

**А.В. Афанасьев, С.С. Борисенко, Б.В. Иванов, В.А. Ильин,  
А.Ф. Кардо-Сысоев, В.В. Лучинин, К.А. Сергушичев, А.А. Смирнов**  
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

## **Трехкиловольтный генератор наносекундных импульсов напряжения на 4H-SiC-диодных сборках**

*Представлены экспериментальные результаты исследования процесса переключения высоковольтных диодныхборок на основе 4H-SiC дрейфовых диодов с резким восстановлением (ДДРВ). Разработанные сборки используются в качестве коммутаторов размыкающего типа в составе генераторов сверхкоротких импульсов напряжения (СКИН). Сборка из трех структур ДДРВ в схеме генератора позволила сформировать на нагрузке 50 Ом импульсы напряжения амплитудой 3 кВ и длительностью на полувывоте 3 нс. Величина максимального обратного напряжения, полученная в статическом режиме дляборок из десяти 4H-SiC - ДДРВ, каждый из которых рассчитан на пробивное напряжение 1000 В, составила 10,5 кВ.*

**Ключевые слова:** дрейфовый диод с резким восстановлением (ДДРВ), карбид кремния, генератор наносекундных импульсов, высоковольтная диодная сборка

### **Введение**

Высоковольтные генераторы СКИН являются основой систем сверхширокополосной (СШП) радиолокации, связи, импульсной интроскопии и томографии, широко применяются в лазерной технике и технике физического эксперимента. Использование дрейфовых диодов с резким восстановлением (ДДРВ) в генераторах в качестве быстродействующих коммутаторов размыкающего типа позволяет формировать сверхкороткие импульсы напряжения амплитудой от сотен вольт до десятков киловольт с частотой повторения до сотен килогерц [1]. Используемые в настоящее время ДДРВ-прерыватели на основе кремния обеспечивают скорость переключения  $dU/dt \leq 10^3$  В/нс на одном  $p$ - $n$ -переходе. В [2 - 4] было экспериментально установлено, что аналогичные диоды на основе карбида кремния политипа 4H обеспечивают в 2–3 раза более высокие скорости переключения по сравнению с кремниевыми коммутаторами. Дальнейшее увеличение скорости нарастания напряжения и величины коммутируемого напряжения возможно за счет увеличения числа отдельных диодных структур в интегрированном прерывателе. К моменту постановки данной работы экспериментальных исследований характеристик динамического режима 4H-SiC-диодныхборок (в структуре схемы генератора) не проводилось. В частности, не исследовался вопрос одновременности обрыва тока отдельных карбидокремниевых диодов в сборке. В настоящей работе приводится краткое описание технологического маршрута изготовления диодного коммутатора из отдельных 4H-SiC-элементов и характеристика работы диодныхборок в статическом и динамическом (переключение структуры из состояния с высокой проводимостью в состояние с высоким сопротивлением) режимах.

Основными элементами при создании высоковольтных диодныхборок являлись 2 типа 4H-SiC-ДДРВ, представляющие собой мезаэпитаксиальные структуры  $p^+$ - $p$ - $n^+$ -типа с

$p$ -базой толщиной 15 мкм и 18 мкм, уровнями легирования алюминием  $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и  $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  соответственно. Толщина сильнолегированного  $p^+$ -слоя составляла 5 мкм с концентрацией акцепторов  $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Толщина  $n^+$ -подложки – 350 мкм с концентрацией доноров азота  $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  и удельным сопротивлением 0, 026 Ом·см. Первый тип ДДРВ характеризовался максимальным коммутируемым напряжением 1000 В и диаметром мезаструктуры 1100 мкм, второй тип ДДРВ – на 1500 В с длиной стороны квадратной мезаструктуры 2380 мкм. Оптимизация структур диодов проводилась с помощью пакета TCAD Synopsys. При моделировании учитывались эффекты неполной ионизации примесей, высокого уровня инжекции, сильного легирования и лавинной генерации.

Технологический процесс создания диодных сборок из отдельных карбидокремниевых ДДРВ-чипов заключался в следующем. На первом этапе создавалась так называемая базовая структура путем приклеивания при помощи высокотемпературного компаунда поликоровой прокладки к диодной структуре. На втором этапе производилась посадка и фиксация базовой структуры на медную шайбу, служащую основанием диодной сборки. Затем осуществлялись соединение чипов в сборку и установка верхнего выводного контакта (при помощи проводящего эпоксидного клея). Завершающей операцией изготовления высоковольтной диодной сборки являлась герметизация высокотемпературным силиконовым компаундом П-727. В целях предотвращения поверхностного пробоя базовых структур периферийные области диодов покрывались высокотемпературным полиимидом типа Durimid 115А (производство Fuji, Япония).

Перед исследованием работы диодныхборок в динамическом режиме (в структуре схемы генератора) проводились измерения прямой и обратной ветвей вольтамперной характеристики и оценивалось максимальное обратное напряжение, которое может выдержать диодная сборка.

