

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

*Физико-технический институт им. Иоффе РАН*

## **Экспериментальное определение полевой зависимости дрейфовой скорости электронов в 4H-SiC вдоль оси С**

*Проведены измерения и анализ статических и импульсных прямых вольт-амперных характеристик меза-эпитаксиальных 4H-SiC диодов Шоттки со слаболегированной ( $10^{15} \text{ см}^{-3}$ )  $n$ -областью. Получена полуэмпирическая формула для полевой зависимости дрейфовой скорости электронов в 4H-SiC вдоль оси С вплоть до полей около  $4 \times 10^5 \text{ В/см}$ . Насыщенная скорость дрейфа составляет  $(1.55 \pm 0.05) \times 10^7 \text{ см/с}$  при полях свыше  $2 \times 10^5 \text{ В/см}$ .*

**Ключевые слова:** Карбид кремния политипа 4H, дрейфовая скорость электронов вдоль оси С.

Полевая зависимость скорости дрейфа носителей тока является важнейшей характеристикой полупроводниковых материалов, используемых для СВЧ приборов. Как известно, в полупроводниках проявляется эффект насыщения дрейфовой скорости разогретых электрическим полем носителей: зависимость скорости ( $v$ ) от напряженности электрического поля ( $E$ ) отклоняется от линейной и затем перестает зависеть от поля, достигая насыщения. 4H-SiC является перспективным широкозонным материалом для мощных импульсных и СВЧ приборов. Однако вплоть до настоящего времени транспорт горячих носителей в 4H-SiC исследовался преимущественно теоретически - численным моделированием методом Монте-Карло (см., например, [1-3]). В работе [2] моделирование транспорта электронов в 4H-SiC проведено как для направления поперек оси С, так и вдоль оси С. Насыщенная скорость дрейфа электронов оценена величинами  $2.12 \times 10^7 \text{ см/с}$  (поперек оси С) и  $1.58 \times 10^7 \text{ см/с}$  (вдоль оси С). Экспериментальным исследованиям эффекта насыщения дрейфовой скорости в 4H-SiC посвящены лишь единичные работы [4-6]. По результатам измерений и анализа вольт-амперных характеристик (ВАХ) планарных резистивных элементов максимальная скорость дрейфа электронов в 4H-SiC поперек оси С оценена величинами  $2.2 \times 10^7 \text{ см/с}$  [5] и  $1.4 \times 10^7 \text{ см/с}$  [6]. В работе [7], посвященной исследованиям обратных ВАХ 4H-SiC  $p^+-n-n^+$ -диодов в режиме лавинного пробоя, насыщенная скорость электронов вдоль оси С оценена величиной  $8 \times 10^6 \text{ см/с}$ , что по меньшей мере в два с половиной раза меньше по сравнению с дрейфом поперек оси С. 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 С оценена еще меньшей величиной - всего  $3.3 \times 10^6 \text{ см/с}$ . Таким образом, данные, имеющиеся в литературе, существенно различаются, так что для уточнения параметров дрейфа вдоль оси С необходимы дальнейшие экспериментальные исследования.

В настоящей работе с целью определения полевой зависимости дрейфовой скорости электронов в 4H-SiC вдоль оси С проведены измерения и анализ прямых ВАХ меза-эпитаксиальных диодов Шоттки со слаболегированной базовой  $n$ -областью. Базовая область диода Шоттки по сути представляет собой вертикальный резистивный элемент, так что по измеренной зависимости плотности прямого тока ( $j$ ) от напряженности поля ( $E$ ) в

базовой области можно легко определить зависимость  $v(E) = j(E)/qn$ , где  $q$  - элементарный заряд,  $n$  - концентрация электронов в базе.

*Экспериментальные образцы.* 4H-SiC диоды Шоттки (рис. 1) изготавливались на основе коммерческого эпитаксиального материала: концентрация доноров в базовом  $n$ -слое  $N = 1 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , толщина  $n$ -слоя  $d = 34 \text{ мкм}$ , удельное сопротивление  $n^+$ -подложки  $0.02 \text{ Ом см}$ . Диоды изготавливались в следующей последовательности. Вначале на поверхности базового эпитаксиального  $n$ -слоя был сформирован контакт Шоттки диаметром  $290 \text{ мкм}$  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 меза-структур, сформированных сухим селективным травлением эпитаксиального слоя на всю его толщину  $34 \text{ мкм}$ . На обратной стороне структуры был сформирован омический контакт из напыленного и термически вожженного никеля. Пластина с дискретными диодами разрезалась на отдельные чипы размером  $1 \times 1 \text{ мм}$ . Верхний и нижний никелевые электроды облуживались свинцово-оловянным припоем. К верхнему электроду припаивалась посеребренная медная проволока. Чипы напайвались на полосу из металлизированного текстолита с полосковыми выводами (рис. 2). Для проведения высоковольтных измерений полоска размещалась внутри отрезка виниловой трубки, полость которой заполнялась диэлектриком - силиконовым гелем.

