

# Силовые полупроводниковые приборы

Часть первая: основные сведения и область применения

Стефан Линдер



За последние 10-15 лет благодаря стремительному прогрессу полупроводниковых технологий кремниевые силовые переключательные приборы превратились в высокоэффективные, надёжные и простые в применении устройства. Эти устройства прочно заняли место в области высоких напряжений и сильных токов, работая в диапазоне выходных мощностей от 1 мегаватта до нескольких гигаватт. По сути началась «тихая революция», в ходе которой электромеханические устройства совершенствовались за счёт всё

большего введения в них силовой электроники или вовсе заменялись силовыми электронными устройствами.

Настоящая статья, носящая в значительной степени познавательный характер, является первой из двух, в которых журнал АББ Ревю совершает экскурс в область силовых полупроводниковых приборов. В первой части рассказывается о различных классах устройств, в частности, об IGBT и IGCT, сравниваются их преимущества и недостатки, а также

рассматриваются важнейшие аспекты их применения. Во второй части, которая будет опубликована в следующем номере журнала, будут рассмотрены вопросы термостабилизации, а также расчёта и проектирования корпусов. Более того, будет предпринята попытка прогноза дальнейшего развития силовых полупроводниковых приборов и возможной роли в силовой электронике материалов с большой шириной запрещённой зоны таких, как SiC (карбид кремния), GaN (нитрид галлия), а также алмаз.

Именно внедрение технологии нейтронного легирования в 1970-е гг. сделало возможным производство полупроводниковых приборов с запирающим напряжением более 1000 В. Только эта технология позволила получить кремний с заданной однородностью легирования. В те годы единственным технологически освоенным видом полупроводниковых приборов в этом классе напряжений были тиристоры. Однако область их применения была ограничена, поскольку тиристор не допускает принудительное прерывание тока в произвольный момент времени. В 1980-90-е гг. к тиристорам добавились устройства с управляемым отключением, а именно GTO (Gate Turn-Off Thyristor – запираемый тиристор), а позднее – IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor – биполярный транзистор с изолированным затвором) и IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor – запираемый тиристор с интегрированным управлением). Эти устройства существенно расширили спектр эффективных применений полупроводниковых приборов. Благодаря таким устройствам в настоящее время выпускаются регулируемые приводы мощностью порядка мегаватт и уже трудно представить передачу электроэнергии и стабилизацию работы энергосистем, где мощности измеряются уже в гигаваттах, без использования силовых полупроводниковых приборов.

В течение последних 10 лет приборы IGBT и IGCT (заменившие приборы GTO) были усовершенствованы в направлении снижения потерь, повышения выдерживаемого напряжения и допустимой нагрузки по току (т.е. расширения области безопасной работы), а также в направлении повышения удобства применения. Поэтому старая парадигма середины 1990-х гг., согласно которой приборы IGBT предназначены для «относительно малых» мощностей, а приборы IGCT – для «относительно больших», более не существует. Приборы IGBT теперь успешно используются при мощностях свыше 300 МВт [1]. Однако вывод о том, что приборы IGCT из-за этого потеряют право на существование, неверен, что подтверждается расширением

их применения преимущественно в области средних напряжений. Выбор наиболее подходящего для данного применения силового полупроводникового прибора зависит от ряда технических факторов, которые в той или иной степени будут освещены в настоящей статье. Но не следует недооценивать при этом знания и опыт пользователя. Поскольку характеристики и надёжность полупроводниковых устройств в сильной степени зависят от условий работы и реальной конструкции системы в зависимости от механических, электрических и тепловых параметров, пользователи везде, где только возможно, применяют платформы, опыт работы с которыми у них наибольший.

Старая парадигма середины 1990-х гг., согласно которой приборы IGBT предназначены для «относительно малых» мощностей, а приборы IGCT – для «относительно больших», более не существует.

