

Ф.О. Птащенко<sup>1</sup>, О.О. Птащенко<sup>2</sup>, Г.В. Довганюк<sup>2</sup>

## Вплив поверхневого легування на характеристики кремнієвих *p-n* переходів як газових сенсорів

<sup>1</sup>Одеська національна морська академія, вул. Дідріхсона, 8, м. Одеса, 65029;

<sup>2</sup>Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, вул. Дворянська, 2, м. Одеса, 65100, e-mail: [aptash@list.ru](mailto:aptash@list.ru)

Досліджено вплив тривалої витримки кремнієвих *p-n* переходів у вологих парах аміаку з парціальним тиском 12 кПа на характеристики *p-n* структур як сенсорів парів аміаку та води в навколишній атмосфері. Проведено чисельні двовимірні розрахунки нерівноважних поверхневих процесів при адсорбції молекул донорного газу. Встановлено, що тривала обробка в парах аміаку суттєво збільшує струм, обумовлений адсорбцією молекул NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O та C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH. Даний ефект пояснюється формуванням донорних поверхневих центрів, які частково компенсують акцепторні поверхневі центри в кремнії.

**Ключові слова:** газовий сенсор, чутливість, *p-n* перехід, провідний канал, поверхневі центри.

Стаття постуила до редакції 23.05.2011; прийнята до друку 15.06.2011.

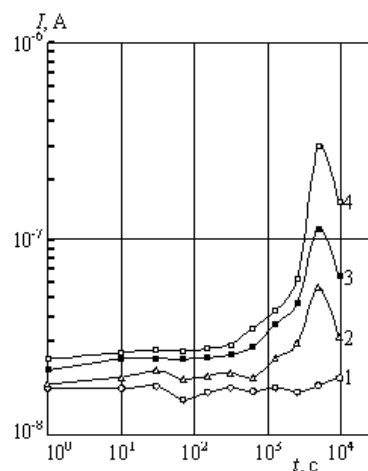
Газові сенсори на основі *p-n* переходів [1, 2] мають переваги у порівнянні з іншими сенсорами на основі оксидів полікристалічних плівок [3] і діодами Шоттки [4, 5]. *P-n* переходи на основі широкозонних напівпровідників мають високий потенціальний бар'єр для носіїв заряду і, як результат, малий фоновий струм. Сенсори на *p-n* переходах мають кристалічну структуру, високу чутливість при кімнатній температурі, селективність до компонентів газу. Чутливість *p-n* переходів на основі напівпровідників A<sup>3</sup>B<sup>5</sup> до парів аміаку, води та етанолу можна суттєво підвищити за рахунок поверхневого легування атомами сірки, які є донорами в даних напівпровідниках [6, 7].

Кремнієві *p-n* переходи перспективні для застосування в газових сенсорах [8]. Вони можуть бути виготовлені за мікроелектронною технологією. Їх можна використовувати як складові компоненти сенсорів на основі біполярних транзисторів [9]. Для створення газових сенсорів на основі кремнієвих *p-n* переходів необхідно розробити способи підвищення їх чутливості та стабільності.

Досліджено вплив тривалої витримки кремнієвих *p-n* переходів у вологих парах аміаку з парціальним тиском 12кПа на стаціонарні вольт-амперні характеристики (ВАХ) прямого і зворотного струмів, а також на характеристики *p-n* структур як сенсорів парів аміаку, води та етанолу в навколишній атмосфері. Аналізувалась кінетика прямого і зворотного струмів у *p-n* переходах при зміні складу навколишньої атмосфери. Вимірювання проводилися на плавних *p-n* переходах з градієнтом концентрації домішок у збідненому шарі від  $1,5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-4}$  до

$4,5 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-4}$ . Донорами були атоми фосфору, акцепторами – атоми бору.

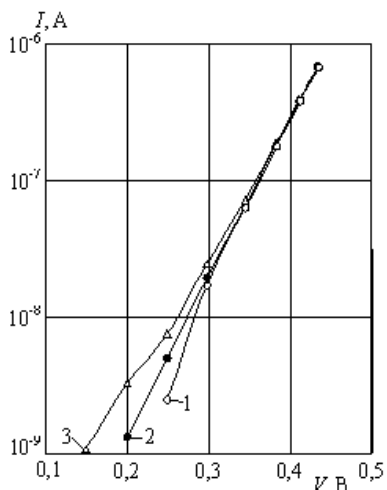
Рис.1 ілюструє вплив тривалості обробки у вологих парах аміаку з парціальним тиском 12 кПа на прямий струм в *p-n* переході, виміряний при напрузі 0,3 В. Градієнт концентрації домішок у даному *p-n* переході складав  $5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-4}$ . Хід кривої 1 свідчить, що обробка незначно впливає на струм у сухому повітрі. В той же час хід кривих 2 - 4, виміряних в парах аміаку з різним парціальним тиском, свідчить, що вказана обробка веде до різкого збільшення струму, індукованого адсорбцією молекул аміаку. Аналогічно



