



ООО «САВТЭК», 124498, г. Москва, Зеленоград, 4922-й проезд, дом 4, строение 5

Применение печей вакуумной пайки для ответственных компонентов

Зюбер Д.И.¹, Шаталин А.С.²

¹ОАО «САВТЭК»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, проезд 4922, д. 4 стр. 5 ком. 50

info@savtech.ru

²АО «НПП «Пульсар»

105187, г. Москва, Окружной проезд, дом 27

Аннотация

Рассмотрены теоретические основы процесса вакуумной пайки, преимущества пайки с флюсами и в их отсутствие. Проведено сравнение оборудования с различным типом нагрева и охлаждения рабочей зоны. Исследовано влияние применения данного оборудования на качество паяных соединений.

Ключевые слова: вакуумная пайка; печь для пайки; флюс; формиргаз; пайка в парах муравьиной кислоты; высокий вакуум; кондуктивный нагрев; радиационный нагрев; технологический процесс пайки, пайка с избыточной атмосферой.

Введение

При изготовлении радиоэлектронной продукции одним из самых сложных технологических процессов является пайка. Важно не только построить оптимальный температурный профиль, но и свести к минимуму риски возникновения дефектов, влияющих на электрическую проводимость и теплопроводность паяных соединений.

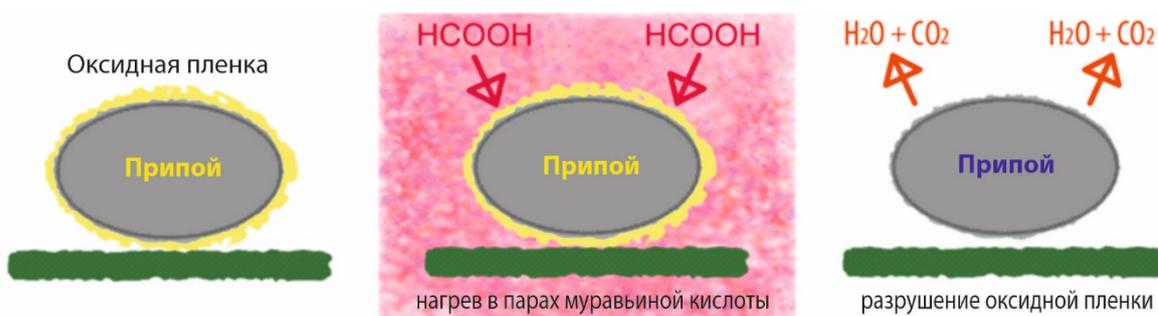
В общем случае в процессе пайки электронных компонентов в воздушно-газовых средах в соединениях присутствуют неоднородности, а именно: наличие локальных непропаев и газовых включений в паяном соединении. Они появляются из-за следующих факторов: наличие оксидных пленок, наличие загрязнений поверхности паяемых поверхностей, неполное удаление газа из расплава припоя.

Такие дефекты негативно влияют как на механические свойства паяемых электронных компонентов, так и на их способность переносить температурные нагрузки, поэтому их присутствие для ответственных изделий недопустимо. Для минимизации дефектов проводят предварительную очистку поверхности:

- предварительную – плазменную очистку поверхности паяемых поверхностей;

- в процессе пайки очистка производится с применением флюсов – неметаллических веществ, которые разрушают и удаляют оксидные пленки и предохраняют очищенную поверхность, пока припой не растечется по ней. Температура плавления флюса должна быть ниже температуры начала плавления припоя. К началу плавления припоя флюс должен смачивать поверхность основного материала.

В полупроводниковом производстве часто применение флюсов недопустимо, поскольку часто флюсы и являются причиной выхода из строя приборов [1]. Тогда пайку проводят в вакууме с добавлением различных технологических газовых сред. По характеру воздействия на металл газовые среды делятся на нейтральные (аргон, азот) и восстановительные. Основной восстановительной средой для пайки в полупроводниковом приборостроении является водород, сухой, очищенный от примеси. Во время пайки он взаимодействует с металлом, разлагая оксиды металлов, и легко удаляется сам – т.е. фактически выполняет роль флюса. Наряду с водородом в качестве восстановительных сред в печах вакуумной пайки применяется формиргаз – смесь азота с водородом или пары муравьиной кислоты.





ООО «САВТЭК», 124498, г. Москва, Зеленоград, 4922-й проезд, дом 4, строение 5

Рисунок 1. Разрушение оксидной пленки в парах муравьиной кислоты.

Технологический процесс вакуумной пайки [2]

Решением проблемы возникновения таких дефектов является вакуумная пайка. Стандартный процесс вакуумной пайки состоит из следующих этапов:

1. Вакуумирование объема камеры для удаления воздуха из вакуумной камеры.
2. Напуск инертной атмосферы или смеси инертного газа с водородом или парами муравьиной кислоты.
3. Нагрев сборки до температуры активации поверхности.
4. Активация поверхности - разрушение связей между атомами поверхности [3].

Соединяемые поверхности покрыты слоем оксидов различной толщины и структуры, а также другими загрязнениями, поскольку любая поверхность твердого тела адсорбирует атомы внешней среды. Здесь происходит разрушение окислов на поверхности паяемых изделий под воздействием флюсов или газообразной восстановительной среды.

