

**А.В. Афанасьев¹, Б.В. Иванов¹, В.А. Ильин¹,
А.Ф. Кардо-Сысоев², В.В. Лучинин¹, А.А. Смирнов¹.**

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук, Санкт-Петербурга

Анализ эффективности 4H-SiC дрейфового диода с резким восстановлением в схеме генератора сверхкоротких импульсов

Представлены результаты моделирования и экспериментального исследования энергетической эффективности генератора наносекундных импульсов на основе карбидокремниевого дрейфового диода с резким восстановлением (ДДРВ) в качестве быстродействующего размыкающего ключа. Проведен анализ потерь в каждом из двух каскадов временной компрессии энергии генератора СКИ – в MOSFET транзисторном ключе и 4H-SiC-ДДРВ-размыкателе. Результаты проведенных экспериментальных исследований сопоставлены с результатами компьютерного моделирования в программном пакете TCAD Synopsys и результатами аналогичных исследований энергетической эффективности генераторов СКИ на кремниевых ДДРВ.

Ключевые слова: дрейфовый диод с резким восстановлением (ДДРВ), транзисторный ключ, генератор наносекундных импульсов, карбид кремния.

Генераторы наносекундных и субнаносекундных импульсов являются основой для систем сверхширокополосной связи, радиолокации, импульсной интроскопии, томографии, применяются в лазерной технике и технике физического эксперимента. Использование в генераторах дрейфовых диодов с резким восстановлением в качестве быстродействующих ключей размыкающего типа позволяет формировать сверхкороткие импульсы напряжения амплитудой от сотен вольт до десятков киловольт с высокой частотой повторения [1]. Как известно, ДДРВ на основе кремния обеспечивают скорость переключения $dU/dt \sim 10^3$ В/нс на одном p - n -переходе, а диапазон частот повторения импульсов ограничивается допустимым уровнем средней коммутируемой мощности, определяемой максимальной рабочей температурой p - n -перехода ~ 150 °С.

В [2 - 5] было экспериментально установлено, что ДДРВ на основе карбида кремния, могут обеспечить более высокие (в 2 - 4 раза) скорости переключения и коммутацию токов с плотностью до $5 \cdot 10^3$ А/см². При этом, вследствие высоких (до 500 °С) рабочих температур 4H-SiC-диода и в 2 раза более высокой теплопроводности карбида кремния по сравнению с кремнием, можно добиться значительного выигрыша в удельных мощностных характеристиках генераторов СКИ. Однако, малые времена жизни неравновесных носителей заряда и более низкие, чем в Si, дрейфовые подвижности, неполная ионизация относительно глубоких легирующих примесей и связанная с ней низкая эффективность эмиттерных областей диода могут приводить к значительным потерям энергии при её последовательной компрессии в каскадах генератора СКИ.

К моменту постановки данной работы экспериментальных исследований энергоэффективности генераторов СКИ с карбидокремниевыми ДДРВ-ключами не проводилось. В настоящей работе приводятся результаты анализа потерь в генераторе СКИ на основе карбидокремниевых ключей в каждом из последовательных каскадов

сжатия энергии во времени – в первом каскаде с быстродействующим высоковольтным MOSFET-ключом и во втором – с изготовленными 4H-SiC-ДДРВ. Полученные экспериментальные данные сопоставляются с результатами моделирования в программном пакете TCAD Synopsys.

Исследования проводились в структуре схемы генератора наносекундных импульсов с индуктивным накопителем энергии и 4H-SiC ДДРВ в качестве размыкающего ключа (рис.1). В первоначальном состоянии конденсатор C_1 заряжен до напряжения источника питания $U_{пит}$. После замыкания транзисторного ключа от импульса задающего генератора конденсатор C_1 частично разряжается и происходит накачка ДДРВ (диода D_1) прямым током. На второй стадии ключ размыкается и в цепи происходит перезарядка с периодом колебаний, определяемым индуктивностью L_2 и емкостью транзисторного ключа C_{stray} . При этом катушка индуктивности L_2 накапливает протекающий через диод заряд и при достижении максимального тока происходит восстановление его обратного сопротивления и энергия, накопленная в L_2 , переходит в нагрузку R_1 , на которой формируется импульс напряжения. Для регулирования баланса зарядов в ДДРВ на участках прямого и обратного направлений протекания тока используется второй источник питания $U_{смещ}$. Он позволяет выбирать оптимальный момент обрыва тока ДДРВ, тем самым, улучшая параметры выходного импульса напряжения на сопротивлении нагрузки.

