

Вольт-амперные характеристики высоковольтных 4H-SiC $p^+ - n_0 - n^+$ -диодов в режиме лавинного пробоя

© П.А. Иванов, А.С. Потапов, Т.П. Самсонова, И.В. Грехов

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

E-mail: Pavel.Ivanov@mail.ioffe.ru

(Получена 9 августа 2016 г. Принята к печати 17 августа 2016 г.)

Изготовлены 4H-SiC $p^+ - n_0 - n^+$ -диоды с однородным лавинным пробоем при напряжении 1860 В. В лавинном режиме измерены импульсные вольт-амперные характеристики диодов до плотности тока 4000 А/см². Показано, что напряжение лавинного пробоя растет при повышении температуры. Определены лавинное сопротивление диодов ($8.6 \cdot 10^{-2}$ Ом·см²), скорость дрейфа электронов в n_0 -базе при полях выше 10^6 В/см ($7.8 \cdot 10^6$ см/с), относительный температурный коэффициент напряжения пробоя ($2.1 \cdot 10^{-4}$ К⁻¹).

DOI: 10.21883/FTP.2017.03.44214.8385

1. Введение

К настоящему времени на основе карбида кремния политипа 4H (4H-SiC) разработаны высоковольтные силовые приборы, устойчивые к деградации при лавинном пробое, — это высоковольтные интегрированные шоттки-($p-n$)-диоды [1,2] и МОП-транзисторы со встроенным антипараллельным $p-n$ -диодом [3]. Удельная лавинная энергия, которую эти приборы выдерживают без деструкции, достигает нескольких Дж/см². На основе 4H-SiC созданы также диоды с $p-n$ -переходом, работающие в квазинепрерывном лавинном режиме, — лавинные фотоприемники [4,5] и лавинно-пролетные диоды [6].

Физические исследования лавинного умножения и лавинного пробоя в 4H-SiC проводились ранее с использованием относительно низковольтных (до 300–400 В) диодных $p-n$ -структур. Были определены коэффициенты ионизации электронов и дырок и критическое поле лавинного пробоя [7], температурный коэффициент напряжения пробоя [8,9], дрейфовая скорость электронов в 4H-SiC при полях ~ 1 МВ/см [9].

В высоковольтных (свыше 1000 В) $p-n$ -структурах необходимо предпринимать специальные меры для предотвращения преждевременного краевого пробоя. В работе [10] нами с использованием мезаэпитаксиальных охранных $p-n$ -переходов были изготовлены 4H-SiC $p^+ - n_0 - n^+$ -диоды, имеющие напряжение лавинного пробоя 1060 В при легировании n_0 -базы $1.9 \cdot 10^{16}$ см⁻³. (Напряженность поля пробоя составляла $2.7 \cdot 10^6$ В/см). Диоды были протестированы в лавинном режиме (на постоянном токе). Без деструкции они выдерживали постоянный ток плотностью по меньшей мере 1 А/см². В настоящей работе с помощью описанной в [10] технологии изготовлены диоды с напряжением лавинного пробоя 1860 В. В лавинном режиме измерены импульсные ВАХ до плотности тока 4000 А/см². Обсуждаются полученные экспериментальные результаты.

2. Экспериментальные детали

4H-SiC $p^+ - n_0 - n^+$ -диоды изготавливались на основе коммерческого эпитаксиального материала. Согласно спецификации эпитаксиальной структуры, концентрация доноров в n_0 -слое составляет $(6-7) \cdot 10^{15}$ см⁻³; толщина n_0 -слоя 11–12 мкм. Концентрация акцепторов и доноров в p^+ - и n^+ -слоях были $\sim 10^{19}$ см⁻³ и $\sim 10^{18}$ см⁻³ соответственно. Толщины p^+ - и n^+ -слоев ~ 1 мкм. Постростовая технология изготовления диодов с „плавающими“ охранными кольцами детально описана нами ранее в работе [10]. Площадь $p^+ - n_0$ -перехода в изготовленных диодах была $S = 3.1 \cdot 10^{-4}$ см². Пластина с дискретными диодами разрезалась на отдельные чипы размером 1×1 мм. К анодному электроду диодных чипов приваривалась золотая проволока. Чипы напаивались на полоски из металлизированной керамики (AlN) для последующего поверхностного монтажа. Смонтированные чипы помещались внутрь виниловой трубки, полость которой заполнялась диэлектриком — силиконовым гелем.

