

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время уровень развития телекоммуникационных и информационных систем (ТК и ИС) однозначно зависит от степени внедрения в них изделий микроэлектроники и наноэлектроники.

За 50 лет развития микроэлектроники разработана широкая номенклатура интегральных микросхем. Для специалистов в области проектирования и эксплуатации ТК и ИС важны знания о возможностях современной микроэлектронной элементной базы. Поэтому в данное пособие включены материалы по изучению свойств и применений аналоговых и цифровых интегральных микросхем.

Основной тенденцией развития микроэлектроники является увеличение степени интеграции в соответствии с законом Мура. С учетом этого в книге рассматриваются интегральные микросхемы с различной степенью интеграции и устройства на их основе.

Начиная с 2003 г. наблюдается переход от микроэлектроники к наноэлектронике. Дальнейшему развитию традиционной микроэлектроники препятствуют технологические, физические и электрические барьеры.

Уровень развития технологии определяется минимально возможной топологической нормой — минимальным размером элемента или зазора в регулярных структурах с максимальной плотностью упаковки.

Магистральным направлением развития электроники является уменьшение топологических норм транзисторных структур: переход от микрометрового в нанометровый диапазон линейных размеров и создание наноразмерных структур. Технологическая норма проектирования нанотранзисторов — меньше 100 нм (0,1 мкм).

В течение последних лет в наноэлектронике достигнуты значительные практические результаты: созданы высокоэффективные лазеры и светоизлучающие диоды на основе гетероструктур, фотоприемники, сверхвысокочастотные транзисторы с высокой подвижностью электронов, одноЭлектронные транзисторы, различного рода микро- и наноэлектромеханические устройства и системы, являющиеся базовыми для современных ТК и ИС. Наложены серийный выпуск микросхем ультрабольшой и гигантской степеней интеграции (УБИС и ГИС), производство наноэлектронных микропроцессорных УБИС и ГИС. Поэтому рассмотрению возможностей нанотехнологий и наноэлектроники в этом пособии уделяется существенное внимание.

Автор выражает благодарность сотрудникам редакционно-издательского отдела СибГУТИ Игнатовой А. С. и др., а также сотрудникам кафедры «Техническая электроника» Ананьеву А. В., Полянской А. В., Егорову И. Ю., Дроздову А. Ю. и др. за помощь в подготовке книги к изданию.

1.1. КРИТЕРИЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Под качеством аппаратуры понимают совокупность средств, обусловливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с назначением.

Свойства аппаратуры — это объективные особенности, проявляющиеся при разработке и эксплуатации.

Количественные характеристики свойств аппаратуры, рассматриваемые применительно к определенным условиям разработки и эксплуатации, называются показателями качества. Различают следующие показатели качества [41]:

- единичные (дифференциальные), характеризующие только одно из свойств;
- комплексные (обобщенные), учитывающие несколько свойств аппаратуры;
- интегральные, дающие соотношение суммарного полезного эффекта от эксплуатации аппаратуры и затрат на ее разработку и эксплуатацию;
- базовые, принятые за исходные при сравнительных оценках качества.

В технической литературе при рассмотрении свойств аппаратуры обычно акцентируется внимание на показателях качества по назначению. В частности, аппаратура каналов и трактов звукового вещания классифицируется по показателям высшего, I и II классов качества. Нормы основных параметров качества канала звукового вещания приведены в табл. 1.1.

Оценку качества аппаратуры связи и радиовещания целесообразно проводить по методике оценки качества изделий электронной техники. В указанной методике выделяется восемь групп свойств и соответственно восемь групповых показателей качества: по назначению, надежности, стандартизации и унификации, технологичности, экономичности,

Основные параметры качества канала звукового вещания

Наименование параметра	Нормы по классам		
	Высший	I	II
Номинальный диапазон частот, Гц	30...15 000	50...10 000	100...6300
Допускаемые отклонения АЧХ, дБ, не более			
на краях номинального диапазона частот	+1,0 -5,0	+2,0 -5,0	+2,5 -7,0
в средней части номинального диапазона частот	+1,0	±2,0	±2,5
Коэффициент гармоник, %, не более, на частотах:			
≤ 100	3,0	6,0	—
100...200	2,0	3,5	4,5
> 200	1,5	3,0	4,0
Защищенность от интегральной помехи, дБ	55	52	46
Защищенность от псофометрического шума, дБ	55	52	47
Защищенность от внятной переходной помехи, дБ	74	70	60

