**Основные сведение микроэлектроники. Понятие микросхем**

Это микросхемы, которые можно классифицировать по различным признакам: по технологии, по мощности, по быстродействию, по обрабатываемым сигналам, по частоте и т. д. Далее мы используем классификацию по технологии, дающую представление о том, что это такое. Имеются полупроводниковые, пленочные и гибридные микросхемы. Микросхема это изделие микроэлектроники с высокой степенью интеграции элементов. Интеграция это объединение в единое целое транзисторов, диодов, резисторов и других элементов электроники. Уточним, это количественная интеграция. Характеризуется интеграция коэффициентом упаковки, равном отношению числа элементов в объеме 1 см3. Для микросхем он более 15. В конструктивном отношении это сама микросхема (полупроводниковый кристалл, диэлектрическая подложка с элементами,) помещенная в вакуумированный корпус с выводами. Типов корпусов много, один из них, пластмассовый корпус ДИП с микросхемой внутри показан на рис. 1.

Рис. 1. Микросхема в корпусе ДИП.

По технологии изготовления микросхемы бывают следующие.

- Полупроводниковые, выполненные на полупроводниковом кристалле. Имеют широкое распространение (≈80% всех микросхем) благодаря транзисторам в составе.

- Пленочные (≈5%). Это только пассивные элементы и решения на них.

- Гибридные (≈15%), представляют сочетание двух предыдущих технологий.

Полупроводниковые интегральные микросхемы.

Ее основа полупроводниковый кристалл, это подложка. Чаще всего используется материал Si по следующим причинам.

Во первых, он распространенный материал в природе.

Во вторых, у кремниевых приборов хорошая температурная стабильность, в частности меньше неуправляемый ток транзистора Ik0.

В третьих, у кремниевого p-n перехода больше порог открывания, что делает такие приборы более помехоустойчивыми (Рис. 2).

В четвертых, на основе кремния легко изготовить изоляцию. Для этого в нужное место подложки подводят кислород, образуется двуокись кремния SiO2, которая является хорошим во всех отношениях диэлектриком .

Проводимость подложки не имеет принципиального значения, однако, природный Si засорен трехвалентными атомами бора, которые предают ему дырочную проводимость. Итак, основа схемы – подложка р кремния рис. 3, в которой по единой технологии, одновременно формируется множество транзисторов, диодов, резисторов и пр. элементов

Iпр Ge Si

0.3B 0.7B Uпр

p - Si

подложка

Рис. 2. ВАХ переходов. Рис. 3. Подложка микросхемы.

Процесс изготовления микросхемы следующий. Исходным является круглый или квадратный стержень кремния диаметром 40-50 мм с известной концентрацией 3-х валентной (акцепторной ) примесью бора. Далее он режется на пластины толщиной 0.2мм. На пластине одновременно идет изготовление множества микросхем, каждая из которых имеет площадь 1мм2. По окончании изготовления пластина разрезается на отдельные кристаллы (рис. 4). Массовость делает микросхему дешевой и имеющийся брак не существенно влияет на стои- Рис. 4. Изготовление мость.



микросхемы

Обратите внимание на то, что при изготовлении элементов к пластине имеется доступ только с поверхности. В каком то смысле базовыми полупроводниковыми приборами для полупроводниковых микросхем является транзисторы.

Интегральные биполярные транзисторы.

**Прежде всего заметим, что принцип действия транзистора в интегральном исполнении абсолютно такой же, как и у одиночного**. Технологических же методов их изготовления много, но все они основаны на доступе к подложке с поверхности. Подложка р типа имеет концентрацию примеси 1014 1/см3. Если вносить в локальную область примеси большей концентрации 1016 1/см3, например n (фосфор), то здесь в подложке будет уже n область. Таким образом, поочередно внося различные примеси, можно сформировать структуру биполярного транзистора. На рис. 5 показаны интегральные транзисторы диффузионного типа. Из сформированных областей делают выводы, поверхность подложки окисляют для защиты транзистора пленкой диэлектрика.

Э Б К +10В

n+

p

n

n+

p

n

p – Si подложка

Эмиттер

База

Коллектор

К

Б

Э

SiO2 – диэлектрическая

пленка

+5В

Рис. 5. Структура интегрального биполярного транзистора

Особенности транзистора следующие.

- Транзистор имеет вертикальную структуру и обратную проводимость, n-p-n.

