

# Содержание

|  |    |
|--|----|
| <b>Введение</b> .....  | 11 |
| <b>ЧАСТЬ 1. ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВО ПО ОГРАНИЧЕНИЮ<br/>ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВИНЦА</b> .....                       | 14 |
| <b>Глава 1. Законодательство и его влияние на печатные платы</b> .....                               | 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<br>изготовление печатных плат ..... | 19 |
| 1.5. Перспективы бессвинцового монтажа .....   | 24 |
| Литература .....   | 26 |
| <b>ЧАСТЬ 2. ДВИЖУЩИЕ СИЛЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ<br/>ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ</b> .....               | 27 |
| <b>Глава 2. Монтаж электронных схем в корпусе и межсоединения<br/>высокой плотности</b> .....        | 27 |
| 2.1. Введение .....  | 27 |
| 2.2. Оценка революционных межсоединений<br>(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 |
| <b>Глава 3. Технология корпусирования полупроводников</b> .....                                      | 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<br>техническими характеристиками .....     | 75 |
| 3.6. Информация по перспективному плану развития .....   | 75 |
| Литература .....   | 75 |
| <b>Глава 4. Пакирование современных компонентов</b> .....  | 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        |
| <b>Глава 5. Типы печатных плат .....</b>  | <b>104</b> |
| 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        |
| <b>ЧАСТЬ 3. МАТЕРИАЛЫ .....</b>   | <b>120</b> |
| <b>Глава 6. Введение в базовые материалы .....</b>  | <b>120</b> |
| 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        |
| <b>Глава 7. Компоненты базовых материалов .....</b>   | <b>147</b> |
| 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        |
| <b>Глава 8. Свойства базовых материалов .....</b>   | <b>177</b> |
| 8.1. Введение .....   | 177        |
| 8.2. Тепловые, физические и механические свойства .....                                     | 177        |
| 8.3. Электрические свойства .....   | 192        |
| Литература .....  | 196        |
| <b>Глава 9. Базовые материалы. Рабочие характеристики .....</b>                             | <b>197</b> |
| 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<br>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<br>с низкими значениями $D_k/D_p$ совместимыми<br>с бессвинцовыми технологиями пайки ..... | 237        |
| Литература .....   | 238        |
| <b>Глава 10.</b> 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        |
| <b>Глава 11.</b> Выбор базовых материалов применительно к бессвинцовой<br>технологии пайки .....   | 266        |
| 11.1. Введение .....   | 266        |
| 11.2. Взаимосвязь изготовления печатных плат и сборки<br>печатных узлов [1] .....  | 266        |
| 11.3. Правильный выбор базового материала для специального<br>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<br>для бессвинцовых технологий .....   | 284        |
| 11.8. Выводы .....   | 285        |
| Литература .....   | 286        |
| <b>Глава 12.</b> 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        |
| <b>ЧАСТЬ 4. РАЗРАБОТКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ .....</b>  | <b>318</b> |
| <b>Глава 13.</b> Физические характеристики печатных плат .....   | <b>318</b> |
| 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        |
| <b>Глава 14. Процесс проектирования печатных плат .....</b>                                  | <b>348</b> |
| 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        |
| <b>Глава 15. Электрические и механические параметры конструкции .....</b>                    | <b>366</b> |
| 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<br>и электромагнитной совместимости ..... | 370        |
| 15.6. Требования к механической конструкции .....  | 376        |
| Литература .....   | 386        |
| <b>Глава 16. Токонесущая способность печатных плат .....</b>                                 | <b>388</b> |
| 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        |
| <b>Глава 17. Проектирование тепловых характеристик печатных плат .....</b>                   | <b>414</b> |
| 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        |
| <b>Глава 18. Форматирование и обмен информацией .....</b>                                    | <b>439</b> |
| 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        |
| <b>Глава 19.</b> 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        |
| <b>Глава 20.</b> Производственная информация, документация и ее передача,<br>включая данные автоматизированной технологической обработки<br>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        |
| <b>Глава 21.</b> 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        |
| <b>ЧАСТЬ 5. МЕЖСОЕДИНЕНИЯ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ .....</b>   | <b>551</b> |
| <b>Глава 22.</b> Введение в технологии межсоединений высокой плотности (HDI) .....  | <b>551</b> |
| 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        |
| <b>Глава 23.</b> Современные технологии межсоединений<br>высокой плотности (HDI) .....  | <b>595</b> |
| 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        |
| <b>ЧАСТЬ 6. ПРОИЗВОДСТВО .....</b>   | <b>636</b> |
| <b>Глава 24. Процессы сверления .....</b>  | <b>636</b> |
| 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        |
| <b>Глава 25. Прецизионное сверление межсоединений .....</b>  | <b>661</b> |
| 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        |
| <b>Глава 26. Формирование изображения .....</b>  | <b>683</b> |
| 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        |
| <b>Глава 27. Материалы и процессы многослойных плат .....</b>  | <b>721</b> |
| 27.1. Введение .....   | 721        |
| 27.2. Материал для печатных плат .....   | 723        |
| 27.3. Типы многослойных конструкций .....  | 743        |
| 27.4. Обработка многослойных печатных плат (МПП)<br>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        |
| <b>Глава 28. Подготовка плат к металлизации .....</b>  | <b>812</b> |
| 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        |
| <b>Глава 29. Гальванические покрытия .....</b>  | <b>827</b> |
| 29.1. Введение .....  | 827        |
| 29.2. Основы гальванических покрытий .....  | 827        |
| 29.3. Отверстия с высоким характеристическим отношением<br>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        |
| <b>Глава 30. Прямая металлизация .....</b>  | <b>867</b> |
| 30.1. Технология прямой металлизации .....  | 867        |
| Литература .....  | 879        |
| <b>Глава 31. Производство печатных плат на основе толстослойного<br/>химического меднения .....</b> | <b>880</b> |
| 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        |
| <b>Глава 32. Финишные покрытия печатных плат .....</b>  | <b>898</b> |
| 32.1. Введение .....  | 898        |
| 32.2. Альтернативные виды финишных покрытий .....   | 900        |
| 32.3. Облуживание с выравниванием горячим воздухом<br>(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        |
| <b>Глава 33. Паяльная маска .....</b>  | <b>928</b> |
| 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        |
| <b>Глава 34. Технологии и процессы травления .....</b>                         | <b>956</b> |
| 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        |
| <b>Глава 35. Механическая обработка по контуру .....</b>                       | <b>997</b> |
| 35.1. Введение .....   | 997        |
| 35.2. Пробивка отверстий .....   | 997        |
| 35.3. Вырубка и резка заготовок из фольгированных<br>слоистых материалов ..... | 1000       |
| 35.4. Фрезерование .....   | 1003       |
| 35.5. Скрайбирование .....   | 1012       |
| 35.6. Благодарности .....  | 1015       |