эргономичности и эстетичности, а также патентно-правовые. Каждая из этих групп описывается совокупностью технико-экономических показателей. Количественную оценку качества изделия дает комплексный показатель качества, вычисляемый по формуле

$$Q_A = \frac{\sum_{i=1}^m K_{Bi} q_i}{m}, \quad (1.1)$$

где K_B — весовые коэффициенты каждой группы; q — групповые показатели качества; m — число показателей.

Из всей совокупности групповых показателей часто выделяют обобщенные, которые характеризуют определяющее значение уровня качества изделий. Это относится прежде всего к показателям качества по назначению, технологичности и надежности. Важнейшими показателями, определяющими качество аппаратуры Q_A , являются надежность λ , масса G , объем V , стоимость C , потребляемая мощность P : $Q = f(A, G, V, C, P)$. Все перечисленные показатели являются функциями уровня миниатюризации. Уменьшение каждого из них соответствует повышению качества аппаратуры. Таким образом, повышение уровня миниатюризации обеспечивает улучшение качества аппаратуры.

В историческом плане решение проблем, связанных с качеством, проявляется в смене поколений электронной аппаратуры. Первое поколение аппаратуры выполнялось на электровакуумных лампах, второе — на транзисторах, третье — на ИМС малой и средней интеграции, четвертое — на основе БИС, пятое — на однокристальных СБИС.

Большое влияние на технологические свойства конструкции оказывает уровень унификации. Ее важным этапом является сокращение многообразия составных элементов, входящих в состав аппаратуры. Добиться унифи-

кации аппаратуры на уровне укрупненных функциональных узлов удается при использовании ИМС и микросборок.

Обобщенные показатели качества позволяют определить наилучшую реализацию аппаратуры из множества возможных вариантов. Обобщенный показатель качества, учитывающий массу M_i , объем V_i , потребляемую мощность P_i , стоимость Q , интенсивность отказа λ_i варианта аппаратуры, может быть рассчитан по формуле

$$Q_0 = K_{B M_i} M_i + K_{B V_i} V_i + K_{B P_i} P_i + K_{B C_i} C_i + K_{B \lambda_i} \lambda_i. \quad (1.2)$$

Здесь используются нормированные значения показателей качества. Коэффициенты $K_{B M_i}$, $K_{B V_i}$, $K_{B P_i}$, $K_{B C_i}$, $K_{B \lambda_i}$ называются весовыми. Они могут принимать значения в пределах от 0 до 1 в зависимости от важности отдельных показателей для конкретной области применения аппаратуры.

При сравнении реализаций аппаратуры лучшим окажется вариант с наименьшим значением обобщенного показателя Q_0 . Наилучших его значений можно добиться при комплексной миниатюризации аппаратуры связи и радиовещания. Принцип комплексной миниатюризации предполагает оптимизацию функции качества Q_0 с учетом всех групповых показателей качества. Ориентировочную оценку эффективности миниатюризации можно проводить с помощью следующих показателей:

- уровень комплексной миниатюризации, представляющий собой отношение суммы показателей качества функционирования аппаратуры к корню третьей степени из произведения массы, объема и потребляемой мощности;
- показатель применяемости ИМС и микросборок (отношение числа ИМС и микросборок к общему числу элементов аппаратуры). Коэффициент весомости, характеризующий среднее пропорциональное отношение объема, массы и интенсивности отказов ИМС и микросборок к соответствующим показателям всех применяемых элементов;
- удельная плотность элементов по объему и массе, представляющая собой отношение общего числа элементов к общему объему и массе аппаратуры.

1.2. КРИТЕРИИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

При проектировании аппаратуры связи и радиовещания решаются задачи выбора наилучших вариантов из множества допустимых решений, удовлетворяющих предъявленным требованиям. Проектирование считается оптимальным, если определен вектор $X = (X_1, \dots, X_m)$ оптимальных параметров проектируемого изделия исходя из критерииев оптимальности и поставленных ограничений. Переменные проектирования вектора X являются внутренними, допускающими варьирование.

