Опыт и потенциальные возможности производства элементной базы силовой электроники для систем постоянного тока

Хапугин А.А., Бормотов А.Т.

06 ноября 2018 г. г. Москва

III Научно-практическая конференция
«ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ И РЕАЛИЗАЦИИ МЕЖДУНАРОДНЫХ ПРОЕКТОВ»

Основные данные о предприятии

Год основания: 1941

Место расположения: Республика Мордовия, г. Саранск (600 км от Москвы)

Области деятельности:

- разработка и производство силовых полупроводниковых приборов
- разработка и производство мощной преобразовательной техники

Производственный потенциал:

- 3 полупроводниковых цеха
- 3 цеха по производству силовых преобразователей
- заготовительное и вспомогательное производство
- производство технологической оснастки
- цех по производству трансформаторов
- линейный ускоритель электронов для регулировки параметров приборов
- аккредитованный испытательный центр
- приемка продукции с участием заводской инспекции ОАО «РЖД», ВП МО РФ
- лицензия на право производства оборудования для ядерных установок

Научно-технический потенциал:

- Научно-инженерный центр силовых полупроводниковых приборов
- Научно-инженерный центр преобразовательной техники

Полный технологический цикл производства биполярных приборов и модулей

Шлифовка кремниевых дисков свободным абразивом

Преддиффузионная очистка пластин кремния в парах смеси кислот

Термическое оборудование для проведения высокотемпературных процессов диффузии и окисления кремния

Высокотемпературное сплавление кремниевых кристаллов с молибденовыми термокомпенсаторами

Напыление алюминиевой металлизации на катодную поверхность полупроводниковых элементов

Вжигание металлизации полупроводниковых элементов

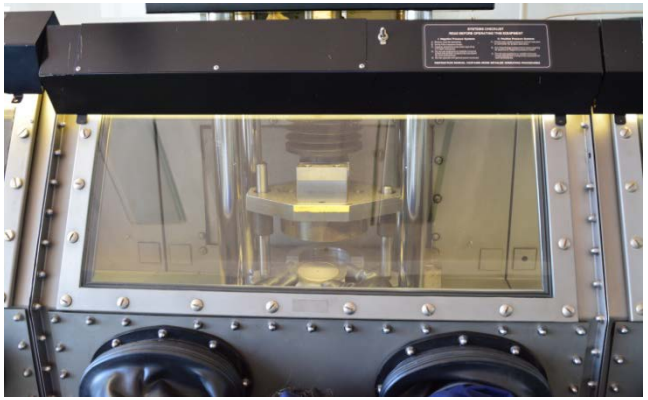
Полный технологический цикл производства биполярных приборов и модулей

Формирование фаски на полупроводниковых элементах методом пескоструйной обработки

Кислотное травление и отмывка фаски на полупроводниковых элементах

Защита фаски полупроводниковых элементов кремнийорганическим компаундом

Облучение полупроводниковых элементов
на линейном ускорителе электронов

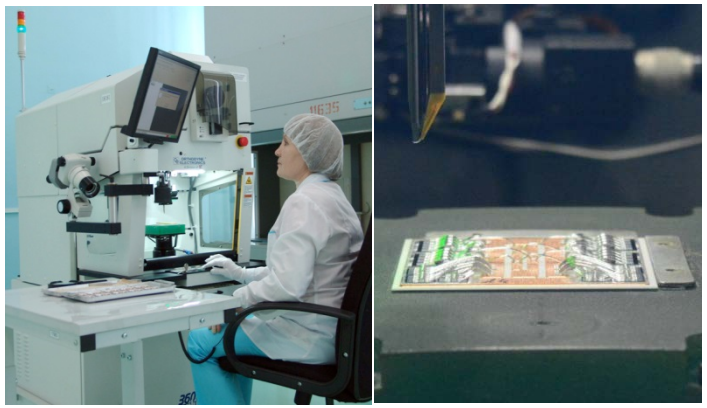


Герметизация СПП в среде азота
методом холодной сварки

Технологический цикл производства IGBT модулей

Сборка блоков плат с чипами

Бесфлюсовая вакуумная пайка



Ультразвуковая сварка алюминиевых выводов

Ультразвуковая сварка силовых выводов

Дозированная заливка защитными композициями

Финишная заливка эпоксидными компаундами

Собственное производство деталей и комплектующих для СПП и модулей

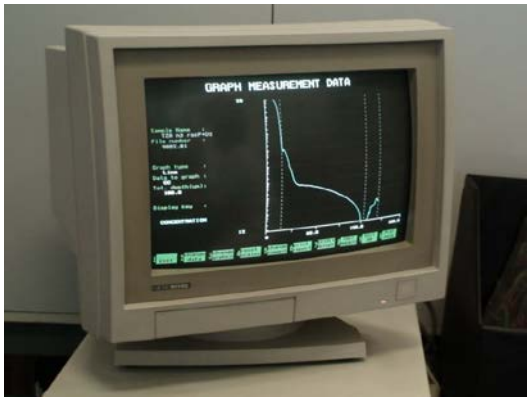
Цех термопластавтоматов
для изготовления пластмассовых деталей
модулей

Металлообрабатывающий цех для
изготовления металлических деталей

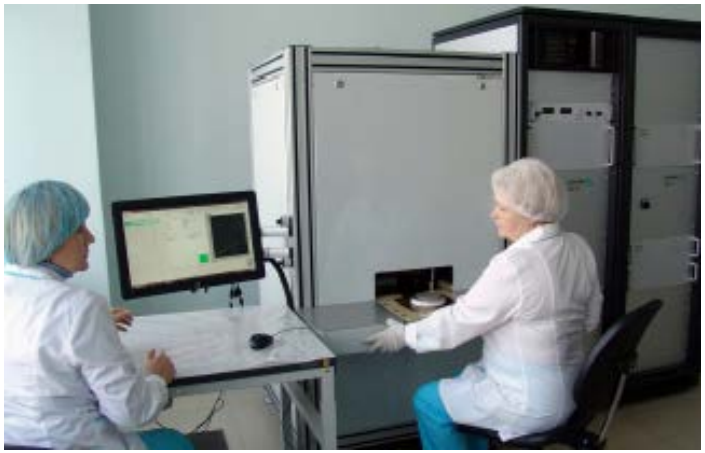
Межоперационный контроль в производстве тиристоров

Особое внимание в процессе производства тиристоров уделяется:

- **воспроизводимости концентрационного профиля распределения легирующих примесей;**
- **распределению времени жизни неосновных носителей заряда;**
- **геометрическому профилю фаски полупроводниковых элементов;**
- **качеству соединительного слоя между кремниевым кристаллом и молибденовым термокомпенсатором**



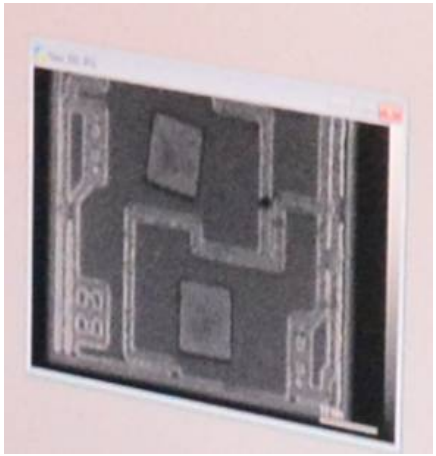
Установка измерения концентрационных профилей методом растекания



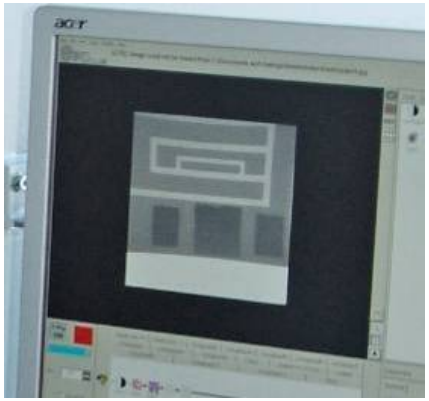
Стенд для испытаний статических и динамических параметров тиристоров

