

## Мощные полупроводниковые ключи для импульсных применений

Валентин МАРТЫНЕНКО  
Алексей ХАПУГИН  
Геннадий ЧУМАКОВ  
Владимир ЧИБИРКИН, к. т. н.  
martin@moris.ru  
Игорь ГАЛАХОВ, к. т. н.  
Василий МУРУГОВ, д. ф.-м. н.  
Владимир ОСИН  
galakhov@iskra5.vniief.ru  
Евгений КОПЕЛОВИЧ, к. т. н.  
Феликс ФЛАТ  
hightech@sandy.ru

ОАО «Электровыпрямитель» разработало новое поколение реверсивно-включаемых динисторов (РВД), предназначенных для коммутации мощных импульсных токов микросекундной длительности. В данной статье приведены результаты экспериментальных исследований РВД, проведенные РФЯЦ ВНИИЭФ при токах до 560 кА и длительности импульса тока по уровню до 500 мкс  $[0, 1I_{max}]$ . Обоснованы критерии предельной токовой нагрузки коммутаторов с учетом длительной работы в импульсно-периодическом режиме. Описана конструкция и результаты испытаний коммутатора в моноимпульсном режиме при рабочем напряжении до 25 кВ и рабочем токе до 300 кА. Сделана оценка возможности использования такого коммутатора в конденсаторной батарее проектируемой установки «Искра-б».

### Введение

Твердотельные полупроводниковые ключи весьма привлекательны для использования в импульсных системах питания, что связано, прежде всего, с высокой надежностью полупроводниковых приборов, большим сроком службы, низкими эксплуатационными расходами и экологической безопасностью (нет ртути и свинца). Полупроводниковые ключи могут работать в аппаратуре в любом положении, что дает возможность проектировать установки как в стационарном лабораторном, так и подвижном транспортном исполнении. Поэтому такие ключи все чаще рассматриваются как замена газоразрядных приборов — игнитронов, тиратронов, искровых и вакуумных разрядников, в основном применяемых сегодня в мощных электрофизических установках, включая современные лазерные системы.

Традиционные тиристоры (SCR) являются полупроводниковыми ключами, наиболее широко используемыми для устройств импульсной техники. У них малое прямое падение напряжения во включенном состоянии, они обладают высокой перегрузочной способностью по току и благодаря простой биполярной технологии имеют сравнительно низкую себестоимость. Недостатки SCR проявляются при коммутации коротких и очень больших по амплитуде импульсов тока. Это связано с достаточно медленным процессом распространения включенного состояния от управляющего электрода до внешней границы  $p$ - $n$ -перехода после подачи импульса управления. Такая особенность SCR определи-

ла их применение в миллисекундном диапазоне коммутации токов. Улучшение импульсных свойств тиристоров достигается за счет использования конструкций с управляющим электродом, равномерно распределенным по площади кремниевой структуры. Это позволяет существенно снизить время полного включения и значительно улучшить коммутационные свойства тиристоров. Так, фирма АВВ расширила применение полупроводниковых ключей до микросекундного диапазона, разработав специальные импульсные асимметричные тиристоры (ASCR) [1]. Эти приборы имеют распределенный управляющий электрод, подобный используемому в запираемых тиристорах (GTO). Такая конструкция тиристора и форсированный режим управления обеспечивают ему высокую коммутационную способность ( $I_p = 150$  кА,  $t_p = 50$  мкс,  $di/dt = 18$  кА/мкс, одиночный импульс). Однако в этом случае под управляющий электрод занимает большая активная площадь тиристора (до 50% и более), что ухудшает эффективность использования кремния и ведет к росту стоимости прибора.

Хорошие коммутационные характеристики в частотном режиме продемонстрировали SIT-тиристоры и биполярные транзисторы с изолированным затвором [2, 3]. Однако приборы такого типа не предназначены для работы в режимах коммутации больших импульсных токов (десятки килоампер и более) из-за известных физических ограничений (низколегированные эмиттеры, короткое время жизни неосновных носителей заряда, малые размеры кристаллов и пр.)

