

Полевая зависимость дрейфовой скорости электронов в 4H-SiC вдоль оси c

© 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 11 января 2016 г. Принята к печати 18 января 2016 г.)

Проведены измерения и анализ прямых вольт-амперных характеристик меза-эпитаксиальных 4H-SiC диодов Шоттки при высоких полях в базовой n -области (до $4 \cdot 10^5$ В/см). Получена полуэмпирическая формула для полевой зависимости дрейфовой скорости электронов в 4H-SiC вдоль оси c . Насыщенная скорость дрейфа составляет $(1.55 \pm 0.05) \cdot 10^7$ см/с при полях свыше $2 \cdot 10^5$ В/см.

1. Введение

Полевая зависимость скорости дрейфа носителей тока является важнейшей характеристикой полупроводниковых материалов. Как известно, в сильных электрических полях в полупроводниках проявляется эффект насыщения дрейфовой скорости: зависимость скорости (v) от напряженности электрического поля (E) поначалу отклоняется от линейной (становится сублинейной), а потом скорость вообще перестает зависеть от поля, достигая насыщения.

Для SiC разных политипов в ряде работ транспорт горячих электронов был промоделирован методом Монте-Карло (см., например, [1–3]). В работе [2] моделирование транспорта электронов в 4H-SiC проведено как для направления вдоль гексагональной оси c , так и поперек оси c . Насыщенная скорость дрейфа электронов оценена величинами $1.58 \cdot 10^7$ см/с (вдоль оси c) и $2.12 \cdot 10^7$ см/с (поперек оси c).

Экспериментальным исследованиям эффекта насыщения дрейфовой скорости в 4H-SiC посвящены единичные работы [4–6]. По результатам измерений и анализа вольт-амперных характеристик (ВАХ) планарных резистивных элементов максимальная скорость дрейфа электронов поперек оси c оценена величинами $2.2 \cdot 10^7$ см/с [5] и $1.4 \cdot 10^7$ см/с [6]. Полученные экспериментальные результаты близки к теоретическим. Дрейфу электронов в 4H-SiC вдоль оси c было уделено меньше внимания. В работе [7], посвященной исследованиям обратных ВАХ 4H-SiC $p^+ - n - n^+$ -диодов в режиме лавинного пробоя, насыщенная скорость электронов вдоль оси c оценена величиной $8 \cdot 10^6$ см/с, что по меньшей мере в 2.5 раза меньше по сравнению со скоростью дрейфа поперек оси c . В работах [8,9], посвященных исследованиям ВАХ 4H-SiC $n^+ - p - n^+$ -структур в режиме монополярной инжекции электронов в p -базу, насыщенная скорость электронов вдоль оси c оценена еще меньшей величиной — всего $3.3 \cdot 10^6$ см/с. Таким образом, имеющиеся в литературе экспериментальные данные, полученные разными авторами, существенно отличаются не только между собой, но и от результатов теоретического моделирования, поэтому для уточнения

параметров дрейфа необходимы дальнейшие экспериментальные исследования.

В настоящей работе с целью определения полевой зависимости дрейфовой скорости электронов в 4H-SiC вдоль оси c проведены измерения и анализ прямых ВАХ меза-эпитаксиальных диодов Шоттки со слабо легированной базовой n -областью.

2. Изготовление образцов

Диоды Шоттки (рис. 1) изготавливались на основе коммерческого эпитаксиального 4H-SiC материала: концентрация доноров в базовом n -слое $N = 1 \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$, толщина n -слоя $d = 34$ мкм, удельное сопротивление n^+ -подложки 0.02 Ом · см. Диоды изготавливались в следующей последовательности. Вначале на поверхности базового эпитаксиального n -слоя был сформирован контакт Шоттки диаметром 290 мкм из напыленного и термически обработанного титана. Поверх титана был нанесен слой никеля. Для того чтобы исключить растекание тока из верхнего электрода в эпитаксиальный слой (в латеральном направлении), диоды были выполнены в виде мезаструктур, сформированных сухим селективным травлением эпитаксиального слоя на всю его толщину. На обратной стороне структуры был сформирован омический контакт из напыленного и термически

