

# Температурная зависимость квантовой эффективности кремниевых $p-n$ -фотоприемников

© Ю.А. Гольдберг, В.В. Забродский, О.И. Оболенский, Т.В. Петелина, В.Л. Суханов

Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 15 июля 1998 г. Принята к печати 28 июля 1998 г.)

Исследована температурная зависимость квантовой эффективности фотодиодов на основе кремниевых  $p-n$ -структур в области энергий фотонов 1.1–5.2 эВ и интервале температур 77–300 К. Показано, что для энергий фотонов, превышающих 1.4 эВ, изменение квантовой эффективности не превосходит 0.01% на градус. Проводится сопоставление температурной зависимости фотоотклика кремниевых фотодиодов и фотодиодов на основе GaAs и GaP барьеров Шоттки.

1. Среди ультрафиолетовых полупроводниковых фотодетекторов наиболее распространенными являются кремниевые  $p-n$ -структуры и GaAs и GaP диоды Шоттки [1,2]. Общим недостатком этих приборов является резкий спад квантовой эффективности в коротковолновой области спектра. Недостатком приборов на основе GaAs и GaP, кроме того, является сильная температурная зависимость фототока, который возрастает в несколько раз при увеличении температуры от 100 до 300 К [3,4].

Нам неизвестны экспериментальные работы, в которых бы детально изучалась температурная зависимость квантовой эффективности кремниевых  $p-n$ -структур в широком интервале температур. Настоящее сообщение посвящено именно этому вопросу. Наши эксперименты показывают, что в коротковолновой области 1.4–5.2 эВ квантовая эффективность практически не зависит от температуры. В длинноволновой области 1.1–1.3 эВ имеется сильная температурная зависимость, обусловленная, по-видимому, ростом числа фононов, необходимых при непрямом оптическом переходе.

В работах [3,4] предложена модель, объясняющая сильный рост фототока с температурой. Согласно этой модели, происходит захват фотоносителей на ловушки, расположенные в области пространственного заряда (ОПЗ). Такая ловушка, по предположению, способна одновременно захватывать электрон и дырку, поэтому большая часть фотоносителей при низкой температуре рекомбинирует в ловушках, а оставшаяся часть выбрасывается из ловушки за счет теплового возбуждения. Эта часть фотоносителей и дает вклад в фототок, растущий с ростом температуры. Экспериментальные результаты и их объяснение, приведенные в [3,4], свидетельствуют о весьма высокой концентрации ловушек в ОПЗ. Оценки показывают, что ловушки атомного типа должны были бы иметь концентрацию порядка  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ , так что, скорее всего, эти ловушки двумерны, типа дислокационных петель.

Отсутствие температурного роста фототока в кремниевых  $p-n$ -структурах имеет, по нашему мнению, принципиально важное значение. Этот факт свидетельствует о высоком технологическом и конструктивном совершенстве кремниевых структур и отсутствии в их ОПЗ каких-либо структурных дефектов.

2. Объектами исследования были кремниевые фотодиоды, изготовленные методом локальной диффузии из газовой фазы. Исходная подложка  $n\text{-Si:P}$  с ориентацией [100] и удельным сопротивлением  $20 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  окислялась в сухом кислороде, в присутствии хлорсодержащих веществ. После окисления вскрывались окна  $7 \times 7 \text{ мм}$ , в которые проводилась диффузия бора на глубину  $\leq 30 \text{ нм}$ ; при этом концентрация примеси в приповерхностном слое, определенная методом спектроскопии обратного рассеяния (RBS), составляла  $N_A(0) \approx 10^{22} \text{ см}^{-3}$ . На обратной стороне подложки создан изотипный  $n-n^+$ -переход. Металлические контакты на лицевой стороне формировались с использованием методов фотолитографии и травлением осажденной в вакууме пленки алюминия.

На рис. 1 приведена спектральная характеристика такого фотоприемника. Анализ спектра квантовой эффективности данного фотодиода, а также спектра отражения кремния [5] позволяют сделать вывод, что внутренняя квантовая эффективность детектора близка к единице. Разработанный тип детектора позволяет работать в ультрафиолетовой области.

