

ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СЕНСОРНИХ СТРУКТУР НА ОСНОВІ КРЕМНІЄВОГО p - n -ПЕРЕХОДУ З ЗУСТРІЧНИМИ ГРЕБІНЧАТИМИ КОНТАКТАМИ НА ТИЛЬНІЙ ПОВЕРХНІ

О.В. КОЗИНЕЦЬ, С.В. ЛИТВИНЕНКО

Київський національний університет ім. Тараса Шевченка,
Інститут високих технологій

(Просп. Академіка Глушкова, 2, корп. 6, Київ 01033; e-mail: alk@univ.kiev.ua)

УДК 621.383
© 2012

Досліджено вплив адсорбції молекул води на фоточутливість кремнієвого p - n -переходу із зустрічними гребінчатими контактами на тильній поверхні. Показана можливість використання таких структур для створення ефективних хімічних сенсорів.

1. Вступ

Одним з принципів створення сенсорів на основі напівпровідникових структур є використання впливу фізичної адсорбції молекул на зарядовий стан робочої поверхні. Саме такі фізичні засади використано у хімічних сенсорах на базі структури польового транзистора [1]. Зміна заряду викликає зміну приповерхневого вигину зон та, як наслідок, зміну швидкості поверхневої рекомбінації S або виникнення індукованого p - n -переходу. У випадку, коли суттєві зміни струму деякої напівпровідникової структури зумовлено саме адсорбційними процесами на поверхні, такий прилад доцільно використати для подальших експериментальних досліджень, для оптимізації та розробки сенсорів. Відомо, що у випадку опромінювання базової області кремнієвого переходу світлом із області сильного поглинання, фотострум суттєво залежить від S , причому чим менша довжина хвилі, тим більш суттєвою є така залежність [2]. У даній роботі досліджено структуру подібного типу: p - n -перехід із зустрічними гребінчатими контактами на тильній поверхні [3, 4]. Основною областю її використання є сонячна енергетика. Така архітектура елемента була запропонована в 1977 році з метою створення тонкоплівкових фотоперетворювачів для роботи з концентраторами сонячного світла; вона дозволяла повністю уникнути втрат, зумовлених затіненням контактами "корисної площі", зменшити втрати, по-

в'язані з рекомбінацією фотогенерованих носіїв в емітері, зменшити темновий струм та послідовний опір омичних контактів, полегшити операції складання модуля з окремих структур [5–10].

Розташування омичних контактів на одній поверхні пластини, та особливості формування фотосигналу в структурах такого типу можна використати і при створенні хімічних сенсорів. Серед основних переваг, які можна очікувати в таких приладах – виключення агресивного впливу адсорбованих речовин на процеси передачі корисного сигналу у зовнішнє електричне коло для його реєстрації. Ці аспекти і визначили комплекс досліджень, результати яких наведено в даній роботі.

2. Методика експерименту

Рівень легування кремнієвої підкладки p -типу у структур, що досліджувалися, становив 10^{16} см^{-3} , n -емітера та p^+ -області, відповідно, 10^{20} та 10^{19} см^{-3} . Площа омичних контактів становила $0,5 \text{ см}^2$. Товщина p^+ -області (яка забезпечує електричне поле, що "відштовхує" фотогенеровані носії від омичного контакту) – 1 мкм. Відстань між гребінчатими контактами була близько 50 мкм, дифузійна довжина неосновних носіїв в підкладці l_n – 100 мкм. Загальна товщина підкладки становила 70 мкм. На фронтальній поверхні означених структур навмисно не було сформовано шару для пасивації поверхні або для зменшення оптичних втрат на відбиття світла. Рівномірність розтікання речовини по поверхні забезпечувалось використанням покривного скельця товщиною близько 0,1 мм. Для створення контакту безпосередньо до зустрічних гребінок на неосвітленій поверхні використовували срібну пасту. Спектральний розподіл фоточутливості визначався за допомогою стандартної автоматизованої установки на базі ИКС-12 з

