

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

© В.А. Добров¹, В.В. Козловский², А.В. Мещеряков², В.Г. Усыченко^{1,2},
А.С. Чернова^{1,2}, Е.И. Шабунина³, Н.М. Шмидт^{3,¶}

¹ АО „Светлана-Электронприбор“,
194156 Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251 Санкт-Петербург, Россия

³ 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 малошумящих 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 политипа 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} 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 шумы *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 аттенуатора.

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 SiO₂. 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

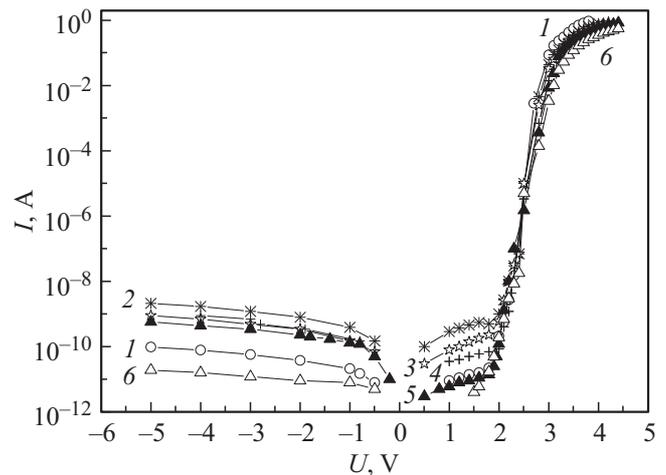


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики *pin*-диода после разных доз облучения, см^{-2} : 1 — $(0-4) \cdot 10^{14}$, 2 — $2.4 \cdot 10^{15}$, 3 — $3.4 \cdot 10^{15}$, 4 — $5.4 \cdot 10^{15}$, 5 — $5.4 \cdot 10^{15}$ (после 4 месяцев), 6 — $8.4 \cdot 10^{15}$.

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, ΔE_{gA} и ΔE_{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 ε_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; η — 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 η , 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 $2.4 \cdot 10^{15}$ см⁻² (рис. 1, кривые 1

и 2) сменяется их снижением при последующем увеличении дозы до $5.4 \cdot 10^{15}$ см⁻² (рис. 1, кривые 2 и 4). Через 4 месяца после дозы $\Phi = 5.4 \cdot 10^{15}$ см⁻² токи при прямом смещении снизились до начальных значений, а при обратном смещении — меньше (рис. 1, кривые 4 и 5). После дозы $\Phi = 8.4 \cdot 10^{15}$ 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 $\Phi \leq 8.4 \cdot 10^{15}$ 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 η_2 возрастает и при дозе $\Phi = 8.4 \cdot 10^{15}$ 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. Токосвязности 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

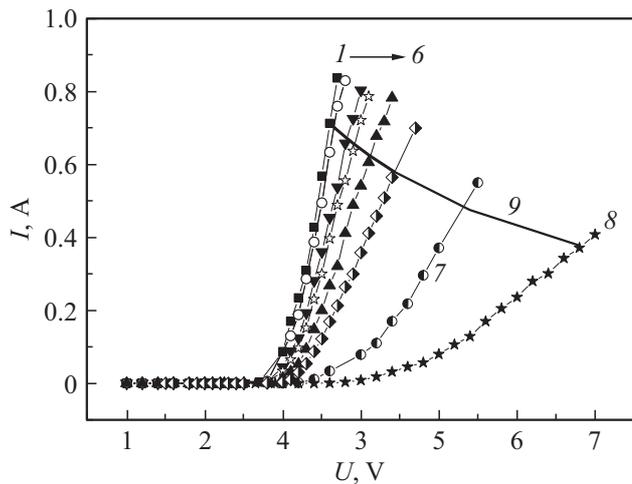


Рис. 2. ВАХ *pin*-диода при больших токах в линейном масштабе, см^{-2} : 1 — $(0-4) \cdot 10^{14}$, 2 — $1.4 \cdot 10^{15}$, 3 — $2.4 \cdot 10^{15}$, 4 — $3.4 \cdot 10^{15}$, 5 — $5.4 \cdot 10^{15}$ (после 4 месяцев), 6 — $8.4 \cdot 10^{15}$, 7 — $2 \cdot 10^{16}$, 8 — $4 \cdot 10^{16}$, 9 — изотерма.

