

Влияние облучения быстрыми нейтронами на электрические характеристики приборов на основе CVD эпитаксиальных слоев 4H-SiC

© Е.В. Калинина[¶], Г.Ф. Холуянов, Д.В. Давыдов, А.М. Стрельчук, А. Hallén*, А.О. Константинов⁺, В.В. Лучинин[≠], А.Ю. Никифоров[•]

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

* Royal Institute of Technology Department of Electronic, Electrum 229, SE 164 40 Kista, Sweden

⁺ Acreo AB, Electrum 236, SE 164 40 Kista, Sweden

[≠] Санкт-Петербургский электротехнический университет, Центр микротехнологии и диагностики, 197376 Санкт-Петербург, Россия

[•] Специализированные электронные системы, 115409 Москва, Россия

(Получена 11 февраля 2003 г. Принята к печати 17 февраля 2003 г.)

Исследовалось влияние облучения быстрыми нейтронами (1 МэВ) на электрические свойства Al-барьеров Шоттки и ионно-легированных алюминием p^+-n-n^+ -диодов, сформированных на основе высокоомных чистых эпитаксиальных слоев 4H-SiC n -типа проводимости, выращенных методом газотранспортной эпитаксии. Использование таких структур позволило проводить исследования радиационных дефектов в эпитаксиальном слое при температурах до 700 К. После облучения образцов нейтронами с флюенсом $6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ наблюдалось исчезновение выпрямляющих свойств диодных структур из-за высокого (до 50 ГОм) сопротивления радиационно-нарушенного слоя. Однако при температуре 650 К диодные характеристики облученных p^+-n-n^+ -структур частично восстанавливались.

1. Введение

Карбид кремния является одним из наиболее перспективных широкозонных полупроводников, имеющих высокую электрическую и механическую прочность, а также температурную и радиационную стойкость. Учитывая этот уникальный набор свойств, появляется возможность использовать SiC для изготовления электронных приборов, способных работать в экстремальных условиях — высоких температурах и повышенном уровне радиации, а также в химически активных средах.

Работы по исследованию влияния облучения нейтронами на свойства SiC в основном посвящены изучению природы дефектообразования [1–4]. Не менее актуальным является исследование радиационных эффектов при воздействии облучения на готовые приборные структуры, поскольку это дает информацию о механизмах отказов и пороговых уровнях облучения, приводящих к изменению характеристик и деградации приборов, а также позволяет разработать модели их поведения при облучении [5]. Исследования электрических характеристик облученных SiC-выпрямителей на основе $p-n$ -переходов и барьеров Шоттки, проведенные ранее, показали большие различия в результатах [6–9]. Такое разнообразие в экспериментальных данных, вероятно, можно объяснить различиями в характеристиках об-

лучаемых образцов по причине низкого качества используемого материала. Прогресс, достигнутый в последнее время в промышленном выращивании чистых эпитаксиальных слоев SiC, позволил получить новые данные по влиянию облучения нейтронами на некоторые характеристики приборных структур, сформированных на этом материале [10–14].

В данной работе исследовалось влияние облучения быстрыми нейтронами как на дефектообразование в чистом слабо легированном эпитаксиальном слое n -типа проводимости 4H-SiC, так и на некоторые электрические характеристики диодов Шоттки и ионно-легированных p^+-n-n^+ -структур, сформированных в этих слоях.

2. Методика эксперимента

Исследованные диодные структуры были изготовлены на основе пленок n -4H-SiC, выращенных методом газотранспортной эпитаксии (CVD) на подложках n^+ -4H-SiC с концентрацией нескомпенсированных доноров $N_d - N_a \approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$. CVD-слои толщиной 26 мкм имели концентрацию $N_d - N_a \approx (5-8) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Диодные p^+-n-n^+ -структуры создавались методом ионной имплантации ионов Al дозой $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ с энергией ионов 150 кэВ. С целью активации введенной примеси проводился высокотемпературный отжиг при 1700°C в течение 15 с в атмосфере Ar, при этом формировался p^+-n -переход на глубине 0.6 мкм [15]. Омические кон-

