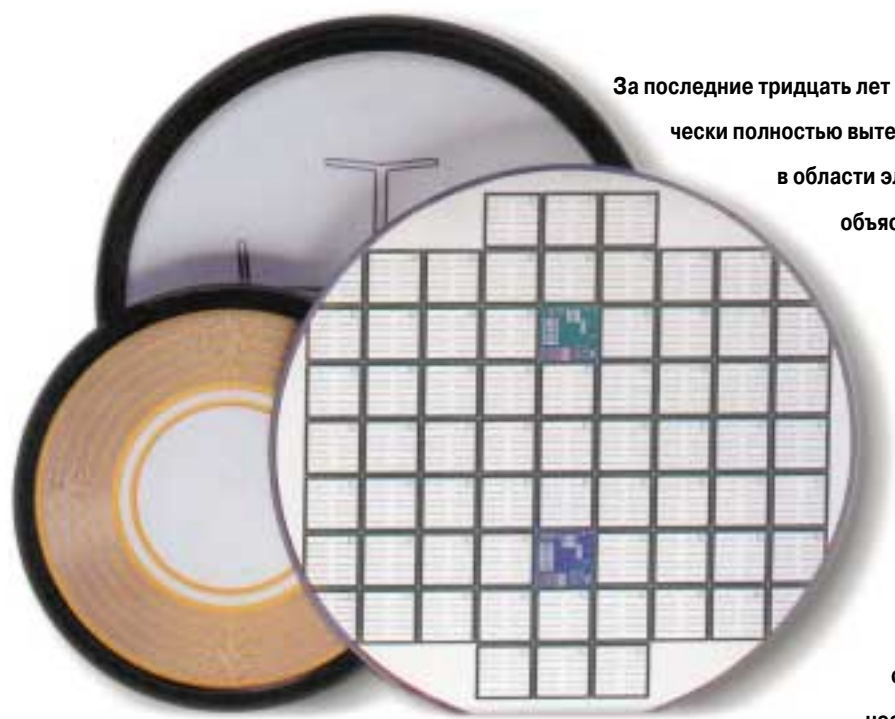


СИЛОВЫЕ полупроводниковые приборы

В центре тихой революции

Штефан Линдер



За последние тридцать лет силовые полупроводниковые приборы практически полностью вытеснили электромеханические преобразователи в области электроприводов и энергоснабжения. Это легко объяснимо: в различных отраслях промышленности и на транспорте, а также в системах передачи и распределения энергии, силовые полупроводниковые приборы обеспечивают почти неограниченную свободу в формировании потоков электрической энергии.

И все же, что придает силовым полупроводниковым приборам столь замечательные свойства для применения в системах большой мощности? Пришло время познакомиться с еще одной историей успеха компании АББ.

Описать работу силовых полупроводниковых приборов довольно просто: как и обычные выключатели, эти устройства могут находиться всего в двух состояниях – «открытом» и «закрытом». Однако, в отличие от выключателей, полупроводниковые приборы обладают способностью очень быстро переходить из одного состояния в другое – обычно всего за несколько микросекунд. Поэтому применение быстро чередующихся управляющих импульсов включения и выключения позволяет получить практически любую желаемую форму потока энергии, например синусоидальную (см. рис. 1).

Номинальные параметры полупроводниковых ключей при разработке могут выбираться в широком диапазоне напряжений и токов, что позволяет изготавливать приборы в точном соответствии с требованиями промышленности. В настоящее время максимальное значение запирающего напряжения достигает 6500-8500 В, в то время как максимальный ток в открытом состоянии прибора может достигать до нескольких тысяч ампер. При более высоких токах и напряжениях приборы могут быть соединены параллельно или последовательно.

Так поступают, например, при создании линий электропередачи постоянного тока высокого напряжения (HVDC), где используются напряжения до 600 кВ.

Потери: низкие, но не нулевые

В области силовой электроники получили распространение три типа полупроводниковых устройств: тиристор, IGCT (integrated gate-commutated thyristor – запираемый тиристор с интегрированным блоком управления) и IGBT (insulated gate bipolar transistor – биполярный транзистор с изолированным затвором), представленные на рис. 2 и 3. Хотя доминиру-

вание этих приборов наводит на мысль об их идеальности, это неверно: в этих приборах происходят потери. Хотя эти потери относительно малы – обычно менее 0,5% от коммутлируемой энергии рассеивается в виде тепла, – количество энергии, проходящей через приборы, велико, поэтому и суммарные потери оказываются существенными. Отвод выделяемого тепла может оказаться сложной задачей, на решение которой затрачиваются значительные средства.