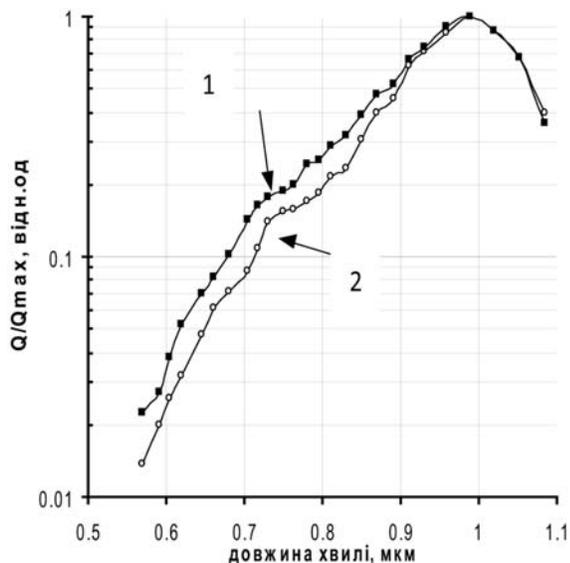


Рис. 1. Спектральний розподіл квантової ефективності *p-n*-переходу з зустрічними гребінчастими контактами на тильній поверхні в умовах контакту з дистильованою водою (1) та в повітрі (2)

механічним модулятором, частота модуляції – близько 445 Гц. Просторовий розподіл фоточутливості досліджено методом сканування поверхні зразка лазерним променем (джерело освітлення – гелій-неоновий лазер з довжиною хвилі $\lambda = 0,63$ мкм, позиціонування забезпечує пристрій на акустооптичних кристалах, частота модуляції інтенсивності освітлення становила 700 Гц) [6].

3. Результати та їх обговорення

На рис. 1 наведено спектральні розподіли фоточутливості $Q(\lambda)$ описаної структури в середовищі повітря, та тієї самої структури із дистильованою водою між покривним скельцем та освітлюваною поверхнею (подані криві нормовані на максимальне значення Q_{max}). Додатково отримано також залежності величини темного струму від зовнішньої напруги та струму в умовах підсвітки лампою розжарювання (рис. 2,б). Слід зазначити, що досліджувані зразки характеризувалися добрим випрямленням струму (кілька порядків при зміні полярності напруги, рис. 2,а), що свідчить про високу якість бар'єрної структури *p-n*-переходу. На рис. 3 наведено поверхневий розподіл фоточутливості структур.

Для пояснення отриманих результатів можна висловити припущення, що фізична адсорбція молекул води приводить до зміни приповерхневого вигину зон

поблизу освітлюваної поверхні та зміни швидкості поверхневої рекомбінації S . Для випадку опромінювання базової області кремнієвого переходу світлом із області сильного поглинання, фотострум суттєво залежить від S . Причиною цього є конкуренція між рекомбінаційним потоком до освітлюваної поверхні та потоком носіїв в напрямку області просторового заряду, яка і визначає фотострум. Розрахунки з використанням пакета *PC-1D* для моделювання одновимірної задачі свідчать про те, що для кремнієвого *p-n*-переходу з омичними контактами на протилежних поверхнях (у випадку освітлення з боку тильної поверхні, товщина бази – 150 мкм, емітера – 0,3 мкм, довжина дифузії неосновних носіїв – 70 мкм) рекомбінаційний потік до освітлюваної поверхні суттєво зменшує фотострум для короткохвильового світла, причому чим менша довжина хвилі, тим більше фотострум залежить від величини S . Так, її зміна на порядок приводить до зміни фотоструму в 5 разів. У нашому випадку ситуація на якісному рівні подібна до описаної вище: хоча конструктивні особливості структури зумовлюють викривлення ліній струму, однак теж можна очікувати суттєвого впливу рекомбінаційних процесів поблизу освітлюваної поверхні на величину фотоструму. Очевидно, крім компоненти фотоструму вздовж напрямку поширення світла (вісь y), існує і компонента в напрямку між гребінчастими контактами (вісь x), тому вираз для квантового розподілу фоточутливості в області сильного поглинання кремнію використати для числових оцінок безпосередньо не можна [11]. Рекомбінаційний потік до поверхні може змінювати компоненту струму вздовж осі y за рахунок “відбору” носіїв до поверхні. З метою отримання коректних результатів в такому випадку необхідно застосовувати модельні розрахунки з урахуванням компонент струмів уздовж обох означених напрямків. За допомогою числового двовимірного моделювання отримано залежності струму короткого замикання та напруги холостого ходу від швидкості рекомбінації на освітлюваній поверхні для фотоперетворювачів з зустрічними гребінчастими контактами на тильній поверхні для умов освітлення AM 1,5, рис. 4 [3]. Хоча програма Mdraw ISE TCAD 8,5 і не дозволяє виконати розрахунки для фіксованої довжини хвилі, результати розрахунку свідчать про те, що фотострум суттєво залежить від рекомбінаційних процесів на поверхні. Такий висновок залишається, очевидно, вірним і для випадку освітлення поверхні окремими короткохвильовими компонентами спектра, а тому його можна використати для подальших міркувань.

