

## Влияние облучения электронами с энергией 0.9 МэВ на вольт-амперные характеристики и низкочастотные шумы 4H-SiC *pin*-диодов

© В.А. Добров<sup>1</sup>, В.В. Козловский<sup>2</sup>, А.В. Мещеряков<sup>2</sup>, В.Г. Усыченко<sup>1,2</sup>,  
А.С. Чернова<sup>1,2</sup>, Е.И. Шабунина<sup>3</sup>, Н.М. Шмидт<sup>3,¶</sup>

<sup>1</sup> АО „Светлана-Электронприбор“,  
194156 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
195251 Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

¶ E-mail: Natalia.Shmidt@mail.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 21 ноября 2018 г.

В окончательной редакции 29 ноября 2018 г.

Принята к публикации 29 ноября 2018 г.)

Экспериментально установлено, что при воздействии электронов с энергией 0.9 МэВ заметные изменения вольт-амперных характеристик и низкочастотных шумов 4H-SiC *pin*-диодов наблюдаются после доз  $\Phi \geq 1.4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . При смещениях менее 2 В токи прямой и обратной ветвей вольт-амперной характеристики с ростом дозы меняются немонотонно, что объясняется взаимодействием возбужденной электронной подсистемы с метастабильными дефектами. При этом наблюдается устойчивый рост коэффициента идеальности и последовательного сопротивления диодов на экспоненциальном участке вольт-амперной характеристики при смещении более 2 В. Надежная работа маломощных 4H-SiC *pin*-диодных СВЧ-устройств в условиях электронного облучения возможна до накопления дозы  $\Phi \leq 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . В СВЧ-устройствах, в которых уровни низкочастотных шумов не важны, но нужна стабильность режимных параметров, доза может быть повышена до  $\Phi \approx 8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ .

DOI: 10.21883/FTP.2019.04.47457.9027

### 1. Введение

В полупроводниковой СВЧ электронике все чаще используется новый широкозонный материал — карбид кремния. В последние два десятилетия достигнуты значительные успехи в создании высококачественных слоев эпитаксиального полупроводника 4H-SiC, что позволило приступить к промышленному выпуску таких приборов, как диоды Шоттки и *pin*-диоды. *pin*-Диоды на основе 4H-SiC используются в мощных сверхвысокочастотных аттенуаторах, ограничителях, переключателях и фазовращателях, к которым зачастую предъявляются повышенные требования как по стабильности вольт-амперных характеристик (ВАХ), так и по уровню низкочастотных (НЧ) шумов в пределах всего срока эксплуатации, особенно в радиационно-опасных средах.

С 1970-х годов начались исследования радиационных дефектов в SiC [1]. К настоящему времени имеется немало работ, например [2–7], посвященных изучению радиационной стойкости, дефектообразования и низкочастотных шумов в SiC-приборах при облучении их потоками электронов. Наибольшее число исследований относится к энергиям  $\geq 1 \text{ МэВ}$  с дозами более  $10^{16} \text{ см}^{-2}$ . Однако при таких дозах у 4H-SiC диодов Шоттки уже заметно меняются и форма ВАХ, и уровни НЧ шумов [3,5,6]. Применительно к *pin*-диодным СВЧ-устройствам значительные изменения ВАХ и НЧ

шумов чреваты появлением рассогласований в цепях и снижением стабильности СВЧ-колебаний в диапазоне доплеровских отстроек частоты. Поэтому для практики важно знать до какого уровня доз можно рассчитывать на надежную работу *pin*-диодных СВЧ-устройств, тем более что в литературе практически отсутствуют исследования по этому вопросу.

Активное рабочее пространство *pin*-диода, примерно равное объему *i*-области, намного больше, чем у транзисторов и смесительных диодов общего частотного диапазона. По причине большого объема НЧ шумов *pin*-диодов намного меньше [8], чем у традиционных приборов СВЧ, и измерять их значительно сложнее. Возможно, по этой причине трудно отыскать публикации по НЧ шумам *pin*-диодов, особенно в области больших токов, при которых эти приборы обычно работают в СВЧ-устройствах. Косвенные подтверждения их малости обнаружены в статье [9], в которой приведены измеренные энергетические спектры флуктуаций фазы и амплитуды СВЧ-колебания, порожденные  $1/f$  шумами кремниевого *pin*-диодного аттенюатора.

В настоящей работе приведены результаты исследования эволюции ВАХ и НЧ шумов 4H-SiC *pin*-диодов, в том числе в области рабочих токов, после облучения электронами с энергией 0.9 МэВ в диапазоне доз от  $10^{13}$  до  $4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ .

## 2. Объекты и методы исследования

Исследовались *pin*-диоды на основе эпитаксиальных 4H-SiC CVD-структур производства фирмы CREE (США), выращенных на  $n^+$ -подложке (концентрация доноров  $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ) с  $n_i$ -слоем толщиной 10 мкм и концентрацией примесей  $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ;  $p^+$ -область толщиной 1 мкм с концентрацией дырок  $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  формировалась диффузией. Для получения омических контактов к  $p^+$ - и  $n^+$ -областям напылялись слои соответственно Al/Ti/Ni/Au и Ti/Ni/Au. Затем методами фотолитографии формировались мезаструктуры диаметром 200 мкм, пассивированные SiO<sub>2</sub>. Чипы с мезами монтировались в корпус. Облучение электронами с энергией 0.9 МэВ проводилось на ускорителе РТЭ-1В в диапазоне доз  $1 \cdot 10^{13} - 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ . После каждого облучения измерялись ВАХ в широком диапазоне значений токов  $I$  и напряжений смещения  $U$ , а также уровни НЧ шумов. В одинаковых условиях были исследованы 6 диодов.

