

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

В. Л. Ланин, В.А. Емельянов, И.Б. Петухов

**ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ
СБОРКИ И МОНТАЖА
ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

**Минск
«Беларуская навука»
2022**

УДК 621.791.3: 621.396.6

Ланин, В. Л. Технология и оборудование сборки и монтажа электронных средств
/ В.Л. Ланин, В.А. Емельянов, И.Б. Петухов. – Минск: Беларуская навука, 2022. – 512 с.
ISBN 978-985-6845-41-6

В монографии приведены описания процессов, конструкций и материалов соединений, инструментов и оборудования, используемых для формирования электромонтажных соединений в изделиях электроники. Рассмотрены физико-химические основы процессов создания паяных и микросварных соединений, применение интенсифицирующих воздействий, напаянные электромонтажные соединения и методы контроля качества соединений.

Проблемы технологии электромонтажных соединений в электронике приобрели особую актуальность в связи с высокой функциональной сложностью компонентов и интеграцией их в малых объемах микроплат и микроблоков. Переход на бессвинцовистые припои при формировании электромонтажных соединений ставит ряд задач по совершенствованию технологии, оптимизации температурных профилей нагрева, контролю качества соединений.

Книга предназначена для инженерно-технических специалистов, аспирантов и студентов технических вузов, специализирующихся в области технологии производства электронной аппаратуры.

Табл.47. Ил.305. Библиограф.: 200 назв.

Р е ц е н з е н т ы:

акад. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф. *В.А. Лабунюв,*
акад. НАН Беларуси, д-р физ.-мат. наук, проф. *Ф.Ф. Комаров*

© Ланин В.Л.,
Емельянов В.А.
Петухов И.Б., 2022

ISBN 978-985-6845-41-6

Содержание

Введение	8
Глава 1.	
ЭВОЛЮЦИЯ КОНСТРУКЦИЙ И ТЕХНОЛОГИЙ СБОРКИ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ	10
1.1. Тенденции развития электронных модулей	10
1.2. Классификация и характеристика видов соединений в модулях	17
1.3. Монтаж выводных компонентов в электронных модулях	21
1.4. Поверхностный монтаж электронных модулей	24
1.5. Непосредственный монтаж кристаллов и микрокорпусов	29
1.6. Микросварные соединения в интегральных микросхемах и микросборках	32
1.7. Многокристальные модули и особенности их сборки	36
1.8. Микро- и наноразмерные модули	41
Список литературы к главе 1	43
Глава 2.	
МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМОНТАЖНЫХ СОЕДИНЕНИЙ	44
2.1. Припой для электромонтажных соединений	44
2.2. Свойства припоев в зависимости от состава и наличия примесей	47
2.3. Бессвинцовые припои	49
2.4. Флюсы для электромонтажной пайки	53
2.5. Припойные пасты	55
2.6. Токопроводящие клеи	59
2.7. Микропроволоки для контактных соединений	61
2.8. Защитные жидкости и покрытия для пайки	65
2.9. Материалы для очистки соединений	68
Список литературы к главе 2	70
Глава 3.	
ПАЯЕМОСТЬ МАТЕРИАЛОВ И ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ	72
3.1. Паяемость и критерии ее оценки	72
3.2. Методы оценки паяемости погружением в расплав	74
3.3. Методы оценки паяемости по капиллярному проникновению и площади растекания припоя	78

3.4 Паяемость гальванических покрытий	83
3.5 Паяемость электронных компонентов	87
Список литературы к главе 3	93
Глава 4.	
ФИЗИКО–ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОМОНТАЖНОЙ ПАЙКИ	95
4.1 Подготовка поверхностей к пайке	95
4.2. Удаление оксидных пленок с паяемых поверхностей	98
4.3. Процессы на межфазной границе раздела припой – паяемая поверхность	103
4.4. Капиллярное проникновение припоя и диффузия	105
4.5. Кристаллизация припоя и формирование структуры соединений	107
Список литературы к главе 4	109
Глава 5.	
СБОРКА И МОНТАЖ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ НА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТАХ	110
5.1. Подготовка компонентов к монтажу	110
5.2. Установка компонентов на платы	114
5.3. Методы флюсования при волновой пайке	118
5.4. Волновые способы пайки модулей на печатных платах	121
5.5. Пайка с помощью паяльников и паяльных станций	127
5.6. Демонтаж электронных компонентов	129
5.7. Методы очистки от остатков флюса	
Список литературы к главе 5	133
Глава 6.	
ПОВЕРХНОСТНЫЙ МОНТАЖ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ	143
6.1. Типы поверхностно-монтируемых элементов и разновидности их монтажа	143
6.2. Технология и оборудование для дозирования паяльных паст	148
6.3. Методы и оборудование установки элементов на платы	
6.4. Термические аспекты пайки электронных модулей	
6.5. Технология волновой пайки поверхностного монтажа	152
6.6. Конвективные методы пайки поверхностного монтажа	
6.7. Селективная пайка модулей со смешанным монтажом	162
6.8. Конденсационная пайка модулей	156
6.9. Инфракрасная пайка поверхностного монтажа	

6.9.1. Особенности инфракрасного нагрева	
6.9.2. Оборудование инфракрасного нагрева	
6.10. Контроль температурного профиля пайки	
6.11. Типичные дефекты поверхностного монтажа	162
Список литературы к главе 6	165

Глава 7.

