

Вплив рівня легування на газову чутливість кремнієвих *p-n* переходів

О.О. Птащенко^{1*}, Ф.О. Птащенко², В.Р. Гільмутдінова¹, О.С. Кирничук¹

¹ Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, вул. Дворянська, 2, 65026 Одеса, Україна

² Національний університет "Одеська морська академія", вул. Дідріхсона, 8, 65029 Одеса, Україна

(Одержано 26.12.2017, у відредагованій формі – 06.06.2018, опубліковано online 25.06.2018)

Експериментально досліджено характеристики кремнієвих дифузійних *p-n* переходів як сенсорів парів води і аміаку в широкому діапазоні значень градієнта концентрації домішок *a*. Встановлено, що зменшення величини *a* від $6 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-4}$ до $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-4}$ знижує поріг чутливості P_m *p-n* структур до парів NH_3 (тобто, мінімальний парціальний тиск парів, який можна зареєструвати) на два порядки, до значень біля 0,5 Па. Ця величина значно нижча, ніж у мембран із мезопористого кремнію і кремнієвих нанодротів, виготовлених із пластин з концентрацією домішки бору 10^{18} см^{-3} . Розкид порогу чутливості серед досліджених зразків пояснюється впливом неконтрольованих поверхневих центрів. Обробка зразків послідовно у HF і воді різко підвищує поріг чутливості, а витримка у водному розчині Na_2S значно знижує його.

Ключові слова: Кремній, *p-n* перехід, Газовий сенсор, Аміак, Поріг чутливості, Рівень легування.

DOI: [10.21272/jnep.10\(3\).03022](https://doi.org/10.21272/jnep.10(3).03022)

PACS numbers: 07.07.Df, 68.47.Fg

1. ВСТУП

Кремнієві структури з поверхневим бар'єром для носіїв заряду перспективні для створення газових сенсорів, що обумовлено високим ступенем розвитку кремнієвих технологій, а також технологічною сумісністю сенсорних елементів з мікроелектронними елементами для підсилення і перетворення сигналів. Для підвищення чутливості сенсорів використовуються мембрани із мезопористого кремнію [1, 2]; сенсори на основі кремнієвих нанодротів [3, 4] мають малі розміри. Для даних структур можна знехтувати розмірним квантуванням енергії електронів [5], тобто закономірності електронних явищ в них такі ж, як у макроскопічних кристалах.

Зручними модельними об'єктами для дослідження цілого комплексу проблем, пов'язаних з розробкою високочутливих і стабільних газових сенсорів, є кремнієві *p-n* переходи [6]. Ціла низка явищ, що спостерігались на вказаних вище структурах, узгоджуються з результатами, отриманими на *p-n* переходах. Так, адсорбція вологих парів аміаку вела, при підвищенні парціального тиску NH_3 , до зменшення концентрації дірок у наноструктурах з *p*-провідністю [1, 3], до появи електронної провідності [7], зростання концентрації електронів і виродження електронів у зоні провідності [7]. У *p-n* переходах при адсорбції вологих парів NH_3 на поверхні *p* області формувалася канал з електронною провідністю [6] і, при високих концентраціях аміаку, вольт-амперна характеристика (ВАХ) ставала такою ж, як у тунельних діодів, що свідчить про виродження електронів у поверхневому каналі [9]. Для мембран із мезопористого кремнію характерна інерційність зміни провідності при зміні складу навколишньої атмосфери [6], що спостерігається і на *p-n* переходах, при приблизно таких же значеннях часу релаксації. Як у нанопористих структурах, так і на поверхні *p-n* переходів відбуваються деградаційні процеси, які мають спільну природу.