### Цели, достигаемые применением приборов IGBT и IGCT в новых разработках

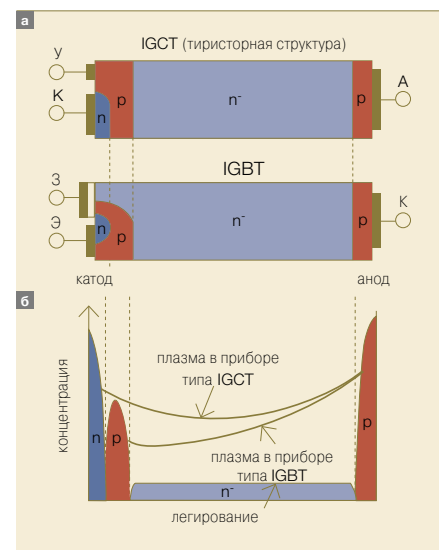
#### Введение

Степень легирования кристалла кремния силового полупроводникового прибора и связанную с ней проводимость подложки необходимо непрерывно снижать по мере того, как возрастает напряжение пробоя, которое должно обеспечиваться в данном приборе. В результате компоненты, свойства которых в открытом состоянии определяются проводимостью подложки (униполярные приборы, работающие на основных носителях заряда, например, силовые МОП-транзисторы и диоды Шоттки), имеют в открытом

состоянии при запирающих напряжениях более 200-1000 В слишком большое для экономичной работы падение напряжения (зависит от типа прибора и условий применения). Соответственно кремниевые силовые приборы на рабочие напряжения свыше 600 В обычно проектируются как устройства с управляемой проводимостью. Внутренний объём в таком приборе в открытом состоянии заполнен большим количеством носителей заряда положительного и отрицательного знака (плазмой из «дырок» и электронов), что значительно увеличивает проводимость по сравнению с исходной подложкой. В производстве силовых полупроводниковых приборов такие компоненты часто именуют биполярными, хотя с технической точки зрения это не вполне корректно (об этом пойдёт разговор во второй части статьи в следующем номере журнала).

При переходе прибора в закрытое состояние для восстановления его запирающей способности

1 Структура и зоны легирования в приборах классов IGCT и IGBT (а), а также качественное сравнение распределения плазмы в проводящем состоянии (б).



Полупроводники стали применяться повсеместно, в том числе при передаче электрической энергии (а), на транспорте (б), в промышленных приводах (в).



## Важнейшие аспекты в энергетике

плазму необходимо удалить. Это производится приложением напряжения восстановления, при этом появившееся электрическое поле «разгоняет» отрицательно заряженные электроны к аноду, а положительно заряженные «дырки» к катоду. В результате при повышении напряжения ток некоторое время продолжает течь и возрастают потери в форме выделяемого тепла.

### Снижение рассеиваемой мощности в открытом состоянии и при запирании путём регулирования распределения плазмы

Главной целью при разработке высоковольтных силовых полупроводниковых ключей (наиболее широко представленных приборами IGBT

и IGCT) является оптимальное сочетание потерь в открытом состоянии и при запирании. На языке практики это означает, что в открытом состоянии падение напряжения на полупроводниковом приборе должно быть минимально возможным (образовалась плазма с достаточной плотностью), а при запирании не должно быть значительных потерь, возникающих при рассасывании избыточного заряда.

На рис. 1 показано типовое распределение плазмы в приборах IGBT и IGCT. Главное различие между этими классами приборов в том, что в IGCT плотность плазмы наибольшая у катода, а в IGBT она относительно резко убывает от анода к катоду. О причинах этого рассказывается ниже.

### Наименьшая толщина структуры силового полупроводникового прибора определяется требуемым запирающим напряжением и электрической прочностью кремния на пробой.

