

М.

ISSN 0013-5860



ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
8 2005

СОДЕРЖАНИЕ

СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Ковалев В.Д., Евсеев Ю.А., Сурма А.М. Элементная база силовой полупроводниковой электроники в России. Состояние и перспективы развития	3
Крымко М.М. Элементы силовой электроники	23
Данцев О.Н., Громов В.И. ЗАО "Группа-Кремний": развитая собственная материальная база – гарантия технологической и экономической независимости предприятия	29
Глебов С.С., Жуликов А.И., Фоменко Ю.Л. Современные тенденции развития элементной базы силовой электроники и состояние разработок на "Воронежском заводе полупроводниковых приборов"	33
Чибиркин В.В., Гейфман Е.М., Елисеев В.В., Мартиненко В.А., Сурма А.М. Создание и освоение производства нового поколения мощных тиристоров и диодов для энергоёмких областей промышленности, энергетики и транспорта	37
Исаев В.М., Суслов В.М., Степанов Ю.И., Майоров С.И., Тарасов В.П. Основные направления развития специальной электротехники на период до 2015 г.	42
Терехов В.Ф., Хныков А.В. Анализ работы мостового конвертора с резонансным переключением ключей и фазоимпульсным управлением для построения высокоэффективных импульсных источников вторичного электропитания	53

ЭЛЕКТРОПРИВОД

Захаренков А.В. Применение частотно-регулируемых электроприводов тягодутьевых механизмов и питательного насоса в АСУ ТП котла ТЭЦ	60
--	----

CONTENTS

POWER ELECTRONICS

Kovalev V.D., Evseev Yu.A., Surma A.M. The element base of the power semiconductor electronics in Russia. The condition and prospects of the development	3
Krymko M.M. The elements of the power electronics ...	23
Dantsev O.N., Gromov V.I. Advanced own material resources – a guarantee of technological and economic independence of the enterprise	29
Glebov S.S., Zhoulikov A.I., Fomenko Y.L. Modern trends in a development of elements basis for power electronics and development status at "VZPP"	33
Chibirkin V.V., Geifman E.M., Eliseev V.V., Martinenko V.A., Evseev Yu.A., Surma A.M. The creation and manufacturing new generation of power thyristors and diodes for power-consuming fields of industry, energetic and transport	37
Isaev V.M., Suslov V.M., Majorov S.I., Tarasov V.P. The basic directions of development special electrotechnical equipment for the period till 2015	42
Terekhov V.F., Khnykov A.V. The analysis of work for bridge converter with resonant switching of keys and phase-pulse control for construction of high-effective switch mode power supplies	53

THE ELECTRIC DRIVE

Zakharenkov A.V. Application is adjustable frequency drives mechanisms and the nutritions pump in automatic control technological process of thermal power plant	60
---	----

СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Элементная база силовой полупроводниковой электроники в России. Состояние и перспективы развития

КОВАЛЁВ В.Д., ЕВСЕЕВ Ю.А., СУРМА А.М.

Рассмотрено состояние разработок и производства силовых полупроводниковых приборов – основной элементной базы силовой электроники в России и за рубежом. Отмечены области опережения и отставания от мирового уровня. Намечены мероприятия для закрепления опережения и ликвидации отставания от мирового уровня в области силовых полупроводниковых приборов.

The considered condition of the developments and production power semiconductor instrument main element base of the power electronics in Russia and overseas. The Noted areas опережения and backlog from world-level. The Intended actions for fastening опережения and liquidations of the backlog from world-level in the field of power semiconductor instrument.

Силовое полупроводниковое приборостроение ведёт своё начало с 1957 г., когда в ВЭИ имени В.И. Ленина согласно приказу Министра электротехнической промышленности СССР была создана лаборатория полупроводниковых приборов, руководителем которой стал Самуил Борисович Юдицкий. Почти одновременно в Физико-техническом институте имени А.Ф. Иоффе Ж.И. Алфёровым и В.Е. Челноковым под руководством В.М. Тучкевича были начаты работы по созданию мощных германиевых диодов, предназначенных для применения в подводных лодках и надводных кораблях ВМФ, производство которых было начато на саранском заводе "Электровыпрямитель".

К 1990 г. направление силовых полупроводниковых приборов (СПП) было представлено 8 заводами, производящими следующие приборы:

- диоды, тиристоры, симисторы промышленной частоты на токи 100 А и выше – Саранск;
- тиристоры и симисторы на токи 10–80 А – Запорожье;
- диоды на токи 10–80 А – Каджи-Сай;
- высокочастотные диоды и тиристоры на токи 100 А и более – Таллинн;
- мощные высоковольтные диоды и тиристоры на токи 320 А и выше – Москва;
- автомобильные диоды и силовые транзисторы – Молодечно;
- силовые транзисторы – Ереван;
- тиристоры и оптронные модули – Ставрополь;

– металлокерамические корпуса для силовых полупроводниковых приборов – Белая Церковь.

Производство было подкреплено научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами, которые проводились 3 институтами (Москва, Таллинн, Запорожье) и 7 СКБ (Молодечно-2, Саранск, Запорожье, Ереван, Таллинн).

Под руководством ВЭИ им. В.И. Ленина – головного института по силовым полупроводниковым приборам (главный конструктор – доктор техн. наук, проф. Ю.А. Евсеев) были проведены работы по созданию единой унифицированной серии силовых полупроводниковых приборов, изготовление которой осуществлялось на основе унифицированных конструкций и технологических процессов. Унификация конструкции и технологии приборов позволила решить проблему производства оборудования для СПП. Особенностью производства приборов того времени была жёсткая специализация по видам приборов и кооперация в изготовлении деталей корпусов и охладителей.

Работы в области СПП были отмечены Ленинской премией (1966 г.) и премией СМ СССР (1986 г.) (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, завод "Электровыпрямитель", ВЭИ им. В.И. Ленина). Среди лауреатов этих премий В.М. Тучкевич, И.В. Грехов, В.Е. Челноков (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), Ю.А. Евсеев, В.М. Бабайлов (ВЭИ им. В.И. Ленина) и другие известные специалисты.

Результатом распада СССР явилось то, что

большая часть предприятий – производителей СПП оказалась за пределами РФ, часть приборов в РФ не производилась, что создавало определённые трудности в плане организации производства изделий силовой электроники, предназначенных для ответственных потребителей. Чтобы ликвидировать отсутствие производства нужной комплектации, были разработаны и реализованы мероприятия по организации производства диодов на ток 10–80 А (завод в Каджи-Сае, Киргизия), тиристоров и симисторов на ток 10–80 А (производство заводов в Запорожье). Эти изделия были освоены и осваиваются на саранском заводе "Электровыпрямитель". Освоению помогло то, что ранее были решены вопросы унификации конструкции и технологии приборов. По инициативе и лицензии ВЭИ им. В.И. Ленина в орловском ЗАО "Протон-Электротекс" был организован полный цикл производства широкой номенклатуры быстродействующих тиристоров и быстровосстанавливающихся диодов (ранее на быстродействующих СПП специализировался таллинский завод).

Если раньше производство чётко придерживалось правил специализации и кооперации, то переход на рыночные отношения потребовал отказа от этой концепции и перехода к политике конкуренции. Сегодня как в ОАО "Электровыпрямитель", так и в ЗАО "Протон-Электротекс" выпускается широкая гамма СПП "традиционных" типов для применений на промышленной и повышенных частотах, а также быстродействующих. Оба предприятия освоили СПП модульной конструкции на основе тиристоров и диодов. Опытный завод ВЭИ им. В.И. Ленина также производит СПП "традиционной" номенклатуры, ориентируясь преимущественно на ответственных потребителей: железные дороги, специальную технику и др. Таким образом, в настоящее время в России традиционные СПП выпускаются на 3 предприятиях – в Саранске, Москве и Орле. Производство металлокерамических корпусов организовано на заводе в Бобрик-Донском.

Особо стоит вопрос о производстве силовых транзисторов в связи с переходом основных производителей на выпуск биполярных транзисторов с изолированным затвором

(IGBT). Здесь положение усугубляется тем, что заводы, производящие силовые транзисторы, оказались за пределами России.

Современная элементная база силовой электроники включает в себя значительное количество типов СПП, сильно отличающихся как по конструкции и технологии, так и по сфере применения. При дальнейшем рассмотрении целесообразно условно разделить их на три группы:

1. Тиристоры и диоды различного уровня быстродействия, применяемые в "традиционных" схемах преобразовательных устройств силовой электроники. Рабочий диапазон токов сегодня 10 – 3600 А, диапазон повторяющихся импульсных напряжений 100 – 12000 В.

2. Полностью управляемые ключевые элементы: силовые запираемые тиристоры (СЗТ), СЗТ, управляемые по эмиттеру, СЗТ с интегрируемым драйвером, на импульсный запираемый ток до 6000 А, повторяющееся напряжение до 6500 В, а также приборы с функциональной интеграцией – тиристоры-диоды, двунаправленные тиристоры, симисторы, тиристоры с обратной проводимостью и др. Общим для них является повышенный уровень интеграции.

3. Ключевые элементы с высоким уровнем интеграции: IGBT, силовые металл-оксид-полупроводник-транзисторы (МОП-транзисторы) и др. Приборы этого поколения отличаются также по концепции конструкции – как правило, это модульная конструкция с высокой степенью функциональной интеграции и "интеллектуальными" элементами (самозащита, самотестирование и др.). Наиболее массовыми приборами этой группы являются IGBT модули на токи диапазона 100–1000 А, напряжение до 1200 и до 1700 В.

В настоящей статье сделана попытка на основе анализа современного состояния и перспектив развития силовых полупроводниковых приборов в мире и в России сформулировать "ключевые" проблемы, решение которых необходимо для создания опережающего задела в основной части номенклатуры СПП, а также для ликвидации отставания от мирового уровня некоторых видов СПП, предложен комплекс мероприятий для решения указанных "ключевых" проблем.

Прогноз потребности России в силовых полупроводниковых приборах на период 2005–2015 гг.

Таблица 1

В настоящее время уровень эффективности использования электроэнергии в России значительно отстаёт от мирового, что связано с низким потреблением электроэнергии в преобразованном виде (около 30% в России, в то время как в передовых странах более 60%). Мал удельный вес применения регулируемого электропривода, на долю которого в развитых странах приходится до 60% потребления электроэнергии.

Решением проблемы повышения эффективности потребления электроэнергии является внедрение энергосберегающей преобразовательной техники, основой элементной базы которой являются СПП.

Однако, хотя силовые полупроводниковые приборы и являются одной из определяющих основ энергетического машиностроения, но не они определяют темпы и развитие этой отрасли. Экономический эффект от внедрения энергосберегающей техники определяется, с одной стороны, общим объёмом преобразованной электроэнергии, с другой стороны, техническим уровнем преобразующих устройств. При этом особенностью сегодняшнего развития энергетического машиностроения (как в России, так и в мире) является комплексность в решении задач, выдвигаемых потребителем.

Одной из наиболее важных зон сбережения электроэнергии является электропривод. Опыт применения показывает, что применение регулируемого электропривода позволяет снизить потребление энергии: насосами до 25%, компрессорами 40–50%, центрифугами 50%, а в целом не менее 25%. Применение новых систем электропривода с рекуперацией в сеть на транспорте позволит экономить до 30% электроэнергии. Другой важной зоной сбережения электроэнергии является сама энергетика. Так, применение статических компенсаторов реактивной мощности обеспечивает повышение пропускной способности ЛЭП на 15% и уменьшение потерь в линиях на 1 квар до 300 кВт·ч в год.

Энергосберегающая преобразовательная техника в России востребована уже сегодня, несмотря на относительно низкий (по срав-

Тип СПП	Общая годовая потребность, млн.руб.	Возможный объём продаж отечественных СПП, млн.руб.
Тиристоры и диоды	1970	1970
Запираемые тиристоры с интегрированным драйвером (IGCT)	3540	3540
Биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) в модульном исполнении	5590	4520
Всего	11100	10030

нению с мировым) уровень цен на электроэнергию. Это доказывает, например, резкий рост применения систем регулируемого электропривода в коммунальном хозяйстве (тепло- и водоснабжение), а также в нефте-, газоперекачке в течение последних 5–7 лет. Другим весомым критерием является программа РАО ЕЭС по созданию гибких линий электропередач, включающая создание и применение статических компенсаторов на суммарную установочную мощность 40000–80000 Мвар за период 2005–2015 гг. Значительную потребность в новой преобразовательной технике выявляют также программы технического перевооружения тяговых подстанций и электропривода подвижного состава железных дорог. Прогноз общей ёмкости рынка России на период 2007–2010 гг., полученный суммированием по наиболее электроёмким отраслям народного хозяйства, приведен в табл. 1.

Прогноз динамики российского рынка СПП для различных вариантов развития структуры энергопотребления приведён на рис. 1. Видно, что в период 2005–2009 гг., соответствующий структурной перестройке рынка, можно ожидать "обвального" спроса на СПП, когда потребность за 4 года вырастет в 2–3 раза. Далее темпы роста потребности в СПП несколько снизятся, но рынок все равно будет достаточно динамично развиваться и достигнет по своему объёму 15–24 млрд.руб. к 2015 г.

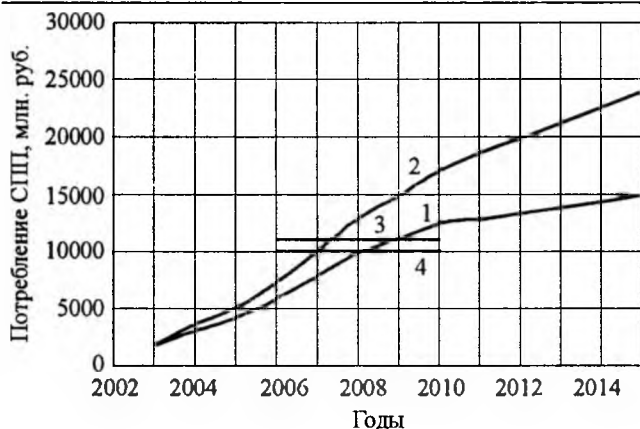


Рис.1. Прогноз развития рынка СПП в России:

1 – "умеренный", на основании прогноза производства электроэнергии; 2 – "оптимистический", на основании прогноза производства электроэнергии; 3 – оценка спроса на СПП на период до 2010 г. по наиболее электроёмким отраслям; 4 – оценка спроса на СПП российского производства на период до 2010 г. по наиболее электроёмким отраслям

Элементная база силовой полупроводниковой электроники в мире и в России

СПП 1-й группы (тиристоры и диоды), несмотря на быстрый прогресс групп СПП повышенной интеграции, имеют стабильную и технически оправданную "нишу" применения в ряде устройств силовой электроники. Основные объекты применения СПП 1-й группы, прогнозируемые для электроаппаратуры нового поколения:

1. Силовые выпрямители систем и средств электроснабжения, в том числе управляемые и неуправляемые выпрямители систем бесперебойного питания, источников вторичного электропитания, преобразователей систем электродвижения.

2. Инверторы преобразователей электроэнергии с мягкой коммутацией, обеспечивающих низкий уровень электромагнитных помех и акустического шума.

3. Защитные цепи и бесконтактные коммутаторы систем электропитания.

4. Бесконтактные коммутаторы систем импульсного электропитания (импульсная мощность до 1000 МВт).

Основные мировые тенденции развития элементной базы первой группы в прошедшее десятилетие можно охарактеризовать следующим образом.

Элементная база устройств промышленной частоты

– Тенденция увеличения максимальной мощности, коммутируемой отдельным прибором. Освоен диапазон блокируемых напряжений до 8000 В, с реальной перспективой его расширения до 12000 В (например тиристор FT1500AU-240, "Mitsubishi", на ток 1500 А, напряжение 12000 В). Освоен диапазон до 3200 А по среднему току отдельного тиристора, что соответствует диаметру отдельного кремниевого тиристорного элемента 100–125 мм.

