

# РВД-ключи

## для мощных твердотельных энергетических систем

**В статье представлены результаты разработки полупроводниковых ключей на импульсные токи до 300 кА, напряжение до 25 кВ на основе реверсивно-включаемых динисторов для мощных твердотельных энергетических систем. Дано описание конструкции и особенности работы реверсивно-включаемых динисторов в типовой схеме коммутирующего устройства, их основные параметры и характеристики. Представлены также вспомогательные приборы — коммутатор двуполярных импульсов тока, генератор запуска, дроссель насыщения, защитный лавинный диод, необходимые для надежной работы РВД-ключей в модулях емкостных накопителей электрофизических установок нового поколения.**

**Алексей Хапугин**

**Вячеслав Мускатиньев**

**Валентин Мартыненко**

**Алексей Гришанин**

nicssp@elvpr.ru

**Вячеслав Елисеев**

el.press@mail.ru

**Игорь Галахов**

**Леонид Ганин**

**Владимир Осин**

igor.galakhov@mail.ru

### Введение

Мощная импульсная энергетика является одной из перспективных областей применения силовых полупроводниковых приборов [1]. В настоящее время создаются современные мощные твердотельные энергетические системы (PSSSES — Power Solid State Energy System), состоящие из параллельно соединенных модулей емкостных накопителей электрической энергии (е.н.э.) с коммутирующей аппаратурой общей мощностью  $10^9$ – $10^{14}$  Вт. Они работают как в одиночных, так и в импульсно-периодических режимах и используются для питания электрофизических установок различного назначения (лазеры, ускорители, токамаки, генераторы магнитных полей и пр.) [2–4]. В будущем PSSSES могут быть применены в традиционной и альтернативной энергетике, промышленности, электротранспорте — там, где требуется быстрая передача большого количества энергии в короткий интервал времени. Для коммутирующей аппаратуры PSSSES необходимы полупроводниковые ключи с большой активной площадью, способные переключать импульсные токи до 500 кА при рабочем напряжении до 25 кВ со сроком службы свыше  $10^4$  включений. Для быстрой коммутации мощных и коротких импульсов тока сегодня наиболее предпочтительны полупроводниковые приборы тиристорного типа с инжекционно-плазменным управлением — реверсивно-включаемые динисторы (РВД) [5]. РВД обладают рядом преимуществ по сравнению с газоразрядными ключами: низкой энергией потерь мощности, рассеиваемой в ключе, низкими эксплуатационными расходами, не допускают пропуска срабатывания, имеют большой срок службы, экологически безопасны,

невосприимчивы к положению в пространстве. Традиционные тиристоры (ЕТТ, ЛТТ), используемые в импульсной технике, имеют принципиальный недостаток, связанный с низкой скоростью распространения включенного состояния (0,05–0,1 мм/мкс). Вследствие этого время полного включения тиристоров может длиться десятки и сотни микросекунд, что приводит к высоким переходным потерям мощности и низкой стойкости приборов к  $di/dt$  при коммутации больших и коротких импульсов тока. Импульсные свойства тиристоров можно улучшить, например, с помощью разветвленной топологии управляющего электрода [6]. Однако это вызывает значительные потери полезной площади кремниевых пластин (до 80%), снижая эффективность использования дорогостоящих материалов (Si, Mo, Ag) при изготовлении тиристоров и увеличивая стоимость ключей. РВД способны однородно переключать импульсы тока плотностью до  $10^4$  А/см<sup>2</sup> в широком временном диапазоне ( $10^1$ – $10^3$  мкс) с очень высокими скоростями нарастания тока ( $di/dt \geq 10^5$  А/мкс), недостижимыми для самых лучших импульсных тиристоров.

В статье представлены результаты разработки РВД-ключей на рабочие ток до 250 кА и напряжение до 25 кВ для систем питания мощного неодимового лазера и рентгенографических комплексов нового поколения.

### Структура кристалла, принцип работы РВД

Реверсивно-включаемый динистор является двухэлектродным аналогом тиристоры с обратной проводимостью. Кремниевая структура динисто-

ров представляет собой большую силовую интегральную схему, состоящую из нескольких тысяч одинаковых элементарных ячеек (ЭЯ), каждая из которых содержит тиристорные ( $n^+pnn^+p^+$ ) и диодные ( $pnn^+n^+$ ) элементы (рис. 1а). Чередующиеся тиристорные и диодные элементы оптимальным образом расположены по площади кремниевой пластины (рис. 1б). Благодаря этому удается минимизировать время полного включения динистора и обеспечить низкие энергетические потери в режиме накачки, в переходном и установившемся состоянии проводимости. При этом суммарная площадь диодов РВД, рассчитанного для работы в моноимпульсном режиме, не превышает 10–12% от полной площади кремниевой пластины. Все элементы динисторов имеют общий высоковольтный  $p-n$ -переход, который служит коллектором для тиристорных элементов и блокирует внешнее напряжение. Для коммутации биполярных импульсов тока используются динисторы с обратной проводимостью (РВДД) [7], у которых суммарная площадь диодов около 30% от общей площади кремниевой пластины.

