

Справа: положительная температурная зависимость выше номинального тока (75 А)

Преимущества положительной температурной зависимости можно реализовать в специальных параллельных системах, так как у нагретого диода носителей тока меньше и система более стабильна. Отрицательный температурный коэффициент (> 2 мВ/К) вызовет температурную нестабильность при параллельном соединении диодов, при котором всегда имеется разброс падений напряжения, возникающий в процессе изготовления.

Параллельные диоды термически соединяются

- через прокладку в корпусе модуля,
- обычно через теплоотвод в корпусе модуля.

В принципе, при умеренно отрицательном температурном коэффициенте, эффект термической связи будет необходим для избежания температурных разбросов диода при максимальном падении напряжения. Для диодов с отрицательным температурным коэффициентом > 2 мВ/К мы рекомендуем выбрать нижнее номинальное значение тока, которое может достичь ток отдельного диода (снижение номинальных значений).

1.4 Силовые модули: специальные возможности многокристалльных структур

1.4.1 Конструкция силовых модулей

Силовые модули *отдельных силовых полупроводников* (MOSFET или IGBT кристаллов и диодов) являются электрически изолированными от монтажного основания (теплоотвода) и встроены в корпус на общей пластине.

Кристаллы припаяны (или приклеены) к металлической поверхности изолирующей подложки, которая электрически изолирует кристаллы от общей пластины модуля, и в то же время хорошо отводит тепло. Верхние части кристаллов подключены к структурным площадкам металлизированных поверхностей с помощью алюминиевых проводов. Дополнительно, пассивные элементы, такие как резисторы, шунты/ датчики тока или температуры (например РТС – резисторы) могут быть встроены в модуль (гибридно) а также частично в кристаллы транзистора (монолитно).

Кроме того, «интеллектуальные» силовые модули дополнительно содержат драйвер и цепи защиты, см. п.1.6.

Используемые в настоящее время изолирующие подложки для силовых модулей приведены в таблице ниже:

Изоляционный материал:

| | | | |
|------------------|--------------------------|----------------------|-------------------|
| <u>керамика:</u> | оксид алюминия Al_2O_3 | <u>органические:</u> | эпоксидная смола |
| | нитрид алюминия AlN | | полиимид (каптон) |

(оксид бериллия BeO)
(карбид кремния Si₃N₄)

Подложки

Металлические пластины:

DCB (**D**irect **C**opper **B**onding)
AMB (**A**ctive **M**etal **B**razing)
IMS (**I**nsulated **M**etal **S**ubstrate)
Многослойная IMS

Тонкопленочные слои: TFC (**T**hick **F**ilm **C**ooper)

DCB (**D**irect **C**opper **B**onding)

На рис.1.42 показана структура силового модуля с IGBT и обратными диодами, которая используется в большинстве современных технологий с подложкой из DCB-керамики с Al₂O₃ или AlN изоляцией, с хорошей температурной проводимостью и высоким изоляционным напряжением.

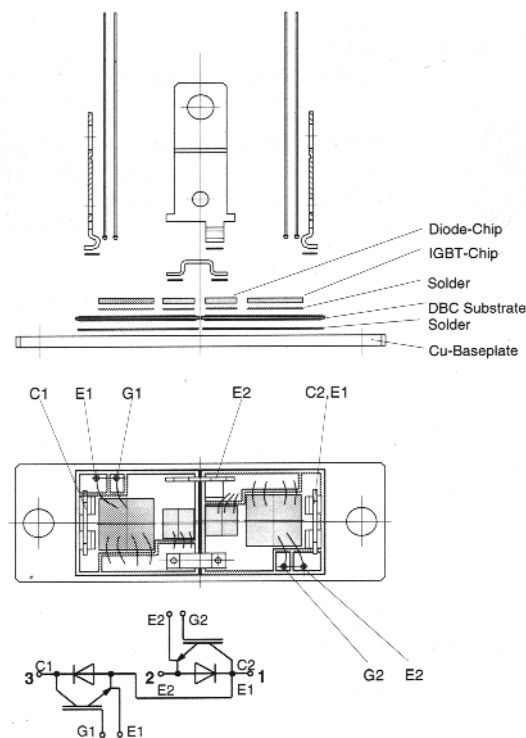


Рис.1.42 Конструкция IGBT модуля SKM100GB123D в корпусе SEMITRANS 2

Для изготовления подложки DCB, на медную поверхность толщиной около 300 мкм сверху и снизу эвтектически наплавляют при температуре свыше 1000 °С изолирующий материал (толщиной 0.38...0.63 мм). После необходимой разводки схема модуля вытравливается на верхней части медной поверхности, кристаллы припаиваются, и контакты

кристалла подключаются перемычками. Нижняя часть DCB-керамической подложки припаивается прямо к основной пластине модуля (толщиной около 3 мм), см. рис.1.42.

