

## Введение

В создании современных высоконадежных и технологичных электронных устройств широко применяются перспективные устройства электронной коммутации в виде постоянно обновляющейся номенклатуры высокотехнологичных печатных плат, в проектировании и производстве которых широко используются средства автоматизации.

Разработка информационных и конструкторско-технологических моделей, методов и инструментальных средств САПР, обеспечивающих информационную поддержку конструкторско-технологических процессов автоматизированного проектирования и технологической подготовки автоматизированного производства устройств электрических межсоединений для электронной аппаратуры является основополагающей и направлена на повышение качества и надежности проектируемых изделий, отвечающих самым современным требованиям автоматизированного производства и создания конкурентоспособной электронной продукции.

Со времен создания первых средств информационной и вычислительной техники главная тенденция развития этой техники состоит в стремлении к микроминиатюризации и повышению функциональности ее компонентов. Вместе с повышением функциональности вынуждено должна расти скорость обработки информации. Она складывается из скорости переключения логических элементов и скорости распространения сигналов по линиям связи. Если принять во внимание, что в вакууме скорость распространения сигнала (скорость света) составляет (округленно) 300 000 км/с, что соответствует задержке сигнала в линии 3 нс/м. В реальной диэлектрической среде скорость распространения сигнала уменьшается в  $\sqrt{\varepsilon}$  раз. Таким образом, время переключения логических элементов становится соизмеримым с временем распространения сигнала в линиях связи. Из этого можно понять, что размеры и материалы монтажных подложек (печатных плат) непосредственно влияют на скорость обработки большого объема информации, свойственно большой функциональности электронных средств. Таким образом, стремление к миниатюризации электроники — это не дань моде, а настоятельная необходимость в увеличении функциональности и производительности электроники. И этим обусловлена главная тен-

денция развития электроники — увеличение интеграции логических элементов и увеличение плотности межсоединений для сокращения длин связей.

Интеграция микросхем, уменьшение размеров электронных компонентов происходят с невероятной скоростью. Формулировка основного закона, в соответствии с которым вот уже более сорока лет развивается компания Intel, принадлежит одному из ее основателей — Гордону Муру. Звучит она следующим образом: *число транзисторов, которое можно включить в состав интегральной схемы, удваивается примерно каждые 18 месяцев.*

Председатель совета компании Эндрю Гроув в свое время предсказал, в 2017 году Intel сможет выпускать чипы, содержащие миллиарды транзисторов, т. е. почти в сотни раз больше, чем содержится в современных процессорах\*.

Что интересно, подобные геометрические прогрессии в природе — явления аномальные. Один из профессоров Гарвардского университета показал, как бы работал закон Мура применительно к автомобилестроительной и авиационной промышленности. По сообщению журнала «Semiconductor Industry & Business Survey», он определил, что если бы эти отрасли развивались такими же темпами, как производство полупроводников на протяжении последних 30 лет, то сегодня автомобиль «Ролс-Ройс» стоил бы почти 3 доллара и был бы способен преодолеть расстояние в полторы тысячи километров на одном литре бензина, а самолет «Боинг-767» при цене в 500 долларов мог бы облететь вокруг земного шара за 20 минут, истратив лишь канистру керосина. Такое сравнение дает возможность наглядно представить скорость развития электронной базы. Но такое интенсивное развитие электронной базы компонентов диктует адекватные изменения в развитии технологий печатного монтажа.

Возникла настоятельная потребность в значительном увеличении плотности межсоединений в печатных платах и использовании микросхем в корпусах, которые всего лишь незначительно превышают размеры полупроводникового кристалла. обусловлена необходимостью уменьшения габаритов изделий, повышения функциональной сложности изделий, автоматизации производства, улучшения технологической чистоты производства и повышением экономической эффективности.

