

УДК 621.315.592

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

СУЛЬФІДНА АКТИВАЦІЯ P–N - ПЕРЕХОДІВ НА ОСНОВІ GaAs ЯК ГАЗОВИХ СЕНСОРІВ

О. Богдан¹, О. Птащенко¹, Ф. Птащенко², Н. Маслєва¹

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 сульфідної обробки поверхні p–n - переходів на основі GaAs на вольт-амперні характеристики прямого та зворотного струмів, а також на характеристики p–n - переходів як газових сенсорів. Показано, що сульфідна обробка зменшує прямий та зворотний струми в p–n - переходах. Після сульфідної обробки суттєво підвищується газова чутливість p–n - переходів. Це явище можна пояснити зменшенням щільності поверхневих центрів рекомбінації унаслідок нанесення на поверхню атомів сірки. У разі такої обробки також зменшується концентрація електрично активних центрів у поверхневому збідненому шарі.

Ключові слова: p–n - перехід, GaAs, сульфідна обробка, сенсор, чутливість.

P–n - переходи на основі напівпровідників A³B⁵ перспективні для використання як газові сенсори. Такі сенсори мають кристалічну будову, високу чутливість за кімнатної температури, а також селективність до компонентів навколишньої атмосфери. Чутливість таких сенсорів зумовлена формуванням поверхневого провідного каналу в електричному полі, індукованому адсорбованими іонами на поверхні природного оксидного шару [1–3].

Чутливість газових сенсорів залежить від щільності поверхневих станів в p–n - переходах. Щільність поверхневих станів в GaAs може бути зменшена у разі нанесення атомів сірки із водних та спиртових розчинів [4].

У статті вивчено вплив нанесення атомів сірки на поверхневі струми в p–n - переходах на основі GaAs. Досліджено вплив сульфідної обробки на вольт-амперні характеристики (ВАХ) прямого та зворотного струмів, а також на чутливість p–n - структур до парів аміаку, води та етилового спирту.

Сульфідна обробка атомами сірки p–n - переходів на основі GaAs здійснювалась у 30% водному розчині Na₂S·H₂O [5].

ВАХ прямого струму типової p–n - структури на основі GaAs представлені на рис. 1. Криву I виміряно до сульфідної обробки. В області прямих струмів від 1 до 1 мА ВАХ мали вигляд:

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

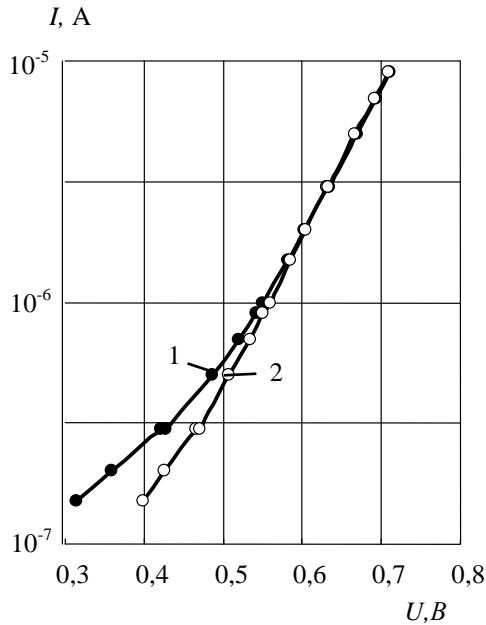


Рис. 1. Вольт-амперні характеристики прямого струму $p-n$ - структури: 1 – до сульфідної обробки, 2 – після обробки

де I_0 – константа; q – заряд електрона; V – напруга; k – стала Больцмана; T – температура; $n_i \approx 2$ – коефіцієнт неідеальності. Такі ВАХ пояснюються рекомбінацією носіїв заряду на глибоких рівнях в об'ємі $p-n$ - переходів та на їх поверхні [6]. Відповідний струм називають рекомбінаційним [3]. На кривій 1 рис.1 в області малих напруг простежено ділянку надлишкового струму з коефіцієнтом неідеальності $n_i > 2$. Цей струм зумовлений тунельною рекомбінацією за участю фононів на глибоких центрах [6]. Тунельна рекомбінація відбувається в неоднорідностях збідненого шару $p-n$ - переходу, де локальна напруженість електричного поля вища, ніж її середнє значення [6]. Крива 2 на рис. 1 виміряна після сульфідної обробки. Видно, що обробка суттєво не впливала на рекомбінаційний струм (при $I > 1 \mu\text{кА}$) і значно зменшувала надлишковий струм.

