

# Высоковольтный полупроводниковый ключ

на основе реверсивно-включаемого динистора  
с обратной проводимостью для коммутации  
мощных двуполярных импульсов тока

**В статье представлена новая версия реверсивно-включаемого динистора (РВД), оптимизированного для коммутации мощных двуполярных импульсов тока. Описывается концепция РВД с обратной проводимостью (РВДД), основанная на введении в кремниевую структуру динистора определенного количества интегрированных инверсных диодов, равномерно расположенных с заданной периодичностью по всей рабочей площади прибора и обеспечивающих требуемую обратную проводимость. Для поддержания высокой коммутирующей способности прямого тока в микросекундном и субмиллисекундном диапазонах в структуру динистора дополнительно интегрированы триодные ячейки, снижающие время включения РВДД и повышающие скорость нарастания тока  $(di/dt)_{cr}$ . Эти решения обеспечивают эффективную коммутацию мощных двуполярных импульсов тока одним прибором, причем пачка двуполярных импульсов запускается лишь одним внешним управляющим импульсом. Приведено описание конструкции РВДД и высоковольтного блока на его основе, представлены расчетные и экспериментальные данные, демонстрирующие работу нового прибора.**

**Алексей Хапугин  
Валентин Мартыненко  
Вячеслав Мускатиньев  
Олег Фролов  
Алексей Гришанин  
Сергей Потапов**

nicpp@elvpr.ru

**Вячеслав Елисеев**

el.press@mail.ru

**Сергей Коротков**

korotkov@mail.ioffe.ru

**Игорь Галахов  
Владимир Осин**

igor.galakhov@mail.ru

## Введение

Сегодня для многих импульсных технологий необходимо за период от единиц до сотен микросекунд коммутировать импульсы тока с амплитудой в десятки и сотни килоампер. Минимальные потери энергии при коммутации мощных импульсов тока с нано- и микросекундными фронтами имеют реверсивно-включаемые динисторы (РВД), в которых переключение в состояние высокой проводимости происходит однородно и практически мгновенно по всей активной площади прибора [1].

РВД имеют аналогичную тиристорам четырехслойную  $p^+n-p-n^+$ -структуру (рис. 1а) и выпускаются по одноступенчатой диффузионной технологии. Как и в тиристорах, требуемая температурная и  $dv/dt$ -стойкость достигается с помощью равномерно распределенных шунтов катодного  $n^+$ -эмиттера. В отличие от тиристора, у РВД нет электрода управления. Его переключение инициируется с помощью тонкого слоя электронно-дырочной плазмы, создаваемого в плоскости коллекторного перехода при кратковременном изменении полярности приложенного напряжения и протекания импульса обратного тока, являющегося током управления динистора. Ток

управления протекает через  $n^+$ -шунты анодного  $p^+$ -эмиттера. Поскольку шунты анодного и катодного эмиттеров в РВД расположены независимо друг от друга, каналы обратной проводимости создаются как в диодных (2), так и в транзисторных (3) секциях при пробое низковольтного  $n^+$ -перехода.

После восстановления на РВД напряжения исходной полярности внешнее поле вытягивает носители из плазменного слоя, вызывая инжекцию электронов и дырок из эмиттерных переходов. Это приводит к быстрому (десятки наносекунд) переключению в состояние с высокой проводимостью, которое происходит однородно по площади и без задержки относительно момента окончания тока управления. Отсутствие задержки включения позволяет синхронно переключать большое количество последовательно соединенных РВД, используя общий для всех приборов импульс управления. Это обеспечивает при включении высоковольтной сборки в высшей степени равномерное динамическое деление напряжения между динисторами. При этом, в отличие от тиристорных сборок, в РВД сборках нет необходимости решать проблему рассинхронизации импульсов управления между приборами из-за естественного разброса параметров электронных компонентов драйверов управления.

**Концепция РВДД**

**Конструкция прибора**

Стандартный РВД предназначен для коммутации силовых импульсов тока только одной (положительной) полярности. Область обратной проводимости этого прибора минимизирована и предназначена для управления прибором с помощью короткого импульса тока отрицательной полярности. Поэтому РВД имеет достаточно большие потери энергии при протекании силового тока в обратном направлении, обусловленные сравнительно высоким сопротивлением каналов обратной проводимости. Это обстоятельство до недавнего времени создавало определенные трудности при разработке мощных РВД коммутаторов для электроразрядных технологий, предполагающих протекание знакопеременных импульсов тока. В работе [2] была показана возможность эффективного использования высоковольтного коммутатора на основе блока РВД в режиме коммутации медленно затухающих знакопеременных импульсов тока. Это достигается подключением параллельно к блоку РВД диодного блока, коммутирующего импульсы обратного тока. При этом схема коммутатора значительно усложняется в связи с необходимостью принятия мер, исключающих перераспределение тока управления РВД в диодный блок.