---

\* Прогноз Гроува сбылся значительно раньше — процессор с более чем двумя млрд транзисторов выпущен в 2006 году, в 2019 году число транзисторов в одном чипе превысило 43 млрд. — *Прим. ред.*

В отечественной и зарубежной практике ведется непрерывный поиск новых и совершенствование известных методов межсоединений. Ежемесячно публикуются сотни патентов, описывающих новые процессы и операции, претендующих на новое слово в технологиях электронной аппаратуры. Среди достижений в технологии монтажа появлялись и методы, изобретение которых сопровождалось значительной рекламой, но на практике они оказались маловыгодными, или ненадежными, или нашли ограниченное применение. Ежегодные международные конференции, симпозиумы по международной стандартизации способствуют в дискуссиях специалистов и практике использования отбору выверенных решений, на основе которых родились базовые технологии. Именно для базовых общепринятых технологий разрабатываются стандарты, оборудование и материалы. На их основе строятся новые производства с многомиллионными вложениями капитала.

Конечно, как сказал один мудрец: «Если бы человечество придерживалось мнения большинства, Земля до сих пор плавала бы на трех китах». Но технология — традиционно наиболее консервативная отрасль техники, она не терпит революций и развивается эволюционно. Промышленное освоение новых технологических принципов обходится слишком дорого, чтобы перестраивать под них производство без предварительного опробования в технологических лабораториях.

Производство средств информационной и вычислительной техники относится к высоким технологиям, требующим от специалистов высокой степени профессионализма. Безусловно, эта книга не может служить введением в технологию электроники. Она дополняет уже сложившуюся информацию, изложенную в многочисленных публикациях в книгах и журналах.

В настоящее время разрабатываются технологии нового поколения, для которых будет характерно: широкое использование компьютеров для создания и использования электронной технологической документации, «сухие» технологические операции на основе плазменных и лазерных методов, иммерсионное золочение, всесторонняя система обеспечения качества, экономическая эффективность.

С ростом сложности микросхем увеличивается число выводов и уменьшается шаг выводов. Такие микросхемы, как BGA — микросхемы с матрицей шариковых выводов, CSP — микрокорпуса в размер кристалла, flip-chip — перевернутый кристалл, требуют применения печатных плат с высокой плотностью межсоединений. Уже

сегодня в видеокамерах используются печатные платы послойного наращивания с шириной проводников и зазоров 50 мкм и с переходными отверстиями 100 мкм.

Одно из направлений развития технологий печатных плат — встраивание компонентов в объем плат в виде печатных резисторов и конденсаторов, выполняющих согласующие и блокирующие функции для достижения требуемой помехозащищенности.

Современные материалы позволяют изготавливать ультратонкие многослойные печатные платы, создающие определенные преимущества в проектировании и производстве уникальных электронных изделий.

Еще одним перспективным направлением развития является печатная электроника, когда электронные изделия, такие как солнечные батареи, аккумуляторы, дисплеи и др., будут изготавливаться как полиграфическая продукция на принтерах.

# 1 Физико-химические основы технологий производства электроники

---

## 1.1. Диффузионные процессы

*Диффузия* (лат. *diffusio*) — распространение, растекание, рассеивание, взаимодействие) — процесс взаимного проникновения молекул или атомов одного вещества между молекулами или атомами другого, приводящий к самопроизвольному выравниванию их концентраций по всему занимаемому объёму. При этом перенос вещества происходит из области с высокой концентрацией в область с низкой концентрацией (вдоль вектора градиента концентрации).

По существу, все жизненные процессы сопровождаются диффузией: наше дыхание — диффузия кислорода воздуха через альвеолы легких в кровь и углекислого газа из крови, питательные вещества диффундируют из пищи в кровь через стенки кишечника, листья деревьев растут за счет процессов диффузии. Все живые существа существуют за счет диффузионных процессов. Также широко распространены процессы диффузии в физических и химических технологиях.