Для уточнения уровня легирования блокирующего n_0 -слоя проводились измерения вольт-фарадных характеристик тестовых диодов большей площади ($1.5 \cdot 10^{-2}$ см²) на частоте 1 МГц с помощью цифрового измерителя иммитанса E7-20. Измеренная концентрация доноров в эпитаксиальном n_0 -слое составляет $N = 7.0 \cdot 10^{15}$ см⁻³. Уточненная толщина базового n_0 -слоя ($d = 10.9$ мкм) была определена по напряжению лавинного пробоя диодов (см. разд. 3.2). Омическое сопротивление блокирующей n_0 -базы диода (в разд. 3.1 оно сравнивается с дифференциальным сопротивлением диода в открытом состоянии) составляет

$$R_{epi} = \frac{1}{qn\mu} \frac{d}{S} = 3.9 \text{ Ом}, \quad (1)$$

где q — элементарный заряд; n, μ — концентрация и подвижность электронов соответственно (при концентрации электронов $n = N = 7 \cdot 10^{15}$ см⁻³ подвижность электронов $\mu = 800$ см²/В·с [11]). Квазистатические

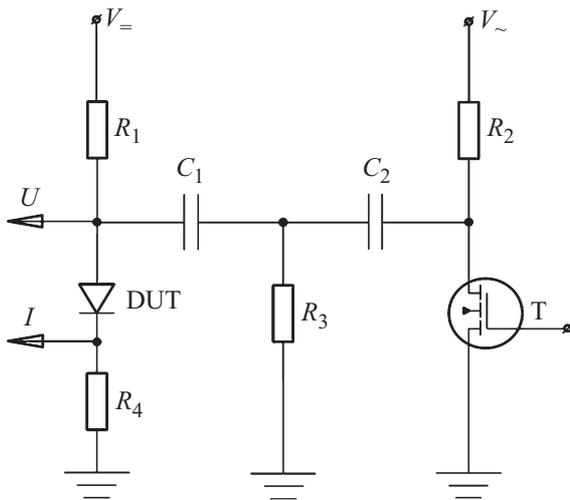


Рис. 1. Схема импульсных измерений ВАХ в режиме пробоя. $R_1 = 1 \text{ МОм}$, $R_2 = 12 \text{ кОм}$, $R_3 = R_4 = 50 \text{ Ом}$, $C_1 = 13.6 \text{ нФ}$, $C_2 = 2 \text{ мкФ}$.

ВАХ измерялись с помощью цифрового характериографа Л2-100. Импульсные ВАХ измерялись с помощью специальной двухконтурной схемы (рис. 1), которая позволяет прикладывать к диоду постоянное обратное смещение $V_$, несколько меньшее напряжения пробоя V_B (для уменьшения барьерной емкости $p^+ - n_0$ -перехода), и накладывать на постоянное смещение прямоугольные импульсы разной амплитуды $V_$ так, что $V_ + V_ > V_B$.

В показанной на рис. 1 схеме постоянное смещение обеспечивает заряженный от источника $V_$ (через ограничительный резистор R_1 и резистор R_3) конденсатор C_1 . Этот же конденсатор развязывает по постоянному току контуры постоянного и импульсного смещения. Импульсное смещение обеспечивает заряженный от источника $V_$ (через ограничительный резистор R_2 и резистор R_3) конденсатор C_2 большой емкости. Напряжение заряда конденсатора C_2 добавляется к постоянному смещению диода на то время, когда транзистор T открыт. Осциллограммы напряжения на диоде и тока через него записывались с помощью цифрового осциллографа Tektronix DPO 4104 с измерительными щупами. Измерения проводились после подачи одиночных открывающих импульсов управления на затвор транзистора T .

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

3.1. Квазистатические вольт-амперные характеристики

На рис. 2 показана типичная квазистатическая ВАХ диода, измеренная с помощью цифрового характериографа Л2-100.

В прямом направлении дифференциальное сопротивление диода при токе 100 мА составляет 2.2 Ом, что почти в 2 раза меньше рассчитанного омического сопротивления блокирующей n_0 -базы, равного 3.9 Ом. Из этого следует, что: 1) в прямом направлении n_0 -база эффективно модулируется инжектированными носителями и 2) суммарное сопротивление p^+ - и n^+ -слоев, подложки и контактов намного меньше по сравнению с омическим сопротивлением базы.