На рис. 2 показано ВАХ зворотного струму, виміряні до (крива 1) та після сульфідної обробки (крива 2). Видно, що нанесення атомів сірки значно зменшує зворотний струм у $p-n$ - переходах. Це свідчить, що зворотний струм має таку ж саму природу, як і прямий надлишковий струм.

Для пояснення природи впливу сульфідної обробки на ВАХ $p-n$ - переходів необхідно врахувати, що мають місце два механізми проходження струму. Рекомбінаційний струм протікає по всій поверхні і пропорційний до швидкості поверхневої рекомбінації, яка лінійно залежить від щільності поверхневих станів. Отож, зменшення щільності поверхневих станів зменшує рекомбінаційний струм. З іншого боку, надлишковий струм зосереджений у неоднорідностях, де товщина збідненого поверхневого шару менша, ніж середня товщина $p-n$ - переходу і характеризується сильним електричним полем. Коефіцієнт неідеальності ВАХ надлишкового струму $n_i > 2$, що відповідає залежності напруженості електричного поля від щільності поверхневих рекомбінаційних центрів.

Коефіцієнт захоплення носіїв заряду на поверхневі стани за участю фононів [6] може бути розрахований як

$$C_t = C_{t0} \exp \left[\frac{(q\hbar E_m)^2}{24m_t (kT)^3} \right], \quad (2)$$

де C_{io} – стала; E_m – максимальне значення напруженості електричного поля; m_t – ефективна маса тунелюючого носія заряду. Своєю чергою, E_m лінійно залежить від локальної щільності поверхневих станів. Тому переріз захоплення носіїв заряду поверхневими центрами (та надлишковий струм) експоненціально залежить від локальної щільності поверхневих станів. Цей ефект можна простежити в електричному полі з напруженістю $\sim 10^5$ В/см. Це є причиною того, що надлишковий струм в GaAs $p-n$ - переходах є більш чутливим до зміни щільності поверхневих станів, зумовленої нанесенням атомів сірки, ніж рекомбінаційний струм.

Унаслідок сульфідної обробки простежувалось суттєве зменшення зворотного струму в $p-n$ - переходах, як показано на рис. 2. Цей ефект можна пояснити, припустивши, що зворотний струм зосереджений на тих же неоднорідностях, як і прямиий надлишковий струм.

Вплив сульфідної обробки на ВАХ $p-n$ - переходів в парах аміаку показано на рис. 3. Криві 1 і 2 отримані в сухому повітрі та в парах аміаку з парціальним тиском 4000 Па, відповідно, до сульфідної обробки. Видно, що криві 1 і 2 на рис. 3 майже збігаються. Збіг кривих свідчить, що $p-n$ - перехід нечутливий до парів аміаку. Крива 3 виміряна в парах аміаку з парціальним тиском 200 Па після сульфідної обробки. Порівняння кривих 2 і 3 засвідчує, що сульфідна пасивація суттєво підвищує чутливість $p-n$ - переходу до парів аміаку. Так само веде себе і чутливість зворотного струму до парів аміаку.

ВАХ $p-n$ - переходів до сульфідної обробки не виявляла чутливості до парів води та етилового спирту. Сульфідна обробка спричинила різке зростання чутливості прямого та зворотного струмів до парів води та етилового спирту.

Чутливість газових сенсорів визначали як

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

де ΔI – зміна струму при зміні парціального тиску парів ΔP при фіксованій напрузі.

Для досліджених $p-n$ - переходів чутливість до парів аміаку при прямому зміщенні 0,5 В становила 20 нА/Па.

