

О ПОВЫШЕНИИ КОММУТАЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ И НАДЕЖНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО КОММУТАТОРА НА ОСНОВЕ РЕВЕРСИВНО ВКЛЮЧАЕМЫХ ДИНИСТОРОВ В КОНДЕНСАТОРНОЙ БАТАРЕЕ МОЩНОГО ЛАЗЕРА НА НЕОДИМОВОМ СТЕКЛЕ

Е. В. Коженков, В. Г. Безуглов, И. В. Галахов, Л. С. Ганин, А. В. Креков, В. А. Осин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Одной из ключевых подсистем мощных лазерных установок является емкостной накопитель энергии – конденсаторная батарея (КБ). В КБ запасается электрическая энергия, которая затем передается в нагрузку – импульсные источники света, где преобразуется в световое излучение накачки рабочего вещества лазерных усилителей. Коммутация электрической энергии из емкостного накопителя в нагрузку осуществляется высоковольтными коммутаторами тока.

Для конденсаторных батарей мощных неодимовых лазерных установок мегаджоульного класса требуется коммутатор. Коммутатор должен выдерживать рабочее напряжение 24 кВ и пропускать импульсные токи амплитудой 250 кА и более при длительности импульса около 500 мкс (по уровню 0,1 от максимальной амплитуды импульса тока), что соответствует протеканию через коммутатор заряда 70 Кл и более.

При этом срок службы коммутатора должен быть сравним со сроком службы установки – не менее 10000 срабатываний, а вероятность безотказной работы должна быть не хуже 0,999, т.е. не более одного отказа на 1000 срабатываний [1].

Исследования, проведенные в РФЯЦ-ВНИИЭФ, показали, что наиболее пригодными полупроводниковыми коммутаторами для диапазона импульсных токов 250–500 кА микросекундной и субмиллисекундной длительности являются коммутаторы на основе реверсивно включаемых динисторов (РВД) [2]. Полупроводниковые коммутаторы обладают высокой идентичностью характеристик, присущей серийно изготавливаемым полупроводниковым приборам, надежностью, большим сроком службы, простотой обслуживания, малыми габаритными размерами, нечувствительностью к расположению в пространстве и экологической безопасности.

1. Конструкция и принцип работы реверсивно включаемых динисторов и полупроводниковых коммутаторов на их основе

В основе процесса коммутации тока в РВД лежит идея переключения полупроводникового эле-

мента 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 импульсного тока, коммутируемого прибором. Наиболее удобным и энергетически выгодным способом создания такого управляющего плазменного слоя оказался способ реверсивно-инжекционного управления, при котором плазменный слой образуется в результате кратковременного изменения полярности напряжения, приложенного к РВД. Конструктивно РВД представляет собой несколько десятков тысяч чередующихся тиристорных и диодных элементов с характерными размерами около 100 мкм, расположенных на одной кремниевой пластине. Ток управления протекает первоначально по диодным секциям, но в это время образующаяся плазма практически однородно заполняет и базовые области тиристорных элементов по всей площади кремниевой структуры. В результате, полное включение РВД происходит практически одновременно по всей площади полупроводника и длится не более нескольких микросекунд. Это обеспечивает уникальные коммутационные характеристики РВД.

РВД являются полупроводниковыми приборами тиристорного типа и их прямая вольтамперная характеристика аналогична вольтамперной характеристике тиристора в закрытом состоянии. Таким образом, 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.

Конструкция коммутатора на основе РВД представляет собой сборку из последовательно соединенных элементов РВД, однородно сжатых между собой системой прижима с определенным усилием. Для РВД-коммутатора увеличение коммутируемого тока достигается увеличением активной площади кремниевой структуры, а напряжения – простым увеличением числа последовательно включенных приборов без дополнительных выравнивающих цепей и усложнения схемы управления, при этом требуется всего одно устройство управления (генератор запус-



Рис.1. Внешний вид РВД диаметрами 63, 76 и 100 мм

ка коммутатора), включающее одновременно и абсолютно синхронно все элементы сборки. При этом исключается ситуация, когда задержка включения отдельных элементов (как это бывает у тиристорov), приводит к их пробое из-за превышения напряжения переключения и выходу из строя всего коммутатора. Однако для оптимального режима управления необходимо быстрое и однородное накопление заряда избыточных носителей вблизи коллекторного перехода с величиной, в несколько раз превышающей критический заряд включения динистора (1–2 мКл). Если условие многократного превышения критического заряда включения не обеспечивается, это является причиной увеличения прямого падения напряжения, дополнительного нагрева кремниевой структуры, ускорения деградационных процессов в динисторах и снижения ресурса работы РВД-коммутаторов.