– Устойчивая ниша применения высокомоощных приборов для работы на промышленной частоте.

– Рост требований по надёжности и ресурсу. Ведущие фирмы, например АВВ, начинают уравнивать гарантированный ресурс работы мощных тиристоров с ресурсом работы объектов, где тиристоры находят применение. Стандартным требованием к прибору становится термодинамическая устойчивость корпуса как элемент обеспечения пожаробезопасности объекта. Кстати, в своё время в СССР этому вопросу уделялось большое внимание, в 80-х годах были разработаны термодинамические приборы и корпуса для применения в высокоэнергетичных установках, так что задел в этом направлении в России имеется.

– Рост применения высоковольтных тиристоров с управлением светом по оптоволокну (далее – оптоволоконное управление). Применение тиристоров с оптоволоконным управлением позволяет существенно упростить конструкцию ряда устройств силовой электроники и преобразовательной техники и повысить их надёжность и устойчивость к электромагнитным излучениям (ЭМИ) [1]. Следует отметить, что в России накоплен значительный потенциал в области управляемых светом силовых тиристоров. В частности, серийно выпускаются оптотиристоры и оптосимисторы, где в одном корпусе смонтированы тиристор-светоприёмник и арсенид-галлиевый диод-излучатель. В 80-е годы в ВЭИ им. В.И. Ленина были спроектированы и изготовлены высоковольтные (до 400 кВ) блоки, для выпрямительно-инверторной подстанции (ВИП) Россия – Финляндия (г. Выборг). Управление большим количеством пос-

ледовательно включённых отечественных тиристоров осуществляется светом по оптоволоконному кабелю. Работа была отмечена Государственной премией.

– Применение "интеллектуальных" элементов, т.е. элементов самозащиты и само-тестирования, интегрируемых в кремниевую структуру тиристорного элемента. Рост "интеллекта" прибора позволяет увеличить его реальный ресурс работы и надёжность, так как исключает выход из строя при возникновении несанкционированного режима работы.

Определение областей безопасной работы и связанные с ними рекомендации по применению мощных тиристоров были в основном завершены более 30 лет назад. При этом, в частности, не допускалось включение мощных тиристоров в так называемых динисторных режимах (без внешнего сигнала управления) – путём приложения в прямом направлении:

- 1) перенапряжений (импульсов напряжения, нарастающих со скоростями ниже критической скорости);
- 2) импульсов напряжения, нарастающих со скоростями выше критической скорости;
- 3) импульсов прямого напряжения до завершения процесса восстановления запирающих свойств.

Исследования, направленные на обеспечение работоспособности мощных тиристоров в указанных режимах, проводятся до настоящего времени. По публикациям специалистов фирмы "Siemens" [1, 2] современные "интеллектуальные" фототиристоры (тиристоры) фирмы допускают работу в этих режимах. Работоспособность в режимах 1 и 2 достигнута путём интеграции в четырёхслойную кремниевую структуру защитного динисторного элемента, а в режиме 3 – путём формирования локальной кольцевой n -области в эмиттерном p -слое в зоне управления.

Элементная база устройств повышенной частоты

Рядом фирм ("Westcode", "Eupec", "Semikron", "International Rectifier") освоены и серийно выпускаются серии быстродействующих тиристоров (включая "инверторные" тиристоры среднего быстродействия) и комплектных быстро восстанавливающихся диодов с исключительно оптимальными ха-

рактеристиками. Серийно выпускаются тиристоры и комплектные диоды, рассчитанные на работу в частотном диапазоне до 50 кГц, что открывает широкие перспективы их использования в резонансных инверторах. Наряду с малым временем выключения для тиристоров новых серий характерен исключительно малый заряд обратного восстановления, что делает их привлекательными при использовании также в инверторах тока.

Несмотря на прогресс технических характеристик тиристоров с повышенным быстродействием наблюдается сильное сокращение их рыночной ниши вследствие "давления" со стороны интенсивно развивающихся приборов 2- и 3-й групп. Анализ тенденций развития устройств силовой электроники показывает, что "традиционные" быстродействующие тиристоры и комплектные диоды практически вытеснены IGBT-модулями из ниши элементной базы преобразователей частоты (ПЧ) со звеном инвертора напряжения, так как IGBT позволяют существенно упростить конструкцию и улучшить характеристики таких устройств. С другой стороны, в области ПЧ со звеном инвертора тока или резонансного инвертора, т.е. там, где применение быстродействующих тиристоров **технически оправдано** (при учёте прогресса их технических характеристик), все равно происходит искусственная переориентация на IGBT. Эту тенденцию нужно считать следствием технической политики крупных фирм, производящих как элементную базу, так и устройства силовой электроники на их основе и стремящихся унифицировать элементную базу преобразовательной техники. Следует отметить, что достигнутый **уровень стойкости к ионизирующему излучению** для современных быстродействующих тиристоров примерно на **порядок выше**, чем для IGBT, причём это положение, вероятно, сохранится и в обозримом будущем.

Весьма перспективным направлением развития СПП 1-й группы является создание модулей на основе как дискретных тиристоров и диодов, так и гибридных силовых интегральных схем. Применение модульного принципа построения силового агрегата преобразователя позволяет уменьшить массога-

баритные показатели устройств преобразования электроэнергии в 1,5–2 раза.

Основные конструктивные и технологические решения, используемые в отечественном производстве мощных тиристоров и диодов, относятся к периоду 1976–1986 гг. и в основном базировались на отечественном научно-техническом потенциале (ВЭИ им. В.И. Ленина, ФТИ им. Иоффе, НИЦ СПП "Электровыпрямитель" и другие научно-исследовательские и конструкторские подразделения). В 1990 г. эти СПП в основном отвечали мировому уровню, а отставание было связано лишь с приборами, изготавливаемыми на кремнии диаметром 100 мм и выше. Наглядной иллюстрацией сказанному является ряд серий мощных, высоконадёжных и совершенных по конструкции тиристоров и диодов, разработанных и освоенных в производстве заводом "Электровыпрямитель" совместно с ВЭИ им. В.И. Ленина в период 1980–1990 гг. Эти приборы производятся и сегодня, причём объём их продажи растёт в течение последних 3 лет на 15–20% в год, до 20 % общего объёма произведённых приборов поставляется на экспорт, в том числе в страны Западной Европы.

В последующие за 1991-м годы в России вопросам поддержания и совершенствования качества "традиционных" СПП уделялось явно недостаточное внимание как из-за отсутствия материальных ресурсов у изготовителей СПП из-за резкого снижения объёмов производства и потребления на отечественном рынке, так и из-за отсутствия интереса к этим вопросам у российских потребителей СПП и государства. Возможно, одной из причин этой тенденции является существенно более резкое отставание от мирового уровня в СПП 2- и 3-й групп, ликвидация которого требует намного больше средств и внимания.

Несмотря на это российской наукой и промышленностью наработан весомый задел в части модернизации элементной базы первой группы.

В частности, ОАО "Электровыпрямитель" (Саранск) и ЗАО "Протон-Электротекс" (Орел) при содействии ГУП ВЭИ им. В.И. Ленина (Москва) успешно осваивают в производстве гамму приборов, рассчитанных на напряжение до 6000 В. Силами этих же пред-

приятий проводится освоение приборов на ток до 2500–3200 А с диаметром кремниевого выпрямительного элемента 100 мм.

ГУП ВЭИ им. В.И. Ленина ведёт ряд исследований по внедрению в конструкцию тиристора "интеллектуальных" элементов самозащиты и самотестирования [3, 4]. Актуальность проблемы защиты мощных тиристоров от пробоя в режиме переключения при неполном восстановлении запирающих свойств была подтверждена специалистами ВЭИ по результатам анализа отказов тиристоров при их работе на таких объектах, как ВИП (г. Выборг), где одновременно эксплуатируется 6 тыс. тиристоров Т273-1250 42 класса, и электропоезд с асинхронным приводом "ЭТ2А", где использованы в преобразователе тиристоры Т453-500 40 класса и ТБ853-800 22 класса. Обследование режимов работы тиристоров, возможной взаимосвязи отказов тиристоров с отказами других элементов, например, основных блоков управления, позволило установить, что отказы тиристоров в значительной мере обусловлены "несанкционированным" режимом: переключением при неполном восстановлении запирающих свойств.

Проведённые исследования позволили модернизировать конструкцию и технологию изготовления этих тиристоров. Модернизированные тиристоры ТБ853-800 прошли опытную эксплуатацию на электропоезде "ЭТ2А" и подтвердили отсутствие характерных пробоев по сравнению с предыдущей конструкцией.

В ГУП ВЭИ разработаны физико-технологические основы создания двух- и трёхэлементных модулей и выпрямителей на основе техники интегральных схем, позволяющие существенно (в 2–3 раза) уменьшить массу и габариты модулей и снизить их цену [5], что позволяет ставить задачу о разработке нового поколения модулей и выпрямителей на токи от 10 до 1250 А в малогабаритном исполнении.

Таким образом, научный потенциал ГУП ВЭИ позволяет решить вопросы по интеграции в тиристорную структуру элементов защиты в режимах перенапряжения и высоких скоростей нарастания напряжения, но без должного финансирования со стороны заин-

тересованных государственных и коммерческих организаций решение этих вопросов может растянуться на неопределённое время.

В России в настоящее время в различных отраслях эксплуатируется более 100 тыс. мощных тиристоров на токи свыше 800 А, большинство из которых, как и на ВИП (г. Выборг), перешагнуло свой гарантируемый ресурс. Если завтра не провести работы по внедрению элементов самозащиты в конструкцию отечественных тиристоров, то отечественные СПП потеряют конкурентоспособность не только на зарубежных рынках, но и на отечественном рынке. По нашим представлениям, потребители должны четко осознать: уровень независимости России в части электроэнергетического оборудования определяется в конечном итоге состоянием отечественной элементной базы и, соответственно, зависит от уровня капиталовложений в развитие современной элементной базы СПП.

К вопросу о появлении в серийном производстве "интеллектуального" фототиристора с непосредственным оптоволоконным управлением для целей энергетики, можно заметить, что чем раньше начнется финансирование со стороны заинтересованных в их потреблении (или производстве) финансовых структур, тем раньше они появятся в российском производстве. Следует отметить, что это комплексная проблема, связанная с тем, что эксплуатационная надёжность фототиристора будет определяться надёжностью лазерной системы управления.

Значительны успехи в разработке быстродействующих тиристоров нового поколения. ГУП ВЭИ совместно с ЗАО "Протон-Электротекс" и ГУП ИТЭФ разработана оригинальная технология протонного облучения СПП, освоение которой в производстве позволило ЗАО "Протон-Электротекс" выпустить новые серии быстродействующих тиристоров – ТБИ и ТБЧ, не уступающие по своим характеристикам продукции фирмы "Westcode" – признанному мировому лидеру в этой области [6, 7].

Кремниевые структуры новых тиристоров имеют диаметр 32, 40, 56 мм (рис.2).

Повышенное разветвление управляющего электрода для работы в частотных и частотно-импульсных режимах обеспечивает быст-

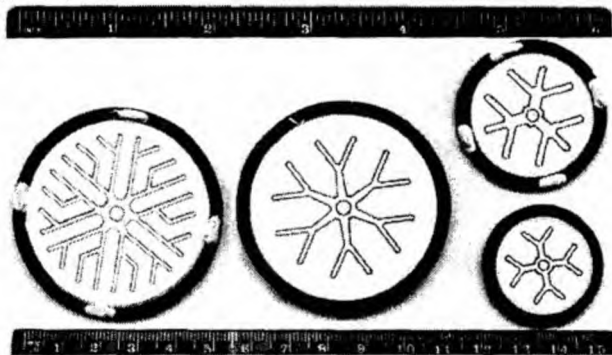


Рис.2. Топология структур быстродействующих тиристоров новых серий ТБИ и ТБЧ

рое включение всей тиристорной структуры и малую энергию потерь при включении. Тиристоры серии ТБЧ имеют сильно разветвленный управляющий электрод, обеспечивающий полное включение всей площади тиристорной структуры за 8–12 мкс. Приборы с симметричными блокирующими характеристиками на напряжения 800–3400 В рассчитаны на ток от 320 до 1250 А. Основные отличия тиристоров новых серий:

- исключительно малые времена выключения (t_q) – от 5 мкс для тиристоров 10–12 классов, от 20 мкс для тиристоров 20–22 классов, от 63 мкс для тиристоров 34 класса; слабая зависимость времени выключения от таких факторов, как скорость спада анодного тока, скорость нарастания повторного анодного напряжения;

- малые значения заряда обратного восстановления (Q_{rr}) – от 50 мкКл для тиристоров 10–12 классов, от 80 мкКл для тиристоров 14–15 классов, от 150 мкКл для тиристоров 20–22 классов, от 800 мкКл для тиристоров 34 класса;

- благодаря уменьшенным значениям Q_{rr} и t_q новые тиристоры могут работать в диапазонах частот соответственно: до 40 кГц для блокирующего напряжения 1000–1500 В, до 10 кГц для блокирующего напряжения 2200 В и 2–5 кГц для блокирующего напряжения 3400 В;

- до 1600–2000 А/мкс повышена стойкость к нарастанию анодного тока при включении; топология тиристорной структуры адаптирована для работы при высокой частоте; гарантируется надёжное функционирование тиристоров в режимах с повторяющейся скорос-

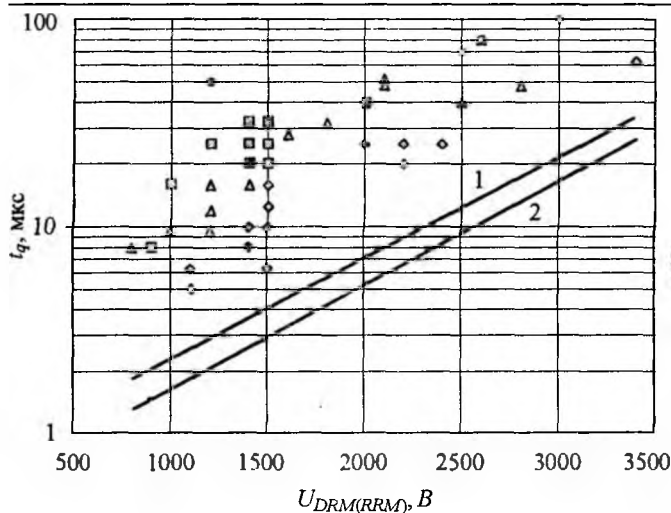


Рис.3. Соотношения повторяющегося напряжения и времени выключения для новых быстродействующих тиристоров в сравнении с серией "distributed gate" тиристоров "Westcode" и уровнем отечественных быстродействующих тиристоров 90-х годов:

■; ● – СССР 1990-1991 гг.; ▲ – современный мировой уровень ("Westcode"); ◆ – Россия, современный уровень ("Протон-Электротекс"); 1 – новые разработки (симметричная блокирующая характеристика); 2 – новые разработки (асимметричный тиристор)

тью нарастания тока 800–1250 А/мкс;

– контроль значений Q_{rr} и t_q обеспечивается для всех тиристоров; максимальный заряд обратного восстановления Q_{rr} можно выбрать из типового ряда значений.

На рис.3 приведены соотношения повторяющегося напряжения и времени выключения для новых быстродействующих тиристоров в сравнении с серией "distributed gate" тиристоров "Westcode" и уровнем отечественных быстродействующих тиристоров 90-х годов.