Ограничения и связи между отдельными параметрами аппаратуры приводят к необходимости идти на компромисс и выбирать для каждой характеристики не максимально возможное значение, а такое, при котором и другие важные характеристики тоже будут иметь приемлемые значения.

При проектировании приходится решать задачи, проводимые по нескольким критериям оптимизации. Они называются **многокритериальными** или **задачами векторной оптимизации**. Известные методы векторной оптимизации обычно сводят решением задачи к задачам скалярной оптимизации. Частные критерии $F_i(X)$, $i = 1, n$ объединяют в обобщенный критерий $F(X) = \phi(F_1(X), \dots, F_n(X))$, который затем максимизируется (или минимизируется). В зависимости от того, каким образом частные критерии объединяются в обобщенный критерий, различают критерии аддитивные, мультипликативные/минимаксные и максиминные.

При проектировании по частным критериям в качестве целевой функции $F(X)$ принимают наиболее важный параметр проектируемого объекта, все остальные параметры учитываются в виде условий работоспособности. В этом случае решается однокритериальная задача — максимизировать (или минимизировать) значение целевой функции $F(X) \rightarrow \max(\min)$ с учетом ограничений на параметры.

В аддитивных критериях целевая функция образуется путем сложения нормированных значений частных критериев. Целевая функция при применении аддитивного критерия имеет вид

$$F(X) = \sum_{i=1}^n K_{Bi} \frac{F_i(X)}{F_i^0(X)} = \sum_{i=1}^n K_{Bi} f_i(X), \quad (1.3)$$

где K_{Bi} — весовой коэффициент i -го частного критерия; $F_i^0(X)$ — i -й нормирующий делитель; $F_i(X)$ — нормированное значение i -го частного критерия.

Пример использования аддитивного критерия с целью выбора перспективных типов ИМС рассмотрен в разделе 1.8.

В ряде задач проектирования целесообразно оперировать не с абсолютными, а с относительными изменениями значений частных критериев. При этом необходимо, чтобы суммарный уровень относительного снижения значений одного или нескольких критериев не превышал суммарного уровня относительного увеличения значений других критериев. В математической формуле это выражает принцип справедливой относительной компенсации:

$$\sum_{i=1}^n \frac{\Delta F_i(X)}{F_i(X)} = 0, \quad (1.4)$$

который реализуется в мультипликативном обобщенном критерии оптимальности:

$$F(X) = \prod_{i=1}^n K_{Bi} F_i(X). \quad (1.5)$$

Таким образом, мультипликативный критерий образуется путем перемножения частных критериев с учетом весовых коэффициентов.

В теории векторной оптимизации особое место занимает принцип компромисса, основанный на идее равномерности. Он используется в минимаксных (максиминных) критериях. Основываясь на принципе равномерного компромисса, ведут поиск таких значений переменных проектирования $X = (X_1, \dots, X_m)$, при которых нормированные значения всех частных критериев становятся равными между собой, $K_{Bi} F_i(X) = K$, $i = 1, n$. При большом

числе частных критериев чрезвычайно трудно добиться выполнения указанного соотношения. В этом случае оказывается полезным применение принципа максимина. Он заключается в такой вариации значений переменных проектирования, при которой последовательно «подтягиваются» те нормированные критерии, численные значения которых в исходном решении оказались наименьшими. Принцип максимина формулируется следующим образом: нужно выбрать такое $X^0 \in X$, на котором реализуется максимум из минимальных значений частных критериев:

$$F(X^0) = \frac{\max}{X} \frac{\min}{i} f_i(X); \quad i=1, n; \quad X = X_1, \dots, X_m. \quad (1.6)$$

Если частные критерии $F_i(X)$ следует минимизировать, то самым «отстающим» критерием является тот, который принимает максимальное значение. В этом случае принцип равномерной компенсации формулируется в виде минимаксной задачи:

$$F(X^0) = \frac{\min}{X} \frac{\max}{i} f_i(X); \quad i=1, n; \quad X = X_1, \dots, X_m. \quad (1.7)$$

1.3. МЕТОДЫ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Традиционные методы проектирования электронной аппаратуры по номинальным значениям параметров используемых элементов имеют существенные недостатки:

- не обеспечивают высокой точности расчетов;
- не позволяют оценить изменение характеристик при действии дестабилизирующих факторов и в процессе эксплуатации;
- обусловливают наличие значительного количества регулировочных элементов;
- требуют больших затрат на отладку, настройку и ремонт.