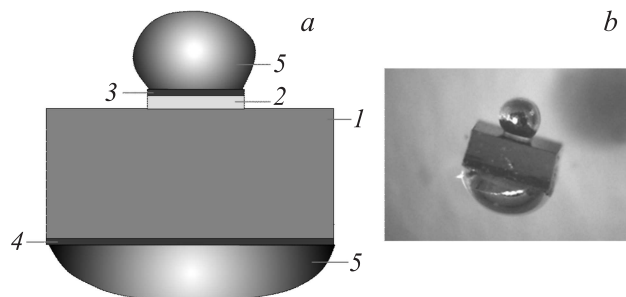


Рис. 1. Экспериментальные образцы 4H-SiC диодов Шоттки: a — схематическое сечение (1 — n^+ -подложка, 2 — эпитаксиальная n -база, 3 — контакт Шоттки, 4 — омический контакт, 5 — припой); b — фотография отдельного чипа.

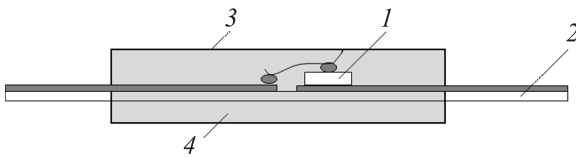


Рис. 2. Схема монтажа диодного чипа: 1 — чип, 2 — полоска из металлизированного текстолита, 3 — виниловая трубка, 4 — силиконовый гель.

вожженного никеля. Пластина с дискретными диодами разрезалась на отдельные чипы размером 1×1 мм. Верхний и нижний никелевые электроды облуживались свинцово-оловянным припоем. К верхнему электроду припаивалась посеребренная медная проволока. Чипы напаивались на полоску из металлизированного текстолита с полосковыми выводами (рис. 2). Полоска размещалась внутри отрезка виниловой трубки, полость которой заполнялась силиконовым гелем.

3. ВАХ при малых напряжениях и токах

На рис. 3 точками показана типичная прямая ВАХ диодов, измеренная на постоянном токе в диапазоне от 100 нА до 10 мА. В пределах изменения по току 0.1–200 мкА ВАХ представляет собой экспоненциальную зависимость тока I от напряжения V . При дальнейшем увеличении тока дифференциальное сопротивление диода сравнивается с последовательным сопротивлением диода (R_s) и ВАХ отклоняется от экспоненциальной зависимости.

На рис. 3 сплошной линией показана ВАХ, полученная аппроксимацией экспериментальных данных по модели термоэлектронной эмиссии из полупроводника в

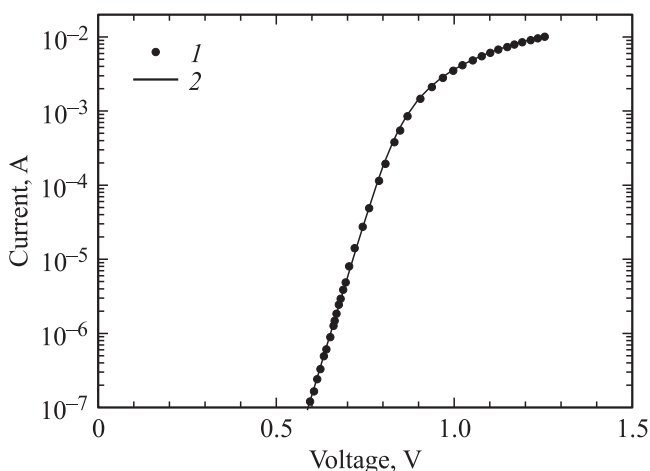


Рис. 3. ВАХ диода: 1 — экспериментальные данные, 2 — ВАХ, полученная аппроксимацией экспериментальных данных по модели термоэлектронной эмиссии с учетом влияния последовательного сопротивления диода.

