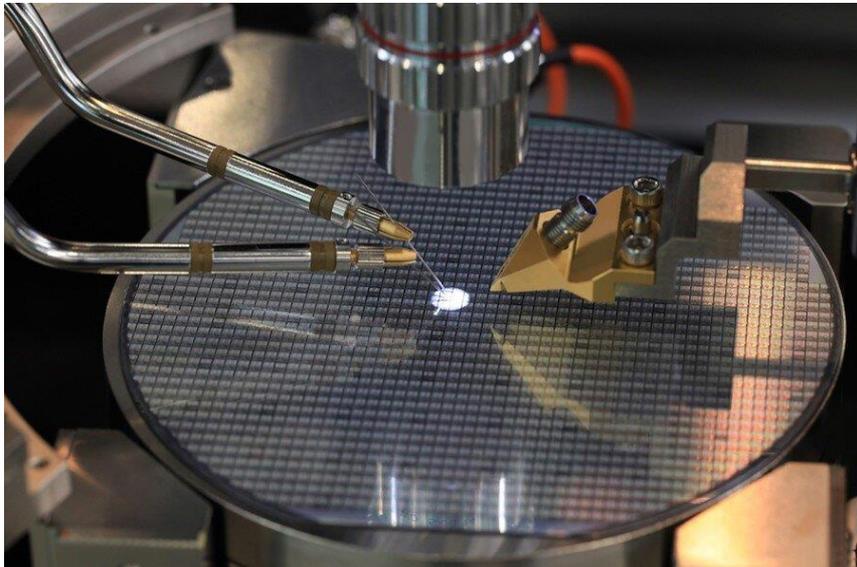


ІТМО

Д.А. Бауман

**ТЕХНОЛОГИЯ СБОРКИ (КОРПУСИРОВАНИЯ)
В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ**



**Санкт-Петербург
2024**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Д.А. Бауман
ТЕХНОЛОГИЯ СБОРКИ (КОРПУСИРОВАНИЯ)
В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлению подготовки 12.04.05, 16.04.01
в качестве учебного пособия для реализации основных профессиональных
образовательных программ высшего образования магистратуры

ИТМО

Санкт-Петербург
2024

Бауман Д.А., Технология сборки (корпусирования) в микроэлектронике– СПб:
Университет ИТМО, 2024. – 72 с.

Рецензент(ы):

Маслова Елена Владимировна, инженер лаборатории однофотонных детекторов и генераторов Университета ИТМО.

Настоящее учебное пособие представляет собой дополненную и исправленную версию первой редакции учебного пособия [1], подготовленного и изданного в 2018 году на основании одноимённого курса. За прошедшие шесть лет курс был существенно переработан: вместо сборки светодиодов рассматривается более общий подход корпусирования чипов в микроэлектронике, добавлены новые разделы, связанные с появившимися технологиями (монтажа чипов и герметизации), новые материалы (адгезивы, компаунды и др.), исправлены некоторые ошибки. Внесённые изменения потребовали переиздания учебного пособия в новой редакции.

В пособии изложены основы построения технологического процесса корпусирования в микроэлектронике. Обсуждаются общие принципы разработки технологического процесса, место технолога в производственном процессе, методы формализации и описания технологии. Рассмотрены основные стандарты, в том числе системы ЕСТД, состав комплекта технологической документации.

Во второй части пооперационно разобран технологический процесс сборки (корпусирования) с одновременным построением технологического маршрута.

The logo for ITMO University, consisting of the letters 'ITMO' in a bold, black, sans-serif font. The 'I' and 'T' are connected, and the 'O' is a solid circle.

ИТМО (Санкт-Петербург) — национальный исследовательский университет, научно-образовательная корпорация. Альма-матер победителей международных соревнований по программированию. Приоритетные направления: ИТ и искусственный интеллект, фотоника, робототехника, квантовые коммуникации, трансляционная медицина, Life Sciences, Art&Science, Science Communication.

Лидер федеральной программы «Приоритет-2030», в рамках которой реализуется программа «Университет открытого кода». С 2022 ИТМО работает в рамках новой модели развития — научно-образовательной корпорации. В ее основе академическая свобода, поддержка начинаний студентов и сотрудников, распределенная система управления, приверженность открытому коду, бизнес-подходы к организации работы. Образование в университете основано на выборе индивидуальной траектории для каждого студента.

ИТМО пять лет подряд — в сотне лучших в области Automation & Control (кибернетика) Шанхайского рейтинга. По версии SuperJob занимает первое место в Петербурге и второе в России по уровню зарплат выпускников в сфере ИТ. Университет в топе международных рейтингов среди российских вузов. Входит в топ-5 российских университетов по качеству приема на бюджетные места. Рекордсмен по поступлению олимпиадников в Петербурге. С 2019 года ИТМО самостоятельно присуждает ученые степени кандидата и доктора наук.

© Университет ИТМО, 2024

© Бауман Д.А., 2024

Содержание

Перечень используемых сокращений.....	4
Вступление.....	5
Определения	6
Место и задача технолога.....	7
Особенность описания технологии	9
Общие принципы построения ТП.....	10
Описание технологического процесса. Технологическая документация.....	11
Вопросы для самоконтроля.....	28
Технологический маршрут.....	29
1. Ионно-плазменная очистка	29
2. Монтаж чипов в корпус.....	34
2.1 Нанесение материала.....	34
2.2 Постановка чипа	41
3. Сушка адгезива	44
4. Микросварка. Проволочные контакты.	45
5. Герметизация	56
5.1 Герметизация не светодиодных чипов	56
5.2 Заливка светодиодов силикон-люминофорной смесью. Приготовление, нанесение и сушка люминофорной смеси	57
6. Разделение групповой заготовки	65
7. Контроль, сортировка, упаковка.....	65
Вопросы для самоконтроля.....	68
Заключение	69
Список использованной и рекомендованной литературы.....	70

Перечень используемых сокращений

ВО – ведомость оснастки
ВОБ – ведомость оборудования
ВТД – ведомость технологических документов
ИОТ – инструкция по охране труда
КД – конструкторская документация *или* конструкторский документ
КП – контактная площадка
КТД – комплект технологической документации
КТИ – карта технологической информации
МК – маршрутная карта
ОК – операционная карта
ПП – производственный процесс
РЭ – руководство по эксплуатации
СД – светодиод, светодиодный
СЭМ – сканирующий электронный микроскоп
Т – технология
ТД – технологическая документация *или* технологический документ
ТЗ – техническое задание
ТИ – технологическая инструкция
ТЛ – титульный лист
ТО – технологическая операция
ТП – технологический процесс
УЗ – ультразвук, ультразвуковой

Вступление

Данный курс основан на более чем пятнадцатилетнем опыте работы автора курса в светодиодной индустрии, в том числе, опыте разработки производственных технологических процессов сборки светодиодов. Курс построен так, что почти вся информация применима не только к сборке светодиодов, но и к более широкому классу технологий корпусирования чипов в микроэлектронике. Курс имеет исключительно практическую направленность. Основные цели курса – дать обучающимся представление о специфике работы технолога в индустрии, разработки промышленных (а не лабораторных) технологий, об основных требованиях к процессу корпусирования полупроводниковых чипов в микроэлектронном производстве. Причем, за исключением специфики собственно корпусирования, все общие понятия и представления пригодятся обучающимся при любой технологической работе в микро- или оптоэлектронной индустрии, поскольку принципы построения технологии, основные её отличия от лабораторной исследовательской работы одни и те же при производстве светодиодов, лазерных диодов, фотоприёмников и других приборов микроэлектроники.

Курс устроен следующим образом. Сперва в рамках одной или двух лекций вводятся и разбираются основные понятия, связанные с производственной технологией: понятие собственно технологии, технологичности, технологического маршрута и т.п. Рассматривается связь конструкции изделия и технологии его изготовления, изучаются основные способы описания технологического процесса, основные документы и основные стандарты из ЕСТД.

Во второй части на основе светодиода достаточно простой конструкции и комплекта конструкторской документации на него пооперационно разбирается и составляется технологический процесс сборки этого светодиода. По мере составления технологических операций сборки основные из них разбираются подробнее. Каждая операция заносится в основной технологический документ – маршрутную карту. Так что к концу курса у каждого обучающегося получается документ, максимально приближенный к настоящей маршрутной карте, которой пользуются в сборочном цеху.

Третья часть курса состоит из практических занятий в лаборатории сборочных технологий. Там студенты могут увидеть тот технологический процесс, который будет разобран на лекциях, увидеть основное оборудование, оснастку, работу технологов, после чего – выполнить несколько практических заданий. Необходимо обратить внимание на то, что практические занятия являются самой важной и самой содержательной частью курса. Собственно, вся лекционная часть нужна для того, чтобы подготовить студентов к практике. Без выполненных практических работ курс не может быть завершён.

Определения

Итак, введём основные понятия, связанные с разработкой технологии. Начнём с определения собственно технологии:

Технология (Т) (от греческого *techne* - искусство, мастерство, умения и ... *логия*) - совокупность методов обработки, изготовления, изменения состояния, формы, свойств сырья, материала или деталей, применяемых в процессе производства, для получения готовой продукции.

Технологический процесс (ТП) – это часть производственного процесса (ПП), содержащая целенаправленные действия по изменению и (или) определению состояния предмета труда.

Правильное, но не очень понятное и не очень полезное определение, которое даётся в большинстве учебников по технологии. Понятно одно: есть общий производственный процесс – процесс производства изделия, включающий в себя и разработку изделия, и подготовку производства, и организацию рабочих мест, и обеспечение производства, хранение материалов и ещё много чего (см. рисунок 01). И в том числе – ТП, т.е. собственно процесс изготовления изделия. В этом смысле – ТП есть часть ПП.

Говоря проще, **Технологический процесс (ТП)** – это последовательность действий (технологических операций), позволяющих изготовить (в нашем случае - собрать) изделие, и набор численных значений параметров технологического режима выполнения каждого действия (каждой технологической операции).

Технология и ТП часто употребляются как синонимы. Однако Т – более широкое понятие, чем ТП. Например, Т может включать в себя несколько ТП. Пример: Т изготовления светодиода включает в себя ТП эпитаксиального роста структуры, ТП изготовления чипа и ТП сборки собственно светодиода (СД).

Технологическая операция (ТО) – законченная часть техпроцесса, выполняемая на одном рабочем месте. Это основная структурная часть ТП.

Технологичность. Под технологичностью понимают совокупность свойств конструкции изделия, определяющие ее приспособленность к достижению оптимальных затрат при производстве, техническом обслуживании и ремонте для заданных показателей качества, объема выпуска и условий выполнения работ. Технологичность обеспечивается при разработке конструкции изделия.

Технологичность конструкций изделий оценивают качественно («хорошо» – «плохо»), «рационально» – «нерационально»), «технологично» – «нетехнологично») и количественно. Основными количественными показателями технологичности конструкции изделия являются трудоемкость, материалоемкость и себестоимость. Трудоемкость изготовления изделия представляет собой затраты труда на выполнение технологических процессов его изготовления. Материалоемкость изделия – это расход материалов и комплектующих, необходимых для его производства и эксплуатации. Себестоимость изделия включает в себя затраты

предприятия на изготовление единицы продукции, выраженные в денежной форме (подробнее см. [2])



Рисунок 01 - Схема организации ПП

Сборочное изделие технологично, когда:

- его легко и удобно собирать;
- минимизировано время на сборку единицы изделия;
- в изделии используются стандартные комплектующие и материалы.

Вообще, стандартизованность, унифицированность – основные признаки технологичности. Подробное описание технологичности можно найти в ГОСТ 14.201-83 «Обеспечение технологичности конструкций изделия. Общие требования» [3].

Место и задача технолога

В чём состоит работа технолога? В разработке и сопровождении Т (ТП). Но это только часть единого процесса разработки и производства изделия. Где в этом процессе место технолога и технологии?

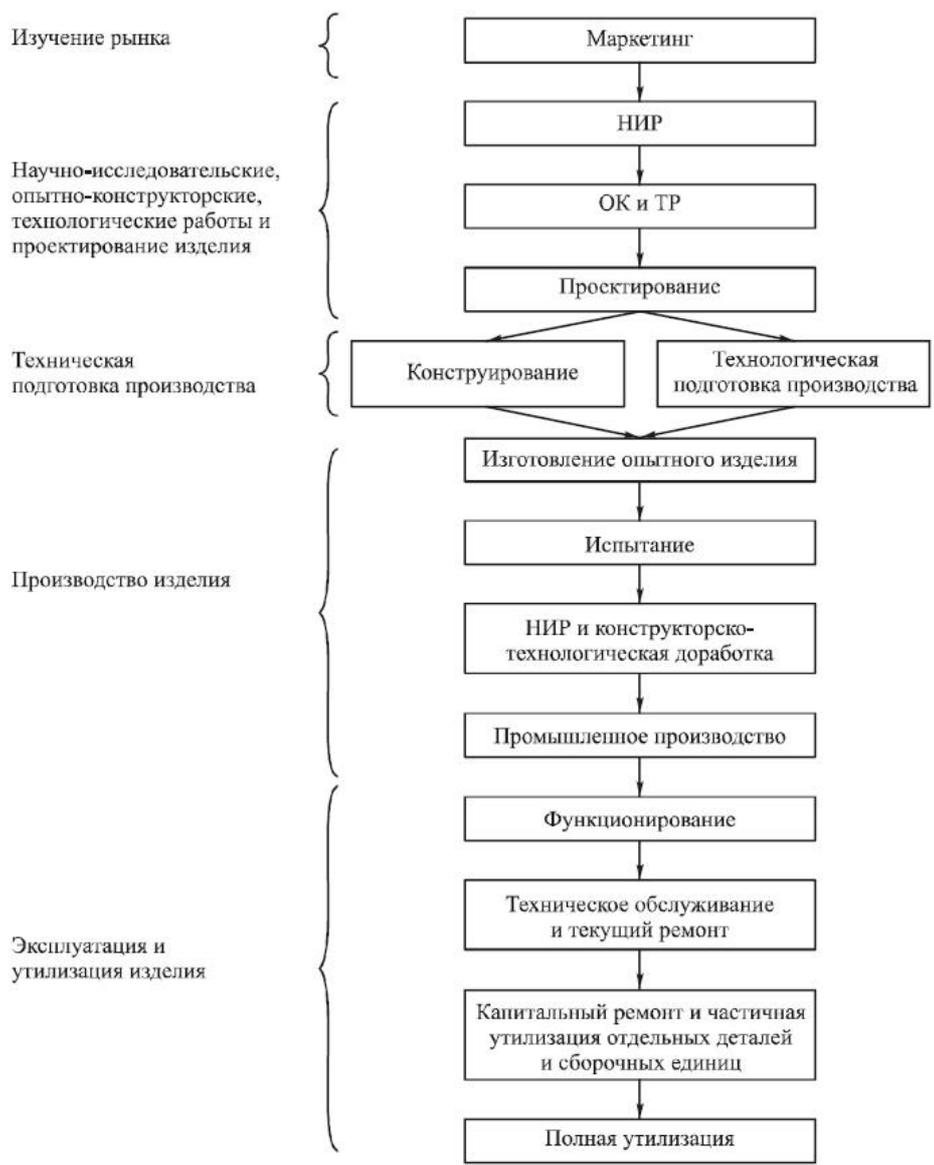


Рисунок 02 – Жизненный цикл изделия

Любое производство начинается с разработки (проектирования) изделия (см. рисунок 02). Разработкой занимается инженер-разработчик и инженер-конструктор. Иногда эти работы (функции) выполняет один человек. На входе этого этапа – техническое задание на разработку. На выходе – разработанная конструкция изделия в виде комплекта конструкторской документации (КД). Технолог подключается к работе на этапе технологической экспертизы КД. В этот момент, в частности, оценивается технологичность изделия. После технологической экспертизы КД передаётся технологам для разработки технологической документации (ТД). Отсюда естественный вывод: технолог должен уметь читать КД.

Особенность описания технологии

С чего начинается работа технолога? С анализа КД. Глядя на КД, на состав деталей, комплектующих, материалов, на методы соединения разных элементов конструкции (это всё должно быть в КД), технолог определяет перечень и последовательность технологических операций или технологический маршрут сборки изделия.

В чём особенность и сложность описания технологических операций? Разберём на простейшем примере из машиностроения. Пусть у нас есть две детали, которые соединяются резьбовым соединением (см. рисунок 03).

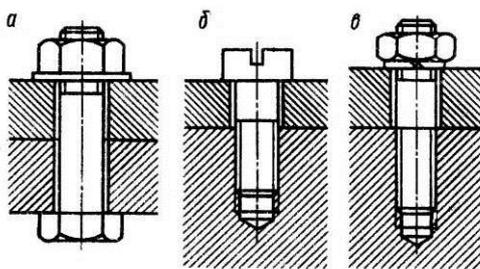


Рисунок 03 – Чертёж резьбового соединения

На одной детали – сквозное отверстие, на другой – глухое с внутренней резьбой. Используется винт или болт. Казалось бы, что тут описывать? Но есть масса нюансов.

- 1) Что выбрать – болт или винт? Это зависит, например, от доступности соединения, это влияет на выбор инструмента.
- 2) Выбор материала крепежа (он должен соответствовать материалу деталей).
- 3) Требуется ли виброустойчивость, т.е. нужна ли шайба Гровера (пружинная шайба)?
- 4) Если несколько винтовых соединений одной детали – важна последовательность закручивания (от центра, крест-накрест), чтобы избежать перекоса.
- 5) Важно определить усилие (крутящий момент).
- 6) Нужна ли оснастка?

(подробное описание операции см. [4] стр. 312-318). Т.е. при описании выполнения ТО технолог должен предусмотреть множество особенностей данной ТО, в том числе кажущихся очевидными.

Общие принципы построения ТП

Задача любого ТП – обеспечить возможность серийного изготовления изделия, обеспечив при этом выполнение всех технических и экономических требований к изделию. Соответственно, технолог разрабатывает ТП, исходя из двух принципов – технического и экономического. Иначе говоря, нужно сделать такой ТП, чтобы изделие получалось таким, как нужно (задано в ТЗ), и при этом затраты (в рублях) были минимальными.