Избежать указанных недостатков удается при использовании ЭВМ для анализа и синтеза электронных устройств и систем; это позволяет моделировать характеристики электронных устройств и проводить расчеты методом многократных случайных проб. Метод Монте-Карло и моделирование на ЭВМ случайных процессов дают возможность предсказать с заданной точностью свойства разрабатываемой аппаратуры на этапе проектирования и, следовательно, избежать существенных затрат на экспериментальные исследования.

Применение ЭВМ при расчетах электронных устройств позволяет:

- проводить оценку свойств разрабатываемой аппаратуры на этапе проектирования;
- выбирать оптимальную элементную базу;
- рассчитывать характеристики схем, описываемые сложными аналитическими выражениями;
- оптимизировать параметры схем (реализовывать максимальный динамический диапазон при заданных нелинейных искажениях, определять максимальную допустимую амплитуду сигнала на входе и т. п.);

- решать задачи по рациональному выбору схемы электронного устройства для удовлетворения требований технического задания;
- рассчитывать электронные устройства со специальными характеристиками;
- исследовать влияние разброса значений и старения отдельных элементов схемы на результирующие характеристики;
- исследовать влияние дестабилизирующих факторов на показатели и характеристики электронных устройств.

Компоненты электронных схем имеют определенный разброс параметров и подвержены влиянию дестабилизирующих факторов. Устройства, схемы которых рассчитываются обычными методами, требуют подбора элементов для получения заданных показателей работы. Оценить влияние разброса параметров элементов схемы радиоэлектронного устройства позволяет метод Монте-Карло. Его сущность заключается в многократном последовательном повторении полного анализа схемы при задании случайных значений параметров элементов в соответствии с выбранными для них статистическими характеристиками.

Точность метода Монте-Карло возрастает с увеличением числа испытаний n . Необходимое их число можно определить по формуле

$$n = \frac{4p(1-p)}{\delta^2}, \quad (1.8)$$

где p — вероятность получения правильного решения; δ — допустимая погрешность расчета.

При инженерных расчетах достаточно провести 100 испытаний, чтобы обеспечить приемлемую точность. Увеличение числа испытаний повышает точность расчетов, однако требует большого расхода машинного времени.

При разработке электронных устройств производят расчет основных характеристик — амплитудной, частотной, фазовой, переходной и др. Разработчиков аппаратуры интересует ход усредненных характеристик. Однако большую практическую ценность имеет расчет зоны возможных отклонений расчетных характеристик от усредненных с учетом разброса используемых элементов, влияния температуры, нестабильности напряжений источников питания, старения элементов и т. п. Такая возможность реализуется при вероятностном расчете характеристик методом Монте-Карло.

Блок-схема обобщенного алгоритма расчета характеристик электронных устройств методом Монте-Карло с помощью ЭВМ приведена на рис. 1.1.

Оператор 1 производит ввод исходных данных. В операторе 2 вычисляются значения постоянных параметров электронного устройства. Для обеспечения высокой точности расчетов необходимо знать законы распределения параметров каждого из используемых элементов. Параметры элементов зависят от многих факторов: неоднородности исходных материалов, несовершенства технологии изготовления, влияния окружающей среды и др. При разработке серийной аппаратуры не допускается индивидуальный отбор элементов. С учетом этого можно считать, что параметры элементов являются нормальными случайными величинами.

Для нахождения случайных значений параметров используемых элементов нужен генератор нормально распределенных чисел. Вычисление нормально распределенного числа производится оператором 3 с помощью стандартной подпрограммы. Исходными данными для ее работы по получению нормально-распределенных случайных чисел являются: S — задаваемое среднеквадратическое отклонение нормального распределения, AM — задаваемое среднее нормального распределения, IX — нечетное целое число с девятыю или меньшим числом цифр. Оператор 4 производит вычисление характеристик с учетом случайных отклонений параметров элементов. Число циклов расчета должно быть равно задаваемому числу испытаний n . Это обеспечивается с помощью оператора 5, который проверяет соответствие между задаваемым числом испытаний n и текущим значением n_i . Если нет соответствия между ними, то производится повторное обращение к стандартной подпрограмме для определения очередных случайных чисел и повторяется цикл расчета.

