

Мощный высоковольтный диод

для импульсных применений

На рынке импульсных применений силовой электроники в настоящее время доминируют технологии двойного назначения. Большой интерес представляют коммутаторы и генераторы импульсов тока микросекундного и субмиллисекундного диапазонов на основе быстродействующих полупроводниковых ключей. Они по-прежнему остаются наилучшей альтернативой механическим прерывателям, игнитронам и тиратронам. Среди прочих, требуются диоды с высокими коммутирующими токами и запирающими напряжениями с самозащитой от перенапряжений. Такие приборы выполняют в силовых схемах функции блокирующих диодов и диодов кроубар для переключения токов в импульсных генераторах при коммутации.

Валентин Мартыненко

Алексей Хапугин

Лариса Лебедева

Владимир Картаев

Дмитрий Наумов

Алексей Гришанин

Всеволод Акимов

nicssp@elvpr.ru

Введение

Сегодня перед отечественной промышленностью, в том числе в электронике, стоят задачи по импортозамещению. Сложившиеся условия нарушили принципы организации и функционирования российской электронной отрасли, ориентированные на встраивание в сложную систему глобальной международной кооперации. ПАО «Электровыпрямитель», специализируясь на разработке и производстве биполярных силовых полупроводниковых приборов, сохраняет свою деятельность и предлагает потребителям широкую гамму изделий [1], по своим характеристикам способных заместить импортные аналоги. Также в компетенциях предприятия разработка и производство новых изделий силовой электроники, не имеющих конструктивно-технологических аналогов и по своему назначению полностью удовлетворяющих требованиям отечественных потребителей,

в частности для импульсных применений [2]. В статье представлена отечественная разработка мощного высоковольтного импульсного лавинного диода с блокирующим напряжением 25 кВ, импульсные токи до 300 кА, способного выдерживать импульсы перенапряжений с энергией не менее 150 Дж.

Применение

Появление высоковольтных диодов для коммутации токов амплитудой свыше 100 кА длительностью 100–1000 мкс продиктовано созданием в последнее время импульсных систем для специальных и гражданских применений. В их состав, как правило, входят высоковольтные (до 30 кВ) емкостные накопители энергии (е.н.э.) с запасенной энергией до 1 МДж и разрядные твердотельные ключи большой мощности. В качестве нагрузки в этих системах, в зависимости от решаемых задач, используются устройства с резистивными, резистивно-индуктивными и индуктивными характеристиками. Примеры таких применений представлены на рис. 1–3.

На рис. 1 показана схема импульсного генератора, используемого для испытаний ударным током устройств защиты от ударов молний (с резистивными характеристиками) [3].

Напряжение заряда конденсаторной батареи составляет 30 кВ. Важными элементами схемы, определяющими выходные параметры и надежность генератора, являются импульсные диоды большой мощности. В качестве блокирующего диода и диода кроубар в данной схеме имеются высоковольтные сборки последовательно соединенных трехдвойных 9-кВ диодов таблеточной конструкции. Генератор работает в различных режимах нагрузки.

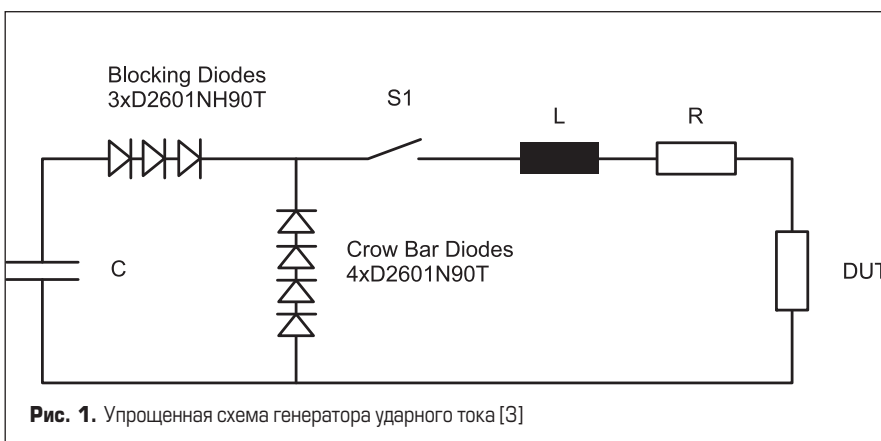


Рис. 1. Упрощенная схема генератора ударного тока [3]