Причина таких потерь лежит в физической природе этих устройств. В выключенном состоянии в кремниевом кристалле отсутствуют подвижные электроны, вследствие чего ток не течет. При включении прибора кристалл буквально наводняется подвижными электронами, и ключ становится хорошим проводником тока. Однако концентрация подвижных носителей заряда во включенном состоянии в кристалле не столь высока, как, скажем, в металле. Как следствие, наблюдается заметное падение напряжения. Связанные с ним потери называются потерями на электропроводность.

При возврате ключа в запертое состояние все ранее введенные электроны необходимо удалить из кристалла. Это осуществляется восстанавливающим напряжением, которое «уносит» эти электроны. Следовательно, при выключении прибора ток в течение короткого промежутка времени течет при высоком напряжении, что приводит к, так называемым, потерям на выключение.

«Старая экономика»: тиристор

Тиристор – это самый старый коммутрующий прибор, используемый в настоящее время, но он все так же пользуется коммерческим успехом. Однако в отличие от более новых приборов, транзисторов IGBT и тириستоров IGCT, его можно лишь включить, но не выключить. Тиристор возвращается в непроводящее состояние только при изменении направления тока на обратное. На практике это осуществляется с помощью внешней цепи, так называемой цепи принудительной коммутации, либо посредством естественной коммутации, например, при пересечении синусоидальной волной нулевой отметки. В новых системах принудительная коммутация с появлением IGBT и IGCT более не используется. Эти приборы обеспечивают возмож-

Несмотря на то, что с помощью управляющего сигнала тиристор можно лишь открыть, но не закрыть, малые потери на электропроводность делают его идеальным элементом для систем с большими токами и естественной коммутацией, таких как HVDC.

ность отключения подачи сигнала на управляющий электрод, и необходимость в дорогостоящей внешней схеме отпадает. Причиной того, что тиристоры еще применяются наряду с более совершенными запираемыми приборами, является то, что потери на электропроводность в них значительно ниже. Поэтому они идеально подходят для использования в системах с большими токами и естественной коммутацией, таких как HVDC. Фактически тиристоры до сих пор являются предпочтительными для систем HVDC с номинальной мощностью выше 500 МВт.

«Новая экономика 1»: IGCT

В отличие от классического тиристора, запираемый тиристор с интегрированной схемой управления, или IGCT, можно включить или выключить в любой момент времени, что делает его «настоящим» ключом. К сожалению, за эту свободу необходимо платить: падение напряжения в проводящем состоянии на IGCT выше, чем на классическом тиристоре.

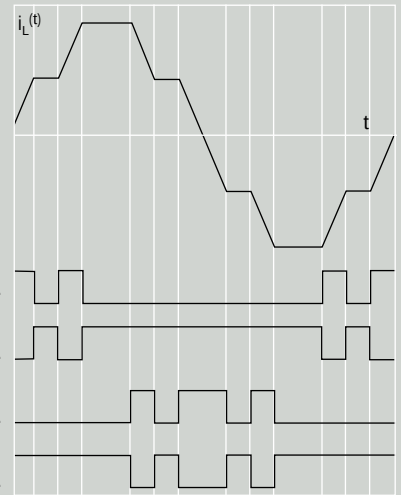
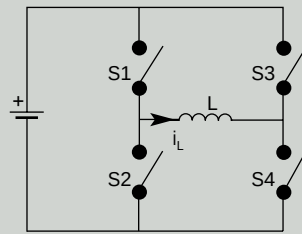
IGCT управляется с помощью тока через управляющий электрод. Мощность, затрачиваемая на управление, сильно зависит от силы коммутлируемого тока и частоты коммутации и обычно лежит в диапазоне 10-50 Вт.

