

Фотоэлектрические свойства $p^+ - n$ -переходов на основе $4H$ -SiC, ионно-легированного алюминием

© Г.Н. Виолина, Е.В. Калинина*[¶], Г.Ф. Холуянов*, Г.А. Онушкин*, В.Г. Коссов[†],
Р.Р. Яфаев[‡], А. Халлен[‡], А.О. Константинов[×]

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет,
197376 Санкт-Петербург, Россия

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

[†]Электрон Оптроник,
194223 Санкт-Петербург, Россия

[‡]Royal Institute of Technology Department of Electronics,
Electrum 229, SE 164 40 Kista, Sweden

[×]ACREO AB,

Electrum 236, SE 164 40 Kista, Sweden

(Получена 29 ноября 2001 г. Принята к печати 14 декабря 2001 г.)

Исследованы фотоэлектрические свойства $p^+ - n$ -переходов на основе ионно-легированного алюминием $4H$ -SiC, сформированных в слаболегированных эпитаксиальных слоях n -типа проводимости, выращенных методом газотранспортной эпитаксии. Показано, что такие фотодетекторы удачно сочетают достоинства фотоструктур, сформированных на основе барьеров Шоттки и эпитаксиальных $p - n$ -переходов. Результаты теоретического расчета спектральных характеристик ионно-легированных фотодетекторов находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными. Структуры обладают близкой к 100% эффективностью сбора неравновесных носителей заряда в спектральном диапазоне энергии квантов 3.5–4.25 эВ.

1. Введение

Наличие в SiC широкой запрещенной зоны делает этот материал перспективным для создания на его основе фотодетекторов в ультрафиолетовой области спектра. Кроме того, такие особенности этого материала, как температурная и радиационная стойкость, увеличивают надежность работы таких приборов даже при экстремальных условиях эксплуатации. В ранних исследованиях фотодетектирующие структуры с использованием барьеров Шоттки или $p - n$ -переходов формировались на основе кристаллов $6H$ -SiC, выращенных методом Лелли [1–3], или на основе сублимационных эпитаксиальных слоев, выращенных на этих кристаллах [4]. Высокие уровни легирования и значительное количество дефектов являлись причиной коротких времен жизни неравновесных носителей заряда в исследованных структурах и их малых площадях, что приводило к снижению эффективности детекторов. Для работы в экстремальных условиях особый интерес представляют детекторы на основе $p - n$ -переходов. Однако при формировании p -областей традиционными методами (диффузия, эпитаксия, легирование в процессе роста) не удается получить слои с высокими концентрациями акцепторов из-за предела их растворимости в SiC. Это приводит к увеличению сопротивления детекторных структур и к снижению эффективности детектирования. Однако известно, что неравновесный способ легирования — ионное легирование позволяет получать p^+ -слои с концентрациями акцепторов, превышающими предел их растворимости

в SiC, и не вносящие дополнительного сопротивления в структуры с $p - n$ -переходами [5].

Прогресс, достигнутый за последнее время в технологии получения качественного монокристаллического SiC, позволяет получать чистые эпитаксиальные слои с низкими значениями концентраций глубоких уровней и с диффузионными длинами неосновных носителей заряда около 5 мкм [6], что дает возможность проводить исследования фотодетектирующих свойств SiC-структур на качественно новом уровне. В настоящей работе представлены результаты исследования фотоэлектрических характеристик $p^+ - n$ -структур, изготовленных ионной имплантацией Al в эпитаксиальные пленки $4H$ -SiC, полученные методом газотранспортной эпитаксии (CVD).

2. Эксперимент

На коммерческих подложках n - $4H$ -SiC с концентрацией некомпенсированных доноров $N_d - N_a = 10^{19} \text{ см}^{-3}$ были выращены n - $4H$ -SiC эпитаксиальные CVD-пленки толщиной 25 мкм с $N_d - N_a = (3-5) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Структуры типа $p^+ - n$ формировались методом имплантации ионов Al с энергией $E_{Al} = 150 \text{ кэВ}$ и дозой $Q_{Al} = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. После имплантации был проведен термоактивационный отжиг при $T = 1700^\circ\text{C}$ в течение $t = 15 \text{ с}$ [6]. Омические контакты к n - и p -SiC формировались методом термовакуумного напыления Cr и полупрозрачного Al соответственно. Алюминий служил маской при формировании меза-структур диаметром 300 мкм методом ионно-плазменного травления.