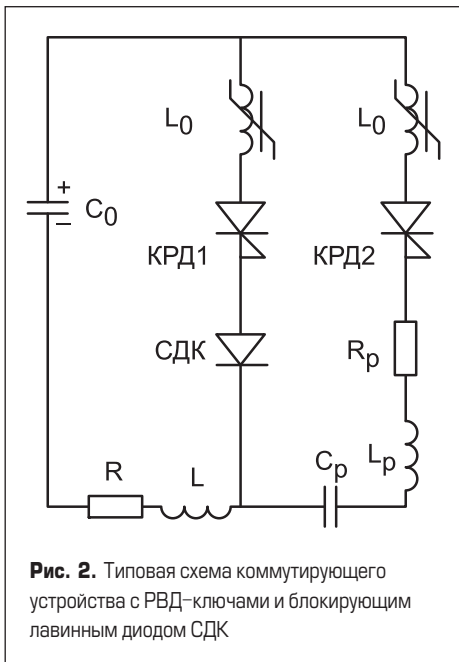


Рис. 2. Типовая схема коммутирующего устройства с РВД-ключами и блокирующим лавинным диодом СДК

Максимальные значения коммутируемых токов до 100 кА, длительность импульсов 20–1000 мкс.

На рис. 2 представлена упрощенная схема коммутирующего устройства с твердым разрядным ключом КРД1 на основе реверсивно-включаемых динисторов (РВД) с последовательно соединенным блокирующим диодом СДК. Подобная схема реализована в высоковольтных блоках системы накопления и коммутации электрической энергии (СНКЭЭ) мощной лазерной установки [4].

Зарядное напряжение конденсаторной батареи установки составляет 25 кВ. При включении РВД емкостный накопитель блока СНКЭЭ разряжается на 10 параллельно включенных ламп накачки. В рабочем режиме разрядный ток равен 250 кА, в аварийном режиме — 300 кА. Длительность импульса тока в штатном режиме около 500 мкс, форма тока — аperiodический разряд. Схема состоит из двух параллельных силовых контуров, запускаемых последовательно. Диод блокирует прохождение тока в цепь накачки РВД силового коммутатора КРД1 и предотвращает его несанкционированное срабатывание при включении блока контура предварительной ионизации КРД2. В соответствии с режимом работы СНКЭЭ диод должен, как и РВД-ключ, блокировать постоянное обратное напряжение не менее 25 кВ и пропускать импульсы тока до 300 кА с минимальными потерями. Кроме этого, диод должен выдерживать перенапряжения амплитудой до 40 кВ с энергией импульсов порядка 20 Дж, возникающие в разрядном контуре при работе коммутатора предварительной ионизации ламп накачки в тестовом режиме.

Диодные блоки СДК нашли применение и в мобильной системе питания циклических ускорителей — безжелезных импульсных малогабаритных бетатронов [5]. В свою очередь бетатроны используются в качестве мощного импульсного источника излучения для рентгенографирования динамических объектов с большими оптическими толщинами.

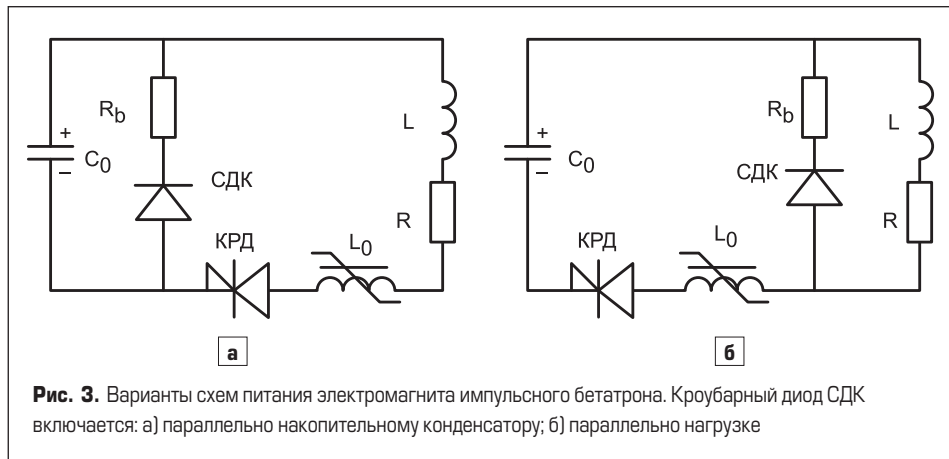


Рис. 3. Варианты схем питания электромагнита импульсного бетатрона. Кроубарный диод СДК включается: а) параллельно накопительному конденсатору; б) параллельно нагрузке

На рис. 3 показаны два варианта упрощенных электрических схем питания электромагнита импульсного бетатрона.