Технические:

Перечень операций → Соответствие изделия ТЗ

Экономические:

Себестоимость → Материальные затраты

Трудозатраты

При сборочном ТП в основном встречаются операции трёх типов:

- 1) обработки детали/полусборки;
- 2) соединения деталей (собственно сборка);
- 3) контроля изделия на данном этапе технологического процесса.

Обработка деталей в сборочном ТП обычно носит вспомогательный характер. Здесь обычно нет обработок, качественно меняющих характеристики детали (форму, качество поверхности и т.п.). Т.е. обычно не встречается механическая обработка деталей. Но может встретиться, например, подготовка поверхности для выполнения других операций (отмывка, очистка и т.п.).

Что касается контроля изделия, то следует различать контроль двух типов:

- 1) Контроль выполнения данной операции (*контроль в процессе выполнения отдельной технологической операции*). В случае автоматизированного оборудования чаще всего такой контроль предусмотрен в самом оборудовании. В любом случае такой контроль нужно обеспечить, по возможности, для каждой сборочной операции. Такой контроль логичнее включить в состав исходной ТО. Можно выделить в отдельную ТО – в этом случае это будет контроль второго типа (п.2);
- 2) Контроль изготовления полусборки или изделия как целого (*контроль после выполнения технологической операции*). Может быть промежуточным и финишным. Такой контроль всегда выделяется в отдельную ТО.

Пример контроля первого типа: при установке чипа в корпус (это отдельная ТО сборки) вам нужно проверить точность позиционирования чипа – визуально или с помощью машинного зрения. Пример контроля второго типа: после установки корпусированных чипов на плату производится контроль работоспособности платы.

При планировании каждой технологической операции необходимо определить:

На входе операции

- 1) какие детали и/или полусборки необходимы;

- 2) какие необходимы материалы;
- 3) какое оборудование будет использовано;
- 4) какая оснастка (если нужно).

На выходе операции

- 1) какой результат мы должны получить в результате выполнения данной ТО;
- 2) как проконтролировать качество выполнения данной операции.

При планировании ТП при поточной сборке важно также обеспечить синхронизацию и согласованность операций (по времени и по производительности) для минимизации простоя оборудования и персонала.

Описание технологического процесса. Технологическая документация

Описание ТП выполняется с помощью и в виде технологической документации. Напомним, что основа любого ТП – это маршрут прохождения детали при её сборке, состоящий из отдельных последовательных ТО. Описание ТП может быть трёх видов:

1. Маршрутное, при котором производится сокращенное описание всех технологических операций в маршрутной карте (МК) в последовательности их выполнения без указания переходов и технологических режимов. Такой способ применим, когда ТП состоит из стандартных и не слишком сложных операций, либо, когда подробное описание операции содержится в других документах: например, в руководстве по эксплуатации установки (РЭ), в технологической инструкции (ТИ) и карте технологической информации (КТИ).
2. Операционное, при котором дается полное описание всех технологических операций в форме операционных карт (ОК) в последовательности их выполнения с указанием переходов и технологических режимов. Маршрутная карта при этом также оформляется. (Вообще, крайне редко встречается ТП, в котором можно обойтись без МК)
3. Маршрутно-операционное, при котором дается сокращенное описание технологических операций в маршрутной карте в последовательности их выполнения с полным описанием отдельных операций в других технологических документах (обычно – ОК).

Выбор описания ТП зависит от конкретного ТП, входящих в него ТО и определяется технологом-разработчиком.

Выше мы с вами указали несколько видов технологических документов: МК, ОК, ТИ, КТИ. Полный перечень ТД содержится в ГОСТ 3.1102-81 «Стадии разработки и виды документов» [5], а формы основных документов – в ГОСТ 3.1105-84 «Формы и правила оформления документов общего назначения» [6].

Разберём содержание и оформление основных технологических документов.

				ГОСТ 3.1105-84 Форма 1	
		12.04.11	22.03.11	НКСТ.01288.00132	
ЗАО «СВЕТЛАНА – ОПТОЭЛЕКТРОНИКА»		НКСТ.432225.092 НКСТ.432225.099		НКСТ.01288.00132	
Светодиоды SvL-03				12	13
		НКСТ-080-11	НКСТ-028-11		
		Изм	Изм		
		13	12		
<p>Утверждаю</p> <p>Главный технолог</p> <p>Е.В.Маслова</p> <p>17.03.11г.</p> <p>КОМПЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ</p> <p>На технологический процесс сборки светодиода SvL-03</p> <p>Инженер ТО ООС и ПБ Н.П. Камышенцева</p> <p>Ведущий технолог А.П. Петров</p> <p>АКТ № от</p>					
Дубл.					
Взам.					
Подп.					
ТЛ					

Рисунок 04 – Титульный лист

Титульный лист (ТЛ). Это формальный документ, содержащий, однако, основную (формальную же) информацию о ТП:

- десятичный номер комплекта ТД;
- название компании-разработчика;
- десятичный номер комплекта КД на собираемое изделие;
- десятичный номер данного документа (для ТЛ – совпадает с номером комплекта ТД);
- название собираемого изделия;
- название ТП;
- разработчик ТП;
- литера.

Литера – это условное обозначение стадии разработки изделия. Понятие более конструкторское, чем технологическое. Но на комплекте ТД также проставляется. Стадии разработки (основные) бывают:

Э – эскизный проект. Как вариант – стадия макетирования.

О – после предварительных испытаний.

О1 – после приёмочных испытаний.

А – после испытаний установочной серии и постановки изделия и ТП на производство.

Здесь также появился новый термин – десятичный номер. По сути – это условное (закодированное) обозначение любого ТД или КД. Как устроен десятичный номер? Разберём на примере. На нашем ТЛ мы видим десятичный номер нашей ТД: РТВК.01188.00460

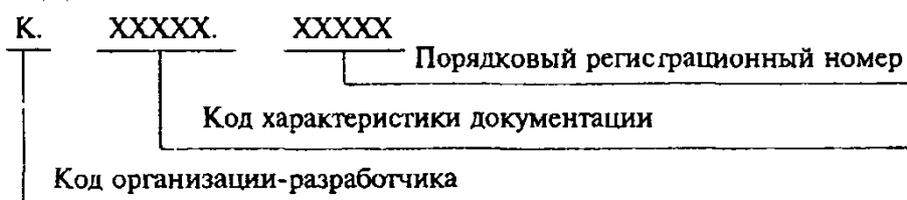


Рисунок 05 – Десятичный номер. Первая часть.

Структура этого номера определена в ГОСТ 3.1201-85 «Система обозначений технологической документации» [7]. Расшифровка структуры приведена на рисунках 05 и 06. Первая часть (слева от первой точки) – это буквенный код организации-разработчика. По запросу в Росстандарт любая организация может получить такой уникальный код. Зачем он нужен, если на любом документе итак есть название организации? В основном для формирования архива технической документации, где у вас в перечне указаны только десятичные номера. И по коду вы сразу видите, в какой организации разработана документация.

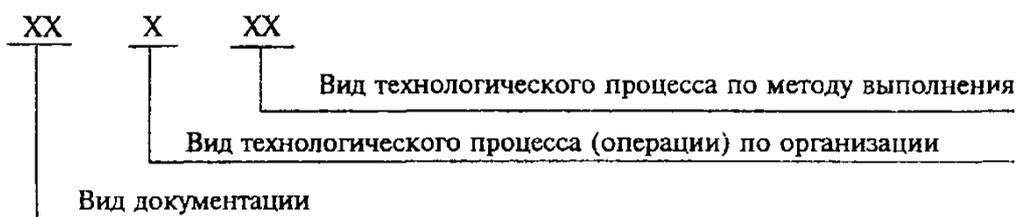


Рисунок 06 – Децимальный номер. Вторая часть.

Следующие пять цифр – код характеристики документа. Первые две цифры – вид документа. Например:

01 – комплект ТД

10 – маршрутная карта

25 – технологическая инструкция

Полный перечень обозначений приведён в [7]. Третья цифра в средней части – вид технологического процесса (операции) по организации

Код	Вид технологического процесса (операции) по организации
0	Без указания
1	Единичный процесс (операция)
2	Типовой процесс (операция)
3	Групповой процесс (операция)

Последние две цифры в средней части – вид ТП по методу выполнения. В нашем случае метод выполнения – сборка, что обозначается кодом «88». Таким образом, у нас с вами на ТЛ: «01» - комплект ТД (как и должно быть на титуле), «1» – значит, наш ТП – единичный, «88» означает – сборка, т.е. наш ТП по методу выполнения – сборочный.

Последние пять цифр десятичного номера (после второй точки) – это просто порядковый номер документа (комплекта документов) в техническом архиве.

Таким образом, в нашем примере (РТВК.01188.00460) приведён десятичный номер комплекта технологической документации на единичный технологический процесс сборки, зарегистрированный в системе учёта технической документации под номером 460. Код разработчика – РТВК.

Следующий технологический документ – ведомость технологических документов (ВТД, см. рисунки 07.1 и 07.2). Формально – основной технологический документ (аналогично спецификации в комплекте КД). Фактически – это просто содержание комплекта ТД. Из примера мы видим полный набор документов, входящих в данный комплект ТД: ТЛ, ВТД, ВО, ВД, МК, ТИ, КТИ.

						НКСТ.01288.00132	2	1	
		ЗАО «СВЕТЛАНА – ОПТОЭЛЕКТРОНИКА»	НКСТ.432225.092 НКСТ.432225.099			НКСТ.40288.00102			
		Светодиоды SvL-03					Ф ₁	А	
		С	НПП	Обозначение ДСЕ		Наименование ДСЕ		КП	
		Ф	НПП	Обозначение комплекта ТД		Наименование комплекта ТД		Листов	
		Г	Обозначение ТД		Услов. обозн.	Лист	Листов	Примечание	
		Ф ⁰¹	1	НКСТ.01288.00132		Комплект технологической документации			
		02	на типовой технологический процесс «Светодиоды SvL-03»						
		03	2	НКСТ.01288.00132		Титульный лист			
		04	3	НКСТ.42288.00054		Ведомость оснастки		7	
		05	4	НКСТ.40288.00102		Ведомость технологических			
		06				документов		2	
		07	5	НКСТ.44288.00062		Ведомость деталей		6	
		08	6	НКСТ.43288.00170, НКСТ.43288.00180, НКСТ.43288.00203,					
		09	НКСТ.43288.00204, НКСТ.43288.00206, НКСТ.43288.00207			Нормы			
		10	расхода материалов						
		11							
		12							
		Г ¹³	7	НКСТ.10288.00132	МК	8			
		14	8	НКСТ.25201.00032	ТИ	8			
		15	9	НКСТ.25204.00012	ТИ	7	КТИ НКСТ.59304.00012		
		16	10	НКСТ.25288.00066	ТИ	11			
		17	11	НКСТ.25201.00039	ТИ	5			
		18	12	НКСТ.25201.00079	ТИ	6	КТИ НКСТ.59301.00079		
		19	13	НКСТ.25288.00067	ТИ	11	КТИ НКСТ.59388.00067		
		20	14	НКСТ.59302.00010	КТИ	12			
		21							
						Разраб.	Секиркин	08.02.13	
						Проверил	Шабанов	11.02.13	
						Согл.	Маслова	12.02.13	
Дубл.	Взам.	Подл.	14	зам	НКСТ-008-13	25.01.13	Н.контр.	Грибкова	12.02.13
			ВТД						

Рисунок 07.1 – ВТД Лист 1

Следующий технологический документ – Маршрутная карта (МК) – вероятно, наиболее важный документ в комплекте ТД. Как мы уже говорили, суть ТП – это последовательное выполнение ТО (в нашем случае – по корпусированию чипа). Собственно, последовательность ТО называется технологический маршрут или просто маршрут. Этот маршрут и описан в маршрутной карте.

Разберём как устроена МК (см. рисунки 08.1 и 08.2). Подробное описание – ГОСТ 3.1118-82 «Маршрутные карты» [8]. Ниже приведены пустой шаблон МК (рисунок 08.1) и заполненный образец (рисунок 08.2). Глядя на образец МК, видно, что здесь есть уже знакомые нам элементы: десятичный номер КТД, организация-разработчик, десятичный номер КД, десятичный номер данного документа. Вообще, эта шапка практически одна и та же для любого технологического документа. Обращаю внимание, что теперь у нас различаются номер комплекта ТД и номер данного документа. В МК, как и практически в любом другом технологическом документе, кроме ТЛ, первая страница отличается по форме от последующих наличием нижней форматной рамки (разработчики, подписи, даты).

Расшифровка строк:

Строка «В» – место, номер, код и название ТО. Нумерация операций – через 10 или через 5: 005, 010, 015 и т.д. Код операции – по «Классификатору технологических операций машиностроения и приборостроения».

РМ – рабочее место (мы не используем)

Строка «Г» – перечень документов, используемых при выполнении данной ТО.

Строка «Д» – оборудование, используемое в данной ТО.

Строка «Е» - информация по трудозатратам. Нами не используется.

Строка «Л/М» – наименование детали, сборочной единицы (Л) или материала (М).

Строка «Н/М» – Информация по комплектации изделия (сборочной единицы). Нами почти не используется. В строке «Н/М»:

ОПП – обозначение подразделения (склада, кладовой и т.п.), откуда поступают комплектующие детали, сборочные единицы или материалы

КИ – Количество деталей, сборочных единиц, применяемых при сборке изделия

Видно, что каждая операция в МК описана очень кратко. Здесь нет никакой информации о действиях оператора или технолога. Но есть ссылки на другие документы, которые необходимо использовать при выполнении данной ТО.

				УШКР.01100.00002		2		1			
ЗАО «Эпи-Центр»		УШКР.432245.001		-		УШКР.60101.00001					
		Светоизлучающий кристалл на основе инверсных GaN-гетероструктур						-			
В Г Д Е Л/М О	Цех	Уч	РМ	Опер.	Код, наименование операции						
	Обозначение документа					Код, наименование оборудования					
	СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ВН	ОП	Кпт	Тпа	Тпт
	Наименование детали, сб. единицы или материала					Содержание операции (перехода)					
В 01	005		0143		Очистка химическая пластин в						
02	четырёххлористом углероде										
Г 03	ИТЬ 0004, 0007, 0043										
Д 04	электроплитка ЭПТ-1,0220 ГОСТ 14919-83										
05	шкаф вытяжной 2-ПНЖ										
Л 06	Светоизлучающая гетероструктура										
07											
М 08	Спирт этиловый ректификованный ГОСТ 8300-87										
09	Бязь ГОСТ 29298-92										
10	Углерод четырёххлористый ХЧ ГОСТ 20288-74										
11											
12											
О 13	1. Включить электроплитку.										
О 14	2. Поместить пластины при помощи пинцета в кассету.										
15	Пластины брать пинцетом на расстояние не более 3 мм от края.										
О 16	3. Поместить кассету с пластинами в кварцевый стакан.										
О 17	4. Наполнить стакан четырёххлористым углеродом до высоты, превышающей										
18	уровень пластин на 2 – 2,5 см.										
О 19	5. Поместить стакан с пластинами на разогретую плитку.										
О 20	6. Кипятить пластины в четырёххлористом углероде 10 минут.										
О 21	7. По истечении заданного времени выгрузить кассету с пластинами из стакана.										
О 22	8. Заполнить сопроводительный лист на партию пластин, указав в нем дату										
23	проведения операции, количество обработанных пластин, фамилию оператора.										
О 24	9. Передать годные пластины в кассете с сопроводительным листом на										
					Разработал	В.В.Уелин					
					Проверил	Л.К.Марков					
					Утвердил	Д.А.Зактейм					
Дубл. Взам. Подп.	МК/ОК										

Рисунок 09.1 – ОК Лист 1

				УШКР.01100.00002		2					
		УШКР.432245.001		УШКР.60101.00001							
В Г Д Е Л/М Н/М	Цех	Уч	РМ	Опер.	Код, наименование операции						
	Обозначение документа				Код, наименование оборудования						
	СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ВН	ОП	Клт	Тгв	Тлт
	Наименование детали, сб. единицы или материала										
	Обозначение, код				ОП	ВВ	ВН	КИ	Н.расх.		
	01	следующую операцию.									
	02										
	03										
	Т 04	Пинцет 01 Ц-738									
	05	Тара межоперационная									
	06	Кассета для травления									
	07	Капельница 2-50 для хранения спирта ГОСТ 25336-82									
	08	Стакан кварцевый химический ГОСТ 25336-82									
	09										
	10										
	11										
	12										
	13										
	14										
	15										
	16										
	17										
	18										
	19										
	20										
	21										
	22										
	23										
	24										
	25										
	26										
Дубл.	Взам.										
Испол.	МК/ОК										

Рисунок 09.2 – ОК Лист 2

								9	2	
								НКСТ.25201.00073		
								Настоящая инструкция устанавливает порядок приготовления люминофорной смеси с силиконовыми компаундами.		
								1 ОХРАНА ТРУДА		
								1.1 Для предупреждения поражения электрическим током перед началом работы проверить наличие защитного заземления приборов.		
								1.2 С целью избежания профзаболеваний работу с ЛВЖ и силиконовыми материалами проводить только при включенной вентиляции и в перчатках хирургических.		
								1.3 Не приступать к работе без инструктажа по технике безопасности при работе с ЛВЖ и силиконовыми материалами.		
								1.4 При попадании материала на кожу, необходимо тщательно смыть его теплой водой с мылом и вытереть насухо.		
								1.5 После окончания работы тщательно вымыть руки теплой водой с мылом и вытереть насухо.		
								1.6 Не держать посторонние предметы в рабочей зоне.		
								2 ОСНАЩЕНИЕ РАБОЧЕГО МЕСТА		
								2.1 Оборудование и оснастка:		
								- стол монтажный;		
								- холодильник;		
							Разработал	Трофимова	04.05.12	
							Проверил	Втюрина	04.05.12	
			17	изм	НКСТ-065-13		11.07.13			
			15	изм	НКСТ-068-2012		03.05.12	Н.контр.	Грибкова	
			ТИ							04.05.12

Рисунок 11 –ТИ Лист 2

Следующий документ – операционная карта (ОК). Этот документ по сути своей – подробное описание выполнения данной ТО. Пример заполненной ОК приведён на рисунках 09.1 и 09.2.