- транзистор, будучи одним из многих в общей подложке, имеет связь с подложкой. Это емкость «коллектор-подложка», Скп , которая играет вредную роль. Каждый интегральный транзистор должен быть самостоятельным и независимым, однако, благодаря Скп, между ними возникает связь, что ограничивает применение микросхемы по частоте.

- Между транзисторами существует изоляция. Если мысленно пройти от коллектора к коллектору (рис 5), то структура будет n-p-n, то - есть два встречно включенных диода, которые не проводят ток при любой полярности напряжения. Это изоляция p-n переходом, которая далеко не идеальна, так как обратно смещенный переход это барьерная емкость. Но несмотря на этот недостаток, такая изоляция работает вполне удовлетворительно до частот десятков мегаГерц. На более высоких частотах изолируют элементы диэлектрическими карманами.

- Работа коллектора не эффективна, так как приложенное к нему напряжение, например 10В., не «доберется» без потерь вглубь. Напомним, что коллектор самая высокоомная область транзистора и протекающий по выводу ток Ik создает падение напряжения. Таким образом, в глубине коллектора будет не 10В, а меньше (рис. 5).

В современных микросхемах такие транзисторы не применяются. Распространены **планарно – эпитаксиальные структуры со скрытым n+ слоем**, рис.6. Эпитаксия это технологический прием - направленный рост кристалла, который применяется при формировании коллектора.

p – Si подложка

n+ - скрытый слой

n+

p

n –область эпитаксии

К Б Э Б К

Рис. 6. Планарное – эпитаксиальный транзистор

Наличие скрытого слоя с повышенной концентрацией примеси (n+) обеспечивает низкое сопротивление области коллектора, благодаря чему потери напряжения в коллекторе уменьшаются, и повысится эффективность его работы (коэффициент β имеет величину 1000-5000). Эта конструктивная особенность повышает и быстродействие, транзистор работает на частотах 50-100МГц.

Интегральная технология позволяет изготовить несколько типов биполярных транзисторов. Разберем их особенности.

**Транзистор с горизонтальной структурой**. Это транзистор с прямой проводимостью p-n-p, бывает крайне необходим при разработке аналоговых устройств. Его структура показана на рис. 7. Качество такого транзистора весьма не высокое, так как невозможно изготовить узкую базу Δб. В обачном транзисторе она имеет величину 0.1 мкм, а здесь 5-10 мкм. В широкой базе заметно возрастает рекомбинация носителей, уменьшается их количество дошедших до коллекторного перехода. Ток коллектора становится меньше, коэффициент β уменьшается (β=10-20).

эмиттер база Б Δб коллектор

Э К

р+ р

n база

Si- р подложка SiO2

n

p-Si

Рис. 7. Продольный транзистор

**Многоэмиттерный транзистор.** Имеется аналог такого транзистора в отдельном исполнении. Применяется в логических схемах транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ). Его структура показана на рис.8.

n+

n+

К SiO2  Б Э1 Э2 К

р- база

n-коллектор

Скрытый n+ слой

Si-p подложка

p-Si

Рис. 8. Многоэмиттерный транзистор.

Здесь надо рассуждать категориями двоичной логики, 0- 1; да - нет; открыт транзистор - закрыт. Состояние транзистора по коллектору, открыт - закрыт, определяется состоянием эмиттеров. Каждый эмиттер, а их число может быть доведено до восьми, является входом логической схемы. Выход же один, коллектор.

**Транзистор Шоттке.** Также имеется аналог в отдельном исполнении. Во всех предыдущих структурах показаны выводы базы коллектора и эмиттера. Это пленка алюминия. Напомним , что контакт металла и полупроводника может быть омическим и диодным в зависимости от свойств материалов. В транзисторах Шоттки пленка выводы коллектора захватывает область базы. Она образует омический контакт с коллектором и диодный контакт с базой (диод Шоттки). На рис. 9 показана структура транзистора. Его коллекторный переход зашунтирован быстродействующим диодом Шоттки.

Б Э К

n+

p

n

p - Si подложка

n+

Диод Шоттки

Контакт

Б

Рис. 9. интегральный транзистор Шоттки.

Диод Шоттки имеет следующие преимущества. Это малоинерционный, быстродействующий диод. Порог открывания диода меньше (0.2-0.3В.) чем у кремниевого (0.7В.). Поэтому в режиме насыщения коллекторный переход вообще не будет открыт, так как он зашунтирован диодом Шоттке. Это дает определенные преимущества и самому транзистору при переключении. Нет насыщения, нет инжекции неравновесных носителей, нет накопления в областях транзистора неравновесных зарядов и, наконец, нет проблемы выведения неравновесных зарядов при закрытии транзистора. **Вывод: транзистор Шоттки обладает лучшим быстродействием как переключатель.**

**Транзисторы с инжекционным питанием**. Транзистор не требует коллекторного источника питания при обработке сигналов. Принцип его работы может быть пояснен на структуре рис. 10.