Для решения этой проблемы была разработана конструкция реверсивно-включаемого динистора с обратной проводимостью РВДД (рис.1 б), обладающая уменьшенными потерями при протекании обратного тока [3]. Конструкция РВДД, представляет собой силовую интегральную схему, состоящую из тиристорных  $p^+-n-p-n^+$ -секций с закороченными шунтами анодного и катодного эмиттеров. В четырехслойную структуру встроены  $n^+-n-p-p^+$ -диоды цилиндрической формы (2), включенные антипараллельно тиристорной структуре, а  $p^+$ -эмиттер четырехслойной структуры дополнительно закорочен анодными  $n^+$ -шунтами, образующими транзисторные  $n^+-n-p-n^+$ -секции (3), расположенные вокруг катодных эмиттеров встроенных диодов. В структуре РВДД можно условно выделить три зоны, ответственные за все этапы коммутации двуполярных импульсов тока:

- 1. Секции (2 + 3) — коммутация тока управления (инжекция управляющей плазмы в  $n$ -область).
- 2. Секции (1+3) — включение динистора и коммутация мощного импульса прямого тока.
- 3. Секция (2) — коммутация мощного импульса обратного тока (инжекция управляющей плазмы в  $n$ -область). В последнем режиме силовые импульсы обратного тока эффективно выполняют роль тока управления перед коммутацией многократно повторяющихся импульсов прямого тока.

Интегрированные диоды РВДД имеют значительно меньшие падения напряжения при протекании импульса тока обратной полярности по сравнению с квазидиодами в транзисторных секциях 3 и способны пропускать

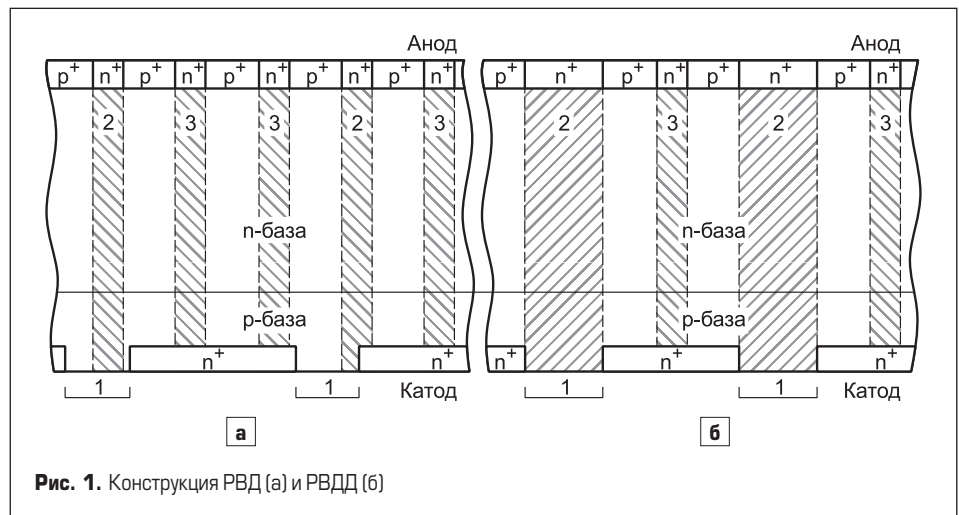


Рис. 1. Конструкция РВД (а) и РВДД (б)

обратные токи, сопоставимые с прямыми импульсными токами. Количество равномерно распределенных по площади динистора инверсных диодов может составлять 2–5 тыс. штук на одной кремниевой пластине диаметром 50 мм. Изменяя соотношение площадей диодных и тиристорных секций, путем вариации диаметра и количества встроенных диодов, можно гибко менять максимально допустимые амплитуды положительных и отрицательных полувольт токов. Это позволяет оптимизировать конструкцию РВДД для разных режимов коммутации двуполярных импульсов тока с различными коэффициентами затухания.