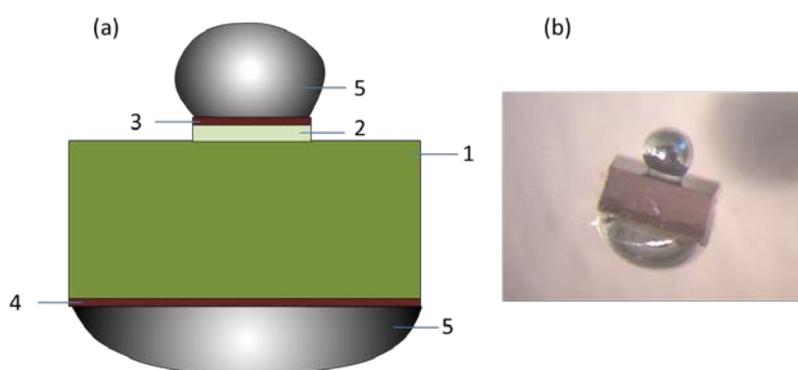


Рис. 1. Экспериментальные образцы 4H-SiC диодов Шоттки: (а) - схематическое сечение (1 -  $n^+$ -подложка, 2 - эпитаксиальная  $n$ -база, 3 - контакт Шоттки, 4 - омический контакт, 5 - припой); (б) - фотография отдельного чипа.



Рис. 2. Монтаж диодного чипа. Пояснения в тексте.

*Прямые ВАХ при малых напряжениях и токах.* На рис. 3 точками показана типичная прямая ВАХ диодов, измеренная на постоянном токе в диапазоне от  $100 \text{ нА}$  до  $10 \text{ мА}$ . В пределах изменения по току  $0.1 - 200 \text{ мкА}$  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. На рис. 3 сплошной линией показана ВАХ, полученная аппроксимацией экспериментальных данных по модели термоэлектронной эмиссии из полупроводника в металл с учетом влияния последовательного сопротивления диода ( $R_s$ ):

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

где  $V_b$  - падение напряжения на обедненном слое контакта Шоттки,  $k$  - постоянная Больцмана,  $T$  - абсолютная температура,  $m$  - фактор идеальности. Полученные в результате компьютерной аппроксимации значения подгоночных параметров ( $I_0$ ,  $m$  и  $R_s$ ) следующие:  $I_0 = 4 \times 10^{-17}$  А,  $m = 1.09$ ,  $R_s = 34$  Ом.

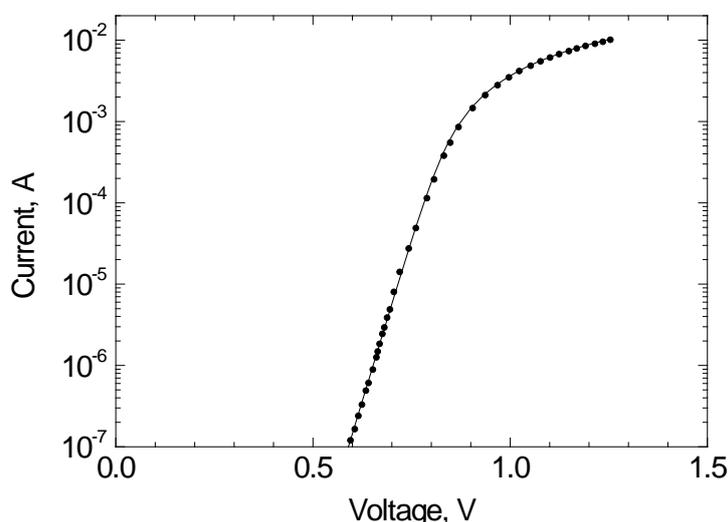


Рис. 3. Экспериментальная прямая ВАХ диода (точки). Сплошная линия - ВАХ, полученная аппроксимацией экспериментальных данных по модели термоэлектронной эмиссии с учетом влияния последовательного сопротивления диода.

