

Ни рис.1.53 показано максимально допустимое напряжение изоляции для разных изоляционных подложек и сегодняшний стандарт толщины подложки  $d$ .

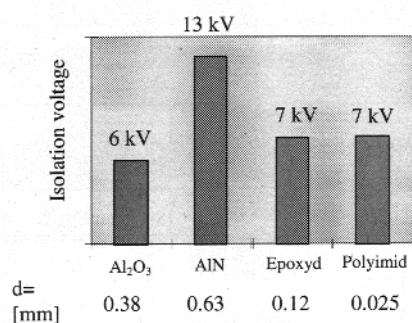


Рис.1.53

#### 1.4.2.4 Способность периодически передавать мощность

Эта способность на частотах ниже приблизительно 3 кГц, особенно при рабочем цикле, преимущественно в пусковых, тяговых и импульсных применениях, будет подвергать температурной циркуляции внутренние соединения модуля, такими соединениями будут:

- соединения проводов,
- нижняя пайка кристаллов,
- пайка DCB и основной пластины,

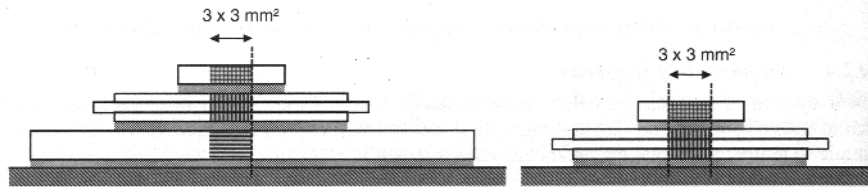
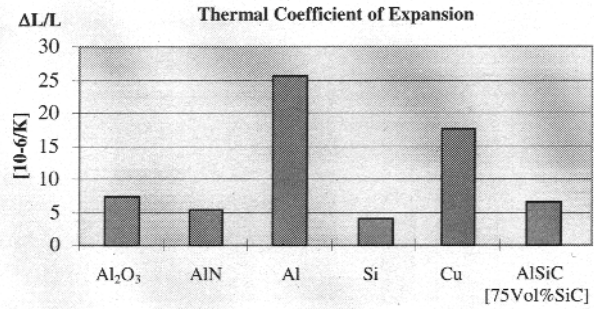
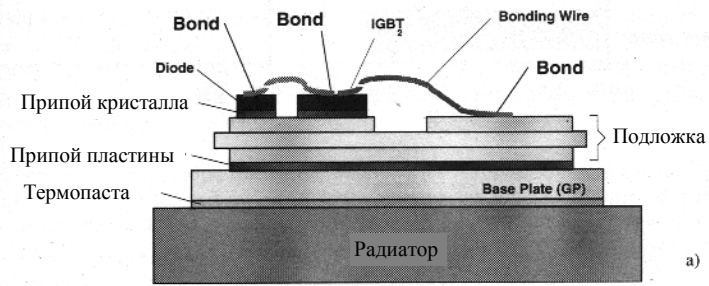
а также покрытие подложки (Cu на Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> или AlN).

Разные коэффициенты расширения слоев вызовут температурные перегрузки при изготовлении и работе, что приведет к старению и износу материала; срок службы модуля (число возможных коммутаций) будет уменьшен, если амплитуда перепадов температуры кристалла возрастет при этих циклах.

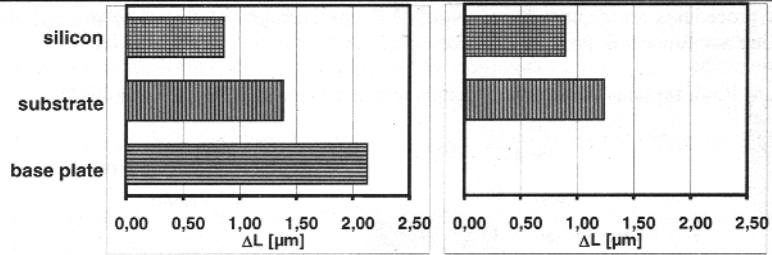
Процесс испытаний рассмотрен в п.2.7; корреляция срока службы модуля и амплитуды перепадов температуры будет разъяснена в п.3.2.3.

Ни рис.1.54а показаны детали структуры модуля IGBT которые имеют отношение к его сроку службы.

Из рис.1.54 ясно, что пайка подложки к медной пластине имеет большое значение, так как это наибольшее соединение – обеспечивается средний перепад коэффициентов расширения соседних материалов. Следовательно, нужно использовать высококачественные припои и сложный процесс пайки для избежания деформации и разрушения подложки также в случае больших амплитуд перепадов температуры.