**Результаты расчета**

Для определения взаимосвязи коммутирующей способности двуполярного ключа с конструкцией и электрофизическими параметрами кремниевой структуры проведено моделирование и расчеты РВДД с диаметром

полупроводникового элемента 50 мм, блокирующим напряжением 2,5 кВ. Следует отметить, что используемые в настоящее время в разрядных ключах стандартные РВД такого же размера и напряжения могут коммутировать однополярные импульсы тока амплитудой до 180 кА, длительностью около 250 мкс. Интегрированные инверсные диоды в этом приборе спроектированы только для создания в кремниевой структуре управляющего слоя электронно-дырочной плазмы, необходимого для однородного включения РВД с малыми динамическими и статическими потерями. Расчеты показали, что попытка коммутировать этим РВД двуполярные импульсы тока, например амплитудой 30 кА, длительностью 250 мкс (режим преионизации импульсных ксеноновых ламп накачки), гарантированно приведет к пробое РВД, так как максимальная температура кремниевой структуры при протекании обратного тока превысит +700 °С. Таким образом, для создания полупроводникового

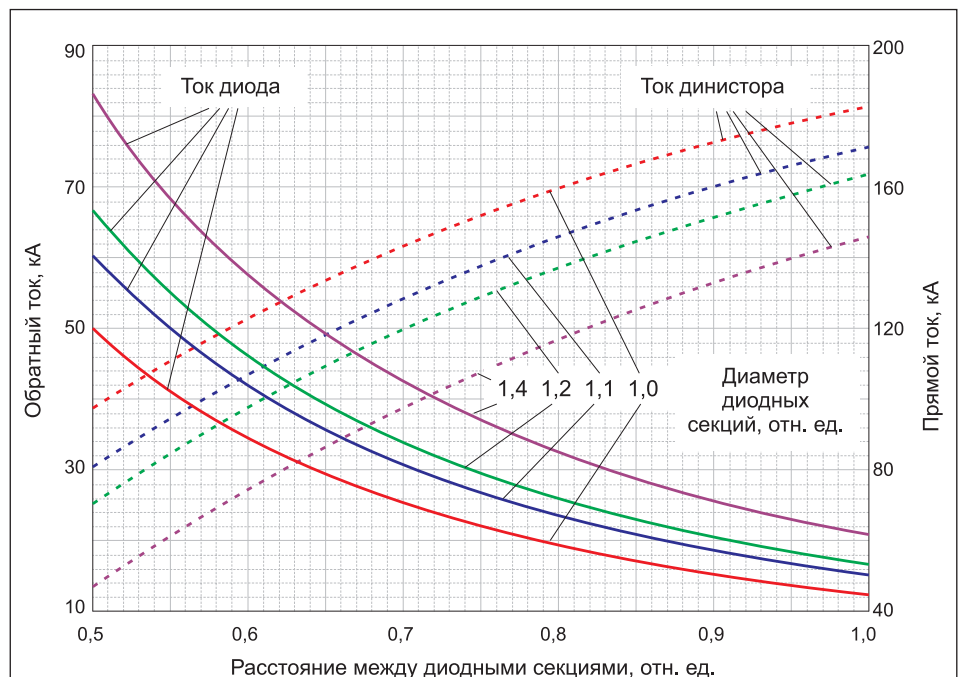
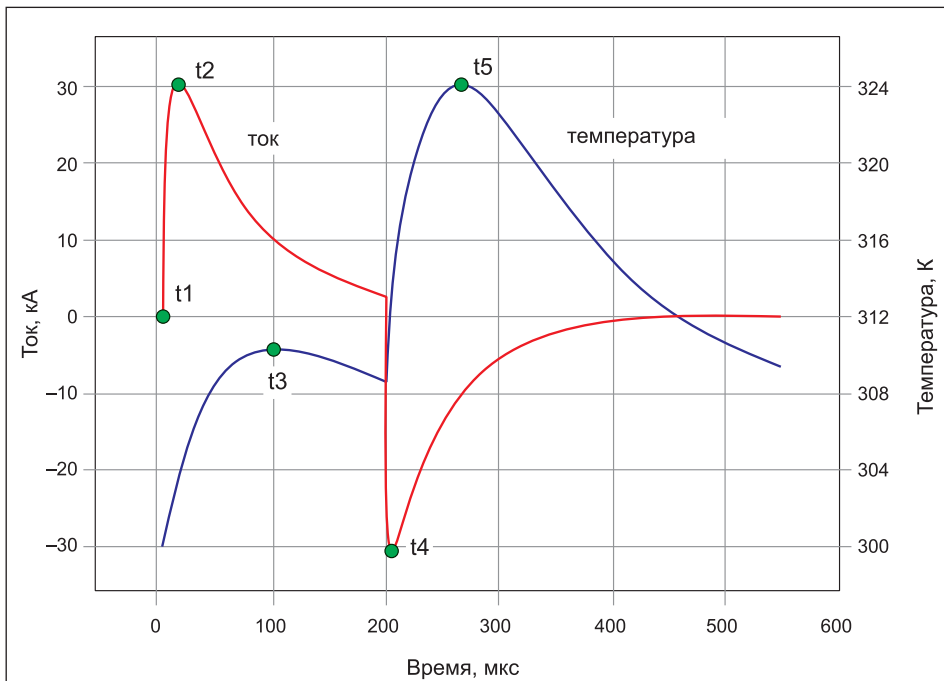