На рис. 1 и рис. 2 представлены внешний вид РВД диаметрами 63, 76 и 100 мм и эскиз полупроводникового коммутатора на основе РВД, используемого в КБ лазерной установки «Луч» [3].

Одним из основных критериев при разработке конструкции высоковольтных полупроводниковых коммутаторов является величина активной площади контакта между катодной поверхностью элемента РВД и электродом. Ошибки в конструкции коммутатора могут привести к неравномерному распределению тока по катодной поверхности РВД и выходу прибора из строя из-за расплавления катодного покрытия прибора. Имеет определяющее значение конструкция опоры прижимного устройства, передающая механическое усилие сжатия на контактные поверхности полупроводниковых приборов, а также величина не плоскостности и не параллельности контактных поверхностей полупроводниковых элементов и электродов, соосность полупроводниковых приборов и прижимного устройства, прогиб полупроводниковых элементов, усилие сжатия и др.

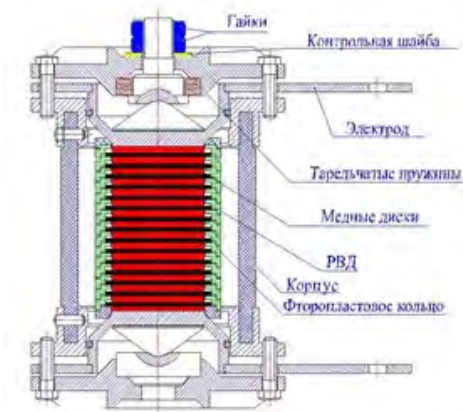


Рис. 2. Эскиз полупроводникового коммутатора на основе РВД, используемого в КБ лазерной установки «Луч»

2. Исследование работы полупроводниковых коммутаторов на основе РВД в КБ лазерных установок

В РФЯЦ-ВНИИЭФ накоплен большой опыт использования коммутаторов на основе РВД в КБ лазерных и электрофизических установок.

В середине 90-х годов прошлого века была испытана конструкция полупроводникового коммутатора на основе РВД [4], рассчитанного на рабочее напряжение до 25 кВ и рабочий ток до 200 кА при длительности импульса тока 500 мкс по уровню 0,1 от максимальной амплитуды. Также была проведена оценка возможности использования такого коммутатора в конденсаторной батарее лазерной установки NIF (National Ignition Facility, Ливерморская Национальная Лаборатория, США) [4]. Сборка коммутатора состояла из пятнадцати элементов РВД диаметром 80 мм, блокирующее напряжение каждого из которых 2 кВ, последовательно соединенных и помещенных в керамический корпус. Для определения максимального импульсного тока, пропускаемого элементом РВД до момента его теплового пробоя, можно воспользоваться феноменологической теорией предельного коммутируемого тока не превышает следующего значения:

$$I_m < K \frac{S}{f t_p^{1/3}}$$

где I_m – предельный коммутируемый ток в А; S – площадь элемента РВД в см²; t_p – длительность (по основанию) импульса тока в секундах; f – форм-фактор кривой тока, принимающий значения от 1 для прямоугольных импульсов до 0,66 для полусинусоиды; K – коэффициент, определяемый параметрами структуры РВД.

Коэффициент K обратно пропорционален толщине базы РВД, определяющей его рабочее напряжение. Для рабочего напряжения 2 кВ он равен 210.

Отметим, что использование данной формулы имеет ряд ограничений. В работе [6] указано, что теория разработана для импульсов, длительность которых не превышает 100 мкс. Для субмиллисекундного диапазона, возможно, необходимо учитывать влияние достаточно медленных процессов, которые не рассматривались при выводе данной формулы (например, диффузии тепла), что может несколько видоизменить получаемое выражение для максимального тока. Тем не менее, можно использовать эту формулу для оценки границ возможности РВД.

