

Вакуумная пайка в производстве силовой электроники

Современное решение для лабораторного и крупносерийного производства

Сергей Валев

valev@ivtec.ru

Использованы материалы фирмы Pink GmbH Vacuumtechnik

Введение

Производство изделий силовой электроники, в особенности силовых модулей, включает четыре основных операции: монтаж кристаллов, их пайку на основание или подложку, ультразвуковую сварку и окончательную сборку/герметизацию. Все эти процессы требуют аккуратного и серьезного подхода. Как показала практика, организовать производство силовой электроники на порядок сложнее, чем, к примеру, участок поверхностного монтажа. Проблема усугубляется тем, что в последние годы отечественные производители силовых модулей столкнулись с жестким натиском «белых» и «серых» импортеров зарубежных изделий.

Специалисты отечественных предприятий пришли к выводу, что даже использование в собственной конструкции исходных материалов и компонентов, применяемых их зарубежными конкурентами, не гарантируют результата, приемлемого с технической и экономической точек зрения. В итоге, отечественные силовые модули, часто превосходящие зарубежные аналоги в плане конструкции, стойкости к воздействию окружающей среды и по электрическим параметрам, как правило, проигрывают им по себестоимости и наработке на отказ.

Ключевая технологическая проблема российских производителей силовых модулей — отсутствие проработанного решения процесса пайки. Применение силовых модулей предусматривает крайне жесткие условия их эксплуатации — огромные токовые и термические нагрузки, термические циклы, вибрации. В отличие от компонентов поверхностного монтажа паяные соединения силовых модулей служат не для создания электрического контакта, а для теплопередачи. Естественно, наличие в припойном слое пузырей воздуха, азота или флюса — основная причина локального перегрева термически-нагруженных компонентов модуля и выхода его из строя. Проблему нельзя недооценивать — зарубежные производители потратили десятки лет, чтобы добиться приемлемого качества паяного соединения. Различные источники регламентируют максимально допустимое содержание пузырей (каверн) в паяном соединении. Наиболее известная норма — площадь пузырей не должна превышать 5% общей площади соединения, при том что максимальная площадь любого из пузырей не превышает 1%. С появлением более мощных и тонких кристаллов многие производители уже

сточили требования по наличию пузырей до 1% общей площади и менее.

Так или иначе все отечественные производители силовой электроники пришли к пониманию того, что ни компрессионная, ни эвтектическая пайка в азоте, ни тем более обычная конвекционная пайка не могут обеспечить выполнения этих требований.

Уменьшение геометрических размеров корпуса и повышение токовых нагрузок обусловили необходимость учитывать на всех этапах разработки и производства изделий характеристик теплопроводности. Из-за того, что воздух имеет на несколько порядков меньшую теплопроводность, чем металл припоя, пузыри в паяном соединении уменьшают общую теплопроводность соединения и вызывают образование локальных областей перегрева. Электропроводность нагретого полупроводника уменьшается, сопротивление растёт, в результате происходит отказ.

Внедрение бессвинцовых составов припоя лишь усиливает проблему: они намного более расположены к образованию каверн. Единственным общепризнанным методом удаления пузырей из жидкого припоя является вакуумная пайка. Одним из удачных технических решений является семейство вакуумных печей серии VADU, разработанных немецкой фирмой PINK совместно с известным производителем силовых модулей. Теплопередача в этих печах (как нагрев, так и принудительное охлаждение) основана на кондукционном нагреве, имеющем неоспоримые преимущества над остальными методами в случае пайки изделий большой неравномерно распределенной термической массы. Нагрев изделий в печи происходит при контакте изделия и нагретой поверхности «мармита» нагревателя. Теплопередача в этом случае происходит снизу вверх. Вначале нагревается теплоотвод — нижняя, самая тяжелая часть изделия. Только когда теплоотвод нагрелся до температуры, обеспечивающей смачивание припоем, происходит плавление припоя и нагрев верхних компонентов изделия, как правило, более чувствительных к перегреву подложек и кристаллов. Время, в течение которого кристаллы нагреты до температуры пайки, очень мало, соответственно, исключается их перегрев.