Рис. 2. Зависимость максимально допустимых амплитуд полувольт токов от геометрических параметров тиристорных и диодных секций для РВДД диаметром 50 мм



**Рис. 3.** Расчетные кривые коммутируемого тока и мгновенной температуры перехода 2,5 кВ РВДД диаметром 50 мм при работе в схеме коммутатора предионизации ламп накачки

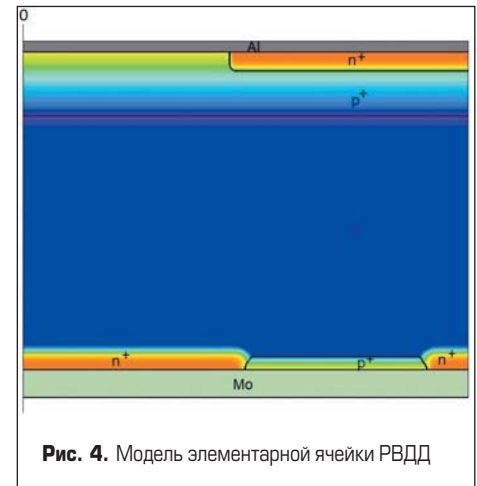
ключа диаметром 50 мм, способного надежно переключать двуполярные импульсы тока амплитудой несколько десятков килоампер, требуется существенно изменить конструкцию РВД, сделав ее способной пропускать мощные импульсы обратного тока. Совершенно очевидно, что для этого необходимо увеличить общую площадь инверсных диодов, максимально сохранив при этом способность прибора к переключению высоких прямых токов. Увеличение площади инверсных диодов влечет за собой решение задачи сохранения параметров импульсов управления такими же, как у однополярного РВД. При разработке РВДД, удовлетворяющих этим требованиям, использовался программный комплекс TCAD Synopsys [4].

Моделирование выполнялось для одной диодно-тиристорной ячейки РВДД, а затем результаты приводились к структуре РВДД заданной площади с применением коэффи-

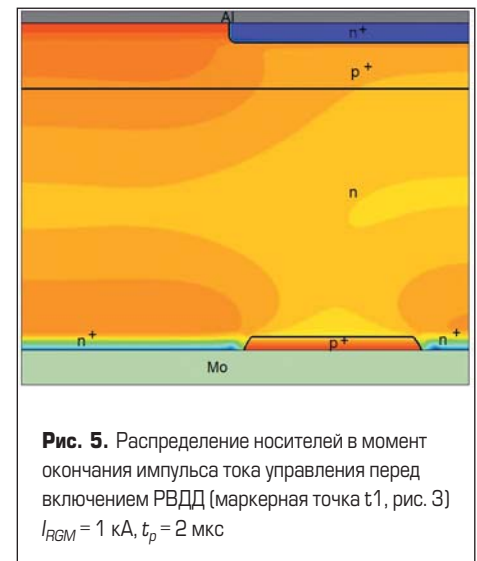
циента, равного отношению площади кремниевой структуры РВДД к площади диодно-тиристорной ячейки. Расчеты проводились с помощью цилиндрической системы координат. Физическая модель и распределение легирующей примеси в РВДД представлены на рис. 4.

На рис. 2 показаны расчетные зависимости максимально допустимых значений коммутируемых РВДД импульсных токов прямой и обратной полярности длительностью около 250 мкс от размеров тиристорных и диодных секций 2,5 кВ РВДД с диаметром кремниевой структуры 50 мм. В качестве переменных были взяты диаметр интегрированных диодов и расстояние между ними. Их значения даны в относительных единицах, приведенных к размерам стандартного РВД.