Тогда для РВД диаметром 80 мм расчетная амплитуда предельного коммутируемого тока при длительности импульса 500 мкс по уровню 0,1 равна 200 кА. Высоковольтные испытания показали, что для РВД диаметром 80 мм предельным значением амплитуды коммутируемого тока, при котором мала вероятность возникновения необратимого теплового пробоя полупроводниковой структуры, является 210–220 кА. Рабочими значениями токов, коммутируемых РВД такого диаметра, являются токи до 200 кА.

Для КБ лазерной установки «Луч» был разработан полупроводниковый коммутатор на основе РВД диаметром элементов 63 мм, рассчитанный на рабочее напряжение 24 кВ и ток 100 кА (максимальный ток 140 кА). В настоящее время в КБ лазерной установки «Луч» успешно используются 18 таких высоковольтных РВД-коммутаторов, которые с 2001 г. выдержали более 2000 срабатываний. На рис. 3 представлен общий вид полупроводниковых коммутаторов на основе РВД диаметром 80 мм и коммутируемым током 200 кА (слева) и диаметром 63 мм и током 100 кА (справа).

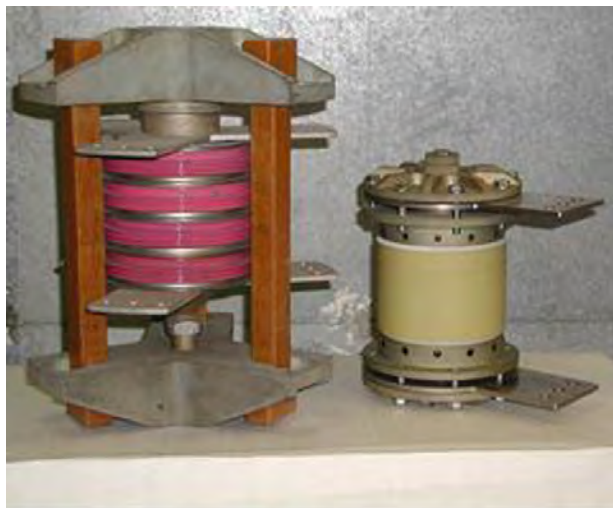


Рис. 3. Общий вид полупроводниковых коммутаторов на основе РВД диаметром 80 мм и коммутируемым током 200 кА (слева) и диаметром 63 мм и током 100 кА (справа)

В 1996 г. производители РВД – Саранский завод «Электровыпрямитель» – перешли на стандартные размеры полупроводниковых элементов диаметром 76 мм. Расчеты и экспериментальные исследо-

вания показали, что для РВД-коммутаторов диаметром элементов 76 мм рабочим значением коммутируемого тока является 170–180 кА [7]. В 1997 г. три параллельно включенные РВД-коммутатора с диаметрами элементов 76 мм были успешно испытаны при зарядном напряжении 24 кВ и коммутируемых токах 470 кА и заряде 145 Кл [2].

В КБ строящейся мощной неодимовой лазерной установки коммутатор должен выдерживать рабочее напряжение 24 кВ и пропускать токи амплитудой до 250 кА при длительности импульса 500 мкс (по уровню 0,1 от максимальной амплитуды импульса тока), что соответствует протеканию через коммутатор заряда 70 Кл. Для увеличения коммутационных возможностей единичных РВД в ОАО «Электровыпрямитель» была разработана новая технология изготовления структур РВД, в которых обеспечивается снижение всех составляющих энергии потерь: и в процессе включения, и в установившемся состоянии. Это позволило увеличить коммутируемый ток через один РВД диаметром 76 мм с 170 кА до 250 кА.

В РФЯЦ-ВНИИЭФ проведены исследования работы двух типов коммутаторов на основе РВД нового поколения при коммутируемых токах амплитудой 250 кА длительностью 500 мкс и зарядном напряжении 24 кВ: на основе бескорпусных элементов РВД и на основе РВД в металлокерамических корпусах. Каждый коммутатор представляет собой сборку из 15 последовательно соединенных РВД нового поколения диаметром 76 мм с блокирующим напряжением 2 кВ. На рис.4 представлены два типа коммутаторов: на основе РВД в металлокерамических корпусах (тип 2) и на основе бескорпусных элементов РВД (тип 1).

