



МИР ЭЛЕКТРОНИКИ

Печатные платы
Справочник.
В 2-х книгах

Книга I

Под редакцией К.Ф. Кумбза

Перевод с английского
под редакцией д.т.н.,
проф. А.М. Медведева

ТЕХНОСФЕРА

Москва

2018

УДК 621.3.049.75

ББК 32.844

П 31

П 31 Печатные платы: Справочник / Под редакцией К.Ф. Кумбза

В 2-х книгах. Книга 1

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2018. – 1016 с.

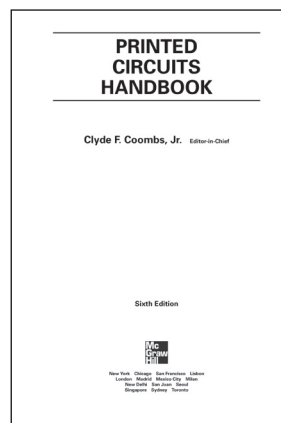
ISBN 978-5-94836-258-8

В издании рассматриваются все процессы создания и применения печатных плат: проектирование и выбор базовых материалов, изготовление, обеспечение качества и оценки надежности печатных плат и печатных узлов, монтаж плат, включая особенности бессвинцовых технологий пайки, а также методы и средства испытаний применительно к специальным требованиям. Шестое издание дополнено информацией по ценообразованию, количественной оценке технологичности плат, управлению производством и решению экологических проблем.

Справочник рассчитан на широкий круг специалистов-технологов, конструкторов, схемотехников и специалистов по надежности, поскольку печатные платы являются фундаментом проектирования и производства изделий электроники. Данная книга может служить учебным пособием для студентов и аспирантов вузов соответствующих специальностей.

УДК 621.3.049.75

ББК 32.844



Copyright © 2008 by The McGraw-Hill Companies. All rights reserved.

© 2011, ЗАО «РИЦ «Техносфера», перевод, оригинал-макет, оформление

ISBN 978-5-94836-258-8

ISBN 007-1467343 (англ.)

Содержание

| | |
|--|----|
| Введение | 11 |
| ЧАСТЬ 1. ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВО ПО ОГРАНИЧЕНИЮ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВИНЦА | 14 |
| Глава 1. Законодательство и его влияние на печатные платы | 14 |
| 1.1. Обзор законодательства | 14 |
| 1.2. Отходы электрического и электронного оборудования (WEEE) | 14 |
| 1.3. Ограничение использования опасных веществ (RoHS) | 15 |
| 1.4. Воздействие законодательства в области RoHS на промышленное изготовление печатных плат | 19 |
| 1.5. Перспективы бессвинцового монтажа | 24 |
| Литература | 26 |
| ЧАСТЬ 2. ДВИЖУЩИЕ СИЛЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ | 27 |
| Глава 2. Монтаж электронных схем в корпусе и межсоединения высокой плотности | 27 |
| 2.1. Введение | 27 |
| 2.2. Оценка революционных межсоединений (межсоединений высокой плотности) | 27 |
| 2.3. Иерархия межсоединений | 31 |
| 2.4. Факторы, влияющие на выбор межсоединений | 32 |
| 2.5. Интегральные схемы и корпуса | 36 |
| 2.6. Оценки плотности | 41 |
| 2.7. Методы увеличения плотности печатных плат | 45 |
| Литература | 51 |
| Глава 3. Технология корпусирования полупроводников | 52 |
| 3.1. Введение | 52 |
| 3.2. Однокристалльный модуль | 56 |
| 3.3. Многокристалльные модули | 67 |
| 3.4. Оптические межсоединения | 73 |
| 3.5. Обзор корпусирования высокой плотности с улучшенными техническими характеристиками | 75 |
| 3.6. Информация по перспективному плану развития | 75 |
| Литература | 75 |
| Глава 4. Пакетирование современных компонентов | 77 |
| 4.1. Введение | 77 |
| 4.2. Без применения свинца | 79 |
| 4.3. Система на одном кристалле (SOC) и система на одном корпусе (SOP) | 80 |
| 4.4. Многокристалльные модули | 83 |
| 4.5. Многокристалльные корпуса | 84 |
| 4.6. Поддерживающие технологии | 89 |

| | |
|---|------------|
| 4.7. Благодарности | 101 |
| Литература | 101 |
| Глава 5. Типы печатных плат | 104 |
| 5.1. Введение | 104 |
| 5.2. Классификация печатных плат | 104 |
| 5.3. Подложки из органических и неорганических веществ | 106 |
| 5.4. Графическая плата и плата с дискретными межсоединениями | 106 |
| 5.5. Жесткие и гибкие платы | 108 |
| 5.6. Платы, изготавливаемые графическим способом | 109 |
| 5.7. Прессованные устройства межсоединений | 114 |
| 5.8. Технологии металлизированных сквозных отверстий (PTH) | 114 |
| 5.9. Краткие выводы | 119 |
| Литература | 119 |
| ЧАСТЬ 3. МАТЕРИАЛЫ | 120 |
| Глава 6. Введение в базовые материалы | 120 |
| 6.1. Введение | 120 |
| 6.2. Марки и технические характеристики | 120 |
| 6.3. Свойства, используемые для классификации базовых материалов | 128 |
| 6.4. Типы материалов марки FR-4 | 133 |
| 6.5. Идентификационная схема слоистых плат | 135 |
| 6.6. Идентификационная схема препрега | 139 |
| 6.7. Процессы изготовления слоистых плат и препрегов | 140 |
| Литература | 146 |
| Глава 7. Компоненты базовых материалов | 147 |
| 7.1. Введение | 147 |
| 7.2. Системы с эпоксидной смолой | 147 |
| 7.3. Другие полимерные системы | 152 |
| 7.4. Добавки | 154 |
| 7.5. Армирование | 160 |
| 7.6. Проводящие материалы | 168 |
| Литература | 176 |
| Глава 8. Свойства базовых материалов | 177 |
| 8.1. Введение | 177 |
| 8.2. Тепловые, физические и механические свойства | 177 |
| 8.3. Электрические свойства | 192 |
| Литература | 196 |
| Глава 9. Базовые материалы. Рабочие характеристики | 197 |
| 9.1. Введение | 197 |
| 9.2. Методы увеличения плотности монтажа схем | 198 |
| 9.3. Медная фольга | 198 |
| 9.4. Конструкции композиционных диэлектриков | 204 |
| 9.5. Пропитанная стеклоткань (препрег) и результирующие величины в расчете на слой | 207 |

| | |
|--|------------|
| 9.6. Стабильность размеров | 208 |
| 9.7. Материалы для плат с высокой плотностью межсоединений (HDI) | 212 |
| 9.8. Образование проводящих анодных нитей | 214 |
| 9.9. Электрические характеристики | 224 |
| 9.10. Электрические характеристики материалов с низкими значениями D_k/D_p , совместимыми с бессвинцовыми технологиями пайки | 237 |
| Литература | 238 |
| Глава 10. Влияние бессвинцовой пайки на базовые материалы | 239 |
| 10.1. Введение | 239 |
| 10.2. Основы Директивы RoHS | 239 |
| 10.3. Проблемы совместимости базовых материалов | 240 |
| 10.4. Влияние бессвинцовой пайки на компоненты базовых материалов | 243 |
| 10.5. Наиболее важные свойства базового материала | 243 |
| 10.6. Связь надежности печатных плат с выбором материала | 259 |
| 10.7. Выводы | 264 |
| Литература | 265 |
| Глава 11. Выбор базовых материалов применительно к бессвинцовой технологии пайки | 266 |
| 11.1. Введение | 266 |
| 11.2. Взаимосвязь изготовления печатных плат и сборки печатных узлов [1] | 266 |
| 11.3. Правильный выбор базового материала для специального использования [2, 3] | 273 |
| 11.4. Пример применения механизма выбора | 281 |
| 11.5. Пиковые температуры бессвинцовой пайки | 282 |
| 11.6. Бессвинцовые технологии и требования стандарта IPC-4101 | 283 |
| 11.7. Дополнительные варианты выбора базовых материалов для бессвинцовых технологий | 284 |
| 11.8. Выводы | 285 |
| Литература | 286 |
| Глава 12. Свойства базовых материалов и их испытания | 287 |
| 12.1. Введение | 287 |
| 12.2. Промышленные стандарты | 289 |
| 12.3. Стратегия испытаний диэлектриков | 290 |
| 12.4. Начальные испытания | 292 |
| 12.5. Полная оценка материала | 298 |
| 12.6. Технологичность производства | 316 |
| ЧАСТЬ 4. РАЗРАБОТКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ | 318 |
| Глава 13. Физические характеристики печатных плат | 318 |
| 13.1. Классы конструкций печатных плат | 318 |
| 13.2. Типы печатных плат или компоновка электронных схем | 325 |
| 13.3. Методы монтажа компонентов | 331 |

| | |
|--|------------|
| 13.4. Типы корпусов компонентов | 333 |
| 13.5. Выбор материалов | 338 |
| 13.6. Методы изготовления | 343 |
| 13.7. Выбор типа компоновки и производителя | 345 |
| Глава 14. Процесс проектирования печатных плат | 348 |
| 14.1. Цель проектирования печатных плат | 348 |
| 14.2. Процесс проектирования | 348 |
| 14.3. Средства проектирования | 355 |
| 14.4. Выбор комплекта средств проектирования | 362 |
| 14.5. Согласование САЕ-, САD- и САМ-инструментов друг с другом | 363 |
| 14.6. Входные данные для процесса проектирования | 364 |
| Глава 15. Электрические и механические параметры конструкции | 366 |
| 15.1. Требования к проектированию печатных плат | 366 |
| 15.2. Введение в устойчивость электрического сигнала | 366 |
| 15.3. Введение в электромагнитную совместимость | 369 |
| 15.4. Расчет помех | 369 |
| 15.5. Проектирование с учетом устойчивости сигнала и электромагнитной совместимости | 370 |
| 15.6. Требования к механической конструкции | 376 |
| Литература | 386 |
| Глава 16. Токонесущая способность печатных плат | 388 |
| 16.1. Введение | 388 |
| 16.2. Диаграммы выбора размера проводника (трассы) | 388 |
| 16.3. Допустимая токовая нагрузка | 390 |
| 16.4. Диаграммы | 391 |
| 16.5. Диаграммы с базовой линией | 400 |
| 16.6. Эффект неправильной геометрии и «швейцарского сыра» | 411 |
| 16.7. Толщина меди | 412 |
| Литература | 413 |
| Глава 17. Проектирование тепловых характеристик печатных плат | 414 |
| 17.1. Введение | 414 |
| 17.2. Печатная плата как теплосток для припаянных компонентов | 415 |
| 17.3. Оптимизация печатной платы по тепловым характеристикам | 416 |
| 17.4. Кондуктивный теплоотвод на корпус | 428 |
| 17.5. Требования к теплостокам | 432 |
| 17.6. Моделирование тепловых характеристик печатной платы | 433 |
| Литература | 437 |
| Глава 18. Форматирование и обмен информацией | 439 |
| 18.1. Введение в обмен данными | 439 |
| 18.2. Процесс обмена данными | 442 |
| 18.3. Форматы обмена данными | 448 |
| 18.4. Движение к совершенству | 464 |

| | |
|---|------------|
| 18.5. Благодарности | 465 |
| Литература | 465 |
| Глава 19. Планирование проектирования, изготовления и монтажа | 466 |
| 19.1. Введение | 466 |
| 19.2. Общие соображения | 468 |
| 19.3. Проектирование новой продукции | 469 |
| 19.4. Планирование компромиссных топологий | 475 |
| 19.5. Планирование компромиссов при изготовлении платы | 483 |
| 19.6. Планирование компромиссов при сборке | 491 |
| Литература | 494 |
| Глава 20. Производственная информация, документация и ее передача, включая данные автоматизированной технологической обработки для изготовления и сборки | 495 |
| 20.1. Введение | 495 |
| 20.2. Производственная информация | 496 |
| 20.3. Предварительный анализ проекта | 502 |
| 20.4. Ввод задания на проектирование | 513 |
| 20.5. Анализ и проверка конструкции | 517 |
| 20.6. Процессы наладки САМ | 518 |
| 20.7. Дополнительные процессы | 535 |
| 20.8. Признательность | 537 |
| Глава 21. Встроенные компоненты | 538 |
| 21.1. Введение | 538 |
| 21.2. Определения и примеры | 538 |
| 21.3. Использование и компромиссы | 539 |
| 21.4. Проектирование встраиваемых компонентов | 541 |
| 21.5. Материалы | 544 |
| 21.6. Применяемые материалы | 547 |
| ЧАСТЬ 5. МЕЖСОЕДИНЕНИЯ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ | 551 |
| Глава 22. Введение в технологии межсоединений высокой плотности (HDI) | 551 |
| 22.1. Введение | 551 |
| 22.2. Определения | 551 |
| 22.3. Структуры HDI | 556 |
| 22.4. Проектирование | 562 |
| 22.5. Диэлектрические материалы и методы нанесения покрытий | 564 |
| 22.6. Технологические процессы изготовления HDI | 581 |
| Литература | 593 |
| Дополнительные библиографические ссылки | 594 |
| Глава 23. Современные технологии межсоединений высокой плотности (HDI) | 595 |
| 23.1. Введение | 595 |
| 23.2. Определения технологических факторов HDI | 595 |

| | |
|--|------------|
| 23.3. Процесс изготовления плат категории HDI | 597 |
| 23.4. Технологические процессы HDI следующего поколения | 630 |
| Литература | 635 |
| ЧАСТЬ 6. ПРОИЗВОДСТВО | 636 |
| Глава 24. Процессы сверления | 636 |
| 24.1. Введение | 636 |
| 24.2. Материалы | 637 |
| 24.3. Станки | 645 |
| 24.4. Методы | 651 |
| 24.5. Качество отверстия | 656 |
| 24.6. Проверка после сверления | 656 |
| 24.7. Затраты на сверление в расчете на одно отверстие | 657 |
| Глава 25. Прецизионное сверление межсоединений | 661 |
| 25.1. Введение | 661 |
| 25.2. Факторы, определяющие сверление HDI-плат | 661 |
| 25.3. Лазер в сравнении с механическим способом | 662 |
| 25.4. Факторы эффективности сверления HDI-плат | 665 |
| 25.5. Методы сверления с контролем глубины | 671 |
| 25.6. Сверление глубоких отверстий | 672 |
| 25.7. Проверка внутренних слоев многослойных плат | 676 |
| Глава 26. Формирование изображения | 683 |
| 26.1. Введение | 683 |
| 26.2. Фоточувствительные материалы | 684 |
| 26.3. Сухие пленочные фоторезисты | 687 |
| 26.4. Жидкие фоторезисты | 691 |
| 26.5. Электрофоретически осаждаемый фоторезист | 692 |
| 26.6. Обработка фоторезиста | 693 |
| 26.7. Проектирование для производства | 716 |
| Литература | 719 |
| Глава 27. Материалы и процессы многослойных плат | 721 |
| 27.1. Введение | 721 |
| 27.2. Материал для печатных плат | 723 |
| 27.3. Типы многослойных конструкций | 743 |
| 27.4. Обработка многослойных печатных плат (МПП) и соответствующие им технологические схемы | 773 |
| 27.5. Процесс прессования | 795 |
| 27.6. Управление процессом прессования и устранение неполадок | 805 |
| 27.8. Выводы относительно МПП | 810 |
| Литература | 811 |
| Глава 28. Подготовка плат к металлизации | 812 |
| 28.1. Введение | 812 |
| 28.2. Технологические решения | 812 |

| | |
|---|------------|
| 28.3. Процессы водоподготовки | 815 |
| 28.4. Подготовка отверстий к металлизации | 817 |
| 28.5. Химическое меднение [5–10] | 822 |
| 28.6. Благодарности | 825 |
| Литература | 825 |
| Глава 29. Гальванические покрытия | 827 |
| 29.1. Введение | 827 |
| 29.2. Основы гальванических покрытий | 827 |
| 29.3. Отверстия с высоким характеристическим отношением и металлизация микропереходов | 828 |
| 29.4. Горизонтальное гальванопокрытие | 830 |
| 29.5. Общие вопросы медного гальванопокрытия | 833 |
| 29.6. Кислые сернокислые электролиты меднения и их эксплуатация | 843 |
| 29.7. Гальваническое осаждение припоя (олова-свинца) | 850 |
| 29.8. Электролитическое осаждение олова | 853 |
| 29.9. Электролитическое осаждение никеля | 855 |
| 29.10. Электролитическое осаждение золота | 858 |
| 29.11. Платиновые металлы | 862 |
| 29.12. Электролитическое осаждение серебра | 863 |
| 29.13. Лабораторный контроль процесса | 863 |
| 29.14. Благодарности | 866 |
| Литература | 866 |
| Глава 30. Прямая металлизация | 867 |
| 30.1. Технология прямой металлизации | 867 |
| Литература | 879 |
| Глава 31. Производство печатных плат на основе толстослойного химического меднения | 880 |
| 31.1. Толстослойное химическое меднение | 880 |
| 31.2. Аддитивный процесс и его варианты | 881 |
| 31.3. Аддитивный процесс металлизации рисунка | 881 |
| 31.4. Аддитивный процесс панельной металлизации | 887 |
| 31.5. Частично аддитивный процесс | 889 |
| 31.6. Химия химической металлизации | 890 |
| 31.7. Проблемы толстослойного химического меднения | 894 |
| Литература | 896 |
| Глава 32. Финишные покрытия печатных плат | 898 |
| 32.1. Введение | 898 |
| 32.2. Альтернативные виды финишных покрытий | 900 |
| 32.3. Облуживание с выравниванием горячим воздухом (HASL или HAL) | 901 |
| 32.4. Химическое осаждение никеля и иммерсионное золочение (ENIG) | 903 |
| 32.5. Органическое защитное покрытие (ОЗП) | 906 |
| 32.6. Иммерсионное серебро | 909 |

| | |
|--|------------|
| 32.7. Иммерсионное олово | 911 |
| 32.8. Другие виды финишных покрытий | 912 |
| 32.9. Совместимость сборки | 915 |
| 32.10. Методы испытания надежности | 919 |
| 32.11. Специальные темы | 920 |
| 32.12. Режимы отказов | 922 |
| 32.13. Сравнение свойств финишных покрытий | 926 |
| Литература | 927 |
| Глава 33. Паяльная маска | 928 |
| 33.1. Введение | 928 |
| 33.2. Тенденции и проблемы, связанные с паяльной маской | 929 |
| 33.3. Типы паяльной маски | 931 |
| 33.4. Выбор паяльной маски | 932 |
| 33.5. Нанесение и обработка паяльной маски | 938 |
| 33.6. Защита переходных отверстий | 951 |
| 33.7. Финальные свойства паяльной маски | 953 |
| 33.8. Условные обозначения и маркировка (номенклатура) | 953 |
| Глава 34. Технологии и процессы травления | 956 |
| 34.1. Введение | 956 |
| 34.2. Основные положения и процедуры травления | 957 |
| 34.3. Удаление резиста | 960 |
| 34.4. Травильные растворы | 962 |
| 34.5. Другие материалы, используемые в конструкции платы | 980 |
| 34.6. Прочие металлы | 981 |
| 34.7. Основы травления рисунка | 982 |
| 34.8. Оборудование и методы | 990 |
| Литература | 994 |
| Глава 35. Механическая обработка по контуру | 997 |
| 35.1. Введение | 997 |
| 35.2. Пробивка отверстий | 997 |
| 35.3. Вырубка и резка заготовок из фольгированных слоистых материалов | 1000 |
| 35.4. Фрезерование | 1003 |
| 35.5. Скрайбирование | 1012 |
| 35.6. Благодарности | 1015 |

Введение

С вступлением в силу директивы Европейского союза (ЕС) по ограничению использования опасных веществ (RoHS) в производстве печатных плат произошла беспрецедентная технологическая революция. Результатом этой революции стала новая технология, обычно обозначаемая термином «бессвинцовая». Этот термин читатель будет встречать в этом справочнике, хотя ограничения по применению затрагивают, дополнительно к свинцу, еще несколько материалов, перечисленных в гл. 1. Причиной выделения именно свинца является то, что ограничение его применения оказало наибольшее воздействие на промышленное производство плат, так как он использовался в пайке для межсоединений различных компонентов.

Эти изменения не были вызваны требованием рынка или технологическим прогрессом; скорее всего, они были узаконены с учетом пользы для общества в целом. Хотя влияние ограничения использования свинца при сборке печатных плат на глобальную окружающую среду было источником непрекращающихся дебатов, однако эти ограничения были приняты и стали учитываться при проектировании, изготовлении и монтаже печатных плат.

Оловянно-свинцовый припой был основой межсоединений с самого начала использования печатных плат, и все материалы и процессы разрабатывались с учетом использования именно этого материала. Переход на новые припои поставил много вопросов по процессам и технологиям, которые теперь должны были приспособливаться и изменяться, чтобы удовлетворить новым требованиям. Опыт прошлых лет и научно-техническая литература не могли дать ответ на все эти вопросы. Цель книги состоит в том, чтобы предоставить нужную информацию насколько возможно в более конкретном и подробном виде, используя промышленные стандарты там, где они существуют, и передовой опыт, имеющий технологическое обоснование и продемонстрировавший свою работоспособность там, где соответствующих стандартов нет.

Наиболее ощутимые изменения затрагивают металлургию припоя и контактирующих поверхностей. Все альтернативные сплавы припоя плавятся при температуре выше, чем эвтектический припой, и это потребовало разработки новых базовых материалов для изготовления плат, а также новых процессов монтажа, методов испытаний, критериев надежности и способов их контроля. Описание бессвинцовых альтернативных сплавов в книге начинается с выбора из таблицы химических элементов тех, которые могут стать кандидатами на использование, а также с анализа их влияния на свойства припоя. Физика и материаловедение должны помочь в выборе подходящей альтернативы эвтектическому припою. А чтобы читатель смог выбрать базовый материал для плат, пригодный для монтажа при повышенной температуре и для более высоких рабочих частот, авторы обращаются к химии материалов.

С момента обнародования природоохранной директивы ЕС проблема долгосрочной надежности изделий и методика ее контроля в этой новой ситуации поглотили огромный объем корпоративных ресурсов. Прогностические модели и архив данных были основаны на оловянно-свинцовых сплавах, а для бессвинцо-

вых аналогов требовались уже новые модели. В этом издании справочника был добавлен новый материал и расширен существующий, посвященный этой проблеме.

Хотя революция в электронной промышленности, вызванная бессвинцовой технологией производства печатных плат, привлекла к себе очень большое внимание, все же наряду с этим происходили и важные эволюционные изменения, результатом которых стали монтаж схем и размещение компонент повышенной плотности, а также их более быстрое изготовление. Благодаря этому платы с печатным монтажом продолжали проектироваться мельче, чем когда бы то ни было, или, наоборот, крупнее, чтобы удовлетворять требованиям конкретных приложений. Эта книга знакомит читателя со всеми этими достижениями. Продолжение глобализации производства печатных плат и сокращение времени выхода на рынок и запуска серийного производства все острее ставят вопрос о необходимости принятия международных стандартов, которые бы охватывали данные по монтажу, проектированию и связям и позволили бы каждому организационному элементу в цепи поставок функционировать эффективней, с минимальной ручной доводкой и минимальными задержками, обычно вызванными разъяснениями проекта. Для рассмотрения этих вопросов нами впервые были добавлены новые главы.

Были также включены дополнительные материалы по встроенным компонентам и комформным покрытиям, которые являются важными для многих областей их использования.

Настоящее издание справочника дает описание новых элементов обработки печатных плат, имеющих как революционное, так и эволюционное происхождение, по-прежнему сохраняя в качестве фундамента технологические основы их изготовления. Не имеет значения, насколько изошренным становится передовой край технологии, так как в центральной части всех печатных схем по-прежнему находится сквозное металлизированное отверстие в его разнообразных видах и способах применения. Оно остается одним из наиболее важных технических достижений XX века. По-прежнему, основываясь на металлизированном сквозном отверстии, технология создания печатных плат за прошедшие годы существенно развилась, став надежнее, эффективнее и воспроизводимей, но процесс, который был описан в первом издании этой книги, по-прежнему узнаваем в ее шестом издании. В результате те, кто знакомится с этой технологией впервые, все еще смогут найти вводную информацию, тогда как опытные специалисты найдут промышленные стандарты и передовой опыт для освоения самых последних достижений.

По мере своего развития промышленность изготовления печатных плат становится все более специализированной, что настоятельно требует стандартизации документов и методов связи, а также понимания конкретных возможностей всех поставщиков в общей цепи поставок. Результатом является достоверное знание всех возможностей и ограничений процесса на каждом его этапе, начиная с проектирования платы, четко учитывающее все эти обстоятельства, а согласованный критерий приемлемости при этом одобряется до того, как ответственность за плату переходит от проектировщика к производителю для ее сборки. Это порождает

дает сообщество людей, которые, занимаясь поставками, до этого не были близко связаны с технологией производства печатных плат и которые теперь обнаружили необходимые практические знания по их изготовлению в своей повседневной работе. Книга также предоставляет для них определенную полезную информацию. Они найдут не только базовую информацию, которая будет полезной для понимания технологических вопросов, но также инструкции по созданию цепи и ее управлению.

С технологической точки зрения предпочтительным для обозначения предмета этой книги является термин «печатный монтаж» или «монтаж травлением», но термин «печатные платы» уже вошел в разговорную речь многих народов мира как представляющий процесс изготовления и его продукцию, описываемые в этой книге. Поэтому мы будем использовать все эти термины как взаимозаменяемые.

Все изменения в технологии изготовления печатных плат нашли свое отражение в этой книге, что привело к тому, что более 75% ее глав были либо исправлены, либо являются новыми, свидетельствуя, что шестое издание содержит самую последнюю информацию.

Продолжающееся сотрудничество с руководством и сотрудниками Ассоциации связей в электронной промышленности (IPC) и их поддержка являются неоценимыми не только для этого издания, но и для всех предыдущих изданий этого справочника. Ассоциация IPC под руководством Рэя Притчарда, в настоящее время ушедшего в отставку, и Дитера Бергмана в 2007 г. отметила свое 50-летие, и невозможно переоценить вклад, который она внесла не только в электронную промышленность, но и в современный мир в целом, который все в большей степени опирается на достижения электроники. Особая признательность выражается Джеку Кроуфорду за помощь в подборе и предоставлении материалов IPC, которые были важны при подготовке этого издания.

В завершение хотелось бы выразить свою признательность и благодарность авторам, которые уделили свое время и поделились опытом при подготовке глав этой книги. Все они внесли неоценимый вклад в развитие технической литературы и электронной промышленности.

Клайд Е. Кумбс-младший, главный редактор

ЧАСТЬ I

ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВО ПО ОГРАНИЧЕНИЮ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВИНЦА

ГЛАВА I

ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВО И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ

Gary M. Freedman

Hewlett-Packard Corporation, Business Critical Systems, Singapore

1.1. Обзор законодательства

Увеличение количества производимой продукции и быстрое старение бытовой и промышленной электроники способствовали составлению Европейским союзом (ЕС) двух разделов законодательства по защите окружающей среды, которые оказывают воздействие на электронную промышленность:

- Директива 2002-96-ЕС от 27 января 2003 г. Европарламента и Совета по отходам электрического и электронного оборудования, сокращенно обозначается WEEE;
- Директива 2002-95-ЕС от 27 января 2003 г. Европарламента и Совета Европы, которая ограничивает применение определенных опасных веществ в электрическом и электронном оборудовании, сокращенно обозначается RoHS (ограничение использования опасных веществ).