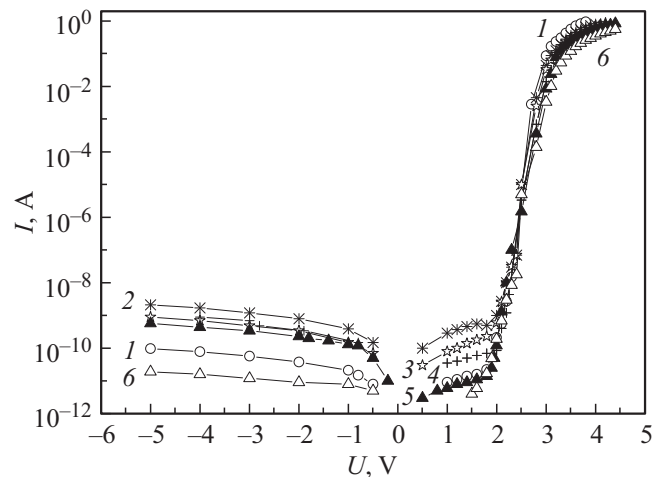
Малое дифференциальное сопротивление *pin*-диодов в области больших токов ( $\sim 1 \text{ Ом}$ ) затрудняло измерение шумов, особенно в исходном состоянии и при малых дозах. Для согласования с измерителем НЧ шума использовали трансформатор, у которого в диапазоне частот 3–100 кГц входное сопротивление составляло  $\sim 0.3 \text{ Ом}$ , а выходное сопротивление было близко к 300 Ом. За пределами полосы пропускания трансформатора чувствительность измерений резко снижалась, поэтому при малых дозах шумы измеряли преимущественно в диапазоне частот 5–100 кГц.

С уменьшением тока дифференциальное сопротивление *pin*-диода растет, согласование с измерителем шума улучшается, и при токах  $I \leq 2 \text{ мА}$  использовали другую установку, на которой измеряли шумы на фиксированной частоте  $f = 1.24 \text{ Гц}$ .

## 3. Вольт-амперные характеристики 4H-SiC *pin*-диодов до и после воздействия потока электронов

Исходные ВАХ всех исследованных диодов были практически идентичны. Облучение было решено начать с дозы  $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , но из-за отсутствия видимых изменений в параметрах диодов разовая доза была увеличена до  $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ . В дальнейшем дозу последовательно увеличивали в среднем в 2 раза. До накопленной дозы  $\Phi = 4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  каких-либо убедительных изменений ВАХ не наблюдали. При дальнейшем увеличении дозы ВАХ диодов изменялись, но по-прежнему оставались близкими между собой.

На рис. 1 представлена типичная исходная ВАХ *pin*-диода (кривая 1) и она же после облучений возрастающими дозами вплоть до накопленной дозы  $\Phi = 8.4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  (кривая 6). Выделяются четыре характерных участка с разной реакцией на облучение: область обратных смещений, область прямых



**Рис. 1.** Вольт-амперные характеристики *pin*-диода после разных доз облучения,  $\text{см}^{-2}$ : 1 —  $(0-4) \cdot 10^{14}$ , 2 —  $2.4 \cdot 10^{15}$ , 3 —  $3.4 \cdot 10^{15}$ , 4 —  $5.4 \cdot 10^{15}$ , 5 —  $5.4 \cdot 10^{15}$  (после 4 месяцев), 6 —  $8.4 \cdot 10^{15}$ .

малых смещений  $U \leq U_0 \approx 2 \text{ В}$ , область экспоненциального изменения тока и область больших токов (при  $U > 3 \text{ В}$ ). С точки зрения работы *pin*-диодов в СВЧ-устройствах наибольший интерес представляют последние области.

В общем случае прямые ветви ВАХ *pin*-диодов хорошо описываются в рамках моделей токов двойной инжекции достаточно сложными и громоздкими выражениями [10]. Поэтому рассмотрим варианты более простого представления ВАХ. Например, в аналитической модели ВАХ ток 4H-SiC *pin*-диода при положительных напряжениях смещения описывается выражением [11]

$$I_D(U) = I_1(U) + I_2(U).$$

Здесь  $I_1(U) = I_B + I_{SC}$ , где  $I_B$  и  $I_{SC}$  — токи носителей заряда, рекомбинирующих соответственно в  $n_i$ -области и в области пространственного заряда  $p^+ - n_i$ -перехода при малых смещениях;  $I_2(U) = I_{np+} + I_{pc}$ , где  $I_{np+}$  и  $I_{pc}$  — токи носителей, эффективно рекомбинирующих в аноде и катоде *pin*-диода. Токи  $I_{np+}$  и  $I_{pc}$  с увеличением напряжения  $U$  растут экспоненциально быстро, но по-разному:  $I_{np+} \propto \exp(\Delta E_{gA}/kT)$ ,  $I_{pc} \propto \exp(\Delta E_{gC}/kT)$ , где  $kT$  — тепловая энергия,  $\Delta E_{gA}$  и  $\Delta E_{gC}$  — кажущиеся сужения ширины запрещенной зоны соответственно со стороны анода и катода. В результате зависимость  $I_2(U)$  складывается из двух экспонент, одна из которых (при повышенных смещениях) растет быстрее другой.