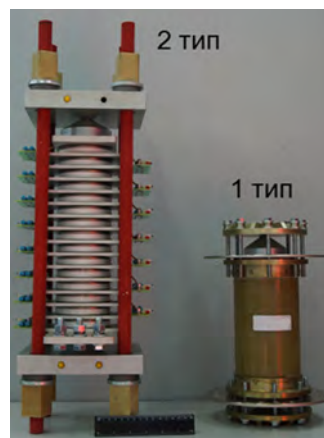


Рис. 4. Два типа коммутаторов: 1 тип – на основе бескорпусных элементов РВД с улучшенной системой прижима, 2 тип – на основе РВД в металлокерамических корпусах с защитными цепями

Состав – 15 последовательно соединенных РВД $\varnothing 76$ мм 2 кВ нового поколения. Характеристики РВД-коммутатора:

- рабочее напряжение – 24 кВ;
- рабочий импульсный ток ($T_{и} = 500$ мкс) – 250 кА;
- ресурс – не менее 10000 срабатываний.

На рис. 5 показана осциллограмма коммутируемого тока через РВД-коммутатор при зарядном напряжении 24 кВ.

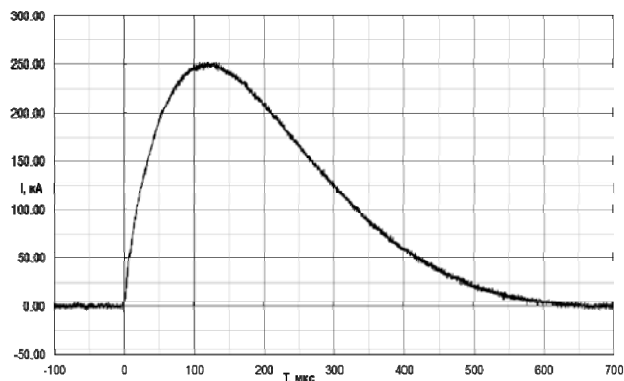


Рис. 5. Осциллограмма коммутируемого тока через РВД-коммутатор при зарядном напряжении 24 кВ

Испытания макетных образцов коммутатора на основе РВД в металлокерамических корпусах при зарядном напряжении 24 кВ и коммутируемом токе 250 кА показали, что в такой сборке не удастся обеспечить однородное по площади сжатие полупроводниковых элементов, что приводит к выходу их из строя. В частности, после 50 включений в одном коммутаторе была разрушена полупроводниковая структура одного элемента РВД, а в другом – трёх элементов.

Макетный образец коммутатора на основе бескорпусных элементов РВД выдержал 1000 включений при зарядном напряжении 24 кВ и коммутируемом токе 250 кА, после чего на заводе-изготовителе был разобран и все элементы РВД были повторно протестированы. Заводские испытания показали, что какой-либо деградации отдельных элементов не выявлено. После этого были проведены испытания 28 образцов РВД-коммутаторов. 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 повышенным током 265 кА. Три образца коммутатора успешно выдержали по 1000 включений с током 250 кА.

Проведенные испытания 28 образцов РВД-коммутаторов показывают, что полупроводниковые коммутаторы на основе бескорпусных элементов РВД способны выдерживать рабочее напряжение 24 кВ и коммутировать токи амплитудой 250 кА длительностью импульса 500 мкс (по уровню 0,1 от максимальной амплитуды импульса тока), 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 ком-

мутируемому току для РВД, что значительно повысит надежность и увеличит ресурс работы коммутатора. Примером правильно выбранного режима токовой загрузки РВД может служить опыт многолетней эксплуатации реверсивно включаемых динисторов диаметром 63 мм в коммутаторах лазерной установки «Луч». В ней реальная токовая нагрузка РВД составляет около 50 % от номинального импульсного тока.