1.2. Отходы электрического и электронного оборудования (WEEE)

Эта директива Европейского союза полностью вступила в силу в августе 2005 г. Она требует от производителей, продающих электрическое или электронное оборудование странам, являющимся членами Европейского союза, нести ответственность за утилизацию в конце срока эксплуатации своих изделий. Эта Директива ограничивает количество различных материалов, закапываемых в землю в виде мусора, разрешает их повторное использование, а также заставляет проектировщиков оборудования и материалов в большей степени учитывать вопросы защиты окружающей среды. Конечным результатом являются тарифы на покупку электронной продукции, которые должны помочь с затратами на утилизацию и поощряющие производителей электроники на установление программ по возвращению для повторного использования. Перечень затронутых товаров очень длинный. Табл. 1.1 содержит примеры таких товаров.

Таблица 1.1. Примеры продукции, затрагиваемой директивой WEEE

| Категория | Примеры |
|--|---|
| Крупное хозяйственное оборудование | Моечные машины, сушильные аппараты, рефрижераторы, морозильные камеры, микроволновые печи, кондиционеры воздуха и т.п. |
| Мелкое хозяйственное оборудование | Пылесосы, тостеры, утюги, часы, фены и т.п. |
| Оборудование по ИТ и телекоммуникациям | Компьютеры, принтеры, мониторы, копировальное оборудование, калькуляторы, устройства накопления данных, проекторы, телефоны и т.п. |
| Бытовая аппаратура | Радио, телевизоры, видеокамеры, аудиооборудование, музыкальные инструменты и т.п. |
| Осветительное оборудование | Колбы светильников, лампы, другое осветительное оборудование и т.п. |
| Электрические и электронные приборы | Инструменты для сверления, пиления, шитья, заточки, перемалывания, шлифовки, измельчения, резания, стрижки, прорезывания отверстий, перфорирования, фальцовки, сгибания, клепки, забивания гвоздей, сварки, пайки и т.п. |
| Игрушки, оборудование для занятий спортом и отдыха | Электрические поезда; комплекты для автогонок; консоли для видеоигр; компьютеры для мотогонок, вождения, бега, гребли и т.п.; спортивное оборудование с электрическими или электронными компонентами; игровые автоматы и т.п. |
| Медицинское оборудование | Оборудование для радиотерапии, кардиологии, диализа, а также ядерной медицины, вентиляции легких; лабораторное оборудование для экстракорпорального оплодотворения, диагностики, анализаторы, морозильные камеры и т.п. |
| Приборы по контролю и управлению | Детекторы дыма, термостаты, приборы для измерения и взвешивания, лабораторное оборудование, оборудование промышленного контроля и т.п. |
| Автоматические дозаторы | Автоматические дозаторы для горячих напитков, холодных напитков, бутылок, консервных банок, твердых продуктов, денег и т.п. |

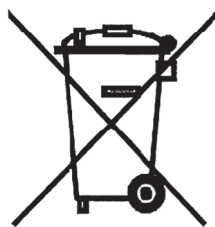


Рис. 1.1. Символ, обозначающий раздельный сбор для последующей утилизации

Эта Директива также требует, чтобы символ, показанный на рис. 1.1, помещался на видном месте изделия, предназначенного для раздельного сбора после окончания срока службы, с целью последующей утилизации.

1.3. Ограничение использования опасных веществ (RoHS)

Второй фрагмент законодательства имеет наибольшее воздействие на электронную промышленность. Директива RoHS делает незаконным производство или импорт в страны, являющиеся членами ЕС, любого электрического или электронного обо-

рудования, которое содержит ограничиваемые в использовании материалы, т.е. материалы, которые были основными в электронной промышленности.

Эта Директива полностью вступила в силу 1 июля 2006 г. Ее полномочия имеют широкую область и применяются ко всему электрическому и электронному оборудованию, если только нет особого указания основного законодательного органа или соответствующих исключений. Определение понятий внутри законодательства по RoHS происходит очень медленно; некоторые исключения все еще требуют полного определения, тогда как другие уже были изменены. Неточности законодательства привели к задержке его принятия электронной промышленностью. В результате все еще отсутствует набор промышленных стандартов на материалы и оценка альтернативных материалов, пригодных для производства или обеспечивающих долгосрочную надежность.

В гл. 45, посвященной материалам для пайки, перечисляются и описываются альтернативные материалы для замены оловянно-свинцового припоя. В гл. 58 и 59, посвященных надежности, предоставляется информация по методам прогнозирования срока службы.

1.3.1. Ограничение использования материалов RoHS

Директива RoHS нацелена на шесть широко используемых материалов (табл. 1.2).

Таблица 1.2. Материалы, затронутые законодательством «Ограничение использования опасных веществ»

| Вещество | Символ или аббревиатура | Максимальная допустимая величина (масс. %) | Использование в электронике |
|--------------------------------------|-------------------------|--|---|
| Шестивалентный хром | Cr ⁶⁺ | 0,1 | Покрытия, особенно для пассивации поверхности нестабильных к воздействию окружающей среды металлов, пигменты и пластики; красящие вещества, такие как хромовокислый свинец; шестивалентное хромовокислое покрытие для металлизированных оболочек, клеммы, зажимы и винты |
| Кадмий | Cd | 0,01 | Покрытия, пигменты чернил, пигменты красителей, батарейки, детекторы и схемы на толстых пленках |
| Ртуть | Hg | 0,1 | Пигменты, катализаторы отвердевания для пластмасс и пен, переключающие контакты, батарейки, стабилизаторы PVC и красящее вещество |
| Свинец | Pb | 0,1 | Поверхностное покрытие для припоя PWB; контакты компонент; поверхностные покрытия; стабилизаторы PVC и красители; пластмассовые красители, такие как хромовокислый свинец; кабели и электропроводка; нанесение покрытий на металлические листы (для уменьшения риска образования Zn усов); катализатор сплавов стали, меди, алюминия и т.п. |
| Полиброминированный бифенил | PBB | 0,1 | Ингибитор горения монтажной платы и для других электрических изоляторов |
| Полиброминированный дифениловый эфир | PBDE | 0,1 | Ингибитор горения монтажной платы и других электрических изоляторов, а также для пластмасс |

1.3.2. Анализ соответствия RoHS

Эта Директива делает акцент на мельчайшей однородной части или материале, который может быть отделен из массы компонентов или их сборки. В качестве примера рассмотрим случай интегральной схемы (IC) в пластмассовом корпусе с медной (Cu) выводной рамкой, покрытой некоторым веществом для возможности выполнения пайки. Поверхностное покрытие рамки будет оцениваться на соответствие требованиям RoHS отдельно от корпуса в целом или даже от веса самой выводной рамки. Вместо этого весовая доля Pb поверхностного слоя покрытия будет оценена по отношению веса любого Pb к весу поверхностного слоя покрытия поверх рамки выводов. Аналогичным образом любой Pb, находящийся в сплаве с Cu выводной рамки, будет оцениваться на основании общего веса анализируемого Pb к общему весу Cu рамки выводов. Также и герметик интегральных схем будет оцениваться для веса любого PBB или PBDE по сравнению с весом герметика, в котором он содержится или слоем которого он был покрыт.

1.3.3. Методы анализа на соответствие требованиям RoHS

Законодательство в области RoHS не устанавливает определенных рекомендаций для проведения анализа, так же как не существует среди специалистов электронной промышленности единого мнения относительно стандартного метода отбора при анализе на определение соответствия законодательству в области RoHS. Простая выборочная проверка при жидкостной химической обработке может быть проведена на определение присутствия или отсутствия Cr⁺⁶, Hg, Cd и Pb. Эти тесты при их правильном проведении имеют высокую чувствительность для осуществления качественного анализа. Атомная абсорбционная спектрофотометрия (AAS), рентгеновский флуоресцентный анализ (XRF), спектроскопия энергетической дисперсии (EDS или EDAX), инфракрасная (ИК) или ультрафиолетовая (УФ) спектрофотометрия, а также хромато-газ-спектрометрия (GC-MS, которая эффективна для PBB или PBDE) являются лишь несколькими из перечня методов, требующих дорогостоящее аналитическое оборудование. С их помощью могут быть получены количественные данные, но капитальные затраты при этом будут очень высоки и, кроме того, потребуется высококвалифицированный персонал и использование доступных для калибровки эталонов.

1.3.4. Исключения и запрещения

Законодательство в области RoHS освобождает многочисленные приложения от ограничения на использование четырех заданных элементов. Большинство из них не подходят к обсуждению темы пайки при изготовлении печатных плат. Подходящие же к этой теме приложения перечислены в табл. 1.3.

Следует заметить, что даже в тех случаях, когда Pb удален из компонента или припоя, корпус должен также соответствовать требованиям RoHS.

Хотя это кажется парадоксальным, но Директива устанавливает исключение для основанных на свинце межсоединений, когда содержание Pb превышает 85%.

Таблица 1.3. Исключения в области RoHS согласно второй поправке законодательства в области RoHS*

| |
|---|
| Свинец в припоях с высокой температурой плавления (т.е. сплавы на основе свинца с 85%-ным или более высоким содержанием свинца) |
| Свинец в припоях для серверов; системах хранения или системах массивов хранения; оборудовании сетевой инфраструктуры для коммутаций, сигнализации и передачи, а также сетевого управления для телекоммуникаций |
| Свинец в керамических частях электроники (например, пьезоэлектронные устройства) |
| Свинец в качестве материала покрытия для теплопроводного модуля в виде полукруглого кольца |
| Свинец в припоях, содержащих более двух элементов для соединения между штекерами и корпусом микропроцессора с содержанием свинца свыше 80% и менее 85% по весу |
| Свинец в припоях для выполнения жизнеспособного электрического соединения между полупроводниковым кристаллом и носителем внутри интегральной схемы с корпусами, монтаж которых выполнен по технологии перевернутого кристалла |
| Кадмий и его соединения в электрических контактах и покрытиях кадмием, за исключением приложений, запрещенных Директивой 91-338-ЕЕС |

* *Источник:* L 280-18 EN *Официальный журнал Европейского союза* 25.10.2005, 2-е исправленное приложение к Директиве 2002-95-ЕС.

Это исключение предназначается для специальных устройств с использованием технологии керамических шариковых выводов (СВГА), керамических корпусов со столбиковыми матричными выводами (ССГА), устройств с монтажом методом перевернутого кристалла и других межсоединений в схемах с высоким содержанием свинца. СВГА и ССГА основываются на шариках или столбиках с высоким содержанием свинца, соответственно, которые плавятся при более высоких температурах, чем эвтектический сплав свинца и олова и поэтому не будут разрушаться при пайке расплавлением полуды. Поскольку эти керамические устройства являются тяжелыми, то при разрушении шариковых выводов или столбиков под ними может произойти короткое замыкание. Обычно требуется несколько лет, чтобы определить воздействие, которое оказывают изменения в металлургии на надежность корпусов интегральных схем. В случае устройств с матрицей соединений по всей поверхности основания корпуса IC соединения припоем с высоким содержанием свинца являются неотъемлемой составной частью корпуса, а не простым соединением вывода компонента и контактной площадкой на печатной плате. Более того, эти корпуса обычно используются в высокоуровневых системах, таких как телекоммуникационное оборудование, а также в мощных компьютерах. Законодательство в области RoHS исключает подобное оборудование из ограничений по использованию Pb вплоть до 2010 г. Между тем изготовители корпусов работают над поиском и испытанием надежной замены для основанных на свинце припоев, используемых в высококлассных корпусах. Некоторые меньшие по размеру интегральные схемы уже переключились на использование бессвинцовых межсоединений. Другими исключениями, выделенными в используемой в настоящее время Директиве RoHS, являются Cd и Pb в батарейках, Pb в экранах видеомониторов и Hg в лампах флуоресцентного света. Любопытно заметить, что законодательство в области RoHS включает в поле своего действия Pb в припоях, даже если припой использует Pb в незначительных количествах (по оценкам, он составляет менее 10% мирового использования Pb). И наоборот,

исключенные из области действия этого законодательства свинцово-кислые аккумуляторные батареи, являются крупным потребителем Pb, на долю которых приходится более 85% мирового использования Pb.

В августе 2006 г. были разрешены дополнительные исключения для директивы RoHS. Как это будет следовать из материала в последующих главах, свинец используется для уменьшения или устранения появления оловянных усов (металлических дендритов олова, которые вырастают на поверхностях из чистого олова). Металлические усы, подобные тем, что возникают из олова или цинка, известны как факторы, представляющие угрозу надежности из-за короткого замыкания между противоположно заряженными проводниками. Именно поэтому законодательство в области RoHS сделало поправку, позволяющую использовать свинец в поверхностных покрытиях компонентов с шагом $<0,65$ мм для подавления оловянных усов. Эта методика применяется для выводных рамок из NiFe (сплав 42, также известный как ковар), а также для компонентов с медными выводными рамками. Странно, что это исключение не охватывает разъемы.

1.4. Воздействие законодательства в области RoHS на промышленное изготовление печатных плат

Никогда раньше еще не было столь радикального изменения в производстве электроники, как это имело место в случае законодательных директив WEEE и RoHS, особенно последней. Любая промышленность находится под влиянием либо уже используемых процессов и материалов, либо поиска пригодных к использованию вариантов.

1.4.1. Компоненты

В общем случае, интегральные схемы, пассивные устройства и разъемы не рассчитаны переносить резкие скачки температуры, намного большие, чем температура плавления сплава Sn-Pb, и рассчитаны только на кратковременные циклы нагревания и охлаждения. Изготовители интегральных схем и производители их компонентов вынуждены были провести определенную работу, чтобы понять воздействие более высокотемпературных процессов, требуемых для бессвинцовой пайки.

Известно, что помещенные в пластмассовый корпус компоненты поглощают воду из атмосферы. При нагревании этих компонентов до температуры пайки расплавлением полуды происходит расширение воды и это может вызвать растрескивание корпуса. Это явление широко известно как «приближение хлопка», поскольку пластмассовый корпус часто пузырится до растрескивания и остается деформированным после охлаждения. Во избежание этого упакованные в пластмассовый корпус компоненты «просушивают» до пайки. Режимы повышенных температур большинства бессвинцовых припоев будут усугублять проблему приближающегося хлопка, требуя большего внимания к циклам просушки компонентов. Кроме того, повышенная температура пайки методом расплавления полуды без использования свинца вынудила пересмотреть классификационную таб-

лицу для чувствительности корпуса к влажности. Это особенно актуально для компонентов, которые не герметизированы. Для них также необходимы более длительные циклы прогревания.

Многие компоненты, такие как интегральные схемы и пассивные устройства (сопротивления, емкости и т.п.), могут быть не приспособлены к процессам с повышенной температурой, которые обычно связаны с использованием бессвинцовой пайки. Повышенная температура может привести к изменению электрических характеристик, образованию трещин, плавлению или к другим повреждениям электронных компонентов или ухудшению их функциональных свойств. Только компоненты, сертифицированные производителем этих деталей или пользователем, могут рассматриваться для бессвинцового монтажа печатных плат.

Производитель каждого компонента устанавливает его чувствительность к влажности, которая указывает, как долго этот компонент может храниться в среде обычного рабочего помещения до того, как потребуется плановый цикл его прогревания. Подробную информацию по классификации чувствительности любого из компонентов к влажности по условиям его хранения и требованиям к прогреванию можно найти в объединенных промышленных стандартах J-STD-020 [1] и J-STD-033 [2].

Дополнительно к изменению чувствительности к влажности составляющие слоистых материалов, герметизирующие вещества или формовочные составы могут иметь склонность к потере функциональных свойств в результате воздействия повышенных температур в течение продолжительного времени их воздействия. Есть и другие отрицательные факторы, связанные с переходом на бессвинцовые припои. Большинство бессвинцовых припоев имеют более низкую смачиваемость (медленнее распределяются на предназначенной для пайки поверхности), гранулируются (что не является обязательно отрицательным фактором, но отличается от того, что обычно воспринимается как положительный фактор для соединений с помощью припоя на основе свинца).

С введением бессвинцовых припоев в качестве базовой технологии электрические компоненты, предназначенные для поверхностного монтажа, перекалифируются или переформируются, чтобы выдерживать повышенные температуры, необходимые для бессвинцовой обработки. Аналогичным образом организации, занимающиеся стандартами, такие как Объединенный инженерный совет по электронным устройствам (JEDEC), переопределили максимально безопасный температурный режим для электронных компонентов из-за повышенной температуры пайки расплавлением полуды, которая требуется при исключении свинца. Инженер-технолог теперь должен обращаться к техническим условиям производителя электронных компонентов, чтобы установить безопасные параметры для пайки расплавлением полуды в случае использования бессвинцовой технологии.

1.4.2. Стандарт качества работы

Наиболее широко используемый стандарт качества работы IPC-A-610 был переписан, чтобы включить в него обследование бессвинцовых монтажных сборок, выполненных с помощью пайки. Эти изменения были внесены в версии D этого документа. Персонал технического контроля нуждается в подготовке, чтобы быть

в состоянии уделять должное внимание всем внесенным изменениям и пересмотренному критерию приемочного контроля.

1.4.3. Слоистые платы

Многие из широко используемых многослойных печатных плат (PWB), предназначенных для монтажа с помощью пайки с применением свинца, не смогут выдержать повышенные температуры, применяемые без использования свинца. Только многослойные платы с определенной температурой стеклования (T_g) и определенной температурой разложения (T_d) должны исследоваться для выяснения возможности их использования в бессвинцовой технологии. Многослойные платы PWB вероятнее всего будут провисать во время выполнения бессвинцовой пайки методом расплавления полуды. Некоторые могут даже темнеть или расслаиваться при воздействии температур, необходимых для бессвинцовой пайки. Для бессвинцовой пайки необходимо уделять пристальное внимание выбору материалов и их испытанию. Для использования многослойных плат при повышенных температурах требуется изменение последовательности расположения слоев, чтобы уменьшить вероятность искривления, обугливания, расслоения, провисания, сквозного или кругового образования трещин и т.п. Высокотемпературные многослойные платы PWB имеются в наличии, но они обычно стоят значительно дороже, чем те, что используются для обработки с использованием припоя из олова и свинца.

1.4.4. Флюс для пайки

Некоторые из используемых флюсов для свинцово-оловянного припоя могут быть несовместимы с повышенными температурами, необходимыми для бессвинцовых сплавов. Необходимые для пайки материалы во флюсе могут выпариться, разложиться или окислиться до того как произойдет полное флюсование. Кроме того, флюс должен оставаться на соединяемых вместе металлических поверхностях все время, пока идет процесс пайки расплавлением полуды, поскольку он служит барьером кислороду. Там, где флюс пропадает слишком быстро, может произойти повторное окисление припоя и соединяемых поверхностей, что замедлит смачивание припоя. Флюсы для бессвинцовых припоев должны подбираться с учетом их состава и повышенной температуры пайки, а также для бессвинцовых поверхностных покрытий на площадках выводов и контактных площадок PWB.

1.4.5. Требования по гигиене

Определенная польза для здоровья связана с удалением свинца из смонтированных печатных плат. Токсичность свинца убедительно подтверждена различными публикациями, а наиболее серьезные проблемы связаны с непосредственным попаданием внутрь организма содержащих свинец материалов (например, проглатывание детьми оберток конфет с красками на основе свинца или свинец в питьевой воде из водопровода, запаянного содержащим свинец припоем). Этот накапливающийся тяжелый металл очень медленно растворяется в организме че-

ловека. Хотя существуют противоречивые доказательства того, как свинец из припоя может вымываться в грунтовые воды из свалок мусора, создавая проблему свинцового загрязнения, все же каждый из нас заинтересован в исследовании альтернативных сплавов для припоя и отказе от использования припоев на основе свинца.

Операции монтажа печатных плат определенно выиграют оттого, что технический персонал будет соприкасаться с более низким уровнем токсичности. Окалина припоя, создаваемая во время пайки волной припоя или возбуждаемая при выполнении обслуживания пайки волной припоя, является основным источником вдыхаемого свинца на заводах-изготовителях. Переносимая по воздуху окалина создается также при выполнении операций разбрызгивания припоя, доработки горячим воздухом и даже при пайке вручну. Переход на бессвинцовую технологию также устранил проблемы, связанные с проглатыванием мелких частиц свинца с загрязненных рук.

1.4.6. Стоимость замены свинца

В США и других странах некоторые законодательные инициативы, нацеленные на ограничение использования свинца, закончились неудачей. Эта неудача дала толчок исследованию по замене припоя другими сплавами. Несколько корпораций и университетов разработали бессвинцовые припои, часть которых была запатентована. Как в случае с любой запатентованной деталью или запатентованным процессом, права на использование изобретения некоторое время остаются за изобретателем или финансировавшей исследование корпорацией, так что некоторые из этих сплавов не могут использоваться свободно. В некоторых случаях только незначительные изменения в составе сплава отделяют общедоступные сплавы припоя от запатентованных композиций припоя. Стоимость патентной лицензии для конечного пользователя либо для производителя припоя в большой степени ляжет нагрузкой на конечного пользователя.

Почти в каждом случае стоимость бессвинцового припоя как минимум на 20% выше, чем оловянно-свинцового сплава. Многослойные PWB стоят еще дороже, поскольку состоят из многих компонентов. Вместе с необходимостью использовать повышенные температуры для пайки расплавлением полуды увеличиваются затраты на энергию. Существенные затраты обусловлены также подготовкой персонала, способного заниматься заменами при переходе на бессвинцовую технологию. Также могут понадобиться отдельные линии для свинецсодержащих и бессвинцовых припоев.

Как олово, так и свинец находятся в избытке, легко рафинируются и поэтому являются недорогими в использовании. Совсем по-другому обстоит дело в случае с некоторыми составляющими бессвинцовых припоев, такими как индий (In), галлий (Ga) и серебро (Ag). Даже висмут (Bi) является малой составляющей свинцовой руды и в основном получается в процессе его рафинирования. При пайке волной припоя требуется большое количество припоя (сотни фунтов) для заполнения емкости припоя (ванны). Стоимость и доступность некоторых бессвинцовых сплавов делают их массовое использование непрактичным. Сравните припой

Sn-Pb стоимостью примерно 1,50 долл. за фунт с Sn-0,7Cu по цене 2,30 долл. за фунт и с Sn₂Ag_{0,8}Cu_{0,5}Sb по цене 4 долл. за фунт. Следует признать, что поскольку свинец является тяжелым элементом, то цена за фунт не самая лучшая мера; цена за единицу объема является в этом случае более предпочтительной.

Несмотря на это, отказ от бинарного сплава олова со свинцом будет означать существенно более высокие стоимости сырьевых материалов. Кроме того, при выполнении пайки волной припоя волна расплава будет растворять определенные поверхностные покрытия, вещества которых, накапливаясь, могут изменять состав припоя. Различные сплавы припоя имеют разные свойства растворения металла. Поэтому использование одного и того же бессвинцового сплава припоя для пайки волной припоя, так же как и в случае пайки растворением полуды, может оказаться практически нецелесообразным.

Некоторые очевидные дополнительные затраты и последствия перехода на бессвинцовые припои упоминались ранее в этой главе. Однако существуют другие возможные и скрытые затраты. Оборудование для пайки может не иметь ширину энергетической зоны, необходимую для использования повышенных температур, требуемых для некоторых бессвинцовых сплавов. Может оказаться, что для печей, используемых для пайки расплавом полуды, потребуются иные материалы конструкции, чтобы выдерживать длительные воздействия повышенных температур. Втулки вентилятора и полимерные уплотнители для поддержания инертной атмосферы могут не выдержать намного более высокие температурные режимы, чем были необходимы для обработки сплава олова и свинца. Такие же соображения применимы и к пайке волной припоя. Паяльники для пайки вручную потребуют более высокую температуру нагревания, и еще больше плат может пойти на лом из-за локализованного обугливания, появляющегося при попытке добиться пайки расплавлением полуды при ручной пайке или при выполнении ремонта. Материалам плат, флюсам и другим сопутствующим материалам может потребоваться новый состав, что также повысит затраты.

1.4.7. Изменения оборудования

В некоторых случаях потребуются изменения в оборудовании для пайки с повышенными температурами и для контактов с материалами, отличными от олова и свинца. Подобные изменения подробно описываются в гл. 47.

1.4.8. Отходы в лом и ошибки выбора материала

В некоторых случаях появятся затраты на разделение материалов (содержащие и не содержащие свинец) и связанный с этим рост рабочего помещения для проведения двух инвентаризаций (материалов со свинцом и без него). Неподходящие материалы должны быть отправлены в лом или распроданы тем, кто все еще использует процессы с применением свинца. Ожидается, что на начальной стадии перехода на бессвинцовые технологии при инвентаризации деталей они могут быть случайным образом перемешаны, а это может повлиять на надежность готовых изделий и сделает эти изделия неприемлемыми для импорта в Европу после 1 июля 2006 г. из-за принципов Директивы в области RoHS.

1.4.9. Обучение

Каждый сектор производства плат в электронной промышленности сегодня затронут изменениями, вызванными бессвинцовой технологией: освоением нового типа пайки или проверкой соединений, выполненных с ее помощью; электрическим тестированием; инвентаризацией материалов; проверкой ведомости материалов; составлением требований к поставкам, инвентарным распределением и проверкой поступающих материалов. Адаптация Директивы RoHS и бессвинцовых стандартов к сборным печатным платам определенно потребует самых широкомасштабных изменений. Большое внимание должно быть уделено обучению персонала на каждом уровне изготовления монтажной печатной платы (РСА) и ее технической поддержки.

1.4.10. Испытание надежности

Замена материалов и припоев для реализации ограничения использования свинца делает необходимым испытание надежности бессвинцовых сборок, предполагая ее сопоставимость с надежностью монтажа на основе олова и свинца. Методы проверки надежности, параметры и модели должны соответствовать свойствам материалов бессвинцовых сборок.

1.4.11. Внутрисхемный тест (ICT)

Поскольку температура процесса сборки для большинства не содержащих свинец материалов выше, чем для близкого к эвтектическому припою из Sn и Pb, то любые остатки флюса при технологии без чистки после его использования сильнее запекаются на поверхностном металле печатной платы PWB. Это препятствует электроиспытанию зондовым контактом. Даже с современными, не требующими чистки пастами припоя и с применением припоя из Sn и Pb осуществление зондового контакта может быть проблематичным. Часто остатки, которые покрывают контрольные точки, вынуждают производить целый цикл приладок зонда, чтобы проникнуть сквозь остатки флюса.

1.5. Перспективы бессвинцового монтажа

Относительные преимущества отказа от использования или уменьшения применения свинца остаются спорными. Некоторые исследования показали отрицательный результирующий эффект из-за энергоемких материалов и процессов, требуемых для изготовления и перехода на бессвинцовые материалы. Какими бы ни были долгосрочные перспективы воздействия на окружающую среду, очевидно, что краткосрочные последствия уже создают техническую проблему обеспечения надежности и рентабельности сборок монтажных плат. Не существует простой замены сплаву Sn-Pb, как не существует единого мнения относительно возможности промышленного применения однокомпонентного припоя. Наиболее обещающие сплавы имеют существенные проблемы из-за стоимости исходных ма-

териалов, ограниченной надежности и еще из-за не выясненного до конца взаимодействия с другими материалами. Потребовалось много лет, чтобы понять свойства припоя из Sn и Pb, его металлургическое поведение, свойства паяных соединений и разработать методологию пайки. Новым припоям предстоит пройти тщательное обследование для определения ключевых характеристик процесса его использования и надежности. Поскольку система взглядов и понятий для характеристики припоев и надежности отработывалась в течение векового применения припоя из Sn и Pb, то цикл развития для бессвинцового припоя должен быть существенным образом рационализирован. С другой стороны, быстрый переход на бессвинцовый припой несет с собой риски в отношении эффективности нового процесса и его контроля, а также долгосрочной надежности конечной продукции. Эти риски потребуют непрерывных проверок выбранных сплавов для припоя, использованных поверхностных покрытий, условий выполнения пайки, совместимости материалов (печатных плат, корпуса интегральных схем и т.п.), изменения требований к объему припоя для достижения прочности паяного соединения и даже замены некоторого используемого оборудования. Гл. 45 «Материалы припоя» содержит подробное описание бессвинцовых сплавов и материалов, в ней предлагается несколько вариантов выбора подходящих материалов, а также приводятся их характеристики.

