

Сравнительный анализ характеристик переключения дрейфовых диодов с резким восстановлением на основе кремния и карбида кремния

С. А. Шевченко¹, Б. В. Иванов², А. А. Смирнов³, Ле Дык Зуй⁴ (студ.)

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

¹sashevchenko@etu.ru, ²bvivanov@etu.ru, ³aasmirmov@etu.ru, ⁴dykzuy.le@yandex.ru

Аннотация. Представлен сравнительный анализ зависимостей характеристик переключения дрейфовых диодов с резким восстановлением (ДДРВ) на основе кремния и карбида кремния. Показана сильная зависимость основных параметров процесса переключения 4H-SiC ДДРВ от величины вносимого в структуры заряда накачки. Проведено численное моделирование в среде Synopsys TCAD.

Ключевые слова: дрейфовый диод с резким восстановлением; карбид кремния; Synopsys Sentaurus TCAD

I. ВВЕДЕНИЕ

Сверхкороткие импульсы напряжения с пиковой мощностью от мегаватт до тераватт используются в целом ряде областей науки и техники: системы питания лазеров, ускорителей заряженных частиц и установках управляемого термоядерного синтеза, промышленных методах ионизации воздуха и очистки воды и т. д. Существует множество способов генерации мощных субнаносекундных импульсов. Одним из них является накопление энергии в индуктивных накопителях с последующей передачей накопленной энергии в нагрузку с помощью быстродействующего размыкающего ключа. В качестве подобных ключей могут выступать размыкатели на взрывающихся проводниках, плазменные прерыватели тока, тиратроны, игнитроны и т. д., однако их низкая надежность, малые частоты следования генерируемых импульсов, а также короткий срок службы определяют их недостатки перед твердотельными ключами.

На текущий момент хорошо зарекомендовал себя дрейфовый диод с резким восстановлением (ДДРВ), который был создан в 80-х годах в ЛФТИ им. Иоффе [1]. Кремниевые дрейфовые диоды с резким восстановлением обеспечивают коммутацию напряжений киловольтового диапазона за сотни пикосекунд и единицы наносекунд при плотности коммутируемого тока J не превышающей $1 \text{ кА} \cdot \text{см}^{-2}$. Перспективной альтернативой основному материалу электроники – кремнию – выступает карбид кремния 4H-политипа, имея большие, чем в кремнии, ширину запрещенной зоны, критическую напряженность поля пробоя и насыщенные дрейфовые скорости

носителей. Так, карбид-кремниевые ДДРВ могут переключаться существенно быстрее кремниевых [2-3], однако на сегодняшний день практически не представлено сравнительных исследований зависимости основных характеристик переключения ДДРВ на основе кремния и карбида кремния от условий ввода заряда неосновных носителей, который предусматривает режим их работы.

II. МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчет процессов переключения структур диодов проводился в среде численного моделирования Synopsys Sentaurus TCAD в диффузионно-дрейфовом приближении при учете эффектов сильного легирования, сильной инжекции и лавинной генерации. Схема включения диода состояла из последовательно соединенных источника напряжения, испытываемого диода и нагрузки 50 Ом. В каждую структуру током $J \approx J_0$ вносился заряд Q_+ , составлявший доли от Q_+^{max} , при этом варьировалась длительность накачки t_p . Типовой вид переходных процессов в описанной схеме приведен на рис. 1.

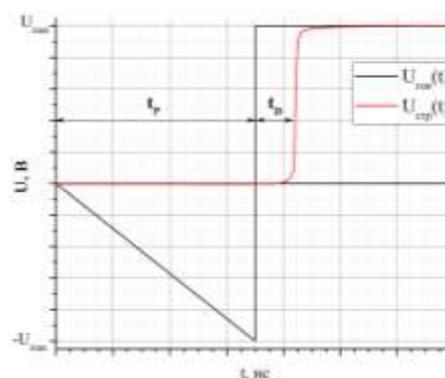


Рис. 1. Типовой вид переходного процесса на структуре и на источнике

На рис. 1 t_p – время накачки структуры, t_D – длительность вывода заряда Q_- , накопленного в базе. Черная кривая – напряжение на источнике, красная – на ДДРВ.