Для проверки работоспособности РВДД при коммутации двуполярных импульсов



**Рис. 4.** Модель элементарной ячейки РВДД



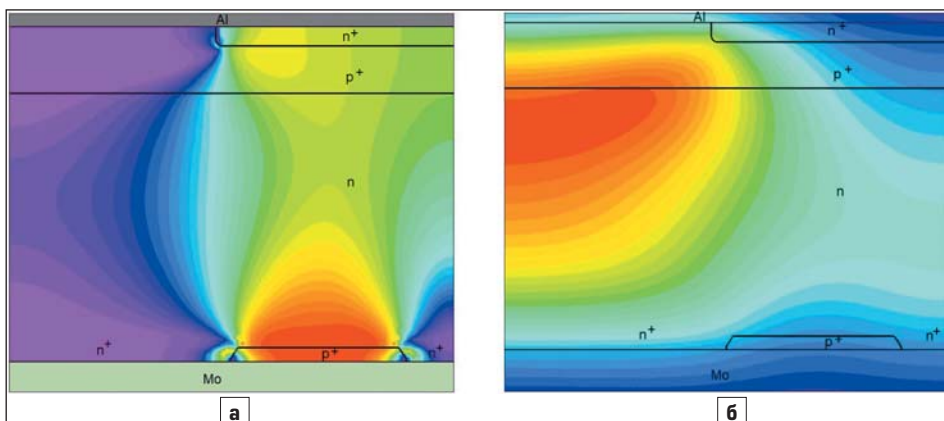
**Рис. 5.** Распределение носителей в момент окончания импульса тока управления перед включением РВДД (маркерная точка t1, рис. 3)  $I_{RGM} = 1 \text{ кА}, t_p = 2 \text{ мкс}$

тока произведен расчет максимальной температуры кремниевой структуры динистора при его работе в режиме коммутатора предионизации ламп накачки. На рис. 3 показаны коммутируемый ток и температура кремниевой структуры одного из вариантов РВДД, у которого диаметр диодных ячеек равен 1,4 и расстоянию между ними 0,7 (относительные единицы).

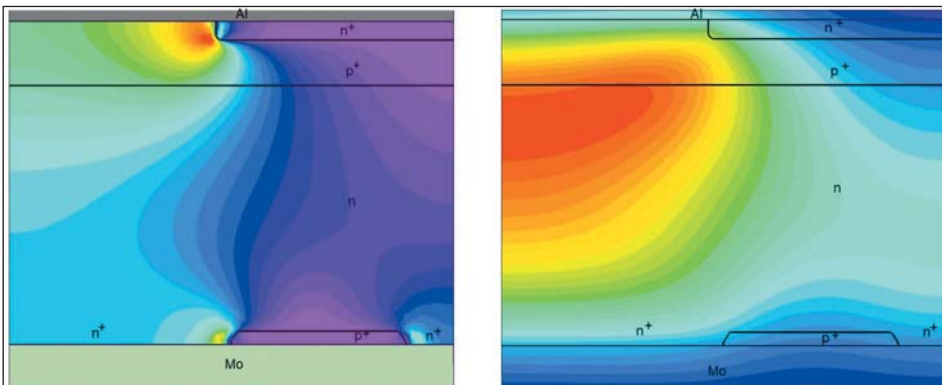
Как видно на рис. 3, максимальная температура РВДД связана с коммутацией обратного тока и составляет 324 К (+51 °С). Она значительно ниже предельно допустимой температуры перехода для данного типа прибора ( $T_{jmax} = +150 \text{ °С}$ ), что должно обеспечивать его надежную работу в указанном режиме эксплуатации.

На рис. 5 показано распределение носителей в момент окончания импульса тока управления на этапе накачки в базовые области РВДД управляющей плазмы, непосредственно перед включением РВДД и протеканием через него импульса прямого тока (момент времени t1, рис. 3).

На рис. 6 представлены результаты расчета распределения плотности тока (а) и температуры (б) в элементарной тиристорной ячейке РВДД при коммутации прибором импульса прямого тока амплитудой 30 кА, длительностью 200 мкс в моменты времени соответственно t2 и t3, указанные на рис. 3.



**Рис. 6.** а) Распределение плотности тока и б) температуры в тиристорной ячейке РВДД в момент протекания прямого тока  $I_{TM} = 30 \text{ кА}, t_p = 200 \text{ мкс}$  (маркеры t2 и t3 на рис. 3)



**Рис. 7.** а) Распределение плотности тока и б) температуры в диодной ячейке РВДД в момент протекания обратного тока.  $I_{FM} = 30$  кА,  $t_p = 200$  мкс (маркеры  $t_4$  и  $t_5$ , рис. 3)

На рис. 7 видно распределение плотности тока (а) и температуры (б) в элементарной ячейке интегрированного инверсного диода РВДД при коммутации силового обратного тока амплитудой 30 кА, длительностью 200 мкс ( $t_4$  и  $t_5$ , рис. 3).

