

Исследование влияния длительности управляющих импульсов напряжения на прямую ВАХ SiC-диода с барьером Шоттки

А.В. Афанасьев, А.В. Восколович, Б.В. Иванов, С.А. Пологов, Е.А. Тертышная, С.А. Шевченко

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: исследовались прямые ВАХ SiC-диода с барьером Шоттки при воздействии на него одиночным пилообразным импульсом напряжения длительностью от 1 мкс до 10 мс с учетом эффекта саморазогрева структуры. При длительности импульсов свыше 500 мкс наблюдалась S-образная ВАХ, которая обусловлена инжекцией неосновных носителей (дырок) из p^+ -областей в дрейфовую область диода.

Ключевые слова: карбид кремния, численное моделирование, диод Шоттки, биполярная проводимость

1. Введение

SiC-диоды с биполярной и униполярной проводимостью (PIN-диоды и диоды Шоттки соответственно) широко применяются в различных областях высоковольтной и силовой электроники [1] – [3]. Основными преимуществами диодов Шоттки (ДШ) перед диодами с $p-n$ -переходом являются быстродействие, малое прямое падение напряжения на потенциальном барьере и малые потери при переключении. Это обусловлено тем, что ДШ являются устройствами на основных носителях [3]. Однако, использование SiC-компонентов в условиях коммутации больших мощностей приводит к их сильному разогреву, что обуславливает деградацию свойств контакта Шоттки [4, 5]. Это, в свою очередь, обуславливает необходимость создания эффективных теплоотводов, что зачастую затруднительно без детального понимания физики процессов, происходящих в структуре.

Для снижения влияния эффекта саморазогрева, помимо использования теплоотводов с улучшенными характеристиками, целесообразен также подбор оптимального режима работы диода в схеме. Целью работы являлось исследование влияния длительности импульса прямого смещения на вид ВАХ SiC JBS(MPS)-диода.

2. Условия расчета и результаты моделирования

Типовая структура JBS(MPS)-диода приведена на рисунке 1. В работе был выбран диод с напряжением пробоя 1200 В и максимальным рабочим постоянным током 30 А. Площадь структуры составила 9 мм². Её общая толщина (включая толщины подложки, эпислоя и металлизации) составляла 380 мкм. Расчет проводился в среде TCAD в диффузионно-дрейфовом приближении с учетом эффекта саморазогрева диода (1.1)-(1.6). В модели учитывались также эффекты лавинной генерации, насыщения скорости в сильных полях, сильного легирования, сильной инжекции при биполярной проводимости и эффект неполной ионизации легирующей примеси. Условия проведения расчета соответствовали приведенным в технической документации аналога [6]. При этом тепловое сопротивление принималось постоянным и равным 0,65 К/Вт.

$$\Delta\varphi = -\frac{q}{\epsilon\epsilon_0}(p - n + N_D - N_A); \quad (1)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla \cdot \vec{J}_n - R_{net,n} + G_{net,n} \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \nabla \cdot \vec{J}_p - R_{net,p} + G_{net,p} \quad (3)$$

$$\vec{J}_n = -nq\mu_n (\nabla \Phi_n + P_n \nabla T); \quad (4)$$

$$\vec{J}_p = -pq\mu_p (\nabla \Phi_p + P_p \nabla T); \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (c_L T) - \nabla \cdot (\kappa \nabla T) = & -\nabla \cdot \left[(P_n T + \Phi_n) \vec{J}_n + (P_p T + \Phi_p) \vec{J}_p \right] - \\ & - \frac{1}{q} \left(E_C + \frac{3}{2} kT \right) (\nabla \vec{J}_n - q (R_{net,n} - G_{net,n})) - \\ & - \frac{1}{q} \left(-E_V + \frac{3}{2} kT \right) (-\nabla \vec{J}_p - q (R_{net,p} - G_{net,p})), \end{aligned} \quad (6)$$

где $\vec{J}_{n,p}$ – плотность тока электронов и дырок; $\mu_{n,p}$ – подвижности электронов и дырок, $\Phi_{n,p}$ – квазипотенциалы Ферми электронов и дырок, $c_L = 1,63 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{см}^3)$ и $\kappa = 4,55 \text{ Вт}/(\text{К} \cdot \text{см})$ – теплоемкость и теплопроводность карбида кремния соответственно. Множители $qn\mu_n P_n$ и $qp\mu_p P_p$ перед градиентом температуры в уравнениях (4) - (5) имеют смысл кинетических коэффициентов [7], остальные обозначения соответствуют стандартным в физике полупроводников [8].