В обратном направлении резкий пробой диода наступает при напряжении $V_B = 1860 \text{ В}$. В случае диода с полубесконечной базой толщина области пространственного заряда (ОПЗ) при данном напряжении составила бы

$$W_B = \sqrt{\frac{2\epsilon V_B}{qN}} = 17 \text{ мкм}, \quad (2)$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость 4H-SiC. В нашем случае распространение ОПЗ ограничено меньшей по толщине блокирующей n_0 -базой (см. рис. 5). Ее толщина d может быть определена из следующего

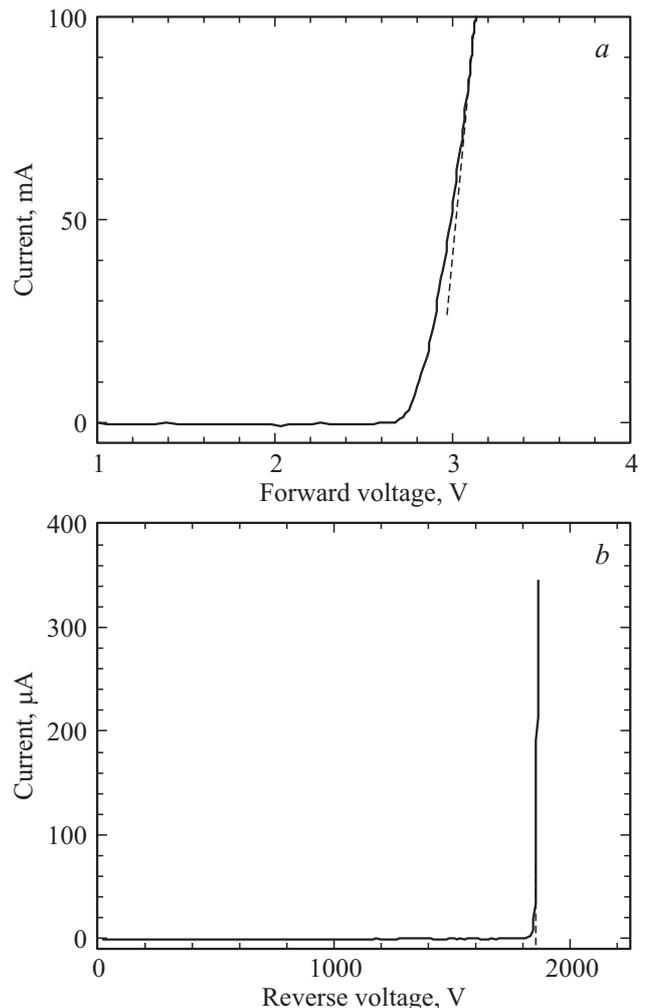


Рис. 2. Прямая (a) и обратная (b) ВАХ изготовленных диодов, измеренные с помощью характериографа Л2-100.

