

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} 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.

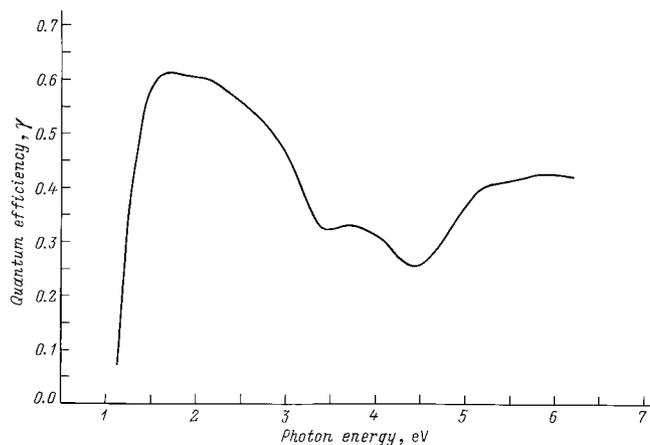


Рис. 1. Зависимость квантовой эффективности кремниевых фотодиодов (в электронах на фотон) от энергии фотона при комнатной температуре.

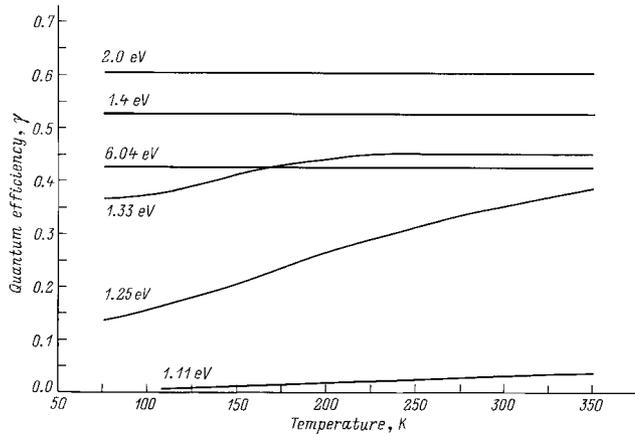


Рис. 2. Зависимость квантовой эффективности кремниевого фотодиода (в электронах на фотон) от температуры при нескольких энергиях фотонов.

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