

Министерство образования Республики Беларусь

Научно–производственное объединение “ИНТЕГРАЛ”

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

Филиал кафедры электронной техники и технологии

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

по дисциплинам

“ТЕХНОЛОГИЯ ИЗДЕЛИЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ”,

“СПЕЦИАЛЬНОЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ”

для студентов специальностей:

“Проектирование и производство РЭС”,

“Электронно-оптические системы и технологии”

Часть 3

Минск

“Интегралполиграф”

2007

УДК 621.3.049.77 (076.5)(075.8)

ББК 32.844.1 я 73

Л 12

Авторы: В.А. Емельянов, Л.П. Ануфриев, А.П. Достанко, С.В. Бордусов,
Л.И. Гурский, В.Л. Ланин, А.С. Турцевич, Я.А. Соловьев, Л.Я. Портнов, А.О.
Коробко, И.П. Король, А.В. Борисик, А. А. Осипов

Под редакцией академика НАН Беларуси А.П. Достанко

Лабораторный практикум по дисциплинам «Технология изделий интегральной электроники», «Специальное технологическое оборудование» для студентов специальностей «Проектирование и производство РЭС», «Электронно-оптические системы и технологии» / В.А. Емельянов [и др.] ; под ред. А.П. Достанко. Ч. 3. – Минск: Интегралполиграф, 2007. –76 с.: ISBN

Лабораторный практикум включает в себя исследования процессов формирования конфигурации элементов интегральных схем на поверхности полупроводниковых пластин проекционной литографией на установке ЭМ 584А, процессов ионно-лучевого, термовакуумного, катодного, магнетронного нанесения тонких пленок, а также герметизации интегральных схем в пластмассовые корпуса .

Предназначен для закрепления и углубления теоретических знаний, приобретения практических навыков работы с технологическим оборудованием и приборами контроля параметров кремниевых структур.

УДК 621.3.049.77 (076.5)(075.8)
ББК 32.844.1 я 73

© УП «Интегралполиграф», 2007

ISBN

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №7

ФОРМИРОВАНИЕ КОНФИГУРАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ
СХЕМ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ПЛАСТИНЫ
ПРОЕКЦИОННОЙ ЛИТОГРАФИЕЙ..... 4

Лабораторная работа №8

ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК В ВАКУУМЕ 32

Лабораторная работа №9

ГЕРМЕТИЗАЦИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ В ПЛАСТМАССОВЫЕ
КОРПУСА59

Библиотека БГУИР

Лабораторная работа № 7

ФОРМИРОВАНИЕ КОНФИГУРАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ПЛАСТИНЫ ПРОЕКЦИОННОЙ ФОТОЛИТОГРАФИЕЙ

Цель работы

Изучить методы оптической, рентгено-, электронолитографии, работу установки пошаговой проекционной печати ЭМ 584А, исследовать процесс фотолитографии на кремниевых пластинах.

1. Теоретические сведения

Быстрое развитие микроэлектроники в значительной мере определяется возможностью массового получения дискретных полупроводниковых приборов и интегральных схем (ИС) с высокой воспроизводимостью геометрических размеров и электрических параметров. Массовое производство ИС сложной конфигурации с элементами небольших размеров невозможно без фотолитографических процессов. В настоящее время при изготовлении ИС методами фотолитографии воспроизводятся элементы с размерами 1,5—2,0 мкм, а также возникает необходимость получения элементов ИС с субмикронными размерами в условиях промышленного производства.

Основные методы получения конфигурации элементов ИС, их характеристики и возможности приведены в табл. 7.1. Важное место среди этих методов занимает фотолитография. Различают оптическую фотолитографию (контактная, проекционная, голография), рентгенолитографию и электронолитографию. Оптическая фотолитография базируется на фотошаблонах, фоторезистах и фотопечати.

ФОТОРЕЗИСТЫ И ИХ ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА

Фоторезисты — сложные полимерно-мономерные вещества, в которых под действием излучения определенного спектрального состава протекают фотохимические процессы, изменяющие их растворимость в проявителях специального состава.

К фоторезистам предъявляются следующие основные требования: высокая светочувствительность и необходимая спектральная чувствительность; высокая разрешающая способность; однородность по всей поверхности, беспористость и стабильность во времени слоя фоторезиста с высокой адгезией к материалу подложки; получение резкой границы между участками, защищенными и не защищенными фоторезистом; устойчивость к химическому воздействию; отсутствие загрязнений продуктами фотохимических превращений фоторезиста; доступность материалов, относительная простота, надежность и безопасность применения.

Таблица 7.1. Методы получения конфигурации элементов ИС

На основе масок		Основанный на различии физико-химического взаимодействия	Фотолитографическая гравировка		
Свободных	Растворимых контактных		Оптическая фотолитография		
			Контактная	Проекционная	Голографическая
1	2	3	4	5	6

Фотолитографическая гравировка		Микрофрезеровка потоками частиц		
Рентгенолитография	Электронолитография	остросфокусированными		широкими
		Электронным лучом	Лазерным лучом	Ионами газов
7	8	9	10	11

Примечание: 1 — подложка; 2 — пленка; 3 — тигель с испаряемым материалом; 4 — маска; 5 — маскодержатель; 6 — пленка SiO₂; 7 — ГЭС; 8 — молекулярный поток испаряемого вещества; 9 — фоторезист; 10 — фотошаблон; 11 — ультрафиолетовое излучение; 12 — оптическая система; 13 — голограмма; 14 — лазер; 15 — электронный луч; 16 — рентгеновское излучение; 17 ■ — мишень; 18 — электронный луч; 19 — ионный луч.

Воспроизведенное пленкой фоторезиста изображение топологии схемы переносится на соответствующую подложку методом химического или ионного травления, химическим или электрохимическим осаждением.

Процесс избирательного травления материалов является завершающей стадией формирования элементов схем и оказывает решающее влияние на электрические параметры и выход годных изделий. Требования, предъявляемые к проведению этого процесса, можно сформулировать следующим образом: минимальное искажение геометрических размеров элементов ИС; полное удаление материала на участках, не защищенных фоторезистом, а также возможность последующего полного удаления продуктов реакции; возможность управления процессом; высокая селективность воздействия травителей.

Конечный результат травления определяется во многом предысторией формирования защитной маски из фоторезиста, его адгезией к подложке, геометрией элементов, клином травления. Кроме того, протекание процесса травления, геометрические размеры образующихся элементов и клин травления будут определяться типом выбранного травителя, температурой травления, типом материала (например, наличием в нем легирующих примесей) и кинетикой травления по глубине материала, смачиваемостью травителем поверхности материалов, входящих в состав структуры, толщиной пленок этих материалов и отклонением по толщине.

В последнее время наиболее перспективным считается плазменное травление, которое имеет ряд преимуществ по сравнению с химическим травлением. Плазменное травление дает, меньшую дефектность фоторезиста, обеспечивает высокую разрешающую способность процесса. При этом используются практически безвредные газы, резко сокращается число операций и время обработки, применяется универсальное оборудование для травления всех видов пленок (диэлектрики, полупроводники, металлы). Несмотря на универсальность этого метода, применение его связано с трудностью подбора соответствующей маски, так как 90% энергии падающего пучка ионов тратится на разогрев подложки и фоторезиста, который под воздействием температуры и облучения проходит дальнейшую полимеризацию, распыляется, изменяет свои размеры и прочнее связывается с поверхностью структуры, что затрудняет его удаление после обработки.

Выбор защитной маски — одна из проблем при плазменном травлении. Качество маски для плазмохимического травления (ПХТ) определяется, во-первых, стойкостью фотослоя при травлении по всей площадке кристалла и, во-вторых, уходом линейных размеров элементов. Более высокой плазмостойкостью обладают фоторезисты на основе термостатических смол: ацетонофенолформальдегидных, циклогексаноформальдегидных и других.

Дефекты, возникающие в защитном слое фоторезистов, связаны со свойствами фоторезистивной пленки: включения в пленке фоторезиста, визуально обнаруживаемые в виде «сыпи»; локальные разрывы пленки фоторезиста; неравномерность пленки фоторезиста по толщине; растворение отдельных участков защитной пленки фоторезиста в проявителе; искажение геометрических размеров элементов в процессе термообработки

фоторезиста; локальные дефекты в виде темных точек в пленке фоторезиста, возникающие в процессе задубливания из-за образования пузырьков азота, выделяющегося при деструкции молекул нафтохинондиазида; растравы пленки фоторезиста в процессе травления.

Все перечисленные дефекты возникают в процессах формирования, проявления, термообработки и травления фоторезистивного слоя и приводят к нарушению его защитных свойств.

Выражая дефектность слоя фоторезиста в количестве проколов на мм² и зная ее, можно подсчитать процент дефектных кристаллов на пластине для различных приборов при однократном повторении фотолитографического процесса.

ФОТОШАБЛОНЫ И ИХ РОЛЬ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИС

Фотошаблон — плоскопараллельная, механически прочная, прозрачная пластина, на рабочей плоскости которой сформированы непрозрачные и прозрачные для света определенной длины волны участки, образующие топологию элементов одного из слоев структуры и элементы (реперы) грубого и точного совмещения.

В связи с необходимостью обеспечения идентичности конфигураций элементов от процесса к процессу к фотошаблонам предъявляются жесткие требования. Фотошаблоны должны обладать высокой износо- и коррозионной устойчивостью, высокой разрешающей способностью, контрастностью изображения между темными и светлыми участками, минимальным количеством дефектов (царапин, проколов, островков), иметь строго рассчитанные геометрические размеры элементов и расстояний между ними с допусками в пределах долей микрона и отвечать требованиям совмещаемости различных топологических рисунков всех входящих в комплект фотошаблонов с допуском $\leq \pm 0,5$ мкм.

В качестве основного фотоматериала для получения промежуточных и эталонных фотошаблонов (первый фотошаблон с полным набором изображений структур, с которого получают первичные или рабочие копии) используются специальные высокоразрешающие фотопластины. Разрешающая способность фотослоя для пластин, применяемых при получении фотошаблонов с минимальными элементами структуры до 1 мкм, должна быть не менее 1500—2000 линий/мм, а размытость края не более 0,1—0,2 мкм. Стекланные пластины должны обладать высокой стойкостью к механическому истиранию, быть прозрачными, не должны деформироваться со временем в рабочем диапазоне температур для сохранения высокой плоскостности и в то же время обеспечивать хорошую адгезию с пленками, образующими непрозрачные участки.

