

УДК 621.315.592

PACS number(s): 73.20.Hb, 73.25.+i

***P-N* - ПЕРЕХОДИ НА ОСНОВІ Si ТА AlGaAs ЯК ГАЗОВІ СЕНСОРИ**

О. Ємець¹, В. Шугарова¹, О. Птащенко¹, Ф. Птащенко²

¹Одеський національний університет імені І. І. Мечникова

вул. Дворянська, 2, 65026 Одеса, Україна

²Одеська національна морська академія

вул. Дідріхсона, 8, 65029 Одеса, Україна

Досліджено вплив складу газового середовища на вольт-амперні характеристики прямого і зворотного струмів, а також на кінетику поверхневого струму в *p-n*-структурах на основі кремнію та AlGaAs. Проаналізовано механізми чутливості даних *p-n*-переходів до парів аміаку, води та етилену. Усі зазначені пари підвищують прямий і зворотний струми. Чутливість до аміаку значно вища, ніж до інших парів. Це пояснюють донорними властивостями молекул NH₃. Час спрацьовування досліджених *p-n*-переходів як газових сенсорів за кімнатної температури не перевищував 60 с.

Ключові слова: *p-n*-структура, кремній, арсенід галію, сенсор, чутливість.

Газові сенсорі на основі *p-n*-переходів [1, 2] мають значні переваги над сенсорами на основі оксидних полікристалічних плівок [3, 4] і діодів Шоткі [5]. *P-n*-переходи у широкозонних напівпровідниках мають високі потенціальні бар'єри для носіїв струму, високу чутливість та селективність до газових компонент навколишнього середовища [6, 7].

Чутливість *p-n*-сенсорів до донорних газів, таких як аміак, пояснюють утворенням поверхневого провідного каналу в електричному полі, індукованому адсорбованими іонами аміаку на поверхні природного оксидного шару [1, 2]. Такий механізм дійсний лише для адсорбованих молекул, які іонізуються на поверхні напівпровідника. Це є причиною газової селективності таких сенсорів. Поверхневий провідний канал утворюється в цих сенсорах при виконанні нерівності

$$N_s^m > N_s, \quad (1)$$

де N_s^m і N_s – поверхневі концентрації адсорбованих молекул (іонів) і поверхневих електронних станів у напівпровіднику, відповідно. Ця умова визначає порогову газову концентрацію для сенсорів.

Характеристики кремнієвих *p-n*-переходів як газових сенсорів були вивчені у працях [8, 9]. Було показано, що чутливість цих структур до аміаку пояснюють збільшенням інтенсивності поверхневої рекомбінації, зумовленим адсорбованими

молекулами NH_3 . Відмінність в механізмах чутливості може спричинити до відмінності у характеристиках сенсорів.

Метою статті є вивчення впливу парів аміаку, води та етилену на електричні характеристики $p-n$ - переходів на основі Si та AlGaAs.

Вимірювались стаціонарні вольт-амперні характеристики (ВАХ) та кінетика прямого і зворотного струмів Si та AlGaAs $p-n$ - переходів в разі зміни газової атмосфери. $P-n$ - структури на основі AlGaAs склалися з шарів p^+ -GaAs(Zn) – p -Ga_{0,45}Al_{0,55}(Ge) – p -Ga_{0,65}Al_{0,35}(Ge) – n -Ga_{0,45}Al_{0,55}(Ge) з виродженою p^+ областю.

На рис. 1 і 2 показано ВАХ прямого струму для $p-n$ - переходів на основі Si та AlGaAs, відповідно.