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

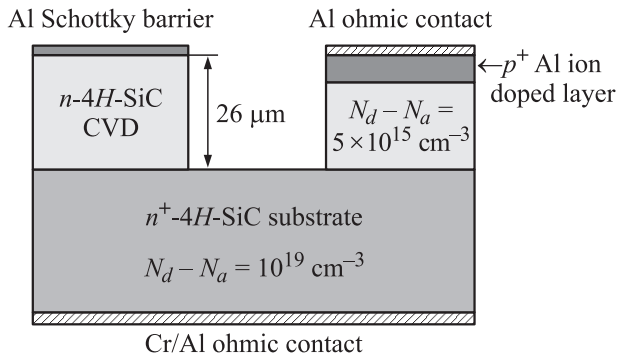


Рис. 1. Поперечный разрез структуры с барьером Шоттки и ионно-легированным алюминием p^+ - n -переходом, сформированным в эпитаксиальном слое 4H-SiC.

такты изготавливались термовакuumным напылением Al и Cr/Al к p^+ - и n^+ -областям диодных структур соответственно. При этом на предварительно маскируемой части эпитаксиального слоя без ионного легирования формировались Al-барьеры Шоттки. Т.е. базовые контакты Cr/Al к n^+ -областям всех диодных структур формировались в одном процессе. Диодные меза-структуры с барьерами Шоттки и p^+ - n -переходами с площадью 10^{-3} см² и высотой 30 мкм формировались ионно-плазменным травлением, при этом Al служил маской (рис. 1). В работе исследовались диоды без специальной обработки периферии, которая обычно используется для исключения поверхностного пробоя.

Таблица 1. Параметры облучения быстрыми нейтронами

Порядок облучения	Флюенс, см ⁻²	Суммарный флюенс, см ⁻²	Сопутствующая доза γ -излучения, рад
Первое (D_1)	$1.2 \cdot 10^{14}$	$1.2 \cdot 10^{14}$	$2.3 \cdot 10^4$
Второе (D_2)	$1.9 \cdot 10^{14}$	$3.1 \cdot 10^{14}$	$4.6 \cdot 10^4$
Третье (D_3)	$3.14 \cdot 10^{14}$	$6.24 \cdot 10^{14}$	$8.6 \cdot 10^4$

Диодные структуры облучались последовательно тремя флюенсами быстрых нейтронов с энергией 1 МэВ с сопутствующими дозами γ -излучения. Параметры облучения представлены в табл. 1. Перед и после каждого облучения диодных структур проводились измерения и сравнительный анализ их электрических характеристик.

Профиль распределения электрически активных примесей в CVD-слое вблизи барьеров Шоттки и области p^+ - n -перехода исследовался по вольт-фарадным характеристикам (ВФХ), измеренным на частоте 10 кГц. Наличие и количество глубоких уровней в запрещенной зоне 4H-SiC оценивались по данным емкостной спектроскопии (C-DLTS) в диапазоне температур 80–700 К. Измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) барьеров Шоттки и p^+ - n - n^+ -структур проводилось при постоянном токе в диапазоне температур 293–650 К.

3. Результаты эксперимента и их обсуждение

Согласно измерениям ВФХ, для диодных структур обоих типов — диодов Шоттки и ионно-легированных алюминием p^+ - n -переходов — наблюдалось уменьшение концентрации $N_d - N_a$ в области объемного заряда в 1.5 раза после первого облучения нейтронами (D_1) и в 2 раза после второго облучения (D_2). После третьего облучения с общим флюенсом быстрых нейтронов $D_3 = 6.24 \cdot 10^{14}$ см⁻² независимые от напряжения значения емкостей диодов Шоттки и p^+ - n -переходов составляли 0.2–0.3 пФ. Эта величина соответствует диэлектрическому слою толщиной 20–30 мкм, что соизмеримо с толщиной высокоомного CVD-слоя.

DLTS-измерения исходных CVD-слоев выявили наличие одного глубокого центра Z_1 с энергией 0.62 эВ в количестве $(2-3) \cdot 10^{13}$ см⁻³ (рис. 2, кривая 1). После облучения диодных структур с флюенсом D_1 DLTS-измерения проводились в диапазоне температур 80–400 К. Облучение приводило, наряду с увеличением концентрации центра Z_1 , к появлению еще одного глубокого центра NI_2 с энергией 0.68 эВ (кривая 2). Общее количество глубоких центров Z_1 увеличивалось на порядок по сравнению с исходными данными и составило $4 \cdot 10^{14}$ см⁻³ (табл. 2).