Включение РВД производится коротким импульсом тока при кратковременном приложении к нему обратного напряжения

(режим накачки, рис. 2а). Обратный ток, протекая через диодные элементы, быстро и однородно заполняет приколлекторную базовую область динистора электронно-дырочной плазмой. Она вызывает встречную инжекцию носителей заряда с прямосмещенных эмиттерных переходов (рис. 2б) и инициирует регенеративный процесс перехода динистора в проводящее состояние. Суммарное количество введенного заряда регулируется амплитудой и длительностью тока накачки. Благодаря такому способу включения и специальной конструкции кремниевой структуры происходит однородное включение РВД по всей активной площади прибора за очень короткий промежуток времени, подобно включению диода; при этом преимущество РВД перед обычными тиристорами будет тем больше, чем выше  $di/dt$  и меньше длительность коммутируемого тока.

**Типовая электрическая схема коммутирующего устройства, обозначения параметров и характеристик РВД**

Наиболее распространенная схема коммутирующего устройства с РВД представлена на рис. 3. Силовая часть схемы состоит из сле-

дующих элементов: силовой конденсатор большой емкости  $C_0$ , сопротивление нагрузки  $R$ , формирующая индуктивность  $L$ , динистор РВД, дроссель с насыщающимся сердечником  $L_0$ . На схеме в пределах области, ограниченной пунктирной линией, обозначены элементы контура запуска. Схема работает при условии  $L < L_g$ . В случае  $L \gg L_g$  дроссель насыщения  $L_0$  можно исключить.

Находясь в исходном запертом состоянии в силовом контуре с заряженным до рабочего напряжения конденсатором  $C_0$ , динистор блокирует разрядный ток. Для включения РВД к нему в обратном направлении от блока запуска подается короткий (~1 мкс) запускаящий импульс тока.

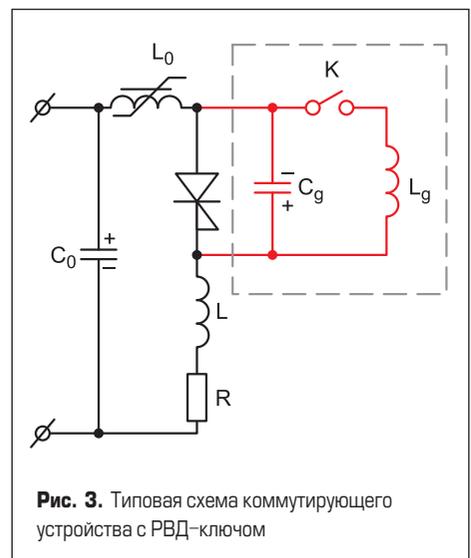
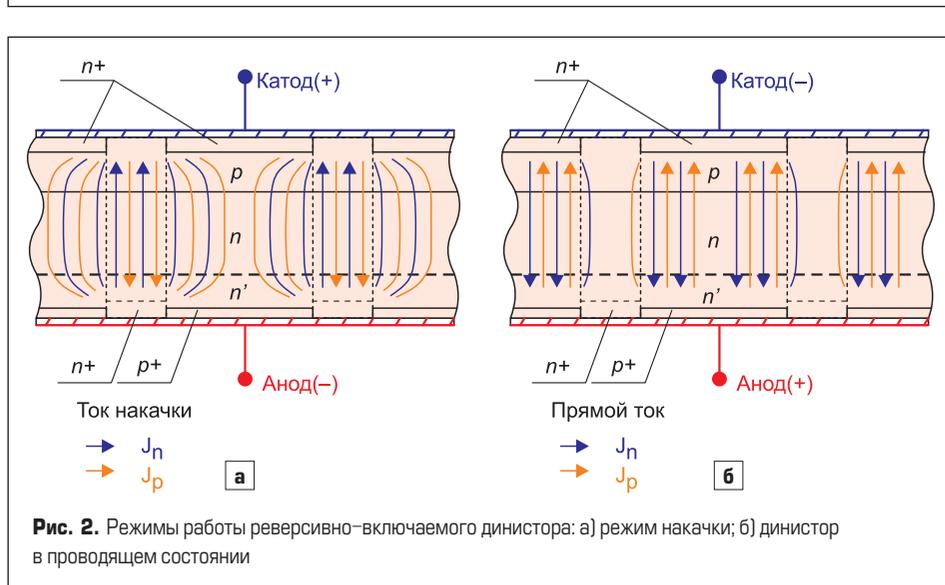
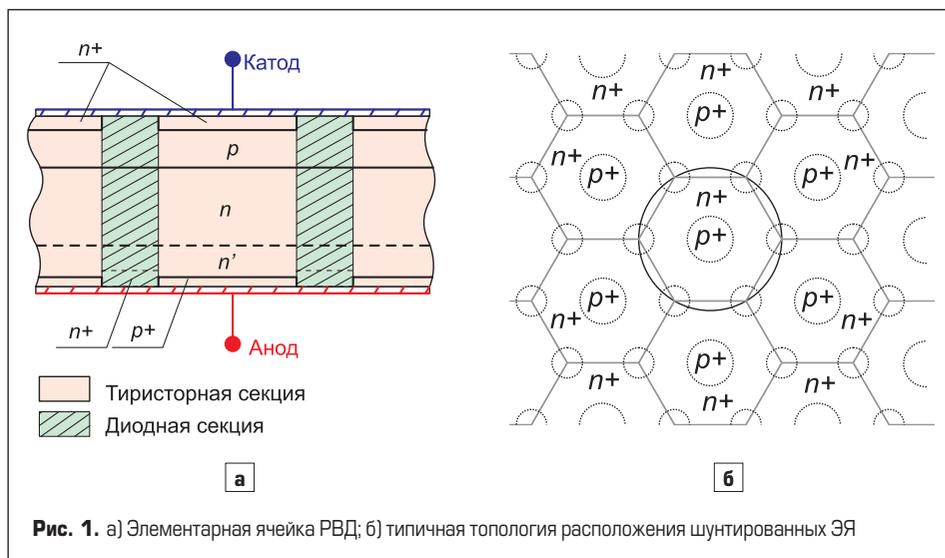
Во время этого процесса электрическая развязка силового и управляющего контуров обеспечивается дросселем  $L_0$ , имеющим большую начальную индуктивность. В течение времени магнитной задержки (~1,5 мкс) через  $L_0$  протекает медленно растущий ток, после чего происходит насыщение дросселя (переход в состояние с низкой индуктивностью). Направление протекания тока становится положительным и РВД осуществляет разряд конденсатора  $C_0$  на нагрузку.