Инжектор И Коллектор К

База Б

p + n

p

инжекторный переход

n-Si область эмиттера

+ - Епит Ключ

Рис 10. Транзистор с инжекционным питанием

В базовом кристалле n проводимости имеется область р+, инжекторная. Образуется инжекторный p-n переход, на который подается напряжение источника питания. Резистор в цепи ограничивает ток. Этот переход должен быть открыт и не столь принципиально, какая величина прямого тока. Поэтому источник питания может быть достаточно нестабилен. А далее идет следующее. Через открытый переход начинается инжекция дырок в область базового кристалла. На остальные переходы структуры ничего не подается, но при контакте на них образуется контактная разность потенциалов за счет «обнажения» атомов примесей, рис. 11.

Ek

Эмиттер ЭП КП Rк

+ - - +

+ - - +

И p+ n p n K

+ - - + Uk

+ - - +

инжекция Э Б Контактная разность

Ключ потенциалов

Рис. 11 Принцип действия транзистора

Обратите внимание на полярность контактной разности потенциалов. Дырки , которые вошли в выбрасываются электрическим полем ЭП в базу и там задерживаются электрическим полем КП. Идет процесс накопления неравновесных дырок в базе. Результат этого: эмиттерный переход открывается, электроны инжектируют в базу, далее полем коллекторного перехода выводятся в коллектор. Таким образом, все три области транзистора насыщены электронами и транзистор находится в открытом состоянии. Это значит. сопротивление «коллектор-эмиттер мало».

Совершенно иная картина будет при замкнутом ключе, (его роль может исполнить такой же транзистор). Скопившиеся в базе неравновесные дырки будут отводится на минус источника питания, следовательно, в коллектор дальше не пойдут и не обеспечат проводимость по выводу коллектора. Транзистор будет закрыт.

Такое решение питания транзистора обеспечивает обработку цифровой информации, поскольку здесь важно два состояния 0-1, да-нет, открыт-закрыт (транзистор). И еще одно преимущество, чрезвычайно важное для именно в микросхемах. Один инжектор может обеспечивать питание нескольких транзисторов. Это позволяет сократить размеры транзистора в 10 раз и тем самым повысит степень интеграции.

Результат обработки цифровой информации можно расшифровать по состоянию транзистора. Достаточно на коллектор подать питающее напряжение через нагрузочный резистор Rkр (рис. 11). Если напряжение на коллекторе Uk большое – транзистор закрыт; если маленькое – открыт. Такие микросхемы имеют технологию И2Л, обладают высокой экономичностью, степенью интеграции и не критичны к источнику питания.

Интегральные полевые транзисторы.

В интегральном исполнении существуют все виды полевых транзисторов: с p-n переходом, Шоттке, МОП со встроенным и индуцированным каналом. Принцип действия у них такой же, как и у обычных. В справочниках можно найти микросхемы технологий p-МОП, n-МОП. Транзисторы в них имеют обыкновенную структуру. Но в интегральном исполнении есть и отличительные решения на транзисторах, так как ним предъявляется особые требования. Это

* снижение потребляемой мощности,
* увеличене плотности упаковки.

Именно это привело к модификации полевых транзисторов.

**КМОП – технология**. Комплиментарный МОП транзистор , состоит из двух полевых, каждый из которых – МОП структура с индуцированным каналом и разной проводимостью канала. На рис. 12 показано включение пары транзисторов, а на рис. 13 интегральное исполнение в общей подлжке. Можно назвать это «комплиментарная МОП пара».

+Епит

И1

VT1

З1

С1 Uвых

Uвх

С2

З2 VT2

И2

-

общая точка

Рис.12. Комплиментарное включение полевых транзисторов

На рис.12 приведена схема комплиментарного транзистора для логических схем, хотя существуют подобные решения со своими преимуществами и для аналоговых. Итак, на вход подается логический сигнал либо высокого уровня (+Епит), либо низкого (-Епит, она же общая точка). Состояние транзисторов будет следующим.

При высоком уровне положительное напряжение в цепи затворов образует канал проводимости в транзисторе VT2 (МОП транзистор с электронным каналом), и он переходит в открытое состояние. Напряжение Епит делится между двумя транзисторами и на выходе возникает низкое напряжение (уровень логического нуля).