После облучения диодных структур с флюенсом D_2 измерения DLTS проводились на ионно-легированных p^+ - n -переходах в две стадии: сначала в температурном диапазоне 80–400 К для предотвращения отжига нестабильных дефектов, а затем до температур 700 К. При измерениях до 400 К на образцах, облученных второй дозой, были обнаружены центры Z_1 и NI_2 (рис. 2, кривая 3) аналогично результатам, полученным после облучения с первым флюенсом D_1 . Однако концентрации этих центров заметно увеличивались по сравнению с данными, полученными после первого облучения. Кроме того,

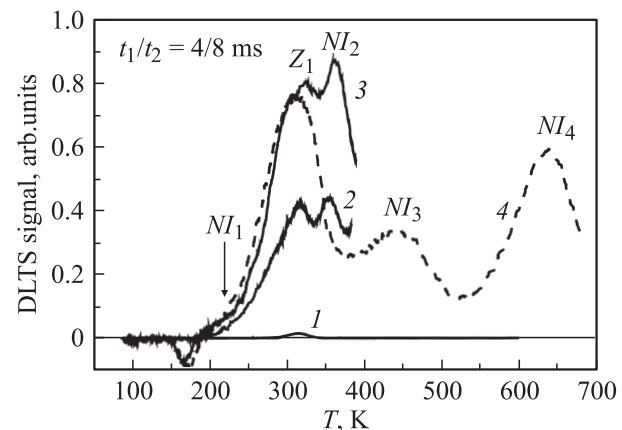


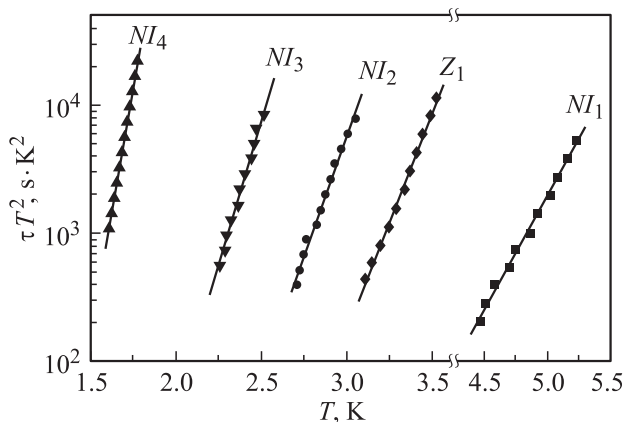
Рис. 2. Спектры C-DLTS диодов Шоттки (1, 2) и ионно-легированных алюминием p^+ - n -переходов (3, 4), измеренные до облучения (1) и после облучения нейтронами с флюенсом D_1 (2) и D_2 (3). Спектры 1–3 при измерении до температуры 400 К, кривая 4 — после нагрева образца до 700 К.

Таблица 2. Параметры глубоких уровней, обнаруженных в CVD-слоях 4H-SiC, после облучения нейтронами с разными флюенсами

Порядок облучения	Центр	$E_c - E_0, \text{эВ}$	$\sigma_n, \text{см}^2$	$N, \text{см}^{-3}$
Исходный образец	Z_1	0.63 ± 0.01	10^{-14}	$(2-3) \cdot 10^{13}$
Первое (D_1)	Z_1	0.63 ± 0.01	10^{-14}	$4 \cdot 10^{14}$
	NI_2	0.68 ± 0.01	10^{-14}	$4 \cdot 10^{14}$
Второе (D_2), до отжига	NI_1	0.37 ± 0.01	10^{-16}	$5.5 \cdot 10^{13}$
	Z_1	0.69 ± 0.01	10^{-14}	$5.5 \cdot 10^{14}$
	NI_2	0.74 ± 0.03	$5 \cdot 10^{-15}$	$5.8 \cdot 10^{14}$
	NI_1	0.37 ± 0.01	10^{-16}	$< 10^{13}$
Второе (D_2), после отжига при 700 К	Z_1	0.68 ± 0.01	10^{-14}	$5.3 \cdot 10^{14}$
	NI_2	0.74 ± 0.03	10^{-14}	$< 10^{13}$
	NI_3	0.92 ± 0.1	$5 \cdot 10^{-15}$	$\sim 2 \cdot 10^{14}$
	NI_4	1.56 ± 0.02	$5 \cdot 10^{-13}$	$8 \cdot 10^{14}$