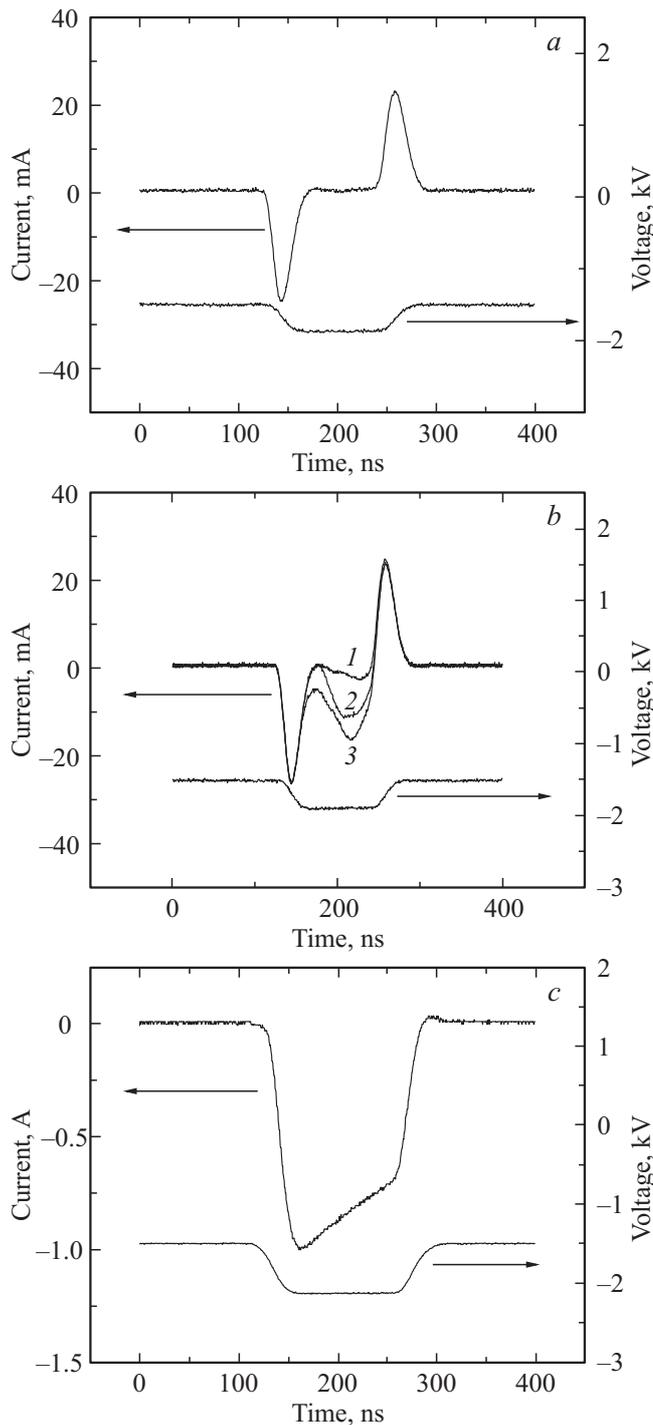


Рис. 3. Осциллограммы напряжения и тока при разных амплитудах импульсов V_{\sim} . Пояснения даны в тексте.

уравнения:

$$V_B = E_B d - \frac{qNd^2}{2\epsilon}, \tag{3}$$

где E_B — критическое поле лавинного пробоя 4H-SiC $p^+ - n_0$ -перехода. Величина E_B связана с концентрацией доноров N в блокирующей n_0 -области следующим эмпи-

рическим соотношением [7]:

$$E_B \text{ (В/см)} = \frac{2.49 \cdot 10^6}{1 - 0.25 \log\left(\frac{N \text{ (см}^{-3}\text{)}}{10^{16}}\right)} = 2.39 \cdot 10^6 \text{ В/см} \tag{4}$$

при $N = 7.0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Решение уравнения (3) дает величину $d = 10.9 \text{ мкм}$.

3.2. Импульсные вольт-амперные характеристики

Исходя из величины напряжения пробоя $V_B = 1860 \text{ В}$ для импульсных измерений были выбраны следующие величины питающих напряжений: $V_{=} = 1500 \text{ В}$, $V_{\sim} = 0 - 700 \text{ В}$. Длительность импульсов была выбрана $\sim 100 \text{ нс}$. На рис. 3 показаны осциллограммы напряжения и тока при разных амплитудах импульсов V_{\sim} .

Когда суммарное приложенное напряжение V не превышает напряжение пробоя V_B ($V < V_B$), на осциллограмме тока (рис. 3, *a*) присутствуют только емкостные всплески амплитудой около 20 мА . При увеличении напряжения выше порога статического пробоя ($V > V_B$) сначала возникает и далее увеличивается лавинный ток. При токах до $\sim 200 \text{ мА}$ пробой проявляет нестабильный во времени характер, обусловленный включением и выключением отдельных микроплазм (см., например, [12]). На рис. 3, *b* для примера показаны осциллограммы трех одиночных импульсов тока, записанные при одинаковых величинах $V_{=}$ и V_{\sim} . Нестабильность проявляется в том, что форма и амплитуда импульсов тока различаются. По мере того как пробой становится все более развитым и переходит к квазиоднородному, токовая нестабильность пропадает. При увеличении тока все большую роль играет эффект саморазогрева диода, который проявляется как паде-