Межоперационный контроль в производстве СПП и модулей

Ультразвуковое сканирование для выявления скрытых дефектов



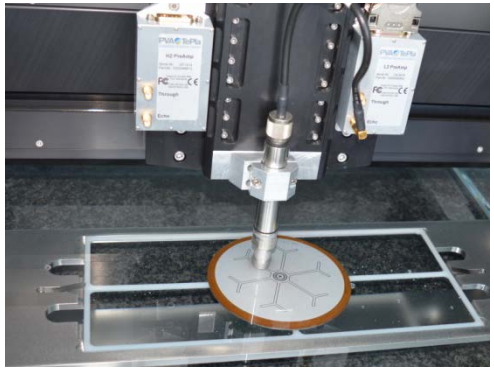
Контроль геометрии поверхности с помощью лазерного бесконтактного профилометра



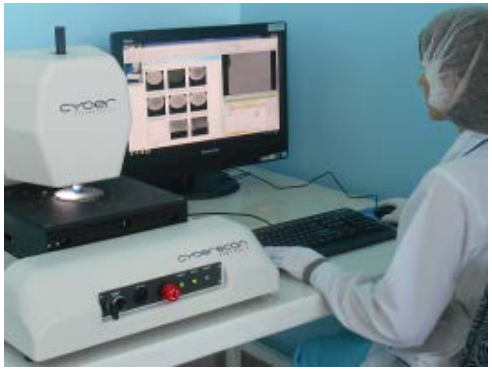
100-процентный рентгеновский контроль качества пайки

Межоперационный контроль в технологическом процессе производства силовых полупроводниковых приборов

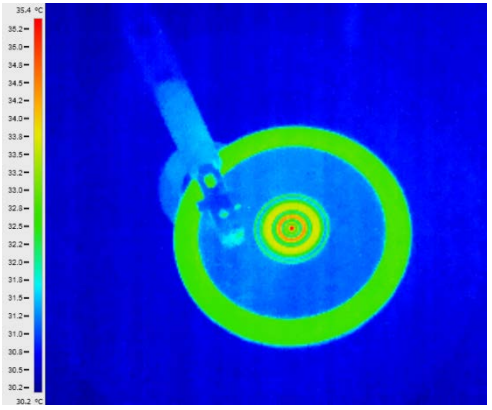
Инфракрасная тепловизионная камера



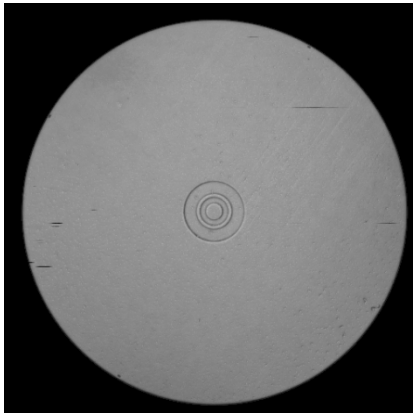
Акустический сканирующий микроскоп



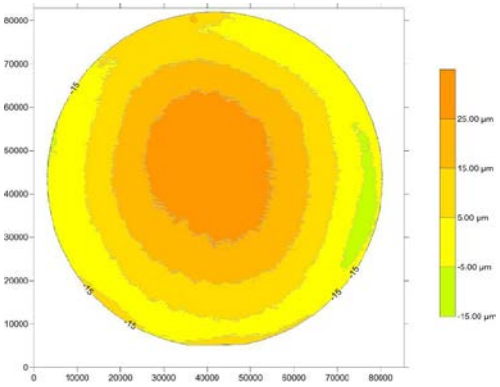
Лазерный сканирующий профилометр



Контроль «горячих» точек



Контроль качества границ раздела материалов



Контроль профилей поверхности

Современная испытательная база

Измерения параметров и характеристик диодов, тиристоров, фототиристоров в области прямых токов до 15000 А и блокирующих напряжений до 13 кВ

Импульсные испытания на токи в области субмиллисекундной длительности до 500 кА, напряжение до 5 кВ

Испытательная база IGBT модулей

Измерение статических параметров на автоматизированном комплексе “Lem”

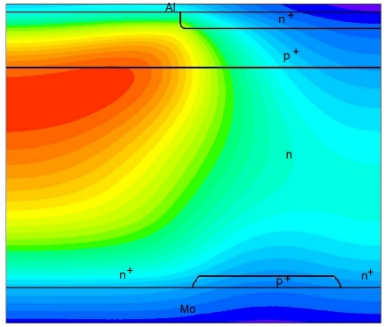
Измерение динамических параметров на установке “TRd 2030” Lemsys

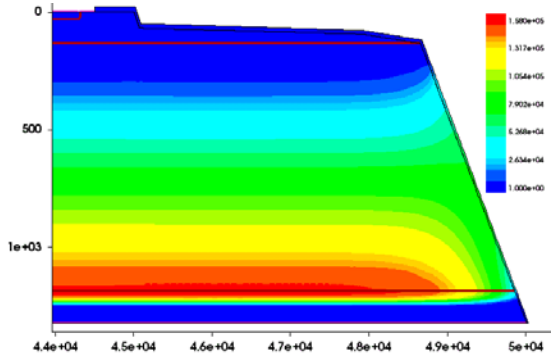
Сертифицированный испытательный центр, для проведения климатических, механических и надежностных испытаний

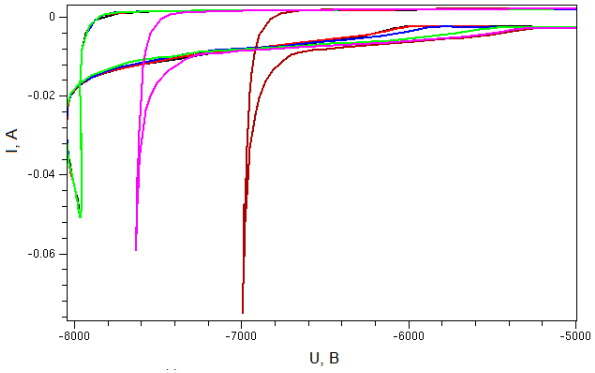
Возможности проектирования новых приборов

- Дизайн центр с вычисленным HPC кластером с производительностью 700 ГФЛОП
- Ускорение процесса разработки новых изделий
- Опыт использования программных комплексов более 10 лет

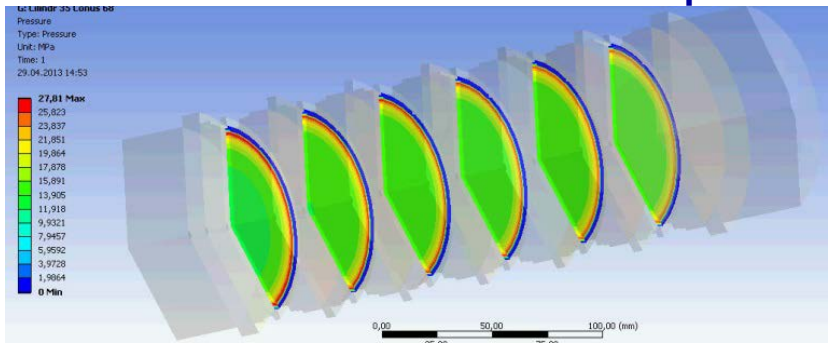
Постоянная лицензия TCAD Synopsys

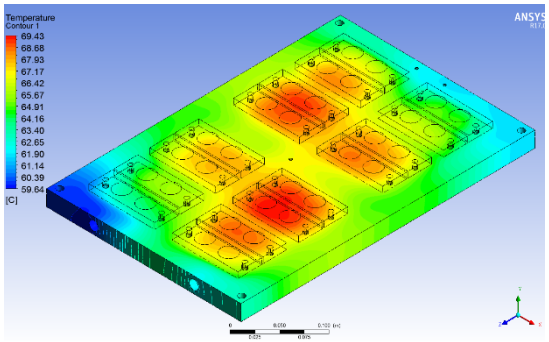






Постоянная лицензия ANSYS

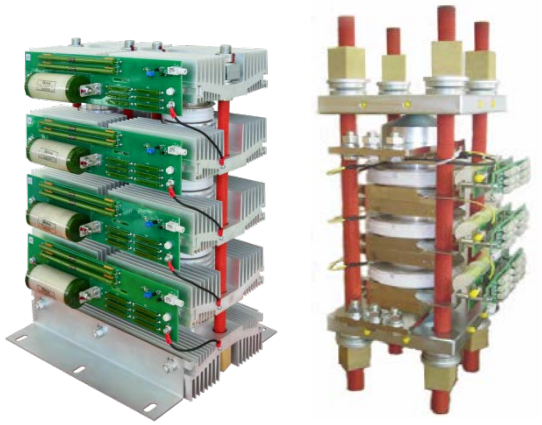




ВСЯ ВЫПУСКАЕМАЯ ПРОДУКЦИЯ РАЗРАБОТАНА СПЕЦИАЛИСТАМИ НАУЧНО-ИНЖЕНЕРНОГО ЦЕНТРА ПРЕДПРИЯТИЯ

Направления деятельности ПАО «Электровыпрямитель»

СИЛОВЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ:
- около 1500 типов приборов и модулей;
- токи от 10 до 10 000 А;
- напряжения от 100 до 10 000 В



СИЛОВЫЕ БЛОКИ:
- выпрямители (32÷32 000 А / 0,1÷10 кВ);
- ключи переменного тока (100÷5 000 А / 0,4÷6,3 кВ);
- импульсные коммутаторы (2,5÷250 кА / 1÷25 кВ);
- инверторы;
- блоки по техническим требованиям Заказчика

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ:
- выпрямители для плавки гололеда;
- преобразователь переменного напряжения для фазоповоротного устройства;
- компенсаторы реактивной мощности;
- многоуровневый активный фильтр высших гармоник

Области применения мощных силовых полупроводниковых приборов

Вставки постоянного тока HVDC

Тяговый электропривод электрифицированного транспорта

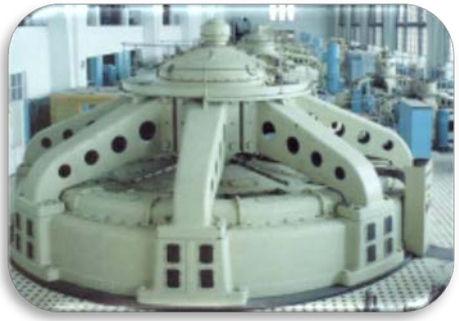
Статические тиристорные компенсаторы SVC

Электропривод, плавный пуск

Альтернативная энергетика

Нефте- и газодобывающая отрасль

Выпрямители для плавки гололёда



Системы возбуждения электрических машин

Диоды и тиристоры

Фототиристоры низкочастотные

Ток 790 - 2500 А
Напряжение 6000 - 7600 В

Двунаправленные тиристоры

Ток 1600 - 2000 А
Напряжение 4200 – 6500 В

Тиристоры низкочастотные

Ток 175 - 6900 А
Напряжение 200 - 10000 В

Быстродействующие тиристоры

Ток 300 - 3200 А
Напряжение 300 - 3000 В

Выпрямительные диоды

Ток 240 - 10000 А
Напряжение 200 - 10000 В

Диоды и тиристоры штыревой конструкции

Ток 100 - 400 А
Напряжение 400 - 4400 В

Роторные диоды и тиристоры

Ток 160 - 630 А
Напряжение 1600 - 2800 В

Диоды, тиристоры, симисторы МГС

Ток 10 - 80 А
Напряжение 100 - 1600 В

Высоковольтные низкочастотные тиристоры

ОСОБЕННОСТИ

- низкие статические и динамические потери;
- минимальные разбросы Q_{RR} V_{TM} для параллельных и последовательных соединений;
- внутреннее усиление сигнала управления, разветвленный управляющий электрод для быстрого и однородного включения;
- таблеточная конструкция

ПРИМЕНЕНИЕ

Вставки постоянного тока HVDC

Статические тиристорные компенсаторы SVC

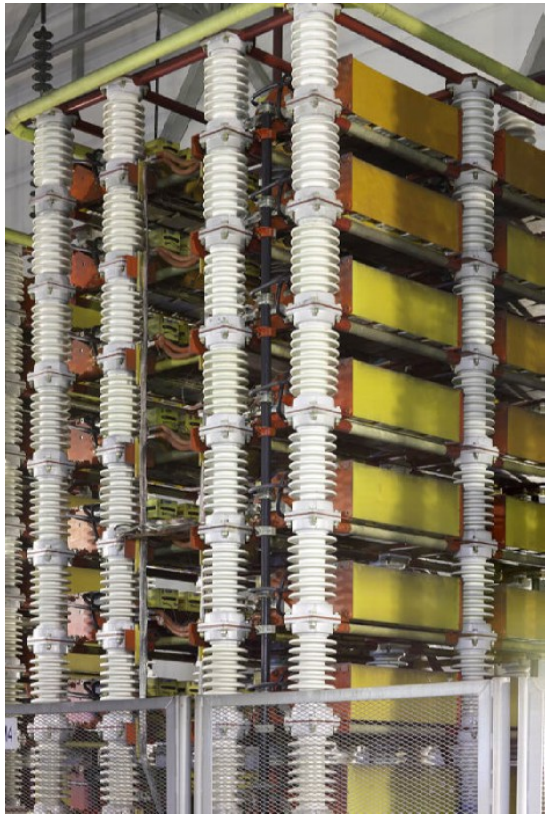
Выпрямители для плавки гололёда

Фазо-поворотные устройства FACTS

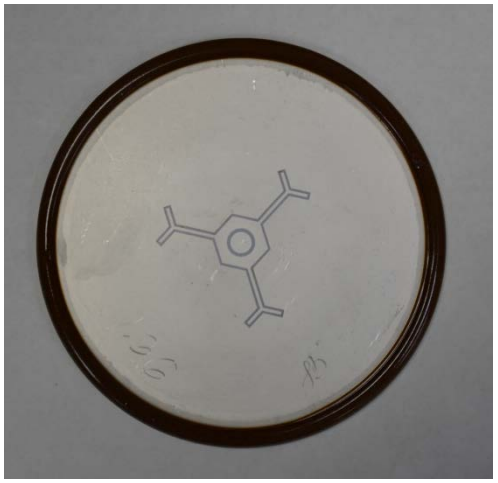
Приборы для высоковольтных тиристорных вентилей вставки постоянного тока

Т-630
∅50 мм; 630 А; 2700 В

1981



Т273-1250
∅76 мм; 1250 А; 4200 В

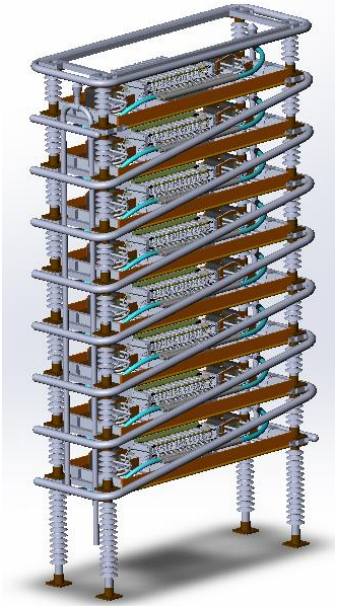


1991

Опыт эксплуатации тиристоров Т-630 и Т273-1250 в составе высоковольтных тиристорных вентилей Выборгской вставки постоянного тока показал высокую эксплуатационную надежность и подтвердил высокий уровень качества конструкции и технологии изготовления тиристоров производства завода «Электровыпрямитель»

Новый тиристор для применения в модернизируемых высоковольтных тиристорных вентилях Выборской вставки постоянного тока

Структура силовой схемы блока вентилей должна гарантировать требуемую надежность при максимальном использовании приборов по току и напряжению



2017

Применение тиристоров Т283-1600-60 позволит в 1,5 раза сократить количество последовательно соединенных приборов в блоке по сравнению с действующей конструкцией, снизить максимальную температуру p-n-перехода до 90°С и повысить эксплуатационную надежность вентиля

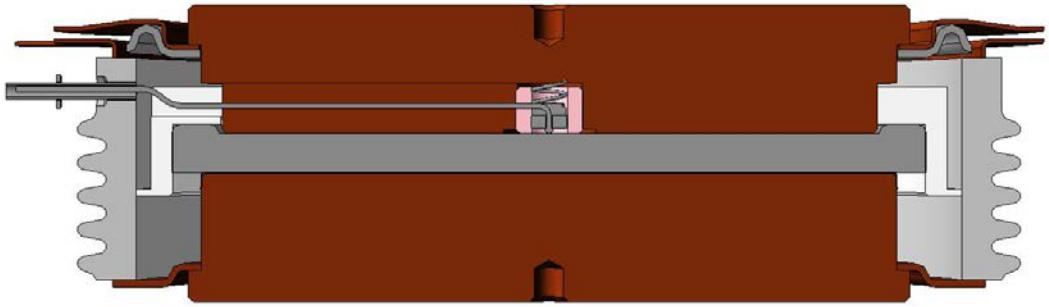
Новые тиристоры для применения в модернизируемых высоковольтных тиристорных вентилях