Из-за особенностей физических процессов, протекающих в IGCT-тиристоре, повлиять на скорость перехода из проводящего в непроводящее состояние невозможно. После подачи управляющего сигнала пути назад нет: прибор перейдет в другое состояние в соответствии с динамикой внутренних процессов. Это влечет за собой следующие практические выводы:

- Тиристор IGCT при включении вызывает резкие броски тока (di/dt), способные повредить вспомо-

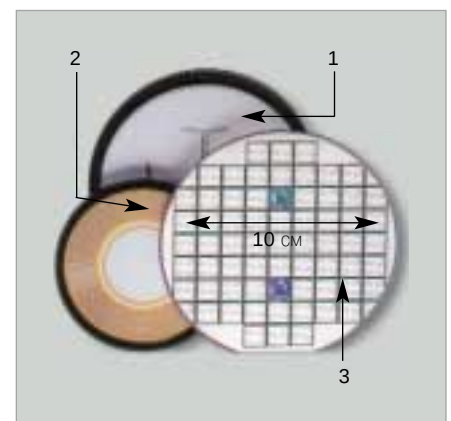
1

Четыре простых выключателя и батарея – это все, что необходимо для создания приблизительно синусоидального тока в катушке индуктивности (L)



2

В силовых схемах получили распространение три типа полупроводниковых приборов



- 1 Тиристорный элемент, используемый в линиях электропередачи HVDC
- 2 Элемент IGCT для систем с номиналом 2-5 МВт
- 3 Кремниевая пластина, на которой размещены приблизительно 50 чипов IGBT, способных коммутировать около 200 кВт каждый

гательные элементы, в особенности диоды (выпрямляющие приборы, являющиеся электрическим эквивалентом обратных клапанов). В силу этого, последовательно с таким тиристором необходимо включать защитную цепь – так называемый di/dt -дрессель – для ограничения максимальной скорости нарастания тока.

- Тиристоры IGCT можно соединять параллельно только при условии включения параллельно с ними второй защитной цепи – ограничителя dv/dt (в сущности, RC-цепи). Чтобы исключить необходимость применения такой демпфирующей цепи, необходимо очень точно синхронизировать момент запираания (в наносекундном масштабе), что на сегодняшний день практически не осуществимо.
- Если необходимо применение нескольких тиристоров IGCT, соединенных последовательно, необходимо скомпенсировать все внутренние и внешние допуски, способные вызвать несовпадение моментов запираания. Для этого опять требуется защитная цепь dv/dt . Конденсатор этой цепи поглощает все избыточные заряды, возникающие вследствие незначительных различий в моментах запираания, тем самым равномерно распределяя напряжение по всем приборам.

Благодаря этой информации легко увидеть, что IGCT имеет наибольшее преимущество в системах большой мощности, где не требуется (или нежелательно) применение ни последовательных, ни параллельных соединений. К примеру, при использовании IGCT можно изготовить очень компактный высоковольтный привод с номинальной мощностью более 500 кВт, который будет работать с малыми потерями.

Остается упомянуть, что тиристоры IGCT были созданы на основе запираемых тиристоров GTO (gate turn-off thyristor – запираемый тиристор). Широко применяемые до внедрения IGCT, тиристоры GTO в настоящее время в новых разработках практически не применяются.

«Новая экономика 2»: IGBT
Биполярный транзистор с изолированным затвором, как и все транзисторы (но принципиально отличаясь от тиристор-

ов), представляет собой линейный элемент, и поэтому является управляемым в любой момент времени. Благодаря такой управляемости, скорость переходов между открытым и закрытым состоянием может быть

Преимущества IGCT сильнее всего проявляются в системах большой мощности, где нет необходимости в их последовательном или параллельном соединении: например, в высоковольтных приводах с номинальной мощностью более 500 кВт.

3	Основные свойства тиристора IGCT и IGBT
---	---

Элемент	Тиристор	IGCT	IGBT
Условное обозначение			
Управление	Отпирается импульсом тока на УЭ Запирается при смене направления тока через А-К	Отпирается/запирается с помощью импульсов тока на УЭ	Прибор с переменной проводимостью, зависящей от напряжения между З-К
Параллельное включение	Необходимо согласование параметров (подбор приборов)	Требуется защитная цепь	Допускается работа без защитной цепи
Последовательное включение	Необходимы защитные цепи		Защитные цепи необязательны (рекомендуются)
Защита от короткого замыкания и отказа	Ток КЗ не ограничивается, необходимы защитные схемы		Прибор ограничивает ток КЗ, короткое замыкание может быть устранено с помощью сигнала на у.э.

резко снижена, что делает транзистор IGBT очень удобным в использовании:

- Не требуется применение защитных схем, необходимых для IGCT;
- Транзисторы IGBT без особых сложностей включаются параллельно;
- Последовательное включение также возможно без применения dv/dt -ограничителя. Однако для оптимальной работы все же рекомендуется включение небольших RC-фильтров параллельно с каждым прибором.