Для определения границы между токами  $I_1(U)$ , протекающими при малых напряжениях смещения, и токами  $I_2(U)$ , меняющимися экспоненциально быстро, обратимся к упрощенной феноменологической модели *pin*-диода, в которой  $n_i$ -слой находится между двумя переходами  $p^+ - n_i$  и  $n^+ - n_i$ . Полагая переходы одинаково резкими и несимметричными, воспользовавшись формулой из

работы [12]  $W = \sqrt{2\varepsilon_s V_{bi}/qN_B}$  (здесь  $\varepsilon_s$  — диэлектрическая постоянная,  $V_{bi}$  — контактная разность потенциалов,  $q$  — заряд электрона,  $N_B$  — концентрация примеси в  $n_i$ -слое), оценим суммарную ширину  $2W \approx 4.7$  мкм обедненной области заряда в равновесном состоянии; она меньше толщины  $n_i$ -слоя, равной 10 мкм. При малом смещении  $U$  пространственные заряды переходов отделены друг от друга, и через  $pin$ -диод течет ток  $I_1 = I_B + I_{SC}$  [11]. При напряжении  $U = U_0$  объемные заряды смыкаются, и с дальнейшим увеличением  $U$  экспоненциально быстро растет ток  $I_2 = I_{np+} + I_{pc}$ . При напряжениях  $U \geq U_0$  ток  $pin$ -диода можно описать формулой

$$I = I_0(U_0) \exp\left(\frac{q(U - U_0 - IR)}{\eta kT}\right), \quad (1)$$

где  $I_0(U_0)$  — значение тока, с которого начинается его экспоненциальный рост;  $R$  — последовательное сопротивление диода;  $\eta$  — коэффициент идеальности. Значение этого коэффициента зависит от напряжения  $U$ , т. е. от соотношения вкладов токов  $I_{np+}$  и  $I_{pc}$ . В феноменологической модели различие этих токов объясняется различием электрофизических параметров переходов.

Исходная ВАХ исследованных нами 4H-SiC  $pin$ -диодов (рис. 1, кривая 1) хорошо описывается выражением (1) начиная с  $U_0 = 2$  В,  $I_0(U_0) \approx 10^{-10}$  А. В области токов  $10^{-10} < I < 10^{-7}$  А коэффициент идеальности  $\eta_1 = 2$ , в области токов  $10^{-7} < I < 10^{-3}$  А его значение уменьшается до  $\eta_2 = 1.4$ . Эти результаты согласуются с экспериментальными данными работы [13] и соответствуют частному случаю в теории токов двойной инжекции [10]: если падение напряжения на  $n_i$ -базе диода не зависит от тока, а не инжекционные потери малы, то  $\eta_1 = 2$ ; уменьшение коэффициента идеальности до значения  $\eta_2 = 1.4$  при повышенных токах свидетельствует о снижении рекомбинационных потерь в области объемного заряда благодаря заполнению части глубоких центров инжектируемыми носителями.

Таким образом, о степени влияния электронного облучения на ВАХ 4H-SiC  $pin$ -диодов будем судить по поведению токов при малых напряжениях смещения  $U \leq U_0$ ; при смещениях  $U \geq U_0$  — по изменению значений параметров  $\eta$ ,  $R$ ,  $U_0$ ,  $I_0(U_0)$  формулы (1).

#### 4. Влияние облучения на ВАХ в области обратных и прямых $U < 2$ В смещений

Из рис. 1 видно, что до облучения ток в области отрицательных смещений (кривая 1) меняется пропорционально напряжению. Это указывает на преобладающий вклад токов поверхностной рекомбинации на периферии  $p^+-n_i$ -перехода [12]. В области прямых смещений при  $U < 2$  В преобладают туннельные токи [12]. С увеличением дозы значения этих токов, а соответственно и значения  $I_0(U_0)$ , меняются немонотонно. Возрастание на 2 порядка после дозы  $2.4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  (рис. 1, кривые 1

и 2) сменяется их снижением при последующем увеличении дозы до  $5.4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  (рис. 1, кривые 2 и 4). Через 4 месяца после дозы  $\Phi = 5.4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  токи при прямом смещении снизились до начальных значений, а при обратном смещении — меньше (рис. 1, кривые 4 и 5). После дозы  $\Phi = 8.4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  токи практически вернулись к исходным значениям (рис. 1, кривые 1 и 6).