повторное облучение образцов нейтронами приводило к появлению в небольшом количестве центра NI_1 на глубине $E_c - E_0 = 0.37 \text{ эВ}$ от края зоны проводимости, который отжигался при 400 К (табл. 2). Прогрев образцов до 700 К приводил к незначительному уменьшению концентрации центра Z_1 , в то время как концентрации глубоких центров NI_1 и NI_2 заметно уменьшались. Кроме того, при температурах более 400 К были обнаружены глубокие центры NI_3 и NI_4 , расположенные на глубине 0.92 и 1.56 эВ от края зоны проводимости соответственно. Сечения захвата электронов (σ_n) для различных глубоких уровней определялись по отсечкам зависимостей Аррениуса (рис. 3). Параметры всех обнаруженных глубоких уровней приведены в табл. 2, их суммарная концентрация составляла $\sim 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ после второго (D_2) облучения.

Как отмечалось выше, после облучения диодных структур быстрыми нейтронами с флюенсом D_3 образовывался диэлектрический слой, соизмеримый с толщиной слабо легированного эпитаксиального слоя 26 мкм. Можно считать, что вносимое при тре-

**Рис. 3.** Зависимости Аррениуса для глубоких центров, обнаруженных в CVD-слоях 4H-SiC после облучения нейтронами с флюенсом D_2 .

тем облучения суммарное количество глубоких центров становилось соизмеримым с величиной исходной концентрации активных доноров в CVD-слое $N_d - N_a = (5-8) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Учитывая, согласно измерениям ВФХ, незначительное уменьшение концентрации нескомпенсированных доноров в эпитаксиальном слое в процессе облучения образцов нейтронами, можно предположить, что только часть глубоких центров являлись компенсирующими.

Начальные участки прямых ветвей ВАХ для барьеров Шоттки, а также для ионно-легированных диодов, измеренные при напряжениях, меньших контактной разницы потенциалов U_c , имели до облучения экспоненциальную зависимость тока от напряжения с малыми токами утечки (см. вставку на рис. 4, кривые 1, 4). Наличие малых токов утечки у исходных исследованных диодных структур свидетельствует о достаточно высоком качестве исходного полупроводникового материала и качественной обработке поверхности меза-структур. Каждое облучение нейтронами с флюенсами D_1 (рис. 4, кривые 2, 5) и D_2 (кривые 3, 6) приводило к укорачиванию экспоненциального участка ВАХ за счет увеличения сопротивления диодных структур.

Заметные изменения ВАХ наблюдались после облучения нейтронами для тех же диодных структур при напряжениях, превышающих величины контактного потенциала для диодов Шоттки и $p^+ - n$ -переходов (рис. 4). Облучение быстрыми нейтронами приводило к заметному увеличению сопротивления выпрямителей, которое формально может быть обусловлено изменениями сопротивлений: базовых омических контактов Si/Al, низкоомной подложки, высоколегированного ионно-легированного тонкого (0.6 мкм) p^+ -слоя или высокоомного CVD-слоя. Измерения контактных сопротивлений базового контакта после облучений показали, что величина контактного сопротивления не изменялась. Согласно данным по облучению SiC быстрыми нейтронами [3,16], уровни облучения не должны влиять на высоколегированные области n^+ - и p^+ -SiC. В таком случае увеличение со-