Наименование параметра	Т473-1250	Т283-1600
Повторяющееся блокирующее напряжение, В	4800	6000
Средний ток в открытом состоянии, А	1254 (85°С)	1670 (85°С)
Ударный ток в режиме ЛЭП, кА	22	28
Критическая скорость нарастания напряжения в закрытом состоянии, В/мкс	2500	2500
Время выключения, мкс	400	400
Заряд обратного восстановления, мкКл	2000	3500
Критическая скорость нарастания тока в открытом состоянии, А/мкс	200	200
Тепловое сопротивление переход-корпус, °С/Вт	0,0114	0,077
Максимально допустимая температура перехода, °С	125	125

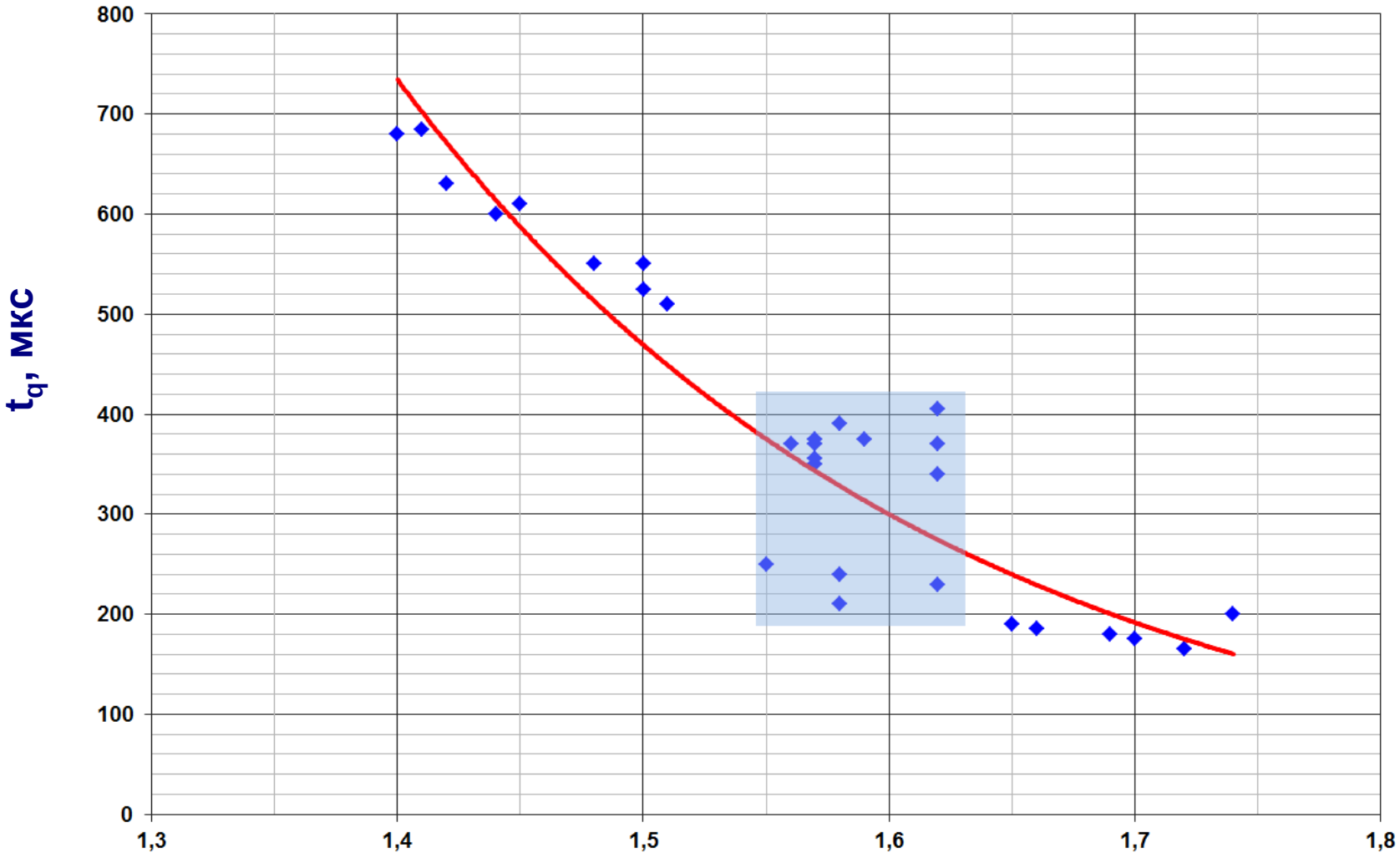
Новые тиристоры для применения в модернизируемых высоковольтных тиристорных вентилях

ОСОБЕННОСТИ

- низкие статические и динамические потери;
- минимальный разброс Q_{RR} для последовательных соединений;
- низкие времена выключения;
- устойчивость к лавинным перегрузкам;
- внутреннее усиление сигнала управления;
- разветвленный управляющий электрод для быстрого и однородного включения;
- таблеточная конструкция;
- металлокерамический корпус с термодинамической устойчивостью



Время выключения/прямые падения напряжения

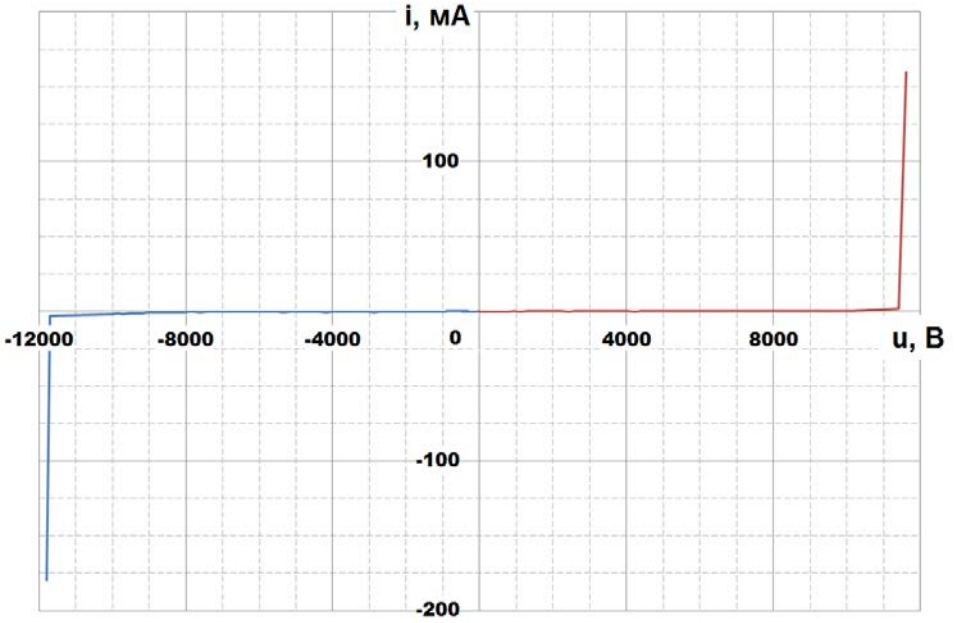


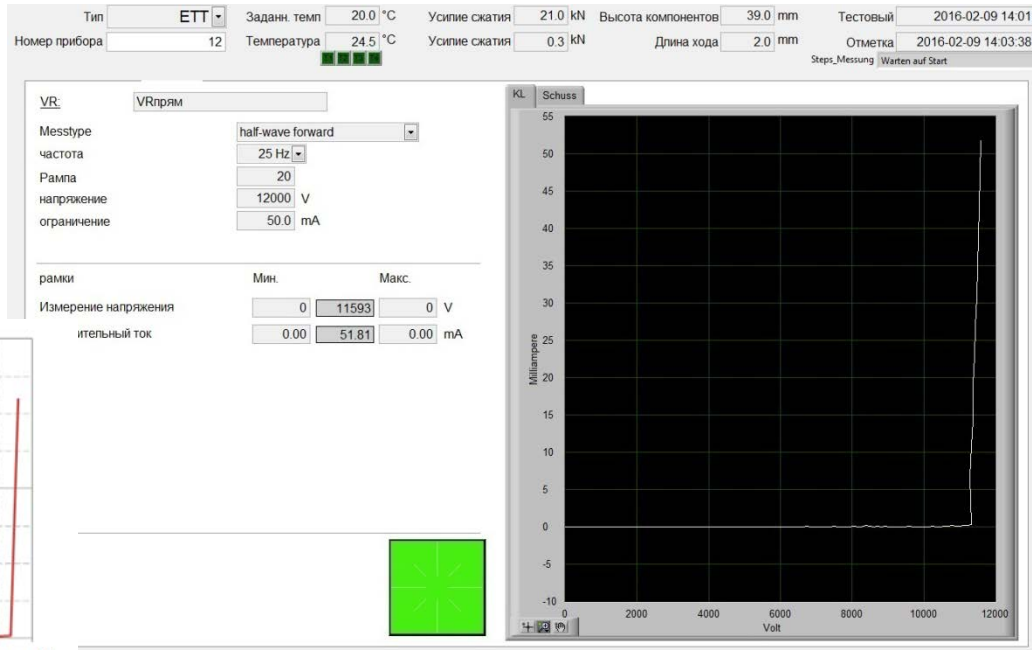
Взаимосвязь времени выключения и напряжения в включенном состоянии высоковольтного тиристора Т283-1600-60