ТЕХНОЛОГИЯ СБОРКИ И МОНТАЖА МИКРОМОДУЛЕЙ	206
7.1. Технология монтажа кристаллов полупроводниковых приборов	206
7.2 . Автоматизированный монтаж кристаллов вибрационной и ультразвуковой пайкой	
7.3. Монтаж кристаллов транзисторов в корпусах D-Pak и Super-D2Pak	
7.4. Бессвинцовые припойные композиции для монтажа кристаллов	
7.5. Монтаж кристаллов в модулях силовой электроники	
7.6. Монтаж кристаллов жесткими объемными выводами	210
7.7. Формирование матричной структуры выводов припоя	
7.8. Технология монтажа Flip-Chip	
7.9. Технология сборки многокристальных и 3D-модулей	220
7.10. Бесконтактный монтаж кристаллов	223
Список литературы к главе 7	223

Глава 8.

СБОРКА И МОНТАЖ СВЧ МИКРОМОДУЛЕЙ И МИКРОБЛОКОВ

8.1. Конструктивно-технологические особенности СВЧ микромодулей	
8.2. Технология сборки и монтажа СВЧ микромодулей	
8.3. Технология герметизации пайкой корпусов микроблоков	
Список литературы к главе 8	

ГЛАВА 9.

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ПАЙКА И МЕТАЛЛИЗАЦИЯ В ЭЛЕКТРОНИКЕ	233
9.1. Физические модели ультразвуковых эффектов в расплавах	233
9.2. Удаление оксидных пленок и интенсификация процесса смачивания	239
9.3. Диффузия и химическое взаимодействие расплавов с паяемыми материалами	245
9.4. Технологическое оснащение ультразвуковой пайки	254
9.5. Влияние параметров ультразвуковых процессов на свойства соединений	265
9.6. Модификация структуры многофазных материалов контактных соединений	
Список литературы к главе 9	

Глава 10.

ТЕХНОЛОГИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ПАЙКИ В ЭЛЕКТРОНИКЕ	269
10.1. Выбор частоты и мощности нагрева	269
10.2. Методы и устройства высокочастотного нагрева	272
10.3. Оборудование и оснастка высокочастотного нагрева	276
10.4. Управление термическими профилями высокочастотной пайки	
Список литературы к главе 10	

Глава 11.

ЛАЗЕРНАЯ ПАЙКА ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ	193
11.1. Твердотельные лазеры для монтажной пайки	193
11.2. Лазерные диодные системы для пайки	200
11.3. Моделирование параметров лазерной пайки	203
Список литературы к главе 11	

Глава 12.

МИКРОМОНТАЖ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ И МИКРОМОДУЛЕЙ	310
12.1. Микросварные соединения в интегральных схемах и микромодулях	310
12.2. Особенности методов и механизмы образования микросоединений	
12.3. Термокомпрессионная микросварка	311
12.4. Ультразвуковая микросварка проволочных выводов	313
12.5. Ультразвуковая микросварка ленточных выводов	319
12.6. Термозвуковая микросварка	

12.7. Автоматическое оборудование микросварки	327
12.8. Монтаж силовых полупроводниковых приборов и микромодулей	333
12.9. Инструмент для микросварки	336
12.10. Микросварка расщепленным электродом	
12.11. Лазерная микросварка	
12.12. Контроль качества микросварных соединений	
Список литературы к главе 12	342

Глава 13

ГЕРМЕТИЗАЦИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

13.1. Герметизация металлостеклянных и металлокерамических корпусов ИС	
13.2. Формирование сварных соединений контактной шовно-роликовой сваркой	
13.3. Особенности герметизации металлокерамических корпусов ИС	
13.4. Моделирование термических напряжений в металлокерамических узлах	
13.5. Обеспечение низкого уровня паров воды в корпусах интегральных схем при герметизации	
Список литературы к главе 13	

Глава 14

МЕЖБЛОЧНЫЙ МОНТАЖ

	344
14.1. Соединение обжатием	344
14.2. Эластичное соединение	344
14.3. Соединение врезанием	348
14.4. Соединения типа Press-Fit	349
Список литературы к главе 14	349

Глава 15.