Зарядное напряжение конденсатора составляет 22 кВ. Амплитуда коммутируемого тока в электромагнит ускорителя достигает 110 кА. Длительность импульса 1000 мкс. В этих схемах кроубарный диод СДК включается параллельно накопительному конденсатору (рис. 3а) либо параллельно нагрузке (рис. 3б) и выполняет функции коммутатора тока для формирования аperiodического разряда.

Конструкция и технология

Конструкция мощного высоковольтного импульсного диода представлена на рис. 4. Она выполнена в виде герметичного блока [6], в состав которого входят сборка из 15 последо-

довательно соединенных элементов бескорпусных 2,6-кВ лавинных диодов диаметром 80 мм (1), медные электроды (2), цилиндрический корпус-изолятор (3), система прижима (4), внешние катодный (5) и анодный (6) токовыводы. Корпус изготовлен из армированного стекловолокном изоляционного материала с высокой механической и электрической прочностью. На обоих торцах корпуса жестко закреплены металлические фланцы (7), имеющие резьбовые отверстия для крепления крышек блока (8) к корпусу с помощью болтов. При сборке блока одновременно производится герметизация диодной сборки эластичными уплотнителями, расположенными между фланцами и токовыми выводами. Корпус блока защищает диодную сборку от внешней среды, обеспечивает необходимые изоляционные воздушный промежуток и расстояние

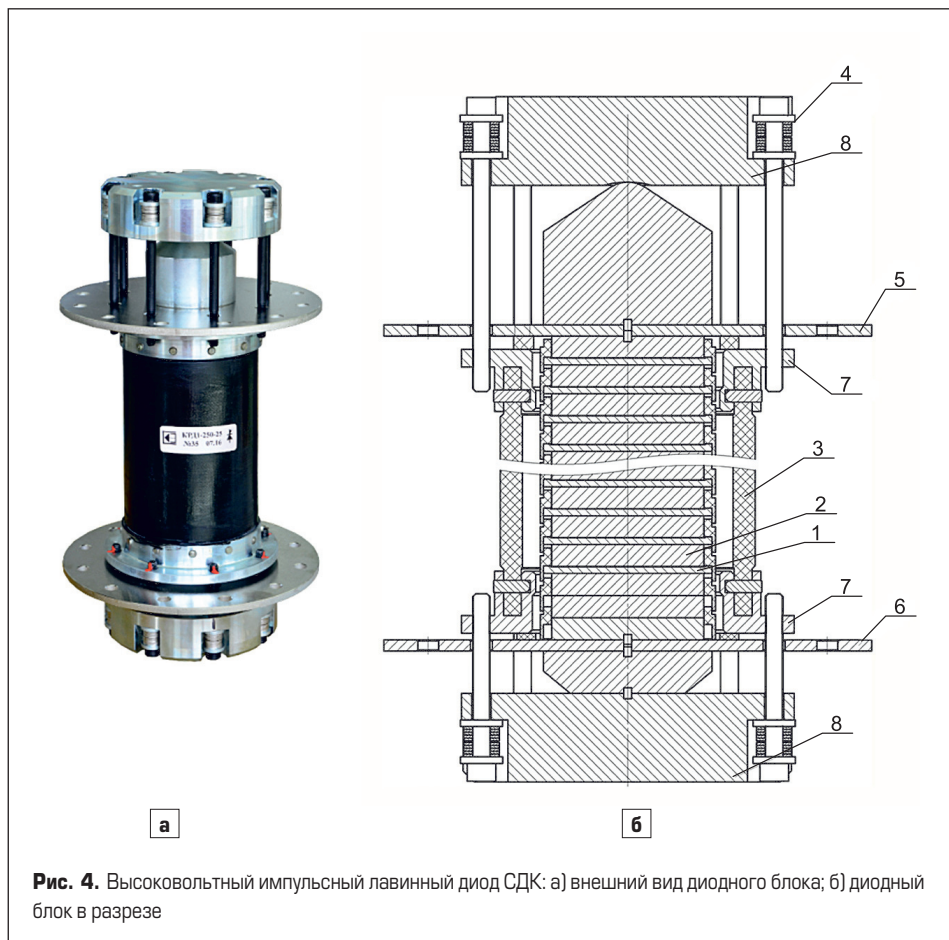


Рис. 4. Высоковольтный импульсный лавинный диод СДК: а) внешний вид диодного блока; б) диодный блок в разрезе

по поверхности корпуса между катодом и анодом импульсного диода. Кроме того, через корпус передается сжимающее усилие от узла прижима к диодным элементам. Они соединены между собой контактными медными дисками, расположенными между анодом одного элемента и катодом соседнего элемента. Центрирование диодных элементов, медных дисков и токовых электродов между собой обеспечивается с помощью фторопластовых колец. На катодном и анодном токовыводах расположены конусные опоры, необходимые для равномерной передачи усилий сжатия на рабочие поверхности диодных элементов.