**Законы переноса.** Если в твердом теле имеется градиент какого-либо свойства, то становится возможным перенос этого свойства. Наиболее важные типы переноса — перенос количества движения, тепла, носителей заряда, массы. Перенос количества движения называют вязкостью, перенос тепла — теплопроводностью. Перенос носителей заряда вследствие наличия градиента потенциала приводит к протеканию электрического тока. Эти процессы подчиняются соответствующим законам.

Закон Ньютона переноса количества движения в направлении  $x$ :

$$P = \eta \frac{\partial v}{\partial x},$$

где  $P$  — плотность потока импульса;  $\eta$  — коэффициент динамической вязкости;  $v$  — скорость сдвига слоев жидкости (газа).

Закон Фурье теплопереноса (первый закон)

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x},$$

где  $q$  — плотность потока теплоты;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  $T$  — температура среды.

Закон Ома

$$J_t = \sigma \frac{\partial U}{\partial x},$$

где  $J_e$  — плотность потока электрических зарядов (плотность тока);  $\sigma$  — коэффициент электропроводности;  $U$  — электрическое напряжение.

Обратимся теперь к переносу массы — *диффузии*. Этот процесс представляет собой перемещение частиц в направлении убывания их концентрации. Чем больше градиент концентрации, тем интенсивнее происходит перемещение. Эта закономерность описывается законом Фика, по которому:

$$J_D = -D \frac{\partial C}{\partial x},$$

где  $J_D$  — плотность потока переноса вещества в направлении  $x$ ;  $D$  — коэффициент диффузии;  $C$  — концентрация вещества.

В общем случае эти уравнения могут быть записаны в виде

$$J = D \operatorname{grad} C,$$

где  $J$  — вектор плотности диффузионного потока;  $D$  — коэффициент диффузии;  $\operatorname{grad}$  — градиент поля концентрации;  $C$  — концентрация.

Перенос частиц в трехмерной среде:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial C}{\partial z} \right).$$

Перенос частиц в среде осуществляется как последовательность их случайных перемещений, причем абсолютная величина и направление каждого из них не зависят от предыдущих. Идентичность уравнений, связывающих различные параметры системы в необратимых процессах, указывает на существование единого закона, характеризующего перенос вещества и свойств в системе. Таким образом, диффузия относится к процессам переноса, подобно тепло- и электропроводности, в данном случае переноса массы. Перенос приобретает направленность, если есть градиенты соответствующих параметров. Для диффузии направленность и ускорение процесса возникают, если в зоне диффузии есть градиенты концентраций, температуры, внутренних механических напряжений или если через зону протекает электрический ток.

*Диффузия как таковая.* В кристаллах может происходить перемещение примесных атомов и атомов основного вещества. В пер-

вом случае говорят о гетеродиффузии, во втором — о самодиффузии.

В технологиях машиностроения и приборостроения используется большое число процессов, описываемых законами диффузии. К таким процессам относятся физическое и физико-химическое осаждение и растворение слоев, электрохимические, плазменные, диффузионные процессы, создание контактов пайкой и сваркой, мембранные процессы массообмена, диффузионные процессы создания примесной проводимости в полупроводниковых приборах и др.

Диффузионные процессы возникают на границах неравновесного состояния системы. Они не возникают в *гомогенных* системах, где все параметры одинаковы во всех точках объема. В системах, называемых *гетерогенными*, когда они состоят из частей с разной концентрацией вещества, разделенных явными поверхностями раздела, диффузия — естественный процесс выравнивания концентраций.

Диффузионные процессы для ряда ответственных элементов электронной техники являются основополагающими в определении долговечности, поскольку процессы диффузии постепенно разрушают (размывают) *p-n*-переходы в тонких структурах современных высокоинтегрированных процессоров, охрупчивают пайки за счет образования интерметаллических соединений, разрушают электрическую изоляцию за счет диффузии загрязнений и т. п.