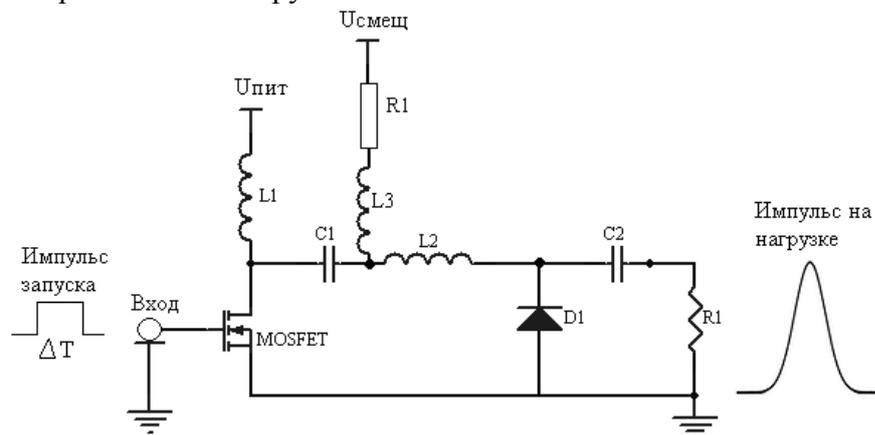


Рис. 1. Схема генератора с 4H-SiC ДДРВ в качестве размыкающего ключа.

В качестве размыкающего ключа использовался ДДРВ, рассчитанный на максимальное коммутуемое напряжение 1000 В и представляющий собой структуру $p^+ - p - n^+$ -типа с толщиной градиентно-легированной p -базы 9 мкм и уровнем легирования $1,4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. 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 $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Коэффициент полезного действия генератора в общем случае определяется как отношение энергии, потребленной от источника питания к энергии, выделенной на нагрузке 50 Ом:

$$\eta[\%] = \frac{E_{НАГР}}{E_{ПИТ}} \cdot 100, \quad (1)$$

где $E_{ПИТ}$ – энергия, отданная источником питания, $E_{НАГР}$ – энергия, выходного импульса. При этом энергию, потребляемую от источника питания можно рассматривать как сумму энергий потерь в транзисторном ключе, в диоде и выделяемую на нагрузке:

$$E_{ПИТ} = E_{MOSFET} + E_{ДДРВ} + E_{НАГР}, \quad (2)$$

где в свою очередь потери в транзисторном ключе при его коммутации:

$$E_{MOSFET} = \int U_C(t) I_{DRAIN}(t) dt, \quad (3)$$

в свою очередь потери в дрейфовом диоде с резким восстановлением:

$$E_{ДДРВ} = \int U_{ДДРВ}(t) I_{ДДРВ}(t) dt, \quad (4)$$

а энергия, рассеиваемая на нагрузке определяется как:

$$E_{НАГР} = \frac{1}{R_{НАГР}} \int |U_{НАГР}(t)|^2 dt. \quad (5)$$

При этом ток I_{DRAIN} , протекающий через MOSFET-ключ можно представить как разность токов:

$$I_{DRAIN}(t) = I_{L1}(t) - I_{ДДРВ}(t), \quad (6)$$

где $I_{L1}(t)$ – ток, источника питания, ограниченный величиной индуктивности L_1 .

$$I_{L1}(t) = \frac{1}{L_1} \int_0^t [U_{ПИТ} - U_C(\tau)] d\tau. \quad (7)$$

Экспериментальное определение эффективности схемы генератора проводилось следующим образом. В начальный момент времени с задающего генератора на транзисторный ключ подавался прямоугольный импульс с фронтом 5 нс и длительностью 60...80 нс, при этом время срабатывания самого MOSFET-ключа составляет порядка 4,5 нс. Напряжение питания $U_{ПИТ}$ менялось от 70 до 92 В. При помощи цифрового высокочастотного осциллографа с полосой пропускания 20 ГГц через высоковольтный СВЧ-аттенюатор снимались временные зависимости напряжения на стоке $U_C(t)$ транзисторного ключа, тока через структуру ДДРВ $I_{ДДРВ}(t)$ и напряжения на нагрузке $U_{НАГР}(t)$. После чего по формулам (1) - (7) производилась обработка данных.

