

УДК

Исследование влияния уровня легирования заглубленного р-кармана на пространственное распределение электрического поля SiC JBS-диода с латеральным каналом (LC-JBS) при подаче обратного напряжения

Е.А. Тертышная, С.А. Шевченко, Б.В. Иванов, А.В. Афанасьев, А.В. Восколович,
М.О. Паламарчук

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: исследовалось распределение напряженности электрического поля в SiC JBS-диоде с латеральным каналом (LC-JBS диод) при подаче на диод обратного напряжения смещения при уровне легирования в области заглубленного р-кармана от $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ до $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. При уровнях легирования свыше $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ наблюдалась локализация напряженности электрического поля в области границы р-кармана.

Ключевые слова: карбид кремния, численное моделирование, диод Шоттки, диод Шоттки с латеральным каналом

1. Введение

В современной силовой электронике широко применяются такие приборы ключевого типа, как MOSFET-транзисторы и JBS(MPS)-диоды на карбиде кремния [1–3]. Сильноточные и высоковольтные приложения обуславливают работу приборов при высоких температурах, что в случае карбидокремниевых диодов с барьером Шоттки приводит к деградации свойств данного контакта и преждевременному выходу из строя данного типа приборов.

Эта проблема приводит к необходимости поиска новых конструктивных решений для ячеек самих приборов и изучения физических процессов и явлений в них. Целью данной работы являлись синтез в среде TCAD двумерной структуры карбидокремниевых LC-JBS-диода на основе экспериментальных данных, представленных в [4] и исследование влияния уровня легирования в заглубленном р-кармане базовой ячейки на пространственное распределение электрического поля в области контакта Шоттки при подаче на структуру отрицательного напряжения смещения.

2. Условия расчета и результаты моделирования

Типовая структура LC-JBS-диода приведена на рисунке 1. Для данной работы был выбран диод с напряжением пробоя 1500 В. Площадь структуры составила 0.0625 мм^2 .

Расчет проводился в среде TCAD в диффузионно-дрейфовом приближении (1.1)-(1.5). В модели учитывались эффекты лавинной генерации, насыщения скорости в сильных полях, сильного легирования, сильной инжекции при биполярной проводимости, эффект туннелирования носителей через барьер Шоттки и эффект неполной ионизации примеси в карбиде кремния.

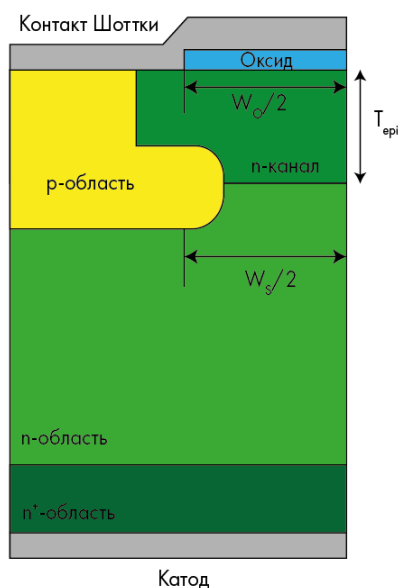


Рисунок 1. Типовая структура LC-JBS-диода

$$\Delta\varphi = -\frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0}(p-n+N_D-N_A); \quad (1)$$

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

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

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

$$\vec{J}_p = -pq\mu_p\nabla\Phi_p, \quad (5)$$

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.

В результате численного моделирования в среде TCAD была реализована структура карбидокремниевого LC-JBS диода. Сравнение экспериментально измеренной плотности прямого тока в ячейке [4] и результатов расчета представлены на рисунке 2 и демонстрируют высокую степень соответствия результатов численного моделирования с экспериментальными данными. Толщина дрейфовой области составляет 10 мкм при уровне легирования в данной области $1\cdot 10^{16}$ см⁻³, эпитаксиальный слой *n*-канала составляет 0.7 мкм, а уровень легирования в нем равен $1\cdot 10^{17}$ см⁻³, полная толщина структуры (включая *n*-канал, дрейфовую область и подложку) составляет 20 мкм. Сильнолегированная *p*-область над заглубленным *p*-карманом имеет ширину 0.5 мкм, глубину 0.7 мкм и уровень легирования $1\cdot 10^{20}$ см⁻³. Заглубленный *p*-карман имеет толщину 0.4 мкм и уровень легирования в центре области равный $1\cdot 10^{19}$ см⁻³ и имеет гауссовский тип распределения.



Рисунок 2. Плотность прямого тока верифицируемой модели и эксперимент

Для расчетов была спроектирована базовая ячейка с шириной оксидного слоя (W_o) и шириной зазора между p -областями (W_s) по 4 мкм соответственно. Максимальный уровень легирования в области заглубленного p -кармана варьировался от $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ до $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. На рисунке 3 представлены результаты расчетов распределений напряженности электрического поля для разных уровней концентрации легирующей примеси в заглубленном p -кармане структуры LC-JBS диода при напряжении обратного смещения 1500 В.