5. Нагрев до температуры пайки (пиковой температуры, выше температуры ликвидуса припоя примерно на 10-20°C).

6. Вакуумирование порядка 10 Па. Происходит дегазация и удаление газообразных соединений.

7. Выдержка при температуре пайки (от десятка секунд до нескольких минут).

8. Фаза охлаждения, которая зачастую должна быть максимально быстрой, чтобы не успели перегреться паяемые изделия.

9. Напуск азота.

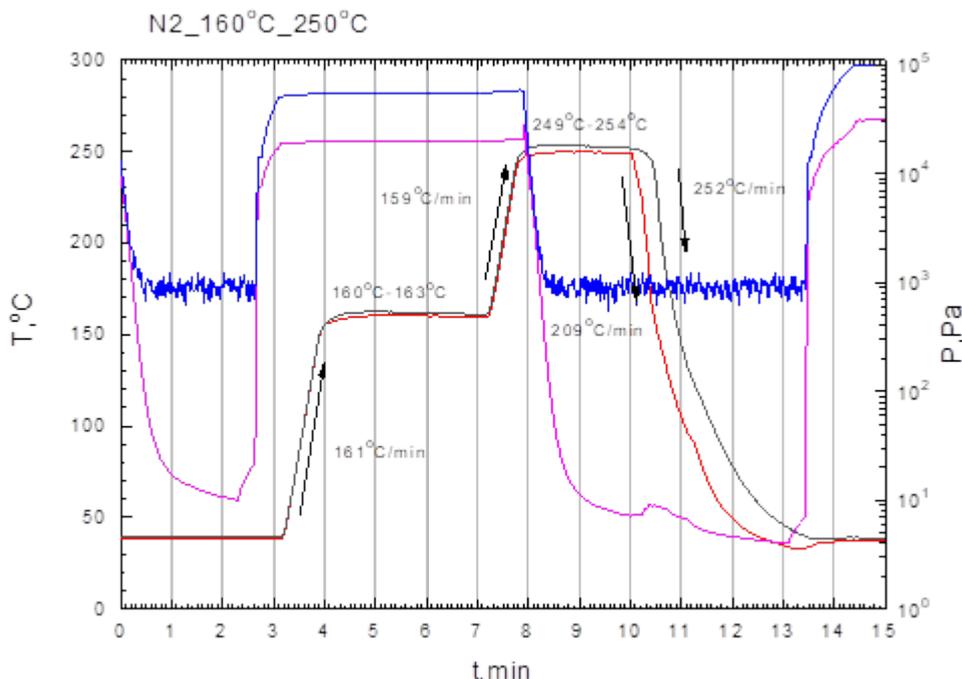


Рисунок 2. Типовой технологический процесс вакуумной пайки.

На качество паянного соединения оказывают влияние следующие факторы:

- Предварительная очистка поверхности;
- Создание вакуума уровнем в несколько (1...10) Па на разных стадиях технологического процесса;
- Использование флюсов;
- Подача инертных газов в процессе пайки;
- Подача водорода, формиргаза, муравьиной кислоты;
- При проведении пайки корпусов – возможность создания избыточной атмосферы азота.



ООО «САВТЭК», 124498, г. Москва, Зеленоград, 4922-й проезд, дом 4, строение 5

Пайка в среде технологических газов с использованием вакуума и без, томографический анализ