Електрохімічне формування кремнієвих мезопо-

рих структур звичайно потребує наявності у пластині дірок (бажано, у концентрації порядку 10^{18} см^{-3}) [1-4]. При зміні концентрації акцепторів у пластині для отримання наноструктур необхідні зміни технології [1, 2]. Тому дослідження впливу концентрації акцепторів у кремнію на характеристики отримуваних мезопористих сенсорів натикається на певні труднощі. В той же час технологія кремнієвих *p-n* переходів різного рівня легування добре вивчена. Тому дослідження впливу рівня легування на характеристики *p-n* переходів як газових сенсорів актуальне не тільки для оптимізації структури відповідних сенсорів (які мають субміліметрові розміри), але й для розробки сенсорів на основі мезопористого кремнію та кремнієвих нанодротів. Таке дослідження і є предметом даної роботи.

2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Досліджувалися кремнієві *p-n* переходи, отримані дифузиею фосфору в пластини орієнтації (111), леговані бором. Зразки кубічної форми з довжиною ребра 250 мкм і з металевими контактами отримувалися сколюванням. Вольт-фарадні характеристики бар'єрної ємності (ВФХ) вимірювалися на установці на основі моста Е10-2 при частоті 1 МГц. Залежність $C^{-3}(V_r)$, де C – ємність, V_r – напруга зворотного зміщення, для досліджених *p-n* переходів була лінійною, що свідчить про лінійний розподіл електрично активних домішок у околі збідненого шару [10]. Для досліджень підбиралися зразки з градієнтом концентрації домішок у діапазоні від $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-4}$ до $6 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-4}$.

Вимірювалися ВАХ прямого і зворотного струмів у зразках за допомогою автоматизованої установки на основі приладу Е14-140-МД. При вимірюваннях зразок поміщався послідовно у контейнер з сухим повітрям, з насиченими парами води, або з насиченими парами аміаку над його водним розчином. Па-

*aptash@onu.edu.ua

рціальний тиск парів аміаку змінювався в інтервалі 0-12 кПа за рахунок зміни концентрації NH₃ у його водному розчині.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На рис. 1 криві 1 і 2 представляють ВАХ кремнієвого *p-n* переходу, виміряні в сухому повітрі та в парах аміаку з парціальним тиском 50 Па, відповідно. Ординати точок кривої 3 отримано як різницю ординат відповідних точок кривих 2 і 1, так що дана крива являє собою ВАХ додаткового поверхневого струму (ДПС) в *p-n* переході, обумовленого адсорбцією парів аміаку.

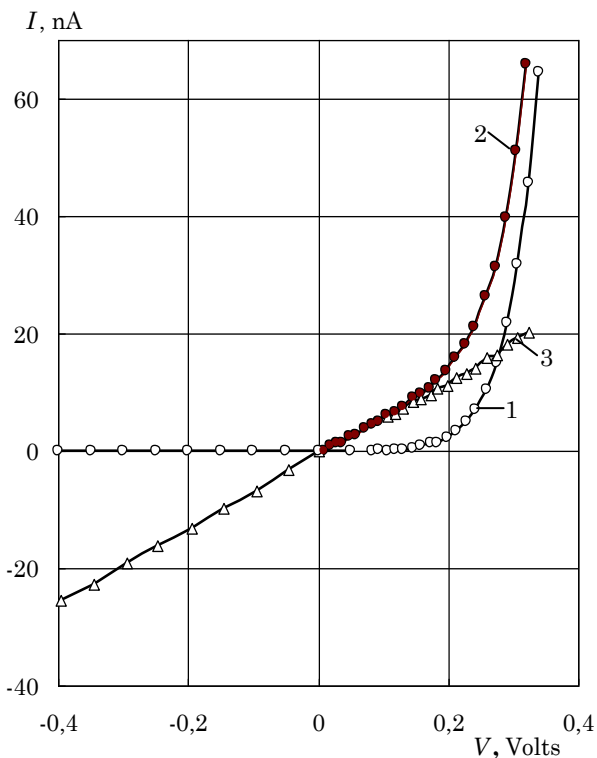


Рис. 1 – ВАХ кремнієвого *p-n* переходу, виміряні в сухому повітрі (1) та в парах аміаку (2). Крива 3 – ВАХ додаткового поверхневого струму, обумовленого адсорбцією парів NH₃

Зміну струму в кремнієвих *p-n* переходах під дією парів аміаку можна використати для створення сенсора даних парів. Лінійність кривої 3 відповідає моделі [6], яка враховує, що при адсорбції вологих парів аміаку утворюється поверхневий провідний канал з електронною провідністю, який закорочує *p-n* перехід.