Одним из главных критериев при разработке конструкции высоковольтного диода было обеспечение однородного давления в контактах между катодной поверхностью элементов диодов и медными электродами. Проведены моделирование и расчеты конструкции прижимного устройства блока, его деталей и узлов [7].

По результатам расчетов найден наиболее оптимальный вариант конструкции зажимного устройства блока, обеспечивающий однородное распределение контактного давления на всех 15 диодных элементах в единой сборке — как по площади каждого элемента, так и между элементами. Важным фактором для диодных элементов, работающих в импульсном режиме при сверхвысоких плотностях тока (6–8 кА/см²), является величина активной площади контакта S_a между элементом и медным электродом при усилии сжатия $F = 50$ кН. Эта площадь определяется как площадь контакта, в каждой точке которой давление составляет не менее 8 МПа. Для надежной и длительной работы диода в моноимпульсном режиме 250 кА/25 кВ/500 мкс величина S_a должна быть не менее 90% от общей площади контакта. Поэтому все диодные элементы, предусмотренные в комплектации диодного блока, подвергаются контролю S_a .

Для улучшения электрических и тепловых характеристик контактных соединений была внедрена новая технология соединения диодных структур с контактными электродами с использованием серебросодержащих паст (ЛТТ). Данный процесс проводится при относительно низких температурах и высоких давлениях и позволяет увеличить активную площадь катодного контакта полупроводниковых приборов до 90% и более [8]. Оценка активной площади контакта на катодных поверхностях диодов проводится с помощью тензочувствительных полимерных пленок, обладающих способностью изменять цвет в зависимости от величины давления. Посредством сканирования делается оцифровка полученных отпечатков, с записью результатов в компьютер. С помощью программного обеспечения проводится интерпретация результатов с выводом значений давления и активной площади контактов.

На рис. 5 показаны отпечатки, характеризующие активную площадь контактов, на катодных поверхностях диодов, изготовленных по стандартной технологии (рис. 5а) и с использованием ЛТТ-технологии (рис. 5б).

На рис. 5 видно, что площадь отпечатка на диодном элементе с максимальным давлением 8 МПа, изготовленном по стандартной технологии, не превышает 54% от общей площади катодного контакта между поверхностью диодного элемента и медным электродом, тогда как низкотемпературное спекание обеспечивает свыше 90% активной площади контакта с максимальным давлением. Соответственно, технология ЛТТ позволила наилучшим образом минимизировать электрические и тепловые сопротивления в контактных соединениях и внести существенный вклад в повышение коммутационных характеристик, надежности и срока службы высоковольтных импульсных диодов.

Перед сборкой в корпус все диодные элементы подвергаются тщательной проверке статических и динамических параметров с нумерацией элементов и регистрацией измеренных значений V_{BR} , I_{DRM} , V_{FM} , Q_{RR} , P_{RSM} . По этим параметрам проводится отбор элементов для каждой сборки. Главное условие отбора — разброс параметров диодных элементов в высоковольтной сборке должен быть менее 10%. Сборка диодных блоков СДК производится в обеспыленной среде с контролируемой температурой и влажностью окружающего воздуха.

Параметры и характеристики

После сборки блоки подвергаются высоковольтным испытаниям постоянным напряжением до 30 кВ, затем многократной нагрузке импульсами тока большой мощности с контролем токов утечки при напряжении 25 кВ до и после нагрузки. Испытательный стенд представляет собой 200-кДж емкостный накопитель с разрядным током до 400 кА при напряжении заряда конденсатора до 5000 В. Форма импульса тока близка к синусоиде, длительность у основания импульса (0,1 амплитуды) — 500 мкс. На рис. 6 показан блок