Тиристор Т253-630 на напряжение 10 000 В

Повторяющееся импульсное блокирующее напряжение, В	10000
Средний ток в открытом состоянии, А	690
Ударный неповторяющийся ток в открытом состоянии, кА	12
Критическая скорость нарастания напряжения в закрытом состоянии, В/мкс	1000
Время выключения, мкс	1000
Тепловое сопротивление переход-корпус, °С/Вт	0,021
Максимально допустимая температура перехода, °С	+125

Тиристор Т253-630 на напряжение 10 000 В





Блокирующая ВАХ тиристора Т253-630-100
(вид диалогового окна испытательного комплекса с изображением прямой ветви блокирующей ВАХ)

Тиристор Т1103-2500 на напряжение 8 500 В

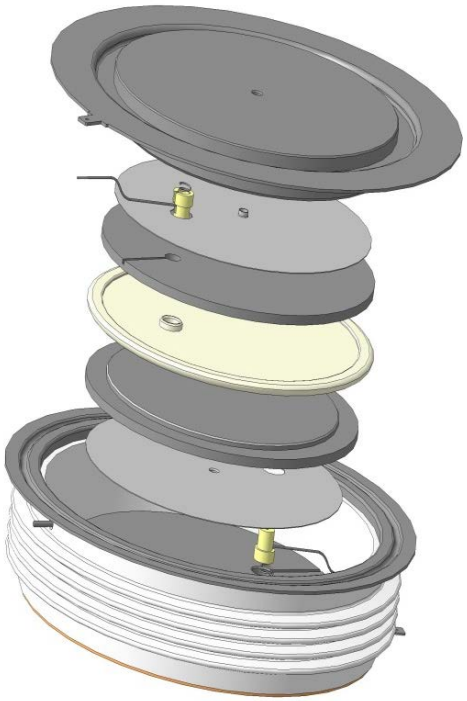
Повторяющееся импульсное блокирующее напряжение, В	8500
Средний ток в открытом состоянии, А	2160
Ударный неповторяющийся ток в открытом состоянии, кА	65
Критическая скорость нарастания напряжения в закрытом состоянии, В/мкс	2000
Максимально допустимая рабочая температура, °С	+90

Низкочастотные фототиристоры

ПРЕИМУЩЕСТВА:

- токи в открытом состоянии 630÷2500 А;
- рабочие напряжения 6000÷7600 В;
- прямое управление импульсами света инфракрасного диапазона по оптоволоконному кабелю на расстоянии до 1000 м;
- точный временной контроль включения группы приборов;
- высоковольтная гальваническая развязка между силовой цепью и схемой управления ;
- высокая помехоустойчивость
- встроенная функция самозащиты

Двунаправленные тиристоры



ОСОБЕННОСТИ:

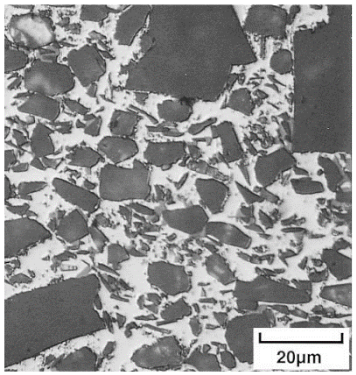
- токи в открытом состоянии 1600÷2000 А;
- повторяющееся напряжение 4000÷6500 В;
- два тиристора, включенных встречно-параллельно и интегрированных в одну полупроводниковую структуру;
- изолированное управление (два управляющих и вспомогательных вывода);
- оптимальная топология кремниевой структуры;
- полностью прижимная конструкция таблеточного исполнения;

Дальнейшее развитие биполярных силовых полупроводниковых приборов

- повышение коммутируемой мощности единичным прибором;
- уменьшение массогабаритных параметров прибора;
- расширение функциональных возможностей прибора;
- повышение надежностных характеристик прибора;
- снижение стоимости прибора

Новый композиционный материал для замены молибденовых термокомпенсаторов в силовых полупроводниковых приборах AlSiC

AlSiC – металломатричная композиция, состоящая из частиц карбида кремния и алюминиевого сплава Высокоэффективные материалы AlSiC совмещают в себе прекрасную теплопроводность и управляемое тепловое расширение. Обладают низкой плотностью и высокой прочностью. Свойства AlSiC соответствуют высоким требованиям к эксплуатационным характеристикам современных систем силовых полупроводниковых приборов



ТКР = $5{,}8 \times 10^{-4}$/K

Mo, масса 800 г

ТКР = $5{,}97 \times 10^{-4}$/K

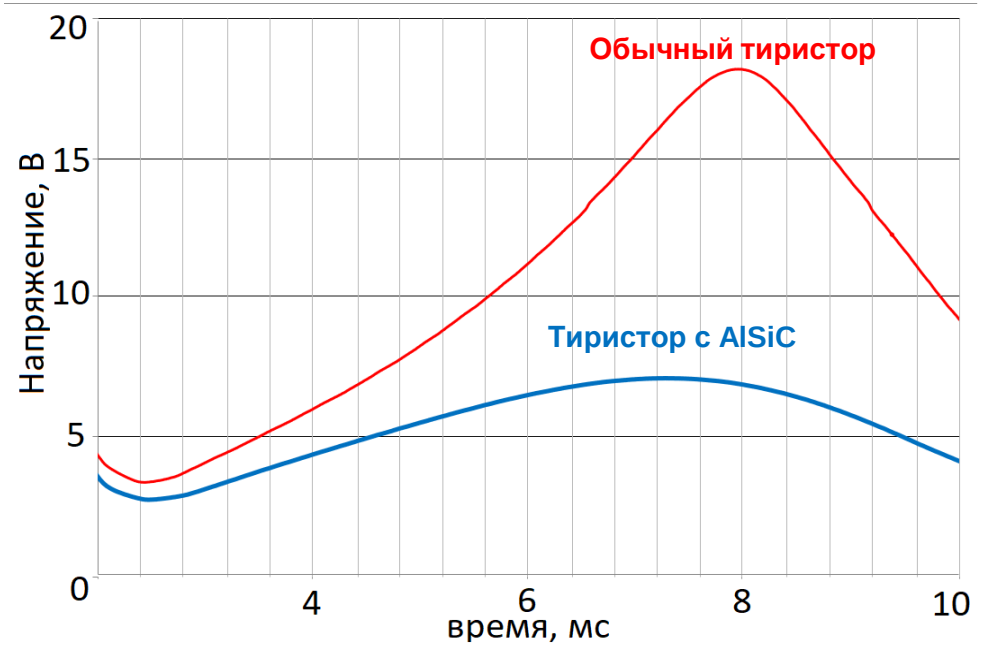
AlSiC, масса 240 г

Процесс низкотемпературного спекания

Низкотемпературное спекание – метод создания тел из порошков. Основан на диффузии атомов. Нагретые до температуры ниже точки плавления, атомы в частицах порошка диффундируют через границы частиц, связывая частицы и образуя твердое тело.

Порошок серебра спекается при T>190°C (типичная температура 250°C) при низком давлении.

