

06.1

## Температурная зависимость квантовой эффективности фотодиодов Шоттки на основе 4H-SiC

© Т.В. Бланк, Ю.А. Гольдберг, Е.В. Калинина,  
О.В. Константинов, А.О. Константинов, А. Hallen

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург  
ACREO AB, Electrum 236, SE 16440 Kista, Sweden  
KTH Electrum, Department of Electronics, S-16440 Kista, Sweden

Поступило в Редакцию 29 марта 2001 г.

На основе чистого эпитаксиального слоя  $n$ -4H-SiC ( $N_d - N_a = 4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ) изготовлены структуры металл-полупроводник, которые позволили создать фотоприемники ультрафиолетового излучения с максимумом фоточувствительности при 4.9 eV и квантовой эффективностью до 0.3 el/ph. Спектр фоточувствительности структур оказался близким к спектральной кривой бактерицидного воздействия ультрафиолетового излучения. Экспериментальное изучение температурной зависимости квантовой эффективности фотоэлектропреобразования показало, что при энергиях фотонов 3.4–4.7 eV и температурах, больших 300 K, имеет место быстрый рост квантовой эффективности с ростом температуры, что обусловлено участием фононов в непрямых межзонных переходах. Этот участок роста пропадает, когда энергия фотона близка к пороговой энергии прямых оптических переходов в непрямозонном полупроводнике, что дает возможность оценить ее величину ( $\sim 4.9 \text{ eV}$ ).

**Введение.** Как известно, диоды Шоттки на основе широкозонных полупроводников, таких как SiC, являются в настоящее время наиболее распространенным типом фотоприемников ультрафиолетового излучения. Обычно для этой цели используется 6H-SiC, спектр таких приборов расположен в области 3.3–6 eV с максимумом при 4.5 eV [1]. Перспективность 4H-SiC для использования в высокотемпературной и в высоковольтной фотоэлектронике была рассмотрена в ряде работ (например [2,3]). Отметим, что спектральная область фоточувствительности поверхностно-барьерной структуры на основе 4H-SiC (3.9–5.2 eV) с максимумом при 4.9 eV оказывается близкой к спектру бактерицидного воздействия ультрафиолетового излучения, благодаря чему данный фо-

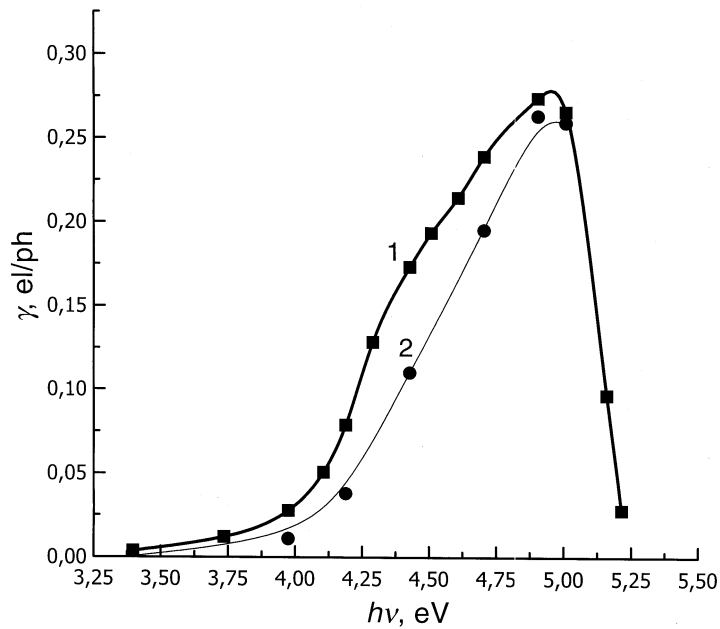
топриемник может найти широкое применение в медицине и биологии. Спектральная зависимость квантовой эффективности фотоприемников на основе 4Н-SiC изучалась до сих пор при комнатной температуре [4,5].

Основным предметом этой статьи является температурная зависимость квантовой эффективности диодов Шоттки Сг-4Н-SiC при различных энергиях детектируемых фотонов (3.2–6 eV). Такое исследование позволяет судить о температурной стабильности фотоприемника и выявить физические особенности механизма фотоэлектропреобразования в таком диоде Шоттки. В частности, на механизм фотоэлектропреобразования могут влиять дефекты кристаллической структуры в приповерхностной области полупроводника, с которыми связана температурная нестабильность GaAs и GaP фотодиодов Шоттки [6]. В настоящей статье показано, что имеется еще одна физическая особенность, а именно резкий рост фототока с температурой вблизи порога прямого оптического поглощения, что позволяет определить энергию этого порога.