Другие типы модулей (например SEMITOR, SKiiPACK, MiniSKiiP) не всегда крепятся на основную пластину и процесса припаивания может не быть. В этих модулях DCB-подложка запрессовуется в теплоотвод благодаря соответствующей конструкции корпуса (см. п. 1.5).

Преимущества DCB-технологии по сравнению с другими конструкциями - это в основном высокая проводимость тока благодаря слою меди, хорошие условия охлаждения благодаря керамическому материалу, высокая адгезионная сила меди к керамике (надежность) и оптимальная теплопроводность керамического материала [52].

AMB (Active Metal Brazing)

Технология AMB (brazing-«пайка твердым припоем» металлической фольги к подложке) была разработана на основе DCB. Преимущества AMB-подложки с AlN-керамикой по сравнению с подложками с Al₂O₃-керамикой в, например, более низком температурном сопротивлении, меньшем коэффициенте расширения и улучшенной способности частичного разряда. Рис.1.43 разъясняет различия между DCB и AMB.

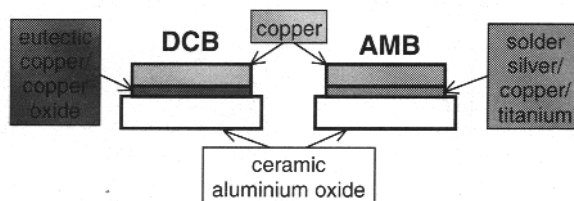


Рис.1.43

IMS (Insulated Metal Substrate)

IMS сначала использовался в дешевых или маломощных конструкциях, и характеризуется прямым присоединением изоляционного материала к основной пластине модуля. Для изоляции от алюминиевой пластины обычно используются полимеры (такие как эпоксидные смолы, полиамиды). Верхний слой из медной фольги, которая формируется и приклеивается на изоляционную подложку (как в конструкции PCB), а также разведена травлением (рис.1.44).

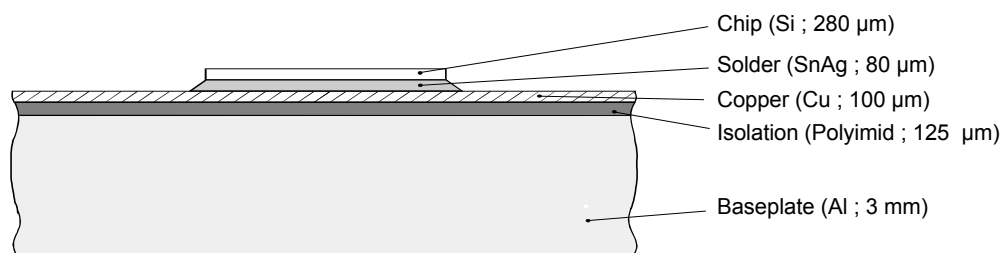


Рис.1.44 Основная конструкция IMS силового модуля [194]

Преимущества IMS в низкой стоимости, филигранной конструкции дорожек (возможность интеграции драйвера и цепей защиты), высокой механической прочности подложки и относительно широкой ее площади, по сравнению с DCB.

Очень тонкий изоляционный слой, однако, приводит к сравнительно высоким общим емкостям поверхности монтажа (см. п. 1.4.2.6). Кроме того, тонкий верхний слой меди только обеспечивает сравнительно низкое распределение тепла, которое улучшается дополнительными металлизированными слоями распределения тепла под кристаллами или добавлением алюминиевых частиц в изоляционный слой.

TFC (Thick Film Cooper)

Как и в DCB, основным материалом для тонкой пленочной подложки является изоляционная керамика, которая прямо приклеена на основную пластину или теплоотвод при помощи силикона или пайкой (рис.1.45).

Дорожки в верхней части керамической подложки выполнены из меди трафаретной печатью. Кристаллы силового модуля или другие компоненты припаяны или приклеены на дорожки

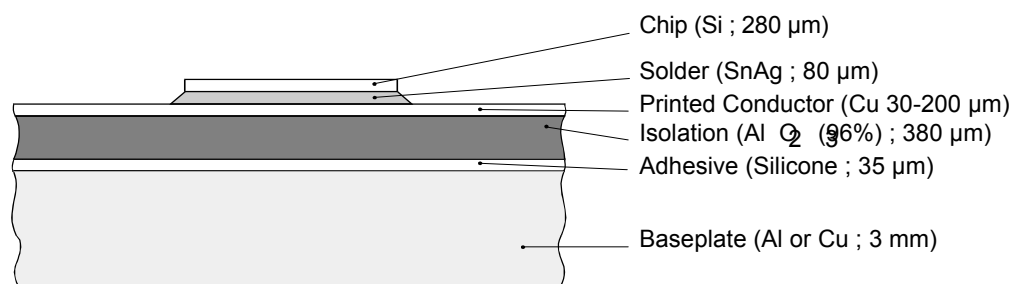


Рис.1.45 Основная конструкция TFC-силового модуля [194]

TFC-технология также может комбинироваться со стандартной тонкопленочной технологией.