металл с учетом влияния последовательного сопротивления диода:

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV_b}{mkT}\right), \quad (1)$$

$$V = V_b + IR_s, \quad (2)$$

где q — элементарный заряд, V_b — падение напряжения на обедненном слое контакта Шоттки, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, m — фактор идеальности. Полученные в результате аппроксимации значения подгоночных параметров следующие: $I_0 = 4 \cdot 10^{-17}$ А, фактор идеальности $m = 1.09$, последовательное сопротивление $R_s = 34$ Ом.

Последовательное сопротивление R_s включает в себя сопротивление эпитаксиальной n -базы, сопротивление подложки и сопротивление омического контакта к подложке. Оценим, какой вклад в последовательное сопротивление R_s вносит омическое сопротивление эпитаксиальной n -базы (это сопротивление определяется подвижностью μ и концентрацией электронов $n = N = 1 \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$, а также площадью мезаструктуры $S = 6.6 \cdot 10^{-4}$ см 2 и толщиной базы $d = 34$ мкм):

$$E_{\text{epi}} = \frac{1}{qn\mu} \frac{d}{S}. \quad (3)$$

Зависимость подвижности электронов в 4H-SiC от концентрации доноров описывается эмпирической формулой:

$$\mu = \frac{\mu_{\text{max}}}{1 + \left(\frac{N}{N_{\text{ref}}}\right)^{\delta}}. \quad (4)$$

Здесь $\mu_{\text{max}} = 1071$ см 2 /В·с, $N_{\text{ref}} = 1.94 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$, $\delta = 0.4$ [10]. При концентрации доноров $N = 1 \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$ подвижность электронов $\mu = 955$ см 2 /В·с. При этом расчетное омическое сопротивление эпитаксиального n -слоя составляет 33.7 Ом. Как видно, измеренное последовательное сопротивление определяется сопротивлением эпитаксиального n -слоя: $R_{\text{epi}} \approx R_s = 34$ Ом.

4. Импульсные ВАХ при больших напряжениях и токах

Во избежание саморазогрева диодов измерения ВАХ при больших напряжениях и токах проводились на коротких одиночных импульсах. В качестве источника напряжения был использован высоковольтный импульсный генератор, в котором выходные импульсы формируются кремниевыми диодами с резким восстановлением (ДДРВ). На нагрузке 50 Ом генератор выдает импульсы амплитудой до 5 кВ и длительностью 4 нс (время нарастания и спада около 2 нс). Схема импульсных измерений ВАХ показана на рис. 4. Амплитуда напряжения, подаваемого на диод от генератора I , регулируется аттенуатором 2 с изменяемым коэффициентом ослабления. Осциллограммы тока через диод и падения напряжения на нем измеряются с помощью цифрового осциллографа

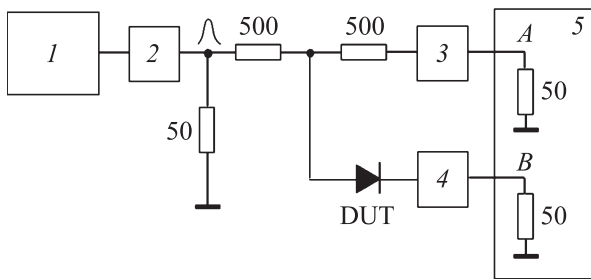


Рис. 4. Схема импульсных измерений ВАХ: 1 — импульсный генератор, 2 — аттенуатор с регулируемым коэффициентом ослабления, DUT — исследуемый диод, 3 и 4 — аттенуаторы с фиксированным коэффициентом ослабления (40 дБ), 5 — цифровой осциллограф DPO 4104.