При достижении соответствия между заданным числом испытаний и текущим значением управление передается оператору 6, который вычисляет математическое ожидание и дисперсию по известным формулам:

$$m_x = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}; \quad D_x = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - m_x)^2}{n-1}, \quad (1.9)$$

где X_i — случайное число.

Оператор 7 производит нахождение максимальных и минимальных значений вычисленных величин.

В алгоритме также предусмотрена возможность расчетов, необходимых для построения гистограммы распределения текущих значений характеристик. С этой целью используется подпрограмма GIST, вызываемая оператором 10. Алгоритм данной подпрограммы заключается в следующем: выбирается число шагов гистограммы, вычисляется значение интервала и шага гистограммы, ведутся перебор и подсчет элементов массива для каждого шага гистограммы. Печать полученных результатов вычислений, а также минимальных и максимальных значений результатов полученных величин и интервала гистограммы производят оператор 9.

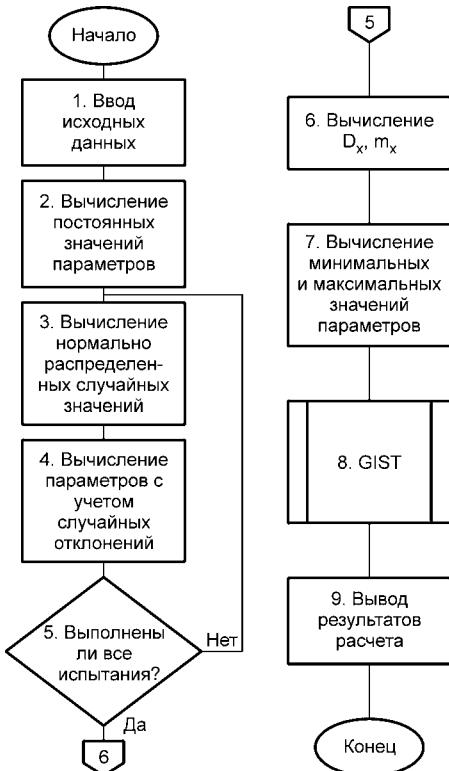


Рис. 1.1
Алгоритм расчетов методом Монте-Карло

1.4. КЛАССИФИКАЦИЯ И СИСТЕМА ОБОЗНАЧЕНИЙ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

В зависимости от функционального назначения ИМС делятся на аналоговые и цифровые. Первые предназначены для обработки и преобразования сигналов, являющихся непрерывными функциями времени. Вторые — для обработки и преобразования сигналов, являющихся дискретными функциями времени (в частном, но широко распространенном случае имеющих вид двоичных импульсов).

В зависимости от технологии изготовления различают полупроводниковые, пленочные и гибридные ИМС. В полупроводниковой ИМС все элементы и межэлементные соединения выполнены в объеме и на поверхности полупроводниковой подложки. В пленочной — только в виде пленок проводящих и диэлектрических материалов на поверхности диэлектрической подложки. Различают две разновидности пленочных ИМС: тонкопленочные, если используются пленки толщиной менее 1 мкм, и толстопленочные — с пленкой толщиной более 1 мкм. В гибридных ИМС, кроме элементов, содержатся простые и сложные бескорпусные компоненты (например, кристаллы полупроводниковых ИМС), расположенные на поверхности диэлектрической подложки.

Если в ИМС элементы и межэлементные соединения выполнены в виде пленок, а также содержатся бескорпусные компоненты (транзисторы, диоды, индуктивности и др.), то она называется гибридно-пленочной.

Интегральные схемы подразделяются также по степени интеграции. Степень интеграции

$$K_{\text{и}} = \lg N_{\text{имс}},$$

где $K_{\text{и}}$ — показатель степени сложности ИМС; $N_{\text{имс}}$ — число входящих в ИМС элементов и компонентов.