Он сделан на шаблоне МК, что допустимо и отражено обозначением МК/ОК. Здесь добавились кодовые строки «О» – содержание технологической операции и «Т» - используемая технологическая оснастка и инструменты. Видно, что помимо информации о ТО, аналогичной МК, здесь появилось детальное описание действий исполнителя. Степень детализации определяется разработчиком ТП, с учётом содержания других документов. Т.е. в каких-то случаях вы можете не прописывать детали в ОК, а отсылать исполнителя, например, к руководству по эксплуатации используемого оборудования или к технологической инструкции.

Далее – технологическая инструкция (ТИ). По сути - это также, как и ОК, подробное описание конкретной технологической процедуры (сознательно не используем термин «операция»). Отличие здесь в том, что в ТИ вы описываете процедуру, общую для разных изделий и разных ТП. Например, при сборке светодиодов такой процедурой является приготовление силикон-люминофорной смеси. Последовательность действий в этой процедуре одинаковая для любого светодиода. И чтобы не повторять в каждом ТП одно и то же описание, в соответствующем месте МК или ОК (строка «Г») дают ссылку на нужную ТИ.

Вид ТИ показан на рисунках 10 и 11. Обращаю внимание, что ТИ не относится непосредственно к какому-либо конкретному ТП – десятичный номер КТД не проставлен, также как не относится к конкретному изделию – десятичный номер КД также отсутствует.

Совместно с ТИ часто применяется такой документ, как карта технологической информации (КТИ) – это документ, который содержит переменные данные для процедуры, описанной в ТИ. Пример КТИ – на рисунках 12.1 и 12.2.

Следующие документы – более формальные: ведомость оснастки (ВО), ведомость оборудования (ВОб). Начнём с наиболее содержательного – ВО.

Прежде всего – что такое оснастка или, точнее, технологическая оснастка? Это вспомогательные приспособления, обычно являющиеся дополнением к оборудованию, предназначенные для удобства работы или сокращения времени выполнения операции. Часто оснастка входит в комплектацию оборудования. Пример – адаптер для установки рамки с корпусами на установку микросварки проволочных контактов, полученный вместе с установкой (рисунок 13, верхний ряд). Впоследствии в определённый момент понадобилась аналогичная оснастка под другой типоразмер корпуса. Она была разработана и изготовлена силами производственного предприятия (см. рисунок 13, нижний ряд).

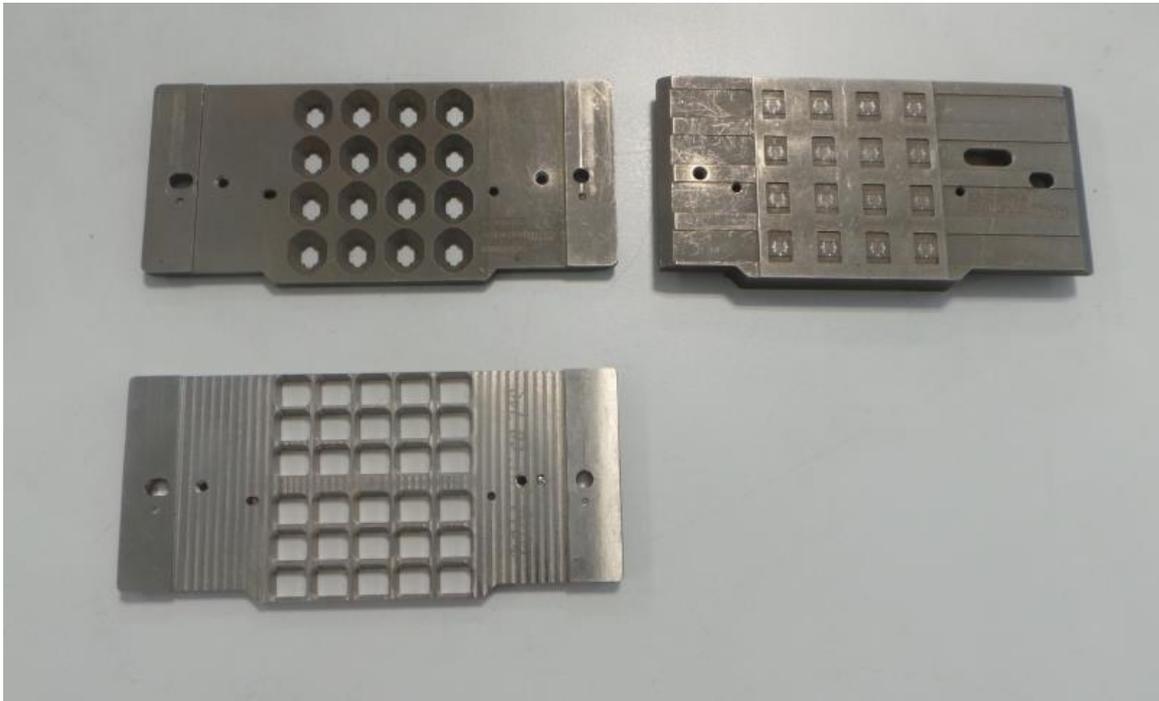


Рисунок 13 – Оснастка для разварки проволочных контактов на установке iHawk. Вверху – фирменная оснастка, внизу – изготовленная дополнительно для другого типа корпусов

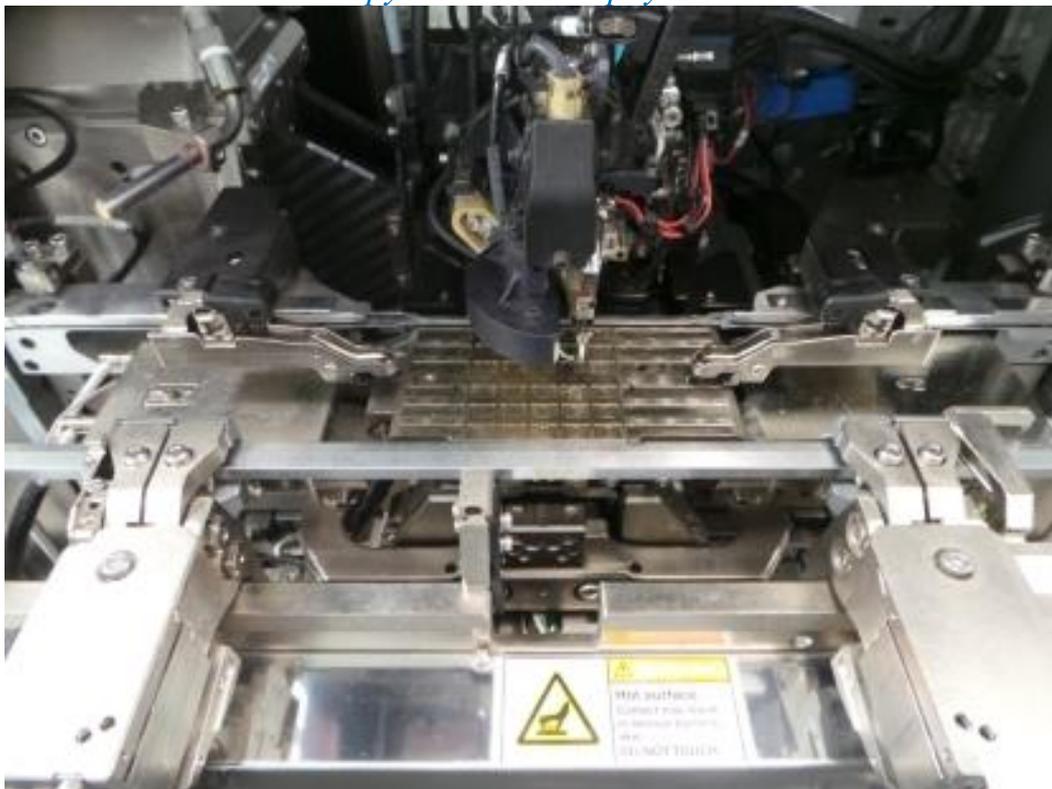


Рисунок 14 – Эта же оснастка непосредственно в установке

Вопросы для самоконтроля

- 1) Дайте определение технологического процесса, технологической операции.
Укажите связь между этими понятиями.
- 2) В чём отличие понятий «технология» и «технологический процесс»?
- 3) Что такое технологичность изделия?
- 4) Какие виды технологических операций могут входить в сборочный технологический процесс? Приведите примеры операций каждого вида.
- 5) Какие виды контроля могут быть включены в технологический процесс? Приведите примеры.
- 6) Какие способы описания технологического процесса вы знаете? Опишите их.
- 7) Какой технологический документ фактически является главным при описании технологического процесса? Что является его основным содержанием?
- 8) Перечислите все известные вам технологические документы, которые используются при описании технологического процесса и входят в комплект технологической документации. Укажите их иерархическую взаимосвязь (основные – вспомогательные, обязательные – необязательные).

Технологический маршрут

Итак, начнём составлять технологический маршрут корпусирования чипа.

1. Ионно-плазменная очистка

Задача очистки – удаление загрязнений (обычно – органических веществ или оксидных плёнок) с рабочей поверхности элемента сборки (в нашем случае – с корпуса, в который устанавливается чип). Операция универсальная и может использоваться в любом процессе микроэлектронной сборки. Последствия наличия загрязнений:

- плохая адгезия;
- снижение теплопроводности;
- ухудшение электрического контакта (например, при микросварке проволочных контактов).

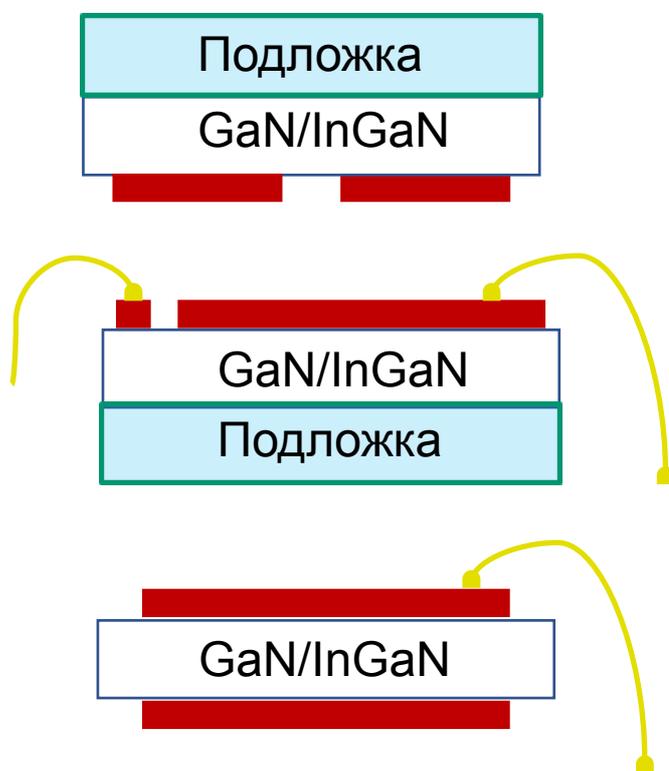


Рисунок 15 – Схематические изображения чипов трёх типов. Сверху вниз – флип-чип, face-up, вертикальный чип.

Напомним, что существуют три типа чипов, отличающихся взаимным расположением контактных площадок на чипе (см. рисунок 15).

Для флип-чипа очистка контактных площадок корпуса обеспечивает и адгезию, и электрический контакт.

Для face-up чипа сперва вы очищаете посадочное место – обеспечение адгезии и теплоотвода. Затем нужна очистка контактных площадок перед микросваркой проволочных контактов для обеспечения электрического контакта.

Для вертикального чипа: нижний контакт – и адгезия, и электропроводность, верхний проволочный контакт – аналогично face-up.

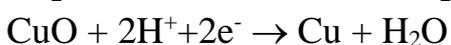
Важно учесть, что загрязнения почти всегда распределены неоднородно. Как следствие, наличие загрязнений на контактной площадке или на посадочном месте приведёт к неоднородному по площади нагреву, появлению латеральных градиентов температуры и в итоге – дополнительных механических напряжений, что всегда вредно для любого прибора.

Эффект очистки:

– удаление загрязнений;

– активация поверхности за счёт разрыва хим. связей в верхнем слое.

И то, и другое ведёт к улучшению адгезии. Пример очистки – удаление окислов с поверхности медных контактных площадок в водородной плазме:



Основной принцип работы установки ионно-плазменной очистки: рабочая камера с помещёнными в неё деталями заполняется рабочим газом, высокочастотный генератор создаёт внутри камеры переменное электрическое поле высокой частоты (обычно от 10^6 до 10^9 Гц), которое ионизирует газ. Газ постоянно поступает в камеру с заданным потоком. Камера постоянно откачивается для поддержания заданного давления (обычно существенно ниже атмосферного). Нужно учитывать, что в данных процессах плазма никогда не бывает полностью ионизированной, т.е. в камере содержится большое количество неионизированных молекул.

Основные рабочие параметры процесса:

- 1) Рабочее давление в камере/поток газа через камеру;
- 2) Мощность генератора/частота;
- 3) Время обработки;
- 4) Тип рабочего газа.

Эти параметры влияют на степень ионизации и интенсивность/длительность взаимодействия ионов с поверхностью. Причём первые три параметра оказывают наибольшее влияние на процесс очистки.

Давление регулируется насосом и потоком рабочего газа. Обычный диапазон давлений для плазменной очистки: от 0,05 мБар до 0,9 мБар. Нужно помнить, что при низких давлениях длина свободного пробега ионов в плазме и, как следствие, их энергия выше. В этом случае основной эффект достигается за счёт физического (механического) взаимодействия (разрушения и десорбции) молекул загрязнения с ионами плазмы. Такая плазма носит название физической. Для неё характерны давления от 0,05 мБар до 0,3 мБар (границы несколько условны). В диапазоне давлений от 0,3 мБар до 0,9 мБар длина свободного пробега ионов и их энергия в плазме ниже. В этом случае в основном эффект очистки достигается за счёт химического взаимодействия свободных зарядов с загрязнителями с образованием

и последующим удалением летучих продуктов реакций. Такая плазма называется химической.

Физическая плазма – более интенсивное, но более жёсткое и низкоселективное воздействие. Химическая плазма – более мягкое более избирательное воздействие.

Для справки, длина свободного пробега в плазме:

$$l_p \approx \frac{(kT_p)^2}{4\pi e^4 N Z_i^n L_p}$$

где индекс p может обозначать либо электронную (e), либо ионную (i) компоненту, а параметр n принимает значения $n = 1$ для электронов ($p=e$) и $n = 3$ для ионов ($p=i$). N – концентрация электронов, Z_i – заряд ионов, концентрация ионов при этом $N_i = N/Z_i$. L_p – кулоновский логарифм (безразмерный параметр плазмы, показывающий, во сколько раз полное сечение рассеяния больше сечения ближнего взаимодействия).

Частота работы генератора обычно зафиксирована и для заданного генератора не регулируется. Чаще всего такие генераторы настроены на стандартизованную частоту 13,56 МГц. Мощность регулируется вручную в широких пределах.

Тип рабочего газа:

- | | |
|----------------------------------|-----------|
| 1) Сухой чистый воздух или N_2 | 5) O_2 |
| 2) Ar | 6) CF_4 |
| 3) H_2 или Ar/ H_2 | 7) SF_6 |
| 4) CO_2 | |

Кислород (O_2) – мощный окислитель, используется при плазменной очистке для химического воздействия на загрязнения (химическая плазма). Органические молекулы, которые в нормальном состоянии обладают очень низкой летучестью и остаются в твёрдой фазе даже в вакууме, при взаимодействии с кислородом (кислородной плазмой) трансформируются в небольшие молекулы с высокой летучестью, которые тут же улетают с поверхности и удаляются из камеры за счёт вакуумирования. Но нужно помнить, что некоторые металлы в присутствии кислородной плазмы, наоборот, окисляются, что приводит к негативному эффекту ([9]).

Аргон (Ar) – тяжёлые молекулы ($M_{Ar} \approx 40$). Поэтому аргон в основном используется при ион-плазменной очистке для физического (механического) воздействия на загрязнения. При его использовании нужно обеспечить сравнительно низкое давление в камере (0,05 мБар до 0,3 мБар – физическая плазма) для увеличения длины свободного пробега ионов, а также использовать высокую мощность генератора поля для обеспечения больших энергий (скоростей) ионов.

Водород (H_2) – в силу достаточно высокой химической активности водород хорошо удаляет оксиды с поверхности металлов. Наиболее эффективно – в смеси с аргоном ($< 10\%$ ат. водорода). Но при применении водорода нужно учитывать его горючесть и взрывоопасность. В смеси с кислородом он образует так называемую гремучую смесь, способную к воспламенению и детонации при определённых условиях. Поэтому, во-первых, предъявляются специальные требования к хранению водорода (в помещении – изолированное пространство с отдельной вытяжкой, замкнутым антистатическим контуром и отсутствием электропроводки; либо на улице), во-вторых, нужны меры по утилизации не переработанного водорода из камеры.

Фториды (CF_4 , SF_6) при плазменной очистке в сборочных процессах используются сравнительно редко. При воздействии фторидной плазмы оксидные плёнки на поверхности металлов превращаются в оксифториды, что обеспечивает возможность безфлюсовой пайки.

Время обработки. Интенсивность очистки прямо пропорциональна длительности обработки и мощности генератора. В свою очередь, чем дольше процесс очистки при заданной мощности, тем больше нагреется очищаемая деталь. Об этом нужно помнить, чтобы избежать перегрева!

На рисунке 16 приведена схема установки плазменной очистки, а на рисунке 17 – фотография установки.



