

СОВРЕМЕННЫЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ СИЛОВЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ



Полупроводниковые приборы силовой электроники – важная элементная база энергосберегающего преобразовательного оборудования. Они выполняют функции мощных электронных управляемых ключей для коммутации тока в схемах преобразования электрической энергии (выпрямление, инвертирование, регулирование переменного и постоянного токов, стабилизация питающих сетей, защита от перенапряжений и т.п.).

Силовые полупроводниковые приборы (СПП) способны преобразовывать мощности в непрерывном режиме от 0,5 кВт до 100 МВт на частотах от 50 Гц до 100 кГц, в импульсных режимах – до 100 ГВт. Эти уникальные свойства приборов обусловили их широкое применение в силовой электронике.

Развитие полупроводниковых приборов в России зависит от состояния отечественного рынка преобразовательной техники, а также от мировых тенденций развития электронной компонентной базы. По-прежнему востребованы стандартные биполярные приборы: диоды, тиристоры (SCR), динисторы, триаки и др. Они и сегодня составляют основу отечественного преобразовательного оборудования, применяемого в электроэнергетике, транспорте, машиностроении, металлургии, нефте- и газодобыче, стройиндустрии, на крупных коммунальных объектах, в военной технике и пр.

Вместе с тем, за последние годы на базе полностью управляемых ключей, прежде всего IGBT (Isolated Gate Bipolar Transistor) и IGCT (Integrated Gate-Commutated Thyristor), созданы современные преобразователи, обеспечивающие преобразование электроэнергии на высоких частотах при минимальных потерях и материальных затратах. Рынок этих приборов, в первую очередь IGBT-модулей, сегодня наиболее динамичен. Он активно расширяется как за счет новых областей применения (автомобильная электроника, ветроэнергетика, инверторы для солнечных батарей, очистка воды, медицинская техника, радиолокация и др.), так и за счет сфер, в которых раньше традиционно использовались мощные тиристоры, – передача электроэнергии (HVDC), компенсаторы реактивной мощности (SVC), электроприво-

В.Елисеев, В.Мартыненко,
В.Мускатиньев, В.Чибирик
martin@moris.ru

ды (IDCD), источники питания (UPS) и др. Причем IGCT уже сегодня достигли предельных коммутируемых мощностей (6000 А/8000 В), характерных для SCR, а IGBT приближаются к ним (3600 А/6500 В).

С учетом этих тенденций в ОАО "Электровыпрямитель" ведутся разработки и осваиваются производства новых видов СПП в дискретных и модульных конструкциях в широком диапазоне токов, напряжений и рабочих частот. Предприятие является крупнейшим производителем силовых полупроводниковых приборов и преобразовательного оборудования на постсоветском пространстве. За последние сорок лет потребителям поставлены десятки миллионов СПП. В 1990-е годы ОАО "Электровыпрямитель" освоило все силовые полупроводниковые приборы, выпускаемые на предприятиях Украины, Эстонии и Киргизии.

Сегодня ОАО "Электровыпрямитель" поставляет свыше 1000 наименований СПП на токи от 1 А до 6300 А и рабочее напряжение от 100 В до 50 кВ.

ДИСКРЕТНЫЕ ПРИБОРЫ

ОАО "Электровыпрямитель" выпускает дискретные силовые полупроводниковые приборы с диаметром кремниевых структур от 5 до 101 мм в корпусах штыревой, таблеточной и фланцевой конструкций 22 типов (рис.1). Производится широкий ряд силовых диодов и тиристоров нового поколения для низкочастотных применений на ток от 10 до 6300 А, рабочее напряжение от 200 до 6500 В. В 2008 году планируется разработать тиристоры с рабочим напряжением до 8 кВ, диоды до 10 кВ.

По количеству эта серия СПП – одна из крупнейших в мире. По электрическим параметрам, габаритно-присоединительным размерам она соответствует аналогам, выпускаемым фирмами ABB, Infineon/Eupec, Westcode, Dypex и другими известными компаниями.

