

УДК 621.315.592

ЭФФЕКТ СМЕЩЕНИЯ КРАЯ ПОГЛОЩЕНИЯ В КРЕМНИЕВОЙ НАНОПРОВОЛОКЕ

Ф.В. ГАСПАРЯН, А.А. АРАКЕЛЯН, Г.Д. ХОНДКАРЯН*

Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

*e-mail: hxondkaryan@mail.ru

(Поступила в редакцию 20 мая 2016 г.)

Исследованы темновые и фото вольт–амперные характеристики (ВАХ), спектр поглощения и фоточувствительность полевого транзистора на основе кремниевой нанопроволоки. Получены спектральные зависимости фототока. Показано, что поглощающая способность кремниевой нанопроволоки смещается в коротковолновую область спектра. В отличие от массивного кремния фототок и фоточувствительность растут при комнатной температуре и принимают рекордно большие значения в ультрафиолетовой области. Предлагается использовать полевые транзисторы на основе кремниевых нанопроволок как высокочувствительные приемники для ультрафиолетовой области спектра, работающие при комнатной температуре.

1. Введение

Структуры на основе кремниевых нанопроволок (Si НП) представляют большой интерес для применения в оптоэлектронике. Одним из направлений этих применений может быть использование взаимодействия излучения с группой нанопроволок, нанесенных на подложку. Наноразмерные структуры с размерами, близкими к длинам волн падающего излучения, проявляют интересные оптические свойства, такие как низкая отражающая способность и высокое значение коэффициента поглощения. Исследования оптического поглощения Si НП показывают существенную зависимость поглощающей способности от их размеров [1]. Измерения спектра оптического поглощения в образцах из Si НП показали высокие значения коэффициентов поглощения [2]. Показано также, что в них значительно ослабляется отражающая способность по сравнению с массивным образцом кремния [2–3]. Оптическое поглощение растет с уменьшением длины волны падающего излучения. Необходимо отметить, что в отличие от массивного образца Si НП – прямозонный полупроводник, что делает его превосходным материалом для оптических применений [4–7]. С другой стороны ширина

запрещенной зоны НП увеличивается с уменьшением ее диаметра [4]. Из сказанного следует, что можно ожидать существенного сдвига спектра поглощения Si НП в области коротких длин волн.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований спектров поглощения, а также фоточувствительности полевого транзистора на основе p^+-p-p^+ структуры, изготовленной из Si НП.

2. Образцы и техника эксперимента

Структуры, состоящие из верхнего слоя оксида кремния p -Si НП, нижнего окисного слоя кремния и p -Si подложки (рис.1), были изготовлены по технологии кремний на изоляторе (SOI). Толщины верхнего и нижнего слоя SiO_2 составляли 9 нм и 145 нм, соответственно, диаметр нанопроволоки равнялся 250 нм и ее длина – 20 мкм. Особенности изготовления образца представлены в работе [8]. Si НП легировалась атомами бора с концентрацией 10^{15} см^{-3} . Области истока (S) и стока (D) (крайние p^+ -области) были изготовлены на той же НП с высоким уровнем легирования атомами бора (10^{19} см^{-3}). Спектральные измерения проводились при комнатной температуре с помощью монохроматора УМ-2. Для освещения были использованы лампы накаливания, находящиеся от верхнего слоя SiO_2 на расстоянии 15 см. Плотность, падающего на образец излучения W составляла 1.1 Вт/см^2 и 1.6 Вт/см^2 в области длин волн 0.25–0.6 мкм.