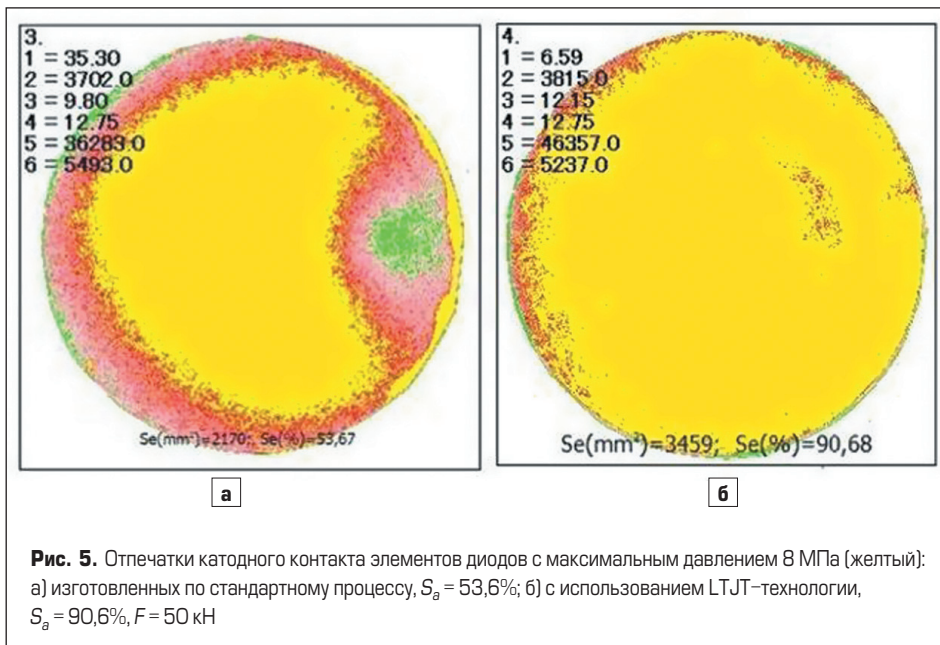


Рис. 5. Отпечатки катодного контакта элементов диодов с максимальным давлением 8 МПа (желтый): а) изготовленных по стандартному процессу, $S_a = 53,6\%$; б) с использованием ЛТТ-технологии, $S_a = 90,6\%$, $F = 50$ кН

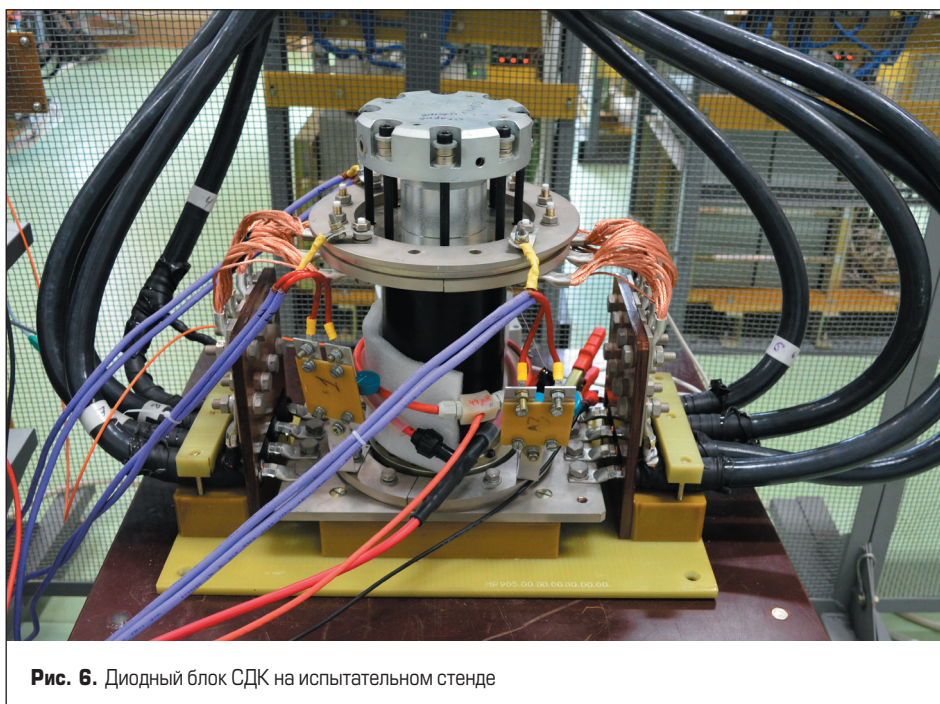


Рис. 6. Диодный блок СДК на испытательном стенде

СДК на испытательном стенде перед включением импульсным током 250 кА/500 мкс. Частота включений при испытаниях — 1 включение/5 мин.

На рис. 7 показаны измеренные импульсы тока и прямое падение напряжения при полном токе. Форма импульса тока, сформированная схемой испытательного стенда, — правильная синусоида, амплитуда тока 250 кА, длительность 500 мкс, что соответствует протекающей заряду 80 Кл. Скорость нарастания тока на участке от нуля до 100 кА — 2 кА/мкс, скорость спада тока на участке от 100 кА до нуля ~1,5 кА/мкс. Форма волны падения напряжения при включении диодного блока имеет характерный коммутационный пик напряжения амплитудой 75 В длительностью около 4 мкс. Его появление в момент перехода прибора из блокирующего в проводящее состояние связано с конечным временем пролета носителей заряда, инжектированных с эмиттерных переходов, и модуляцией проводимости базовых областей.