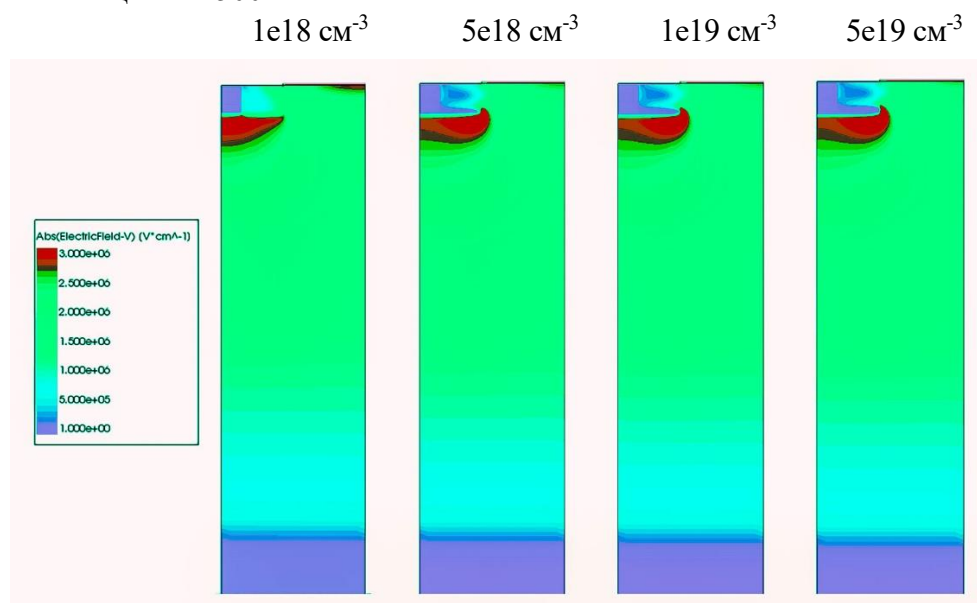


Рисунок 3. Распределение напряженности электрического поля в сечении диода при напряжении обратного смещения 1500 В

На рисунке 4 приведена зависимость напряженности электрического поля от координаты в горизонтальных сечениях под контактом Шоттки, в области эпитаксиального слоя n -канала и в области заглубленного p -кармана. Продемонстрировано, что при уровне легирования заглубленного p -кармана $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ напряженность электрического поля в области под контактом Шоттки на порядок выше, чем при уровнях легирования $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3} \dots 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, однако в области границы p -кармана при более высоком уровне легирующей примеси в нем наблюдается выраженная локализация электрического поля. Повышение уровня легирования p -кармана приводит к оттеснению электрического поля от контакта Шоттки и, соответственно, защите его от деградации свойств в латеральном направлении, в то

время как наличие оксида над областями между соседними p -карманами защищает контакт Шоттки от электрического поля в вертикальном направлении. Снижение уровня легирования в вышеупомянутой области снижает локализацию электрического поля на ее границе, но приводит к существенному возрастанию напряженности электрического поля у поверхности контакта Шоттки.

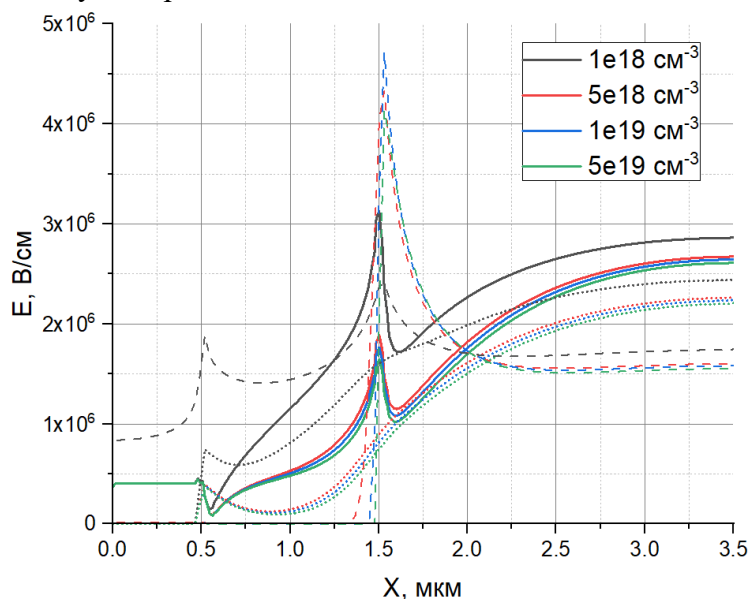


Рисунок 4. Зависимость напряженности электрического поля в сечениях диода (сплошные линии – сечение под контактом Шоттки, пунктирные – сечение в середине эпитаксиального n -канала, штриховые – сечение по центру заглибленного p -кармана)

3. Заключение

Исследование и оптимизация различных конфигураций базовых ячеек силовых полупроводниковых диодов необходимы для усовершенствования электрических характеристик прибора, что позволяет добиваться более высоких рабочих токов и напряжений. Установлено, что при уровнях легирования $1 \cdot 10^{18} \dots 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в области p -кармана обеспечивается защита контакта Шоттки от электрического поля как в латеральном, так и в вертикальном направлениях без повышения степени локализации электрического поля в области границы p -кармана.

Список литературы

1. Baliga B.J. Fundamentals of Power Semiconductor Devices. Cham: Springer International Publishing, 2019
2. Tsunenobu Kimoto 2015 Jpn. J. Appl. Phys. 54 040103 DOI 10.7567/JJAP.54.040103
3. 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.
4. Zhu L. et al. 1.5 kV novel 4H-SiC lateral channel (LC) JBS rectifiers with low leakage current and capacitance // Proceedings. ISPSD'05. The 17th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs, 2005. – IEEE, 2005. – С. 283-286.