При низком входном напряжении (-Епит) открывается верхний транзистор VT1 , а нижний остается закрытым. На выходе формируется высокое напряжение (уровень логической единицы). На языке Булевой алгебры получилась схема отрицания или инвертор: на входе «0» на выходе «1», на входе «1» на выходе «0».

P

p-Si подложка

SiO2 И1 З1 С1 металл С2 З2 И2

P

n

n

n

VT1

VT2

Рис.13. Структура МОП транзистора.

Основное достоинства такого транзистора в том, что при любом состоянии один из последовательно включенных транзисторов будет закрыт и потребление энергии от источника будет чрезвычайно малым. Мощность рассеиваемая транзисторами также будет мала.

Чем меньше мощность, тем выше допустимая степень интеграции микросхемы. Правда, на практике картина не столь идеальна. Дело в том , что существуют межэлектродные емкости транзистора и емкости проводов (разводки). Одна такая емкость показана на рис. 13. Во время работы она будет перезаряжаться, что потребует тока от источника питания в момент переключения. Несмотря на это КМОП микросхемы имеют в несколько раз выше показатели интеграции, чем схемы на традиционных решениях.

Далее разберем другие приборы микроэлектроники. Заметим, что в большинстве своем они не имеют самостоятельной структуры, а создаются на основе транзисторов. Это еще одно преимущество интегральных микросхем.

Интегральные диоды.

Интегральные диоды yне имеют самостоятельной структуры и создются на основе биполярного транзистора, используя его p-n переходы. Всего можно придумать пять схем диодного включения, рис. 14.

Все включения имеют различные свойства, отличаются друг от друга временными параметрами, емкостью и предельными величинами (см. таблицу). Объяснить эти величины можно исходя из свойств транзистора. Так, например, большое напряжение пробоя, Uпроб, будет у тех включений, где работает широкий коллекторный переход, рис. 15 в), г), а быстродействие больше при работе тонкого эмиттерного перехода и тонкой базе, рис. 15 а), б).

а) б) в) г) д)

Рис. 15. Интегральные диоды

Таблица

Приближенные параметры диодного включения

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Схема | а) | б) | в) | г) | д) |
| Uпроб, В | 7 | 7 | 55 | 55 | 7 |
| Быстродействие, нс | 5.6 | 9 | 55 | 53 | 100 |
| Uпрямое, В | 1.0 | 0.6 | 0.9 | 0.9 | 0.9 |
| Скол-подл, пФ | 1.2 | 2.9 | 2.9 | 2.9 | 2.9 |

Структура интегрального диода может быть показана на структуре транзистора; в качестве примера на рис. 16 изображен диод на коллекторного перехода по схеме рис. 15 б).

p – Si подложка

n+ - скрытый слой

n+

p

n –область эпитаксии

К Б Э Б К

Рис. 16. Интегральный диод

Интегральные резисторы.

Также не имеют самостоятельной структуры. В качестве резистора используются области биполярного (диффузионные резисторы) или полевого (МОП резисторы) транзисторы.

Начнем с диффузионных резисторов, изготавливаются на основе областей транзистора, которые формируются методом диффузии. Области коллектора, базы и эмиттера различные по площади, имеют различные концентрации примесей и , следовательно, обладают различной проводимостью. Благодаря этому возможные значения номиналов лежат в диапазоне 50 – 500000 Ом, что вполне достаточно для проектирования схем. На рис. 17 показана структура резистора на основе коллекторной области. другие области транзистора не нужны. Однако , если сверху создать область базы р проводимости, она уменьшит объем коллектора и тем самым увеличит сопротивление резистора. Таким решением часто пользуются (пинч-резистор).

Rk SiO2

1 2

p

n коллектор

p-Si подложка

Рис. 17. Интегральный резистор.

Существует еще одна разновидность интегральных резисторов, это МОП (МДП) резисторы, которые изготавливаются на основе полевого транзистора. Резистором является встроенный канал, рис.18 .



Рис. 18. МДП резистор

Из принципа работы вспомним, что канал можно обеднять или обогащать носителями изменением напряжения на затворе. Сейчас это означает, что величину резистора можно изменять. Получается переменный резистор с электрическим управлением величины, .

Недостатки интегральных транзисторов следующие.

- Точность номинала очень низкая и составляет 20 – 50%, . Это допустимо в цифровых схемах, но совершенно не приемлемо в аналоговых.

- Большая площадь подложки, что не желательно в интегральных схемах, так как ограничивает степень интеграции.