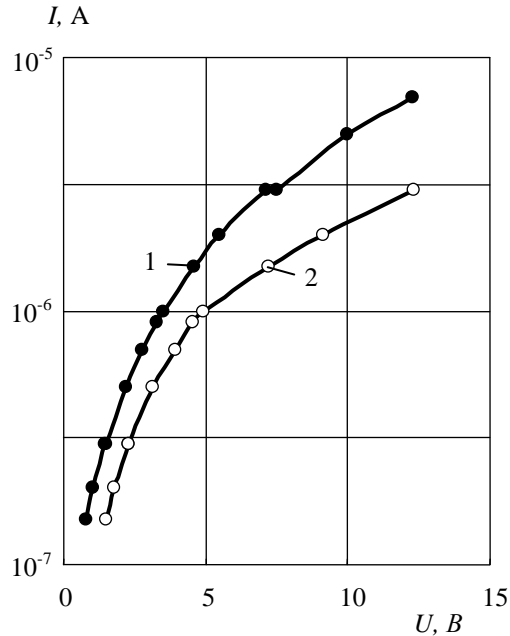


Рис. 2. Вольт-амперні характеристики зворотного струму $p-n$ - структури: 1 – до сульфідної обробки, 2 – після обробки

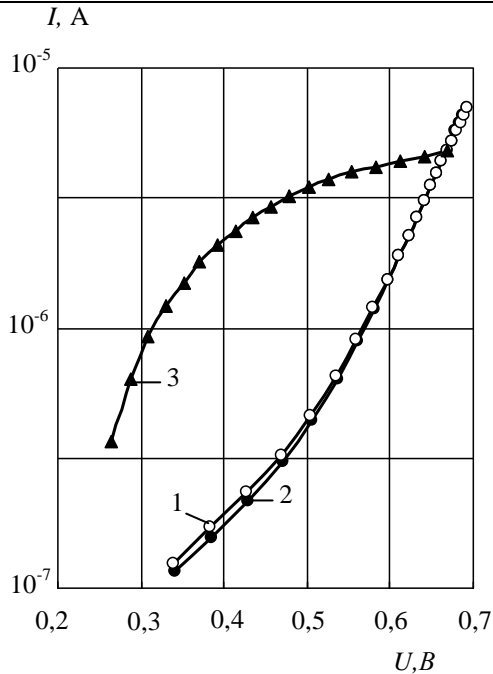


Рис. 3. ВАХ прямого струму $p-n$ - структури: 1 – у сухому повітрі; 2 – в парах аміаку з парціальним тиском 4000 Па до пасивації; 3 – в парах аміаку з парціальним тиском 200 Па після сульфідної обробки

носіїв заряду в напівпровіднику. В парах аміаку заряд, який знаходиться на поверхневих станах, є від'ємним, і провідний канал утворюється тільки у випадку виконання нерівності

$$N_i > N_s. \quad (6)$$

Беручи до уваги цю умову, можна пояснити зміну чутливості $p-n$ - переходів до аміаку під впливом сульфідної обробки. До обробки щільність поверхневих станів дуже велика, і умова (6) не виконується. Зростання чутливості до аміаку, води та спирту після сульфідної обробки є результатом зменшення щільності поверхневих станів.

Чутливість $p-n$ - переходів до парів води, аміаку та етилового спирту можна пояснюють утворенням поверхневого провідного каналу в p -області під впливом електричного поля адсорбованих іонів [6].

Іонізовані молекули NH_3 адсорбуються на поверхні шару природного оксиду. Електричне поле іонів вигинає s - і v -зони в кристалі. У разі утворення поверхневого провідного каналу закорочується $p-n$ - перехід.

