

06

## ***P*–*n*-детекторы ядерного излучения на основе пленок 4H-SiC для работы при повышенных температурах (375°C)**

© Е.В. Калинина, А.М. Иванов, Н.Б. Строкан

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
E-mail: evk@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 27 августа 2007 г.

Впервые представлены результаты исследования спектрометрических характеристик в температурном интервале 25–375°C, проведенного на детекторах, выполненных на основе 4H-SiC ионно-легированных  $p^+ - n$ -переходов. Тестирование  $\alpha$ -частицами с энергией 5.8 MeV проводилось в специально созданной высокотемпературной измерительной камере. Выявлены факторы, связанные со структурными характеристиками как исходного материала, так и ионно-легированных  $p^+ - n$ -переходов, ограничивающие температурный предел работы детекторов в спектрометрическом режиме. Наблюдаемое повышение эффективности диффузионно-дрейфового переноса заряда с ростом температуры объяснено увеличением диффузионной длины неосновных носителей.

PACS: 61.82.Fk, 61.80.-x

**Введение.** Благодаря своим электрофизическим свойствам, широкозонные полупроводники являются перспективными материалами при создании высокотемпературных детекторов для мониторинга ядерных излучений в „горячих“ точках ядерных реакторов на атомных станциях и космических объектах, при утилизации ядерных отходов и отработанного ядерного топлива. Наиболее обещающим из них представляется 4H-SiC, обладающий отличными механическими, электрическими и химическими свойствами. Эпитаксиальные слои 4H-SiC, выращенные методом газотранспортного осаждения (CVD), высокой степени чистоты с толщинами в несколько сотен микрон в настоящее время промышленно выпускаются вплоть до 3 дюймов в диаметре.

Использование 4H-SiC чистых CVD-слоев толщинами до  $30 \div 50 \mu\text{m}$  позволило создать детекторы на основе Ст-барьеров Шоттки, которые при тестировании  $\alpha$ -частицами имели разрешения по энергии

0.5–0.34%, соизмеримые с параметрами Si-детекторов [1,2]. Структуры с барьерами Шоттки на подобных эпитаксиальных слоях исследовались как детекторы  $\alpha$ - и рентгеновского излучения при температурах 90 и 107°C соответственно [3,4]. В этих структурах не отмечалось влияния роста температуры на эффективность собирания заряда. Одновременно наблюдавшийся низкий уровень шума в приборах подтверждал возможность работы SiC-детекторов при повышенных температурах.

Поскольку использование барьеров Шоттки имеет серьезные температурные ограничения, несомненный интерес для создания высокотемпературных детекторов представляют структуры с  $p-n$ -переходами. Наиболее перспективными являются детекторы на основе ионно-легированных (ИЛ)  $p-n$ -переходов, где возможно сформировать тонкие высоколегированные  $p^+$ -эмиттеры, которые могут служить эффективным „входным окном“ с малыми потерями энергии. Детекторы на структурах 4H-SiC и ИЛ Al  $p^+-n$ -переходами имели 100%-ную эффективность собирания заряда, созданного  $\alpha$ -частицами, с разрешением по энергии  $\leq 2\%$  [5]. Именно на таких структурах были впервые исследованы спектрометрические характеристики детекторов и матриц из 4 детекторов при их рабочей температуре 170 и 140°C соответственно [6,7].

В настоящем сообщении приведены результаты по спектрометрии аналогичных 4H-SiC детекторов с ИЛ Al  $p^+-n$ -переходами в температурном интервале 25–375°C.

**Методика эксперимента.** Детекторные структуры изготавливались на основе 4H-SiC CVD-слоев толщиной  $\leq 45 \mu\text{m}$  с концентрацией нескомпенсированных доноров  $N_d - N_a = (4-6) \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ , которые выращивались на коммерческих подложках 4H-SiC с концентрацией  $N_d - N_a = 1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ .  $P^+-n$ -переходы изготавливались имплантацией ионов Al с энергией 100 keV и дозой  $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ , с последующим высокотемпературным активационным отжигом при температуре 1700°C в течение 15 s. Детекторные мезаструктуры площадью  $10^{-3} \text{ cm}^2$  формировались ионно-плазменным травлением без специальной обработки периферии  $p^+-n$ -переходов [7].