Оценим, какой вклад в последовательное сопротивление  $R_s$  вносит омическое сопротивление эпитаксиальной  $n$ -базы (это сопротивление определяется подвижностью  $\mu$  и концентрацией электронов ( $n = N = 1 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ), а также площадью меза-структуры ( $S = 6.6 \times 10^{-4} \text{ см}^2$ ) и толщиной базы ( $d = 34 \text{ мкм}$ ). Подвижность электронов в 4H-SiC при концентрации доноров  $N = 1 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$  составляет  $\mu = 955 \text{ см}^2/\text{В с}$  [10]. При этом расчетное омическое сопротивление эпитаксиального  $n$ -слоя составляет 33.7 Ом. Как видно, измеренное последовательное сопротивление практически полностью определяется сопротивлением эпитаксиального  $n$ -слоя:  $R_{epi} \approx R_s = 34 \text{ Ом}$ .

*Импульсные ВАХ при больших напряжениях и токах.* Во избежание саморазогрева диодов измерения ВАХ при больших напряжениях (до 1300 В) проводились на коротких одиночных импульсах. В качестве источника напряжения был использован специализированный высоковольтный импульсный генератор. На нагрузке 50 Ом генератор выдает импульсы напряжения амплитудой до 5 кВ и длительностью 4 нс (время нарастания и спада импульсов около 2 нс). ВАХ строилась по измеренным величинам амплитуд импульсов напряжения на диоде и протекающего через диод тока. При амплитудах импульсов напряжения 1300 В и тока 3.6 А пиковая мощность достигала  $P = 4.7 \text{ кВт}$ . Оценим верхний предел повышения температуры  $n$ -базы, считая, что в ней выделяется вся электрическая мощность, а теплоотдачи из  $n$ -базы нет:

$$\Delta T \leq \frac{P \Delta t}{C d S \rho} \quad (2)$$

где  $\Delta t$  - длительность импульса,  $C = 0.69 \text{ Дж/г К}$  и  $\rho = 3.21 \text{ г/см}^3$  - теплоемкость и плотность 4H-SiC [11], соответственно. При  $\Delta t = 4 \text{ нс}$  и  $P = 4.7 \text{ кВт}$  перегрев  $\Delta T \leq 3.8 \text{ К}$ . Таким

образом, саморазогревом можно пренебречь, а измеренную на 4-нс импульсах ВАХ (рис. 4) считать изотермической.

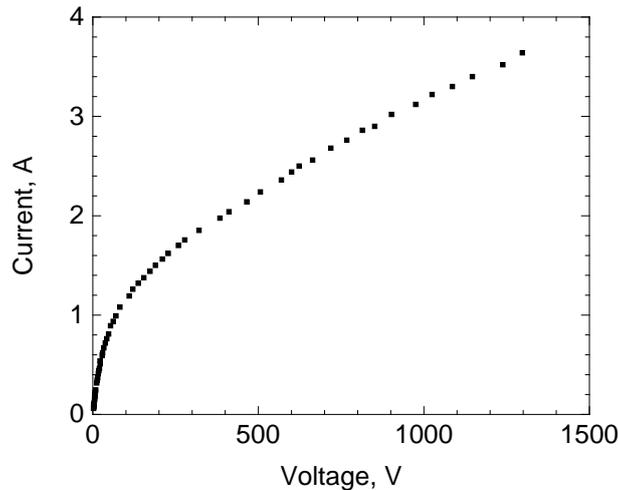


Рис. 4. Экспериментальная прямая ВАХ диода, измеренная импульсным методом.

Из рис. 4 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 сильнолегированной  $n^+$ -подложки. Даже тогда, когда скорость дрейфа электронов в базе уже насыщена, ток растет при увеличении напряжения за счет роста концентрации свободных электронов  $\Delta n$  [12]:

$$I = q(n + \Delta n)v_s S, \quad \Delta n = \frac{k\varepsilon V}{qd^2} \quad (3)$$

где  $\varepsilon = 8.85 \times 10^{-13}$  Ф/см - диэлектрическая проницаемость 4H-SiC [11], а коэффициент  $k$ , принимающий значения из интервала  $1 \leq k \leq 2$ , характеризует однородность пространственного распределения инжектированных электронов в  $n$ -базе. Как следует из выражения (3), при насыщении скорости  $\Delta I \sim \Delta V$ . Действительно, при  $V > 900$  В линейный участок на измеренной ВАХ имеет место (см. рис. 4). Экстраполяция этого прямолинейного участка на ось ординат (при  $V = 0$ ) дает величину тока насыщения  $I_s = qnv_s S = 1.62$  А. Из величины  $I_s$  можно рассчитать скорость насыщения:  $v_s = 1.55 \times 10^7$  см/с. Отметим, что полученная таким способом величина скорости насыщения близка к значениям, полученным ранее в результате численного моделирования методом Монте-Карло. Определив величину  $v_s$ , по тангенсу угла наклона линейного участка ВАХ можно определить коэффициент  $k$ , фигурирующий в выражении (3):  $k = 2.0$ . Отметим, что равенство коэффициента  $k$  двум свидетельствует об однородном распределении инжектированных электронов в  $n$ -базе [12].