На рис. 2 представлены экспериментальные зависимости амплитуды импульса $U_{ИМП}$ на нагрузке от времени накачки $T_{НАКАЧ}$ при фиксированных значениях напряжений питания (а) и зависимости энергии, выделенной на нагрузке от времени накачки $T_{НАКАЧ}$ и напряжения питания $U_{ПИТ}$ (б).

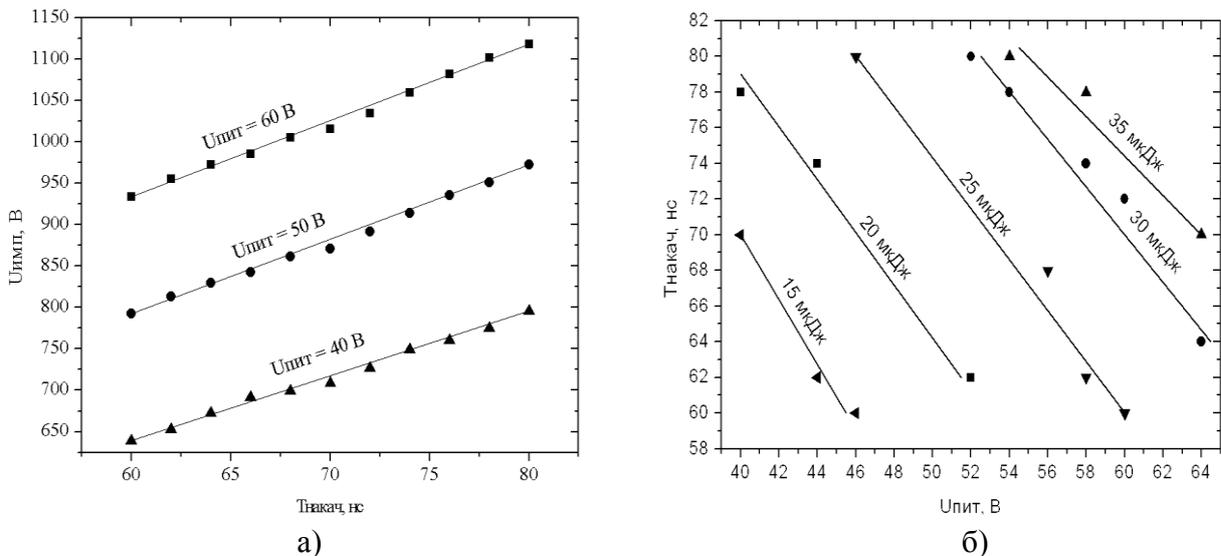


Рис. 2. Зависимости амплитуды импульса $U_{ИМП}$ на нагрузке 50 Ом от времени накачки $T_{НАКАЧ}$ при различных значениях напряжении питания (а) и энергии, выделенной на нагрузке от времени накачки $T_{НАКАЧ}$ и напряжения питания $U_{ПИТ}$ (б).

На рис. 3 показаны зависимости коммутационных потерь в MOSFET-ключе (а) и эффективность генератора СКИ (б) от времени накачки $T_{\text{накач}}$ и напряжения питания $U_{\text{пит}}$.