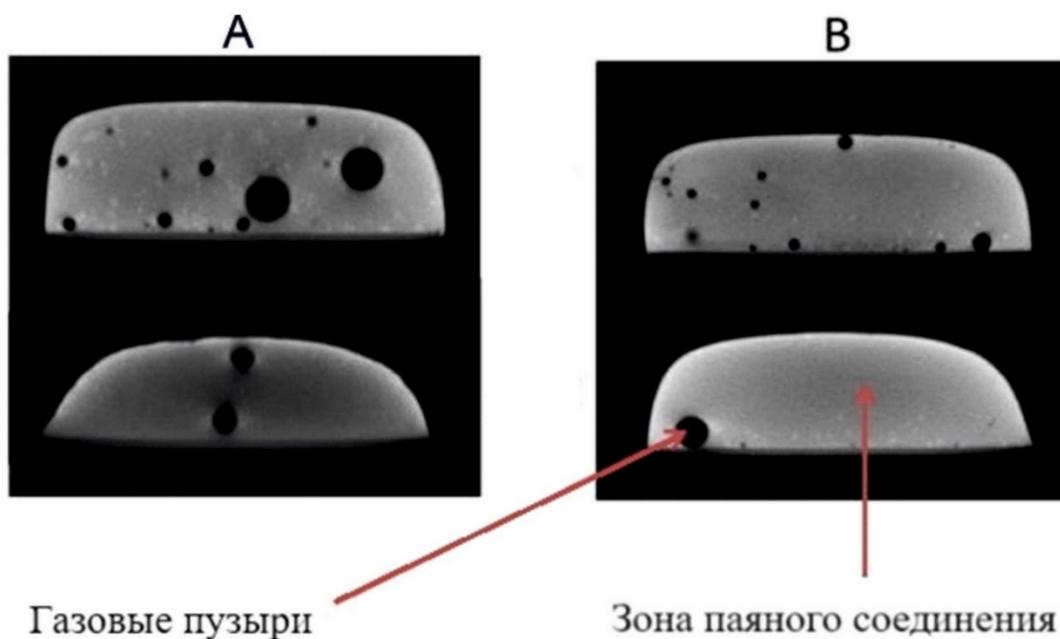
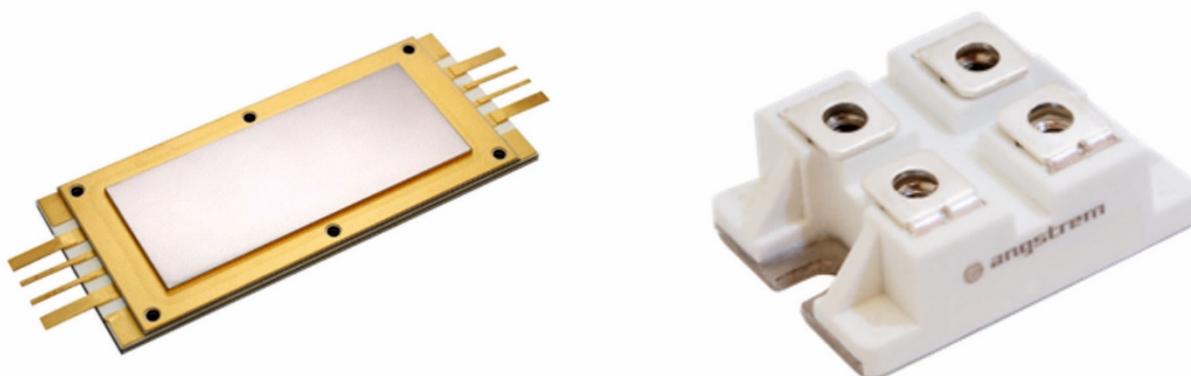


Рисунок 3. Припой SN96.5 Ag3Cu0.5. Парофазная пайка (А) и пайка с вакуумированием (В).

Вакуумная пайка силовых модулей

Наиболее остро проблема качества паянного соединения встает для силовых модулей. Эксплуатация этих изделий происходит в наиболее жестких условиях: тепловые и токовые нагрузки, термические циклы, вибрация. Паяные соединения в них обеспечивают теплопередачу. Корпуса модулей уменьшаются и возникает вопрос теплопроводности паяных соединений. А пузыри в таких соединениях, имеющие теплопроводность на несколько порядков меньшую, чем металл припоя вызывают появление локальных областей перегрева. Мировые производители силовых модулей устанавливают предельное содержание пузырей в области паянного соединения на уровне 1% по площади. Добиться таких результатов можно на печах вакуумной пайки. Это единственный надежный и повторяемый метод.

В частности компания САВТЭК проводила пайку силовых диодов на печах собственного производства R200M и R200MC и разрабатывала оснастку для пайки этих изделий.





ООО «САВТЭК», 124498, г. Москва, Зеленоград, 4922-й проезд, дом 4, строение 5

Рисунок 4. Силовые модули, производимые АО «Ангстрем», собираемые с применением технологии вакуумной пайки.

Вакуумная пайка на примере GAN-транзистора

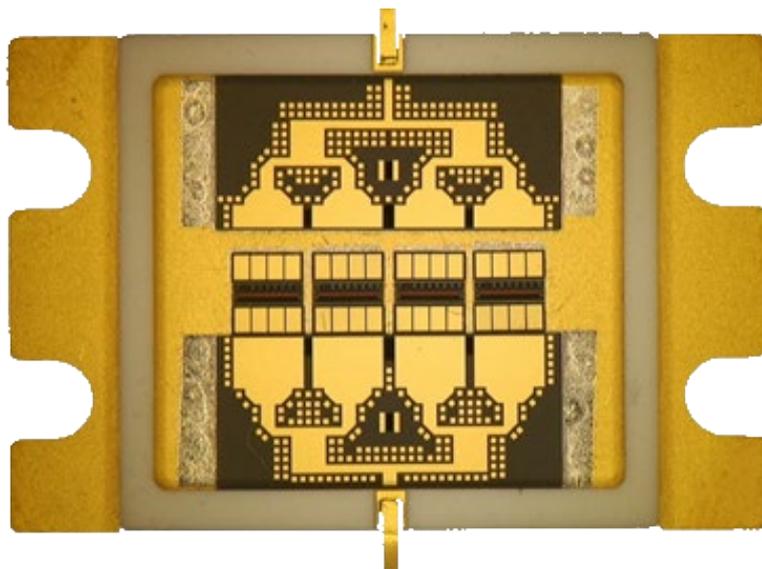


Рисунок 5. GAN-транзистор.

