

КОММУТАТОРЫ ИМПУЛЬСОВ ТОКА НА ОСНОВЕ РЕВЕРСИВНО-ВКЛЮЧАЕМЫХ ДИНИСТОРОВ ДЛЯ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

© 2021 г. А. Г. Арзев^а, И. В. Галахов^а, Л. С. Ганин^а, А. В. Гришанин^б, В. В. Елисеев^б,
В. Н. Картаев^б, Е. В. Коженков^{а,*}, А. В. Креков^а, В. А. Мартыненко^б, В. Г. Мускатиньев^б,
Д. А. Наумов^б, Д. Ю. Немаев^б, В. А. Осин^а, В. В. Свиридов^а, О. В. Фролов^б, А. А. Хапугин^б

^а РФЯЦ–ВНИИ экспериментальной физики
Россия, 607190, Саров Нижегородской обл., просп. Мира, 37

^б ПАО “Электровыпрямитель”
Россия, 430001, Саранск, ул. Пролетарская, 126

*e-mail: evgenkog538@gmail.com

Поступила в редакцию 06.02.2021 г.

После доработки 06.03.2021 г.

Принята к публикации 09.03.2021 г.

Представлены результаты разработки и основные характеристики полупроводниковых коммутаторов тока нового поколения (250 кА/25 кВ/70 Кл) на основе блоков последовательно соединенных реверсивно-включаемых динисторов (р.в.д.). Изучены пути повышения коммутируемой мощности, повышения срока службы и надежности р.в.д.-коммутаторов с сохранением принятых ранее массогабаритных показателей. Задача решалась путем снижения мощности потерь р.в.д. и повышения стойкости контактных соединений к воздействию импульсов тока большой мощности. Выполнена модернизация конструкции коммутатора и оптимизация кремниевой структуры, разработана новая технология низкотемпературного соединения в системе кремний–металл с применением серебра, что позволило удвоить активную площадь контактов, улучшить нагрузочные характеристики и рабочий ресурс новых коммутаторов. Определены их рабочие и предельно-допустимые значения пусковых и коммутируемых токов. Представлены результаты эксплуатации р.в.д.-коммутаторов в емкостных накопителях энергии мощных лазерных установок. По результатам ресурсных испытаний сделана оценка срока службы новых приборов.

DOI: 10.31857/S0032816221040133

ВВЕДЕНИЕ

Одной из главных технических проблем при создании емкостных накопителей энергии (е.н.э.) в составе современных электрофизических установок является разработка сильноточных замыкающих коммутаторов. В конденсаторных батареях с запасаемой энергией мультимегаджоулевого уровня, которые предназначены для импульсного питания источников накачки лазеров с выходной лазерной энергией несколько мегаджоулей, используются коммутаторы со следующими характеристиками: коммутаторы должны работать при напряжениях 20–30 кВ и коммутировать импульсные токи порядка 250–500 кА при длительности импульса 300–500 мкс, что соответствует протеканию заряда до 150 Кл. Для лазерной установки NIF американская национальная лаборатория Sandia провела специальные исследования коммутаторов различных типов [1] и предложила использовать в качестве разрядного ключа в кон-

денсаторной батарее NIF искровые разрядники ST-300, изготавливаемые фирмой Maxwell Physics. Эти разрядники соответствуют указанным выше параметрам, но требуют применения специальной системы газообеспечения, обладают значительным уровнем потерь энергии, рассеиваемой в ключе, а также имеют ограниченный срок службы (не более 1500–2000 срабатываний), после которого требуется замена графитовых электродов и изоляторов.

В последнее время в импульсных системах питания различных электрофизических установок широко применяются полупроводниковые коммутаторы тока, которые имеют ряд преимуществ по сравнению с газовыми разрядниками. Полупроводниковые коммутаторы используют полупроводниковые приборы промышленного изготовления, технология производства которых хорошо отработана. Силовые полупроводниковые приборы легко соединяются последовательно в единой сборке, что обеспечивает рабочее напря-

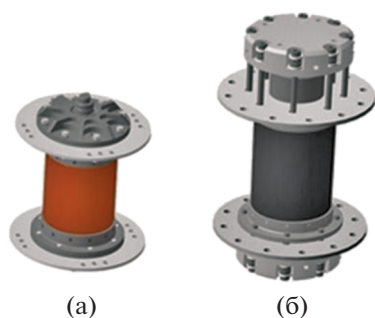


Рис. 1. Коммутаторы на основе р.в.д. с диаметром элемента 63 мм (а) и 76 мм (б).

жение коммутатора до 40 кВ. Полупроводниковые коммутаторы не допускают пропусков срабатываний, обладают большим сроком службы, экологической безопасностью, а также невосприимчивостью к положению в пространстве.

Для решения задач коммутации мощных импульсов тока были разработаны полупроводниковые приборы тиристорного типа с инжекционно-плазменным управлением — реверсивно-включаемые динисторы (р.в.д.) [2–6]. Они обеспечивают импульсы тока плотностью до 10^4 А/см² ($di/dt \geq 10^5$ А/мкс), недостижимые для самых лучших импульсных тириستоров.

Импульсные параметры и характеристики реверсивно-включаемых динисторов хорошо известны специалистам, работающим в области мощной импульсной энергетики. С 1985 года создателями этого направления силовой электроники — учеными Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН во главе с академиком И.В. Греховым, а позднее также и другими российскими и зарубежными исследователями, опубликованы и продолжают публиковаться десятки статей и докладов, демонстрирующих уникальный потенциал р.в.д.-технологии. Коммутаторы на основе р.в.д. успешно используются в качестве разрядных ключей, работая в широком диапазоне импульсных мощностей при длительности импульса от микросекунд до миллисекунд. Тем не менее, сегодня еще недостаточно информации о результатах эксплуатации р.в.д.-коммутаторов в реальных системах высоких энергий, их надежности и сроке службы при работе в штатных и предельных режимах. Данная статья — попытка восполнить этот пробел.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К Р.В.Д.-КОММУТАТОРАМ. КОНСТРУКЦИЯ. ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Как отмечалось выше, в е.н.э. современных неодимовых лазерных установок высоковольтные коммутаторы тока должны выдерживать на-

пряжение 25 кВ и пропускать импульсы тока амплитудой до 250 кА (до 300 кА в аварийных ситуациях), длительностью около 500 мкс. При этом срок службы коммутатора должен быть сравним со сроком службы установки — не менее 10000 срабатываний. Эти требования определяют необходимость разработки нового поколения р.в.д.-коммутаторов, обладающих меньшими коммутационными потерями энергии и большим сроком службы.