Важность такого распределения носителей заряда иллюстрируется на примере процесса запирания: во время перехода в закрытое состояние полупроводниковый прибор обретает свою запирающую способность посредством формирования электрического поля от p-n перехода на катодной стороне в сторону зоны n – (рис. 2). Напряжение восстановления вытесняет плазму от катода к аноду, при этом носители заряда у катода рассасываются при более низком напряжении, благодаря чему потери при запирании низкие, в то же время для рассасывания носителей заряда у анода требуется более высокое напряжение, вызывающее значительные потери.

Из изложенного становится ясно, почему распределение плазмы в тиристоре считается для прибора IGBT идеальным: падение напряжения в открытом состоянии прибора определяется в основном расположением зоны с наименьшей плотностью плазмы, чем и объясняется то, что в приборе IGBT в открытом состоянии потери больше, чем у тиристора со сходными характеристиками. Поэтому, если бы в приборе IGBT плотность плазмы у катода удалось бы существенно повысить, потери в открытом состоянии удалось бы снизить без появления значительных потерь при запирании (рис. 3).

Первичная причина низкой плотности плазмы у катода прибора IGBT – слабо выраженный эффект накопления заряда: инжектированные анодом «дырки» могут сравнительно легко проникать в p-зону на стороне катода и беспрепятственно уходить оттуда через контакт с эмиттером в этой зоне (рис. 1). У тиристора такого контакта в p-зоне нет, поэтому эффект накопления заряда выражен хорошо. Потенциальный барьер на p-n переходе у катода препятствует проникновению «дырок» в n-зону.

Для улучшения распределения плазмы в приборах IGBT предложены две различные концепции: одна, весьма эффективная, заключается в применении т. н. целевого принципа [2], при котором нахождение «дырками» p-зоны препятствует специально подобранная геометрическая структура катода. Альтернативная концепция состоит в следующем: с помощью легирующего слоя перед p-зоной создаётся слабый потенциальный барьер, препятствующий проникновению «дырок» в p-зону [3]. Детальное описание этих методов можно найти в литературе, например в [4].

У современных приборов IGBT, разработанных с использованием одной из упомянутых концепций, имеется связь между потерями в открытом и закрытом состояниях, близкими по значению к таковым приборов IGCT. В новейших разработках (например, SPT+ компании АББ [8]) уровень оптимизации настолько высок, что ожидать каких-либо значительных шагов вперед уже не приходится, хотя некоторые дальнейшие улучшения возможны.

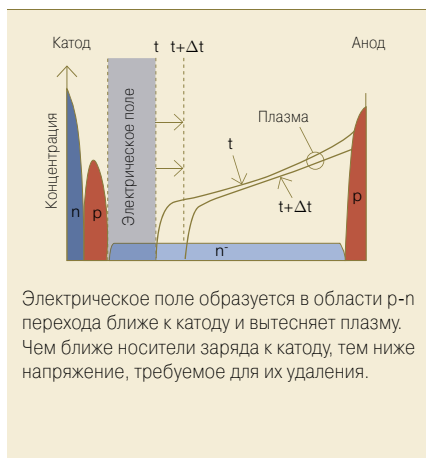
### Снижение потерь за счёт уменьшения толщины полупроводниковой структуры

Уменьшение толщины полупроводниковой структуры эффективнее всего влияет на снижение общих потерь. Причина проста: при меньшей толщине и сопротивлении прибора в открытом состоянии меньше, объём плазмы в приборе в открытом состоянии также меньше, следовательно, меньше и потери при запирании.

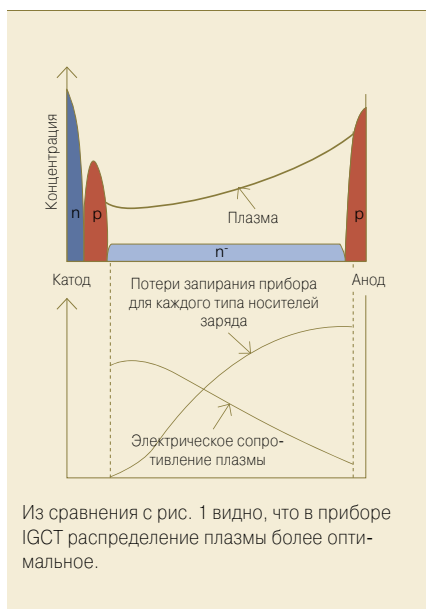
Наименьшая толщина структуры силового полупроводникового прибора определяется требуемым запирающим напряжением и электрической прочностью кремния на пробой. На рис. 4 показаны два по-разному спроектированных полупроводниковых прибора с одинаковой запирающей способностью.