На основе этих же конструкций разработаны и поставляются быстродействующие диоды и тиристоры, предназначенные для работы в частотно-импульсных режимах. Частотные тиристоры выпускаются с временем выключения от 8 до 50 мкс, диоды – от 50 нс до 5 мкс. Рабочее напряжение



от 800 до 2400 В. По заказам поставляются диоды и тиристоры с рабочим напряжением до 4000 В с временами выключения не более 150 мкс, оптимизированные для инверторных применений.

ОАО "Электровыпрямитель" – традиционный поставщик мощных диодов и тиристоров. В 1966 году за исследования сложных структур с р-п-переходами, разработку технологии изготовления и внедрение в серийное производство силовых кремниевых вентилях группе специалистов завода и ФТИ им. А.Ф.Иоффе (С.-Петербург) была присвоена Ленинская премия.

В настоящее время на предприятии производится разнообразная гамма приборов тиристорного типа в широком диапазоне токов и напряжений: тиристоры низкочастотные (SCR) до 6300 А/6000 В; тиристоры с оптическим управлением (LTT) до 1000 А/6500 В; тиристоры быстродействующие и частотно-импульсные до 2000 А/2400 В; тиристоры асимметричные (SCRA) до 1000 А/2800 В; тиристоры симметричные (триаки) до 1000 А/1400 В; оптоотиристоры до 80 А/1200 В; реверсивно включаемые динисторы (RSD) до 500 кА/3000 В.

Мощные диоды и тиристоры ОАО "Электровыпрямитель" успешно эксплуатируются сегодня в промышленности (электропривода, источники питания, различное оборудование для преобразования электрической энергии); электроэнергетике (системы возбуждения турбо- и гидрогенераторов, вставки постоянного тока, компенсаторы реактивной энергии); на транспорте (тяговые электропривода магистральных электровозов, системы электродвижения надводных и подводных судов); в атомной промышленности, военной технике и др.

Практически все турбо- и гидрогенераторы в России и на постсоветском пространстве оснащены современными системами возбуждения с отечественными тиристорами на ток от 800 до 1250 А и напряжение до 4400 В. Этими приборами укомплектованы тиристорные системы возбуждения, работающие сегодня на 140 электростанциях (в том числе и атомных) в России и в 27 странах мира.

Высоковольтные роторные диоды ОАО "Электровыпрямитель" с рабочим током 630 А и напряжением 2800 В специально разработаны и успешно эксплуатируются в бесщеточных диодных системах возбуждения (БСВ) для питания обмоток возбуждения турбогенераторов серии ТВВ большой мощности от 320 до 1200 МВт.

ОАО "Электровыпрямитель" является одним из крупнейших поставщиков силовых полупроводниковых приборов для комплектации электрооборудования железнодорожного транспорта России и СНГ. Эти приборы в течение многих лет успешно работают в выпрямителях тяговых подстанций электрифицированных железных дорог, выпрямительно-инверторных преобразователях (ВИП) магистральных электровозов, выпрямителях различного назначения для тепловозов, путевых машин и карьерных электровозов, в системах



Рис. 1. Силовые полупроводниковые приборы штыревой, таблеточной и фланцевой конструкций

электропитания вагонов, вспомогательных приводах локомотивов и другом электрооборудовании РЖД. Например, на базе высоковольтных мощных тиристоров на ток 800 А и напряжение до 3400 В, выпускаемых ОАО "Электровыпрямитель", изготавливаются тяговые ВИП для электровозов ВЛ-65 и ВЛ-85; многоканальные преобразователи для электровозов ВЛ-80; преобразователи для питания асинхронных тяговых двигателей тепловозов ТЭМ 21 и ТЭ2П и др. Высоковольтные лавинные диоды на ток до 2000 А и напряжение до 6000 В успешно применяют для питания двигателей электровозов ВЛ-80С, ВЛ-80К, ВЛ60К; в преобразователях тепловозов ТЭМ-10, ТЭМ-0А и ТЭП-70; в преобразователях тяговых подстанций железных дорог.