В статье [7] приведены результаты исследований предельных импульсных токов, которые можно пропустить через единичные элементы р.в.д. с сохранением их блокирующей способности. Исследовались динисторы с блокируемым напряжением 2.4 кВ и со стандартными для силовой электроники диаметрами полупроводниковых элементов — 63, 76 и 100 мм. Экспериментальным путем было определено, что для р.в.д. значения предельных токов длительностью 450 мкс (форма импульса: фронт нарастания тока — полусинусоида длительностью примерно 160 мкс, спад тока — экспонента, аperiодический процесс) составляли для этих диаметров соответственно 250, 380 и 550 кА. Рабочие токи для единичных р.в.д. в этом размерном ряду — 200, 300 и 500 кА. В дальнейшем было установлено, что величины предельного тока (и соответственно рабочего тока) высоковольтных сборок коммутаторов, состоящих из последовательно соединенных элементов р.в.д., могут значительно отличаться от предельных токов единичных р.в.д. Это связано с конструкцией и монтажом высоковольтных мультисборок, а также с технологией изготовления динисторов.

На рис. 1 представлены рабочие образцы коммутаторов, изготовленных на основе р.в.д. с диаметром элемента 63 мм (рис. 1а) и 76 мм (рис. 1б). Коммутаторы состоят из цилиндрического корпуса-изолятора, последовательно соединенных полупроводниковых элементов в количестве 15 штук, системы прижима, катодных и анодных токовыводов [8].

Корпус изготовлен из армированного стекловолокном изоляционного материала с высокой механической и электрической прочностью. На обоих торцах корпуса жестко закреплены металлические фланцы, имеющие резьбовые отверстия для крепления крышек коммутатора к корпусу с помощью болтов. При этом одновременно обеспечивается герметизация внутреннего объема корпуса эластичными уплотнителями, расположенными между фланцами и токовыводами. Корпус коммутатора защищает высоковольтную сборку от внешней среды, обеспечивает необходимые воздушные изоляционные промежутки и расстояния по поверхности корпуса между катодом и анодом коммутатора. Кроме того, через корпус осуществ-

ляется передача сжимающих усилий от узла прижима к полупроводниковым элементам. Полупроводниковые элементы соединены друг с другом через контактные медные диски, расположенные между анодом одного элемента и катодом соседнего элемента. Центрирование полупроводниковых элементов, медных дисков и токоподводящих электродов между собой обеспечивается с помощью фторопластовых колец. На катодном и анодном токовыводах расположены конусные опоры, предназначенные для обеспечения равномерного распределения давления на рабочих поверхностях полупроводниковых элементов.

Коммутаторы с диаметром элементов р.в.д. 63 мм (рис. 1а) нашли применение в конденсаторной батарее с зарядным напряжением 25 кВ и запасаемой энергией 5 МДж [9] для питания импульсных ламп накачки неодимового лазера установки «Луч» [10] – прототипе мощных лазеров нового поколения [11]. В каждом из 18 модулей конденсаторной батареи установки в качестве разрядного ключа использованы коммутаторы с элементами р.в.д. Ø 63 мм, имеющие следующие характеристики: рабочее напряжение до 25 кВ, максимальный импульсный ток 100 кА, длительность импульсов тока 450–500 мкс, коммутируемый заряд за импульс – до 25 Кл.

На установке с момента ввода ее в строй в 2002 г. в общей сложности было проведено более 2500 срабатываний е.н.э. при разных зарядных напряжениях (18–24 кВ). При этом максимальный рабочий ток через каждый коммутатор не превышал 55 кА. Плотность тока через р.в.д. около 2.2 кА/см².

Подобная конструкция коммутатора, но с усиленным прижимом (рис. 1б), была разработана для использования в новой лазерной установке, создаваемой в Институте лазерно-физических исследований РФЯЦ–ВНИИЭФ. В этой установке коммутаторы должны пропускать импульсы тока с существенно большей амплитудой (250 кА в рабочем режиме и до 300 кА в аварийном режиме), что определило необходимость увеличения площади полупроводниковых структур и изменение узла прижима коммутатора. Первые опытные образцы таких коммутаторов были собраны из 15 штук соединенных последовательно динисторов Ø 76 мм с блокирующим напряжением 2.4 кВ. Несмотря на увеличение активной площади новых динисторов, по сравнению с р.в.д. Ø 63 мм, они должны были обеспечить в 1.6 раза большую плотность протекающего тока.

Работоспособность коммутаторов была исследована на экспериментальном стенде в РФЯЦ–ВНИИЭФ, представляющем собой прототип модуля конденсаторной батареи для новой лазерной установки [12]. Цель испытаний – проверка способности коммутатора работать с периодичностью один импульс каждые 10 мин, коммутируя

заряженную до постоянного напряжения 24 кВ батарею конденсаторов суммарной емкостью 3000 мкФ с запасенной энергией 860 кДж, с пиковым током до 250 кА и длительностью импульса 500 мкс (по уровню 0.1 от максимальной амплитуды импульса тока). При этом переносимый заряд составлял примерно 70 Кл. Время между импульсами ограничивалось временем заряда накопительных конденсаторов модуля.

Проведенные испытания первых 28 образцов коммутаторов на основе элементов р.в.д. Ø 76 мм показали, что они способны при зарядном напряжении 24 кВ коммутировать токи амплитудой 250 кА и выдерживать не менее 1000 включений. Был сделан анализ полупроводниковых элементов коммутатора, проработавшего 1000 включений. Результаты анализа показали, что все приборы сохранили свои блокирующие характеристики и находятся в рабочем состоянии. Повреждений в контактной системе коммутатора не было. Однако имели место неглубокие локальные точки плавления алюминиевой металлизации глубиной до 2–5 мкм, расположенные участками на катодной поверхности элементов р.в.д. Деградиация катодного контакта р.в.д. связана с явлением электромиграции алюминия. Она имеет место в полупроводниковых приборах и интегральных схемах при высоких плотностях тока и температурах >350°C [13, 14] и является главным механизмом отказа при большом (несколько тысяч) количестве включений. Полученные результаты обусловили необходимость дополнительных исследований, направленных на повышение срока службы р.в.д.-коммутаторов субмегаамперных импульсов тока.

ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ КОММУТИРУЮЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК, ПОВЫШЕНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ И НАДЕЖНОСТИ Р.В.Д.-КОММУТАТОРОВ

Критерием выбора р.в.д. для коммутатора является величина максимального перепада температуры перехода ($\Delta T_j = \Delta T_{j_{\max}} - RT_j$) в момент протекания импульсного тока. Для надежной работы коммутатора перепад температуры не должен превышать 250°C и, чем меньше ΔT_j , тем больше его срок службы. Перепад температуры перехода зависит от множества факторов, в том числе от характеристик кремниевой структуры, величины полезной площади р.в.д. (S), режима работы р.в.д. (амплитуды, длительности и формы импульсов коммутируемого тока).