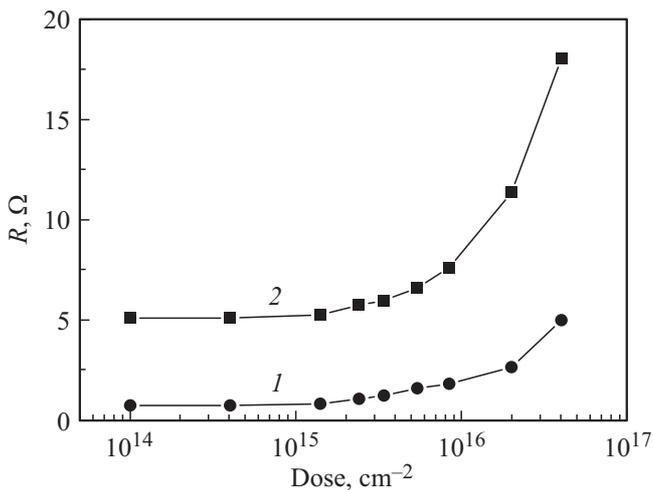


Рис. 3. Зависимости дифференциального $\partial U/\partial I$ (кривая 1) и полного U/I (кривая 2) сопротивлений *pin*-диода от дозы облучения в точках равной мощности $P = 2.56$ Вт.

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 $f \approx 10$ кГц при токах $I \geq 100$ мА измерялся равномерный шум, спектральная плотность которого с погрешностью ≤ 1.5 дБ совпадала с рассчитанной по формуле $S_I = 2qI$; на частоте $f = 11$ кГц при токе $I \approx 600$ 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 $f = 11$ 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 β , 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 β снова стал снижаться.

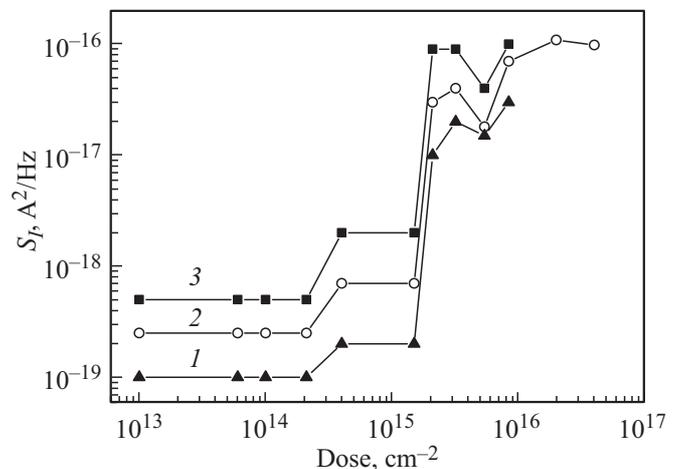


Рис. 4. Зависимости спектральной плотности токового шума *pin*-диода от дозы при разных токах, мА: 1 — 200, 2 — 380, 3 — 625. Измерения проведены на частоте $f = 11$ кГц.

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 γ возрастает, достигая значения $\gamma \approx 1.2$ при токе 625 мА. Перепады значений γ 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 β уменьшается с ростом частоты: на частоте 0.7 кГц $\beta \approx 1.6$, а на частоте 70 кГц $\beta \approx 1$.

Значение β 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 β 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 шум тока перераспределяется при изменении тока, и в результате в законе пропорциональности $S_I(f) \propto I^\beta$ коэффициент β 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

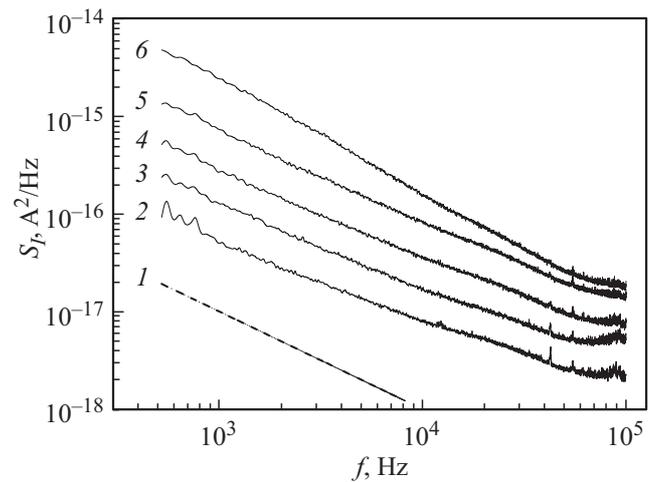


Рис. 5. Частотные зависимости спектральной плотности токового шума вида $1/f$ (кривая 1) и токового шума *pin*-диода после дозы $\Phi = 8.4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, при разных токах, мА: 2 — 50, 3 — 100, 4 — 200, 5 — 380, 6 — 625.

