

## Фотодетекторы на базе гетероструктур Ge/Si(001), выращенных методом горячей проволоки

© В.Г. Шенгуров<sup>\*†</sup>, В.Ю. Чалков<sup>\*</sup>, С.А. Денисов<sup>\*</sup>, Н.А. Алябина<sup>\*</sup>, Д.В. Гусейнов<sup>\*</sup>,  
В.Н. Трушин<sup>\*♦</sup>, А.П. Горшков<sup>+♦</sup>, Н.С. Волкова<sup>+</sup>, М.М. Иванова<sup>\*</sup>,  
А.В. Круглов<sup>♦</sup>, Д.О. Филатов<sup>♦</sup>

<sup>\*</sup> Научно-исследовательский физико-технический институт,  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
603950 Нижний Новгород, Россия

<sup>+</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
603950 Нижний Новгород, Россия

<sup>♦</sup> Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.М. Седакова,  
603950 Нижний Новгород, Россия

<sup>♦</sup> Научно-образовательный центр „Физика твердотельных наноструктур“,  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 17 марта 2015 г. Принята к печати 26 марта 2015 г.)

Сообщается о создании фотодетекторов коммуникационного диапазона длин волн  $\lambda = 1.3\text{--}1.55$  мкм на базе гетероструктур Ge/Si(001) с толстыми ( $\sim 0.5$  мкм) слоями Ge, выращенными методом горячей проволоки при пониженных ( $350^\circ\text{C}$ ) температурах роста. Полученные монокристаллические слои Ge отличались низкой плотностью прорастающих дислокаций ( $\sim 10^5 \text{ см}^{-2}$ ). Фотодетекторы продемонстрировали достаточно высокую квантовую эффективность ( $\sim 0.05$  при  $\lambda = 1.5$  мкм, 300 К) при умеренных значениях плотности обратного тока насыщения ( $\sim 10^{-2} \text{ А/см}^2$ ). Таким образом, было показано, что метод горячей проволоки является перспективным для формирования интегрированных фотодетекторов коммуникационного диапазона длин волн, в особенности, в условиях ограничений на условия термообработок.

### 1. Введение

В последние два десятилетия интенсивно развивалась новая отрасль науки и техники — кремниевая оптоэлектроника [1]. Основной задачей данной области является создание оптоэлектронных устройств на базе кремния, таких как светодиоды, фотодетекторы, оптические волноводы и т.п., которые могут быть интегрированы в электронные интегральные схемы (ИС), сформированные по традиционной КМОП технологии. В настоящее время наиболее перспективными фотодетекторами для этой цели считаются фотодиоды на базе гетероструктур Ge/Si(001) с толстыми ( $\sim 1$  мкм) эпитаксиальными слоями (ЭС) Ge [2]. Высокие значения коэффициента межзонного оптического поглощения Ge в так называемом коммуникационном диапазоне длин волн  $\lambda = 1.3\text{--}1.55$  мкм, соответствующем спектральной области минимума оптических потерь в кварцевых волоконных световодах  $\alpha \sim 10^6 \text{ см}^{-1}$ , подвижности электронов  $\mu$  (до  $1300 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  при 300 К), а также совместимость с хорошо развитой кремниевой КМОП ИС технологией делает фотодетекторы указанного типа практически идеальными кандидатами для оптоэлектронных ИС на базе кремния.

Для выращивания гетероструктур Ge/Si(001) с толстыми слоями Ge применялись различные методы: молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ), газофазная эпитаксия (ГФЭ), ГФЭ в сверхвысоком вакууме (СВВ) и др. Обычно температура роста ЭС Ge с низкой

плотностью составляющих дислокаций ( $\sim 10^7 \text{ см}^{-2}$ ) составляет  $600\text{--}700^\circ\text{C}$  [3]. Другой важный аспект выращивания ЭС Ge/Si(001) — снижение плотности дислокаций несоответствия, возникающих вследствие значительной разности постоянных кристаллической решетки Si и Ge ( $\sim 4.2 \cdot 10^{-2}$ ). Для снижения плотности дислокаций применяются различные подходы, например циклический отжиг в диапазоне температур  $700\text{--}800^\circ\text{C}$  [4] и др. Однако для интеграции Ge/Si фотодетекторов в стандартные КМОП ИС необходимы низкотемпературные методы роста ЭС Ge, для того чтобы не повредить уже сформированные электронные приборы при нагреве во время осаждения активных слоев Ge [2].