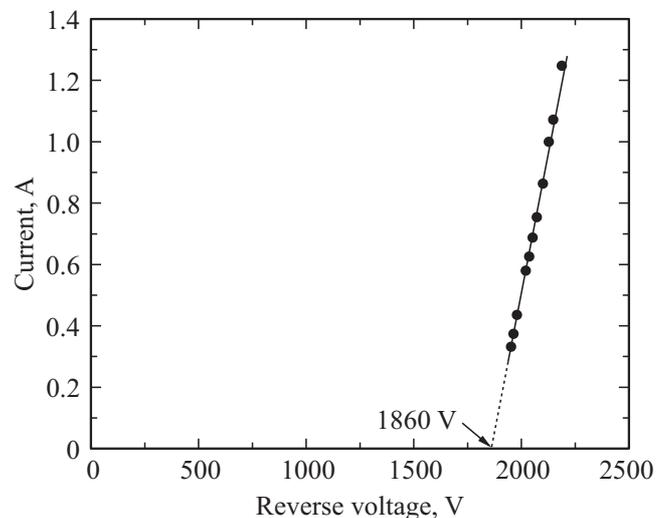


Рис. 4. Типичная импульсная ВАХ изготовленных диодов.

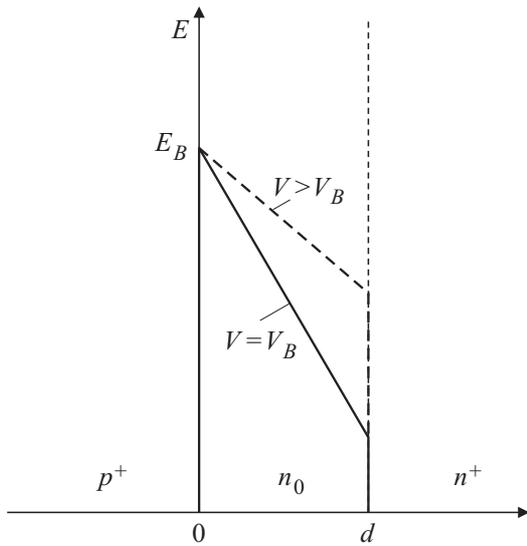


Рис. 5. Распределение электрического поля в $p^+ - n_0 - n^+$ -диоде в режиме лавинного пробоя.

ние тока во времени при неизменном напряжении. На рис. 3,с показана для примера осциллограмма тока, амплитуда которого составляет уже около 1 А. В конце импульса ток падает на 25%, и это является прямым свидетельством положительного температурного коэффициента напряжения (ТКН) пробоя, о чем сообщалось ранее другими исследователями для низковольтных диодов [8,9].

Для построения импульсной ВАХ, близкой к изотермической, измерялись максимальные величины тока, протекающего во время импульса. Типичная ВАХ, измеренная таким способом (в режиме развитого пробоя), показана на рис. 4.

Как видно, лавинный ток линейно растет с ростом приложенного напряжения. Максимальная измеренная амплитуда тока составляет 1.25 А (плотность тока 4030 А/см^2 , напряжение 2200 В, пиковая рассеиваемая мощность равна 8.9 МВт/см^2). Экстраполяция линейной зависимости к $I = 0$ дает напряжение 1860 В, совпадающее с напряжением пробоя V_B . Важнейшей характеристикой диода, работающего в лавинном режиме, является его лавинное сопротивление R_B (дифференциальное сопротивление на лавинном участке ВАХ). В нашем случае это сопротивление довольно велико (в сто с лишним раз больше дифференциального сопротивления диода в прямом направлении): $R_B = 278 \text{ Ом}$.

Лавинное сопротивление определяется формой распределения электрического поля в ОПЗ, а также скоростью дрейфа носителей тока в ОПЗ [13]. На рис. 5 показано распределение электрического поля в $p^+ - n_0 - n^+$ -диоде с „проколотой“ n_0 -базой ($d < W_B$) для двух случаев: 1) $V = V_B$ и 2) $V > V_B$. (Лавинное умножение происходит в очень тонком слое, непосредственно примыкающем к $p^+ - n_0$ -переходу [13]).