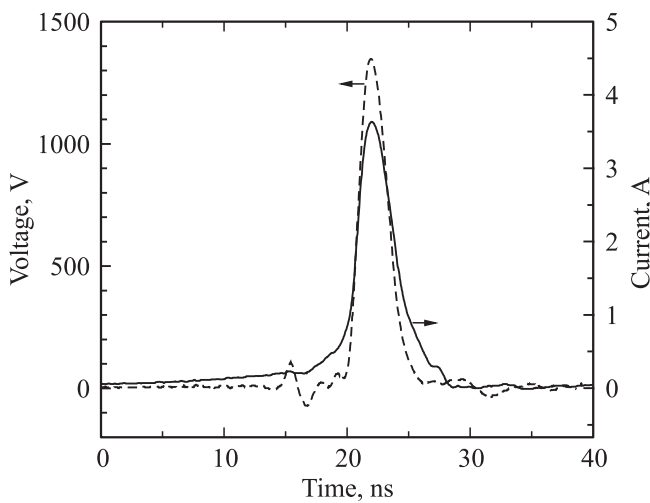


Рис. 5. Осциллограммы тока и напряжения, снятые при подаче на вход измерительной схемы одиночного импульса напряжения максимальной амплитуды.

DPO 4104. В соответствии с показанной схемой напряжение и ток вычисляются следующим образом:

$$U(V) = ((100 \cdot U_A(V))/50) \cdot 550 - 100 \cdot U_B(V), \quad (5)$$

$$I(A) = (100 \cdot U_B(V))/50, \quad (6)$$

где U_A и U_B — сигналы, измеряемые на 50-омных входах A и B осциллографа соответственно. ВАХ строилась по измеренным величинам амплитуд импульсов напряжения и тока. Для контроля точности измерений с помощью данной схемы предварительно проводились измерения ВАХ безындуктивного резистора с заведомо известным сопротивлением. Погрешность измерений составляет не более 10%.

На рис. 5 показаны осциллограммы тока и напряжения, снятые при подаче на вход схемы одиночного импульса напряжения максимальной амплитуды. Важно отметить, что при амплитудах напряжения 1300 В и тока 3.6 А пиковая мощность составляет $P = 4.7$ кВт. Оценим верхний предел повышения температуры n -базы,

считая, что в ней выделяется вся электрическая мощность, а теплоотдачи из n -базы нет:

$$\Delta T \leq \frac{P \Delta t}{C d S \rho}, \quad (7)$$

где Δt — длительность импульса, $C = 0.69$ Дж/г К и $\rho = 3.21$ г/см³ — теплоемкость и плотность 4H-SiC [11] соответственно. При $\Delta t = 4$ нс и $P = 4.7$ кВт перегрев $\Delta T \leq 3.8$ К. Таким образом, даже при максимальных амплитудах напряжения и тока саморазогревом можно пренебречь, а измеренную на 4-нс импульсах ВАХ (рис. 6) считать изотермической. Из рис. 6 видно, что зависимость тока от напряжения сугубо нелинейная, но тем не менее полного насыщения тока нет. Отсутствие насыщения тока объясняется тем, что при больших напряжениях становится существенной монополярная инжекция электронов в n -слой из сильно легированной n^+ -подложки (рис. 7). Даже тогда, когда скорость дрейфа электронов уже насыщена, ток растет при увеличении напряжения за счет роста концентрации свободных электронов:

$$I = q(n + \Delta n)v_s S, \quad (8)$$

где Δn — концентрация инжектированных электронов. Концентрация инжектированных электронов пропорциональна приложенному напряжению [12]:

$$\Delta n = \frac{k \varepsilon V}{q d^2}, \quad (9)$$

где $\varepsilon = 8.85 \cdot 10^{-13}$ Ф/см — диэлектрическая проницаемость 4H-SiC [11]. Коэффициент k , принимающий зна-