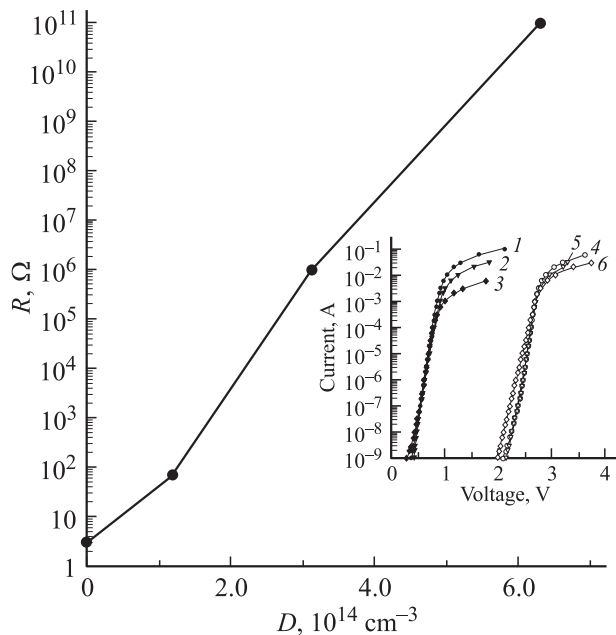


Рис. 4. Изменение сопротивления CVD-слоя 4H-SiC с увеличением флюенса облучающих нейтронов (D). На вставке — начальные участки прямых вольт-амперных характеристик барьеров Шоттки (1–3) и ионно-легированных $p^+ - n$ -переходов (4–6), измеренные до облучения (1, 4) и после облучения с флюенсами D_1 (2, 5) и D_2 (3, 6).

противления структуры определялось только увеличением сопротивления высокоомного CVD-слоя за счет появления радиационных дефектов при облучении. Это сопротивление возрастало при облучении нейтронами с флюенсом D_2 , и при флюенсе облучения D_3 диодные структуры теряли свои выпрямляющие свойства. При прямом напряжении 50 В токи составляли наноамперы, и общее сопротивление диодных структур обоих типов превышало 50 ГОм.

Было замечено, что при освещении лампой накаливания облученных нейтронами диодных структур их сопротивление заметно уменьшалось. Наличие фотоэффекта в исследуемых структурах, без учета сопутствующих факторов (например, растекания тока), можно объяснить появлением при нейтронном облучении в CVD-слое радиационных дефектов, заметно влияющих на сопротивление этого слоя.

Радикальные изменения ВАХ диодов, подвергнутых облучению нейтронами, наблюдались при их нагревании. На рис. 5 представлены температурные зависимости сопротивления ионно-легированной диодной структуры, облученной нейтронами с флюенсом D_3 . Прогрев образцов проводился поэтапно с интервалом около 50°С с промежуточным остыванием до комнатной температуры. Экспериментальные точки на кривой 2 получены при комнатной температуре и представлены в зависимости от температуры предварительного прогрева. Как видно, при нагревании облученных образцов до 650 К сопротивление структур уменьшалось на 8 порядков

(рис. 5, кривая 1) за счет частичного отжига радиационных дефектов. Заметный отжиг радиационных дефектов наблюдался при прогреве, начиная с 200°С. После прогрева образцов до 650 К и остывания, сопротивление облученной структуры уменьшалось почти на 4 порядка по сравнению с сопротивлением до нагрева.

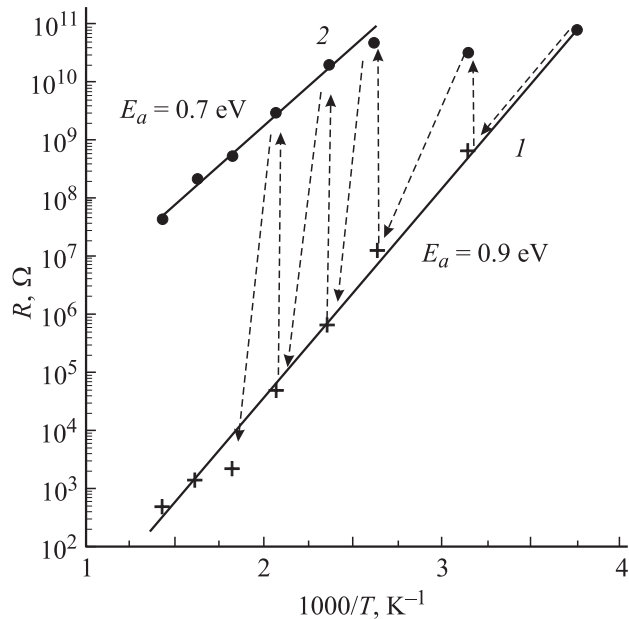


Рис. 5. Температурные зависимости сопротивления ионно-легированных $p^+ - n - n^+$ -структур, облученных нейтронами с флюенсом D_3 . Зависимость 2 измерена при 293 К после поэтапного нагрева с интервалом 50°С с промежуточным остыванием до 293 К.