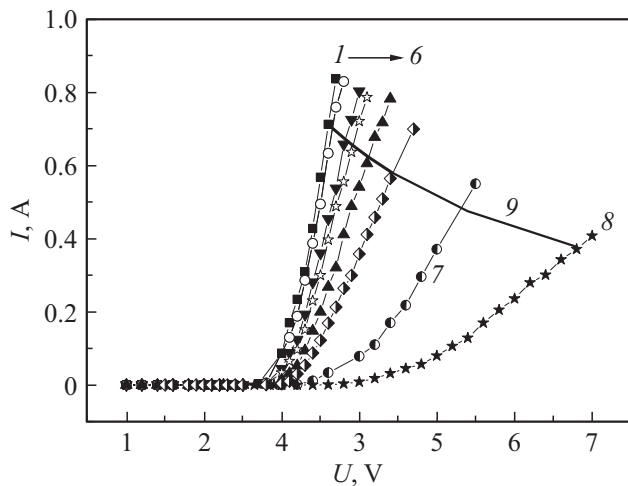
Подобные эффекты, названные эффектами радиационного упорядочения, неоднократно наблюдались в различных полупроводниковых материалах, в том числе в диодах Шоттки на основе соединений  $A^{III}B^V$  и  $A^{II}B^{VI}$  [14]. Объясняются эффекты тем, что воздействие сравнительно малых доз ионизирующего излучения сопровождается возбуждением в полупроводнике электронной подсистемы. Релаксация этого возбуждения, т. е. переход системы к более равновесному состоянию, происходит в результате рекомбинации носителей на метастабильных дефектах. Процесс сопровождается радиационно-стимулированной диффузией собственных дефектов, аннигиляцией дислокаций, геттерированием [14,15]. Эти явления развиваются в первую очередь вблизи поверхности, границ раздела, гетерограниц, дислокаций, в областях повышенных электрических и механических полей, в кластерах.

#### 5. Влияние облучения на экспоненциальный участок ВАХ и область больших токов

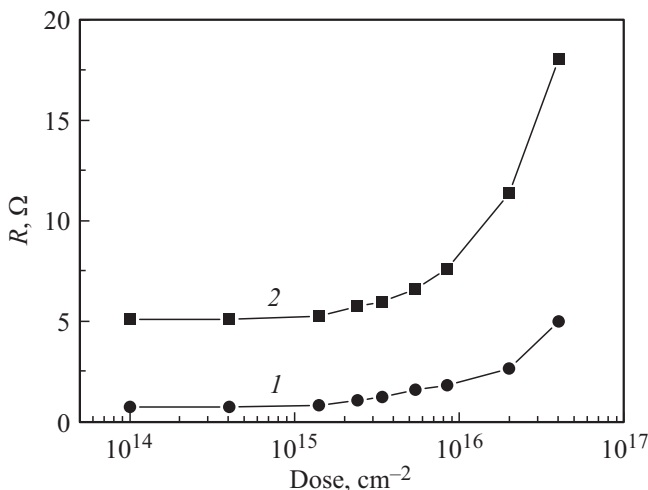
С увеличением дозы в диапазоне значений  $\Phi \leq 8.4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  (рис. 1) кривые тока веерообразно расходятся, словно вращаясь по часовой стрелке вокруг значения  $I_0 \approx 2 \cdot 10^{-8}$  А. При этом коэффициент идеальности  $\eta_1 = 2$  меняется слабо, а коэффициент  $\eta_2$  возрастает и при дозе  $\Phi = 8.4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  достигает значения 1.75. Это свидетельствует об увеличении вклада рекомбинационных процессов через глубокие уровни, созданные радиационными дефектами в области объемного заряда.

Влияние облучения на участок ветви ВАХ, расположенный в области токов  $I > 10^{-3}$  А, представлено на рис. 2 в линейном масштабе. При любой дозе наклон кривой тока зависит от дифференциального сопротивления  $\partial U/\partial I$ , которое монотонно уменьшается с увеличением  $U$  и асимптотически приближается к  $\partial U/\partial I = \text{const}$ , принимая значение, равное последовательному сопротивлению  $R$  из формулы (1). На наклон кривых влияет также температура диода. Токковые зависимости в области  $\partial U/\partial I = \text{const}$  пересекает жирная линия 9, вдоль которой рассеиваемая в  $pin$ -диоде мощность постоянна:  $P = UI = 2.56$  Вт. Так как квантовый выход у SiC не превышает процента [10], затраты энергии на излучательную рекомбинацию малы, и вдоль линии 9 температуру диода можно считать одинаковой.

При разных дозах в точках пересечения изотермы (жирной линии) с кривыми тока определили значения



**Рис. 2.** ВАХ *pin*-диода при больших токах в линейном масштабе,  $\text{см}^{-2}$ : 1 —  $(0-4) \cdot 10^{14}$ , 2 —  $1.4 \cdot 10^{15}$ , 3 —  $2.4 \cdot 10^{15}$ , 4 —  $3.4 \cdot 10^{15}$ , 5 —  $5.4 \cdot 10^{15}$  (после 4 месяцев), 6 —  $8.4 \cdot 10^{15}$ , 7 —  $2 \cdot 10^{16}$ , 8 —  $4 \cdot 10^{16}$ , 9 — изотерма.



**Рис. 3.** Зависимости дифференциального  $\partial U/\partial I$  (кривая 1) и полного  $U/I$  (кривая 2) сопротивлений *pin*-диода от дозы облучения в точках равной мощности  $P = 2.56$  Вт.

последовательного сопротивления  $\partial U/\partial I = \text{const}$  диода и его полного электрического сопротивления  $U/I$ . На рис. 3 значения этих сопротивлений приведены в зависимости от дозы, с увеличением которой они растут, что типично для полупроводниковых материалов [6,14]. После четырехмесячного перерыва какие-либо изменения в значениях этих сопротивлений замечены не были, из чего следует, что увеличение сопротивлений с ростом дозы связано с появлением преимущественно равновесных радиационных дефектов.