Рисунок 16 – Схема установки плазменной очистки

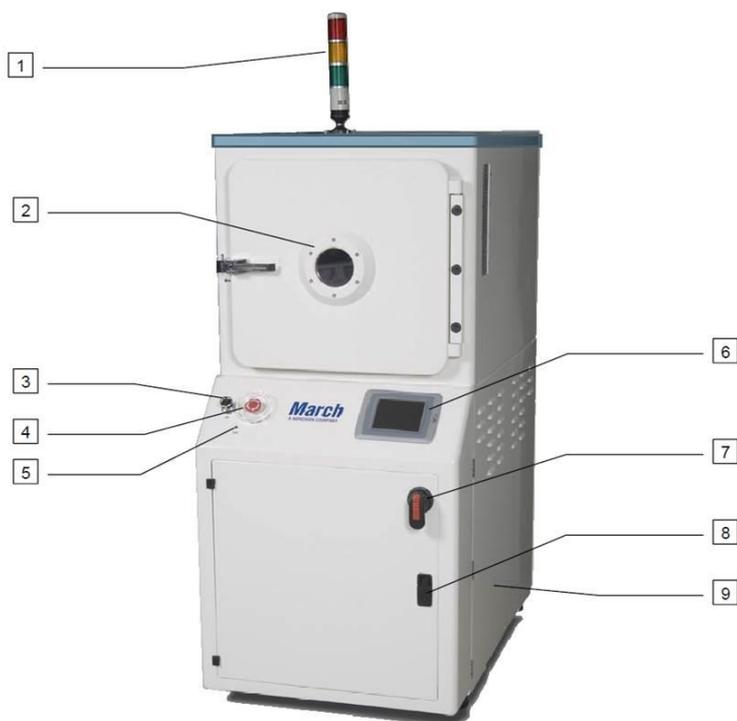


Рисунок 17 – Установка плазменной очистки AP1000. На рисунке обозначены:

- 1 - световая индикация*
- 2 - дверь рабочей камеры*
- 3 - кнопка включения*
- 4 - аварийный выключатель*
- 5 - ESD Jack*
- 6 - экран контроллера*
- 7 – рубильник*
- 8 - доступ к блоку питания*
- 9 - доступ к контроллеру, насосу и генератору*

Как выбрать режим? В первую очередь экспериментально. Какой-то базовый начальный режим чаще всего можно получить от производителя оборудования (при покупке у производителя). При очистке от обычных загрязнений пластиковых или керамических корпусов обычно достаточно использовать аргон или аргон-водородную плазму. Подбор параметров режима – по экспериментальной проверке чистоты поверхности.

Контроль чистоты (после очистки) можно проводить несколькими способами.

Способ 1. По углу смачивания поверхности водой. При загрязнении смачивание будет плохим, угол смачивания возрастает. После очистки смачиваемость поверхности увеличивается (в том числе с учётом активации поверхности в процессе плазменной очистки), угол смачивания уменьшается.

Для этого способа существует специальное контрольное оборудование и разработанные методы (см., например, [10]).

Способ 2. Визуально методом 2017.9 из стандарта [11].

Способ 3 (самый надёжный). Экспериментальная проверка качества адгезии путём реализации и контроля следующей операции (посадка чипа, микросварка контактов и пр.).

При использовании любого способа вам нужно установить процент изделий, подвергаемых контролю.

Что в итоге записываем в маршрут? На входе операции:

- 1) Оборудование: установка плазмохимической очистки
шкаф сухого хранения с азотной средой
- 2) Материалы, комплектующие: рамка с корпусами/основаниями
аргон (или аргон, водород), азот (или воздух)
- 3) Документы: ТИ (ионно-плазменная очистка), КТИ (возможно), руководство по эксплуатации (РЭ), инструкция по охране труда (ИОТ)
- 4) Оснастка: магазин (куда загрузить рамки после очистки)

Кроме изложенного выше материала по ионно-плазменной очистке можно порекомендовать работу О. Симонова [12] и гл.7 из [13].

2. Монтаж чипов в корпус

После очистки наши корпуса готовы к установке в них чипов. В самом общем случае монтаж компонентов на корпус состоит из нанесения материала присоединения и установки компонента. Не зная ни устройства, ни принципа работы оборудования, ни свойств материалов, из самых общих соображений – что может быть важно при установке чипа в корпус?

- хорошая адгезия;
- хорошая теплопроводность;
- хороший электрический контакт (если устанавливаем вертикальный или флип-чип);
- размеры капли материала присоединения;
- точность установки (позиционирования);
- производительность, стоимость операции.

И ещё некоторые моменты будут существенными – мы коснёмся их чуть позже.

2.1 Нанесение материала

Адгезия и контакт определяются материалом присоединения и качеством соединяемых поверхностей. О качестве соединяемых поверхностей мы уже позаботились на этапе ионно-плазменной очистки. Осталось определиться с материалом присоединения.

В принципе существует несколько основных способов присоединения чипа к корпусу (подложке, плате, основанию). Во-первых, это **пайка**. Это всегда

достаточно прочное соединение с отличной электро- и теплопроводностью. Но для постановки чипа этот метод можно использовать с большой осторожностью. Дело в том, что при пайке используются достаточно высокие температуры. И, чтобы избежать повреждений, контактная площадка на чипе должна быть достаточно толстой. В противном случае она может просто раствориться и отслоиться при пайке. Сегодня этот способ при корпусировании чипов используют достаточно редко. Для справки по пайке можно рекомендовать книги [14], [15].

Второй способ – так называемый **бампинг**. Суть его состоит в том, что между контактными площадками чипа и корпуса, покрытыми иммерсионным золотом, помещаются микрошарики (бампы, bumps) припоя. Этот метод плохо подходит для такого массового продукта, как светодиоды, поскольку он не очень быстр. Но он широко используется при монтаже интегральных микросхем.

Основной способ монтажа чипов (по крайней мере, при сборке СД) – использование в качестве материала присоединения - **адгезива** (клея).

(Для справки: адгезив — вещество, способное соединять материалы путём поверхностного сцепления. Адгезивы бывают природными и синтетическими. Скрепляющее действие адгезива основано на создании молекулярных связей между ним и поверхностями соединяемых материалов. После застывания адгезива они склеиваются.)

Тем более, что сегодня существует достаточное количество разных адгезивов с самыми разными характеристиками.

Есть два типа адгезивов:

1. токопроводящий;
2. не токопроводящий.

В первом типе содержатся частицы металла, чаще всего серебра. Пример: EPO-TEC H20S (EPO-TEC Inc, США). Массовая доля серебра в таком адгезиве значительна и составляет более 60%, за счет чего он обладает хорошими теплопроводностью и электропроводностью (теплопроводность 3 Вт/(м·К)). В роли органической связки - эпоксидная смола. Но в случае токопроводящего клея есть строгие требования к форме и размеру капли, поскольку избытком клея можно закортить контактные площадки на корпусе.

С непроводящими клеями проблем с размером капли нет, но и теплопроводность у них хуже. Пример теплопроводящих и электроизолирующих адгезивов:

– OE8001 (силиконовый с высоким коэффициентом отражения оптического излучения, Dow Corning, США);

- DA 8472 (эпоксидно-силиконовый, наполнитель – оксид металла, NAMICS Corp. Япония).

Существуют определенные требования к процессу нанесения по размеру капли адгезива. Адгезив необходимо наносить таким образом, чтобы он максимально равномерно покрывал площадь посадки чипа, но не закрывал

боковые грани чипа при его последующей посадке более чем на треть высоты грани. Невыполнение этого условия с некоторыми типами чипов может стать причиной возникновения каналов утечки тока или загрязнению контактов чипов. При наличии под чипом пустот он будет локально перегреваться, что рано или поздно приведет к росту дефектов структуры. Наличие же воздуха под чипом может повлечь за собой появление пузырей при нанесении люминофорной смеси и даже привести к поломке чипа на последующих операциях. В среднем толщина наносимого адгезива, в зависимости от особенностей процесса, должна составлять 15–70 мкм. При этом большая толщина будет негативно сказываться на термической устойчивости и адгезии. Размер и вид капли адгезива, точность позиционирования определяются техническими возможностями оборудования и выбором оснастки.

Один из основных технологических вопросов при реализации этого процесса на производстве – выбор принципа нанесения. При этом для серийного производства одними из существенных критериев являются точность и воспроизводимость, с одной стороны, и производительность - с другой.

Различают:

- 1) штемпелевание;
- 2) дозирование;
- 3) трафаретная печать.

На выбор влияют материал присоединения, размер компонента и размер групповой заготовки.

1) Штемпелевание

Для компонентов размером до 500x500 мкм, а также при использовании материалов присоединения с размерами частиц наполнителя более 20 мкм, наилучшая воспроизводимость процесса обеспечивается при выборе метода переноса материала присоединения штемпелеванием.

Достоинства метода – высокая точность и повторяемость размера капли. Недостаток – меньшая производительность (относительно дозирования и трафаретной печати).

При нанесении материала присоединения методом штемпелевания инструментом захвата материала (штемпелем) из открытой ёмкости (чаши с ракелем) захватывается капля материала (проще говоря, штемпель *обмакивается* в адгезив) и переносится на место установки компонента.

Контролируемые параметры процесса, влияющие на размер капли:

- высоты инструмента захвата над чашкой с адгезивом и над деталью;
- скорость вращения чаши с материалом присоединения (обеспечивает постоянство уровня адгезива в чаше);
- давление инструмента захвата при постановке капли на деталь;
- скорость вертикального движения инструмента захвата, время задержки инструмента захвата;

- глубина погружения инструмента захвата в чашу;
- диаметр штампа;
- толщина слоя клея в чаше.

2) Дозирование

При нанесении материала присоединения методом дозирования, материал загружается в диспенсер и наносится диспенсером непосредственно на необходимое место.

Достоинства метода - бóльшая производительность (относительно штемпелевания) поскольку, в отличие от штампа, не требуются дополнительные перемещения дозатора.

Недостаток - меньшая воспроизводимость (повторяемость) размера капли.

Дело в том, что из диспенсера (шприца) капли выдавливаются сжатым воздухом. При длительной работе (несколько часов) под воздействием сжатого воздуха в материале присоединения происходит увеличение вязкости адгезива из-за более быстрого ухода жидкой фазы (если материал присоединения не однокомпонентный, а с наполнителем). Возможно расслоение материала. Это приводит к засорению насадок, неравномерной подаче материала, нестабильным размерам капли или периодически к ее отсутствию.

Этот метод следует использовать для компонентов размером более 1500x1500 мкм, стабильный результат даёт также и дозирование материалов присоединения без наполнителя при использовании его для компонентов размером от 500x500 мкм. В течение процесса необходимо проводить контроль давления и времени подачи, отслеживать расход дозируемого материала. Важным аспектом стабильности процесса является оптимальный выбор диаметра и материала иглы диспенсера. Применение системы взвешивания дозы обеспечивает автоматический контроль её объема и помогает избегать снижения качества из-за изменений в составе материала. Автоматическая система очистки иглы позволяет увеличивать время безостановочной работы дозатора и его производительность.

Контролируемые параметры процесса, влияющие на размер капли:

- давление сжатого воздуха;
- время подачи сжатого воздуха.

Важным аспектом стабильности процесса является оптимальный выбор диаметра и материала иглы диспенсера. При выборе данного метода следует учитывать большой расход одноразовых частей оборудования.

3) Трафаретная печать

Наиболее производительный, но наименее точный метод - это метод трафаретной печати, при котором используются специальные принтеры. Типичная точность принтеров трафаретной печати не превышает ± 30 мкм. Метод трафаретной печати рационально применять для крупногабаритных групповых заготовок. Одним из преимуществ этого метода является возможность нанесения материала присоединения под компоненты «флип-чип»-конструкции.

Недостатком является отсутствие возможности совмещения в рамках одной установки операций нанесения материала и установки компонента.

DAF технология¹

Отдельно следует упомянуть монтаж чипов с помощью DAF-плёнок (Die Attach Film). DAF-плёнка представляет собой многослойную полимерную пленку (см. рисунок 18), состоящую из:

- разделительной пленки или защитного слоя (release film) для предотвращения преждевременного прилипания липкой поверхности;
- DAF-слоя (die attach film) – клеевого слоя, используемого для соединения полупроводниковых чипов с печатными платами или чипов с чипами в процессе корпусирования микросхем;
- клеевого слоя (adhesive layer) для сцепления базового слоя с DAF-слоем;
- базового слоя пленки или плёнка-носитель (base film) для удержания полупроводниковой пластины с помощью кольцевой рамки во время процесса разделения пластины на чипы, а также для транспортировки её на следующий этап производства.

[DAF : Die Attach Film]

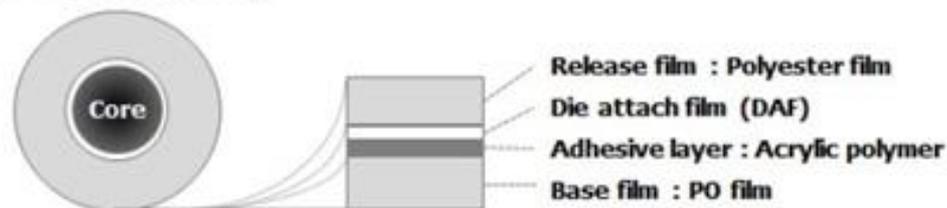


Рисунок 18 – Структура DAF-пленки.

Как правило, DAF-плёнку приклеивают к обратной стороне подложки с изготовленными на ней чипами до разделения на отдельные чипы. Так что после разделения на чипы постановщик захватывает для установки в корпус или на плату отдельный чип с уже готовым клеевым слоем – фрагментом DAF-слоя. Схематично процесс разделения подложки и захвата одиночного чипа для последующего монтажа с использованием DAF приведён на рисунке 19.

На схеме на рисунке 19 на первом шаге изображена стандартная операция утонения (шлифования) полупроводниковой пластины с обратной (неактивной) стороны с целью уменьшения толщины чипа и, как следствие, финальной толщины готовой микросхемы. Далее (второй шаг на схеме) на обратную (сошлифованную) сторону наносится плёнка DAF с предварительно снятой разделительной плёнкой. Следующий шаг (Dicing) — процесс разделения пластины на чипы. Во время резки помимо кристалла также разрезается DAF-слой (базовый слой остаётся целым). В качестве материала клеевого слоя (adhesive layer) в составе DAF-плёнки обычно используют адгезивы, клеевые свойства которых ослабляются под действием

¹ Материалы данного раздела предоставлены компанией АО «ДжиЭс - Нанотех», г. Гусев.

ультрафиолета. Поэтому после разделения пластины пленка облучается ультрафиолетовым излучением, тем самым снижается её адгезия для корректного поднятия кристалла с пленочного носителя. В результате на этапе захвата чипа (четвёртый шаг на схеме) чип с фрагментом DAF-слоя легко отделяется от плёнки-носителя (base film)

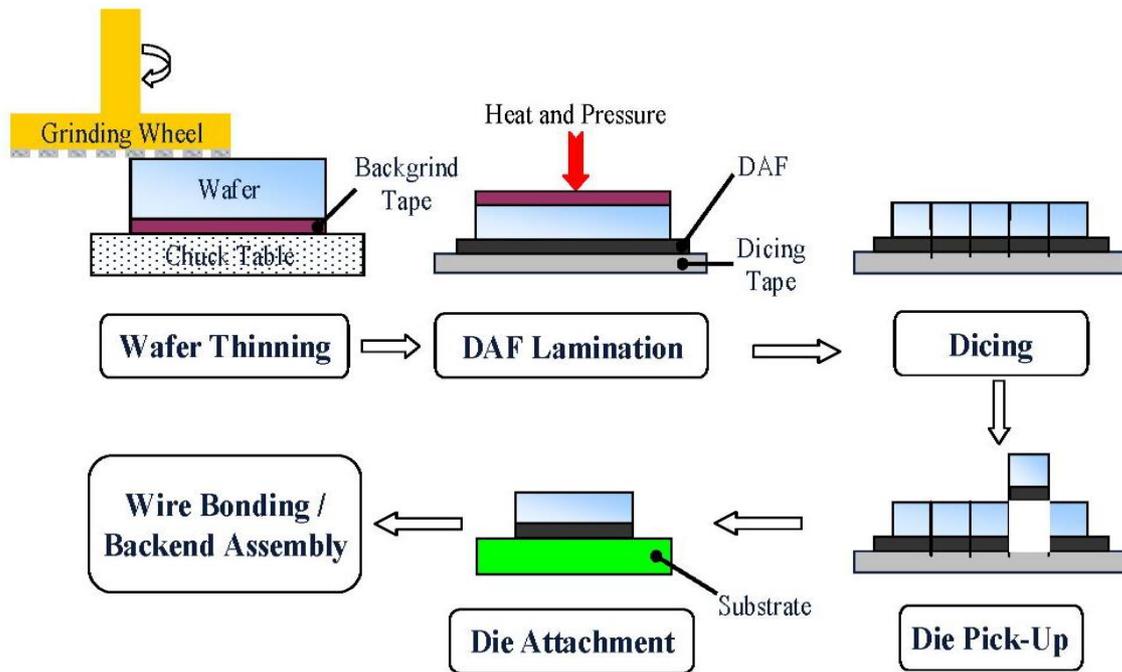


Рисунок 19 – Схема разделения полупроводниковой пластины (wafer) на чипы и монтажа чипа в корпус (на подложку/substrate) с использованием DAF².

Основное отличие использования DAF от пайки и посадки на клей состоит в том, что исключена операция нанесения материала присоединения на каждое посадочное место на подложке (корпусе). Это заметно сокращает длительность технологического процесса. Но главное преимущество технологии DAF состоит в том, что в процессе в принципе не используется жидкий адгезив. Как следствие, клеевой слой равномерен по высоте по всей площади чипа, исключено затекание избытка адгезива на чип и, наоборот, частичное отсутствие адгезива под чипом, обеспечено отсутствие пустот в адгезиве под чипом, практически исключены загрязнения клеем контактных площадок. Эти преимущества чрезвычайно важны при работе с чипами малой площади (линейные размеры – от 300 мкм и менее), малой толщины (менее 10 мкм), а также в случае установки чипов друг на друга (*stacked die*). Пример установки чипов друг на друга с использованием DAF приведён на рисунке 20.