Наши исследования показали, что наиболее перспективными твердотельными ключами для коммутации сверхбольших мощностей в микросекундном и субмиллисекундном диапазоне являются коммутаторы на основе реверсивно-включаемых динисторов [4]. Реверсивно-включаемый динистор является двухэлектродным аналогом тиристора с обратной проводимостью с интегрированным в кремниевую структуру обратным диодом, который включен встречно-параллельно тиристорной части РВД. Включение реверсивно-включаемых динисторов производится коротким импульсом тока управления при кратковременном приложении к нему обратного напряжения. Конструкция РВД выполнена таким образом, что управляющий ток протекает через диодные области динистора квазиаксиально и однородно по площади кремниевой структуры. Этот ток вызывает встречную инжекцию носителей заряда с обеих эмиттерных переходов в базовые области и инициирует регенеративный процесс переключения тиристорной области РВД. Благодаря такому способу включения и специальной конструкции кремниевой пластины происходит полное и однородное включение РВД по всей активной площади за очень короткий промежуток времени, подобно включению диода. Интегрированный в структуру РВД обратный диод может быть использован также в качестве демпфирующего диода при аварийной ситуации в разрядном контуре (например, пробой в кабельных линиях), которая может привести к колебательному характеру тока через коммутатор.

В работах [5–7] было экспериментально подтверждено, что полупроводниковые коммутаторы на основе реверсивно-включаемых диристоров могут успешно работать в системах импульсного питания ламп накачки мощных неодимовых лазеров. В работе [5] было показано, что высоковольтные РВД-коммутаторы с диаметрами элементов 63 мм (тип КРД-25-100) и 76 мм (тип КРД-25-170) способны коммутировать одиночные многократно повторяющиеся импульсы тока в субмиллисекундном диапазоне с амплитудой соответственно 140 и 200 кА. Три параллельно включенных коммутатора типа КРД-25-170 были успешно испытаны в режиме  $U_0 = 24$  кВ,  $I_p = 470$  кА,  $Q = 145$  Кл [6]. В 2001 году в РФЯЦ ВНИИЭФ была построена конденсаторная батарея для неодимового лазера установки «Луч» [7]. Эта батарея, в составе которой работают 18 коммутаторов типа КРД-25-100, уже в течение 5 лет успешно эксплуатируется без каких-либо отказов коммутаторов.

В данной статье представлены результаты разработки нового поколения твердотельных ключей с малыми потерями мощности и высокими импульсными токами.

### Разработка реверсивно-включаемых диристоров нового поколения

Для увеличения коммутационной способности разработана технология изготовления диристоров с «мягким» смыканием области пространственного заряда в буферном  $n'$ -слое [8].

Уменьшение толщины  $n$ -базы, а также улучшение однородности включения РВД за счет хорошего растекания носителей тока по  $n'$ -слою при обратном смещении обеспечивают снижение всех составляющих энергии потерь: при накачке, переходном процессе включения и в установившемся состоянии. По предварительным оценкам, такая структура должна позволить увеличить рабочие импульсные токи в РВД приблизительно в 1,5 раза.

Исследования реверсивно-включаемых диристоров с блокирующим напряжением 2,4 кВ и с размерами кремниевых пластин 63, 76 и 100 мм проводились на специальном испытательном стенде. Цель исследований — установление значений предельно допустимых импульсных токов, которые можно пропустить через единичный РВД данной площади. В процессе испытаний регистрировались ток через РВД и падение напряжения на РВД при протекании данного тока. На рис. 1 представлены осциллограммы разрядных токов и напряжений на РВД диаметром 76 мм с блокирующим напряжением 2,4 кВ.