Глубина залегания Al в ионно-легированных (ИЛ) $p^+ - n$ -переходах была определена с помощью сканиру-

[¶] E-mail: evk@pop.ioffe.rssi.ru
Факс: (+7-812)-2476425

ющего электронного микроскопа (SEM) при сканировании пучка электронов по сколу структуры с $p^+ - n$ -переходом. Диффузионная длина неосновных носителей заряда, а именно дырок в n -области (L_p), определялась с помощью SEM из стандартной обработки сигнала, наведенного пучком электронов (ЕВІС-сигнал). Эти данные сопоставлялись с данными, полученными из зависимости фототока от обратного напряжения, снятой в условиях квазиоднородного облучения образца. Профиль распределения электрически активных примесей в области $p^+ - n$ -перехода исследовался по вольт-фарадным характеристикам (ВФХ). Вольт-амперные характеристики (ВАХ) $p^+ - n$ -структуры снимались на постоянном токе в прямом (в области малой плотности тока $< 200 \text{ А/см}^2$) и обратном направлениях в диапазоне температур $T = 20 - 500^\circ\text{C}$.

Спектральная характеристика фоточувствительности исследовалась в диапазоне энергии квантов света $h\nu = 2.8 - 5.6 \text{ эВ}$ при комнатной температуре с помощью монохроматора МДР-3. Источником возбуждения служила ксеноновая лампа ДКСШ-200. Световой поток, промодулированный механическим прерывателем, фокусировался на входную щель монохроматора. Сигнал регистрировался узкополосным вольтметром В6-9.

3. Результаты эксперимента

Согласно данным SEM-измерений, глубина залегания $p^+ - n$ -перехода имела значения около $x_{pn} = 0.6 \text{ мкм}$. Стандартная обработка ЕВІС-сигнала позволила определить диффузионную длину дырок ($L_p = 4 - 5 \text{ мкм}$) в n -области, прилегающей к $p^+ - n$ -переходу [6]. Значения диффузионных длин дырок в исходных n - $4H$ -SiC-слоях, оцененные по зависимости фототока барьеров Шоттки от ширины области объемного заряда по методике, изложенной в работе [7], находились в хорошем согласии с данными работы [6] и составляли 2 мкм . Как видно, полученные нами значения L_p не меньше (и даже несколько больше), чем L_p в исходном материале. Этот экспериментальный факт свидетельствует об улучшении структурного совершенства исходного эпитаксиального материала вблизи $p^+ - n$ -перехода, сформированного ионной имплантацией Al с последующим высокотемпературным отжигом [8].

Экспериментальные результаты исследования зависимости фототока от обратного напряжения, построенные в виде зависимости фототока (I_{ph}) от ширины области объемного заряда (δ_{SCR}), представлены на рис. 1. Как видно, эта зависимость линейна, что отвечает выражению, выведенному в работе [7] для условия квазиоднородного облучения образца:

$$I_{ph} \propto \alpha F(L_p + L_n + \delta_{SCR}), \quad (1)$$

где α — коэффициент поглощения, F — количество фотоактивных квантов, падающих на единицу поверхности в единицу времени, L_p и L_n — диффузионные длины

дырок и электронов соответственно. Экстраполяция экспериментальной прямой к нулевому значению фототока дает величину $L_p + L_n = 3.5 \text{ мкм}$. Определенная нами величина $L_p + L_n = 3.5 \text{ мкм}$ близка к значению L_p , определенному ранее при использовании стандартной обработки ЕВІС-сигнала, что объясняется относительно малым вкладом в фототок носителей, собираемых из тонкого p^+ -слоя.