Исследуемые структуры помещались в специально разработанную высокотемпературную камеру, обеспечивающую нагрев детекторов до 500°C в процессе их тестирования  $\alpha$ -частицами с энергией  $\approx 5.8 \text{ MeV}$ . Давление в камере при измерении характеристик детекторов поддер-

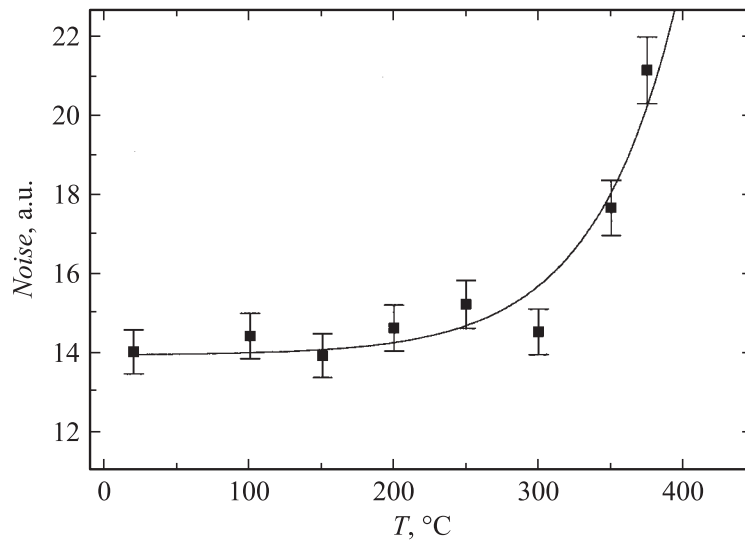
живалось сорбционным насосом и не превышало  $10^{-4}$  mm ртутного столба.

Прямые и обратные вольт-амперные характеристики (ВАХ) детекторных структур измерялись до температуры  $400^{\circ}\text{C}$ . Измерения характеристик детекторов проводились в температурном интервале  $25 \div 375^{\circ}\text{C}$  с использованием стандартной для задач спектromетрии установки. Полоса пропускания усилительного тракта формировалась RC-фильтром из цепочек дифференцирования-интегрирования сигнала с постоянной времени  $3 \mu\text{s}$ . Получаемые амплитудные спектры регистрировались анализатором с числом каналов 4000.

**Результаты эксперимента и их обсуждение.** В результате имплантации ионов Al и отжига в указанных режимах, на глубине  $0.3 \div 0.4 \mu\text{m}$  от поверхности формировался  $p^+ - n$ -переход с концентрацией акцепторов  $N_a - N_d = 5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  в  $p^+$ -слое [7]. Детекторные структуры на основе таких  $p^+ - n$ -переходов имели дифференциальные сопротивления в прямом направлении  $\leq 3 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^{-2}$  и напряжения пробоя 1700 V. При этом токи от приложенного обратного напряжения возрастали линейно с температурой до  $400^{\circ}\text{C}$ . Линейный характер указывал на отсутствие микроплазменных пробоев и токов утечки по периферии в детекторных структурах в исследуемом интервале температур, что являлось предпосылкой низкого уровня шумов детекторов при повышенных температурах [5].

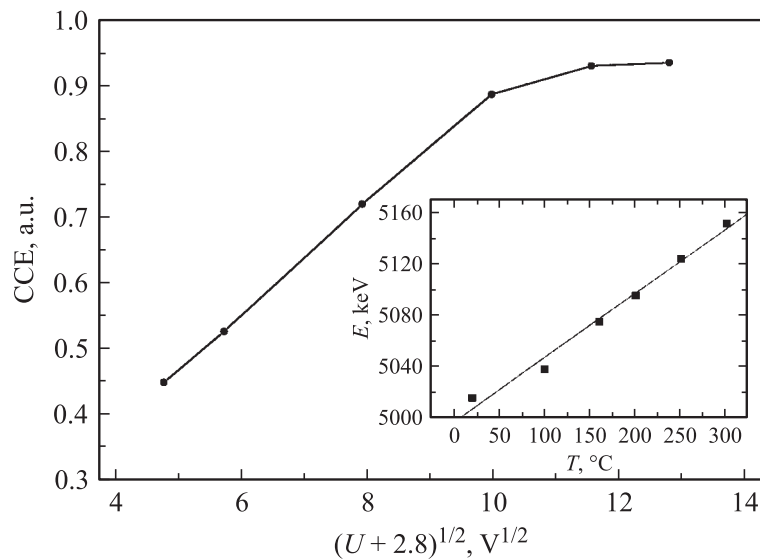
Как известно, именно шумы, связанные с возрастанием тока при повышении температуры, являются основным препятствием для работы детекторов на основе традиционных полупроводников (Ge, Si, CdTe). Широкозонные полупроводники, в том числе и SiC, отличаются малыми генерационными токами при  $25^{\circ}\text{C}$  и, как следствие, малыми шумами в приборе [5]. Но даже экспоненциальный рост генерационных токов с температурой позволяет рассчитывать на возможность работы SiC детекторов в спектromетрическом режиме. Согласно данным работы [8], при температуре  $400 - 500^{\circ}\text{C}$  генерационные токи в 4H-SiC ИЛ  $p^+ - n$ -переходах составляют  $10^{-13} - 10^{-12}$  A.

