструктурах на основе GaAs–AlGaAs / А. А. Птащенко, Е. С. Артеменко, Ф. А. Птащенко // Физика и химия твердого тела. — 2001. — Т. 2, № 3. — С. 481–485.
2. Effect of ammonia vapors on the surface morphology and surface current in p-n junctions on GaP / О. О. Ptashchenko, О. S. Artemenko, М. L. Dmytruk [et al.] // Photoelectronics. — 2005. — No. 14. — P. 97–100.
3. Газові сенсори на основі оксиду цинку (огляд) / М. Е. Бугайова, В. М. Коваль, В. Й. Лазаренко [та ін.] // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. — 2005. — № 3. — С. 34–42.
4. Про природу чутливості до аміаку газових сенсорів на основі структур надтонка титанова плівка — кремній / О. Й. Бомк, Л. Г. Ільченко, В. В. Ільченко [та ін.] // Укр. фіз. журн. — 1999. — Т. 44, № 9. — С. 759–763.
5. Сенсори амміака на основі діодов Pd-n-Si / В. И. Балюба, В. Ю. Грицьк, Т. А. Давыдова [и др.] // Физика и техника полупроводников. — 2005. — Т. 39, № 2. С. 285–288.
6. Ptashchenko F. O. Characteristics of silicon transistors as gas sensors. // Photoelectronics. — 2010. — No. 19. — P. 18–21.
7. Птащенко О. О. Формування поверхневого провідного каналу в р-п структурах при адсорбції іонів / О. О. Птащенко, Ф. О. Птащенко // Вісник ОДУ, сер. Фіз. — мат. науки. — 2003. — Т. 8, № 2. — С. 226–233.
8. Птащенко О. О. Вплив парів аміаку на поверхневий струм в р-п переходах на основі напівпровідників A^3B^5 / О. О. Птащенко, О. С. Артеменко, Ф. О. Птащенко // Журнал фізичних досліджень. — 2003. — Т. 7, № 4. — С. 419–425.
9. Птащенко Ф. О. Вплив парів аміаку на поверхневий струм у кремнієвих р-п переходах // Вісник ОНУ, сер. Фізика. — 2006. — Т. 11, № 7. — С. 116–119.
10. Ptashchenko A. A. Tunnel surface recombination in optoelectronic device modelling / А. А. Ptashchenko, F. A. Ptashchenko // Proc. SPIE. — 1997. — V.3182. — P.145–149.