Цель дальнейшего анализа состоит в том, чтобы получить аналитическую формулу для зависимости  $v(E)$ . Следует иметь ввиду, что наличие объемного заряда инжектированных носителей приводит к неоднородному распределению электрического поля вдоль базы, что кардинальным образом усложняет анализ. Поэтому ограничим концентрацию инжектированных электронов величиной  $\Delta n < 10^{14}$  см<sup>-3</sup>. Этому условию соответствуют напряжения  $V < 100$  В. При моделировании полупроводниковых приборов очень часто используют полуэмпирическую зависимость  $v(E)$  следующего вида:

$$v = \frac{\mu E}{\left[1 + \left(\frac{\mu E}{v_s}\right)^\beta\right]^{\frac{1}{\beta}}} \quad (4)$$

Положим  $E = V/d$  и будем аппроксимировать ВАХ на том участке, где  $V < 100$  В, по формуле

$$I = \frac{G_{epi}V}{\left[1 + \left(\frac{\mu V}{dv_s}\right)^\beta\right]^{\frac{1}{\beta}}} \quad (5)$$

где  $G_{epi} = 1/R_{epi}$ . Компьютерная аппроксимация ВАХ, выполненная по формуле (5) с двумя подгоночными параметрами ( $v_s$  и  $\beta$ ), дала следующие их числовые значения:  $v_s = (1.55 \pm 0.05) \times 10^7$  см/с и  $\beta = 1.15 \pm 0.03$ . Следует отметить, что значения  $v_s$ , полученные анализом ВАХ на разных ее участках, совпали. Из выражения (4) следует, что скорость дрейфа становится практически насыщенной при полях  $E \sim 2 \times 10^5$  В/см.

*Заклучение.* Проведены измерения и анализ прямых вольт-амперных характеристик меза-эпитаксиальных 4Н-SiC диодов Шоттки при высоких полях (до  $4 \times 10^5$  В/см) в базовой п-области. Получена полуэмпирическая формула для полевой зависимости дрейфовой скорости электронов в 4Н-SiC вдоль гексагональной оси С кристалла. Насыщенная скорость дрейфа составляет  $(1.55 \pm 0.05) \times 10^7$  см/с при полях свыше  $2 \times 10^5$  В/см. Полученные экспериментальные результаты могут быть использованы для моделирования характеристик полупроводниковых приборов многих типов на основе 4Н-SiC. (Как показали наши недавние исследования, параметры выходных импульсов субнонсекундных генераторов с дрейфовыми диодами с резким восстановлением на основе 4Н-SiC очень чувствительны к виду в зависимости  $v(E)$  [13]).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект N 14-29-00094).

#### Библиографический список

1. R. Mickevicius and J. H. Zhao. J. Appl. Phys., т. 83, с. 3161 (1998).
2. M. Hjelm, H-E. Nilsson, A. Martinez, K.F. Brennan, E. Bellotti. т. 93, с. 1099 (2003).
3. A. Akturk, N. Goldsman, S. Potbhare, A. Lelis. J. Appl. Phys., т. 105, 033703 (2009).
4. I.A. Khan, J.A. Cooper. Materials Science Forum, т. 338-342, с. 761 (2000).
5. I.A. Khan, J.A. Cooper, IEEE Trans. Electron Devices т. 47, с. 269 (2000).
6. L. Ardaravicius, A. Matulionis, O. Kiprijanovic, J. Liberis, H.-Y. Cha, L.F. Eastman, M.G. Spencer. Appl. Phys. Lett., т. 86, 022107 (2005).
7. K.V. Vassilevski, K. Zekentes, A.V. Zorenko, L.P. Romanov. IEEE Electron Device Lett., т. 21, с. 485 (2000).
8. V.I. Sankin, A.A. Lepneva. Materials Science Forum, т. 338-342, с. 769 (2000).
9. В.И. Санкин, А.А. Лепнева. ФТП, т. 33, с. 586 (1999).
10. W.J. Schaffer, G.H. Negley, K. Irvine, J.W. Palmour, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. т. 339, с. 595 (1994).
11. Properties of advanced semiconductor materials GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe. Ed. by M.E. Levinshtein, S.L. Rumyantsev, M.S. Shur. John Willey & Sons, Inc., 2001, 194 p.
12. М. Ламперт, П. Марк. Инжекционные токи в и твердых телах, М., Мир, 1973, 416 с.
13. П.А. Иванов, И.В. Грехов. ЖТФ, т. 86, с. 85 (2016).