На практике значение $K_{\text{и}}$ округляется до ближайшего целого числа: например, если $K_{\text{и}} = 3$, то это означает число элементов и компонентов ИМС порядка 10^3 .

Классификация и система обозначения ИМС основаны на ГОСТ 18682-73; по конструктивно-технологическому исполнению они подразделяются на три группы, которым присвоены следующие обозначения: 1, 5, 7 — полупроводниковые; 2, 4, 6, 8 — гибридные; 3 — прочие.

Условное обозначение типа ИМС состоит из четырех элементов:

- цифры, указывающей конструктивно-технологическое исполнение;
- двух цифр, указывающих порядковый номер разработки;
- двух букв, указывающих функциональное назначение микросхемы;
- одной или нескольких цифр, указывающих порядковый номер разработки ИМС по функциональному признаку в данной серии.

Первые два элемента обозначают номер серии ИМС.

Серий называют совокупность типов ИМС, которые могут выполнять различные функции, имеют единое конструктивно-технологическое исполнение и предназначены для совместного применения.

В маркировке микросхем, выпускаемых для широкого применения, перед первым элементом обозначения ставят индекс «К». В конце условного обозначения иногда проставляется дополнительная буква от А до Я для учета разброса отдельных электрических параметров.

Примеры обозначений ИМС:

- 101КТ1А: полупроводниковая ИМС, серия — 101, порядковый номер разработки внутри серии — 1, выполняет функцию ключа тока; группа — А, означающая, что остаточное напряжение ключа не превышает 50 мкВ;
- К284УД1А: гибридно-пленочная ИМС широкого применения, серия — 284, порядковый номер разработки внутри серии — 1, функциональное назначение — дифференциальный операционный усилитель, группа — А, означающая уровень собственных шумов в полосе 0,1...10 Гц не более 6 мкВ.

1.5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

1.5.1. ГРУППОВОЙ МЕТОД ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

Метод был предложен в конце 1950-х гг. Сущность его состоит в том, что в полупроводниковой пластине диаметром 25...80 мм и толщиной 0,2...0,5 мм одновременно изготавливается множество транзисторов, регулярно расположенных на поверхности пластины. Затем пластина разрезается на множество отдельных кристаллов, содержащих по одному транзистору. После этого кристаллы помещаются в корпусы с внешними выводами.

Следует отметить, что ведущие фирмы в настоящее время используют пластины диаметром 300...500 мм.

Идея группового метода стала очень широко использоваться при изготовлении интегральных схем, что иллюстрирует рис. 1.2.

Здесь реализуется возможность технологической интеграции компонентов на одной подложке. Суть интеграции состоит в том, что на исходной пластине (рис. 1.2а) вместо отдельных транзисторов одновременно изготавливается множество ИМС, каждая из которых содержит все компоненты

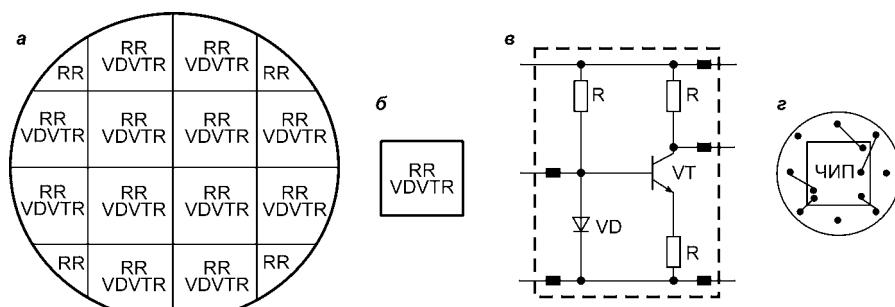


Рис. 1.2
Этапы группового метода изготовления интегральных схем

(резисторы R , диоды VD , транзисторы VT , указанные на рис. 1.2б, в), необходимые для построения функционального узла. Эти компоненты соединяются друг с другом тонкими металлическими полосками (часто алюминиевыми). Как видно из рис. 1.2а, все ИМС регулярно расположены на поверхности пластины. Пластина разрезается на отдельные кристаллы (называемые в специальной литературе **чипами**), которые помещаются в корпус, что иллюстрирует рис. 1.2г. При этом разработчик аппаратуры получает готовый функциональный узел в виде электронного прибора определенного типа и назначения.