Диффузия протекает благодаря стремлению системы достигнуть физико-химического равновесия. Она идет до тех пор, пока химические потенциалы компонентов всех частей однородной системы или соприкасающихся фаз (для многофазной системы) не станут равными, как показано для примера на рис. 1.1.

При производстве полупроводниковых приборов широко используют явление диффузии в твердой среде для создания слоев с определенными градиентами концентраций акцепторных и донорных примесей. Поверхность твердого тела является как бы «дверью», через которую проходят атомы примеси, для того чтобы продиффундировать в глубь его и образовать слои с заданной концентрацией примеси.

Перенос приобретает направленность, если есть градиенты соответствующих параметров. Для диффузии направленность и уско-

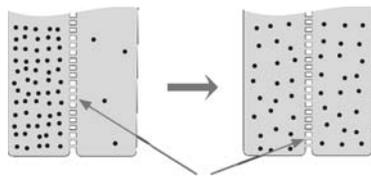


Рис. 1.1. Выравнивание концентраций раствора через мембрану (стрелками показана мембрана)

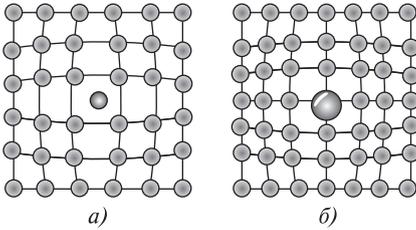


Рис. 1.2. Искажение кристаллической решетки в твердых растворах внедрения (а) и замещения (б)

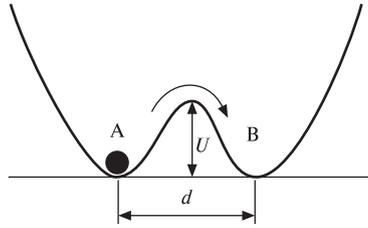


Рис. 1.3. Потенциальный барьер, отделяющий два соседних узла решетки, один из которых занят атомом А, другой — вакансией В

рение процесса возникают, если в зоне диффузии есть градиенты концентраций, температуры, внутренних механических напряжений или если через зону протекает электрический ток.

Можно видеть, что диффузия чужеродных (примесных) атомов в решетке может протекать как по междоузлиям (рис. 1.2,а), так и по вакансиям (рис. 1.2,б). Первый механизм характерен для примесей, образующих с основным веществом раствор внедрения, второй — для примесей, образующих раствор замещения.

Если ионный радиус диффундирующих атомов значительно меньше атомов основного металла (растворителя), как в случае газов и некоторых металлов, то они перемещаются преимущественно по междоузлиям кристаллической решетки (рис. 1.2,а).

Диффузант по этому механизму диффузии для перемещения по междоузлиям должен преодолеть потенциальный барьер  $U$ . Значит должно быть:  $E_a \geq U$ .

При температуре, превышающей температуру Таммана (эта температура равна половине температуры плавления данного вещества, выраженной в абсолютных градусах), подвижность атомов возрастает настолько, что становится возможным перемещение атомов в решетке от узла к узлу при условии, что размеры атомов диффузанта и основного металла примерно одинаковы.

Такой механизм диффузии представляет собой обмен вакансиями, так что в конечном итоге диффузант покидает свое место в узле решетки и перемещается в место образовавшейся вакансии (рис. 1.3). При этом энергия активации растрчивается на образование вакансии  $U_B$  и на работу, необходимую для преодоления потенциального барьера между узлом решетки с диффундирующим атомом и вакансией  $U_A$ . Значит, для диффузии путем обмена вакансиями необходимо условие, при котором  $E_a \geq U_A + U_B$ .

**Диффузионные процессы при спекании.** Образование твердых сплавов спеканием порошков и термокомпрессионная сварка — примеры использования диффузионных процессов образования твердых тел без расплавления исходных компонентов. Например, вольфрам имеет настолько высокую температуру плавления (3380 °С), что никакая ванна для его расплава не выдержит такой температуры, поэтому детали из металлического вольфрама получают исключительно методами спекания порошка, полученного химическим восстановлением, при температурах гораздо меньших, чем температура плавления (как правило, это температура Таммана).