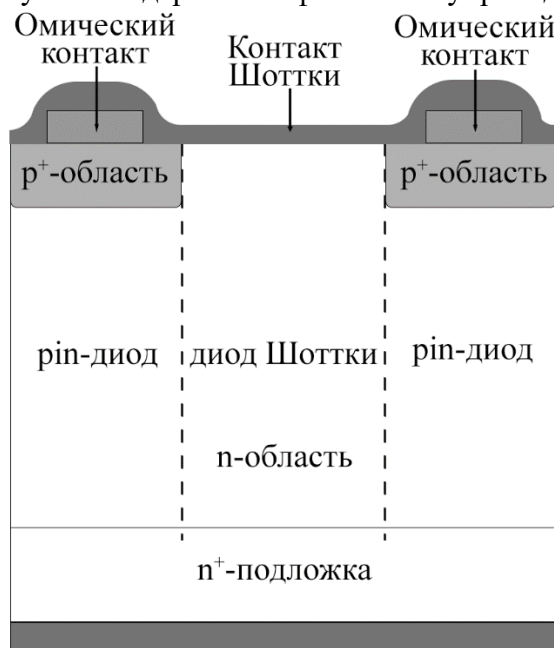


Рисунок 1. Типовая структура JBS(MPS)-диода

Проводился расчет переходного процесса в схеме, при котором диод смещался в направлении пропускания тока одиночным пилообразным импульсом напряжения. Скорость подъема напряжения на диоде и длительность импульса выбирались такими, чтобы на каждом шаге расчета устанавливалось электрическое равновесие, но при этом не устанавливалось равновесие тепловое. Амплитуда импульса прямого смещения составила 30 В, длительность импульсов варьировалась в пределах от 1 мкс до 10 мс.

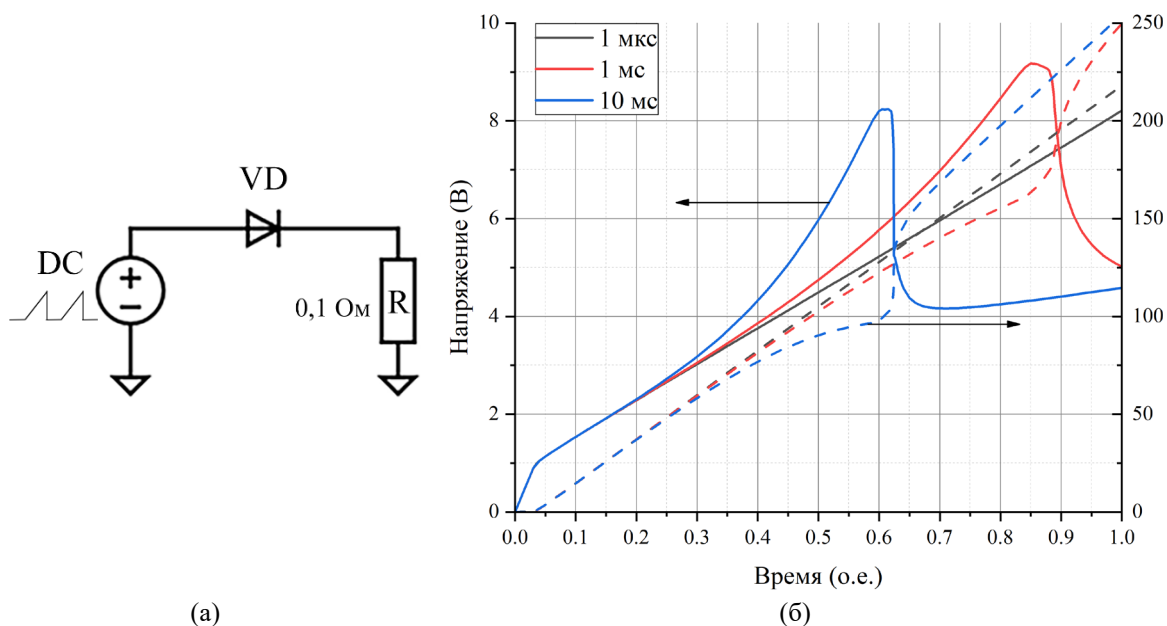


Рисунок 2 . Схема измерений (а), зависимость напряжения (левая ось) и тока (правая ось) на диоде от времени (б)

На рисунке 2 приведены зависимости падения напряжения на диоде и тока через него от времени для различных длительностей импульса напряжения прямого смещения. Видно, что для длительностей импульсов 1 и 10 мс наблюдается падение напряжения, сопровождающееся ускоренным ростом тока через диод. Это обусловлено включением областей диода с p - n -переходом, которое приводит к инжекции неосновных носителей из p^+ -областей (рисунок 3), что снижает сопротивление дрейфовой n -области и падение напряжения на диоде и сопровождается возрастанием тока.