Высоковольтными тиристорами с повышенным быстродействием на ток 800 А и напряжение 2400 В комплектуются преобразователи частоты технологического оборудования, которое работает на предприятиях топливно-энергетического комплекса (ТЭК) страны. Тиристоры используются в нефтегазовом комплексе в преобразователях частоты на напряжение 6 кВ; 10 кВ; 15,75 кВ и токи 100 А, 200 А, 500 А, 800 А для синхронного электропривода, в пусковых устройствах на напряжение 6 кВ, 10 кВ и токи 50 А, 200 А, 500 А для плавного пуска электродвигателей при плавном изменении напряжения методом фазового регулирования.

ОАО "Электровыпрямитель" – одно из немногих предприятий, которое выпускает симметричные тиристоры таблеточной конструкции с однополярным и двухполярным управлением, рассчитанные на рабочий ток до 1000 А. В схеме регуляторов переменного тока промышленной частоты один симистор заменяет два тиристора.

Мощные симметричные тиристоры успешно применяются сегодня в электросварочном оборудовании ОАО "АВТОВАЗ" (г. Тольятти) для сварки кузовов автомобилей и бронетранспортеров, в силовых светотехнических установках, электротермическом оборудовании, в приводах пассажирских и грузовых лифтов.

Силовые диоды и тиристоры ОАО "Электровыпрямитель" полностью соответствуют требованиям военной техники. Они способны коммутировать большие электрические мощности (ток до тысяч ампер при напряжении до не-

скольких киловольт), имеют небольшие массогабаритные параметры, малый уровень акустических и электромагнитных помех, высокую надежность при работе в преобразователях, в том числе в циклических режимах. Приборы могут работать во всех климатических зонах Земли, они устойчивы к ионизирующему излучению и электромагнитным воздействиям. За период с 1985 по 2007 год ОАО "Электровыпрямитель" изготовило и поставило для нужд Минобороны несколько десятков тысяч современных, высоконадежных силовых диодов и тиристоров. За весь период эксплуатации этих приборов рекламаций и претензий от потребителей не поступало.

За комплекс работ по созданию и освоению производства нового поколения тиристоров и диодов для энергоемких отраслей промышленности, энергетики и транспорта группе специалистов ОАО "Электровыпрямитель", ФГУП "ВЭИ" (Москва) и ФТИ им. А.Ф.Иоффе (С.-Петербург) в 2006 году была присвоена премия Правительства Российской Федерации.

Для импульсной техники (Pulsed Power Applications) предприятие освоило производство и поставляет реверсивно-включаемые динисторы (РВД). Разработка физических принципов коммутации больших мощностей проводилась сотрудниками ФТИ им. А.Ф.Иоффе (они удостоены Государственной премии СССР).

Динисторами комплектуются высоковольтные коммутаторы тока, способные переключать импульсы тока в мега- и гигаваттном диапазоне мощностей. Последние разработки таких коммутаторов подтвердили абсолютное превосходство РВД перед всеми другими типами полупроводниковых ключей. На основе приборов такого типа можно проектировать коммутирующие устройства на импульсный ток до миллиона ампер, напряжение до 100 кВ.

Перспективные области применения РВД: системы коммутации электрической энергии для мощных лазеров, ускорителей и накопителей заряженных частиц, рентгенографической аппаратуры и других мощных электрофизических установок.

ДИОДНО-ТИРИСТОРНЫЕ МОДУЛИ

ОАО "Электровыпрямитель" разработало и производит большое семейство диодно-тиристорных модулей с изоли-



Рис.2. Диодно-тиристорные модули с прижимными контактами



Рис.3. Быстровосстанавливающиеся диодные модули (SFRD-модули)

рованным основанием на ток от 40 до 1250 А и рабочее напряжение до 4400 В в шести базовых конструкциях с шириной медного основания 20, 34, 50, 60 и 70 мм (рис.2). Напряжение изоляции между выводами модуля и основанием составляет от 2500 до 9500 В. Модули выполнены по технологии прижимного контакта (pressure-contact technology), что обеспечивает им высокую энерготермоциклостойкость, надежную работу в режиме больших токовых нагрузок, эксплуатацию в тяжелых климатических условиях.

Конструкция модулей с прижимными контактами позволяет реализовать различные варианты силовых схем (ключи, полумосты, однофазные мосты, снабберные цепи) с использованием всех видов выпускаемых СПП – диодов, тиристоров, оптотиристоров, симисторов, резисторов и других приборов.