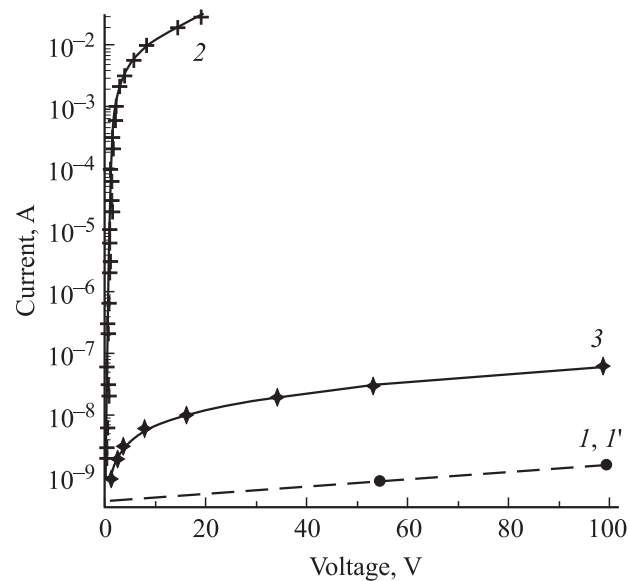


Рис. 6. Прямые (1, 2) и обратные (1', 3) ветви ВАХ ионно-легированных $p^+ - n - n^+$ -структур после облучения нейтронами с суммарным флюенсом $6 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$. Кривые 1, 1' измерены при $T = 293 \text{ K}$, кривые 2 и 3 при $T = 650 \text{ K}$.

На рис. 6 представлены ВАХ ионно-легированных диодов, подвергнутых облучению нейтронами с флюенсом D_3 при $T = 293$ К (рис. 6, кривые 1, 1'). Видно, что при более высокой температуре выпрямляющие свойства диодных структур частично восстанавливаются (рис. 6, кривые 2, 3) с сопротивлением в прямом направлении ~ 200 Ом. Исходные диодные структуры имели сопротивление ~ 3 Ом.

Обратные напряжения исследованных диодных структур обоих типов контролировались до 300 В. При этом обратные токи при комнатной температуре составляли наноамперы как для исходных диодов, так и после облучения быстрыми нейтронами с флюенсами D_1 и D_2 . Можно предположить, что при облучении не создавалось дополнительных каналов для токов утечки и пробоя.

4. Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что при облучении CVD-слоев 4H-SiC быстрыми нейтронами с флюенсом $6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ концентрация вводимых радиационных дефектов становилась соизмеримой с концентрацией доноров $N_d - N_a = (5-8) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ в эпитаксиальном слое. Согласно ВФХ и ВАХ, часть вводимых при облучении радиационных дефектов была компенсирующего типа. При этом CVD-слой 4H-SiC трансформировался в диэлектрик с емкостью 0.2–0.3 пФ и сопротивлением ~ 50 ГОм, что приводило к исчезновению выпрямляющих функций диодов, сформированных на этих слоях. Однако было выявлено, что диодные структуры, деградировавшие после облучения быстрыми нейтронами, частично восстанавливали свои выпрямляющие характеристики при температуре 650 К. Таким образом, впервые показана возможность увеличения радиационной стойкости приборов на основе SiC при повышенных рабочих температурах.

Авторы благодарят Г.Н. Виолину за полезные консультации и Г.А. Онушкина за помощь в оформлении.

Работа была поддержана проектом РФФИ № 01-02-17911.