Поскольку практически все бессвинцовые сплавы имеют повышенную температуру плавления, то требуемая для этого дополнительная энергия приводит к повышению затрат на использование бессвинцовой пайки. Необходимые изменения в оборудовании для обработки по новой технологии будут описаны в гл. 46 и 47.

Кроме того, поскольку основанные на свинце припои будут продолжать использоваться согласно директиве RoHS до 2010 г., то другой вероятной причиной неполадок может стать случайное использование бессвинцового припоя с корпусами, содержащими свинец, или припоя на основе свинца с не содержащими свинец корпусами. Хотя и существует некоторая совместимость предыдущих версий с последующими и наоборот в отношении припоев, корпусов и поверхностных покрытий, существуют все же и определенные трудности. Некоторые корпуса, предназначенные к использованию с применением свинца, не смогут вынести повышенных температур пайки бессвинцовыми припоями. В случае бессвинцовой платы с матрицей шариковых выводов (BGA), которая паяется припоем со свинцом, или наоборот, уже известно, что это приведет к отрицательному влиянию на результирующую надежность паяных соединений с применением главного кандидата на замену содержащего свинец припоя. Увеличение предела прочности на растяжение наряду с ростом хрупкости обычно проявляется в системе олово-серебро-медь – главном кандидате на замену.

Китай, Япония и Корея выдвинули законодательные инициативы, которые принимают форму, аналогичную инициативе Евросоюза, а именно директивам WEEE и RoHS. То же самое относится к нескольким штатам США. И от того факта, что бессвинцовая пайка будет основной технологией всех будущих межсоединений в электронике, уже никуда не уйти.

Литература

1. J-STD-020: Объединенный IPC-JEDEC стандарт для классификации чувствительности к влажности — пайки полудой для негерметичных твердотельных компонентов с поверхностным монтажом (Объединенный инженерный совет по электронным устройствам (JEDEC), Арлингтон, Виржиния, США и Ассоциация связей в электронной промышленности, IPC, Баннокберн, Иллинойс, США).
2. J-STD-033: Объединенный стандарт IPC-JEDEC для обработки, упаковки, транспортировки и использования чувствительных к влажности и пайке расплавлением полуды компонентов с поверхностным монтажом (JEDEC, Арлингтон, Виржиния, США и IPC, Баннокберн, Иллинойс, США).

ЧАСТЬ 2

ДВИЖУЩИЕ СИЛЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

ГЛАВА 2

МОНТАЖ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ В КОРПУСЕ И МЕЖСОЕДИНЕНИЯ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ¹

Clyde F. Coombs Jr.
Editor-In-Chief, Los Altos, California

Happy T. Holden
Westwood Associates, Loveland, Colorado

2.1. Введение

Для формирования функциональной и работоспособной системы необходимо, чтобы все электронные компоненты были соединены между собой и собраны воедино. Проектирование и производство этих межсоединений эволюционировали в отдельную дисциплину, получившую название *монтаж электронных схем в корпусе*. С начала 1950-х гг. основным стандартным блоком электронного монтажа является плата с печатным монтажом (PWB), и такое положение дел сохранится в обозримом будущем. Эта книга обрисовывает основные подходы процессов проектирования и производства, необходимые для изготовления PWB.

Данная глава описывает основные соображения при выборе методов межсоединений для электронных систем, а также допустимые компромиссы. Основной акцент делается на анализе влияния, которое может оказать выбор различных типов печатных плат и вариантов проектирования на стоимость и рабочие характеристики конечной электронной продукции.

2.2. Оценка революционных межсоединений (межсоединений высокой плотности)

Совершенствование рабочих характеристик компонентов и рост плотности выводов параллельно с уменьшением размера корпусов требовали от технологий со-

¹ Взято из работы Coombs, Clyde F. Jr., *Printed Circuits Handbook* (4-е издание), гл. 1 «Электронный монтаж и межсоединения» (McGraw-Hill, New York, 1996).

здания PWB соответствующих путей увеличения плотности межсоединений на подложке. С появлением и усовершенствованием таких технологий сборки, как матрица шариковых выводов (BGA), монтаж в корпусе, по размеру сопоставимом с кристаллом (CSP), а также бескорпусный монтаж кристаллов на печатной плате (COB) традиционная технология достигла той точки, когда стала необходима разработка альтернативных путей обеспечения высокой плотности межсоединений (см. гл. 3 и 4 для ознакомления с подробным описанием используемых компонентов и технологий сборки).

Иногда это называют межсоединениями высокой плотности (HDI), революционными межсоединениями или революционной плотностью, потому что продолжать делать одно и то же, но только меньшего размера, дальше было недостаточно.

2.2.1. Плотное межсоединение элементов

Диапазон проблем, связанных с плотностью межсоединений, не всегда различим, но диаграмма [1] на рис. 2.1 может помочь каждому определить и понять его. Эта диаграмма описывает взаимосвязь между плотностью сборки компонентов в корпус, плотностью поверхностного монтажа (SMT) и плотностью PWB. Как можно видеть, все три элемента взаимосвязаны. Изменение одного имеет существенное влияние на суммарную плотность межсоединений. Наглядные показатели этого следующие.

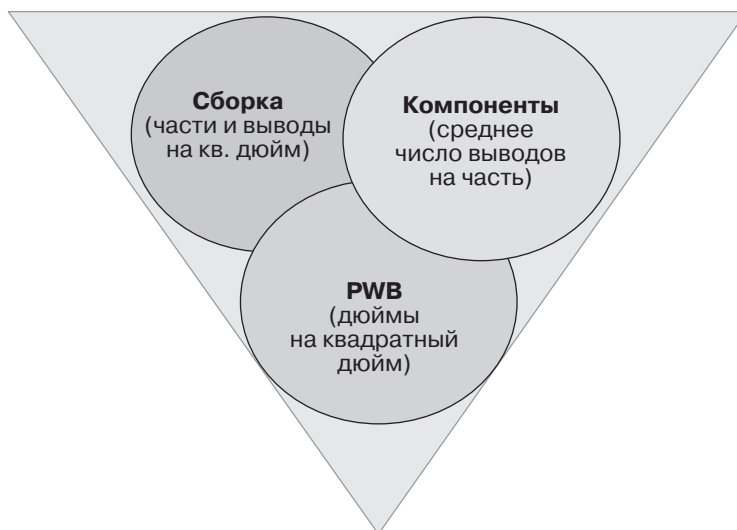


Рис. 2.1. Представление показателей сборки, компонентов и PWB и их общей взаимосвязи друг с другом

- *Сложность блока*: мера сложности сборки компонентов при поверхностном монтаже, выражаемая в частях на квадратный дюйм и в выводах на квадратный дюйм.

- *Сложность сборки компонентов в корпусе*: степень сложности отдельных компонентов, измеряемая средним количеством выводов (I/O) на одной части.
- *Плотность платы с печатной электропроводкой*: объем электропроводки, который имеет печатная плата, измеряемый средней длиной разводок на квадратный дюйм площади этой платы, включая все слои сигнальной разводки. Измеряется в дюймах на квадратный дюйм.

2.2.2. Технологическая карта межсоединений

Для визуального представления взаимосвязанности этих трех элементов обратимся к рис. 2.2. На нем изображены эти элементы в качестве осей трехмерной технологической карты, которая определяет переход от традиционных конструкций PWB к передовым технологиям и показывает, как изменение только одного из этих трех элементов может увеличить или уменьшить суммарную плотность полной электронной корпусной сборки.

Для описания сложности блока компонентов все соединения его компонентов (I/O), включая обе стороны сборки, а также лапки на его кромках или контакты, делятся на общее число компонентов блока. Результирующие средние числа выводов (I/O) в расчете на одну часть дают ось *x* на рис. 2.2. Горизонтальная овальная форма показывает, как сложность компонентов может меняться от двух выводов в расчете на одну часть в дискретных элементах схем до очень большого их числа, которые можно видеть на BGA и специализированных интегральных схемах.

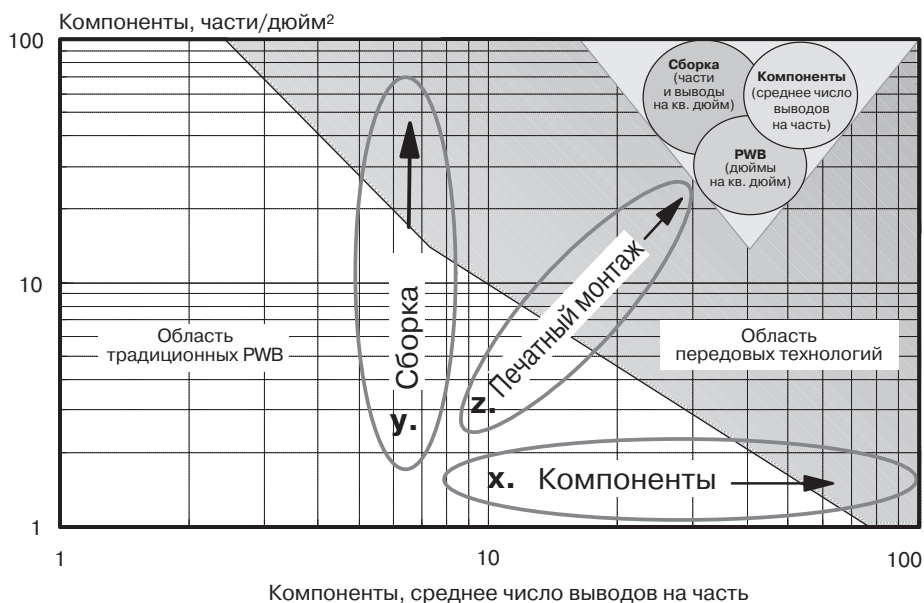


Рис. 2.2. Технологическая карта компонентов, показывающая влияние сборки, PWB и технологий изготовления компонентов на окончательную плотность корпусной сборки и технологии ее изготовления

Если использовать рис. 2.2 для описания схем с поверхностным монтажом, то вертикальное измерение (ось y , показанная в виде вертикального овала) указывает, насколько сложно собрать плату, исходя из количества компонентов на квадратном дюйме или квадратном сантиметре для данной площади поверхности платы PWB. Этот вертикальный овал может меняться от одной и до более чем 100 частей на квадратный дюйм. По мере того как части становятся все меньше и ближе друг к другу, это число естественным образом возрастает. Второй мерой схемы является среднее число выводов на квадратный дюйм или квадратный сантиметр. Он равен произведению величины, взятой по оси x , на величину, взятую по оси y . (Дальнейшее описание этих вопросов и уравнение для определения их численного значения приводятся в гл. 18.)

Овал по оси z на рис. 2.2 описывает плотность платы с печатной проводкой. Это та проводка, которая требуется для всех выводов компонентов при размере, определенном схемой, предполагая по три узла на каждую сеть. Эта ось имеет размерность дюймов на квадратный дюйм или сантиметров на сантиметр квадратный. Дальнейшее описание этой меры приведено в этой главе далее, а более подробное описание можно найти в гл. 9.

2.2.3. Пример революции межсоединений

Строя диаграмму продукции определенного типа в зависимости от времени и анализируя результат, можно показать, как менялась и продолжает меняться технология межсоединений, скорость ее изменения и направленность этих изменений.

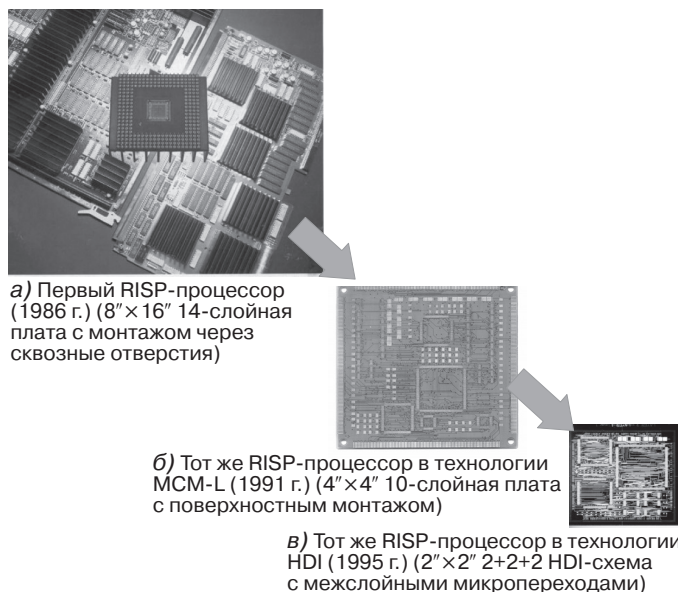


Рис. 2.3. Пример одной и той же платы ЦПУ компьютера при использовании ею альтернативных компонентов, сборки и технологий PWB: *а* — размер и внешний вид каждого поколения; *б* — изменение суммарной плотности платы при переходе от традиционной технологии к HDI; *в* — HDI

Пример такой диаграммы показан на рис. 2.3. Он демонстрирует, каким образом технология создания компонентов, технология сборки и технология PWB привели к эволюции одного и того же компьютерного ЦПУ: от 14-слойной платы с монтажом в отверстие платы с площадью поверхности 128 дм² в 1986 г. (рис. 2.3а) до 10-слойной платы с поверхностным монтажом с площадью поверхности 16 дм² в 1991 г. (рис. 2.3б) и далее к плате с высокой плотностью межсоединений с последующими встроенными межслойными микропереходами, заглубленными и глухими переходными отверстиями и с площадью поверхности в 4 дм² в 1995 г. (рис. 2.3в).

2.2.4. Зона передовых технологий

Второй ценной особенностью диаграммы на рис. 2.2 является зона, идентифицируемая как область передовых технологий. Это то место, где расчеты и данные указывают на необходимость иметь межсоединения конструкции высокой плотности. Именно поэтому в этом месте находится барьер или стена межсоединений высокой плотности: с одной стороны от этой стены наиболее целесообразно использовать традиционные технологии PWB; с другой – становится экономически выгодно использовать технологии HDI. Дальше за этой точкой технология HDI становится необходимой.

2.3. Иерархия межсоединений

Чтобы иметь возможность правильно оценивать, в каких случаях PWB подходят для использования в электронных системах, полезно дать краткое описание иерархии корпусной сборки электронных систем. Некоторое время тому назад Институт межсоединений и корпусного монтажа электронных схем (IPC) предложил восемь категорий систем элементов в порядке возрастания размера и сложности, которыми мы здесь воспользуемся для того, чтобы проиллюстрировать типичные корпусные электронные конструкции. Ниже приведено их описание.

Категория А состоит из полностью обработанных активных и пассивных устройств. Открытые или бескорпусные интегральные схемы и дискретные емкости, сопротивления или схемы с их использованием являются типичными примерами этой категории.

Категория В включает в себя все корпусные устройства (активные и пассивные) в пластмассовых корпусах, такие как DIP, TSOP, QFPs и BGA, а также те из них, что используют керамические корпуса, такие как PGA, включая разъемы, гнезда и переключатели. Все они готовы к подключению в межсоединяемую структуру.

Категория С представлена подложками, которые объединяют бескорпусные или открытые интегральные схемы (т.е. компоненты категории А) в разъемные корпуса. Сюда включены все типы многокристальных модулей (MCM), бескорпусные чипы на плате (COB) и все гибридные микросборки.

Категория D охватывает все типы подложек, которые используются для межсоединений и составления микросборок уже помещенных в корпус компонентов, т.е. элементов категорий В и С. Эта категория включает в себя все типы жестких PWB, гибких, гибко-жестких плат, а также плат с дискретными межсоединениями.

Категория E охватывает соединительные платы, выполненные с помощью печатного монтажа и методов дискретного монтажа или с помощью гибких печатных плат, которые соединяют между собой различные PWB, но не компоненты предшествующих групп.

Категория F охватывает все огражденные изнутри соединения. В эту категорию включены жгуты проводов, шины заземления и шины распределения электропитания, коаксиально-волноводные тракты и коаксиальные или волноводно-оптические проводки.

Категория G включает в себя установки для сборки аппаратных средств, блоки для печатных плат, механические конструкции и компоненты терморегулирования.

Категория H охватывает интегрированные системы в целом со всеми секциями, полками, боксами и оболочками, а также все вспомогательные и дополнительные подсистемы.

Как можно видеть из приведенного списка, PWB находятся посередине этой иерархии и являются наиболее важными и повсюду используемыми элементами корпусирования электронных схем.

Категории корпусных электрических схем *F*, *G* и *H* используются главным образом в крупных многопользовательских компьютерах, суперкомпьютерах, коммутационных станциях и некоторых военных системах. Поскольку существует явная тенденция использования миниатюрных и портативных электронных изделий для проектирования большинства электронных схем в корпусах, то компромиссы делаются между разумным использованием и выбором среди элементов первых пяти категорий. Эти вопросы обсуждаются в данной главе.

2.4. Факторы, влияющие на выбор межсоединений

Выбор подходов в корпусной сборке электронных схем из различных вышеупомянутых элементов диктуется не только функцией системы, но также типами выбранных компонентов и рабочими параметрами системы, такими как тактовая частота, потребляемая мощность, методы контроля тепла и среда, в которой будет эксплуатироваться система. Этот выбор нуждается в учете этих основных ограничений, которые необходимо учитывать для правильного проектирования корпусной сборки электронной системы.

2.4.1. Рабочая скорость

Частота, на которой будет работать электронная система, является очень важным техническим фактором в проектировании межсоединений. Многие цифровые системы работают близко к 100 МГц и уже достигают превышения этого уровня. Увеличивающаяся частота системы предъявляет повышенные требования к изобретательности инженеров, занимающихся корпусной электроникой, а также к свойствам материалов, используемых для подложек PWB.

Скорость распространения сигнала обратно пропорциональна квадратному корню из диэлектрической постоянной материала подложки, что требует от проектировщиков знания диэлектрических свойств материалов подложки, которые

они собираются использовать. Распространение сигнала на подложке между кристаллами, так называемое *время полета*, прямо пропорционально длине проводников и должно быть небольшим, чтобы обеспечить оптимальные электрические характеристики системы, работающей на высоких частотах.

Для систем, работающих на частотах свыше 25 МГц, межсоединения должны иметь такие характеристики линии передачи, которые бы минимизировали потери и искажение сигнала. Правильное проектирование таких линий передачи требует тщательных расчетов проводника и зазоров между диэлектриками и их точное изготовление, гарантирующее ожидаемую точность рабочих характеристик. Для печатных плат существуют два основных типа линии передачи:

- 1) полосковая линия передачи;
- 2) микрополосковая линия передачи (подробная информация приводится в гл. 15).

2.4.2. Потребляемая мощность

По мере увеличения тактовой частоты кристаллов и числа логических схем на один кристалл наблюдается соответствующее увеличение потребляемой мощности. Некоторые кристаллы требуют для своей работы до 30 Вт. При этом требуется все больше и больше клемм для подачи электропитания и для вмещения обратного потока на земляном слое. Около 20–30% клемм кристалла используются для подачи электропитания и заземления. С появлением необходимости электрической изоляции сигналов, функционирующих в высокочастотных системах, эта доля может достичь 50%.

Инженеры-разработчики должны обеспечить адекватное распределение слоев электропитания и земляных слоев внутри многослойной платы (MLB) для обеспечения эффективного, низкоомного протекания токов, что может быть важно в платах, соединяющих между собой высокочастотные кристаллы, потребляющие десятки ватт и работающие при 5 В, 3,3 В или более низких напряжениях. Правильное распределение заземлений и электропитания в таких системах очень важно для уменьшения di/dt коммутационных помех, возникающих в высокочастотных системах, а также для уменьшения нежелательного скопления тепла. В некоторых случаях требуются конструкции отдельных токопроводящих шин, чтобы удовлетворить столь высоким потребностям в мощности.

2.4.3. Отвод тепла

Вся энергия, которая была доставлена для питания интегральных схем (ИС), должна быть эффективно удалена из системы для ее правильного функционирования и обеспечения продолжительного срока службы. Отвод тепла из системы является одной из наиболее сложных задач корпусной электроники. В больших системах крупные конструкции теплоотвода, обслуживающие отдельные интегральные схемы, сами требуют воздушного охлаждения, а некоторые компьютерные компании создали гигантские суперконструкции для охлаждения своих компьютерных модулей жидкостью. Некоторые разработчики компьютеров используют охлаждение погружением в жидкость. По-прежнему охлаждение, необходимое для крупных систем, обременяет возможности существующих методов охлаждения.

Такое положение дел не столь критично в случае небольшого, настольного или портативного электронного оборудования, но по-прежнему ставит инженеров корпусной электроники перед необходимостью совершенствовать горячие точки и обеспечивать приемлемую продолжительность срока службы. Поскольку печатные платы известны как плохие проводники тепла, разработчики должны тщательно оценивать метод отвода тепла через плату, используя для этого такие технологии, как отвод тепла сквозь плату, встроенные металлические отрезки проволоки и теплопроводные слои.

2.4.4. Помехи электроники

По мере увеличения рабочей частоты электронного оборудования многие интегральные схемы, модули или сборки могут действовать как генераторы радиочастотных (RF) сигналов. Такие электромагнитные помехи (EMI) могут ставить под угрозу работу соседней электроники или даже других элементов этого же оборудования, вызывая появление неисправностей, сбоев и ошибок, и поэтому они должны быть предотвращены. Существует определенный стандарт EMI, определяющий допустимые уровни подобного излучения, и эти уровни очень низкие.

Инженеры, занимающиеся корпусированием, а особенно разработчики печатных плат, должны быть знакомы с методами уменьшения или устранения излучения этих электромагнитных помех, чтобы гарантировать, что их оборудование не превысит допустимые пределы, установленные для этих помех.

2.4.5. Условия эксплуатации системы

Выбор определенного способа корпусирования электронного изделия, помимо прочего, диктуется его конечным использованием и сегментом рынка, для которого эта продукция была разработана. Разработчик корпусной электроники должен понимать основную движущую силу использования этой продукции. Что это – стоимость, рабочие характеристики или что-то, находящееся посередине? Где ее будут использовать – например, под капотом автомобиля, где условия окружающей среды очень суровые, или в офисе, где условия эксплуатации весьма благоприятные? Институт по межсоединениям и корпусной сборке электронных схем установил совокупности условий эксплуатации оборудования, классифицируемые по степени суровости, которые перечислены в табл. 2.1.

2.4.5.1. Стоимость. Всеобщая дискретизация большинства функций электроники свела в одно целое потребителя, компьютеры и технические средства связи. Это развитие привело к повышенному спросу на электронику и необходимости массового производства большинства продукции электроники. Таким образом, стоимость продукции стала наиболее важным критерием при разработке любых электронных систем. При соблюдении всех вышеупомянутых условий разработки и эксплуатации инженер-разработчик должен рассматривать стоимость как доминирующий критерий и анализировать все возможные замены в свете достижения наилучшего соотношения цены/эксплуатационных качеств для данной продукции.

Таблица 2.1. Реалистичное представление условий использования, сроков эксплуатации и приемлемых вероятностей отказа для электроники с поверхностным монтажом по категориям использования

| Категория использования | Наихудшие условия использования | | | | | Годы службы | Приемлемый риск отказа, % |
|---|---------------------------------|---------------------|----------------------|-----------------|------------|-------------|---------------------------|
| | $T_{min}^{\circ C}$ | $T_{max}^{\circ C}$ | $\Delta T^{\circ C}$ | $t_p^{\circ C}$ | Циклы/год | | |
| 1 – Потребительские | 0 | +60 | 35 | 12 | 365 | 1–3 | ~1 |
| 2 – Компьютерные | +15 | +60 | 20 | 2 | 1460 | ~5 | ~0,1 |
| 3 – Средства связи | -40 | +85 | 35 | 12 | 365 | 7–20 | ~0,01 |
| 4 – Коммерческая авиация | -55 | +95 | 20 | 12 | 365 | ~20 | ~0,001 |
| 5 – Промышленность и автомобилестроение (пассажирское отделение) | -55 | +95 | 20 | 12 | 185 | ~10 60 | ~0,1 |
| | | | &40 | 12 | 100 | | |
| | | | &80 | &60 | 12 | | |
| | | | 20 | 20 | | | |
| 6 – Военные наземные средства и корабли | -55 | +95 | 40 &60 | 12 12 | 100 265 | ~5 | ~0,1 |
| 7 – Низкоорбитальные полеты Геостационарные космические орбиты | -40 | +85 | 35 | 1 | 8760 | 5–20 | ~0,001 |
| | | | | 12 | 365 | | |
| 8 – Военные <i>b</i> авионика <i>c</i> | <i>a</i> -55 | +95 | 60 | 40 | 2 | 365 ~10 | ~0,01 |
| | | | 80 | 2 | 365 | | |
| | | | &20 | 1 | 365 | | |
| 9 – Автомобилестроение (под капотом) | -55 | +125 | 60 | 1 | 1000 | ~5 | ~0,1 |
| | | | &100 &140 | 1 2 | 300 40 | | |

& – дополнительно.

* ΔT представляет максимальную амплитуду колебаний температуры, но не учитывает эффекты потери мощности; для потери мощности необходимо рассчитать ΔT_c .

Важность строгого анализа с целью выбора компромиссных решений при разработке электронной продукции подчеркивается тем, что около 60% производственной себестоимости определяются на первых стадиях процесса проектирования, когда было потрачено только 35% суммарных затрат, связанных с разработкой.

Внимание к требованиям производства и монтажа и их возможностям (так называемое проектирование с учетом возможностей производства и монтажа [DFM/A]) при проектировании продукции может уменьшить затраты на монтаж до 35%, а затраты на изготовление печатных плат – до 25%.

К элементам, которые должны учитываться для наиболее рентабельных работ корпусирования электроники, относятся:

- оптимизация конструкции печатной платы и ее разводки с целью уменьшения стоимости ее производства;
- оптимизация конструкции печатной платы для уменьшения стоимости ее монтажа;
- оптимизация конструкции печатной платы для уменьшения стоимости ее испытания и затрат на ремонт.

Следующие разделы содержат некоторые инструкции относительно подхода к выполнению подобного рода оптимизации разработки печатной платы. В основном стоимость электронных сборок напрямую связана с их сложностью, и существует целый ряд мер исследований, относящихся к влияниям различных конструктивных элементов печатных плат на их стоимость, для инструктирования инженера-разработчика в выборе наиболее рентабельного подхода.

2.5. Интегральные схемы и корпуса

Наиболее важными факторами, оказывающими влияние на разработку печатной платы и ее компоновку, являются схемы выводов компонентов и их шаг, особенно в интегральных схемах и их корпусах, поскольку они диктуют плотность межсоединений на подложках. Поэтому этот элемент будет учитываться в первую очередь.

Под воздействием необходимости уменьшения стоимости и улучшения рабочих характеристик сложность интегральных схем постоянно увеличивается. Благодаря непреклонному прогрессу в технологии изготовления интегральных схем плотность упаковки интегральных схем в эквивалентных логических элементах на кристалле увеличивается примерно на 75% в год, приводя к росту клемм ввода/вывода кристалла интегральной схемы на 40% в год, что ставит все возрастающие требования к методам их корпусирования и межсоединений.

В результате физический размер электронного оборудования продолжает сжиматься на 10–20% в год, тогда как площадь подложек уменьшается примерно на 7% в год. Это сопровождается непрерывным увеличением плотности проводки и уменьшением ширины линий, что вызывает перенапряжение методов производства печатных плат, уменьшает долю выхода годных изделий при обработке, а также увеличивает стоимость плат.