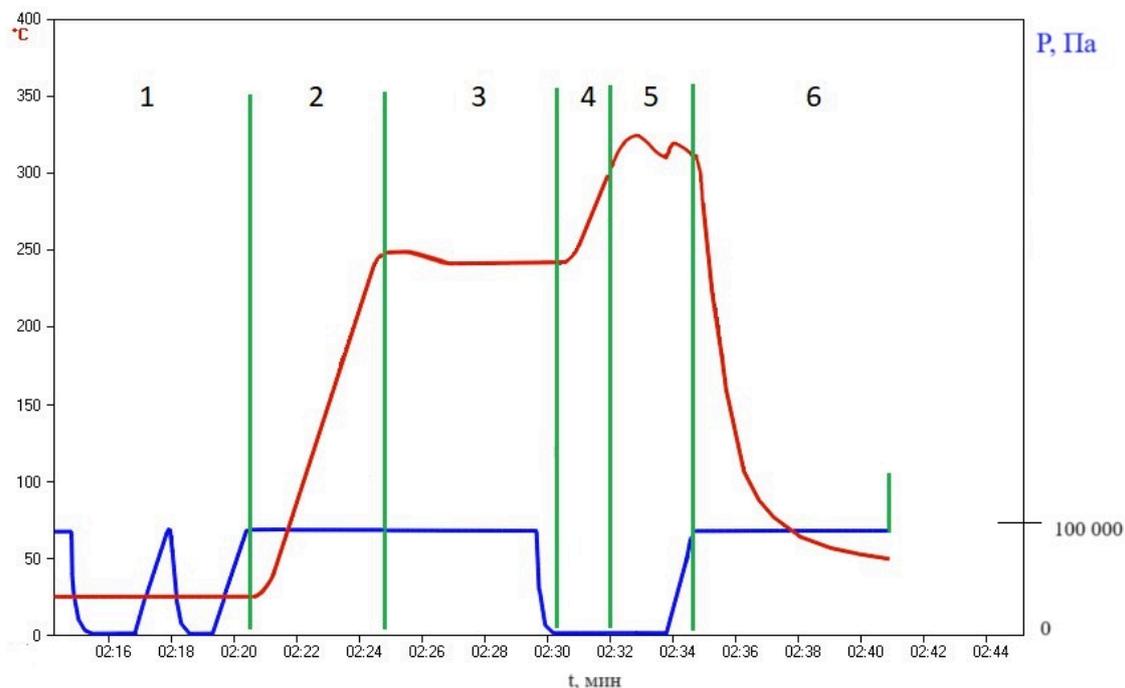


Рисунок 6. Реальный график температуры и давления пайки транзистора

Этапы процесса пайки:



ООО «САВТЭК», 124498, г. Москва, Зеленоград, 4922-й проезд, дом 4, строение 5

1. Детали загружены в камеру печи, дверь печи закрыта. Проводится 2-х кратная операция вакуумирования объема печи с последующим напуском азота до 1 бар.
2. В камере печи азот при давлении 1 бар. Нагрев деталей до температуры 240°C.
3. Детали транзистора нагреты до температуры 240°C, давление 1 бар. Выдержка при этих значениях 300 с.
4. Откачка азота до давления 15 мбар.
5. Нагрев до 310°C, выдержка 30 с, откачка до давления 1мбар, выдержка 30 с, напуск азота до давления 1 бар. Происходит пайка деталей и удаление пустот в паяном соединении.
6. Охлаждение спаянных деталей до температуры 50°C.

Оборудование для вакуумной пайки

Печи для вакуумной пайки электронных компонентов в общем можно разделить по способам нагрева паяемых изделий на печи:

- с кондуктивным нагревом и кондуктивным охлаждением;
- с радиационным нагревом и конвекционным охлаждением.

Обе конструкции имеют существенное преимущество перед печами с конвекционным нагревом. Компоненты паяемых изделий, например силовых модулей, имеют разную чувствительность к перегреву. В случае конвекционной пайки тепло подается сразу на все изделие, а припой может начать плавиться раньше, чем тяжелый элемент конструкции, который расположен снизу, достигнет температуры, при которой происходит смачивание. Области, где не произошло смачивание и образуют пузыри в припое.

С радиационным нагревом



С кондуктивной теплопередачей



Рисунок 7. Рабочие зоны печей с различным типом нагрева: SAVTECH R200M с ИК-нагревом (слева) и SAVTECH R200LC с кондуктивным нагревом с терморегулируемым столом (справа).



ООО «САВТЭК», 124498, г. Москва, Зеленоград, 4922-й проезд, дом 4, строение 5

Таблица 1. Основные характерные различия тех. характеристик для печей вакуумной пайки с разным типом нагрева

Наименование параметра	Печь с радиационным нагревом на примере R200L	Печь с кондуктивной теплопередачей примере R200LC
Внешний вид печи		
Максимальная температура	450°C	450°C
Скорость нагрева, °C/мин	150 °C * Зависит от массы изделия.	180 °C
Скорость охлаждения °C/мин	60 °C * Зависит от массы изделия.	250 °C
Остаточное давление, Па	До 0,001 Па	2 Па
Создаваемое давление	4,5 Бар	4,5 Бар
Подводимые газы	До 4 шт.	До 4 шт.
Минусы	Большой расход чистого азота для охлаждения.	Нагревательный стол – расходный элемент.