Ясно, что для данной толщины полупроводниковой структуры наибольшую запирающую способность можно получить, если электрическое поле со значением напряжённости возможно более близким к порогу электрической прочнос-

2 Процесс запирания приборов типа IGBT/IGCT



3 Геометрические зависимости проводимости плазмы и потерь запирания в приборе класса IGBT.



ти на пробой, распространить по всей толщине структуры.

Требуемый градиент напряжённости поля  $dE/dx$  (рис. 1) можно получить подбором степени легирования кремния.

На практике применению концепции, когда поле распространяется по всей толщине полупроводника, имеется предел, следовательно, имеется и предельная толщина полупроводниковой структуры. Происходит это по следующим двум причинам:

1. Если уровень концентрации примесей в полупроводнике задаётся на очень низком уровне, то электрическое поле распространяется по всей толщине структуры даже при низком напряжении. Поэтому и плазма в этом случае при запираии прибора вытесняется низким напряжением. Теоретически это желательно (т. к. при этом снижаются потери запираия), но при этом при достижении определённого напряжения прохождение тока резко обрывается (в этот момент плазма полностью исчезает). Такой эффект называется отсечкой тока. Большая величина  $di/dt$  порождает перенапряжения в имеющихся паразитных индуктивностях и при наличии емкостей может вызвать нежелательные колебательные процессы. На рис. 5 показаны примеры желательной («мягкой») и нежелательной («жёсткой») кривых напряжения и тока.

Влияние паразитных индуктивностей в силовых полупроводниковых приборах, рассчитанных на большие токи, гораздо сильнее, нежели в маломощных дискретных компонентах. Прежде всего, значение индуктивности утечки больше в приборах, представляющих собой большие сборки. Кроме того, одна и та же паразитная индуктивность может вызвать различное воздействие на полупроводник. Чтобы это проиллюстрировать, сравним гипотетический дискретный чип IGBT на ток 50 А с модулем на 1000 А, собранным из двадцати таких чипов. Паразитная индуктивность в цепи с одним дискретным чипом примерно 20 нГн, а с модулем из двадцати чипов – примерно 100 нГн. Расчёт запасённой в паразитной индуктивности энергии ( $E_{инд} = LI^2/2$ ) показывает, что при номинальном токе индуктивная нагрузка на каждый чип модуля в 100 раз больше таковой на одиночный чип (соответственно 2,5 мДж и 25 мкДж). Отсюда следует, что компоненты, рассчитанные на большие мощности, должны проектироваться так, чтобы процессы переключения в них происходили более плавно, чем в чипах для маленьких сборок на печатных платах. Практически это означает, что толщина таких компонентов должна быть больше теоретической. Разумеется, при этом возрастают потери, как это видно из рис. 5.

Помимо увеличения толщины полупроводника влияние эффекта отсечки тока можно снизить легированием анодной области. В промышленности используются различные названия для технологий, по сути сходных (по крайней мере по результатам их применения), например, SPT (Soft Punch Through) [5] или FS (Field Stop) [6].