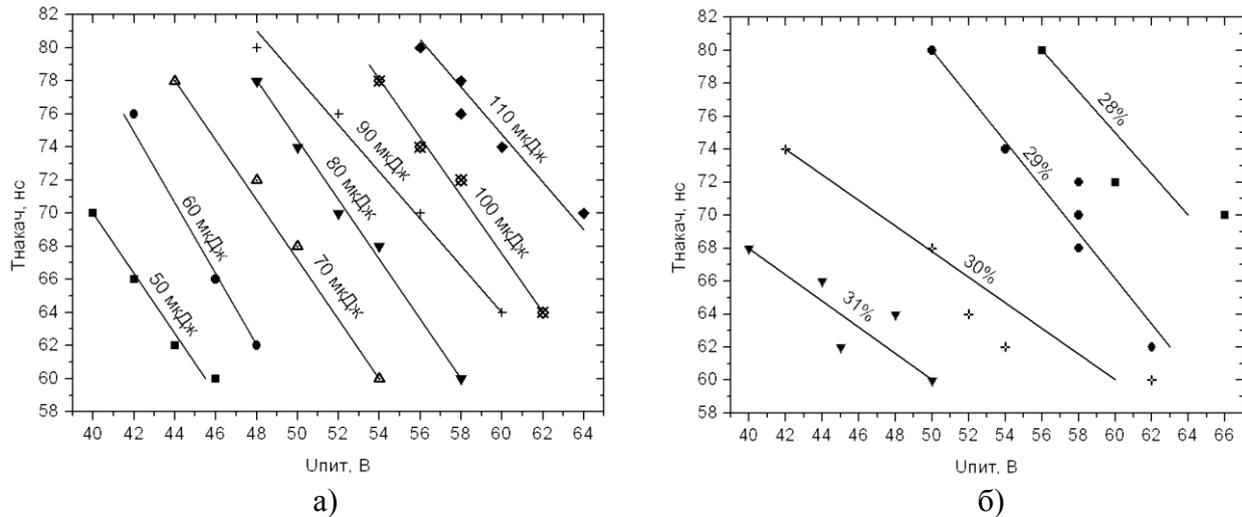


Рис. 3. Зависимости потерь в транзисторном ключе (а) и эффективности генератора от времени накачки $T_{\text{накач}}$ и напряжения питания $U_{\text{пит}}$ (б).

Из представленных зависимостей видно, что для повышения амплитуды и энергии импульса на нагрузке необходимо увеличивать время накачки диода и напряжение питания $U_{\text{пит}}$. Однако, при этом возрастают потери в самом ДДРВ и транзисторном ключе, что ведет к снижению общей эффективности схемы генератора.

Сопоставление полученных значений эффективности схемы генератора СКИ с 4Н-SiC ДДРВ в качестве размыкающего ключа с данными, приведенными в [6-8], показывает, что генератор СКИ с карбидокремниевым размыкателем менее эффективен (на $\sim 10\%$). Это может быть вызвано существенным влиянием эффекта потери заряда в 4Н-SiC при переключении.

Компьютерное моделирование схемы, приведенной на рис.1, проводилось в программном пакете TCAD Synopsys. Транзисторный ключ был представлен как неидеальный коммутационный элемент – учитывались сопротивление канала в открытом состоянии, паразитная емкость сток-исток, было принято во внимание время, которое затрачивается при переключении транзистора из открытого состояния в закрытое. Готовая SPICE-модель 4Н-SiC-ДДРВ отсутствует, поэтому при компьютерном анализе использовалась одномерная физическая модель дрейфового диода. При этом учитывались эффекты неполной ионизации примесей, сужение запрещенной зоны и лавинное умножение.

На рис. 4 изображены экспериментальные и расчетные зависимости напряжения на стоке транзистора (а) и тока, текущего через индуктивность L_1 (б) при времени накачки $T_{\text{накач}} = 70$ нс и напряжении питания $U_{\text{пит}} = 50$ В. Из рис. 4 видно, что результаты эксперимента и компьютерного моделирования на этапе накачки (при $t = 0 \dots 70$ нс) дают хорошее совпадение, однако, после срабатывания ДДРВ, расчетные и эмпирические зависимости несколько различаются.

По результатам компьютерного моделирования, КПД всей схемы генератора при длительности накачки $T_{\text{накач}} = 70$ нс, напряжении питания $U_{\text{пит}} = 50$ В и $U_{\text{смещ}} = 10$ В составило 26%. Потери в ДДРВ $E_{\text{ДДРВ}}$, коммутационные потери в транзисторном ключе E_{MOSFET} и энергия, выделенная на нагрузке $E_{\text{НАГР}}$ составили 16 мкДж, 41,3 мкДж и 18,4 мкДж соответственно. При указанных выше параметрах источника питания и времени накачки, эффективность схемы генератора в эксперименте получилась равной 29%,

потери же в диодном ключе $E_{\text{ДДРВ}}$, потери в транзисторном ключе E_{MOSFET} и энергия на нагрузке $E_{\text{НАГР}}$ составили 3,7 мкДж, 51,4 мкДж и 21,8 мкДж соответственно.