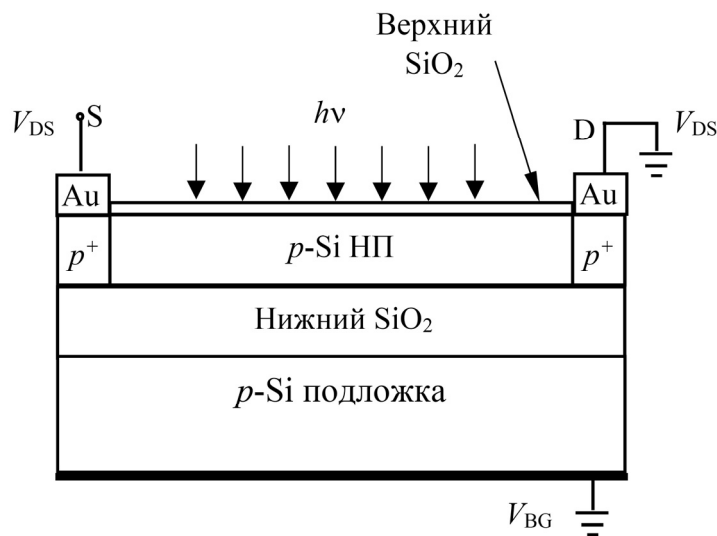


Рис.1. Схема полевого транзистора со структурой $\text{SiO}_2/p\text{-Si НП}/\text{SiO}_2/p\text{-Si}$ подложка: S и D – исток и сток, соответственно, а V_{DS} и V_{BG} – напряжения на истоке и тыльном контакте, соответственно.

3. Результаты и их обсуждение

На рис.2 представлены темновые и фото ВАХ. Как видно, ВАХ имеют обычный для полевого транзистора вид.

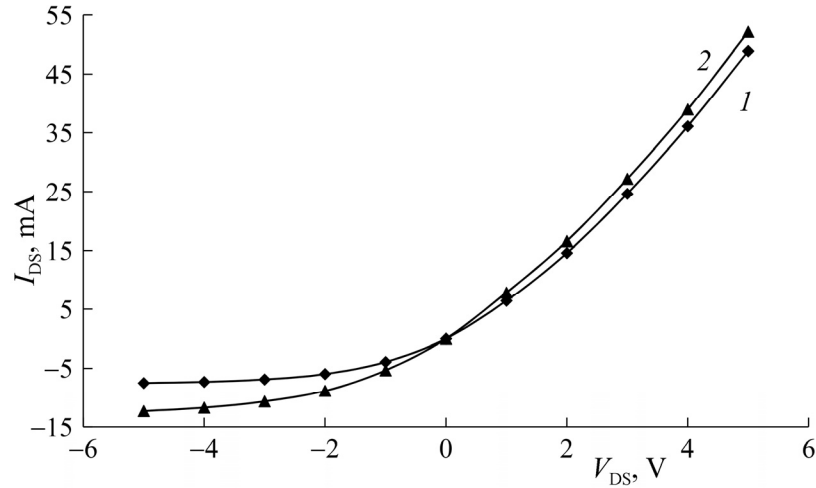


Рис.2. ВАХ сток–исток при $V_{BG} = -5$ В, $T = 300$ К и плотности излучения $W = 1.1$ Вт/см²: 1 – фото ВАХ и 2 – темновая ВАХ.

На рис.3 представлены спектральные зависимости тока сток–исток I_{DS} при $V_{BG} = V_{DS} = -5$ В. Как видно, спектральные зависимости тока I_{DS} смещаются

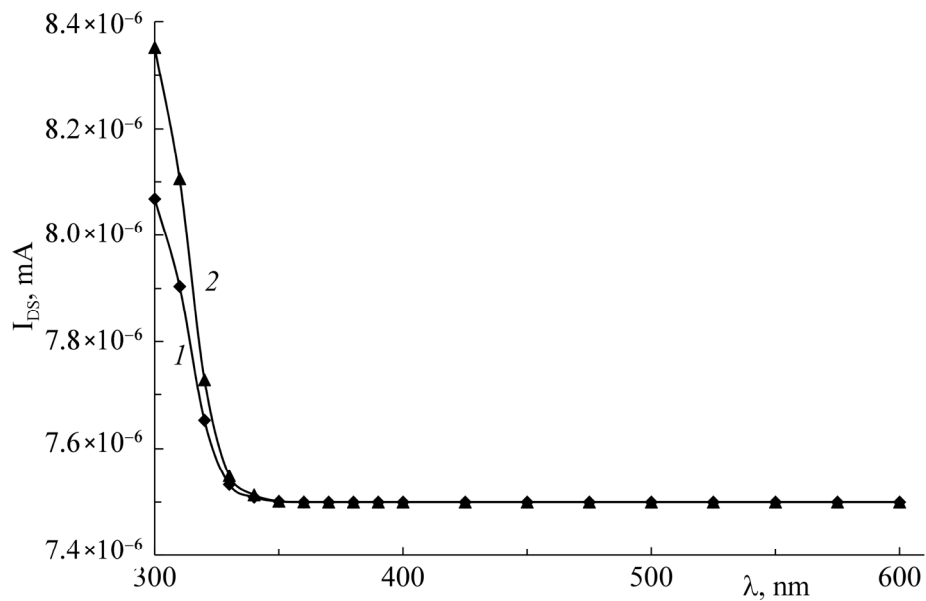


Рис.3. Спектральные зависимости тока I_{DS} при $V_{BG} = -5$ В, $V_{DS} = -5$ В и разных плотностях излучения: 1 – 1.1 Вт/см² и 2 – 1.6 Вт/см².