3. Пути повышения коммутационных возможностей и надежности полупроводниковых коммутаторов на основе РВД

Одним из путей повышения ресурса работы и надежности полупроводниковых коммутаторов является повышение активной площади РВД. Это можно сделать либо параллельным соединением двух РВД-коммутаторов, либо увеличением диаметра элементов РВД в коммутаторе. Недостатками первого варианта являются значительное увеличение цены и габаритных размеров. Поэтому совместно с ОАО «Электровыпрямитель» было решено увеличить диаметр элементов РВД с 76 мм до 80 мм. Этот вариант позволяет сохранить конструкцию коммутатора без изменения его габаритных размеров. Расчеты показывают, что при увеличении активной площади кремниевой структуры РВД на 12 % (с 76 мм до 80 мм) коммутируемый ток увеличится на 10–15 %, а величина максимального нагрева РВД при разряде значительно снизится, что создаст запас для коммутируемого тока, повысит надежность и существенно увеличит ресурс работы коммутатора. Также расчеты показывают, что снизить максимальную температуру РВД можно за счет снижения толщины кремниевой структуры.

В работе [2] описана методика и результаты измерений предельно допустимых импульсных токов, которые можно пропустить через единичный РВД диаметром 76 мм. В процессе испытаний регистрировались ток через РВД и падение напряжения на РВД при протекании данного тока. Для проведения таких исследований в ОАО «Электровыпрямитель» был создан специальный стенд, на котором был испытан РВД нового поколения диаметром 80 мм. На рис. 6 представлена осциллограмма коммутируемого тока и напряжения на таком РВД. Амплитуда коммутируемого тока составляла 257 кА при длительности импульса по основанию 550 мкс, а падение напряжения на элементе РВД – 176 В. Отмечено, что за счёт увеличения диаметра элемента РВД с 76 мм до 80 мм падение напряжения уменьшается на 10 %, а величина максимального нагрева РВД при разряде – на 25 %.

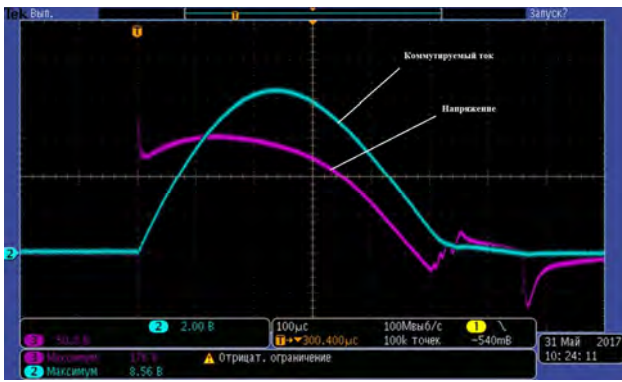


Рис. 6. Осциллограмма коммутируемого тока и напряжения на РВД диаметром 80 мм. Амплитуда коммутируемого тока – 257 кА, длительность импульса по основанию – 550 мкс, падение напряжения на элементе РВД – 176 В

Исследования работы полупроводниковых коммутаторов на основе РВД, проведенные в 2014 г., показали необходимость дальнейшей доработки конструкции коммутаторов с целью повышения их устойчивости к внешним механическим воздействиям при монтаже и надежности. В 2015 г. была проведена доработка системы прижима для обеспечения однородности распределения давления на контактные поверхности РВД и стабильности усилия сжатия, приложенного к сборке последовательно соединенных полупроводниковых элементов. В результате этой работы была проведена корректировка конструкции системы прижима, которая используется в настоящее время.

Надежность РВД определяется не только системой прижима и свойствами кремниевых структур, но и технологией межэлементных соединений полупроводникового элемента. Минимизация электрического и теплового сопротивлений в контактных соединениях позволяет повысить коммутирующие возможности элементов РВД при одновременном увеличении ресурса работы. До недавнего времени в РВД-коммутаторах использовалась технология изготовления динисторов, в которой кремниевая структура соединялась с молибденовой подложкой методом сплавления с применением высокотемпературного припоя из силумина в среде водорода. Недос-

татком метода сплавления является достаточно большой изгиб элемента, что препятствует образованию надежного контакта между электродом и элементом РВД. Поэтому полупроводниковые элементы с данной конструкцией имеют определенные ограничения при работе в предельных режимах коммутатора.

В последних образцах элементов РВД внедрена технология, в которой основным является процесс соединения кремниевых структур с молибденовыми подложками методом низкотемпературного спекания [8]. Этот процесс широко и успешно внедряется крупнейшими электронными компаниями в современные изделия силовой электроники.