Технология спекания порошков (порошковая металлургия) состоит в приготовлении шихты (смеси) из порошков в заготовки с заданными формой и размерами и их спекании, т. е. термической обработки заготовок при температуре ниже точки плавления порошка. В некоторых вариантах технологии отпадает операция формования: спекают порошки, засыпанные в произвольные формы и затем их обрабатывают до нужных размеров. В ряде случаев прессование и спекание объединяют в одну операцию так называемого горячего прессования — обжатия порошков при нагреве.

Порошковая металлургия создала возможность получения таких материалов, которые трудно или невозможно получать другими методами: тугоплавкие металлы (вольфрам, тантал); сплавы и композиции на основе тугоплавких соединений (твёрдые сплавы на основе карбидов вольфрама, титана и др. — так изготавливают все твердосплавные инструменты); композиции и псевдосплавы металлов, не смешивающихся в расплавленном виде, в особенности при значительной разнице в температурах плавления (например, вольфрам–медь, так делают контакты силовых реле); композиции из металлов и неметаллов (медь–графит — щетки коллекторов генераторов и электродвигателей и т. п.); пористые материалы (для подшипников, фильтров, уплотнений, теплообменников) и др.

## 1.2. Термические и термохимические процессы

Термическими и термохимическими называют технологические процессы, стимулированные нагревом, протекающие при плавлении или диффузии в твердой фазе и сопровождаемые химическими реакциями. К ним отнесены процессы пайки и сварки, лазерной обработки, вжигания композитной эмали на основе стеклянной фритты с заданными электрофизическими свойствами, металлизации спеканием, термохимического осаждения пленок.

По способу воздействия на объект технологические процессы разделяют на изотропные и локальные.

*Изотропные* — процессы с температурным воздействием на все изделие или поверхность. К изотропным относят процессы, выполняемые в однородной среде, например в печах с заданной газовой средой, в ваннах для пайки, с помощью газо-термических напылительных установок.

*Локальные* — процессы с избирательным воздействием на ограниченной площади (в «точке»). К локальным — точечную сварку и пайку, лазерную обработку.

В термических и термохимических процессах реакции протекают в жидкой и твердой фазах.

Реакции в твердой фазе развиваются на границе касания твердых тел друг с другом.

### 1.2.1. Термокомпрессионные процессы сварки

При термокомпрессионной сварке, протекающей под действием температуры и значительного давления в области соединения, также не связана с плавлением и смачиванием, а определяется деформационными явлениями в соединяемых металлах в сочетании с нагревом в зоне соединения.

Сцепление двух металлических поверхностей, прижатых друг к другу с большим удельным давлением, возникает и без нагрева. Для этого металлы сжимаются и деформируются. Приложенное усилие (ковка, давление, удар) вызывают течение металла вдоль поверхности раздела, разрушает поверхностные слои раздела (в первую очередь — окислы), выводит на поверхность свежие, не бывшие в соприкосновении с атмосферой слои металла, сближает соединяемые поверхности до соприкосновения их на атомарном уровне. Сопутствующий нагрев снижает твердость металла и повышает его пластичность — способность к пластической деформации. Две прижатые друг к другу поверхности начинают контактировать в отдельных пятнах касания, сконцентрированных в определенных областях. По мере увеличения сжимающего усилия происходит пластическая деформация выступов микрорельефа, в соприкосновение входит все большее число выступов. Сближение абсолютно чистых металлических поверхностей на расстояние в несколько нанометров приводит к появлению ван-дер-ваальсовых сил взаимодействия. Дальнейшее сближение до долей нанометра приводит к образованию атомарных металлических связей как результату взаимодействия свободных электронов атомов соединяемых тел.