в область коротких длин волн по сравнению с массивным образцом кремния (известно, что у массивного кремния спектральная чувствительность лежит в области более 1 мкм [9]). Токовая фоточувствительность возрастает в области длин волн ниже 500 нм. Очевидно, что это обусловлено малыми размерами кремния в исследуемом образце. О спектральном смещении фототока с уменьшением диаметра Si НП сообщалось также в работе [10].

Такое поведение фототока и фоточувствительности Si можно объяснить следующим образом: во-первых, небольшой диаметр нанопроволоки (250 нм) ограничивает поглощение длинноволновых фотонов; во-вторых, в отличие от массивного монокристаллического Si, запрещенная зона Si НП растет с уменьшением размеров нанопроволоки [4]; в-третьих, начиная с энергии кванта $h\nu \geq 3$ эВ, внутренний квантовый выход для кремния растет и достигает значений 2–3 [11]; в-четвертых, как известно [12], длина волны испускаемого света от наноразмерных полупроводниковых образцов управляется выбором их размера L , так как энергия излучаемого кванта $h\nu = E_g + E_e + E_h$, где E_g – энергия запрещенной зоны, а E_e и E_h – энергии связи электронов и дырок, соответственно. Последние (E_e и E_h) увеличиваются с уменьшением размеров L . С другой стороны, согласно соотношению Ван Русбрук–Шокли, поглощение и испускание излучения – взаимосвязанные процессы [13]. Смещение спектра поглощения Si НП

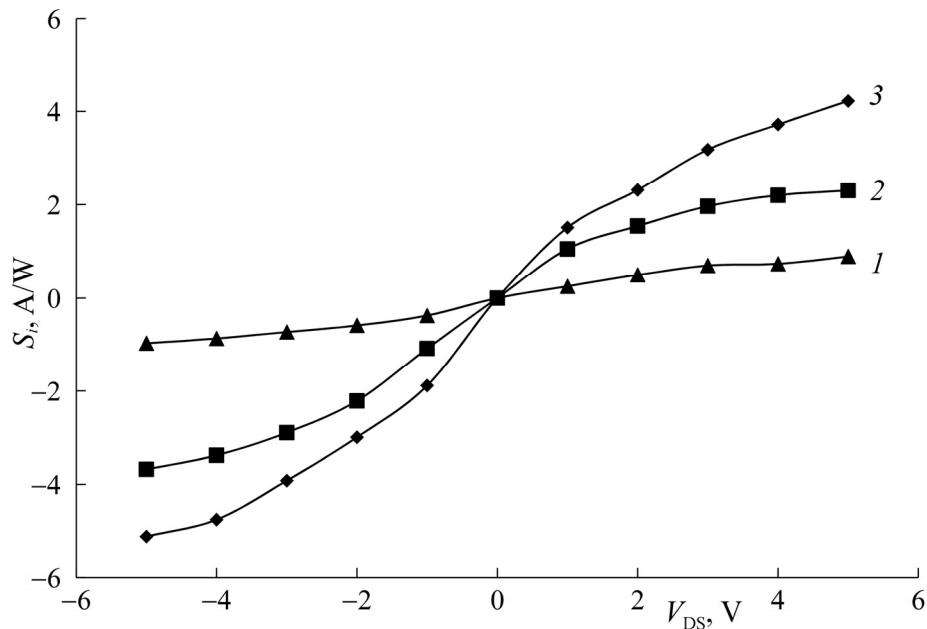


Рис.4. Зависимость фоточувствительности от напряжения сток–исток V_{DS} при $T = 300$ К и различных значениях напряжения на тыльном затворе V_{BG} : 1 – $V_{BG} = -1$ В, 2 – $V_{BG} = -5$ В и 3 – $V_{BG} = -10$ В.