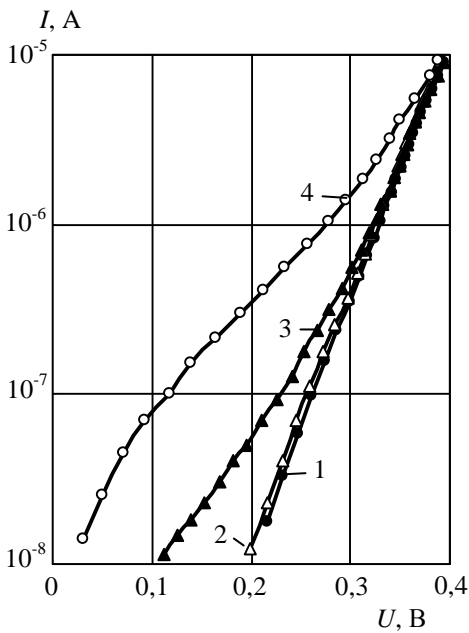


Рис. 1. ВАХ прямого струму кремнієвого $p-n$ - переходу, виміряні в повітрі (1) та в парах води (2), етилового спирту (3) та аміаку (4)

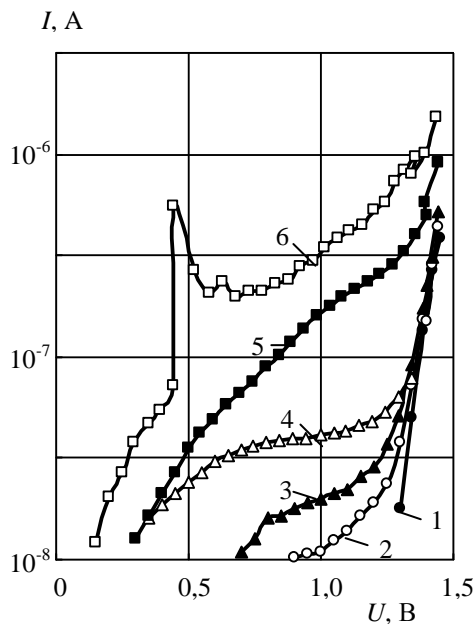


Рис. 2. ВАХ прямого струму $p-n$ - переходу на основі AlGaAs, виміряні в повітрі (1) в парах аміаку з парціальним тиском: 2 – 50Па; 3 – 100Па; 4 – 200Па; 5 – 1000Па; 6 – 4000Па

В області струмів 10 нА–1 мА ВАХ прямого струму $p-n$ - переходів, виміряні в сухому повітрі, відповідали виразу

$$I(U) = I_0 \exp[qU / (nkt)], \quad (2)$$

де I_0 – стала; q – заряд електрона; k – стала Больцмана; T – температура; для $p-n$ - переходів на основі AlGaAs коефіцієнт неідеальності $n \approx 2$. Такі ВАХ пов'язані з рекомбінацією на глибоких рівнях [10]. Для кремнієвих $p-n$ - переходів $n \approx 1,1$.

Криві 2, 3, 4 на рис. 1 були отримані в парах води, етилену і аміаку. Значення парціального тиску води, етилену і аміаку становили 2 000 Па, 5 000Па і 50 Па, відповідно. З порівняння кривих 2, 3 і 4 на рис. 1 доходимо висновку, що чутливість кремнієвих $p-n$ - структур до парів аміаку є найвищою, а до парів води – найнижчою.

На рис. 2 показано, що прямий ступ $p-n$ - переходів на основі AlGaAs збільшується зі збільшенням концентрації аміаку. При парціальному тиску парів аміаку $P > 1\,000$ Па на ВАХ спостерігається пік. Появу цього піка можна пояснити електронним тунелюванням між s -зоною поверхневого провідного каналу та v -зоною виродженої p^+ -області. Це означає також, що електрони у каналі вироджені.

На рис. 3 та 4 зображені ВАХ додаткового струму, зумовленого адсорбцією відповідних молекул, для $p-n$ - переходів на основі Si та AlGaAs, відповідно.

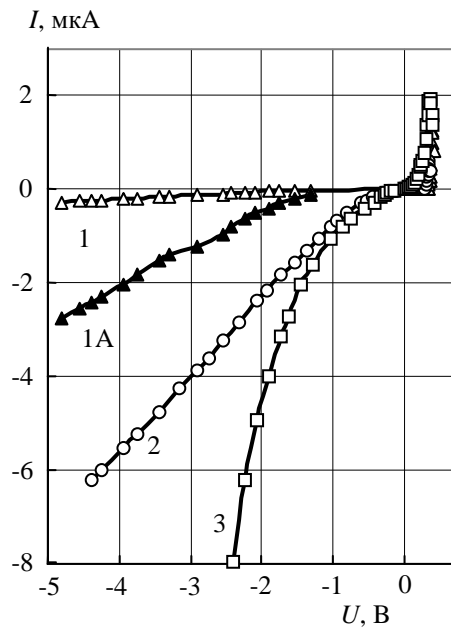


Рис. 3. ВАХ додаткових струмів Si $p-n$ переходів, виміряні в парах води (1, 1A), етилового спирту (2) та аміаку (3). Ординати кривої 1A помножені на 10