По программе исследований токи плавно увеличивались до предельного значения  $I_{pm}$ , при достижении которого происходит резкий рост напряжения на кривой  $U(t)$  и затем

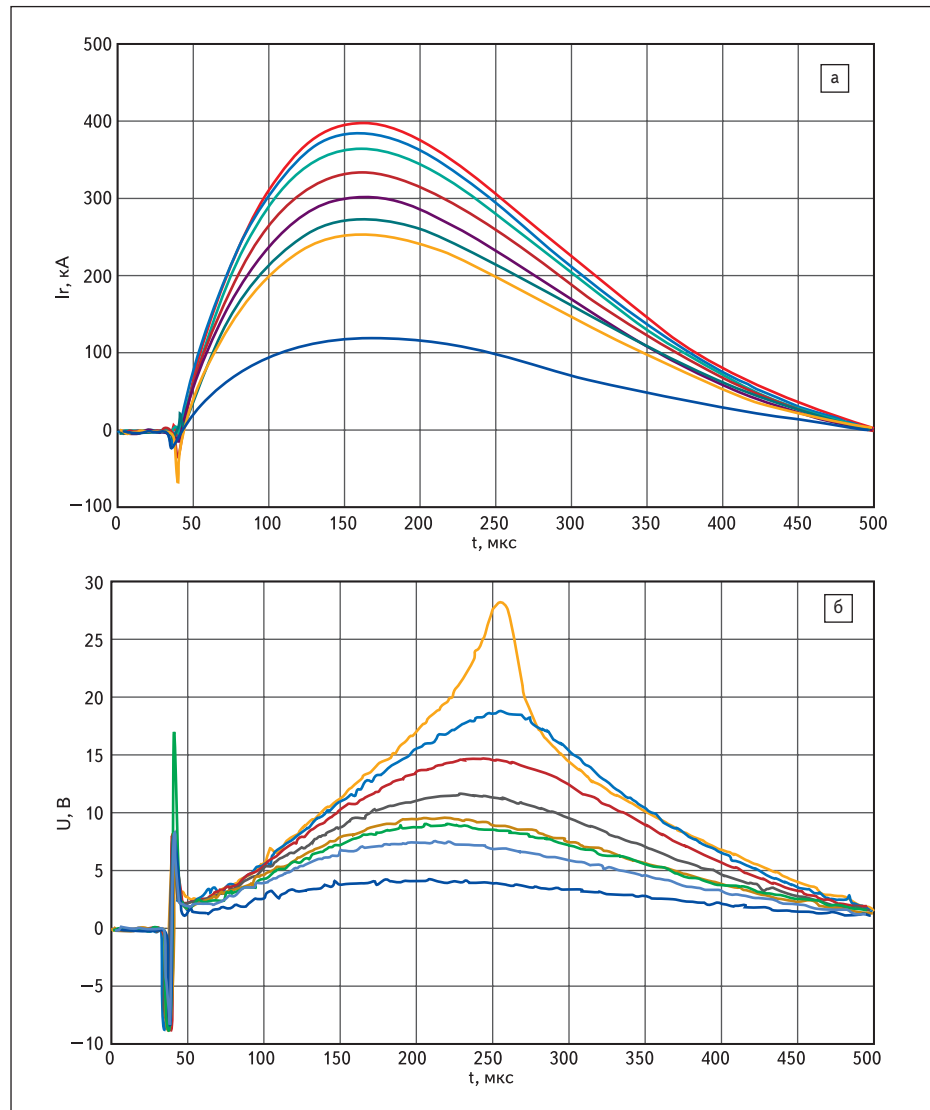


Рис. 1. Осциллограммы разрядных токов (а) и напряжений (б) на РВД диаметром 76 мм с блокирующим напряжением 2,4 кВ

такой же резкий спад. Этап быстрого нарастания напряжения объясняется сильным уменьшением подвижности неосновных носителей заряда при высоких температурах, а спад  $U(t)$  происходит за счет модуляции проводимости канала термогенерированной плазмой, образующейся при температурах 400–600 °С и состоящей из основных носителей заряда.