в коротковолновую область связано также с этим фактором. Показано, что такое оптическое ограничение (голубое смещение) по энергии пропорционально $1/L^2$ [12]. Следовательно, с уменьшением размеров образцов коротковолновые фотоны могут более эффективно поглощаться в Si НП.

Зависимости фоточувствительности от напряжения сток–исток, а также спектральные зависимости фоточувствительности представлены на рис.4 и 5, соответственно. Зависимости токовой фоточувствительности $S_i(\lambda)$ от напряжения сток–исток V_{DS} и их спектральные зависимости рассчитаны по формуле

$$S_i(\lambda) = \frac{\Delta I_{DS}(\lambda)}{AW(\Delta\lambda)}.$$

Здесь A – площадь фоточувствительной площадки НП, $\Delta I_{DS}(\lambda)$ – фототок при длине волны λ и $\Delta\lambda = 10$ нм – минимально возможная при измерении полоса разрешения длин волн.

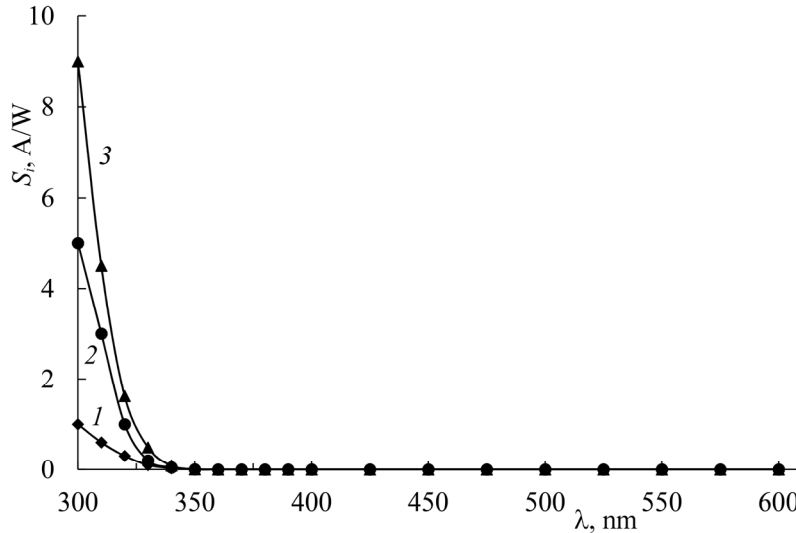


Рис.5. Спектральная зависимость фоточувствительности при $T = 300$ К: 1 – $V_{BG} = -1$ В, 2 – $V_{BG} = -5$ В и 3 – $V_{BG} = -10$ В.

Фоточувствительность в зависимости от V_{DS} достигает значений 4–6 А/Вт при комнатной температуре. Чувствительность растет в УФ области спектра и ее значения в ~10 раз больше по сравнению с фотодетекторами, изготовленными на основе массивного кремния [14–18] (см. рис.4 и 5). Например, в фотодетекторах на основе полевых транзисторов из графена значение фоточувствительности достигало ~126 мА/Вт при больших напряжениях (8 В) и мощности излучения в 20 мВт [19].

4. Заключение

Показано, что поглощающая способность кремниевой нанопроволоки смещается в коротковолновую область спектра и в отличие от массивного кремния фототок и фоточувствительность растут при комнатной температуре и принимают рекордно большие значения в УФ области. Таким образом, полевые транзисторы на основе Si НП могут успешно работать при комнатной температуре в УФ области спектра.

Исследование выполнено при финансовой поддержке ГКН МОН Армении в рамках научного проекта № 15T-1C279.