Так как очень низкие сопротивления можно получить при помощи клейких материалов, которые обычно используются в тонкопленочной технологии, и так как изолированные дорожки можно расположить одну над другой и подключить, довольно большое количество компонентов можно интегрировать очень компактно. Однако, очень филигранные дорожки (толщиной примерно 15 мкм) ограничат способность пропускания тока в такой структуре до величины около 10 А.

1.4.2 Возможности силовых модулей

Оценка важности параметров для компоновки модулей будет всегда зависеть от специфики применения. Наиболее важным параметром для управления железной дорогой,

например, будет надежность, поскольку низкая цена является критерием для потребительских товаров.

В этом разделе применимость силовых модулей будет рассматриваться при следующих комплексных критериях: *«оптимизированная» сложность модуля, способность рассеивать тепло, напряжение изоляции и устойчивость к отдельным разрядам, температурная прочность и способность выдерживать периодичность нагрузки во внешних цепях, конструкция с низкой внутренней индуктивностью, статическая и динамическая симметричность структуры, электромагнитная стабильность, определенные и мягкие условия отказов, простота конструкции и технологии подключения, а также благоприятное не загрязняющее производство и пригодность к переработке для вторичного использования.*

1.4.2.1 Степень сложности

Оптимизировать степень сложности в основном нельзя. С одной стороны, с усложнением модулей будет падать цена устройств, и минимизироваться проблемы, возникающие при комбинировании нескольких компонентов (паразитная индуктивность, взаимное влияние, неправильная разводка). С другой стороны, с усложнением модулей снизится их универсальность (уменьшится число партий). Число испытаний и стоимость одного модуля возрастут. С увеличением числа интегрированных компонентов и связей надежность модуля снизится и работ по ремонту будет больше. Драйверы, датчики и цепи защиты должны удовлетворять высоким требованиям по термо- и электромагнитной стабильности.

До настоящего времени следующие конфигурации модулей получили признание как «мировой стандарт» по отношению к интеграции драйверов. Актуальность этих разработок описана в п.1.6. универсальность силовых модулей резко снижается с возрастанием интеграции функций драйвера, модуль становится основной системой.

С одной стороны, «интеллектуальные» модули стремятся изготавливать большими тиражами (бытовая, автомобильная техника), с другой стороны, спрос только расширяется, очень много похожих устройств будут питаться от новейших модульных систем, состоящих из похожих основных элементов. В отличие от неизбежной избыточности в таком случае, пользователь может получить выгоду от удешевления систем благодаря совместным усилиям изготовителей модулей.

Что касается расположения IGBT и диодов в наиболее используемых силовых модулях, конфигурации, показанные на рис.1.46, пользуются хорошим спросом, отвечая требованиям большинства устройств силовой электроники и технологии управления. Рис.1.46

соответственно подходит к модулям на силовых MOSFET, которые сегодня часто используются в источниках питания.