Помимо удобства в использовании, транзисторы IGBT обладают еще двумя важными преимуществами:

- Управление ими осуществляется приложением управляющего напряжения к, так называемым, МОП- входам (МОП – структура металл-оксид-полупроводник). Поэтому необходимая мощность управления очень мала, обычно достаточно 1-2 ватт. Это очень важно для схем с последовательным включением, например, схем HVDC, поскольку обеспечение достаточного питания формирователей импульсов (драйверов) в высоковольтных системах технически сложно, а потому дорого.

- В случае короткого замыкания через такой транзистор, например, вследствие замыкания в обмотке электродвигателя, транзистор автоматически ограничивает ток короткого замыкания на уровне 5-10-кратного значения собственного номинального тока. После этого короткое замыкание можно безопасно устранить в течение 10 микросекунд с помощью обычного запирающего сигнала IGBT. В результате таких коротких замыканий прибор не выходит из строя.

Единственная расплата за эти преимущества – это то, что плотность подвижных носителей заряда в открытом состоянии в транзисторе IGBT несколько ниже, чем в тиристоре IGCT, а следовательно, потери на проводимость – выше. Однако в силу того, что при выключении необходимо вывести меньшее количество носителей заряда, потери на выключение также ниже.

Гибкость и легкость применения IGBT определяют его применение в широком ряду систем передачи и распределения энергии. Хорошим примером может послужить технология HVDC Light™ компании АББ [1].

Выбор подходящего исполнения

Соответствие типа корпуса силового полупроводникового прибора и области его применения очень важно. Существуют корпуса двух различных типов, при этом подходящий выбирается на основе трех основ-

ных критериев:

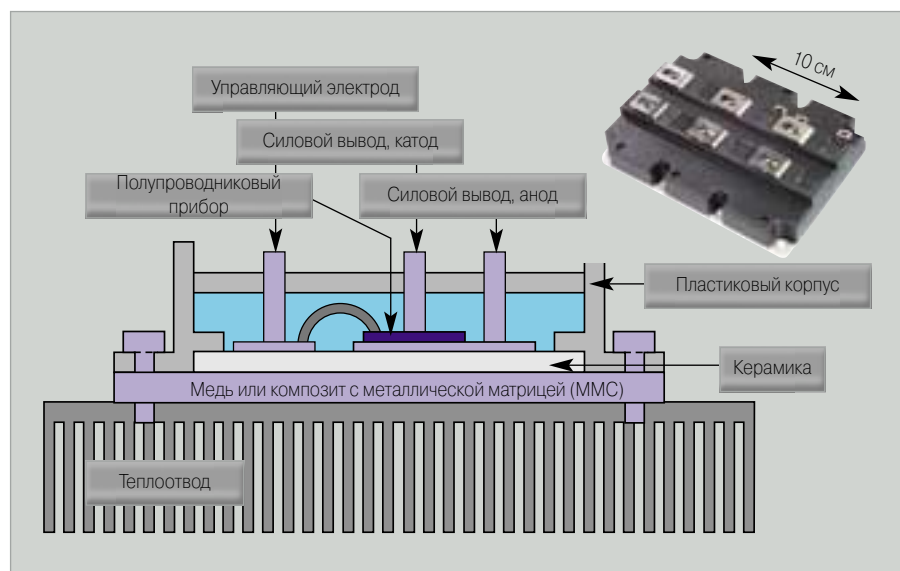
- метод, используемый для передачи тепла от полупроводника к теплоотводу;
- метод, используемый для изоляции силовых выводов от теплоотвода;
- механизм отказа прибора.

Изолированное исполнение: гибкое решение

Основной особенностью конструкции изолированного корпуса является керамическая пластина, обладающая электроизоляционными свойствами, но при этом также хорошо проводящая тепло, которая разделяет электрические и тепловые потоки. Корпус размещается над стороной пластины, где закреплены полупроводниковые элементы, а затем сборка нижней стороной крепится с помощью болтов к теплоотводу. Благодаря такой гальванической развязке, на одном теплоотводе могут размещаться несколько компонентов с разным электрическим потенциалом. Сам теплоотвод также может иметь определенный потенциал (например, заземлен). Компоненты системы, например, всего инверторного преобразователя, могут быть собраны внутри одного корпуса такого типа.

