

Карбидкремниевые детекторы частиц высокой энергии

© Г.Н. Виолина, Е.В. Калинина*[¶], Г.Ф. Холуянов*, 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 4 декабря 2001 г.)

Представлены результаты исследования $4H$ -SiC ионно-легированных алюминием p^+ - n -переходов в качестве детекторов частиц высокой энергии. Переходы созданы на основе эпитаксиальных пленок SiC, изготовленных методом газотранспортной эпитаксии. Концентрация нескомпенсированных доноров в исходном материале составляла $(3-5) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, диффузионная длина носителей заряда $L_p = 2.5 \text{ мкм}$. Детекторы облучались α -частицами с энергией 4.8–5.5 МэВ при 20°C. Эффективность сбора наведенного заряда достигала величины 0.35. Анализируются возможности работы SiC-детекторов при повышенных температурах $\sim 500^\circ\text{C}$.

Введение

Карбид кремния является одним из наиболее перспективных широкозонных полупроводников, имеющих высокие электрическую и механическую прочности, а также температурную и радиационную стойкости. Учитывая этот уникальный набор свойств, возможно использовать SiC для изготовления электронных приборов, способных работать в экстремальных условиях — высокие температуры и радиации, химически активные среды. Перспективность использования p^+ - n -переходов на основе SiC для создания высокотемпературных детекторов и спектрометров высокоэнергетичных частиц была показана еще в ранних работах по карбиду кремния и подтверждается в настоящее время. Ранее на основе монокристаллического $6H$ -SiC, выращенного методом Лели, были созданы детекторы α -частиц, надежно регистрирующие энергетичные частицы до температур 500°C [1–3]. Однако высокие концентрации дефектов в кристаллах Лели, обуславливающие низкие значения времени жизни неравновесных носителей заряда за счет рекомбинационных процессов, приводили к низкой эффективности счетных характеристик детекторов. Высокие концентрации дефектов в кристаллах Лели и их малые размеры не позволяли изготавливать приборы большой площади, что также приводило к снижению эффективности детекторов высокоэнергетичных частиц. Кроме того, относительно высокие значения концентраций нескомпенсированных доноров в кристаллах Лели не позволяли растягивать область сбора неравновесных носителей заряда до величин, соразмерных с

пробегом α -частиц, что резко снижало их эффективность сбора. В последние годы благодаря прогрессу в технологии выращивания чистых эпитаксиальных слоев SiC разных политипов с низкими концентрациями дефектов появилась возможность значительно повысить эффективность детекторов высокоэнергетичных частиц [4,5].

Другой важной проблемой в изготовлении приборов на основе SiC является невозможность создания низкоомного материала p -типа проводимости традиционными равновесными методами легирования, так как концентрация акцепторов ограничена пределом их растворимости в SiC. Это приводит к высоким значениям контактных сопротивлений и сопротивлений создаваемых структур, что уменьшает эффективность работы приборов. Однако известен неравновесный метод легирования полупроводников — ионное легирование, который позволяет вводить примеси в количествах, превышающих их пределы растворимости в материале. Используя легирование ионами Al в $6H$ -SiC n -типа проводимости с последующим высокотемпературным отжигом, удалось получить p^+ -слои, которые не вносили дополнительного сопротивления в структуры с p^+ - n -переходами [6].

В настоящее время представляется несомненно интересным рассмотреть возможности SiC-счетчиков высокоэнергетичных частиц на базе современного, более качественного материала и с использованием технологии ионного легирования.

1. Описание эксперимента

Исследованные p^+ - n -структуры были изготовлены на основе эпитаксиальных пленок n - $4H$ -SiC, выращенных методом газотранспортной эпитаксии (CVD)

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

на коммерческих подложках n -4H-SiC. Коммерческие подложки имели концентрацию нескомпенсированных доноров $N_d - N_a \approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$. CVD-эпитаксиальные слои толщиной 26 мкм имели концентрации $N_d - N_a = (3-5) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Для исследования CVD-эпитаксиальных слоев на них методом термовакуумного напыления формировались барьеры Шоттки с Cr. Структуры p^+ - n -переходов создавались методом ионной имплантации ионов Al дозой $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ с энергией ионов 150 кэВ. Затем с целью активации введенной примеси проводился высокотемпературный отжиг при 1700°C в течение 15 с в атмосфере Ar. Омические контакты формировались термовакуумным напылением Al и Cr/Al к p - и n -областям соответственно. Диодные структуры с площадями 10^{-3} см^2 и $4 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ формировались ионно-плазменным травлением, при этом Al служил маской. Для получения детекторных структур с малыми токами утечки на последней стадии технологического процесса производилась обработка периферии p^+ - n -перехода травлением в расплаве щелочи.