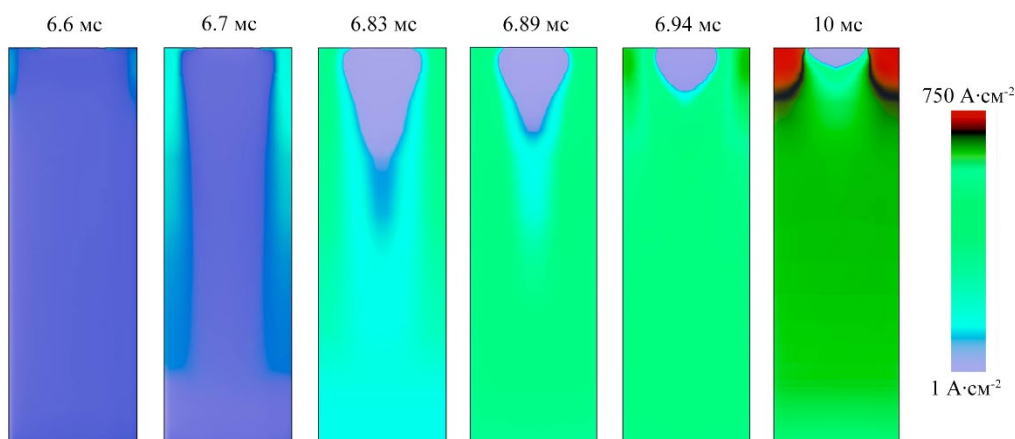


Рисунок 3. Распределения тока неосновных носителей (дырок) в диоде в различные моменты времени при длительности импульса 10 мс

Для построения ВАХ диода, представленных на рисунке 4, зависимости напряжения и тока от времени, полученные в результате расчета переходного процесса, были размещены на осях X и Y соответственно. На том же рисунке изображен результат стационарного расчета, при котором на каждом шаге по напряжению в диоде устанавливается и электрическое, и тепловое равновесия. По данным рисунка 4 видно, что с увеличением длительности импульса рост тока замедляется вследствие насыщения скорости электронов и усиления фонов

рассеяния с ростом температуры по мере саморазогрева структуры. Результаты расчета показывают, что при длительности импульса напряжения свыше 500 мкс наблюдается S-образность ВАХ.

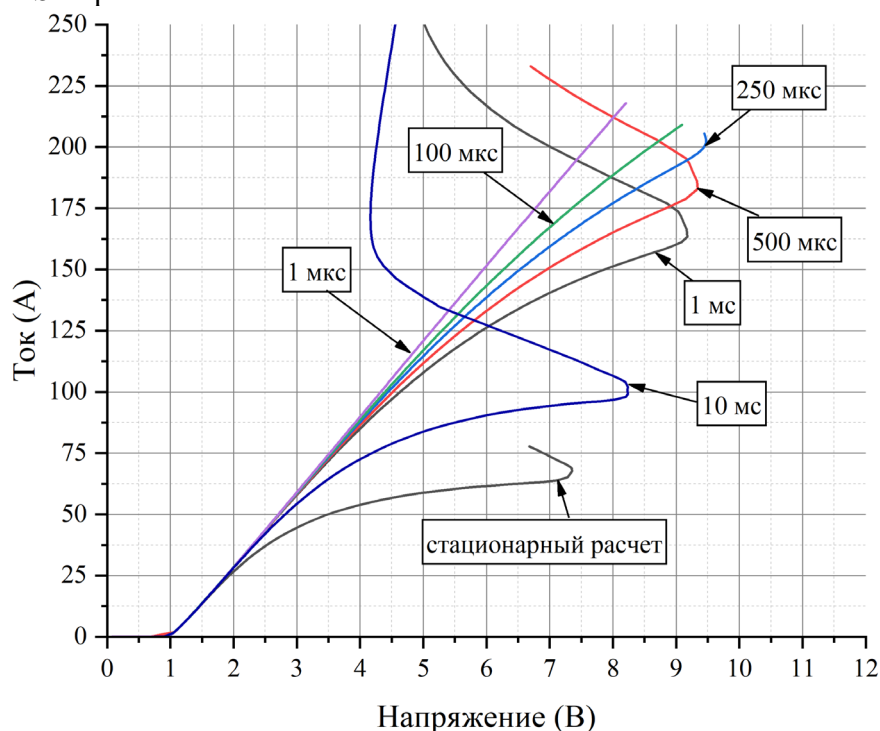


Рисунок 4. Прямые ветви ВАХ диода при различных длительностях импульса прямого смещения