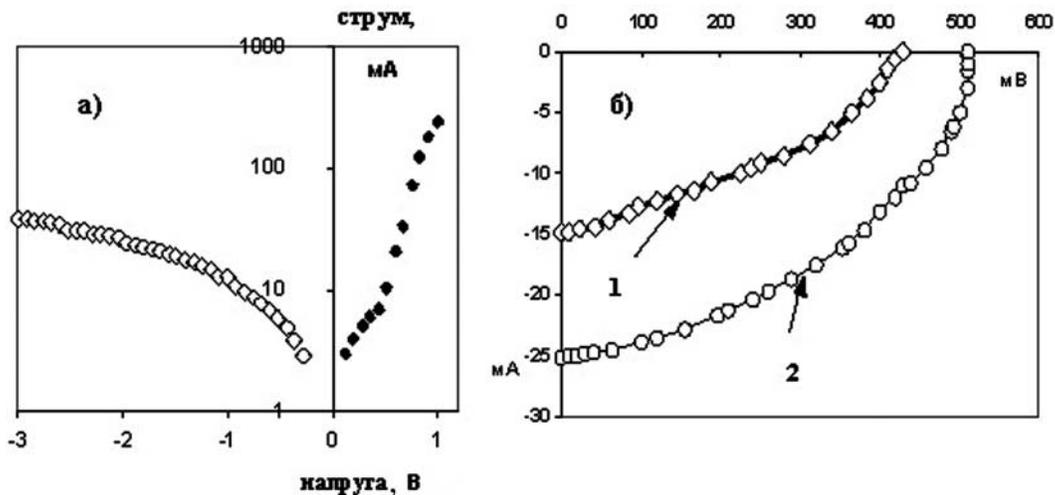


Рис. 2. Вольт-амперна характеристика досліджуваної структури: а – темнова; б – в умовах підсвітки – в повітрі (1) та в умовах контакту з дистильованою водою (2)

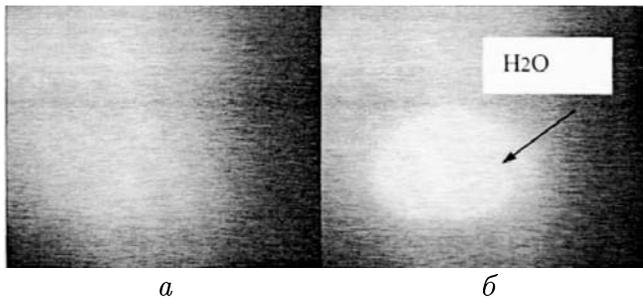


Рис. 3. Поверхневий розподіл фоточутливості *p-n*-переходу з зустрічними гребінчастими контактами на тильній поверхні в повітрі (а), та в умовах контакту з дистильованою водою (б). Градації світлого відповідають більшій густині фотоструму

Якщо адсорбція молекул води змінює початковий вигин зон поблизу освітлюваної поверхні (збільшує або зменшує залежно від початкової величини), то, відповідно до моделі Стівенсона-Кейса, може відбуватися зміна швидкості поверхневої рекомбінації [12, 13]. Відповідно, у разі зменшення S , зменшується рекомбінаційний потік неосновних носіїв (електронів) в напрямку осі y і збільшується загальна густина фотоструму. Тому цілком імовірно є зростання фоточутливості в діапазоні $0,5 < \lambda < 0,8$ мкм (рис. 1) саме внаслідок цієї причини. Ці результати добре узгоджуються із збільшенням напруги холостого ходу на 10% та струму короткого замикання на 25% (рис. 2,б), а також експериментальними даними, наведеними на рис. 3. Дійсно, якщо S зменшується від 10^4 до 10^2 см/с (рис. 4), зіставлення результатів числового моделювання та експериментально визначених параме-