Максимальная величина падения напряжения при протекании импульса тока 250 кА равна 130 В. На рис. 7 видно, что амплитуда напряжения смещена относительно амплитуды тока на 50 мкс. Наблюдаемое смещение является результатом разогрева кремниевой структуры диода при протекании импульса тока большой мощности, так как мгновенная температура перехода при нагрузке одиночным импульсом тока 250 кА/500 мкс достигает +200 °С [8]. Ресурсные испытания в подобном режиме, проведенные на стендах у заказчика (апериодический разряд на резистивно-индуктивную нагрузку), и анализ результатов этих испытаний подтвердили проектный срок службы диодных блоков, установленный как 10⁴ включений.

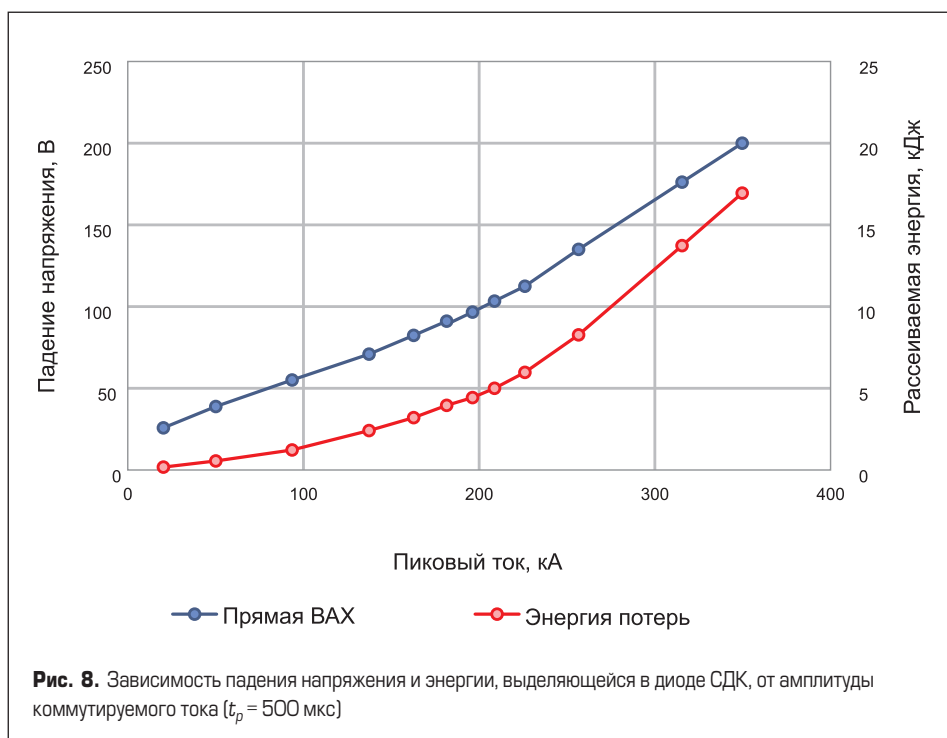
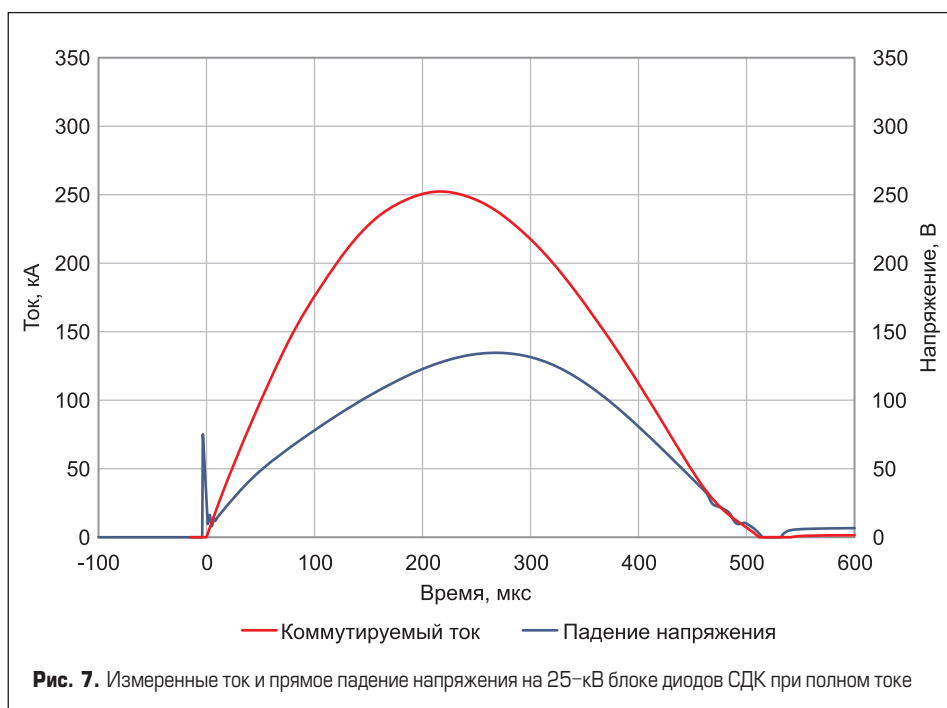
При длительной работе высоковольтных диодных блоков в импульсно-периодическом режиме важно поддерживать на низком уровне среднюю температуру нагрева переходов $T_j < +40$ °С, которая зависит от рассеиваемой в приборах энергии и характера отвода тепла. Во время испытаний и эксплуатации диодных блоков не было проблем с их нагревом. Время между включениями, установленное в соответствии с режимами работы е.н.э. лазера и бетатрона, было достаточно продолжительным (5 мин), так что температура перехода успевала снижаться до своего исходного значения. На рис. 8 показана зависимость падения напряжения и полной энергии, рассеиваемой в диодном блоке СДК, от амплитуды коммутируемого тока длительностью 500 мкс.