Для исследования путей снижения ΔT_j проведены моделирование и расчеты р.в.д., используя программный комплекс TCAD Synopsys [15]. На рис. 2 представлены расчетные кривые зависимости максимального приращения температуры

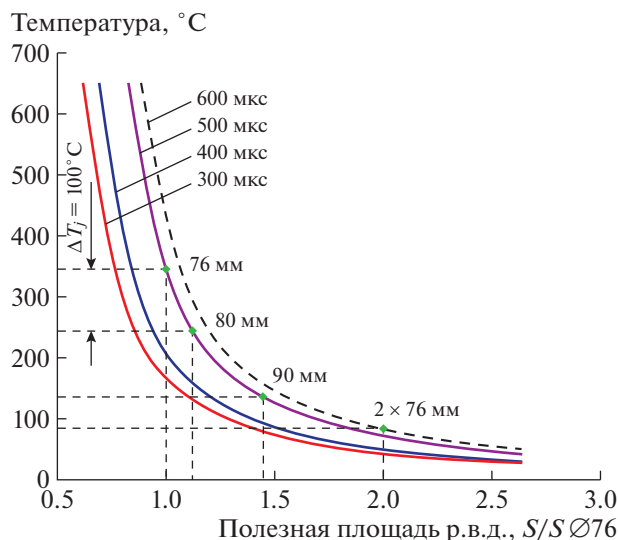


Рис. 2. Расчетные кривые зависимости максимально приращения температуры р.в.д. при коммутационном токе 250 кА с длительностью импульса от 300 до 600 мкс от полезной площади динистора (нормированное значение к площади динистора $\varnothing 76$ мм).

кремниевой структуры р.в.д. от величины полезной площади динисторов (нормированное значение к площади динистора $\varnothing 76$ мм) при коммутации импульсов тока длительностью от 300 до 600 мкс амплитудой 250 кА. Прежде всего, следует отметить сильную зависимость ΔT_j от длительности импульсов тока, которая представлена в достаточно узком субмиллисекундном диапазоне. Например, снижение длительности тока амплитудой 250 кА, коммутационного динистором, с 500 до 400 мкс снижает ΔT_j на 150°C (рис. 2). На рис. 2 видно, что увеличение площади р.в.д. снижает максимальную температуру кремния в интересующем нас режиме 250 кА/500 мкс с 350°C (р.в.д. $\varnothing 76$ мм) до 250°C (р.в.д. $\varnothing 80$ мм), до 165°C (р.в.д. $\varnothing 90$ мм) и до 90°C (два р.в.д. $\varnothing 76$ мм, соединенные параллельно). Столь сильная зависимость ΔT_j от площади динисторов и длительности импульсов тока (а далее будет показано, что и от формы импульсов тока) дает возможность гибкого управления амплитудой разрядного тока, его крутизной и количеством включений коммутатора.

Последующие расчеты и испытания коммутаторов показали, что по сочетанию требуемых электрических и габаритных параметров, сроку службы и цене наиболее оптимальным вариантом коммутатора для новой лазерной установки стал коммутатор на основе р.в.д. $\varnothing 80$ мм. Увеличение диаметра кремниевой структуры с 76 до 80 мм увеличило активную площадь р.в.д. на 12%, при этом плотность тока снизилась с 6.5 до 5.8 кА/см². Соответственно уменьшились и прямые потери энергии в р.в.д. во включенном состоянии. В но-

вом приборе они были минимизированы за счет уменьшения толщины *p*-базы до 40 мкм и увеличения нижней границы времени жизни носителей заряда в высокоомных областях до 30 мкс.

Все это позволило уменьшить прямое падение напряжения (V_T) на р.в.д. при токе 250 кА с 12.5 В до 10 В. Как видно из расчетной кривой (рис. 2), при коммутации импульса тока амплитудой 250 кА увеличение диаметра кремниевой структуры с 76 до 80 мм и оптимизация ее параметров дало снижение максимального приращения температуры кремния на 100°C .

Коммутационные возможности р.в.д.-коммутатора ограничиваются не только размерами и параметрами кремниевых структур, но и деградационными процессами в контактных соединениях коммутатора при многократных нагрузках импульсами тока большой мощности. В связи с этим был предпринят ряд мер, улучшающих электрические и тепловые сопротивления контактных соединений. Исследования в этом направлении показали, что для надежной коммутации импульсного тока сверхвысоких плотностей необходима тщательная проработка конструкции высоковольтных сборок, состоящих из полутора десятков динисторов. Ошибки в механике коммутатора, прежде всего, в его системе прижима, могут привести к выходу приборов из строя из-за разрушения катодной металлизации р.в.д.

Одним из главных критериев правильной конструкции высоковольтной сборки является высокая однородность давления в контактах между катодной поверхностью элементов р.в.д. и медными электродами. Проведены моделирование и расчет конструкции прижимного устройства, его деталей и узлов [16]. По результатам расчетов найден наиболее подходящий вариант конструкции зажимного устройства коммутатора, обеспечивающее однородное распределение контактного давления на всех 15 элементах р.в.д. в единой сборке, как по площади каждого элемента, так и между элементами.

Для дальнейшего улучшения электрических и тепловых характеристик контактных соединений была применена известная [17] технология соединения кремниевой структуры полупроводникового прибора с молибденовым термокомпенсатором с использованием серебрясодержащих паст. Данный процесс проводится при сравнительно низких температурах и высоких давлениях и, в отличие от процесса сплавления, позволяет значительно увеличить активную площадь катодного контакта полупроводниковых приборов [18].

На рис. 3 представлены полученные с помощью оптического профилометра CyberScan трехмерные изображения биметаллических изгибов катодных поверхностей элементов р.в.д. после высокотемпературного ($T = 720^\circ\text{C}$) сплавления

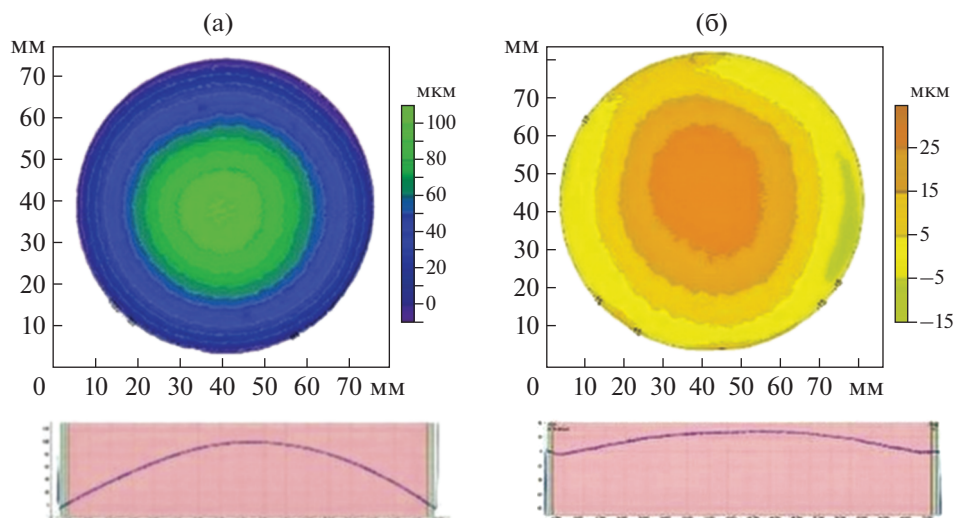


Рис. 3. Оптические профилограммы и изгибы катодной поверхности элементов р.в.д. после высокотемпературного ($T = 720^{\circ}\text{C}$) сплавления (а) и низкотемпературного ($T = 250^{\circ}\text{C}$) спекания (б).