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СБОРКИ И МОНТАЖА

	360
15.1. Методы и оборудование контроля качества сборки электронных модулей	360
15.2. Контроль электрических параметров паяных соединений	365
15.3. Контроль физико-механических свойств соединений	366
15.4. Металлографический контроль качества соединений	370
15.5. Типичные дефекты паяных соединений	372
15.6. Методы контроля скрытых дефектов соединений	392
15.7. Надежность паяных соединений	399
Список литературы к главе 15	405

ВВЕДЕНИЕ

В XXI веке трудно найти область человеческой деятельности, в которой важным помощником человека не являлись бы электронные средства (ЭС). Электронные средства чрезвычайно разнообразны как по функциональному назначению, так и по их конструктивному исполнению. Современная мировая промышленность производит больше чем 60 миллиардов различных ЭС в год. Это разнообразие включает устройства, которые управляют системами персональных компьютеров, космических кораблей, самолетов, автомобилей, телевизоров, мобильными телефонами, цифровыми камерами, DVD проигрывателями и др. В современном мире происходит бурное развитие ЭС отвечая растущим потребностям телекоммуникационных технологий, аэрокосмической техники и приборостроения оборонного сектора.

Операции сборки и монтажа являются до сих пор самыми трудоемкими при изготовлении ЭС и занимают до 50–70 % общей трудоемкости изготовления изделий. Микроминиатюризация элементов и создание функционально сложных микроэлектронных устройств, в частности сверхбольших интегральных микросхем (СБИС) и микропроцессоров вызвала особые проблемы в области микромонтажа ЭС. Увеличение плотности активных элементов на кристалле в среднем на 75 % в год вызывает необходимость в увеличении количества выводов на корпусах на 40 % в год [1]. Это обуславливает постоянно растущий спрос на новые методы корпусирования, создающие высокую плотность межсоединений на печатных платах. Высокую функциональную сложность и степень интеграции невозможно реализовать без принципиального совершенствования системы контактных соединений. Разработка микропроцессоров с рабочей частотой сигнала до 5 ГГц увеличивает число выводов до 1000 [2].

Освоение электронных сборок V поколения - многокристальных модулей (МКМ) - тонкопленочных многослойных гибридных конструкций, выполненных на керамических, кремниевых или металлических подложках, к которым бескорпусные кристаллы присоединяются методами сварки или пайки, повысило плотность монтажных соединений до 200 на см² [3]. Традиционные процессы монтажа не обеспечивают необходимой в настоящее время высокой производительности и высокого процента выхода годных изделий с плотным монтажом. Статистические данные показывают, что 50-80 % всех отказов в ЭС происходит вследствие дефектов соединений, причем стоимость обнаружения и исправления отказа на этапе сборки блока обходится в 100 раз дешевле, чем при испытаниях аппаратуры [4].

Переход на бессвинцовистые припои при монтаже электронных модулей ставит ряд задач по обеспечению хорошей смачиваемости поверхностей, оптимизации температурных профилей нагрева, контролю качества соединений. С

повышением функциональной сложности ЭС растут проблемы демонтажа электронных компонентов с поверхности плат, в особенности многовыводных корпусов BGA, контактируемых с помощью шариковых выводов.

Повышение производительности труда, качества и надежности соединений может быть достигнуто за счет широкого внедрения автоматизированного оборудования с микропроцессорным управлением, использования концентрированных потоков энергии электромагнитного поля, включая высокочастотное, инфракрасное, лазерное излучение, разработки новых материалов для формирования соединений.

Согласно Международной технологической маршрутной карты по полупроводникам (International Technology Roadmap for Semiconductor– ITRS) планируется переход на 450 мм пластины, внедрение структур кремний на изоляторе (SOI), увеличение слоев металлизации до 14, переход к низкотемпературным процессам сборки (ниже 200°C) с использованием объемных выводов на кристалле, увеличение числа выводов корпусов до 5000 и более при шаге матричных выводов до 0,2 мм, переход на частоты в диапазоне 10 – 100 ГГц [5].

Особенностями процессов формирования контактных соединений в электронных модулях являются: широкая номенклатура используемых электронных компонентов, интегральных микросхем, микросборок; различные виды макросоединений дискретных электронных компонентов на печатных, двусторонних и многослойных платах; микросоединений на подложках, микроплатах, в многокристальных модулях; разнообразные по физической природе источники теплового излучения: потоки расплавленного припоя, нагретый инструмент, концентрированные потоки энергии различных полей. Для реализации высокоэффективных технологических процессов формирования соединений и управления ими в реальном масштабе времени необходимо современное программно-управляемое оборудование, сочетающее возможность компьютерного управления процессами с гибкой переналадкой производства.

Таким образом, для получения качественных и стабильных контактных соединений необходимо решение комплекса взаимосвязанных проблем, направленных на разработку моделей и технологических основ новых активированных процессов формирования соединений, теоретическое и экспериментальное исследование механизмов формирования соединений, создание оборудования на основе совместного применения концентрированных потоков энергии различных полей, что обеспечит существенное повышение качества изготавливаемых изделий, экономию материалов и снижение энергопотребления.