² Рисунок взят из статьи Teng Cheung A. Dicing die attach films for high volume stacked die application. 56th Electronic Components and Technology Conference 2006, p.5. DOI: 10.1109/ectc.2006.1645824

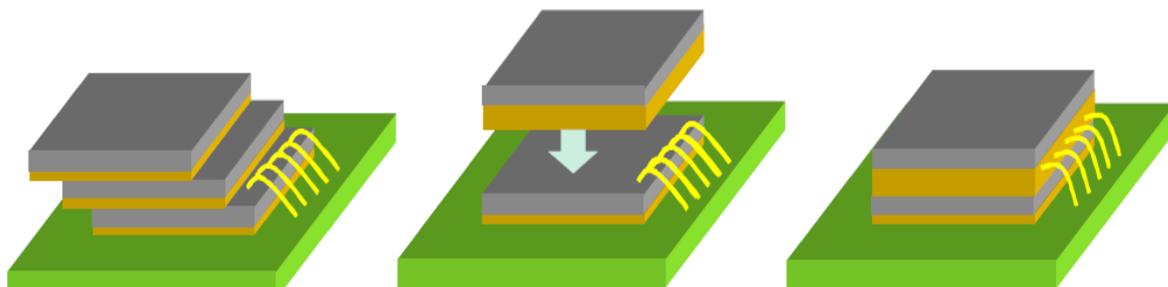


Рисунок 20 – Монтаж чипов вертикально друг на друга (stack) с использованием технологии DAF. Пленка DAF на рисунке обозначена тёмно-жёлтым цветом. Слева – монтаж со смещением. В центре и справа – монтаж без смещения за счёт использования более толстого адгезионного слоя DAF.

Тем не менее, у технологии DAF есть и свои недостатки. Во-первых, требуется отработка нанесения плёнки DAF на подложку. При несоблюдении технологии (некорректно подобраны параметры, несоблюдение условий хранения материала и т.п.) между плёнкой и пластиной могут образовываться пустоты (пузырьки воздуха) (рисунок 21). Следующая проблема связана с усложнением операции разделения пластины на чипы из-за многослойности пленки: die attach film, adhesive layer и base film, а именно, после резки на краях кристалла могут оставаться заусенцы от DAF-слоя. Решение проблемы требует нестандартного набора значений параметров операции резки. Также потребуется подбор параметров на этапе монтажа кристаллов на подложку.

В зависимости от решаемой задачи используют плёнки DAF проводящие или непроводящие. Как и у любого адгезива, у DAF должна быть достаточно хорошая теплопроводность. Современные образцы DAF имеют теплопроводность в диапазоне от 1.0 до 8.0 Вт/м·К. Толщина плёнок DAF может лежать в интервале от 15 мкм до 50 мкм.

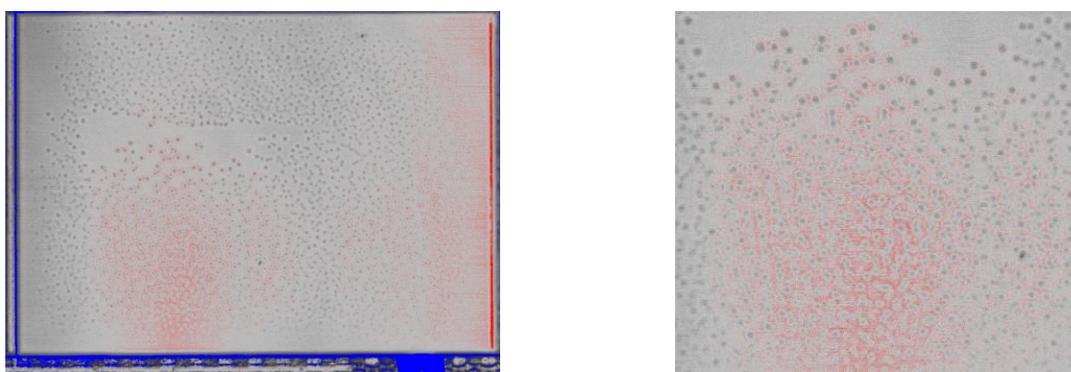


Рисунок 21 – пустоты между DAF-слоем и кристаллом на акустическом микроскопе.

2.2 Постановка чипа

Современное автоматизированное оборудование для монтажа компонентов оснащено основной осью (или *головой*) для установки компонентов и одной или двумя вспомогательными осями с оборудованием для нанесения материалов присоединения: диспенсера и/или штемпеля или двух узлов для штемпелевания. На вспомогательной оси/осях установки происходит дозирование материала присоединения на групповые заготовки в места установки компонентов. После завершения операции групповая заготовка при помощи транспортной системы доставляется к основной оси установки, после чего установочная головка осуществляет доставку и установку (с программируемым усилием) компонента на место присоединения на групповой заготовке. Процесс ведётся одновременно на основной и вспомогательной осях установки.

Постановка чипа в корпус происходит следующим образом. Чип захватывается инструментом захвата с помощью вакуумной системы. Для снижения вероятности внесения дефектов на материал чипов возможно использование насадок из пластичных материалов (силикона, резины). Инструменты захвата и насадки подбираются по каталогам производителей инструментов в соответствии с размерами чипов. В момент захвата инструментом чипа с липкого носителя производится подкол чипа снизу через липкий носитель с помощью иглы (системы подкола).

Стабильность процесса гарантируется контролируемыми параметрами:

- скоростью движения иглы подкола;
- временем задержки на отлипание компонента;
- скоростью движения установочной головки;
- уровнем вакуума на установочной головке.

Процесс требует прецизионной (высокоточной) оснастки.

Точность оборудования для монтажа компонентов в среднем составляет $\pm(30-40)$ мкм. Для отдельных применений указанная точность недостаточна. В этом случае оборудование может быть дооснащено дополнительными опциями. Так, использование машинного зрения, при помощи которого производится распознавание реперных знаков на групповых заготовках и автоматически рассчитывается отклонение координаты и угол разворота базового модуля на каждой групповой заготовке, калибровка при помощи машинного зрения после захвата компонента, контроль качества, выполняемый сразу по завершении операции установки, позволяют обеспечить точность монтажа компонентов ± 10 мкм.

Важно помнить о ещё нескольких особенностях при операции постановки чипов:

– нужно контролировать правильную ориентацию полярности чипов относительно корпуса;

- при длительной работе оснастка (например, штемпель) может нагреваться и расширяться, что приводит к ошибке позиционирования;
 - температура работы чипа от 80°C до 110°C. Это нужно учитывать при выборе адгезива (пределных рабочих температур адгезива).
- На рисунке 22 приведены фотографии установки монтажа чипа в корпус AD830.

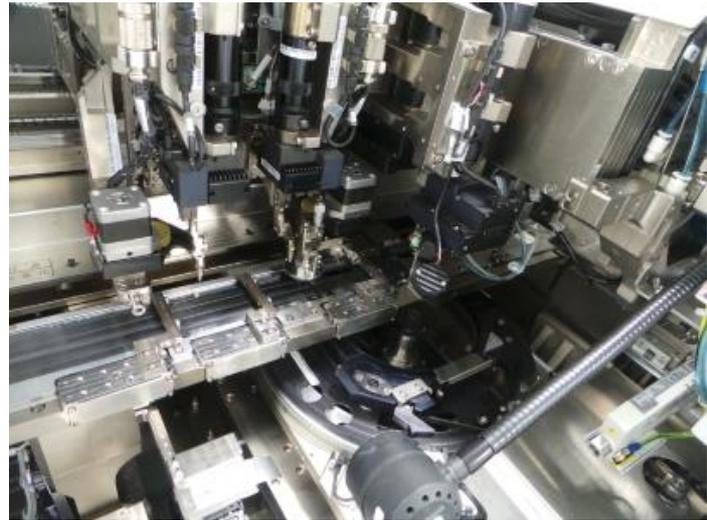


Рисунок 22 – Фотографии установки AD830 монтажа чипов в корпус

Итак, мы установили чип в корпус. Как проконтролировать качество установки чипа в корпус? Есть два способа:

Способ 1. Визуально.

Первым этапом визуального контроля может быть аппаратный контроль (машинное зрение) при захвате чипа, как мы уже обсуждали выше. В этот момент контролируется и корректируется угол ориентации чипа относительно рамки.

Второй этап визуального контроля – также аппаратный (машинное зрение) после установки чипа. Здесь контролируется точность позиционирования и ориентации чипа в корпусе.

Третий этап визуального контроля – выборочный контроль оператором/технологом. Контроль проводится по методу 2017.9 стандарта [11].

Визуально также нужно контролировать наличие материала присоединения, выступающего за границы чипа. Так мы контролируем площадь контакта и, как следствие, качество теплоотвода. Для разных чипов и разных конечных приборов здесь могут быть разные требования. Например, по стандарту [11], адгезив должен выступать за края чипа не менее, чем с трёх сторон чипа.

Способ 2. С помощью тестового усилия на сдвиг. Этим способом мы проверяем качество адгезии (приклейки). Здесь используется специальное тестовое оборудование. Например, установка Dage 4000. Суть метода в том, что в выбранной полусборке (корпус с чипом) мы пытаемся сдвинуть чип относительно корпуса нарастающим усилием. Усилие, при котором чип оторвётся, должно быть не меньше заранее заданного тестового (контрольного) усилия. Тестовое усилие, естественно, зависит от площади чипа (площади приклейки).

Что в итоге записываем в маршрут в операции постановки чипов? На входе операции:

- 1) Оборудование: установка постановки чипов
шкаф сухого хранения с азотной средой
стол монтажный
микроскоп
- 2) Материалы: адгезив
- 3) Комплектующие: рамка с корпусами/основаниями
растяжка (пяльцы) с чипами
- 4) Документы: ТИ (установка чипов на AD830)
КТИ (установка чипов на AD830)
КТИ (технологический контроль)
ТИ (приготовление клея)
РЭ
ИОТ
- 5) Оснастка³: магазин (*откуда/куда загружаются/выгружаются рамки - при наличии входных/выходных буферов (доп опция оборудования); или специальная прецизионная оснастка для подачи рамок по транспортной системе установки*)
штемпельная чашка/инструмент нанесения – штемпель (или дозатор)
игла подкола
инструмент захвата
пяльцы
тара для брака
прижим

³ Вообще, оснастка указывается явно в ВО, а не в МК. Здесь этот пункт приводим по причине большого количества оснастки в этой ТО для лучшего понимания процесса.

3. Сушка адгезива

После постановки чипов на адгезив последний нужно высушить. Для этого используются специальные печи (сушильные шкафы) с азотной средой. Обычно температура сушки не превышает 150°C - 160°C. Собственно, второй способ контроля качества постановки (усилие на сдвиг) проводится после сушки.



Рисунок 23 – Печь для сушки адгезива

Запись в маршрут:

- 1) Оборудование: шкаф сушильный (или печь для сушки)
микроскоп
- 2) Материалы: азот
- 3) Комплектующие: рамка с полусборками (чип на корпусе, адгезив)
- 4) Документы: ТИ (сушка адгезива)
КТИ (сушка адгезива)
ТИ (контроль)
ИОТ
РЭ

С целью предотвращения окисления контактных площадок под сварку (или пайку) сушку проводят в защитной атмосфере. Достижение полной степени полимеризации технолог определяет визуально при помощи микроскопа и дополняет испытаниями с использованием тестирующего оборудования.

4. Микросварка. Проволочные контакты.

Итак, у нас имеется полусборка – чип, установленный в корпус. Следующая операция – изготовление проволочных контактов. Напомним, что в рассматриваемом примере сборочного процесса мы устанавливаем в корпус чип типа face-up (см. рисунок 15 «Схематичные изображения светодиодных чипов трёх типов» в разделе «Ионно-плазменная очистка»). Если бы мы устанавливали флип-чип, то никакие проволочные контакты не потребовались бы. Но при установке флип-чипа на корпус мы должны были бы обеспечить отдельный монтаж омических контактов n и p типа на соответствующие контактные площадки корпуса. В случае вертикального чипа один контакт (n) обеспечивается уже при постановке в корпус, и далее нужен один проволочный контакт. В нашем случае оба омических контакта на чипе сверху, и нужны два проволочных контакта для соединения с выводами корпуса.

Перед изготовлением проволочных контактов необходимо повторить процедуру ионно-плазменной очистки для удаления окислов/загрязнений с поверхности контактных площадок корпуса и контактов чипа, так как эти площадки неизбежно контактировали с кислородом воздуха как минимум в процессе установки чипа в корпус (см. п.1 Ионно-плазменная очистка). А также в процессе нанесения и сушки адгезива на места сварки могли попасть продукты испарений материала присоединения и посторонние включения при монтаже. Здесь требуется особенно тщательный подбор режима очистки, чтобы не повредить уже установленный чип.

Ввиду малых толщин соединяемых элементов сварка должна выполняться без расплавления соединяемых элементов. При изготовлении проволочных контактов используются комбинации трёх следующих воздействий (здесь и далее для справки по микросварке наиболее полную информацию можно получить из [13]):

- ультразвук (УЗ)
- температура
- давление

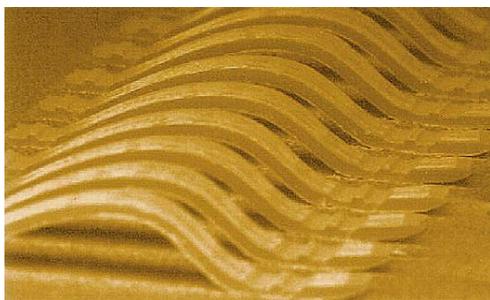
Прочность соединения обеспечивается взаимной диффузией материалов в твердой фазе, что, в свою очередь, требует применения пластичных материалов и обеспечения плотного контакта на достаточно большой площади. Так как необходимую площадь контакта можно получить лишь за счет пластической деформации перемычки, к материалу последней предъявляются требования пластичности.

Одним из первых в микроэлектронике применялся метод так называемой **термокомпресии**, т.е. формирование контакта между проволокой и контактной площадкой под действием достаточно высокой температуры (300°C - 400°C) и давления. В результате получалось металлическое соединение, аналогичное сварному. В этом методе есть существенные недостатки: во-первых, высокая

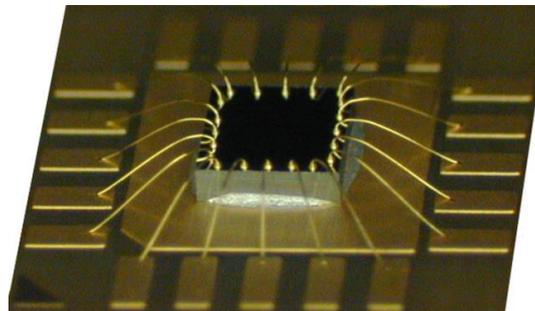
температура, которая оказывается критичной для некоторых полупроводниковых приборов (напомним, операция проводится на уже установленном чипе), во-вторых, высокое давление, что также ограничивает применимость некоторых корпусов и чипов, и, наконец, большое время сварки по сравнению с другими методами. Сегодня этот метод практически не используется.

Ультразвуковая сварка клин-клин – метод получил распространение в микроэлектронике с 60-х годов 20 века. В этом методе для формирования контакта используется энергия ультразвука при комнатной температуре. В основном этот метод использовался для сварки алюминиевой проволоки с алюминиевыми или золотыми контактными площадками. В действительности в этом методе используется ещё и давление (проволока прижимается инструментом к контактной площадке), но величины давления заметно меньше, чем в методе термокомпрессионной сварки. Микросварка клин-клин осуществляется посредством специального инструмента – клина (*не путать: в данном случае совпадают название сварного соединения «клин» и инструмента для его формирования*). Проволока по микроскопическому каналу, выполненному на острие клина, подается под инструмент. Специальная канавка на наконечнике клина позволяет сформировать устойчивое соединение. Микросварка типа клин-клин отличается расширенными возможностями по формированию плотно расположенных петель и по сварке на узких или близко расположенных контактных площадках. Пример сварного соединения «клин-клин» приведён на рисунке 24.

Однако при сварке клином движение инструмента возможно только в одном направлении – ведь в случае смещения образца в сторону от линии петли проволока уведётся из-под клина, делая тем самым выполнения второго соединения невозможным. По этой причине такой метод сварки неприменим при формировании множества близко расположенных *разнонаправленных* контактов (см. рисунок 25).



*Рисунок 24 – Пример
контакта «клин-клин»*



*Рисунок 25 – Пример
разнонаправленных контактов*

Сегодня часто используется метод **термозвуковой сварки** (thermosonic bonding) типа **шарик - клин**, в котором основными факторами, формирующими

контакт, являются УЗ-энергия и температура. Давление также присутствует, но оно мало по сравнению с методом термокомпрессии.

Принцип формирования микросварки шарик-клин заключается в том, что перед выполнением первого соединения на концевом участке проволоки формируется шарик, который затем приваривается к контактной площадке, образуя прочную связь, позволяющую формировать высокие длинные петли сложного профиля. Инструмент шариковой микросварки – капилляр – принципиально отличается от клина. Он имеет конусообразный наконечник и сквозной канал для проволоки, совпадающий с вертикальной осью. Кроме того, капилляры обычно выполнены из керамики, в отличие от металлокарбидных инструментов для клиновой сварки.

Шариковая микросварка позволяет формировать второе соединение в любом направлении относительно первого, обладает более высокими характеристиками при испытании на отрыв. В качестве основного недостатка этого метода можно указать относительно большие размеры соединения (шарика), что не позволяет использовать данную технологию в случае высокой плотности размещения контактов.

Как реализован процесс формирования контакта? Рассмотрим это на примере изготовления контакта «шарик-клин» (см. рисунки 26.1 – 26.6). Смысл терминов «шарик» и «клин» сейчас будет ясен.

В нашем примере мы изготовим соединение из золотой проволоки к алюминиевым контактными площадкам. Основной инструмент – капилляр с отверстием внутри, через которое подается проволока. На установке сварки есть зажим, который фиксирует проволоку или, наоборот, позволяет ей свободно двигаться.

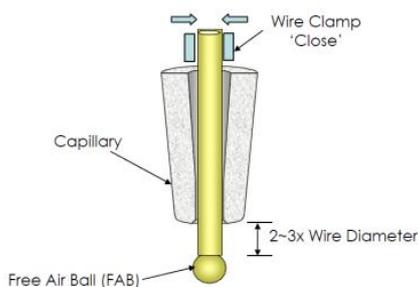


Рисунок 26.1 – Схема капилляра, проволоки и зажима.

1-й шаг. Формирование шарика.

Проволока из капилляра подается на определённую длину (см. рисунок 26.1). Затем методом электрического разряда с помощью искровика (E-torch) формируется (оплавляется) шарик (FAB) на конце проволоочного вывода (рис.26.2).