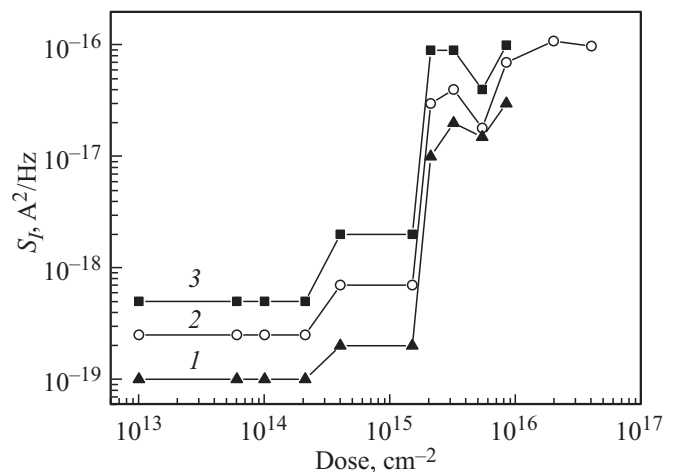
Вызываемые облучением отклонения дифференциального и полного сопротивлений *pin*-диодов от первоначальных значений влияют на качество работы СВЧ-устройств, в которых они используются. Предельно допустимой мерой такого отклонения можно счи-

тать увеличение этих сопротивлений в 2–3 раза. Из рис. 3 видно, что этот предел достигается при дозе  $\Phi \approx (0.8-1) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ . При дальнейшем увеличении дозы происходит ускоренная деградация ВАХ, что видно из рис. 2 и 3.

## 6. Низкочастотные шумы

У трех из шести обследованных диодов исходные НЧ шумы в области больших токов оказались практически одинаковые: на частоте  $f \approx 10 \text{ кГц}$  при токах  $I \geq 100 \text{ мА}$  измерялся равномерный шум, спектральная плотность которого с погрешностью  $\leq 1.5 \text{ дБ}$  совпадала с рассчитанной по формуле  $S_I = 2qI$ ; на частоте  $f = 11 \text{ кГц}$  при токе  $I \approx 600 \text{ мА}$  фиксировался  $1/f$  шум со спектральной плотностью  $S_I(f) \approx 5 \cdot 10^{-9} \text{ А}^2/\text{Гц}$ . У трех других диодов на этой частоте шум оказался больше в среднем на порядок.

Известно, что если в приборе имеется один источник НЧ шума (генерационно-рекомбинационный, либо вида  $1/f$ ), то при вариации тока спектральная плотность токовых шумов меняется по закону  $S_I(f) \propto I^\beta$ , где  $\beta = 2$  [8,16]. На рис. 4 приведены типичные для группы малошумящих *pin*-диодов зависимости  $S_I(f)$  от накопленной дозы, измеренные на частоте  $f = 11 \text{ кГц}$  при разных токах. Видно, что вплоть до  $\Phi = 2.1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  уровни шума оставались постоянными и при изменении тока коэффициент  $\beta$ , как нетрудно определить, имел значение, близкое к 1.4. После  $\Phi = 4.1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  шумы возросли в 2–3 раза, но особенно резкое возрастание (примерно на 2 порядка) произошло после накопленной дозы  $\Phi = 2.1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . Причем между дозами  $\Phi = 4.1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  и  $\Phi = 3.1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  при вариации тока шум менялся по закону  $S_I \propto I^2$ . Однако при последующих увеличениях дозы коэффициент  $\beta$  снова стал снижаться.



**Рис. 4.** Зависимости спектральной плотности токового шума *pin*-диода от дозы при разных токах, мА: 1 — 200, 2 — 380, 3 — 625. Измерения проведены на частоте  $f = 11 \text{ кГц}$ .



Видно также, что после дозы  $\Phi = 5.4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  через 4 месяца шумы снизились примерно вдвое, но после дозы  $\Phi = 8.4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  они вернулись практически к прежним значениям. У трех исходно малошумящих диодов с ростом дозы шумы, измеренные на частоте  $f = 11 \text{ кГц}$ , возрастали сходным образом и после всех облучений увеличились в 300–500 раз. У трех исходно более шумящих диодов с ростом дозы шумы то возрастали, то уменьшались, но после дозы  $\Phi = 5.4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  они стабилизировались с разбросом в 3–5 дБ на том же уровне, что и у малошумящих диодов. Об уровне стабилизации можно судить по шумам, измеренным при токе  $I \approx 380 \text{ мА}$  у четырех *pin*-диодов, облученных дозами  $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  и  $4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  (рис. 4). Из сказанного следует, что при использовании 4H-SiC *pin*-диодов в высококачественных СВЧ-устройствах, к которым предъявляются повышенные требования по НЧ шумам, желательно не превышать уровень накопленной электронной дозы  $\Phi \approx 10^{15} \text{ см}^{-2}$ .