Непрозрачные участки в большинстве случаев формируют из пленок металлов, сплавов, фотослоев, окислов и др. Наибольшее распространение получил хром, так как пленки из него при строгом соблюдении режимов технологического процесса образуют хорошую адгезию со стекланными

подложками, имеют достаточно высокую устойчивость на истирание, высокую оптическую плотность при толщине 0,1—0,2 мкм, получение их не связано с большими технологическими трудностями и др. Однако хромовым фотошаблонам присущи и недостатки. К ним прежде всего относятся: невозможность структуры пленки хрома и ее адгезии к стеклянной подложке при даже незначительном отклонении режимов технологического процесса; наличие проколов в пленках хрома; зависимость качества травления пленки от состояния ее структуры, которая в свою очередь зависит от чистоты поверхности подложки, давления и состава остаточных газов в вакуумной камере при нанесении, скорости нанесения хрома и температуры подложки; высокая отражательная способность, приводящая к образованию стоячих волн и нежелательных эффектов при засветке фоторезиста, снижающих разрешающую способность контактной фотолитографии; непрозрачность пленки хрома в видимой области, что затрудняет совмещаемость при визуальном контроле.

Повышение износостойкости иногда достигается формированием непрозрачных участков в углублениях стекла. В таких фотошаблонах трение поверхности ИС с фотошаблоном осуществляется через стекло. Пленки металлов и сплавов обладают одним общим недостатком — непрозрачностью в видимой области спектра экранирующих участков. Это не позволяет видеть сквозь них топологию нижележащего слоя ИС.

Другим методом устранения недостатков металлизированных фотошаблонов является применение так называемых прозрачных (полупрозрачных, цветных) фотошаблонов. Идея прозрачного фотошаблона заключается в создании покрытия, обладающего селективным светопропусканием для света волн длиной более 550 нм и задерживающего коротковолновое излучение в области ультрафиолета. Такими свойствами обладает ряд материалов и окислов, например пленки из ZnSe, Fe₂O₃ и SiO₂.

Несмотря на известность большого количества типов фотошаблонов, необходимо их совершенствовать для получения элементов субмикронных размеров, увеличения их износостойкости и упрощения процесса совмещения.

КОНТАКТНАЯ И ПРОЕКЦИОННАЯ ФОТОЛИТОГРАФИИ

Широкое распространение для формирования конфигурации ИС получила оптическая фотолитография. Предельные возможности оптической фотолитографии определяются качеством фоторезиста и объектива (объектив должен быть безабберационным и иметь разрешающую способность примерно 2000 линий/мм), дифракцией света на окнах фоторезистивной маски, осветителем, формирующим плоскопараллельный пучок света, качеством фотошаблонов, условиями производства и др.

При использовании таких материалов и устройств теоретически можно зарегистрировать для одиночной структуры окно шириной 0,16 мкм. Так как реальные структуры ИС представляют собой сложные сочетания конфигураций различных элементов, дифракционные картины которых будут частично накладываться друг на друга, может происходить снижение контрастности

оптического изображения и соответственно дополнительно уменьшаться разрешение еще на 30 — 40 %.

Из оптической фотолитографии наибольшее распространение получила **контактная фотолитография**, сущность которой заключается в следующем: фотошаблон с помощью специальной установки совмещения и экспонирования плотно прижимают к покрытой слоем фоторезиста подложке, после чего экспонируют пучком параллельных лучей света слой ИС в масштабе 1 : 1.

Контактная фотолитография позволяет получать элементы ИС с размерами до 1,5—2,0 мкм при зазоре между фотошаблоном и слоем, равным 1 мкм, на значительных рабочих площадях. Существенным недостатком является необходимость непосредственного контакта фотошаблона с фоторезистивной маской, что может приводить к повреждению как фотошаблонов, так и масок.

Одним из наиболее перспективных методов фотолитографии является **проекционная фотолитография**, преимущества которой заключаются прежде всего в отсутствии механического контакта фотошаблона со слоем фоторезиста, нанесенного на металлическую пленку. Это полностью устраняет возможность повреждения фотошаблона при совмещении, в результате срок его службы значительно увеличивается и, следовательно, увеличивается выход годных приборов.

Существуют два основных вида совмещения: отделенное от проекционного объектива (глобальное) и совмещение через проекционный объектив (локальное). Глобальное совмещение включает в себя вращательное и поступательное совмещение пластины и фотошаблона. В сканерах, работающих в режиме экспонирования полного поля изображения, вся пластина экспонируется после однократного совмещения меток на пластине и шаблоне при фиксированной фокусировке. В современных степперах проводится совмещение на каждом поле и достигается согласование по двум координатам X и Y, углу поворота, фокусу и наклону. Сравнение проекционных систем приведено в табл. 7.2.

Таблица 7.2 .Характеристики проекционных систем

Характеристика	Степпер	Сканер
Уменьшение	10:1, 5:1, 1:1	1:1
Разрешение, мкм	0,7	2
Длина волны, нм	365,405,435	Полихроматическое
Размер поля, мм	5–20	100-150мм. пластина
Глубина фокуса, мкм		5-10
Совмещение, ±мкм (3σ)	1,5 -10	0,3-1,0
Чувствительность к дефектам шаблона	0,1-1,0 Низкая	Высокая 30-60
Производительность, 100-мм, пл./час.	15-40	

Как степперы, так и сканеры классифицируют по точности совмещения, производительности и разрешению. Для сравнения этих двух видов экспозиций введен параметр предпочтительности M :

$$M = 10^6 TY/CL^2, \quad (7.1)$$

где T - производительность (пл/ч), Y - выход годных, C - стоимость в тыс. долл., L - минимально достижимая ширина линии в мкм. Выход годных определяется выражением:

$$Y = \exp(-ADN), \quad (7.2)$$

где A - площадь шаблона (см^2), D - плотность дефектов (деф./ см^2), N - число фотолитографий.

Степперы обладают лучшей точностью совмещения, однако производительность степперов ниже производительности оптических сканеров.

Процессы пошагового сдвига и совмещения оказывают основное влияние на производительность степпера. Главное преимущество степпера 10:1 заключается в уменьшении влияния дефектов шаблона до несущественных значений по сравнению с объективами с 5-кратным уменьшением. С другой стороны в системе 5:1 получаем выигрыш в существенно большем размере поля изображения.

При проекционной печати происходит накопление пыли на поверхности фотошаблона. Количество пропечатанных дефектов можно уменьшить применением пленочных покрытий (тонкая пленка полимера - пеликл), которые дефокусируют изображение частиц пыли, оказывающихся в этом случае на некотором расстоянии от поверхности фотошаблона.

Основные требования к пошаговым системам экспонирования:

- 1) хорошее совмещение отдельных кристаллов для компенсации искривления шаблонов и пластины;
- 2) точный лазерный координатный стол для перемещения после каждого совмещения кристалла, когда различимость меток падает ниже приемлемого уровня;
- 3) возможность изменения координатной сетки без снижения производительности;
- 4) малая площадь, занимаемая установкой экспонирования в чистой комнате;
- 5) производительность около 40 пластин/ч для диаметра 250 мм.

Точность совмещения - один из важнейших параметров установок совмещения. Если точность совмещения низка, то даже при высоком разрешении, не удастся добиться высокой плотности интеграции. Желательно, чтобы точность совмещения была меньше 1/5 минимальной ширины элемента ИС. Точность совмещения зависит от оптических свойств системы, плоскостности поверхностей фотошаблона и подложки, а также вида меток совмещения и способов обработки сигналов рассовмещения.

Главными причинами, вызывающими рассовмещение, являются усиливающаяся от линзы к линзе дисторсия в оптической системе, тепловое или возникающее в процессе экспонирования смещение фотошаблона относительно пластины и ошибки совмещения..

Ошибки совмещения (A) являются лишь частью общего допуска на отклонение ширины линии от требуемого значения. Допуск (T) или иначе точность совмещения одного маскирующего слоя с предшествующим вытравленным топологическим слоем представляет собой отклонение независимых переменных, которыми являются допуски фотошаблонов (M), процесса травления (E) и допуск совмещения (A):

$$T = (A^2 + M^2 + E^2)^{1/2} . \quad (7.3)$$

Изменение температуры на 1°C может вызвать рассовмещение из-за термического расширения и изменение расстояния в 1 см. между двумя точками на кремниевой пластине на 0,023 мкм. Для двух точек, находящихся на расстоянии 10 см. друг от друга это изменение в сканерах составляет 0,23 мкм. Помимо этого кремниевая пластина искривляется в ходе высокотемпературных процессов при осаждении тонких пленок. Искажения могут достигать вплоть до 0,15 мкм/см. Так как в оптических сканерах осуществляется глобальное совмещение, то контроль плоскостности пластин становится очень важным. В результате анализа всех факторов, влияющих на точность совмещения, можно сделать вывод, что сканеры удовлетворяют лишь требованиям производства приборов с минимальным размером 2-3 мкм.

Одной из разновидностей проекционной фотолитографии является голография. **Голография** — процесс фотографической регистрации изображения, при котором фиксируется волновая картина рассеянного объектом света при обеспечении возможности восстановления оптического образа объекта съемки.

Сущность метода голографии заключается в регистрации интерференционной картины, образующейся в результате наложения двух когерентных пучков света: одного опорного, идущего непосредственно от лазера и прошедшего лишь систему расширения, и второго пучка, дифрагированного на фотошаблоне.

Голография позволяет следующее: получение микроизображения рисунков ИС высокого разрешения на большом рабочем поле без использования дорогостоящей оптики; запись на одну голограмму нескольких фотошаблонов, что обеспечивает совмещение конструкторской и технологической баз; изготовление голограммы-растра, позволяющей осуществлять мультипликацию изображения без механических перемещений при постоянном шаге; построение трехмерного изображения через оптические поверхности неправильной формы, например смотровые окна и др.; получение микроизображения с большой степенью резервирования; получение размеров элементов меньше размеров тех же элементов на фотошаблонах.

Несмотря на отмеченные достоинства, этот метод не нашел пока широкого применения в промышленности из-за необходимости иметь мощные стабильные когерентные источники света, высокоразрешающие (~ 2000 линий/мм) светочувствительные материалы, короткие промежутки времени экспозиции, отсутствие вибраций во время записи голограммы и др.

РЕНТГЕНОЛИТОГРАФИЯ И ЭЛЕКТРОНОЛИТОГРАФИЯ

В связи со стремлением разработчиков ИС разместить на кристалле все большее число элементов возникает необходимость дальнейшего уменьшения их размеров. Чтобы получить столь малые размеры (< 1 мкм), необходимо выбрать подходящий литографический процесс. Одним из таких методов, который сочетает сверхвысокую разрешающую способность с быстродействием и удобством работы, является метод рентгенолитографии.