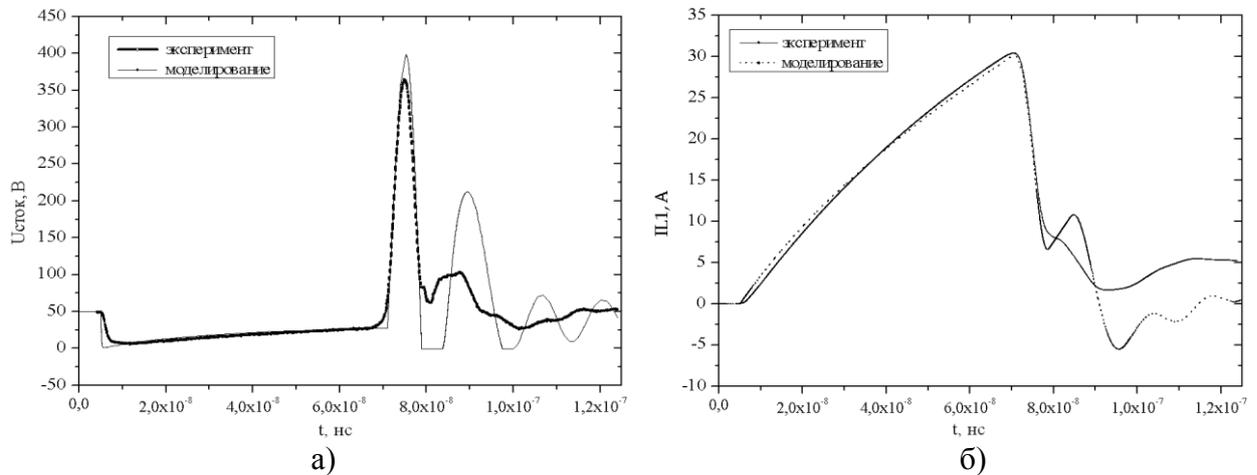


Рис. 4. Напряжение на стоке транзистора (а) и ток, текущий через индуктивность L_1 (б). Эксперимент – жирная штриховая кривая, моделирование – тонкая сплошная кривая.

Отношение выведенного из диодной структуры заряда Q^- при пропуске обратного тока I к накопленному на стадии накачки прямым током I^+ заряду Q^+ по результатам компьютерного моделирования и эксперимента составило 0,39 и 0,41 соответственно, что свидетельствует о существенном вкладе 4H-SiC-ДДРВ в снижение общей эффективности схемы генератора.

Сравнивая расчетные и экспериментальные результаты, можно видеть, что потери энергии при коммутации транзисторного ключа в обоих случаях практически равны, что свидетельствует о достаточной точности принятой модели MOSFET-ключа. Однако следует отметить, что хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных обеспечивается только при начальном напряжении конденсатора C_1 на 10 - 15 В меньше, чем в эксперименте. Этот факт требует дополнительного исследования.

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. V Grekhov, P.A.Ivanov, A.O.Konstantinov, T.P.Samsonova. On the possibility of creating a superfast-recovery silicon carbide diode. Tech. Phys. Lett. (2002) 28. 544-546.
3. 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.
4. A.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. Trans Tech Publications, Switzerland. 2013. P. 1010-1013.
5. 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.
6. Amit S Kesar, Yaakov Sharabani, Lev M. Merensky, Inbar Shafir, and Ariel Sher. "Drift-Step-Recovery Diode Characterization by a Bipolar Pulsed Power Circuit". IEEE Transactions on plasma science, vol. 40, no. 11, november 2012.
7. Белкин В.С., Марин О.Ю., Шульженко Г.И. Формирователи высоковольтных наносекундных импульсов на серийных диодах. // ПТЭ. 1992. №6. С. 120.
8. Брылевский В.И., Грехов И.В., Ефанов В.М., Кардо-Сысоев А.Ф. Полупроводниковые формирователи мощных киловольтных наносекундных импульсов// ПТЭ. 1988. №1. С. 106.