В [5] для выращивания толстых ( $\sim 0.5$  мкм) ЭС Ge/Si(001) при низкой температуре ( $\sim 350^\circ\text{C}$ ) был применен метод газофазного осаждения, где разложение газового источника происходит на горячей проволоке (HW CVD) [6]. Данным методом нами были выращены монокристаллические слои Ge/Si(001) с низкой плотностью прорастающих дислокаций ( $\sim 10^5 \text{ см}^{-2}$ ). В настоящей работе сообщается об изготовлении мезафотодиодов на базе толстых ЭС Ge/Si(001), выращенных методом HW CVD, приводятся результаты исследований их электрических и фотоэлектрических параметров.

### 2. Методика эксперимента

ЭС Ge толщиной  $\sim 0.5$  мкм выращивались на подложках  $n^+\text{-Si}(001)$  марки КЭМ-0.005 с использованием ори-

<sup>†</sup> E-mail: shengurov@phys.unn.ru

гинальной установки сублимационной МЛЭ, спроектированной и изготовленной в Научно-исследовательском физико-техническом институте Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (НИФТИ ННГУ) [7]. Базовое давление в ростовой камере составляло  $\sim 10^{-8}$  Торр. Перед началом роста подложки Si отжигались при  $1200^\circ\text{C}$  в течение 30 мин. Затем температура подложек снижалась до  $800^\circ\text{C}$  и на поверхность подложек из сублимационного источника осаждались буферные слои  $n^+\text{-Si}$ , легированные  $P$  (концентрация  $P \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) толщиной  $\sim 200$  нм. Осаждение ЭС Ge проводилось при температуре подложки  $T_g = 350^\circ\text{C}$  путем напуска в ростовую камеру  $\text{GeH}_4$  под давлением  $p_g = 4 \cdot 10^{-4}$  Торр, который разлагался пиролизически на поверхности Ta полоски, расположенной на расстоянии  $\sim 40$  мм от Si-подложки. Полоска Ta нагревалась пропуском через нее постоянного электрического тока до  $1200\text{--}1300^\circ\text{C}$ .

Морфология поверхности ЭС Ge/Si(001) изучалась методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) в атмосферных условиях при помощи АСМ „Солвер Про“ производства ЗАО „НТ МДТ“ (Зеленоград, Россия). Кристаллическая структура ЭС Ge/Si(001) исследовалась методом двухкristальной рентгеновской дифрактометрии при помощи дифрактометра Bruker D8 Discoverer и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) высокого разрешения при помощи ПЭМ JEOL JEM 2100F. Плотность прорастающих дислокаций определялась на оптическом микроскопе „LEIKADM 4000M“ методом подсчета ямок травления. Электрофизические параметры ЭС Ge определялись методом ван-дер-Пау при  $300\text{ K}$  на образцах, выращенных на подложках „кремний-на-изоляторе“ (КНИ) с тонкими высокоомными Si-слоями в тех же условиях, что и ЭС Ge/ $n^+\text{-Si}$ (001) в приборных структурах для изготовления мезафотодиодов. Последние были изготовлены стандартным методом фотолитографии с использованием жидкостного химического травления. Размеры мез составляли  $1.2 \times 1.8$  мм. Подконтактные слои  $p^+\text{-Ge}$  формировались методом ионной имплантации  $B$  с энергией  $\sim 30$  кэВ и дозой  $\sim 1.5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  с последующим отжигом при  $550^\circ\text{C}$  в течение 30 мин.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) и вольт-фарадные ( $C-V$ ) характеристики фотодиодов измерялись с помощью измерителя параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500A.