В первом случае градиент поля в ОПЗ задается концентрацией доноров N , так что

$$V_B = E_B d - \frac{qNd^2}{2\epsilon}. \tag{5}$$

Во втором случае помимо положительного объемного заряда ионизованных доноров необходимо учитывать отрицательный объемный заряд свободных электронов, движущихся со скоростью v через ОПЗ. Ток I и концентрация электронов n связаны соотношением

$$I = qnvS. \tag{6}$$

В присутствии свободных электронов градиент поля в ОПЗ уменьшается, так что

$$V = E_B d - \frac{q(N - n)d^2}{2\epsilon}. \tag{7}$$

Из формул (5)–(6) получаем следующее выражение для лавинного сопротивления диода:

$$R_B = \frac{V - V_B}{I} = \frac{d^2}{2\epsilon v S}. \tag{8}$$

Ранее выражение для лавинного сопротивления было получено для случая диода с полубесконечной базой (см., например, [14]). От формулы (8) оно отличается тем, что в нем вместо толщины d проколотой n_0 -базы фигурирует толщина ОПЗ при пробое W_B (см. формулу (2)). Рассчитанная из формулы (8) скорость дрейфа электронов составляет $v = 7.8 \cdot 10^6 \text{ см/с}$ (отметим, что в режиме пробоя среднее поле в ОПЗ $E_{av} > 10^6 \text{ В/см}$).

Если пренебречь температурной зависимостью дрейфовой скорости электронов v , то по осциллограмме тока (рис. 3,с) и измеренной импульсной ВАХ (рис. 4) можно оценить температурный коэффициент напряжения (ТКН) пробоя диодов (см. рис. 6). В нашем случае

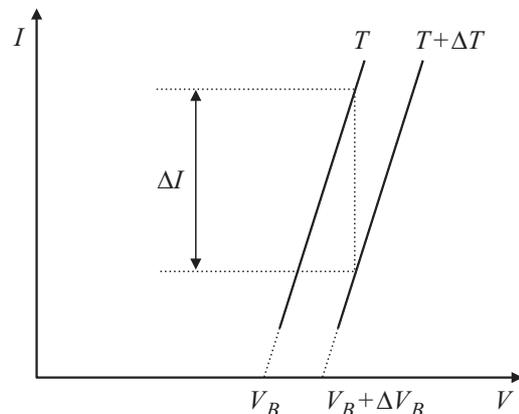


Рис. 6. Качественный вид ВАХ при разных температурах в пренебрежении температурной зависимостью скорости электронов v (ТКН положительный).

$\Delta I = 0.25$ А (рис. 6), а $\Delta V_B = 66$ В (рис. 6). Энергия, рассеиваемая в диоде за время прохождения импульса лавинного тока $I_{av} = 0.88$ А длительностью $\Delta t = 100$ нс, составляет

$$E = I_{av} V_B \Delta t = 0.16 \text{ мДж.} \quad (9)$$

Характерная длина тепловой диффузии L_T , на которую тепло распространяется за время Δt , оценивается следующим образом:

$$L_T = \sqrt{\frac{K}{\rho C}} \Delta t = 2.9 \text{ мкм,} \quad (10)$$

где K , C и ρ — теплопроводность, теплоемкость и удельный вес 4H-SiC соответственно. Величина перегрева ΔT рассчитывается следующим образом:

$$\Delta T = \frac{E}{C\rho(d + L_T)S} = 166 \text{ К.} \quad (11)$$

Таким образом, относительный температурный коэффициент напряжения пробоя составляет

$$\alpha = \frac{\Delta V_B}{V_B \Delta T} = 2.1 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}. \quad (12)$$

4. Заключение

Проведено исследование квазиоднородного лавинного пробоя в высоковольтных (около 1900 В) $p^+ - n_0 - n^+$ -диодах малой площади. Лавинное сопротивление исследованных диодов довольно велико (около $9 \cdot 10^{-2}$ Ом·см²) по сравнению с суммарным сопротивлением p^+ и n^+ -слоев, подложки, контактов. Это дает большую гарантию правильного определения дрейфовой скорости электронов в ОПЗ ($7.8 \cdot 10^6$ см/с) и температурного коэффициента напряжения пробоя ($2.1 \cdot 10^{-4}$ К⁻¹).