На рис. 8 видно, что при максимальном импульсном токе амплитудой 250 кА в блоке рассеивается энергия величиной около 8 кДж. Это означает, что каждый элемент лавинного диода рассеивает 0,53 кДж энергии, или 1,75 Вт средней мощности, при рабочей частоте — 1 включение/5 минут..

Низкие потери и отвод тепла от каждого элемента диода массивными медными электродами, установленными в блоке, позволяют использовать в конденсаторных батареях

Таблица. Основные параметры и характеристики высоковольтного диодного блока СДК 1-250-25

Наименование параметра, условия установления норм, обозначение	Норма
Постоянное обратное напряжение, V_{DC}	25 кВ
Повторяющееся обратное напряжение, V_{RRM}	30 кВ
Напряжение лавинного пробоя, V_{BR}	40 кВ
Максимальная энергия пика перенапряжения, E_{RSM}	150 Дж
Амплитуда прямого тока при $t_p = 500$ мкс, I_{FRM}	250 кА
Ток аварийной перегрузки при $t_p < 500$ мкс, I_{FSM}	300 кА
Падение напряжения при $I_{TRM} = 250$ кА, V_{FM}	< 150 В
Обратный ток при $T_a = T_R$, $V = V_{DC}$, I_R	< 0,1 мА
Срок службы (режим работы 250 кА/25 кВ/500 мкс)	10 ⁴ вкл.
Температура окружающей среды, T_a	+10...+35 °С
Относительная влажность окружающего воздуха при температуре не более +25 °С	80%