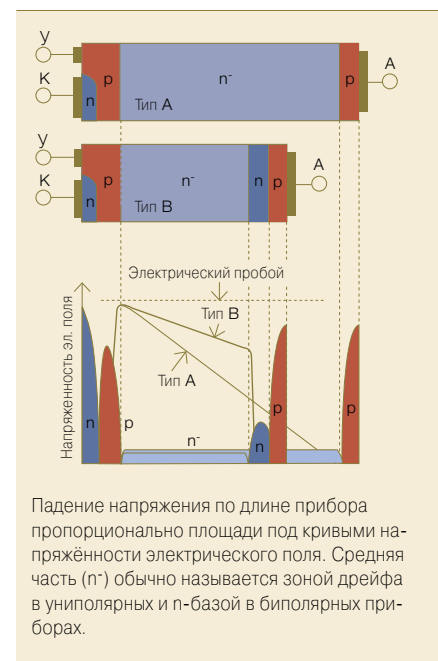
Следует также указать, что в настоящее время для разработчиков систем максимально возможное ограничение паразитных индуктивностей в их устройствах ещё более актуально, поскольку конструкция современных полупроводниковых компонентов является более уязвимой.

В открытом состоянии падение напряжение на полупроводниковом приборе должно быть минимально возможным, а при запираии не должно быть значительных потерь, вызванных снятием избыточного заряда.

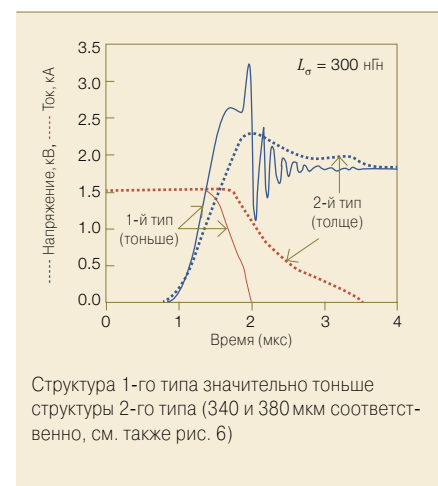
2. Второе ограничение связано с космической радиацией. Если космическая частица высокой энергии (например, протон) соударяется с ядром атома кремния, высвобождаемая энергия порождает очень большое количество электронов и «дырок». Если полупроводниковый прибор находится в закрытом состоянии под высоким напряжением, из-за большой напряжённости поля в приборе, количество возникающих носителей заряда возрастает лавинообразно. Это приводит к пробое, сосредоточенному в очень малой области, что в конечном счете может вызвать разрушение прибора. Поэтому производители полупроводниковых приборов выработали правила задания размеров, согласно которым толщина полупроводниковых компонентов и распределение электрического поля в них должны быть такими, чтобы вероятность разрушения компонента из-за воздействия космической радиации была достаточно малой. Эта вероятность примерно определяется как 1-3 FIT (Failures in time) на  $1 \text{ см}^2$  поверхности компонента, что соответствует 1-3 пробоям на  $1 \text{ см}^2$  за 1 миллиард часов работы. В настоящее время проверка устойчивости новых полупроводниковых компонентов к воздействию космического излучения обычно производится бомбардировкой образцов компонентов протонами или нейтронами на ускорителях, что достаточно точно воспроизводит воздействие естественной космической радиации.

Высоковольтные полупроводниковые компоненты последнего поколения по толщине уже приблизились к практическому пределу. Рис. 6 иллюстрирует степень близости новейших компонентов к практическому и расчётному теоретическому пределам. И хотя дальнейшее уменьшение толщины кристалла в принципе ещё возможно, оно обернётся большей «жёсткостью» процесса переключения или существенным ростом потерь запираия. С сегодняшней точки зрения пользователям такие приборы вряд ли нужны.

4 Различные варианты тиристорной структуры силового полупроводникового прибора.



5 Эффект отсечки тока при запираии большого модуля IGBT 3,3 кВ/1500 А с учётом влияния большой паразитной индуктивности.