1.5.2. ПЛАНАРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

При разработке электронной аппаратуры на электронных лампах и транзисторах всегда возникает необходимость в многочисленных соединениях приборов между собой с помощью пайки. Обилие паяных соединений резко снижает надежность аппаратуры и увеличивает ее стоимость вследствие множества сборочных и монтажных операций. В значительной степени избежать указанных недостатков позволяет так называемая *планарная технология*, широко используемая в настоящее время при производстве ИМС. Она обеспечивает изготовление разнотипных элементов в полупроводниковой пластине с расположением их выводов в одной плоскости. Это позволяет выполнять межсоединения элементов в едином технологическом цикле с помощью металлических полосок. При разработке сложных ИМС для обеспечения необходимых межсоединений иногда используют несколько слоев металлических пленок, разделенных между собой диэлектрическими слоями. Таким образом, при разработке аппаратуры на основе ИМС, изготовленных по планарной технологии, отпадает необходимость в многочисленных паяных соединениях, резко сокращаются габаритные размеры, масса, повышается надежность и снижается стоимость.

1.5.3. ПЛЕНОЧНАЯ И ГИБРИДНАЯ ТЕХНОЛОГИИ

С помощью пленочной технологии изготавливают пассивные элементы: резисторы, конденсаторы, элементы индуктивности, а также соединительные проводники и контактные площадки. Таким образом, чисто пленочные ИМС обычно являются пассивными. Пленочные интегральные элементы часто используют совместно с миниатюрными навесными компонентами в составе гибридных ИМС. Последние, уступая полупроводниковым ИМС по надежности, плотности упаковки и себестоимости, имеют во многих случаях лучшие технические показатели за счет применения широкой номенклатуры навесных компонентов (транзисторов, конденсаторов и элементов индуктивности). Элементы пленочных и гибридных ИМС выполняются на поверхности диэлектрической подложки.

При изготовлении гибридных ИМС используют как толстые, так и тонкие пленки. Исходными материалами для элементов толстопленочных ИМС являются специальные резистивные, проводящие и диэлектрические полужидкие пасты стеклоэмалей. Они наносятся на поверхность подложки через

специальный трафарет, обеспечивая заданную конфигурацию изготавливаемых элементов. Затем трафарет убирают, а локально нанесенную пасту высушивают и вжигают в подложку. Для толстопленочных ИМС используют теплостойкие диэлектрические подложки (например, керамические). Такие ИМС обладают высокой механической прочностью, имеют хорошую коррозийную устойчивость. Использование в толстопленочных ИМС подложек с высокой теплопроводностью позволяет создавать мощные ИМС.

Толстопленочные ИМС отличает низкая стоимость, для их изготовления не требуется сложное оборудование. Однако толстопленочная технология не обеспечивает высокой точности изготовления элементов, что приводит к большим отклонениям реальных значений их параметров от расчетных номинальных значений.

Технология тонкопленочных ИМС позволяет изготавливать пассивные элементы с более узкими допусками номиналов по сравнению с другими видами технологий. При производстве тонкопленочных ИМС используется дорогостоящее оборудование, позволяющее путем локального напыления резистивных, проводящих или диэлектрических материалов создавать элементы и межсоединения. По сравнению с толстопленочными ИМС элементы в них размещены более плотно.

Технологии пленочных ИМС не обеспечивают изготовление высококачественных активных элементов, а также элементов индуктивности и конденсаторов с большими номинальными значениями параметров. Избежать указанного недостатка позволяет гибридно-пленочная технология. Она обеспечивает производство ИМС, у которых на диэлектрических подложках создаются пленочные элементы, а также располагаются навесные бескорпусные активные элементы и другие миниатюрные пассивные элементы.

Конструктивное устройство простейшей гибридно-пленочной ИМС и ее электрическая схема показаны на рис. 1.3а, б.

Здесь изображены пассивные пленочные элементы (резистор R , конденсатор C) и бескорпусной активный элемент (транзистор VT), приклеенный к подложке.