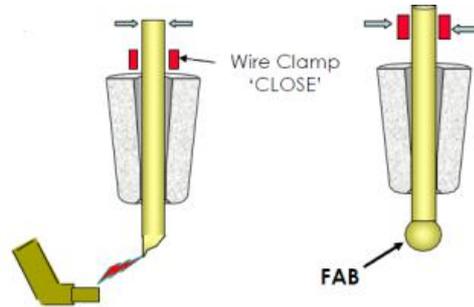


Рисунок 26.2 – Схема формирования шарика

2-й шаг. Формирование первого сварного соединения типа «шарик».

Капилляр подходит к первой заданной контактной площадке (КП), останавливается на определенной высоте, затем опускается до касания шариком КП с определенным давлением (рисунок 26.3). Включается УЗ-преобразователь и нагрев. Нагревается обычно столик под деталью (в нашем случае - под полусборкой), причём, как правило, нагрев включается за некоторое время (несколько минут) до сварки. Процесс ультразвуковой микросварки основан на введении преобразованных ультразвуковых колебаний в зону соединения без значительной пластической деформации свариваемых деталей.

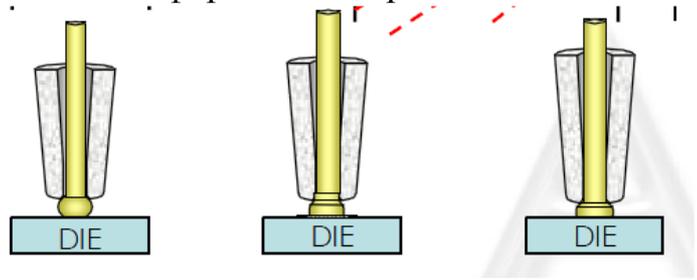


Рисунок 26.3 – Схема формирования шарика

3-й шаг. Формирование петли.

Капилляр поднимается на заданную высоту и перемещается ко второй контактной площадке. Траектория движения капилляра задаёт форму петли (рисунок 26.4).

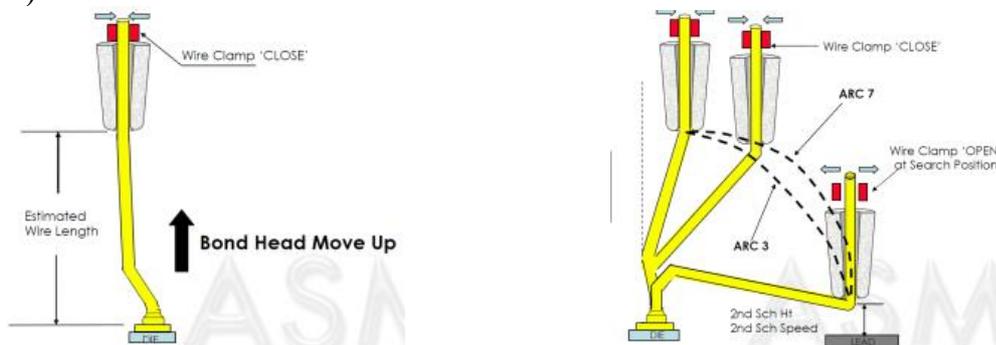


Рисунок 26.4 – Схема формирования петли

4-й шаг. Формирование второго сварного соединения типа «клин».

На этом этапе капилляр снова опускается, прижимает проволоку, и включается УЗ-преобразователь. Нагрев продолжает быть включённым всё время

сварки. В результате на второй контактной площадке формируется сварное соединение типа «клин» (рисунок 26.5).

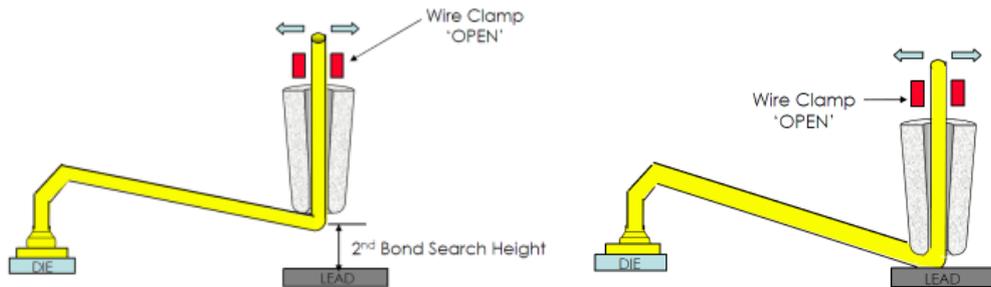


Рисунок 26.5 – Схема формирования 2-го сварного соединения «клин»

5-й шаг. Обрыв проволочного вывода

Сложным движением с заданными параметрами капилляр обрывает (срезает) проволоку в месте второго контакта (клина) – соединение «шарик-клин» готово.

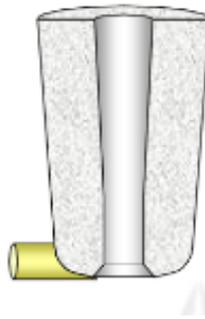


Рисунок 26.6 – Обрыв (срез) проволоки

На рисунках 27-30 приведены изображения проволочных контактов и сварных соединений.

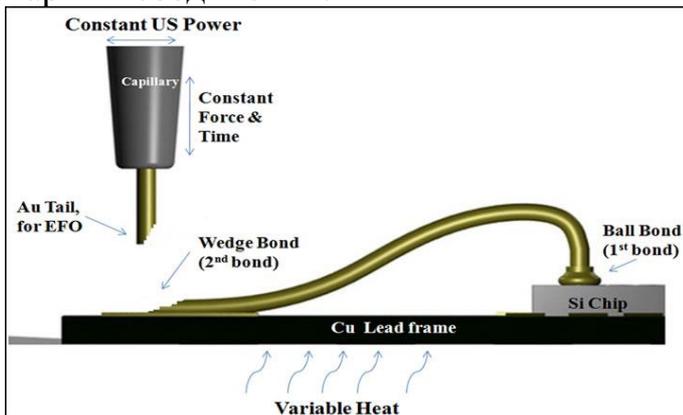


Рисунок 27 – Схематичное изображение проволочного контакта шарик-клин

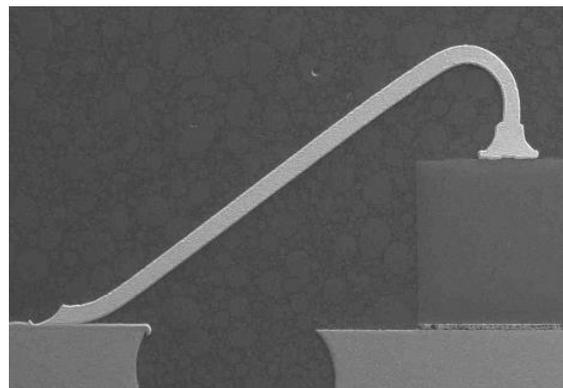


Рисунок 28 – Фото проволочного контакта шарик-клин (СЭМ)

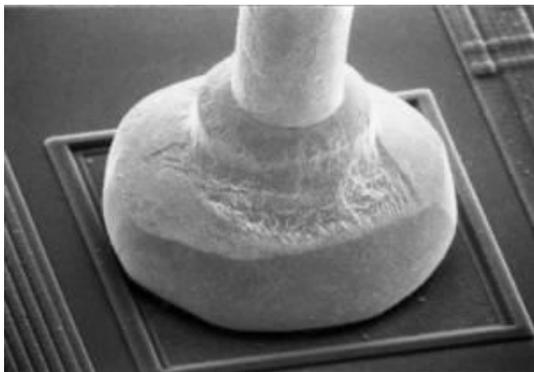


Рисунок 29 – Фото сварного соединения шарик (СЭМ)

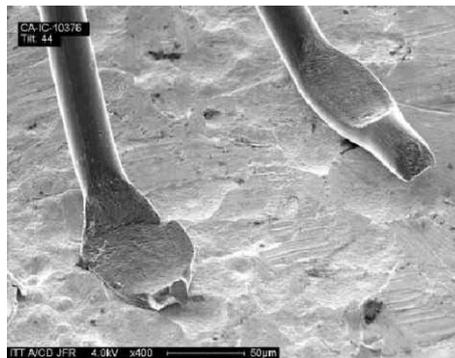


Рисунок 30 – Фото сварного соединения клин (СЭМ)

Как правило, причиной отказа и повышенной дефектности микросхем является отрыв соединения «клин» от контактной площадки, поскольку в процессе формирования такого соединения участвует меньше половины площади торца сварочного инструмента (капилляра) (см. рисунок 31, вид сверху).

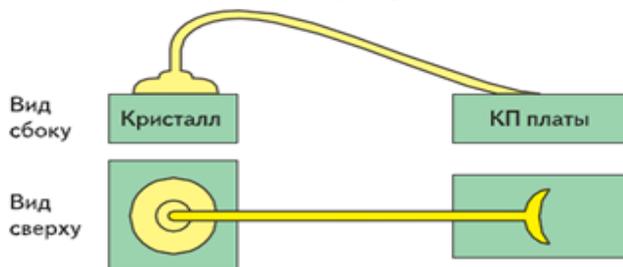


Рисунок 31 – Профиль проволочного контакта, выполненного по технологии термозвуковой сварки «шарик-клин»

Поэтому иногда для повышения надежности сварных соединений второе сварное соединение дополнительно укрепляется шариком (схема сварки BBOS – Bond Ball On Stitch, сварное соединение «шарик-на-клин»), или же клин разваривается на предварительно поставленный шарик (схема сварки BSOB – Bond Stitch On Ball, сварное соединение «клин-на-шарике»). Схема и фото таких контактов приведены на рисунках 32.1, 32.2, 32.3.

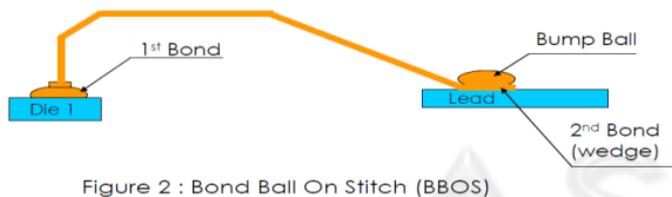


Рисунок 32.1 – Схема проволочного контакта «шарик-клин-шарик»

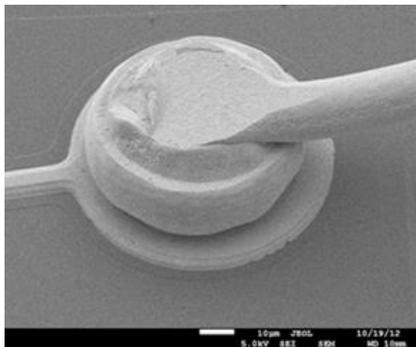


Рисунок 32.2 – Фото сварного соединения клин на шарике

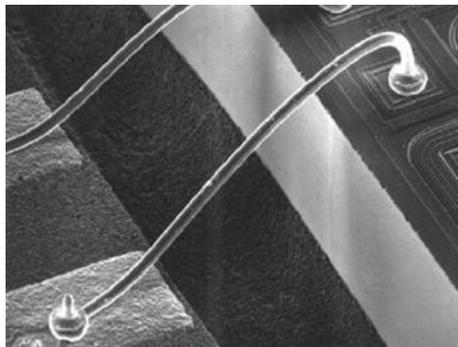


Рисунок 32.3 – Фото проволочного контакта шарик – клин – шарик. На фото дополнительный шарик – на левом конце проволоки.

При формировании контактов взаимодействие двух металлов (в нашем примере – золото и алюминий) под действием УЗ, температуры и давления приводит к образованию интерметаллических слоёв или интерметаллидов.

Примерное распределение атомов металлов в таком контакте изображено на рисунке 33 слева.

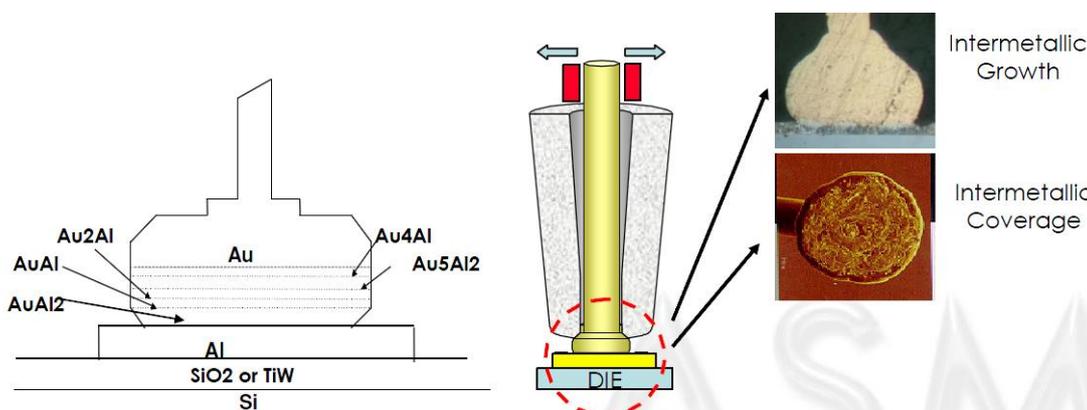


Рисунок 33 – Схематичная структура распределения атомов в контакте

Заметим, что интерметаллиды не являются отдельным новым веществом, в них не образуются валентные связи. Вы не можете получить, например, расплав такого вещества. Не существует таких молекул Au_2Al . Это, по сути, диффузное проникновение молекул одного металла в другой. Но в них образуются металлические связи между атомами, что обеспечивает достаточно прочный контакт. Подробнее об интерметаллидах можно посмотреть, например, в работе [16].

Какие материалы могут использоваться при формировании проволочных контактов? Самые распространённые материалы контактных площадок или покрытий на корпусах – золото, медь, алюминий, серебро. На чипе чаще всего двухслойный контакт: верхний (наружный) слой – золото, нижний (прилегающий к полупроводнику) слой – никель, титан и др. (зависит от типа полупроводника). Проволока может быть золотая, алюминиевая, медная, реже серебряная.

На что нужно обращать внимание при микросварке?

В первую очередь, на форму и размер капилляра. Они существенно влияют на форму и размер шарика и клина, и, как следствие, на прочность контакта.

На рисунке 34 указаны основные размеры наконечника капилляра. Очевидно, что диаметр (В), форма (IC) и угол (IC angle) сопла задают форму «шарика», наружный диаметр капилляра (Т) и лицевой угол (Face angle) – форму и размер «клина».

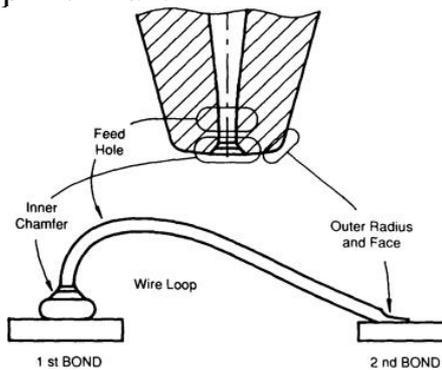


Рисунок 34.1 – Влияние параметров капилляра

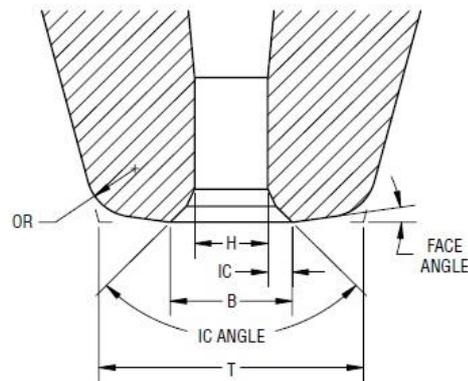


Рисунок 34.2 – Характерные размеры наконечника

Важную роль играет и первоначальный размер шарика (до сварки). Он определяется диаметром и материалом проволоки, задаваемыми параметрами электрического разряда, а также его можно корректировать определенными параметрами в программе, которую составляет оператор установки для каждого типа сварного соединения. (Например, в установке iHawk компании ASM можно задать ток и размер, и установка сама подберёт время. А можно задать ток и время и откалибровать параметры по размеру начального шарика).

Существуют технологические требования к размерам сварных соединений, оговоренных стандартом. Размер шарика и клина выбирается исходя из размера контактной площадки, но в пределах стандартных допусков.

Требования к размеру сварного соединения (d – диаметр проволоки):

Диаметр шарика $D = 2,5d \div 4d$

Ширина клина $W = 1d \div 3d$

Длина клина $L > 5d$

$\frac{1}{2} S$ контакта чипа $< D$ сварн. соед $\leq \frac{3}{4} S$ контакта чипа.

Вообще, при обработке технологии формирования проволоочных контактов в качестве исходной информации необходимо определить:

1. Размер и материал контактных площадок;
2. Между чем соединение: чип-чип или чип-корпус;
3. Расстояние между КП для данного соединения и между соседними соединениями;
4. Режимы и условия работы изделия;
5. Разница по высоте расположения КП.

Отсюда определяются:

1. Диаметр проволоки;
2. Материал проволоки;
3. Тип, форма и размер сварного соединения (в пределах, допускаемых стандартами), на что, кстати, влияет исходный размер шарика;
4. Форма (в том числе количество перегибов) и высота петли.

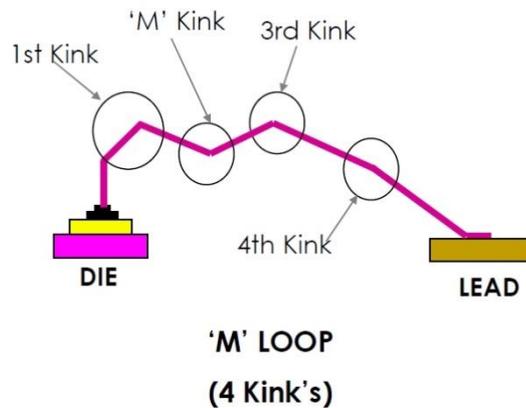
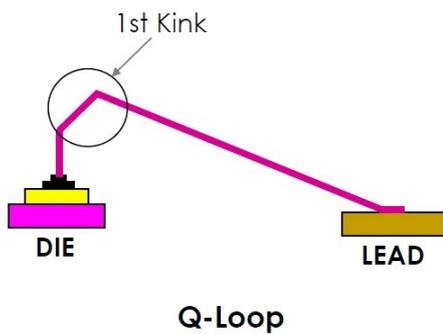


Рисунок 35.1 – Форма петли Q

Рисунок 35.2 – Форма петли M

Важно правильно выбрать форму проволочной петли. Она определяется расстоянием между контактными площадками, разницей высот между контактными площадками, диаметром проволоки. Пример: при работе СД происходит неоднородный нагрев и объемное расширение силиконолюминофорной смеси вокруг чипа, что приводит к возникновению напряжений, вследствие чего может произойти деформация и обрыв проводника. Правильно подобранная форма петли нивелирует воздействие напряжений. На рисунке 35 приведены для примера два возможных типа петли.