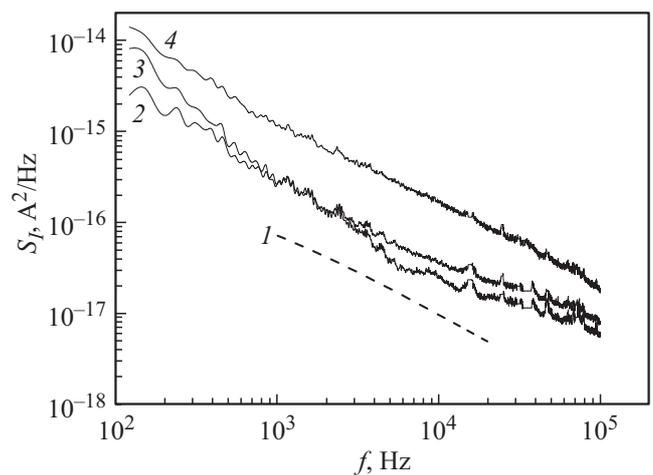


Рис. 6. Частотные зависимости спектральной плотности токового шума вида $1/f$ (кривая 1) и токового шума *pin*-диода после дозы $\Phi = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ при разных токах, мА: 2 — 40, 3 — 80, 4 — 370.

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

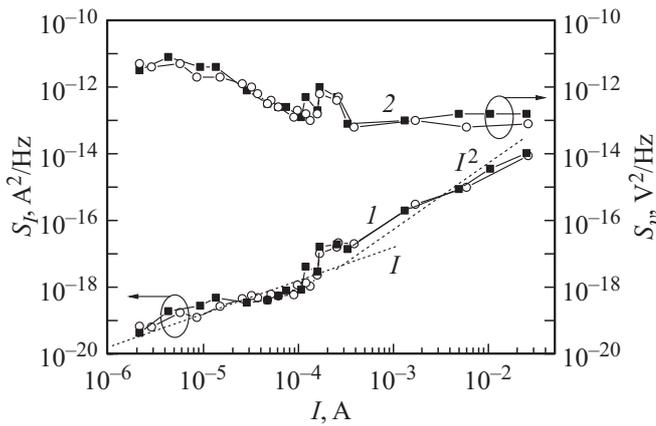


Рис. 7. Зависимости спектральной плотности токового шума (кривая 1) и флуктуаций напряжения (кривая 2) от тока двух необлученных диодов. $f = 1.22$ Гц.

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 β 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 вверху. 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 $1 \cdot 10^{13} - 4 \cdot 10^{16}$ см⁻² при малых смещениях $U \leq U_0 \approx 2$ 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 $\Phi \geq 1.4 \cdot 10^{15}$ 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 η_2 . Причем с последовательным увеличением дозы значения *R* и η_2 неуклонно растут, но НЧ шумы при дозах $\Phi \approx (2 - 8) \cdot 10^{15}$ 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 $\Phi \leq 10^{15}$ см⁻². В СВЧ-устройствах, в которых уровни НЧ шумов не важны, но нужна стабильность режимных параметров, доза может быть повышена до $\Phi \approx 8 \cdot 10^{15}$ см⁻². При этом по сравнению с исходным состоянием коэффициент идеальности η_2 возрастает в ~ 1.25 раза, а последовательное сопротивление *R* примерно втрое. 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. Korkolov, 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. Samara, 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. Усыченко. *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. Dobrov¹, V.V. Kozlovski², A.V. Mescheryakov², V.G. Usychenko^{1,2}, A.S. Chernova^{1,2}, E.I. Shabunina³, N.M. Shmidt³

¹ JSC „Svetlana-Electronpribor“, 194156 St. Petersburg, Russia

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 195251 St. Petersburg, Russia

³ 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.