Объединение технологий: AlSiC + низкотемпературное спекание

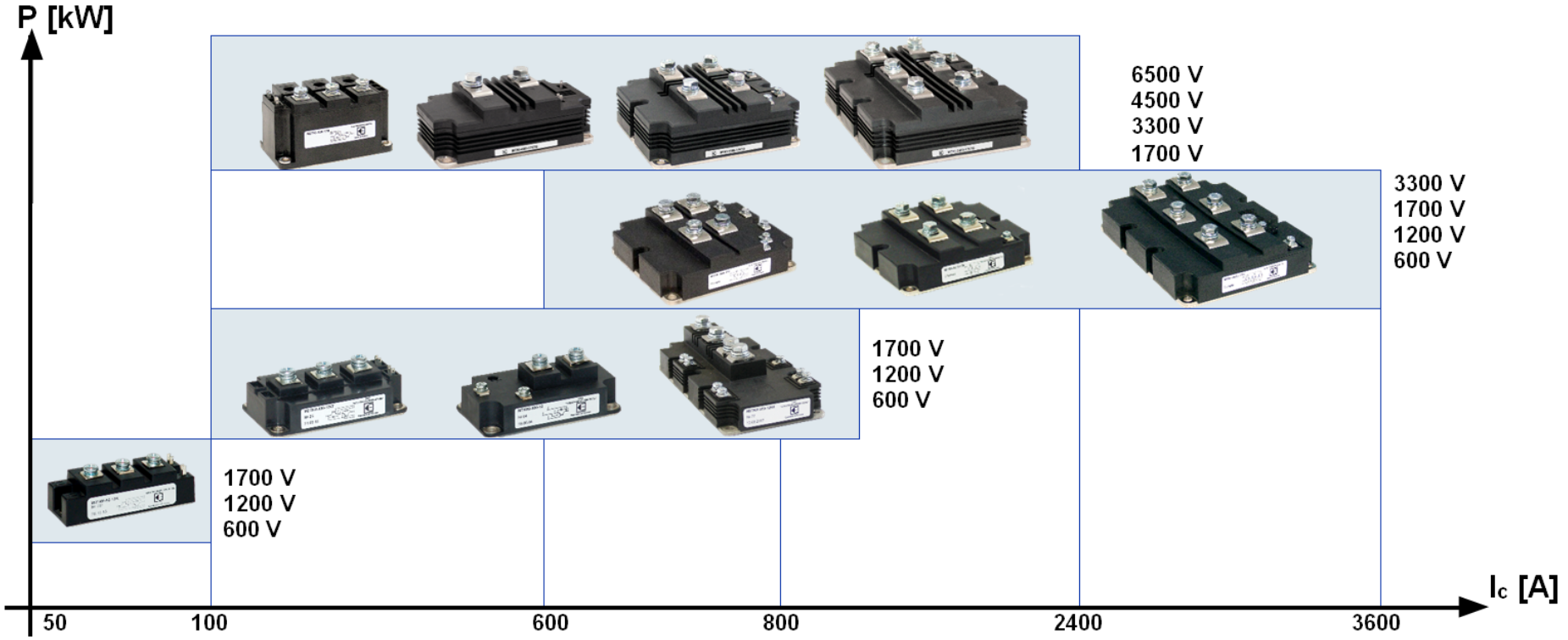


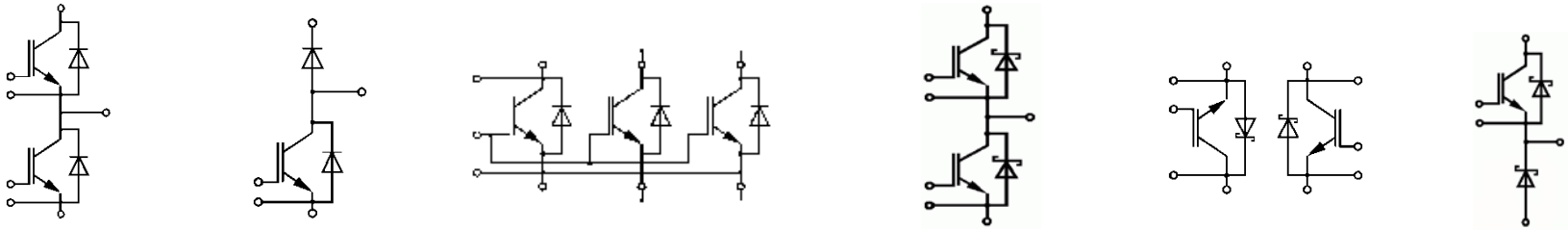
Результаты сравнения обычного тиристора и тиристора со спеченным термокомпенсатором из AlSiC при воздействии ударного тока 21кА

20-летний опыт производства IGBT модулей

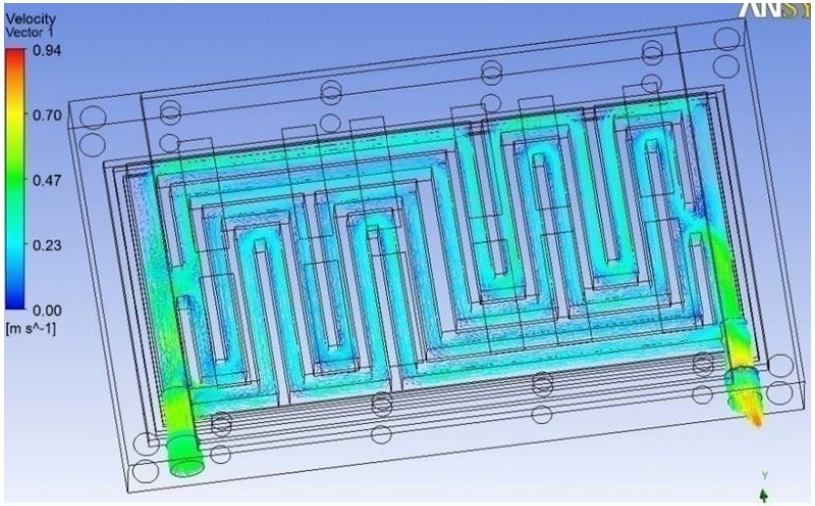
- 14 типов корпусов
- стандартное и циклостойкое исполнение
- более 400 типов серийно выпускаемых IGBT и SFRD модулей

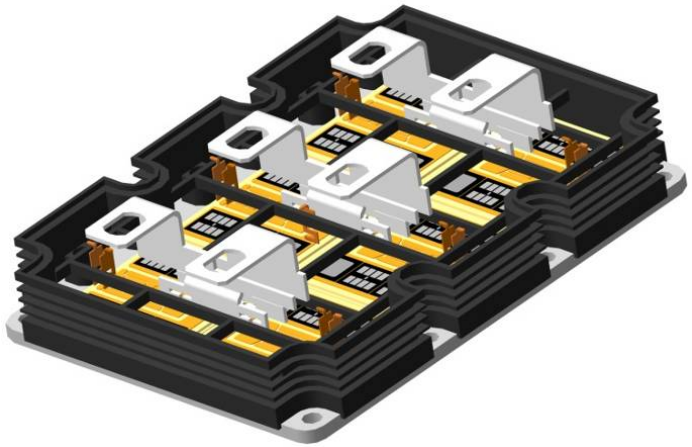
IGBT модули
Варианты конструктивных исполнений и схем