Экспериментально наблюдаемый ход шума детектора в температурном интервале  $20 \div 375^{\circ}\text{C}$  при напряжении смещения  $U = 150 \text{ V}$  представлен на рис. 1. При таком обратном напряжении уже имело место насыщение как амплитуды сигнала, так и разрешения по энергии (рис. 2 и 3). Как видно, при нагреве детекторов до  $300^{\circ}\text{C}$  уровень шума не изменялся, сравнительно с начальной величиной. Ток детектора,



**Рис. 1.** Зависимость величины шума имплантированного детектора от температуры.

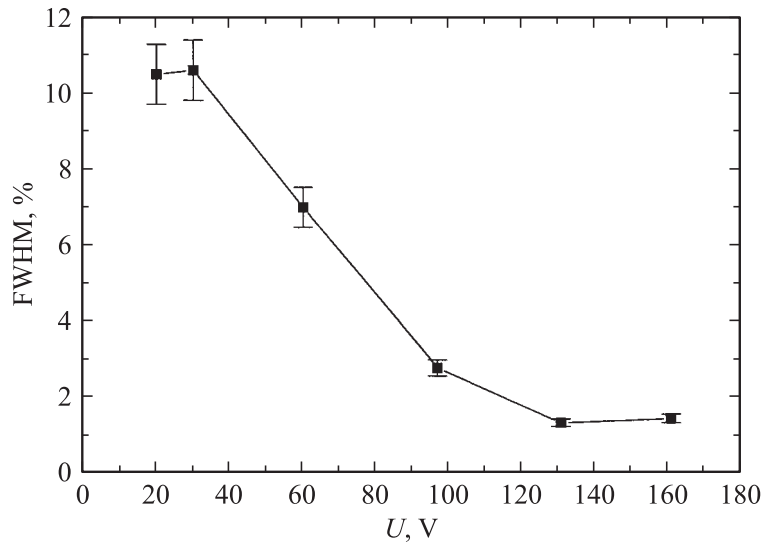
естественно, возрастал, но оставался менее тока кремниевого полевого транзистора на входе зарядочувствительного предусилителя. Поскольку было зафиксировано отсутствие микроплазменных пробоев и токов утечки по периферии в детекторных структурах в исследуемом интервале температур, обратные токи, а следовательно и шумы, определялись генерационными токами и токами утечки объемной природы. Рост шума на 50% происходил при 375°C и не может быть обусловлен только генерационными токами по причине их малости при таких температурах. Известно, что дробовое происхождение токов, а значит и шумов, объясняется наличием шунтов на пути прохождения тока. Вероятностный характер дробовых токов обуславливает экспоненциальную их зависимость с ростом температуры [8]. По-видимому, именно объемные утечки по шунтам определили экспоненциальный рост шума при температурах выше 375°C, что явилось температурным пределом для снятия детекторных характеристик. Наличие шунтов определяется качеством как исходного материала, так и структурными особенностями



**Рис. 2.** Эффективность сбора заряда при  $300^{\circ}C$  в зависимости от приложенного обратного смещения. Фрагмент: зависимость величины сигнала от температуры при  $100 V$  обратного смещения.

формируемых ИЛ Al  $p^+ - n$ -переходов. В частности, наличие шунтов связывалось с присутствием в областях интерфейса подложка–CVD-слои и  $p^+ - n$ -переходов 3С квантовых ям в 4H-SiC. Количество появляющихся ям возрастает с ростом температуры прибора. Кроме того, известно, что при росте CVD-слоев могут возникать дефекты упаковки с малыми энергиями образования, которые также могут служить шунтами для протекающего тока [9]. Вероятно, именно структурные характеристики определили температурный предел спектрометрических характеристик исследуемых детекторов.