Из рис.3 видно, что по совокупности блокирующего напряжения и времени выключения новые тиристоры существенно превосходят не только уровень 1990–1991гг. отечественных СПП, но и наиболее передовую серию быстродействующих тиристоров "Westcode". Результаты новых разработок, проводимых в настоящее время ВЭИ в сотрудничестве с предприятиями-производителями, показывают, что резерв улучшения характеристик быстродействующих тиристоров за счёт применения технологии протонного облучения ещё далеко не исчерпан. В каче-

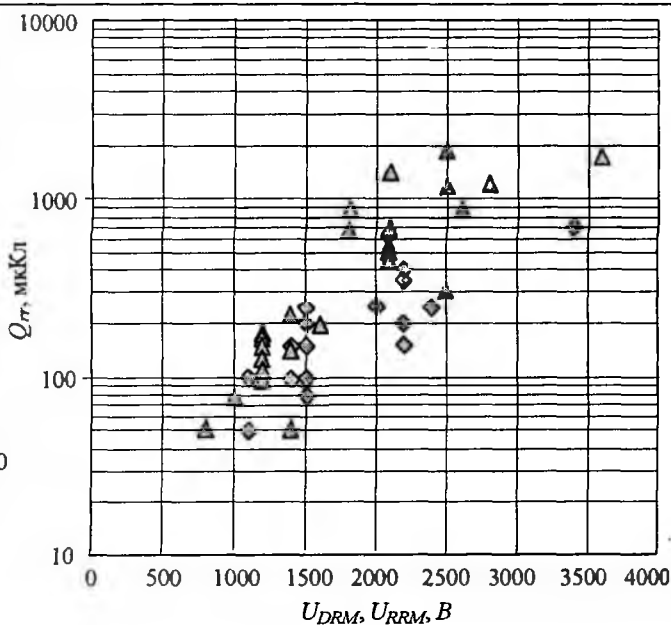


Рис.4. Соотношения повторяющегося напряжения и заряда обратного восстановления для новых быстродействующих тиристоров в сравнении с серией "distributed gate" тиристоров "Westcode":

◆ – "Протон-Электротекс", серия ТБИ; ▲ – "Westcode", серия R (distributed gate thyristors)

стве примера на рис.3 приведены прогнозы сочетания блокирующего напряжения и времени выключения для новых разработок тиристоров с симметричной блокирующей характеристикой и асимметричных тиристоров, построенные по результатам испытаний макетных образцов.

На рис.4 приведены соотношения повторяющегося напряжения и заряда обратного восстановления для тиристоров серий ТБИ, ТБЧ в сравнении с серией "distributed gate" тиристоров "Westcode". Видно, что для уровня блокирующего напряжения 1000–1500 В новые отечественные тиристоры не уступают приборам "Westcode", а для более высоких напряжений имеют перед тиристорами "Westcode" преимущество.

Прогресс характеристик быстродействующих тиристоров открывает перспективу развития преобразователей с резонансным промежуточным звеном. Такие преобразователи при использовании в качестве элементной базы новых тиристоров 12–16 классов по повторяемому напряжению, могли бы работать на частотах до 40–60 кГц, а при исполь-

зовании тиристоров 20–24 классов – на частоте до 10–12 кГц, составив конкуренцию преобразователям на IGBT.

Среди производителей СПП 1-й группы в России имеется два основных предприятия – ОАО "Электровыпрямитель" и ЗАО "Протон-Электротекс", первое из которых отметило свой 60-летний юбилей, а второе – готовится лишь к 10-летию. Таким образом, для современной схемы производства в России есть все условия, включая двух и более поставщиков и конкурентность продукции по цене и качеству.

Определённый задел наработан в ГУП ВЭИ в области тиристор-диодов. Обнаружен эффект дополнительного рассасывания зарядов из широкой *n*-базы через шунт *p*-эмиттера [8, 9], что позволяет в 3–5 раз уменьшить время выключения тиристора-диода. Создание приборов, использующих этот эффект, позволит изготавливать квантовые и резонансные преобразователи с частотой 500 и даже 1000 кГц с высоким КПД.

Существующий весомый научно-технический задел позволяет провести комплексную модернизацию полупроводниковой элементной базы 1-й группы, без которой современные серийные СПП этой группы рискуют вскоре оказаться наиболее слабым звеном в комплекте электроаппаратуры нового поколения.

Комплекс важнейших задач, которые необходимо решить:

- введение в прибор "интеллектуальных" элементов – элементов самотестирования и самозащиты от потенциальных аварийных факторов;

- разработка базовой конструкции и технологии производства кремниевых структур мощных высоковольтных тиристоров, адаптированных к управлению светом по оптоволокну, разработка базовой конструкции цепи оптоволоконного управления;

- расширение номенклатуры приборов с повышенной термодинамической устойчивостью корпуса;

- разработка и освоение нового поколения приборов в интегральном и гибридно-интегральном модульном исполнении;

- разработка и освоение серии сверхбыстрых тиристоров с временами выключения 1–6,3 мкс для использования в устройствах

с рабочей частотой до 100 кГц;

- разработка и освоение тиристоров и диодов с уменьшенным зарядом обратного восстановления и повышенной мягкостью обратного восстановления;

- разработка и освоение высокотемпературных быстродействующих тиристоров и быстро восстанавливающихся диодов в "традиционном" и модульном конструктивном исполнении.

Среди приборов элементной базы второй группы следует, прежде всего, выделить полностью управляемые тиристоры (GTO тиристоры (Gate Turn Off) или силовые запираемые тиристоры – СЗТ). Базой для применения этих приборов сегодня являются наиболее мощные устройства силовой электроники:

- системы регулируемого электропривода на основе асинхронных двигателей мощностью свыше 800 кВт;

- компенсаторы реактивной мощности в составе систем электроснабжения;

- импульсные источники питания систем специальной силовой электроники.

Требования к мощности преобразователей для этих применений таковы, что часто необходимо последовательное и параллельное включение полупроводниковых приборов. Поэтому актуально увеличение коммутируемой мощности отдельного прибора, т.е. увеличение его максимального блокирующего напряжения и максимального коммутируемого тока.

Ведущими зарубежными компаниями – производителями этих приборов в настоящее время являются "ABB Semiconductors" и "Mitsubishi Electric". Эти же компании в середине 90-х годов разработали и выпустили на рынок СЗТ усовершенствованной конструкции, названные GCT (Gate Commutated Thyristors – СЗТ с жесткой коммутацией) и IGCT (СЗТ с жесткой коммутацией и интегрированные с драйвером) [10, 11].

Анализируя тенденции развития этих приборов фирмами АВВ и "Mitsubishi" можно отметить следующее:

1. Общее количество типов приборов выпускаемое этими двумя компаниями в 2003 г. – 49, причём в течение последних 5 лет номенклатура заметно расширилась, например фир-

мой АВВ – с 15 типов в 1997 г. до 29 типов в 2003 г. Следует отметить, что уже к 1997 г. только АВВ выпустила более 80 тыс. GTO тиристоров различных типов.

2. Наряду с технически более совершенными GCT/IGCT фирмы продолжают выпуск и традиционных GTO тиристоров, вероятно для комплектации ЗИП.

3. Выпускаются самые мощные в мире GTO тиристоры и GCT на основе кремниевых кристаллов диаметром 140 мм, рассчитанные на импульсный коммутируемый ток до 6000 А и блокирующее напряжение до 6000 В.

4. Наряду с сильноточными приборами выпускается ряд приборов на меньшие токи с меньшим диаметром кремниевого кристалла (ряд 38, 51, 68, 91 мм).

5. Наибольший удельный вес в номенклатуре (42 типа) имеют высоковольтные приборы на напряжение 4500 В и выше.

6. В последние годы разработаны и серийно выпускаются симметричные по напряжению IGCT.

7. Компания АВВ разработала и за последние годы резко расширила номенклатуру IGCT с интегрированными диодами обратного тока.

Область применения GCT и GTO тиристоров испытывает сильное давление со стороны бурно развивающихся приборов 3-й группы, в частности IGBT. Следует, однако, отметить, что в настоящее время высоковольтные GCT (4500 В и выше) выгодно отличаются от аналогичных IGBT как по комплексу технических характеристик, так и по цене. Такое положение, вероятно, сохранится и в обозримом будущем, во всяком случае вопрос о целесообразности замены GCT на IGBT в этом диапазоне напряжений открыт и дискутируется мировым научным сообществом в течение последних 5 лет. Если такая замена и произойдет, то скорее альтернативой GCT станут не "традиционные" IGBT, а приборы с полевым управлением следующего поколения (Clustered IGBT, CSTBT и др.), разработка которых началась сравнительно недавно [12, 13].

К быстровосстанавливающимся диодам (БВД), комплектным к GCT, выдвигается ряд специфических технических требований, на-

столько "жестких", что эти приборы следует выделить в особый подкласс и рассматривать отдельно от диодов 1-й группы [14, 15]. Важнейшие среди этих требований:

- устойчивая работа при обратном восстановлении со скоростью спада анодного тока 1000–5000 А/мкс, малый заряд обратного восстановления в таких режимах;

- мягкая характеристика обратного восстановления;

- устойчивая работа при обратном восстановлении с индуктивной нагрузкой и с кратковременным лавинным пробоем.

Рынок таких БВД определяется в основном рынком GCT/IGCT, наиболее качественные диоды в этом подклассе выпускают фирмы АВВ и "Mitsubishi". АВВ выпускает 4 типа "снабберных" диодов (комплектация устройств на традиционных GTO тиристорах) и 8 типов БВД обратного тока (комплектация устройств как на GTO тиристорах, так и на IGCT). Практически в тех же конструктивных исполнениях, но с несколько отличными параметрами компания выпускает 8 типов специальных БВД для совместного применения с IGCT (это так называемые clamp-диоды, в том числе neutral point clamp diodes). "Mitsubishi" выпускает 4 типа БВД с "мягкими" характеристиками обратного восстановления на основе кристаллов диаметром 51, 91 и 140 мм, причём 1 из них в качестве clamp-диода, а остальные 3 как диоды обратного тока.

Следует отметить, что конструктивно-технологические решения, применяемые для достижения специальных свойств комплектных для GCT/IGCT БВД, близки к применяемым для диодов 3-й технологической группы, комплектующих IGBT-модули. Поэтому фирмы, "продвинувшиеся" в изготовлении подобных диодов, выпускают, как правило, и диодные чипы для техники 3-й группы с исключительно хорошими характеристиками. Пример – те же компании АВВ и "Mitsubishi".

Серийное производство СПП 2-й группы в России развито недостаточно, хотя для его организации не требуется кардинального обновления сложившейся технологической базы, кроме того, имеется значительный научно-технический задел в части разработки таких приборов. В частности, ВЭИ им. В.И.

Ленина является сегодня одним из наиболее авторитетных научно-технических центров, развивающих работы по тематике ГТО-ГСТ. В НИЦ СПП ВЭИ в 70 – 80-х годах XX в. сформировалась научная школа, определившая направления развития данной тематики и основные конструктивно-технологические решения, используемые всеми отече-

ственными производителями этой техники по сегодняшний день. Все запираемые тиристоры, выпускаемые сегодня полупроводниковыми предприятиями СНГ ОАО "Электровыпрямитель" (Саранск), ЗАО "Протон-Электротекс" (Орел), ОАО "Преобразователь" (Запорожье) разработаны и внедрены в производство совместно с ВЭИ им. В.И. Ленина и на основании его научно-технических разработок.

Ряд последних приборных и технологических разработок ВЭИ [16-18], например быстродействующий тиристор, выключаемый по эмиттеру (Emitter Commutated Thyristor – ECT) на напряжение до 6000 В, ГСТ с "транспарентным" эмиттером, технологический процесс протонного облучения и др. соответствуют и даже превышают современный мировой уровень.

Весьма перспективным мощным полностью управляемым ключом является тиристор, выключаемый по эмиттеру. Основным полупроводниковым элементом этого ключа является запираемый тиристор нового поколения, допускающий форсированное "жёсткое" управление. Для форсирования процесса выключения применяется каскадная схема, когда выключение происходит при прерывании тока в цепи катодного эмиттера запираемого тиристора низковольтным, быстродействующим ключом (например МОП-транзистором) (рис.5.). Каскадная схема управления запираемым тиристором позволяет получить высокие динамические характеристики силовых ключей и осуществить полевой принцип управления.

Необходимо особо отметить, что каскадный принцип управления позволяет реализовать полностью автономный драйвер для тиристорной структуры, так как источником управляющего тока является силовая цепь.

Таким образом, интегрируя запираемый тиристор и МОП-ключ в каскадном включе-

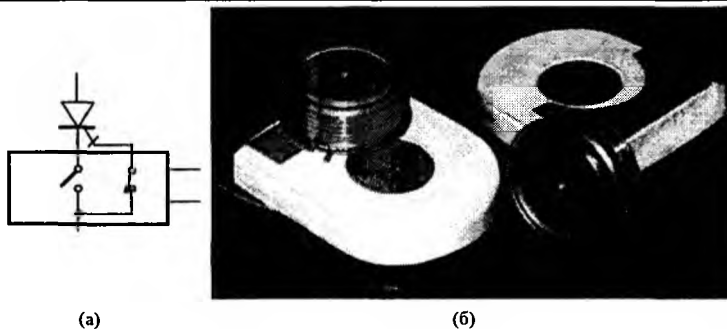


Рис. 5. Тиристор выключаемый по эмиттеру и МОП-драйвер (низковольтный катодный МОП-ключ):

а – эквивалентная схема, б – конструктивное исполнение

нии в едином модуле, можно получить полный функциональный аналог IGBT модуля, характеризуемый положительными качествами последнего:

- управление по цепи МОП-структуры;
- высокое быстродействие, низкая энергия потерь при выключении;
- прямоугольная область безопасной работы.

При этом новый прибор сохраняет достоинства IGCT:

- меньшее, по сравнению с IGBT, остаточное падение напряжения во включенном состоянии;
- меньшая, по сравнению с IGBT, энергия потерь при включении,
- так как основным высоковольтным полупроводниковым элементом модуля является запираемый тиристор.

По сравнению с IGCT новый прибор будет иметь несколько большее остаточное падение напряжения во включенном состоянии, так как в нём реализуется последовательное соединение запираемого тиристора и низковольтного МОП-транзистора. Однако при использовании современных МОП-транзисторов диапазона напряжений 20–30 В с исключительно низкими значениями сопротивления в проводящем состоянии ($R_{ds\ on}$), можно свести эту добавку примерно к 0,2–0,4 В, т.е. сделать несущественной.

Применение новых приборов особенно актуально для электропреобразовательной аппаратуры на железнодорожном транспорте и в электроэнергетике, где требуется комплектация мощными полностью управляемыми твердотельными ключами на токи до не-

скольких тысяч ампер, напряжения 4500-6000 В. В настоящее время для этих применений наиболее пригодны IGCT, высоковольтные IGBT-модули заметно уступают им по своим характеристикам (причём прогресс характеристик **высоковольтных IGBT** за последние 5 лет незначителен), кроме того они значительно дороже. IGCT-ключи, однако, сложнее в эксплуатации, так как имеют драйвер, требующий достаточно мощного внешнего источника электропитания. Требуемая мощность источника питания драйвера прямо пропорциональна рабочей частоте переключения IGCT, что на практике ограничивает частотный диапазон этих приборов на уровне не более 1 кГц.

Новые гибридные приборы тиристорного типа, совмещающие достоинства IGBT и IGCT и лишённые их недостатков, предназначены для замены IGCT в описанных выше *областях* применения. При этом ECT могут быть предпочтительнее для использования в более высоковольтных устройствах (особенно при необходимости последовательного соединения), а также при повышенных рабочих частотах. IGCT имеют преимущества при использовании в устройствах, требующих коммутации больших токов [19].