**Образцы и методика измерений.** Барьеры Шоттки формировались методом термовакuumного напыления Сг на эпитаксиальные слои 4Н-SiC *n*-типа проводимости с концентрацией нескомпенсированных доноров  $N_d - N_a = 4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  и толщиной 25  $\mu\text{m}$ . Слои выращивались методом газотранспортной эпитаксии (CVD) на коммерческих подложках *n*-типа 4Н-SiC с концентрацией нескомпенсированных доноров  $N_d - N_a = 1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . Базовый омический контакт создавался термическим напылением Сг на подложку.

При измерениях диод помещался в термостат с кварцевыми окнами, источником света в ультрафиолетовой области спектра служила лампа ДРТ-300. Это позволило исследовать фотоприемники в температурном интервале 78–400 К и в интервале энергий детектируемых фотонов 3.2–6 eV. Фототок измерялся в режиме короткого замыкания; из значений фототока определялась квантовая эффективность (электрон/фотон), т.е. отношение токовой чувствительности ( $A/W$ ) к энергии детектируемых фотонов (eV).

Коротковолновым фотоэффектом обычно называют случай, когда весь свет поглощается в фотоэлектроактивной области, т.е. длина поглощения света  $L_v = \alpha^{-1}$  ( $\alpha$  — коэффициент поглощения света) должна быть меньше суммы толщины слоя объемного заряда  $W$  и диффузионной длины неосновных носителей заряда, в данном случае дырок  $L_p$ :  $L_v < W + L_p$ . Длинноволновым фотоэффектом называют обратный случай:  $L_v > W + L_p$ . Для исследуемых структур (концентрация нескомпенсированных доноров  $N_d - N_a = 4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ) толщина

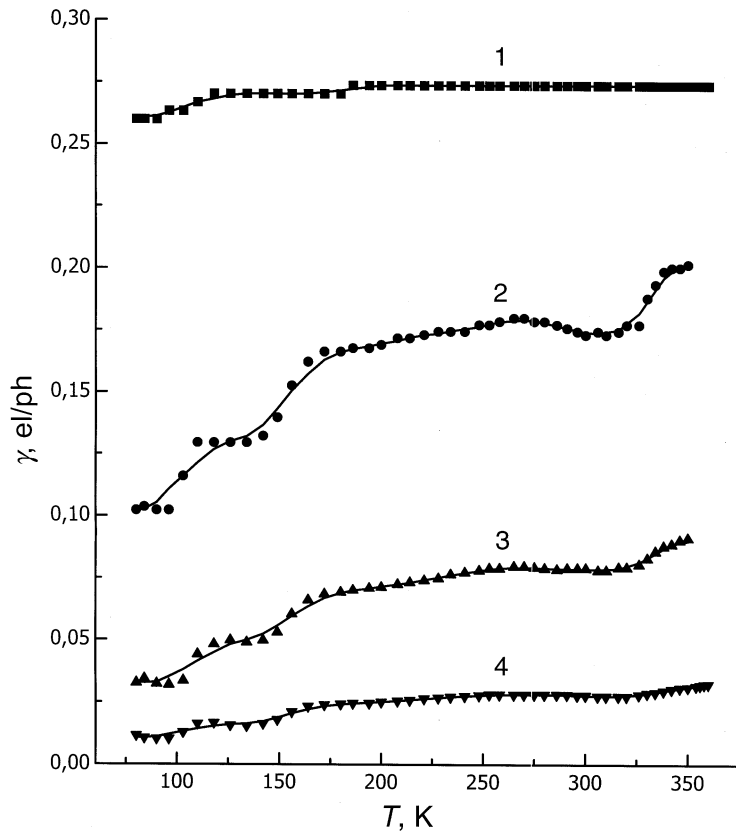


**Рис. 1.** Зависимость квантовой эффективности Si-4H-SiC поверхностно-барьерных фотоприемников от энергии фотонов при различных температурах  $T$ : 1 —  $T = 300$  К, 2 —  $T = 100$  К.

слоя объемного заряда  $W$  составляет  $5 \cdot 10^{-5}$  см, диффузионная длина дырок  $L_p \sim 2 \cdot 10^{-4}$  см. Если воспользоваться данными по спектральной зависимости коэффициента поглощения света, приведенными в [7], то условия длинноволнового фотоэффекта реализуются при энергиях фотонов, меньших 4.8 eV, а условия коротковолнового фотоэффекта — при энергиях фотонов, больших 4.8 eV.

