

07;12

Фотоприемник канцерогенного ультрафиолетового излучения на основе 4H–SiC

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

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 17 апреля 2007 г.)

Канцерогенное (бактерицидное) излучение (200–300 нм с максимумом при 254 нм) присутствует в естественных (Солнце) и искусственных (лампы) источниках ультрафиолетового излучения. Его интенсивность очень мала по сравнению с другими видами излучения, но оно оказывает сильное влияние на здоровье человека. Для профилактики онкологических заболеваний необходимо контролировать уровень канцерогенного излучения, т. е. необходимы селективные фотоприемники.

Предложен фотоприемник ультрафиолетового излучения на основе *n*-4H–SiC барьеров Шоттки и *p*⁺–*n*-переходов. Спектр квантовой эффективности таких приборов очень близок к спектру относительного воздействия на человека канцерогенного излучения. Квантовая эффективность в максимуме спектра (254 нм) составляет около 0.3 ел/рл при практически полной нечувствительности в других спектральных областях. Квантовая эффективность в интервале длин волн 247–254 нм практически не зависела от температуры в интервале –100–+100°С.

PACS: 85.60.Gz, 73.40.Lq

Введение

Ультрафиолетовое излучение (УФИ) занимает спектральную область 10–380 нм (рис. 1) и обладает исключительно сильным влиянием на жизнедеятельность человека, причем излучение различных длин волн оказывает различное влияние — как полезное (пигментационное, эритемное, витаминообразующее), так и вредное (канцерогенное) [1]. Канцерогенное излучение приводит к разрушению клеток ДНК, оно является одной из главных причин возникновения канцерогенных заболеваний у человека.

Основными источниками УФИ являются Солнце и УФ-лампы, приемниками излучения — стеклянные вакуумные приборы (ФЭУ) и полупроводниковые при-

боры — диоды Шоттки и *p*–*n*-структуры на основе широкозонных полупроводниковых материалов: GaP, GaN, SiC. На основе этих материалов изготавливались широкополосные фотоприемники УФИ со спектром квантовой эффективности, расположенным в интервале 200–400 нм [2]. Особо отметим перспективность 4H–SiC, поскольку этот материал может использоваться в высокотемпературной и высоковольтной фотоэлектронике (например, [3–5]).

Одной из основных проблем полупроводниковой фотоэлектроники является создание приборов, которые могут регистрировать отдельные виды УФИ (селективные фотоприемники).

В настоящей работе представлен фотоприемник канцерогенного ультрафиолетового излучения и приведены его спектральные характеристики в широком интервале температур. Создание таких приборов направлено на профилактику онкологических заболеваний.

Методика эксперимента

В качестве исходного материала был выбран полупроводник *n*-4H–SiC. Его ширина запрещенной зоны $E_g = 3.23$ эВ ($\lambda = 380$ нм) [6], что существенно меньше, чем максимум воздействия на человека канцерогенного излучения (4.87 эВ), однако этот полупроводник непрямозонный, и минимальная энергия прямых оптических переходов, определенная нами из температурной зависимости параметров барьеров Шоттки Cr–4H–SiC [7,8], оказалась существенно большей (около 4.9 эВ). Поэтому этот полупроводник может использоваться для создания фотоприемников УФИ с энергией максимума 4.87 эВ.

Для изготовления приборов использовались коммерческие пластины *n*-4H–SiC с концентрацией ионизо-

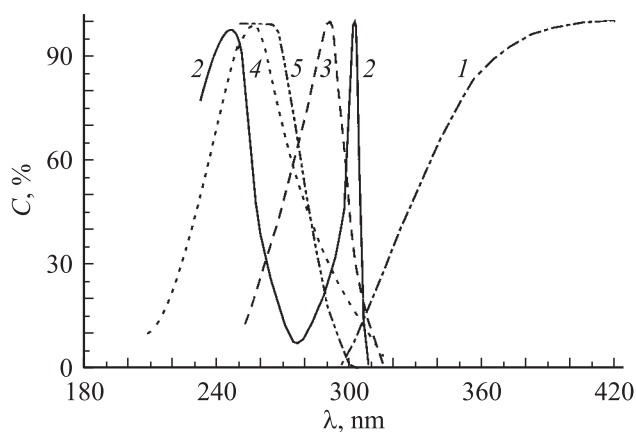


Рис. 1. Спектр относительного воздействия на человека (C) различных видов УФИ при 300 К: 1 — пигментационное, 2 — эритемное, 3 — витаминообразующее, 4 — бактерицидное, 5 — канцерогенное (разрушающее ДНК клетки).