Рентгенолитография является одним из самых новых и перспективных методов фотолитографической гравировки. Она основана на экспонировании резиста мягкими рентгеновскими лучами ($\lambda \sim 1$ нм), для которых отсутствует проблема дифракции, присущая методу контактной фотолитографии. Это позволяет воспроизводить линии с шириной менее 1 мкм. Метод рентгенолитографии позволяет получить линии шириной до 0,16 мкм при более низких затратах по сравнению с другими конкурирующими методами.

Рентгеновское излучение должно быть достаточно мягким, чтобы фоторезист при экспозиции поглощал его, и достаточно жестким, чтобы его не поглощало окно установки, служащей источником излучения или подложкой фотошаблона.

Базовым механизмом экспонирования в рентгеновских лучах служит их поглощение с возбуждением электронов, которые при этом приобретают энергию падающих квантов. Поэтому резист, чувствительный к облучению электронами, должен также быть чувствителен к рентгеновским лучам.

Сущность **электронолитографии** базируется на обработке резиста электронным лучом, а не пучком света. Электронный луч обладает целым комплексом уникальных свойств, позволивших с помощью электронолитографии получать элементы ИС микронных и субмикронных размеров.

В результате взаимодействия электронного луча с резистом происходит разрыв межатомных связей, что ведет к полной перестройке молекулярных связей структуры резиста и изменению его свойств. При электронном экспонировании линий в толще резиста происходит их расширение за счет рассеяния электронов. Электроны, внедряясь в резист, двигаются по прямым линиям до определенной глубины. Далее они теряют свою энергию и за счет диффузии проникают в подложку. Подложка поглощает энергию электронов, а также рассеивает некоторое их количество обратно в пленку резиста.

Получение рисунка обработкой сканированием единичного электронного луча имеет существенные недостатки: длительное время (десятки секунд) и небольшую площадь одновременного экспонирования. Устранить частично эти недостатки позволяет метод проекционной электронолитографии, основанный на

использовании фотокатодов, несущих информацию о конфигурации элементов ИС. Экспонирование резиста осуществляется потоком электронов, испускаемых фотокатодом. Количество электронов, испускаемых каждой точкой фотокатода, соответствует конфигурации элементов ИС. Экспонированию подвергается сразу вся пластина, покрытая резистом. Проекционная электронолитография позволяет обеспечить высокую производительность, большую глубину резкости ($\pm 50\text{мкм}$), долговечность катодов, экспонировать резист одновременно на достаточно больших площадях, получать линии шириной немного меньше 1 мкм. Ограниченное применение метода связано с трудностями создания прецизионных фотокатодов с микронными и субмикронными размерами, разработки резистов, чувствительных к потоку электронов и нечувствительных к УФ излучению, и обеспечения последовательного совмещения топологии слоев ИС.

Важным материалом в электронолитографии являются электронорезисты, чувствительные к электронам и позволяющие проводить необходимую химическую или ионную обработку. Разрешающая способность электронорезистов колеблется в интервале от 250—500 линий/мм для галогеносеребряной эмульсии до ~ 1250 линий/мм для электронорезистов на основе силиконов.

ОПИСАНИЕ РАБОТЫ УСТАНОВКИ КОНТАКТНОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ ЭМ 576

Основные технические данные и характеристики установки контактной фотолитографии ЭМ 576 приведены в табл. 7.3.

Таблица 7.3. Характеристики установки контактной фотолитографии ЭМ 576

Параметр	Допуск
погрешность совмещения	не более 0,5 мкм
размер минимального элемента:	
в контакте	2 мкм
в зазоре	4 мкм
невоспроизводимость размера минимального элемента	не более 0,5 мкм

Работа установки заключается в перенесении изображений фотошаблона на полупроводниковую пластину методами контактного экспонирования без зазора и контактного экспонирования с зазором. Схема экспонирования представлена на рисунке 7.1.

Фотошаблон устанавливается по трем жестким упорам на плиту шаблондержателя, фиксируется вакуумом и ориентируется при помощи манипулятора шаблондержателя таким образом, чтобы знаки совмещения на фотошаблоне находились в поле зрения объективов микроскопа совмещения.

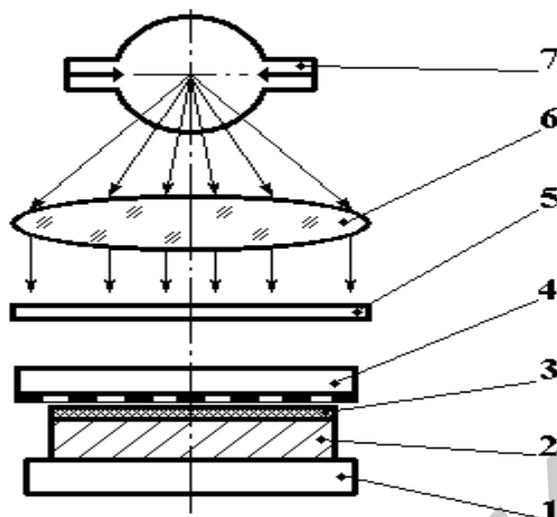


Рис. 7.1. Схема экспонирования при контактной печати:
 1 — предметный столик, 2 — подложка, 3 — слой фоторезиста, 4 — фотошаблон, 5 — затвор, 6 — конденсор, 7 — источник света

Полупроводниковая пластина из подающей кассеты по пневмодорожке попадает на столик предварительной ориентации, где с помощью специального устройства ориентируется по базовому срезу.

По окончании ориентации столик предварительной ориентации поднимается вверх до калибратора, пластина прихватывается вакуумом к калибратору, после чего калибратор вместе с пластиной перемещается в зону совмещения.

Рабочий столик вместе с калибратором и полупроводниковой пластиной поднимается вверх механизмом вертикальных перемещений до упора калибратора в фотошаблон, при этом происходит передача пластины с калибратора на рабочий столик (т.е. вакуум с калибратора отключается и подается на рабочий столик) и выравнивание полупроводниковой пластины в плоскости, параллельной рабочей плоскости фотошаблона, отстоящей от него на толщину калибратора.

Рабочий столик с полупроводниковой пластиной возвращается в исходное положение, а калибратор в зону предварительной ориентации. Затем рабочий столик с пластиной поднимается вверх и останавливается на определенном расстоянии от фотошаблона, соответствующем заранее установленному зазору.

Совмещение рисунков фотошаблона и пластины производится манипулятором совмещения, наблюдение за процессом совмещения производится микроскопом. Объективы принадлежат микроскопу с разведенным полем зрения, так что правый глаз видит точку на правой стороне шаблона и пластины, а левый — точку слева.

В этом совмещенном положении пластина приводится в соприкосновение с шаблоном и проводится еще одна проверка на точность совмещения. По окончании совмещения производится экспонирование от осветителя с лампой ДРШ-350, при этом микроскоп автоматически отводится.

Контроль за временем экспонирования осуществляется дозатором световой энергии. После окончания экспонирования столик с пластиной опускается в исходное положение, пластина струей воздуха сдувается со столика на пневмодорожку и далее в приемную кассету.

Назначение кнопок на блоке управления представлено в табл. 7.4.

Таблица 7.4. Описание кнопок и сигнальных ламп блока управления

Название	Назначение
Сигнальные лампы «ИСХ.», «КАЛИБРОВКА»	индикация положения рабочего столика
Кнопка «ПОБЪЕМ» и сигнальная лампа	подъем блока экспонирования и контроля совмещения
Сигнальные лампы «СОВМЕЩЕН.», «ЭКСПОНИР.»	индикация положения рабочего столика при совмещении и экспонировании.
Программные переключатели «СОВМЕЩЕН.» и «ЭКСПОНИР.»	набор величины зазора при совмещении и экспонировании
Кнопка «ЦИКЛ КАЛИБРОВКИ».	запуск рабочего цикла с калибровки
Кнопка «ЦИКЛ С ОРИЕНТАЦИЙ».	запуск рабочего цикла с ориентации
Кнопки «КОНТАКТН.», «ЗАЗОРН.»	экспонирование в контакте или на зазоре
Кнопка «ПЕРВИЧН.»	экспонирование без совмещения
Кнопка «ПЛАСТИНА» и сигнальная лампа	расфиксация пластины на рабочем столике
Кнопки режима «РУЧН.» и «П.АВТ.».	переход на ручной или автоматический режим
Программный переключатель «ЭКСПОЗИЦИЯ»	установка световой дозы при экспонировании
Кнопка «ПУСК»	пуск полуавтоматического режима
Кнопка «ВОЗВРАТ КАССЕТ»	перемещение кассет в исходное положение
Клавиша «ЗАЗОР»	возврат рабочего столика на зазор для совмещения из положения экспонирования
Клавиша «КОНТАКТ»	перемещение рабочего столика в положение экспонирования
Клавиша «ЭКСПОНИР.»	экспонирование пластины
Кнопка «ПРЕРЫВ ЦИКЛА» и сигнальная лампа	прерыв цикла (остановка)
Кнопка «СБРОС»	возврат всех механизмов в исходное состояние

ОПИСАНИЕ РАБОТЫ УСТАНОВКИ ДВУХСТОРОННЕЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ «Karl Suss MA- 25»

Работа установки заключается в перенесении изображений с двух фотошаблонов на полупроводниковую пластину с двух сторон методами контактного экспонирования без зазора (только нижний фотошаблон) и контактного экспонирования с зазором (только верхний фотошаблон).

Совмещение двух фотошаблонов. Верхний фотошаблон устанавливается на рамку, нижний фотошаблон устанавливается по двум жестким упорам на плиту шаблондержателя, фиксируется вакуумом и ориентируется при помощи манипулятора шаблондержателя, чтобы знаки совмещения на двух фотошаблонах находились в поле зрения объективов микроскопа совмещения. Подвижная платформа захватывает верхний фотошаблон с рамки и перемещается в зону совмещения. Платформа с верхним фотошаблоном в зоне совмещения опускается до нижнего фотошаблона и останавливается на определенном расстоянии от него, соответствующем заранее установленному зазору. Совмещение рисунков двух фотошаблонов производится манипулятором совмещения (который перемещает только нижний фотошаблон относительно верхнего), наблюдение за процессом совмещения производится микроскопом. Объективы принадлежат микроскопу с разведенным полем зрения, так что правый глаз видит точку на правой стороне двух шаблонов, а левый – точку слева. По окончании совмещения платформа с верхним фотошаблоном возвращается в исходное положение. По окончании совмещения фотошаблонов микроскоп отводится вручную.