Облучение образцов осуществлялось α -частицами с энергией 4.8–5.5 МэВ при 20°C . Сигнал детектора, предварительно усиленный, записывался с помощью стандартного спектрометрического оборудования. Градуировка спектра по каналам производилась с помощью кремниевого эталонного счетчика. Величина энергии, приходящейся на канал, составляла 2.2 кэВ.

Значения диффузионных длин неосновных носителей заряда L_p (дырок в n -области) в исходном CVD-слое и после формирования p^+ - n -переходов определялись с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM) по стандартной методике обработки сигнала, наведенного пучком электронов (EBIC). Глубина залегания ионно-легированных p^+ - n -переходов определялась с помощью метода SEM на сколе структуры.

Сведения об электрических параметрах детекторных структур были получены из анализа вольт-амперных (ВАХ), вольт-емкостных (CV) и фотоэлектрических характеристик p^+ - n -переходов в диапазоне температур 20–500°C. Методики измерения и детальные рассмотрения этих характеристик изложены в работе [7].

2. Результаты эксперимента и обсуждение

На рис. 1 представлены счетные характеристики структур с имплантированными p^+ - n -переходами измеренные при обратном напряжении 390 В при температуре 20°C . Как видно, регистрируемый сигнал наблюдался в каналах 520–900. Число событий в единицу времени не превышало 2–3 в секунду, что, вероятно, связано с малыми площадями исследованных структур. Увеличение площади исследованных структур в 4 раза приводило к увеличению количества событий до 10–12, т.е. наблюдалась линейная зависимость числа зарегистрированных событий от площади детектора.

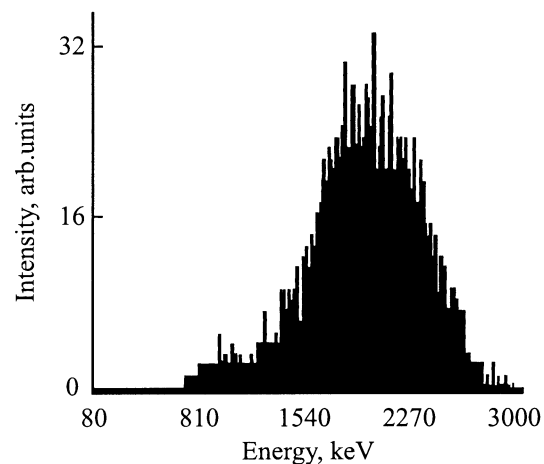


Рис. 1. Счетные характеристики ионно-легированных алюмином структур 4H-SiC.

Уровень фона в исследованных счетчиках был крайне низкий (около 1), что с учетом малых токов утечки на p^+ - n -переходе указывает на отсутствие „мертвого окна“ в структуре, аналогично детекторам на основе барьеров Шоттки.

Зная, что на один канал приходится энергия 2.2 кэВ, можно видеть, что эффективность собирания наведенного заряда (r) в исследованных структурах не превышала 0.35. Заметим, что увеличение обратного смещения на p^+ - n -переходе от 0 до 390 В приводило к увеличению эффективности собирания от 0.22 до 0.35. Рассмотрим причины, приводящие к снижению эффективности собирания наведенного заряда в исследуемой структуре.

Известно, что для детекторов, в которых трек энергетической частицы соответствует протяженности чувствительной области W , эффективность собирания наведенного заряда описывается выражением

$$r = \frac{\mu\tau V_r}{W^2} \left[1 - \exp\left(-\frac{W^2}{\mu\tau V_r}\right) \right],$$

где τ — время носителей заряда, μ — эффективная подвижность носителей заряда, V_r — приложенное к p^+ - n -структуре обратное напряжение.