Не основные носители заряда, введенные силовым обратным током в диодную ячейку (рис. 7а), при следующей смене полярности инициируют форсированное включение и коммутацию импульса прямого тока в расположенной рядом тиристорной ячейке РВДД. Таким образом, процессы, изображенные на рис. 6, 7 и запущенные одним импульсом управления (рис. 5), будут многократно повторяться в РВДД в режиме коммутации двухполярных импульсов тока.

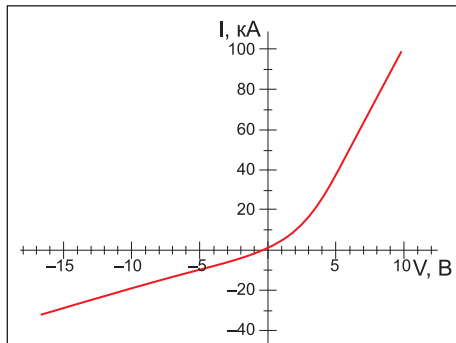
**Экспериментальные результаты**

На рис. 8 приведена усредненная вольт-амперная характеристика РВДД во включенном состоянии в прямом и обратном направ-

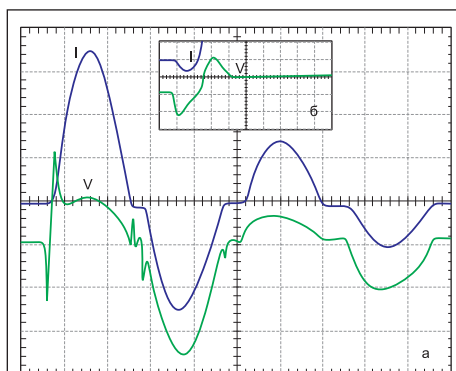
лении, полученная при исследовании РВДД в режимах коммутации мощных униполярных импульсов прямого и обратного тока.

При исследовании РВДД в режиме коммутации знакопеременных импульсов было проведено более 100 коммутаций медленно затухающих импульсов с амплитудой первых полувольт прямого и обратного тока 90 и 65 кА (рис. 9) [5].

Представленные на рис. 9 осциллограммы падений напряжения на РВДД показывают низкие суммарные потери энергии в процессе коммутации. Как видно из осциллограммы на рис. 9б, малая величина коммутационного пика напряжения при высокой скорости нарастания силового тока (~5 кА/мкс) была обеспечена при сравнительно небольшом токе управления (~800 А). Измеренные после испытаний токи утечки через РВДД при рабочем напряжении 2 кВ не изменились. При использовании в этом режиме стандартного РВД его разрушение произошло при амплитуде первой полувольты прямого