Разработку серии IGCT в настоящее время проводит ОАО "Электровыпрямитель" [20]. Предполагается освоение серии приборов, аналогичных по своим параметрам приборам производства АВВ, начало коммерческого выпуска планируется в 2006 г. Приборы рассчитаны на ряд коммутируемых импульсных токов до 4000 А, этот предел обусловлен современными технологическими возможностями предприятия по работе с кремниевыми пластинами диаметром не более 100 мм.

Комплекс важнейших задач, которые необходимо решить для развития элементной базы 2-й технологической группы:

- разработка и освоение в производстве серии СЗТ с жёсткой коммутацией для работы с интегрированным драйвером на токи до 4000 А, напряжение до 6000 В;

- разработка и освоение в производстве серии комплектных БВД, устойчиво работающих при обратном восстановлении со скоростью спада тока 1–3 кА/мкс, формируемой индуктивной нагрузкой;

- разработка серии комплектных интегрируемых драйверов;

- разработка и освоение в производстве серии СЗТ с жёсткой коммутацией (ток до 1500 А, напряжение до 6000 В) на базе тиристоров, управляемых по эмиттеру (каскадная схема) в модульном исполнении;

- обеспечение области безопасной работы, надёжности и ресурса разработанных изделий на уровне аналогов производства фирм АВВ и "Mitsubishi".

В 80–90-х годах XX в. мощные переключающие биполярные транзисторы и тиристоры, традиционно применявшиеся в системах силовой электроники, стали интенсивно заменяться на СПП 3-й группы – мощные переключающие МОП-транзисторы, IGBT и модули на их основе. Это позволило существенно повысить КПД и снизить массогабаритные показатели устройств силовой электроники (устройства электроснабжения, преобразования электроэнергии, коммутации и др.).

Основопологающими признаками элементной базы третьей группы являются:

- модульная конструкция СПП с всё более возрастающей степенью функциональной интеграции и "интеллектуальности";

- ориентация на "высокотехнологичные" СПП, создание которых стало возможным благодаря бурному прогрессу полупроводниковой технологии, ориентированной первоначально на нужды микроэлектронной и компьютерной техники.

При разработке и выпуске приборов новой группы используется интегральная МОП- и БИМОП-технологии.

Одним из основных "высокотехнологичных" изделий является IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) = БТИЗ (Биполярный Транзистор с Изолированным Затвором). На сегодняшний день преобразовательное оборудование, построенное на элементной базе IGBT модулей, считается "брендом" силовой электроники, обеспечивающим наиболее качественное преобразование электроэнергии при максимальной компактности и надёжности устройства.

Рынок IGBT-модулей и комплектующих изделий (кристаллы IGBT и БВД, драйверы, элементы тестирования и защиты и др.) является сегодня самым динамичным сегмен-

том рынка СПП, причём его расширение происходит как за счёт прорыва устройств преобразовательной техники на новой элементной базе в новые области использования (например освещение, бытовая техника и др.), так и за счёт расширения традиционных областей, причём с вытеснением используемых в этих областях СПП 1- и 2-й групп.

При рассмотрении тенденций развития IGBT-модулей целесообразно выделить тенденции в "кристалльной" базе диапазона напряжений 600–3300 В и диапазона напряжений 3300–6500 В, а также тенденции в конструкции и технологии изготовления непосредственно модулей.

Общепризнанным базовым ключевым кристаллом для диапазона напряжений 600–1700 В является IGBT. Ведущими фирмами-изготовителями, определяющими сегодня "уровень" изделия, являются "Infineon", "International Rectifier", "Toshiba", "Mitsubishi", АВВ. Этими фирмами в настоящее время достигнут уровень, позволяющий получить комплекс характеристик прибора, близкий к теоретически предельно возможному. Технические характеристики во многом определяются уровнем технологии создания МОП-структуры на поверхности кристалла, в частности минимальным размером элементарной ячейки (плотностью упаковки ячеек). Наиболее "продвинутой" является "trench"-технология (5-е поколение IGBT), обеспечивающая минимальный размер ячейки 5–8 мкм, планарная "самосовмещённая" технология предыдущего 4-го поколения обеспечивает размер ячейки 10–15 мкм. Уровень среднего тока серийно выпускаемых IGBT-модулей диапазона до 1700 В достигает 3600 А при типичных значениях остаточного напряжения $U_{ce\ sat} = 1,5 \div 1,7$ В.

Ведущие фирмы обеспечивают также выпуск комплектных БВД с исключительно хорошими характеристиками (в том числе с мягкой характеристикой обратного восстановления), а также других изделий, комплектованных модуль.

Мировой рынок изделий диапазона напряжений 600–1700 В – наиболее ёмкий, но несмотря на это, в значительной мере "перенасыщен". Это сказывается на уровне цен: цена IGBT-модуля "за 1 А коммутируемого тока"

приближается к уровню цены, характерному для изделий 1-й группы (тиристоров) при несоизмеримой разнице в уровне технологической сложности.

Далее заметно резкое уменьшение числа фирм, занимающихся изготовлением IGBT и диодных чипов на напряжения диапазона до 3300 В, практически до приведённого списка наиболее передовых. Технические характеристики изделий здесь ещё достаточно далеки от "предельных", но наблюдается их значительный прогресс за последние 5 лет. Это дает основание предполагать, что данный диапазон напряжений в ближайшем будущем также будет прочно "завоёван" IGBT. Достигнутый уровень среднего тока серийно выпускаемых IGBT-модулей диапазона до 3300 В сегодня составляет 1200 А (для модулей паяной конструкции) при типичных значениях остаточного напряжения $U_{ce\ sat} 2,7\text{--}3,0$ В.

Для области более высоких напряжений ситуация далеко не так однозначна. IGBT-чипы на напряжения 4500–6500 В и модули на их основе разработаны и выпускаются, однако по характеристикам эти изделия заметно уступают значительно более простым и дешёвым GCT/IGCT. При этом за последние 4–5 лет (со времени появления первых высоковольтных IGBT модулей) значительного прогресса их характеристик не наблюдается. Ведущие фирмы ведут интенсивный поиск конструкции нового прибора, который мог бы заменить "традиционный" IGBT в этом диапазоне напряжений. В качестве " претендентов" на такую замену можно назвать IEGT (Injection Enhanced Gate Transistor) [21], CSTBT (Carrier Stored Trench-gate Bipolar Transistor) [13], EST (Emitter Switch Thyristor) [22], CIGBT (Clustered IGBT) [12] и др.

Следует отметить, что улучшение характеристик высоковольтного ключевого элемента определяется уже не столько уровнем технологии создания МОП-ячейки на поверхности кристалла (в частности, не плотностью упаковки ячеек), сколько прогрессивностью конструктивно-технологических решений, направленных на улучшение "работы" объёма кристалла. При этом становятся востребованными многие прежние наработки силовой полупроводниковой электроники, приме-

няемые на приборах элементной базы 1-, 2-й технологических групп.

Модульное исполнение, характерное для элементной базы 3-й группы, весьма привлекательно для потребителей, так как позволяет существенно упростить конструкцию всего преобразовательного устройства. В единый модуль при этом могут быть интегрированы целые узлы устройства, вплоть до всего силового агрегата.

Достаточно просто любые схемотехнические соединения необходимого количества кристаллов IGBT и БВД реализуются в модульных металлопластмассовых конструкциях с паяными контактами. При этом активные элементы (IGBT и БВД) изолируются от основания через теплопроводящие изоляционные керамические пластины и соединяются между собой с помощью привариваемых алюминиевых проводов. Однако большое количество паяных и сварных соединений, разнородные конструкционные материалы сборки естественным образом снижают надёжность изделий и их температуростойкость. При достаточно высоких рабочих температурах и в режиме повторяющегося большого перепада температур из-за практически неустранимого различия в коэффициентах теплового расширения конструкционных материалов модуля возникают значительные механические растягивающие и сжимающие напряжения в местах соединений, что в конечном итоге приводит к их разрушению и отказу приборов.

Выполненные в последние годы исследования позволили значительно повысить допустимое рабочее количество термоциклов приборов и их надёжность путём использования специальных многокомпонентных припоев и особых температурных приёмов пайки, разработки для основания модулей сложных композиционных материалов с близкими к кремнию коэффициентами термического расширения. Тем не менее, обеспечение высокой температуростойкости IGBT-модулей паяной конструкции (особенно на повышенные значения токов – более 1000 А) продолжает оставаться весьма трудновыполнимой задачей.

Кардинальным образом высокая температуростойкость IGBT-модулей обеспечивается

при переходе на прижимную конструкцию [23, 24]. Переход с паяной на прижимную конструкцию обеспечивает прирост температуростойкости модулей более чем в 50°C.

Кроме обеспечения повышенной надёжности и температуростойкости металлокерамические прижимные конструкции за счёт плоских поверхностей корпусов и их лучшей герметичности по сравнению с металлопластмассовыми паяными конструкциями позволяют также:

- существенно снизить собственную индуктивность;
- использовать двухстороннее охлаждение и облегчить отвод тепла;
- легко осуществлять при необходимости последовательное соединение отдельных модулей;
- использовать изделия в средах с неблагоприятными условиями (повышенная влажность, вибрация и т. д.), например, на транспорте, ответственных источниках питания, металлургии, горнодобывающей промышленности и т. д.

Практическая реализация сильноточных прижимных IGBT конструкций затруднена необходимостью обеспечения равномерного давления на каждый кристалл IGBT и БВД. Небольшая разница в толщине полупроводниковых кристаллов и термокомпенсаторов приводит к неравномерности давления и, в конечном итоге, разрушению конструкции. Кроме того, в прижимных конструкциях по сравнению с паяными намного сложнее обеспечить соединение к контактным площадкам затворных областей IGBT и к резисторам в цепи затвора.

Состояние разработок мощных IGBT модулей в России

При оценке состояния разработок и перспектив развития производства IGBT-техники в России целесообразно выделить два направления работ:

- разработка и освоение производства отечественных кристаллов IGBT и комплектных быстровосстанавливающихся диодов (БВД);
- разработка конструкции и технологии изготовления модулей, освоение сборочного производства, базирующегося на применении отечественных или зарубежных кристаллов.

**Кристаллы IGBT и комплектных диодов
(ЗАО "Группа кремний", Брянск)**

Напряже- ние, В	Транзистор на ток, А	Диод на ток, А	Размер кристалла, мм
1200	50		7,9 × 7,9
	75		10,0 × 10,0
	100		12,6 × 12,6
		50	7,5 × 7,5
		75	10,0 × 6,08
		100	12,6 × 6,8
1800	80		12,4 × 12,4
		80	12,4 × 6,25
		160	12,4 × 12,4
2500	60		13,6 × 13,6
		60, 120	13,6 × 13,6

По обоим направлениям сегодня имеется серьезное отставание от ведущих зарубежных производителей аналогичной продукции. Однако в последние два года можно отметить существенный прогресс по данным направлениям работ отечественных предприятий, что внушает "осторожный" оптимизм.

Кристаллы. Серийное производство кристаллов IGBT и комплектных БВД в настоящее время в России отсутствует. Ситуация с разработкой и освоением в производстве чипов элементной базы 3-й группы осложнена принципиальной непригодностью для этих целей технологической базы предприятий-изготовителей "традиционных" СПП 1- и 2-й групп. Для производства в принципе пригодна технологическая база предприятий микроэлектроники, но эти предприятия, как правило, не имеют опыта разработки и производства мощных приборов, а также сборочной и испытательной базы СПП.

Таким образом, создание полноценного производства кристаллов элементной базы СПП 3-й группы возможно на базе предприятий микроэлектроники при условии их кооперации с предприятиями, обладающими опытом разработки СПП, испытательной и сборочной базой, а также существенных капитальных вложений в модернизацию и доукомплектацию технологической базы и последующей долговременной (не менее 5–7 лет) финансовой поддержкой развивающегося предприятия до выхода его на самоокупаемость.

Одним из примеров удачного развития предприятия микроэлектроники для освоения номенклатуры СПП 3-й группы является ЗАО "Группа-Кремний" (Брянск). В сотрудничестве с ГУП ВЭИ им. В.И. Ленина это предприятие за последние 3 года освоило весь комплекс технологий, специфичных для производства кристаллов IGBT и комплектных БВД. В 2004 г. в ЗАО "Группа-Кремний" успешно завершено ОКР на разработку серии кристаллов IGBT и комплектных БВД на ряд напряжений 1200, 1700, 2500 В и токи 50–120 А. Параметры кристаллов приведены в табл.2. Следует особо отметить, что освоен ряд кристаллов с относительно большими геометрическими размерами (аналоги произ-

водятся фирмой АВВ), причём их топология и контактные покрытия адаптированы для сборки в модули прижимной конструкции. Серийное производство кристаллов начинается с 2005 г. Можно с уверенностью утверждать, что при наличии финансирования, а также при использовании наработок ВЭИ ЗАО "Группа-Кремний" способно в течение 1–2 лет разработать и освоить производство кристаллов на напряжения 3300, 4500, 6500 В, т.е. ликвидировать отставание от ведущих зарубежных фирм по высоковольтному кристаллу.

Модули. В настоящее время имеется ряд предприятий (ОАО "Электровыпрямитель", ОАО "Контур" и др.), выпускающих модули паяной конструкции на основе импортных кристаллов, однако надёжностные показатели продукции этих предприятий пока далеки от импортных аналогов, хотя в последние два года наблюдается их ощутимый прогресс. На наш взгляд эта ситуация объясняется не только "техническим" отставанием российских предприятий от ведущих зарубежных фирм, но и рядом принципиальных проблем, присущих конструкции и технологии изготовления паяных модулей, рассмотренных выше. Действительно, даже признанные лидеры в области технологии паяных модулей – фирмы EUPEC, "Semikron", "Mitsubishi", занимающиеся этими проблемами второй десяток лет и вкладывающие в исследования и

Таблица 3

Параметры серии IGBT-модулей полностью прижимного типа [20]

Тип модуля	I_c , А	U_{ce} , В	$U_{ce\ at}$, В	R_{th} , °С/Вт	P_{tot} , Вт	Тип корпуса
МПТКИ-1400-18	1400	1800	3,0	0,015	7000	075
МПТКИ-1200-25	1200	2500	3,5	0,018	5550	075
МПТКИ-1200-33	1200	3300	4,0	0,014	7100	085
МПТКИ-800-65	800	6500	5,0	0,014	7100	085
МПТКИ-160-52	160	5200	6,0	0,014	1200	056

ботку полностью прижимного таблеточного модуля с использованием субмодульной технологии и оригинальных конструктивно-технологических решений в области прижимного контакта, ранее опробованных [25] в конструкции высоковольтных запираемых тиристоров (рис.6).

Таим образом, можно ожидать, что в течение 2005–2006 гг. в России будут разработаны и практически апробированы основные решения в части конструкции и технологии полностью прижимных модулей.

Перспективы развития современной элементной базы силовой электроники в России

Для ликвидации разрыва в области последних достижений транзисторной техники, модернизации серийно выпускаемых СПП, направленной на опережение уровня лучших зарубежных фирм, ГУП ВЭИ предлагает разработать и выполнить Комплексную Программу России "Создание современной элементной базы силовой электроники".

Целью программы является комплексная модернизация отечественной силовой полупроводниковой элементной базы и приведение её структуры и уровня по основным типам приборов в соответствие с требованиями современной техники.

В течение 7 лет (срока действия программы) должен быть создан опережающий задел в области элементной базы 1- и 2-й групп, ликвидировано или существенно сокращено техническое и технологическое отставание элементной базы российского производства от мирового уровня. Реализация этих предложений необходима для обеспечения экономической независимости России в секторе силовой электроники.