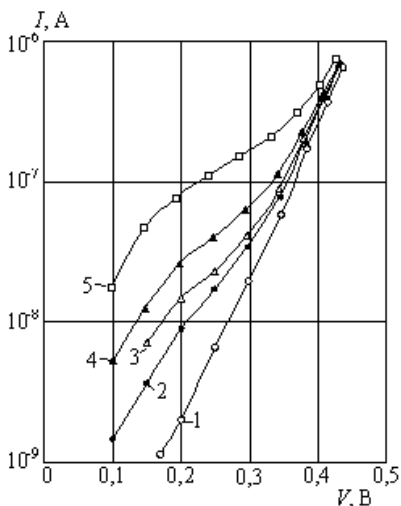
**Рис. 1.** Залежність прямого струму в *p-n* переході від тривалості обробки. Вимірювання проводилися при  $V = 0,3 \text{ В}$  в сухому повітрі (1) та в парах аміаку при їх парціальному тиску, Па: 2 - 20; 3 - 200; 4 - 500.

веде себе і зворотний струм.

На рис. 2 наведені ВАХ прямого струму в p-n переході, отримані в повітрі (крива 1) та в парах аміаку різного парціального тиску до обробки. Порівняння кривих 1-3 свідчить, що адсорбція молекул аміаку при парціальному тиску NH<sub>3</sub> до 500 Па лише незначно підвищує струм при напругах до 0,3 В і практично не впливає на струм при більш високих напругах.



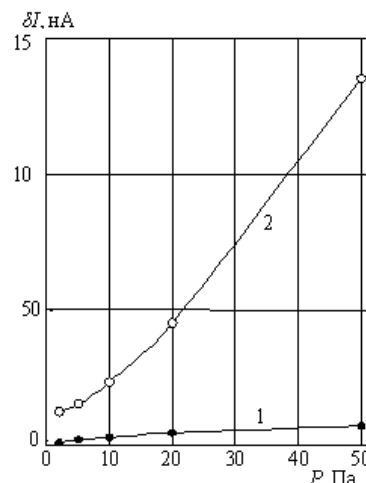
**Рис. 2.** ВАХ прямого струму p-n переходу до обробки, виміряні в сухому повітрі (1) та в парах аміаку при парціальному тиску, Па: 2 – 50; 3 – 500.



**Рис. 3.** ВАХ прямого струму p-n переходу після обробки, виміряні в сухому повітрі (1) та в парах аміаку при парціальному тиску, Па: 2 – 50; 3 – 100; 4 – 100; 5 – 500.

Рис. 3 представляє ВАХ прямого струму в тому ж p-n переході, отримані після обробки тривалістю 10000с. Зіставлення кривих 1 на рис. 2 і рис. 3 показує, що обробка практично не впливає на ВАХ прямого струму, виміряні в сухому повітрі. В той же час криві 2-5 свідчать, що після обробки суттєво зріс струм в парах аміаку.

Рис. 4 ілюструє залежності прямого поверхневого струму, індукованого адсорбцією молекул NH<sub>3</sub> при



**Рис. 4.** Залежності прямого струму, індукованого адсорбцією молекул аміаку, від парціального тиску парів NH<sub>3</sub>, виміряні при V = 0,3 В: 1 – до обробки; 2 – після обробки.

напрузі 0,3В, від парціального тиску аміаку. Крива 1 отримана до обробки, крива 2 – після обробки. Чутливість p-n переходу як газового сенсора визначається виразом

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

де  $\Delta I$  – зміна струму в p-n переході при зміні парціального тиску даних парів на  $\Delta P$ . Аналіз лінійних ділянок кривих 1 і 2 рис. 4 дає чутливість даного зразка до парів аміаку при вказаних умовах вимірювання 14 нА/кПа до обробки і 300 нА/кПа після обробки.

Витримка у вологих парах аміаку з парціальним тиском 12 кПа вела до різкого зростання зворотного струму кремнієвих p-n переходів. Обробка залежностей I(P) для зворотного струму при напрузі V = -1 В з використанням виразу (1) дала S = 80 нА/кПа до обробки і 1400 нА/кПа – після обробки.

Отримані результати можна пояснити за врахуванням того, що 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 [10, 11]. В однорідній частині каналу виконується рівність

$$N_{ns} = N_i - N_{sf} - N_{ss} + N_{sd} - N_{sa}, \quad (2)$$

де  $N_{ns}$  – число вільних електронів у каналі на 1см<sup>2</sup> поверхні;  $N_i$  – поверхнева щільність адсорбованих іонів;  $N_{sf}$  і  $N_{ss}$  – значення щільності акцепторних швидких і повільних поверхневих центрів;  $N_{sd}$  – поверхнева щільність іонізованих донорних поверхневих центрів;  $N_{sa}$  – число акцепторів у поверхневому шарі просторового заряду на 1см<sup>2</sup> поверхні, тобто

$$N_{sa} = N_A w_s, \quad (3)$$

де  $N_A$  – концентрація акцепторів у  $p$ -області;  $w_s$  – товщина поверхневого шару просторового заряду. Із формули (2) видно, що підвищення поверхневої щільності іонізованих донорних поверхневих центрів  $N_{sd}$  веде до зростання числа вільних електронів у каналі, а значить, і до збільшення поверхневого струму при фіксованій щільності адсорбованих іонів.