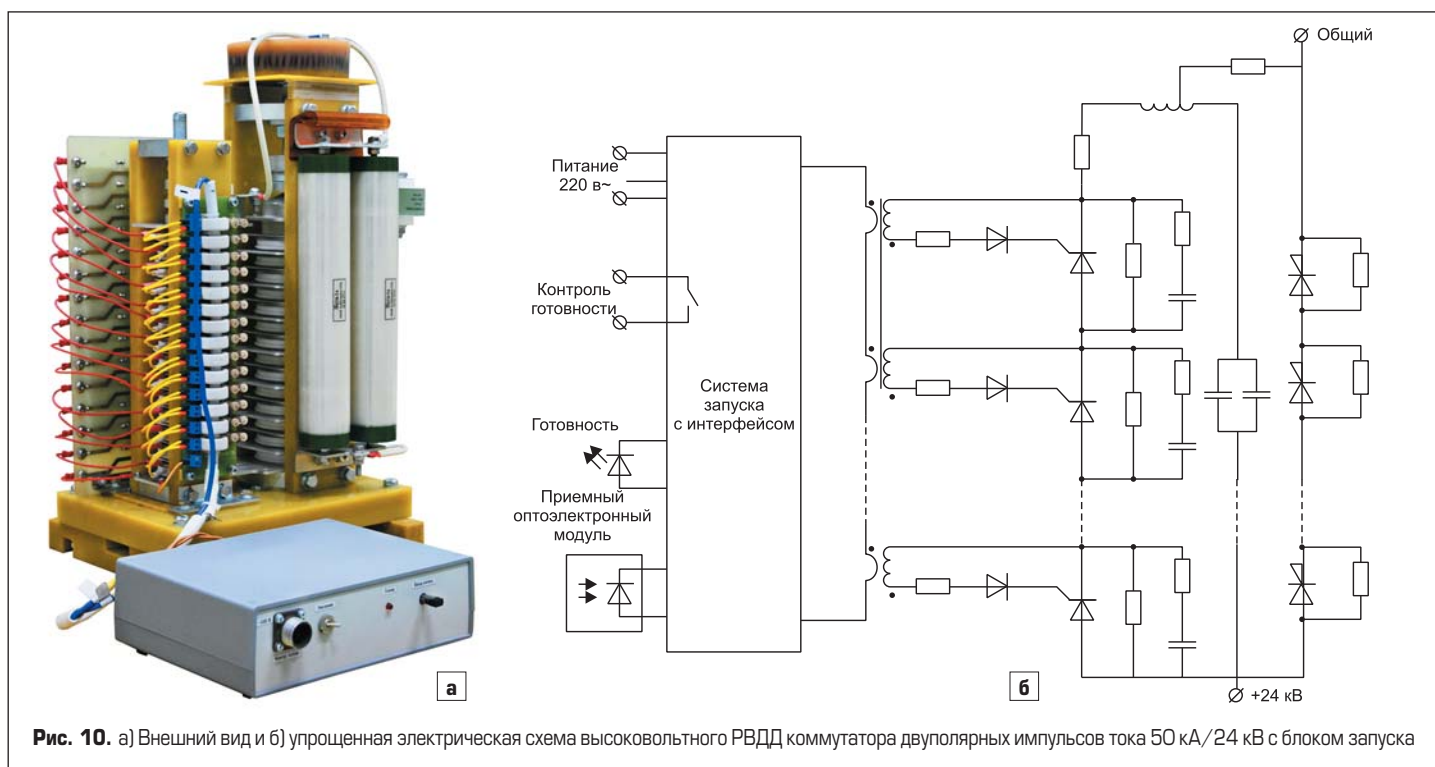


**Рис. 8.** Вольт-амперная характеристика РВДД в проводящем состоянии



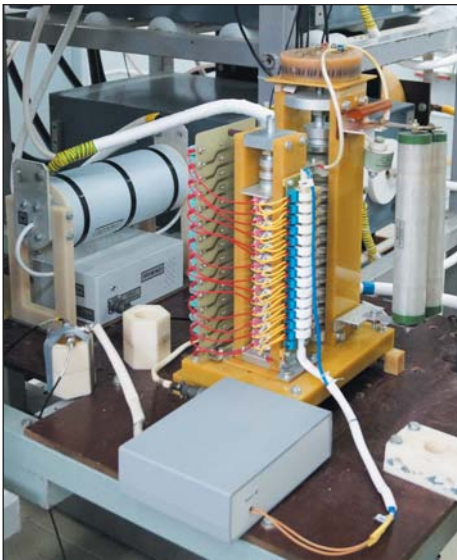
**Рис. 9.** а) Осциллограммы тока и напряжения на РВДД при коммутации знакопеременного силового тока. М: 25 кА/дел, 10 В/дел, 20 мкс/дел; б) осциллограммы тока и напряжения управления на начальном этапе процесса коммутации. М: 1 кА/дел, 10 В/дел, 2 мкс/дел

тока — 75 кА вследствие больших потерь энергии в процессе коммутации импульсов обратного тока.



**Рис. 10.** а) Внешний вид и б) упрощенная электрическая схема высоковольтного РВДД коммутатора двухполярных импульсов тока 50 кА/24 кВ с блоком запуска





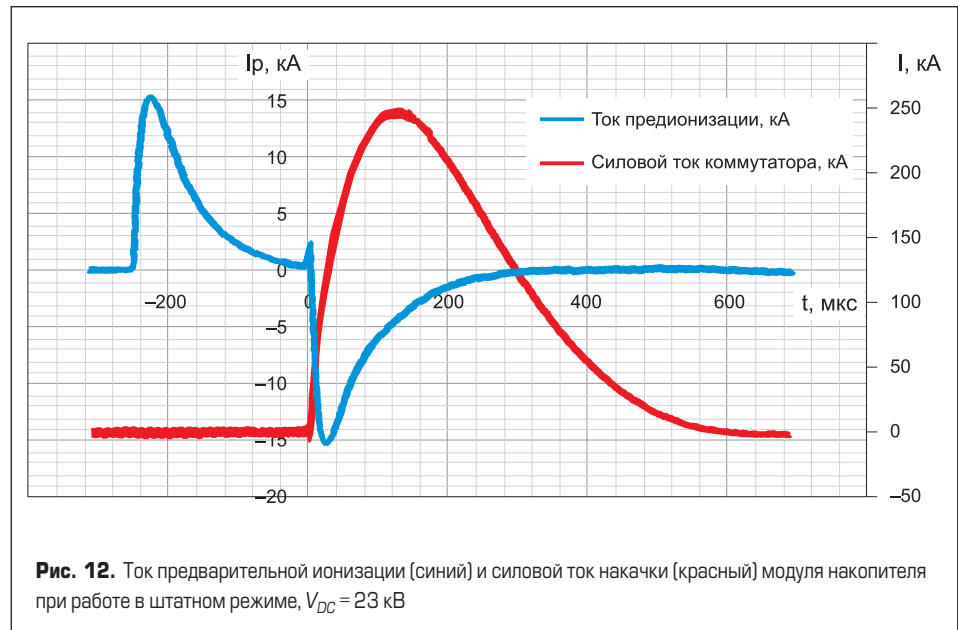
**Рис. 11.** Внешний вид высоковольтного блока коммутатора преионизации в составе модуля накопления и коммутации электрической энергии лазерной установки