Также выпускаются новые тиристорные модули (полумосты, ключи переменного тока) на действующий ток до 1600 А, напряжение до 1800 В с интегрированным в основание прибора водяным охладителем. Они предназначены для мощного сварочного оборудования, которое обычно применяют в автомобильной промышленности.

Силовые модули удобны для потребителей. Модули с изолированным основанием и охлаждающие устройства, выполненные в виде единой моноплиты, существенно упрощают силовую схему преобразователя, улучшают его массогабаритные характеристики, уменьшают затраты на монтаж и обслуживание.

ОАО "Электровыпрямитель" выпускает высокочастотные диодные модули с "мягкими" характеристиками обратного восстановления (SFRD-модули) на напряжение от 600 до 3300 В и токи от 20 до 800 А (рис.3). Внутреннее напряжение изоляции – от 2500 до 13000 В. Схемное исполнение данной серии – от одиночных ключей до трехфазных мостов. Особенность этих приборов – лавинные блокирующие характеристики, низкие времена обратного восстановления (до 50 нс), низкие потери при работе на высоких частотах, широкая область безопасной работы.

SFRD-модули могут работать в качестве инверторных и снабберных диодов для мощных IGBT, шунтирующих диодов для индуктивных нагрузок, выходных выпрямителей



для источников бесперебойного питания, электросварки и других высокочастотных применений.

IGBT-МОДУЛИ

Одно из приоритетных направлений развития силовых полупроводниковых приборов в ОАО "Электровыпрямитель" – разработка и производство силовых модулей на основе биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT). За последние 10 лет предприятие разработало и освоило производство около 200 типов IGBT-модулей на ток от 25 до 3600 А и напряжение до 6500 В, выполненных по схемам одиночных ключей, чопперов, полумостов, инверторов (рис.4). В модулях предусмотрены защитные диоды обратного тока с "мягкими" характеристиками обратного восстановления. В основном эти приборы выпускаются в стандартных корпусах и предназначены для статических преобразователей частоты, используемых в различных областях применений.

IGBT-модули ОАО "Электровыпрямитель" являются близкими аналогами приборов известных фирм (Infineon/Еupes, Semicron, ABB, Mitsubishi Electric и др.) как по параметрам, так и по габаритным и присоединительным размерам, что обеспечивает им хорошую взаимозаменяемость с зарубежными аналогами.

Жесткая конкуренция на рынке силовых IGBT-модулей, в том числе и в России, заставляет искать новые технические решения, которые обеспечат предприятию устойчивую нишу в данной области. Возможность быстрой разработки и поставки нестандартных IGBT-модулей – важное для потребителей преимущество ОАО "Электровыпрямитель". Гибкость производственной линии, унификация конструкции модулей позволили в короткие сроки по индивидуальным заказам разработать более 20 новых типов IGBT-модулей нестандартного исполнения с максимальным использованием хорошо известных конструкций. В их числе – высоковольтные модули на напряжение 3300 и 6500 В в корпусах шириной 34 и 62 мм, а также модули, выполненные по нестандартным электрическим схемам.

В последние годы были созданы IGBT-модули для электроподвижного состава. Они имеют специальное исполнение и предназначены для эксплуатации в циклических режимах нагрузок, при низких отрицательных температурах, в условиях жестких механических воздействий. Для вспомогательных систем бортового питания электровозов и пассажирских поездов разработаны и эксплуатируются модули с напряжением изоляции более 15 кВ. Ведутся работы по созданию отечественных IGBT-модулей на напряжение 6500 В для тягового электропривода магистральных электровозов мощностью до 1200 кВт.

ОАО "Электровыпрямитель" разрабатывает IGBT на ток до 2000 А и напряжение до 2500 В в герметичных метал-



Рис.4. IGBT-модули с паяными и прижимными контактами

локерамических корпусах прижимной конструкции. Приборы имеют высокую энерготермоциклоустойчивость, повышенную устойчивость к механическим и климатическим воздействиям. Предназначены они для преобразовательных устройств электроэнергетики (гибких линий электропередач, компенсаторов реактивной мощности, активных фильтров), регулируемых мощных высоковольтных приводов переменного тока, городского, пригородного и железнодорожного электротранспорта, большегрузных карьерных самосвалов, подводных и надводных судов и других устройств с повышенными требованиями к надежности.