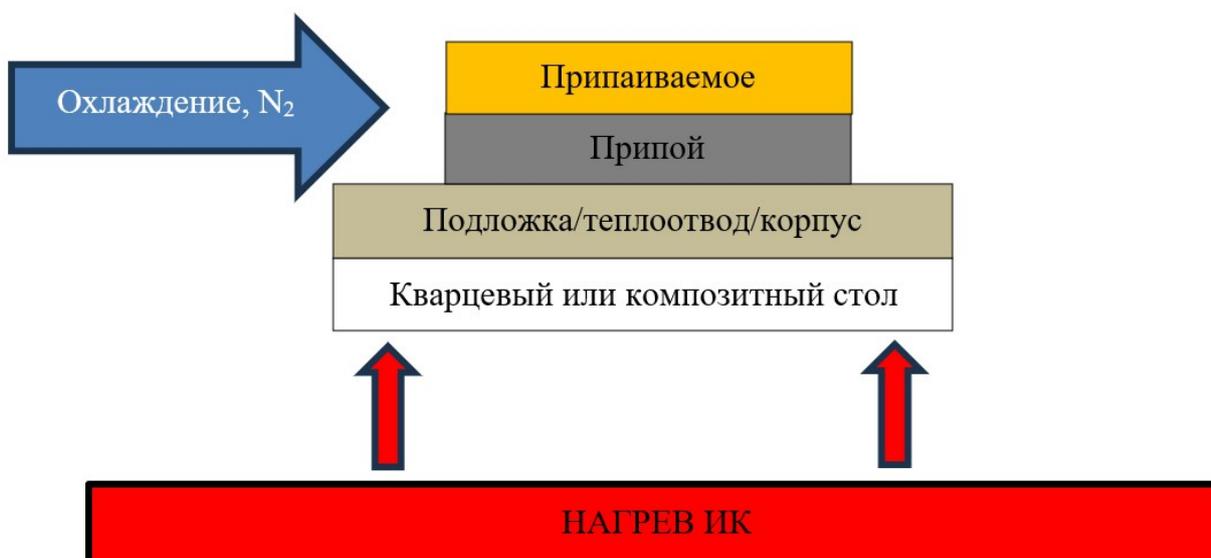


Рисунок 8. Вакуумная камера печи пайки Серии R с радиационным нагревом.



ООО «САВТЭК», 124498, г. Москва, Зеленоград, 4922-й проезд, дом 4, строение 5



Рисунок 9. Вакуумная камера печи пайки серии RC с кондуктивным нагревом.

Наиболее универсальны печи с кондуктивным нагревом и кондуктивным охлаждением, поскольку температура изделий в них может поддерживаться наиболее точно, а скорость нагрева и охлаждения паяемых сборок мало зависит от их массы. Достижимые скорости нагрева изделий – $3^{\circ}\text{C}/\text{сек}$, а максимальные скорости охлаждения – $4^{\circ}\text{C}/\text{с}$.

В то же время прямой нагрев оптимально применять для пайки электронных сборок с маленькой площадью контакта между поверхностью стола и паяемого изделия. А также для маленьких плат с небольшой теплоемкостью. Нужно принимать во внимание, что скорости нагрева, достигаемые в установках с радиационным нагревом также достигают $2,5\text{-}3^{\circ}\text{C}/\text{с}$, но намного сильнее зависят от массы и теплоемкости изделий. Данный аспект можно нивелировать, используя непрозрачную проставку, расположив ее на кварцевом нагреваемом столе. А вот характерные скорости охлаждения не превышают $1,5^{\circ}\text{C}/\text{с}$ для такого оборудования и также сильно зависят от массы и теплоемкости паяемых изделий.

Для пайки сборок со сложной конструкцией устанавливается дополнительный верхний радиационный нагрев при наличии нижнего кондуктивного нагрева и кондуктивного охлаждения (печь с комбинированным нагревом).