ВФХ исследуемых $p^+ - n$ -переходов подчинялись зависимости $(1/C_{br})^n \propto U_{rev}$, где C_{br} — барьерная емкость, U_{rev} — обратное напряжение. При напряжениях $< 10 \text{ В}$ показатель $n = 3$, т.е. профиль распределения электрически активной примеси в области $p^+ - n$ -перехода был близок к плавному (рис. 2, область 1). При более высоких обратных напряжениях характер зависимости барьерной емкости от обратного напряжения изменялся ($n < 3$) (рис. 2, область 2). Вероятно, это связано

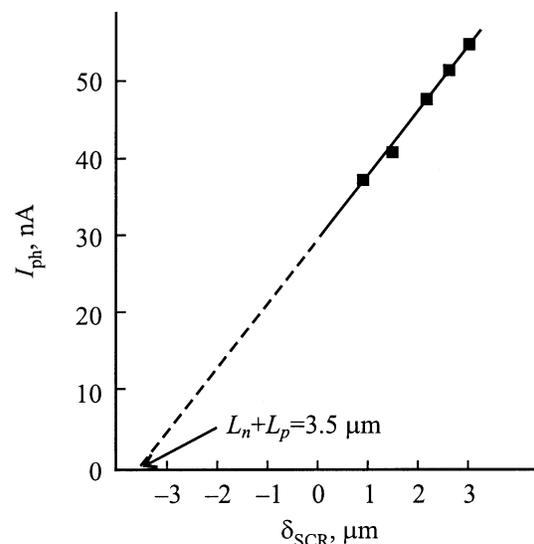


Рис. 1. Зависимость фототока (I_{ph}) $p^+ - n$ -переходов, ионно-легированных Al, от ширины области объемного заряда (δ_{SCR}).

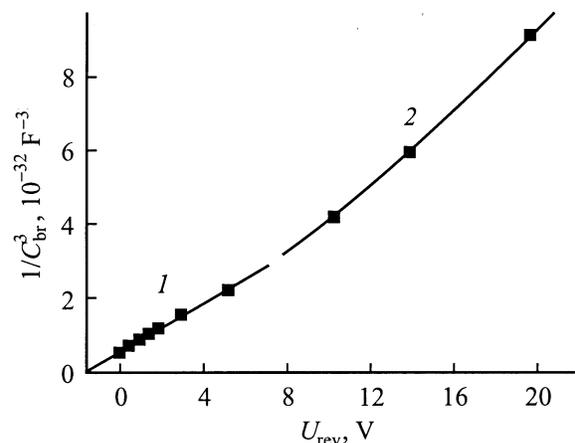


Рис. 2. Вольт-фарадная характеристика $p^+ - n$ -структуры, ионно-имплантированной Al.

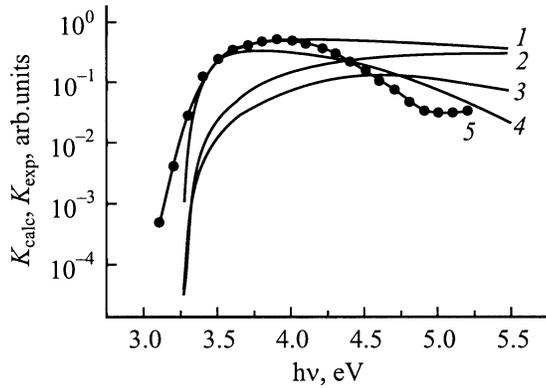


Рис. 3. Экспериментальная (5) и расчетные (1–4) спектральные характеристики фоточувствительности p^+n -структур, ионно-имплантированных Al. При расчетах учитывалась эффективность сбора фотоносителей: 1 — полная, рассчитанная по методике [10], 2 — из p -области, 3 — из области объемного заряда, 4 — из n -области.

с особенностями перераспределения имплантированного Al в $4H$ -SiC во время высокотемпературного отжига. Использование модели плавного p^+n -перехода позволило нам оценить величину напряженности встроенного электрического поля (ϵ_{pn}) в прилегающих к переходу областях, значение которого используется в дальнейших расчетах.

ВАХ исследуемых p^+n -переходов измерялись в прямом направлении до плотностей тока 10 A/cm^2 при температурах от 20 до 500°C . Эти характеристики в широком диапазоне напряжений подчинялись классической зависимости $J \approx J_0 \exp(qU/\beta kT)$, где q — заряд электрона, β — коэффициент, характеризующий механизм протекания тока. Величина β изменялась в пределах 1.2–2, что связано с вкладом термостимулированных рекомбинационных токов [9].

Периферия перехода специально не была защищена; обратные токи менее 10^{-7} A наблюдались при напряжениях 20–30 В при температуре $T = 20^\circ\text{C}$. При температуре $T = 500^\circ\text{C}$ обратные токи менее 10^{-6} A наблюдались при напряжениях до 10 В.