Элементная база 1-й группы (тиристоры и диоды):

- разработка и освоение в производстве модернизированной элементной базы тиристоров и диодов, соответствующей и опережающей мировой уровень;

- приведение качества ряда общепромышленных приборов до уровня требований к из-



а)

б)

Рис.6. Прижимной таблеточный IGBT-ключ субмодульной конструкции:

а – субмодуль с полностью прижимным IGBT-кристаллом; б – принцип сборки субмодулей в таблеточный металлокерамический корпус

разработки средства, на 2–3 порядка превышающие возможности российских заводов, могут обеспечить, например, циклоустойкость в "транспортном цикле" на уровне 20–30 тыс. циклов при перепаде температуры 100°С, тогда как требования разработчиков электроаппаратуры постоянно повышаются и в ряде случаев достигают уже 100–300 тыс. циклов в течение 20–25 лет эксплуатации.

Технологическим прорывом здесь может послужить освоение относительно дешёвой технологии полностью прижимной сборки модулей как таблеточной конструкции (как правило, одноключевых), так и с более сложными многоключевыми схемами, в том числе и модулей с изолированными основаниями. В области разработок такой технологии в России в последние 2 года заметен ощутимый прогресс.

Так, ОАО "Электровыпрямитель" ведёт работу по разработке и освоению производства серии IGBT-модулей полностью прижимного типа, таблеточной конструкции [20], параметры которых представлены в табл.3. Выпуск коммерческих партий этой продукции намечен на 2006 г.

ГУП ВЭИ проводит инициативную разра-

деляям спецтехники, прежде всего по сроку службы (25 лет);

– удовлетворение потребности внутреннего российского рынка, противодействие проникновению на российский рынок продукции иностранных корпораций;

– проведение работ по созданию и освоению производства силовых полупроводниковых модулей второго поколения на основе силовых интегральных схем на базе диодов, тиристоров, симисторов, оптоотиристоров и оптосимисторов на токи 100–1250 А, имеющих лучшие массогабаритные показатели и радиационную стойкость;

– модернизация производства силовых тиристоров, создание новых типов с улучшенными массогабаритными показателями и повышенной температурой;

– создание технологической базы и разработка сверхмощных тиристоров и диодов с диаметром выпрямительного элемента 125–150 мм;

– выход на мировой рынок и увеличение доли экспорта приборов не менее чем до 30 % объёма российского производства.

Элементная база 2-й группы (запираемые тиристоры, тиристоры-диоды, двуоперационные тиристоры):

– модернизация существующей технологической базы производства;

– разработка и освоение в производстве серии запираемых тиристоров с жёсткой коммутацией с комплектными диодами и драйверами, опережающей по характеристикам изделия ведущих зарубежных фирм–производителей подобной техники; формирование внутреннего рынка полностью управляемых тиристоров с жёсткой коммутацией и обеспечение его отечественной продукцией;

– формирование и обеспечение внутреннего рынка тиристорами-диодами, запираемыми тиристорами;

– разработка серии быстродействующих тиристоров-диодов и тиристоров с обратной проводимостью, опережающих по своим коммутационным характеристикам IGBT, но в отличие от последних соответствующих требованиям радиационной стойкости;

– продвижение российских СПП 2-й группы на мировой рынок.

Элементная база 3-й группы (IGBT, ти-

ристоры со статической индукцией (СИТ) и модули на их основе):

– разработка базовых технологий производства чипов IGBT, СИТ, БВД и модулей на их основе;

– создание полноценного отечественного кристалльного производства по основным типам продукции 3-го поколения с учётом компромисса "цена-качество";

– развитие производства и выход его на самокупаемость с одновременным сокращением отставания по уровню продукции от мировых аналогов;

– развитие ряда сборочных предприятий по производству модулей, с повышением качества продукции до мирового уровня.

Выполнение мероприятий предлагаемой программы позволит создать опережение и ликвидировать или существенно сократить техническое и технологическое отставание элементной базы российского производства в некоторых видах СПП от мирового уровня (рис.7), осуществить наполнение российского рынка приборами отечественного производства и продвижение российских СПП на мировой рынок (рис.8).

Принцип реализации

Работы должны координироваться единым координирующим центром (ГУП ВЭИ) по согласованию с предполагаемыми предприятиями-исполнителями.

Основные функции координирующего центра: определение "базовых" предприятий, совместные разработки новых приборов и технологий, специализация предприятий, налаживание связей между предприятиями по кооперации, аудит состояния производства и уровня качества продукции.

Принцип развития – формирование двух "базовых" предприятий-изготовителей по каждому значимому виду продукции.

Необходимость наличия не менее двух предприятий-поставщиков близкой по качеству и взаимозаменяемой продукции является сложившейся традицией на мировом рынке. Формирование двух базовых предприятий в каждом сегменте рынка позволит после завершения программы поддерживать и развивать производство без участия государства, используя принципы здоровой и цивилизованной конкуренции.

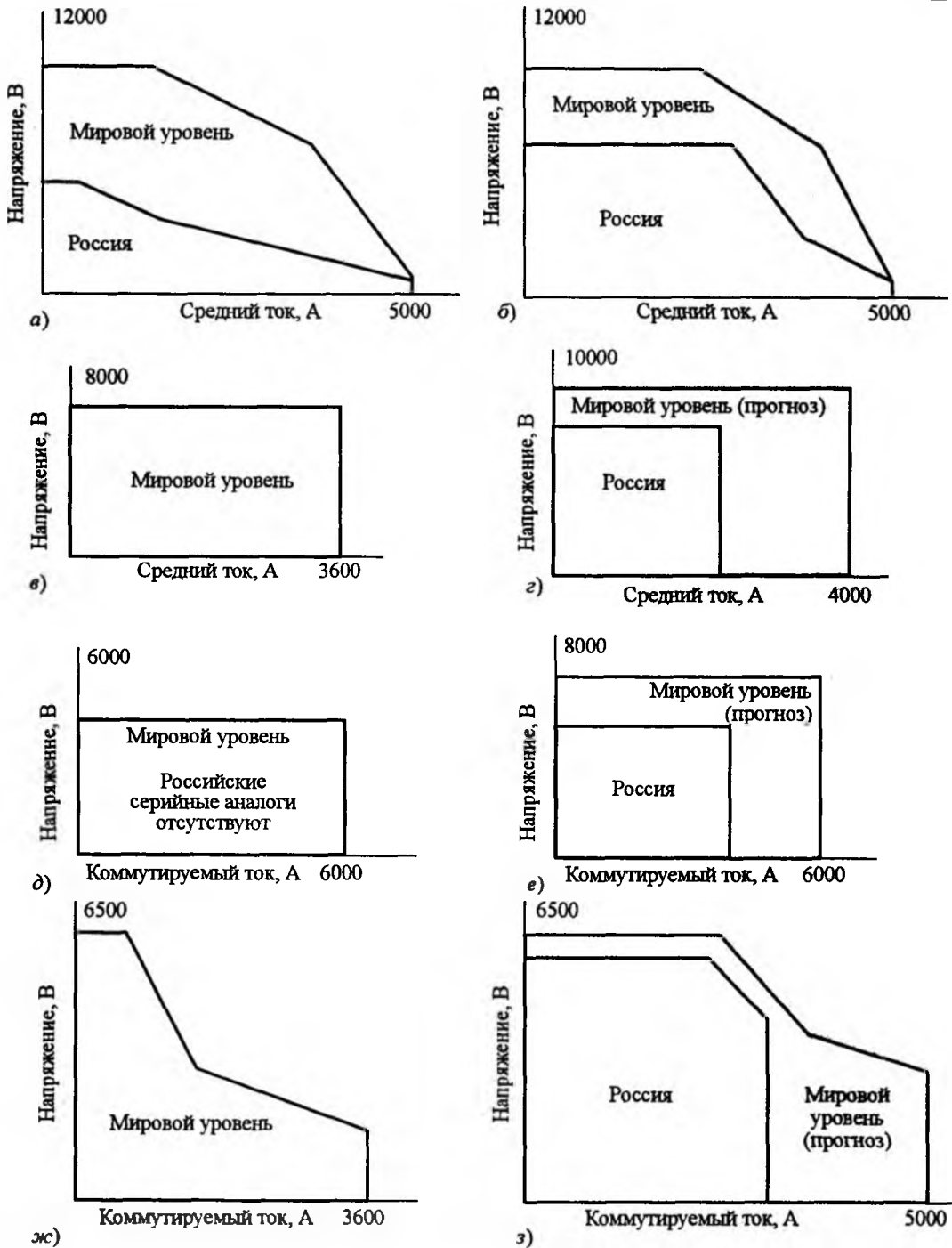


Рис.7. Состояние отечественной полупроводниковой элементной базы в сравнении с мировым уровнем (современное а, в, д, ж) и прогнозируемое по результатам выполнения предлагаемой программы (б, г, е, з):

а, б – мощные тиристоры и диоды; в, г – мощные оптоотиристоры с элементами самозащиты; д, е – IGBT (запираемые тиристоры с жёстким управлением); ж, з – IGBT-модули

Участники Программы

Развитие СПП 1-й группы целесообразно в ОАО "Электровыпрямитель" (Саранск), ЗАО "Протон-Электротекс" (Орёл), на Опытном заводе ВЭИ (Москва).

Развитие СПП 2-й группы планируется в ОАО "Электровыпрямитель" (Саранск) и

ОАО "Орбита" (Саранск) с частичной модернизацией их технологической и испытательной базы, на Опытном заводе ВЭИ (Москва).

Развитие производства чипов элементной базы 3-й группы планируется на базе ОАО "Ангстрем" (Зеленоград) и ЗАО "Группа Кремний" (Брянск).

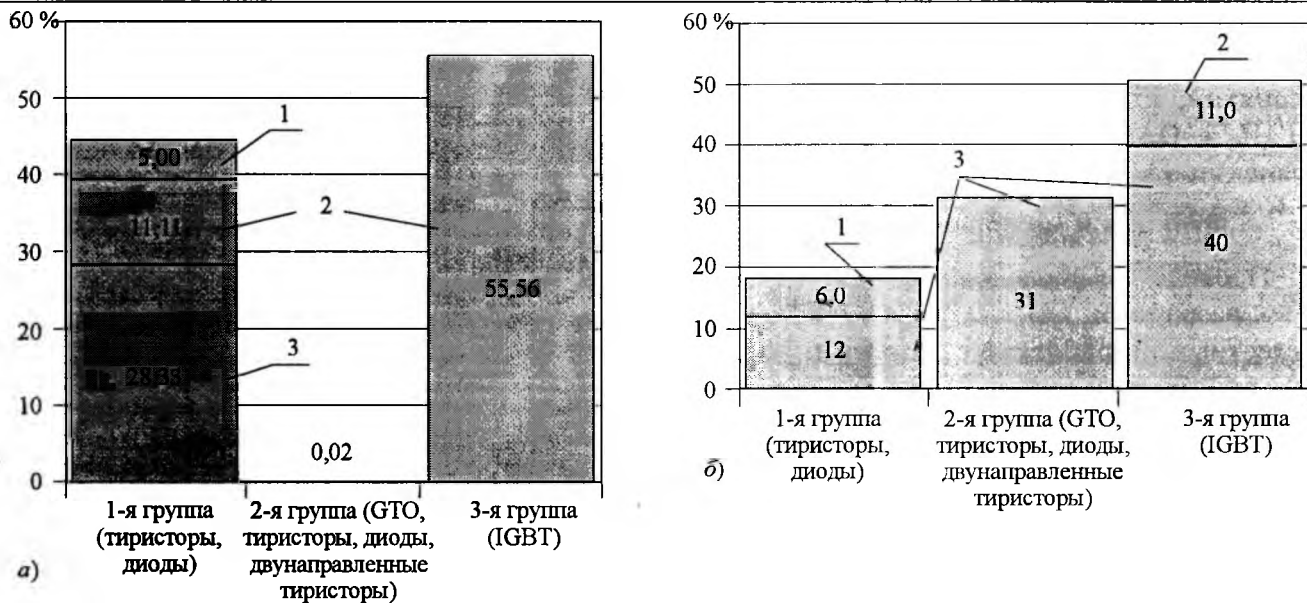


Рис.8. Структура рынка СПП в России – современное состояние (а) и прогноз по результатам выполнения предлагаемой программы (б):

а – 2004 г., общий объём 1,8 млрд. руб.; б – 2012 г., общий объём 12–15 млрд. руб. (в ценах 2004 г.); 1 – экспорт; 2 – импорт; 3 – собственное производство и потребление

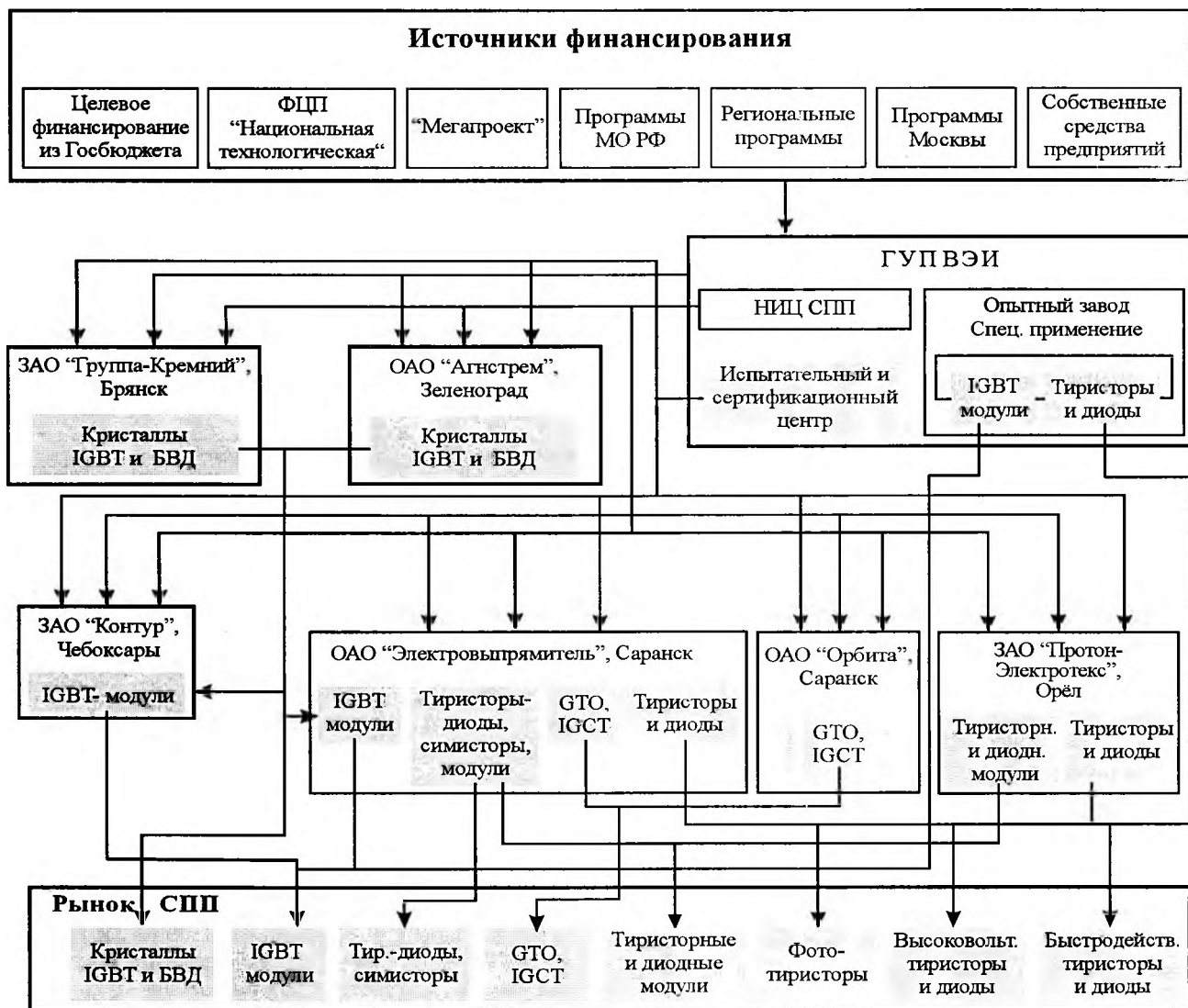


Рис.9. Структурная схема взаимодействия участников программы в ходе её выполнения

Развитие производства модулей, комплектуемых IGBT кристаллами "базовых" предприятий, планируется на Опытном заводе ВЭИ, в ОАО "Электровыпрямитель" (Саранск) и ЗАО "Контур" (Чебоксары).