Процесс низкотемпературного спекания представляет собой способ соединения поверхностей кремния и молибдена, металлизированных благородными металлами, при воздействии температуры и давления с применением серебряносодержащих паст. Серебро обладает значительно более высокими показателями электро- и теплопроводности, а также имеет большую надежность при температурном циклировании за счёт высокой температуры плавления (961 °С), чем припой [9]. Специальные серебряные порошки уже при температурах около 230 °С в содержащих кислород атмосферах показывают склонность к спеканию. Происходит также их спекание с неокисленными поверхностями благородных металлов. Приложение давления способствует диффузии атомов серебра и уплотнению соединения при спекании. При достаточном давлении (от 10 до 30 МПа) промежуточный слой из этого серебряного порошка уплотняется и увеличивает соединяемые поверхности путем заполнения шероховатостей, что приводит к прочному соединению кремния и молибдена, покрытых тонким слоем серебра. На рис. 7 схематично показан полупроводниковый элемент в разрезе, изготовленный по технологии высокотемпературного сплавления (слева) и технологии низкотемпературного спекания (справа).

Соединение кремниевой структуры с молибденовой подложкой, полученное по технологии низкотемпературного спекания, обладает рядом преимуществ.

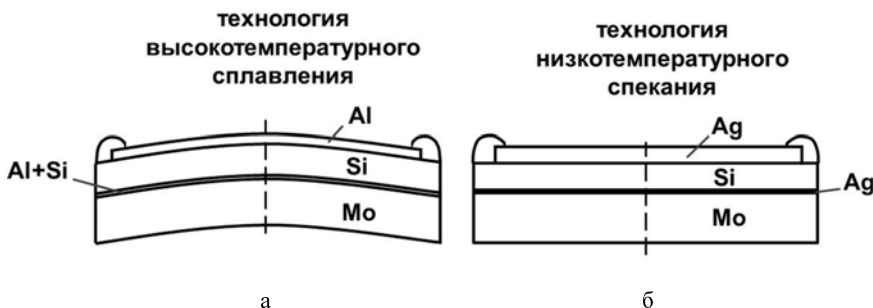


Рис. 7. Полупроводниковый элемент в разрезе: а – технология высокотемпературного сплавления, б – технология низкотемпературного спекания

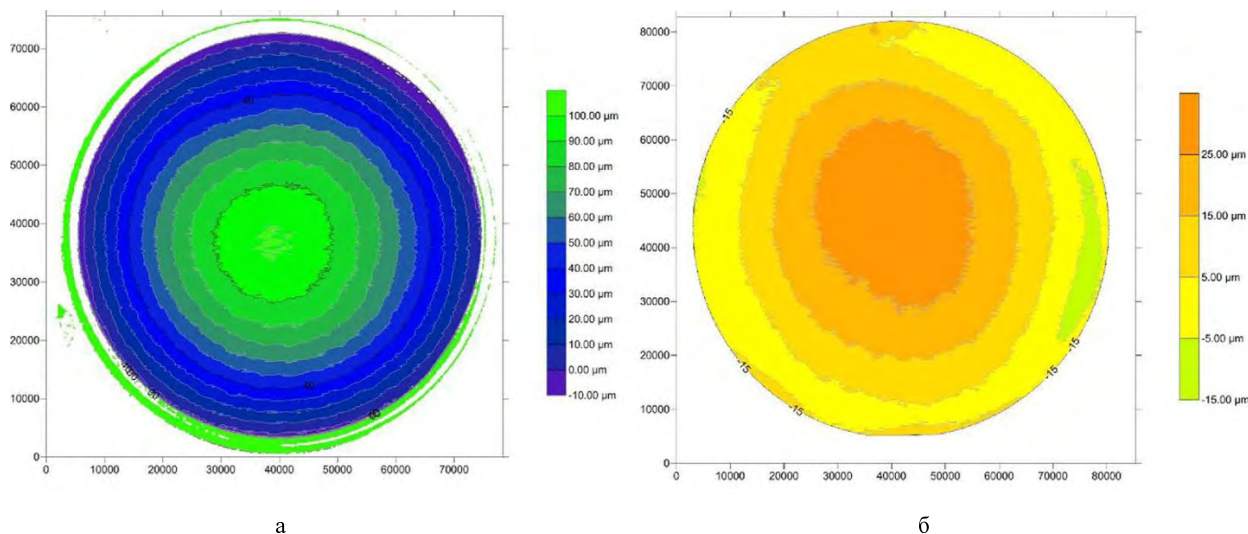


Рис. 8. Двухмерные профили со стороны катодной поверхности полупроводниковых элементов диаметром 76 мм: а – технология высокотемпературного сплавления, б – технология низкотемпературного спекания под давлением

