

ИССЛЕДОВАНИЕ КОММУТАЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ И РАБОЧЕГО РЕСУРСА РВД-КОММУТАТОРОВ НА ТОК 250 КА И НАПРЯЖЕНИЕ 25 КВ ДЛЯ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ МОЩНОЙ ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ

RESEARCH ON SWITCHING CAPABILITIES AND OPERATION RESOURCE OF RSD-SWITCHES AT THE CURRENT OF 250 KA AND VOLTAGE OF 25 KV IN THE SYSTEM OF POWER SUPPLY FOR HIGH-POWER LASER FACILITY

Е. В. Коженков¹, А. Г. Арзев¹, И. В. Галахов¹, Л. С. Ганин¹, А. В. Гришанин², В. Н. Картаев², С. И. Кострицкий², А. В. Креков¹, В. И. Лесков¹, В. А. Мартыненко², Д. А. Наумов², В. А. Осин¹, В. В. Свиридов¹, Д. А. Сенник¹, О. В. Фролов², А. А. Хапугин², М. В. Чистопольский¹

E. V. Kozhenkov¹, A. G. Arzev¹, I. V. Galakhov¹, L. S. Ganin¹, A. V. Grishanin², V. N. Kartayev², S. I. Kostriksky², A. V. Krekov¹, V. I. Leskov¹, V. A. Martynenko², D. A. Naumov², V. A. Osin¹, V. V. Sviridov¹, D. A. Senik¹, O. V. Frolov², A. A. Khapugin², M. V. Chistopolsky¹

¹Институт Лазерных Физических Исследований

Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИЭФ

²Научно-Инженерный Центр Силовых Полупроводниковых Приборов
Публичное Акционерное Общество «Электровыпрямитель», г. Саранск

¹Institute of Laser Physics Research

Russian Federal Nuclear Center – VNIIEF

²Scientific-Engineering Center of Power Semiconductor Devices
Open Joint-Stock Company «Electric Converter»

В неодимовой лазерной установке для коммутации запасенной энергии используются РВД-коммутаторы на импульсный ток 250 кА, рабочее напряжение 25 кВ, коммутируемый заряд более 70 Кл. В работе приведены результаты экспериментального определения величины критического тока через РВД-коммутатор по моменту появления на кривой падения напряжения на коммутаторе термогенерационных пиков в диапазоне токов от 20 кА до 350 кА. Представлены результаты исследований прямых вольт-амперных характеристик коммутаторов вплоть до критических значений импульсных токов, а также результаты их ресурсных испытаний.

RSD-switches are used for switching storage energy on a neodymium laser facility at the pulsed current of 250 kA, the operating voltage of up to 25 kV, the charge switched per pulse of more than 70 C. In this article the results of the experimental determination of a magnitude of critical current through the RSD switch due to the instant of occurrence of thermogeneration peaks on the curve of voltage drop on the switch in the range currents from 20 kA to 350 kA are presented. We present the results of researches of switches' direct volt-ampere characteristics up to the critical magnitudes of pulse currents as well as the results of switches' resource tests.

Введение

В настоящее время в РФЯЦ-ВНИИЭФ создается неодимовая лазерная установка [1]. Система накопления и коммутации электрической энергии (СНКЭЭ) является одной из основных систем установки и представляет собой емкостной накопитель энергии. В СНКЭЭ запасается электрическая энергия, которая затем передается в нагрузку – импульсные источники света, где преобразу-

ется в световое излучение накачки рабочего вещества лазерных усилителей.

СНКЭЭ состоит из идентичных модулей, в каждом из которых запасается 835 кДж электрической энергии при рабочем напряжении 24 кВ. Накопительные конденсаторы модуля разряжаются в импульсные лампы накачки лазера с помощью одного коммутатора импульсов тока. Коммутатор является ключевым элементом модуля и его

разработке уделяется особое внимание при создании накопителя энергии.