На рис. 5 приведены спектры шумов тока исходно малошумящего *pin*-диода измеренные после получения дозы  $\Phi = 8.4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . Видно, что в диапазоне измеряемых частот спектры меняются по закону  $1/f^\gamma$ , и с увеличением тока коэффициент  $\gamma$  возрастает, достигая значения  $\gamma \approx 1.2$  при токе 625 мА. Перепады значений  $\gamma$  характерны для генерационно-рекомбинационных шумов при наложении лоренциановских спектров с заметно различающимися средними временами жизни носителей заряда. Заметим, что при меньших дозах наряду со спектрами вида  $1/f^\gamma$  нередко появлялись участки спектра, почти независимые от частоты. Из рис. 5 следует также, что при изменении тока шумы меняются по закону  $S_I \propto I^\beta$ , причем значение  $\beta$  уменьшается с ростом частоты: на частоте 0.7 кГц  $\beta \approx 1.6$ , а на частоте 70 кГц  $\beta \approx 1$ .

Значение  $\beta$  может меняться при наличии нескольких независимых источников не только генерационно-рекомбинационного шума, но и  $1/f$  шума. Например, в диодах Шоттки [17] при малых токах преобладают источники  $1/f$  шума, локализованные в области барьера, а при больших токах — в области базы. При увеличении тока вклад первых снижается, а вклад вторых — возрастает. В этой переходной области токов коэффициент  $\beta$  зависит от соотношения скорости снижения и скорости увеличения вкладов первого и второго источников, и в экспериментах [17] его значение может меняться в широких пределах  $\beta \leq 2$ . У *pin*-диода число независимых источников шума больше, чем у диода Шоттки, и природа их не столько фликкерная, сколько генерационно-рекомбинационная. Вклад различных источников в шумы тока перераспределяется при изменении тока, и в результате в законе пропорциональности  $S_I(f) \propto I^\beta$  коэффициент  $\beta$  оказывается зависящим не только от тока, но и от частоты.

На рис. 6 приведены типичные спектры шумов *pin*-диода, облученного дозой  $\Phi = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ . При сопоставимых токах эти спектры и по форме, и по уровню

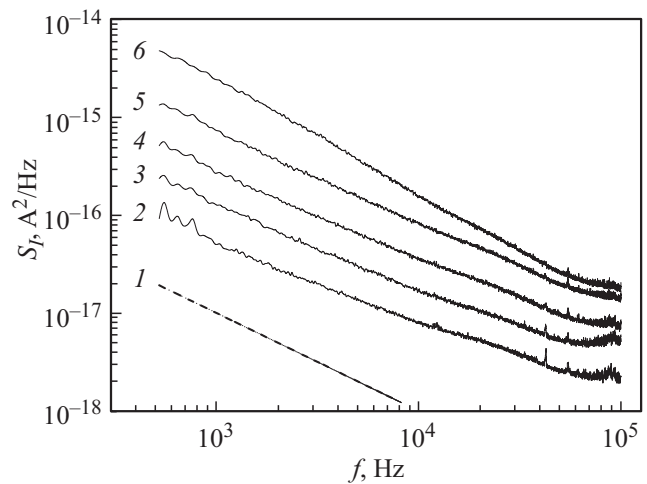


Рис. 5. Частотные зависимости спектральной плотности токового шума вида  $1/f$  (кривая 1) и токового шума *pin*-диода после дозы  $\Phi = 8.4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , при разных токах, мА: 2 — 50, 3 — 100, 4 — 200, 5 — 380, 6 — 625.

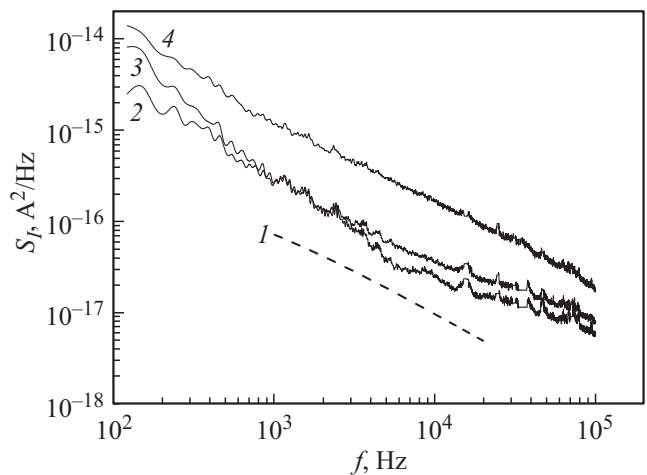


Рис. 6. Частотные зависимости спектральной плотности токового шума вида  $1/f$  (кривая 1) и токового шума *pin*-диода после дозы  $\Phi = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  при разных токах, мА: 2 — 40, 3 — 80, 4 — 370.

близки спектрам, приведенным на рис. 5. Обратим внимание на то, что на рис. 6 при токах 80 и 40 мА шумы примерно одинаковы, т.е.  $\beta \approx 0$ . Аналогичные случаи наблюдали неоднократно при разных дозах.

Шумы, измеренные после дозы  $\Phi = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ , в пределах 3–5 дБ остались такими же, как и при дозе  $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ . Таким образом, НЧ шумы в области больших токов насыщаются при дозах  $\Phi \approx (2-8) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  и в дальнейшем форма их спектров в диапазоне частот 0.7–70 кГц может меняться, но средний уровень лишь варьируется в пределах нескольких децибелов, превышая исходный уровень малошумящих диодов примерно в 300–500 раз.

