

waves, radar and wireless communications, Warszawa, 17–21 May 2004. Vol. 1 // Telecommunications Research Institute. Poland, Warsaw, 2004. P. 27–38.

5. On the class-F power amplifier design / P. Colantoni, F. Giannini, G. Leuzzi, E. Limiti // Intern. J. of RF and microwave computer-aided engineering. 1999. Vol. 9, № 2. P. 129–149.

6. Scott T. Tuned power amplifiers // IEEE Trans. on circuit theory. 1964. Vol. CT-11, № 3. P. 385–388.

7. Behaviors of class-F and class-F¹ amplifiers / J. Moon, S. Jee, J. Kim et al. // IEEE Trans. on microw. theory and tech. 2012. Vol. MTT-60, № 6. P. 1937–1951.

8. Ефимович А. П., Крыжановский В. Г. Исследование энергетических характеристик насыщенного усилителя класса F // Радиотехника: всеукр. межвед. науч.-техн. сб. / ХНУРЭ. Харьков, 2014. № 178. С. 84–92.

A. P. Yefymovych

Donetsk national university

The method of calculating saturated class-F amplifier

The proposed method of calculating the saturated class-F amplifier. The determined values of the cut-off angles at which can be realized this amplifier. It is shown that a saturated class-F amplifier can be realized in high cut-off angle range than an unsaturated class-F amplifier.

Class-F amplifier, drain efficiency, output power, saturation of transistor

Статья поступила в редакцию 4 мая 2015 г.

УДК 621.373.5

А. В. Афанасьев, Ю. А. Демин, Б. В. Иванов, В. А. Ильин,
В. В. Лучинин, К. А. Сергушичев, А. А. Смирнов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ"
А. Ф. Кардо-Сысоев
Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН

Мегаваттный генератор наносекундных импульсов на основе карбидокремниевых дрейфовых диодов с резким восстановлением

Представлены экспериментальные результаты исследования коммутационных характеристик высоковольтных карбидокремниевых коммутаторов на основе дрейфовых диодов с резким восстановлением (ДДРВ) и разработанного на их основе генератора наносекундных импульсов напряжения с мегаваттной импульсной мощностью. Впервые показана возможность последовательной компрессии энергии включенными параллельно кремниевым и карбидокремниевым каскадами ДДРВ.

Карбид кремния, дрейфовые диоды с резким восстановлением, наносекундные импульсы напряжения, высоковольтные диодные сборки

Высоковольтные генераторы сверхкоротких импульсов напряжения широко применяются в локационной, лазерной, преобразовательной техни-

ке, экспериментальной физике и импульсной интроскопии. Использование дрейфовых диодов с резким восстановлением (ДДРВ) в генераторах в