После этого при фиксированных геометрии и материале контактов, выбранной проволоке, определённой форме петли необходимо подобрать режим работы установки (значения параметров режима), который позволит реализовать проволочные контакты.

Существенно при формировании проволочных контактов обеспечить точное расположение сварного соединения на КП. Обычно требуемая точность позиционирования при сварке составляет $\pm(2,5\div 3,0)$ мкм. Для обеспечения требуемой точности перед началом процесса сварки необходимо провести автоматическое сканирование заготовки для определения мест формирования сварных соединений.

Основные контролируемые параметры режима:

- УЗ энергия;
- температура;
- сила давления;
- время воздействия.

Дополнительные параметры:

- форма капилляра;
- материал и диаметр проволоки (который, возможно, потребуется изменить при подборе и анализе режимов работы).

Как проконтролировать качество проволочного соединения? Всё по тому же стандарту [11], метод 2017.9. Контроль здесь обычно выполняется в два приёма – сперва визуально, а затем на специальной установке, например, Dage 4000, тестируется усилие на сдвиг контакта и отрыв проволоки (см. рисунок 36).

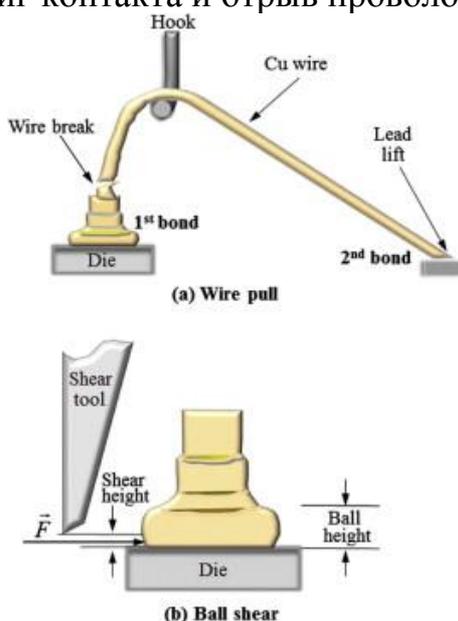


Рисунок 36 – Испытание контакта на прочность

Общий вид установки микросварки контактов iHawk приведён на рисунке 37.



Рисунок 37 – Фото установки сварки проволочных контактов iHawk

Что записываем в маршрут?

- 1) Оборудование: установка сварки контактов
шкаф сухого хранения с азотной средой
стол монтажный
микроскоп
- 2) Материалы: проволока

3) Комплектующие: рамка с полусборками (чип в корпусе)

4) Документы: ТИ (сварка контактов на iHawk)
КТИ (сварка контактов на iHawk)
КТИ (технологический контроль)
ИОТ
РЭ

Какие проблемы возможны при сварке контактов? Приведём несколько примеров. Во-первых, в процессе формирования интерметаллических соединений при взаимной диффузии коэффициенты диффузии разных компонентов (например, Au и Al) могут оказаться различными. Это может приводить к образованию вакансий, которые, в свою очередь, при нагреве чипа во время работы прибора будут стремиться объединяться и образовывать полости.

Второй пример: так называемый *overbonding* – деформация материала под контактом при избыточной силе давления капилляра. Это особенно важно учитывать при формировании контактов непосредственно на чипе.

Часто разработчики технологии, стремясь повысить производительность, стараются сократить время формирования контакта за счёт увеличения силы давления и УЗ энергии. Это также может приводить к различным нежелательным деформациям как материала контактной площадки, так и самого контакта.

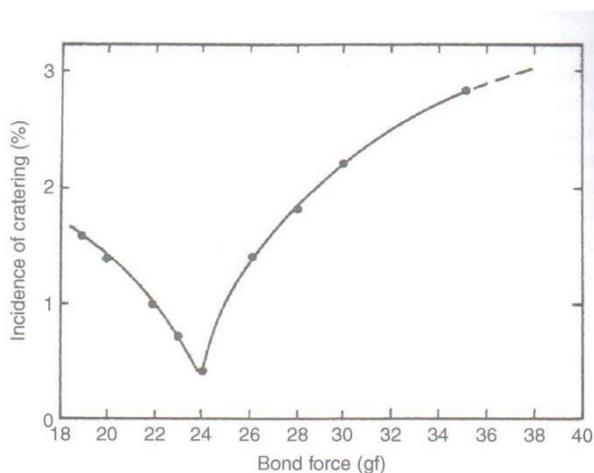


Рисунок 38 – Cratering vs Bonding force

Взято из Kale V.S. «Control of Semiconductor Failure Caused by Cratering Bonding Pads». Proc. Of 1979 International Microelectronics Symp., Los Angeles, Nov. 13-15, 1979, pp.311-318»

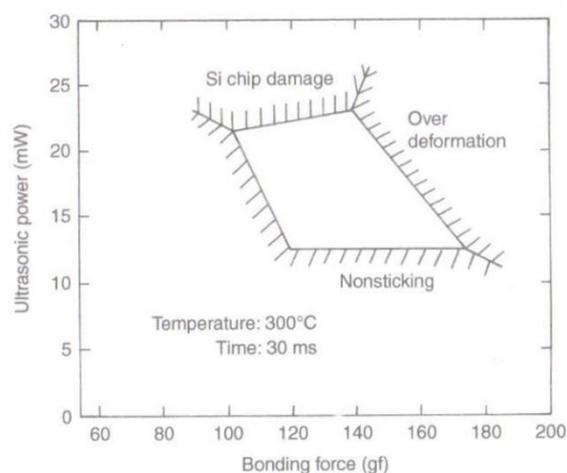


Рисунок 39 – US energy vs Bonding Force

Взято из Mori S., Yoshida H. And Uchiyama N. «The Development of New Copper Ball Bonding Wire». Proc. 38th Electronic Components Conf., Washington DC, May 1-4, 1988, pp. 539-545

При анализе влияния давления (bonding force) на появление дефектов (cratering) в объёме сварного соединения при сварке «клин-клин» была

установлена зависимость, приведённая на рисунке 38. В случае больших значений давления увеличение дефектов объясняется чрезмерными механическими напряжениями в материале. В случае же малых сил эффект связан, вероятно, с недостатком энергии для формирования сплошных интерметаллических слоёв.

На рисунке 39 приведено двумерное распределение параметров на диаграмме «УЗ энергия vs. Давление». Видно, что оптимальные значения этой пары параметров лежат в «окне», ограниченном зонами дефектных соединений.

5. Герметизация

Последняя операция (блок операций) сборки (корпусирования) микроэлектронного прибора – это герметизация. Общее назначение данной операции – изолировать полупроводниковый чип от окружающей среды, обеспечить его защиту (механическую, химическую) от внешних воздействий. В отличие от всех предыдущих рассмотренных нами технологических операций, которые качественно одинаковы для всех микроэлектронных приборов, операция герметизации для светодиодов⁴ принципиально отличается от герметизации остальных приборов. Причина в том, что помимо защитных функций, в светодиоде герметизирующий материал выполняет ещё одну важнейшую для светодиода функцию – преобразователя излучения.

5.1 Герметизация не светодиодных чипов

В случае несветодиодных приборов герметизация чипа, как уже было сказано, проводится для защиты чипа от внешних воздействий. Чип представляет собой открытый полупроводник, даже если на него нанесено защитное пассивирующее покрытие при изготовлении. Любой прямой контакт с окружающей средой в этом случае нежелателен. Для примера рассмотрим кристалл микросхемы (флип-чип), установленный на подложку (корпус) на припойные шарики/бампы (рис. 40). В результате такого монтажа между кристаллом и корпусом, между контактами остаётся пустое пространство. При герметизации необходимо полностью исключить пустоты и открытую поверхность чипа. Для этого конструкцию заливают жидким компаундом (андерфилом). Например, для чипов микросхем значительной площади (линейный размер ~ 5 мм и более) используется жидкий терморезистивный пластик на основе мелко гранулированного диоксида кремния. Важнейшей характеристикой таких компаундов является низкий коэффициент теплового расширения, обеспечивающий минимальные механические напряжения при нагреве-охлаждении. Литьё происходит под давлением, но основной движущей силой, позволяющей заполнить все пустоты, является капиллярный эффект. Для обеспечения капиллярного эффекта предварительно полусборку обрабатывают в

⁴ Здесь речь идёт о белых светодиодах, в которых внешнее излучение формируется за счет смешивания синего излучения и чипа и переизлучения в люминофоре.

плазме, что увеличивает смачиваемость (угол смачивания, см. п.1 «Ионно-плазменная очистка» на стр.28).

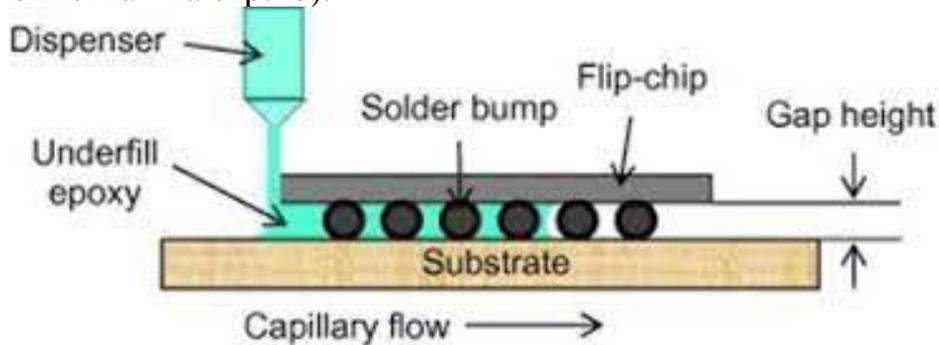


Рисунок 40 – Схема герметизации микросхемы на бампах.

После заполнения качество заливки проверяют визуально, а также акустическими методами на предмет оставшихся пустот. Размер чипов, с которыми работают при данной технологии, от 5x5 мм до 12x14 мм, шаг между бампами 100-200 мкм. Для чипа большого размера с указанным шагом между бампами заполнить полностью всё пространство под чипом – задача весьма непростая.

При этом оставшиеся пустоты могут приводить к следующим проблемам:

- 1) Шарики припоя при работе прибора перегреваются, плавятся, что приводит к замыканию двух контактов;
- 2) При нагреве внутри пустот испаряется материал герметизации, пустоты расширяются и может наблюдаться так называемый попкорн-эффект, когда эти пустоты взрываются. Т.е. компаунд ещё играет роль теплоотвода.

5.2 Заливка светодиодов силикон-люминофорной смесью.

Приготовление, нанесение и сушка люминофорной смеси

Напомним, что здесь мы изготавливаем стандартный белый светодиод, где чип, излучающий в синем диапазоне, покрывается люминофором (заливается силикон-люминофорной смесью), что в результате даёт на выходе из светодиода белый свет. Мы не рассматриваем технологии удалённых люминофоров, люминофорных стёкол, также как технологию RGB светодиодов.

Люминофор представляет собой кристаллический порошок разной природы и цвета. Основные характеристики люминофоров перечислены ниже в таблице (приведены данные для люминофоров марки Intematix).

Ещё одной важнейшей характеристикой люминофора является эффективность (или квантовый выход) люминесценции, определяющая потери в люминофоре при переизлучении. Современные качественные люминофоры обычно имеют значения эффективности не менее 95%.

Вид люминофора	Цвет люминофора	Координаты цветности	Пиковая длина волны излучения, нм	Размер частиц, мкм
Алюмоитриевый гранат (YAG)	Желтый Зеленый	X=0,430 Y=0,530 X=0,400 Y=0,560	545-566 534-544	6-14
Силикат	Оранжевый Желтый Зеленый	X=0,550 Y=0,440 X=0,560 Y=0,442 X=0,220 Y=0,615	586-610 547-575 507-530	15-16
Алюминат (GAL)	Желтый Зеленый	X=0,430 Y=0,540 X=0,350 Y=0,560	550-560 516-545	6-14
Нитрид	Красный	X=0,640 Y=0,360	630-670	12-17

Выбор люминофора для приготовления люминофорной смеси зависит от поставленной задачи. Например, для получения светодиода в холодной области цвета можно использовать желтый люминофор, для нейтрального или тёплого белого цвета – красный и желтый люминофоры одновременно. Введение в смесь красного люминофора повышает цветопередачу. Для увеличения цветопередачи до 98% желтый люминофор можно заменить на зеленый.

Выбор оптически прозрачных силиконовых компаундов для люминофорной смеси определяется физико-химическими характеристиками силиконов до и после полимеризации.

Силикон в силикон-люминофорной смеси выступает в роли носителя и фиксатора люминофора. Силиконы, используемые для приготовления люминофорной смеси, – обычно термоотверждаемые двухкомпонентные системы, состоящие из основы (компонент А) и сшивающего агента (компонент В). Соотношения компонентов может быть различным. Наиболее оптимальный вариант соотношения 1:1. При других соотношениях есть большая вероятность ошибки при приготовлении смеси. Кроме того, тот компонент, который вводится в смесь в меньшем количестве, будет расходоваться быстрее. Потери обоих компонентов при приготовлении смеси одинаковые, а исходный объем разный.

Важную роль играет вязкость силикона. Частицы люминофора, равномерно распределенные в объеме силикона после приготовления люминофорной смеси,

при недостаточной вязкости будут оседать на дно шприца во время заливки, что приведет к непопаданию светодиодов в заданный бин. Вязкость силиконов должна быть не менее 3 Па*с. Силиконы с вязкостью больше 5 Па*с хорошо удерживают частицы люминофора в объеме, однако люминофорная смесь будет слишком медленно распределяться (растекаться) внутри корпуса СД. Поэтому оптимальная вязкость силикона для заливки 3÷5 Па*с.

При недостаточной вязкости силикона в люминофорную смесь добавляют антиседиментационные добавки (например, пирогенный гидрофобный диоксид кремния Аэросил 202). Эти добавки мешают оседать частицам люминофора в силиконе при заливке.

Другие важные характеристики – показатель преломления и твердость силикона. Использование силиконов с высоким показателем преломления увеличивает светоотдачу светодиода относительно использования силикона со стандартным показателем преломления. Однако силиконы с высоким показателем преломления (фенилсиликоны) быстрее деградируют при выдержке при повышенных температурах, чем силиконы со стандартным показателем (диметилсиликоны). Поэтому для больших корпусов СД и особенно матриц (COB – chip-on-board), где имеется существенное увеличение температуры в рабочем состоянии, используются диметилсиликоны.

Основные характеристики полимеризованных силиконов:

Тип силикона	Показатель преломления	Физическое состояние	Твердость	Применение
Диметилсиликон	1,41	Гель Эластомер	- 30-70 по Шору А	Заполнение под линзу вторичной оптика Для мощных СД в корпусах 5050 и матрицах
Фенилсиликон	1,5-1,57	Резина	30-70 по Шору D	Для маломощных СД в корпусах 3528

Силиконы при нагревании/охлаждении могут сильно изменять объем, что может привести к растрескиванию отвержденного материала, отслоению его от корпуса и обрыву проволочных контактов внутри люминофорной смеси. Поэтому малоэластичные силиконы с твердостью по Шору D более 30 могут быть использованы только для корпусов небольших размеров. Кроме того, твердость силикона важна при проведении поверхностного монтажа СД на печатную плату.

Проволочные контакты могут повреждаться инструментом во время монтажа СД на плату, если силикон недостаточно твердый.

Как разрабатываются рецепты люминофорной смеси?

При проектировании светодиода одним из параметров технического задания на разработку является бин – область на диаграмме цветности МКО1931, такая, что источники белого света (в нашем случае светодиоды), координаты цветности которых лежат внутри этой области (этого бина), визуально воспринимаются тождественными. Пример задания бинов белого цвета приведён на рисунке 41. Задача технолога – рассчитать состав люминофорной смеси так, чтобы излучение данного светодиода попадало в заданный бин. После расчетов технолог изготавливает нужную смесь люминофоров, производит заливку светодиода силикон-люминофорной смесью, определяет получившиеся координаты цветности и подтверждает или корректирует расчет.

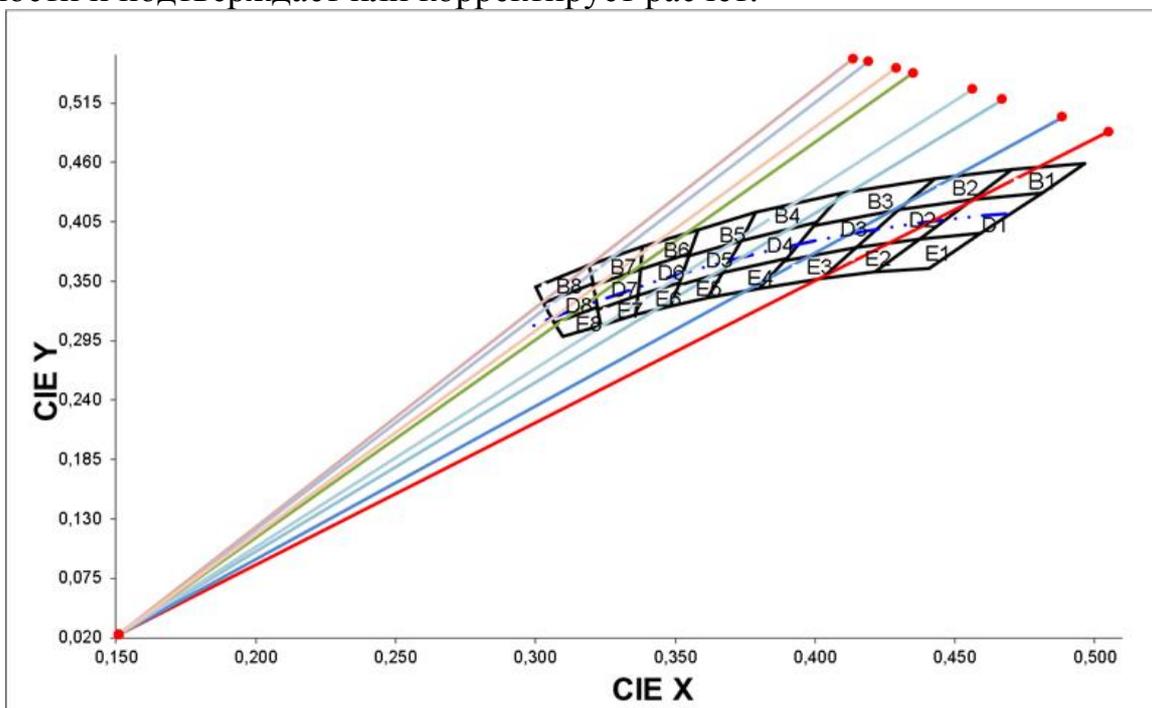


Рисунок 41 – Области белого цвета (бины) в координатах цветности МКО1931

Например: имеется несколько новых люминофоров, и есть задача определить, какой из них лучше подходит для получения СД с координатами цветности в области D4 (белый нейтральный цвет). На диаграмме цветности можно построить отрезки, соединяющие координаты цветности синего чипа (на рисунке 41 – красная точка слева внизу на пересечении осей) и каждого из люминофоров (на рисунке 41 красные точки справа вверху). Как видно из рисунка, отрезок, соответствующий каждому из люминофоров, проходит через область белого цвета, но только один пересекает D4.