В случае конвекционной пайки тепло подается сразу на все изделие. Очевидно, что все, даже самые чувствительные к перегреву компоненты нагреваются за одно и то же время. Кроме этого, припой начинает плавиться прежде, чем тяжелый теплоотвод достигнет температуры, при которой происходит смачивание.

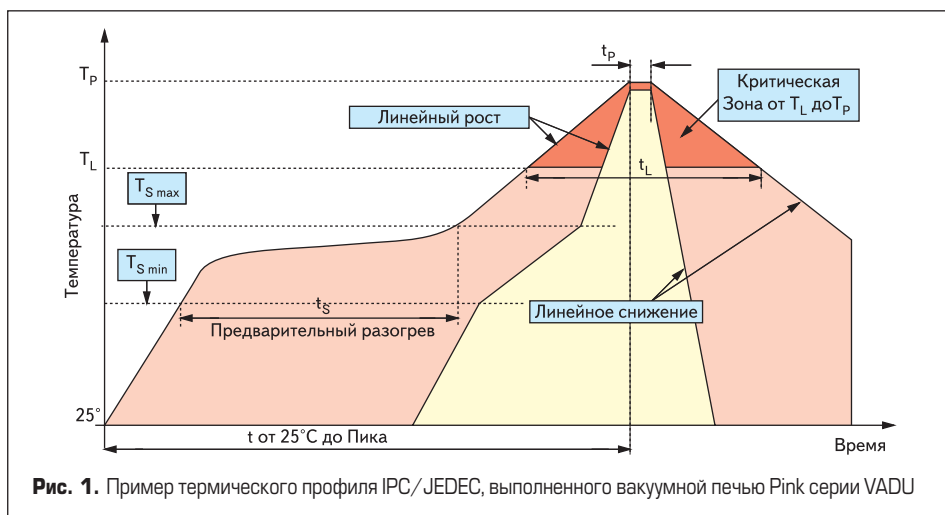


Рис. 1. Пример термического профиля IPC/JEDEC, выполненного вакуумной печью Pink серии VADU

В результате образуются области, где смачивания не произошло, то есть будущие пузыри в припойном слое.

Вакуумные печи PINK

От аналогичных печей других производителей серия VADU отличается патентованной системой динамически регулируемого зазора между изделием и нагревателем. Уровень вакуума также регулируем, что обеспечивает стабильный и повторяемый процесс, отсутствие всплесков и брызг припоя независимо от начальных условий и термической массы загруженных изделий. Вакуум, плавно подаваемый непосредственно в момент образования жидкой фазы, практически полностью выводит пузыри из паяного соединения. Немаловажно и то, что применение динамически регулируемого зазора, плавной регулировки вакуума и принудительного охлаждения позволяет выполнять термические профили по стандартам IPC/JEDEC, а также подстраивать их в широком технологическом коридоре под требования производителей силовых модулей.

На рис. 1 представлен пример термического профиля IPC/JEDEC, выполненного вакуумной печью Pink серии VADU.

Технически печь представляет собой несколько вакуумных рабочих камер, сообщающихся между собой через шлюзы. На рис. 2

показана схема процесса вакуумной пайки, запатентованная Pink. В качестве примера взят алгоритм работы печи серии VADU 300.

На первом этапе (рис. 2а) в печь загружается тара-спутник с изделиями, происходит закрытие клапана приемного шлюза, откачка воздуха и продувка камеры инертным газом. Начинается предварительный прогрев изделий и активация флюса (если используется припойная паста).