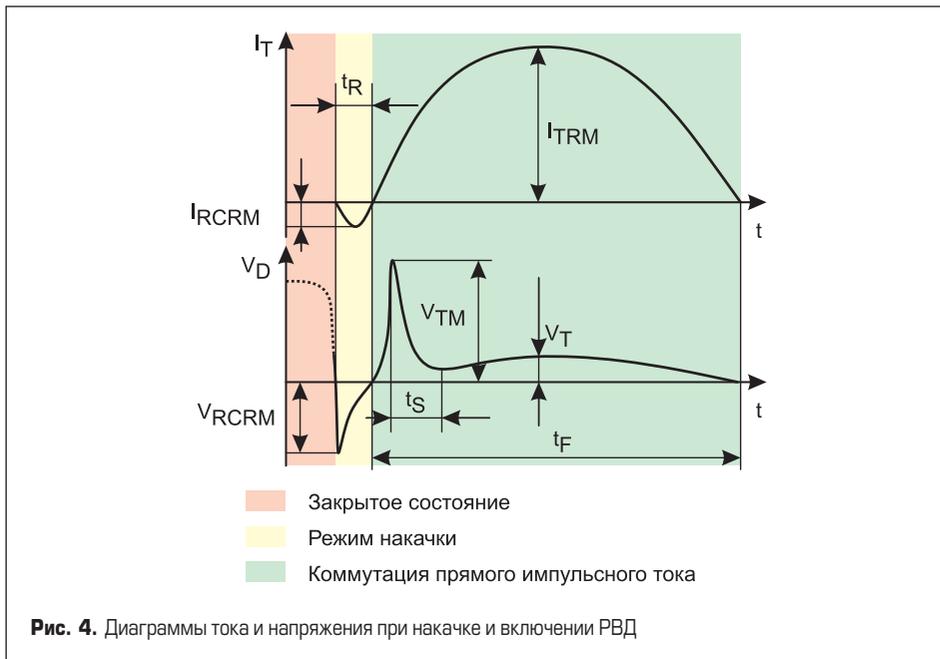
На рис. 4 показаны временные диаграммы тока и напряжения на всех этапах включения РВД:

- блокирующее напряжение  $V_D$  (красный);
- импульс тока накачки  $I_{RCRM}$  длительностью  $t_R$ , падение напряжения при этом токе  $V_{RCRM}$  (желтый);
- переходный процесс перехода РВД в проводящее состояние с коммутационным пиком  $V_{TM}$  длительностью  $t_S$  (зеленый);
- установившееся состояние проводимости РВД, прямое падение напряжения  $V_T$  при токе  $I_{TRM}$  длительностью  $t_F$  (зеленый).

**Конструкция приборов и высоковольтных сборок РВД-ключей**

В конденсаторных батареях с запасаемой энергией мультимегаджоулевого уровня используются РВД с блокирующим напряжением 2,4 кВ и диаметром элементов 63, 76





Высоковольтные ключи состоят из цилиндрического корпуса-изолятора, последовательно соединенных бескорпусных полупроводниковых элементов в количестве 15 штук, системы прижима, катодных и анодных токовыводов.

Полупроводниковые элементы проходят специальные испытания для надежной работы в сборках с последовательным соединением без делителей напряжения. В случае работы РВД-ключей в сложных климатических условиях приборы изготавливаются в таблеточной конструкции типа Presspack, а ключи на их основе в конструкциях, аналогичных Stack Assemblies. РВД-ключи с диаметром элементов 63 мм в варианте, изображенном на рис. 6а, нашли применение в конденсаторной батарее с зарядным напряжением 25 кВ и запасаемой энергией 5 МДж для питания импульсных ламп накачки неодимового лазера установки «Луч» [9] — прототипа мощных лазеров нового поколения. PSSES-установка «Луч» состоит из 18 модулей конденсаторной батареи, в каждом из которых находится по одному РВД-ключу с параметрами 100 кА, 25 кВ, 500 мкс. Ключи в данной установке работают без дросселей насыщения, поскольку в ее конструкции выполняется условие  $L \gg L_g$  (рис. 3). Установка «Луч» была запущена в 2002 году и до настоящего времени стабильно, без самопроизвольных срабатыва-

и 100 мм (рис. 5). В работе [8] отмечено, что эти приборы способны коммутировать одиночные импульсы тока длительностью 450 мкс и амплитудой 200, 300 и 500 кА соответственно. Дальнейшие исследования показали, что в сборках с последовательным соединением приборов импульсные токи высоковольтных РВД-ключей должны быть примерно на 20% ниже значений, установленных для единичных приборов.

На основе этих приборов разработаны различные варианты конструкций высоковольтных сборок РВД-ключей в зависимости от схем применения, режимов и условий эксплуатации.