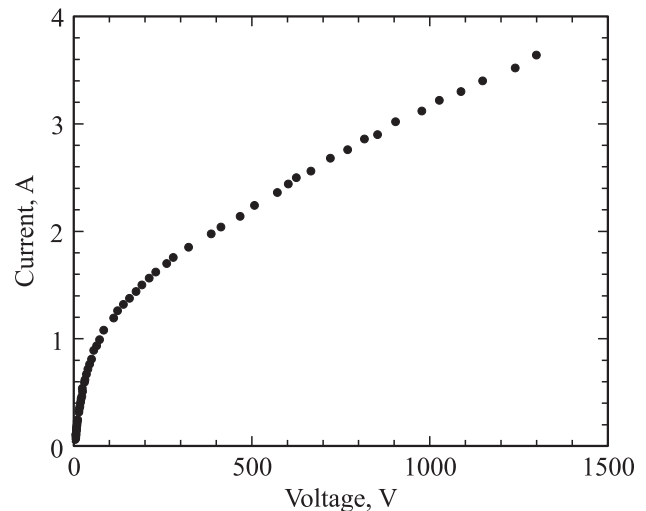


Рис. 6. Экспериментальная прямая ВАХ диода, измеренная импульсным методом.

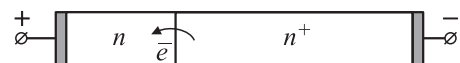


Рис. 7. Иллюстрация монополярной инжекции электронов в n -слой из сильно легированной n^+ -подложки.

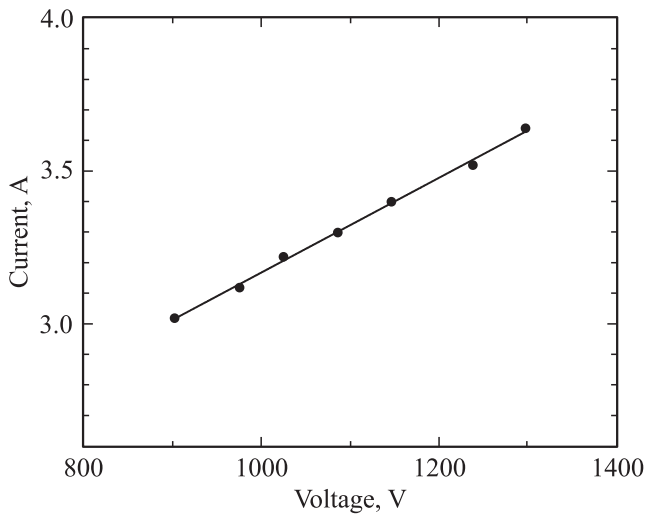


Рис. 8. ВАХ диода, измеренная импульсным методом (точки) в диапазоне напряжений 900–1300 В, и ее аппроксимация линейной зависимостью (сплошная линия).

чения из интервала $1 \leq k \leq 2$, характеризует однородность пространственного распределения инжектированных электронов в *n*-базе. Как следует из формул (8) и (9), при насыщении скорости $\Delta I \sim \Delta V$. Действительно, при $V > 900$ В на измеренной ВАХ наблюдается линейный участок (см. рис. 8). На этом же рисунке показана компьютерная аппроксимация ВАХ линейной зависимостью. Экстраполяция прямой линии на ось ординат (при $V = 0$) дает величину тока насыщения (в отсутствие инжекции):

$$I_s = qnv_sS = 1.62 \text{ A.} \quad (10)$$

Из величины I_s можно рассчитать скорость насыщения: $v_s = 1.55 \cdot 10^7$ см/с. Отметим, что полученная таким способом величина скорости насыщения близка к значениям, полученным ранее в результате численного моделирования.

Определив величину v_s , по тангенсу угла наклона линейного участка ВАХ можно определить коэффициент k , фигурирующий в формуле (9):

$$k = \frac{d^2}{\epsilon v_s S} \frac{\Delta I}{\Delta V} = 2.0. \quad (11)$$

Следует отметить, что равенство коэффициента k двум свидетельствует об однородном распределении инжектированных электронов в *n*-базе [12].