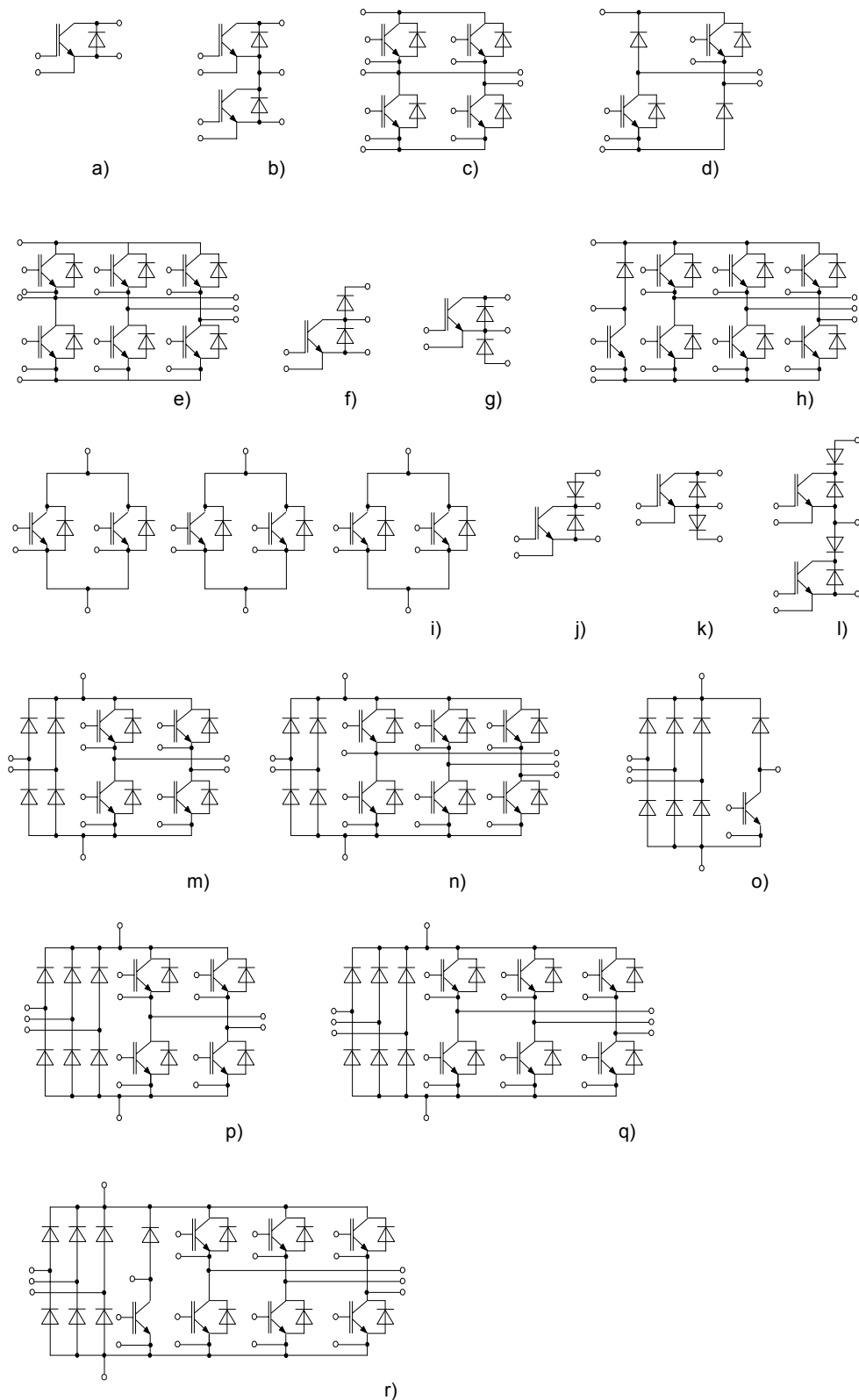


Рис.1.46 Основные схемы силовых модулей с IGBT и диодами

- a) ...GA...: одиночный ключ, состоит из IGBT и гибридного обратного диода (для MOSFET модулей, здесь и в остальных конструкциях, часто паразитный обратный диод).
- b) ...GB...: сдвоенный модуль (полумостовой модуль) состоит из двух IGBT и гибридных обратных диодов.
- c) ...GH...: H-мост с двумя плечами, состоящий из IGBT и обратных диодов
- d) ...GAN...: асимметричный H-мост с двумя диагональными IGBT и гибридными обратными диодами, а также с двумя диодами на пересечении диагонали.
- e) ...GD...: 3-фазный мост (Sixpack, инвертор) с тремя плечами, состоящий из IGBT и обратных диодов.
- f) ...GAL...: коммутирующий модуль с IGBT, инверсным и обратным диодом со стороны коллектора
- g) ...GAR...: коммутирующий модуль с IGBT, инверсным и обратным диодом со стороны эмиттера
- h) ...GDL...: 3-фазный мост «GD» с ключем «GAL» (прерыватель)
- i) ...GT...: Tripack-модуль с тремя парами ключей
- j) ...GAX...: одиночный ключ с последовательным диодом со стороны коллектора (обратный блокирующий ключ)
- k) ...GAY...: одиночный ключ с последовательным диодом со стороны эмиттера (обратный блокирующий ключ)
- l) ...GBD...: двойной модуль с последовательными диодами (обратный блокирующий ключ)
- m) ...B2U – диодный выпрямитель и IGBT H-мост
- n) ...B2U – диодный выпрямитель и IGBT инвертор (трехфазный мост)
- o) ...B6U – диодный выпрямитель и IGBT ключ «GAL» (IGBT и обратный диод со стороны коллектора)
- p) ...B6U – диодный выпрямитель и IGBT H-мост
- q) ...B6U – диодный выпрямитель и IGBT инвертор (трехфазный мост)
- r) ...B6U – диодный выпрямитель, IGBT ключ «GAL» и IGBT-инвертор (трехфазный мост)

Разработанная система маркировки SEMIKRON для SEMITRANS-IGBT и MOSFET модулей приведена в п.1.4.4; для SEMITOR, SKiiPPACK и MiniSKiiP в п.1.5.