На основании методик приближенных оценок оптимальных параметров ДДРВ, представленных в [6], были рассчитаны параметры структур кремниевых и карбид-кремниевых диодов с различными напряжениями переключения. Применение методики, изложенной в [7], позволило оценить максимальные заряды неосновных носителей, запасаемых в слоях структур при их накачке током заданной плотности J . Параметры структур диодов и максимальные запасаемые в их слоях заряды приведены в таблице, где Q_+^{max} – полный заряд, запасаемых во всех слоях структуры, а Q_-^{max} – заряд, запасаемый в слаболегированной базе и определяющий длительность задержки перед переключениям диода.

ТАБЛИЦА I ПАРАМЕТРЫ СТРУКТУР ДИОДОВ, ПРИБЛИЖЕННЫЕ К ОПТИМАЛЬНЫМ

Параметр	Si, 500 В	Si, 1000 В	4H-SiC, 1000 В	4H-SiC, 1800 В	4H-SiC, 3000 В
W , мкм	43	88	12	18	28
N , см ⁻³	$8 \cdot 10^{14}$	$2 \cdot 10^{14}$	$8 \cdot 10^{15}$	$5 \cdot 10^{15}$	$2,5 \cdot 10^{15}$
S , см ²	1,6	7,6	0,3	0,8	2
J_D , кА·см ⁻²	0,625	0,3	13	8	4
Q_+^{max} , нКл	2300	13000	383	1567	3147
Q_-^{max} , нКл	2117	13047	171	881	1900

Параметры p^+ - и n^+ -эмиттеров в структурах (уровни их легирования и толщины) были выбраны идентичными с целью упрощения процесса моделирования ($W_p = 5$ мкм, $N_p = 10^{19}$ см⁻³, $W_n = 500$ мкм, $N_D = 10^{19}$ см⁻³).

III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчетов приведены на рис. 2–3. Сравнение основных характеристик переключения кремниевых и 4H-SiC ДДРВ показывает, что средняя скорость коммутации 4H-SiC диодами сильно зависит от величины переключаемого структурой напряжения. Карбид-кремниевые ДДРВ имеют существенное преимущество перед кремнием по максимальной скорости переключения: структура с напряжением переключения 3000 В при коммутации имеет участки на фронте со скоростью нарастания напряжения более 2,5 В/пс, что существенно превосходит тот же параметр у кремниевых ДДРВ. Видно также, что зависимости скорости переключения карбид-кремниевых диодов от величины внесенного заряда имеют минимумы при $Q_+/Q_+^{max} \approx 10\%$, тогда как диапазон максимальных скоростей приходится на $Q_+/Q_+^{max} \approx 40 - 70\%$. Скорости переключения кремниевых структур остаются практически неизменными во всем диапазоне вносимых зарядов Q_+ .

По приведенным на рис. 3 данным видно, что кремниевые и карбид-кремниевые структуры обнаруживают сходный характер зависимостей от введенного в диоды заряда Q_+ величины выведенного заряда Q_- при малых величинах вносимого заряда.

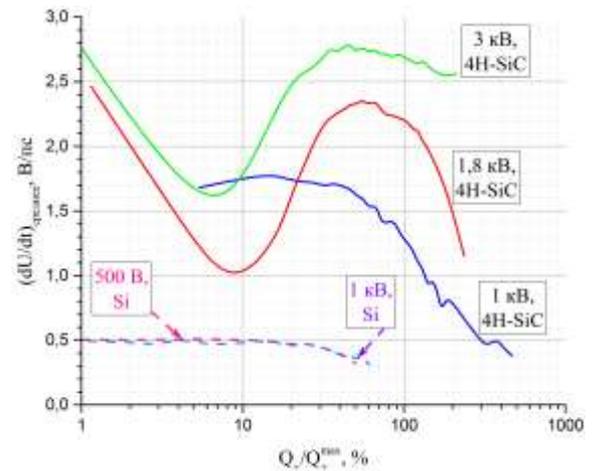


Рис. 2. Зависимость средней скорости переключения диодных структур от величины введенного в диод заряда Q_+