С увеличением длительности импульса в результате роста температуры кристаллической решетки повышается степень ионизации примеси в p^+ -областях диода, что вызывает инжекцию неосновных носителей в дрейфовую область (рисунок 5). При этом зависимость распределения плотности дырок в диоде от времени демонстрирует также заполнение структуры неосновными носителями от подложки к p^+ -областям. Это обусловлено монополярной инжекцией электронов в дрейфовую область диода из сильнолегированной n^+ -подложки. Отрицательный заряд, образованный этими электронами, притягивает ранее инжектированные дырки из объема материала, что ведет к увеличению общей проводимости дрейфовой области и дальнейшему возрастанию тока через диод. Описанный механизм обуславливает переход униполярного прибора в биполярный режим работы, при котором вклады основных и неосновных носителей в токоперенос становятся сопоставимы (рисунок 6).

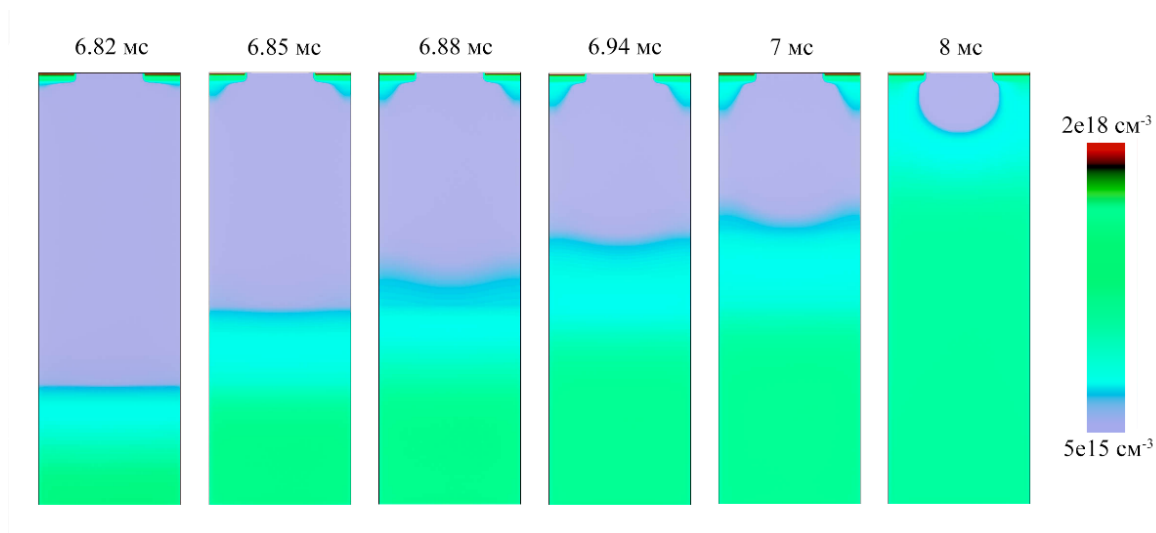


Рисунок 5. Распределения неосновных носителей (дырок) в диоде в различные моменты времени при длительности импульса 10 мс