кремниевых структур с термокомпенсаторами с применением алюминиевых преформ (рис. 3а) и после низкотемпературного ($T = 250^{\circ}\text{C}$) процесса спекания с применением серебродержащих паст (рис. 3б). Видно, что элементы р.в.д., изготовленные по технологии низкотемпературного спекания, имеют изгиб катодной поверхности в три раза меньше по сравнению с элементами, изготовленными по стандартной технологии.

Оценка равномерности давления на катодных поверхностях р.в.д. проводилась по отпечаткам на тензочувствительных полимерных пленках, обладающих способностью изменять цвет в зависимости от величины давления в контакте р.в.д. — медный диск. Эмпирическим путем установлено, что для длительной и надежной работы р.в.д. в коммутаторе площадь отпечатка (S_K) с максимальным давлением 10 МПа должна быть не менее 90% от общей площади катодной поверхности динистора.

На рис. 4 показаны контактные отпечатки на катодных поверхностях р.в.д., изготовленных по стандартной технологии (рис. 4а) и технологии низкотемпературного спекания (рис. 4б). Видно, что площадь отпечатка на элементе р.в.д. с максимальным давлением 10 МПа, изготовленного по стандартной технологии, составляет примерно 53% от общей площади катодного контакта, тогда как низкотемпературное спекание обеспечивает более 90% активной зоны контакта между катодной поверхностью р.в.д. и медным электродом. Таким образом, технология низкотемпературного спекания позволяет наилучшим образом минимизировать электрические и тепловые сопротивления в контактных соединениях и внести существенный вклад в повышение коммутирующих

характеристик, надежности и срока службы р.в.д.-коммутаторов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ Р.В.Д.-КОММУТАТОРОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

С учетом полученных результатов исследований была изготовлена партия новых р.в.д.-коммутаторов с модернизированной конструкцией сборки, в которой использованы элементы р.в.д. $\varnothing 80$ мм с уменьшенной мощностью потерь, изготовленные по технологии низкотемпературного спекания. Определялись основные характеристики нового коммутатора: параметры импульса запуска, предельно-допустимые рабочий и аварийный токи. Была сделана также оценка срока службы новых коммутаторов.

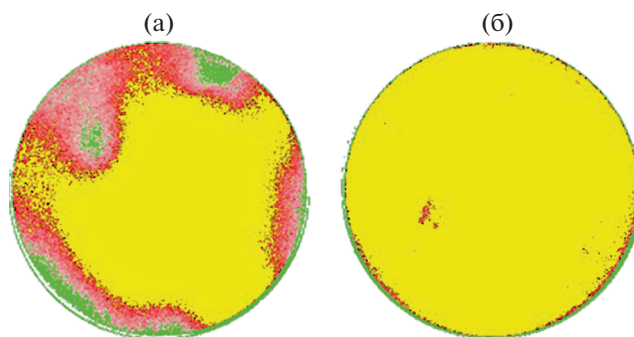


Рис. 4. Отпечатки катодного контакта элементов р.в.д. с максимальным давлением 10 МПа, изготовленных по технологии высокотемпературного сплавления (а), $S_K \approx 53\%$, и технологии низкотемпературного спекания (б), $S_K \approx 90\%$, усилие сжатия р.в.д. $F = 50$ кН.

*Параметры импульса запуска
р.в.д.-коммутаторов*

Включение р.в.д. производится кратковременным приложением напряжения обратной полярности, что приводит к протеканию импульса обратного тока – тока запуска. В результате вблизи коллекторного перехода возникает тонкий и однородный слой электронно-дырочной плазмы, который при смене полярности напряжения инициирует инжекцию неосновных носителей из эмиттерных областей в базовые области динистора, обеспечивающую быстрое включение по всей активной площади прибора. Для устойчивого и однородного переключения р.в.д. необходимо, чтобы накопленный при запуске заряд был не менее чем на порядок больше критического заряда включения динистора.

В данной работе изучалось влияние заряда запуска на коммутационный всплеск напряжения (V_{TM}) и установившееся прямое падение напряжения (V_T) при переключении коммутатором тока с амплитудой, близкой к 250 кА. Максимальная плотность тока в импульсе составляла 5.8 кА/см², скорость нарастания тока на начальном участке синусоиды 1.5 кА/мкс, длительность коммутируемого тока 500 мкс. На рис. 5 показаны осциллограммы тока запуска при коммутации импульсов тока 215 кА/500 мкс. Заряд запуска Q_{RCRM} варьировался от 0.31 мКл ($I_{RCRM} = 0.25$ кА) до 4.11 мКл ($I_{RCRM} = 2.5$ кА), длительность тока запуска изменялась соответственно от 2.2 до 3.4 мкс.

Ниже представлены результаты измерений V_{TM} и V_T при различных параметрах реверсивного запуска, а также расчетные значения заряда запуска Q_{RCRM} и отношения переходного и установившегося напряжений V_{TM}/V_T :

I_{RCRM} , кА	2.5	1.95	1.5	0.92	0.5	0.25
t_R , мкс	3.4	3.2	3.1	2.9	2.7	2.3
V_{TM} , В	122	122	125	135	150	550
V_T , В	112	112	112	112	112	112
V_{TM}/V_T	1.09	1.09	1.11	1.2	1.34	4.91
Q_{RCRM} , мКл	4.11	3.18	2.43	1.45	0.71	0.31

На рис. 6 и рис. 7 представлены осциллограммы падения напряжения на коммутаторе при протекании импульсов тока амплитудой 215 кА при различных режимах запуска. При сравнении осциллограмм на рис. 6 и 7 видно, что процесс включения р.в.д. малым током запуска сопровождается резким увеличением всплеска переходного напряжения V_{TM} со 122 В до 550 В. Это свидетельствует о начале истощения накопленного вблизи коллекторного перехода динистора слоя неосновных носителей, что приводит к расширению области пространственного заряда в окрестности коллектора. В результате этого с ростом то-

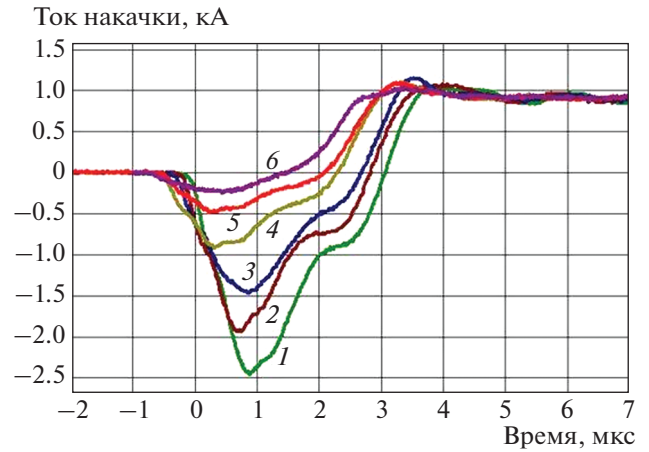


Рис. 5. Осциллограммы токов запуска при коммутации импульсов тока 215 кА/500 мкс: 1 – 2.5 кА, 2 – 1.95 кА, 3 – 1.5 кА, 4 – 0.92 кА, 5 – 0.5 кА, 6 – 0.25 кА.