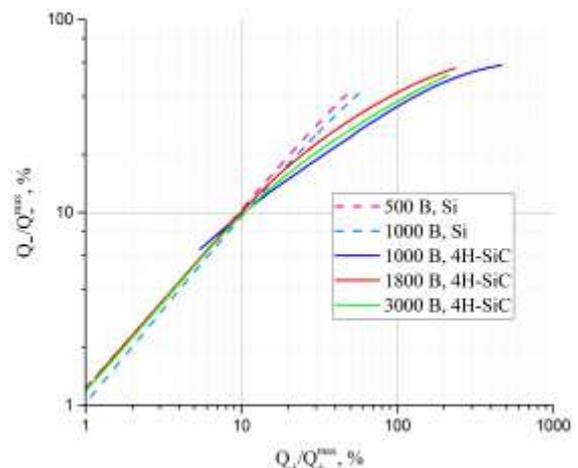


Рис. 3. Зависимость величины выведенного из базы заряда Q_- , отнесенного к максимальному накапливаемому в базе заряду Q_+^{max} , от отношения Q_+/Q_+^{max}

Нелинейность указанной зависимости у 4H-SiC диодов указывает на наличие в структурах потерь накопленного заряда, тогда как сходство линейных участков у кремниевых и карбид-кремниевых структур в области малых внесенных зарядов указывает на сходство механизмов накопления.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показывает следующее. Большие, чем у 4H-SiC ДДРВ, толщины базовых слоев в кремниевых структурах приводят к большим значениям максимальных запасаемых в структурах зарядов Q_+^{max} . При $Q_+/Q_+^{max} > 40\%$ скорость переключения 4H-SiC диодов падает вследствие накопления неосновных носителей в эмиттерных слоях структур, тогда как в кремнии этот параметр остается постоянным во всем диапазоне Q_+ . Тем не менее, во всем диапазоне вносимых зарядов скорость переключения кремниевых структур оказывается значительно ниже, чем у 4H-SiC ДДРВ, что демонстрирует преимущество таких диодов перед кремниевыми аналогами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Грехов И.В., Месяц Г.А. Полупроводниковые наносекундные диоды для размыкания больших токов // Успехи физических наук. 2005. Т. 175. № 7. С. 735–744.
- [2] Грехов И.В. О возможности создания диода со сверхрезким восстановлением запирающих свойств на основе карбида кремния / И.В. Грехов, П.А. Иванов, А.О. Константинов, Т.П. Самсонова // ПЖТФ. 2001. Т. 28. Вып. 13. С. 24–29.
- [3] Иванов П.А. Динамические характеристики дрейфовых диодов с резким восстановлением на основе 4H-SiC / П.А. Иванов, О.И. Коньков, Т.П. Самсонова, А.С. Потапов, И.В. Грехов // ФТП, 2015. Т.49. В.11 С.1558-1562.
- [4] 10-kV 4H-SiC Drift Step Recovery Diodes (DSRDs) for Compact High-repetition Rate Nanosecond HV Pulse Generator / R. Sun, K. Zhang, W. Chen // Proc. 2020 32nd Int.Symp. on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSPD) Sept. 13-18, 2020, Vienna, Austria. <http://ieeexplore.ieee.org/document/9170132>
- [5] Мнацаканов Т.Т. О пределе инжектирующей способности кремниевых р⁺-п переходов, обусловленной влиянием фундаментальных физических эффектов / Т.Т. Мнацаканов, М.Е. Левинштейн, В.Б. Шуман, Б.М. Середин // ФТП, 2017. Т.51. В.6. С.830-834.
- [6] Смирнов А.А. Карбидокремниевые размыкатели тока и генераторы субнаносекундных импульсов на их основе: дис. ... канд. техн. наук / СПб: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 140 С.
- [7] Shevchenko S.A., Ivanov B.V., Smirnov A.A., Luchinin V.V., Piyin V.A., Afanasyev A.V. On Approximate Estimation of Emitters Injection Ability Limit in p-i-n Structures // Proc. 2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2019) <http://ieeexplore.ieee.org/document/8982301> (дата обращения 11.12.2020).