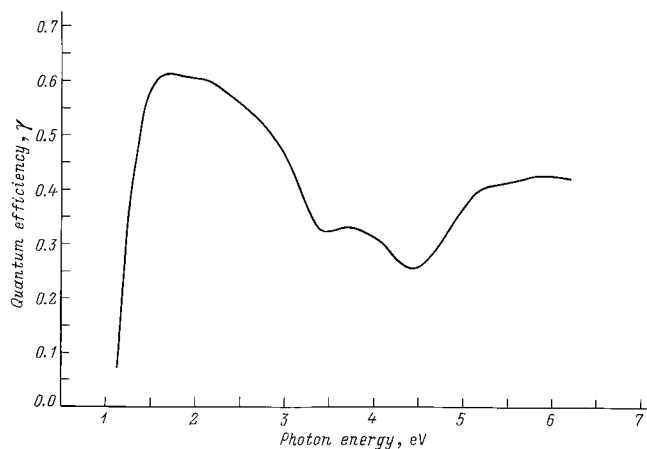
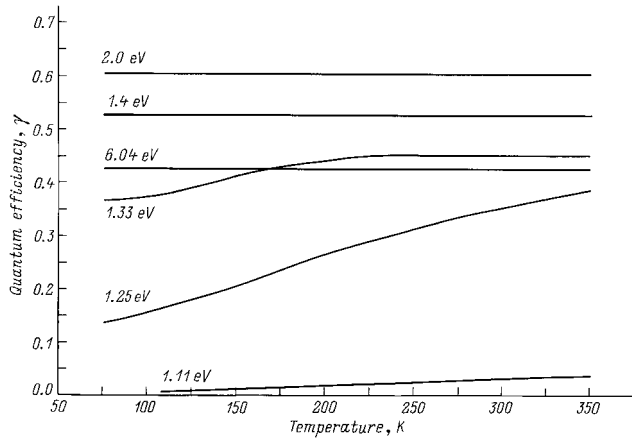


Рис. 1. Зависимость квантовой эффективности кремниевых фотодиодов (в электронах на фотон) от энергии фотона при комнатной температуре.



**Рис. 2.** Зависимость квантовой эффективности кремниевого фотодиода (в электронах на фотон) от температуры при нескольких энергиях фотонов.

Модель подобных сильно несимметричных кремниевых  $p-n$ -переходов со сверхмелким залеганием рассмотрена в работе [6]. Высокое значение электрического поля  $E > 10^4$  В/см, распространяющееся вплоть до внешней поверхности легированной области  $p-n$ -перехода, предопределяет дрейф генерированных в этой области носителей с высокими скоростями, близкими к предельной скорости насыщения  $\approx 10^7$  см/с. Время, за которое носитель, генерированный вблизи поверхности, достигает  $p-n$ -перехода  $t \leq 3 \cdot 10^{-13}$  с. Столь малые времена дрейфа объясняют малый уровень рекомбинационных потерь в тонкой сильно легированной области  $p-n$ -перехода.

3. Результаты проведенных экспериментов отражены на рис. 2 и сводятся к следующему.

При энергиях фотонов 1.1–1.3 эВ квантовая эффективность с ростом температуры возрастает, причем тем сильнее, чем меньше энергия фотонов. Предполагаем, что это связано с увеличением числа фононов, поскольку при небольшом превышении энергии фотона над шириной запрещенной зоны не прямые оптические переходы происходят в основном с поглощением фонона.

При энергиях фотонов в интервале 1.4–5.2 эВ квантовая эффективность не зависит от температуры. Погрешность измерений не превышала 1.5%, поэтому можно сделать вывод о том, что в этой области спектра изменение квантовой эффективности не превышает 0.01%/°C.

Авторы благодарны О.В. Константинову за обсуждение результатов данной работы.

## Список литературы

- [1] Hamamatsu Photonics Photodiodes Catalog, 1995.
- [2] Е.И. Иванов, Л.Б. Лопатина, В.Л. Суханов, В.В. Тучкевич, Н.Н. Шмидт. ФТП, **15**, 1343 (1981).
- [3] Ю.А. Гольдберг, О.В. Константинов, О.И. Оболенский, Е.А. Поссе, Б.В. Царенков. ФТП, **31**, 563 (1997).

- [4] Ю.А. Гольдберг, О.В. Константинов, Е.А. Поссе, Б.В. Царенков. ФТП, **29**, 215 (1995).
- [5] H.R. Philipp, E.A. Taft. Phys. Rev., **99**, 1151 (1955).
- [6] D. Redfield. Phys. Appl. Lett., **35**, 182 (1979).

Редактор В.В. Чалдышев

## The temperature dependence of quantum efficiency of Si $p-n$ -photodetectors

Yu.A. Goldberg, V.V. Zabrodsky, O.I. Obolensky, T.V. Petelina, V.L. Suhanov

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** The temperature dependence of quantum efficiency of photodiodes based on Si  $p-n$ -structures has been investigated in the photon energy range 1.1–5.2 eV and temperature interval 77–300 K. It has been demonstrated that quantum efficiency variation does not exceed 0.01% per degree for the photon energies greater than 1.4 eV. A comparison of photocurrent temperature dependencies of Si  $p-n$ -structures against GaAs and GaP Schottky diodes has been carried out.

E-mail: oleg@rpro.ioffe.rssi.ru