ООО «САВТЭК», 124498, г. Москва, Зеленоград, 4922-й проезд, дом 4, строение 5

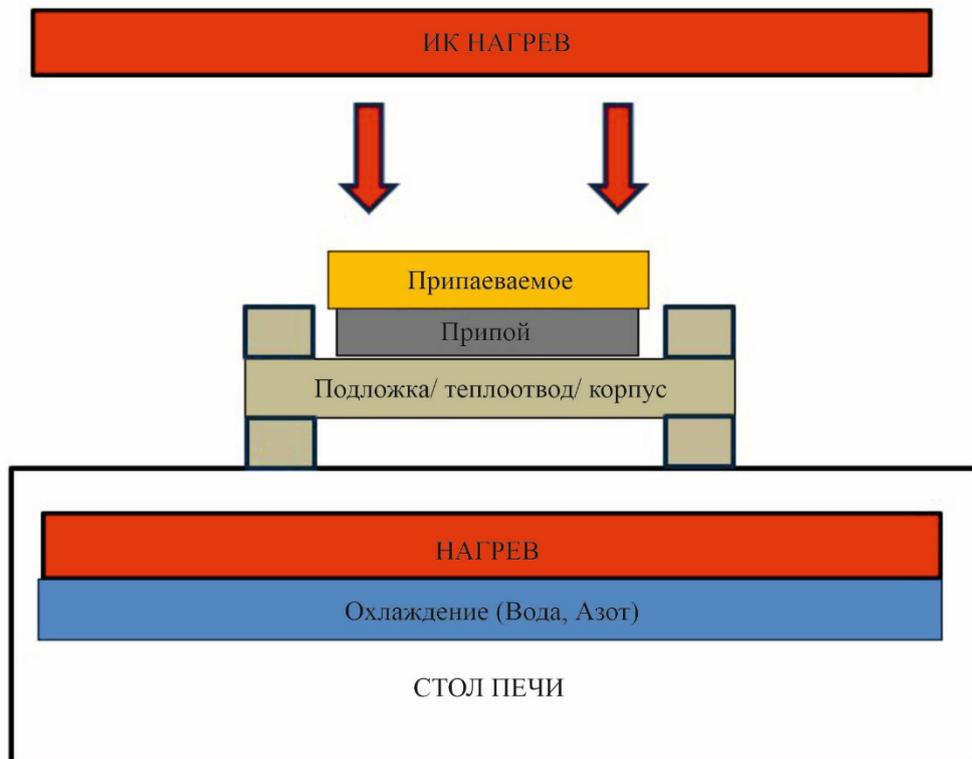


Рисунок 10. Вакуумная камера печи пайки серии RC с дополнительным верхним нагревом.

Оба типа установок обеспечивают функции, влияющие на качество паяных установок:

- подачи инертных газов, водорода, формирующего газа, подачи паров муравьиной кислоты;
- возможность создания избыточной атмосферы азота при проведении пайки корпусов.

Только установки с радиационным типом нагрева обеспечивают возможность проведения пайки при высоком вакууме 10^{-2} - 10^{-3} Па для максимизации удаления газовых пузырей из паянного соединения.

Только установки с кондуктивным типом охлаждения обеспечивают возможность регулирования скорости охлаждения изделий.

Оснастка для проведения процессов пайки

Для силовых диодов:

На итоговую прочность и однородность паянного соединения влияет не только соблюдение технологии вакуумной пайки, но и наличие правильной оснастки. Особенно данное замечание касается легких изделий. Например, при пайке кристаллов в корпусе силовых диодов значительную роль играет оснастка, обеспечивающая как прижим «сэндвича» диода с расположенным кристаллом, так и его центрирование. При достижении расплава температуры ликвидуса, нефиксированные элементы конструкции могут сдвигаться. Этот сдвиг приводит к браку готовых диодов из-за того, что они могут оказаться закорочены, и к ухудшению прочностных свойств.



ООО «САВТЭК», 124498, г. Москва, Зеленоград, 4922-й проезд, дом 4, строение 5

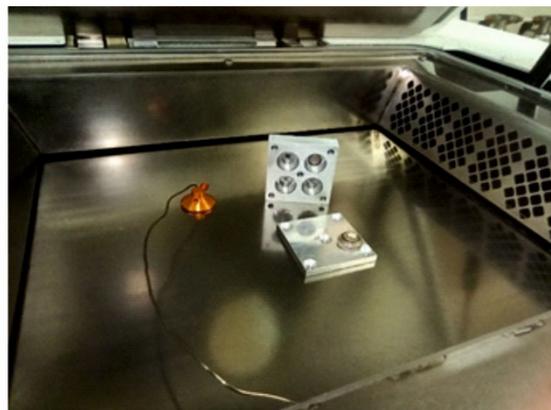


Рисунок 11. Оснастка для пайки силовых диодов.

Кроме оснастки, при пайки таких приборов рекомендуется редуцировать скорость откачки вакуумным насосом печи, используя так называемый «клапан мягкой откачки», чтобы предотвратить сдвиг компонентов друг относительно друга.

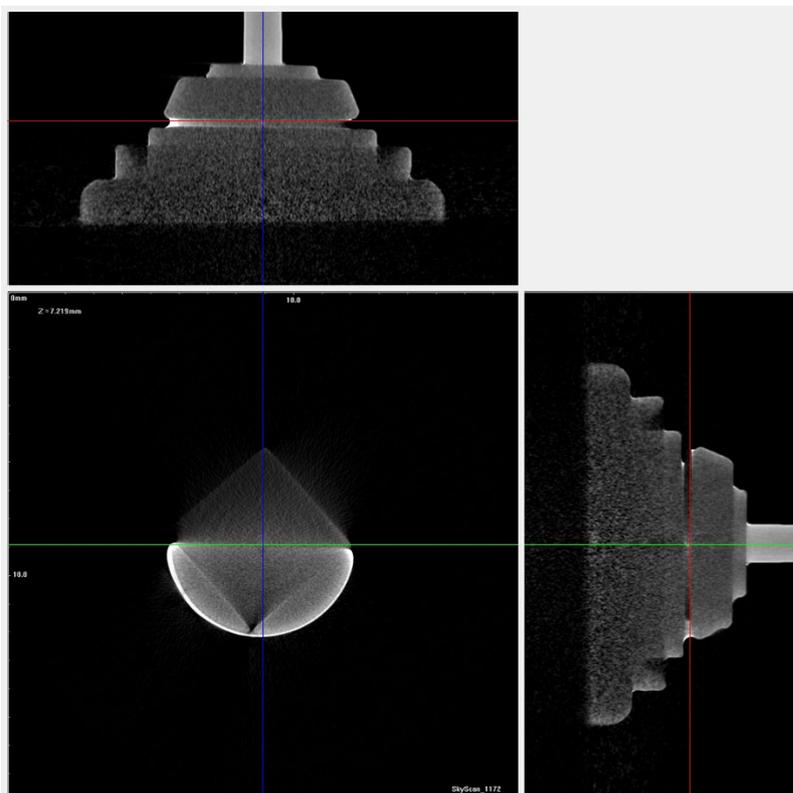


Рисунок 12. Томографический анализ паянного силового диода.