Совмещение пластины с фотошаблоном. Полупроводниковая пластина из подающей кассеты по пневмодорожке попадает на столик предварительной ориентации, где с помощью специального устройства ориентируется по базовому срезу. По окончании ориентации столик поднимается вверх до вакуумной платформы, которая подъезжает по окончании цикла ориентации пластины, пластина прихватывается вакуумом к платформе, после чего вакуумная платформа вместе с пластиной перемещается в зону совмещения. Вакуумная платформа с пластиной в зоне совмещения опускается до нижнего фотошаблона и останавливается на определенном расстоянии от него, соответствующем заранее установленному зазору. Столик предварительной ориентации возвращается в исходное положение и на него подается следующая пластина. Совмещение рисунков нижнего фотошаблона и пластины производится джойстиком совмещения, наблюдение за процессом совмещения производится микроскопом. Объективы принадлежат микроскопу с разведенным полем зрения, так что правый глаз видит точку на правой стороне шаблона и пластины, а левый – точку слева. В этом совмещенном положении пластина приводится в соприкосновение с шаблоном и проводится еще одна проверка на точность совмещения. По окончании совмещения вакуумная платформа оставляет пластину в совмещенном состоянии на нижнем фотошаблоне, опускается платформа с верхним фотошаблоном и производится одновременное экспонирование пластины и двух фотошаблонов от осветителя

при этом микроскоп отводится вручную. Контроль за временем экспонирования осуществляется дозатором световой энергии. После окончания экспонирования платформа с верхним фотошаблоном возвращается в исходное положение и вакуумная лапа захватывает пластину и несет ее на пневмодорожку и далее в приемную кассету.

Назначение кнопок панели управления приведено в табл. 7.5.

Таблица 7.5. Описание кнопок панели управления.

Название	Назначение
STEP	задание шаговой работы программы
CENTER	центровка
YES, NO	подтверждение или отказ команды
LAMP TEST	проверка освещённости
UN LOAD	выгрузка фотошаблонов
U.EXP.T	задание времени экспонирования верхнего фотошаблона
L.EXP.T	задание времени экспонирования нижнего фотошаблона
MASK CHANGE	замена фотошаблонов
CASS STEP	шаг кассеты
# CONT	количество контактов
RESET	сброс программы
START	запуск программы в работу

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОЦЕССА ПРОЕКЦИОННОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ

Схема установки мультипликации и совмещения изображена на рис. 7.2. При проекционной фотолиитографии, как и при контактной, необходимо точно совмещать фотошаблон с подложкой, для чего существуют специальные метки совмещения.

Метки совмещения имеют форму в виде канавок травления (рис. 7.3.), на которых рассеивается падающий световой пучок и создается их оптический контраст по отношению к остальному полю. Профиль канавки травления зависит от ориентации подложки.

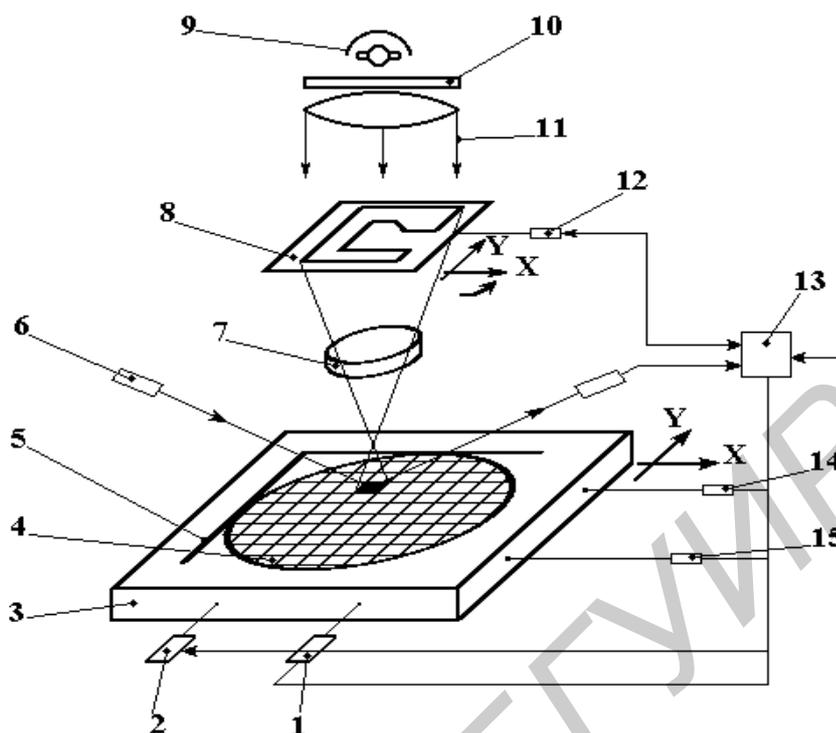


Рис. 7. 2. Схема установки мультипликации с совмещением:
 1, 15 – приводы стола по осям x и y ; 2, 14 – лазерные интерферометры по осям x и y ; 3 – координатный стол; 4, 5 – п/п подложка и упоры для ее ориентации; 6 – система фокусировки; 7 – проекционный объектив; 8 – столик с промежуточным фотошаблоном; 9 – источник света; 10 – затвор; 11 – актиничное излучение; 12 – устройство совмещения меток промежуточного фотошаблона и подложки; 13 – управляющая ЭВМ

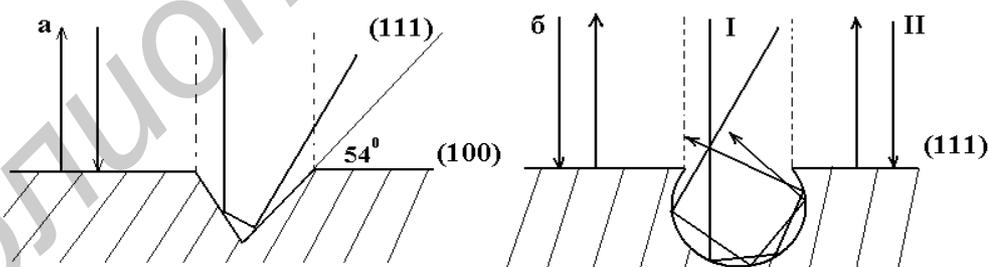


Рис. 7.3. Профиль знаков совмещения

Процесс совмещения выполняется автоматически с помощью фотоэлектрического микроскопа, который регистрирует сигнал, поступающий от метки совмещения на подложке, и сравнивает его с сигналом, поступающим от такой же метки на фотошаблоне. Для совмещения меток координатная система перемещает подложку и фотошаблон, а также поворачивает фотошаблон относительно оси проекции.

В частности, для работы на установках ЭМ – 584 А используют фотошаблоны или так называемые металлизированные промежуточные оригиналы (МПО), на которых топологический рисунок увеличен в 10 раз по сравнению с его истинными размерами.

Уменьшенное изображение рисунка, получающееся на пластине в результате экспонирования называют модулем. Модуль может состоять из одного или нескольких кристаллов в зависимости от размеров той или иной микросхемы. Кристаллы друг от друга отделяются дорожками скрайбирования.

На дорожках, отделяющих друг от друга модули, располагаются метки контроля шага мультипликации, по которым определяют такие важные характеристики МПО и установки как разворот и немасштаб. На рис. 7. 4. представлены метки контроля шага мультипликации.

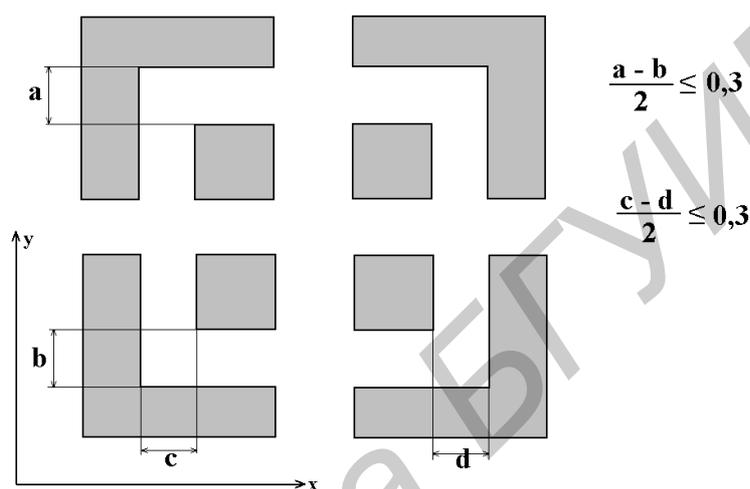


Рис. 7. 4. Метка контроля шага мультипликации

Разворот и немасштаб определяются смещением квадратов шаговой метки мультипликации относительно рамки шаговой метки мультипликации по осям X или Y.

Процесс совмещения начинается с «захвата» меток системой наблюдения фотоэлектрического микроскопа, при котором их изображение на подложке попадает в окна фотошаблона и возникает разностный сигнал в каналах совмещения. При этом система совмещения предварительно совмещает фотошаблон и подложку по координатам в соответствии с метками, и затем, выполняя угловую коррекцию, поворачивает фотошаблон относительно меток. В случае такого совмещения ошибка не превышает 0,1 – 0,2 мкм, уменьшается влияние изменения температуры и геометрических искажений подложки на точность передаваемого изображения.

Помодульный перенос изображения обеспечивает снижение плотности дефектов, вносимых в формируемую на слое фоторезиста маску, поскольку дефекты значительно меньше элементов изображения и не переносятся с МПО на слой фоторезиста.

После завершения операции совмещения выполняется автофокусировка, а затем экспонирование. Эти три операции составляют единичный цикл мультипликации (размножения) модуля. Весь процесс мультипликации состоит из пропечатки модуля по всему полю подложки с помощью координатного стола, обеспечивающего пошаговое перемещение по осям X и Y.

Современная проекционная фотолитография использует оптические системы, работающие практически на пределе возможностей в условиях дифракционных ограничений. Это налагает очень жесткие требования на качество исполнения и конструкцию проекционной оптики.

Качество проекционного объектива характеризует такой параметр, как числовая апертура:

$$NA = n \sin \alpha, \quad (7.4)$$

где n – коэффициент преломления среды в пространстве изображения, для воздуха $n = 1$;

α – половина максимального угла расходимости лучей, проходящих в точку изображения на оптической оси проекционной системы.

Для устранения возникающих при светопередаче хроматических aberrаций используют ультрафиолетовое излучение, создаваемое мощными ртутными лампами высокого давления, которое дополнительно фильтруется специальными монохроматическими фильтрами и избирательно отражающими зеркалами. Конденсор выполнен из микролинз, что позволяет увеличить равномерность освещения по всему полю. Зеркало имеет селективно отражающее покрытие, пропускающее тепловые лучи, но эффективно отражающее ультрафиолетовые. Это позволяет защитить оптику от мощного потока теплоты, излучаемого ртутной лампой. Разрешающая способность (минимальный передаваемый размер элемента) определяется длиной волны излучения и числовой апертурой проекционного объектива по соотношению:

$$L_{\min} = \lambda / 2NA. \quad (7.5)$$

Важным параметром проекционной системы является глубина резкости σ определяемая как:

$$\sigma = \lambda / [(2NA)]^2. \quad (7.6)$$

Чем выше глубина резкости, тем меньше влияют искривления пластин и неравномерность толщины слоя фоторезиста на качество передаваемого рисунка, поэтому точность фокусировки должна быть более $\pm 0,2$ мкм. Для повышения разрешающей способности необходимо уменьшить длину волны излучения, что однако затруднительно из-за возрастания коэффициента поглощения оптических стекол. Обычно в проекционных системах используют монохроматическое излучение с длиной волны 400-440 нм.

ОПИСАНИЕ РАБОТЫ УСТАНОВКИ ПРОЕКЦИОННОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ ТИПА MPA 500 Fab

Оптическая схема установки проекционной фотолитографии 1:1 типа MPA 500 Fab показана на рис. 7. 5.

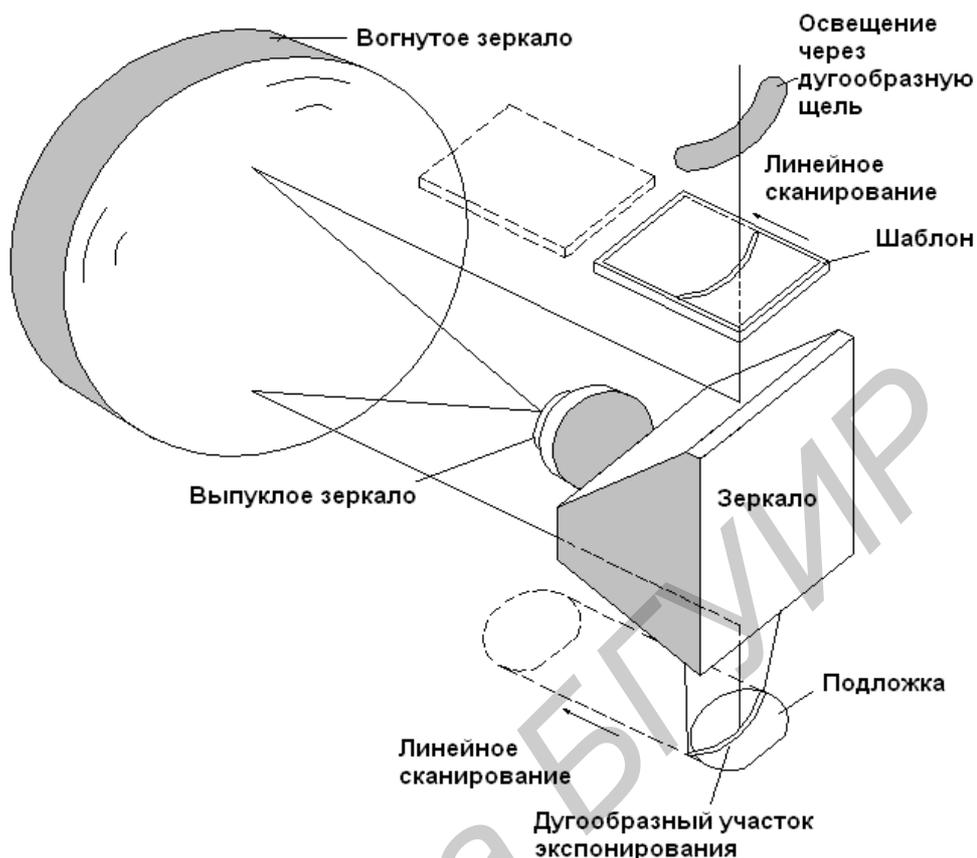


Рис. 7.5. Оптическая схема сканера 1:1 типа MPA 500 Fab

В таких установках фотошаблон и подложка размещаются отдельно. За счет размещения в самой середине сферического зеркала, рисунок фотошаблона, вырезанный щелью размером 1,0–2,0 мм в форме дуги окружности, проецируется в масштабе 1:1 на поверхность подложки. Последовательно перемещая фотошаблон относительно подложки в одном направлении, осуществляют экспонирование всей поверхности подложки. При освещении ртутной лампой высокого давления с УФ излучением получают на практике разрешение порядка 2мкм.

В сканере MPA-500 Fab предусмотрено автоматическое и ручное совмещение пластин. При автоматическом совмещении лазерный луч (He-Ne газовый лазер, длина волны- 633 нм), проходя через объектив сканирует метки совмещения на фотошаблоне и пластине. Отраженные от фотошаблона и пластины лучи идут в обратном направлении через объектив к детектору, где преобразуются в сигналы местоположения фотошаблона и пластины. Эти сигналы поступают на вычисление позиционной разницы между фотошаблоном и пластиной. Для того, чтобы совмещение осуществлялось автоматически необходимо:

а) Отрегулировать (настроить) интервал линз объектива, местоположение по «Х» и «У» координатного столика для фотошаблона пока в правом и левом полях зрения микроскопа не установятся метки на фотошаблоне, как показано на рис. 7.6.

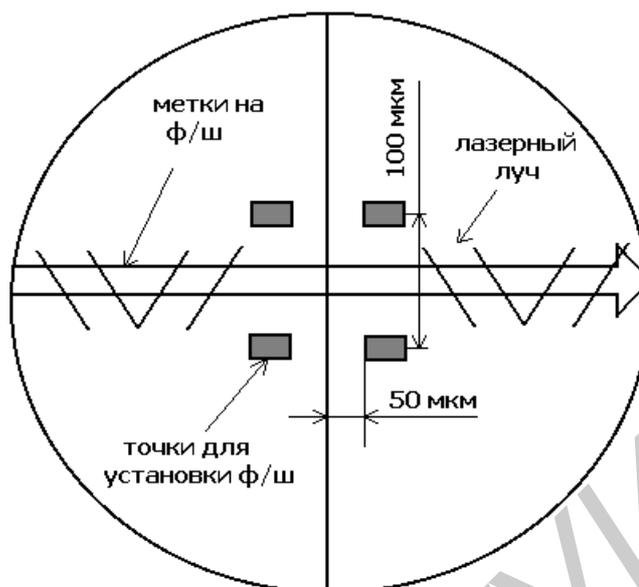


Рис.7.6. Пример установки меток на фотошаблоне

б) Правильная установка осуществляется, когда лазерный луч посылается между двумя верхними и нижними точками для установки фотошаблона, расположенными в обоих полях зрения микроскопа, как показано на рисунке 7.6. Если сигналы обнаруживаются правильно, то необходимо установить дисковые переключатели «MASK POSITION» на значение, отображаемое на индикаторе «MASK POSITION».

Метки совмещения на фотошаблоне называются метками типа «М», на пластине –метками типа «W». Совмещение меток фотошаблона и пластины показано на рис. 7.7.

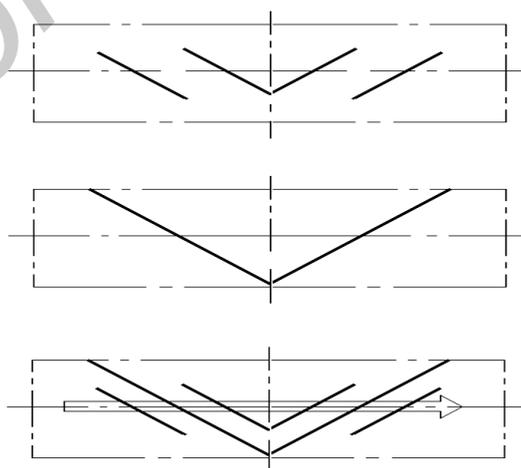


Рис. 7.7. Метки совмещения на пластине

Поскольку диаметр лазерного пучка в установке MPA-500 Fab составляет около 8 мкм, то для меток на фотошаблоне и на пластине предпочтительны более тонкие линии. В режиме автосовмещения возможно визуальное наблюдение.

Ручное совмещение осуществляется по осям «Х» и «У» посредством джойстика. Разворот пластины возможен в пределах 3°. Предусмотрены три скорости совмещения: «Малая/Средняя/Высокая». Угол наклона джойстика обеспечивает различную скорость. Метки для ручного совмещения на фотошаблоне и пластине представляют собой прямоугольники, которые при совмещении вписываются друг в друга.

ОПИСАНИЕ РАБОТЫ УСТАНОВКИ ПРОЕКЦИОННОЙ ПЕЧАТИ ЭМ 5084 АМ

Установка обеспечивает:

- 1) размер минимального элемента—0,8 мкм;
- 2) глубину резкости минимального элемента не менее 1,5 мкм;
- 3) разрешающую способность объектива не более 0,6-0,7 мкм;
- 4) погрешность совмещения $\pm 0,1$ мкм;
- 5) невозпроизводимость ширины линий периодической структуры не более $\pm 0,1$ мкм;
- 6) автоматическую фокусировку и выравнивание пластин;
- 7) максимальный размер квадрата изображения не менее 16x16 мм.

В основе работы установки проекционной печати лежит способ последовательного переноса (мультипликации) уменьшенного изображения промежуточного фотооригинала (ПФО) на полупроводниковую пластину, предварительно сфокусированную, сориентированную по специальным знакам совмещения, нанесенным на ее рабочую поверхность. При этом установка последовательно работает в следующих автоматических режимах:

- 1) загрузка п/п пластин из подающей кассеты на столик предварительной ориентации, ориентация по базовому срезу и загрузка ее на столик каретки координатного стола;
- 2) корректировка координат плоскости фокусировки после загрузки первой пластины из обрабатываемой партии;
- 3) фокусировка и глобальное выравнивание пластины;
- 4) контроль разворота и ориентация ПФО относительно пластины;
- 5) контроль масштаба и разворота ПФО относительно пластины, в случае необходимости ориентация и масштабирование ПФО относительно пластины, если масштаб изменялся, то корректировка координат плоскости фокусировки;
- 6) измерение координат положения знаков совмещения на п/п пластине относительно реперных знаков ПФО (совмещение);
- 7) мультипликация изображения ПФО на п/п пластину в выбранном режиме выравнивания(глобальное, позонное, покадровое) ;
- 8) разгрузка обработанной п/п пластины в приемную кассету;

П/п пластина автономным блоком загрузки автоматически транспортируется из подающей кассеты на позицию предварительной ориентации, центрируется и ориентируется по базовому срезу, передается загрузчиком на индуктор координатной системы (обеспечивает цикл измерений в горизонтальной плоскости). Все операции в блоке загрузки производятся

манипуляторами с вакуумными прихватками за нерабочую поверхность п/п пластины.