Тривала обробка всіх досліджених кремнієвих  $p$ - $n$  переходів у концентрованих парах аміаку суттєво збільшувала струм, обумовлений адсорбцією молекул  $NH_3$ ,  $H_2O$  та  $C_2H_5OH$ .

Підвищення газової чутливості кремнієвих  $p$ - $n$

переходів при тривалій обробці в парах аміаку високої концентрації можна пояснити утворенням донорних центрів на поверхні кристалу. Поверхнева щільність даних донорних центрів при вказаних умовах обробки недостатня для утворення поверхневого провідного каналу. Тому ВАХ прямого струму, вимірні в сухому повітрі, практично не змінюються при такій обробці. Але введені донорні центри частково компенсують акцепторні поверхневі центри і суттєво полегшують формування поверхневого провідного каналу при адсорбції донорних молекул із навколишньої атмосфери.

- [1] А.А. Птащенко, Е.С. Артеменко, Ф.А. Птащенко. Влияние газовой среды на поверхностный ток в  $p$ - $n$  гетероструктурах на основе GaAs–AlGaAs // *Физика и химия твердого тела*, **2**(3), сс. 481-485 (2001).
- [2] О.О. Ptashchenko, O. S. Artemenko, M. L. Dmytruk et al. Effect of ammonia vapors on the surface morphology and surface current in  $p$ - $n$  junctions on GaP // *Photoelectronics*, **14**, pp. 97-100 (2005).
- [3] М.Е. Бугайова, В.М. Коваль, В.Й. Лазаренко та ін. Газові сенсори на основі оксиду цинку (огляд) // *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології*, **1**(3), сс. 34-42 (2005).
- [4] О.Й. Бомк, Л.Г. Ільченко, В.В. Ільченко та ін. Про природу чутливості до аміаку газових сенсорів на основі структур надтонка титанова плівка – кремній // *Укр. фіз. журн.*, **44**(9), сс. 759-763 (1999).
- [5] В.И. Балюба, В.Ю. Грицьк, Т.А. Давыдова и др. Сенсоры аммиака на основе диодов Pd- $n$ -Si // *Физика и техника полупроводников*, **39**(2), сс. 285-288 (2005).
- [6] О.О. Ptashchenko, F.O. Ptashchenko, N.V. Masleyeva et al. Effect of sulfur atoms on the surface current in GaAs  $p$ - $n$  junctions // *Photoelectronics*, **17**, pp. 36-39 (2007).
- [7] О.О. Ptashchenko, F.O. Ptashchenko, N.V. Masleyeva, Bogdan O.V. Surface current in GaAs  $p$ - $n$  junctions, passivated by sulphur atoms // *Photoelectronics*, **18**, pp. 115-118 (2009)
- [8] Ф.О. Птащенко. Вплив парів аміаку на поверхневий струм у кремнієвих  $p$ - $n$  переходах // *Вісник ОНУ, сер. Фізика*, **11**(7), сс. 116-119 (2006).
- [9] F.O. Ptashchenko. Characteristics of silicon transistors as gas sensors. // *Photoelectronics*, **19**, pp. 18-21 (2010).
- [10] О.О. Птащенко, Ф.О. Птащенко. Формування поверхневого провідного каналу в  $p$ - $n$  структурах при адсорбції іонів // *Вісник ОДУ, сер. Фіз.-мат. науки*, **8**(2), сс. 226-233 (2003).
- [11] О.О. Птащенко, О.С. Артеменко, Ф.О. Птащенко. Вплив парів аміаку на поверхневий струм в  $p$ - $n$  переходах на основі напівпровідників  $A^3B^5$  // *Журнал фізичних досліджень*, **7**(4), сс. 419-425 (2003).

F.O. Ptashchenko <sup>1</sup>, O.O. Ptashchenko.<sup>2</sup>, G.V. Dovganyuk <sup>2</sup>

## Effect of Surface Doping on the Characteristics of Silicon P–N Junctions as Gas Sensors

<sup>1</sup>Odessa National Maritime Academy, Didrikhsona St., 8, Odessa, 65029, Ukraine;

<sup>2</sup>I.I. Mechnikov National University of Odessa, Dvoryanska St., 2 Odessa, 65100, Ukraine

Effect of the prolonged exposure of silicon  $p$ - $n$  junctions to moist ammonia vapors with a partial pressure of 12kPa was studied on the characteristics of  $p$ - $n$  structures as sensors of ammonia and water vapors in the ambient atmosphere. Numerical 2-D calculations of the non-equilibrium surface processes were performed under adsorption of donor gas molecules. It is found that a prolonged treatment in ammonia vapors significantly enhances the current, due to  $NH_3$ ,  $H_2O$  and  $C_2H_5OH$  molecules adsorption. This effect is explained by forming of donor centers, which partly compensate the acceptor surface centers in silicon.

**Key words:** gas sensor, sensitivity,  $p$ - $n$  junction, conducting channel, surface centers.