Гибридно-пленочная технология отличается гибкостью, позволяя быстро создавать разнообразные электронные устройства. Из-за малых паразитных емкостей, хорошей взаимной изоляции элементов и возможности использования высококачественных навесных активных элементов гибридно-пленочные ИМС имеют лучшие частотные и импульсные свойства, чем схемы на обычных дискретных элементах. Благодаря этим особенностям гибридно-пленочная технология является перспективной для производства аналоговых ИМС, отличающихся большим разнообразием функций.

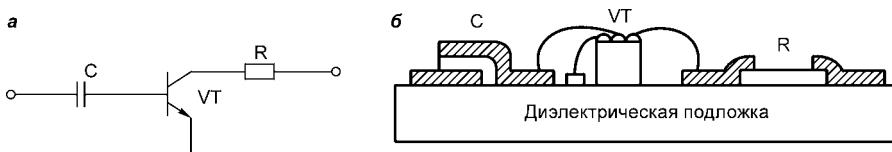


Рис. 1.3
Схема (а) и конструкция (б) ГИМС

1.5.4. ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Для изготовления полупроводниковых ИМС обычно используют пластины монокристаллического кремния с проводимостью *p*- или *n*-типа. Изменяя определенным образом концентрацию примесей в различных частях пластины, получают многослойную структуру, воспроизводящую заданную электрическую функцию и эквивалентную обычному резистору, конденсатору, диоду или транзистору. Как правило, технология ориентирована на изготовление одной или нескольких транзисторных структур, причем в процессе их изготовления в едином технологическом процессе одновременно создаются и другие требуемые структуры (резистивные, диодные и др.), что иллюстрирует рис. 1.4*a*, *b*.

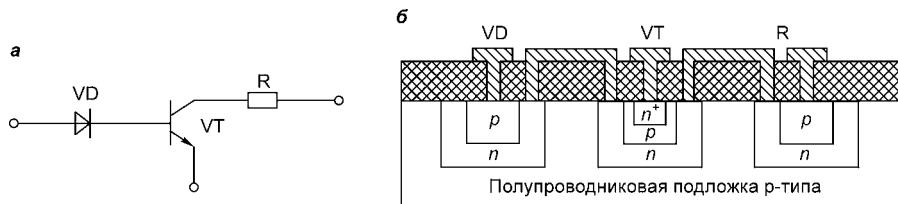


Рис. 1.4
Схема (а) и конструкция (б) ИМС

Процесс изготовления современных полупроводниковых ИМС очень сложен. Он проводится в специальных помещениях с микроклиматом и высокой чистоты с использованием дорогостоящего прецизионного оборудования.

Рассмотрим основные технологические процессы, выполняемые при изготовлении полупроводниковых ИМС. Исходный полупроводниковый материал получают в виде слитков из расплава кремниевого вещества (песка).

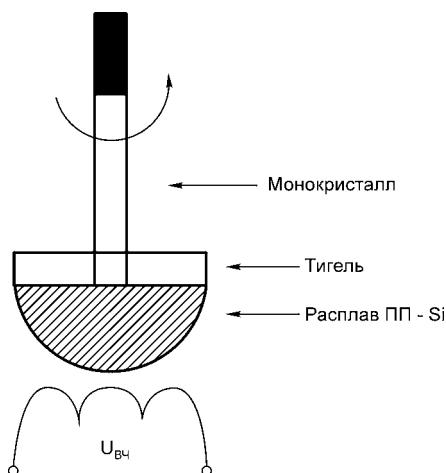


Рис. 1.5
Схема выращивания монокристалла методом Чохральского

Монокристаллические слитки кремния, как и других полупроводников, получают обычно путем кристаллизации из расплава — это так называемый метод Чохральского. Стержень с затравкой (в виде монокристалла кремния) после соприкосновения с расплавом медленно поднимают с одновременным вращением (рис. 1.5). При этом вслед за затравкой вытягиваются нарастающий и застывающий слиток.

Кристаллографическая ориентация слитка (его поперечного сечения) определяется кристаллографической ориентацией затравки. Регулярность (периодичность) структуры кристалла приводит к зависимости его свойств от направления в кристаллической решетке — к ани-

Конец ознакомительного фрагмента.
Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru