

Министерство высшего и среднего специального образования
Р С Ф С Р

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени авиационный
институт имени академика С.П.Королева

ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПАССИВНЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ ГИС МЕТОДОМ ТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ
В ВАКУУМЕ

Методические указания к лабораторной работе 32

Куйбышев 1982

УДК 621.382.049

Предлагаются методы изучения технологических процессов изготовления тонкопленочных резисторов, конденсаторов и проводников пассивных элементов гибридных ИС, а также анализируется связь технологического процесса напыления с параметрами тонкопленочных элементов.

Рекомендуется студентам специальности 0705 при изучении курса "Конструкции и технологии микросхем".

Составитель А.В.В о л к о в

Утверждены редакционно-издательским советом института 16.12.81

Ц е л ь р а б о т ы - изучение технологических процессов изготовления тонкопленочных резисторов, конденсаторов и проводников пассивных элементов гибридных ИС.

З а д а н и я :

1. Изучить параметры термовакuumного напыления и способы получения заданной конфигурации тонкопленочных элементов.

2. Напылить резистивные, диэлектрические и проводящие пленки из материалов, указанных преподавателем.

3. Измерить геометрические размеры и номиналы тонкопленочных элементов.

4. Провести анализ связи технологического процесса напыления с параметрами тонкопленочных элементов.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. Методы получения резистивных, проводящих и диэлектрических пленок

Тонкие проводящие, резистивные и диэлектрические пленки могут быть получены различными методами: вакуумным термическим напылением; катодным распылением; ионно-плазменным распылением; химическим осаждением и др.

Каждый из перечисленных методов имеет свои достоинства и недостатки. Выбор способа нанесения тонких пленок при производстве гибридных интегральных схем определяется в основном двумя факторами: возможностью получения всех тонкопленочных элементов с высокими конструктивными и эксплуатационными характеристиками при малой трудоемкости. В настоящее время наиболее универсальным, достаточно полно разработанным и широко освоенным промышленностью методом является вакуумное термическое напыление.

1.2. Параметры термовакuumного напыления

В соответствии с физическими процессами, протекающими при испарении материала в вакууме, в вакуумной камере можно выделить три основные области: источника паров, переноса паров, конденсации паров.

В области источника паров твердые вещества обычно при нагревании расплавляются, а затем переходят в газообразное или паробразное состояние. Некоторые вещества (Cr , ZnS , Cd и др.) переходят в это состояние, минуя жидкую фазу. Такой процесс называется сублимацией. Испаряемые вещества характеризуются следующими параметрами: давлением насыщенного пара, температурой испарения и скоростью испарения.

Давление пара для любого вещества является функцией температуры и может быть рассчитано по изменению свободной энергии Γ кал/г·моль:

$$P = 2,881 - \Gamma/RT,$$

где P — газовая постоянная.

Температуру, при которой давление паров вещества над его поверхностью составляет 1,33 Па называют температурой испарения. Температуру испарения вещества обычно выбирают соответствующей давлению его паров порядка $13,3 \pm 0,133$ Па. При давлении менее 0,133 Па скорость осаждения пленок настолько мала, что не представляет практического интереса; при давлении выше 13,3 Па, как правило, наблюдается разбрызгивание вещества за счет интенсивного отделения сорбированных газов; пленка при этом получается рыхлой с сильно развитым рельефом поверхности.

Если система не является замкнутой, то равновесное давление паров существует только над расплавом и уменьшается по мере удаления от источника. При достаточно длительном времени весь расплав испаряется.

Скорость испарения вещества Φ (г/с·см²) линейно зависит от давления пара над его поверхностью P и может быть представлена в виде

$$\Phi = 1/17,14P(M/T)^{0,5},$$

где T — абсолютная температура испаряемого вещества;
 M — его молекулярный вес;

При молекулярном режиме испарения, когда остаточное давление газов мало, а упругость паров не превосходит 133 Па, можно считать скорость испарения не зависящей от давления и определяемой числом частиц, покидающих в единицу времени единицу площади поверхности испаряемого вещества:

$$\Phi = 6 \cdot 10^{-4} \text{ г/т.}$$

Область перекоа паров характеризуется в первую очередь средней длиной свободного пробега молекул, которая определяется степенью вакуума в системе (табл. I).

Т а б л и ц а I
Зависимость средней длины свободного пробега молекул
от степени вакуума

| Давление, Па | 101080 | 133 | 0,0133 | 0,000133 | $133 \cdot 10^{-12}$ |
|-----------------|-------------------|--------|--------|----------|----------------------|
| $\bar{\lambda}$ | 620 \AA | 47 мкм | 47 см | 47 м | 4700 км |

П р и м е ч а н и е. Указанные величины приведены для воздуха при $T = 300^\circ\text{K}$.

Если расстояние между испарителем и подложкой — d , то при
 $\lambda < d$ — низкий вакуум;
 $\bar{\lambda} \approx d$ — средний вакуум;
 $\bar{\lambda} \gg d$ — высокий вакуум.

При испарении в высоком вакууме атомы металла, покинув поверхность испарителя, летят независимо друг от друга по прямым линиям без взаимных столкновений и столкновений с молекулами газа, не меняя направления вплоть до конденсации на поверхности подложки или стенок сосуда. Поток испаряемых атомов или молекул, не претерпевающих на своем пути столкновений и рассеяний и движущихся вследствие этого прямолинейно, называется молекулярным потоком.

Молекулярный поток в высоком вакууме аналогичен световому потоку, и на него можно распространить закономерности геометрической оптики, применяемой при расчете освещенности:

a — интенсивность испускания частиц под углом φ относительно нормали d испускающей плоскости пропорциональна $\cos^2 \varphi$; падение молекулярного потока на плоскую поверхность также подчиняется этому закону;

b — количество атомов, падающих в единицу времени на единицу поверхности из точечного источника, обратно пропорционально квадрату расстояния от источника до поверхности.

Область конденсации паров. Конденсацией называется процесс перехода вещества из газообразной (паро-

вой) фазы в твердую или жидкую.

После соударения атомов паровой фазы с подложкой могут происходить три явления:

- а - отражение сразу после удара - его вероятность мала;
- б - адсорбция, приводящая к реиспарению через некоторое время;
- в - адсорбция, приводящая к окончательному оседанию атома.

По теории советского физика Я.И. Френкеля механизм формирования тонкой пленки состоит из трех этапов: 1 - конденсация атомов на подложке; 2 - образование многоатомных зародышей; 3 - превращение зародышей в большие агрегаты.

Атомы потока, конденсируясь на подложке, остаются на ней в течение некоторого отрезка времени, двигаясь по поверхности по-

сле двумерному газу (так называемая миграция или подвижность атомов), а затем могут вновь испаряться с подложки. Подвижность атомов зависит от их энергии и температуры подложки.

При осевом движении по поверхности адсорбированные атомы встречаются с другими атомами и образуют с ними группы из двух и более атомов (дуплеты, триплеты и т.д.), средняя продолжительность жизни которых выше, поэтому они играют роль центров конденсации.

Скорость конденсации, или удельной плотностью конденсирующегося потока (атомов, молекул) на поверхности, называется количество атомов (молекул), которое в единицу времени фактически сцепляется с поверхностью подложки:

$$J_k = \alpha V,$$

где V - число молекул, ударяющихся в единицу времени о единицу поверхности подложки;

α - коэффициент конденсации (акомодации), который тем меньше, чем выше температура подложки и ниже температура испарения вещества.

Для каждого вещества существует критическая температура подложки, выше которой атомы потока полностью отражаются от подложки и критическая плотность атомного (молекулярного) потока, ниже которой при данной температуре подложки пленка не образуется.

При большой плотности потока неиспарившиеся с поверхности подложки атомы захватываются атомами потока и, вновь оседая на подложке, образуют ядра конденсации и прочно удерживают все атомы, прибывшие позже. При увеличении плотности потока критическая температура подложки также увеличивается.