2.5.1. Корпуса интегральных схем

С момента своего появления кристаллы интегральных схем помещались внутри керамических или пластмассовых корпусов. Примерно до 1980 г. все корпуса интегральных схем имели контактные выводы, которые впаивались в металлизированные сквозные отверстия (PTH) печатных плат. С тех пор все больше корпусных интегральных схем стали иметь собственные выводы, которые выполнены в удобной для технологии поверхностного монтажа (SMT) форме, ставшей преобладающим методом монтажа компонентов.

Произошло профилирование типов корпусов интегральных схем как для монтажа с использованием сквозных отверстий, так и для поверхностного монтажа, варьируя конфигурации выводов, их расположение и шаг. Кроме того, IFC-SM-782 [3] предоставляет хороший каталог доступных корпусов SMT и форматы контура печатных плат, требуемых для их монтажа.

Основные методы расположения клемм для входа/выхода корпусов интегральных схем включают в себя следующие:

- *периферийный метод*, в котором выводы располагаются вокруг края кристалла или корпуса;

- *матричный вывод*, в котором выводы располагаются на нижней поверхности кристалла или корпуса.

Большинство корпусов интегральных плат имеют на своих краях периферийные выводы. Практический предел шага периферийных выводов корпусов составляет около 0,3 мм, что позволяет расположить самое большое 500 входов/выходов на корпусе интегральной схемы, как это показано в табл. 2.2. Стало также очевидно, что при выполнении обычных операций монтажа платы выход годной продукции упадет, как только шаг выводов станет ниже 0,5 мм.

Таблица 2.2. Различные размеры корпуса при матричном выводе, конфигурациях и шаге выводов

| Размер корпуса (мм) | Число вводов/выводов | Минимальный шаг (мм) |
|---------------------|----------------------|----------------------|
| 8×8 | 24 | 0,5 |
| 9×9 | 68 | 0,5 |
| 10×10 | 144 | 0,5 |
| 13×13 | 154 | 0,65 |
| 23×23 | 168 | 1,27 |
| 23×23 | 208 | 1,27 |
| 23×23 | 217 | 1,27 |
| 23×23 | 240 | 1,27 |
| 23×23 | 249 | 1,27 |
| 27×27 | 225 | 1,27 |
| 27×27 | 256 | 1,27 |
| 27×27 | 272 | 1,27 |
| 27×27 | 292 | 1,27 |
| 27×27 | 300 | 1,27 |
| 27×27 | 316 | 1,27 |
| 31×31 | 304 | 1,50 |
| 31×31 | 329 | 1,27 |
| 31×31 | 360 | 1,27 |
| 31×31 | 385 | 1,27 |
| 35×35 | 313 | 1,27 |
| 35×35 | 352 | 1,27 |
| 35×35 | 388 | 1,27 |
| 35×35 | 420 | 1,27 |
| 35×35 | 456 | 1,27 |
| 37×37 | 676 | 0,8 |
| 42,5×52,5 | 1247 | 1,0 |
| 52,5×52,5 | 2577 | 1,0 |

Различные компоненты для поверхностного монтажа появляются с большим разнообразием размеров корпусов, числом вводов/выводов и шагов вводов/выводов. Эти компоненты называются корпусами размера, сопоставимого с кристаллом (CSP), пластмассовыми корпусами с матрицами шариковых выводов (PBGA), керамическими корпусами с матрицами шариковых выводов (CBGA), пластмассовыми корпусами с матрицами штырьковых выводов (PPGA), а также керамическими корпусами с матрицами колонн выводов (CCGA).

Ожидается, что для кристаллов с количеством выводов менее 150–200 продолжат использовать корпуса с периферийными выводами, если можно будет пасть в пределах практически приемлемого выхода годной продукции. Но для корпусов интегральных схем с количеством вводов свыше 150–200 очень заманчиво использовать матрицу выводов, поскольку в этом случае может быть использована полная площадь нижней поверхности для выводов, что делает возможным размесить большое число вводов внутри ограниченной области.

Это соображение способствовало развитию ряда методов осаждения припоя на контактные выступы в области матрицы для интегральных схем и корпусов многокристалльных модулей (МСМ), называемых по-разному: корпус с матрицей контактной площадки, корпус с матрицей LG или корпус с матрицей шариковых выводов (BGA) с установкой сетки выводов через 1 мм (0,040 in), 1,27 мм (0,050 дюйма) и 1,50 мм (0,060 дюйма), соответственно.

Использование матриц выводов предоставляет ряд преимуществ. Наиболее важным из них является минимальная область контура на подложке межсоединений, но, кроме того, матрица выводов предоставляет лучшие электрические характеристики благодаря низким паразитным компонентам при высокочастотном режиме работы, упрощенную адаптацию компонентов в линии размещения SMT, а также лучший выход годного монтажа, несмотря на невозможность прямой визуальной проверки соединений.

Благодаря продолжающемуся уменьшению шага выводов на корпусах становится важным, чтобы проектировщики печатных плат тщательно оценивали возможности производства и сборки подложек печатных плат, требующих выводы с таким мелким шагом, чтобы гарантировать наибольший выход годных изделий и самую низкую стоимость готовой продукции.

2.5.2. Прямое крепление кристалла

Влияние, оказываемое уменьшением размера, веса и объема электронной продукции, привело к росту интереса к методам прямого крепления кристалла (DCA), когда незащищенный корпусом кристалл интегральной схемы непосредственно монтируется на подложку. Эти методы широко используются при монтаже бескорпусных интегральных схем на поверхности печатной платы (СОВ) и многокристалльных модулей (МСМ), как это показано на рис. 2.4.

К методам крепления бескорпусного кристалла к подложке платы относятся следующие.

1. *Проволочный монтаж* является старейшим, а также наиболее гибким и широко используемым методом (более 96% всех кристаллов сегодня смонтированы проволочным методом).
2. *Автоматизированное прикрепление кристаллов к выводам на ленточном носителе (ТАВ)* используется при малом шаге вводов/выводов и дает возможность предварительного испытания кристаллов перед выполнением монтажа.
3. *Монтаж методом перевернутого кристалла* используется благодаря его компактности и улучшенной электропроводности, типичным представителем которого является процесс С4 компании IBM.

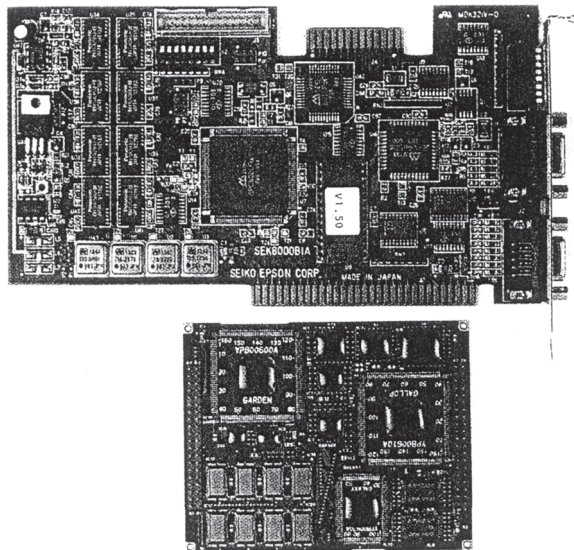


Рис. 2.4. Сборки по методам COB и MCM

Проблемы плохого сочетания коэффициентов теплового расширения (ТСЕ) между кремниевыми кристаллами, которые непосредственно монтируются в перевернутом виде на многослойную подложку, были эффективно устранены с помощью герметизации неполной заливкой эпоксидной смолы между кристаллом и подложкой (рис. 2.5).

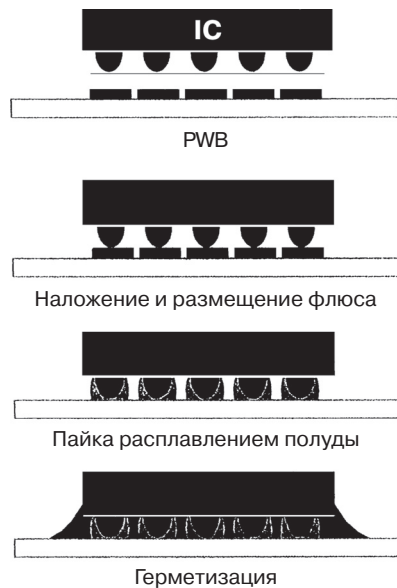


Рис. 2.5. Неполная заливка между кристаллом и печатной платой при монтаже методом перевернутого кристалла

По этому методу распределяется напряжение по всей площади кристалла и таким образом существенно улучшается надежность выполнения монтажа.

Интегральные схемы с матричными выводами по всей площади основания кристалла или с выводами для монтажа методом перевернутого кристалла, т.е. имеющие большое число штырьков, являются наиболее быстро растущей категорией интегральных схем, однако они по-прежнему представляют лишь незначительную долю всех используемых интегральных схем. Именно поэтому разработчики должны выяснить, какой из методов DCA будет наиболее привлекательным с точки зрения стоимости для конкретного применения.

2.5.3. Корпуса размером, сопоставимым с кристаллом (CSP)

При монтаже бескорпусных кристаллов на подложки межсоединений не всегда можно установить, что были смонтированы только пригодные кристаллы. В настоящее время существует ряд методов, предложенных для решения проблемы использования только пригодного кристалла (KGD).

В качестве одного из путей решения этой проблемы рядом производителей разработан комплект миниатюрных корпусов, которые только незначительно крупнее, чем сам кристалл, и защищают его и перераспределяют выводы на матрицу выводов. Эти миниатюрные корпуса позволяют испытать и отбраковать кристаллы до их окончательного монтажа. Типичный пример таких корпусов масштаба кристалла приведен на рис. 2.6. На рынке представлен целый ряд подобных корпусов.

Проектировщик, однако, должен анализировать шаг выводов этих новых CSP, потому что некоторые из них используют очень маленький шаг, такой как 0,5 мм (0,020 дюйма) или еще меньше, что требует применять специальные методы изготовления печатных плат для перераспределения сигнала от этих корпусов к остальным частям платы.

В общем случае современные технологии изготовления печатных плат соответствуют требованиям по обеспечению прямого соединения кристалла, если проводочный монтаж или методика TAB используются для межсоединений открытого кристалла и подложки. Это требует размещения подходящих контактных площадок, отстоящих друг от друга на требуемый шаг в один или два ряда вокруг кристалла.

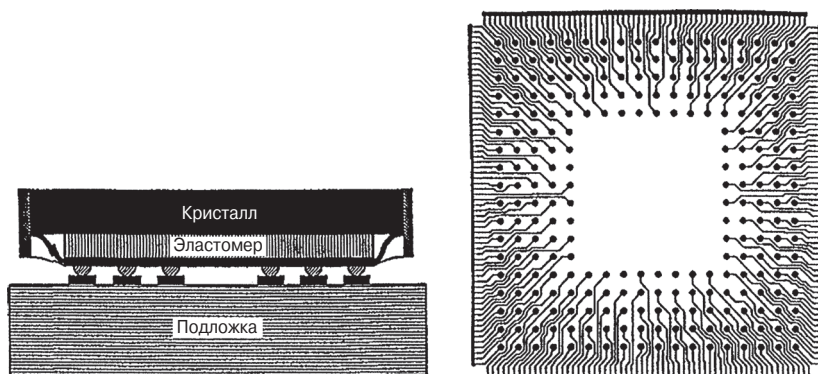


Рис. 2.6. CSP компании Tessera, Сан-Хосе, Калифорния

Хотя эта процедура отчасти уменьшает эффективность компоновки платы, она все еще считается эффективным методом монтажа DCA.

При использовании матрицы выводов ситуация осложняется, потому что сигналы от внутренних рядов области матричных выводов должны проходить между выводами, расположенными ближе к краю, что не позволяет проходить через них более чем одному или самое большое двум проводникам. В большинстве случаев эти сигналы от внутренних рядов опускаются вниз на внутренние слои многослойных плат.

Традиционные конструкции печатных плат сегодня не в состоянии справиться с любой матрицей выводов, имеющей шаг менее 0,020 дюйма, тогда как некоторые технологии перевернутого кристалла с матрицей шариковых выводов доходят до шага менее 0,010 дюйма. В тех случаях, когда шаг сетки области выводов ниже 0,50 мм (0,040 дюйма), часто используются специальные слои перераспределений, которые распределяют сигналы на традиционно сделанные РТН во вспомогательных многослойных платах.

Такие слои состоят из неармированных диэлектрических слоев, в которых с помощью лазера, плазмы или фотоспособом сформированы небольшие сквозные или глухие отверстия с их последующей металлизацией, используя для этого аддитивный или полуаддитивный процесс металлизации. Хотя этот подход требует некоторую дополнительную площадь, выходящую за периметр кристалла для выполнения передачи сигнала, и увеличивает стоимость подложки, он позволяет выполнить на печатной плате монтаж методом перевернутых кристаллов и монтаж CSP. Типичный метод формирования таких слоев перераспределения, получивший название поверхностной ламинарной схемы (SLC) [4], был разработан на заводе Yasu компании IBM.

2.6. Оценки плотности

2.6.1. Анализ плотности компонент

Из-за того, что компоненты и их контактные выводы оказывают основное влияние на усилия разработчиков печатных плат, был разработан ряд показателей, устанавливающих связь между плотностью компонентов и плотностью печатной платы. Основной анализ этих связей был проведен Н. Holden [5], и некоторые из его диаграмм и выводов представлены здесь для инструктирования инженеров-разработчиков при разработке рационального проекта печатной платы.

Эта информация очень полезна при определении того, в каком месте спектра плотности компонентов поместится разработанная продукция и что в результате ожидать в отношении плотности печатной платы.

На рис. 2.7 показан обобщенный вид связей между плотностью компонентов, плотностью их контактных выводов и требуемой плотностью проводки, необходимой для вмещения выбранной степени сложности компонентов. Приводится определение соединяемости проводки W_f .

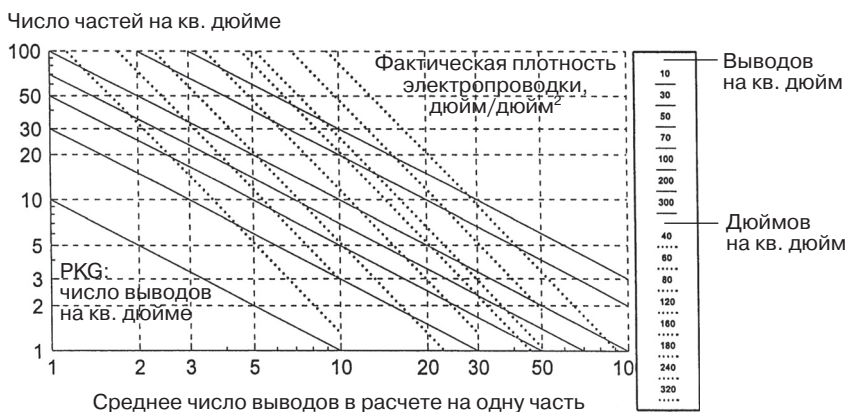


Рис. 2.7. График общих связей между плотностью компонентов и плотностью проводки

2.6.2. Показатели плотности печатных плат

Для правильного проектирования печатных плат важно определить требования к плотности и затем проанализировать возможность использования альтернативных методов создания плат для наиболее рентабельного проекта. Существует ряд основных понятий и уравнений, используемых для расчета и анализа плотности проводки печатной платы:

$$W_c = \frac{T \cdot L}{G}, \text{ дюйм/дюйм}^2, \quad (2.1)$$

- где W_c – емкость монтажа;
- T – дорожки на канал;
- L – число слоев сигнальной разводки;
- G – ширина канала.

Но важнее определить требуемую плотность проводки, которая будет достаточной для соединения всех компонентов на плате нужного размера. Существует ряд эмпирически полученных уравнений, которые позволяют выполнить расчет требуемой плотности проводки. Самое простое уравнение было получено доктором Д. Серафимом⁶:

$$W_d = 2,25 N_i \cdot P, \quad (2.2)$$

где W_d – требуемая плотность проводки; N_i – число вводов/выводов; P – шаг между корпусами электронных компонентов.

2.6.3. Специальные показатели для прямого крепления кристалла

Монтаж бескорпусного или открытого кристалла на подложке стал популярен главным образом благодаря возможности с помощью такого монтажа уменьшить площадку для межсоединений. Теоретическим пределом такого монтажа является

ся плотное расположение всех кристаллов вместе без всякого зазора. Это приведет к 100%-ной эффективности компоновки (показатель, который измеряет отношение площади кремния к площади подложки). Естественно, что такая 100%-ная эффективность не может быть достигнута, но этот показатель по-прежнему считается полезным при классификации различных конструкций подложки или методов крепления бескорпусного кристалла, как показано на рис. 2.8.

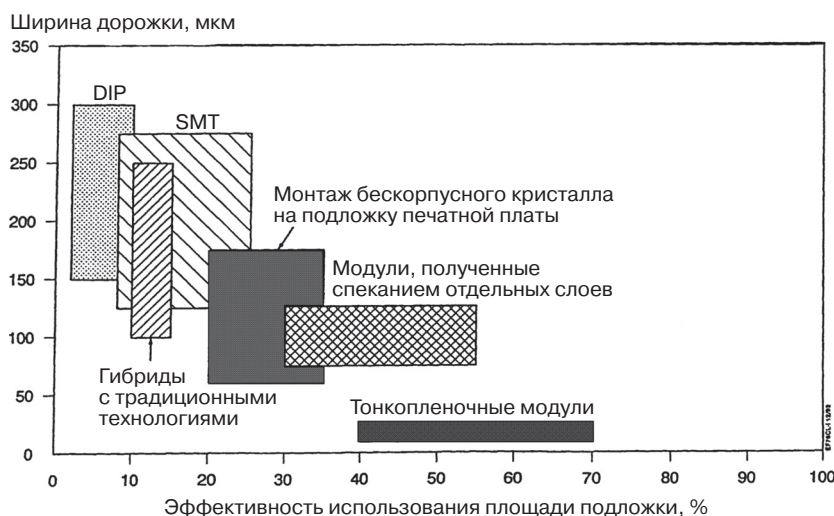
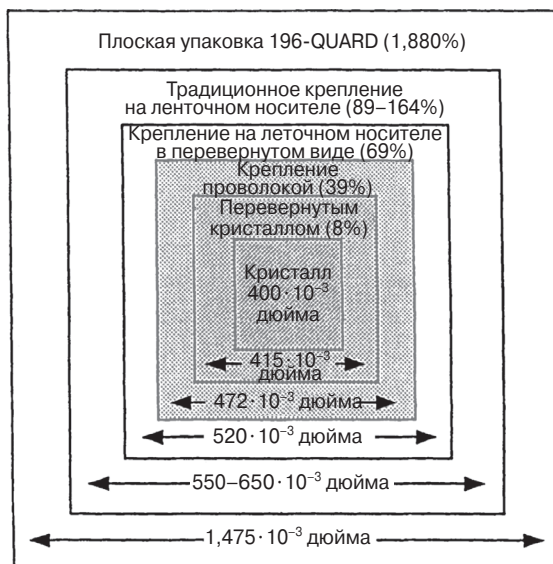


Рис. 2.8. Эффективность компоновки (любезно предоставлено ВРА, используется с разрешения)

100%-ная эффективность компоновки не может быть достигнута, поскольку все методы монтажа кристаллов требуют некоторого пространства вокруг кристаллов. Даже при монтаже методом перевернутого кристалла между кристаллами должен оставаться зазор, чтобы было место для использования монтажного инструмента.

Д-р Х. Чарльз [7] из университета Джона Хопкинса перечислил размеры, помещенные в табл. 2.3, которые необходимы для зазора между кристаллами (или суммарную ширину рамки вокруг кристаллов) при использовании различных методов крепления кристалла. На эти или очень близкие к ним расстояния также ссылается ряд авторов, приводя при этом другие источники.

Даже при монтаже методом перевернутого кристалла эффективность компоновки должна быть снижена примерно до 90%, а в случае проволочного монтажа — до 70%, для ТАВ же — до 50%, а в некоторых случаях значительно больше. Очень похожая ситуация представлена в графическом виде на рис. 2.9. Снижение эффективности компоновки, показанное на рис. 2.9, требуется только для размещения на подложке монтажных площадок для проволочного соединения. Но монтаж бескорпусных кристаллов на печатной плате требует дополнительной площади для распределения сигнальной проводки, чтобы дать возможность поместить там сквозные металлизированные отверстия подальше для обеспечения связи с внутренними слоями.



Штраф за корпус: превышение площади межсоединений

Рис. 2.9. Площадь под кристалл, требуемая для использования различных методов соединения

Очевидно, что эффективность компоновки на печатной плате может быть снижена до диапазона в 20–30%, если только не используются специальные поверхностные слои для распределения сигнальной разводки (как упоминалось ранее), которые изготавливаются из неармированного диэлектрика. В этих случаях эффективность компоновки и зазор между кристаллами снова станут близкими к величинам, на которые дана ссылка в табл. 2.3.

Таблица 2.3. Промежуток, необходимый между кристаллами

| Метод крепления | Зазор между кристаллами, 10^{-3} дюйма |
|-----------------------|--|
| Перевернутый кристалл | 15–20 |
| Проволочный монтаж | 70–80 |
| Перевернутый TAB | 100–120 |
| Нормальный TAB | 150–400 |

Очевидно, что непосредственное крепление кристалла на печатной плате приведет к существенному уменьшению эффективности компоновки таких сборок, за исключением того факта, что компоненты могут монтироваться на обеих сторонах подложки печатной платы. Было показано, что проволочный монтаж можно выполнять на обеих сторонах печатной платы с помощью специальной крепежной оснастки; кроме того, соединение выходных контактов (OLB) по методу TAB может быть сделано на обеих сторонах подложки печатной платы. Таким образом, в то время как односторонний монтаж бескорпусных кристаллов на печатной плате уменьшает эффективность ее компоновки примерно наполовину по сравнению с другими типами конструкций подложки, возможность помещать

компоненты на обе стороны печатных плат возвращает эффективность компоновки на тот же уровень, что и у других вариантов подложки.

2.7. Методы увеличения плотности печатных плат

Существует три основных пути увеличения соединяемости или доступной емкости соединений печатных плат [8]:

- уменьшить диаметр отверстий и контактной площадки;
- увеличить число проводящих каналов между контактными площадками путем уменьшения ширины проводников;
- увеличить число слоев для сигнальной разводки.

Влияние каждого подхода на выход годной продукции при производстве и, таким образом, на стоимость платы будет описано последовательно. Следует отметить, что последний вариант представляет самое простое, но и наиболее дорогостоящее решение, а поэтому должен использоваться только после того, как методы, приемлемые для выполнения первых двух условий, подтвердят свою способность достичь нужную плотность платы.

2.7.1. Влияние контактных площадок на плотность проводки

Основным препятствием на пути увеличения пропускной способности проводящего канала являются контактные площадки большого диаметра вокруг металлизированных сквозных отверстий (PTH), поскольку на предшествующей стадии развития технологии изготовления печатных плат все еще требовались площадки более широкие, чем проводники на своих местах. Эти площадки уменьшают возможность соединений печатных плат и должны учитываться при правильном анализе плотности межсоединений. Например, уменьшение диаметра площадок при проектировании от 55 до 25 мил (на 55%) удваивает плотность межсоединений, тогда как уменьшение шага размещения проводников C_p с $1,8 \cdot 10^{-2}$ до $7 \cdot 10^{-3}$ дюйма (на 61%) приведет к увеличению только на 50%. Очевидно, что уменьшение диаметра площадок или их полное устранение может стать более эффективным путем увеличения пропускной способности проводки в случае сложных печатных плат.

Предназначение медных площадок вокруг просверленных отверстий в печатных платах состояло в том, чтобы вместить в себя любые возможные несовпадения слоя со слоем или рисунка с отверстием и таким образом препятствовать любому разрыву отверстия за пределами медной части площадок. Такое несовпадение в основном вызывается нестабильностью и смещением слоистого пластика при его обработке на этапах производства печатной или многослойной платы (MLB).

Стандарты базовых материалов определяют, что подобное смещение должно быть ограничено максимальной величиной в 300 ppm, но фактически сдвиги для базового материала близки к 500 ppm, что дает сдвиг слоя в 10^{-2} дюйма в пределах 20-дюймового расстояния. Для многих применений этот допуск слишком широкий, поскольку он требует, по крайней мере, контактный ободок шириной в 10^{-2} дюйма вокруг просверленных отверстий, приводя при этом к существенной блокировке проводящего канала.

Другой причиной нестабильности материала в MLB-платах является чрезмерное смещение материала, которое происходит, если температура изготовления многослойного материала превышает температуру стеклования T_g смолы (связывающего). С другой стороны, если температура изготовления многослойного материала остается ниже T_g связывающего, то могут происходить только минимальные изменения в размере материала для основы, поскольку смола при этом находится в фазе линейного расширения. Это обстоятельство объясняет, почему при изготовлении печатных плат необходимо использовать смолу с высокой T_g .

Данные, полученные из технических характеристик новых, более стабильных однонаправленных слоистых материалов, указывают, что смещения базового материала уменьшены с 500 до 200 ppm и что требуемая ширина контактного кольца будет уменьшена с 10^{-2} до $4 \cdot 10^{-3}$ дюйма.

Табл. 2.4 иллюстрирует возможность повышения числа соединений, которое становится возможным при использовании более стабильных слоистых материалов, позволяя уменьшить начальные диаметры площадок (в первом столбце), отстоящих друг от друга на 2,5 мм (0,100 дюйма) при сохранении постоянным шага проводников. Наиболее эффективное использование плоскости слоя сигнальной разводки достигается в случае, когда площадки устраняются, а межсоединения по оси z ограничиваются в пределах ширины проводников, формируя невидимые сквозные соединения.

Этот вывод основывается на фактических данных, полученных из технических характеристик новых, более стабильных, однонаправленных многослойных материалов. В то время как платы MLB, используя эти новые, более стабильные в размерах, однонаправленные слоистые материалы с уменьшенными диаметрами контактных площадок, могут изготавливаться традиционными методами, то изготовление плат MLB с невидимыми сквозными соединениями требует использования последовательного процесса производства, аналогичного процессу производства SLC, описанному ранее.

Производители печатных плат чувствуют себя уверенно, производя платы с проводниками шириной в $(4-5) \cdot 10^{-3}$ дюйма, но им все же требуются крупные площадки вокруг металлизированных отверстий для того, чтобы застраховать себя от разрыва в отверстиях. Это ограничивает достигаемую в настоящее время плотность соединений примерно 40–60 дюйма/дюйм² из расчета на слой, как это видно из табл. 2.4. Технология, которая позволит производителям печатных плат изготавливать невидимые сквозные соединения, сможет увеличить соединения в расчете на слой сигнальной разводки печатной платы от его текущего диапазона до уровня в 100–140 дюймов/дюйм². Ширина проводника в 0,002 дюйма предоставит для печатной платы 200–250 дюймов/дюйм² на один слой сигнальной разводки.

Табл. 2.5 иллюстрирует наиболее важные результаты увеличения соединений в расчете на слой: уменьшение числа слоев сигнальной разводки, требуемых для обеспечения такой же плотности проводки W_d . Табл. 2.5 была составлена с применением данных по соединениям из табл. 2.4 для многослойной платы площадью 50 дюймов² с суммарной длиной проводки в 10 000 дюймов. Также обратите внимание, что число слоев в табл. 2.4 было поднято до следующей более высокой величины полного числа слоев, т. е. рассчитанные 1,4 слоя были записаны как 2 слоя.