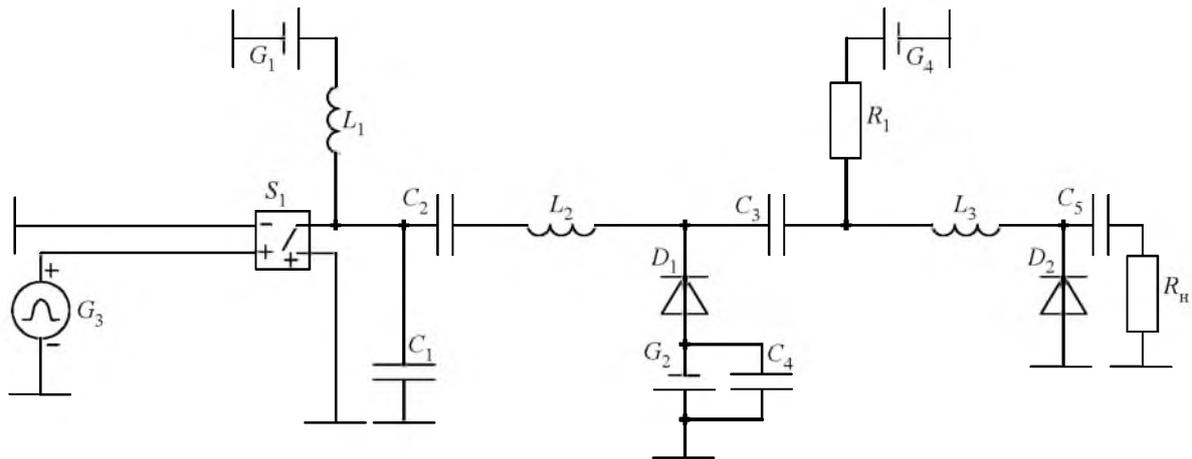


Рис. 1

качестве быстродействующих коммутаторов размыкающего типа позволяет формировать сверхкороткие импульсы напряжения амплитудой от сотен вольт до десятков киловольт с частотой повторения до сотен килогерц [1]. Широко используемые в настоящее время кремниевые ДДРВ-прерыватели тока обеспечивают скорость переключения $dU/dt \leq 10^3$ В/нс на одном $p-n$ -переходе. В [2], [3] экспериментально установлено, что аналогичные одиночные диодные структуры на основе карбида кремния SiC политипа 4H могут переключаться в 2–3 раза быстрее. Возможность последовательной коммутации карбидокремниевых дрефовых диодов с режимом восстановления (4H-SiC-ДДРВ) в высоковольтную сборку впервые была показана в работе [4], где сообщалось о создании генератора на основе карбидокремниевых ДДРВ-коммутатора, состоящего из двух диодных структур и формирующего трехкиловольтный импульс напряжения длительностью 3 нс. Дальнейшее улучшение амплитудно-временных параметров связано с созданием более совершенных высоковольтных 4H-SiC-диодных сборок, с оптимизацией структуры диодов и с использованием схемы последовательной компрессии энергии за счет введения дополнительного каскада сжатия на основе ДДРВ-коммутатора.

В настоящей статье представлено объединение карбидокремниевых ДДРВ в высоковольтную диодную сборку, приведены результаты исследования вольт-амперных, вольт-фарадных и коммутационных характеристик диодных 4H-SiC-сборок, а также схема генератора наносекундных импульсов на их основе.

Экспериментальная часть. Как известно [5], для повышения импульсной мощности и уменьшения длительности импульсов, формируемых генераторами, необходимо использовать схемы

последовательного сжатия энергии. Для этого в схеме генератора предусматривают несколько ДДРВ-коммутаторов, включенных параллельно. Значения переключаемого коммутатором напряжения и плотности обрываемого им тока по мере приближения к нагрузке увеличиваются. В настоящей статье использована двухкаскадная схема компрессии, первый каскад сжатия которой содержит кремниевый ДДРВ-коммутатор, второй каскад – коммутатор на основе карбида кремния. Выбор данной схемы генератора основан на том, что кремниевые ДДРВ позволяют работать при значительно большем времени накачки, чем 4H-SiC-ДДРВ, и отличаются меньшими потерями заряда, что определяет общий КПД генератора. Кроме того, к первому каскаду не предъявляются жесткие требования по временным параметрам импульсов напряжения, инжектирующих носители заряда.

Моделирование в схемотехнической программе MicroCap показало возможность последовательной компрессии энергии при использовании кремниевых и карбидокремниевых размыкателей тока. На рис. 1 представлена электрическая схема, содержащая кремниевый ДДРВ-коммутатор D_1 и 4H-SiC-ДДРВ-коммутатор D_2 .

Для уточнения параметров схемы, а также для выбора оптимальных площадей и количества необходимых диодных структур в высоковольтных сборках было проведено моделирование в пакете TCAD Synopsys с использованием физико-топологических моделей диодов. Принцип работы схемы аналогичен описанному в [4]. В момент прихода управляющего импульса от задающего генератора G_3 открывается транзисторный ключ S_1 , через первый (D_1) и второй (D_2) каскады ДДРВ протекает прямой ток, который "накачивает" элек-

тронно-дырочной плазмой кремниевый и карбидокремниевый коммутаторы. По окончании импульса транзисторный ключ S_1 закрывается, в результате чего меняется полярность напряжения на D_1 и D_2 , их сопротивления резко возрастают, ток прерывается, а на нагрузке R_H формируется импульс напряжения. Для выбора оптимального режима накачки диодных коммутаторов D_1 и D_2 рассмотрены источники смещения G_2 и G_4 , которые позволяют регулировать заряд, вводимый в диоды на этапе протекания через них прямого тока, а также обеспечивают напряжение на карбидокремниевых диодных структурах, достаточное для открытия p - n -переходов.