Спектры фоточувствительности фотодиодов измерялись по стандартной селективной методике при помощи решеточного монохроматора ЛОМО МДР-2 с галогеновой лампой мощностью 100 Вт. Интенсивность фотовозбуждения составляла  $\sim 0.4 \text{ мВт/см}^2$  при длине волны излучения  $\lambda = 1$  мкм, частота модуляции  $\sim 128$  Гц. Фотовозбуждение осуществлялось через окна в верхнем омическом контакте. Спектральные зависимости фототока  $I_{\text{ph}}(\lambda)$  измерялись в фотодиодном режиме при помощи синхронного детектора Stanford Research Systems

SR-530 и нормировались на поток фотонов  $L_{\text{ph}}(\lambda)$ , получая таким образом спектральную зависимость внешнего квантового выхода фотодетекторов:

$$\eta(\lambda) = \frac{I_{\text{sc}}(\lambda)}{eSL(\lambda)}, \quad (1)$$

где  $e$  — элементарный заряд,  $S$  — площадь мезы.

### 3. Результаты и обсуждения

АСМ исследования показали, что среднеквадратичная шероховатость поверхности ЭС Ge/Si(001) на площади  $2.5 \times 2.5$  мкм составляла не более 0.37 нм, что вполне удовлетворяет требованиям современной КМОП технологии. Поверхность ЭС Ge/Si(001) имела блочно-террасчатую структуру (рис. 1), что свидетельствует о слоевом механизме роста ЭС Ge.

Результаты рентгенодифракционных и электронно-микроскопических исследований подтвердили, что ЭС Ge/Si(001) имели монокристаллическую структуру. Ширина кривых качания вблизи рефлекса Ge (004) (см. вставку к рис. 2) на высоте 1/2 максимума составляла  $\sim 0.12^\circ$ , что в  $\sim 4$  раза меньше, чем наименьшие значения, приводимые в литературе для толстых ЭС Ge/Si(001), выращенных методом ГФЭ при пониженном давлении [8].

По данным рентгеновской дифракции (рис. 2), ЭС Ge были практически полностью релаксированными, остаточная упругая деформация слоев Ge/Si(001) составляла  $\sim 2.5 \cdot 10^{-3}$ . На ПЭМ изображении поперечного среза структуры Ge/Si (рис. 3) видны области контраста напряжений вблизи границы Ge/Si, связанные с дислокациями несоответствия, в то время как толщина ЭС Ge практически свободна от дефектов. По данным метода подсчета ямок травления, плотность прорастающих дислокаций в ЭС Ge составляла  $\sim 10^5 \text{ см}^{-2}$ .

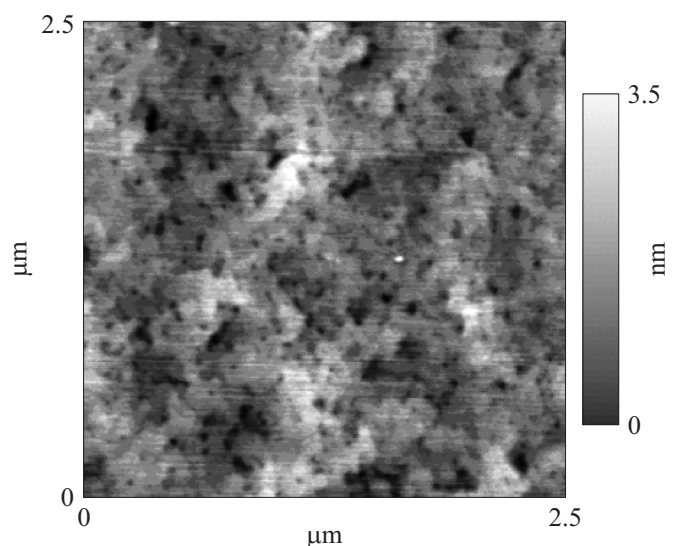


Рис. 1. АСМ изображение поверхности ЭС Ge/Si(001).