Высоковольтный коммутатор тока должен выдерживать рабочее напряжение 24 кВ и пропускать импульсные токи амплитудой 250 кА при длительности импульса около 500 мкс, что соответствует коммутируемому электрическому заряду около 70 Кл. При этом срок службы коммутатора должен быть сравним со сроком службы установки – не менее 10000 срабатываний [2].

В ОАО «Электровыпрямитель» (г. Саранск) по техническому заданию ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ для модуля СНКЭЭ лазерной установки был создан коммутатор на базе реверсивно включаемых динисторов (РВД). Результаты испытаний макетных и опытных образцов РВД-коммутаторов в условиях работы модуля накопителя показали их высокую работоспособность [3]. Вместе с этим в ОАО «Электровыпрямитель» проводилась работа по модернизации конструкции коммутатора, направленная на повышение его коммутационных возможностей и ресурса.

Целью работы являлось проведение исследований коммутационных возможностей РВД-коммутаторов и оценка их надежности и ресурса работы при использовании в лазерной установке. Также было целесообразно оценить и создать запас по коммутационному току и рабочему напряжению.

1. Полупроводниковый коммутатор тока на основе реверсивно включаемых динисторов

Реверсивно включаемый динистор представляет собой полупроводниковый прибор тиристорного типа. В основе процесса коммутации тока лежит идея переключения РВД в проводящее состояние с помощью управляющего плазменного слоя. Это позволяет сформировать плазменный канал с площадью, равной площади кремниевой пластины, и тем самым значительно увеличить величину коммутируемого тока. При приложении к РВД прямого напряжения через него начинает течь небольшой ток (до 100 мкА) – ток утечки. При деградации полупроводниковой структуры ток утечки резко возрастает, что позволяет использовать его в качестве критерия исправности РВД [4].

Коммутатор для модуля СНКЭЭ представляет собой сборку из пятнадцати бескорпусных РВД диаметром 76 мм с блокирующим напряжением 2 кВ, последовательно соединенных и находящихся в общем диэлектрическом корпусе. При этом требуется всего одно устройство управления (генератор запуска коммутатора), включающее одновременно и синхронно все элементы сборки. На

рис. 1 и 2 представлены эскиз и внешний вид РВД-коммутатора.

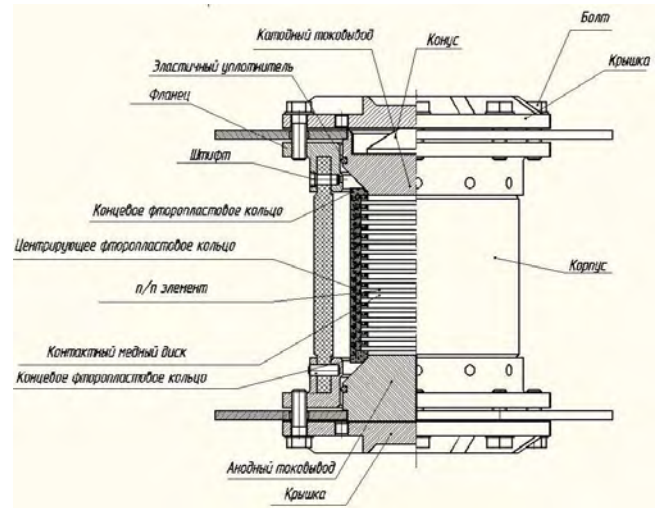


Рис. 1. Эскиз полупроводникового коммутатора на основе РВД



Рис. 2. Внешний вид полупроводникового коммутатора для модуля СНКЭЭ

При разработке конструкции полупроводникового коммутатора важным являются величина активной площади контакта между катодной поверхностью элемента РВД и электродом, усилие сжатия на контактные поверхности полупроводниковых приборов, а также величина неплоскостности и непараллельности контактных поверхностей полупроводниковых элементов и электродов.

2. Исследование коммутационных возможностей и ресурса работы полупроводниковых коммутаторов на основе РВД

При производстве РВД-коммутаторов на заводе-изготовителе ОАО «Электровыпрямитель» бы-

ли внедрены технологии, позволяющие значительно увеличить коммутационные возможности, ресурс работы и надежность коммутаторов.