Функции и мероприятия ГУП ВЭИ

Проведение исследований и создание новых разработок СПП, а также участие в совместных разработках с базовыми предприятиями по всем типам СПП.

На базе ГУП ВЭИ создание единого испытательного центра для аттестации продукции предприятий и независимого контроля за её качеством.

На базе опытного производства ГУП ВЭИ создание пилотной линии по сборке IGBT-модулей полностью прижимного типа для использования в изделиях спецтехники.

На базе Опытного завода ГУП ВЭИ создание производства СПП 1-й группы, ориентированных на применение в изделиях спецтехники (повышенная надёжность, радиационная стойкость, специальные требования по режимам эксплуатации и т.д).

На рис.9 приведена предполагаемая структурная схема взаимодействия участников программы в ходе её выполнения.

Программа должна носить комплексный характер и охватывать работы по созданию и модернизации полупроводниковых приборов, разработке "прорывных" технологий новой элементной базы, закупке и разработке технологического оборудования для модернизации и комплектации технологической базы производства, обеспечению производства необходимыми материалами и комплектующими изделиями, сертификации, подготовке кадров.

Объём финансирования и срок выполнения программы

Срок выполнения работ по программе – 7 лет. Общие затраты на выполнение Программы должны составить около 4,5 млрд. руб., в том числе капитальные вложения в модернизацию технологической и испытательной базы предприятий – около 3,2 млрд. руб. Рис.10 иллюстрирует предлагаемое распределение средств финансирования для выполнения важнейших задач программы.

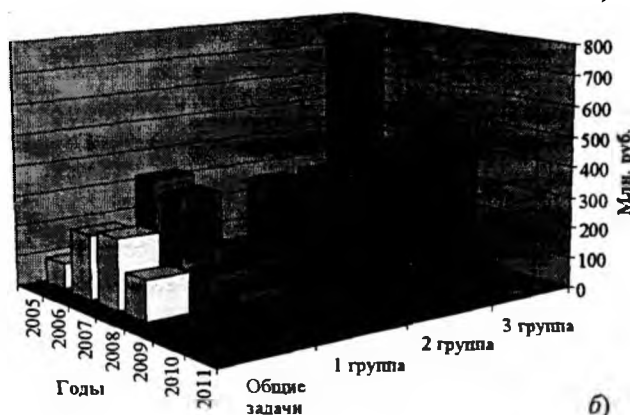
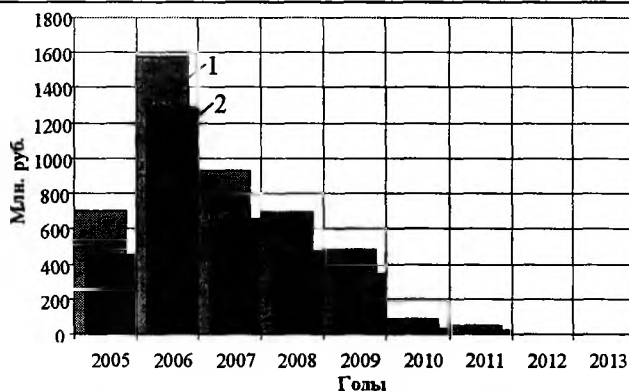


Рис.10. Распределение затрат на выполнение важнейших задач программы:

а – распределение затрат (1 – всего, 2 – на модернизацию и поддержку технологической и испытательной базы); б – затраты на развитие СПП 1-, 2- и 3-й групп

Список литературы

1. Dom J., Kellner U., Niedernostheide F.-J., Schulze H.-J. Light triggered thyristors with integrated protection // Power Electronics Europe. 2002. Issue 2. P.29–35.
2. Niedernostheide F.-J., Schulze H.-J., Kellner-Werdehausen U. Self-protected high-power thyristors // Proc. PCIM 2001. Power Conversion, Nuernberg. P.51–56.
3. Лазарев Н.С., Локтаев Ю.М., Лытаев Р.А. и др. Оценка состояния тиристоров Т 373-1250 в блоках БВПМ 800/120 на Выборгской подстанции // Известия НИИ постоянного тока. С.-Петербург, 2004. № 2 60. С.98–119.
4. Дерменжи П.Г., Колюхов А.В., Лапшина И.Н. и др. К вопросу о расширении областей безопасной работы мощных тиристоров // Тез. докладов конф. "Современное состояние развития приборов силовой электроники и преобразовательной техники". Саранск: ОАО Электровыпрямитель. 2004. С. 15–16.
5. Евсеев Ю.А., Дерменжи Е.П., Тетерьцова Н.А. Силовые интегральные схемы // Электротехника. 2002. № 12. С.2–7.
6. Semenov A.Y., Stolbunov V.S., Surma A.M., Kovrov A.M. Series of fast thyristors with controllable reverse recovered charge and technological complex of proton irradiation used for control of their switching characteristics // PCIM'2003 Proceedings. 2003.

7. Губарев В.Н., Сурма А.М., Ковров А.М., Семенов А.Ю. Исследование характеристик обратного восстановления мощных быстродействующих тиристоров, облученных электронами и протонами // Прикладная физика. 2001. № 4. С.85–92.

8. Евсеев Ю.А. Полупроводниковые приборы для мощных высоковольтных преобразовательных устройств. М.: Энергия. 1978.

9. Пат. 2091907 РФ. Полупроводниковый выпрямительный модуль / Евсеев Ю.А., Тетерьева Н.А., Рачинский Л.Я. и др.

10. Satoh K., Yamamoto M., Nakagawa T., Kawakami A. A new high power device GCT (Gate Commutated Turn-off) thyristor // EPE'97, Trondheim. P. 2070–2075.

11. Gruening H.E., Odegard B. High performance low cost MVA inverters realized with Integrated Gate Commutated Thyristors (IGST) // EPE'97, Trondheim. P. 2060–2065.

12. Sweet M. et al. Recent Advancements in Power Semiconductors // Power Electronics Europe. 2002. 6. P.28–36.

13. Takahashi H. et al. Carrier stored Trench-Gate Bipolar Transistor (CSTBT) – A Novel Power Device for High Voltage Application // ISPSD. 1996. P. 349.

14. Galster N., Vetsch H., Roth M. et al. The Design, Application and Production-Testing of High-Power Fast Recovery Diodes // PCIM'1998 Proceedings.

15. Potapchouk V.A. et al. Distinctions of Lifetime Damage in Silicon Diode Layers at Various Radiation Processing: Influence on Power Losses and Softness of Reverse Recovery Characteristic // PCIM'2002 Proceedings. 2002. P. 293–299.

16. Surma A.M., Prikhodko A.I., Pokrovsky S.V. Fast high power switch-emitter commutated thyristor // Conf. Proc. PEVD'98, London. 1998. P. 232.

17. Rybin S., Surma A., Ladygin E. Comparison of the switching characteristics of high-voltage emitter commutated thyristors, irradiated by electrons and protons // Proc EPE'2001, Graz, 2001.

18. Surma A.M., Semenov A.Y. Fast emitter commutated thyristor for current-fed frequency converters, – Proc. EPE-PEMC2002, Dubrovnik, 2002.

19. Сурма А.М., Ванчикова М.А., Губарев В. Н. и др. ECT – новый полупроводниковый быстродействующий ключ высокой мощности в сравнении с IGBT и IGCT // Сб. докл. V симпозиума "Электротехника 2010". М., 1999. Т.2. С. 248.

20. Мартыненко В.А. Состояние и перспектива развития силовых полупроводниковых приборов в ОАО "Электровыпрямитель" // Тез. докладов конф. "Современное состояние развития приборов силовой электроники и преобразовательной техники". Саранск: ОАО "Электровыпрямитель". 2004. С. 3–7.

21. Kitagawa M. et al. A 4500 V injection enhanced Insulated Gate Bipolar Transistor operating in a mode similar to a thyristor // IEDM, 1993. P. 679.

22. Baliga B.J. The MOS-gate emitter switched thyristor // IEEE Electron Dev. Lett. 1990. EDL-11. P. 75.

23. Evans M.J., Wakeman F.J., Irons R.I. et al. Design Concepts of a bondless pressure contact IGBT // EPE99, Lausanne, 1999.

24. Murakami K. et al. Development in 4.5kV Press Pack IGBT for High Power Electronics Applications // PCIM2001 – POWER ELECTRONICS. 2001. Vol.43. P. 45–49.

25. Prikhodko A., Surma A. Proton irradiated 6kV GTO with full pressure contacts // EPE'97 Proceedings, 1997. Trondheim. P. 1.507–1.512.

Элементы силовой электроники

КРЫМКО М.М.

Описаны элементы и устройства силовой электроники, разработанные и выпускаемые в настоящее время в ФГУП "НПП "Пульсар".

В настоящее время в ФГУП "НПП "Пульсар" разработано и освоено производство более 20 типов переключательных мощных МДП (металл-диэлектрических полупроводниковых) транзисторов на рабочие напряжения до 1000 В. Это полевые кремниевые МДП-транзисторы серий 2П762, 2П7118, 42П816 (табл.1–3). Эти приборы охватывают диапазон переключаемых напряжений от 30 до 1000 В, выпускаются в унифицированных металлокерамических корпусах КТ-9, КТ-57 и КТ-61А. К этой же группе приборов относится сдвоенный мощный *n*-канальный МДП-транзистор на переключаемые напряжения 100 и 200 В (табл.4), разработка ко-

торого закончена в 2002 г. Он выпускается в металлокерамическом корпусе 427.8-1.

В конце 90-х годов на нашем предприятии был выполнен цикл научно-исследовательских работ, позволивший создать технологии изготовления кремниевых мощных биполярных транзисторов с изолированным затвором. К настоящему времени разработаны две группы приборов 2Е701 и 2Е712 на переключаемые напряжения 500–1200 В с временами нарастания менее 250 мкс и временами спада менее 500 мкс (табл.5, 6).

С 2002 г. предприятие начало выпуск серии быстровосстанавливающихся кремниевых диодов серий 2Д714, 2Д237, 2Д2992. Их

Таблица 1

Условное обозначение транзистора	Код ОКП	Основные и классификационные параметры			Условное обозначение корпуса по ГОСТ 18472
		Начальный ток стока, $I_{с\text{нач}}$, мА, не более ($U_{з.и} = 0$; $U_{с.и} = 100$ В для 2П762А, 2П762Б1, 2П762В, 2П762Г1, 2П762К; $U_{с.и} = 150$ В для 2П762Д, 2П762Е1, 2П762Ж; $U_{с.и} = 200$ В для 2П762И2, 2П762Л, 2П762Н; $U_{с.и} = 60$ В для 2П762М)	Сопротивление сток-исток в открытом состоянии $R_{с.и\text{отк}}$, Ом, не более ($U_{з.и} = 15$ В; $I_c = 30$ А для 2П762А, 2П762Б1, 2П762В, 2П762Г1, 2П762Д, 2П762Е1; $I_c = 20$ А для 2П762Ж; $I_c = 15$ А для 2П762И2, 2П762Н; $I_c = 5$ А для 2П762К, 2П762Л; $I_c = 35$ А для 2П762М)	Максимально допустимое напряжение сток-исток, $U_{с.и\text{мах}}$, В	
2П762А	63 4125 7255	2,0	0,085	100	КТ-57
2П762Б1	63 4125 7285	2,0	0,085	100	КТ-9
2П762В	63 4125 7265	2,0	0,100	100	КТ-57
2П762Г1	63 4125 7295	2,0	0,100	100	КТ-9
2П762Д	64 4125 7275	2,0	0,100	150	КТ-57
2П762Е1	63 4125 7305	2,0	0,100	150	КТ-9
2П762Ж	63 4125 7315	2,0	0,200	150	КТ-57
2П762И2	63 4125 7325	2,0	0,250	200	КТ-19
2П762К	63 4125 9135	1,0	0,200	100	КТ-57
2П762Л	63 4125 9145	1,0	0,500	200	КТ-57
2П762М	63 4125 9155	2,0	0,050	60	КТ-57
2П762Н	63 4125 9165	2,0	0,200	200	КТ-57

Таблица 2

Условное обозначение транзистора	Код ОКП	Основные и классификационные параметры			Условное обозначение корпуса по ГОСТ 18472
		Начальный ток стока, $I_{с\text{нач}}$, мА, не более ($U_{з.и} = 0$, $U_{с.и} = 30$ В для 2П7118А; $U_{с.и} = 40$ В для 2П7118Б; $U_{с.и} = 50$ В для 2П7118В; $U_{с.и} = 60$ В для 2П7118Г; $U_{с.и} = 100$ В для 2П7118Д, 2П118Е; $U_{с.и} = 150$ В для 2П7118Ж, 2П7118И; $U_{с.и} = 200$ для 2П7118К, 2П7118Л)	Сопротивление сток-исток в открытом состоянии, $R_{с.и\text{отк}}$, Ом, не более ($U_{з.и} = 15$ В; $I_c = 35$ А для 2П7118А, 2П7118Б, 2П7118В, 2П7118Г, 2П7118Д; $I_c = 30$ А для 2П7118Е, 2П7118Ж, 2П7118И; $I_c = 20$ А для 2П7118К; $I_c = 15$ А для 2П7118Л)	Максимально допустимое напряжение сток-исток, $U_{с.и\text{мах}}$, В	
2П7118А	63 4127 8065	0,5	0,025	30	КТ-57
2П7118Б	63 4127 8075	0,5	0,035	40	КТ-57
2П7118В	63 4127 8085	0,5	0,040	50	КТ-57
2П7118Г	63 4127 8095	0,5	0,050	60	КТ-57
2П7118Д	63 4127 8105	0,5	0,075	100	КТ-57
2П7118Е	63 4127 8115	0,5	0,085	100	КТ-57
2П7118Ж	63 4127 8125	0,5	0,100	150	КТ-57
2П7118И	63 4127 8135	0,5	0,120	150	КТ-57
2П7118К	63 4127 8145	0,5	0,160	200	КТ-57
2П7118Л	63 4127 80155	0,5	0,200	200	КТ-57

Таблица 3

Условное обозначение транзистора	Код ОКП	Основные и классификационные параметры				Условное обозначение корпуса по ГОСТ 18472
		Начальный ток стока, $I_{с.нач}$, мА, не более ($U_{з.и} = 25$ В, $U_{з.и} = 0$)	Ток стока I_c , А, не менее ($U_{с.и} = 25$ В, $U_{з.и} = 20$ В для 2П816А, 2П816Б, 2П816В, 2П816Г $U_{с.и} = 10$ В, $U_{з.и} = 15$ В для 2П816Д $U_{с.и} = 15$ В, $U_{з.и} = 15$ В для 2П816Е, 2П816Ж, 2П816И)	Сопротивление сток-исток в открытом состоянии, $R_{с.и.отк.}$ Ом, не более ($U_{з.и} = 20$ В, $I_c = 1$ А)	Максимально допустимое напряжение сток-исток, $U_{с.и.мах.}$ В	
2П816А		2,0	20	1,0	800	КТ-61А
2П816Б		2,0	20	1,0	100	КТ-61А
2П816В		1,0	18	1,2	800	КТ-61А
2П816Г		1,0	18	1,2	100	КТ-61А
2П816Д		2,0	20	0,3	400	КТ-61А
2П816Е		2,0	16	0,8	500	КТ-61А
2П816Ж		2,0	16	0,5	400	КТ-61А
2П816И		2,0	12	1,0	500	КТ-61А