Список литературы

- [1] Ю.Н. Николаев. Электрон. техн., **3**, 54 (1966).
- [2] В.В. Макаров. ФТП, **13** (8), 2357 (1971).
- [3] А.И. Вейнгер, А.А. Лепнева, Г.А. Ломакина, Е.Н. Мохов, В.И. Соколов. ФТП, **18** (11), 2153 (1984). [Sov. Phys. Semicond., **18** (11), 1256 (1984)].
- [4] V. Nagesh, J.W. Farmer, R.F. Davis, H.S. Kong. Appl. Phys. Lett., **50**, 1138 (1987).
- [5] А.Ю. Никифоров, П.К. Скоробогатов, Ю.И. Сыцько. В сб.: *Радиационная стойкость электронных систем „Стойкость-2002“* (М., Паимс, 2002) т. 5, с. 147.
- [6] L.W. Aukerman, H.C. Garton, R.K. Willardson, V.E. Bryson. *Silicon Carbide*, ed. by J.R. O'Connor, J. Smiltens (Pergamon, Oxford, 1959) с. 388.
- [7] E.W.J. Mitchell, M.J. Moore. *Radiation Damage in Semiconductors* (Dunod, Paris, 1965) с. 235.
- [8] С.Е. Barnes. Appl. Phys. Lett., **20**, 86 (1972).
- [9] И.В. Рыжиков, И.Л. Касаткин, Е.Ф. Уваров. Электрон. техн., сер. 2, 4 (147), 9 (1981).
- [10] В.В. Евстропов, А.М. Стрельчук. ФТП, **30** (1), 112 (1996). [Semiconductors, **30** (1), 52 (1996)].
- [11] А.Ю. Никифоров, В.В. Лучинин, В.С. Фигуров. В сб.: *Радиационная стойкость электронных систем „Стойкость-98“* (М., СПЭЛС–НИИП, 1998) т. 1, с. 127.
- [12] S. Seshadri, A.R. Dulloo, F.H. Ruddy, J.G. Seide, L.B. Rowland. IEEE Trans. ED, **46** (3), 567 (1999).
- [13] А.Ю. Никифоров, А.В. Афанасьев, В.А. Ильин, В.В. Лучинин, А.А. Петров. В сб.: *Радиационная стойкость электронных систем „Стойкость-2001“* (М., Паимс, 2001) т. 4, с. 145.
- [14] А.Ю. Никифоров, П.А. Иванов, В.В. Лучинин. В сб.: *Радиационная стойкость электронных систем „Стойкость-2002“* (М., Паимс, 2002) т. 5, с. 167.
- [15] E. Kalinina, G. Kholujanov, V. Solov'ev, A. Strel'chuk, A. Zubrilov, V. Kossov, R. Yafaev, A.P. Kovarski, A. Hallén, A. Konstantinov, S. Karlsson, C. Adås, S. Randakova, V. Dmitriev. Appl. Phys. Lett., **77** (19), 3051 (2000).
- [16] А.В. Афанасьев, В.А. Ильин, А.А. Петров. Петербургский журн. электроники, **3–4**, 12 (2000).

Редактор Т.А. Полянская

Electrical study of the fast neutrons irradiated devices based on 4H-SiC CVD epitaxial layers

E. Kalinina, G. Kholujanov, D. Davydov, A. Strel'chuk, A. Hallén*, A. Konstantinov[†], V. Luchinin[‡], A. Nikiforov •

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

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

† Acreo, Electrum 233,
SE 164 40 Kista, Sweden

‡ St. Petersburg State Electrotechnical University,
Centre of Microtechnology and Diagnostics,
197376 St. Petersburg, Russia

• Specialized Electronic Systems,
115409 Moscow, Russia

Abstract The electrical properties of the Al Schottky barriers and Al ion implanted 4H-SiC p^+-n-n^+ diodes based on the high purity CVD epitaxial layers and irradiated by fast neutrons with energy 1 MeV were investigated. The radiation defects in CVD epitaxial layers at temperatures 700 K were studied using 4H-SiC p^+-n-n^+ structures. Rectifying properties of the diode structures disappeared after neutron irradiation with the fluence of $6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ due to high resistance (50 GΩ) of the radiationdamaged layer. However the diode characteristics of the neutron irradiated 4H-SiC p^+-n-n^+ structures were partly restored at temperature 650 K.