1. Было введено увеличение диаметра РВД с 76 мм до 80 мм. Это позволяет сохранить конструкцию коммутатора без изменения его габаритных размеров. Расчеты показывают, что коммутируемый ток увеличивается на 10–15 %, а величина максимального нагрева РВД при разряде снижается на 100 °С. Кроме этого, удалось уменьшить толщину кремниевой структуры РВД без изменения величины блокирующего напряжения, что также приводит к снижению максимальной температуры нагрева.

2. Была модифицирована конструкция системы прижима с целью стабилизации усилия сжатия, примененного к сборке последовательно соединенных полупроводниковых элементов.

3. Надежность РВД определяется не только системой прижима и свойствами кремниевых структур, но и технологией межэлементных соединений полупроводникового элемента. В ОАО «Электровыпрямитель» осуществлен переход от технологии высокотемпературного сплавления [5] кремниевых структур с использованием высокотемпературного припоя к молибденовым подложкам к технологии низкотемпературного спекания с применением серебряносодержащих паст [6]. Исследования в этой области показывают, что процесс низкотемпературного спекания позволяет уменьшить изгибы полупроводниковых элементов РВД более чем в 3 раза по сравнению с процессом высокотемпературного сплавления и существенно улучшить однородность давления в контактной системе коммутатора.

2.1. Основные параметры экспериментальных стенов

Исследования коммутационных возможностей и ресурса работы полупроводниковых коммутаторов на основе РВД проводились в ОАО «Электровыпрямитель» – на стенде для испытаний полупроводниковых приборов импульсами тока большой мощности, и в ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ (г. Саров) – на стенде, представляющем собой высоковольтный модуль СНКЭЭ [7]. В табл. 1 приведены основные параметры экспериментальных стенов.

На рис. 3 представлены формы импульсов тока, протекающего через коммутатор при разряде на стендах ИЛФИ и ОАО «Электровыпрямитель», и их аппроксимирующие функции. Формы импульсов существенно различаются при одной и той же амплитуде тока 250 кА, длительность (по уровню 0,1 амплитуды) импульса на стенде ИЛФИ составляет 500 мкс, а на стенде ОАО «Электровыпрямитель» – 520 мкс.

В результате анализа формы импульсов тока установлено, что РВД-коммутатор при работе на стенде ОАО «Электровыпрямитель» при разрядном токе 250 кА переносит заряд, равный 83,9 Кулон, а при работе на стенде в ИЛФИ – заряд, равный 71,4 Кулон. Расчеты характеристик I^2t (интеграла Джоуля) также показали заметное различие этого показателя от формы тока. На стенде в ОАО «Электровыпрямитель» он равен $16,5 \times 10^6 \text{ A}^2\text{с}$, на стенде ИЛФИ – $12,7 \times 10^6 \text{ A}^2\text{с}$. Таким образом, пропускаемые коммутатором заряд и энергия за время действия импульсного тока 250 кА, на стенде в ОАО «Электровыпрямитель» соответственно на 17,5 % и 30 % выше заряда и энергии, пропу-

Таблица 1

Основные параметры экспериментальных стенов

№	Наименование параметра	Стенд в ОАО «Электровыпрямитель» г. Саранск	Стенд в ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ г. Саров
1	Суммарная емкость накопителя энергии	16000 мкФ	3000 мкФ
2	Максимальная запасаемая энергия	200 кДж (при 5 кВ)	900 кДж (при 25 кВ)
3	Напряжение заряда накопительных конденсаторов	(0,5 ÷ 5) кВ	(5 ÷ 25) кВ
4	Максимальный ток через коммутатор	400 кА	в штатном режиме работы – 250 кА, в аварийном – до 300 кА
5	Длительность импульса (на уровне 0,1 амплитуды)	520 мкс	500 мкс
6	Форма импульса тока	правильная полусинусоида	апериодическая
7	Тип нагрузки	резистивная	резистивная

каемых коммутатором при работе на стенде в ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ.