System:	standard 34mm module 0,38mm-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / Cu base plate			SKiiP pressure system 0,38mm-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
Results:	T-T <sub>kk</sub> [K]	ΔL/L [1E-6/K]	ΔL [μm]	T-T <sub>kk</sub> [K]	ΔL/L [1E-6/K]	ΔL [μm]
silicon	69,7	4,1	0,86	62,6	4,1	0,77
substrate	55,4	8,3	1,38	48,3	7,8	1,13
base plate	40,5	17,5	2,13	—	—	—



c)

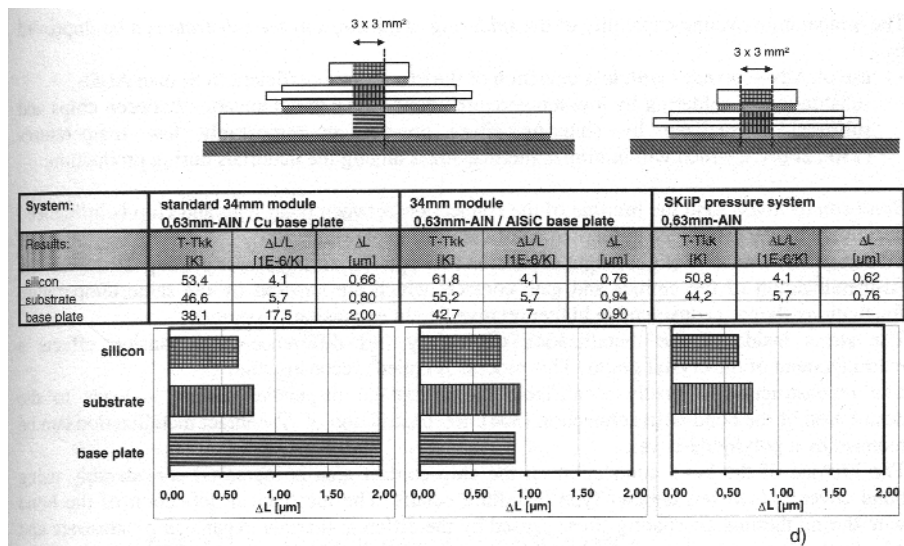


Рис.1.54 Температурное расширение в силовом модуле

- a) стандартная сборка модуля с основной пластиной
- b) коэффициент температурного расширения
- c) сравнение: сборка с и без медной основной пластины; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-подложка
- d) сравнение: сборка с и без медной/AlSiC пластины; AlN-подложка

Кроме того, часто DCB-подложки разделяют для сохранения по возможности минимальной абсолютной разницы коэффициентов расширения с помощью уменьшения площадей пайки. В других, позже разработанных типах модуля, медь заменена материалом с малым коэффициентом расширения (такой как AlSiC), см п.1.5.4 и [206].

Также показано на рис.1.54, что модули с AlN-DCB особенно чувствительны, так как коэффициент расширения AlN очень похож на коэффициент кристалла кремния, но имеет большее отличие от меди по сравнению с Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Следовательно, сегодняшние модули с AlN-DCB и медными пластинами не могут полностью использовать реальные параметры материала из соответствующих технических данных.

Становится очевидным, что одну из основных причин износа и старения можно устранить при исключении основной пластины и пайки к ней, до тех пор, пока обеспечена передача тепла от подложки к радиатору и компенсирован недостаток распространения тепла. Это реализовано в технологиях SKiiP, MiniSKiiP, SEMiTOP и SKiM (см. п.1.5).

Улучшить теплопередачу пайки кристалла к подложке можно при помощи

- использования AlN-подложек с меньшим отклонением коэффициента расширения от кремния, чем Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,
- заменой пайки низкотемпературными соединениями; соединение кристаллов с подложкой выполнено спеканием серебряным порошком при сравнительно низких температурах (150...200 °C), что минимизирует температурный перепад между материалами при изготовлении.

*Внутренние соединения.* Также на срок службы соединений внутренних проводов и кристалла непосредственно влияет разница коэффициентов температурного расширения.

У кремния относительно малое продольное расширение ( $4.7 \cdot 10^{-6}/K$ ). Однако Al-металлизация контактов эмиттера и затвора, которая подвержена тем же перепадам температуры, показывает значительно большее относительное продольное расширение ( $23 \cdot 10^{-6}/K$ ). Перегрузки внутри металлизации вызваны этой разницей в расширениях и перестановкой атомов кристалла. Этот процесс называется «реконструкцией».

Реконструкция – хорошо заметна на светорассеивающих поверхностях – приводит к разрушению внутренних связей [304]. Реконструкцию Al-металлизированных контактов можно уменьшить полиимидным покрытием.

Срок службы соединений внутренних проводов на контактной поверхности кристалла значительно возрастет при использовании покрытий проводов. Однако при этом возникает другая проблема. Механическая деформация внутренних проводов при разных температурных перепадах, которая вызвана разницей коэффициентов температурного

расширения подложки и Al-проводов, приведет к их надломам возле узлов с печатной стороны соединения, так как узел механически закреплен полиимидным покрытием.

Разрушения проводов часто происходят при испытаниях срока службы, потому что разрушение на самом деле вызвано старением слоя припоя. Температурное сопротивление растет из-за трещин в припое, поэтому растет температура кристалла, и большим температурным перепадам подвергаются внутренние соединения и слой припоя кристалла. В конце концов, эта обратная связь приведет к поломке модуля.