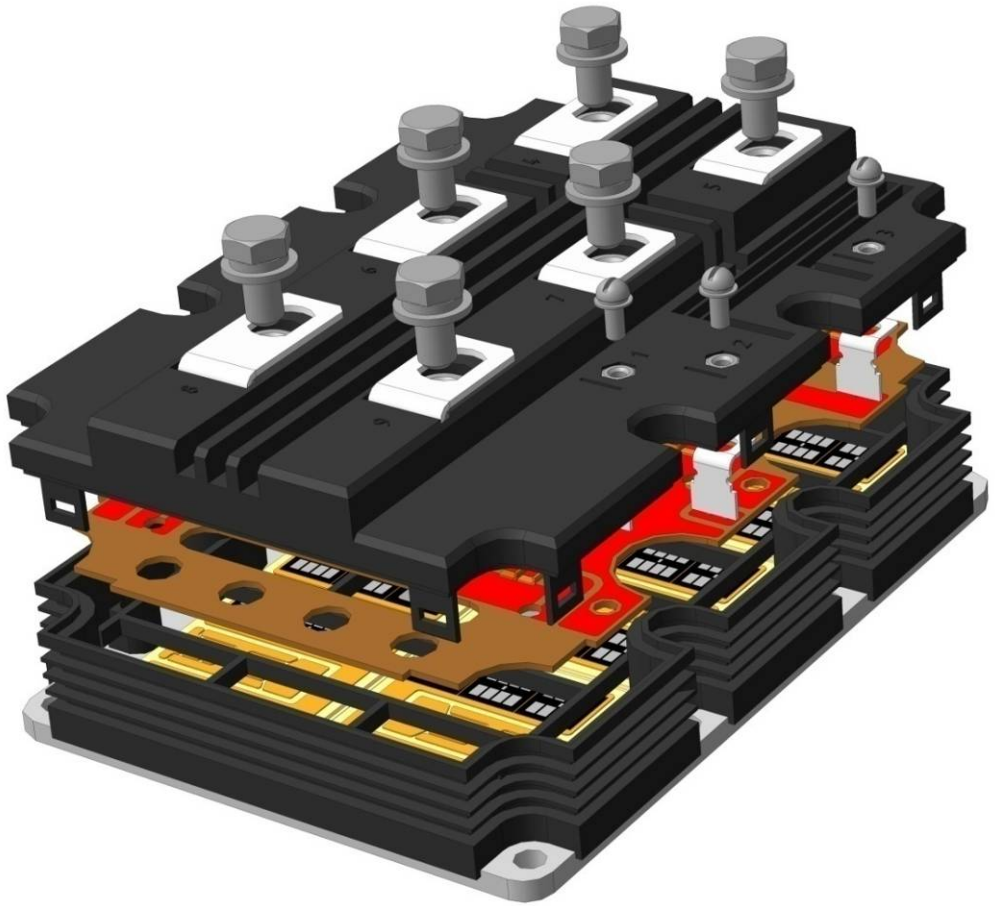




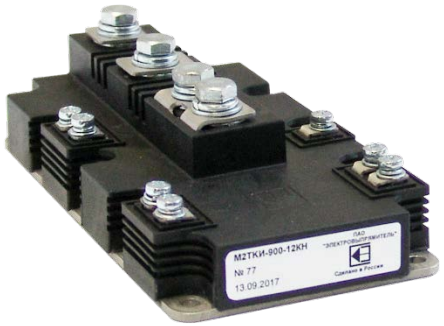
3D-моделирование конструкции и эксплуатационных режимов модулей







2018 г. Серийное производство IGBT модулей на напряжение до 1700 В, ток до 900 А с датчиком температуры



Корпус MI14 (89x172 мм)

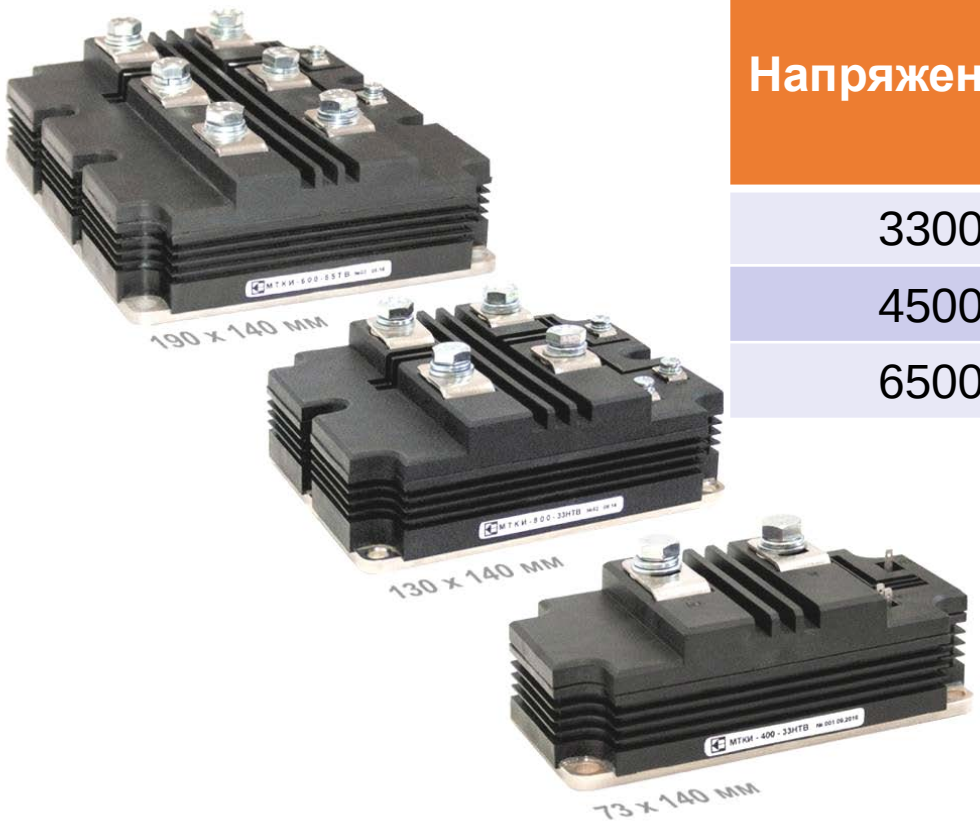
Напряжение, В	Ток, А		
1200	450	600	900
1700	450	650	

2019 г. Новая разработка IGBT модулей на напряжение до 1700 В, ток до 1400 А с датчиком температуры

Корпус MI15 (89x250 мм)

Напряжение, В	Ток, А	
1200	1400	
1700	1000	1400

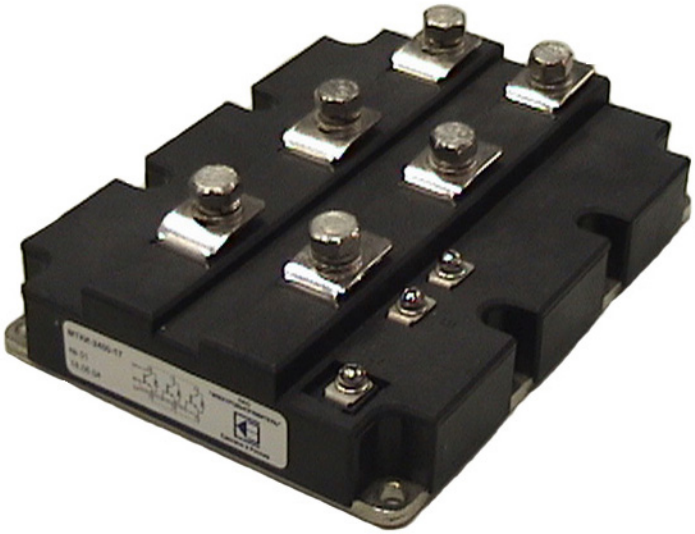
Серийное производство IGBT модулей на напряжение 3300, 4500, 6500 В, ток до 1500 А



Напряжение, В	Ток, А		
	73x140 мм	130x140 мм	140x190 мм
3300	500	1000	1500
4500	400	800	1200
6500	250	500	750

Напряжение изоляции 10,2 кВ (эфф.)

IGBT модули
на токи до 1500 А, напряжение 3300 В
для модульного многоуровневого активного фильтра высших гармоник

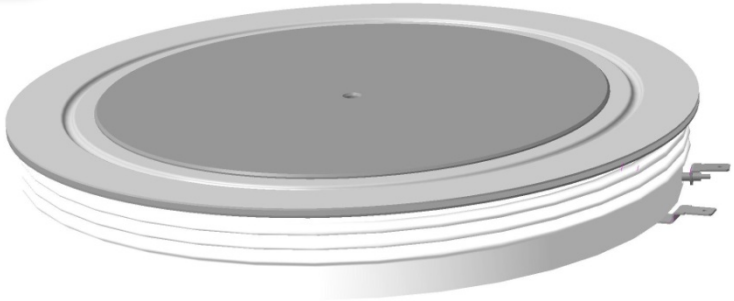


Корпус MI8
(140x190 мм)

2018 г. Серийное производство модуля **МТКИ-1200-33Н** на ток 1200 А

2019 г. Серийное производство **МТКИ-1500-33К** на ток 1500 А с увеличенной плотностью тока и сниженными статическими потерями

Разработка PressPack IGBT
2019 – 2020 г.