Кремниевые диодные сборки изготовлены в ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН. Карбидокремниевые диодные сборки собирались из 4H-SiC-ДДРВ-чипов, выполненных на основе эпитаксиальной структуры p^+p-n^+ -типа с p -базой толщиной 15 мкм и уровнем легирования алюминием $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Толщина сильнолегированного p^+ -слоя составляла 2 мкм с концентрацией акцепторов $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Толщина n^+ -подложки – 350 мкм с концентрацией доноров азота $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и удельным сопротивлением 0.026 Ом·см. Площадь рабочей области ДДРВ равнялась 4 мм² и имела защиту мезоструктурой. Оптимизация структур 4H-SiC-диодов проводилась с помощью пакета TCAD Synopsys. При моделировании учитывались эффекты неполной ионизации примесей, высокого уровня инжекции, сильного легирования и лавинной генерации.

Вследствие технологического разброса характеристик изготовленных 4H-SiC-ДДРВ перед сборкой в высоковольтные блоки структуры проходили процедуру отбраковки на изготовленном измерительном стенде, позволяющем определять амплитудно-временные параметры карбидокремниевых ДДРВ. Экспериментально установлен допустимый разброс диодных структур по значению переключаемого напряжения и времени срабатывания (не более 5%), при котором обеспечивалось синхронное срабатывание одиночных кристаллов ДДРВ в высоковольтной сборке. Проведенные статические измерения одиночной диодной структуры показали, что напряжение открытия, максимальное обратное рабочее напряжение и значение емкости при нулевом смещении составили 2.6 В, 1.5 кВ и 57 пФ соответственно.

Технологический процесс создания высоковольтных диодныхборок из отдельных 4H-SiC-

ДДРВ заключался в следующем. На первом этапе необходимое количество ДДРВ-чипов склеивалось высокотемпературным электропроводящим двухкомпонентным компаундом с последующей сушкой при температуре 150 °С в течение 6 ч. На втором этапе полученная структура осаживалась на медную шайбу, служащую основанием диодной сборки. Затем устанавливался верхний выводной контакт из медной фольги. Завершающей операцией изготовления высоковольтной 4H-SiC-диодной сборки являлась герметизация высокотемпературным компаундом.

Перед исследованием работы диодныхборок в динамическом режиме (в структуре схемы генератора) измерялись вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики. Напряжение открытия и максимальное обратное рабочее напряжение высоковольтной сборки из пяти 4H-SiC-ДДРВ составили 13.4 В и 7.5 кВ соответственно. Измеренное значение емкости сборки при нулевом смещении составило 285 пФ. Полученные результаты статических измерений диодныхборок показывают пропорциональность значений их параметров числу соединенных структур, что свидетельствует об отсутствии паразитных активных и реактивных сопротивлений при последовательной коммутации чипов в диодные сборки с использованием разработанной технологии.

Экспериментальное исследование переключения диодныхборок проводилось в структуре генератора наносекундных импульсов. Выходные импульсы на нагрузке 50 Ом регистрировались цифровым стробоскопическим осциллографом Tektronix DSA8300 с полосой пропускания 20 ГГц. Для ослабления сигнала использовались высоковольтные СВЧ-аттенюаторы 2237-HFNF и 142-NMFP-26 (производства Barth Electronics) с суммарным коэффициентом передачи в тракте –98 дБ. На рис. 2 представлена осциллограмма выходного импульса генератора.

Параметры импульса: амплитуда 7.5 кВ, длительность на полуширине 2.2 нс, передний фронт по уровню 0.1...0.9 составляет 970 пс. Импульсная мощность, выделяемая на нагрузке 50 Ом, составляет $P_{\text{имп}} = U^2/R = 1.125 \text{ МВт}$.

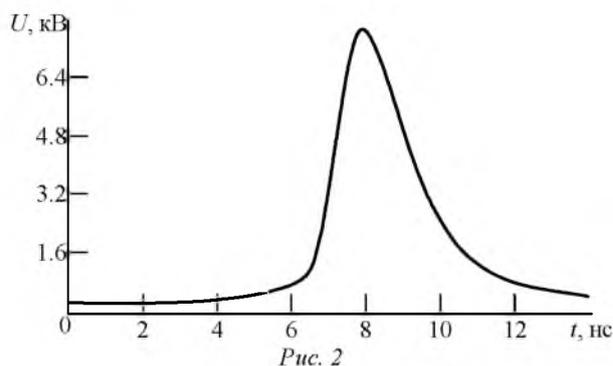
Следует учитывать, что аттенюаторы и осциллограф имеют конечные значения переходных характеристик, равные 150 и 40 пс соответственно. Используя известную формулу [6] для суммарной переходной характеристики:

$$\tau_{\text{изм}} = \sqrt{\tau_{\text{ат}}^2 + \tau_{\text{ист}}^2}$$

($\tau_{\text{изм}}$ – измеряемое время; $\tau_{\text{ат}}$ – время установления аттенуаторов; $\tau_{\text{ист}}$ – истинное значение фронта импульса), получим, что длительность переднего фронта импульса, изображенного на рис. 2, составляет 951 пс.