2.2. Результаты экспериментальных исследований коммутационных возможностей и ресурса работы полупроводниковых коммутаторов на основе РВД

На стенде ИЛФИ при рабочем напряжении 24 кВ и коммутируемом токе 250 кА были проведены исследования работы полупроводниковых коммутаторов на основе РВД диаметром 76 мм. При этом два образца РВД-коммутаторов прошли 400 и 500 включений соответственно. Еще один образец успешно выдержал 250 включений с током 250 кА и 250 включений с током 265 кА. Четыре образца коммутатора успешно выдержали по 1000 включений с током 250 кА. Токи утечки коммутаторов находились в норме и были значительно ниже 100 мкс.

Проведенные исследования РВД-коммутаторов показывают, что они способны работать при таких амплитудах рабочих токов и напряжений по крайней мере до 1000 включений. По расчетам при работе коммутаторов в таком режиме максимальная температура нагрева кремниевой структуры элементов РВД приближается к предельной температуре, при которой в кремнии наступают деградационные процессы и нарушается целостность, что ведет к выходу РВД из строя. Целесообразно создать запас по коммутируемому току для РВД, что значительно повысит надежность и увеличит ресурс работы коммутатора. В настоящее время в опытных образцах РВД-коммутаторов используются РВД диаметром 80 мм, изготовленные по технологии низкотемпературного спекания.

Рабочий режим эксплуатации РВД определяется максимально допустимой температурой разогрева перехода РВД. При условии равенства температур для различных форм коммутируемого тока, рассчитаны рабочие импульсные токи, протекающие через полупроводниковый коммутатор при разряде на обоих экспериментальных стендах. Расчеты проведены с использованием программного комплекса TCAD Synopsys. На рис. 4 представлены графики разрядных токов и температуры разогрева кремниевых структур РВД при протекании импульсов тока различной формы.

Из этих графиков следует, что максимальная температура кремниевых структур коммутатора, равная примерно 490 °К (217 °С), достигается на стенде ИЛФИ при коммутации импульсов тока амплитудой 250 кА, а на стенде ОАО «Электровыпрямитель» – при токе 220 кА. Коэффициент

пропорциональности между этими токами равен 1,136. В дальнейшем, этот коэффициент учитывался для определения рабочих, предельно-допустимых и критических импульсных токов коммутаторов на обоих стендах.

На экспериментальном стенде ОАО «Электровыпрямитель» были проведены исследования прямой вольт-амперной характеристики (ВАХ) РВД-коммутатора в области импульсных токов от 19 до 312 кА при длительности 520 мкс (на уровне 0,1 амплитуды), что соответствует разрядным токам от 22 до 354 кА на стенде ИЛФИ. В табл. 2 представлены численные значения разрядных токов и падений напряжения на коммутаторе, измеренные на стенде ОАО «Электровыпрямитель», а также расчетные значения разрядных токов, приведенные к режиму эксплуатации коммутатора на стенде ИЛФИ.

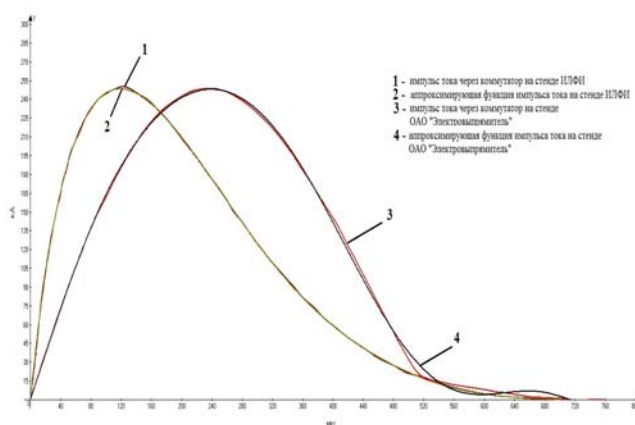


Рис. 3. Формы импульсов силового тока, протекающего через коммутатор при разряде на стендах ИЛФИ и ОАО «Электровыпрямитель», и их аппроксимирующие функции