НЧ шумы растут при увеличении концентрации точечных дефектов, возникающих в объеме полупроводника

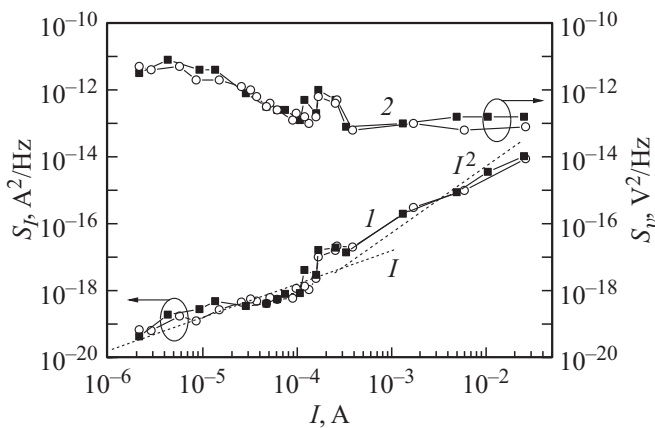


Рис. 7. Зависимости спектральной плотности токового шума (кривая 1) и флуктуаций напряжения (кривая 2) от тока двух необлученных диодов.  $f = 1.22$  Гц.

при воздействии ионизирующих излучений. Насыщение шума означает, что при достижении некоего порога рост концентрации дефектов прекращается, что возможно, если избыточные дефекты начинают сливаться друг с другом, образуя устойчивые структуры. Оборванные связи, являющиеся ловушками для носителей заряда, при слиянии дефектов ослабевают, и рост генерационно-рекомбинационных шумов прекращается. Поскольку шумы с течением времени практически не меняются, то структуры из слившихся дефектов можно считать близкими к равновесным.

Описанные выше НЧ шумы, измеренные в *pin*-диодах при больших токах, связаны с дефектами, находящимися преимущественно вблизи анода и катода, где происходит эффективная рекомбинация носителей заряда [11]. При уменьшении тока выходное сопротивление *pin*-диода возрастает, стремясь на экспоненциальном участке ВАХ к значениям  $\partial U / \partial I = \eta kT / qI$ , и начинают подключаться дефекты, локализованные в области  $p^+ - n_i$ - и  $n^+ - n_i$ -переходов. Измеренные в этой области на частоте 1.22 Гц зависимости спектральной плотности токовых шумов от тока двух необлученных *pin*-диодов приведены на рис. 7 внизу. Видно, что шумы подчиняются уже рассмотренному выше закону  $S_I \propto I^\beta$ , в котором показатель  $\beta$  не отличается постоянством. Например, у диода № 4 при токах  $I \leq 10^{-5}$  А значение  $\beta \approx 1$ ; в диапазоне токов  $(1.1 - 6.0) \cdot 10^{-5}$  А среднее значение показателя  $\beta \approx 0$ ; в диапазоне  $3 \cdot 10^{-4} \leq I \leq 2 \cdot 10^{-3}$  А коэффициент  $\beta \approx 2$ , а при дальнейшем увеличении тока имеет промежуточное значение  $\beta \approx 1.5$ .

Зависимости спектральной плотности флуктуаций напряжения на *pin*-диоде от тока представлены на рис. 7 вверх. Изображенная в области токов  $I \leq 10^{-4}$  А пунктирная зависимость  $S_V \propto 1/I$  свидетельствует об однородном распределении тока по площади диода [18]. В этой же области токовые шумы (рис. 7, кривая 1) пропорциональны току и могут быть связаны с шумом, вызванным туннельным транспортом носителей

заряда по локальным каналам [3]. При  $I \approx 2 \cdot 10^{-4}$  А появляется всплеск шума, возможно, вызванный началом излучательной межзонной рекомбинации, которая, по-видимому, приводит к заполнению или перезарядке центров безызлучательной рекомбинации. Этот процесс приводит к неоднородному распределению токов по площади диода. При токах более  $10^{-3}$  А наблюдается участие двух механизмов: генерационно-рекомбинационного и туннельного.

## 7. Заключение

Облучение 4H-SiC *pin*-диодов потоком электронов с энергией 0.9 МэВ в диапазоне доз  $1 \cdot 10^{13} - 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  при малых смещениях  $U \leq U_0 \approx 2 \text{ В}$  приводит к неравномерным изменениям поверхностной составляющей тока утечки и туннельных токов прямой ветви ВАХ, которые вызваны возбуждением электронной подсистемы полупроводниковой структуры. Релаксация этого возбуждения к равновесному состоянию происходит в результате рекомбинации носителей на метастабильных дефектах. Кроме того, наблюдается процесс самовосстановления токов к исходным значениям при комнатной температуре в течение нескольких месяцев.

Начиная с доз  $\Phi \geq 1.4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  быстро возрастают НЧ шумы в области больших токов и одновременно появляются стабильные радиационные дефекты, приводящие к стойкому увеличению последовательного сопротивления *R* *pin*-диодов и коэффициента идеальности  $\eta_2$ . Причем с последовательным увеличением дозы значения *R* и  $\eta_2$  неуклонно растут, но НЧ шумы при дозах  $\Phi \approx (2 - 8) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  насыщаются и в дальнейшем их спектральная плотность практически не меняется, превышая исходные уровни малошумящих *pin*-диодов в среднем в 300–500 раз.