Таблица 4

Условное обозначение транзистора	Код ОКП	Основные и классификационные параметры			
		Начальный ток стока $I_{с.нач}$, мА, не более ($U_{з.и} = 0$; $U_{с.и} = 150$ В для 2П712ОАС, 2П712ОВС, 2П712ОДС, $U_{с.и} = 200$ В для 2П712ОБС, 2П712ОГС, 2П712ОЕС)	Сопротивление сток-исток в открытом состоянии $R_{с.и.отк.}$ Ом, не более ($U_{з.и} = 15$ В, $I_c = 30$ А)	Время обратного восстановления диода, $t_{вос.обр.}$ нс, не более ($I_{пр} = 1$ А, $I_{обр} = 1$ А, $I_{отсч} = 0,5$ А)	Максимально допустимое напряжение сток-исток, $U_{с.и.мах.}$ В
2П712ОАС	63 4127 8915	2,0	0,2	500	150
2П712ОБС	63 4127 8925	2,0	0,5	500	200
2П712ОВС	63 4128 3455	2,0	0,2	500	150
2П712ОГС	63 4128 3465	2,0	0,5	500	200
2П712ОДС	63 4128 3475	2,0	0,2	50	150
2П712ОЕС	63 4128 3485	2,0	0,5	50	200

Таблица 5

Условное обозначение транзистора	Код ОКП	Основные и классификационные параметры		
		Начальный ток коллектор-эмиттер $I_{к.э.к.}$, мА, не более ($U_{к.э} = 500$ В; $U_{з.э} = 0$ для 2Е701А, 2Е701В $U_{к.э} = 700$ В; $U_{з.э} = 0$ для 2Е701Б, 2Е701Г)	Напряжение насыщения коллектор-эмиттер $U_{к.э.нас.}$ В, не более ($U_{з.э} = 15$ В, $I_k = 10$ А, $\tau_n \leq 500$ мкс, $Q \leq 100$)	Условное обозначение корпуса по ГОСТ 18472
2Е701А		1,0	2,5	КТ-57
2Е701Б		1,0	2,5	КТ-57
2Е701В		1,0	3,5	КТ-57
2Е701Г		1,0	3,5	КТ-57

Таблица 6

Условное обозначение транзистора	Код ОКП	Основные и классификационные параметры		
		Начальный ток коллектор-эмиттер $I_{кзк}$, мА, не более ($U_{кэ} = 800$ В; $U_{ээ} = 0$ для 2Е712А, 2Е712А1 $U_{кэ} = 1000$ В; $U_{ээ} = 0$ для 2Е712Б, 2Е712Б1 $U_{кэ} = 1200$ В; $U_{ээ} = 0$ для 2Е712В, 2Е712В1)	Напряжение насыщения коллектор-эмиттер $U_{кэ нас.}$, В, не более ($U_{ээ} = 15$ В, $I_k = 20$ А, для 2Е712А1, 2Е712Б1, 2Е712В1 $U_{ээ} = 15$ В, $I_k = 50$ А для 2Е712А, 2Е712Б, 2Е712В)	Условное обозначение корпуса по ГОСТ 18472
2Е712А		1,0	4,0	КТ-61
2Е712Б		1,0	4,0	КТ-61
2Е712В		1,0	4,0	КТ-61
2Е712А1		1,0	3,0	КТ-57
2Е712Б1		1,0	3,0	КТ-57
2Е712В1		1,0	3,0	КТ-57

Таблица 7

Параметр (режим измерения)	Норма, не более		Температура среды $t_{окр}$, °С
	2Д714АС1	2Д714АС2	
Постоянное прямое напряжение диода $U_{пр}$, В ($I_{пр} = 10$ мА)	0,9	0,9	25
	1,3	1,3	-60
Постоянный обратный ток диода $I_{обр}$, мкА ($U_{обр} = 70$ В)	3,0	3,0	25
	10,0	10,0	85
Время восстановления обратного тока диода $t_{вос.обр}$, нс ($I_{пр.н} = 10$ мА; $I_{обр.н} = 10$ мА; $I_{обр.отсч} = 1,0$ мА)	6	6	25

Таблица 8

Параметр (режим измерения)	Норма, не более		Температура среды $t_{окр}$, °С
	2Д237А1/ПМ	2Д237Б1/ПМ	
Постоянное прямое напряжение диода $U_{пр}$, В ($I_{пр} = 1$ А)	1,25	1,25	25
	1,55	1,55	-60
Постоянный* обратный ток диода $I_{обр}$, мкА ($U_{обр} = 100$ В)	1		25
	300		125
($U_{обр} = 200$ В)		1	25
		300	125
($U_{обр} = 50$ В)	400		155
($U_{обр} = 100$ В)		400	155
Время обратного восстановления тока диода $t_{вос.обр}$, нс ($I_{обр.н} = 1$ А; $I_{пр.н} = 1$ А; $I_{обр.отсч} = 0,5$ А)	50	50	25

* Параметр, проверяемый на пластине в нормальных климатических условиях.

Таблица 9

Параметр (режим измерения)	Норма, не более			Температура корпуса $t_{кор}$, °C
	2Д2992А/ПМ 2Д2992А1/ПМ	2Д2992Б/ПМ, 2Д2992Б1/ПМ	2Д2992В/ПМ 2Д2992В1/ПМ	
Постоянный обратный ток диода* $I_{обр}$, мА $U_{обр} = 200$ В	0,1 15			25 125
$U_{обр} = 100$ В		0,1 15		25 125
$U_{обр} = 50$ В			0,1 15	25 125
Постоянное прямое напряжение диода $U_{пр}$, В $I_{пр} = 30$ А	0,95 1,5	0,95 1,5	0,95 1,5	25 -60
Стабильность постоянного обратного тока $\Delta I_{обр}$, мкА	20	20	20	25
Время обратного восстановления диода $t_{вос\ обр}$, нс ($I_{пр.н} = 1$ А; $I_{обр.н} = 1$ А; $I_{обр\ отсч} = 0,5$ А)	100	100	100	25

* Параметр измеряется на пластине.

Таблица 10

Параметр	Норма	
	не менее	не более
Выходное напряжение высокого уровня по потенциальному и токовому входам ¹ U_{OH} , В	8	UCC1
Выходное напряжение низкого уровня по потенциальному и токовому входам U_{OL} , В		1,0
Средний статический ток потребления ² I_{CCAV} , мА		15,0
Время нарастания (спада) выходного напряжения ³ $t_r(t_f)$, не при $C_L = 12000$ пФ; $R_L = 1,0$ Ом (послед.) – при одном источнике питания – при двух источниках питания		150(150) 200(200)
Время задержки включения (выключения) ³ $t_{DHL}(t_{DLH})$, не при $C_L = 12000$ пФ; $R_L = 1,0$ Ом – при одном источнике питания – при двух источниках питания		70(70) 70(70)
Напряжение первого источника питания ⁴ U_{CC1} , В – при одном источнике питания – при двух источниках питания	12,5 12,5	22,0 16,5
Напряжение второго источника питания ⁴ U_{CC2} , В	0	-5,5
Напряжение высокого уровня по потенциальному входу ⁴ U_{IH} , В	2,5	22,0
Напряжение низкого уровня по потенциальному входу ⁴ U_{IL} , В	-0,3	1,0
Максимальная частота переключений ⁴ f_{max} , кГц		200

Примечания: 1. Максимальное значение U_{OH} определяется $U_{CC1} = 15$ В.
2. Средний ток потребления определяется соотношением $I_{CCAV} = (I_{CCH} + I_{CCL})/2$, где I_{CCH} – ток потребления при высоком уровне входного напряжения; I_{CCL} – ток потребления при низком уровне входного напряжения.
3. Время нарастания (спада) выходного напряжения и время задержки включения (выключения) приведены при управлении по токовому и потенциальному входам.
4. Параметры приведены для предельно допустимого режима.

Таблица 11

Параметр	Норма		Примечание
	не менее	не более	
Напряжение низкого уровня по основному выходу U_{OL1} , В		0,5	При включенном выходном транзисторе
Ток низкого уровня по основному выходу I_{OL1} , мА	1		–
Ток низкого уровня по выходу индикатора минимального тока I_{OL2} , мА	7	12	При включенном индикаторе минимального тока
Ток низкого уровня по выходу индикатора блокировки I_{OL3} , мА	7	12	При наличии блокировки
Ток высокого уровня по выходу индикатора минимального тока I_{OL2} , мА		1,0	При отключенном индикаторе минимального тока
Ток высокого уровня по выходу индикатора блокировки I_{OL3} , мА		1,0	При отсутствии блокировки
Время задержки формирования низкого (высокого) уровня напряжения на основном выходе при включении (отключении) управляющего сигнала t_{PHL} (t_{PLH}), нс		200	При отсутствии C_d
Время задержки формирования низкого (высокого) уровня напряжения на основном выходе при включении (отключении) управляющего сигнала t_{PHL} (t_{PLH}), нс	200	300	При наличии $C_d \leq 10$ нФ
Время задержки формирования низкого уровня напряжения на основном выходе при подаче дискретных сигналов на вход любой из защит (тепловой защиты, токовой отсечки) t_p , нс		500	
Время срабатывания при входном напряжении, большем граничного уровня ФВТХ $t_{ГПР}$, с	*	*	При $U_I < U_{I\text{пор}}$ $t_{ГПР} = \infty$, где U_I – напряжение на управляющем входе
Напряжение первого источника питания U_{CC1} , В		16,5	Для предельно допустимого режима
Напряжение второго источника питания U_{CC2} , В	0	–5,5	–
Потребляемая мощность P_{CC} , мВт		400	–
* – $t_{ГПР}$ определяется выражением: $\frac{4}{\left(\frac{U_I}{U_{I\text{пор}}}\right)^2} \leq t_{ГПР} \leq \frac{12}{\left(\frac{U_I}{U_{I\text{пор}}}\right)^2}.$			

основные параметры приведены в табл. 7–9.

К интегральным схемам для силовой электроники, выпускаемым на нашем предприятии, следует отнести прежде всего ИС 286 ЕП1АПМ и 286 ЕП2АПМ (табл. 10). Эти приборы были разработаны и выпускались ранее на Ташкентском заводе "Фотон".

Принципиально новым классом изделий являются интегральные схемы серии 1474, предназначенные для управления и защиты силовых транзисторных ключей и распределительных электрических цепей.

Интегральная микросхема (ИМС) типа 1473АП1Т предназначена для управления

силовыми транзисторными ключами на основе МОП и IGBT приборов (IGBT). Её основные особенности:

- двухполярное напряжение питания;
- возможность введения регулируемой задержки включений, что исключает возникновение сквозных токов в мостовых и полумостовых регуляторах и преобразователях;
- наличие трёх управляющих входов (потенциального, токового и оптронного);
- наличие внутреннего реле напряжения;
- микросхема "активно" удерживает выходной потенциал на низком уровне, даже в отсутствии питания.

Питание микросхемы 1474АП1Т осуществляется от одного либо двух источников питания:

- $U_{CC1} = 15 \text{ В}$;
- $U_{CC1} = 15 \text{ В}$, $U_{CC2} = -5 \text{ В}$;

ИМС 1474 АП1Т выполнены в металлокерамических корпусах 402.16-34, 4112.16-3. Основные электрические параметры микросхемы приведены в табл.10.

ИМС 1474 ХХ1Т предназначена для защиты силовых транзисторных ключей и формирования времятоковых характеристик. Основные особенности ИМС 1474 ХХ1Т:

- обеспечивает защиту транзисторных ключей и распределительных электрических цепей от аварийных перегрузок по току и температуре;
- содержит формирователь времятоковых характеристик, определяющий время срабатывания защиты в зависимости от уровня перегрузок;
- содержит реле напряжения питания, которое блокирует работу микросхемы при недостаточном напряжении питания.

Питание ИМС осуществляется от двух источников питания $U_{CC1} = 15 \text{ В}$, $U_{CC2} = -5 \text{ В}$.

Конструктивно ИМС 1474ХХ1Т выполнены в корпусе 4112.16-3. Основные электрические характеристики приведены в табл.11.

Несмотря на трудный период 90-х годов нашему предприятию удалось выполнить в значительной степени задельную работу по разработке твердотельных разумных аппаратов защиты и коммутации (АЗКБ) 1441ХХ1П и 441ХХ2П, предназначенных для работы в составе авиационной электротехнической аппаратуры. Эти изделия изготовлены на токи коммутации 10 и 25 А на основе мощных МДП-транзисторов. АЗКБ обладает полным набором защит и диагностики.

В настоящее время на предприятии активно продолжают работы по разработке новых изделий силовой электроники. В стадии разработки находятся:

- комплект ИМС защиты и управления силовых МДП-транзисторов и ИЗБТ-приборов, согласующего преобразователя для двухсторонней оптической связи с микросхемой защиты и управления; разрабатываемые микросхемы являются функциональными аналогами многокристалльной ИМС HCPL 316У фирмы "Hewlett Packard" (США);
- силовые модули на основе мощных кремниевых МДП-транзисторов на коммутируемые напряжения 200–300 В и токи коммутации до 200 А;
- модули вторичных источников питания на мощности 100 и 300 Вт.

ЗАО "Группа-Кремний": развитая собственная материальная база – гарантия технологической и экономической независимости предприятия

ДАНЦЕВ О.Н., ГРОМОВ В.И.

Наличие полного технологического цикла производства ИС, включая производство исходных структур, кристалльное, сборочное, инструментальное и машиностроительное производство, испытательного, маркетингового и бытового центров, отработанная возможность оперативного перераспределения объемов этих производств в соответствии с изменениями запросов рынка, а также наличие собственного научно-исследовательского и конструкторского центра – гарантия технологической и экономической независимости микроэлектронного предприятия.

ЗАО "Группа-Кремний" (до 1997 г. – ОАО "Кремний", а ещё ранее – Брянский завод полупроводниковых приборов) было создано в 1958 г.

For the benefit of the microelectronic enterprise the guarantee of its technological and economical independence is the availability of:

- the complete fabrication cycle of microelectronic integrated circuits production, including the initial structures production; the crystal, assembly, instrumental and machine-building production; the experimental, market and sale centers;
- the well-trying possibility of the operated redistribution of these productions volumes in accordance with the fluctuations of the market needs;
- the own scientific-research and design centers.

Сначала основным направлением деятельности предприятия было серийное производство сплавных германиевых транзисторов.

Современные тенденции развития элементной базы силовой электроники и состояние разработок на "Воронежском заводе полупроводниковых приборов"

ГЛЕБОВ С.С., ЖУЛИКОВ А.И., ФОМЕНКО Ю.Л.

ООО "ВЗПП-С" (Воронеж)

Описаны современное состояние разработок элементной базы силовой электроники в ООО "ВЗПП-С", охватывающих широкий спектр диодов Шоттки, быстро восстанавливающихся диодов и полевых транзисторов, и вопросы обеспечения новыми типами герметичных корпусов, в том числе для поверхностного монтажа и монтажа в отверстие. В 2004 г. предприятие завершило разработку и освоение более 70 типоминусов указанных изделий.

Contemporary status of development of elements basis for power electronics at "VZPP" has been described. These products include a wide range of Schottky diodes, fast recovery diodes and MOSFET transistors. These issues are reviewed together with problems concerning delivery of new types of hermetically sealed packages, including SMD packages and packages for insertion. In 2004 the enterprise accomplishes development and commercial production of more than 70 types of above mentioned products.