Отдельно проверена возможность синхронного срабатывания карбидокремниевых диодных сборок, работающих на общую нагрузку, т. е. их распараллеливание. Для этого в выходной каскад генератора устанавливалась дополнительная сборка, также содержащая пять 4H-SiC-ДДРВ структур. В результате в 2 раза снизилась плотность тока, протекающего через каждую сборку, вследствие чего уменьшился пьедестал импульса, формируемого на нагрузке. Однако передний фронт импульса не изменился, что свидетельствует об отсутствии "затягивания" фронта из-за возможной несинхронности срабатывания каждой изборок. Полученный результат свидетельствует о возможности уменьшения, при необходимости, удельной коммутируемой мощности 4H-SiC-сборки без ухудшения амплитудно-временных параметров формируемого на нагрузке импульса.

Представленные результаты исследований статических и динамических характеристик высоковольтных 4H-SiC-ДДРВборок свидетельствуют о



синхронности срабатывания одиночных диодных структур в сборке и об отсутствии паразитных активных и реактивных сопротивлений при последовательной коммутации чипов по разработанной технологии. Впервые показана возможность последовательной компрессии энергии включенными параллельно кремниевым и карбидокремниевым высоковольтными диодными коммутаторами в структуре генератора, формирующего наносекундные импульсы напряжения амплитудой пиковой мощности свыше 1 МВт. При исследовании параллельно соединенных ДДРВ-борок с общей цепью коммутации установлено их синхронное срабатывание, что позволяет производить масштабирование коммутируемой мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Grekhov I. V., Mesyats G. A. Nanosecond semiconductor diodes for pulsed power switching // *Phys.-Usp.* 2005. Vol. 48, № 7. P. 703–712.
2. Дрейфовые диоды с резким восстановлением на основе карбида кремния / А. В. Афанасьев, Б. В. Иванов, В. А. Ильин и др. // *Микроэлектроника СВЧ: Всерос. конф., СПб., 4–7 июня 2012.* СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2012. С. 260–262.
3. Высоковольтный миниатюрный карбидокремниевый источник наносекундных импульсов для генерации рентгеновского и микроволнового излучений / А. В. Афанасьев, А. Ф. Кардо-Сысоев, А. А. Смирнов и др. // *Нано- и микросистемная техника.* 2013. № 2. С. 30–32.
4. Трехкиловольтный генератор наносекундных импульсов напряжения на 4H-SiC-диодных сборках / А. В. Афанасьев, С. С. Борисенко, А. А. Смирнов и др. // *Электроника и микроэлектроника СВЧ: III Всерос. науч.-техн. конф., СПб., 2–5 июня 2014.* СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2014. С. 407–412.
5. Kardo-Sysoev A. F. New power semiconductor devices for generation of nano- and subnanosecond pulses // *Ultra-wideband radar technology / ed. by J. D. Taylor.* London: CRC Press, 2000. P. 205–290.
6. Грехов И. В., Ефанов В. М., Кардо-Сысоев А. Ф. Мощный полупроводниковый генератор пикосекундных импульсов // *Приборы и техника эксперимента.* 1984. Т. 5, № 5. С. 93–93.

A. V. Afanasiev, Ju. A. Demin, B. V. Ivanov, V. A. Ilin, V. V. Luchinin, K. A. Serguibchev, A. A. Smirnov
Saint Petersburg state electrotechnical university "LETI"

A. F. Kardo-Sysoev
Ioffe institute of RAS (Saint Petersburg)

Megawatt generator of nanosecond impulses on the basis of carbide-silicon drift diodes with sharp restoration

Experimental results of research of switching characteristics of high-voltage carbide-silicon switchboards on the basis of drift diodes with sharp restoration (DDSR) and the generator of nanosecond voltage impulses developed on their basis with a megawatt pulse power are presented. Possibility of a consecutive compression of energy is for the first time shown by the DDSR cascades which are switched on parallel to silicon and carbide-silicon.

Silicon carbide, drift diodes with sharp restoration, nanosecond voltage impulses, high-voltage diode assemblies

Статья поступила в редакцию 9 июня 2014 г.