Таблица 2.4. Влияние диаметра площадок на плотность межсоединений

| Диам. площадки, дюйм | Шаг проводников, дюйм | I_d для 500 ppm, дюйм/дюйм ² | I_d для 200 ppm, дюйм/дюйм ² | I_d при использовании скрытых переходных отверстий, дюйм/дюйм ² |
|----------------------|-----------------------|---|---|--|
| 0,055 | 0,010 | 20 | 37 | 55 |
| 0,036 | 0,018 | 30 | 48 | 55 |
| 0,025 | 0,009 | 40 | 96 | 100 |
| 0,025 | 0,007 | 60 | 130 | 143 |

Таблица 2.5. Влияние увеличения межсоединений на уменьшение числа слоев

| Диам. площадки, дюйм | Шаг проводников, дюйм | I_d для 500 ppm, слои | I_d для 200 ppm, слои | I_d для скрытых переходных отверстий, количество слоев |
|----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|--|
| 0,055 | 0,010 | 10 | 6 | 4 |
| 0,036 | 0,018 | 7 | 4 | 4 |
| 0,025 | 0,009 | 5 | 2 | 2 |
| 0,025 | 0,007 | 4 | 2 | 2 |

Основное преимущество такого сокращения числа слоев состоит в том, что оно может привести к существенному уменьшению стоимости производства при одновременном сохранении общей длины межсоединений.

2.7.2. Уменьшение длины проводников

Очевидным методом увеличения числа соединений печатных плат является уменьшение ширины проводников и промежутков между ними, чтобы таким образом увеличить число доступных каналов проводки в каждом слое сигнальной разводки, как это было описано ранее. Это направление используется в промышленном производстве интегральных схем и печатных плат уже многие годы. Однако невозможно бесконечно уменьшать ширину проводников или свободное пространство между ними. Уменьшение ширины проводника ограничено пропускной способностью тока тонких, маленьких проводников, особенно когда эти проводники длинные, как это часто бывает в случае печатных плат. Существуют технологические ограничения такого уменьшения параметров проводника, поскольку выход годной продукции при производстве может резко упасть, если это уменьшение приведет к напряжению возможностей процесса изготовления за границы нормы.

Кроме того, существует предел уменьшения свободного промежутка между проводниками, обусловленный главным образом соображениями электрических свойств, т. е. необходимостью предотвращения чрезмерных перекрестных помех, минимизации шумов, а также обеспечения необходимых условий распространения сигнала и для характеристического импеданса.

И все же такое уменьшение параметров проводников, если бы оно было достижимо в пределах описанных ограничений, могло бы быть эффективным способом увеличения плотности печатной платы и уменьшения стоимости ее производства. Как видно из табл. 2.6, составленной по данным стоимости, полученным из про-

граммы Columbus ВРА, уменьшение ширины проводников с $6 \cdot 10^{-3}$ до $3 \cdot 10^{-3}$ дюйма уменьшает в два раза число слоев для сигнальной разводки, необходимых для обеспечения того же самого количества соединений (при том, что выход годной продукции, плотность межсоединений и площадь платы остаются постоянными). Это уменьшение числа слоев может существенно снизить затраты на производство печатных плат.

Таблица 2.6. Влияние ширины проводника на число слоев и стоимость платы для многослойной платы 6×8 дюймов при $I_d = 450$ дюймов/дюйм² и 65–68% выходе

| Линия-отстояние | Общее число слоев сигнальной разводки | Число слоев | Стоимость платы, % |
|-----------------|---------------------------------------|-------------|--------------------|
| 3-3 | 8 | 4 | 55 |
| 4-4 | 10 | 6 | 64 |
| 5-6 | 12 | 7 | 77 |
| 5-7 | 14 | 8 | 87 |
| 6-6 | 16 | 8 | 90 |
| 7-8 | 20 | 10 | 100 |

2.7.3. Влияние ширины проводника на выход годных плат

Очевидно, что любое успешное увеличение плотности проводников I_d в печатных платах будет эффективным только при наличии процесса, позволяющего получать разумный выход годной продукции. К сожалению, выход проводников в печатных платах быстро падает, как только их ширина становится ниже $5 \cdot 10^{-3}$ дюймов, как показано на рис. 2.10. Понятие выхода годной продукции в производстве очень важно для анализа процесса наиболее рентабельного производства, потому что выход годной продукции при этом процессе оказывает большое влияние на стоимость подложек межсоединений.

Полезное эмпирическое уравнение для расчета затрат на производство:

$$C (\text{стоимость}) = \frac{(\text{материалы} + \text{стоимость процесса})}{\text{выход } Y}. \quad (2.3)$$

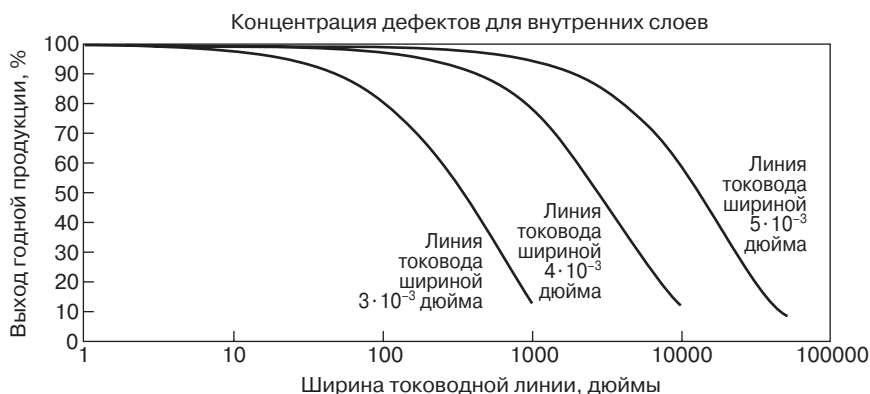


Рис. 2.10. Выход годных плат в зависимости от ширины проводника

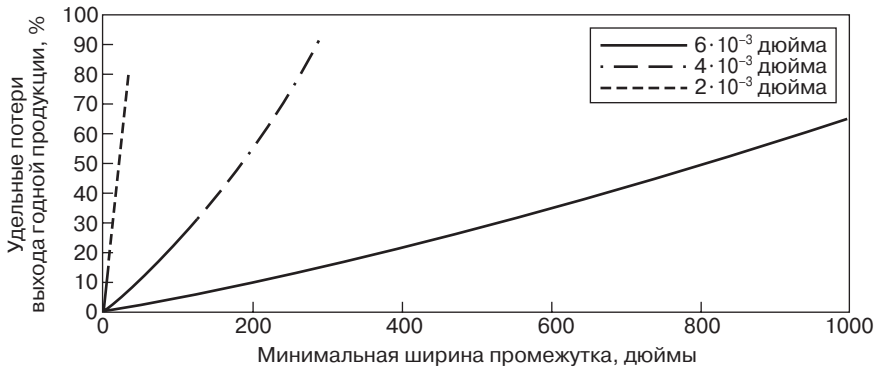


Рис. 2.11. Потеря выхода от коротких замыканий

Для установления влияния плотности межсоединений I_d на конечный выход подложек общий выход при обработке может быть разделен на две составляющие: одна из них зависит от плотности проводников, т.е. Y_{ld} , а другая является функцией объединенных выходов оставшихся процессов производства:

$$Y_{\text{сумм.}} = Y_{ld} \cdot Y_{\text{произв.}} \quad (2.4)$$

При хорошо контролируемой технологической операции технологически зависимый выход (как в случае металлизации) остается в точности постоянным для данной технологии, позволяя выходу целиком зависеть от изменения ширины проводников.

Как видно из рис. 2.11, к дефектам, влияющим на зависящую от плотности функцию выхода Y_{ld} , относятся обрывы проводников и короткие замыкания между ними. Можно предположить, что подобные дефекты имеют функцию распределения Пуассона вдоль всей длины (TL) проводников подложки со средней частотой появления дефектов ν . Выход является вероятностью появления числа дефектов, равного нулю ($n = 0$) во всей длине проводника TL . Таким образом,

$$Y \text{ (при } n = 0) = e^{(-\nu TL)} \text{ (распределение Пуассона)}. \quad (2.5)$$

Как видно из рис. 2.10 и 2.11, частота появления дефектов n также зависит от ширины линий проводки и расстояний между ними, т.е. от шага прокладки проводников C_p . С уменьшением C_p будет увеличиваться ν , но при очень больших C_p ν должно равняться 0, поскольку Y_{ld} будет равно 100%.

Например, в случае разработки, использующей невидимые площадки, при использовании которых $C_p = 2w$, плотность межсоединений I_d может быть выражена как $I_d = TL/A$, а I_d при этом пропорциональна C_p , т.е. $I_d \cdot C_p = l$, а $TL = A/C_p$. Поэтому n в этом уравнении может быть эмпирически выражено как:

$$\nu = -\ln \frac{Y_0}{TL_0} \cdot \left(\frac{C_{p0}}{C_p} \right)^b, \quad (2.6)$$

где b является показателем, зависящим от технологии или процесса, используемого для формирования проводников. Этот показатель b существенно меняется от

оборудования к оборудованию и для различных методов формирования рисунка межсоединений и в каждом конкретном случае должен определяться эмпирически.

2.7.4. Увеличение числа проводящих слоев

Это самое простое и наиболее прямолинейное решение: когда не хватает места на уже существующих слоях для размещения всех необходимых межсоединений, добавляют еще один слой. Этот подход широко применялся в прошлом, но когда эффективность затрат на изготовление подложек стала иметь огромное значение, необходимым стал тщательный анализ проекта для минимизации числа слоев в MLB, потому что с каждым дополнительным слоем существенно растут затраты на изготовление платы. Как видно из табл. 2.6, рассчитанной для плат MLB размером 6×8 дюймов, производимых в большом количестве с постоянным выходом и плотностью проводников, существует почти линейная связь между затратами на изготовление платы и количеством слоев.

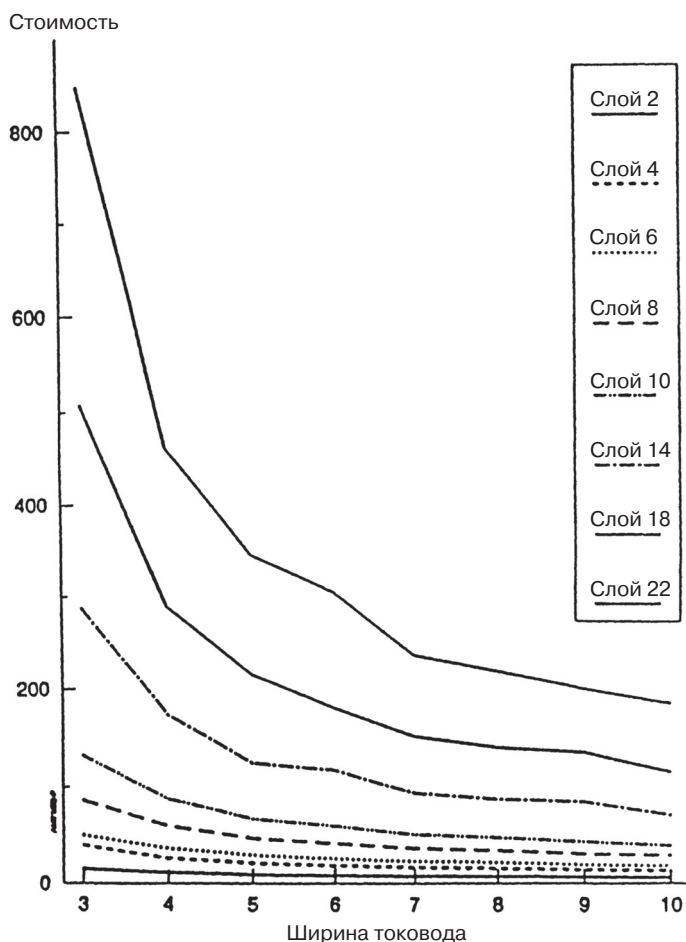


Рис. 2.12. Зависимость стоимости от числа слоев и ширины проводников

Табл. 2.6 демонстрирует также, что любое увеличение числа слоев сигнальной разводки в платах, работающих на частотах, требующих линию передачи, удвоит общее число слоев благодаря необходимости прокладки слоев заземления или слоев питания постоянного тока между слоями сигнальной разводки.

Типичный пример влияния числа слоев на конечный выход MLB можно видеть на рис. 2.12, подготовленном несколько лет назад ВРА. Здесь показано определенное уменьшение выхода при производстве с увеличением числа слоев в любой категории ширины линии проводника. Это достаточно типичная ситуация в производстве плат, потому что увеличение сложности и толщины платы MLB с большим числом слоев обычно приводит к большему числу проблем на производственном уровне.

Литература

1. Toshiba, «New Polymeric Multilayer and Packaging,» *Proceedings of the Printed Circuit World Conference V*, Glasgow, Scotland, January 1991.
2. The Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits, 7380 N. Lincoln Ave, Lincoln-wood, IL60646.
3. IPC-SM-782, «Surface Mount Design and Land Pattern Standard,» The Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits.
4. Y. Tsukada et al., «A Novel Solution for MCM-L Utilizing Surface Laminar Circuit and Flip Chip Attach Technology,» *Proceedings of the 2d International Conference on Multichip Modules*, Denver, CO, April 1993, pp. 252–259.
5. H. Holden, «Metrics for MCM-L Design,» *Proceedings of the IPC National Conference on MCM-L*, Minneapolis, MN, May 1994.
6. D. Seraphim, «Chip-Module-Package Interface.» *Proceedings of Insulation Conference*, Chicago. IL, 7. September 1977, pp. 90–93.
7. H. Charles. «Design Rules for Advanced Packaging,» *Proceedings of ISHM* 1993, pp. 301–307.
8. G. Messner, «Analysis of the Density and Yield Relationships Leading Toward the Optimal Interconnection Methods.» *Proceedings of Printed Circuits World Conference VI*, San Francisco. CA, May 1993, pp. M 191–20.

ГЛАВА 3

ТЕХНОЛОГИЯ КОРПУСИРОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

John W. Stafford

JWS Consulting PLC, Phoenix, Arizona

3.1. Введение

Революция, происшедшая в электронной промышленности, была обусловлена достижениями в разработках и производстве полупроводников, корпусировании полупроводниковых кристаллов и электронных систем, а также в технологическом проектировании.

Ее движущей силой стали достижения технологии интегральных схем (ИС) и достигнутые уровни интеграции. Начальным толчком стало использование литографии микрометрического уровня [1]. Эволюция корпусирования полупроводников и плат с печатным монтажом (PCB) сопутствовала достижениям технологии изготовления интегральных схем. На рис. 3.1 и 3.2 показана тенденция роста плотности транзисторов на кристалле и рост рабочей частоты кристалла в зависимости от времени. Существует опасение, что текущие достижения полупроводниковой технологии примерно к 2010 г. столкнутся с препятствиями на пути дальнейшего развития.

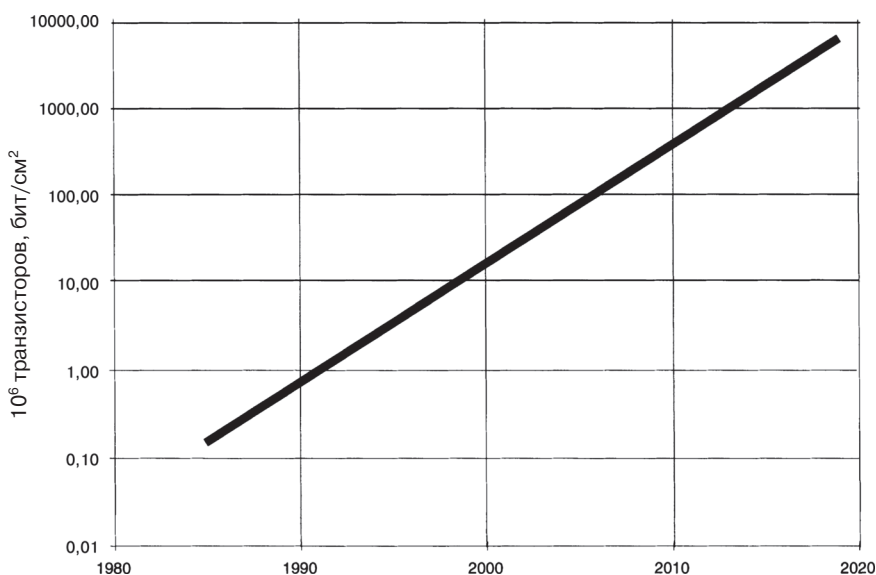


Рис. 3.1. Тенденция плотности монтажа кристаллов для логических компонентов и компонентов логической оперативной памяти (DRAM)

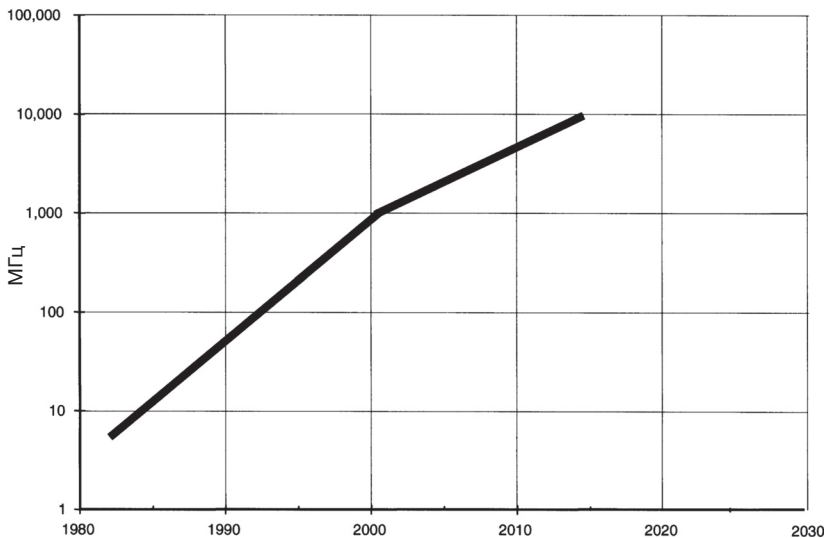


Рис. 3.2. Тенденция требуемой частоты кристалла

Следствием возможности помещать больше компонентов на кремниевой интегральной схеме стало увеличение размера ее корпуса и числа корпусных штырьковых выводов, а также плотность проводки для соединения между собой корпусных интегральных схем.

Продолжающееся наступление в борьбе за все более высокие степени интеграции стимулировало предпринимаемые в настоящее время усилия по обеспечению меньших по размеру и более дешевых средств корпусирования этих интегральных схем, чтобы они могли соединяться между собой более рентабельным способом, который при этом не ухудшал бы электрических характеристик собранной схемы. Поэтому разработка высокоэффективных систем требует учета одновременно и способа проектирования интегральной схемы, и формата ее корпуса, а также согласования с межсоединениями.

В табл. 3.1 сравниваются возможности компьютеров, которые появлялись с годами на протяжении определенного периода. Наблюдался постоянный рост функциональности (т.е. числа выполняемых команд в секунду) наряду с непрерывным уменьшением затрат на команду. Результатом является возрастающая функциональность портативных радиоустройств связи, таких как пейджеры и сотовые телефоны, а также их уменьшение в размерах до минимальных эргономичных стандартов.

Таблица 3.1. Сравнение затрат

| Примерное число команд в с: | | Цена, долл. | Центы/команду |
|--------------------------------------|-------------|-------------|---------------|
| 1975, универ. компьютер IBM ainframe | 10 000 000 | 10 000 000 | 100 |
| 1976, Cray I | 160 000 000 | 20 000 000 | 12,5 |
| 1979, Digital VAX | 1 000 000 | 200 000 | 20,0 |
| 1981, ПК IBM | 250 000 | 3 000 | 1,2 |
| 1984, Sun Microsystems 2 | 1 000 000 | 10 000 | 1,0 |
| 1994, ПК Pentium | 66 000 000 | 3 000 | 0,0045 |

В 1998 г. во всем мире насчитывалось 308 млн пользователей сотовыми телефонами; в 1999 г. это число возросло до 475 млн. Оценивалось, что в 2001 г. будет 1000 млн (т.е. 1 млрд) пользователей сотовых телефонов. С 2000 по 2001 г. было произведено полмиллиарда сотовых телефонов, так что в настоящее время они считаются предметами широкого потребления. Та же самая технологическая тенденция охватывает радиопродукцию для локальных сетей. Эти приложения позволяют пользователям сотовых телефонов, персональных компьютеров и т.п. обмениваться данными (включая видеоданные), используя подходящие радиочастотные (RF) протоколы (Bluetooth, работающий в частотном диапазоне 2,4 ГГц, является одним из таких протоколов), если они находятся поблизости друг от друга.

Потребность Интернета в возрастающей функциональности и ширине полосы, а также меньшей стоимости нуждается в новых принципах технологического проектирования электроники и внедрения оптических компонентов и межсоединений. Эти тенденции будут продолжаться до бесконечности.

3.1.1. Связь технологий корпусирования и изготовления печатных плат

Линии тренда плотности компоновки (площадь корпуса/площадь кристалла) подытожены на рис. 3.3. Эффективность применения корпуса с матричным выводом очевидна и сохраняется уже в течение 20 лет.

Тогда очевидно, что тенденция для новых корпусных полупроводниковых кристаллов состоит в увеличении числа вводов корпуса. Корпуса с матричными выводами по всей площади основания корпуса для полупроводников с высокой плотностью выводов появились для минимизации размера корпуса и улучшения его электрических характеристик (т.е. для уменьшения индуктивности выводов).

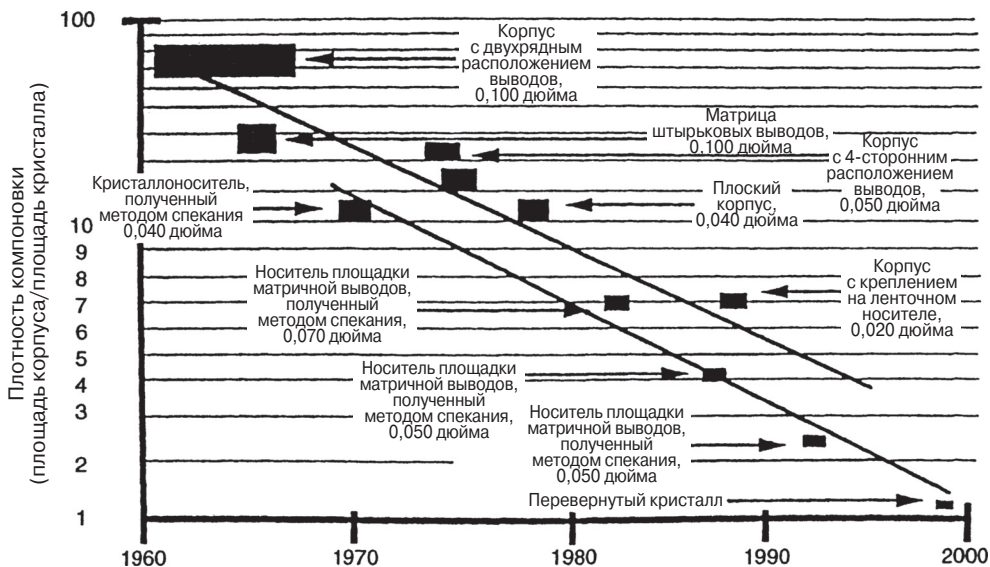


Рис. 3.3. Тренды корпусирования показывают область эффективности концепции использования корпусов с матричным выводом уже в течение 20 лет

В результате перед производителями печатных плат была поставлена задача уменьшить ширину проводящих линий и зазоров между ними и отказаться от многовыводных корпусов с матричными выводами по всему основанию корпуса или от монтажа прямым креплением (ДСА). Чтобы соответствовать требованиям к межсоединениям для промышленной переносной электроники, номиналом для межсоединений печатных плат были $6 \cdot 10^{-3}$ дюйма для линий и расстояний между ними; в 1992 г. — $8 \cdot 10^{-3}$ дюйма; в 1995 г. — $6 \cdot 10^{-3}$ дюйма, а в 2000 г. были уже $4 \cdot 10^{-3}$ дюйма.

Для удовлетворения потребности изготовления плат с более мелким шагом, монтажа схем для корпусов с матрицей шариковых выводов (BGA), корпусов сопоставимого с кристаллом размера (CSP) и монтажных плат с высокой плотностью была разработана новая технология изготовления монтажной платы с высокой плотностью межсоединений, способная обеспечить ширину линии и промежутков между ними в $1,58 \cdot 10^{-3}$ дюйма (40 мкм).

3.1.2. Вопросы и проблемы корпусирования электронных схем

Корпусирование электронных схем начинается после того, как заканчивается их проектирование.

3.1.2.1. Технологический проект и вопросы корпусирования. К вопросам, которые затрагивают технологическое проектирование и корпусирование, относятся:

- выбор подходящих электронных компонентов (полупроводниковых, дискретных и пассивных);
- механическая компоновка и сборка компонентов, разъемов и оболочек;
- техническая и технологическая подготовка производства;
- согласование электрических характеристик межсоединений (проектирование с контролем импеданса, перекрестных наводок, расфазировки синхронизирующих импульсов, задержки распространения сигнала, электромагнитных помех для радиочастотных схем и т.п.);
- расчет теплового режима (рассеяние тепла, охлаждение и т.п.).

3.1.2.2. Соображения при проектировании цифровых схем. Цифровые схемы должны выполнять следующие задачи:

- полностью и в кратчайшее время передавать логический перепад;
- иметь такой характеристический импеданс межсоединения, который бы был равен полному сопротивлению нагрузки;
- иметь чисто резистивный характеристический импеданс, чтобы свести к минимуму отражения;
- компенсировать расфазировку синхронизирующих импульсов.

При соединении цифровых полупроводниковых устройств существенной проблемой является расфазировка синхронизирующих импульсов, которая возникает при изменении длины каналов синхронизации и является одним из основных факторов, которые необходимо учитывать при проектировании высокочастотной продукции.

3.1.2.3. Соображения при проектировании аналоговых схем. Аналоговые схемы должны выполнять следующие задачи:

- минимизировать энергию, переданную от входа к выходу;

- сделать импеданс задающей схемы комплексно сопряженным на линии передачи.

3.1.2.4. Вопросы мощности для кремниевых полупроводников. Следующие пункты перечисляют проблемы, связанные с потребляемой мощностью кремниевых полупроводников:

- рассеяние мощности транзисторно-транзисторной логикой и комплементарным металлооксидным полупроводником (CMOS) зависит от частоты и резко возрастает на высоких частотах;
- для заданной нагрузки отток от эмиттера к коллектору логического устройства не зависит от частоты;
- нагрузочное сопротивление разряжает выходную емкость в схеме CMOS;
- подключение нагрузки к схемам CMOS для контроля отражения приводит к потере мощности.

Полупроводники на основе арсенида галлия (GaAs) в настоящее время технологически не уступают кремнию [2], особенно в высокочастотных логических приложениях. Для логических схем с GaAs рассеяние мощности не зависит от частоты, а работа схемы с GaAs не зависит от напряжения питания при снижении вплоть до 1 В.

3.1.2.5. Радиочастотные полупроводники. Биполярные CMOS с GaAs и с кремний германием являются полупроводниковыми технологиями, в настоящее время используемыми в радиочастотных цепях многих радиоустройств. При корпусировании радиочастотных компонентов требуется уделять особое внимание контролю паразитных электрических компонентов и температурной устойчивости таких компонентов, как усилители мощности и т.п.

3.1.3. Требования к электронным системам

Требования к электронным системам и продукции, выдвинутые развитием полупроводниковой технологии, состоят в следующем.

1. Достижения в технологии интегральных полупроводников означают возможность работы изделий на более высоких частотах при повышенной производительности и функциональности.
2. Надежность и качество продукции в настоящее время и ожидаемые в будущем не связаны с повышением ее стоимости.
3. Размер электронных изделий уменьшается, и это уменьшение ограничено только эргономическими требованиями и способностью рассеивать тепло.
4. Стоимость компонентов и сборки, как ожидается, будет непрерывно уменьшаться.
5. Настало время воздействовать на рынок электроники всем перечисленным выше пунктам.