ка быстро увеличивается падение напряжения на динисторе до тех пор, пока электроны, инжектированные катодным эмиттером, не достигнут коллекторного перехода.

Обращает на себя внимание тот факт, что, несмотря на резкий рост напряжения V_{TM} при почти 8-кратном снижении заряда запуска, установившееся напряжение на коммутаторе V_T составляет 112 В (рис. 6а, 7а) и практически не изменилось. Это можно объяснить тем, что в начальный момент процесса истощения управляющего плазменного слоя, вызванного низким зарядом запуска, эмиттерные переходы динистора успевают установить высокий уровень инжекции носителей заряда и модуляции проводимости в слаболегированной части кремниевой структуры. Тем не менее, дальнейшее снижение Q_{RCRM} может привести к локализации процесса включения, сильному разогреву, шнурованию тока и отказу прибора.

На рис. 8 показана зависимость отношения амплитуды пика коммутационного напряжения к установившемуся падению напряжения (V_{TM}/V_T) на р.в.д.-коммутаторе в открытом состоянии от заряда реверсивного запуска и скорости нарастания тока.

Как видно из экспериментальной зависимости $V_{TM}/V_T = f(Q_{RCRM})$ – кривой 2 на рис. 8, переход участка насыщения к участку резкого роста коммутационного пика происходит примерно при значении Q_{RCRM} , составляющем 0.6–1 мКл. Поэтому минимально допустимую величину заряда запуска при коммутации импульсов тока амплитудой 250 кА и di/dt на начальном участке 1.5 кА/мкс можно было бы установить равной 1.5–2 мКл. Однако в создаваемой установке возможны аварийные режимы работы конденсаторной батареи, при которых через коммутатор может протекать

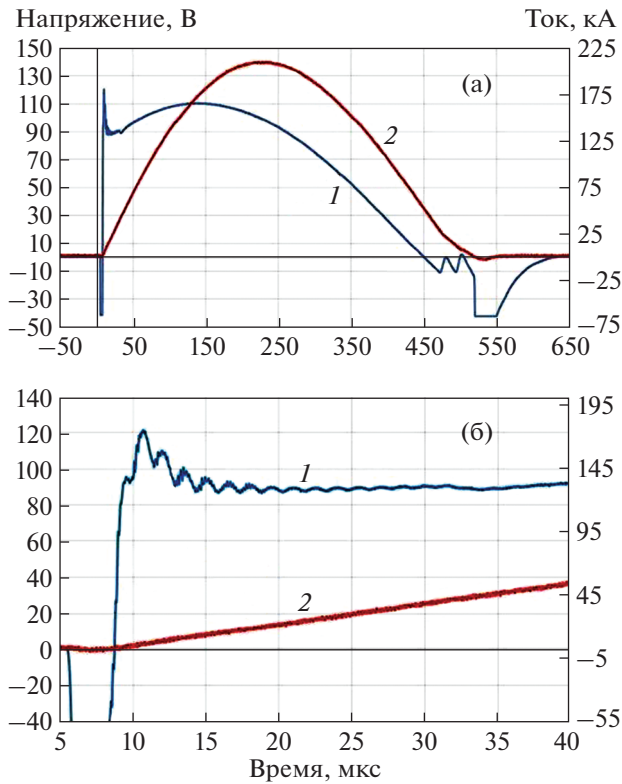


Рис. 6. Осциллограммы напряжения (1) и тока (2) р.в.д.-коммутатора, включенного током запуска 1.5 кА ($Q_{RCRM} = 2.43$ мКл). Масштабы по вертикали: тока – 50 кА/деление, напряжения – 20 В/деление; по горизонтали – 100 мкс/деление (а), 4 мкс/деление (б).

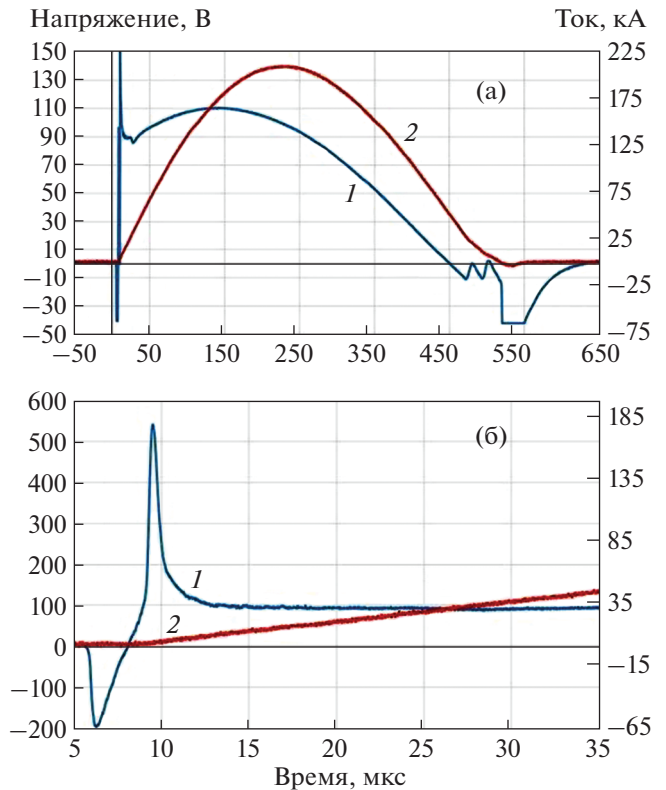


Рис. 7. Осциллограммы напряжения (1) и тока (2) р.в.д.-коммутатора, включенного током запуска 0.25 кА ($Q_{RCRM} = 0.31$ мКл). Масштабы по вертикали: тока – 50 кА/деление, напряжения – 20 В/деление (а), 100 В/деление (б); по горизонтали – 100 мкс/деление (а), 4 мкс/деление (б).

короткий импульс аварийного тока амплитудой несколько сотен килоампер, длительностью < 100 мкс с di/dt на фронте 30–40 кА/мкс. По расчетной зависимости $V_{TM}/V_T = f(Q_{RCRM})$ – кривой 1 на рис. 8 – при коммутации импульсов тока со скоростью нарастания на фронте тока 40 кА/мкс видно, что переход участка насыщения к участку резкого роста коммутационного пика происходит при значении $Q_{RCRM} \approx 3$ мКл. На основании полученных результатов установлено, что для надежной работы р.в.д.-коммутатора во всех режимах эксплуатации е.н.э. минимальный заряд запуска должен быть не менее 3–3.5 мКл.