Эффективность сбора заряда (CCE), определяемая как перенесенный в детекторе заряд, нормированный на заряд, внесенный регистрируемой частицей, представлена на рис. 2 в функции квадратного корня от смещения. Слагаемое  $2.8 V$  представляет величину контактной разности потенциалов. Зависимость имеет типичный вид с линейно нарастающим участком, переходящим к насыщению. Последнее



**Рис. 3.** Зависимость разрешающей способности детектора при 300°C от приложенного обратного смещения.

происходит при смещениях  $U \approx 150$  V, когда протяженность области электрического поля  $W \propto (U + 2.8)^{1/2}$  становится близкой к пробегу  $\alpha$ -частиц  $R = 21 \mu\text{m}$ . Принимая среднее по исходной пластине 4H-SiC значение для концентрации  $N_d - N_a = 5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ , имеем  $W = 18.1 \mu\text{m}$ . Поскольку длины диффузии дырок составляют  $L_p > 10 \mu\text{m}$  [2], указанного смещения достаточно для полного переноса заряда, внесенного в межэлектродную область детектора. Измеренные значения ССЕ, хотя и достигают насыщения, оказываются меньше 1 вследствие неоптимизированной конструкции „входного окна“ детектора.

Показательно также приведенное на фрагменте рис. 2 изменение с ростом температуры величины сигнала. Зависимость снималась при смещении 100 V, когда область поля составляла  $W = 14.8 \mu\text{m}$ . Это заметно меньше пробега  $R$  и практически равно, согласно кривой Брегга, значению  $0.66R$  — положению центра тяжести распределения заряда, созданного  $\alpha$ -частицей. Таким образом, перенос заряда в существенной мере определялся диффузией дырок. На этом основании изменение

величины сигнала (значит и ССЕ) следует относить к возрастанию с ростом температуры величины  $L_p$ , что находится в согласии с ранее полученными данными [6,7].

Разрешение по энергии (FWHM) определяется как ширина спектральной линии на уровне 0.5 от максимума, нормированная на среднюю энергию. Ее зависимость от смещения приведена на рис. 3. Сопоставляя с ходом ССЕ (см. рис. 2), видим четкое соответствие указанных основных характеристик детектора. Рост ССЕ (более полный перенос заряда) сопровождается улучшением разрешения (меньшей шириной линии). Результирующее наименьшее значение  $\text{FWHM} = 1.35\%$  уступает полученной ранее в работе [2] величине 0.34%. В первую очередь это связано (как уже отмечалось выше) со структурой „входного окна“. Дополнительно отметим, что в данной работе ставилась задача работоспособности прибора при температурах до 300°С.

**Заключение.** Прогнозируемые возможности SiC в качестве „детектирующей среды“ успешно оправдываются на практике. В представленных выше детекторах достигнуто сочетание работоспособности при повышенных, как минимум, до 300°С температурах и высокого разрешения по энергии. Указанные характеристики позволяют рассматривать результат работы в целом как появление детекторов нового типа.

Работа выполнена при поддержке грантов президента РФ — Ведущие научные школы НШ-5920.2006.2 и проекта РФФИ № 05-02-08012, а также со стороны исследований по программам коллаборации RD-50 (CERN).

## Список литературы

- [1] *Иванов А.М., Калинина Е.В., Константинов А.О., Онушкин Г.А., Строкан Н.Б., Холуянов Г.Ф., Hallen A.* // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 14. С. 1.
- [2] *Строкан Н.Б., Иванов А.М., Калинина Е.В., Холуянов Г.Ф., Онушкин Г.А., Давыдов Д.В., Виолина Г.Н.* // ФТП. 2005. Т. 39. В. 3. С. 382.
- [3] *Ruddy A.H., Dulloo A.R., Seidel J.G., Seshardi S., Rowland L.B.* // IEEE Trans. Nucl. Science. 1998. V. 45. P. 536.
- [4] *Bertuccio G., Casiraghi R., Cetronio A., Lanzieri C., Nava F.* // Nucl. Instr. & Meth. A. 2004. V. 518. P. 433.
- [5] *Калинина Е.В., Коссов В.Г., Строкан Н.Б., Иванов А.М., Яфаев Р.Р., Холуянов Г.Ф.* // ФТП. 2006. Т. 40. С. 1123.

- [6] *Kalinina E., Strokan N., Ivanov A., Sadohin A., Azarov A., Kossov V., Yafaev R., Lashaev S.* // *Materials Science Forum*. 2007. V. 556–557. P. 941.
- [7] *Калинина Е.В., Строкан Н.Б., Иванов А.М., Ситникова А.А., Садохин А., Азаров А., Коссов В.Г., Яфаев Р.Р.* // Принято для публикации в ФТП.
- [8] *Strel'chuk A.M., Savkina N.S.* // *Materials Science and Engineering B*. 2001. V. 80. P. 378.
- [9] *Sumakeris J.J., Bergman J.P., Das M.K., Hallin C., Hull B.A., Janzen E., Lendenmann H., O'Loughlin M.J., Paisley M.J., Ha S., Skowronski M., Palmour J.W., Carter C.H., Jr.* // *Materials Science Forum*. 2006. V. 527–529. P. 141.