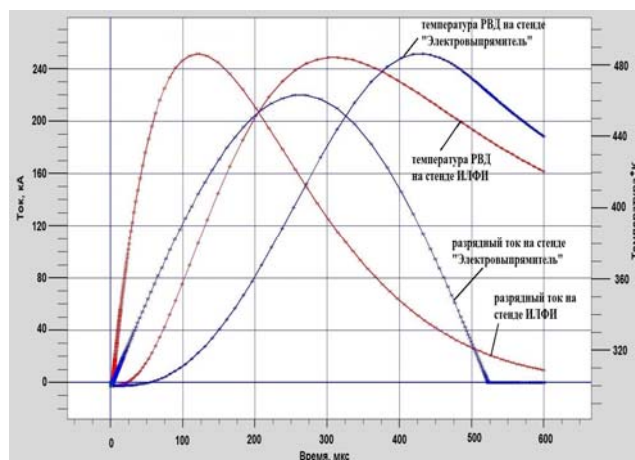


Рис. 4. Графики разрядных токов и температуры разогрева кремниевых структур РВД на стендах ИЛФИ и «Электровыпрямитель»

Таблица значений разрядных токов и падений напряжения на коммутаторе

№	Стенд ОАО «Электровыпрямитель» г. Саранск		Стенд ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ г. Саров		№	Стенд ОАО «Электровыпрямитель» г. Саранск		Стенд ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ г. Саров	
	Разрядный ток, кА	Падение напряжения на коммутаторе, В	Разрядный ток, кА	Разрядный ток, кА		Разрядный ток, кА	Падение напряжения на коммутаторе, В	Разрядный ток, кА	Разрядный ток, кА
1	19	24	22	14	220	140	250		
2	38	34	43	15	227	135	258		
3	46	44	52	16	234	132	266		
4	55	42	66	17	248	136	282		
5	72	50	82	18	256	144	290		
6	85	56	96	19	263	152	299		
7	104	65	119	20	265	148	301		
8	122	72	139	21	268	154	304		
9	140	78	159	22	270	154	308		
10	156	84	177	23	277	165	315		
11	174	92	198	24	294	175	334		
12	191	100	217	25	309	182	351		
13	210	110	239	26	312	187	354		

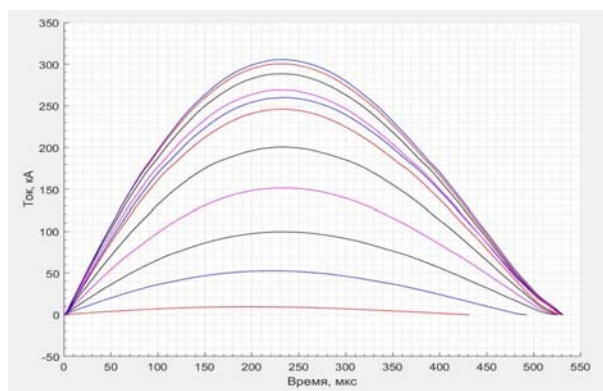


Рис. 5. Разрядные токи через коммутатор на стенде ОАО «Электровыпрямитель»

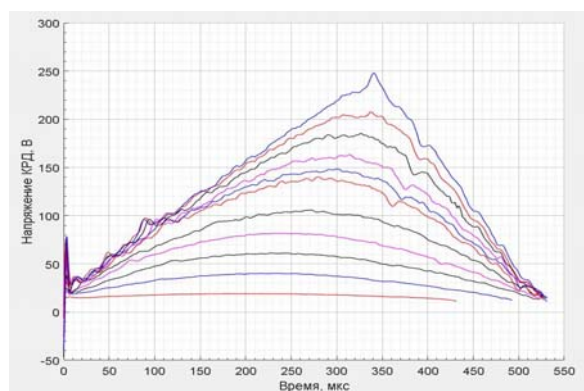


Рис. 6. Падение напряжения на коммутаторе при коммутации токов, указанных на рис. 5, на стенде ОАО «Электровыпрямитель»