Воронежский завод полупроводниковых приборов (с 2004 г. правопреемником которого является ООО "ВЗПП-С") с 1970 г. является одним из крупнейших предприятий РФ по разработке и производству элементной базы микроэлектроники специального назначения.

В настоящее время завод поставляет более 200 типов полупроводниковых приборов и ИС.

В течение последних нескольких лет был разработан ряд новых изделий силовой электроники.

Для создания импульсных источников питания специального применения в течение 2001–2002 гг. совместно с КТЦ "Электроника" разработаны и освоены в серийном производстве диоды Шоттки и быстро восстанавливающиеся диоды в герметичном металло-керамическом корпусе с изолированным основанием КТ-32А с основными электрическими параметрами: прямой средний ток $I_{пр.ср\ max} = 15\ A$; постоянное обратное напряжение – $U_{обр\ max} = 200, 300, 600\ В$; температура перехода – $T_{пер\ max} = 150^\circ C$.

Для обеспечения функциональных возможностей разработанных диодов, обеспечения высоких технико-экономических показателей и надёжности изделий применены оригинальные конструкторско-технологические решения: технология формирования барьера

Шоттки на основе силицида Ni-Pt с технологией регулировки высоты барьера и обратных токов, а также новая технология стабилизации параметров, обеспечивающая высокую устойчивость при работе на индуктивную нагрузку.

С целью обеспечения требуемого времени обратного восстановления быстро восстанавливающихся диодов разработана оригинальная комбинированная технология снижения времени жизни неосновных носителей заряда путём диффузии атомов Pt и электронного облучения.

Выбранные конструктивно-технологические решения позволили обеспечить задел для последующих разработок.

В 2004 г. закончена разработка около 80 типов изделий силовой электроники (табл.1–3, рисунок). Изделия разрабатываются в бескорпусном исполнении и корпусах КТ-56, ТО-204АА, SMD-1, SMD-0,5, SMD-2, ТО-220, ДРАК, D²РАК.

В перечне содержится также номенклатура 4 ОКР по разработке и освоению элементной базы силовой электроники, завершённых в 2004 г. Среди них 16 типоминусов диодов Шоттки с диапазонами токов от 1 до 2×15 А и обратного напряжения от 15 до 200 В с барьерами Шоттки на основе Cr, Mo и Ni-Pt, 6 типоминусов быстро восстанавлива-

Диоды Шоттки, разработанные и освоенные ООО "ВЗПП-С" в 2004 г.

Тип изделий	Ближайший аналог	Основные параметры			Тип корпуса
		$U_{обр}$, В	$I_{пр}$, А	$U_{пр}$, В	
Диоды Шоттки в металлопластмассовых корпусах		25–200	5,0	0,65–1,0	КТ-28-2 (ТО-220)
		25–200	5,0	0,65–1,0	КТ-90 (D2ПАК)
		25–200	20,0	0,7–1,15	КТ-28-2 (ТО-220)
		25–200	20,0	0,7–1,15	КТ-90 (D2ПАК)
		25–200	2,0	0,65–1,0	КТ-28-2 (ТО-220)
		25–200	2,0	0,65–1,0	КТ-88 (DПАК)
Диоды Шоттки в металлокерамических корпусах	IN5817	20	1,0	0,45	SMD-0,5
	IN5819	40	1,0	0,6	SMD-0,5
	10BQ015	15	1,0	0,34	SMD-0,5
	31DQ03	30	3,3	0,55	SMD-0,5
	31DQ04	40	3,3	0,55	SMD-0,5
	31DQ06	60	3,3	0,58	SMD-0,5
	10BQ040	40	1,0	0,53	SMD-0,5
	10BQ100	100	1,0	0,78	SMD-0,5
	31DQ10	100	3,3	0,85	SMD-0,5
	50SQ100	100	5,0	0,66	КТ-94 (SMD-1)
	8TQ100	100	8,0	0,72	КТ-94 (SMD-1)
	50SQ080	80	5,0	0,66	КТ-94 (SMD-1)
	30CPQ100	100	2×15	0,86	КТ-94 (SMD-1)
	30CPQ150	150	2×15	1,0	КТ-94 (SMD-1)
	30CPQ060	20	2×15	0,6	КТ-94 (SMD-1)
MBR2020СТ	200	2×10	0,9	КТ-94 (SMD-1)	

Таблица 2

Быстровосстанавливающиеся диоды, разработанные и освоенные ООО "ВЗПП-С" в 2004 г.

Тип изделий	Ближайший аналог	Основные параметры				Тип корпуса
		$U_{обр}$, В	$I_{пр}$, А	$U_{пр}$, В	t_{rr} , нс	
Быстровосстанавливающиеся диоды в металлопластмассовых корпусах	HFA08TB60 (HFA16TA6C)	600	8,0	1,7	80	КТ-28-2 (ТО-220)
		600	8,0	1,7	80	КТ-90 (D2ПАК)
	HFA15 TB60 (HFA30TA6C)	400–600	15,0	1,7	100	КТ-28-2 (ТО-220)
		400–600	15,0	1,7	100	КТ-90 (D2ПАК)
		600	1,0	1,5	-	КТ-88 (D2ПАК)
Быстровосстанавливающиеся диоды в металлокерамических корпусах	10BF40	400	1,0	1,4	50	SMD-0,5
	30BF40	400	3,0	1,4	50	SMD-0,5
	APT15D40k	400	15	1,8	50	КТ-94 (SMD-1)
	APT15D60k	600	15	1,5	50	КТ-94 (SMD-1)
	RURG3020	200	2×30	1,0	45	SMD-2
	30EPF06	600	2×30	1,41	160	SMD-2

Полевые транзисторы, разработанные и освоенные ООО "ВЗПП-С" в 2004 г.

Тип изделий	Ближайший аналог	Основные параметры			Тип корпуса
		$U_{с.н.}$ В	$R_{с.и.отк.}$ Ом	$I_{с.макс.}$ А	
Полевые транзисторы в металлопластмассовых корпусах	IRF620	200	0,8	5,0	КТ-28-2 (ТО-220)
	IRF640	200	0,18	16,0	КТ-28-2 (ТО-220)
	IRF720	400	1,8	3,0	КТ-28-2 (ТО-220)
	IRF740	400	0,55	9,0	КТ-28-2 (ТО-220)
	IRF520	100	0,27	8,5	КТ-28-2 (ТО-220)
	IRF540	100	0,077	25,0	КТ-28-2 (ТО-220)
	IRFR220	200	0,8	4,5	КТ-88 (DPAK)
	IRF640S	200	0,18	16,0	КТ-90 (D2PAK)
	IRFR320	400	1,8	2,8	КТ-88 (DPAK)
	IRF740S	400	0,55	9,0	КТ-90 (D2PAK)
	IRFR120	100	0,27	7,0	КТ-88 (DPAK)
	IRF540S	100	0,077	25,0	КТ-90 (D2PAK)
	IRFP150	100	0,055	35,0	КТ-43В-1В
Полевые транзисторы в металлокерамических и металлопластмассовых корпусах	IRFN240	200	0,18	16,0	КТ-94 (SMD-1)
	IRFN340	400	0,55	9,0	КТ-94 (SMD-1)
	IRFN140	100	0,077	25,0	КТ-94 (SMD-1)
	IRFN44	60	0,028	45	КТ-94 (SMD-1)
					КТ-9С (ТО-204АА)
	IRFN240	200	0,18	16,0	КТ-9С (ТО-204АА)
		200	0,18	16	КТ-56
	IRFC240	200	0,18	16	б/корп.
	IRF130	100	0,077	25,0	КТ-9С (ТО-204АА)
	IRF150	100	0,055	35,0	КТ-9С (ТО-204АА)
	IRFN150	100	0,055	35,0	КТ-94 (SMD-1)
	IRF250	200	0,085	27,0	КТ-9С (ТО-204АА)
	IRFN250	200	0,085	27,0	КТ-94 (SMD-1)
	IRF230	200	0,12	22	КТ-28-2 (ТО-220)
	IRF350	400	0,3	10	КТ-9С (ТО-204АА)
	IRF440	500	0,6	10	КТ-9С (ТО-204АА)
	IRF440	500	0,85	8,0	КТ-9С (ТО-204АА)
	IRFN440	500	0,85	8,0	КТ-94 (SMD-1)
	IRF350	400	0,3	15,0	КТ-9С (ТО-204АА)
	IRFN350	400	0,3	15,0	КТ-94 (SMD-1)
IRF450	500	0,4	14,0	КТ-9С (ТО-204АА)	
IRFN450	500	0,4	14,0	КТ-94 (SMD-1)	
Полевые транзисторы с возможностью контроля по току					
Полевые транзисторы с возможностью контроля по току в металлокерамических корпусах	IRC530	100	0,16	14	КТ-56
	IRC540	100	0,077	28	КТ-56
	IRC630	200	0,4	9	КТ-56
	IRC640	200	0,18	18	КТ-56
	IRC634	250	0,45	8,0	КТ-56
	IRC644	250	0,2	20	КТ-56



SMD-1

TO-204AA

DPAK

D2PAK

TO-220AB

KT-43B-1B

KT-56

ливающих диодов, с диапазонами токов от 1 до 2×30 А, обратного напряжения от 200 до 600 В и времени обратного восстановления 45–160 нс, 7 типономеров полевых транзисторов (в том числе 6 типономеров транзисторов с возможностью контроля по току и температуре в 5-выводном модифицированном металлокерамическом корпусе типа КТ-56), с параметрами $U_{с.н} = 100 \div 250$ В, $R_{с.н} = 0,077 \div 0,45$ Ом, $I_{с.макс} = 8,1 \div 25$ А.

На предприятии разработаны и серийно выпускаются приборы типа IGBT (биполярные транзисторы с изолированным затвором) KE-705 с напряжением 400 В. В стадии разработки находятся IGBT на 600 и 1200 В.

Для обеспечения корпусной продукцией ОАО "ВЗПП" разработал технические требования и заключил договоры на поставку металлокерамических корпусов для поверхностного монтажа: по корпусам SMD-0,5, SMD-2 с ОАО "Донской завод радиодеталей" (г. Донской Тульской обл.), по SMD-1 с ОАО завод "Марс" (г. Торжок Тверской обл.). Кроме того, ООО "ВЗПП-С" разработал технические требования для разработки металло-стеклянных корпусов аналогов ТО-254, ТО-257, ТО-258.

Наиболее перспективным элементом остается создание однокристалльных силовых интегральных схем. Низкий уровень потерь и малая мощность управления МОП-транзисторами позволило создать силовые интегральные схемы, где на одном кристалле технологическими приемами изготавливаются силовые ключевые элементы, схемы их запуска и защиты, устройства управления, регулирование и диагностика. На наш взгляд заслуживают внимания работы в части создания высоковольтных драйверов для управления газоплазменными панелями.

Учитывая интересы многочисленных предприятий-разработчиков аппаратуры, ООО "ВЗПП-С" планирует реализовать программу разработки элементной базы силовой электроники, представляющую комплексный подход, охватывающий широкий спектр полупроводниковых приборов.

В результате этих работ ожидается значительное повышение номенклатуры элементной базы силовой электроники и технического уровня выпускаемых изделий.

Совершенствование технологии силовых дискретных полупроводниковых устройств оказывает значительное влияние на электротехнические системы в целом.

Последние достижения, которые будут определять развитие силовых полупроводников в начале XXI в. следующие:

1. Для силовых выпрямителей низкого напряжения (до 100 В) – структуры диодов Шоттки с изоляцией канавкой (trench-Шоттки), обеспечивающие снижение прямого падения напряжения в два раза по сравнению со стандартными диодами Шоттки, что даст возможность снизить потери мощности и повысить эффективность устройств, не прибегая к более дорогим средствам выпрямления.

2. Для выпрямителей напряжения свыше 200 В – структуры диодов Шоттки на основе карбида кремния (SiC), позволяющие снизить интегральный показатель $V_f \times Q_{rr}$ до значений порядка 15(В×Н), что в десятки раз меньше, чем у современных *p-i-n*-диодов и FRED.

3. Для кремниевых переключателей мощности низкого напряжения (до 100 В) – trench-технология, позволяющая при условии использования малых размеров литографии обеспечить примерно двадцатикратное снижение сопротивления в открытом состоянии полевых транзисторов.

4. Для кремниевых переключателей мощности высокого напряжения – представляет интерес концепция "супер-переход", реализованная в технологии Cool-MOS со снижением сопротивления в открытом состоянии полевых транзисторов в несколько раз по сравнению со стандартными DMOS. Несмотря на более дорогой процесс изготовления этих транзисторов они имеют преимущество при использовании в условиях высокой частоты и высокого напряжения.

Для силовой электроники высокого напряжения IGBT заменили биполярные мощные транзисторы и угрожают вытеснить в ближайшее время запираемый тиристор. Однако, хотя использование IGBT позволило значительно снизить падение напряжения в рабочем режиме, они имеют низкую скорость переключения, что ограничивает возможность их работы на высоких частотах.

5. Применение карбидокремниевых технологий для переключательной мощности –

большой и важный шаг вперед в технологии силовых полупроводников. При совершенствовании материала карбида кремния и снижении его стоимости MOSFET и IGBT, а также выпрямители могут обеспечить сокращение потерь мощности в десятки раз.

Перечисленные виды технологий ООО "ВЗПП-С" планирует внедрить в серийное производство в ближайшие годы.

Современной тенденцией в развитии силовых полупроводниковых устройств остаётся повышение плотности тока и максимального напряжения на выпрямителях и ключевых элементах, что однозначно определяется уровнем развития технологии, в том числе наличием перспективных полупроводниковых материалов и современного технологического оборудования.

Создание и освоение производства нового поколения мощных тиристоров и диодов для энергоёмких областей промышленности, энергетики и транспорта

**ЧИБИРКИН В.В., ГЕЙФМАН Е.М., ЕЛИСЕЕВ В.В., МАРТЫНЕНКО В.А.,
ЕВСЕЕВ Ю.А., СУРМА А.М.**

Представлены основные результаты теоретических, конструкторских и технологических исследований в области силового полупроводникового приборостроения, которые позволили создать силовые тиристоры и диоды нового поколения, являющиеся основной элементной базой мощных высокоэффективных преобразователей диапазона низких и средних частот.

In article main results of theoretical, construction and technology researches in the field of power semiconductor devices are given. They made it possible to create power thyristor and diodes of new generation. Now these devices are principal element base of power high effective invertors and converters in the field of low and middle frequencies for the use in industry, transport, energetic, nuclear industry, military technic.

From development and to now power thyristors and diodes are competitionable on native and foreign markets.

В России, как в любой индустриально развитой стране, примерно половина производимой электроэнергии на пути к потребителям проходит через полупроводниковые преобразователи. Оценки показывают, что оптимальное насыщение российской промышленности современной высокоэффективной полупроводниковой преобразовательной техникой позволило бы сэкономить 10–15% производимой электроэнергии, что вполне сопоставимо, например, с вкладом всей атомной энергетики.

Мощные тиристоры и диоды являются основной элементной базой силовой полупроводниковой преобразовательной техники. Их характеристики во многом определяют эффективность преобразователей, которые широко применяются во многих энергоёмких областях.

В СССР практически одновременно с ведущими мировыми державами (США, Германией, Японией) в начале 60-х годов XX в. было освоено производство первых силовых тиристоров и диодов, что создало предпосылки для развития отечественной полупроводниковой преобразовательной базы. Однако к началу 80-х годов наметились тенденции к отставанию технического уровня отечественных мощных тиристоров и диодов, что ставило под угрозу выполнение актуальных задач по созданию линий электропередачи постоянного тока, тяговых преобразователей для электропоездов и тепловозов, технологического оборудования предприятий ядерно-топливного цикла и других важных областей экономики.

В связи с этим программой по решению научно-технической проблемы 0.13.05, утвер-