По Я.И.Френкелю эта взаимосвязь может быть представлена

где
$$\nu_{кр} = Ae^{-U_i/KT_n}$$
 $\nu_{кр}$ - критическая плотность потока;

T_n - температура подложки;

U_i - энергия связи атомов;

A - константа, зависящая от рода испаряемого вещества.

1.2. Методы получения тонких пленок заданной конфигурации

Независимо от типа используемых материалов пленочная микросхема всегда представляет собой определенную геометрическую конфигурацию элементов. Существует много методов придания пленкам заданной конфигурации, однако наиболее широкое распространение получили методы свободной маски и селективного травления (фотоли - тографический метод).

Метод свободной маски основан на экранировании подложки с помощью специальных съемных трафаретов кроме тех ее участков, на которые наносятся элементы данного слоя. В этом случае процессы нанесения пленки и придания ей конфигурации совмещены. Для того, чтобы рисунок нанесенной пленки имел четкий край и совпадал с рисунком маски, свободные маски выполняют из тонкой металлической фольги (толщиной 50-100 мкм) и плотно прижимают к подложке с помощью специальных маскодержателей. Точность рисунка маски находится в пределах $\pm(5-7)$ мкм. Точность воспроизведения конфигурации пленочных элементов того же порядка.

При использовании метода селективного травления процессы нанесения тонкой пленки и придания ей необходимой конфигурации проводятся раздельно. Вначале на всю поверхность подложки осаждают пленку нужного материала будущей микросхемы, затем на эту пленку наносят слой специального фоточувствительного лака (фоторезиста) и с помощью фототехники придают олов требуемую конфигурацию.

С незащищенных фоторезистом участков осажденную тонкую пленку удаляют химическим травлением. Главным достоинством этого метода является возможность создания сложных конфигураций слоя с минимальными размерами элементов и высокой точностью.

Свободные маски, используемые при изготовлении пленочных элементов и схем, должны удовлетворять следующим требованиям:

иметь узкие прорезы $< 0,1$ ми с точностью изготовления $\pm 0,005$;

прорезы в масках должны иметь четкие контуры без шероховатостей по кромке, которые были бы видны при 50-ти кратном увеличении;

обладать достаточной жесткостью и упругостью и быть достаточно тонкими, чтобы не образовывать при напылении теней и подутеней;

иметь минимальные неровности в плоскости маски (не более $\pm 0,05$ мм) для плотного прилегания к подложке;

выдерживать достаточно высокую температуру (до 400°C) при высоком разряде без заметных деформаций;

материал масок должен иметь низкое давление собственных паров и обладать минимальной газоотдачей.

В наибольшей степени этим требованиям удовлетворяют биметаллические маски, основой которых является медь, ее сплавы (латунь, бронза), а также специальные сорта стали.

На основу после термообработки и очистки наносят тонкий слой фоторезиста светочувствительного слоя и экспонируют ее через негатив. Та часть фоторезиста, на которую попадает свет от специального источника, изменяет свойства и приобретает способность растворяться при проявлении. В процессе проявления растворимые участки пленки удаляются, а нерастворимые остаются, образуя копию негатива, затем пленку задубливают и подвергают термообработке.

Обратную сторону основы покрывают тонким слоем лака. Электрохимическим методом наносится никель по рисунку. После снятия задублинного фоторезиста и лака маску отжигают в печи, вновь покрывают лаком, сушат и подвергают химическому травлению. Разность между размерами элементов на негативе и биметаллической маске очень велика (порядка нескольких микрон).

В последние годы значительные усилия прилагаются в направлении разработки электроннолучевых обрабатывающих устройств, в которых электронный луч фокусируется в малое пятно и используется для вырезания нужного изображения. При этом электронный луч можно перемещать по обрабатываемой поверхности. Другой способ заключается в перемещении изделия относительно неподвижного луча.

2. Технология изготовления пассивных элементов методом термического испарения в вакууме

Технологический процесс изготовления пассивных элементов микросхемы с использованием вакуумной установки типа УВН-2М-1 приведен в табл. 2.

3. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Схема технологического процесса изготовления пассивных элементов ГИС.

2. Таблица режимов изготовления пленочных элементов.

3. Эскизы плечочных элементов, их геометрические размеры и параметры.

4. Результат анализа связи технологического процесса напыления параметров тонкопленочных элементов.

Контрольные вопросы

1. Каковы вакуумные условия в процессе испарения материалов? Сравните низкий, средний и высокий вакуум.

2. Поясните процесс испарения материалов в вакууме. Объясните процессы плавления, сублимации. Как влияют температура и скорость испарения и давление паров на процесс испарения?

3. Какова связь между длиной свободного пробега молекул и степенью вакуума в камере установки?

4. Объясните теорию конденсации и формирования тонких пленок.

5. В чем состоит сущность методов свободной и контактной маски и в каких случаях они применяются?

6. Каков порядок и содержание операций при напылении тонкопленочных элементов?

7. Каковы особенности испарения материалов, использованных в работе?

8. Каковы технологические режимы напыления пленок резисторов, конденсаторов и проводников?

9. Какая взаимосвязь существует между условиями напыления и электрическими параметрами тонких пленок?

Т а б л и ц а 2

Напыление конденсаторов и резисторов на установке типа УВН-2М-1

| № п/п | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | | | |
|-------|---|--|---|-----------|---|---|---|---|----------|--------|---|---|
| | | | | | | | | | Материал | Режимы | | |
| № | 1 | Содержание операции | Оборудование, приспособления, инструмент | Материалы | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | Дополнительные указания |
| № | 1 | Загрузки и парители навески испаряемых материалов | Установка навески испаряемых материалов типа УВН-2М-1 | Пыльнет | - | - | - | - | - | - | - | Материал навески одного номера |
| 2 | 1 | Установить подложки, маски и контролировать плиту (определять) на керусель установки | Подложкодержатели, маснодержатели | | | | | | | | | Алюминий 0,5±0,005 Монокристаллический германий 0,1±0,01 Хром 0,9±0,1 Никром 0,9±0,1 Ваннадия 0,9±0,1 |
| 3 | 1 | Создать вакуум в камере | | | | | | | | | | Давление в камере должно быть от 6,65 до 10,64 Па |

| I | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----|--|-----------------|---|--|---|---|
| 4 | Произвести полную очистку подложек | Часы сигнальные | - | от 0,20 до 0,22 | от 10 до 15 | - |
| 5 | Создать вакуум в камере | - | - | - | - | Давление в камере не должно быть выше 0,00399 Па |
| 6 | Нагреть подложки и выдержать при температуре | Часы сигнальные | - | - | - | Температура подложек должна быть $250 \pm 10^\circ\text{C}$ |
| 7 | Совместить подложкодержатель с маскодержателем на позиции напыления хрома (никрома, ванадия) | - | - | - | - | - |
| 8 | Подать ток через испаритель | Секундомер | - | 120 \pm 10 220 \pm 20 270 \pm 20 | 2 \pm 0,5 2 \pm 0,5 2 \pm 0,5 | Для хрома Для никрома Для ванадия |
| 9 | Стабилизировать режим напыления | - | - | 120 \pm 10 220 \pm 20 270 \pm 20 | 2 \pm 0,5 2 \pm 0,5 2 \pm 0,5 | Для хрома Для никрома Для ванадия |
| 10 | Произвести напыление | Омметр | = | = | = | Провести до заданного значения сопротивления пленки, определению с помощью контрольной платы. При использовании напыляемых слоев в качестве подслоя сопротивление пленки должно быть от 150 до 400 Ом/кв.см |