Полученные экспериментальные спектральные характеристики фоточувствительности представлены на рис. 3 (кривая 5) в относительных единицах, приведенных к равному числу фотоактивных квантов.

4. Расчеты и обсуждение результатов

В расчетах мы основывались на методике, изложенной в работе [10]. В этой работе предлагалось в качестве параметра, характеризующего спектральную чувствительность $p-n$ -структур, использовать эффективность сбора неравновесных носителей заряда K . Применимость данного метода представляется оправданной, так как, согласно эксперименту, фототок изменялся линейно

в зависимости от уровня возбуждения F :

$$I_{\text{ph}} \propto qF(1 - R)K, \quad (2)$$

где R — коэффициент отражения; K — эффективность сбора неравновесных носителей заряда. При этом уровень возбуждения варьировался в пределах $10^{13} - 10^{16} \text{ фот}/(\text{см}^2\text{с})$.

В дальнейшем будем рассматривать K в виде

$$K = K_n + K_p + K_{pn}, \quad (3)$$

где K_n — эффективность сбора электронов из p -области, K_p — эффективность сбора дырок из n -области, K_{pn} — эффективность сбора носителей тока из области объемного заряда.

При расчете эффективности сбора неравновесных носителей заряда в исследованных нами ИЛ $p-n$ -структурах мы, согласно данным рис. 2, рассматривали плавный профиль $p-n$ -перехода. Расчет производился с учетом влияния внутреннего поля и объемной рекомбинации в n - и p -областях структуры, а также сбора носителей заряда в области объемного заряда.

При расчете использовались параметры структуры, полученные экспериментально, т.е. глубина залегания перехода $x_{pn} = 0.6 \text{ мкм}$, ширина области объемного заряда $\delta_{\text{SCR}} = 0.5 \text{ мкм}$ (при $U = 0 \text{ В}$), диффузионная длина неосновных носителей заряда в n -области $L_p = 3.5 \text{ мкм}$, что соответствует времени жизни дырок $\tau_p \approx 10^{-8} \text{ с}$. Использование модели плавного $p-n$ -перехода позволило нам оценить величину напряженности встроенного электрического поля $\epsilon_{pn} \approx 10^2 \text{ В/см}$. При расчете скорость поверхностной рекомбинации s варьировалась в пределах $10^3 - 10^6 \text{ см/с}$. Заметного влияния на характер спектра при этом не было обнаружено. Расчетные спектральные зависимости коэффициентов сбора, полученных при $s = 10^4 \text{ см/с}$, представлены на рис. 3 (кривые 1–4). Как видно, расчетные данные хорошо совпадают с экспериментальными (рис. 3, кривая 5). Согласно нашим расчетам, полная эффективность сбора фотоносителей в исследуемой структуре (внутренний квантовый выход) близка к 100% в диапазоне энергии квантов 3.5–4.25 эВ. Расчет составляющих коэффициента сбора показывает, что при малых энергиях квантов 3.2–4.0 эВ (в области квазиоднородного облучения образца) преобладающим является сбор дырок из n -области (рис. 3, кривая 4).

Хорошо известно, что время жизни неосновных носителей заряда в SiC возрастает при изменении температуры от 20 до 500°C в 10 раз [9]. По предварительным данным, фототок короткого замыкания в структурах на основе карбида кремния в указанном температурном интервале возрастает в 10–15 раз, при этом напряжение холостого хода уменьшается в 3–5 раз. Согласно температурным измерениям электрических характеристик, исследуемые структуры с описанными выше омическими контактами сохраняли работоспособность и не деградировали при температурах до 500°C . Поэтому можно

ожидать, что чувствительность фотодетекторов на основе ионно-легированных $p^+ - n$ -переходов не уменьшится при этих температурах.