Рис.5. Серия охладителей с воздушной и жидкостной системами охлаждения

ОХЛАЖДАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА И СИЛОВЫЕ БЛОКИ

ОАО "Электровыпрямитель" в течение многих лет разрабатывает и производит высокоэффективные охлаждающие устройства для всех типов СПП (рис.5). Это разнообразные охладители с воздушной и жидкостной системами охлаждения для приборов штыревой и таблеточной конструкций с односторонним и двухсторонним охлаждением, с системами прижима и контроля усилий сжатия, крепежом, силовыми шинами и изоляционными элементами.

За разработку экструзионных охладителей из алюминиевых сплавов специалисты ОАО "Электровыпрямитель", ФГУП "ВЭИ" и НПО "БКМЗ" в 1985 году были удостоены премии Совета Министров СССР.

Из последних разработок следует отметить охладители, предназначенные для СПП большой мощности, которые позволяют создавать преобразователи мощностью до нескольких десятков мегаватт. Это воздушные охлаждающие системы типа О193 с тепловым сопротивлением $0,035^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$; жидкостные охладители типа ОМ209 ($R_{th}(ha) = 0,0085^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$) и др.

Совместно с Мордовским государственным университетом разрабатываются новые охладители на основе двухфазных термосифонов с воздушным охлаждением, которые перспективны для применения в преобразовательных моду-



Рис.6. Силовые блоки: управляемые и неуправляемые выпрямители, регуляторы переменного тока

лях системы передачи электрической энергии и высоковольтного электропривода.

Для диодно-тиристорных и IGBT-модулей разработаны и поставляются охладители – моноплиты типа О55 и О56 (аналоги охладителей Semikron и Fischer). Начаты поставки высокоэффективных широкопрофильных (300–600 мм) алюминиевых охладителей с запрессованными ребрами серии О57 с тепловыми сопротивлениями до $0,03^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$.

Предприятие выпускает изоляционные теплопроводящие элементы таблеточной конструкции на основе оксида и нитрида алюминия с низкими внутренними тепловыми сопротивлениями (до $0,07^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$), с напряжением изоляции 10 кВ. Они предназначены для электрической развязки между силовой схемой с таблеточными СПП и охлаждающими устройствами.

ОАО "Электровыпрямитель" поставляет заказные силовые блоки с использованием всей имеющейся на предприятии номенклатуры СПП и охладителей. Блоки проектируются и изготавливаются по стандартным схемам преобразования (выпрямители, инверторы, регуляторы переменного тока и пр.) на основе технических требований заказчиков. На рис.6 представлены примеры силовых блоков, изготовленных по конкретным заказам.

Блоки предназначены для устройств плавного пуска и управления скоростью вращения электродвигателей, регуляторов температуры и освещенности, компенсации реактивной мощности, электросварки, индукционного нагрева, гальваники, источников бесперебойного питания. Особенности силовых блоков: компактная конструкция, небольшая масса, изолированный охладитель, высокая плотность мощности на единицу объема, высокая надежность при работе в тяжелых режимах циклических нагрузок. По требованию заказчиков поставка силовых блоков производится в комплекте с вентиляторами, термодатчиками (в том числе с изоляцией термоэлемента 6 кВ), драйверами управления, устройствами защиты от перенапряжений, токов перегрузки и коротких замыканий.

ОАО "Электровыпрямитель" продолжает развивать силовую полупроводниковую элементную базу, создает новые приборы, отвечающие требованиям современной техники.

Это, прежде всего, мощные полностью управляемые полупроводниковые ключи – высоковольтные IGBT, IGCT, тиристоры с оптическим управлением и с функциями самозащиты, комплектные частотные диоды с мягким восстановлением и др.

Планируется также создание сверхмощных и супервысоковольтных диодов и тиристоров, рассчитанных на рабочий ток до 10 кА и напряжение до 12 кВ с повышенной эксплуатационной надежностью.

Новые приборы предназначены для отечественных энергетических проектов, научно-промышленного комплекса и инновационных экономических проектов.