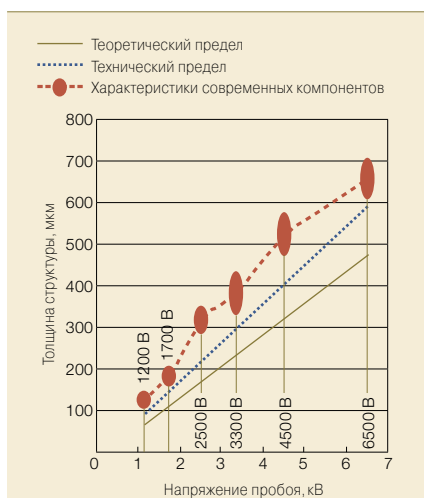


## Важнейшие аспекты в энергетике

### Повышение отключающей способности (зона безопасной работы)

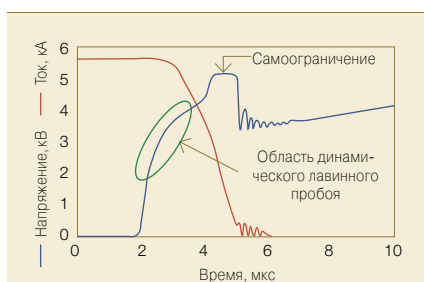
Полезная составляющая выходного тока силового полупроводникового прибора ограничена как возможностями корпуса по рассеянию мощности, так и наибольшим током, который ещё можно безопасно разрывать при запираании. Детально технология корпусов будет рассмотрена

6 Степень близости характеристик современных полупроводниковых компонентов к пределам электрической прочности.



Красные области значений толщины структур полупроводника отображают разброс для разных производителей (в предположении, что пробой происходит при комнатной температуре, а толщина – минимально необходимая; для технического предела показаны реально достижимые значения).

7 Процесс отключения прибора IGCT с площадью активной области 40 см<sup>2</sup> в пределах зоны безопасной работы без демпфирующей цепи.



Поверхностная плотность мощности переключения более 500 кВт/см<sup>2</sup>. Возникновение пробоя вначале замедляет рост напряжения, а затем вообще ограничивает напряжение, препятствуя возникновению перенапряжений.

во второй части настоящей статьи, аспекты же зоны безопасной работы рассматриваются ниже.

В 1990-е гг. считалось общепринятым, что наступление динамического лавинного пробоя – это небезопасный режим работы. Такой пробой происходит, если поверхностная плотность мощности, вычисляемая как отнесённое к единице площади полупроводниковой структуры произведение тока в момент отключения на приложенное напряжение постоянного тока, достигает примерно 150 кВт/см<sup>2</sup>.

Внутренними коммутационными процессами прибора IGBT можно управлять с помощью напряжения на затворе, в то время как переходные процессы при переключениях прибора IGCT определяются исключительно внутренней динамикой последнего.

Теория не подтверждает вывод о том, что динамический лавинный пробой небезопасен. Напротив, пробой является процессом с самоограничением [4] и поэтому может считаться безвредным. Соответственно имеет смысл поднимать значение мощности на единицу площади до максимально возможной. В современных успешно работающих полупроводниковых компонентах (IGCT, IGBT, диоды) эта величина уже превышает 1 МВт/см<sup>2</sup>. Из рис. 7 видно, что большие компоненты могут вполне безопасно управлять очень большими выходными мощностями.

В настоящее время из-за ограничений по нагреву работа полупроводниковых компонентов при поверхностной плотности мощности более 100 кВт (эфф.) /см<sup>2</sup> едва ли возможна. Поэтому закономерен вопрос: имеет ли практическую ценность зона безопасной работы с границей, далеко выходящей за указанный предел мощности? Оказывается, имеет и вот по каким причинам:

■ Нельзя утверждать, что в силовых полупроводниковых приборах большой мощности ток распределяется по полупроводнику равномерно. Неравномерность охлаждения, подключение индуктивностей, некоторая неоднородность полупроводника могут приводить к существенным различиям в температуре и неравномерности тока, особенно в моменты переключения [7]. Значительный запас по мощности позволяет избежать отказа

полупроводниковых компонентов при работе в таких условиях. Некоторым крупным производителям оборудования удалось обнаружить причинную связь между запасом по мощности и эксплуатационной надёжностью даже при работе компонентов в номинальных режимах.