На втором этапе пайки (рис. 2б) тара-спутник перемещается в камеру пайки через второй шлюз. Нагреватель, выполненный в виде мармита с полированной поверхностью из нержавеющей стали, прикасается к нижней поверхности изделий, нагревая их. При достижении изделиями температуры, близкой к температуре плавления припоя (конкретное значение этого температурного порога напрямую зависит от тепловой массы изделия и рассчитывается системой по графику нарастания температуры), нагреватель автоматически отводится от изделий вниз. Через контролируемый интервал времени нагреватель вновь подводится к изделиям, и так несколько раз, до достижения заданной температуры. При этом температура изделия отслеживается непрерывно с помощью особой термопары с пружинным контактом. Такой алгоритм работы нагревателя позволяет избежать «перехлестов» значений температуры, которые происходят,

Таблица 1

| Участок профиля | Оловянно-свинцовый припой | Бесвинцовый припой |
|---|---------------------------|----------------------|
| Средняя скорость нагрева (на участке $T_{Smax} - T_p$) | 3 град./с макс. | |
| Предварительный нагрев Температура T_{Smin} , °C Температура T_{Smax} , °C Время (участок $T_{Smin} - T_{Smax}$), с | 100 150 60...120 | 150 200 60-180 |
| Время до достижения пика Температура T_p , °C Время нагрева t_p , с | 183 60-150 | 217 60-150 |
| Время нахождения в пределах ± 5 °C вблизи пиковой температуры T_p , с | 10-30 | 20-40 |
| Скорость охлаждения | 6 град./с макс | |
| Максимально-допустимое время нагрева от 25 °C до пиковой температуры, мин | 6 | 8 |

как правило, вследствие тепловой инерции. Как только изделие достигнет температуры плавления припоя, начинается процесс вытягивания пузырей воздуха из-под кристаллов/подложек. Система циклически плавно изменяет значение вакуума в пределах 10^{-1} бар, не прерывая процесса нагрева. При таком алгоритме воздействия вакуума минимизируется эффект разбрызгивания припоя, кристаллы остаются на своих местах.

Третий этап (рис. 2в) заключается в охлаждении изделий. Изделия перемещаются через третий шлюз в камеру охлаждения, в которой создана инертная среда. Охладитель конструктивно выполнен так же, как и нагреватель, то есть он касается поверхности изделий, охлаждая их кондукционно. В дополнение к кондукционному охлаждению в камере происходит конвекция азота. Такая конструкция печи позволяет проводить быстрое и эффективное охлаждение изделий и, главное, контролировать его скорость.

После того как изделия охладятся до заданной температуры, открывается четвертый шлюз и изделия на таре-спутнике подаются в зону выгрузки или на выходной конвейер.

На рис. 3 показан реальный профиль пайки силового модуля массой более 1 кг. Хорошо заметны колебания температуры на этапе выдержки при температуре плавления припоя (здесь пайка проводилась на бесвинцовый оловянно-серебро-медный SAC-припой). Колебания обусловлены моментами отвода нагревателя от изделия. Обратите внимание на точность поддержания температуры на изделии такой термической массы и на время выполнения всего процесса: менее 5 минут, включая охлаждение, которое не превышает 2 минут.

Многие из перечисленных технологических приемов запатентованы фирмой Pink. Интересна история создания печей серии VADU. Серия была разработана в середине 1990-х годов на основе технического задания на конвейерную вакуумную систему пайки, выданного лидирующим немецким производителем силовых модулей. До тех пор вся вакуумная пайка выполнялась в однокамерных печах. Поскольку для печи VADU изначально применялись силовые модули общеизвестных типов, вся ее конструкция, оснастка, система