Надежная работа малошумящих СВЧ-устройств на основе 4H-SiC *pin*-диодов при воздействии потока электронов с энергией 0.9 МэВ возможна до дозы  $\Phi \leq 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . В СВЧ-устройствах, в которых уровни НЧ шумов не важны, но нужна стабильность режимных параметров, доза может быть повышена до  $\Phi \approx 8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . При этом по сравнению с исходным состоянием коэффициент идеальности  $\eta_2$  возрастает в  $\sim 1.25$  раза, а последовательное сопротивление *R* примерно вдвое. При более высоких уровнях облучения вольт-амперные характеристики 4H-SiC *pin*-диодов быстро деградируют.

## Список литературы

- [1] W.J. Choyke. Inst. Phys. Conf. Ser., 31, 58 (1977).
- [2] K.K. Asano, Y. Sugawara, A. Tanaka, Y. Miyanagi, K. Nakayama, Sh. Ogata, Sh. Okada, T. Izumi, R. Ishii. Proc. 20th Int. Symp. on Power Semiconductor Devices & IC's (Orlando, FL, 2008) p. 256.
- [3] E.I. Shabunina, M.E. Levinshtein, N.M. Shmidt, P.A. Ivanov, J.W. Palmour. Sol. St. Electron., 96, 44 (2014).

- [4] P. Hazdra, S. Popelka. *Proc. 2016 Eur. Conf. on Silicon Carbide & Related Materials* (Halkidiki, Greece, 2016) v. 897, p. 463.
- [5] A.A. Lebedev, K.S. Davydovskaya, V.V. Kozlovski, O. Korolkov, N. Sleptsuk, J. Toompuu. *Proc. 2016 Eur. Conf. on Silicon Carbide & Related Materials* (Halkidiki, Greece, 2016) v. 897, p. 447.
- [6] V.V. Kozlovski, A.A. Lebedev, M.E. Levinshtein, S.L. Rumyantsev, J.W. Palmour. *Appl. Phys. Lett.*, **110**, 083503 (2017).
- [7] V.V. Kozlovski, A.A. Lebedev, M.E. Levinshtein, S.L. Rumyantsev, J.W. Palmour. *Appl. Phys. Lett.*, **110**, 133501 (2017).
- [8] А. ван дер Зил. *Шумы при измерениях* (М., Мир, 1979) с. 101.
- [9] А.В. Кириллов, С.А. Корнилов. *Электрон. техн., сер. Электроника СВЧ*, **3**, 62 (1975).
- [10] Э.И. Адирович, П.М. Карагеоргий-Алкалаев, А.Ю. Лейдерман. *Токи двойной инжекции в полупроводниках* (М., Сов. радио, 1978).
- [11] S. Bellone, F.G. Della Corte, L.F. Albanese, F. Pezzimenti. *IEEE Transactions Power Electron.*, **26** (10), 2835 (2011).
- [12] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М.: Мир, 1984) т. 1, с. 84.
- [13] N. Camara, E. Bano, K. Zekentes. *Mater. Sci. Forum*, **457–460**, 1017 (2004).
- [14] *Физические процессы в облученных полупроводниках*, под ред. Л.С. Смирнова (Новосибирск, Наука, 1977).
- [15] В.Г. Литовченко, Б.Н. Романюк. *ФТП*, **17** (1), 150 (1983).
- [16] Г.П. Жигальский. *Флуктуации и шумы в электронных твердотельных приборах* (М., Физматлит, 2012) с. 88.
- [17] В.М. Малышев, В.Г. Усаченко. *Изв. Вузов. Радиофизика*, **32**, (3), 632 (1989).
- [18] S. Bychikhin, D. Poganya, L.K.J. Vandamme, G. Meneghesso, E. Zanoni. *J. Appl. Phys.*, **97**, 123 (2005).

Редактор А.Н. Смирнов

## Impact of the electron irradiation with the energy of 0.9 MeV on current-voltage characteristics and low frequency noise in 4H-SiC *pin*-diodes

V.A. Dobrov<sup>1</sup>, V.V. Kozlovski<sup>2</sup>, A.V. Mescheryakov<sup>2</sup>, V.G. Usyachenko<sup>1,2</sup>, A.S. Chernova<sup>1,2</sup>, E.I. Shabunina<sup>3</sup>, N.M. Shmidt<sup>3</sup>

<sup>1</sup> JSC „Svetlana-Electronpribor“, 194156 St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 195251 St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup> Ioffe Institute, 194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** It has been found out experimentally that any noticeable changes in current-voltage characteristics and low-frequency noise in 4H-SiC *pin*-diodes irradiated by electrons with 0.9 MeV energy are seen at a dose  $\Phi \geq 1.4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ . Forward and reverse current-voltage characteristics change non-monotonically at voltages  $\leq 2 \text{ V}$  with an increasing dose due to the interaction between excited electronic subsystem and metastable defects. Furthermore, a steady increase in ideality factor and series resistance values at the region of exponential growth of the current-voltage characteristics at voltages  $\leq 2 \text{ V}$  is observed. Microwave devices based on low-noise 4H-SiC *pin*-diodes can show a stable performance at doses  $\Phi \leq 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ . The dose can be enhanced to  $\Phi \approx 8 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  in the microwave devices which doesn't need low level of noise but require stable regime parameters.