Исследования показали, что резкий рост напряжения при предельном токе не вызывает немедленного выхода РВД из строя. РВД

сохраняет свою блокирующую характеристику. Однако о том, что это уже пограничное состояние прибора, свидетельствует факт появления эрозии со стороны катода алюминиевой металлизации в контактах РВД после воздействия предельного тока  $I_{pm}$ . Дальнейшее увеличение тока (свыше  $I_{pm}$ ) приводит к проплавлению кремниевой структуры. Таким образом, величина  $I_{pm}$  является точкой отсчета при установлении амплитуды рабочего тока  $I_{pw}$  РВД-коммутатора для длительного, многократно повторяющегося режима работы.

Было установлено, что рабочий импульсный ток  $I_{pw}$  не должен превышать 80% от предельного значения  $I_{pm}$ . Это соотношение подтверждено расчетами, а также результатами испытаний в режиме  $I_{pw}$  (несколько тысяч включений).

В таблице приведены результаты испытаний РВД нового поколения с различным диаметром кремниевой пластины. Там же для сравнения показаны результаты аналогич-

Таблица. Результаты испытаний РВД

Диаметр РВД, мм	Предельный ток $I_{pm}$ , кА	Рабочий ток $I_{pw}$ , кА	Длительность импульса, мкс
63	250	200	450
63 (1-е поколение)	150	120	450
76	380	305	450
76 (1-е поколение)	240	180	450
100	560*	500	450

\* предельные возможности стенда

ных испытаний использованных в коммутаторах РВД первого поколения диаметром 76 мм, которые описаны в работах [5–7]. Видно, что коммутационная способность РВД нового поколения значительно превосходит возможности РВД первого поколения и в несколько раз больше коммутационной способности тиристоров такого же диаметра.

### Коммутаторы на основе РВД нового поколения

Новые реверсивно-включаемые динисторы изготавливаются в двух вариантах: в стандартных металлокерамических корпусах и в бескорпусном исполнении с дополнительной защитой периферийной области от внешних воздействий (рис. 2).

Динисторы в корпусах могут быть использованы как в моноимпульсном режиме, так и в частотном режиме, который предусматривает форсированное охлаждение полупроводниковых приборов и применение охладителей с обеих сторон динистора.

Бескорпусные динисторы соединяются друг с другом в последовательную высоковольтную сборку, которая может размещаться в одном компактном корпусе. Такая сборка может эксплуатироваться только в моноимпульсном режиме.

Рабочее напряжение коммутатора обычно превышает блокирующее напряжение единичного РВД ( $U_{BO} \leq 2400$  В), поэтому в коммутаторе должны быть использованы несколько элементов РВД, последовательно соединенных между собой.

Число элементов в сборке зависит от рабочего напряжения коммутатора. Таким образом, техническая проблема разработки полупроводникового коммутатора заключается, прежде всего, в конструировании оптимальной сборки из нескольких последовательно соединенных между собой РВД. Был проведен ряд специальных исследований (таких как выбор наиболее оптимальных материалов для обеспечения наилучших контактов между РВД, расчет динамических усилий при стягивании сборки и т. п.), которые позволили обеспечить низкие и стабильные переход-

ные электрические и тепловые сопротивления между РВД, что гарантирует длительную и надежную работу коммутатора. Разработана специальная компьютерная методика подбора РВД для последовательной сборки. При этом у элементов специально контролируются величины токов утечки и стабильность блокирующих ВАХ. Данная методика подбора позволила исключить делители напряжения, выравнивающие статическое напряжение на каждом элементе в сборке, и, таким образом, упростить конструкцию коммутатора, примерно в 1,5 раза уменьшить его габариты и снизить стоимость.