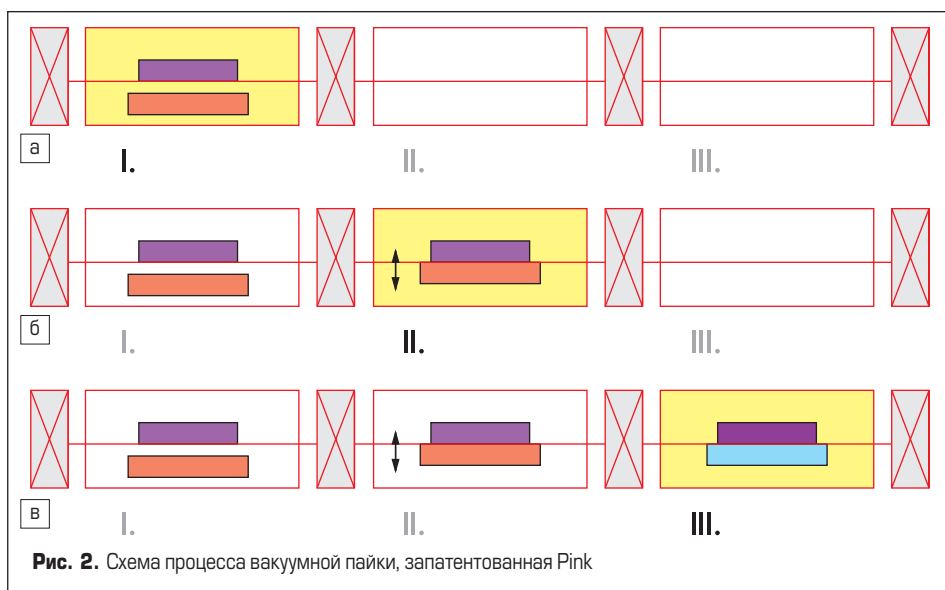


Рис. 2. Схема процесса вакуумной пайки, запатентованная Pink

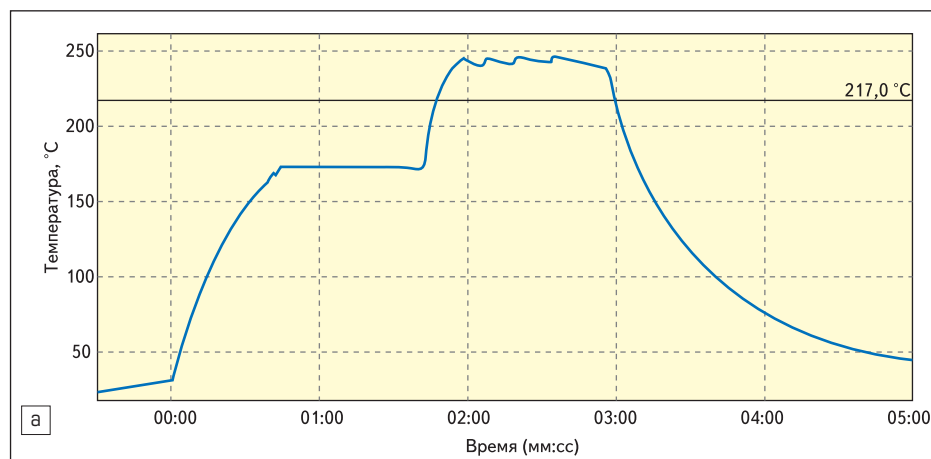
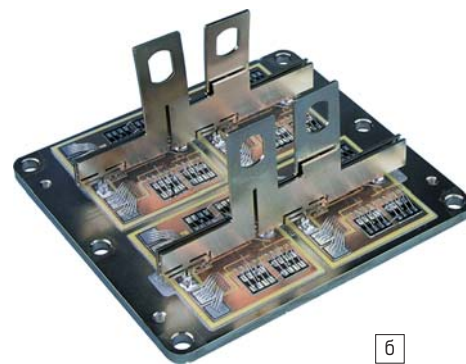


Рис. 3. Профиль вакуумной пайки модуля массой более 1 кг (а) и фотография этого модуля (б)