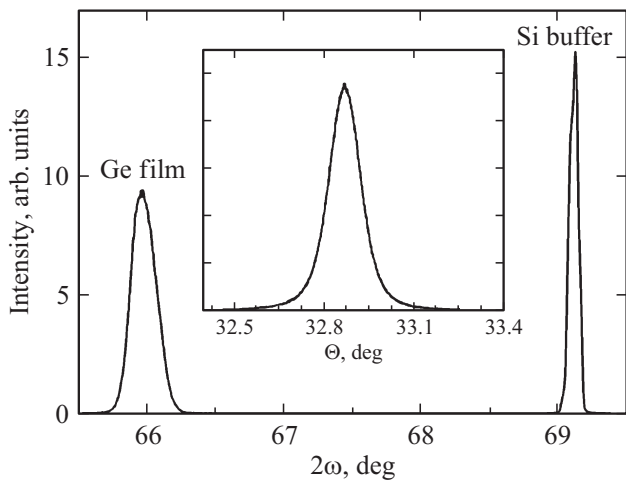


Рис. 2. Дифракционная кривая  $\Omega - 2\omega$  ЭС Ge/Si(001). На вставке — кривая качания вблизи рефлекса Ge (004).

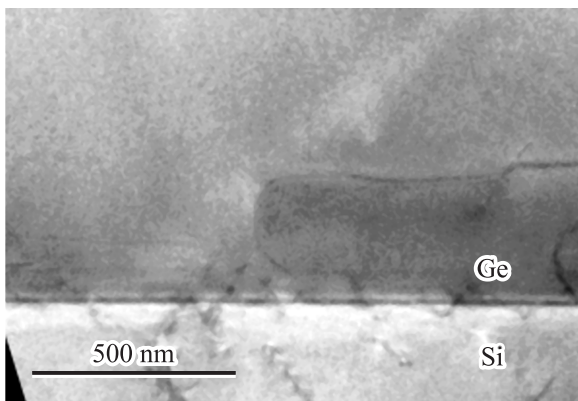


Рис. 3. ПЭМ изображение поперечного среза гетероструктуры Ge/Si(001). Ускоряющее напряжение 180 кВ.

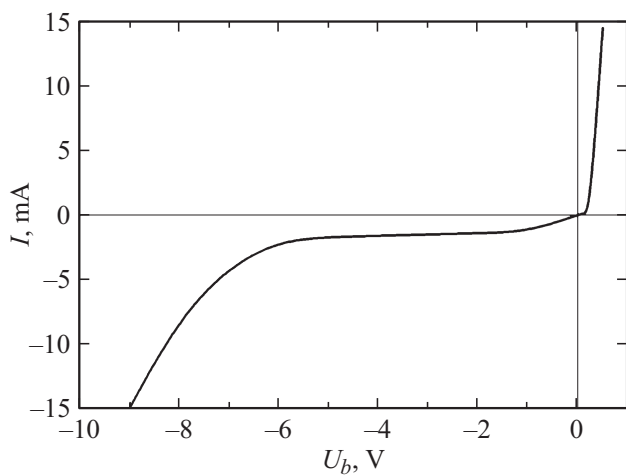


Рис. 4. Темновая ВАХ (300 К) мезафотодиода на базе гетероструктуры Ge/Si(001).

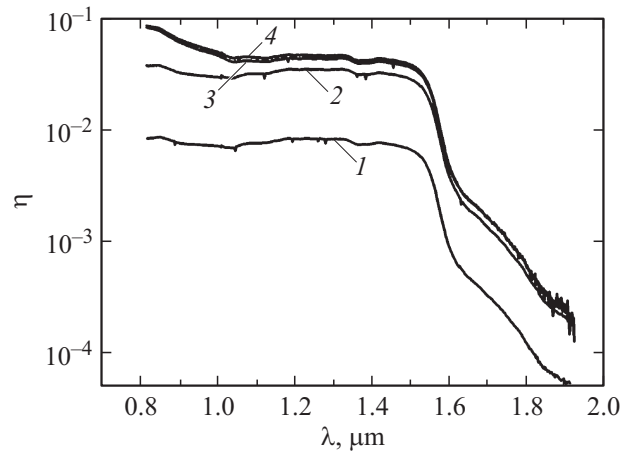


Рис. 5. Спектры квантовой эффективности фотодиода на базе гетероструктуры Ge/Si(001) (300 К).  $U_b$ , В: 1 — 0, 2 — 0.1, 3 — 0.2, 4 — 0.5.

Данное значение находится среди наименьших, опубликованных для толстых ЭС Ge/Si(001) [2]. Следует отметить, что для понижения плотности дислокаций в работе [3] применялось предосаждение тонкого слоя Ge при низкой температуре (300°C). Данный слой, содержащий большое число дислокаций несоответствия, играл роль виртуальной подложки для дальнейшего роста релаксированного ЭС Ge с низкой концентрацией прорастающих дислокаций [3].

Холловские измерения показали, что ЭС Ge имели *p*-тип проводимости, концентрация и подвижность дырок при 300 К составляли  $(1-2) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и  $\sim 900 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  соответственно, что сравнимо с типичными значениями для объемного Ge [9].

Фотодиоды, сформированные на базе гетероструктур Ge/Si(001), имели асимметричные ВАХ (рис. 4). Плотность темнового обратного тока  $j_s \sim 10^{-2} \text{ А/см}^2$  при обратном напряжении  $U_b = 1 \text{ В}$  (300 К) соответствует типичным значениям для фотодиодов на базе толстых слоев Ge/Si(001), приводимым в литературе [2]. Данные значения  $j_s$  превышают типичные для *p-n*-фотодиодов на базе массивного Ge ( $\sim 10^{-3} \text{ А/см}^2$  [10]), что в свою очередь обусловлено дислокациями несоответствия в области пространственного заряда (ОПЗ)  $n^+$ -Si/*p*-Ge перехода [4]. По данным *C-V* измерений, концентрация ионизованных акцепторов в слое *p*-Ge  $N_A = (0.9-1.5) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , что согласуется с данными холловских измерений.

Спектральные зависимости (300К) внешней квантовой эффективности  $\eta(\lambda)$  фотодиода на базе ЭС Ge/Si(001), измеренные при различных значениях обратного напряжения  $U_b$ , представлены на рис. 5. Фотоотклик в диапазоне длин волн  $\lambda = 1.1-1.5 \text{ мкм}$ , обусловленный прямыми (в обратном пространстве) межзонными оптическими переходами в слое Ge, увеличивается с ростом  $U_b$ . Это свидетельствует о том, что слой Ge не был полностью обеднен при  $U_b = 0 \text{ В}$ . Фотоотклик

испытывает насыщение при  $U_b = -0.5$  В, что соответствует полному обеднению слоя Ge. Отсюда может быть сделана оценка диффузионной длины неосновных носителей (электронов) в слое Ge  $L_n \sim 0.1$  мкм.

Значение  $\eta$  при  $\lambda = 1.45$  мкм составляет  $\sim 0.05$ , что в  $\sim 4$  раза меньше рекордного значения на сегодняшний день ( $\sim 0.22$  [11]). Это может быть обусловлено слишком высокой фоновой концентрацией акцепторов и, как следствие, недостаточно большой диффузионной длиной электронов в слое  $p$ -Ge. Таким образом, для повышения квантового выхода фотодиодов необходимо дальнейшее совершенствование технологии выращивания слоев Ge/Si(001) с целью понижения концентрации фоновых акцепторов, что позволит увеличить толщину слоя Ge. Кроме того, для повышения квантового выхода фотодиодов необходимо применять просветляющее покрытие входного окна, пассивацию боковой поверхности мез и другие методы снижения обратных темновых токов.

#### 4. Заключение

Результаты данной работы показывают перспективность низкотемпературного метода горячей проволоки (HW CVD) для выращивания приборных структур с толстыми слоями Ge/Si(001) для фотодетекторов коммуникативного диапазона длин волн 1.3–1.55 мкм. Данным методом были получены монокристаллические эпитаксиальные слои Ge/Si(001) толщиной  $\sim 0.5$  мкм, характеризующиеся низкой плотностью прорастающих дислокаций ( $\sim 10^5$  см $^{-2}$ ), при температуре роста 350°C. Мезафотодиоды, изготовленные на базе гетероструктур Ge/Si(001), выращенных указанным методом, показали внешнюю квантовую эффективность  $\sim 0.05$  в диапазоне длин волн 1.1–1.5 мкм (300 К); при этом имеются значительные резервы для дальнейшего ее увеличения.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (№ 14-02-31370\_мол\_а) и гранта президента РФ (МК-7021.2015.2).