Схема генератора наносекундных импульсов для исследования работы высоковольтных карбидокремниевых диодныхборок в динамическом режиме представлена на рис.1. На вход схемы от внешнего генератора подается импульс запуска амплитудой 5 В, длительность  $T$  которого определяет время накачки диода в прямом направлении. В момент прихода запускающего импульса, происходит замыкание транзисторного ключа и конденсатор  $C1$  частично разряжается и осуществляется накачка ДДРВ (диода  $D1$ ) прямым током. По окончании импульса запуска транзисторный ключ размыкается и в цепи происходит перезарядка с периодом колебаний, определяемым индуктивностью  $L3$  и емкостью  $C1$ . Катушка индуктивности  $L3$  накапливает энергию, определяемую обратным током, текущим через ДДРВ. При этом происходит вынос заряда из диода и в момент, когда заряд  $Q1$ , внесенный в диод на этапе накачки прямым током, станет равным вынесенному заряду  $Q2$  на этапе накачки обратным током, ДДРВ резко переходит в запертое состояние и на нагрузке  $R_{нагр}$  формируется импульс напряжения.

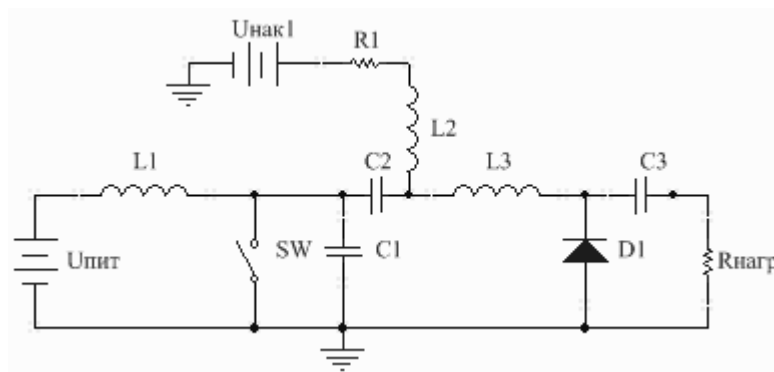


Рисунок 1

### Результаты измерений

Экспериментальное исследование переключения диодных сборок проводилось в структуре генератора наносекундных импульсов на специализированном стенде. Выходные импульсы на нагрузке 50 Ом регистрировались цифровым стробоскопическим осциллографом Tektronix DSA8300 с полосой пропускания 20 ГГц. Для ослабления сигнала использовались высоковольтные СВЧ аттенюаторы 142-NMFP-26 (производства Barth Electronics) с суммарным коэффициентом передачи в тракте -86 дБ. Максимальное входное напряжение, на которое рассчитаны аттенюаторы, составляет 2,5 кВ, что ограничило пределы измерений амплитуды выходных импульсов генератора.

На рис. 2 представлена экспериментальная осциллограмма выходного импульса генератора с использованием в качестве коммутатора диодной сборки из двух диодов первого типа. Параметры импульса: амплитуда 2010 В, длительность на полуширине 3 нс, передний фронт по уровню 0,1...0,9 составляет 1,2 нс. Импульсная мощность, выделяемая на нагрузке 50 Ом, составляет  $P_{\text{имп}} = U^2/R = 80,8$  кВт.

При использовании в качестве коммутатора диодной сборки из двух диодов второго тип на нагрузке был сформирован импульс напряжения, осциллограмма которого изображена на рис. 3. Параметры полученного импульса: амплитуда 2920 В, длительность на полуширине 3 нс, передний фронт по уровню 0,1...0,9 составляет 1,4 нс. Импульсная мощность, выделяемая на нагрузке 50 Ом, составляет  $P_{\text{имп}} = U^2/R = 170,5$  кВт.

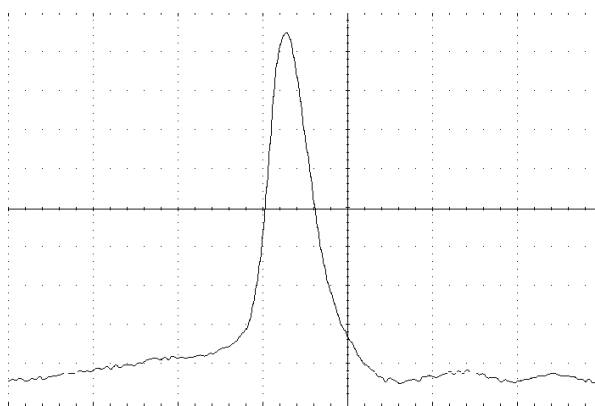


Рисунок 2. Осциллограмма напряжения на нагрузке 50 Ом: по оси абсцисс 5 нс/дел, по оси ординат 240 В/дел.