3.2. Однокристалльный модуль

До 1980 г. наиболее широко используемым корпусом для полупроводников был корпус с двухрядным расположением штырьковых выводов (DIP). Этот корпус

имеет прямоугольную форму с выводами, расположенными вдоль длинных сторон корпуса с шагом 0,100 дюйма.

На рис. 3.4 приведены тенденции развития различных форматов и корпусов полупроводников. Корпуса с левой стороны рис. 3.4 главным образом относятся к корпусам, имеющим выводы, расположенные по периметру корпуса, т. е. DIP, а также плоские корпуса с четырехсторонним расположением выводов (QFP), пластмассовые кристаллоносители с выводами (PLCC), корпуса с автоматизированной сборкой на ленточном носителе (TAB) и т.п. В нижней правой части рис. 3.4 находятся корпуса с матричными выводами по всей площади основания корпуса, в частности со штырьковыми выводами (PGA, прикрепленная к основанию корпуса матрица штырьков, используемая для электрического соединения), корпуса LGA (корпуса с матрицей проводящих площадок на основании корпуса, иногда называемых несущими матричными площадками [PAC], или корпуса с площадками, имеющими припаянные шарики, а также корпуса с матрицей шариковых выводов [BGA]) и многокристалльные модули. Шаг вводов в случае корпусов DIP и PGA равен 0,1 дюйма, тогда как шаг вводов для баланса частей составляет 0,060 дюйма и менее (т.е. 0,050 дюйма, 0,5 мм, 0,4 мм, 0,3 мм). Корпуса матричного типа появились, чтобы обеспечить электрические характеристики для крупных корпусов и/или в случае более низких плотностей компоновки (площадь корпуса/площадь кристалла).

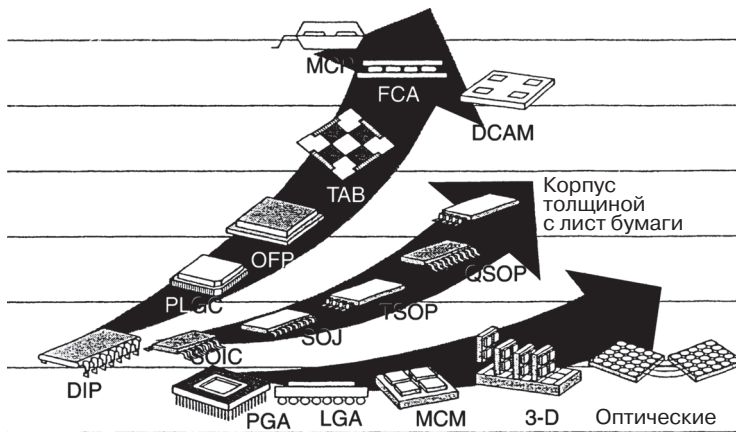


Рис. 3.4. Тенденции корпусирования интегральных схем

3.2.1. Корпуса с двухрядным расположением штырьковых выводов (DIP)

На рис. 3.5 представлена конфигурация корпуса DIP. Используются корпуса DIP с многослойным керамическим телом, изготовленным методом спекания; с выводами, припаянными вдоль длинных краев, или в опрессованной конструкции, в которой кристалл привязан к выводной рамке и золотая проволока соединяет кристалл к выводам выводной рамки до прессовки пластмассового тела вокруг выводной рамки. Корпуса DIP используют не более 64 вводов/выводов.

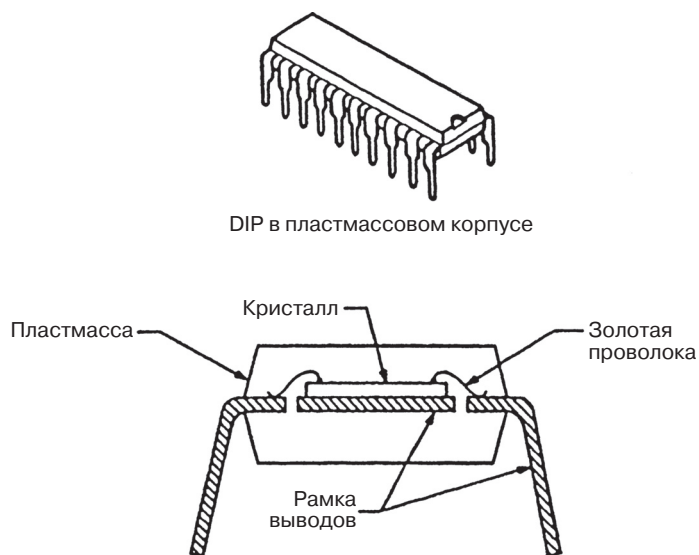


Рис. 3.5. Корпус с выводами в два ряда

3.2.2. Безвыводной керамический контейнер кристалла

Для улучшения форм-фактора были разработаны корпуса промышленного и военного назначения, получившие название безвыводных керамических кристаллоносителей, главным образом состоящих из углубления в DIP из герметической керамики (рис. 3.6) с пригодными для пайки посадочными местами, нанесенными фотолитографией на нижнюю часть безвыводного керамического корпуса кристаллоносителя.

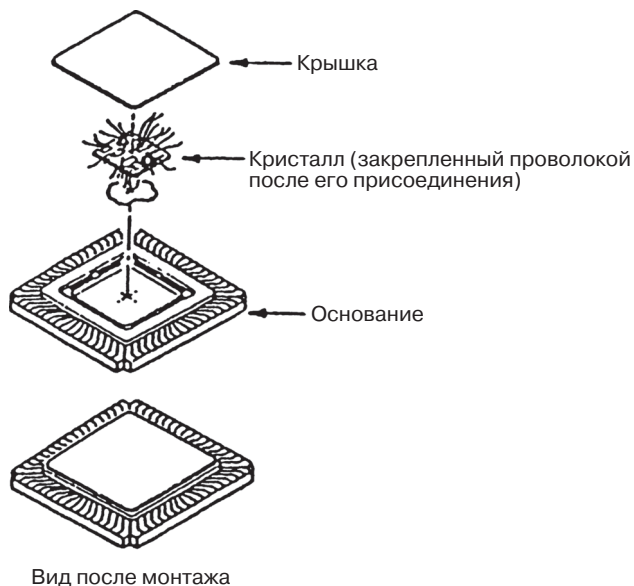


Рис. 3.6. Безвыводной керамический кристаллоноситель

Эти части собирались на керамических подложках и использовались как в военной, так и в телекоммуникационной продукции. Почти одновременно стали появляться варианты с выводами на безвыводных корпусах. Шаг безвыводных частей составлял 0,040 и 0,050 дюйма, тогда как части с выводами располагались друг от друга на расстоянии 0,050 дюйма. Работа [3] содержит подробное описание этих разработок. К 1980 г. началось использование корпусов с четырехсторонними выводами для поверхностного монтажа с акцентом на использовании пластмассовых корпусов, оснащенных выводами с четырех сторон.

В работе [4] показано, что к 1993 г. произошел резкий поворот от монтажа частей в сквозные отверстия платы (т.е. DIP) к корпусам с монтажом на поверхности. В 1993 г. 50% изготавливаемых корпусов для полупроводников относились к DIP, смонтированным с использованием сквозных отверстий. К 2000 г. их доля упала до 30%, а к 2005 г. предполагается сокращение до 15%.

3.2.3. Плоский керамический корпус с четырехсторонним расположением выводов (PQFP)

Движущей силой развития пластмассовых корпусов, используемых для поверхностного монтажа, была разработка пластмассового плоского корпуса с четырехсторонними выводами (PQFP), который состоит из металлической рамки выводов с выводами, выходящими со всех четырех сторон. К рамке выводов, обычно медной, должен прикрепляться полупроводниковый кристалл (обычно с помощью эпоксидной смолы). Вводы/выводы кристалла соединены проволочным монтажом к выводам рамки. Традиционным методом проволочного монтажа является термоультразвуковая шариковая компрессия золотой проволокой. Пластмассовый корпус затем запрессовывают вокруг кристалла, а выводы подгоняют и формируют. На рис. 3.7а приведено поперечное сечение PQFP.

PQFP имеют выводы, сформированные в виде крыла чайки (рис. 3.7), тогда как PLCC имеют выводы в форме буквы J, которые формируются (т.е. сворачиваются) под корпусом.

На рис. 3.8 показан шаг выводов и предельное число штырьков в зависимости от размера QFP и шага выводов. QFP производятся и уже используются при монтаже продукции с шагом 0,5 мм. Основываясь на возможности формования и воздействии длины вывода на электрические характеристики, пресс-форма с 30-мм стороной считается практическим пределом. QFP с шагом 0,5 мм, основываясь на обработке, ограничены примерно 200 вводами/выводами. Внедряются QFP с шагом 0,4 мм.

На рис. 3.7 показано разнообразие пластмассовых корпусов для монтажа на поверхности, которые были разработаны с использованием технологии PQFP.

Керамические и пластмассовые QFP, а также корпуса PLCC используются для матриц логических элементов, стандартных логических ячеек и микропроцессоров. Плоский микрокорпус интегральной схемы с двусторонним расположением выводов (корпус SO) в форме крыла чайки, а также корпуса SO с выводами в форме буквы J используются для упаковки памяти (SRAM и DRAM), а также линейных полупроводниковых кристаллов. Число штырьков для всех типов корпусов ограничивается только возможностями прессования и требованием получить как можно более тонкий пластмассовый корпус.

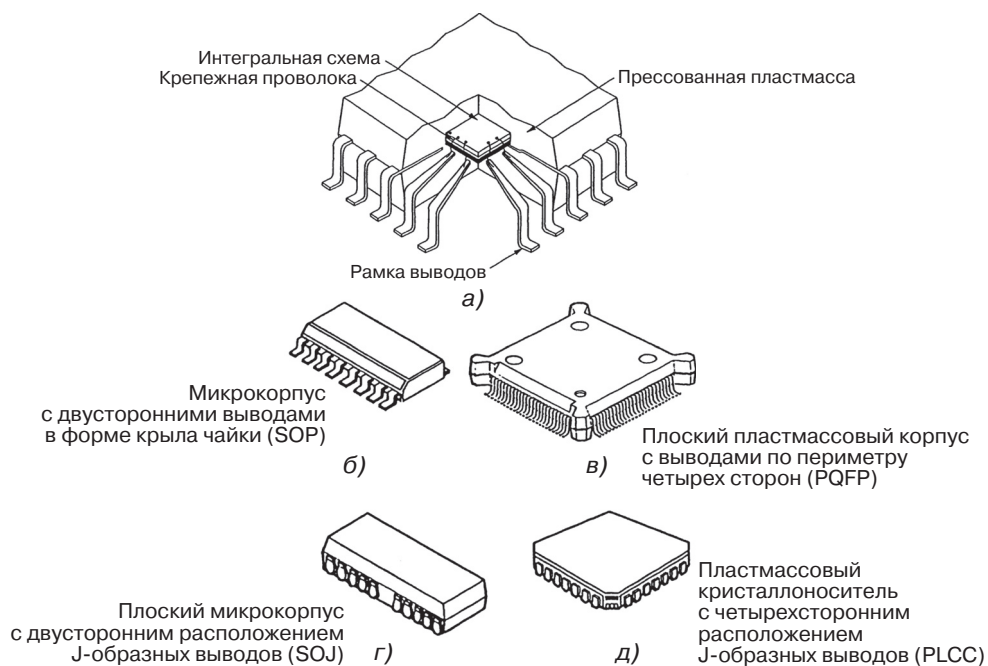


Рис. 3.7. Типы пластмассовых корпусов для поверхностного монтажа

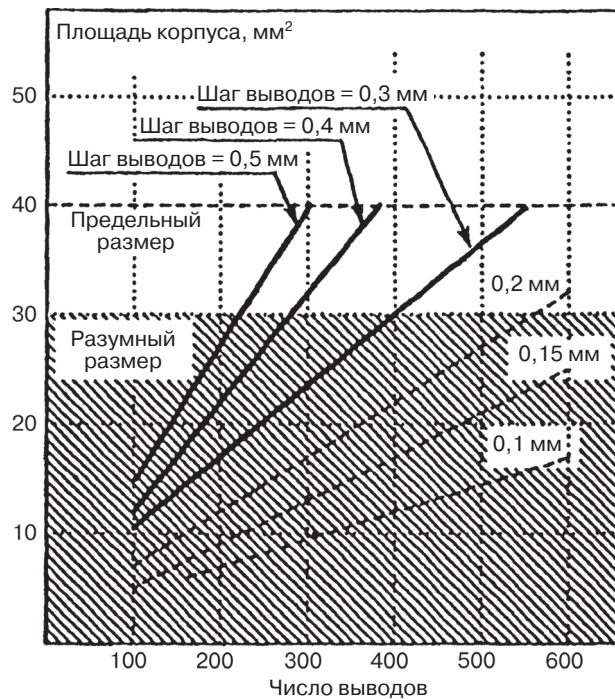


Рис. 3.8. Шаг выводов и предельное число штырьков в зависимости от размера QFP и шага выводов

3.2.4. Матрица штырьковых выводов (PGA) и носитель матрицы площадок (PAC)

Сравним корпуса с выводами, расположенными по периметру корпуса, с корпусами, использующими матрицу выводов по всей площади основания корпуса. Рис. 3.9 наглядно представляет разницу между безвыводным кристаллодержателем и корпусом с матричным выводом по всей площади основания (PAC). На рис. 3.10 приведена зависимость между площадью корпуса и числом выводов для двух различных вариантов – для корпуса с выводами по его периметру и под его основанием. Из рис. 3.10 становится ясно, что для полупроводников с числом выводов, превышающих 100, корпуса PGA и PAC становятся более привлекательными для упаковки сверхбольших и ультрабольших полупроводниковых интегральных схем (БИС и УБИС). Предел масштабирования определяется только вопросами усталости соединения или стыковки, выполняемой пайкой.

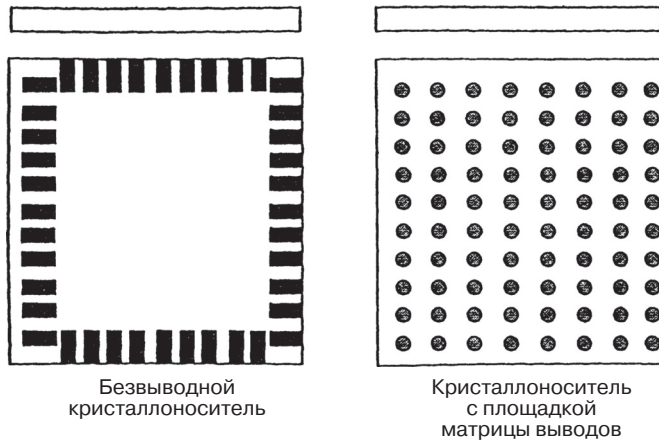


Рис. 3.9. Сравнение корпуса с расположением выводов по периметру и корпуса с матрицей выводов по площади его основания

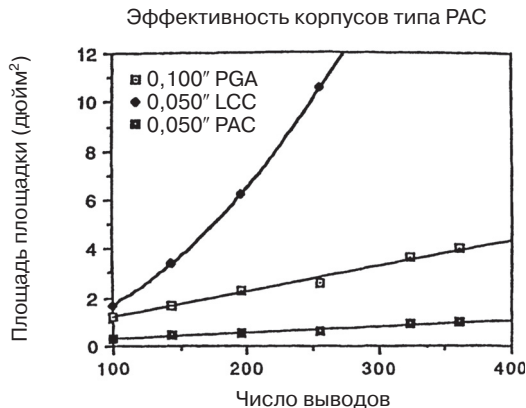


Рис. 3.10. Эффективность корпусов типа PAC

3.2.4.1. Преимущества и недостатки корпусов с выводами, расположенными по периметру.

- Корпуса с выводами по периметру при шаге 0,050 дюйма легко использовать для сборки с поверхностным монтажом. Корпуса QFP с шагом 0,4 мм и 0,3 мм в настоящее время уже выпускаются серийно. Анализируя рис. 3.8, который показывает зависимость размера QFP от шага выводов и числа штырьков, становится очевидным, что применение корпусов типа QFP ограничено примерно 400 выводами.
- Среди специалистов корпусной электроники и электронной сборки все еще идут споры относительно того, возможно ли корпуса QFP с шагом 0,3 мм, особенно с большим числом выводов, быстро изготавливать, поддерживая высокий выход годной продукции. Причина этих споров обусловлена усталостью выводов (шириной 0,015 мм) и возможностью появления между ними перемычек из припоя.

3.2.4.2. Корпуса с матрицей выводов в основании и BGA-корпуса. Это разъемное соединение прежде всего предназначается для корпусов с выводами в основании корпуса и для корпусов BGA. В работах [5] и [6] приводится подробное описание этой развивающейся технологии, что связано с использованием ею недорогих пластмассовых корпусов с матрицей шариковых выводов для пайки волной припоя, присоединенных к корпусу. На рис. 3.11 приведен керамический корпус с матрицей шариковых выводов (CBGA), а на рис. 3.12 – поперечное сечение пластмассового корпуса BGA.

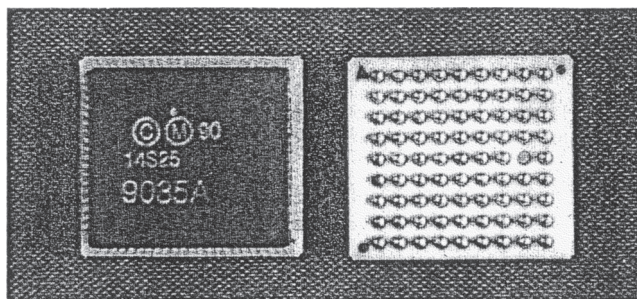


Рис. 3.11. Керамический корпус с матрицей шариковых выводов

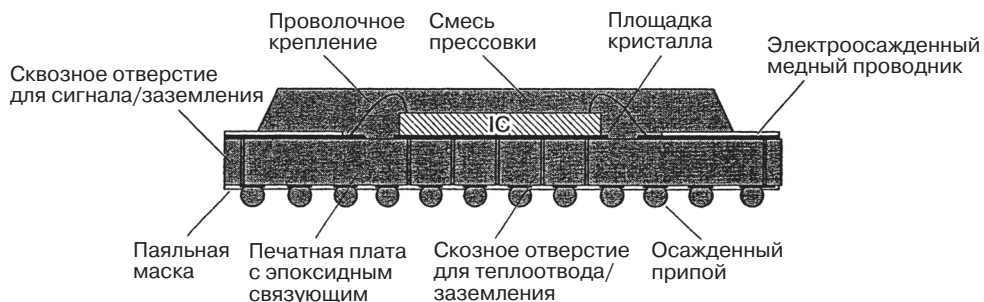


Рис. 3.12. Поперечное сечение корпуса с матрицей шариковых выводов

К преимуществам корпусов с матрицей шариковых выводов (керамических или пластмассовых) относятся:

- высокая плотность межсоединений. В настоящее время серийно выпускаются площадки с выводами, имеющими шаг 1,27; 1,0; 0,8 и 0,5 мм;
- корпуса достигли уровня качества пайки в 6-s (продемонстрированного для 1,27 и 1,00 мм шага выводов) благодаря большому объему припоя на площадке выводов;
- этот корпус относится к тонкопрофильным частям (теперь доступна толщина корпуса не более 1 мм);
- этот корпус имеет превосходные электрические характеристики благодаря небольшой общей длине выводов, контролируемому импедансу, низкой диэлектрической постоянной и использованию при изготовлении подложки материалов с малыми потерями;
- корпус благодаря своей конструкции имеет превосходные тепловые характеристики;
- принцип конструкции корпуса имеет возможность расширения до вариантов многокристалльных корпусов (MCP).

В табл. 3.2 приводятся ожидаемые диапазоны числа выводов в случае BGA-корпусов для высокоэффективных микропроцессоров и для кристаллов, используемых в портативных изделиях. В 2000 г. примерно 60% всех BGA-корпусов имели шаг 1,27–1,00 мм, а для баланса частей – 0,8–0,5 мм. К 2004 г. 60% всех BGA-корпусов будут иметь шаг 0,8–0,5 мм, а их небольшая доля – с шагом меньше 0,5 мм.

Таблица 3.2. Количество штырьковых выводов BGA-корпуса

| Год | 2001 | 2005 | 2010 |
|--|----------|-----------|-----------|
| Число штырьков, высокоэффективные логические схемы | 700–1000 | 1000–1900 | 1200–4000 |
| Число штырьков, портативные изделия | 256 | 312 | 360 |

Эффективность использования поверхности BGA-корпусов, имевших небольшое число контактных площадок (менее 140), за последние несколько лет значительно возросла. Новая форма BGA-корпусов, получившая название корпусов с основанием, сопоставимым с величиной кристалла (CSP), обладает эффективностью использования площади поверхности примерно 80% (т. е. 80% площади корпуса занимает кремниевый кристалл). Шаг контактной площадки для CSP имеет диапазон 0,8–1 мм. Корпуса CSP следует рассматривать как разновидность технологии BGA-корпусирования. На рис. 3.13 приведен типичный корпус CSP.

Был разработан новый, меньший по размеру корпус, который получил название корпуса в масштабе целой пластины (WSP). На рис. 3.14 показан такой корпус. Эффективность использования поверхности в нем составляет 100% (т. е. 100% площади корпуса занимает кремниевый кристалл). WSP относятся к корпусам, при изготовлении которых все процессы выполняются на кремниевой пластине, включая аппликацию шариков припоя, используемых для выводов. WSP имеет относительно небольшое число выводов и шаг расположения площадок в диапазоне 0,8–1 мм. Обычно для реализации такого шага требуется равномерное перераспределение выводов микросхемы по всей площади кристалла. Для WSP не нужна герметизация кристалла, как в случае прямого крепления кристалла (DCA), описанного в разд. 3.2.5.

Amkor Tape CSP

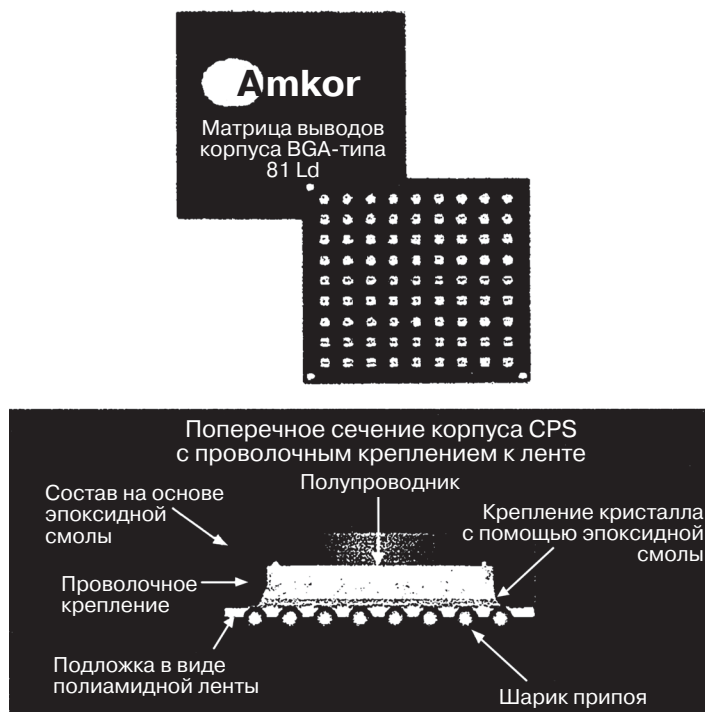


Рис. 3.13. Типичная технология CSP (схема любезно предоставлена компанией Amkor Inc.)



Рис. 3.14. Корпуса в масштабе целой пластины (любезно предоставлено компанией Flipchip)

3.2.5. Прямое крепление кристалла (DCA)

Следующим шагом в развитии корпусов является технология DCA. К методам крепления полупроводниковых кристаллов прямо на соединительную плату (PCB, многослойная керамика и т.п.) относятся:

- соединение кристалла с помощью проволоки;
- технология ТАВ;
- соединение методом перевернутого кристалла.

Исчерпывающее описание монтажа печатных плат креплением кристалла проволокой, на ленте (ТАВ), а также соединение кристалла методом контролируемого разрушения (С4) или технологии крепления перевернутым кристаллом пайкой к столбиковым выводам на плату можно найти в гл. 6 работы [7]. Рис. 3.15 иллюстрирует методики присоединения кристалла, которые будут описаны далее в тексте.

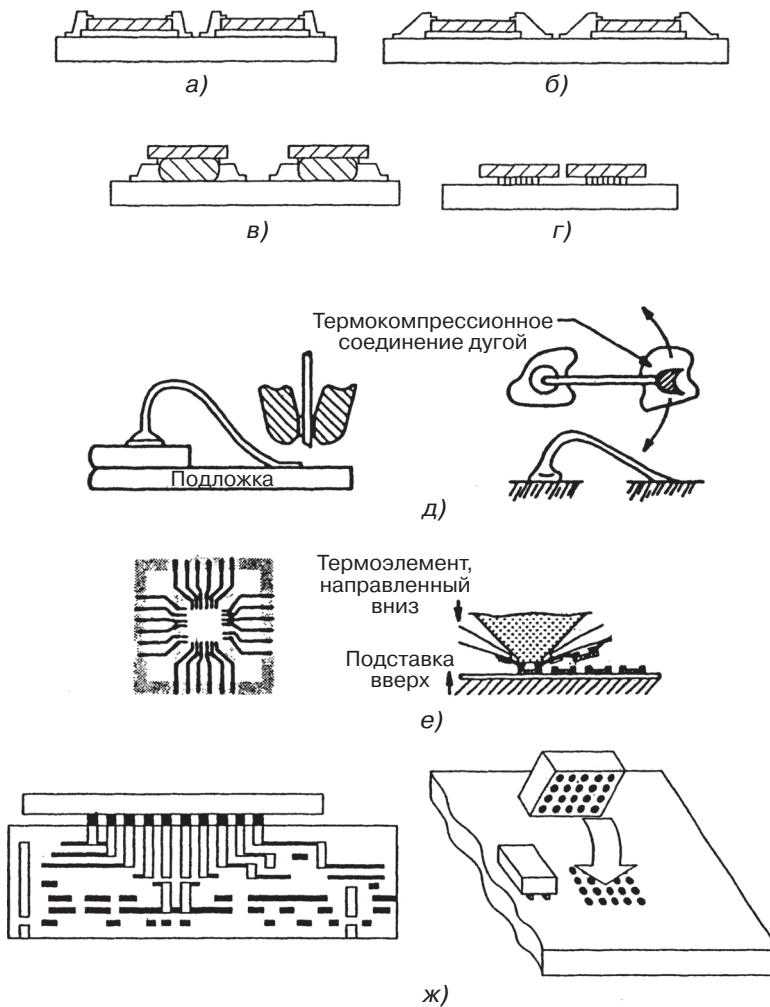


Рис. 3.15. Методики межсоединений: *а* – модуль с креплением кристалла проволочным монтажом; *б* – ленточный модуль ТАВ; *в* – модуль с прикреплением перевернутых кристаллов к выводам на ленточном носителе; *г* – модуль с кристаллом, установленным лицевой поверхностью вниз; *д* – термоакустическое крепление с использованием золотой проволоки; *е* – крепление на ленточном носителе ТАВ; *ж* – крепление перевернутого кристалла

3.2.5.1. Крепление кристалла к печатной плате. К предпочтительным методам крепления кристалла и проволочного монтажа относится его крепление эпоксидной смолой к межсоединениям (т.е. к РСВ или к многослойной керамике) и метод шариковой термокомпрессии золотой проволокой. Одно из преимуществ шариковой термокомпрессии золотой проволокой состоит в том, что она может выполняться по дуге вокруг шарикового соединения. К термокомпрессии клином с использованием проволоки это не относится.