1. В отличие от процессов сплавления при данной технологии не происходит растворения кремния в серебросодержащей пасте и не изменяется уровень легирования в приповерхностных слоях кристалла РВД, поэтому данная технология пригодна для создания контактной системы к кремниевым многослойным структурам с не глубокими *p-n*-переходами.

2. Предел температурной стабильности соединения между кремнием и молибденом оказывается гораздо более высоким, чем та температура, которая используется при изготовлении методом сплавления.

3. Отсутствие в полупроводниковых элементах значительных механических напряжений. Причина в том, что при низкотемпературном соединении после охлаждения деформация соединяемых деталей в элементе незначительна. Это гарантирует высокую рабочую площадь контактных соединений полупроводникового элемента с медными дисками коммутатора даже при низких усилиях сжатия.

Был проведен контроль топографии поверхности структур элементов РВД с применением установки CyberScan Vantage. На рис. 8 представлены двухмерные профили со стороны катодной поверхности полупроводниковых элементов диаметром 76 мм, изготовленных по технологии высокотемпературного сплавления (рис. 8а) и технологии низкотемпературного спекания под давлением (рис. 8б).

Изгиб полупроводникового элемента составляет 30 мкм при технологии низкотемпературного спекания и 100 мкм при технологии высокотемпературного сплавления. 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.

В настоящее время в опытных образцах РВД-коммутаторов для КБ установки нового поколения используются РВД диаметром 80 мм, изготовленные по технологии низкотемпературного спекания. На данный момент изготовлено и протестировано 18 таких РВД-коммутаторов.

Заключение

Создан и протестирован коммутатор на основе РВД нового поколения, который надежно коммутирует токи до 250 кА, пропуская заряд до 70 Кл и работая при напряжении 24 кВ.

В настоящий момент произведено и успешно испытано более 50 таких коммутаторов.

Исследовано влияние основных факторов, от которых зависят надежность и коммутационные возможности полупроводниковых коммутаторов на основе РВД.

Определены пути повышения надежности, долговечности и коммутационных возможностей полупроводниковых коммутаторов данного типа.

Литература

1. 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-6»: концептуальный проект // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003 г. Т. 5, С. 224–231.
2. Безуглов В. Г., Беляев С. А., Галахов И. В. и др. Новое поколение мощных полупроводниковых коммутаторов для применений импульсной энергетики // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2010 г. Т. 15, С. 326–331.
3. Безуглов В. Г., Галахов И. В., Гаранин С. Г. и др. Конденсаторная батарея 25 кВ, 5МДж с полупроводниковыми РВД-коммутаторами для питания

импульсных ламп неодимового лазера установки «Луч» // Межд. конф. X Харитоновские чтения. Сек. Мощные лазеры и исследования физики высоких плотностей энергии, 2008.

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. «Switching of High-Power Current Pulses up to 250 kA and Submillisecond Duration using New Silicon Devices - Reverse Switched Diodes», in *Proc. Xth IEEE International Pulsed Power Conference*, Albuquerque, NM, USA, July 1995.

5. Hammon G. III, Newton M. A. «NIF Amplifier Power Conditioning System (PCS). Design Basis Document», January 1, 2001.

6. Горбатюк А. В., Панайотти И. Е. // ЖТФ, 1990. Т. 60. Вып. 5. Стр. 129–135

7. Пат. № 2421840 С1 РФ, МПК H01H 9/00 (2006.01), H01L 25/00 (2006.01). Высоковольтный полупроводниковый коммутатор тока / Ю. Я. Бродский, И. В. Галахов, Е. А. Копелович и др. // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2011.

8. Лукин В. И., Рыльников В. С., Лоцинин Ю. В., Ницев К. Н. Низкотемпературное спекание серебряносодержащей пасты при соединении кремния с молибденом // Электрон. науч. журн. «Труды ВИАМ», 2015.

9. 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.