Чутливість сенсора визначалася за виразом [11]

$$S = \Delta I / \Delta P, \quad (1)$$

де ΔI – зміна струму в *p-n* переході при зміні тиску парів аміаку на ΔP при фіксованій напрузі V .

При прямому зміщенні *p-n* переходу об'ємний

струм експоненціально зростає з напругою, так що при напрузі $V > 0,4$ В виконується сильна нерівність

$$I \equiv I_2 - I_1 \approx I_2, I_1, \quad (2)$$

де I – величина ДПС, тобто сигналу; I_1, I_2 – значення струму в сухому повітрі та в парах аміаку, відповідно. При виконанні нерівності (2) різко зростають похибки величини I , тобто сигналу. При зворотному зміщенні цього немає, і можна отримувати більший сигнал, а значить, більшу чутливість за рахунок підвищення напруги.

На рис. 2 показана залежність зворотного струму в кремнієвому *p-n* переході, обумовленого адсорбцією вологих парів аміаку, від парціального тиску парів NH₃. На основі даної залежності можна визначити чутливість сенсора і поріг чутливості.

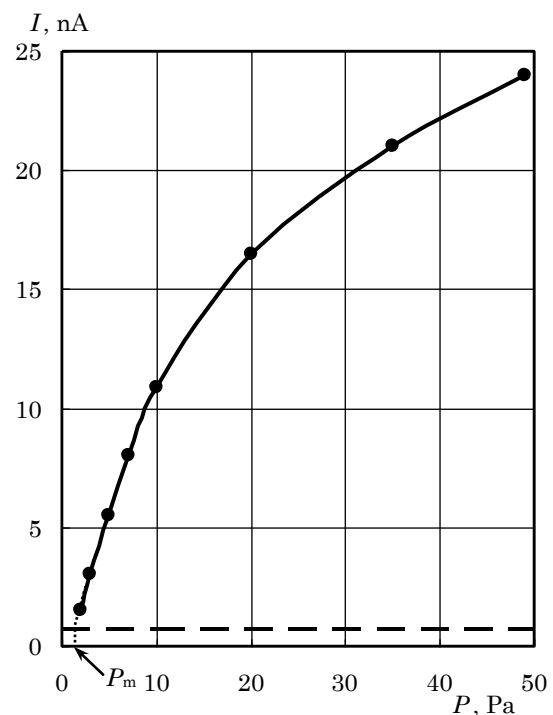


Рис. 2 – Залежність зворотного струму в *p-n* переході від парціального тиску парів аміаку при $V = -1,5$ В. Штрихова лінія відповідає струму в насичених парах води

Із рис. 2 видно, що нахил кривої $I(P)$, який, згідно з формулою (1), визначає чутливість даного зразка, залишається практично сталим при значеннях парціального тиску P парів аміаку до 10 Па і зменшується при подальшому зростанні тиску. Аналіз кривої $I(P)$ при $P \leq 10$ Па дає чутливість $S = 1,25$ нА при напрузі $V = -1,5$ В.

Внаслідок лінійності залежності ДПС від напруги (лінійності кривої 3 на рис. 1) можна використовувати поняття питомої чутливості (specific sensitivity), яка характеризує даний зразок:

$$S_s = S / |V|. \quad (3)$$

Питома чутливість не залежить від напруги і знаку зміщення й складає для даного зразка 0,71 нА / Па / В.

Поріг чутливості, тобто найменше значення парціального тиску парів аміаку P_m , яке може бути зафіксоване даним сенсором, визначалось за точкою перегину лінійного продовження (позначеного пунктиром) кривої $I(P)$ на рис 2 з горизонтальною штриховою лінією, яка відповідає струму, вимірюваному в насичених парах води. Для даного зразка отримано значення $P_m = 1,5$ Па. Мінімальне значення порогу чутливості 0,4 Па було отримано на зразку з градієнтом концентрації домішок $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-4}$.