Фокусировка и выравнивание пластины происходит с помощью автономной фотоэлектрической системы. Система фокусировки (обеспечивает цикл измерений в вертикальной плоскости) удерживает рабочую поверхность пластины в плоскости фокусировки, заданной относительно базовой плоскости установки. Связь между плоскостью фокусировки и поверхностью наилучшего изображения ПФО осуществляется с помощью системы анализа изображения (САИ): маска САИ перемещается в позицию совмещения топологии рисунка маски САИ и топологии соответствующего репера ПФО, маска перемещается по высоте с целью определения плоскости фокуса.

Установка использует принцип угловой ориентации ПФО относительно топологии загруженной п/п пластины. При мультипликации пластины нулевого слоя (отсутствии знаков совмещения) ПФО ориентируется относительно топологии знаков совмещения нанесенных на поверхность маски САИ. Положение ПФО относительно маски САИ вычисляется путем последовательного измерения положения этих двух объектов относительно осей координатной системы установки. Для определения положения ПФО используется информация двух разнесенных каналов датчика совмещения о координатах одного и того же знака совмещения, нанесенного на поверхности пластины (маски САИ – для нулевого слоя). Для определения положения пластины используется информация одного из каналов датчика совмещения о координатах двух знаков совмещения, расположенных на одной оси X и максимально разнесенных друг от друга. После выбора знаков совмещения, используемых при ориентации оператор должен указать их координаты относительно центра пластины. Один из этих знаков будет использоваться для определения положения ПФО. После определения величины углового разворота ПФО последний разворачивается и устанавливается вдоль топологии пластины. Для точной ориентации осей ПФО и пластины используется возможность разворота каретки координатного стола. После ориентации ПФО производится операция контроля масштаба изображения ПФО относительно топологии пластины. Операция масштабирования считается законченной, если вычисления значений масштаба и разворота ПФО меньше установленных пользователем допусков. Далее происходит совмещение. В режиме совмещения возможно покадровое выравнивание и фокусировка на каждом экспонируемом кадре. После окончания мультипликации отключается фокусировка, координатный стол перемещается в позицию разгрузки, пластина убирается вакуумным захватом в приемную кассету.

Состав системы анализа изображения (САИ) установки приведен в табл.

7.6.

Таблица 7.6. Состав системы анализа изображения

Часть системы	Функциональное назначение	Место расположения
ПФО	Содержит специальные знаки (репера САИ), топология репера согласована с анализирующей маской датчика САИ	блок ПШ
датчик САИ	Анализатор изображения, формирует электрический сигнал, несущий информацию о взаимном положении в пространстве (X, Y, Z) маски, датчика САИ и изображения репера САИ.	Каретка координатной системы
Проекционная система	Включает в себя осветитель с системой дозирования энергии, проекционный объектив и предназначена для построения изображения репера САИ в плоскости фокусировки проекционного объектива.	ОМУ- опτικο-механическое устройство.
Координатная система	Обеспечивает цикл измерений в горизонтальной плоскости.	ОМУ, блок управления.
Система фокусировки	Обеспечивает цикл измерений в вертикальной плоскости	ОМУ, блок управления.

Для работы САИ в режимах определения координат изображения реперов САИ рабочий ПФО должен содержать специальные знаки, конфигурация которых совпадает с конфигурацией репера САИ. Места расположения реперов САИ на рабочем ПФО заранее определены и зависят от желания и возможностей пользователя:

- 1) по одному реперу (обязательное присутствие) САИ контролирует положение плоскости фокусировки проекционного объектива по Z;
- 2) по двум реперам, лежащим на одной прямой, установка может осуществить ориентацию ПФО, проверку масштаба изображения на рабочей длине волны проекционной системы, проверку соответствия показаний системы совмещения относительно САИ;
- 3) по трем реперам, не лежащим на одной прямой, САИ может контролировать положение плоскости фокусировки объектива в пространстве (фокусировка и угловые заклоны);
- 4) специальные тестовые шаблоны с большим количеством реперов могут применяться при анализе качества проекционного объектива.

САИ может работать в следующих режимах:

- 1) контроль стабильности лампы проекционной системы (измерение уровня освещенности на краю поля в течении заданного времени);
- 2) контроль неравномерности освещенности (измерение уровня освещенности в заданных точках рабочего поля);
- 3) контроль работы системы дозирования энергии (контроль дозы энергии по заданному количеству экспозиций);
- 4) контроль положения ПФО (измерение положения заданных реперов САИ в плоскости X и Y);
- 5) контроль положения плоскости фокусировки проекционного объектива (измерение положения заданных реперов САИ в пространстве относительно исходной плоскости Z);
- 6) контроль параметров проекционного объектива (измерение положения заданных реперов САИ в пространстве относительно плоскости фокусировки).

Состав системы совмещения приведен в табл. 7.7.

Таблица 7.7. Состав системы совмещения

Узел системы	Функциональное назначение в составе системы
Датчик совмещения	Формирует оптические сигналы, несущие информацию о взаимном положении знаков совмещения на рабочей поверхности и реперных знаков ПФО. Преобразует оптические сигналы в электрические аналоговые сигналы.
Объектив проекционный	Формирует совместно с датчиком совмещения изображение знака совмещения в плоскости ПФО.
Блок промежуточного шаблона (ПШ)	Содержит ПФО с реперными знаками. Производит ориентацию ПФО относительно координатной системы с помощью знаков совмещения, нанесенных на рабочую поверхность маски САИ, расположенной на координатном столе.
Стол координатный	Содержит рабочую поверхность со знаками совмещения. Производит перемещение рабочей поверхности, отсчет текущего положения рабочей поверхности. На рабочем столе располагается маска САИ, которая выполнена из высокостабильного кварцевого стекла. Нанесенные на маску САИ знаки совмещения используются для контроля масштаба координатной системы, а так же в качестве опорного углового эталона для проверки перпендикулярности осей координатной системы.
ЭВМ	Задаёт перемещение координатного стола, управляет режимами работы системы совмещения, рассчитывает координатную сетку поверхности п/п пластины.

Совмещение осуществляется путем:

- измерения координат знаков, ориентации на рабочей поверхности (п/п пластины или маски САИ), ориентации и масштабирования ПФО;
- измерения координат знаков совмещения на рабочей поверхности п/п пластины относительно реперных знаков ПФО и привязке их к интерферометрической системе координатного стола.

ОПИСАНИЕ РАБОТЫ УСТАНОВКИ ЭМ - 584 А

В основе работы установки проекционной печати лежит способ последовательного переноса (мультипликации) уменьшенного изображения промежуточного фотооригинала (ПФО) на полупроводниковую пластину, предварительно сориентированную по специальным знакам совмещения, нанесенным на ее рабочую поверхность. При этом установка последовательно работает в следующих автоматических режимах:

- 1) загрузка пластин из подающей кассеты на столик предварительной ориентации и загрузка ее на стол индуктора координатного стола;
- 2) точная ориентация п/п пластины;
- 3) измерение координат положения знаков совмещения на п/п пластине;
- 4) мультипликация изображения ПФО на п/п пластину;
- 5) разгрузка обработанной п/п пластины в приемную кассету.

Пластина автоматически транспортируется из кассеты по пневмодорожке на позицию предварительной ориентации, ориентируется по базовому срезу и сдвигается толкателем загрузчика на рабочий столик индуктора, где ее положение фиксируется вакуумом.

На рабочей поверхности п/п пластины нанесены знаки совмещения. Точная ориентация пластины производится разворотом стола, на котором она зафиксирована, по результатам измерения знаков совмещения 1 и 2 (рис. № 5 .Расположение знаков совмещения на пластине). При этом знаки совмещения 1 и 2 должны быть максимально удалены от центра пластины.

После точной ориентации производится операция совмещения, которая представляет собой измерение координат положения знаков совмещения п/п пластины. На основании результатов измерения ЭВМ рассчитывает коррекцию координат положения экспонируемых модулей и вводит эти коррекции при последующей операции мультипликации.

Операция совмещения по выбору оператора может производиться в нескольких вариантах:

- 1) совмещение по двум знакам, когда расчет коррекции производится по результатам измерения положения знаков совмещения 1 и 2;
- 2) совмещение по четырем знакам, когда коррекции производятся по результатам измерения положения знаков совмещения 3, 4, 5 и 6;
- 3) совмещение по девяти знакам, коррекции производятся по результатам измерения положения 9 знаков, которыми поверхность п/п пластины разбивается на четыре квадрата. В каждом квадрате рассчитываются коррекции по двум координатам, при мультипликации обеспечивается их независимый

ввод, при этом 7 может не лежать на общей оси знаков 3 и 4, а знак 8 может не лежать на общей оси знаков совмещения 5 и 6;

4) совмещение по восьми знакам, при этом виде совмещения на пластине может отсутствовать центральный знак совмещения 9, расчет и ввод коррекции производится так же, как и в предыдущем варианте, т.к. ЭВМ вычисляет положение отсутствующего знака совмещения 9.

Режим мультипликации заключается в последовательном экспонировании всей рабочей поверхности пластины (при этом учитывается круговая форма пластины), заданная доза облучения фоторезиста в каждом модуле выдерживается системой экспонирования. После окончания мультипликации запрещается работа системы фокусировки, координатный стол перемещается в позицию разгрузки, п/п пластина сдувается с рабочего столика в приемную кассету и начинается цикл обработки следующей пластины. Команды управляющей программы приведены в табл. 7.8, 7.9.