б

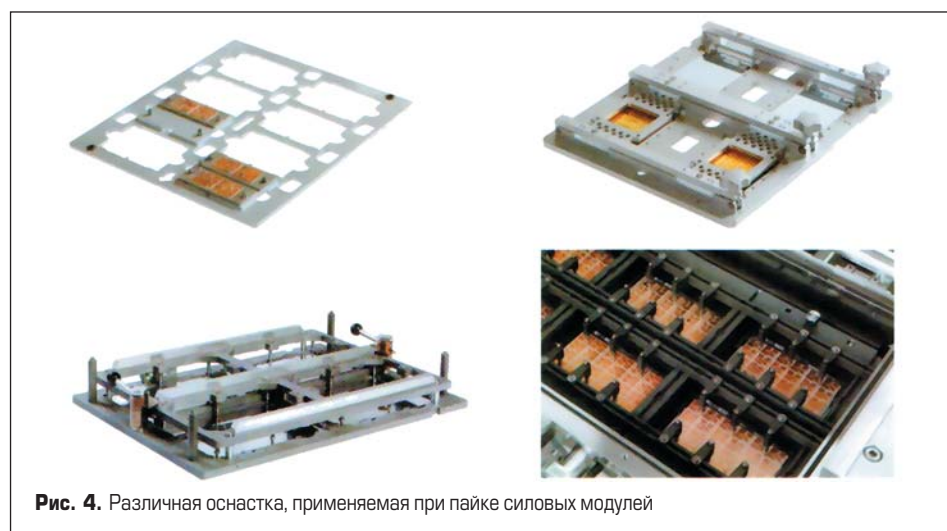


Рис. 4. Различная оснастка, применяемая при пайке силовых модулей

управления ориентированы на работу с этими изделиями. В течение нескольких лет после создания первых печей Pink не имела права продавать их на сторону, будучи связанной конфиденциальным соглашением с первым заказчиком. Лишь в последние годы печи серии VADU появились в свободной продаже, и к настоящему моменту используются на десятках предприятий отрасли. Процесс пайки отработан специалистами Pink до мелочей, и создание качественных паяных соединений не представляет более проблем для производителей.

По сравнению с многокамерными печами Pink однокамерные вакуумные печи имеют несколько недостатков, сужающих диапазон их применения для пайки силовых модулей:

- Поскольку и нагрев, и охлаждение происходят в одной и той же камере, процесс достаточно долог. Производительность однокамерных печей позволяет применять их лишь в лабораторном и мелкосерийном производстве.
- Создание динамически-поддерживаемого теплового градиента конструктивно невозможно. Существует риск «перехлеста» температуры вследствие инерции нагрева, что в случае применения бессвинцовых припоев может привести к перегреву изделий.
- Применение постоянного вакуума может привести к взрывному испарению флюса и перемещению кристаллов по подложке.

Кроме технологических преимуществ немаловажно и то, что процесс пайки проводится с применением оптимальной для силовых модулей оснастки. Производители зачастую вынуждены подстраиваться под габариты вакуумной камеры, а низкая мощность печей не позволяет им применять тару-спутники надлежащего типа. Оснастка, разработанная для VADU, практически стандартна. Это обусловлено фактической монополией Electrovas s.r.l. GmbH как поставщика базового материала DBC в Европе, а также стандартными типоразмерами корпусов модулей. На рис. 4 показана типичная оснастка, стандартно поставляемая с печами серии VADU.

Вакуумная пайка с применением преформ и припойных паст

Все обычные припойные материалы, такие как преформы и припойная паста, могут быть использованы для вакуумной пайки. Рабочие температуры для распространенных составов не превышают 400 °C. Единственное, о чем следует помнить, — при работе с припойными пастами в систему включается дополнительный модуль флюсоуловителя, предохраняющий элементы вакуумного насоса, камеры и изделия от загрязнения продуктами выгорания органической связки-флюса. В случае же применения бесфлюсовых припоев (таких, как преформы — фольга калиброванных размеров) вакуумная печь оснащается системой



Рис. 5. Рабочая камера печи серии VADU

для работы в форминг-газе или парах муравьиной кислоты. Иногда предприятия применяют комбинированные процессы, например монтаж кристаллов на припойную пасту, а соединение DBC-подложки с теплоотводом — с помощью преформы припоя. Такой процесс можно проводить в один прием, что является уникальной особенностью серии VADU.

Используемый в серии VADU кондукционный нагрев с динамически-регулируемым зазором характеризуется высокой эффективностью и гибкостью. Градиент между нагревателем и изделием может быть точно задан и не зависит от термической массы изделия. Такое решение позволяет проводить пайку массивных силовых модулей массой до 1 кг с применением стандартных термических профилей IPC/JEDEC. Кондукционный нагрев может быть в любой момент прерван, при этом изделие может быть произвольное время выдержано при заданной температуре в вакуумной камере. В результате полностью исключается образование всплесков припоя на поверхности кристаллов и подложек. Критическими фазами процесса пайки является температура 100 °C, при которой происходит выброс водяных паров из гигроскопичной органической связки припойной пасты, и температура 180 °C, при которой начинается крайне нестабильное по природе выгорание самой связки.