Ранее нами были проведены измерения и анализ прямых вольт-амперных характеристик мезаэпитаксиальных 4H-SiC диодов Шоттки при высоких полях в базовой n -области (до 4×10^5 В/см) [15]. Была получена полуэмпирическая формула для полевой зависимости дрейфовой скорости электронов в 4H-SiC вдоль гексагональной оси c кристалла. Было показано, что при полях $\sim 2 \cdot 10^5$ В/см насыщенная скорость дрейфа составляет $(1.55 \pm 0.05) \cdot 10^7$ см/с, что почти в 2 раза выше по сравнению с определенной в данной работе скоростью дрейфа при полях более 10^6 В/см. Сопоставляя эти данные, естественно предположить, что полевая зависимость дрейфовой скорости в 4H-SiC имеет выраженный максимум при полях $\sim 2 \cdot 10^5$ В/см. Это является экспериментальным подтверждением проведенного ранее моделирования транспорта горячих носителей в 4H-SiC методом Монте-Карло [16].

Работа выполнена при поддержке ОЭММПУ РАН (программа „Силовая полупроводниковая электроника на основе кремния, карбида кремния, нитридов галлия и алюминия“).

Список литературы

- [1] T. Basler, R. Rupp, R. Gerlach, B. Zippelius, M. Draghici. Int. Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM Europe 2016, Nürnberg, Germany, 10–12 May 2016), 1 (2016).
- [2] A. Konstantinov, S. Jinman, S. Young, B. Lee, F. Allerstam, T. Neyer, S. Akram. Mater. Sci. Forum, **858**, 777 (2016).
- [3] A. Fayyaz, L. Yang, M. Riccio, A. Castellazzi, A. Irace. Microelectron. Reliab., **54**, 2185 (2014).
- [4] R.A. Berechman, M. Skowronski, S. Soloviev, P. Sandvik. J. Appl. Phys., **107**, 114504 (2010).
- [5] F. Yan, J.H. Zhao, G.H. Olsen. SSE, **44** (2), 341 (2000).
- [6] K.V. Vassilevski, A.V. Zorenko, K. Zekentes. Electron. Lett., **37** (7), 466 (2001).
- [7] A.O. Konstantinov, Q. Wahab, N. Nordell, U. Lindefelt. Appl. Phys. Lett., **71** (1), 90 (1997).
- [8] A.O. Konstantinov, N. Nordell, Q. Wahab, U. Lindefelt. Appl. Phys. Lett., **73** (13), 1850 (1998).
- [9] K.V. Vassilevski, K. Zekentes, A.V. Zorenko, L.P. Romanov. IEEE Electron Dev. Lett., **21** (10), 485 (2000).
- [10] П.А. Иванов, И.В. Грехов, Н.Д. Ильинская, Т.П. Самсонова. ФТП, **39** (12), 1475 (2005).
- [11] T. Kimoto, J.A. Cooper. *Fundamentals of silicon carbide technology: growth, characterization, devices, and applications* (Wiley-IEEE Press; 1 ed-n, 2014).
- [12] *Breakdown Phenomena in Semiconductors and Semiconductor Devices. Selected Topics in Electronics and Systems*, ed. by M. Levinshtein, J. Kostamovaara, S. Vainshtein, v. 36, p. 224 (2005).
- [13] А.С. Тагер, В.М. Вальд-Перлов. Лавинно-пролетные диоды и их применение в технике СВЧ. М., Сов. радио, 1968.
- [14] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1984) т. 2.
- [15] П.А. Иванов, А.С. Потапов, Т.П. Самсонова, И.В. Грехов. ФТП, **50** (7), 900 (2016).
- [16] M. Hjelm, H.-E. Nilsson, A. Martinez, K.F. Brennan, E. Bellotti. Appl. Phys., **93**, 1099 (2003).

Редактор А.Н. Смирнов

Current-voltage characteristics of high voltage 4H-SiC $p^+ - n_0 - n^+$ -diodes in avalanche breakdown mode

P.A. Ivanov, A.S. Potapov, T.P. Samsonova, I.V. Grekhov
Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract 4H-SiC $p^+ - n_0 - n^+$ -diodes with homogeneous avalanche breakdown at 1860 V were fabricated. Pulsed current-voltage characteristics were measured in the avalanche breakdown mode up to the current density of 4000 A/cm². It was shown that the avalanche breakdown voltage increases with growing temperature. The following diode parameters were determined: avalanche resistance ($8.6 \cdot 10^{-2}$ Ohm·cm²), electron drift velocity in the n_0 -base at electric fields higher than 10^6 V/cm ($7.8 \cdot 10^6$ cm/s), relative temperature coefficient of the breakdown voltage ($2.1 \cdot 10^{-4}$ К⁻¹).