Изолированный корпус на сегодняшний день является стандартным исполнением для IGBT. Выполненный таким образом прибор обычно называется модулем IGBT, поскольку, как правило, включает в себя несколько полупроводниковых чипов. Одними из приборов IGBT, производимых фирмой АББ в изолированном корпусе, являются модули LoPak™ с максимальным напряжением в закрытом состоянии 1200 и 1700 В и номинальным током от 50 до 900 А. Модуль по конфигурации может быть однофазным плечом (два последовательно соединенных прибора с отводом в средней точке) или трехфазным мостовым

4	Изолированный корпус. Благодаря гальванической развязке теплоотвода от силовых выводов, на общем теплоотводе можно смонтировать несколько элементов
---	---

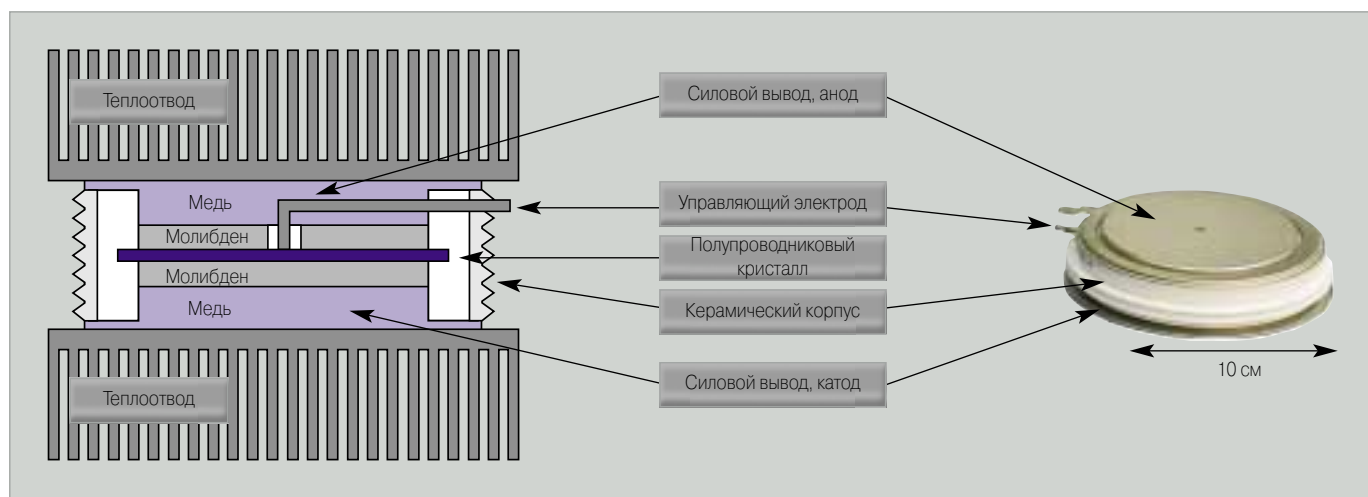


инвертором. Серия HiPak™ имеет конфигурацию одного ключа с обратным диодом с номиналами от 1200 В, 3600 А с рядом напряжений 1700 В, 2500 В, 3300 В вплоть до 6500 В, 600 А.

Изолированный корпус предпочтителен для использования в системах с номинальной мощностью до нескольких мегаватт. Системы более высокой мощности (например, системы электропередачи HVDC) обычно требуют последовательного соединения элементов. Однако у изолированного корпуса имеются определенные недостатки, делающие его непригодным для последовательного включения:

- Изоляционная способность керамики ограничена всего несколькими киловольтами, поэтому последовательное соединение на общем теплоотводе возможно лишь при относительно невысоких напряжениях.
- Чтобы повысить надежность систем HVDC и других высоковольтных систем, используются резервные устройства. Если один из последовательно включенных приборов отказывается, оставшиеся элементы обеспечивают работу вентили, но только в том случае, если отказавший прибор переходит в состояние с низким сопротивлением (т.е., если он «замкнут»). Однако особенности конструкции изо-

5	Прижимной таблеточный корпус. Теплоотводы имеют электрический потенциал анода и катода. Молибденовые диски служат «буферами», снижающими механический износ, вызванный температурными колебаниями
---	---



лированного корпуса обычно способствуют отказу прибора в «открытом» состоянии.