Диффузионные длины носителей заряда в исходном эпитаксиальном слое составляли $L_p \approx 2.5$ мкм. После формирования ионно-легированных алюмином p^+ - n -переходов диффузионные длины дырок в CVD-слое возрастали до значений $L_p \approx 5$ мкм [8]. Для таких диффузионных длин время жизни носителей заряда составляет $r = 10^{-7}$ с. Ширина области объемного заряда в исследованных p^+ - n -структурах варьировалась в пределах от 1–1.5 мкм до 7–10 мкм при изменении обратного напряжения от 0 до 400 В. Примем эффективную подвижность носителей заряда (дырок) в области их собирания $\mu = 0.01 \text{ м}^2(\text{В} \cdot \text{с})$.

С учетом параметров исследованных p^+ - n -структур отношение $W^2/\mu\tau V_r \ll 1$ и практически весь наве-

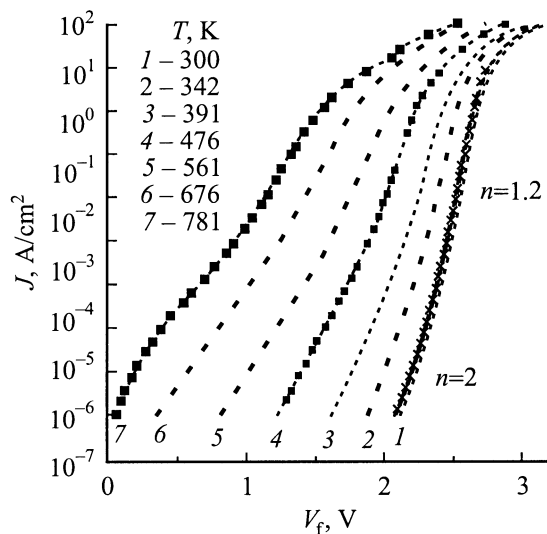


Рис. 2. Прямые ветви вольт-амперных характеристик ионно-легированных алюминием структур $4H$ -SiC при различных температурах, указанных на рисунке.

денный в области W заряд должен быть собран, т.е. $r = 1$. На практике мы наблюдали $r < 1$, что можно объяснить несколькими обстоятельствами. Во-первых, по нашим оценкам, в изготовленных $p^+ - n$ -структурах не удалось реализовать соответствие величины пробега (трека) α -частиц и протяженности области объемного заряда. К сожалению, в литературе нет сведений о треках энергетических частиц в SiC. Однако грубую оценку этого параметра можно сделать, используя сведения о пробегах энергетических частиц в Si и C. При изменении энергии α -частиц от 1 до 5.5 МэВ протяженность трека в них изменяется от 3.27 до 25.46 мкм. Очевидно, что трек α -частиц, использованных в данной работе (с энергией 4.8–5.5 МэВ), превышал ширину области объемного заряда в исследованных $p^+ - n$ -структурах даже при подаче максимального обратного напряжения 390 В. Можно указать и еще одну причину, уменьшающую экспериментальное значение эффективности собирания зарядов в детекторе — ограничение регистрируемого сигнала последовательным сопротивлением базы $p^+ - n$ -структуры.

С учетом выше сказанного полученные нами экспериментальные результаты представляются нам весьма обнадеживающими. Они позволяют сделать вывод, что на основе современного полупроводникового SiC можно изготавливать эффективные детекторы частиц высокой энергии.

Оценим возможности предлагаемых детекторов с точки зрения высоких рабочих температур. К сожалению, исследования счетных характеристик в температурном интервале не были проведены, это задача ближайшего будущего. И тем не менее косвенно можно оценить возможности $p^+ - n$ -структур на основе карбида кремния, анализируя температурные измерения ВАХ. На рис. 2

представлены прямые ветви ВАХ ионно-легированных $p^+ - n$ -структур в диапазоне температур 20–500°С. Как видно, с ростом температуры сопротивление базы $p^+ - n$ -перехода уменьшается. Таким образом, влияние этого фактора, ограничивающего эффективность собирания детектора, с ростом температуры ослабляется. Кроме того, ранее было показано, что с увеличением температуры времена жизни носителей заряда в SiC возрастают [9]. Обе указанные причины позволяют считать, что с изменением температуры от 20 до 500°С эффективность собирания ионно-имплантированных $p^+ - n$ -структур на основе SiC может возрасти.