На рис. 3 показано залежність порогу чутливості P_m досліджених p - n переходів від градієнта концентрації a електрично-активних домішок.

Градієнт концентрації домішок a визначався із аналізу ВФХ даного p - n переходу [10]. Будувалася залежність $C^{-3}(V_r)$, де C – бар’єрна ємність p - n структури; V_r – модуль напруги зворотного зміщення. Використовувалось співвідношення [10]

$$a = \frac{12}{q(\epsilon_0 \epsilon)^2 \cdot s^3} \left[\frac{d(C^{-3})}{dV_r} \right]^{-1},$$

де q – заряд електрона; ϵ_0 – електрична стала; $\epsilon = 11,8$ – відносна діелектрична проникність кремнію; S – площа p - n переходу.

Для аналізу отриманих результатів використовувалася схема p - n переходу [6], показана на рис. 4. Враховувалось, що бокова поверхня кристалу покрита шаром власного оксиду 2. На поверхні цього шару знаходяться іонізовані донори 3, сформовані внаслідок адсорбції молекул аміаку. Під дією їхнього поля збіднений шар 4 викривлюється і, при достатній поверхневій щільності вказаних донорів, утворюється провідний канал 5 з електронною провідністю. В однорідній ділянці каналу виконується рівність [6]

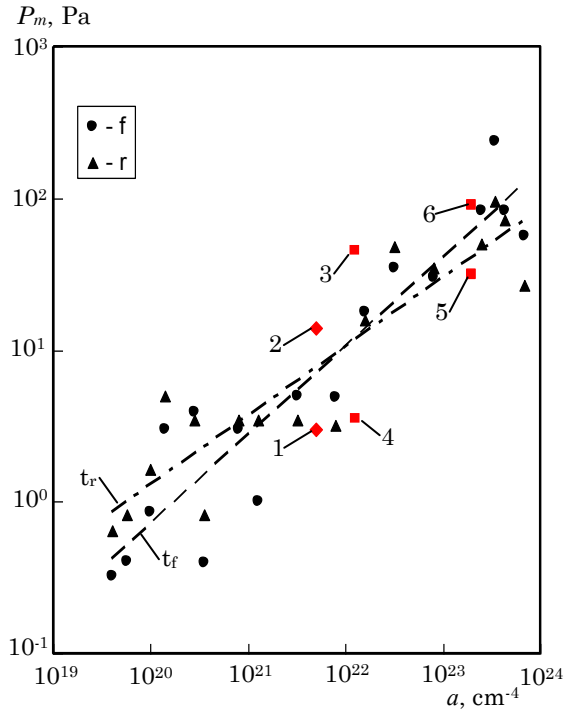
$$N_{ns} = N_i^+ - N_{sa}^- - N_{sf}^- - N_{ss}^- + N_{sd}^+, \quad (4)$$

де N_{ns} – число вільних електронів у каналі на 1 см^2 поверхні; N_i^+ – поверхнева щільність адсорбованих іонів; N_{sa}^- – число іонізованих акцепторів у приповерхневому шарі просторового заряду на 1 см^2 поверхні, тобто

$$N_{sa}^- = N_A(w_d + w_c), \quad (5)$$

де N_A – концентрація акцепторів у p -області; w_d і w_c – товщини приповерхневого збідненого шару і провідного каналу, відповідно; N_{sf}^- і N_{ss}^- – значення щільності іонізованих швидких і повільних акцепторних поверхневих центрів, відповідно; N_{sd}^+ – щільність іонізованих поверхневих донорних центрів (як швидких, так і повільних), не пов’язаних з адсорбованими молекулами.