Рабочие и предельно-допустимые импульсные токи р.в.д.-коммутаторов

Коммутирующие характеристики и рабочий ресурс р.в.д. во многом определяются зависимостью прямого падения напряжения на приборе от амплитуды импульсного тока (прямая вольт-амперная характеристика динистора).

На рис. 9 представлена расчетная вольт-амперная характеристика (кривая 1) единичного элемента р.в.д. $\varnothing 80$ мм при длительности им-

пульса тока 500 мкс. Здесь же показана расчетная зависимость максимального приращения температуры кремниевой структуры динистора (ΔT_j) от протекающего тока (кривая 2).

Полученную вольт-амперную характеристику (в.а.х.) можно условно разделить на три характерных участка и, соответственно, три возможные области работы р.в.д.-коммутатора. Область I – область безопасной работы для токов от 0 до 260 кА с практически линейным участком в.а.х. с низким дифференциальным сопротивлением. Максимальное приращение температуры на границе этой области не превышает 210 К. Область II – разрешенная область работы в диапазоне токов 260–310 кА с низким ресурсом и риском потери работоспособности р.в.д. при первых сотнях включений. В этой переходной области наблюдаются увеличенные значения дифференциального сопротивления и максимальной температуры структуры динистора. Область III (токи свыше 320 кА) – запрещенная область работы. Она характеризуется высокими температурами, близкими к температурам термогенерационных процессов в кремнии, большой вероятностью шнурования тока и

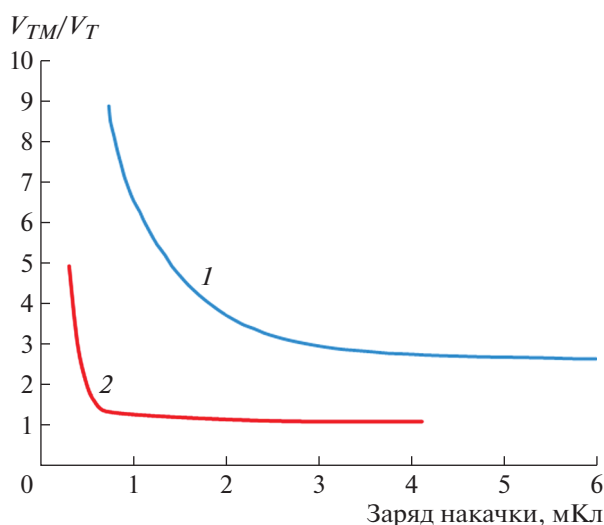


Рис. 8. Зависимость отношения амплитуды пика коммутационного напряжения к установившемуся падению напряжения на р.в.д.-коммутаторе в открытом состоянии от заряда запуска и скорости нарастания тока di/dt : 1 – 40 кА/мкс, 2 – 1.5 кА/мкс.

теплового пробоя. В этом случае выход р.в.д. из строя неизбежен уже при первых включениях.

Исследования прямой в.а.х. нового р.в.д. проводились на испытательном стенде Научно-инженерного центра силовых полупроводниковых приборов (НИЦ СПП) ПАО “Электровыпрямитель” [19] и на стендах в Институте лазерных физических исследований (ИЛФИ) РФЯЦ–ВНИИ-ЭФ. Формы импульсов тока при работе стендов несколько отличаются друг от друга. На рис. 10 представлены динамические кривые разогрева кремниевой структуры р.в.д. при коммутации импульсов тока различной формы: апериодические разряды е.н.э. на активно-индуктивную нагрузку (кривая 1) и импульсные лампы (кривая 2) на испытательных стендах ИЛФИ, правильная полусинусоида (кривая 3) при разряде конденсаторной батареи на резистивную нагрузку на испытательном стенде НИЦ СПП.

На рис. 10 следует, что предельно-допустимая температура кремниевых структур р.в.д. ($T_{j\max} = 250^\circ\text{C}$) достигается на стенде ИЛФИ при коммутации импульсов тока амплитудой 250 кА, а на стенде НИЦ СПП – при коммутации импульсов тока амплитудой 220 кА.

Результаты исследования прямой в.а.х. нового р.в.д.-коммутатора приведены по экспериментам на испытательном стенде НИЦ СПП в диапазоне токов от 19 до 308 кА длительностью 500 мкс при заряде накачки 3.2 мКл. После каждой серии измерений проводились измерения токов утечки коммутатора при напряжении 25 кВ.

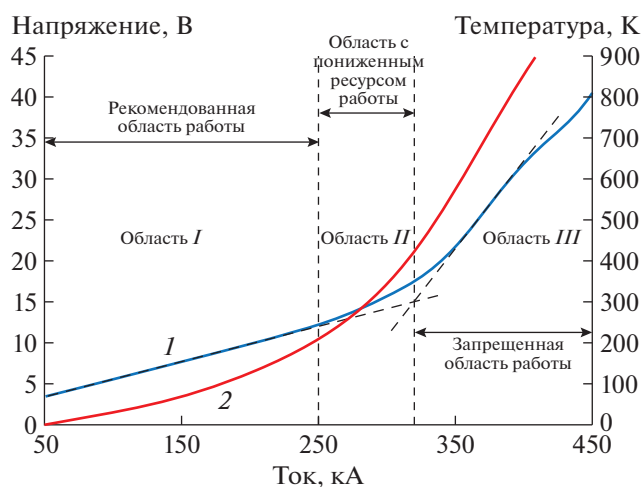


Рис. 9. Расчетная в.а.х. модернизированного р.в.д. $\varnothing 80$ мм: 1 – прямая в.а.х., 2 – максимальное приращение температуры, длительность импульса 500 мкс.

На рис. 11 показаны временные зависимости разрядных токов и падений напряжения на коммутаторе. Термогенерационный пик падения напряжения (рис. 11б) возникает на 340-й микросекунде после начала прохождения разрядного тока амплитудой 308 кА. Появление термогенерационного пика на кривой падения напряжения говорит о начале неконтролируемого термогенерационного процесса. Дальнейшее незначительное увеличение тока (на 0.5–1.0 кА) вызовет быструю

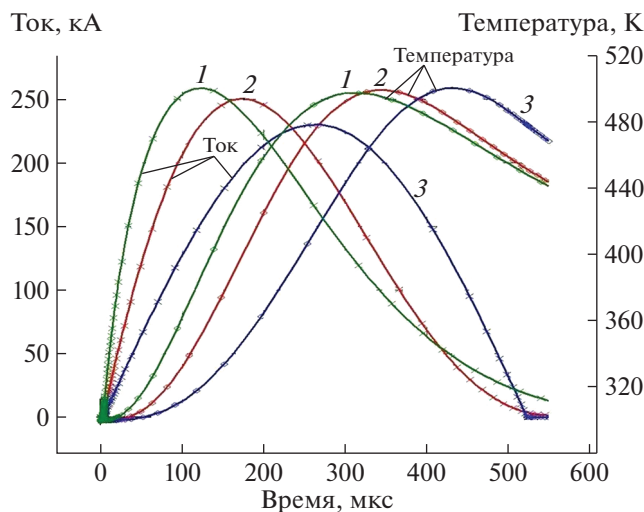


Рис. 10. Динамические кривые разогрева кремниевой структуры р.в.д. при коммутации импульсов тока различной формы: апериодические разряды е.н.э. на активно-индуктивную нагрузку (1) и импульсные лампы (2) на испытательных стендах ИЛФИ, правильная полусинусоида (3) при разряде конденсаторной батареи на резистивную нагрузку на испытательном стенде НИЦ СПП.