На рис. 5 и 6 показаны временные зависимости разрядных токов и падений напряжения на коммутаторе на стенде ОАО «Электровыпрямитель». Из осциллограмм видно, что термогенерационный пик падения напряжения возникает на триста сороковой микросекунде после начала прохождения разряда через коммутатор, что соответствует разрядному току 312 кА. С учетом поправочного коэффициента, учитывающего форму импульса тока, критическая амплитуда импульса тока через коммутатор на стенде в ИЛФИ равна примерно 350 кА. Наличие термогенерационного пика на кривой падения напряжения говорит о начале неконтролируемого термогенерационного процесса, который ведет к локализации тока и тепла в кремниевой структуре РВД, и в итоге к пробоем полупроводниковых приборов и коммута-

тора. Расчеты показывают, что при этих токах температура кремниевой структуры РВД достигает величины около 600 °С. Это может привести к выгоранию катодной металлизации элементов РВД и ускорению процесса их деградации.

На рис. 7 показана прямая вольтамперная характеристика коммутатора, построенная по максимальным значениям импульсов тока и падений напряжения, изображенных на рис. 5 и 6. Прямая ВАХ показана на графике с двумя шкалами токов: верхняя шкала тока соответствует измеренным значениям на стенде ОАО «Электровыпрямитель», нижняя шкала тока – эквивалентному значению тока через коммутатор на стенде ИЛФИ. На рис. 8 представлены расчетные зависимости прямого падения напряжения (1) и максимального перепада температуры (2) в РВД на стенде ИЛФИ при дли-

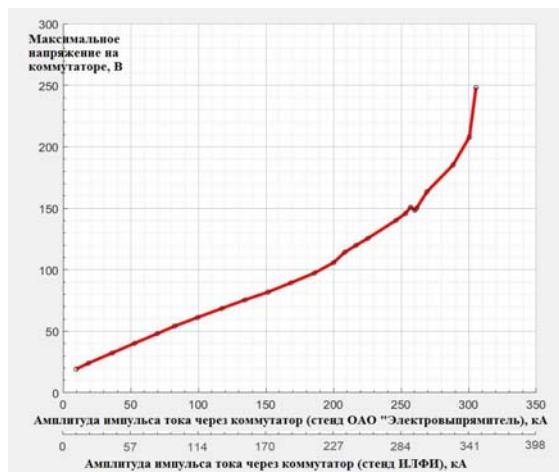


Рис. 7. Вольтамперная характеристика коммутатора, полученная экспериментальным путем

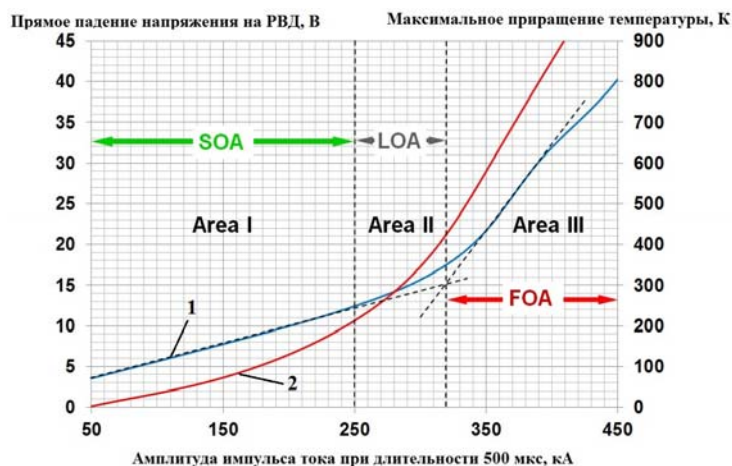


Рис. 8. Расчетные зависимости прямого падения напряжения (1) и максимального перепада температуры (2) в РВД на стенде ИЛФИ

тельности импульса тока 500 мкс. Форма прямой ВАХ коммутатора, полученная экспериментально, близка к форме прямой ВАХ единичного РВД, полученной расчетным путем.