Полученное значение формируемого импульса напряжения на нагрузке превышает паспортное максимальное входное напряжение аттенюатора на 14 %, что при дальнейшем увеличении коммутируемого напряжения диодных сборок из двух структур второго типа могло привести к выходу измерительной аппаратуры из строя. Однако, проведенные статические измерения диодной сборки с целью определения фактического максимального напряжения, которое может быть приложено к сборке из двух чипов показали, что данная сборка способна выдержать максимальное обратное напряжение, равное 3280 В. При характеристизации в статическом режиме сборки из десяти диодных структур первого типа (каждая из которых рассчитана на 1000 В) работоспособность сборки была зафиксирована вплоть до величины приложенного обратного напряжения, равного 10500 В. Таким образом, экспериментально была подтверждена возможность увеличения переключаемого диодной сборкой напряжения пропорционально числу диодных элементов.

### Заключение

Впервые экспериментально исследована возможность работы диодной сборки, состоящего из отдельных карбидокремниевых ДДРВ-структур, как в статическом, так и в динамическом режимах (в структуре генератора наносекундных импульсов напряжения).

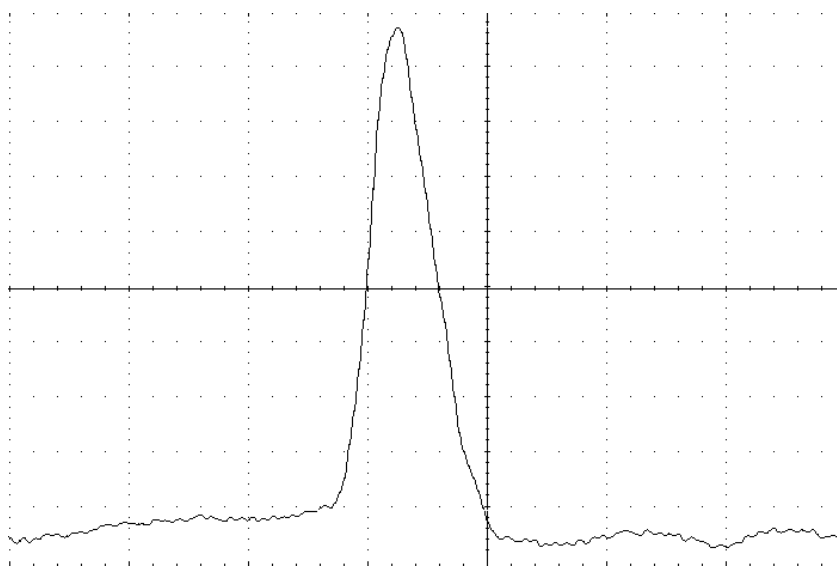


Рисунок 3. Осциллограмма напряжения на нагрузке 50 Ом: по оси абсцисс 5 нс/дел, по оси ординат 340 В/дел.

Показано, что при последовательной коммутации отдельных карбидокремниевых диодных структур в высоковольтную сборку пропорционально возрастает переключаемое им напряжение. Так, для сборки, состоящей из двух ДДРВ-структур второго типа, каждая из которых рассчитана на предельное напряжение 1500В, максимальное коммутируемое напряжение в динамическом режиме составило 2920 В, которое ограничено возможностями измерительного оборудования на момент проведения эксперимента и не связано с предельными возможностями диодныхборок. В статическом режиме данная сборка выдержала приложенное обратное напряжение величиной 3280 В. Сборка, состоящая из десяти структур первого типа (каждая из которых рассчитана на

максимальное напряжение 1000 В), характеризовалась максимальным обратным напряжением величиной 10500 В.

#### Библиографический список

1. I.V. Grekhov and G. A. Mesyats, "Nanosecond semiconductor diodes for pulsed power switching," *Phys.-Usp.*, vol. 48, no. 7, pp. 703–712, 2005.
2. А.В. Афанасьев, Б.В. Иванов, В.А. Ильин, А.Ф. Кардо-Сысоев, В.В. Лучинин, Ф.Б.Серков. Дрейфовые диоды с резким восстановлением на основе карбида кремния. Сборник трудов Всероссийской конференции «Микроэлектроника СВЧ». Санкт-Петербург, СПбГЭТУ. 2012. С.260 - 262.
3. V. Afanasyev, B. V. Ivanov, V. A. Ilyin, A. F. Kardo-Sysoev, M. A. Kuznetsova, V. V. Luchinin. «Superfast drift step recovery diodes (DSRDs) and vacuum field emission diodes based on 4H-SiC»// *Materials Science Forum Vols. 740-742 (2013) pp 1010-1013.*
4. А.В. Афанасьев, Ю.А. Демин, Б.В. Иванов, В.А. Ильин, А.Ф. Кардо-Сысоев, В.В., В.В. Лучинин, А.А.Смирнов. Высоковольтный миниатюрный карбидокремниевый источник наносекундных импульсов для генерации рентгеновского и микроволнового излучений// *Нано- и микросистемная техника. 2013. №2. С.30 - 32.*