5. Заключение

В итоге получены следующие основные результаты:

– согласно расчетам, находящимся в хорошем согласии с экспериментом, эффективность собирания неосновных носителей (т.е. внутренний квантовый выход) в исследуемой структуре близка к 100% в диапазоне энергии квантов $h\nu = 3.5 - 4.25$ эВ;

– замечено увеличение диффузионной длины дырок (L_p) в слоях n - $4H$ -SiC, изготовленных по технологии CVD, после создания в них $p - n$ -переходов методом ионной имплантации Al;

– показано, что такие $p^+ - n$ -структуры наиболее перспективны для высокотемпературных датчиков ультрафиолетового излучения: они сочетают достоинства эпитаксиальных $p - n$ -фотоприемников на основе SiC [11,12] и детекторов на основе барьеров Шоттки Cr- n -SiC [4]. Варьируя энергию имплантированных ионов Al, оптимально приближая $p - n$ -переход к поверхности структуры, мы можем обеспечить спектральную фоточувствительность, аналогичную таковой в барьерах Шоттки Cr- n -SiC;

– для данных структур не ожидается ухудшения фоточувствительности при температурах до 500°C в силу работоспособности омических контактов в указанном диапазоне температур.

Авторы выражают благодарность В.А. Соловьеву за проведение SEM измерений.

Эта работа осуществлялась при поддержке проектов INTAS 97-2141 и РФФИ 01-02-17911.

Список литературы

- [1] Г.Ф. Холуянов. ФТП, **2**, 1909 (1960).
- [2] Г.Н. Виолина, Г.Ф. Холуянов. РЭ, **11**, 2034 (1966).
- [3] P. Glosow, G. Ziegler, W. Suttrop, G. Pensl, R. Hannis. SPIE 868, *Optoelect. Techn. for Rem. Sens. from Space*, 40 (1987).
- [4] Р.Г. Веренчикова, В.Я. Санкин. Письма ЖТФ, **14** (10), 756 (1988).
- [5] Е.В. Калинина, А.В. Суворов, Г.Ф. Холуянов. ФТП, **14** (6), 1099 (1980).
- [6] E. Kalinina, G. Kholujanov, V. Solov'ev, A. Strel'chuk, A. Zubrilov, V. Kossov, R. Yafaev, A. Kovarski, A. Hallén, A. Konstantinov, S. Karlsson, C. Adas, S. Rendakova, V.A. Dmitriev. *App. Phys. Lett.*, **77** (19), 3051 (2000).
- [7] В.С. Балландович, О.А. Омар, В.А. Попов. Известия ЛЭТИ, **250**, 20 (1979).
- [8] E. Kalinina, G. Kholujanov, V. Solov'ev, A. Strel'chuk, V. Kossov, R. Yafaev, A. Kovarskii, A. Shchukarev, S. Obyden, G. Saparin, P. Ivannikov, A. Hallén, A. Konstantinov. In: *Proc. E-MRS Spring Meeting 2001* (Strasbourg, France, 2001) F-VI.2.
- [9] А.М. Стрельчук. ФТП, **29** (7), 1190 (1995).

[10] Г.Ф. Холуянов. ФТП, **3** (5), 658 (1969).

[11] D.M. Brown, E.T. Downey, M. Ghezzi, J.W. Kretchmer, R.J. Saia, J.S. Liu, J.A. Edmond, G. Gati, J.M. Pimbley, W.E. Schneider. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **40** (2), 325 (1993).

[12] J.A. Edmond, H.S. Kong, C.H. Carter, Jr. *Phys. Rev. B*, **185**, 453 (1993).

Редактор Т.А. Полянская

Photoelectrical properties of $4H$ -SiC Al ion-doped $p^+ - n$ junctions

G.N. Violina, E.V. Kalinina*, G.F. Kholujanov*, G.A. Onushkin*, V.G. Kossov†, R.R. Yafaev†, A. Hallén‡, A.O. Konstantinov×

State Electrotechnical University,
197376 St.Petersburg, Russia

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

†Electron Optronics,
194223 St.Petersburg, Russia

‡Royal Institute of Technology,
Department of Electronics, Electrum 229,
SE 164 40 Kista, Sweden

×ACREO AB, Electrum 236,

SE 164 40 Kista, Sweden

Abstract Photoelectrical properties of $4H$ -SiC Al ion-implanted $p^+ - n$ junctions having been formed in lightly doped n -type layers and grown by chemical vapor deposition method have been studied. It has been shown that these photodetectors combine the advantages of photosensitive Schottky barrier structures and those of $p - n$ structures grown by epitaxy. The spectral characteristics of ion-implanted photodetectors derived from theoretical calculations and the obtained experimental data were in good agreement. The structures demonstrated as high as nearly 100% collection efficiency of nonequilibrium charge carriers over a range of incident quanta energy of 3.5–4.25 eV.