В любом случае старение паяного соединения нужно исследовать при анализе отказов. Используя современные технологии пайки, добиваются почти одинакового срока службы при высокотемпературных перепадах ( $\Delta T \approx 100$  K).

На современном испытательном оборудовании измерены и записаны падение напряжения и температурное сопротивление силовых приборов. Так что можно наблюдать изменения в слое припоя и внутренних соединениях.

Соединения внутренних проводов в IGBT и диодах можно заменить на контакты под давлением с высокотемпературными характеристиками благодаря их технологии. Процесс освоения этой технологии применительно к силовым модулям все еще разрабатывается.

#### 1.4.2.5 Внутренняя низкоиндуктивная структура

На примере полумостового модуля, рис.1.55 показывает основные внутренние паразитные индуктивности модуля, возникающие при соединениях между кристаллами и выводами модуля (внутренние проводники).

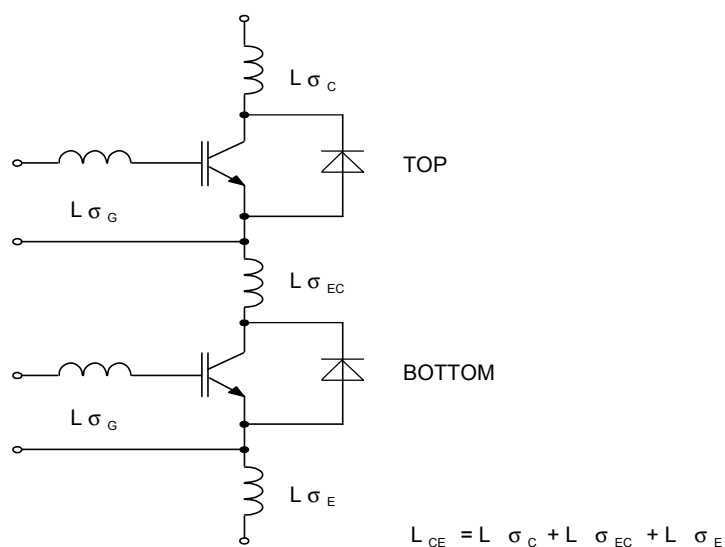


Рис.1.55 Паразитные индуктивности сдвоенного IGBT модуля

$L_{\sigma G}$ : паразитные индуктивности затвора

$L_{\sigma C}$ : паразитная индуктивность верхнего коллектора

$L_{\sigma EC}$ : паразитная индуктивность между верхним эмиттером и нижним коллектором

$L_{\sigma E}$ : паразитная индуктивность нижнего эмиттера

$L_{\sigma CE}$ : общая паразитная индуктивность верхний коллектор – нижний эмиттер

Минимизация этих индуктивностей, которые вызывают перенапряжения при выключении и снижают  $di/dt$  при включении, а также индуктивную связь между силовыми и цепями управления, будет напрямую влиять на характеристики силовых модулей.

Кроме того, паразитные индуктивности модулей с параллельным расположением кристаллов внутри могут вызвать разные динамические характеристики кристаллов и генерацию между ними.

В п.3.4.1 детально рассмотрены эти корреляции.

#### **1.4.2.6 Адаптация внутренней структуры к ЭМС**

Большая скорость нарастания тока и напряжения в нс-диапазоне на MOSFET и IGBT модулях генерирует электромагнитные помехи с частотами далеко за МГц-диапазоном. Следовательно, обычные паразитные элементы внутренних и внешних путей прохождения сигнала в модуле оказывают значительное влияние на генерируемое напряжение помех.

Соответствующие изоляционные материалы, короткие соединяющие площадки или защитные экраны могут уменьшить, например, асимметричные помехи [193].

В дополнение к этому, внутренние соединения модуля должны быть выполнены таким образом, чтобы исключить сбои, вызванные внешними паразитными полями или трансформаторной связью с проводами управления.

Другим аспектом электромагнитной совместимости является «ток земли», т.е. ток  $i_E = C_E \cdot dv_{CE}/dt$ , который протекает благодаря емкости изоляции подложки  $C_E$ , вызванный генерируемым в IGBT  $dv_{CE}/dt$  при коммутации через заземленный теплоотвод к земляной шине.

Земляной ток определяется как ток утечки, его допустимое максимальное значение ограничено 0.1...5 % (преимущественно 1 %) от номинального выходного тока. Соответственно, допустимая частота коммутации будет расти пропорционально уменьшению емкости изоляционной подложки.

На рис.1.56 сравниваются емкости наиболее часто используемых подложек по отношению к их стандартной толщине. Отклонения диэлектрических констант и стандартная зависимость толщины от теплопроводности (наибольшая толщина подложки AlN 630 мкм, наиболее тонкая подложка требуется для IMS-структуры 120 мкм для эпоксидной изоляции, 25 мкм – полиимидной) проявляется в отношении емкостей  $C_E$  и, таким образом, в