■ Высокая устойчивость к динамическому лавинному пробую исключает возникновение перенапряжений, превышающих номинальные (см. рис. 7).

■ Большой запас по мощности может весьма пригодиться и в достаточно редких случаях перегрузки (например, при коротком замыкании). Значительное выделение энергии в таких случаях чаще всего не приводит к выходу прибора из строя, тем более что отключение в таких ситуациях производится всего один раз.

### Повышение максимальной температуры перехода

Расширение пределов по температуре тесно связано со свойствами корпусов силовых полупроводниковых приборов и поэтому подробно рассматривается во второй части настоящей статьи.

### Сравнение приборов IGCT и IGBT

Меньшая мощность управления приборов IGBT часто выдаётся за ключевое преимущество этого класса по сравнению с IGCT. Меньшая мощность управления объясняется тем, что прибор IGBT управляется по МОП-входу, а IGCT управляется током. На практике это различие имеет значение лишь в редких случаях, поскольку в приборах IGCT мощность управления достаточно мала и обычно может быть обеспечена без особых затрат.

С другой стороны, наиболее важное различие этих двух классов приборов заключается в том, что внутренними коммутационными процессами прибора IGBT можно управлять с помощью напряжения на затворе, в то время как переходные процессы при переключениях прибора IGCT определяются исключительно внутренней динамикой последнего. Это различие, на первый взгляд несущественное, имеет далеко идущие последствия для общей схемотехники и для случаев, когда требуется параллельное или последовательное соединение приборов.

### Различия в схемотехнике

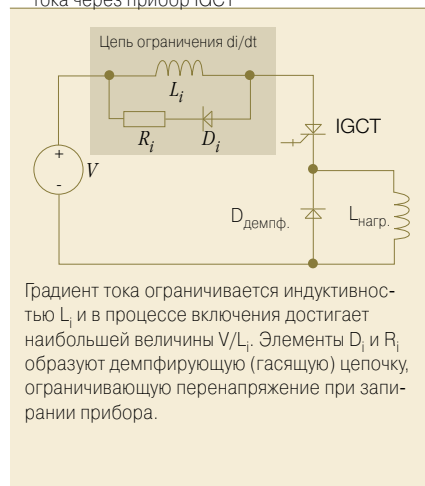
Благодаря тиристорной структуре приборов IGCT, ток в таких приборах при их отпирании нарастает очень быстро, т. е. значение  $di/dt$  очень велико, что порождает недопустимо высокую нагрузку на вспомогательные диоды. По этой причине величину  $di/dt$  в цепях с IGCT всегда следует ограничивать. В инверторных преобразователях ограничение осуществляется включением последовательно с прибором небольшой индуктив-

ности (рис. 8). Схема при этом усложняется, зато приобретает следующие преимущества:

1. В инверторных преобразователях без внешнего ограничителя  $di/dt$  (характерно для схем с приборами IGBT) скорость нарастания тока необходимо ограничивать путём управления самим переключающим прибором. Это приводит к существенным потерям в открытом состоянии. В инверторах в высокими номинальными напряжениями потери при включении в сочетании с потерями за счет тока восстановления на диодах достигают 40-60% от общих потерь и зависят от частоты переключения. Применение пассивного ограничителя  $di/dt$  может значительно снизить потери в кремниевом переключающем приборе, устраняя его перегрев и в результате позволяя в принципе повысить выходную мощность инвертора. Однако следует заметить, что потери всё равно существуют – они лишь переносятся в демпфирующую цепь ограничителя  $di/dt$  (т.е. в резистор  $R_i$  и диод  $D_i$ ). Поэтому утверждение, что инвертор с цепью ограничения  $di/dt$  имеет меньшие общие потери, чем обычный инвертор с приборами типа IGBT, является неверным.