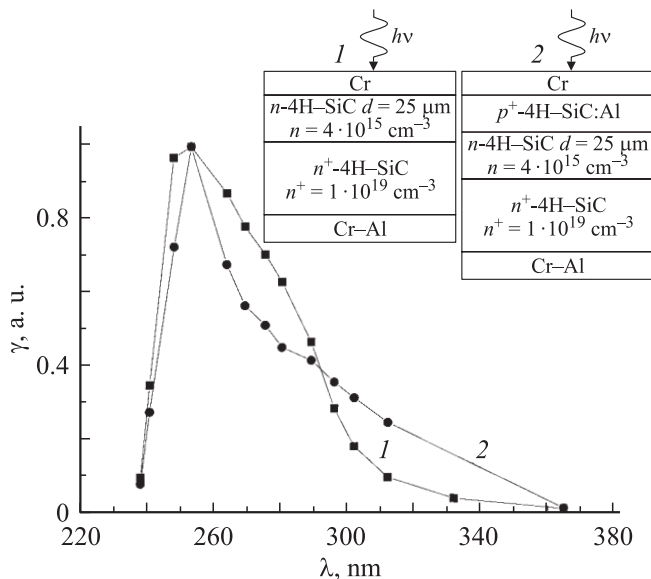


Рис. 2. Схемы двух различных типов фотоприемников на основе *n*-4H-SiC (A) и их спектры квантовой эффективности (γ) при 300 K (B): 1 — *m-s*-структура, 2 — *p⁺-n*-структура.

ванных доноров $N_d - N_a = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, на которых методом газотранспортной эпитаксии (CVD) создавались эпитаксиальные слои *n*-4H-SiC толщиной 0.025 mm с $N_d - N_a = 4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Объектами исследования были диоды Шоттки (*m-s*-структуры) и *p⁺-n*-переходы (рис. 2). Диоды Шоттки создавались методом вакуумного напыления, причем омический контакт представлял собой слой Cr-Al, а барьерный контакт — слой Cr; эти слои проходили различную термообработку. Хром обладает хорошими адгезионными свойствами к 4H-SiC, имеет работу выхода электрона ($\Phi_m = 4.6 \text{ eV}$) большую, чем сродство к электрону 4H-SiC, и следовательно, высота барьера Шоттки в системе Cr-*n*-4H-SiC должна быть больше 0.5 eV. Барьерный контакт имел площадь 2.25 mm² и был полупроницаемым для УФ.

Переходы *p⁺-n* изготавливались легированием *n*-4H-SiC ионами Al с энергией 150 keV (доза $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$) с последующим высокотемпературным активационным отжигом при температуре 1700°C в течение 15 s в среде Ar [9]. Омические контакты к *p⁺*- и *n*-областям создавались термическим напылением Al и Cr-Al толщиной 800 и 1200 nm соответственно.

Детекторные мезоструктуры площадью $1 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$ формировались ионно-плазменным травлением.

Спектральные измерения проводились в термостате с кварцевыми окнами в интервале температур 78–600 K и интервале длин волн 200–400 nm. Фототок измерялся в режиме, близком к режиму короткого замыкания, и из значений фототока определялась квантовая эффективность (el/ph), т.е. отношение токовой фоточувствительности (A/W) к энергии детектируемых фотонов (eV).

Спектральные характеристики фотоприемников

На рис. 2 показана зависимость квантовой эффективности от длины волны детектируемых фотонов для фотоприемников с барьером Шоттки и с *p⁺-n*-переходом при 300 K. На основании рисунка можно сделать следующие выводы.

1) Фототок практически отсутствует при длинах волн, больших 390 nm ($h\nu = 3.2 \text{ eV}$), т.е. ширина запрещенной зоны 4H-SiC (энергетическое расстояние между Γ -точкой зоны Бриллюэна для валентной зоны и *M*-точкой зоны Бриллюэна для зоны проводимости) при 300 K составляет 3.2 eV, что соответствует литературным данным.

2) При $\lambda < 390 \text{ nm}$ с уменьшением длины волны квантовая эффективность увеличивается, вначале слабо благодаря непрямым оптическим переходам между валентной зоной и зоной проводимости вблизи *M*-точки зоны Бриллюэна, а при $\lambda < 300 \text{ nm}$ квантовая эффективность быстро возрастает и достигает максимума при 254 nm благодаря прямым оптическим переходам между валентной зоной и зоной проводимости вблизи Γ -точки зоны Бриллюэна. Квантовая эффективность при $\lambda = 254 \text{ nm}$ составляет около 0.3 el/ph.