Рис. 5. Полупроводниковые элементы РВД Ø 63, 76 и 100 мм и РВД в металлокерамических корпусах



Рис. 6. РВД-ключи на основе полупроводниковых элементов диаметром: а) 63 мм; б) 76 мм

На рис. 6 представлены образцы конструкций РВД-ключей на рабочее напряжение 25 кВ, изготовленных на основе РВД с диаметром элемента 63 (рис. 6а) и 76 мм (рис. 6б). Они предназначены для конденсаторных батарей, работающих в закрытых помещениях при температурах +10...+35 °С и влажности до 80%.

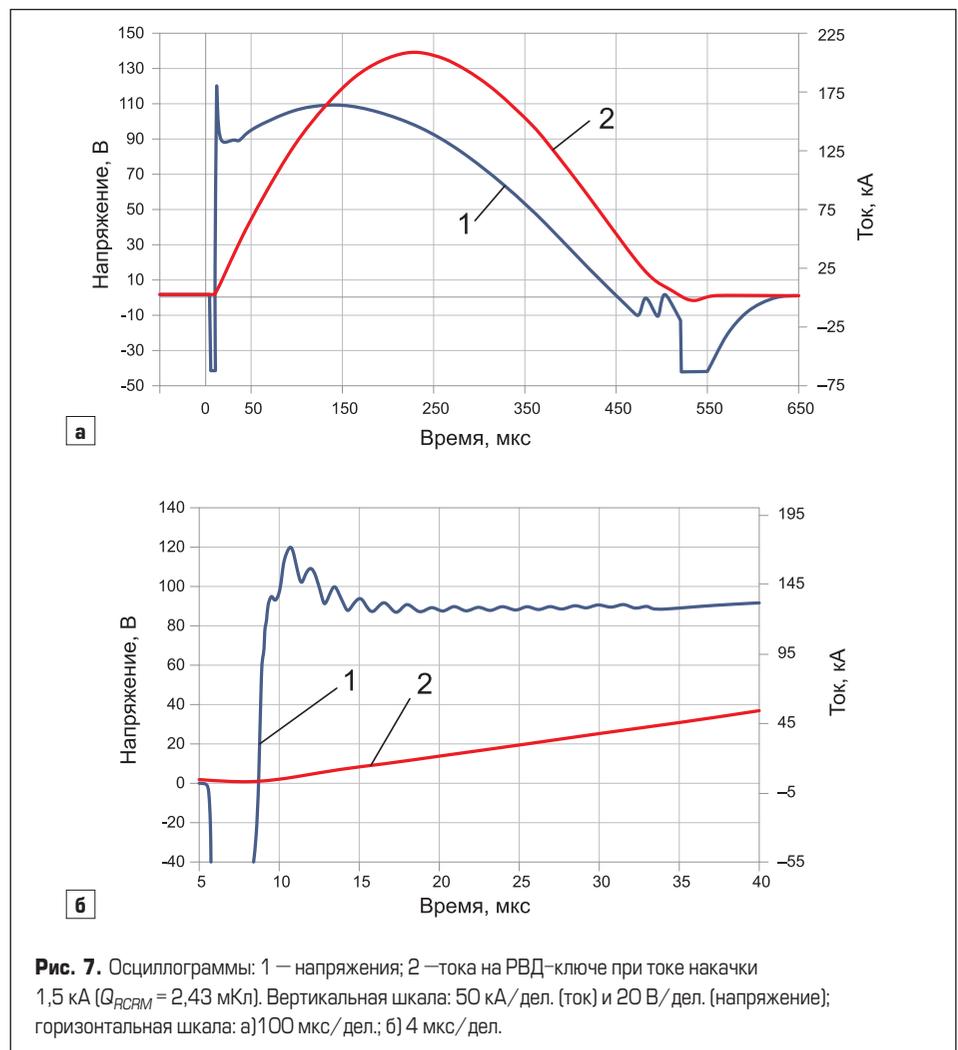


Рис. 7. Осциллограммы: 1 — напряжения; 2 — тока на РВД-ключе при токе накачки 1,5 кА ( $Q_{RCRM} = 2,43$  мКл). Вертикальная шкала: 50 кА/дел. (ток) и 20 В/дел. (напряжение); горизонтальная шкала: а) 100 мкс/дел.; б) 4 мкс/дел.

ний и пропусков срабатываний, функционирует при зарядных напряжениях 20–25 кВ. Это первый в мире неодимовый лазер, у которого коммутирующее устройство накопителя электрической энергии изготовлено на основе РВД-технологии.

**Параметры импульсов запуска, рабочие и предельно допустимые импульсные токи РВД-ключа**

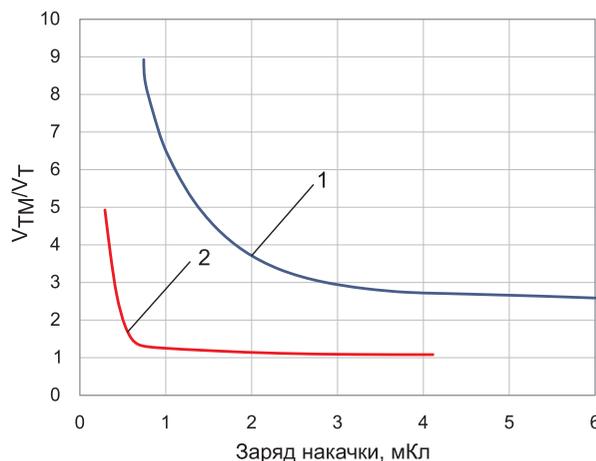
Для 0,9-МДж модуля конденсаторной батареи нового мощного неодимового лазера разработаны 25-кВ РВД-ключи с диаметром элементов 80 мм (рис. 6б) [10]. Они переключают импульсы тока с амплитудой в рабочем режиме — 250 кА, в аварийном режиме — до 300 кА.