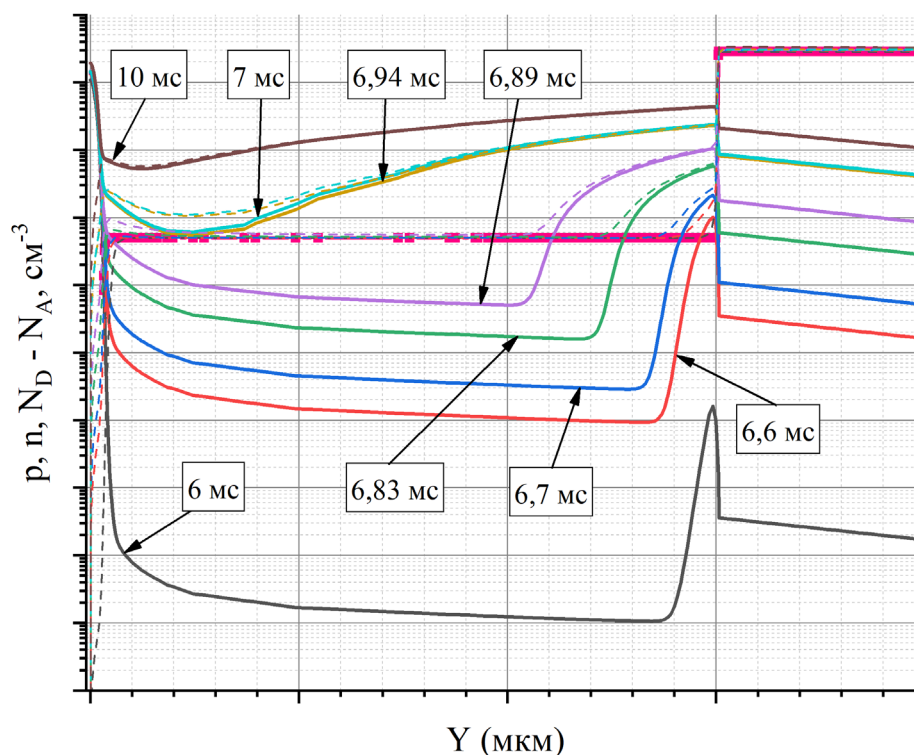


Рисунок 6. Распределение электронов (штриховые линии), дырок (сплошные линии) и концентрационный профиль легирования (маркированная линия) в сечении под p^+ -областями диода в различные моменты времени при длительности импульса 10 мс

Зависимость максимальной температуры $T_{\text{макс}}$ на границе с контактом Шоттки в момент окончания расчета от длительности импульса прямого смещения приведена в таблице 1.

Таблица 1. Зависимость максимальной температуры в диоде от длительности импульса

	Длительности импульсов					
	1 мкс	100 мкс	250 мкс	500 мкс	1 мс	10 мс
$T_{\text{макс}}, \text{K}$	302	334	358	386	419	730

Из таблицы видно, что при длительностях импульса 1...250 мкс использование

теплоотвода для отведения тепла от диода не является необходимым. При воздействии импульсами длительностью более 500 мкс существенный рост температуры в JBS (MPS)-области активирует инжекцию неосновных носителей (дырок) из p^+ -областей в дрейфовую область.

3. Заключение

Исследование процесса саморазогрева силовых полупроводниковых структур и моделирование этого процесса необходимо для оптимизации режимов работы схем, что позволяет предъявлять реалистичные требования к внутренним параметрам структур диодов. Это, в свою очередь, позволяет избежать эффектов необратимой температурной деградации свойств контакта Шоттки. Установлено, что при воздействии одиночными импульсами прямого смещения длительностью до 500 мкс толщина структуры 380 мкм достаточна для эффективного отведения тепла от контакта Шоттки и не требует использования теплоотводов. Для импульсов длительностью свыше 500 мкс в работу включаются p^+ -области диода, снижая сопротивление структуры и обеспечивая защиту от локального перегрева контакта Шоттки. Несомненный интерес также представляет физика работы структуры при воздействии на нее периодической последовательностью импульсов, что является одним из направлений дальнейшей работы.

Список литературы

1. Tsunenobu Kimoto 2015 Jpn. J. Appl. Phys. 54 040103 DOI 10.7567/JJAP.54.040103
2. High Voltage Subnanosecond Silicon Carbide Opening Switch // A.V. Afanasyev, B.V. Ivanov, V.A. Ilyin, A.A. Smirnov, S.A. Shevchenko / Proc. 2016 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University RTUCON 2016 – 2016.
3. Левинштейн М.Е., Иванов П.А., Zhang Q.J., Palmour J.W. Изотермические вольт-амперные характеристики высоковольтных 4H-SiC JBS-диодов Шоттки/ Физика и техника полупроводников, 2016, т. 50, №5.
4. Surge Current Robustness Improvement of SiC Junction Barrier Schottky Diodes by Layout Design, Viorel Banu, Maxime Berthou, Josep Montserrat, Xavier Jord'a, and Philippe Godignon/ Romanian Journal of Information Science and Technology, vol.20, p.369-384.
5. Boccarossa M., Borghese A., Maresca L., Riccio M., Breglio G., Irace A. Numerical Analysis of the Schottky Contact Properties on the Forward Conduction of MPS/JBS SiC Diodes/ Key Engineering Materials 2023, vol. 947, p. 95-102.
6. Wolfspeed Discrete SiC Schottky Diode. URL: <https://www.wolfspeed.com/products/power/sic-schottky-diodes/1200v-silicon-carbide-schottky-diodes/c4d10120h>
7. Callen H.B., Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics, New York: John Wiley & Sons, 2nd ed., 1985.
8. Sze S.M., Physics of Semiconductor Devices, New York: John Wiley & Sons, 2nd ed., 1981
9. Baliga B.J. Fundamentals of Power Semiconductor Devices. Cham: Springer International Publishing, 2019