Проволочный монтаж можно производить проволокой диаметром не более $0,8 \cdot 10^{-3}$ дюйма. Шариковая термоультразвуковая компрессия золотой проволокой, показанная на рис. 3.15*д*, выполняется следующим образом:

- 1) золотая проволока просовывается через капилляр;
- 2) на конце проволоки с помощью разряда емкости или водородной горелкой формируется шарик;
- 3) крепление шарика завершается одновременным приложением вертикальной нагрузки на шарик, помещенный на крепежную площадку кристалла, и возбуждением капилляра ультразвуком (кристалл и подложка обычно нагреваются при этом до номинальной температуры);
- 4) капилляр передвигается вверх и, оказавшись над подложкой или площадкой выводов, создает петлю, которая под нагрузкой и ультразвуковым возбуждением создает крепление;
- 5) проволока фиксируется относительно капилляра, и капилляр, перемещаясь вверх, разрывает проволоку в месте ее крепления.

Присоединение кристалла и монтаж с применением проволоки имеют недостаток, который заключается в том, что закрепленный кристалл очень трудно демонтировать, особенно если он герметизирован.

3.2.5.2. Автоматизированная сборка кристаллов на ленточном носителе (ТАВ). Метод ТАВ, представленный на рис. 3.15*е*, является более дорогостоящим, чем проволочный монтаж, и может потребоваться существенный коэффициент разветвления выхода от кристалла, чтобы выполнить соединение наружным впаем. ТАВ является процессом, в котором химически вытравленные, изготовленные заводским способом медные штырьки в форме непрерывной, полученной химическим травлением ленты, состоящей из повторяющихся участков, под воздействием температуры и давления одновременно присоединяются к столбиковым выводам из золота или сплава золота и олова, которые изготавливаются на выводах кристалла. Наружные впаи кристалла, закрепленного методом ТАВ, вырезаются и одновременно закрепляются к луженым площадкам на плате межсоединений под воздействием температуры и давления.

3.2.5.3. Кристаллы с напаянными столбиковыми выводами. Использование кристаллов с напаянными столбиковыми выводами для корпусирования электронных систем было впервые внедрено компанией IBM и получило название соединения кристалла с помощью контролируемого разрушения (С4). Припой, используемый при методике С4, состоит примерно из 95% Pb и 5% Sn. Кристаллы С4 для приложений компании IBM прикреплялись к многослойным керамическим подложкам с помощью пайки расплавлением полуды, используя флюс, который после заливки припоя требовалось отчищать. Первоначально компания IBM применяла технологии С4 для профессиональных комплектов вычислительного оборудования.

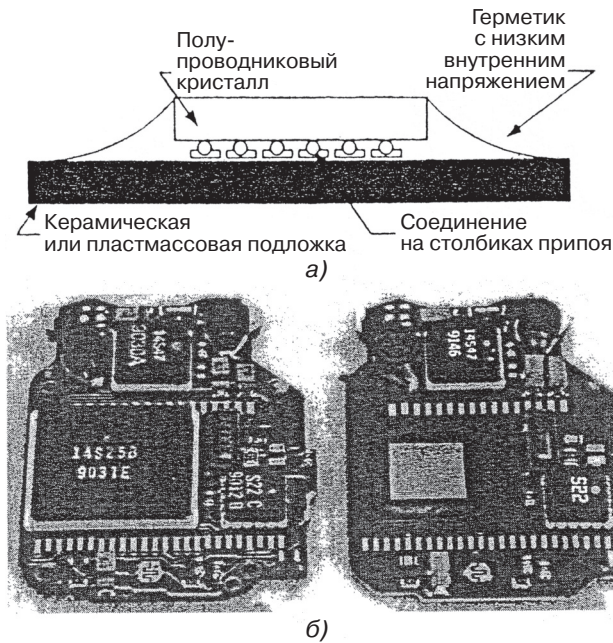


Рис. 3.16. Применения DCA. Микропроцессор слева находится в BGA, тогда как процессор справа прикреплен пайкой к столбиковым выводам, чтобы продемонстрировать возможную экономию площади

Крепление методом перевернутого кристалла представлено на рис. 3.15ж. Выводы кристалла в этом методе припаяны (обычно используется припой из 95% Pb и 5% Sn или эвтектический припой из Pb и Sn), а кристалл волной припоя крепится к схеме межсоединений. В настоящее время этот метод стал широко использоваться как эффективная технология изготовления бескорпусной серийно выпускаемой продукции широкого потребления. Для технологии прямого крепления кристалла с использованием метода PCB место посадки кристаллов обычно покрывают эвтектическим сплавом Pb и Sn. Для пайки при DCA используется припой, который не требует чистки после его использования в пайке. После того как кристалл прикреплен пайкой, для защиты от влажности и для усиления показателей температурной цикличности его герметизируют. В работах [8–10] обсуждаются некоторые появившиеся разработки для прямого крепления кристалла со столбиковыми выводами к PCB для серийного выпуска продукции. На рис. 3.16 показан способ применения DCA, который подробно описан в работе [10]. В этом способе корпусированный микропроцессор СВГА припаян и напрямую прикреплен кристаллом, чтобы показать возможность экономии занимаемой PCB площади.

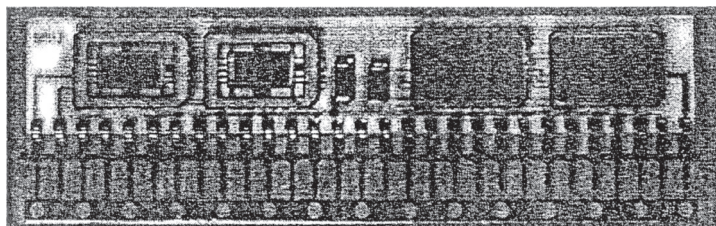
3.3. Многокристальные модули

Многокристальные модули (MCP) появились как вариант корпусирования для тех случаев, когда возникают проблемы с характеристиками или область межсоединений для корпусной интегральной схемы имеет первостепенное значение.

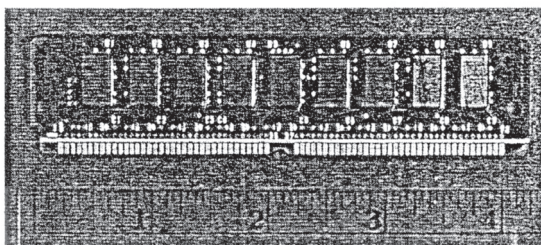
Проблема, связанная с характеристиками, состоит в увеличении технических характеристик полупроводника и влиянии области межсоединений на характеристики смонтированного кристалла. Следствием этого стал вывод о том, что межсоединения мгновенно обеспечивать электрический контакт не могут. Можно показать, что для медных проводников на полиамиде при тактовой частоте в 200 МГц максимально допустимая длина межсоединений составляет 170 мм или около 6,8 дюйма. Для сравнения, тактовая частота для микропроцессора DEC ALPHA RISC была 200 МГц или даже выше уже в 1995 г. Тактовая частота микропроцессора Pentium III составляет 500 МГц, а микропроцессоры с тактовой частотой 1 ГГц в настоящее время уже выпускаются серийно.

3.3.1. Многокристальные модули против однокристалльных

МСР для модулей памяти нашли широкое применение в персональных (ПК) и портативных компьютерах. Модули памяти с многочисленными кристаллами (в корпусах и без корпусов) монтируются на прямоугольных платах межсоединений (PCB или многослойной керамики) с выходами вдоль одной из сторон прямоугольника. Такие корпуса получили название плоских корпусов с односторонним расположением выводов (SIP). SIP могут иметь два ряда штырьковых выводов, расположенных для крепления через сквозное отверстие к PCB, или они могут иметь посадочные площадки на корпусе для стыковки с подходящим разъемом. Для монтажа в сквозные отверстия платы SIP его выводы обычно имеют шаг в 0,100 дюйма. Модули памяти в системах на одном корпусе или в тонком корпусе или плоские микрокорпуса типа SO с J-образными выводами монтируются на SIP, подложкой которого служит PCB с подходящими ветвлениями для расширения возможностей памяти. Можно также использовать DCA или кристалл памяти.



а)



б)

Рис. 3.17. Конфигурации SIP

На рис. 3.17 показано несколько конфигураций SIP. На рис. 3.17а представлена ранняя версия SIP, использующая керамическую подложку и безвыводные керамические кристаллоносители с напаянными выводами. На рис. 3.17б представлена типичная версия SIP для сочленения с разъемом SIP-типа.

3.3.2. Технология применения в МСР печатных плат

МСР с технологией РСВ, но с выводами, расположенными на подложке, также применяются для улучшения функциональных характеристик и сокращения площади монтажа. На рис. 3.18 демонстрируется концепция МСР с выводами на подложке. Выводы к подложке могут быть полностью изготовлены на заводе вместе с платой или могут быть припаяны подходящим высокотемпературным припоем. МРС с выводами, расположенными на подложке, можно после монтажа герметизировать или покрыть слоем подходящего герметика.



Рис. 3.18. Печатная плата МСР с выводами на подложке

МРС с выводами на подложке может также использоваться с керамическими корпусами совместного обжига с напаянными выводами и покрывающим слоем из подходящего герметика или герметичного уплотнителя собранной интегральной схемы. Гл. 7 в работе [7] содержит подробное описание процесса изготовления керамического многослойного корпуса путем совместного обжига.

3.3.3. Органические подложки МСР

Более распространенная форма МСР использует многослойную органическую плату межсоединений на подложке, выполненной из кремния, корундовой керамики или металлического композита. Диэлектрические пленки накладываются сериями одна поверх другой для создания многослойной платы межсоединений. Предпочтительным считается диэлектрик из полиамида с тонкопленочными медными проводниками. Технология для платы межсоединений использует процесс и оборудование изготовления, которое первоначально использовалось для изготовления полупроводников. Эта технология способна изготавливать линии толщиной $1 \cdot 10^{-3}$ дюйма с таким же расстоянием между ними. Корпуса могут иметь впадину, обращенную вверх (в направлении от РСВ) или вниз (в направлении к РСВ), если необходимо использовать сток тепла для его рассеяния.

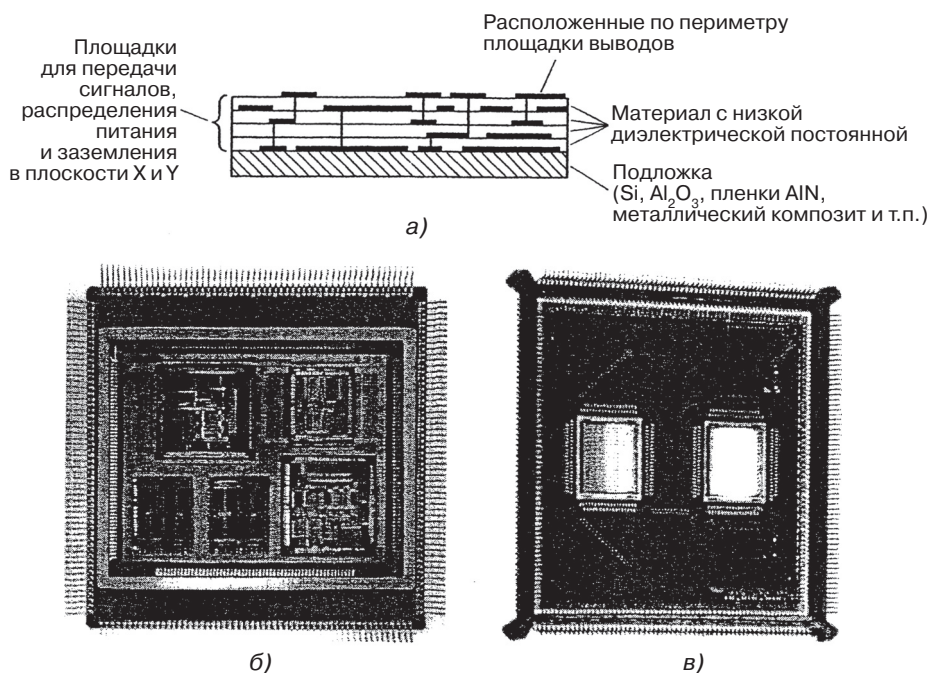


Рис. 3.19. Пример MCP

На рис. 3.19 показан кристалл, закрепленный проволокой к кремниевой подложке и помещенный в заранее спрессованный корпус QFP и в керамический корпус QFP. Заранее спрессованный корпус QFP представляет собой рамку с выводами с запрессованным вокруг пластмассовым корпусом, который содержит углубление для кристалла или подложку. Присоединение кремниевой подложки к корпусу производится с помощью проволоки. Как показано на рис. 3.15, бескорпусный кристалл может крепиться к кремниевой подложке проволочным соединением, соединением TAB или методом перевернутого кристалла. Как и в случае технологии выводов на подложке, формат выводов для QFP, которые вмещают в себя многокристальную подложку, соответствует стандартам корпусов QFP.

3.3.4. MCP и PGA

Корпуса PGA могут использоваться в качестве MCP с подложкой, тип которой указан на рис. 3.19. Корпуса PGA могут иметь впадину, обращенную вверх (в направлении от PCB) или вниз (в направлении к PCB), если необходимо использовать сток тепла для его рассеяния. Шаг выводных штырьков PGA обычно составляет 0,1 дюйма.

3.3.5. Многокристальные корпуса с многоярусным размещением кристаллов

Новая форма MCP появилась в момент написания этого материала. Корпусные кристаллы помещаются один над другим и соединяются между собой главным обра-

зом проволочным монтажом. Кристаллы утончены до формы пластины толщиной, не превышающей $6 \cdot 10^{-3}$ дюйма. На рис. 3.20 представлены различные форматы корпусов. Подложки для многокристалльных корпусов с многоярусным размещением кристаллов могут быть лентой, многослойной органикой (FR-4, FR-5 и т.п.), многослойной органикой с высокой плотностью внутрисхемных соединений или многослойной керамикой. Предпочтительным форматом является BGA. Первоначальным применением многоярусного размещения кристаллов было объединение памяти с логическими кристаллами, а не интегральная логика и память на отдельной кремниевой подложке.

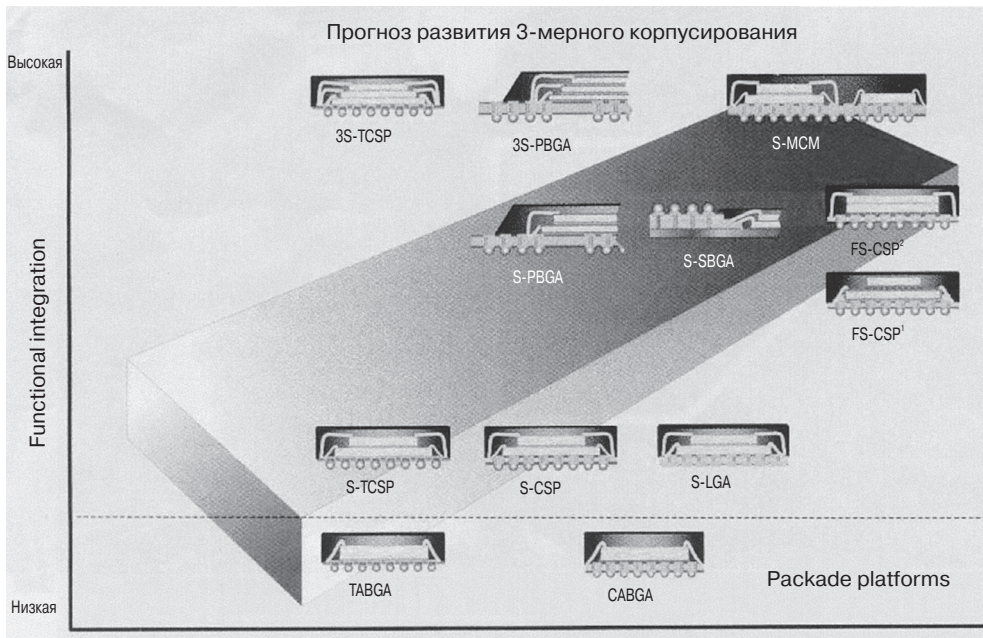


Рис. 3.20. Форматы для многокристалльных корпусов с многоярусным размещением кристаллов

3.3.6. МСР и заведомо годный кристалл

Одной из проблем технологии МСР является возможность использования заведомо годного кристалла. Справедливо полагая, что для большинства кристаллов выход при тестировании корпусных кристаллов после испытаний полупроводниковой пластины составляет около 95%, МСР ограничиваются примерно пятью кристаллами интегральной схемы из расчета на корпус в лучшем случае. Это ограничение является результатом потери полезного выхода конечного корпусного многокристалльного модуля. Например, для двухкристалльной МСР, в которой каждый кристалл имеет полезный выход в сборе примерно 90%, полезный выход МСР составит 81% (т.е. $0,9^2$), а для четырехкристалльной МСР полезный выход составит 65,6% (т.е. $0,9^4$).

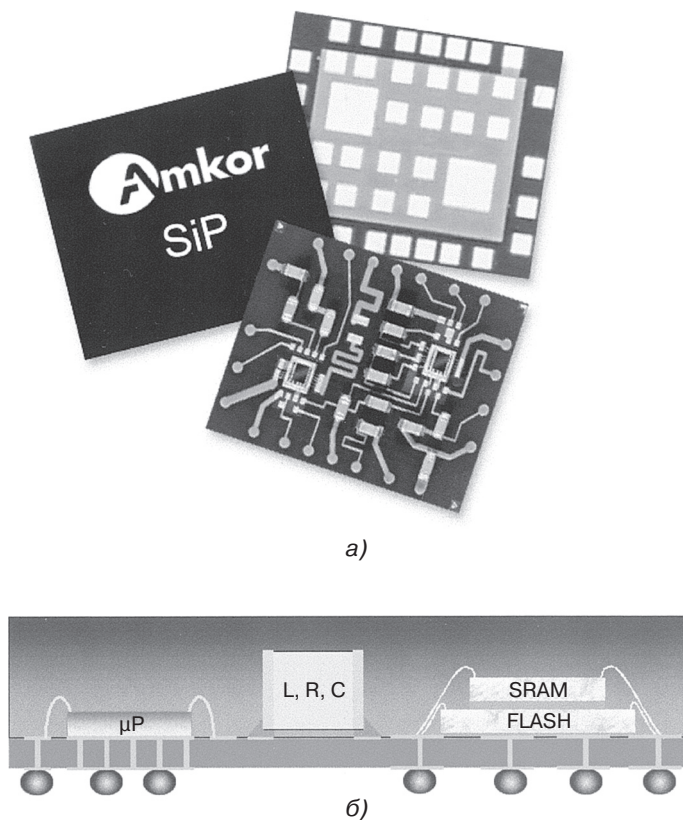


Рис. 3.21. Особенности технологии пакетирования при создании корпуса всей системы в одном корпусе (а); поперечное сечение всей системы в одном корпусе (б)

РАДИОЧАСТОТНЫЙ ВХОДНОЙ КАСКАД INTARSIA

- Радиочастотный входной каскад для HiperLAN
 - для 5,2 ГГц модуля радиосети LAN
 - 12,2×12,2 мм на базе подложки кристалла CSP
- Обеспечивает все функции для преобразования между первой промежуточной частотой и радиочастотой 5,2 ГГц
 - приемопередатчик из сплава GaAs
 - усилитель мощности GaAs
 - прием/передача
 - низкошумящие транзисторы
 - предварительный делитель
 - радиочастотные фильтры системы
- Кристаллоноситель с интегрированными пассивными элементами
 - 2 перевернутых кристалла GaAs
 - 1 кремниевый перевернутый кристалл
 - 2 дискретных компонента GaAs, закрепленных проволокой

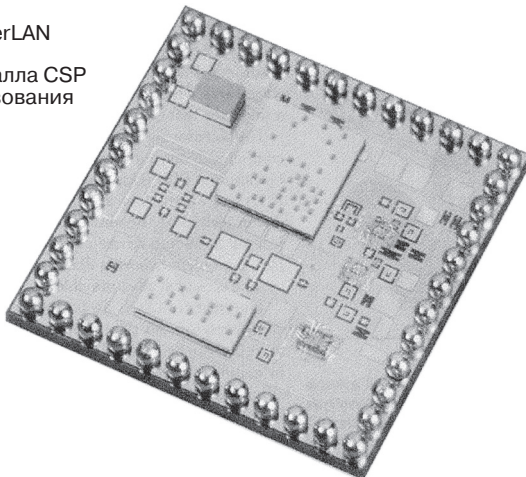


Рис. 3.22. Примеры системы в одном корпусе

3.3.7. Размещение всей системы в одном корпусе

В настоящее время появилась расширенная форма МСР, получившая название «система на корпусе» или «система в корпусе» целиком. Этот вариант корпуса объединяет некоторые или все технологии многокристального корпусирования, которые были описаны ранее. На рис. 3.21 показаны различные возможности корпусирования, которые образуют систему на корпусе или систему в корпусе. Одна из особенностей этой концепции единого корпуса состоит в том, что корпус вмещает в себя не только кремниевый кристалл, но также все пассивные элементы, необходимые для обеспечения функциональности системы. Пассивные элементы (т.е. сопротивления, емкости и катушки индуктивности) могут быть смонтированы на подложке или интегрированы в ней (т.е. в технологии подложки со встроенными пассивными элементами). В работе [11] приводится подробный обзор концепции системы на одном корпусе или системы в одном корпусе. Другим примером применения этой концепции является радиочастотный модуль входного каскада высокопроизводительной радиосети HyperLAN, показанный на рис. 3.22.

3.4. Оптические межсоединения

По мере совершенствования технических характеристик полупроводников, мерой которых является тактовая частота, допустимая длина межсоединений, не приводящая к ухудшению характеристик устройства, уменьшается. Появление Интернета и необходимость все возрастающей полосы пропускания стали основной движущей силой развития оптических компонентов в технологии межсоединений. Для систем мультиплексирования с разделением по длине волны и систем Ethernet был достигнут предел полосы пропускания меди, равный 5 Гб/с.

3.4.1. Компоненты и корпуса

У конечного пользователя в настоящее время появилась заинтересованность в широкой полосе пропускания (стационарные или настольные компьютеры). К области физических разработок недорогой оптоэлектроники относятся: 1) разработка недорогого процесса сборки и недорогих корпусов для оптоэлектронных компонентов и 2) возможность стандартной автоматизированной сборки на плате всех оптоэлектронных частей. На рис. 3.23 представлены разнообразные типы корпусов, используемые для размещения излучателей и детекторов излучения. Как правило, все корпуса относятся к транзисторному типу или к корпусам DIP в форме бабочки, а также предназначенным для монтажа через сквозное отверстие. Обычно все эти корпуса герметичные. Корпуса DIP для монтажа через сквозное отверстие и имеющие форму бабочки чаще всего используются для упаковки лазеров торцевого излучения. Пример корпуса DIP в форме бабочки с оптоволоконными выводами для лазера торцевого излучения показан на рис. 3.24.

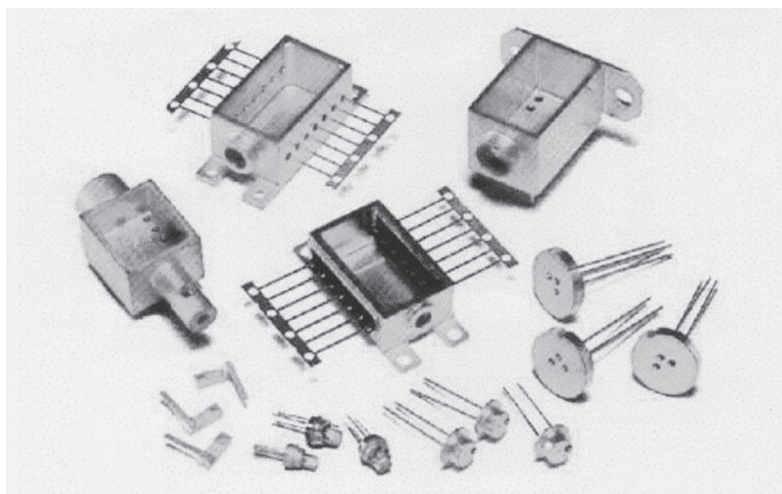


Рис. 3.23. Типы корпусов, используемых для излучателей света и детекторов

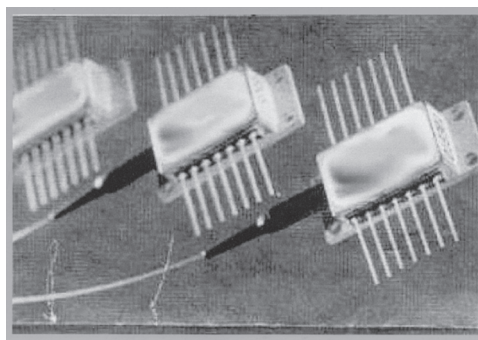


Рис. 3.24. DIP лазера 0/7

3.4.2. Преимущества оптических межсоединений

Преимущества оптических межсоединений состоят в следующем.

- Распространение сигнала не зависит от скорости потока цифровых данных (вплоть до 20 000 Гб/с).
- Оптические компоненты не чувствительны к электромагнитным помехам и перекрестным наводкам.
- Оптические сигналы могут проходить друг через друга (отсутствие оптического взаимодействия).
- Компоненты легко допускают мультиплексирование.

Преимущества оптоэлектронных устройств можно использовать для точного учета локального распределения оптического сигнала для:

- уменьшения числа штырьковых выводов корпусов для сложных сверхбольших интегральных схем путем замены сложных выводов, наличие которых обусловлено полосой пропускания;

- переноса сигналов с очень высокой скоростью передачи цифровых данных в гибридных схемах и сборках РСМ;
- обеспечения межсоединений высокой сложности, которые достигаются без сопутствующего роста себестоимости и затруднений, обычных при использовании объединяющей платы с металлической основой.

3.5. Обзор корпусирования высокой плотности с улучшенными техническими характеристиками

Для обеспечения улучшенных технических характеристик и высокого уровня межсоединений можно воспользоваться идеей совместного использования корпуса МСР и многокристальных модулей. Кроме того, оптоволоконные передатчики и приемники, изготавливаемые в настоящее время серийно, в состоянии обеспечить оптические соединения вне платы с улучшенными техническими характеристиками вместо межсоединений на плате с использованием проволочного монтажа, стандартной технологии РСВ и кабельной проводки. Эти оптоволоконные передатчики и приемники обычно используют герметичные и негерметичные, сделанные под заказ корпуса формата DIP. Вместе с достижениями в оптоэлектронных полупроводниках также были продемонстрированы возможности оптических межсоединений на плате. В работе [12] описывается один из вариантов такого оптического межсоединения на плате, где полимерный оптический волновод, включающий ветвление и перекрестное замыкание, был изготовлен в полиамидном диэлектрике многослойной медной полиамидной кремниевой подложки. В настоящее время разрабатывается технология оптических волноводов, которые встраиваются внутри печатных плат.

3.6. Информация по перспективному плану развития

Перспективный план развития на 2000 год NEMI [13] является хорошим источником подробной информации по перспективе развития корпусирования интегральных схем, технологии изготовления печатных плат, оптоэлектроники и т.п.

Литература

1. D. R. Harriott, R. J. Collier, D.S. Alles, and J. W. Stafford «EBBS: A Practical Lithographic System,» *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. ED-22, no. 7, July 1975.
2. Ira Deyhimy, Vitesse Semiconductor Corp., «Gallium Arsenide Joins the Giants», *IEEE Spectrum* February 1993.
3. J. W. Stafford, «Chip Carriers – Their Application and Future Direction.» *Proceedings of the International Microelectronics Conference*, Anaheim, CA, February 26-28, 1980, New-York., June 17–19, 1980, Also published in *Electronics Packaging and Production*, vol. 20, no. 7, July 1980.
4. Ron Iscoff. «Costs to Package Die Will Continue to Rise,» *Semiconductor International*, December 1994, p. 32.