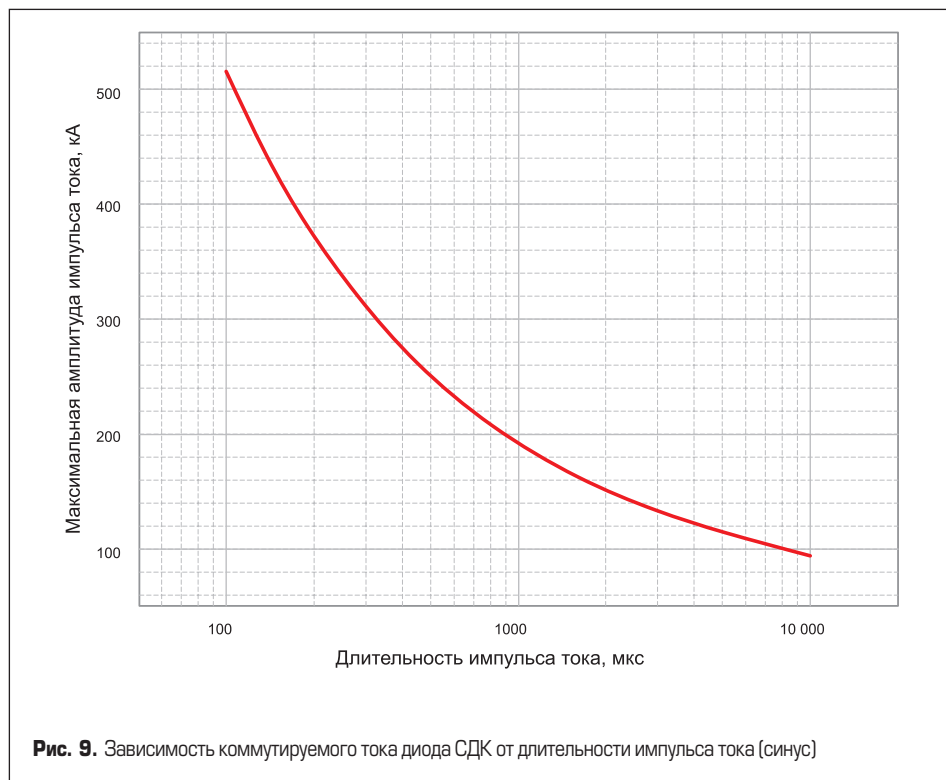


Рис. 9. Зависимость коммутируемого тока диода СДК от длительности импульса тока (синус)

накопителей высоковольтные диоды СДК без дополнительного принудительного охлаждения, существенно упрощая при этом обслуживание и снижая стоимость е.н.э.

Основные параметры и характеристики высоковольтного диодного блока СДК1-250-25 представлены в таблице.

Заключение

В разделе «Применение» было показано, что в зависимости от назначения, а также схемных и конструктивных особенностей систем питания и коммутации электрической энергии параметры коммутируемых токов, а именно их амплитуды и длительности могут быть различными. На рис. 9 представлена расчетная зависимость максимальной амплитуды рабочего тока диодного блока СДК от длительности импульсов тока.

Эта зависимость ограничена наиболее распространенным сегодня временным диапазоном длительностей тока 100–1000 мкс. На рис. 9 видно, что разработанные диоды могут быть успешно применены не только в описанном выше режиме работы 250 кА/25 кВ/500 мкс для ламп накачки лазерной установки [9] или в режиме 110 кА/22 кВ/1000 мкс в системе питания электромагнита импульсного бетатрона, но и в других режимах — например, 500 кА/100 мкс и в иных режимах согласно кривой $I_p = f(t_p)$ (рис. 9).

Литература

1. www.elvpr.ru
2. Хапугин А., Мускатиньев В., Мартыненко В., Гришанин А., Елисеев В., Галахов И., Ганин Л., Осин В. РВД-ключи для мощных твердотельных энергетических систем // Силовая электроника. 2022. № 2.

3. Schneider C., Schöneberger Hr., Przybilla J. Pulse Generator with Diodes D2601NH 90T at company Phoenix Contact. www.infineon.com/dgdl/Infineon_Bipolar-Pulse_Generator_with_Diodes-ART-v1.0-en.pdf
4. Безуглов В. Г., Бабер И. С., Бродский Ю. Я., Галахов И. В. и др. Конденсаторная батарея 25 кВ, 5 МДж с полупроводниковыми РВД-коммутаторами для питания импульсных ламп неодимового лазера установки «Луч». Международная конференция X Харитоновские тематические научные чтения «Мощные лазеры и исследования физики высоких плотностей энергии». Саров, 2008.
5. Савченко К. В., Куропаткин Ю. П., Шамро О. А. Перспективные рентгенографические комплексы на базе безжелезных импульсных бетатронов. Сборник научных трудов восьмой международной научно-практической конференции «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине». Томск, 2016.
6. Бродский Ю. Я., Галахов И. В., Копелович Е. А., Мартыненко В. А., Муругов В. М., Осин В. А., Флат Ф. А., Чумаков Г. Д., Шуляпов В. И. Высоковольтный полупроводниковый коммутатор тока. Патент на изобретение № 2421840.
7. Grishanin A., Martynenko V., Frolov O., Yantsen N., Nishchev K. Simulations and Experimental Investigations of High Voltage Semiconductor Stacks for Ultra-High Current Commutation. PCIM Europe-2014. Nuremberg, Germany. May 2014.
8. Grishanin A., Martynenko V., Khapugin A., Malygin M., Frolov O., Nishchev K., Novopoltsev M. Reliability Improving of Power Semiconductor Discharge Switch by Means of LTJT Technology. PCIM Europe-2017. Nuremberg, Germany. May 2017.
9. Арзев А. Г., Галахов И. В., Ганин Л. С., Гришанин А. В., Мартыненко В. А., Хапугин А. А. и др. // Коммутаторы импульсов тока на основе реверсивно-включаемых динисторов для мощных электрофизических установок // Приборы и техника эксперимента. 2021, № 4.