### Высоковольтный РВДД коммутатор

На основе РВДД разработан и изготовлен высоковольтный коммутатор для переключения двуполярных импульсов тока амплитудой до 50 кА длительностью до 300 мкс, напряжение 24 кВ (рис. 10 а). Схема коммутатора показана на рис. 10б. Коммутатор состоит из высоковольтной сборки 14 последовательно соединенных 2,5-кВ РВДД таблеточной конструкции. Управление блоком РВДД осуществляется от 24-кВ тиристорного блока запуска, формирующего ток управления амплитудой 200 А — 2 кА длительностью 2–3 мкс. Сами тиристоры управляются импульсами тока амплитудой 5–6 А длительностью 6–8 мкс, поступающими от импульсного трансформатора. Импульс тока управления в первичной обмотке трансформатора формируется блоком запуска (представленного на переднем плане рис. 10а) при подаче на его вход сигнала по оптоволоконному каналу. Это обеспечивает гальваническую развязку коммутатора и системы управления.

### Пример применения

На рис. 11, 12 продемонстрирован один из примеров практического применения ново-



**Рис. 12.** Ток предварительной ионизации (синий) и силовой ток накачки (красный) модуля накопителя при работе в штатном режиме,  $V_{DC} = 23$  кВ

го прибора. На рис. 11 представлен разрядный ключ с блокирующим напряжением 25 кВ (DC), состоящий из 14 последовательно включенных таблеточных РВДД с диаметром 50 мм. Здесь он показан в составе модуля накопителя электрической энергии для коммутации тока преионизации в импульсные лампы накачки лазерных усилителей. Слева от РВДД-ключа расположен блок управления, формирующий импульсы тока управления  $I_{RGM}$  амплитудой ~1 кА, длительностью 1–2 мкс. На рис. 12 показаны характерные осциллограммы тока преионизации и силового тока через РВДД-коммутатор в штатном режиме работы системы питания мощной лазерной установки.

Опытный образец РВДД-коммутатора успешно прошел испытания в составе модуля накопителя электрической энергии для коммутации тока преионизации в импульсных ксеноновых лампах накачки лазерных усилителей.

### Заключение

В статье представлена последняя разработка в области РВД-технологий. Дано представление о новом мощном твердотельном разрядном ключе РВДД, способном эффективно переключать двунаправленные импульсы тока. Продемонстрирован образец высоковольтного коммутатора на основе РВДД с рабочим напряжением 24 кВ (DC) и импульсными токами

до 50 кА. Полученные результаты являются первым этапом на пути дальнейшего создания серии компактных коммутаторов двуполярных импульсов тока разной мощности для научно-исследовательских и промышленных применений.

### Литература

1. Grekhov I. V., Gorbatyuk A. V., Kostina L. S., Korotkov S. V., Yakovchuk N. S. Superpower switch of microsecond range // Solid-State Electronics. 1983. Vol. 26. No. 11.
2. Коротков С. В., Аристов Ю. В., Жмодиков А. Л., Козлов А. К., Коротков Д. А. Высоковольтные диодно-тиристорные коммутаторы мощных знакопеременных импульсов тока // Приборы и техника эксперимента. 2014. № 4.
3. Хапугин А. А., Мартыненко В. А., Елисеев В. В., Гришанин А. В., Фролов О. В. Реверсивно включаемый динистор с обратной проводимостью. Патент RU 171465.
4. Sentaurus Device User Guide, Synopsys Inc. Mountain View, CA, USA, 2014.
5. Коротков С. В., Хапугин А. А., Мартыненко В. А., Елисеев В. В., Жмодиков А. Л., Козлов А. К. Исследование реверсивно включаемых динисторов, модернизированных с целью уменьшения потерь энергии при коммутации импульсов обратного тока // Приборы и техника эксперимента. 2018. № 3.