Для модулей с большой площадью основания

Для того, чтобы получать повторяемые результаты внутри партии паяемых изделий, важную роль играет равномерность распределения температуры по нагреваемой плите.

Проведены испытания равномерности температурного поля, создаваемого вакуумной печью R160C. При проверке использовался семиканальный датчик температуры Термодат-29Е5, внесенный в реестр СИ и датчики температуры Pt100. Установлено, что в режиме нагрева (в момент выхода температуры на полку) и поддержания температуры разброс составляет $\pm 3^{\circ}\text{C}$ по плите.



ООО «САВТЭК», 124498, г. Москва, Зеленоград, 4922-й проезд, дом 4, строение 5

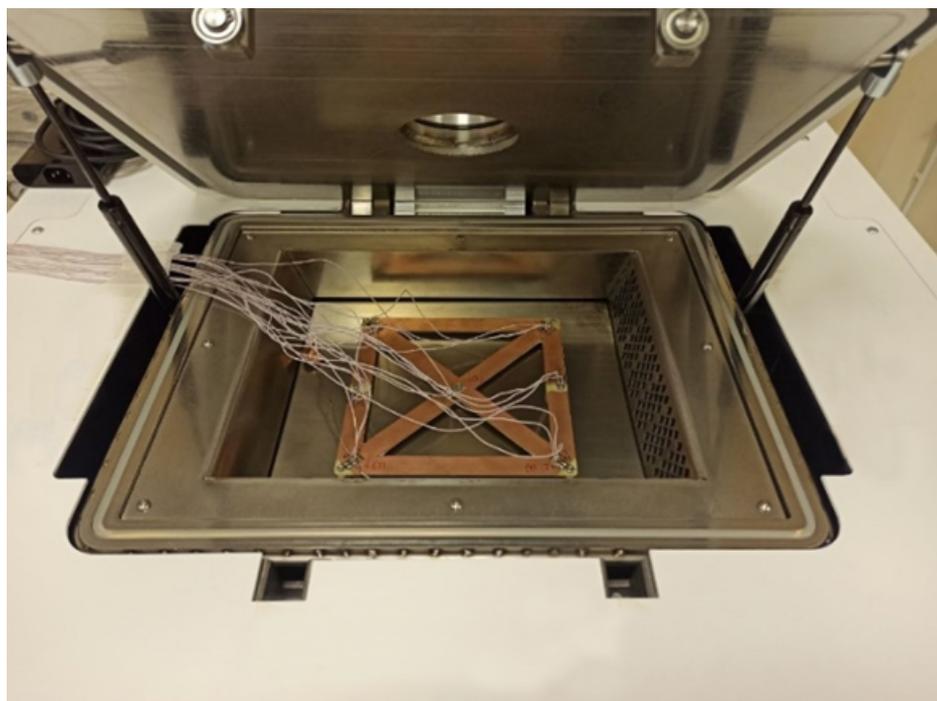


Рисунок 13. Приспособление для измерения зоны равномерности площадью 160x160 мм.



Рисунок 14. Распределение температуры по зоне равномерности 160x160 мм.

Для крупных изделий с плохой теплопроводностью подложек актуальна теплоемкость в процессе нагрева и охлаждения.

Актуальность данной задачи зависит от таких факторов:

- теплоемкость самой платы;
- крутизна нагрева и охлаждения.



ООО «САВТЭК», 124498, г. Москва, Зеленоград, 4922-й проезд, дом 4, строение 5

В процессе испытаний температурного поля было установлено, что неравномерность показаний 7-ми термомпар, расположенных на плите, в большей мере определяется тепловым контактом с нагревательным столом. А наилучший результат получился при подпружинивании контактом.

Избыточное давление

Кроме метода вакуумной пайки силовой электроники существует метод пайки в среде избыточного давления (до 4 бар избыточных инертного газа). Он не дает лучшие результаты чем вакуумный, а расход газа при таком методе значительно больше.

Но все же есть определённые задачи в пайке, которые требуется выполнять в инертной среде с давлением выше атмосферного. Установив на печи вакуумной пайки усиленные замки крышки вакуумной камеры, можно осуществлять пайку корпусов, в которых требуется иметь небольшое избыточное давление в рабочем запаянном виде. Обычно это избыточное к атмосферному давление не более 0,5 бар, т.е. не более 1,5 бар абсолютного давления. Пайка в этом случае происходит в среде повышенного давления, равного тому, что требуется создать в готовом приборе. При этом необходимо учитывать, что при нагреве согласно термопрофилю, в зависимости от температуры ликвидуса используемого припоя, давление может подниматься в 1,5- 2,5 раза из-за роста температуры среды. Поднимается оно и в вакуумной камере печи, и в самом приборе. Поэтому конструкции печей и рассчитаны на давление 4,5 Бар.