ЛИТЕРАТУРА

1. **G. Chen, L. Hu.** SPIE Newsroom: Solar & Alternative Energy, **1**, 1 (2008).
2. **L. Tsakalakos, J. Balch, J. Fronheiser, M.-Y. Shih, S.F. LeBoeuf, M. Pietrzykowski, P.J. Codella, B.A. Korevaar, O. Sulima, J. Rand, A. Davuluru, U. Rapolec.** J. Nanophotonics, **1**, 013552 (2007).
3. **E. Garnett, P. Yang.** Nano Lett., **10**, 1082 (2010).
4. **V. Parkash, A.K. Kulkarni.** IEEE Transactions on Nanotechnology, **10**, 1293 (2011).
5. **G. Sanders, Y.C. Chang.** Phys. Rev. B, **45**, 9202 (1992).
6. **A. Miranda, R. Vazquez, A. Diaz-Mendez, M. Cruz-Irisson.** Microelectronics, **40**, 456 (2009).
7. **M. Bruno, M. Palummo, S. Ossicini, R.D. Sole.** Surface Science, **601**, 2707 (2007).
8. **S. Pud, J. Li, V. Sibille, M. Petrychuk, V. Kovalenko, A. Offenhäusser, S. Vitusevich.** Nano Lett., **14**, 578 (2014).
9. **Р.Р. Варданян, В.К. Даллакян, У. Керст, К. Бойт.** Изв. НАН Армении, Физика, **47**, 111 (2012).
10. **T. Xu, Y. Lambert, Ch. Krzeminski, B. Grandidier, D. Stiévenard, G. Lévêque, A. Akjouj, Y. Pennec, B. Djafari-Rouhani.** J. Appl. Phys., **112**, 033506 (2012).
11. **В.С. Вавилов.** Действие излучения на полупроводники. Москва, Физматгиз, 1963.
12. **E.L. Wolf.** Nanophysics and Nanotechnology: An Introduction to Modern Concepts in Nanoscience. Second Ed., WILEY-VCH Verlag, Weinheim, 2006.
13. **J.I. Pankove.** Optical Processes in Semiconductors. New Jersey, Prentice-Hall, 1971.
14. <http://www.labsphere.com/products/spheres-and-components/laser-power-measurement-spheres/detector-assemblies.aspx>
15. <https://www.solarmeter.com/model57.html>
16. http://www.kyosemi.co.jp/en/sensor/gan_uv_sensor/kpdu37s1_q1
17. <http://physics.nist.gov/Pubs/TN1421/detector.html>
18. http://www.scitec.uk.com/uvphotodiodes/uvphotodiodes/notes/uv_index_measuring
19. **J. Wang, Z. Cheng, Z. Chen, J.-B. Xu, H. Ki Tsang, C. Shu.** J. Appl. Phys., **117**, 144504 (2015).

ԿԼԱՆՄԱՆ ԵԶՐԻ ՇԵՂՄԱՆ ԵՐԵՎԱՆԻՍԿԻ ՄԻԼԻՑԻՈՆԱՐԱՅԻՆ ՆԱՆՈԼԱՐՈՒՄ

Ֆ.Վ. ԳԱՍՊԱՐՅԱՆ, Ա.Հ. ԱՌԱՔԵԼՅԱՆ, Հ.Դ. ԽՈՆԴԿԱՐՅԱՆ

Հետազոտված են սիլիցիումային նանոլարից պատրաստված դաշտային տրանզիստորի մթնային և լուսային վոլտ-ամպերային բնութագրերը (ՎԱԲ): Ստացված են ինչպես ՎԱԲ-երը, այնպես էլ ֆոտոհոսանքի ու ըստ հոսանքի ֆոտոզգայնության սպեկտրալ կախվածությունները: Ցույց է տրված, որ սիլիցիումային նանոլարի կլանումը շեղվում է դեպի սպեկտրի կարճալիքային տիրույթ և ի տարբերություն հոծ սիլիցիումի ֆոտոհոսանքն ու ֆոտոզգայնությունը աճում են և սենյակային ջերմաստիճանում ընդունում արտակարգ բարձր արժեքներ սպեկտրի ուլտրամանուշակագույն տիրույթում: Առաջարկված է սիլիցիումային նանոլարից պատրաստված դաշտային տրանզիստորները օգտագործել որպես սենյակային ջերմաստիճանում աշխատող բարձր զգայնության ընդունիչներ սպեկտրի ուլտրամանուշակագույն տիրույթի համար:

SHIFTING EFFECT OF THE ABSORPTION EDGE IN THE SILICON NANOWIRE

F.V. GASPARYAN, A.H. ARAKELYAN, H.D. KHONDKARYAN

The dark and photo current–voltage characteristics (CVC), absorption spectrum and photosensitivity of the field effect transistor based on silicon nanowires were investigated. The spectral dependences of the photocurrent were obtained. It is shown that the absorption capacity of the silicon nanowire is shifted to shorter wavelengths. In contrast to bulk silicon photocurrent and photosensitivity rise at room temperature and take record high values in the ultraviolet region. It is offered to use the field-effect transistors based on silicon nanowires as a high-sensitive detectors for the ultraviolet spectral region, operating at room temperature.