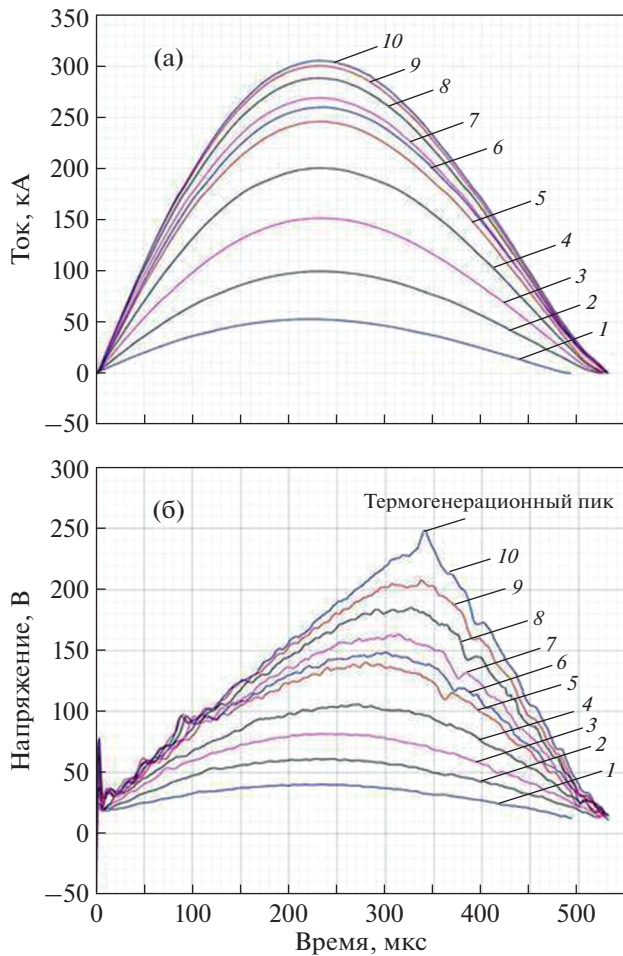


Рис. 11. Осциллограммы коммутируемых импульсов тока (а) и падения напряжения (б) при испытаниях нового р.в.д.-коммутатора. Амплитуда токов, кА: 1 – 50, 2 – 100, 3 – 150, 4 – 200, 5 – 245, 6 – 260, 7 – 270, 8 – 290, 9 – 300, 10 – 308.

локализацию тока и тепла в кремниевой структуре и, в итоге, пробой полупроводниковых приборов и коммутатора.

По измеренным кривым тока и падения напряжения (рис. 11) рассчитана энергия, рассеиваемая в р.в.д.-коммутаторе при токе 250 кА. Она не превышает 8.5 кДж, что в 4.3 раза меньше энергии потерь, выделяющейся при том же токе в одном из лучших представителей газоразрядных коммутаторов – искровом разряднике [1]. Низкие потери и отвод тепла от каждого элемента позволяют использовать р.в.д.-коммутаторы в конденсаторных батареях лазерных установок без принудительного охлаждения, существенно упрощая при этом обслуживание и снижая стоимость е.н.э.

На рис. 12 представлена экспериментальная прямая в.а.х. нового коммутатора, построенная по результатам измерений временных зависимостей разрядных токов и напряжений. Сравнивая

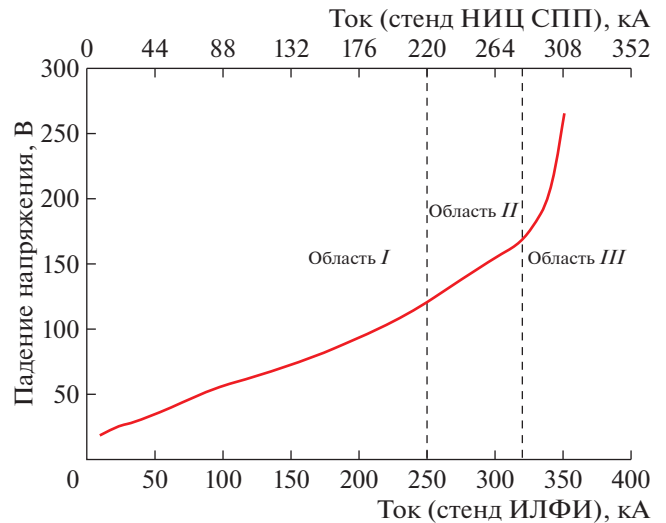


Рис. 12. Экспериментальная в.а.х. нового р.в.д.-коммутатора. Верхняя шкала тока соответствует измеренным значениям на стенде НИЦ СПП, нижняя – эквивалентному значению тока через коммутатор на стенде ИЛФИ.

в.а.х., изображенные на рис. 9 и рис. 12, можно видеть, что результаты измерений (с учетом поправки на форму тока) хорошо совпадают с расчетными данными. Так же, как и на рис. 9, можно выделить три области, характеризующие рабочий (область I), предельный (область II) и запрещенный (область III) режимы работы коммутатора. Рабочий режим – это 250 кА/25 кВ/500 мкс с ресурсом около 10000 включений; предельно-допустимый режим – до 300 кА (апериодический разряд), при этом количество импульсов в таком режиме не должно превышать 25–30 включений за весь срок службы коммутатора.

Коммутация тока свыше 300 кА запрещена. Критическое значение импульса тока через коммутатор, при котором может наступить шнурование тока в кремниевой структуре р.в.д. и выход коммутатора из строя при первом включении, около 350 кА.

Оценка срока службы р.в.д.-коммутаторов

Для оценки полного срока службы (число импульсов между обслуживаниями) и надежности коммутатора были проведены испытания партии из 29 модернизированных коммутаторов при рабочем напряжении 24 кВ и коммутируемом токе 250 кА. Один из таких коммутаторов выдержал 2100 включений, еще один коммутатор прошел 400 включений, а остальные коммутаторы – по 50 включений. Полное число импульсов тока на испытательных стендах составило около 15000. Отказов при срабатывании и выходов из строя коммутаторов не выявлено.