Квазидиодное включение этих приборов наглядно продемонстрировано на рис. 7. Здесь представлена кривая падения напряжения на ключе при протекании импульса тока амплитудой 215 кА. Прибор управлялся током накачки, равным 1,5 кА, заряд накачки 2,4 мКл. Видно, что время полного включения прибора составляет около 4 мкс, падение напряжения 110 В, коммутационный пик напряжения 120 В. На рис. 8 показана зависимость отношения амплитуды пика коммутационного напряжения к установившемуся падению напряжения ( $V_{TM}/V_T$ ) на 25-кВ РВД-ключе в открытом состоянии от заряда накачки и скорости нарастания анодного тока.

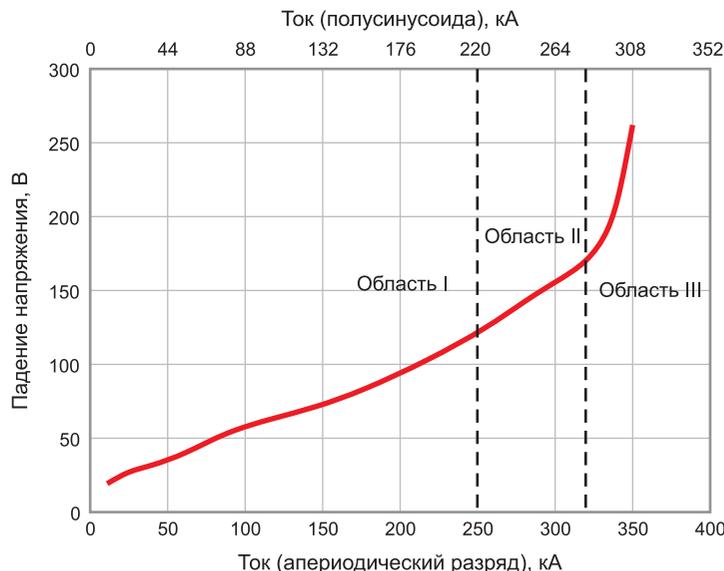
Из этой зависимости следует, что для надежного включения РВД-ключа в различных режимах работы заряд накачки должен быть не менее 2 мКл.

На рис. 9 представлена экспериментальная прямая вольт-амперная характеристика ключа, построенная по результатам измерений временных зависимостей разрядных токов и прямых падений напряжений. Измеренные значения падения напряжения зависят от формы тока. На рис. 9 показаны две шкалы токов. Верхняя шкала соответствует штатным измерениям, выполненным у изготовителя силовых полупроводниковых приборов на активную нагрузку; форма тока — правильная синусоида. Нижняя шкала токов соответствует реальному аperiodическому разряду на нагрузку на стендах изготовителя конденсаторной батареи. Выделены три области на кривой  $V_T = f(I_{TRM})$ , характеризующие: рабочий (область I), предельный (область II) и запрещенный (область III) режимы работы РВД-ключа. Рабочий режим — 250 кА, 25 кВ, 500 мкс с ресурсом около 10 000 включений; предельно допустимый режим — до 300 кА, при этом количество импульсов в таком режиме не должно превышать 100 включений за весь срок службы РВД-ключа.

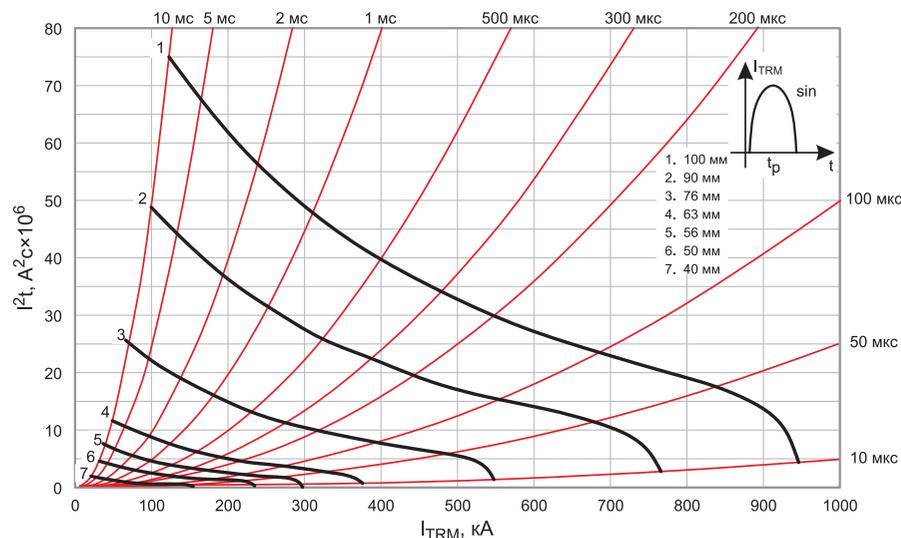
Коммутация тока свыше 300 кА запрещена. Критическое значение импульса тока через коммутатор, при котором может наступить шунтирование тока в кремниевой структуре РВД и выход ключа из строя при первом включении, около 350 кА. Срок службы РВД-ключей зависит от величины коммутируемого тока. В работе [10] показано, что срок службы РВД-ключа повышается с  $10^4$  до  $10^6$  включений