Начальная точка (CIE_x, CIE_y синего чипа) на любом из отрезков на рисунке 41 означает 0% люминофора, конечная точка – 100% люминофора. Концентрация

люминофора в люминофорной смеси будет изменяться вдоль отрезка от 0% до 100% слева направо. Выбор необходимого соотношения между люминофором и силиконом далее производится опытным путем. Концентрация люминофора в смеси также зависит от геометрии корпуса. Чем толще люминофорный слой над чипом, тем меньшая концентрация требуется. Например, для СД в корпусе 5050 – 7%, 3528 – 14% для одного и того же бина.

На результат заливки люминофорной смесью влияет также длина волны синего чипа (см. рисунок 42). Изменение длины волны синего чипа от 465 нм до 450 нм приводит к сдвигу линии, соединяющей координаты синего чипа и люминофора.

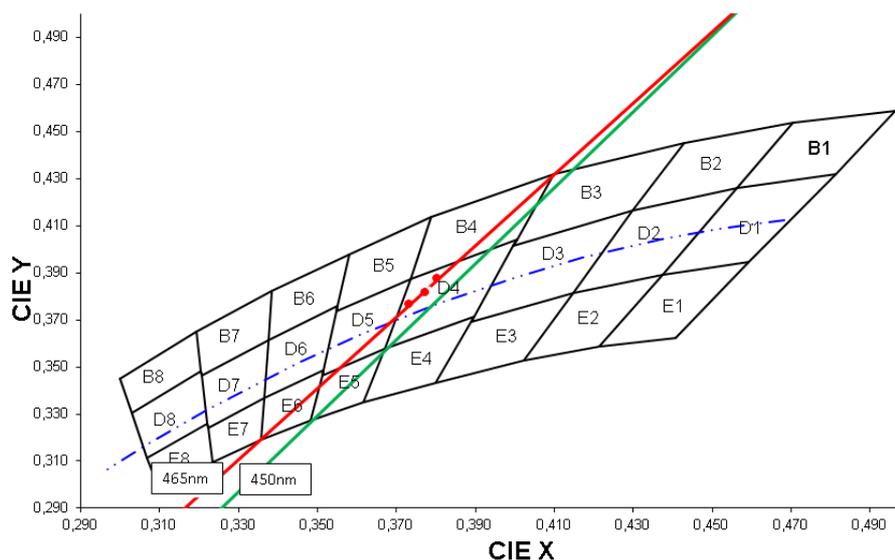


Рисунок 42 – Влияние изменения длины волны синего чипа на координаты цветности светодиодов, изготовленных при использовании одинакового люминофора.

Задача усложняется, если для достижения поставленной цели используется несколько люминофоров. Нужно рассчитать не только отношение всех люминофоров к силикону, но и отношение люминофоров друг к другу. Формулы, приведенные ниже (Considerations for Blending LED Phosphors – Intematix), могут помочь приблизительно определить весовые проценты каждого из люминофоров. Но нужно учитывать, что между люминофорами и синим чипом существует оптическое взаимодействие, которое не учитывается в приведённых формулах.

$$\text{CIE } x = "a" \times \text{CIE } x(\text{зеленый люм}) + "b" \times \text{CIE } x(\text{красный люм.});$$

$$\text{CIE } y = "a" \times \text{CIE } y(\text{зеленый люм}) + "b" \times \text{CIE } y(\text{красный люм.}),$$

a и b – весовые проценты зеленого и красного люминофоров, т.е. a+b=100%

Рассчитанные на основании формул весовые проценты далее корректируются практически после получения результатов измерений.

Таким образом, анализируя результаты измерений координат цветности при нанесении люминофорной смеси и после ее отверждения (полимеризации), внося поправки в расчет люминофорной смеси, приготавливая новую смесь и снова

измеряя координаты, технолог приходит к одному рецепту, соответствующему заданной задаче.

Действия по приготовлению люминофорной смеси:

- 1 Взвешивание компонентов в следующем порядке: компонент А силикона, компонент В силикона, люминофор
- 2 Перемешивание до однородного состояния
- 3 Центрифугирование.

При центрифугировании с помощью вакуумного смесителя (общий вид вакуумного смесителя приведён на рисунке 43) происходит перемешивание компонентов люминофорной смеси за счет движения емкости с материалами вокруг своей оси (rotation) и вокруг центра центрифуги (revolution). Одновременно с перемешиванием происходит дегазация (вакуумирование) силикон-люминофорной смеси, поскольку, кроме однородного распределения частиц люминофора по объёму, важно обеспечить отсутствие пузырей в итоговой смеси. В данной операции важно выбрать скорости вращения, время и массу смеси. При малых оборотах вакуумного смесителя и большой массе смеси люминофор будет неравномерно распределяться по объёму, а при больших центробежная сила будет придавливать порошок ко дну (к стенкам) емкости.



Рисунок 43 – Вакуумный смеситель (Центрифуга)

После приготовления смесь переносится в шприц, при этом необходимо стараться не перемешивать ее, чтобы избежать захвата смесью воздуха. Шприц соединяется с помпой и вместе с ней устанавливается на голову дозатора.

Общий вид установки нанесения силиконовых смесей приведён на рисунке 44. В общем случае установка нанесения силиконовых материалов состоит из:

- основания;
- робота манипулятора (для Musashi - ShootMaster-200DSS);
- дозатора (для Musashi - MPP-1);
- блока машинного зрения (для Musashi - BOX-350);
- управляющего компьютера (для Musashi - ImageMaster-350PC).



Рисунок 44 – Установка нанесения силиконовых материалов Musashi

Перед заливкой проводится калибровка геометрии движения дозатора, задаются начальная точка, высота иголки над чипом.

В чём особенности заливки?

Например, световой поток светодиода существенно зависит от слоя люминофора над чипом, а также от того, выходит ли излучение вбок (в чипе) или нет. Т.е. дозированием люминофорной смеси вы влияете на полный световой поток светодиода.

Для обеспечения однородности растекания смеси и отсутствия вытекания излишков важную роль играет траектория дозатора при заливке. Пример - однокристалльный SvL-03: оптимально заливать не одну каплю в центре, а незамкнутый периметр вокруг чипа (рисунок 45).



Рисунок 45 – Однокристалльный светодиод в корпусе SvL-03 (слева) и оптимальная траектория заливки (справа)

Другой пример – однокристалльный SvL-5630: оптимальная форма заливки – одна линия по центру вдоль корпуса (рисунок 46).



Рисунок 46 – Однокристалльный светодиод в корпусе 5630 (слева) и оптимальная траектория заливки (справа)

После заливки светодиоды проверяют на попадание в нужный бин по цветности – измеряют координаты цветности на спектроколориметре, например, ТКА-ВД.

Диапазон координат цветности, в который необходимо попасть при заливке, записан в рецепте люминофорной смеси. При непопадании координат в этот диапазон технолог анализирует полученный результат и корректирует его.

Причины непопадания в нужный бин могут, например, следующими:

- неправильно взвешены компоненты;
- неравномерно перемешаны компоненты;
- наличие пузырей воздуха или посторонних включений внутри помпы (некачественная отмывка деталей);
- деформация дозирующей иглы.

По окончании заливки необходимо высушить силикон-люминофорную смесь в сушильном шкафу.

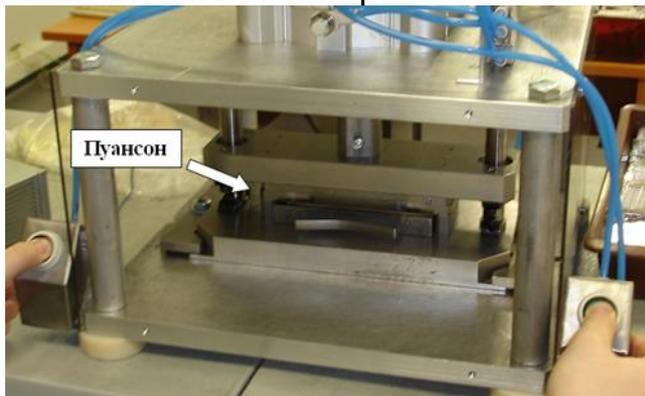
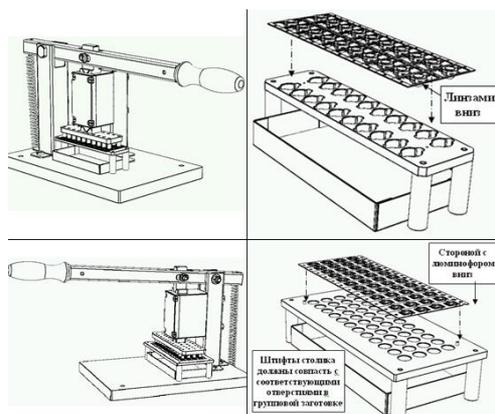
Сушка залитых люминофорной смесью групповых заготовок со светодиодами проводится согласно спецификации на используемый силикон. Режим сушки может быть одноступенчатым, например, 2 часа при 150°C, или многоступенчатым при разных температурах. Сложные режимы сушки используют для постепенного нагрева силиконовой смеси, чтобы не было резкой усадки материала, приводящей к возможному отслоению от корпуса и натяжению проволочных контактов.

Что записываем в маршрут на операции приготовление, нанесение, выборочный контроль координат цветности и сушка люминофорной смеси?

- 1) Оборудование: весы аналитические
вакуумный смеситель
установка нанесения силиконовых материалов
спектроколориметр ТКА-ВД
источник постоянного тока Б5-45
шкаф сушильный
шкаф вытяжной
- 2) Материалы: люминофор
силиконовый компаунд
- 3) Комплектующие: рамка с полусборками (установленными в корпус чипами и проволочными контактами)
- 4) Документы: ТИ (Приготовление люминофорной смеси)
ТИ (Нанесение люминофорной смеси)
КТИ (Нанесение люминофорной смеси)
ИОТ
РЭ

6. Разделение групповой заготовки

После сушки люминофором производится разделение групповой заготовки (рамки) на отдельные светодиоды с помощью механического/пневматического пресса или автоматического разделителя. На рисунке 47 представлены схемы разделения с помощью механического и пневматического пресса.



Пуансон в крайнем нижнем положении.

Рисунок 47 – Схема разделения групповых заготовок на отдельные светодиоды с помощью механического и пневматического пресса.

7. Контроль, сортировка, упаковка

При любой сборке после последней сборочной операции обычно завершают технологический маршрут следующие стандартные операции:

7.1 Финишный контроль изделия как целого и автоматическая сортировка/отбраковка на основе данных контроля

На финишном контроле проверяют основные характеристики изделия. Для СД это, как правило, световой поток, потребляемая мощность, цветовая температура (бин), напряжение.



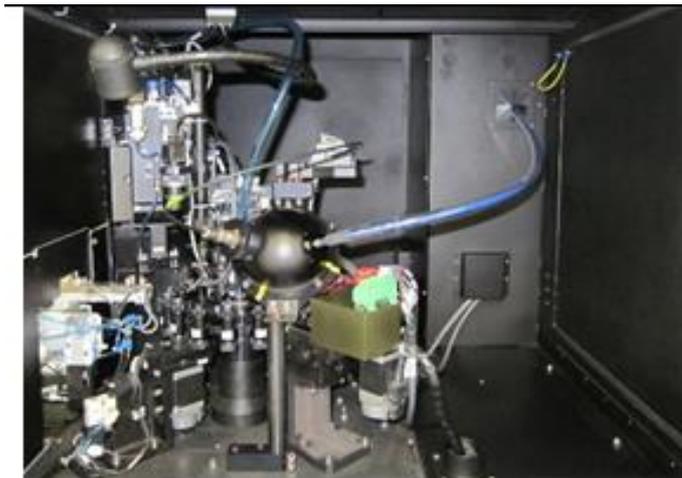
Воронка со светодиодами



Вибробункер со светодиодами



Светодиоды в держателях, держатель



Темная камера

Рисунок 48 – Схема сортировки светодиодов.

На установке сортировки (см. рисунок 48) светодиоды помещаются в воронку, откуда они попадают в вибробункер. Далее по треку светодиоды попадают на держатель. После прохождения контрольной камеры держатель

разворачивает светодиод в нужной ориентации полярности, далее светодиод подается карусельной системой в темную камеру (сферу), где подводятся электрические контакты, подается питание на светодиод и производятся измерения электрических и световых параметров. Годные светодиоды отправляются в накопители в соответствии с индивидуальными характеристиками. Брак тоже сортируется по видам в соответствующие накопители.

7.2 Упаковка

Тип упаковки для любого прибора определяется, как правило, на этапе разработки изделия.

Небольшие партии светодиодов могут быть упакованы в антистатические пакеты.

Партии светодиодов, предназначенных для проведения поверхностного монтажа, должны быть упакованы в специальную несущую ленту с ячейками, намотанную на бобину. Перед упаковкой в ленту светодиоды проверяются на работоспособность, затем несущая лента со светодиодами, установленными в ячейки, закрывается покровной лентой. Покровная лента запаивается. Бобина со светодиодами упаковывается в антистатический пакет.

Вопросы для самоконтроля

- 1) Перечислите известные вам ТО, которые входят в ТП корпусирования чипа. Укажите кратко назначение каждой ТО.
- 2) В чём основное назначение ионно-плазменной очистки в ТП корпусирования чипа?
- 3) Какие типы плазмы могут быть использованы в ТО ионно-плазменной очистки? В чём их преимущества и недостатки?
- 4) Какие виды монтажа чипа в корпус/на плату вы знаете? Опишите основные особенности каждого из них.
- 5) Какие свойства важно обеспечить и проконтролировать при монтаже чипа в корпус/на плату?
- 6) Какие типы полупроводниковых чипов вы знаете? В чём особенность монтажа каждого из этих типов?
- 7) Какие достоинства и недостатки проволочных соединений типа «клин-клин» и «шарик-клин» вы можете указать?
- 8) Из каких материалов изготавливают проволоку для проволочных соединений и почему?
- 9) Баланс каких параметров нужно соблюдать при формировании проволочных соединений? В чём физические причины таких требований?
- 10) Какие проблемы/сложности возникают при герметизации чипов типа «флип-чип»?
- 11) В чём особенность герметизации светодиодных чипов в сравнении с не светодиодными?

Заключение

В заключение автор хочет выразить благодарность сотрудникам АО «ДжиЭс - Нанотех» (г. Гусев) и, в первую очередь, техническому директору Константину Владимировичу Белову и ведущему инженеру-технологу Галдиной Елене Борисовне за ценные обсуждения и предоставленные материалы, использованные при подготовке настоящего пособия.

Список использованной и рекомендованной литературы

- [1] Бауман Д.А. Технология сборки светодиодов. Учебное пособие. ИТМО. СПб. 2018
- [2] Валетов В. А., Помпеев К. П. Технология приборостроения. Учебное пособие. ИТМО. СПб. 2013
- [3] ГОСТ 14.201-83 «Обеспечение технологичности конструкций изделия. Общие требования».
- [4] Скворцов В.Ф. Основы технологии машиностроения. Учебное пособие. Томский политехнический ун-т. Томск. 2013.
- [5] ГОСТ 3.1102-81 «Стадии разработки и виды документов».
- [6] ГОСТ 3.1105-84 «Формы и правила оформления документов общего назначения».
- [7] ГОСТ 3.1201-85 «Система обозначения технологической документации».
- [8] ГОСТ 3.1118-82 «Формы и правила оформления маршрутных карт».
- [9] Graves J.F. “Plasma processing of Hybrids for Improved Bondability” // The International Journal Hybrid Microelectronics, Vol. С6, 1983, pp.147 - 156.
- [10] Масич П., Кашин Е. «Входной контроль компонентов: контроль паяемости методом оценки баланса смачиваемости» // Производство электроники: технологии, оборудование материалы. 2008, №1, стр.55 - 56.
- [11] DEPARTMENT OF DEFENSE. TEST METHOD STANDARD MICROCIRCUITS. MIL-STD-883H.
- [12] Симонов О. «Технология плазменной очистки при микросборке». // Печатный монтаж. 2016, №3 (00064), стр.148 - 152 (<http://www.circuitry.ru/>)
- [13] Harman G. Wire bonding in microelectronics. Third edition. McGraw Hill. 2010.
- [14] Джюд М., Бриндли К. Пайка при сборке электронных модулей. М.: ИД «Технологии», 2006.
- [15] Ли Нинг-Ченг. Технология пайки оплавлением, поиск и устранение дефектов: поверхностный монтаж, BGA, CSP и flip chip технологии. М.: ИД «Технологии», 2006.
- [16] Сурков В.А. «Анализ методов получения интерметаллидов» // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т.17, №10, стр.27 – 33.

Бауман Дмитрий Андреевич

**Технология сборки (корпусирования) в
микроэлектронике**

Учебное пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, литер А