Цель дальнейшего анализа состоит в том, чтобы получить полуэмпирическую формулу для зависимости $v(E)$. При моделировании полупроводниковых приборов очень часто используют полуэмпирическую зависимость $v(E)$ следующего вида:

$$v = \frac{\mu E}{\left[1 + \left(\frac{\mu E}{v_s}\right)^\beta\right]^{\frac{1}{\beta}}}. \quad (12)$$

Сопоставляя формулы (10) и (12) и полагая $E = V/d$, будем аппроксимировать ВАХ (на том участке, где концентрацией инжектированных носителей можно пренебречь; $\Delta n \ll n$) по формуле

$$I = \frac{G_{\text{epi}} V}{\left[1 + \left(\frac{\mu V}{dv_s}\right)^\beta\right]^{\frac{1}{\beta}}}, \quad (13)$$

где $G_{\text{epi}} = 1/R_{\text{epi}}$. Дело в том, что наличие объемного заряда инжектированных носителей приводит к неоднородному распределению поля вдоль базы, что кардинальным образом усложняет анализ. Поэтому ограничим концентрацию инжектированных электронов величиной $\Delta n < 10^{14}$ см⁻³. Из формулы (9) следует, что этому условию соответствуют напряжения $V < 100$ В. На рис. 9 точками показана соответствующая ВАХ. На

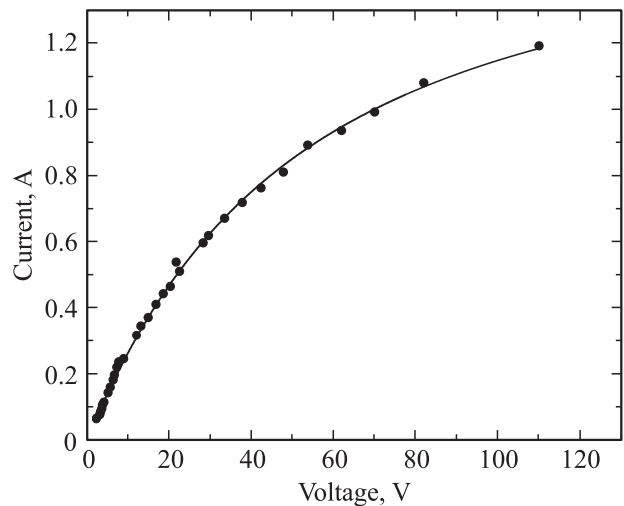


Рис. 9. ВАХ диода, измеренная импульсным методом (точки) в диапазоне напряжений 0–110 В, и ее компьютерная аппроксимация по формуле (13) (сплошная кривая).

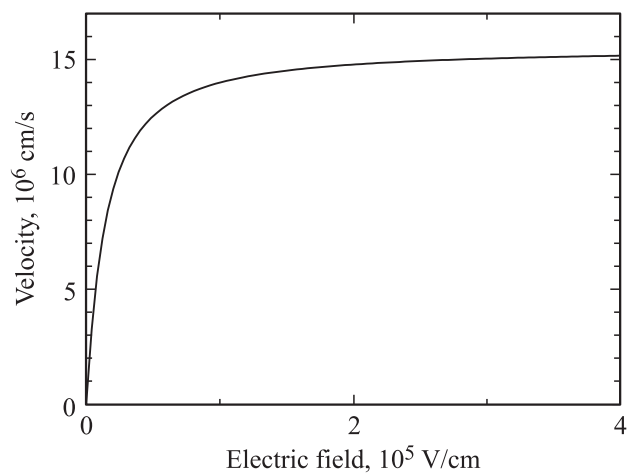


Рис. 10. Реконструированная зависимость дрейфовой скорости от поля, построенная по формуле (12) со следующими значениями параметров: $v_s = 1.55 \cdot 10^7$ см/с и $\beta = 1.15$.

этом же рисунке сплошной линией показана компьютерная аппроксимация ВАХ, выполненная по формуле (13) с двумя подгоночными параметрами — v_s и β . Полученные числовые значения этих параметров следующие: $v_s = (1.55 \pm 0.05) \cdot 10^7$ см/с и $\beta = 1.15 \pm 0.03$. Следует отметить, что значения v_s , полученные анализом ВАХ на разных ее участках, совпали.