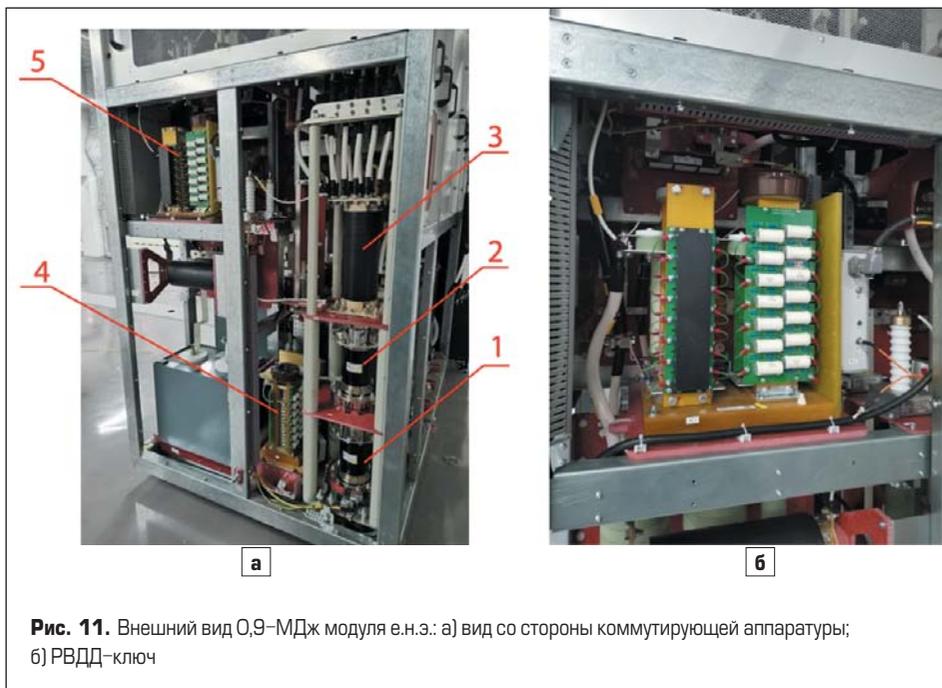
**Рис. 8.** Зависимость отношения амплитуды пика коммутационного напряжения к установившемуся падению напряжения на РВД-ключе от заряда накачки и скорости нарастания тока  $di/dt$ : 1 — 40 кА/мкс; 2 — 1,5 кА/мкс



**Рис. 9.** Экспериментальная прямая вольт-амперная характеристика нового РВД-ключа



**Рис. 10.** SOA РВД с диаметрами элементов 40 (7), 50 (6), 56 (5), 63 (4), 76 (3), 90 (2), 100 мм (1), работающих в моноимпульсном режиме



- Дроссель насыщения для магнитной задержки импульсов 300 кА, 25 кВ, 500 мкс; длительность задержки около 1,5 мкс.
- Лавинный диод на ток 250 кА, напряжение 25 кВ для защиты РВД от обратной полярности тока и перенапряжений в силовой цепи. Диод способен выдерживать обратную ударную мощность с энергией не менее 150 Дж. Конструкция лавинного диода выполнена в виде высоковольтной сборки, аналогичной конструкции РВД-ключа (рис. 6б).
- Высоковольтный диодный модуль на ток 2 А и блокирующее напряжение 50 кВ для защиты зарядного устройства.

**Применение 250 кА/25 кВ РВД-ключа**

Разработанные ключи с устройствами запуска, защиты и магнитной задержки используются в коммутующей аппаратуре 0,9-МДж модулей емкостного накопителя лазерной установки. В правом ближнем углу модуля (рис. 11а) расположен высоковольтный блок коаксиальной конструкции, состоящий из последовательно соединенных РВД-ключа (1), защитного лавинного диода (2) и дросселя насыщения (3). Рядом с РВД-ключом (внизу) находится генератор запуска (4). Управление реверсивно-включаемыми динисторами в высоковольтной сборке производится от одного генератора запуска, который подсоединяется параллельно РВД-ключу. Ток управления (накачки) от генератора запуска протекает по одной цепи через все последовательно включенные приборы. Такой способ управления дает РВД-ключу еще одно несомненное преимущество перед тиристорными переключателями — существенно повышается эффективность и надежность управления емкостными накопителями в мультимегаджоулевых системах. В левой передней части модуля (рис. 11а) расположен РВД-ключ (5) контура предварительной ионизации импульсной лампы накачки лазерных усилителей. Увеличенное фото ключа показано на рис. 11б.

На рис. 12 представлены типичные осциллограммы тока предьонизации и силового тока, коммутируемые соответственно РВД- и РВД-ключами в штатном режиме работы модуля.

В новой мощной лазерной установке модули конденсаторной батареи объединены в общую энергетическую систему (PSSSES). В настоящее время проходит испытания первая часть PSSSES, в составе которой 18 модулей с общей запасаемой энергией 16 МДж.

Разработанные РВД-ключи нашли также применение в модуле импульсного питания электромагнита бетатрона [11], позволяющего создавать в обмотках электромагнита униполярные импульсы тока амплитудой 110 кА длительностью ~1 мс. Запасенная энергия емкостного накопителя ~0,5 МДж. Для защиты емкостного накопителя бетатрона от обратного тока использована схема «крупбар», построенная на основе

при снижении коммутируемого тока с 250 до 100 кА.