Вакуум подается в процессе выполнения следующих этапов пайки:

- удаление кислорода и продувка камеры азотом. После выполнения этого этапа содержание кислорода в рабочей камере уменьшается с обычных 22% до 3–5 ppm, в зависимости от качества подаваемого в камеру азота;

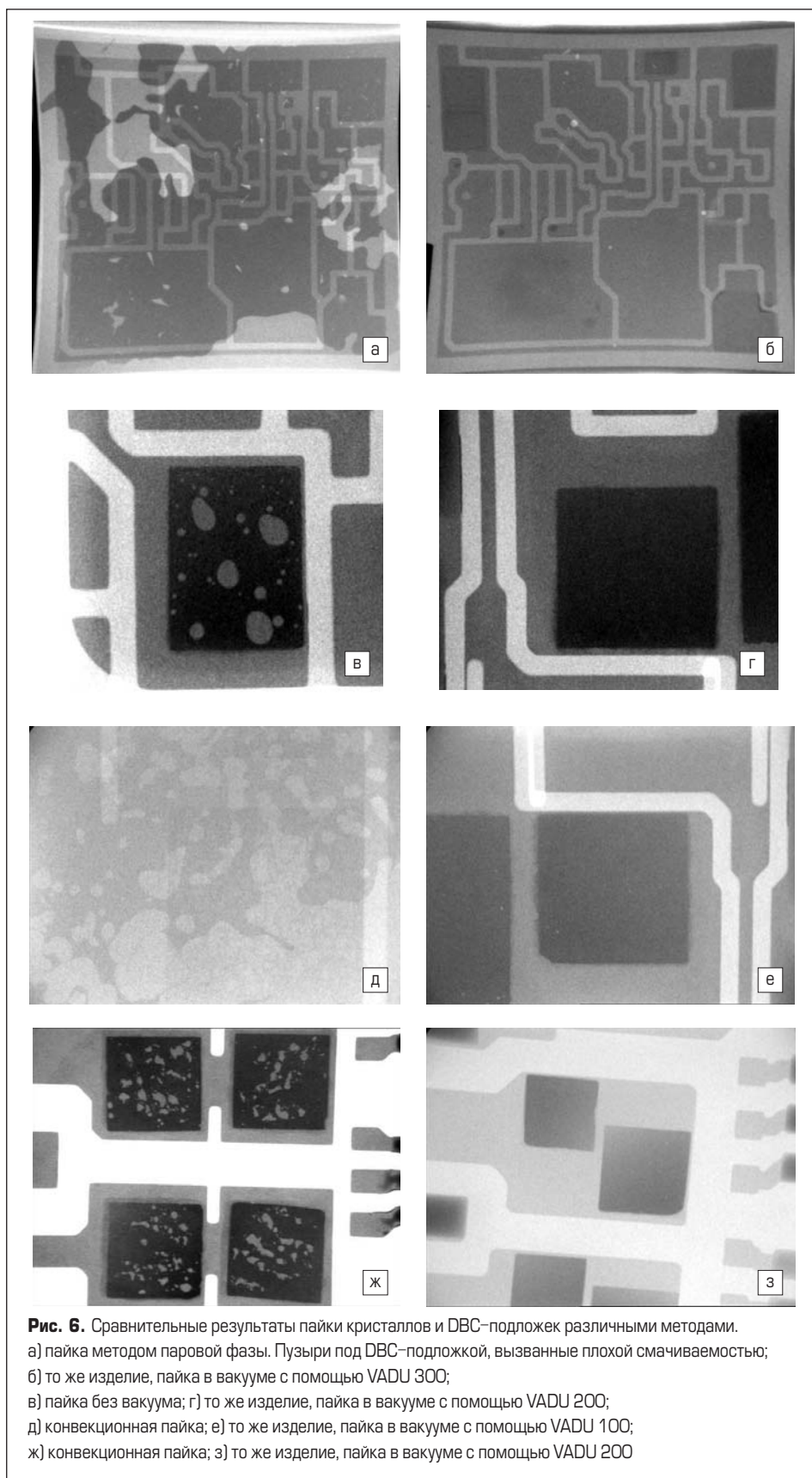


Рис. 6. Сравнительные результаты пайки кристаллов и DBC-подложек различными методами.
 а) пайка методом паровой фазы. Пузыри под DBC-подложкой, вызванные плохой смачиваемостью;
 б) то же изделие, пайка в вакууме с помощью VADU 300;
 в) пайка без вакуума; г) то же изделие, пайка в вакууме с помощью VADU 200;
 д) конвекционная пайка; е) то же изделие, пайка в вакууме с помощью VADU 100;
 ж) конвекционная пайка; з) то же изделие, пайка в вакууме с помощью VADU 200

- дегазация в ходе предварительного прогрева. Удаляются остатки кислорода, водяных паров и флюса;
- удаление пузырей из жидкой фазы припоя во время пайки.

Гибкость параметров процесса

Все параметры процесса, такие как температурный градиент, степень вакуума, подача процесс-газов в камеру, время выполнения опера-

ций в каждой из камер печи, полностью регулируются и могут быть заданы в управляющей программе печи. При многономенклатурном мелкосерийном производстве печь может быть оборудована системой чтения штрихкода. Система определяет необходимый профиль автоматически на входе, и пользователь может в произвольном порядке загружать изделия с бессвинцовым припоем, свинец-содержащей припойной пастой, преформами. В любом случае технологи предприятия смогут подобрать

оптимальные технологические параметры для пайки любым из типов припоя. Немаловажно и то, что процесс полностью проходит в заданных и воспроизводимых условиях. Все параметры процесса, как было сказано выше, задаются через операционную систему управляющего компьютера. Создатели печей серии VADU предусмотрели и постоянный сбор статистических данных о выполненных циклах пайки, что гарантирует прослеживаемость изделий из каждой партии.

Преимущества печей серии VADU:

- получение паяных соединений без пузырей (каверн);
- возможность встраивания в автоматическую линию (VADU 300);
- работа в соответствии с профилями, рекомендованными IPC/JEDEC;
- регулируемый градиент температуры между изделием и нагревателем;
- быстрота процесса за счет применения отдельных камер нагрева и охлаждения;