**Спектральная характеристика диода.** Из рис. 1, на котором представлены зависимости квантовой эффективности от энергии фотона при различных температурах, видно, что:

1. Фототок практически отсутствует при энергиях фотонов, меньших 3.2 eV. Отсюда следует, что ширина запрещенной зоны (непрямая) при  $T = 300$  К составляет величину  $\sim 3.2$  eV, что соответствует опубликованным данным [7].



**Рис. 2.** Зависимость квантовой эффективности Cr-4H-SiC поверхностно-барьерных фотоприемников от температуры при различных энергиях фотонов  $h\nu$ : 1 —  $h\nu = 5.07$  eV, 2 —  $h\nu = 4.42$  eV, 3 —  $h\nu = 4.18$  eV, 4 —  $h\nu = 3.96$  eV.

2. Диод Шоттки на основе 4H-SiC имеет квантовую эффективность более 10% в спектральном интервале 4.3–5.2 eV, с максимумом 4.9 eV и эффективностью в максимуме  $\sim 0.3$  el/ph; характеристика имеет плавный фронт со стороны малых энергий фотонов и резкий спад со стороны больших.

**Температурная зависимость фототока.** Из сопоставления двух кривых на рис. 1, относящихся к разным температурам, виден рост

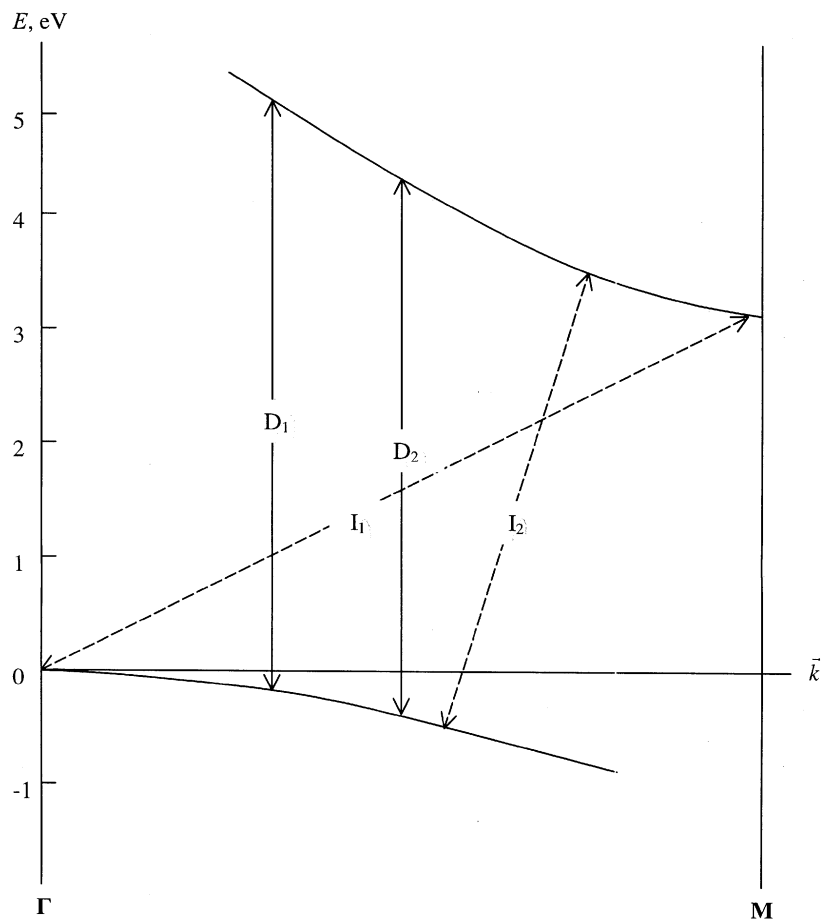
квантовой эффективности с температурой. На рис. 2 представлены зависимости квантовой эффективности от температуры при различных энергиях фотонов. При низких температурах (100–200 К) для всех энергий фотонов зависимость квантовой эффективности от температуры одинаковая — квантовая эффективность возрастает, а затем стремится к насыщению. Эта зависимость в коротковолновой области аналогична наблюдавшейся нами для GaAs и GaP поверхностно-барьерных структур и связана с захватом и высвобождением электронно-дырочных пар на флуктуационных ловушках, расположенных в приповерхностной области полупроводника [6], а в длинноволновой области она связана с изменением положения края поглощения и ростом диффузионной длины дырок с температурой.

При высоких температурах (более 300 К) зависимость квантовой эффективности от температуры существенно отличается для областей длинноволнового и коротковолнового фотоэффекта.