Коммутируемые токи РВД-ключей зависят от диаметра кремниевых элементов и длительности импульса тока. На рис. 10 представлены кривые зависимости интеграла Джоуля от амплитуды и длительности импульсов тока. На них наложены расчетные изотермы для РВД с диаметрами полупроводниковых элементов 40–100 мм. Они получены при условии, что во всех точках изотермических линий максимальная температура перехода кремниевой структуры РВД в моноимпульсном режиме работы равна +250 °С. Области ниже этих линий — разрешенные к эксплуатации, выше — запрещенные.

Изображенные на рис. 10 зависимости можно использовать для предварительной оценки предельно допустимых значений рабочих импульсов тока при выборе РВД для коммутующих устройств с учетом их технических характеристик и режимов работы.

**Вспомогательные изделия для модуля емкостного накопителя**

Для разрядных цепей 0,9-МДж модуля конденсаторной батареи нового мощного неодимового лазера предусмотрен комплект вспомогательных изделий, необходимых для надежного управления и защиты всей системы. В разрядную цепь модуля вместе с главным РВД-ключом входят:

- Полупроводниковый ключ для предварительной ионизации и зажигания ламп накачки на основе РВДД. Параметры ключа: рабочее напряжение 25 кВ, коммутируемые прямые и обратные токи амплитудой соответственно 50 и 30 кА длительностью 100 мкс.
- Генератор запуска главного РВД-ключа с параметрами: выходной ток управления (накачки) до 3,5 кА, длительность импульса 1–1,5 мкс, блокирующее напряжение 25 кВ.

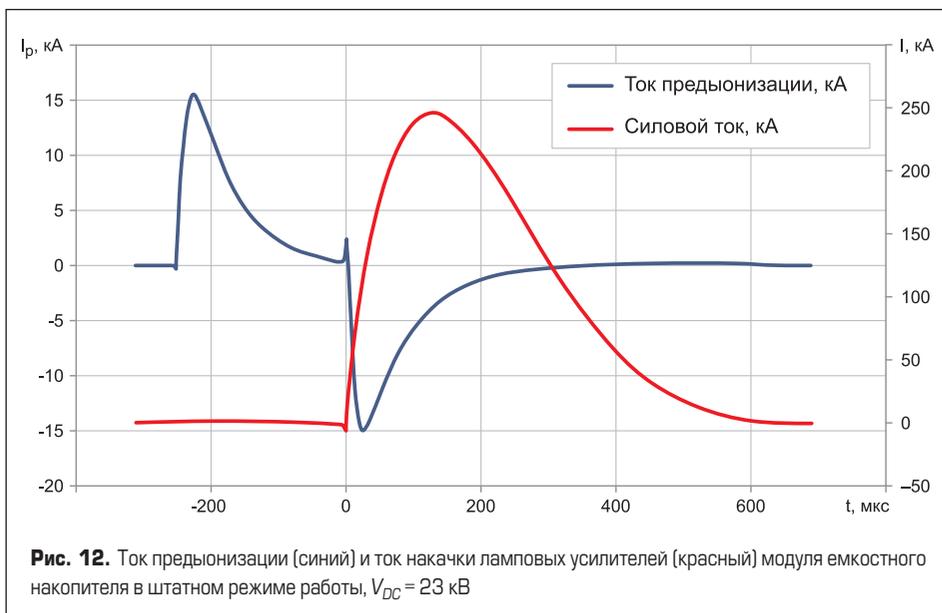


Рис. 12. Ток предьонизации (синий) и ток накачки ламповых усилителей (красный) модуля емкостного накопителя в штатном режиме работы,  $V_{DC} = 23$  кВ



Рис. 13. РВДД-ключ 50 кА/25 кВ/150 мкс

упомянутого лавинного диода с параметрами 250 кА, 25 кВ, 150 Дж. Второй такой же диод используется для защиты РВДД-ключа от перенапряжений на выводах электромагнита, связанных с волновыми процессами в линиях передачи во время срабатывания системы питания электромагнита. Модуль импульсного питания бетатрона входит в состав мобильного комплекса, предназначенного для рентгенографирования динамических объектов.

### Развитие РВД-технологии

Продолжаются работы по развитию РВД-технологии в импульсной энергетике. Для твердотельных энергетических систем, в разрядных контурах которых коммутируются мощные биполярные импульсы тока, разработаны реверсивно-включаемые динисторы с обратной проводимостью (РВДД) [7]. При этом отпадает необходимость в защитных диодах. Поэтому системы PSSPS могут быть более компактными и дешевыми. Исходя из текущей потребности рынка разработаны двухдьюмовые РВДД, на основе которых изготавливаются ключи на токи до 100 кА, напряжение до 25 кВ, с длительностью импульсов тока 20–150 мкс. На рис. 13 и 14 представлены фотографии этих ключей, в состав которых входят высоковольтные сборки РВДД; блоки управления с оптическим интерфейсом; RLC-контур и тиристорные блоки, формирующие требуемые токи накачки.

В состав ключа, изображенного на рис. 14, также входит дроссель магнитной задержки. Эта конструкция выполнена для плазмотрона в низкоиндуктивном варианте, позволяющем ключу работать в микросекундном

диапазоне с очень большими скоростями нарастания анодного тока [12].