- возможность работы при температурах до 400 °С;
- возможность работы с припойными пастами и преформами;
- возможность пайки без флюса;
- возможность пайки в форминг-газе и парах муравьиной кислоты;
- воспроизводимость и прослеживаемость процесса.

Серия VADU включает модели 100, 200 и 300. Патентованная технология пайки с динамическим зазором и регулируемым вакуумом одинаково доступна как для мелкосерийного (модель 100), так и для крупносерийного производства (модель 200). VADU 300 предназначена для работы в составе автоматизированной линии. Применение одинаковых систем и узлов на всех печах серии позволяет перенести профили, разработанные на лабораторной VADU 100, без каких-либо доработок на сверхпроизводительную VADU 300XXL.

В настоящее время печи VADU используются такими производителями, как Eures, IXYS, ABB, Bosch, Danfoss и др.

Заключение

Настоящая статья открывает цикл, посвященный решениям, применяемым лидерами отрасли при постановке процесса пайки силовых модулей. Был рассмотрен главный элемент технологии — оборудование для вакуумной пайки. Необходимо заметить, что для лабораторного применения существуют и другие типы вакуумных печей. К примеру, серия SRO 700, выпускаемая фирмой ATV Technologie, давно зарекомендовала себя как недорогое и универсальное оборудование.

Однако важно помнить, что хорошая технология — это на 90% оборудование и материалы и на 10% — волшебство. Российским специалистам, осваивающим новое оборудование, неизбежно предстоит пройти тот же путь проб и ошибок, которым шли их зарубежные конкуренты, пусть и опираясь на их опыт. Не стоит предвзято относиться к апробированным решениям и бояться неудач на начальном этапе. Как показывает опыт постав-



Рис. 7. Внешний вид печей VADU 100 и 300

щика и консультанта, чаще всего после приобретения адекватного оборудования и материалов проблемы отечественных фирм сводятся к простейшим чрабочая ошибкам: уронили, наступили, пролили, порвали... Этих ошибок сравнительно легко избежать, если в коллективе создана нормальная атмосфера, а поставщик имеет достаточный

уровень знаний и доброй воли для того, чтобы поставить технологический процесс, а не только распаковать контейнеры с оборудованием. Итого, получаем 90% успеха. Ну а волшебством наши специалисты владеют априори, стоит только посмотреть, в каких условиях они сейчас создают действительно уникальную технику.