5. Bruce Freyman and Robert Pennisi, Motorola, Inc., «Overmolded Plastic Pad Array Carriers (OMPAC): A Low Coat, High Interconnect Density IC Packaging,» *Proceedings of the 41st Electronics Components Technology Conference*, Atlanta, GA, May 1991.
6. Howard Markstein, «Pad Array Improves Density,» *Electronics Packaging and Production*, May 1992.
7. Rao R. Tummala and Eugene J. Rymaszewski, *Microelectronics Packaging Handbook*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1989.
8. Yutaka Tsukada, Dyuhei Tsuchia, and Yohko Machimoto, IBM Yasu Laboratory, Japan, «Surface Laminar Circuit Packaging,» *Proceedings of the 42nd Electronics Components and Technology Conference*, San Diego, CA, May 18–20, 1992.
9. Akiteru Rai, Yoshihisa Dotta, Takashi Nukii, and Tetsuga Ohnishi, Sharp Corporation, «Flip Chip COB Technology on PWB,» *Proceedings of the 7th International Microelectronics Conference*, Yokohama, Japan, June 3–5, 1992.
10. C Becker, R. Brooks, T. Kirby, K. Moore, C Raleigh, J. Stafford, and K. Wasko, Motorola, Inc., «Direct Chip Attach (DCA), the Introduction of a New Packaging Concept for Portable Electronics,» *Proceedings of the 1993 International Electronics Packaging Conference*, San Diego, CA, September 12–15, 1993.
11. William F. Shutler, Alberto Parolo, Stefano Orggioni, and Claudio Dall'Ara, «Examining Technology Options for System On a Package,» *Electronics Packaging and Production*, September, 2000.
12. K. W. Jelley, G. T. Valliath, and J. W. Stafford, Motorola, Inc., «1 Gbit/s NRZ Chip to Chip Optical Interconnect,» *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 4, no. 10, October 1992.
13. National Electronic Manufacturing Initiative, Inc. (NEMI) *Year 2000 Roadmap*, NEMI, Herndon, VA, 2000.

ГЛАВА 4

ПАКЕТИРОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ КОМПОНЕНТОВ

Tarak A. Railkar, Ph.D.

Texas Instruments, Inc., Dallas, Texas

Simon Ang, Ph.D.

*High Density Electronics Center, Department of Electrical Engineering
University of Arkansas, Fayetteville, Arkansas*

William Brown, Ph.D.

*High Density Electronics Center, Department of Electrical Engineering
University of Arkansas, Fayetteville, Arkansas*

4.1. Введение

Все корпуса, содержащие электронные устройства, такие как интегральные схемы (ИС), должны, по крайней мере, выполнять четыре основные функции:

- обеспечивать электрическое межсоединение (по передаче сигнала, мощности и заземления) между различными компонентами в корпусе;
- обеспечивать механическую и электрическую защиту для устройств, которые они содержат, и защиту окружающей среды;
- обеспечивать достаточное число вводов/выводов, позволяющее соединяться с другими частями электронных систем, частью которых они являются;
- обеспечивать рассеяние тепла, которое может создаваться электронными устройствами, находящимися внутри корпуса при подаче в систему электропитания.

Проще говоря, корпус электроники должен обеспечивать для схемы поддержку и защиту, распределение электропитания, сигналов и рассеяние тепла. Все эти основные требования должны быть выполнены, если корпус содержит единичную ИС, одновременно несколько ИС или комбинацию ИС и пассивных устройств [1].

Движимые желанием и необходимостью сделать электронные системы меньше, быстрее, дешевле и менее энергоемкими, полупроводниковые технологии продолжают увеличивать плотность компонентов и межсоединений, увеличивая возможности вводов/выводов (I/O) и рассеяния мощности, которые, в свою очередь, предъявляют всевозрастающие требования к технологии корпусирования [2]. Эти достижения развития интегральных схем направляют технологии пакетирования на путь увеличения числа соединений I/O, скорости выполнения операций и возможности рассеивать тепло. Межсоединения корпусных систем при этом должны приспособливаться к требованиям пассивных компонентов в отношении электромагнитных помех (ЕМІ), согласования с фильтрующими контурами,

оконечными устройствами и полным сопротивлением [3]. Следовательно, для высокочастотных интегральных схем корпус будет продолжать играть большую роль в формировании технических характеристик и себестоимости ИС. В технологии корпусирования должно продолжаться совершенствование защиты ИС, улучшаться рассеяние тепла и осуществляться прокладка большого числа сигнальных соединений, а также распределение коммутационных дорожек электропитания и заземлений, используя для этого все меньшее пространство. Многие корпуса включают пассивные устройства в виде интегрированных пассивных элементов. Появление микроэлектромеханических систем (MEMS), микрооптоэлектромеханических систем (MOEMS) и даже биологических корпусов и приложений добавило уже и без того высокие требования, предъявляемые к корпусированию. Оптоэлектронные корпуса содержат не только полупроводниковые устройства, но также оптические компоненты, такие как волоконные световоды, оптику и зависящие от применения элементы, такие как оптический мультиплексор/демультиплексор. MEMS и MOEMS внутри корпуса содержат крошечные подвижные части. С точки зрения увеличенной области применения *современное корпусирование*, возможно, является более подходящим термином, чем просто *корпусирование электроники*.

За прошедшие одно или два десятилетия полупроводниковая технология эволюционировала до той точки, где корпусирование не может рассматриваться как нечто второстепенное в проектировании и производстве электронных устройств. Корпус играет все более интегрирующую, иногда даже решающую роль для технических характеристик полупроводниковых устройств или устройств, которые они содержит. В перспективном международном плане развития полупроводниковых технологий (ITRS) при рассмотрении этого факта [5] в разделе монтажа и корпусирования утверждается следующее: «В электронной промышленности наблюдается возросшее осознание того, что монтаж и корпусирование становятся определяющим фактором в развитии электронной продукции. Проектирование и изготовление корпусов становится все более важным для применений системы.

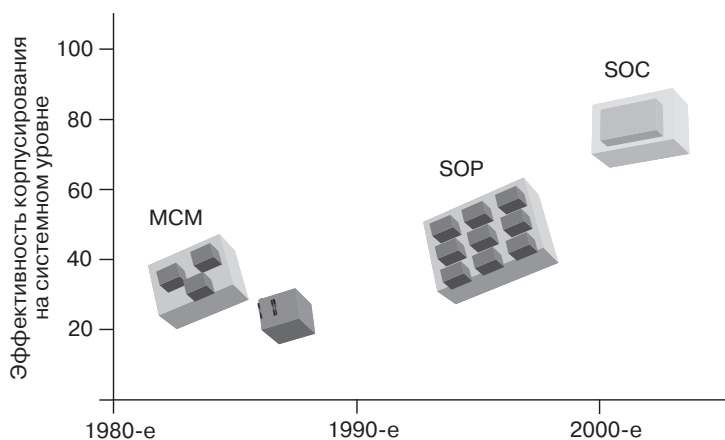


Рис. 4.1. Эволюция на системном уровне эффективности корпусирования

Больше корпуса не являются просто защитным устройством интегральных схем, а представляют собой для разработчика систем способ обеспечения соответствующей формы и функции современной продукции, доводя потребительскую продукцию до уровня высокоэффективных рабочих станций». Хотя определение корпусов с высокой плотностью варьируется по шагу межсоединений до корпуса, который должен быть согласован с кристаллом, понятно, что корпуса с высокой плотностью являются и будут оставаться необходимым условием для обеспечения высокой производительности ИС и систем [5]. Рис. 4.1 показывает эволюцию того, что называлось технологией современного корпусирования, за прошедшие пять лет в терминах эффективности корпусирования на системном уровне. Ожидается, что технологии систем на одном кристалле (SOC) и систем на одном корпусе (SOP) будут доминировать в современных корпусах следующие несколько лет.

4.2. Без применения свинца

Новое требование, предъявляемое к корпусам и связанное с использованием бессвинцового припоя, за прошедшие несколько лет потребовало развить новое производство. Это вызвано требованиями к экспортируемому на рынок Евросоюза (EU) корпусам электроники по ограничению использования вредных веществ (RoHS), установленных Директивой 2002/95/EC Европейского парламента [6]. Происхождение требований RoHS связано с необходимостью ограничить использование определенных материалов в производстве электрической и электронной продукции из-за опасности, которую они представляют для здоровья людей и окружающей среды.

Вещества, попадающие под действие Директивы RoHS, и их максимально допустимые концентрации приводятся ниже:

- свинец: 0,1% по массе (1000 ppm);
- кадмий: 0,01% по массе (100 ppm);
- ртуть: 0,1% по массе (1000 ppm);
- гексавалентный хром: 0,1% по массе (1000 ppm);
- полибромдифенил (PBB) и многобромистый дифенилоксид (PBDE): 0,1% по массе (1000 ppm).

Два других, связанных с этой проблемой термина, иногда используемые в этом контексте, это «бессвинцовый» и «зеленый». Ясно, что RoHS означает больше, чем «бессвинцовый», но «зеленый» включает также отсутствие сурьмы (Sb) и галогенов (хлора, брома и йода). Однако эвтектический припой из олова и свинца (Sn 63%-Pb 37% или SnPb для краткости) не может использоваться ни в одной из операций по изготовлению печатных плат. Это единственное требование приводит к фундаментальным изменениям в мире современной корпусной электроники. Припой SnPb используется в электронике и близких к ней отраслях промышленности уже в течение трех десятилетий. В этот период вся инфраструктура, относящаяся к изготовлению корпусов, начиная с монтажных материалов (таких как подложка, припой и подкладка, а в случае метода перевернутого кристалла — столбиковые выводы на полупроводниковой пластине), оборудование (такое как

печь для изготовления подложек и печи для пайки расплавлением полуды), а также требования к надежности корпусов (такие как стандарты JEDEC) были сосредоточены вокруг припоя из Sn и Pb. Изменение требований производства, вызванных исключением Pb из корпусов электроники, приводит к изменениям всех методов обработки. Эти изменения возникли из существенных различий в физических и металлургических свойствах и, как следствие, в пригодности к обработке и надежности двух материалов припоя. Сплав Sn и Pb является эвтектическим составом его двух исходных элементов и имеет температуру плавления 183 °С. Бессвинцовые сплавы припоя, почти независимо от их типа и состава, имеют повышенную температуру плавления. Более того, большинство составов, не содержащих свинец, не являются по своей природе эвтектическими, т.е. их компоненты не плавятся при одной и той же температуре. Подобного рода составы имеют определенный температурный диапазон размягчения. Кроме того, более высокие температуры плавления/размягчения накладывают дополнительные требования на материалы, используемые при сборке, а также на сам процесс сборки. Например, при пайке расплавлением полуды без свинца используемые вещества не должны разрушаться из-за повышенной температуры. Используемый для монтажа методом перевернутого кристалла флюс теперь должен быть более агрессивным для бессвинцовых припоев и не выгорать при температурах плавления бессвинцовых припоев, одновременно оставаясь под налетом, который предотвращает коррозию. Подкладку следует при этом выбрать так, чтобы ее химический состав был совместим с остатком флюса.

Дополнительные проблемы обусловлены трудностями одновременной замены всех компонентов системы на бессвинцовые. В результате этого промышленность должна справляться с тем, что изготавливаемая система использует смешанную металлургию, частично на основе Sn и Pb, а частично на бессвинцовой основе.

4.3. Система на одном кристалле (SOC) и система на одном корпусе (SOP)

В течение десятилетий наиболее эффективный способ добавить функции электронной системе состоял в интеграции этих дополнительных функций на кристалле либо за счет уменьшения ширины печатного проводника, либо за счет увеличения размера кристалла, либо за счет того и другого. В последнее время, однако, стали понимать, что интеграция на кристалле приводит к ряду практических трудностей, которые растут пропорционально росту кристалла. С увеличением размера кристалла выход годных кристаллов из расчета на полупроводниковую пластину при их производстве начинает снижаться частично из-за увеличения сложности, частично из-за проблем процесса производства полупроводниковых пластин.

Проблема еще больше усложняется из-за того, что межсоединения вне платы начинают способствовать возникновению проблем при интеграции SOC. Это означает, что межсоединения, а не интегральные схемы становятся доминирующим,

а часто и ограничивающим фактором технических характеристик системы и увеличения ее стоимости [7]. Следовательно, нужно пользоваться возможностью переносить межсоединения с кристалла на корпус [8].

4.3.1. Система на одном кристалле (SOC)

Существует множество причин, по которым производители полупроводников продолжают использовать интеграцию системы на кристалле [9]. Одна из основных причин состоит в том, что интеграция на кристалле дает возможность реализовать более быстрые соединения между компонентами схемы просто из-за более коротких расстояний, которые при этом удается реализовать. Однако, как было отмечено, это не относится ко всем конструкциям. Например, сигналу в большой цифровой интегральной схеме, работающей при высокой тактовой частоте, для того чтобы пройти по всему пути межсоединений, может понадобиться целая дюжина тактовых циклов. В подобных случаях, разделяя устройство на небольшие кристаллы и используя межсоединения высокой плотности, выполненные на подложке корпуса, можно добиться значительного повышения быстродействия системы в целом [10].

Другой причиной продолжения интеграции системы на одном кристалле является стремление избежать использования многокристального корпуса (MCP), потому что исторически они были большего по сравнению с однокристалльными корпусами размера.

Хотя технологи и будут продолжать попытки интеграции как можно большего числа функций на одном кристалле, все же существует много факторов, которые следует учитывать при принятии решения относительно использования SOC при разработке электронных систем. При этом по мере уменьшения минимально допустимой геометрии и роста размеров кристалла из-за включения на его основе дополнительной функциональности может быть достигнута точка, начиная с которой производство SOC становится экономически невыгодным или вообще невозможным. В этой точке SOP может предоставить единственную практическую альтернативу SOC. Теперь, когда кристаллы и корпуса начинают проектироваться совместно, можно проектировать системы на основе SOP, которые будут стоить дешевле, функционировать лучше, чем в случае SOC [11]. На рис. 4.2 приведен список некоторых проблем, с которыми придется столкнуться на пути к тому, чтобы SOC стала стандартным подходом в интеграции электронных систем.

| Проблемы с SOC | Проблемы с SOP |
|--|--|
| Основные: время задержки, изоляция SiO ₂ | Проектирование: высокочастотный цифровой сигнал, оптический аналог, радиочастота |
| Сложность обработки | Интеллектуальное производство большой площади, цена/выход годной продукции |
| Разработка и тестирование SOC | Управление отводом тепла |
| Стоимость и выход годной продукции при изготовлении полупроводниковой пластины | Тестирование и надежность |
| Интеллектуальная собственность интегрированных функций | Высокая производительность при низкой стоимости производства |

Рис. 4.2. Выводы, которые можно сделать по перечню проблем применения SOC и SOP

4.3.2. Система на одном корпусе (SOP)

Определение SOP зависит от того, какой будет электронная система. Фактически многое из того, что сегодня считается электронной системой, на самом деле является подсистемой и не может автономно выполнять функции электроники. Как следствие, SOP имеет много определений. Например, некоторые считают, что многочисленные логические интегральные схемы и схемы памяти, помещенные в одном корпусе, представляют собой SOP. С другой стороны, если SOP не содержит драйверов аналоговых периферийных устройств, то можно поспорить относительно того, содержит ли корпус на самом деле систему. Кроме того, полноценные системы обычно, помимо интегральных, содержат еще пассивные устройства. Пассивные устройства нужны для обеспечения работы системы, и если полноценную систему предполагается поместить в корпус, то туда же необходимо поместить пассивные устройства [3, 11], создавая тем самым то, что часто называют MCM.

Корпуса с выводами по всей площади основания корпуса становятся доступной технологией для удовлетворения потребности в изготавливаемых под заказ SOP, которые имеют меньший размер, вес и количество штырьковых выводов на втором уровне межсоединений [12]. Этот тип технологии корпусирования включает в себя матрицу штырьковых выводов (PGA), матрицу шариковых выводов (BGA) и корпуса с размером основания, сопоставимым с кристаллом (CSP), причем BGA играют главную роль прежде всего благодаря своей универсальности.



Рис. 4.3. Дальнейшие перспективы интегральных схем, корпусной электроники и системных технологий в представлении персонала Исследовательского центра корпусной электроники в Технологическом институте Джорджии (рисунок любезно предоставлен Исследовательским центром корпусной электроники Технологического института Джорджии)

По сравнению с традиционными корпусами с выводами BGA обладают улучшенными электрическими характеристиками из-за уменьшения расстояния между интегральной схемой и шариковыми выводами, улучшенными тепловыми характеристиками за счет использования сквозных тепловых отверстий или рассеяния тепла через слои электропитания и площадку заземления, требуют меньше обработки, а также обеспечивают больший выход годной продукции при производстве благодаря своему свойству самовыравнивания [13]. Фактически, BGA стали одним из основных факторов, способствовавших повсеместному распространению мобильных телефонов и других систем радиосвязи. Однако даже со всеми преимуществами корпусов с матричными выводами, расположенными по всей площади основания корпуса, требования к техническим характеристикам, надежности и себестоимости производства представляют в настоящее время проблему для доступных разработок корпусов этого типа, прежде всего из-за проблем с материалами [14]. На рис. 4.3 представлен обзор тенденций развития интегральных схем, корпусной электроники и системных технологий, которые ожидаются к 2007 г.

4.4. Многокристальные модули

Как ясно из названия, при технологии MCM монтируют сразу несколько бескорпусных интегральных схем (незащищенных кристаллов) вместе с преобразователем сигналов или вспомогательными устройствами, такими как конденсаторы или сопротивления, для того чтобы сформировать систему или подсистему на единой подложке [1]. Фактически, в конце 1980-х и начале 1990-х гг. MCM считались основным вариантом межсоединений и корпусирования, способным решить любую проблему в электронной промышленности. Эта технология предусматривает размещение интегральных схем в непосредственной близости друг от друга, тем самым улучшая технические характеристики системы за счет уменьшения задержки, вызываемой межсоединениями [15].

Размер часто выступает основным мотивом использования систем на основе MCM-корпусов. Типичная многокомпонентная сборка отдельных компонентов обеспечивает эффективность использования полупроводника на плате $< 10\%$ (фактическое отношение площади полупроводника к площади печатной платы). MCM технология часто может увеличить эффективность использования полупроводника на плате до 35–40% с проволочным креплением кристалла и до 50% или выше при некоторых процессах с более высокой плотностью монтажа [14]. Таким образом, при существенном уменьшении размера и веса MCM предлагают практический вариант уменьшения суммарного размера системы, предоставляя при этом улучшенные технические характеристики благодаря уменьшению длины соединительных проводников между кристаллами [1]. Многокристальные модули обычно занимают в три-пять раз меньше площади платы, чем эквивалентные им варианты сборки с дискретными компонентами [16].

Поскольку многокристальный модуль представляет собой единую подложку, содержащую две (или более) интегральные схемы, то нет оснований полагать, что

они уже отошли в прошлое. Более того, они сохранились, поменяв лишь обозначение с МСМ на МСР или на корпуса с несколькими кристаллами (FCP), или другие аналогичные названия или обозначения. Эти варианты корпусной электроники обычно содержат от двух до шести интегральных схем, которые упакованы на недорогой многослойной подложке. Хотя они и являются многокристальными модулями, но их можно называть и иначе. Компания Intel обозначает свои двухкристальные корпуса как CSP, хотя фактически это MOP или MCM [17]. Интересно отметить, что многие по-прежнему убеждены, что важным фактором, ускоряющим выход на рынок дешевой и надежной продукции, является использование многокристальных корпусов. С другой стороны, есть и убежденные в том, что вскоре SOC полностью вступят в свои права и многокристальные модули больше не будут нужны, оставаясь лишь промежуточным этапом развития [18]. Тем не менее, независимо от их номенклатуры, многофункциональные корпуса на основе многослойной структуры находятся среди ключевых типов корпусов электронной промышленности.

4.5. Многокристальные корпуса

Вообще говоря, МСР является любой корпус, который содержит более одного кристалла. Недорогостоящие варианты многокристальных модулей доступны для крупносерийных приложений [11].

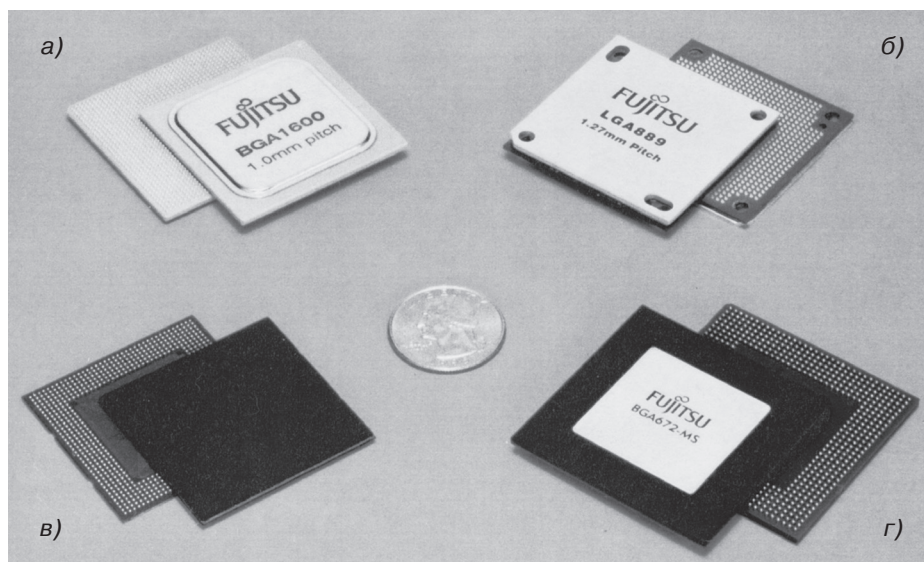


Рис. 4.4. Три различных вида BGA и один корпус LGA: в левом верхнем углу 1600-штырьковая FCBGA (шаг 1,0 мм, керамическая подложка); в правом верхнем углу 1140-штырьковая FC-LGA (шаг 1,0 мм, монтажная подложка); в нижнем левом углу 768-штырьковая TAB-BGA (шаг 1,0 мм) и в нижнем правом углу 672-штырьковая EBGA (шаг 1,27 мм) (фотография любезно предоставлена корпорацией Fujitsu Microelectronics)

Современные технологии корпусирования электроники были исторически ограничены использованием в высококлассной продукции, такой, например, как суперкомпьютеры. Сегодня они сместились в категорию недорогой продукции за счет применения монтажа кристалла на плату (COB), корпусов BGA или корпусов LGA, используемых при сборке межсоединений второго уровня, а также технологии поверхностного монтажа (SMT) при выпуске оборудования массового спроса. Декабрьский отчет Prismark 2005 г. по полупроводникам и корпусированию показал, что многослойные модули составляют 47% суммарного объема корпусной электроники, следом за которой идут корпуса с рамкой внешних выводов, доля которых составляет 39%.

Улучшение полупроводниковой эффективности конструкций MCM может быть выполнено за счет упаковки интегральных схем в очень тонкие, компактные и легкие микрокристаллоносители, используя соединения BGA или LGA, подобные представленным на рис. 4.4. Благодаря разработкам недорогих материалов (т.е. недорогих фоточувствительных материалов), методике обработки больших площадей (как это практикуется при производстве дисплеев), методике литографии больших площадей и низкой себестоимости металлизации, практикуемой при изготовлении печатных плат (PWB), экономически жизнеспособные многокристальные модули в настоящее время являются реальностью.

4.5.1. Модуль с несколькими кристаллами (FCP)

Все большее число компаний выбирают FCP по техническим и коммерческим соображениям. И хотя FCP фактически неотличимы от однокристалльных модулей, они значительно отличаются от MCM начала 1990-х гг. Вместо 10–20 кристаллов современные FCP обычно содержат от двух до пяти кристаллов, смонтированных на многослойной подложке в корпусе BGA. Это возрождение может быть приписано, по крайней мере частично, появившейся возможности проводить улучшенное тестирование бескорпусного кристалла и его обработку наряду с доступностью недорогих, высокоэффективных многослойных подложек. Кроме того, наблюдается тенденция роста использования FCP в качестве альтернативы SOC, что приводит в итоге к системе в одном корпусе (SIP). Этот вариант также обозначается как SOP.

4.5.2. Корпуса размера, сопоставимого с кристаллом (CSP)

CSP впервые были применены в Японии в начале 1990-х гг., а некоторое время спустя и в Соединенных Штатах как менее дорогостоящая альтернатива для MCM [20]. Согласно определению IPC/JEDEC J-STD-012, CSP является однокристалльным модулем, который дает возможность выполнять прямой монтаж на поверхности с площадью не более чем в 1,2 раза превышающей площадь самого кристалла. CSP появились во многих формах: с монтажом проволокой, перевернутым кристаллом, с выводами и в виде BGA. Типичный процесс корпусирования CSP с использованием проволоки (рис. 4.5) начинается с прикрепления кристалла на подложку при помощи эпоксидной смолы.

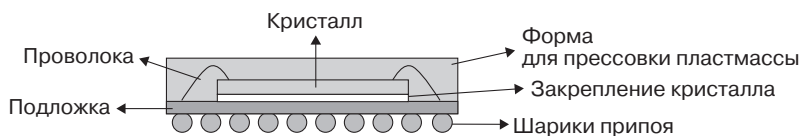


Рис. 4.5. Схема монтажа CSP с применением проволоки

Затем выполняется крепление проволокой площадок выводов кристалла к подложке. Это проволочное крепление должно быть как можно ниже и как можно ближе к кристаллу, чтобы минимизировать размер корпуса. Затем для герметизации кристалла используется литьевое прессование пластмассой. В завершение на нижней части подложки формируются шарiki из припоя. В варианте CSP с перевернутым кристаллом на подложке крепится кристалл со столбиковыми выводами (рис. 4.6). Вариант матричных выводов CSP по всей площади основания корпуса, также известный как корпус BGA с мелким шагом выводов (FPBGA), в настоящее время широко используется в портативной и телекоммуникационной продукции.

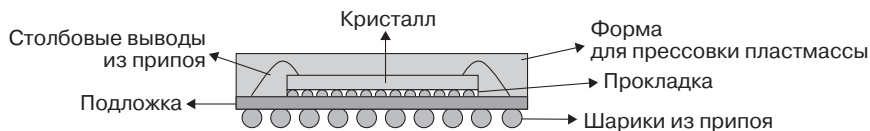


Рис. 4.6. Схема монтажа CSP перевернутым кристаллом

CSP имеют меньший размер, меньший вес и улучшенные электрические характеристики. CSP обеспечивает тот же объем и дополнительную экономию материалов, а также короткие пути передачи сигнала, как в случае метода прямого крепления кристалла (DCA), например COB и монтажа на плате перевернутого кристалла (FCOB). Преимущества использования корпусов размера, сопоставимого с кристаллом, перед DCA состоят в более легкой обработке, большей степени защиты, предоставляемой кристаллу, и большей простоте сборки платы. На рис. 4.7 показан набор промышленно выпускаемых CSP. CSP в какой-то степени ограничиваются использованием средних по числу выходов интегральных схем [20].

4.5.3. Корпуса на базе подложки кристалла (WLP)

Корпуса на базе подложки кристалла определяются как корпуса интегральных схем, полностью изготовленные на базе подложки кристалла и собранные по стандарту SMT. Альтернативно корпуса на базе подложки кристалла можно определить как корпуса, в которых кристалл и корпус изготавливаются и тестируются на полупроводниковой пластине до захвата подложки. При использовании WLP может быть достигнуто существенное снижение стоимости и фактора устройства при одновременном улучшении его электрических характеристик. Корпусирование на базе подложки кристалла впервые было исследовано Национальной лабораторией Сандия и корпорацией Fujitsu в середине 1990-х гг.