Проводятся работы по увеличению рабочих токов РВДД-ключей. Расчеты показали, что на основе трехдьюмовых динисторов с обратной проводимостью можно создать высокоэффективные двунаправленные разрядные ключи с параметрами 210 кА/25 кВ/100 мкс, которые могут быть использованы, например, в магнитной штамповке крупногабаритных деталей.

### Заключение

Разработаны и реализованы мощные полупроводниковые РВД-ключи с устройствами управления и защиты. Они переключают униполярные импульсы тока амплитудой до 250 кА при напряжении 25 кВ.

На их основе изготовлены и находятся в эксплуатации системы накопления и коммутации электрической энергии для питания ламп накачки неодимовых лазеров и рентгенографических комплексов нового поколения. Во время их наладки и эксплуатации выполнено более 3000 включений. Системы показали стабильное и надежное срабатывание. Возможно применение РВД-ключей и в других мощных электрофизических и промышленных установках с учетом их режимов работы.

Авторы благодарят сотрудников ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ А. Г. Арзева, Е. В. Коженкова, В. В. Свиридова за проведение стендовых и ресурсных испытаний опытных образцов РВД-ключей и вспомогательных изделий.

### Литература

1. Месяц Г. А. Импульсная энергетика и электроника. Российская академия наук. Уральское отделение. Институт электрофизики. М., 2004.
2. Галахов И. В., Гаранин С. Г., Кириллов Г. А., Муругов В. М., Сухарев С. А. и др. Конденсаторная батарея 120 МДж, 24 кВ для мощного неодимового лазера установки «Искра-6»: концептуальный проект // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2003. Т. 5.
3. Фридман Б. Э., Baoming Li, Беляков В. А., Еникеев Р. Ш., Коврижных Н. А. Емкостный накопитель энергии 1 МДж // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 4.
4. Serebrov R. A., Enikeev R. Sh., Fridman B. E. Semiconductor Switches in a Counterpulse Capacitor Bank // IEEE Transactions on Plasma Sciences. 2013. Vol. 41. No. 1.
5. Тучкевич В. М., Грехов И. В. Новые принципы коммутации больших мощностей полупроводниковыми приборами. Л. Наука, 1988.
6. Welleman A., Fleischmann W. High Power Semiconductor Devices and Solid State Switches for Pulsed Discharge Applications. 2<sup>nd</sup> International Conference on High Speed Forming ICHSF2006. Dortmund, Germany, March 2006.
7. Хапугин А., Мартыненко В., Мускатиньев В., Фролов О., Гришанин А., Потапов С.,

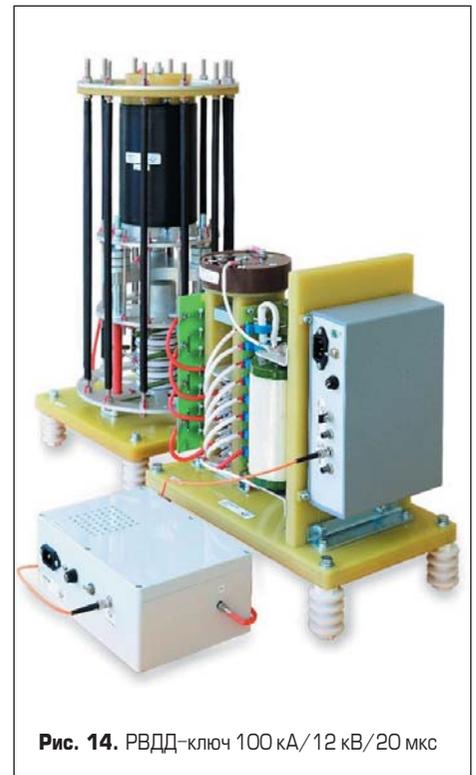


Рис. 14. РВДД-ключ 100 кА/12 кВ/20 мкс

Елисеев В., Коротков С., Галахов И., Осин В. Высоковольтный полупроводниковый ключ на основе реверсивно-включаемого динистора с обратной проводимостью для коммутации мощных двуполярных импульсов тока // Силовая электроника. 2020. № 5.

8. Belyaev S. A., Bezuglov V. G., Chumakov G. D. et al. New Generation of High — Power Semiconductor Closing Switches for Pulsed Power Applications. 28<sup>th</sup> ICPIG, July 15–20, 2007. Prague, Czech Republic, 2007.
9. Безуглов В. Г., Бабер И. С., Бродский Ю. Я., Галахов И. В. и др. Мощные лазеры и исследования физики высоких плотностей энергии. Международная конференция. X Харитоновские тематические научные чтения. РФЯЦ-ВНИИЭФ. Саров, 2008.
10. Арзев А. Г., Галахов И. В., Ганин Л. С., Гришанин А. В., Елисеев В. В. и др. Коммутаторы импульсов тока на основе реверсивно-включаемых динисторов для мощных электрофизических установок // Приборы и техника эксперимента. 2021. № 4.
11. Чинин А. А., Куропаткин Ю. П., Нижегородцев В. И., Романов И. Н., Савченко К. В., Селемир В. Д., Урлин Е. В., Фомичев В. А., Шамро О. А. // Мобильная система питания для электромагнита бетатрона типа БИМ. ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2022 (в печати).
12. Хапугин А., Мускатиньев В., Мартыненко В., Немаев Д., Гришанин А., Елисеев В., Иванова С., Махаев М. и др. 12-кВ твердотельный ключ с ультравысокими скоростями нарастания тока и высокой плотностью мощности для работы в микросекундном диапазоне // Силовая электроника. 2021. № 3.