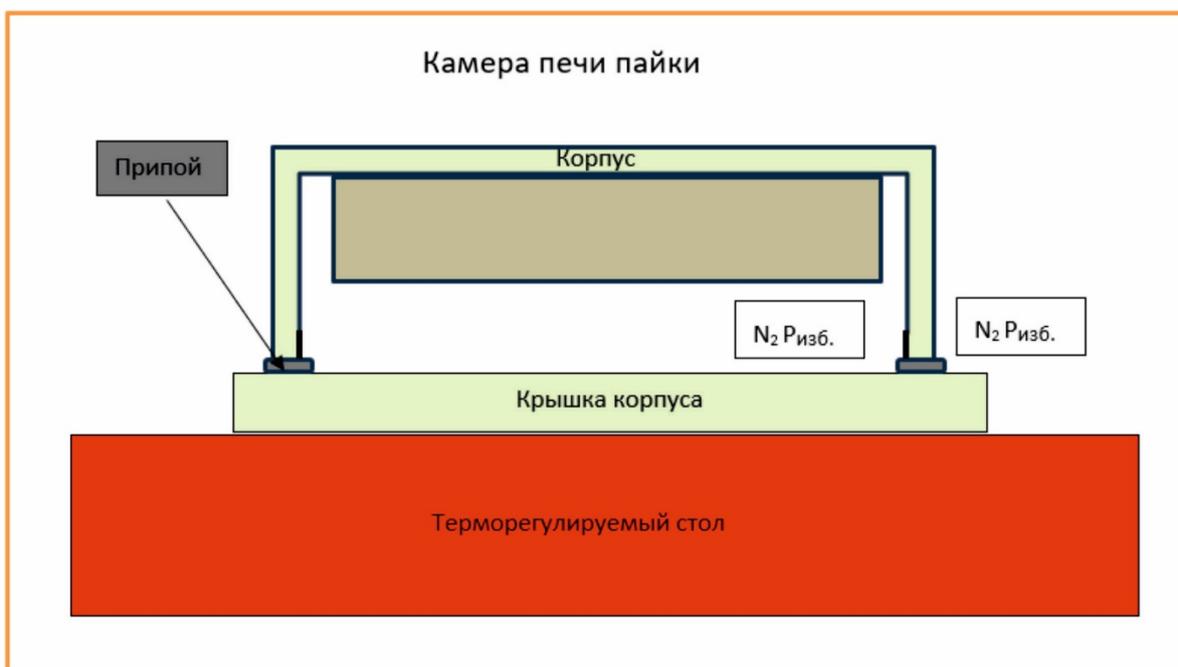


Рисунок 15. Схема пайки, корпусов, работающих при небольшом избыточном давлении.

Заключение

Проведена пайка ряда различных изделий на печи SAVTECH R200MC и SAVTECH R200M и оценено влияние флюсов газов, а также скоростей нагрева и охлаждения изделий на качество пайки, скорость технологического процесса и расход технологических газов.

Установлено, что:

- 1) В виду различных функций и возможностей оборудования, при его выборе всегда нужно внимательно проверить требования к термопрофилю для пайки используемым припоем;
- 2) С целью повышения надежности паяного соединения разумно использовать современное оборудование для вакуумной пайки с функциями подачи инертной среды, формирующего газа, водорода или паров муравьиной кислоты.

Можно предположить, что следующим этапом развития технологии вакуумной пайки станет необходимость в оборудовании большей производительности. Именно на этом стоит сосредоточить усилия при разработке нового оборудования.

Литература



ООО «САВТЭК», 124498, г. Москва, Зеленоград, 4922-й проезд, дом 4, строение 5

1. Сычик В. А. Технология сборки интегральных схем. Конспект лекций по дисциплине «Технология сборки полупроводниковых приборов и интегральных схем». – Минск:БНТУ – 2014 – 306 с. - ISBN 978-985-550-140-5.
2. Кантер А. Вакуумная пайка —залог качественного паяного соединения // Технологии в электронной промышленности – 2013 - №6 – С. 30 - 33.
3. Перевезенцев Б.Н., Шашкин О.В. Теоретические основы пайки. Электронное учебное пособие. – ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет» - 2018 – 132 с. - ISBN 978-5-8259-1271-4.
4. Валев С. Вакуумная пайка в производстве силовой электроники. Современное решение для лабораторного и крупносерийного производства// Силовая электроника – 2006 - №3 - С. 104-108.
5. Christian Ulzhöfer. Vacuum reflow: A simple approach for void reduction by means of an inline reflow system// SMT Vacuum void reduction – 2012.

**Application of vacuum soldering furnaces for essential components
Ziuber D.I.¹, Shatalin A.S.²**

¹ LLC «SAVTEch»

124460, Russia, Moscow, Zelenograd, distr. 4922., 4 build. 5

² LC «NPP" Pulsar»

105187, Russia, Moscow, Okrujnoi distr., 27

Abstract

Theoretical foundations of vacuum soldering process, advantages of soldering with fluxes and in their absence are considered. Equipment with different types of heating and cooling of the working area has been compared. The impact of the use of this equipment on the quality of soldered joints has been investigated.

Keywords: vacuum soldering; soldering furnace; flux; formirgas; soldering in formic acid vapors; high vacuum; conducted heating; radiation heating; soldering with excessive atmosphere.