В следующей статье цикла будут рассмотрены методы визуального контроля качества пайки. Почему не всегда корректно использовать контроль с помощью рентгеноскопии? Как можно увидеть каверну с околонулевой толщиной? Можно ли обойтись механическими тестами? Обо всем этом — в следующей статье.

SEMiX S2 — новая серия модулей IGBT с кристаллами SPT+

SEMIKRON представляет модули семейства SEMiX на основе новейших кристаллов IGBT SPT+, обладающих уникальным сочетанием потерь проводимости и переключения.

Основными особенностями конструктива модулей IGBT SEMiX является разнесение силовых терминалов AC и DC по краям корпуса в плоскости модуля и возможность установки драйвера непосредственно на корпус с помощью пружинных сигнальных контактов. Применение модулей SEMiX в мощных преобразователях позволяет существенно упростить конструкцию DC-шины и свести ее распределенную индуктивность к физическому минимуму.

Технология SPT (Soft Punch Through) IGBT, используемая при производстве модулей SEMIKRON серии 128, обеспечивает оптимальное сочетание потерь проводимости и переключения.

Новая усовершенствованная технология производства кристаллов IGBT, названная SPT+, была разработана в 2005 году. В начале 2006 года кристаллы SPT+ стали доступны для коммерческого применения. Доработка базовой техноло-

Сравнительные характеристики SPT и SPT+ IGBT

(рабочее напряжение 1200 В, номинальный ток кристалла $I_{Cном} = 300$ А)

| Параметры ($I_{Cном} = 300$ А) | SPT (серия 128) | SPT+ (серия S2) |
|---|-----------------|-----------------|
| Напряжение насыщения V_{CEsat} @ 125 °C, В | 2,1 | 2,0 |
| Энергия потерь E_{on}/E_{off} , мДж | 22,5/34,5 | 19,5/33 |
| Макс. допустимая скорость изменения di/dt_{max} , А/мкс | 5250 | 5600 |
| Размер кристалла на 100 А, мм ² | 158 | 134 |

гии SPT заключается в оптимизации элементов структуры, отвечающих за распределение носителей заряда в области *n*-подложки. Данное усовершенствование позволило улучшить электрические характеристики ключей и одновременно уменьшить размер чипов. Новые кристаллы имеют более плавный характер переключения и при этом обеспечивают более высокую стойкость к di/dt в режиме выключения при меньшем напряжении насыщения. Снижение di/dt в номинальных режимах позволяет уменьшить уровень перенапряжений на DC-шине и улучшить электромагнитную совместимость, что особенно важно для высокочастотных применений. Сравнительные характеристики базового и нового кристаллов приведены в таблице.

На рисунке показаны эпюры, демонстрирующие разницу в динамических свойствах базового и нового кристаллов. Использование модулей SPT+ позволяет при меньших значениях резистора затвора R_G снизить di/dt и пиковый ток обратного восстановления I_{Cmax} , благодаря чему уменьшается перенапряжение на шине звена постоянного тока и повышается надежность работы в динамических режимах.

Предельная рабочая температура кристаллов SPT+ составляет 175 °C, что означает увеличение запаса по предельному току на 20–25%. Кроме пониженного уровня статических и динамических потерь, новая технология имеет еще одно уникальное свойство: кристаллы SPT+ обладают способностью к так называемому самоограничению напряжения на коллекторе на уровне 1250 В (для модулей на 1200 В). Таким образом, SPT+ являются первыми низковольтными IGBT, способными поглощать энергию лавинного пробоя. До сих пор эта характеристика была присуща только технологиям MOSFET.

www.semikron.com