АСМ, ПЭМ и рентгеноструктурные исследования выполнены в центре коллективного пользования „Научно-образовательный центр «Физика твердотельных наноструктур»“ Нижегородского государственного университета (ННГУ) им. Н.И. Лобачевского.

Авторы благодарят проф. Д.А. Павлова и А.И. Боброва за проведение ПЭМ исследований.

#### Список литературы

- [1] L. Pavesi. *J. Phys.: Condens. Matter*, **15**, R1169 (2003).
- [2] J. Wang, S. Lee. *Sensors*, **11**, 696 (2011).
- [3] L. Colace, G. Masini, G. Assanto, H.-C. Luan, K. Wada, L.C. Kimerling. *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 1231 (2000).
- [4] S. Fama, L. Colace, G. Masini, G. Assanto, H.-C. Luan. *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 586 (2002).
- [5] S.A. Matveev, S.A. Denisov, D.V. Guseinov, V.N. Trushin, A.V. Nezhdanov, D.O. Filatov, V.G. Shengurov. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **541**, 012 026 (2014).
- [6] C. Mukherjee, H. Seitz, B. Schroder. *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 3457 (2001).
- [7] В.Г. Шенгуров, В.Ю. Чалков, С.А. Денисов, С.П. Светлов, Д.В. Шенгуров. *Вакуумная техника и технология*, **21**, 45 (2011).
- [8] J.M. Hartmann, A. Abbadie, A.M. Papon, P. Holliger, G. Rolland, T. Billon, J.M. Fedeli, M. Rouviere, L. Vivien, S. Laval. *J. Appl. Phys.*, **95**, 5905 (2004).
- [9] О.А. Голикова, Б.Я. Мойжес, В. Яа, Л.С. Стильбанс. *ФТТ*, **3**, 2259 (1962).
- [10] T.P. Pearsall. In: *Optical Fiber Communications: Devices, Circuits and Systems*, eds M.J. Howes, D.V. Morgan (N.Y., Wiley, 1980) p. 147.
- [11] R. Kaufmann, G. Isella, A. Sanchez-Amores, S. Neukom, A. Neels, L. Neumann, A. Brenzikofer, A. Dommann, C. Urban, H. von Kanel. *J. Appl. Phys.*, **110**, 023 107 (2011).

Редактор Т.А. Полянская

#### Photodetectors based on Ge/Si(001) heterostructures grown by hot wire CVD method

V.G. Shengurov\*, V.Yu. Chalkov\*, S.A. Denisov\*, N.A. Alyabina\*, D.V. Guseinov\*, V.N. Trushin\*, A.P. Gorshkov<sup>+♦</sup>, N.S. Volkova<sup>+</sup>, M.M. Ivanova<sup>•</sup>, A.V. Kruglov<sup>♦</sup>, D.O. Filatov<sup>♦</sup>

\* Physicotechnical Research Institute, Lobachevskii State University of Nizhny Novgorod, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

+ Lobachevskii State University of Nizhny Novgorod, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

• Sedakov Research Institute of Measuring Systems, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

♦ Research and Educational Center for Physics of the Solid State Nanostructures Lobachevskii State University of Nizhny Novgorod, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract** We report on the fabrication of the photodetectors for the communication wavelength band  $\lambda = 1.3\text{--}1.55$   $\mu\text{m}$  based on the Ge/Si(001) heterostructures with thick ( $\sim 0.5$   $\mu\text{m}$ ) Ge layers grown by hot wire method at reduced (350°C) growth temperatures. The single crystal Ge layers were featured by low threading dislocation density ( $\sim 10^5$  cm $^{-2}$ ). The photodetectors demonstrated high enough quantum efficiency ( $\sim 0.05$  at  $\lambda = 1.5$   $\mu\text{m}$ , 300 K) at moderate reverse saturated current densities ( $\sim 10^{-2}$  A/cm $^2$ ). Thus, hot wire method has been demonstrated to be a promising one for the fabrication of the integrated photodetectors for the communication waveband, especially in the case when the overall thermal budget restrictions are essential.