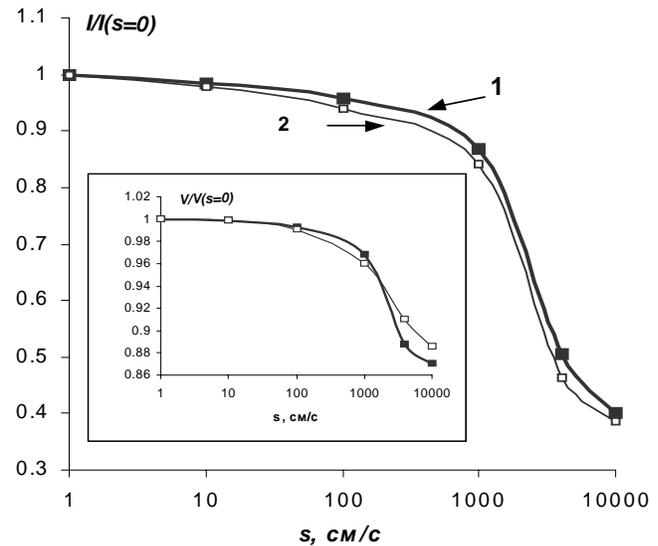


Рис. 4. Розрахункові залежності струму короткого замикання та напруги холостого ходу (на вставці) від швидкості рекомбінації на освітлюваній поверхні для *p-n*-переходу з зустрічними гребінчастими контактами на тильній поверхні, дифузійна довжина становить 300 мкм (1) та 100 мкм (2)

трів фотоперетворення узгоджується на якісному рівні. Додаткові аргументи на користь суттєвої ролі рекомбінаційних процесів поблизу освітлюваної поверхні можна отримати також із вимірів фотоструму в умовах постійної підсвітки фіолетовим світлодіодом з $\lambda=0,4$ мкм, рис. 5.

Вплив додаткової стаціонарної фотогенерації в такому експерименті можна якісно порівняти із впли-

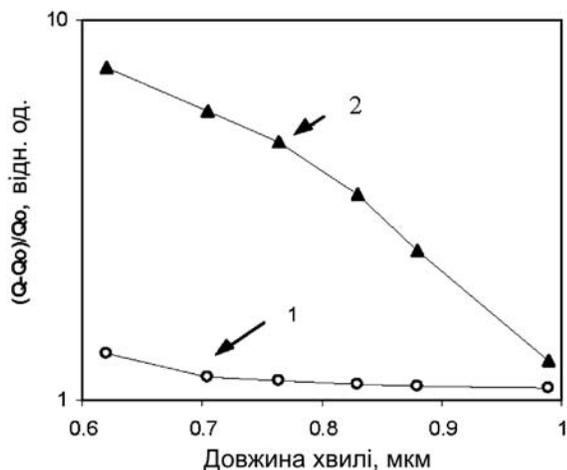


Рис. 5. Відносне збільшення спектральної чутливості структури з зустрічними гребінчастими контактами на тильній поверхні: в умовах контакту з дистильованою водою (1), в умовах стаціонарної підсвітці світлодіодом (2)

вом постійної напруги, яку прикладено до “плаваючого” переходу поблизу поверхні при ввімкненні джерела світла. Наслідком такої фотогенерації може бути зміна величини приповерхневого вигину зон та швидкості поверхневої рекомбінації S . Саме тому величина відносної зміни фотоструму $(Q(\lambda) - Q_0(\lambda))/Q_0(\lambda)$ спадає із зростанням довжини хвилі λ від 0,6 до 1 мкм. У такому випадку збільшується частка квантів, які поглинаються в глибині зразка і внесок рекомбінаційних процесів на освітлюваній поверхні у фотострум стає меншим. На рис. 6 подано переріз розподілу фотоструму по поверхні, який наведено лазерним променем в умовах стаціонарної підсвітці синім світлодіодом $\lambda = 0,47$ мкм.

Таким чином, постійна підсвітка може збільшити величину сенсорного відгуку такої структури. Для пояснення отриманих результатів ми виходили з припущення, що основну роль в рекомбінаційних процесах відіграє рівень з енергією, яка близька за величиною до середини забороненої зони кремнію, однак у реальній ситуації на поверхні може існувати певна дискретна або неперервна система донорно-акцепторних рівнів. Ми сподіваємося, що якісні висновки будуть вірними і в такому випадку. Збільшення адсорбційної ефективності поверхні можна отримати внаслідок застосування додаткових шарів з необхідними структурними властивостями. Відомо, наприклад, що для поруватого кремнію характерна розвинута поверхня з ви-