Чтобы получить возможность использовать преимущества элементов IGBT в системах HVDC и других системах высокого напряжения и большой мощности, например, для компенсации реактивной мощности или борьбы с пульсациями, компания АББ разработала для IGBT уникальный полностью прижимной корпус.

Полностью прижимной корпус: мощное решение

В корпусе такого типа отсутствует керамическая пластина, а тепловые и электрические потоки не разделены. Корпус выполняется с полностью прижимными контактами, т. е. прибор и его электрические контакты сжимаются между двумя охладителями с большим усилием при помощи внешнего устройства сжатия. Таким образом, ток проходит через прибор и теплоотводы «вертикально». Последовательное соединение приборов в прижимном исполнении осуществляется просто размещением их друг на друге, при этом между приборами находятся только теплоотводы. Другим преимуществом является поведение прибора при отказе: сильное давление способствует сплавлению металлических электродов анода и катода, в результате чего образуется надежный контакт с малым сопротивлением для тока (т. е. короткое замыкание).

Эти две особенности делают полностью прижимной корпус идеально подходящим для систем большой мощности и высокого напряжения.

Корпус с прижимными контактами – это стандартное исполнение для классических тиристоров, тиристоров GTO и IGCT, выпускаемых компаниями АББ. Выпускаются тиристоры для большого диапазона номинальных токов и напряжений

вплоть до 8500 В. Тиристоры IGCT поставляются в различных конфигурациях с максимальным напряжением в закрытом состоянии от 4500 до 6500 В.

Полностью прижимной корпус для IGBT компании АББ заслуживает особого внимания. Рассчитанная на

удовлетворение самых жестких требований, уникальная патентованная конструкция делает прибор практически неуязвимым к неравномерному распределению давления при сжатии. Это позволяет значительно упростить конструкцию прижимного устройства и процесс сборки, а также повышает эксплуатационную надежность, что ведет к очень существенной экономии.

Благодаря модульной конструкции прибора, компания АББ может с легкостью подбирать номинальный ток согласно требованиям заказчика. Компания предлагает IGBT в прижимном исполнении под товарным знаком StakPak™. Это изделие лежит также в основе системы HVDC Light™ компании АББ.

Непрерывное совершенствование

Технология силовых полупроводниковых приборов в настоящее время практически полностью использует возможности кремния, поэтому большого прогресса ожидать не стоит. Кроме того, компоненты со значительно более высокими номинальными напряжениями (выше 10 кВ) технически очень трудно реализуемы.

Для преодоления этих ограничений исследовательские институты во всем мире ведут программы, нацеленные на нахождение новых материалов с лучшими свойствами. На данный момент наиболее перспективным является карбид кремния (SiC). К сожалению, использование этих новых материалов сопряжено с трудноразрешимыми технологическими сложностями. С нынешней точки зрения кажется маловероятным, что на практике эти материалы смогут стать альтернативой кремнию в диапазоне

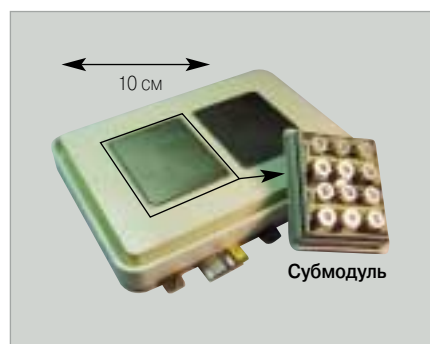
мощности выше 100 кВт в ближайшие 10-15 лет.

Тем временем, можно ожидать непрерывного усовершенствования современных

компонентов: снижение потерь, повышение токов и лучшие характеристики коммутации. Также следует ожидать значительного прогресса в технологии изготовления корпусов. Приборы станут более удобными в использовании, тогда как новые материалы обеспечат лучшее охлаждение, позволяя еще

6

StakPak™, фирменный вариант прижимного исполнения IGBT компании АББ



Возможно сочетание до 6 субмодулей с коммутирующей способностью от 600 до 1000 кВт у каждого.

полнее реализовать весь потенциал полупроводникового материала.

Литература

[1] G. Asplund, et al: HVDC Light – DC transmission based on voltage sourced converters. ABB Review 1/1998, 4-9.

За дополнительной информацией обращайтесь на веб-сайт www.abb.com/semiconductors.

Штефан Линдер
ABB Power Technologies
CH-5600 Ленцбург
Швейцария
stefan.linder@ch.abb.com