2. Второе преимущество заключается в том, что из-за пассивного ограничения  $di/dt$  при возникновении короткого замыкания (например, в выпрямительном мосте инвертора или в нагрузке) ток будет возрастать относительно медленно.

**В** Цепь с ограничением скорости нарастания тока через прибор IGBT



Следовательно, есть два пути защиты от коротких замыканий:

- если короткое замыкание обнаружено вовремя, можно инициировать нормальное отключение;
- можно использовать энергию, запасённую в цепи постоянного тока, для запираания всех ключей, распределив её равномерно между всеми полупроводниковыми компонентами (индуктивность  $L_i$  можно подобрать такой, что она ограничит ток короткого замыкания в безопасных пределах).

Нельзя утверждать, что в силовых полупроводниковых приборах большой мощности ток распределяется по полупроводнику равномерно.

#### Параллельное и последовательное соединения

Поскольку на переходные процессы в приборе IGBT при его переключении нельзя повлиять извне, цепь управления должна обеспечить абсолютно одновременное управление всем устройством. Тогда процесс запираания будет плавным и потому безопасным. Допустимая неодновременность составляет не более 100 нс, а это значит, что приборы IGBT весьма проблематично эксплуатировать в параллельном или последовательном включении. В обоих включениях требуются пассивные или активные демпфирующие цепи, которые смогли бы скомпенсировать даже малейшую разницу в моментах переключения отдельных приборов IGBT (из-за временных ошибок управления или локальных условий, например, температуры). Если этого не сделать, возможна перегрузка отдельных приборов. Стоимость и сложность демпфирующих цепей в большинстве случаев слишком велики, чтобы приборы IGBT в групповом включении обеспечили достойную альтернативу приборам IGBT. Отсюда можно сделать вывод, что приборы IGBT лучше всего использовать в случаях, когда каждая отдельная функция переключения выполняется одним отдельным прибором.

Во второй части настоящей статьи, которая будет опубликована в журнале АББ Ревю 1/2007, будут рассмотрены вопросы расчёта и проектирования корпусов. Будут также рассмотрены потенциальные возможности материалов с большой шириной запрещённой зоны.

**Стефан Линдер**

ABB Switzerland Ltd, Semiconductors  
Ленцбург, Швейцария  
stefan.linder@ch.abb.com

#### Литература:

- [1] K. Eriksson: «HVDC Light™ and Development of Voltage Source Converters». Proc. IEEE/PES T&D Latin American Conf., Sao Paulo, 2002
- [2] T. Laska, F. Pfirsch, F. Hirler, J. Niedermeyer, C. Schaeffer, T. Schmidt: «1200V-Trench-IGBT Study with Short Circuit SOA». Proc. ISPSD '98, 433-436, Kyoto, 1998
- [3] M. Mori, Y. Uchino, J. Sakano, H. Kobayashi: «A Novel High-Conductivity IGBT (HiGT) with a Short Circuit Capability». Proc. ISPSD '98, 429-432, Kyoto, 1998
- [4] Linder, Stefan: Power Semiconductors. EPFL Press / CRC Press, 2006. ISBN 2-940222-09-6 (EPFL Press) or 0-8247-2569-7 (CRC Press)
- [5] S. Dewar et al: «Soft Punch Through (SPT) – Setting new Standards in 1200V IGBT». Proc. PCIM Nuremberg, 2000
- [6] T. Laska et al: «The Field Stop IGBT (FS IG-BT) – A New Power Device Concept with a Great Improvement Potential». Proc. ISPSD 2000, 355-358, Toulouse, 2000
- [7] D. Cottet et al: «Numerical Simulations for Electromagnetic Power Module Design». Proc. ISPSD '06, 209-212, Naples, 2006
- [8] M. Rahimo, A. Kopta, S. Eicher: «Next Generation Planar IGBTs with SPT+». Power Electronics Europe, Ausgabe 06, 2005