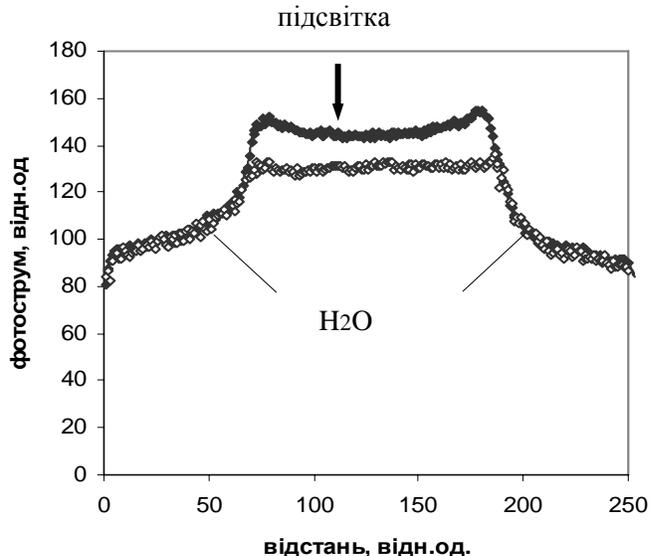


Рис. 6. Розподіл наведеного фотоструму структури з зустрічними гребінчастими контактами на тильній поверхні в умовах контакту з дистильованою водою та стаціонарної підсвітці синім світлодіодом (заповнені точки) та без підсвітці (незаповнені точки)

сокою адсорбційною здатністю. Тому можна припустити, що створення в процесі електрохімічного травлення тонкого поруватого шару (до 2 мкм) на поверхні кремнієвого $p-n$ -переходу з зустрічними гребінчастими контактами, дозволить додатково покращити характеристики такої сенсорної структури.

4. Висновки

Обґрунтовано можливість використання базової структури на основі кремнієвого $p-n$ -переходу з зустрічними гребінчастими контактами на тильній поверхні для створення хімічних сенсорів. Зміна фотосигналу, яка виникає внаслідок адсорбції молекул води, пов'язана із зміною швидкості рекомбінації на освітлюваній поверхні.

1. P. Bergveld, *Sensors Actuat.* **8**, 109 (1985).
2. О.В. Козинець, Автореферат дисертації к. ф.-м. наук, *Фізичні властивості кремнієвих фотоперетворювачів з збудованими дельта та пси шарами* (Київ, 2007).
3. O. Nichiporuk, A. Kaminski, M. Lemiti, A. Fave, and V. Skryshevsky, *Solar Energy Mater. Solar Cells* **86**, 517 (2005).

4. O. Nichiporuk, A. Kaminski, V. Skryshevsky, and S. Litvinenko, *Solar Energy Mater. Solar Cells* **87**, 549 (2005).
5. O. Nichiporuk, A. Kaminski, M. Lemiti, A. Fave, S. Litvinenko, and V. Skryshevsky, *Thin Solid Films* **511-512**, 248 (2006).
6. S. Litvinenko, L. Ilchenko, A. Kaminski, S. Kolenov, A. Laugier, E. Smirnov, V. Strikha, and V. Skryshevsky, *Mater. Sci. Eng. B* **71**, 238 (2000).
7. M.D. Lammert and R.J. Schwartz, *IEEE Trans. Electron. Devices* **24**, 337 (1977).
8. J. Dicker, J.O. Schumacher, W. Warta, and S.W. Glunz, *J. Appl. Phys.* **91**, 4335 (2002).
9. R.A. Sinton and R.M. Swanson, *IEEE Trans. Electron. Devices* **37**, 348 (1990).
10. P. Verlinden *et al.*, in *Proceedings of the 10-th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (Lisbon, Portugal, 1991), p. 246.
11. С. Зи, *Физика полупроводниковых приборов* (Мир, Москва, 1984).
12. В.І. Стріха, Г.П. Пека, *Поверхневі та контактні явища у напівпровідниках* (Либідь, Київ, 1992).
13. D.T. Stevenson and R.J. Keyes, *Physica* **20**, 1041 (1954).

Одержано 30.03.12

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЕНСОРНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ КРЕМНИЕВОГО $p-n$ -ПЕРЕХОДА СО ВСТРЕЧНЫМИ ГРЕБЕНЧАТЫМИ КОНТАКТАМИ НА ТЫЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

А.В. Козинец, С.В. Литвиненко

Резюме

Исследовано влияние адсорбции молекул воды на фоточувствительность кремниевого $p-n$ -перехода со встречными гребенчатыми контактами на тыльной поверхности. Показана возможность использования таких структур для создания эффективных химических сенсоров.

PHYSICAL PROPERTIES OF SENSOR STRUCTURES ON THE BASIS OF SILICON $p-n$ JUNCTION WITH INTERDIGITATED BACK CONTACTS

O.V. Kozynets', S.V. Litvinenko

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of High Technologies of Kyiv (2, blvd. 6, Prosp. Academician Glushkov, Kyiv 01033, Ukraine; e-mail: alk@univ.kiev.ua)

S u m m a r y

The influence of the adsorption of water molecules on the photosensitivity of a silicon $p-n$ junction with interdigitated back contacts has been studied. It has been shown that the examined structures can be used for the creation of effective chemical sensors.