| | 2 | 1 | 3 | 4 | 1 | 5 | 1 | 6 | 7 |
|----|--|-------------------|---|---|---|---------------|---------|---|--|
| I1 | Вывести ток через испаритель | - | - | - | - | - | - | - | - |
| I2 | Нагреть подложки | - | - | - | - | - | - | - | Температура подложки должна быть 110±10°C |
| I3 | Совместить подложкодержатель с маскодержателем на позиции напыления жидких окладов и проводников | - | - | - | - | - | - | - | Переходы I3-I7 повторить для всех подложек |
| I4 | Подать ток через испаритель влмминия | Секундомер | - | - | - | от 300 до 350 | 0,5±0,1 | - | - |
| I5 | Стабилизировать режим напыления | - | - | - | - | - | 0,5±0,1 | За состоянием навески наблюдать в зеркало | - |
| I6 | Произвести напыление | - | - | - | - | не менее 350 | - | До полного испарения навески | - |
| I7 | Вывести ток через испаритель | - | - | - | - | - | - | - | - |
| I8 | Совместить подложкодержатель с маскодержателем на позиции напыления диэлектрического слоя | - | - | - | - | - | - | Переходы I8-23 повторить для всех подложек с напыленными жидкими окладами конденсаторов | - |
| I9 | Установить на приборе толщину диэлектрического слоя | Прибор типа КИТ-1 | - | - | - | - | - | Толщина диэлектрического слоя должна быть 0,980 мкм | - |

| I | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----|---|------------|---|---------------|---|---|
| 20 | Подать ток через испаритель монокисли германия | Оекундомер | - | от 120 до 150 | За состоянием навески наблюдать в зеркало | |
| 21 | Стабилизировать режим напыления | - | - | 1±0,2 | то же | |
| 22 | Произвести напыление | - | - | не менее 150 | По достижении заданной толщины заслонка закрывается автоматически | |
| 23 | Ввести ток через испаритель | - | - | - | чекки | |
| 24 | Сместить подлождержатель с маскодержателем на позиции напыления верхних обкладок и изоставших прободников | - | - | - | Переходы 24-29 повторить для всех подложек с напыленным диэлектрическим слоем | |
| 25 | Подать ток через испаритель алюминия | Секундомер | - | от 300 до 350 | 0,5±0,02 | |
| 26 | Стабилизировать режим напыления | - | - | - | 0,5±0,02 | За состоянием навески наблюдать в зеркало |
| 27 | Произвести напыление | - | - | не менее 350 | До полного испарения навески | |
| 28 | Ввести ток через испаритель | - | - | - | - | |
| 29 | Загрузить испаритель атомарной навеской | - | - | - | Производить с помощью механизма нагрузки | |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----|---|--------------------------------|---|---|---|--|
| 30 | Охладить подложки | - | - | - | - | Температура подложек должна быть 40±5°C |
| 31 | Развакуумировать камеру | - | - | - | - | Давление в камере не должно быть выше 0,00256 Па |
| 32 | Поместить подложки о напыленных конденсаторах в тару, а тару в эксикатор о оцинкованном | Тара цеховая Эксикатор | Силкагель Слит эки. Ректиф. техн. | - | - | Производить в разномых перчатках или в перчатках, про-тертых спиртом |
| 33 | Проверить внешний вид напыленных конденсаторов | Микроскоп отвероскопический | - | - | - | Производить при 16-кратном увеличении на расстоянии не с и.2.1.5. |

Л и т е р а т у р а

1. Ч е р н я е в В.Н. Технология производства интегральных микросхем. М.: Энергия, 1977.

2. Е р с л а е в Ю.П., П о л о м а р е в М.Ф., К р ю к о в Ю.Г. Конструкции и технология микросхем. М.: Сов. радио, 1980.

Составитель Алексей Васильевич Волков

ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ПАССИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГИС МЕТОДОМ
ТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ В ВАКУУМЕ

Методические указания к лабораторной работе 32

Редактор Л.С о к о л о в а
Техн. редактор Н.К а л е м ъ к
Корректор Е. Ф и л и п п о в а

Подписано в печать 23.12.82 формат 60x84 1/16.
Бумага оберточная белая. Оперативная печать.
Усл.п.л. 0,93. Уч.-изд.л.0,9. Тираж 300 экз.
Заказ 2 Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С.П.Королева,
г.Куйбышев, ул.Молодогвардейская, 151.
Офсетный участок КуАИ, г. Куйбышев, ул.Ульяновская, 18.