Рис. 3 – Залежність порогу чутливості p - n переходів до



парів аміаку від градієнта концентрації домішок: f – при прямому зміщенні; r – при зворотному зміщенні; t_f , t_r – відповідні тренди

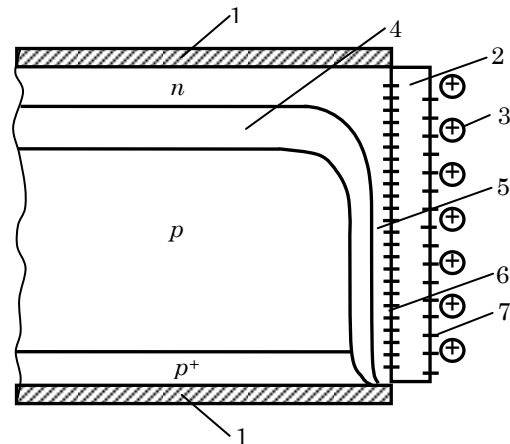


Рис. 4 – Схема p - n структури, що знаходиться в донорному газі: 1 – металеві контакти; 2 – шар оксиду; 3 – адсорбовані іони; 4 – збіднений шар; 5 – провідний канал; 6 – поверхневі (швидкі) центри; 7 – стани на поверхні оксиду (повільні центри)

Умовою формування провідного каналу є нерівність

$$N_{ns} > 0. \quad (6)$$

Із формули (4) видно, що для виконання нерівності (6) необхідно досягнення нерівності

$$N_i^+ > N_{im}^+ = N_{sa}^- + N_{sf}^- + N_{ss}^- - N_{sd}^+. \quad (7)$$

Таким чином, існує порогове (мінімальне) значення поверхневої щільності адсорбованих іонів N_{im}^+ ,

а значить – і парціального тиску P_m парів NH_3 , необхідне для утворення каналу. Із нерівності (7) видно, що при фіксованих значеннях N_{sf}^-, N_{ss}^- і N_{sd}^+ величина N_{im}^+ (а значить, і P_m) повинна лінійно залежати від числа іонізованих акцепторів N_{sa}^- у приповерхневому шарі просторового заряду на 1 см^2 поверхні. А ця величина, згідно з виразом (5), залежить від концентрації акцепторів у p -області N_A .

На рис. 3 точки, позначені маркерами f і r , дають, відповідно, значення порогу чутливості при прямому зміщенні $V_f = 0,3 \text{ В}$ та при зворотному зміщенні $V_r = -0,3 \text{ В}$. Штриховою лінією t_f і штрихпунктирною лінією t_r показано, відповідно, тренди для залежностей $P_m(a)$ при прямому і зворотному зміщеннях. Із рис. 3 видно, що при низьких рівнях легування (при малих значеннях величини a) середнє значення порогу чутливості P_m , отримане при прямому зміщенні, менше, ніж при зворотному зміщенні. Цей ефект можна пояснити за врахуванням результатів роботи [12]. При низькому рівні легування кремнієвих p - n переходів проявляється додатковий механізм газової чутливості, пов'язаний зі зростанням поверхневого струму, обумовленого рекомбінацією електронів і дірок через швидкі центри. При підвищенні числа іонізованих адсорбованих донорів N_i^+ зростає величина N_{sf}^- , що веде до збільшенні темпу рекомбінації дірок при прямому зміщенні. Цей ефект проявляється вже при величинах N_i^+ , ще недостатніх для формування провідного каналу.

Слід відзначити, що вплив знаку зміщення на величину P_m зменшується при високих значеннях градієнта концентрації домішок.

Нахил трендів, тобто величина

$$D = \Delta(\lg P_m) / \Delta(\lg a) \quad (8)$$

складає 0,58 і 0,45 для прямого і зворотного зміщень, відповідно, що дає середнє значення $\bar{D} = 0,51$. Значення $D = 0,5$ можна отримати в спрощеній моделі, яка не враховує наявності поверхневих центрів, тобто при заміні рівності (4) на

$$N_{ns} = N_i^+ - N_{sa}^- \quad (9)$$

Поблизу порогу чутливості, тобто, при низьких значеннях числа електронів у каналі N_{ns} рівність (9) перетворюється в

$$N_i^+ \approx N_{sa}^- \quad (10)$$

Тепер врахуємо, що провідний канал утворюється, коли поверхневий вигин зон в p -області досягає певного значення ΔE . Такому вигину зон відповідає число іонізованих акцепторів у приповерхневому шарі просторового заряду на 1 см^2 поверхні [10]

$$N_{sa}^- = \sqrt{\epsilon_0 \epsilon N_A \Delta E} / q \quad (11)$$

Якщо врахувати (10) і те, що при низьких значеннях парціального тиску парів аміаку (поблизу P_m) щільність адсорбованих іонізованих молекул N_i^+ пропорційна до величини P , то із (11) отримаємо $P_m \propto \sqrt{N_A}$. Для отримання p - n переходів з більшим градієнтом концентрації домішок a використовувалися пластини з більшим значенням концентрації акцепторної домішки – бору N_A , що пояснює, згідно з виразом (8), середню величину нахилу трендів $\bar{D} \approx 0,5$ на рис 3.

Із рис. 3 також видно, що експериментально отримана залежність $P_m(a)$ має дуже великий розкид точок, який можна пояснити розкидом щільності поверхневих центрів, тобто величин N_{sf}^-, N_{ss}^- і N_{sd}^+ у досліджених зразках.

Із нерівності (7) видно, що підвищення числа поверхневих акцепторів повинно вести до зростання порогу чутливості P_m , а донори повинні зменшувати P_m . Для підтвердження ролі поверхневих центрів у зміні величини P_m досліджувався вплив обробки зразків у HF (38%) протягом 120 с, наступного промивання у дистильованій воді протягом 300 с і сушіння у струмені сухого повітря протягом 2 годин на їхні характеристики як сенсорів парів аміаку. Така обробка веде до формування на поверхні зразка оксидного шару з великою щільністю глибоких поверхневих рівнів [13]. Точки 1 і 2 на Рис. 3 дають значення порогу чутливості одного із зразків до і після вказаної обробки, відповідно. Точки 3 і 4 отримані на іншому зразку, відповідно, до і після обробки в розчині Na_2S , яка веде до поверхневого легування атомами сірки, що є донором у кремнію [14]. Видно, що введення глибоких поверхневих центрів підвищило поріг чутливості на порядок. Поверхнєве легування p - n переходів донорами, навпаки, різко знизило поріг чутливості до парів аміаку.

Слід відзначити, що вказані обробки неможливо використовувати для стандартизації спектру поверхневих рівнів, тому що центри, введені при таких обробках, виявилися нестабільними.

Точки 5 і 6 на рис. 3 отримано із літературних даних з характеристик сенсорів аміаку на основі мембран із мезопористого кремнію [5] та кремнієвих нанодротів [3], відповідно. При підвищенні парціального тиску парів аміаку P поверхневий струм у вказаних структурах спочатку зменшувався (внаслідок зменшення концентрації власних носіїв заряду – дірок), і тільки при подальшому зростанні величини P починалось збільшення струму. Значення тиску P , що відповідало мінімуму кривої $I(P)$ в роботах [3, 5], бралось як поріг чутливості. Величина a бралась такою, щоб концентрація домішок на межі збідненого шару і p -області досліджених нами структур відповідала концентрації акцепторів $N_A = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ у вихідних кремнієвих пластинах робіт [3, 5]. Із Рис. 3 видно, що значення порогу чутливості сенсорів на основі вказаних наноструктур і p - n переходів узгоджуються між собою.

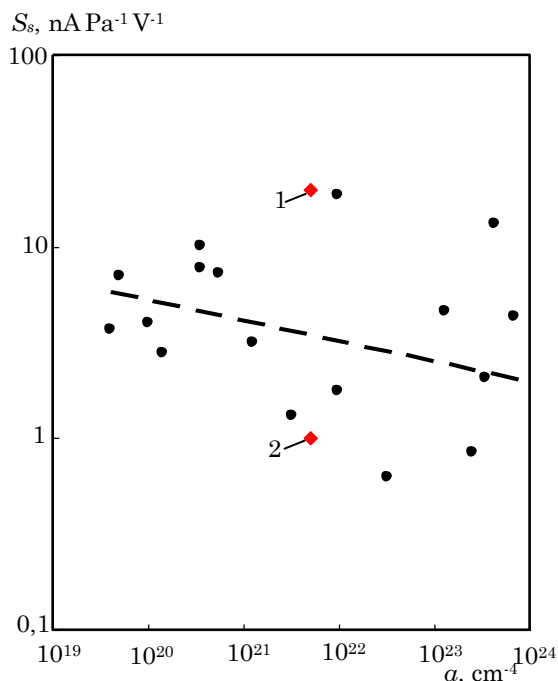


Рис. 5 – Залежність питомої чутливості до парів аміаку від градієнта концентрації домішок в кремнієвих p - n переходах

Рис. 5 ілюструє вплив градієнта концентрації домішок a на питому чутливість S_s , яка визначається формулою (3), кремнієвих p - n переходів як сенсорів парів аміаку. Штрихова лінія дає тренд залежності $S_s(a)$. При зміні градієнта концентрації в 10^4 разів середня питома чутливість сенсорів зменшується лише в 3 рази, тобто вплив рівня легування p - n переходу на чутливість сенсора парів аміаку незначний. В той же час розкид значень чутливості при однаковому градієнті концентрації a сягає одного порядку. Це означає, що основною причиною розкиду значень чутливості сенсорів є розкид щільності поверхневих центрів.

Для перевірки правильності даного твердження вивчався вплив описаної вище обробки зразків у розчині HF та наступної промивки у воді і сушіння на характеристики сенсорів. Точки 1 і 2 на рис. 5 представляють питому чутливість одного із зразків до і після указаної обробки, відповідно. Обробка (вве-

дення глибоких поверхневих центрів [13]) зменшила чутливість сенсора в 14 разів. Таким чином, основним фактором, що впливає на чутливість сенсорів (звичайно ж, після досягнення порогу чутливості) є щільність електрично активних поверхневих центрів. Це можна пояснити так: після формування провідного каналу подальше виконання рівності (4) при підвищенні концентрації парів аміаку забезпечується, в основному, зростанням концентрації електронів у каналі та одночасним збільшенням числа електронів, захоплених поверхневими рівнями, які знаходяться у верхній половині забороненої зони.

4. ВИСНОВКИ

Зменшення градієнта концентрації домішок у сенсорах парів аміаку на основі плавних кремнієвих p - n переходів від $6 \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-4}$ до $5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-4}$ веде до зниження порогу чутливості приблизно на два порядки. Цей ефект свідчить про основну роль іонізованих акцепторів у приповерхневому збідненому шарі p -області в компенсації електричного поля іонізованих донорів, сформованих внаслідок адсорбції молекул аміаку. Нахил тренду експериментально отриманої залежності порогу чутливості P_m від градієнта a концентрації домішок в p - n переході відповідає моделі, яка враховує, що поріг чутливості досягається при певній величині поверхневого вигину зон, незалежно від рівня легування p -області.

Причиною великого розкиду порогу чутливості досліджених сенсорів при фіксованих значеннях градієнта концентрації домішок є неконтрольований розкид щільності поверхневих центрів. Підвищення щільності поверхневих донорів веде до позитивного ефекту – зниження порогу чутливості сенсорів парів аміаку, а введення акцепторів – до протилежного ефекту.

Основною причиною розкиду величини питомої чутливості сенсорів є розкид щільності поверхневих рівнів, що знаходяться у верхній половині забороненої зони кремнію. Зміна рівня легування p - n переходів на 4 порядки незначно впливає на чутливість сенсорів (після досягнення порогового значення тиску парів аміаку).

Причиною високих значень порогу чутливості кремнієвих нанопористих мембран [5] і нанодротів [3] як сенсорів парів аміаку є високий рівень легування вихідних пластин домішкою бору.

Effect of the Doping Level on the Gas Sensitivity of Si p - n Junctions

O.O. Ptashchenko¹, F.O. Ptashchenko², V.R. Gilmudinova¹, O.S. Kurnychuk¹

¹ I. I. Mechnikov National University of Odessa, 2, Dvoryanska St., 65026 Odessa, Ukraine

² National University "Odesa Maritime Academy", 8, Didrikhsona St., 65029 Odessa, Ukraine

The characteristics of Si diffused p - n junctions as water and ammonia vapors sensors are studied over a wide range of the impurity concentration gradient a . It is established that a lowering of the value a from $6 \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-4}$ to $5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-4}$ decreases the sensitivity threshold P_m of the p - n structures to NH_3 vapors (i.e. the lowest vapors partial pressure, which can be detected) by two orders, to about 0.5 Pa. This value is much lower than those of silicon meso-porous membranes and silicon nano-wires fabricated from plates with a boron concentration of 10^{18} cm^{-3} . The observed sensitivity threshold variation among the studied samples is due to the influence of uncontrolled surface centers. A treatment of the sample sequentially in HF and water drastically increases the sensitivity threshold, and the exposure in a Na_2S solution significantly lowers it.

Keywords: Silicon, p - n junction, Gas sensor, Ammonia, Sensitivity threshold, Doping level.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. L. Boarino, S. Borini, G. Amato, *J. Electrochem. Soc.* **156**, No 12, K223 (2009).
2. C. Baker, W. Laminack, J. L. Gole, *ECS Transactions* **61** No19, 1 (2014).
3. G.D. Yuan, Y.B. Zhou, C. S. Guo, W.J. Zhang, Y.B. Tang, Y. Q. Li, Z. H. Chen, Z. B. He, X. J. Zhang, P.F. Wang, I. Bello, R.Q. Zhang, C.S. Lee, S.T. Lee, *ACS Nano* **4**, 3045 (2010).
4. K.Q. Peng, X. Wang, S.T. Lee, *Appl. Phys. Lett.* **95**, 243112 (2009).
5. S. Borini, *J. Appl. Phys.* **102**, 093709 (2007).
6. Ф.О. Птащенко, О.О. Птащенко, Г.В. Довганюк, *ФХТТ* **12**, 782 (2011) (F.O. Ptashchenko, O.O. Ptashchenko, H.V. Dovhanyuk, *Phys. Chem. Solid State* **12**, 782 (2011)) [In Ukraine].
7. E. Konstantinova, A. Pavlikov, A. Vorontsov, A. Efimova, V. Timoshenko, P. Kashkarov, *phys. status solidi A* **206**, 1330 (2009).
8. M. Chiesa, G. Amato, L. Boarino, E. Garrone, F. Geobaldo, E. Giamello, *Angew. Chem. Int. Ed.* **42**, 5032 (2003).
9. O.O. Ptashchenko, F.O. Ptashchenko, V.R. Gilmuddinova, *Photoelectronics* No **22**, 38 (2013).
10. S.M. Sze, *Physics of semiconductor Devices. Second edition* (New York: John Wiley & Sons: 1981).
11. Ю.А. Вашпанов, В.А. Смынтына, *Адсорбционная чувствительность полупроводников* (Одесса: Астропринт: 2005) (Yu.A. Vashpanov, V.A. Smyntyna, *Adsorbtsionnaya chuvstvitel'nost' poluprovodnikov* (Odessa: Astroprint: 2005)) [In Russian].
12. O.O. Ptashchenko, F.O. Ptashchenko, O.V. Yemets, *Photoelectronics* No **18**, 28 (2009).
13. H. Angermann, Th. Dittrich, H. Flietner, *Appl. Phys. A* **59**, 193 (1994).
14. S.D. Brotherton, M.J. King, G.J. Parker, *J. Appl. Phys.* **52**, 4649 (1981).