Оценим возможности SiC-детекторов с точки зрения температурного изменения ВАХ в обратном направлении. Как показали испытания счетчиков, они надежно регистрировали сигнал, если обратные токи в них не превышали 10^{-8} А. Исследованные структуры при 20°С имели $I_r \lesssim 10^{-8}$ А до обратных напряжений ~ 400 В. Эти значения токов на много порядков превышают генерационные токи в $p^+ - n$ -переходах на основе SiC и являются токами утечки поверхностной и объемной природы. С ростом температуры токи I_r увеличивались, и ранее было показано, что для аналогичных структур $I_r \approx 10^{-8}$ А наблюдались при 100 В при температурах 250°С [10].

Таким образом, поведение ВАХ ионно-легированных алюминием $p^+ - n$ -переходов на основе SiC в широком температурном интервале позволяет считать, что на основе современного карбида кремния реально создавать высокотемпературные детекторные структуры для регистрации частиц высокой энергии.

3. Заключение

Показано, что на основе слабо легированных эпитаксиальных пленок n - $4H$ -SiC методом имплантации Al могут быть сформированы структуры с мелкими $p^+ - n$ -переходами, регистрирующие частицы высокой энергии (~ 5 МэВ). Такие структуры сочетают в себе практически отсутствие „мертвого слоя“ и надежную работоспособность в диапазоне температур от 20 до 500°С.

Авторы выражают благодарность В.Д. Савельеву за проведение счетных испытаний и И.М. Котиной за полезную и конструктивную дискуссию.

Работа осуществлялась при частичной поддержке проектом INTAS 97-2141 и РФФИ 01-02-17911.

Список литературы

- [1] С.Р. Capera, Р. Malinaric, R.B. Campbell, J. Ostroski. JEEE Transactions on Nuclear Sci., N 6, 262 (1964).
- [2] Г.Ф. Холуянов, Б.В. Гавриловский. ФТП, 2(4), 573 (1968).
- [3] В.А. Тихомирова, О.П. Федосеева, Г.Ф. Холуянов. ФТП, 6(5), 957 (1972).
- [4] А.А. Лебедев, Н.С. Савкина, А.М. Иванов, Н.Б. Строкан, Д.В. Давыдов. ФТП, 34(2), 249 (2000).

- [5] Г. Виолина, П. Шкребий, Е. Калинина, Г. Холуянов, В. Коссов, Р. Яфаев, А. Халлен, А. Константинов. *Тр. III Межд. сем. „Карбид кремния и родственные материалы“* (Великий Новгород, 2000) с. 213.
- [6] Е.В. Калинина, А.В. Суворов, Г.Ф. Холуянов. *ФТП*, **14** (6), 1099 (1980).
- [7] 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. Dmitriev. *Appl. Phys. Lett.*, **77** (19), 3051 (2000).
- [8] E. Kalinina, G. Kholujanov, V. Solov'ev, A. Strel'chuk, V. Kossov, R. Yafaev, A. Kovarski, A. Schukarev, S. Obyden, G. Saporin, P. Ivannikov, A. Hallén, A. Konstantinov. *Proc. E-MRS Spring Meeting 2001* (Straasbourg, France, 2001) F-VI.2.
- [9] А.М. Стрельчук. *ФТП*, **29** (7), 1190 (1995).
- [10] Ю.А. Водаков, К.Д. Думаков, Е.В. Калинина, Е.Н. Мохов, М.Г. Рамм, Г.Ф. Холуянов. *ФТП*, **21** (9), 1685 (1987).

Редактор Т.А. Полянская

Silicon carbide detectors of high-energy particles

G.N. Violina, E.V. Kalinina*, G.F. Kholujanov*,
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 Optonic,
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 Results of an investigation of the 4H-SiC Al ion implanted $p-n$ junctions that are employed as high energy particle detectors are presented. Obtained have been junctions based on SiC epitaxial layers grown by chemical vapor deposition. The concentration of uncompensated donors and the minority carrier diffusion length in initial epitaxial layers are equal to $N_d - N_a = (3-5) \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ and $L_p = 2.5 \mu\text{m}$, respectively. Detectors were irradiated by α -particles with energy ranging from 4.8 to 5.5 MeV at 20°C, the efficiency of induced charge collection being as high as 0.35. The possibility was considered to use SiC detectors at high, up to 500°C, temperatures.