Таблица 7.8. Команды формирования и выполнения задания

FZ	формировать задание
RM	редактирование размера модуля
RS	редактирование режима совмещения
RP	редактирование прохода
EX	экспонирование пластины
KZ	контроль знаков совмещения на пластине
IZ	измерить знаки совмещения на пластине
RE	подобрать резкость и время экспозиции
PZ	печатать задание
DS	вывод модели пластины на экран
MO	ввести параметры установки

Таблица 7.9. Команды специального режима

СУ/К	кассеты в исходное состояние
СУ/R	аварийная разгрузка пластины
СУ/Z	аварийная загрузка пластины
СУ/X	установка признака повторного совмещения
СУ/T	разгрузка пластины на стол предварительной ориентации
СУ/P	включить/выключить вывод модели на экран
СУ/E	включить/выключить вывод центров знаков совмещения
СУ/G	выход на наладочный пульт
СУ/D	включить/выключить устройство печати
СУ/S	приостановить программу
СУ/Q	продолжить работу программы
СУ/C	выход в системный монитор
СУ/B	выход на начало диалога (#)
СУ/H	остановить программу

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с теоретическими основами процесса фотолитографии.
2. Ознакомиться с принципом работы установки мультипликации ЭМ-584А.
3. Под руководством преподавателя загрузить программу, для чего:
 - вставить дискету, закрыть дисковод;
 - нажать на клавиатуре кнопки «Б» «ВК»;
 - «МХ» 0, 1(2)- на дисководе должна загореться лампочка, на экране появится точка;
 - «О» «ВК»;
 - «R» пробел I 584 A «ВК»;
 - «Ввести параметры установки?»: N «ВК».
3. Сбазировать стол, для чего:
 - нажать кнопку «база» на корпусе установки, выставить стол;
 - нажать кнопку «фиксация» на корпусе установки, немного подвигать стол (должна замигать лампочка «привод»), еще раз нажать кнопку «фиксация»;
 - стол сбазирован, если на корпусе установки горят две лампочки: «привод» и «база».
4. Установить МПО, для чего:
 - нажать на клавиатуре «СУ/G» IF – выезжает шаблонодержатель;
 - Положить МПО « Знак » до упора, включить вакуум;
 - нажать на клавиатуре «СУ/G» IF- промежуток должен заехать в установку, закрыть защитную крышку.
5. Проконтролировать базирования МПО, для чего:
 - ввести программу « метки» для любого изделия, для данной установки;
 - в программе задать размер модуля 6000x6000, используя команду «RM»;
 - спутник с фоторезистом запечатать метками без совмещения;
 - проявить, проконтролировать под микроскопом полученное на пластине изображение, которое называется «сетка»(конец предыдущего знака должен совпадать с началом следующего).
6. Рассчитать программу для запечатки знаков в соответствии с индивидуальным заданием (таблица № 10), для чего:
 - ввести команду «СУ/В», на экране появиться знак (#) ;
 - ввести в программу размер модуля, используя команду «RM»;
 - вывести на экран схему расположения модулей, используя команду «DS»;
 - расположить метки на пластине как показано на рис. 7.8;
 - рассчитать координаты знаков совмещения относительно первого знака (таблица 7.10);
 - указать в программе номера модулей (в которых расположены знаки совмещения), используя команду «RP», запомнить номер модуля, в котором расположен первый знак;
 - задать режим экспонирования без совмещения, используя команду «EX»;

- когда будет печататься модуль с первым знаком совмещения, прервать выполнение программы с помощью команды «CY/P», в результате чего на экране появится точная координата первого знака;
- разгрузить пластину, используя команду «CY/R»;
- запечатать вторую пластину, не прерывая программы;
- внести в программу координаты 9-ти знаков, используя команду «RS»;
- прочесть знаки на пластине, используя команду «KZ» (допуск на чтение знаков-0,5 мкм).

7. Оформить отчет по лабораторной работе.

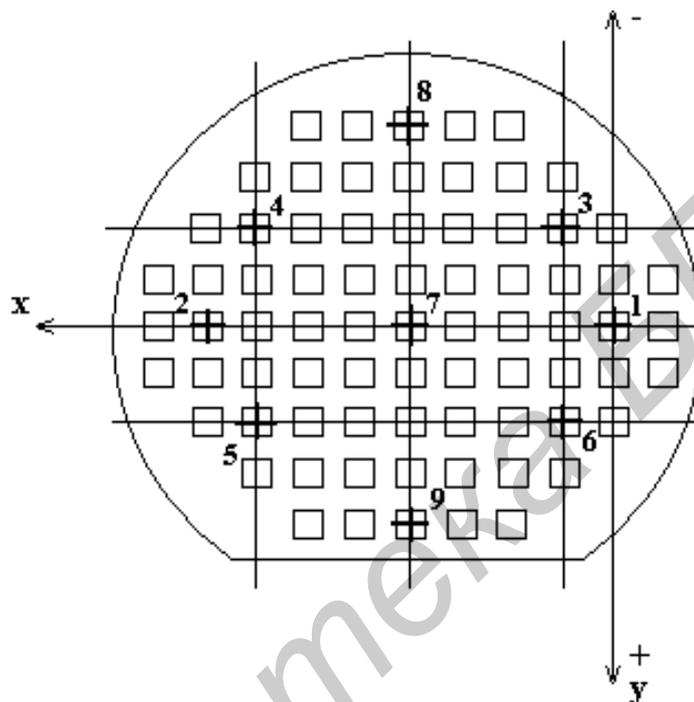


Рис. 7.8. Схема размещения меток на пластине

Таблица № 7.10. Алгоритм расчета координат знаков совмещения

Координаты по оси X	координаты по оси Y
$X1 =$	$Y1 =$
$X2 = 8 \times A$, где A –размер модуля по X	$Y2 = 0$
$X3 = 1 \times A$	$Y3 = -2 \times B$, где B - размер модуля поY
$X4 = 7 \times A$	$Y4 = -2 \times B$
$X5 = 7 \times A$	$Y5 = 2 \times B$
$X6 = 1 \times A$	$Y6 = 2 \times B$
$X7 = 4 \times A$	$Y7 = 0$
$X8 = 4 \times A$	$Y8 = -4 \times B$
$X9 = 4 \times A$	$Y9 = 4 \times B$

Таблица 7.11. Варианты индивидуального задания.

Вариант задания	Размер модуля
1	7500 x 7200
2	7800 x 9600

3	9000 x 11000
4	7800 x 6720
5	6680 x 8940

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Оптическая схема установки проекционной печати ЭМ 584-А.
3. Результаты контроля базирования МПО.
4. Результаты выполнения индивидуального задания (заполненный бланк программы для фотолитографии «Знаки»).
5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют типы фотолитографических устройств?
2. Каковы основные отличия проекционной и контактной фотолитографии?
3. Что такое параметр предпочтительности?
4. Требования к пошаговым системам экспонирования.
5. От чего зависит точность совмещения?
6. Какую функцию выполняют метки контроля шага мультипликации?
7. Какие функции выполняет система анализа изображения в установке проекционной печати ЭМ 5084 АМ?
8. Какие варианты совмещения может реализовать установка проекционной печати ЭМ 584 А?

Литература

1. Технология СБИС: в 2-х кн. Кн. 1. Пер. с англ./Под ред. С.Зи.—М.: Мир, 1986.—404 с.
2. Достанко А.П. Технология интегральных схем. — Минск: Выш. школа., 1982.—206 с.
3. Моро У. Микролитография: в 2-х кн. Кн. 1. Пер. с англ./Под ред. Р.Х. Тимерова. —М.:Мир, 1990.—606 с.
4. Родионов Ю.А., Литография в производстве интегральных схем.—Минск: Дизайн ПРО, 1998—95 с.
5. Техническое описание и инструкция по эксплуатации на уст. ЭМ 576 А, Я 2М2.252.161 ТО.
6. Техническое описание и инструкция по эксплуатации на уст. ЭМ 584 А, I/142.046.ТО.
7. Техническое описание и инструкция по эксплуатации на уст. ЭМ 5084 АМ, БРАС. 442174. 009 ТО.
8. SUSS MA 25 – SERVICE MANUAL.

Лабораторная работа №8

ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК В ВАКУУМЕ

Цель работы

Изучить процессы ионно-лучевого, термовакuumного, катодного, магнетронного нанесения тонких пленок, ознакомиться с технологическим оборудованием и исследовать процесс нанесения пленок металла.

1. Теоретические сведения

Метод получения пленок путем испарения вещества в вакууме и последующей его конденсации на подложке, который сокращенно называют **методом термовакuumного испарения (ТВИ)**, является одним из универсальных методов получения тонких пленок. Он пригоден для получения проводниковых, резистивных, диэлектрических и полупроводниковых пленок испарением неорганических веществ. Процесс происходит в условиях глубокого вакуума, чем обусловлена высокая чистота наносимых пленок. Возможность контроля и управления как процессом, так и вакуумными условиями обеспечивает воспроизводимость пленок при большой скорости их нанесения. Сущность метода ТВИ поясняет рис. 8.1.

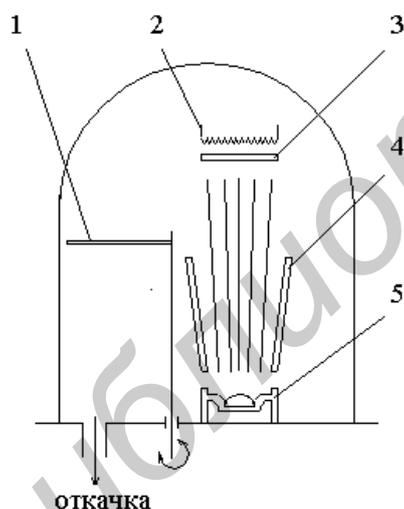


Рис. 8.1. Схема установки для получения пленок методом ТВИ: 1—заслонка; 2—нагреватель; 3—подложка; 4—ограничивающая труба; 5—испаритель

Для получения пленок используется вакуумная камера, откачиваемая до давления $P_{\text{ост}}$. Вещество в испарителе 5 нагревается до высокой температуры, при которой происходит интенсивное его испарение. Частицы в виде атомов или молекул в вакуумной камере свободно распространяются от испарителя, образуя атомарный (молекулярный) поток пара. Достигая подложки 3, частицы конденсируются на ней. Свойства получаемой пленки зависят от температуры подложки; обычно подложка подогревается с помощью специального нагревателя 2. Для перекрытия потока пара на подложку служит заслонка 1; чтобы исключить запыление стенок камеры, используется ограничивающая труба 4. Параметрами процесса являются температура испарителя и определяемая ею плотность потока

пара, скорость напыления, зависящая как от температуры испарителя, так и от взаимного расположения испарителя и подложки, температура подложки, давление остаточных газов в камере. Распределение испаряемых частиц по скорости и по энергии описывается функцией Максвелла–Больцмана. При этом средняя скорость частиц равна:

$$V_{\text{cp}} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}, \quad (8.1)$$

а средняя кинетическая энергия частиц:

$$E_{\text{к.ср}} = \frac{3}{2}kT; \quad (8.2)$$

где k – постоянная Больцмана, T – температура вещества в испарителе, m – масса частицы.

Вакуумные условия в рабочей камере должны обеспечивать формирование чистых пленок испаряемого вещества. Для этого достаточно, в первом приближении, чтобы в пролетном пространстве испаритель–подложка отсутствовало столкновение атомов (молекул) вещества с молекулами остаточного газа. Средняя длина свободного пробега частиц зависит от давления следующим образом:

$$\lambda_{\text{ср}} = \frac{kT}{p_{\text{r}} \pi d_{\text{ч}}^2 \sqrt{2}}, \quad (8.3)$$

где p_{r} – давление газа, $d_{\text{ч}}$ – эффективный диаметр частиц, примерно равный сумме радиусов двух сталкивающихся частиц, T – температура газа, равная температуре стенок камеры.