На рис. 3 показан коммутатор типа КРД-25-300 на 25 кВ, предназначенный для длительной работы в моноимпульсном режиме. Этот твердотельный ключ коммутирует импульсные токи 300 кА длительностью до 0,5 мс и планируется для использования в лазерной установке «Искра-6» [7]. Он содержится в своем корпусе 15 элементов РВД диаметром 76 мм с блокирующим напряжением 2,4 кВ. В такой конструкции достигнут очень высокий показатель удельной коммутируемой мощности на единицу объема коммутатора. Он равен  $2,5 \times 10^6$  Вт/см<sup>3</sup>, что в несколько раз превышает показатели аналогичных коммутаторов, построенных на импульсных тиристорах.

Включение всех полупроводниковых элементов в РВД-коммутаторе производится от одного генератора запуска, который подключен параллельно коммутатору (рис. 3). Генератор запуска формирует импульс управления амплитудой до 10 кА и длительностью 1–5 мкс, который протекает по одной цепи одновременно через все последовательно включенные РВД. Такой способ включения РВД-коммутатора дает еще одно несомненное преимущество перед тиристорными коммутаторами — существенно повышается эффективность и надежность схемы управления высоковольтной сборки.

Для РВД нового поколения при коммутации импульса тока 300 кА минимальные потери достигаются при амплитуде импульса управления 1–1,5 кА и длительности импульса 1,5–2 мкс.

### Заключение

Разработано новое поколение реверсивно-включаемых динисторов и коммутаторов на их основе, которое позволяет достичь рекордных показателей удельной коммутируемой мощности в расчете на единицу объема коммутатора. Коммутаторы способны работать как в моноимпульсном, так и в частотном режимах и пригодны для широкого применения в импульсной энергетике. ■

### Литература

1. Ramezani E., Spahn E., Bruderer G. A novel high current rate SCR for pulse power applications // Proceeding of 11th IEEE International Pulsed Power Conference (1997).
2. Ibuka S., Osada T., Jinguishi K. et al. Pulsed power generator utilizing fast Si-thyristors for environmental applications // Proceeding of 12th IEEE International Conference (1999)
3. Okamura K., Shimumara H., Kobayashi N., Watanabe K. Development of a semiconductor switch for high power copper varop lasers // Proceeding of 11th IEEE International Pulsed Power Conference (1997).
4. Тучкевич В. М., Грехов И. В. Новые принципы коммутации больших мощностей полупроводниковыми приборами. Л.: Наука, 1988.
5. Chumakov G. D., Galakhov I.V., Gudov S. N. et al. Switching of High-Power Current Pulses up to 250kA and Submillisecond Duration using New Silicon Devices-Reverse Switched Dinistors // Proceeding of 10th IEEE International Pulsed Power Conference (1995).
6. Savage M.E. Final Results From the High-Current, High-Action Closing Switch Test Program at Sandia National Laboratories // Proceeding of 12th IEEE International Conference (1999).
7. Beznasyuk N. N., Galakhov I.V., Garanin S.G. et al. The four-channel laser facility LUCH — a module of the ISKRA-6 facility // Proceeding of XXVII European Conference on Laser Interaction with Matter ECLIM-2002 (2002).
8. Geifman E. M., Grekhov I.V., Korotkov S.V. et al. Design and Experimental Investigation of Asymmetric Reverse-Switched Dynistors // Proceedings off 45th Power Converters & Intelligent Motion (PCIM' 02). May 14–16, 2002.



Рис. 2. Реверсивно-включаемые динисторы на импульсные токи от 250 до 500 кА и блокирующее напряжение 2400 В в герметичном металлокерамическом корпусе и в бескорпусном исполнении (размеры элементов 63, 76 и 100 мм)



Рис. 3. РВД-коммутатор (тип ключа КРД-25-300) на рабочий ток 300 кА, напряжение 25 кВ (слева) с подключенным генератором запуска (справа)