3) При $\lambda < 250 \text{ nm}$ квантовая эффективность резко падает. По нашему мнению, резкий коротковолновый спад при $\lambda < 250 \text{ nm}$ ($h\nu > 5 \text{ eV}$) связан с образованием горячего экситона с большой (около 0.1 eV) энергией связи. При $h\nu > 5 \text{ eV}$ фотоэлектрон и фотодырка образуются в той области *k*-пространства, где края зоны проводимости и валентной зоны практически параллельны. Скорости электрона и дырки направлены в одну сторону и близки по абсолютной величине, поэтому вследствие кулоновского взаимодействия они могут образовывать экситон. Возможность существования таких экситонов была теоретически предсказана в [10]. Такой экситон прочно связывает электрон и дырку, не позволяя им разделиться электрическим полем объемного заряда и рекомбинировать в квазинейтральной толще полупроводника или металле.

4) Коротковолновый край и положение максимума спектров квантовой эффективности *m-s*- и *p⁺-n*-переходов на основе 4H-SiC практически совпадают. Длинноволновые края спектров различаются, но не сильно: край спектра *p⁺-n*-структур более резкий, что может быть связано с разным поглощением света в *p*-области *p⁺-n*-структур и слое металла *m-s*-структур.

5) Спектр квантовой эффективности *m-s*- и *p⁺-n*-структур на основе 4H-SiC очень близок к спектру относительного воздействия на человека канцерогенного (бактерицидного) излучения (рис. 3). Это излучение присутствует в спектре Солнца и искусственных источников, его интенсивность на порядки меньше, чем интенсивность других видов излучения (ИК, видимое, длинноволновое УФ), однако его воздействие на человека очень сильное: оно вызывает разрушение ДНК кле-

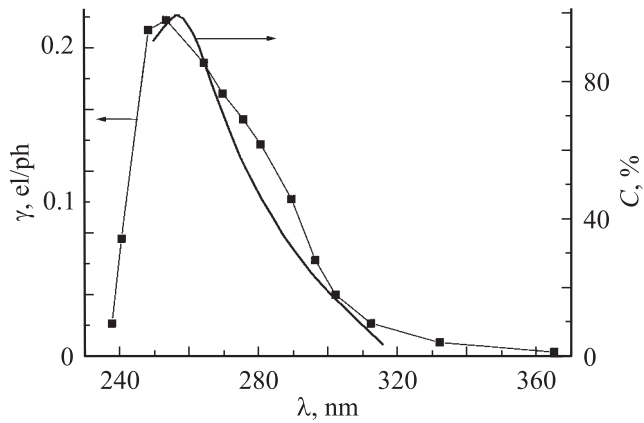


Рис. 3. Сравнение спектра квантовой эффективности γ 4H-SiC фотоприемника с $m-s$ -структурой (1) и спектра относительного воздействия на человека (2) канцерогенного излучения при 300 К.

ток и приводит к образованию опухолей. Регистрация этого излучения на фоне других видов излучений затруднительна: она требует селективных фотоприемников. Поэтому $m-s$ - и p^+-n -структуры на основе 4H-SiC представляют уникальную возможность для регистрации этого вида излучения.

Температурная стабильность квантовой эффективности фотоприемников

На рис. 4 показана зависимость квантовой эффективности 4H-SiC $m-s$ -фотоприемников от температуры. Она сводится к следующему:

1) С ростом температуры при низких температурах (80–175 К) квантовая эффективность возрастает при всех длинах волн детектируемых фотонов, что связано, по-видимому, с захватом и высвобождением электронно-дырочных пар на флуктуационных ловушках, как это

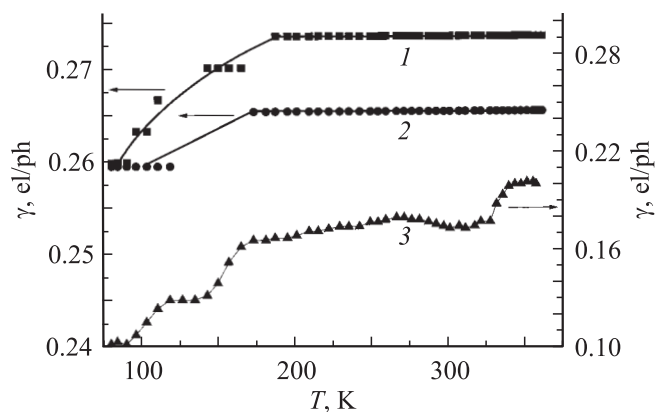


Рис. 4. Температурные зависимости квантовой эффективности γ фотоприемника с $m-s$ -структурой на основе 4H-SiC при различных длинах волн детектируемых фотонов λ : 1 — 247, 2 — 252, 3 — 282 nm.