На основании результатов проведенных исследований можно сделать вывод, что рабочими значениями разрядных токов через РВД-коммутатор в модуле СНКЭЭ следует считать токи порядка 250 кА (область 1 на рис. 8), предельно допустимые значения тока следует ограничить максимальной амплитудой равной 300–310 кА (область 2 на рис. 8; этот ток разрешается коммутировать только в аварийном режиме работы СНКЭЭ, а количество таких включений за срок службы коммутаторов не должно превышать 25), а критическими значениями тока считаются амплитуды свыше 310 кА (область 3 на рис. 8; такой ток может привести к пробоем полупроводниковых элементов РВД и коммутатора).

В настоящее время в ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ испытывается опытная партия РВД-коммутаторов с элементами диаметром 80 мм, изготовленных по технологии низкотемпературного спекания, при рабочем напряжении 24 кВ и коммутируемом токе 250 кА. Один из таких коммутаторов выдержал 1050 включений, еще один коммутатор прошел 300 включений, а остальные коммутаторы – по 50 включений.

Заключение

В работе описаны экспериментальные стенды ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ и ОАО «Электровыпрямитель», которые позволяют испытывать РВД-коммутаторы в предельных режимах и рабочих

условиях модулей накопителя энергии создаваемой установки. Приведены результаты экспериментальных исследований предельного коммутируемого РВД-коммутатором тока. Предельный (критический) ток определялся по моменту появления на кривой падения напряжения на коммутаторе термогенерационных пиков. РВД-коммутатор был испытан в диапазоне токов от 20 до 350 кА. Показано, что амплитуда тока, при котором может наступить шнурование тока и выход из строя коммутатора составляет около 350 кА при длительности импульса около 500 мкс. Рабочими значениями разрядных токов через РВД-коммутатор следует считать токи порядка 250 кА. На стенде ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ в рабочем режиме (напряжение 24 кВ и ток 250 кА) испытаны РВД коммутаторы: пять коммутаторов по 1000 включений, три коммутатора по 300, 400 и 500 включений, а также один коммутатор выдержал 250 включений при повышенном токе 265 кА. Показано, что в результате проведенных испытаний отказов в работе и изменений токов утечки полупроводниковых коммутаторов на основе РВД не зарегистрировано.

Список литературы

1. Гаранин С. Г., Бельков С. А., Бондаренко С. В. Концепция построения лазерной установки нового поколения // Сборник докладов XXXIX международной конференции по физике плазмы и УТС. 2012. С. 17.
2. Галахов И. В., Гаранин С. Г., Кириллов Г. А., Муругов В. М., Сухарев С. А. Конденсаторная батарея 120 МДж, 24 кВ для мощного неодимового лазера установки «Искра-б»: концеп-

туальный проект // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2003. Т. 5. С. 224–231.

3. Свиридов В. В., Арзев А. Г., Беспалов Е. А. и др. Высоковольтный коммутатор мощных импульсов тока на основе реверсивно включаемых динисторов для емкостного накопителя энергии неодимового лазера // Сборник докладов «Труды международной конференции «XVIII Харитоновские научные чтения». 2017. Т. 2. С. 148–156.

4. Безуглов В. Г., Беляев С. А., Галахов И. В. и др. Новое поколение мощных полупроводниковых коммутаторов для применений импульсной энергетики // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2010. Т. 15. С. 326–331.

5. Krebs T., Adema G., Calicdan A., Schmitt W. Silver sintering as lead free die attach technology

in discrete power packages // PCIM Europe 2013. 14–16 May 2013. Nuremberg.

6. Лукин В. И., Рыльников В. С., Лощин Ю. В., Нищев К. Н. Низкотемпературное спекание серебряносодержащей пасты при соединении кремния с молибденом // Электронный научный журнал «Труды ВИАМ». 2015.

7. Ганин Л. С., Арзев А. Г., Беспалов Е. А. и др. Модуль емкостного накопителя с запасенной энергией 900 кДж на базе реверсивно включаемых динисторов для питания ламп накачки мощного неодимового лазера // Сборник докладов «Труды международной конференции «XVIII Харитоновские научные чтения». 2017. Т. 2. С. 55–63.