На рис. 10 показана реконструированная зависимость дрейфовой скорости от поля, построенная по формуле (12) с выше указанными значениями параметров v_s и β . Как видно, скорость дрейфа становится практически насыщенной при полях $E \sim 2 \cdot 10^5$ В/см.

5. Заключение

Проведены измерения и анализ прямых вольт-амперных характеристик меза-эпитаксиальных 4H-SiC диодов Шоттки при высоких полях (до $4 \cdot 10^5$ В/см) в базовой n -области. Получена полуэмпирическая формула для полевой зависимости дрейфовой скорости электронов в 4H-SiC вдоль гексагональной оси c кристалла. Насыщенная скорость дрейфа составляет $(1.55 \pm 0.05) \cdot 10^7$ см/с при полях свыше $2 \cdot 10^5$ В/см. Полученные экспериментальные результаты подтверждают результаты, полученные ранее с помощью численного моделирования, и могут быть использованы для моделирования характеристик полупроводниковых приборов многих типов на основе 4H-SiC. (Как показали наши недавние исследования, параметры выходных импульсов субнаносекундных генераторов с 4H-SiC ДДРВ очень чувствительны к виду в зависимости $v(E)$ [13,14]).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-29-00094).

Список литературы

- [1] R. Mickevicius, J.H. Zhao. J. Appl. Phys., **83**, 3161 (1998).
- [2] M. Hjelm, H.-E. Nilsson, A. Martinez, K.F. Brennan, E. Bellotti. **93**, 1099 (2003).
- [3] A. Akturk, N. Goldsman, S. Potbhare, A. Lelis. J. Appl. Phys., **105**, 033703 (2009).
- [4] I.A. Khan, J.A. Cooper. Mater. Sci. Forum, **338–342**, 761 (2000).
- [5] I.A. Khan, J.A. Cooper. IEEE Trans. Electron Dev., **47**, 269 (2000).
- [6] L. Ardaravicius, A. Matulionis, O. Kiprijanovic, J. Liberis, H.-Y. Cha, L.F. Eastman, M.G. Spencer. Appl. Phys. Lett., **86**, 022107 (2005).
- [7] K.V. Vassilevski, K. Zekentes, A.V. Zorenko, L.P. Romanov. IEEE Electron Dev. Lett., **21**, 485 (2000).
- [8] V.I. Sankin, A.A. Lepneva. Mater. Sci. Forum, **338–342**, 769 (2000).
- [9] В.И. Санкин, А.А. Лепнева. ФТП, **33**, 586 (1999).
- [10] W.J. Schaffer, G.H. Negley, K. Irvine, J.W. Palmour. Mater. Res. Soc. Symp. Proc., **339**, 595 (1994).
- [11] *Properties of advanced semiconductor materials* GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe., ed. by M.E. Levinshtein, S.L. Rumyantsev and M.S. Shur (John Wiley & Sons, Inc., 2001).
- [12] М. Ламперт, П. Марк. *Инжекционные токи в твердых телах* (М., Мир, 1973).
- [13] П.А. Иванов, И.В. Грехов. ЖТФ, **85**, 111 (2015).
- [14] П.А. Иванов, И.В. Грехов. ЖТФ, **86**, 85 (2016).

Редактор А.Н. Смирнов

The dependence of electron drift velocity on electric field in 4H-SiC along the c -axis

P.A. Ivanov, A.S. Potapov, T.P. Samsonova, I.V. Grekhov

Ioffe Institute,
94021 St. Petersburg, Russia

Abstract Forward current-voltage characteristics of mesa-epitaxial 4H-SiC Schottky diodes were measured at high electric fields (up to $4 \cdot 10^5$ V/cm) in base n -region. Semi-empirical formula for the dependence of electron drift velocity on electric field in 4H-SiC along the c -axis of the crystal was obtained. Saturated drift velocity is found to be $(1.55 \pm 0.05) \cdot 10^7$ cm/sec at electric fields above $2 \cdot 10^5$ V/cm.