было установлено ранее для GaAs и GaP $m-s$ -структур [11].

2) При 200–300 К температурная зависимость имеет тенденцию к насыщению для всех длин волн, причем чем меньше длина волны, тем ниже температура насыщения. Для наиболее актуальных длин волн 247–254 nm, соответствующих максимальному воздействию канцерогенного излучения в интервале температур от -100 до $+100^\circ\text{C}$ (175–375 К), квантовая эффективность практически не зависит от температуры: температурный коэффициент квантовой эффективности был менее 0.1%/К. В этой области поглощение света происходит главным образом на прямых оптических переходах между валентной зоной и зоной проводимости 4H-SiC.

3) Для длинноволнового фотоэффекта ($\lambda = 270\text{--}390$ nm) рост температуры вызывает рост квантовой эффективности фотоэлектропреобразования, что связано с непрямыми межзонными оптическими переходами, вероятность которых растет с увеличением числа фононов, т.е. с ростом температуры. В то же время в области 247–254 nm поглощение происходит без участия фононов, и квантовая эффективность не изменяется при изменении температуры. Таким образом, длина волны, при которой исчезает участок температурного роста квантовой эффективности, должна соответствовать минимальной энергии прямых переходов ($\lambda = 250$ nm, $h\nu = 4.9$ eV), что соответствует литературным данным.

Заключение

Спектр квантовой эффективности 4H-SiC-фотоприемников с $m-s$ - и p^+-n -переходами имеет максимум при 254 nm и очень хорошо совпадает со спектром относительного воздействия на человека канцерогенного (бактерицидного) излучения; такие селективные фотоприемники могут использоваться для регистрации канцерогенного УФ-И. Квантовая эффективность таких фотоприемников практически не зависит от температуры в интервале от -100 до $+100^\circ\text{C}$.

Список литературы

- [1] Koller L.R. Ultraviolet Radiation. N.Y.: Wiley, 1965.
- [2] Бланк Т.В., Гольдберг Ю.А. // ФТП. 2003. Т. 37. Вып. 9. С. 1025.
- [3] Ivanov P.A., Levinstein M.E., Mnatsakanov T.T., Palmour J.W., Singh R., Irvin K.G., Das M. // Mater. Sci. Forum. 2004. Vol. 457–600. P. 700.
- [4] Tsukamoto S., Sakai T., Onishi T., Ito K., Murakami M. // J. Electron Mat. 2005. Vol. 34. N 10. P. 1310.
- [5] Guy O.J., Pope G., Blackwood I., Teng K.S., Chen L., Lee W.Y., Wilks S.P., Mawley P.A. // Surf. Sci. 2004. Vol. 573. N 2. P. 253.

- [6] Properties of Advanced Semiconductor materials / Ed. by M. Levinstein, S. Rumyantsev, M. Shur // N. Y.: Willey, 2001. P. 157.
- [7] *Бланк Т.В., Гольдберг Ю.А., Калинина Е.В., Константинов О.В., Халлен А.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. Вып. 18. С. 43–49.
- [8] *Blank T.V., Goldberg Yu.A., Kalinina E.V., Konstantinov A.O., Konstantinov O.V., Hallen A.* // Semicond. Sci. Technol. 2005. Vol. 20. N 8. P. 710–715.
- [9] *Виолина Г.Н., Калинина Е.В., Константинов О.В., Холуянов Г.Ф., Онушкин Г.А., Косов В.Г., Яфаев Р.Р., Халлен А.* // ФТП. 2002. Т. 36. Вып. 6. С. 746.
- [10] *Казаринов Р.Ф., Константинов О.В.* // ЖЭТФ. 1961. Т. 43. Вып. 3. С. 936–945.
- [11] *Goldberg Yu.A., Konstantinov O.V., Obolensky O.I., Petelina T.V., Posse E.A.* // J. Phys. D. Condens. Matter. 1999. Vol. 11. P. 455–463.