В области длинноволнового фотоэффекта присутствует быстро нарастающий высокотемпературный участок. Этот участок обусловлен влиянием фононов, способствующих непрямоугольному оптическому переходу, вероятность которого растет с ростом числа фононов, т. е. с ростом температуры. Энергия фотона, при которой исчезает участок быстрого высокотемпературного роста, и будет энергией прямого межзонного оптического перехода. По нашим данным, эта энергия близка к 4.9 eV. В литературе энергия прямых оптических переходов ранее была оценена только теоретически в 5–6 eV [6], что находится в соответствии с полученным нами значением.

В области коротковолнового фотоэффекта этот участок отсутствует, так как фотоэффект происходит главным образом с участием прямых оптических переходов.

**Модель зонной структуры и обсуждение результатов эксперимента.** Согласно существующим представлениям, минимум зоны проводимости 4H-SiC лежит в  $M$ -точке  $k$ -пространства, тогда как максимум валентной зоны располагается в  $\Gamma$ -точке зоны Бриллюэна [7,8]. На рис. 3 дается схематическое изображение зоны Бриллюэна для 4H-SiC. Очевидно, что межзонный переход электрона при поглощении фотона с энергией, большей 3.2 eV, сначала происходит как не прямой. Этот факт иллюстрируется наклонной пунктирной прямой  $I_1$  (indirect). С ростом энергии фотона наклон этой пунктирной прямой становится меньше, что иллюстрирует наклонная пунктирная прямая  $I_2$ . От этой



**Рис. 3.** Схематическое изображение зоны Бриллюэна 4H-SiC.

позиции достаточно перейти лишь немного в сторону увеличения энергии фотона, чтобы оптический переход стал прямым, как это показано сплошной вертикальной прямой  $D_1$  (direct). Эта прямая иллюстрирует порог прямого оптического перехода, которому в нашем случае и соответствует энергия фотона, равная 4.9 eV. При дальнейшем увеличении энергии фотона вертикальная прямая  $D_1$  смещается в положение  $D_2$ .

Мы предполагаем, однако, что при такой ситуации электрон и дырка связываются в горячий экситон с большой энергией связи, порядка 0.1 eV. При энергии детектируемых фотонов более 5 eV фотоэлектрон и фотодырка образуются в той области  $k$ -пространства, в которой дно зоны проводимости практически параллельно потолку валентной зоны, при этом скорости электрона и дырки направлены в одном направлении и близки по абсолютной величине. Поэтому вследствие кулоновского взаимодействия они могут образовать экситон. Возможность существования таких экситонов была впервые теоретически предсказана в работе [9]. Такой экситон прочно связывает электрон и дырку, не давая им разделиться электрическим полем слоя объемного заряда, и способен покинуть область объемного заряда и рекомбинировать в квазинейтральной толще полупроводника или в металле. С этим связан (по нашему предположению) резкий спад квантовой эффективности фотоэлектропреобразования при энергиях фотонов, превосходящих 5 eV, в фотодиодах Шоттки на основе 4H-SiC.

Работа была частично поддержана проектом INTAS 97-2141.

## Список литературы

- [1] *Boston Electronic Corp, SiC-UV-detectors, Catalog, 1996.*
- [2] *Wahab Q., Kimoto T., Ellison A., Hallin C., Tuominen M., Yakimova R., Henry A., Bergman J.P., Janzen E. // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 72. N 4. P. 445-447.*
- [3] *Lee S.-K., Zetterling C.-M., Ostling M. // J. Appl. Phys. 2000. V. 87. N 11. P. 8039-8044.*
- [4] *Вереничкова Р.Г., Водаков Ю.А., Литвин Д.П., Мохов Е.Н., Роенков А.Д., Санкин В.И. // ФТП. 1992. Т. 26. В. 6. С. 1008-1014.*
- [5] *Виолина Г.Н., Калинина Е.В., Холуянов Г.Ф., Косов В.Г., Яфаев Р.Р., Халлен А., Константинов А.О., Онушкин Г.А. // Тез. докл. III Международного семинара "Карбид кремния и родственные материалы". Великий Новгород, ISSCRM-2000. С. 70-71.*
- [6] *Goldberg Yu.A., Konstantinov O.V., Obolensky O.I., Petelina T.V. (Blank), Posse E.A. // J. Phys.: Condens. Matter. 1999. V. 11. P. 455-463.*
- [7] *Properties of Advanced Semiconductor Materials / Ed. M. Levinshtein, S. Rumyantsev, M. Shur. John Wiley and Sons, 2000. V. 3. 157 p.*
- [8] *Persson C., Lindelfelt U. // J. Appl. Phys. 1997. V. 82. N 11. P. 5496-5508.*
- [9] *Казаринов Р.Ф., Константинов О.В. // ЖЭТФ. 1961. Т. 43. В. 3. С. 936-945.*