Напряжение, В	Ток, А	Фланец Ø/ Контакт Ø/ Высота (мм)	Конфигурация
4500	1200	170/125/26,5	IGBT+FWD (1:1)
4500	1600	170/125/26,5	IGBT+FWD (2:1)

Система менеджмента качества

Система менеджмента качества сертифицирована применительно к разработке и производству силовых полупроводниковых приборов

СИСТЕМА СЕРТИФИКАЦИИ ГОСТ Р

РЕГИСТР СИСТЕМ КАЧЕСТВА
ОРГАН ПО СЕРТИФИКАЦИИ СИСТЕМ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА
ФБУ «МОРДОВСКИЙ ЦСМ»
Российская Федерация, 430027, г.Саранск, ул.А.Невского, 64
№ РОСС RU.0001.13ИК78

К № 27886

СЕРТИФИКАТ СООТВЕТСТВИЯ
Выпуск 4. СМК сертифицирована с мая 2006 г
выдан Открытому акционерному обществу «Электровыпрямитель»
Российская Федерация, 430001, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Пролетарская, д.126

НАСТОЯЩИЙ СЕРТИФИКАТ УДОСТОВЕРЯЕТ:
система менеджмента качества применительно к разработке, производству и поставке элементов тиристоров и диодов, силовых полупроводниковых приборов, интегрированных силовых модулей, сборок и преобразователей электроэнергии на их основе

СООТВЕТСТВУЕТ ТРЕБОВАНИЯМ
ГОСТ ISO 9001-2011 (ISO 9001:2008)

Регистрационный № РОСС RU.ИК78. К00109
Дата регистрации 25.08.2015 Срок действия до 25.08.2018

Руководитель органа по сертификации систем менеджмента качества С.И.Мунтанилов

Председатель комиссии Т.В.Ефимова

Учетный номер Регистра систем качества № 24357

СЕРТИФИКАТ

настоящим удостоверяет, что предприятие

Открытое акционерное общество «Электровыпрямитель» (ОАО «Электровыпрямитель»)
ул. Пролетарская, д. 126
430001 г. Саранск
Республика Мордовия
Российская Федерация

в перечисленных в приложении территориальных подразделениях внедрило и использует
Систему Менеджмента Качества.

Область деятельности:
Разработка, производство и поставка элементов тиристоров и диодов, силовых полупроводниковых приборов, интегрированных силовых модулей и сборок на их основе

Посредством аудиторской проверки, задокументированной в отчете, было получено подтверждение о том, что эта система менеджмента отвечает требованиям следующего стандарта:

ISO 9001 : 2008

Регистрационный номер сертификата 508340 QM08
Действителен с 2015-09-23
Действителен до 2018-09-14
Дата сертификации 2015-09-23

DAkkS
Deutsche Akkreditierungsstelle D-ZM-16074-01-00

DQS GmbH
G. Blechschmidt
Генеральный директор

Accredited Body: DQS GmbH, August-Schanz-Straße 21, 60433 Frankfurt am Main
Administrative Office: ООО ВЭЦ-ДЕКЦЕВ, Ресрубликанская ст. 3, 100003 Ташкент, Russian Federation 1 / 2

IQNet
THE INTERNATIONAL CERTIFICATION NETWORK
CERTIFICATE

IQNet and
DQS GmbH Deutsche Gesellschaft zur Zertifizierung von Managementsystemen
hereby certify that the company

JSC Electrovipryamitel
Proletarskaya Str., 126
430001 Saransk
Rep. Mordovia
Russian Federation

with the organizational units/sites as listed in the annex
has implemented and maintains a Quality Management System.

Scope:
The development, production and delivery of thyristors and diodes elements, power semiconductor devices, integrated power modules and assemblage bulits around them

Through an audit, documented in a report, it was verified that the management system fulfills the requirements of the following standard:

ISO 9001 : 2008

Valid from 2015-09-23
Valid until 2018-09-14
Date of certification 2015-09-23

Registration number: DE-508340 QM08

Michael Drechsel
President of IQNet

Götz Blechschmidt
Managing Director of DQS GmbH

IQNet Partners*:
AENOR Spain AFNOR Certification France AIB-Vinçotte International Belgium APCER Portugal CCC Cyprus CISQ Italy CQC China CQM China CQS Czech Republic Cro Cert Croatia DQS Holding GmbH Germany FCAV Brazil FONDONORMA Venezuela ICONTEC Colombia MNC Mexico Inspecta Certification Finland INTECO Costa Rica IRAM Argentina JQA Japan KFQ Korea MIRTEC Greece MSZT Hungary Nemko AS Norway NSAI Ireland PCBC Poland Quality Austria Austria RR Russia SIGE Mexico SII Israel SIQ Slovenia SIRIM QAS International Malaysia SQS Switzerland SRAC Romania TEST St Petersburg Russia TSE Turkey TUGS Serbia
IQNet is represented in the USA by: AFNOR Certification, CISQ, DQS Holding GmbH and NSAI Inc.
* The list of IQNet partners is valid at the time of issue of this certificate. Updated information is available under www.iqnet-certification.com

ФСВТС РОССИИ, РОССТАНДАРТ,
ГОСКОРПОРАЦИЯ «РОСАТОМ», РСПП,
АНО «ВОЕННЫЙ РЕГИСТР»
СИСТЕМА ДОБРОВОЛЬНОЙ СЕРТИФИКАЦИИ «ВОЕННЫЙ РЕГИСТР»
Свидетельство № РОСС RU.0547.04ГЦ001

Орган по сертификации систем менеджмента качества
(наименование органа по сертификации)
ООО «Московская Радиоэлектронная Компания»
(129344, г. Москва, ул. Искры, д. 31, корп. 1, № ВР АА 1.22.0054-2015)
(адрес, № аккредитации сертификации)

СЕРТИФИКАТ СООТВЕТСТВИЯ
№ ВР 22.1.10158-2016

Срок действия с 03.08.2016 г. по 03.08.2019 г.

Выдан Открытому акционерному обществу «Электровыпрямитель»
(полное наименование организации)
(430001, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Пролетарская, д. 126)
(адрес)

удостоверяет, что система менеджмента качества, распространяющаяся на разработку и производство изделий:
коды ЕКПС 5961, 4130
классов, видов и типов, приведенных в Приложениях
(неотъемлемая часть настоящего Сертификата)

СООТВЕТСТВУЕТ ТРЕБОВАНИЯМ
ГОСТ РВ 0015-002-2012 и РД В 319.015-2006

Руководитель Органа по сертификации систем менеджмента качества
(подпись) Н.С. Хуснуллина
(подпись, фамилия)

№ 120421

СТАНДАРТ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ
Система добровольной сертификации «Р-Стандарт»
№ РОСС RU.31106.04ЖКПО
Орган по сертификации систем менеджмента
ООО ССУ «ДЭКУЭС»
РОСС RU.31106.04ЖКПО.001
СЕРТИФИКАТ СООТВЕТСТВИЯ
Выдан
Открытому акционерному обществу «Электровыпрямитель»
(ОАО «Электровыпрямитель»)
430001, Российская Федерация, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Пролетарская, д. 126

НАСТОЯЩИЙ СЕРТИФИКАТ УДОСТОВЕРЯЕТ:
система менеджмента качества применительно к разработке, производству и поставке элементов тиристоров и диодов, силовых полупроводниковых приборов, интегрированных силовых модулей и сборок на их основе

СООТВЕТСТВУЕТ ТРЕБОВАНИЯМ
ГОСТ ISO 9001-2011 (ISO 9001:2008)

Регистрационный номер РС 000639
Дата регистрации 23.09.2015 Срок действия до 14.09.2018

Руководитель органа по сертификации М.Ю. Залунаев

СТАНДАРТ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ЭКОЛОГИЧЕСКОМУ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ И АТОМНОМУ НАДЗОРУ

ЛИЦЕНЗИЯ

Регистрационный номер ВО-12-101-2549 от 24 декабря 2012 года

Лицензия выдана Открытому акционерному обществу «Электровыпрямитель»

Юридический адрес лицензиата: 430001, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Пролетарская, 126

Лицензия дает право на изготовление оборудования для ядерных установок

Объект, на котором и/или в отношении которого проводится лицензируемая деятельность: атомные станции

Основание для выдачи лицензии: заявление Открытого акционерного общества «Электровыпрямитель» от 09.07.2012 № 11/230-242, решение заместителя руководителя Волжского МТУ по надзору за ЯРБ Ростехнадзора от 20.12.2012 № В.Л-3365

Срок действия лицензии до 24 декабря 2017 года

Лицензия действует при соблюдении приложенных условий действия лицензии, являющихся ее неотъемлемой частью

И.о. руководителя органа лицензирования В.В.Уткин

Серия А В № 347954

БЛАГОДАРЮ
ЗА ВНИМАНИЕ!