Интегральные конденсаторы.

Менее распространенные элементы в интегральных микросхемах. Это либо обратно смещенный p-n переход в биполярном транзисторе (диффузионный конденсатор), либо емкость «металлический затвор – встроенный канал» в полевом транзисторе (МДП конденсатор). Оба типа конденсаторов показаны на рис. 19.

n+

p

+ -

К Б

n

p-Si

Затвор

n канал

p- Si подложка

1. 2

1 2

а) б)

Рис. 19. Интегральные конденсаторы:

а) на биполярном транзисторе, б) на полевом транзисторе.

Емкость таких элементов невелика, 10-30 пФ и поэтому эффективно они работают только на высоких частотах. Применение их в микросхемах ограничено. При необходимости большие по номиналу конденсаторы подключают к внешним выводам микросхемы, такие элементы называют навесными.

.

Пленочные интегральные микросхема.

Это диэлектрическая подложка на поверхности которой нанесены элементы выполненные из пленок. Материал подложки качественный диэлектрик, с малым коэффициентом линейного расширения ( стекло, керамика). Толщина такой пластины менее миллиметра, площадь 12x12 мм2, 12x24 мм2, и др.

Пленки применяют металлические (алюминий др.), диэлектрические (моноокись кремния SiO и др.), резистивные (сплав никеля и хрома NiCr и др.). Толщины пленок определяются технологией нанесения.

Тонкие пленки 0.001 – 2 мкм, технология термовакуумного осаждения.

Толстые пленки 2 – 100 мкм, технология вжигания.

Из пленок можно изготовить только пассивные элементы: это резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности и решения на основе этих элементов (например, фильтры).

**Основной недостаток пленочных схем – отсутствие в их базе активных элементов и прежде всего транзисторов.**

Рассмотрим конструкции пленочных элементов.

**Резисторы**. Величина зависит от толщины и площади пленки. На подложку напыляются две контактные площадки из алюминия (это выводы), а между ними пленка из высокоомного сплава, рис. 20. Для повышения номинала она может быть выполнена в виде змейки.



Рис. 20 Пленочный резистор.

Диапазон номиналов резисторов 50 – 500000 Ом. Важное преимущество этих интегральных элементов в том, что после нанесения пленки, часть ее можно убрать, выжечь лучом технологического лазера, контролируя при этом сам номинал. Это дает возможность получить очень точное значение сопротивления. Такие резисторы называются прецизионные, их точность 0.5%. Для сравнения точность отдельного резистора в лучшем случае 5% .

**Пленочные конденсаторы**. Это чередующиеся металлические и диэлектрические пленки. В зависимости от их числа могут быть трех и многослойные конденсаторы, рис. 21.



Рис. 21. Трехслойный пленочный конденсатор.

Изготовить таким образом можно емкость до 10000 пФ/мм2. В микроэлектронике это большая площадь, а работать такой конденсатор будет на высоких частотах. Этот элемент не выгоден в микросхемах, так как «сжирает» площадь подложки, и его применение ограничено.

**Пленочные индуктивности**. Имеют вид спирали из пленки. конструкция плоская , и поэтому имеет небольшой номинал, порядка 5 мкГн, проявляется в диапазоне свыше 30 МГц, рис. 22.



Рис. 22. Пленочная индуктивность.

По пленочной технологии можно изготовить ряд устройств на основе перечисленных элементов. Это трансформаторы, RC и LC с распределенными параметрами, фильтры, линии задержки. Особенно популярны пленочные резисторы ввиду их высокой точности. На их основе построена 301 серия микросхем, в состав которой входят прецизионные делители напряжения. Конструкция такого делителя и ее аналог приведены на рис. 22.



а) б)

Рис. 22. прецизионный делитель напряжения а) и его аналог б).

Гибридные интегральные микросхемы.

Это микросхемы , в которых совмещаются две технологии, полупроводниковая и пленочная. При это сохраняются преимущества той и другой. основа микросхемы – диэлектрическая подложка. На ней расположены навесные элементы в специальном миниатюрном исполнении. Это транзисторы без корпуса, один кристалл с выводами выполненными микропроводом, размером 1 мм3, диоды, конденсаторы и т. д. резисторы как правило изготавливаются из пленок. Несомненно , такая конструкция имеет невысокий коэффициент интеграции, но дешевле и доступнее в смысле технологии. На рис. 23 показан фрагмент усилителя в гибридном исполнении.



Рис. 23 Гибридная интегральная микросхема