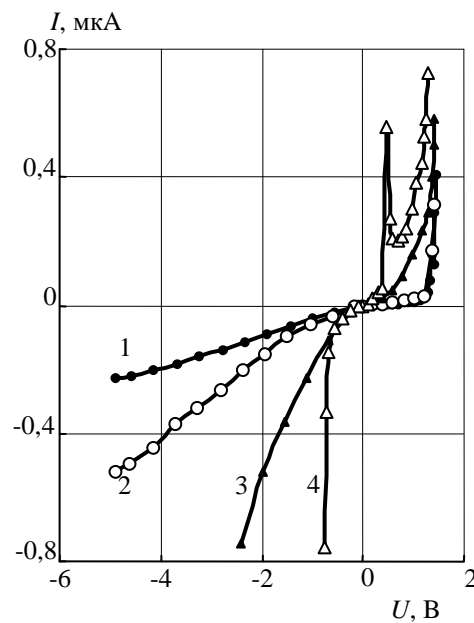


Рис. 4. ВАХ додаткових струмів AlGaAs $p-n$ переходів, виміряні в парах аміаку різних парціальних тисків: 1 – 20 Па; 2 – 100 Па; 3 – 1 000 Па; 4 – 4 000 Па

На рис. 3 та 4 показано, що домішки парів аміаку та етилену в атмосфері зумовлювали значне зростання прямого і зворотного струмів у вказаних $p-n$ - переходах. Додатковий зворотний струм $p-n$ - переходів на основі Si та AlGaAs, зумовлений адсорбцією молекул NH_3 та $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, монотонно зростає під час підвищення напруги зміщення. Пари води впливали лише на ВАХ кремнієвих $p-n$ - переходів.

Абсолютна чутливість газових сенсорів може бути визначена як

$$S_I = \Delta I / \Delta P, \quad (3)$$

де ΔI – зміна струму (при фіксованій напрузі); ΔP – зміна парціального тиску відповідного газу [11]. Відносна чутливість визначається виразом

$$S_R = \Delta I / (I_0 \Delta P), \quad (4)$$

де I_0 – це струм в сухому повітрі, виміряний за тієї ж напруги, що і ΔI .

У табл. 1 представлені чутливості $p-n$ - переходів на основі Si при фіксованій напрузі $U = 0,25$ В – для прямого зміщення та при $U = -3$ В – для зворотного зміщення.

Газова чутливість кремнієвих $p-n$ - переходів

	H ₂ O	C ₂ H ₅ OH	NH ₃
$S_I(0,25 \text{ В}), \text{ нА/кПа}$	6	11	11 000
$S_I(-3 \text{ В}), \text{ нА/кПа}$	70	800	20 000
$S_R(0,25 \text{ В}), \text{ 1/кПа}$	0,1	0,23	200
$S_R(-3 \text{ В}), \text{ 1/кПа}$	3	50	900

З табл. 1 видно, що кремнієві $p-n$ - переходи найчутливіші до парів аміаку при зворотному струмі.

Кінетика поверхневих струмів в $p-n$ - переходах на основі Si при впуску та видаленні парів аміаку показано на рис. 5. Такі ж дані були отримані і для AlGaAs. Час зростання і спаду поверхневого струму при зміні газового середовища для AlGaAs та Si не перевищував 30 і 50 с, відповідно.

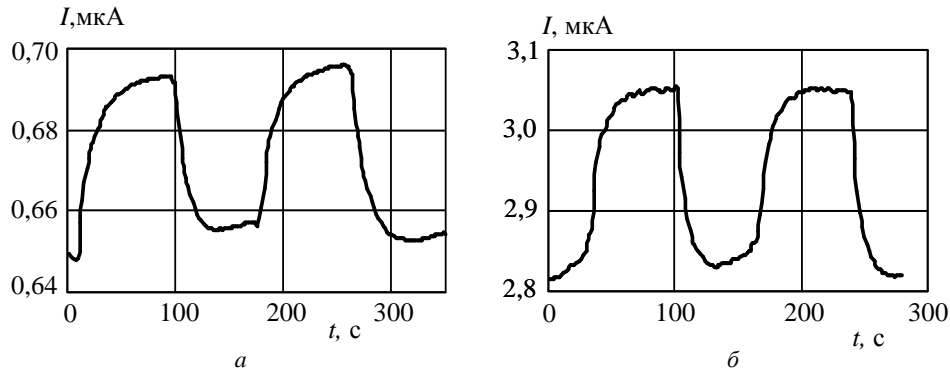


Рис. 5. Кінетика прямого (а) та зворотного (б) струмів у кремнієвих $p-n$ переходах, виміряна при впуску та видаленні парів аміаку з парціальним тиском 50 Па

Розглянемо механізми чутливості $p-n$ - переходів на основі Si та AlGaAs. ВАХ прямого струму $p-n$ - переходів на основі AlGaAs у парах аміаку, як бачимо з рис. 2, мали лінійні ділянки. Таку поведінку поверхневих струмів пояснюють утворенням поверхневого провідного каналу з електронною провідністю в p -області під дією електричного поля адсорбованих позитивних іонів аміаку. Утворення такого каналу в $p-n$ - переходах при адсорбції позитивних іонів підтверджено двовимірними розрахунками [12]. Адсорбція молекул аміаку при досить високому парціальному тиску NH₃ формує в p -AlGaAs поверхневий провідний канал з виродженими електронами. На ВАХ $p-n$ - переходів на основі AlGaAs простежено пік. Такий вигляд ВАХ характерний для тунельного діода. AlGaAs $p-n$ - структури з виродженою $p+$ областю мають більшу чутливість газу під час зворотного зміщення, ніж під час прямого.

ВАХ прямого струму $p-n$ - переходів на основі Si у парах аміаку, етилену та води мали експоненціальні ділянки з коефіцієнтом неідеальності $n \approx 2$ (рис. 1). Це свідчить, що зростання прямого струму в кремнієвих $p-n$ - переходах під час адсорбції молекул цих парів пов'язано з підвищенням інтенсивності поверхневої рекомбінації.

Зміни ВАХ вказаних $p-n$ - переходів були зворотними. Це свідчить про фізичну природу адсорбції молекул етилену та аміаку на поверхні AlGaAs та Si.

Результати дослідження свідчать, що $p-n$ - переходи на основі Si та AlGaAs мають різні механізми чутливості. Відмінність у механізмах чутливості зазначених $p-n$ - структур спричинює відмінності характеристик сенсорів.

Час відгуку у разі зміни газового середовища для $p-n$ - переходів на основі Si та AlGaAs не перевищував 30 і 50 с, відповідно. Отже, ці $p-n$ - переходи можна використовувати як сенсори парів аміаку, води та етилену.

1. Птащенко О.О. Вплив газового середовища на поверхневий струм в $p-n$ - гетероструктурах на основі GaAs-AlGaAs / О.О. Птащенко, О.С. Артеменко, Ф.О. Птащенко // Фізика і хімія твердого тіла. – 2001. – Т. 2, № 3. – С. 481–485.
2. Птащенко О.О. Вплив парів аміаку на поверхневий струм в $p-n$ - переходах на основі напівпровідників A^3B^5 / О.О. Птащенко, О.С. Артеменко, Ф.О. Птащенко // Журн. фіз. досл. – 2003. – Т. 7, № 4. – С. 419–425.
3. Бугайова М.Е. Газові сенсори на основі оксиду цинку (огляд) / М.Е. Бугайова, В.М. Коваль, В.І. Лазаренко та ін. // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. – 2005. – № 3. – С. 34–42.
4. Бомк О.Й. 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. Балюба В.И. Сенсоры аммиака на основе диодов Pd-n-Si / В.И. Балюба, В.Ю. Грицьк, Т.А. Давыдова и др. // Физ. и хим. полупроводн. – 2005. – Т. 39, № 2. – С. 285–288.
6. Ptashchenko O.O. Effect of ammonia vapors on the surface morphology and surface current in $p-n$ - junctions on GaP / O.O. Ptashchenko, O.S. Artemenko, M.L. Dmytruk et al. // Photoelectronics. – 2005. – N 14. – P. 97–100.
7. Ptashchenko F.O. Effect of ammonia vapors on surface currents in InGaN $p-n$ - junctions / F.O. Ptashchenko // Photoelectronics. – 2007. – N 17. – P. 113–116.
8. Птащенко Ф.О. Вплив парів аміаку на поверхневий струм у кремнієвих $p-n$ - переходах / Ф.О. Птащенко // Вісн. ОНУ. Сер. фіз. – 2006. – Т. 11, № 7. – С. 116–119.
9. Ptashchenko O.O. Effect of ammonia vapors on the surface current in silicon $p-n$ junctions / O.O. Ptashchenko, F.O. Ptashchenko, O.V. Yemets // Photoelectronics. – 2006. – N 16. – P. 89–93.
10. Ptashchenko O.O. Tunnel surface recombination in $p-n$ - junctions / O.O. Ptashchenko, F.O. Ptashchenko // Photoelectronics. – 2000. – N 10. – P. 69–71.
11. Вашпанов Ю.А. Адсорбционная чувствительность полупроводников / Ю.А. Вашпанов, В.А. Смынгына. – Одесса : Астропринт, 2005. – 216 с.
12. Птащенко О.О. Формування поверхневого провідного каналу в $p-n$ - структурах при адсорбції іонів / О.О. Птащенко, Ф.О. Птащенко // Вісн. Одеськ. держ. ун-ту. Фіз.-мат. науки. – 2003. – Т. 7. – С. 11–18.

Si AND AlGaAs P-N - JUNCTIONS AS GAS SENSORS**O. Yemets¹, V. Shugarova¹, O. Ptashchenko¹, F. Ptashchenko²**¹*I. I. Mechnikov National University of Odessa
Dvoryanska Str., 2, UA-65026 Odessa, Ukraine*²*Odessa National Maritime Academy
Didrikhsona Str., 8, UA-65029 Odessa, Ukraine*

The influence of the ammonia, water and ethylene vapors on I - V characteristics of forward and reverse currents, as well as on the kinetics of the surface current in silicon and AlGaAs p - n - structures was studied. The mechanisms of sensitivity of these p - n - junctions were analysed. All these vapors enhance both the forward and reverse currents. The sensitivity to ammonia is much higher than to other vapors. It is explained as a result of donor properties of NH_3 molecules. The response time of p - n - junctions as gas sensors at room temperature is below 60 s.

Key words: p - n - structure, silicon, gallium arsenide, sensor, sensitivity.

P-N - ПЕРЕХОДЫ НА ОСНОВЕ Si И AlGaAs КАК ГАЗОВЫЕ СЕНСОРЫ**Е. Емець¹, В. Шугарова¹, А. Птащенко¹, Ф. Птащенко²**¹*Одесский национальный университет имени И. И. Мечникова
ул. Дворянская, 2, 65026 Одесса, Украина*²*Одесская национальная морская академия
ул. Дидрихсона, 8, 65029 Одесса, Украина*

Исследовано влияние состава газовой среды на вольт-амперные характеристики прямой и обратного токов, а также на кинетику поверхностного тока в p - n - структурах на основе кремния и AlGaAs. Проанализированы механизмы чувствительности данных p - n - переходов к парам аммиака, воды и этилена. Все указанные пары увеличивают прямой и обратный токи. Чувствительность к аммиаку значительно выше, чем к другим парам. Это объясняется донорными свойствами молекул NH_3 . Время срабатывания исследуемых p - n - переходов как газовых сенсоров при комнатной температуре не превышало 60 с.

Ключевые слова: p - n - структура, кремний, арсенид галлия, чувствительность, сенсор.

Стаття надійшла до редколегії 26.05.2009

Прийнята до друку 07.06.2010