Напруженість електричного поля, яке виникає на поверхні напівпровідника, можна виразити як

$$E = q / (\epsilon \epsilon_0) (Q_s + \Delta Q_s), \quad (4)$$

де ϵ_0 – електрична стала; ϵ – відносна діелектрична проникність напівпровідника; ΔQ_s – поверхнева щільність адсорбованих іонів. Щільність заряду, локалізованого на поверхневих станах, визначається формулою

$$qQ_s = qN_s (p - n) / (p + n + 2n_i), \quad (5)$$

де N_s – щільність поверхневих станів; p, n – концентрації дірок та електронів на поверхні; n_i – власна концентрація

1. Птащенко А.А. Влияние газовой среды на поверхностный ток в $p-n$ - гетероструктурах на основе GaAs-AlGaAs / А.А. Птащенко, Е.С. Артеменко // Физ. и хим. тверд. тела. – 2001. – Т. 2, №3. – С. 481–485.
2. 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.
3. Птащенко А.А. $P-n$ - переходы на основе GaAs и других полупроводников $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$ как газовые сенсоры / А.А. Птащенко, Ф.А Птащенко // Девятая конференция

"Арсенида галлія і напівпровідникові з'єднання групи III-V". Матеріали конференції. – 2006. – С. 496–499.

4. Бессолов В.Н. Халькогенідна пасивація напівпровідників $A^{III}B^V$ / В.Н. Бессолов, М.В. Лебедев // Физ. и техн. напівпровідників. – 1998. – № 32. – 1281 с.
5. Ptashchenko O.O. Effect of sulfur atoms on the surface current in GaAs $p-n$ - junctions / O.O. Ptashchenko, F.O. Ptashchenko, N.V. Masleyeva. et al. // Photoelectronics. – 2007. – №17. – P. 36–39.
6. Ptashchenko A.A. Tunnel surface recombination in optoelectronic device modelling / A.A. Ptashchenko, F.A. Ptashchenko // Proc. SPIE. – 1997. – Vol. 3182. – P. 145–149.

SULPHUR ACTIVATION OF P-N - JUNCTIONS ON GaAs AS GAS SENSORS

O. Bogdan¹, O. Ptashchenko¹, F. Ptashchenko², N. Masleyeva¹

¹I. I. Mechnikov National University of Odessa
Dvoryanska Str., 2, UA–65026 Odessa, Ukraine

²Odessa National Maritime Academy
Didrikhsona Str., 8, UA–65029 Odessa, Ukraine

Deposition of sulphur atoms on GaAs surface and its influence on I - V characteristics of forward and reverse currents and sensitivity of GaAs $p-n$ - structures as gas sensors were studied. The sulphur treatment reduces the excess forward and reverse currents in $p-n$ - junctions, substantially enhances the sensitivity to ammonia vapors. All these effects are explained, taking into account lowering of the surface states density as a result of sulphur atoms deposition.

Key words: Sulphur treatment, $p-n$ - junction, gas sensor, sensitivity, conducting surface channel

СУЛЬФИДНАЯ АКТИВАЦИЯ P-N - ПЕРЕХОДОВ НА ОСНОВЕ GaAs КАК ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ

O. Богдан¹, O. Птащенко¹, Ф. Птащенко², Н. Маслеева¹

¹Одесский национальный университет имени И. И. Мечникова
ул. Дворянская, 2, 65026 Одесса, Украина

²Одесская национальная морская академия
ул. Дидрихсона, 8, 65029 Одесса, Украина

Исследовано влияние сульфидной обработки поверхности $p-n$ - переходов на основе GaAs на вольт-амперные характеристики прямого и обратного токов, а также на характеристики $p-n$ - переходов как газовых сенсоров. Показано, что сульфидная обработка уменьшает прямой и обратный токи в $p-n$ - переходах. После сульфидной обработки существенно увеличивается газовая чувствительность $p-n$ - переходов. Данное явление можно объяснить уменьшением плотности поверхностных центров рекомбинации в результате нанесения на поверхность атомов серы. При такой обработке также уменьшается концентрация электрически активных центров в поверхностном обедненном слое.

Ключевые слова: $p-n$ - переход, GaAs, сульфидная обработка, чувствительность, сенсор.

Стаття надійшла до редколегії 26.05.2009

Прийнята до друку 07.06.2010