Проведенные испытания имитируют реальные условия эксплуатации полупроводниковых компонентов. Но объем этих испытаний, как правило, не достаточен, чтобы подтвердить заявленный срок службы коммутатора. Испытания в реальных условиях на весь срок службы заняли бы слишком много времени и затрат. Поэтому по результатам ресурсных испытаний была сделана оценка срока службы модернизированных коммутаторов с использованием модели отказа Аррениуса. Эта модель связывает скорость физико-химических реакций, протекающих в полупроводниковых приборах при деградации, с энергией активации разрушения алюминия и температурной нагрузкой. Если количество включений коммутатора предполагать законченным при достижении определенной деградации, то его ресурс можно представить в виде:

$$L = A \exp(E_a/kT),$$

где E_a , эВ – энергия активации, k – постоянная Больцмана, T , К – абсолютная температура, A – константа. Энергия активации зависит от механизма отказа. В расчетах использовалась энергия активации $E_a = 0.6$ эВ, соответствующая электромиграции алюминия в полупроводниковых приборах при высоких плотностях тока и температурах [13, 14]. Гарантированный ресурс работы коммутаторов с р.в.д. $\varnothing 76$ мм, неоднократно подтвержденный экспериментально, – не менее 1000 включений. Расчеты показали, что снижение максимальной температуры перехода на 100°C , полученное за счет модернизации динисторов и коммутаторов, увеличивает ресурс разрядных ключей при работе в режиме 250 кА/25 кВ/500 мкс до 10066 включений. Также, используя расчетную зависимость максимальной температуры перехода от амплитуды импульсного тока (рис. 9), можно оценить срок службы коммутаторов при снижении токовой нагрузки. Расчеты показали, что снижение рабочего тока с 250 кА до 200, 150 и 100 кА повышает срок службы р.в.д.-коммутатора соответственно с 10^4 до $3.5 \cdot 10^4$, 10^5 и 10^6 включений. Соединив два коммутатора в параллель, можно повысить срок службы р.в.д.-коммутатора до 10^5 включений при работе в режиме 250 кА/25 кВ/500 мкс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан и исследован высоковольтный полупроводниковый коммутатор нового поколения на основе реверсивно-включаемых динисторов, работающий при высоких плотностях тока, с прогнозируемым ресурсом 10000 включений и рабочим напряжением 25 кВ. Он способен коммутировать импульсы силового тока с амплитудой 250 кА и заряд около 70 Кл. Достигнуты рекордно высокие показатели удельной импульсной мощности

коммутатора на единицу объема (490 МВт/дм^3) и массы (250 МВт/кг).

Налажено производство опытных образцов р.в.д.-коммутаторов и их тестирование в штатном режиме работы неодимовой лазерной установки мегаджоулевого класса (250 кА/25 кВ/500 мкс). Несколько образцов были подвергнуты ресурсным испытаниям, которые продемонстрировали надежную работу коммутаторов в течение 1000, 2000 и 3000 срабатываний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Savage M.E.* // Proceedings of the 12 th IEEE International Pulsed Power Conference. Monterey, CA, USA. 1999. P. 1238.
2. *Горбатюк А.В., Грехов И.В., Коротков С.В., Костина Л.С., Яковчук Н.С.* // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 8. № 11. С. 685.
3. *Тучкевич В.М., Грехов И.В.* Новые принципы коммутации больших мощностей полупроводниковыми приборами. Л.: Наука, 1988. С. 117.
4. *Chumakov G.D., Galakhov I.V., Gudov S.N., Kirillov G.A., Kovtun V.I., Larson D., Martynenko V.A., Murugov V.M., Osin V.A., Zolotovskii V.I.* // Proceeding of 10th IEEE International Pulsed Power Conference. Albuquerque, NM, USA. 1995. P. 1103.
5. *Грехов И.В., Козлов А.К., Коротков С.В., Степаныч А.Л.* // ПТЭ. 2003. № 1. С. 53.
6. *Коротков С.В., Аристов Ю.В., Воронков В.Б., Жмодиков А.Л., Козлов А.К., Коротков Д.А., Люблинский А.Г.* // ПТЭ. 2010. № 1. С. 172.
7. *Belyaev S.A., Bezuglov V.G., Chibirkin V.V., Chumakov G.D., Galakhov I.V., Garanin S.G., Grigorovich S.V., Kinzibaev M.I., Khapugin A.A., Kopelovich E.A., Flat F.A., Frolov O.V., Logutenko S.L., Martynenko V.A., Murugov V.M. et al.* // 28th ICPIG. Prague, Czech Republic. 2007.
8. *Бродский Ю.Я., Галахов И.В., Копелович Е.А., Мартыненко В.А., Муругов В.М., Осин В.А., Флат Ф.А., Чумаков Г.Д., Шуляпов В.И.* Патент на изобретение 2421840 РФ // Опубл. 20.06.2011. Бюл. № 17.
9. *Безуглов В.Г., Бабер И.С., Бродский Ю.Я., Галахов И.В., Гаранин С.Г., Григорович С.В., Гудов С.Н., Зарецкий А.И., Золотовский В.И., Карпов Н.И., Кирдяшкин М.Ю., Копелович Е.А., Лазарчук В.П., Логутенко С.Л., Митрофанов О.Г. и др.* // Международная конференция. X Харитоновские тематические научные чтения. Мощные лазеры и исследования физики высоких плотностей энергии. Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2008. С. 260.
10. *Безнасюк Н.Н., Галахов И.В., Гаранин С.Г., Григорович С.В., Ерошенко В.А., Илькаев Р.И., Кириллов Г.А., Кочемасов Г.Г., Муругов В.М., Рукавишников Н.Н., Сухарев С.А.* // Труды РФЯЦ–ВНИИЭФ. 2002. Т. 3. С. 232.
11. *Гаранин С.Г., Бельков С.А., Бондаренко С.В.* // Сборник докладов XXXIX международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС. 2012. С. 17.
12. *Арзев А.Г., Беспалов Е.А., Бродский И.А., Галахов И.В., Ганин Л.С., Коженков Е.В., Креков А.В., Лесков В.И.,*

- Логутенко С.Л., Осин В.А., Свиридов В.В., Сенник Д.А., Чистопольский М.В.* // Международная конференция. XVIII Харитоновские тематические научные чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии. Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2016. Т. 2. С. 55.
13. Semiconductor Reliability Handbook (Discrete Devices). Toshiba Corporation, 1999.
 14. *Сивченко А.С.* // МЭС-2016. М.: Ин-т проблем проектирования в микроэлектронике РАН, 2016.
 15. Sentaurus Device User Guide // Synopsys Inc. Mountain View. CA, USA. 2014.
 16. *Grishanin A., Yantsen N., Martynenko V., Frolov O.* // PCIM Europe 2014. Nuremberg, Germany. May 2014. P. 921.
 17. *Schwarzbauer H., Kuhnert R.* // IEEE Trans. Industry Applications, 1991. V. 27. № 1. P. 93.
 18. *Grishanin A., Martynenko V., Khapugin A., Malygin M., Frolov O., Nishchev K., Novopoltsev M.* // PCIM Europe 2017. Nuremberg, Germany. May 2017. P. 756.
 19. *Khapugin A.A., Plotnikov A.V., Martynenko V.A., Grishanin A.V., Kostritskii S.I., Kartaev V.N.* // PCIM Europe 2019. Nuremberg, Germany. May 2019. P. 769.