Вероятность для молекулы вещества преодолеть расстояние r_0 от испарителя до подложки без столкновения с молекулами воздуха:

$$P = \exp\left(-\frac{r_0}{\lambda_{\text{ср}}}\right). \quad (8.4)$$

Реальный размер r_0 в установках вакуумного напыления не превышает 30 см. Исходя из требования отсутствия столкновений в пролетном пространстве, что соответствует величине $P \geq 0,95$, достаточно, чтобы давление в камере было $p_{\text{r}} \approx 10^{-3}$ Па.

Следует учесть также постоянную бомбардировку подложки и растущей пленки молекулами остаточных газов. Остаточные газы вступают в химическое взаимодействие с атомами вещества или адсорбируются, ухудшая адгезию, образуя поры в пленке.

Для подавления мешающего действия остаточных газов следует уменьшить давление в камере и увеличивать скорость напыления. Важными при выборе степени разряжения в рабочей камере являются экономические соображения. Для производственных условий приемлемым является вакуум $1,3 \cdot 10^{-4} \dots 7 \cdot 10^{-5}$ Па, который достигается относительно простыми откачными

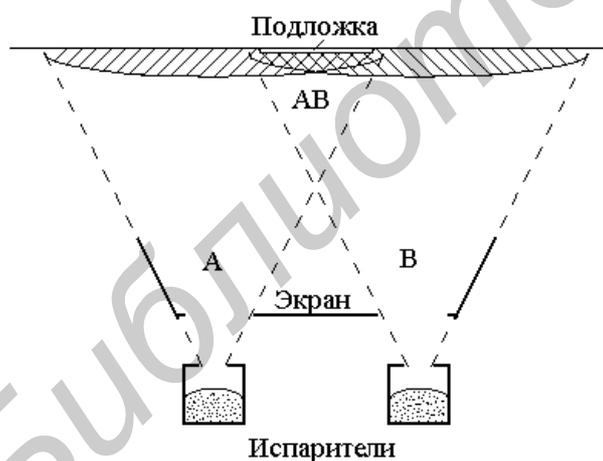
средствами; время откачки составляет 1...1,5 часа. Переход к более высокому вакууму потребует недопустимого увеличения длительности откачки или использования более производительных, но и значительно более дорогих средств откачки.

Кроме остаточной атмосферы загрязнения возможны за счет молекул летучих соединений, имеющих в вакуумной камере. Газ выделяется при прогреве деталей внутрикамерного устройства, при прогреве испаряемого материала; летучие углеводороды поступают из вакуумных насосов. Для уменьшения их влияния используется прогрев и обезгаживание внутрикамерного устройства и испарителей, предварительное испарение вещества; насосы и камера снабжаются ловушками паров масел, поглотителями активных газов.

Стабилизация вакуумных условий при напылении является необходимым фактором достижения воспроизводимых свойств пленок.

Разновидности метода ТВИ. Классификацию вариантов метода ТВИ можно провести по способу получения потока пара и по способу нагрева испаряемого вещества.

Наиболее распространенным способом создания потока пара является непосредственное испарение вещества. Скорость испарения однокомпонентных веществ определяется температурой испарителя и легко регулируется. Однако непосредственное испарение сложных веществ затруднено, поскольку происходит фракционирование их в паровой фазе в зависимости от летучести компонентов. Для сохранения в пленке



стехиометрического состава, т. е. соответствующего исходному для твердой фазы соотношению компонентов в сплаве, смеси, химическом соединении, используют специальные способы испарения. Одним из таких способов является испарение из двух отдельных источников (рис. 8.2).

Рис. 8.2. Схема испарения из двух источников

Каждый испаритель загружается чистым веществом, плотность потока пара задается его температурой. У подложки соотношение компонентов в паровой фазе определяется температурой испарителей $T_{и1}$ и $T_{и2}$ и расстоянием до соответствующего испарителя. Условия конденсации зависят от температуры подложки $T_{п}$. Управляя этими тремя температурами, удается получить пленки с необходимым соотношением компонентов (по этой

причине другое название способа – «метод трех температур»). Для исключения взаимного загрязнения испарители должны быть разделены экраном. Испарение двух материалов при различных температурах с последующей их совместной конденсацией на одной и той же подложке позволяет получать также пленки, отдельные составляющие которых в массивном образце не образуют ни соединений, ни твердых растворов.

Испарением из двух источников получают:

а) пленки сплавов, например, пленки пермаллоя $Ni + Fe$ при испарении никеля и железа, проводниковые пленки $Al + 1\% Si$ и сверхпроводящие пленки $Nb + Fe$;

б) пленки многофазные, например, керметные резистивные пленки $Cr + SiO$ путем испарения хрома и монооксида кремния;

в) пленки химических соединений, например, полупроводниковые пленки стехиометрического состава CdS , $CdSe$, $GaAs$.

Другим способом получения пленок стехиометрического состава является «взрывное» испарение, называемое также дискретным испарением или испарением «вспышкой». Сущность его состоит в том, что испаряемое вещество подается на перегретый испаритель малыми порциями и мгновенно испаряется. Температура испарителя превышает температуру испарения наименее летучего компонента. Мгновенное испарение и непрерывная подача малых порций практически исключают фракционирование вещества, испаренный поток пара имеет однородный состав, совпадающий с составом исходного вещества.

Метод применим для испарения сплавов, смесей и химических соединений. Так получают резистивные пленки из сплавов нихром ($80\% Ni + 20\% Cr$), МЛТ, РС (например, РС – 3710), из смеси металл – диэлектрик (керметные пленки $Cr + SiO$), пермаллоевые пленки $Ni + Fe$, пленки для термопар хромель и алюмель, полупроводниковые эпитаксиальные пленки $GaAs$, GaP , $InAs$.

Исходное вещество для обеспечения непрерывного испарения малых количеств может подаваться на испаритель в виде порошка или проволоки.

Окислы, нитриды и другие соединения металлов могут быть получены реактивным испарением. Для этого испарение металла проводят в камере с относительно высоким (до 1 Па) давлением активного газа – кислорода, азота и др.

Для повышения адгезии пленок иногда используют термоионное напыление. Сущность этого варианта метода ТВИ сводится к тому, что поток пара в промежутке испаритель – подложка ионизируется, ионизированные частицы ускоряются в электрическом поле и с более высокой, чем при термическом испарении, энергией попадают на подложку.

В зависимости от способа нагрева вещества различают испарение с резистивным нагревом, с индукционным нагревом, с нагревом электронной бомбардировкой. При этом нагрев может быть прямой, непосредственно испаряемого вещества, и косвенный, за счет теплопередачи от нагреваемого

испарителя. Прямой нагрев исключает или уменьшает нагрев испарителя или его деталей, что снижает загрязнение напыляемой пленки. В технологии полупроводниковых приборов наибольшее применение нашли испарение с резистивным и с электронно-лучевым нагревом.

Метод ионного распыления (ИР) является, так же как и метод ТВИ, универсальным для получения тонких пленок различных материалов. Ионное распыление вещества происходит при бомбардировке его поверхности ионами инертного газа, распыленные частицы оседают на подложке, образуя пленку. Бомбардировке (облучению) ионами подвергается мишень, изготовленная из распыляемого вещества.

Широкому применению метода в микроэлектронике способствовал ряд преимуществ его по сравнению с методом ТВИ, а именно:

- а) возможность получения пленок тугоплавких металлов;
- б) отсутствие фракционирования при распылении и возможность получать пленки сплавов, смесей и соединений с сохранением стехиометрического состава;
- в) большая емкость источника и возможность напыления в установках непрерывного действия;
- г) равномерность пленки по толщине.

Распыление является практически безинерционным процессом и прекращается при отключении напряжения питания. Процесс нанесения пленок методом ИР легко контролируется и управляется, что способствует его автоматизации. Определенные недостатки метода – малая скорость напыления, повышенная загрязненность пленок – преодолеваются в специальных распылительных системах.

Для распыления идеальным является использование ионных пучков, необходимая энергия ионов обеспечивается в ионном источнике. Процесс при этом происходит в глубоком вакууме при отсутствии электрических и магнитных полей в области между мишенью и подложкой; возможно облучение мишени под малыми углами к ее поверхности. При этом достигается и высокая чистота пленок, и необходимая скорость напыления. Однако для получения тонких пленок такое распыление почти не используется из-за сложности оборудования.

На практике для получения пленок находят применение различные распылительные системы, в которых источником ионов является плазма газового разряда. В связи с этим метод часто называют ионно-плазменным распылением (ИПР).

Механизм ионного распыления. Взаимодействие бомбардирующего иона с твердым телом (мишенью) наиболее убедительно описывается моделью атомных столкновений по типу упругих соударений бильярдных шаров. Основные положения такой теории распыления хорошо согласуются с опытом.

Ион, обладающий определенной кинетической энергией, сталкиваясь с атомом кристаллической решетки твердого тела, передает ему импульс энергии. При энергиях, превышающих энергию связи атомов, происходит

смещение атома из узла кристаллической решетки, при столкновении с соседним атомом он передает тому свой импульс и т. д. В результате ряда последовательных столкновений импульс передается поверхностному атому; если получаемая этим атомом энергия выше теплоты сублимации $E_{\text{суб}}$, то он имеет возможность быть выбитым в паровую фазу, т. е. происходит его распыление. Рассмотренный упрощенный механизм относится к парному соударению ион-атом, на самом деле происходит более сложное взаимодействие ионов с кристаллической решеткой твердого тела.

Распыление происходит, если энергия иона превышает некоторую пороговую энергию, равную:

$$E_{\text{пор}} = \frac{1 + (M_2 / M_1)^2}{M_2 / M_1} E_{\text{суб}}, \quad (8.5)$$

где M_1 – масса иона; M_2 – масса атома мишени.

Величина пороговой энергии при распылении ионами аргона различается для металлов в несколько раз: для алюминия $E_{\text{пор}} = 13$ эВ, для меди 12...17 эВ, для вольфрама 35 эВ, для золота 20 эВ, для тантала 25 эВ.

Количественной мерой процесса распыления является коэффициент распыления S , представляющий собой среднестатистическое число атомов, выбитых с поверхности мишени одним ионом. Коэффициент распыления зависит от энергии иона, его массы, угла падения, материала мишени, температуры и состояния поверхности.

Типичная зависимость коэффициента распыления от энергии иона показана на рис. 8.3. Можно выделить четыре области на графике: I – распыление практически отсутствует, что соответствует энергии ниже пороговой; II – происходит слабое распыление, область пригодна для режима очистки поверхностей от адсорбированных газовых примесей; III – коэффициент распыления достаточен для использования

в режиме получения тонких пленок; IV – коэффициент распыления, достигнув максимума, уменьшается вследствие внедрения ионов в мишень, область может быть использована для ионной имплантации.

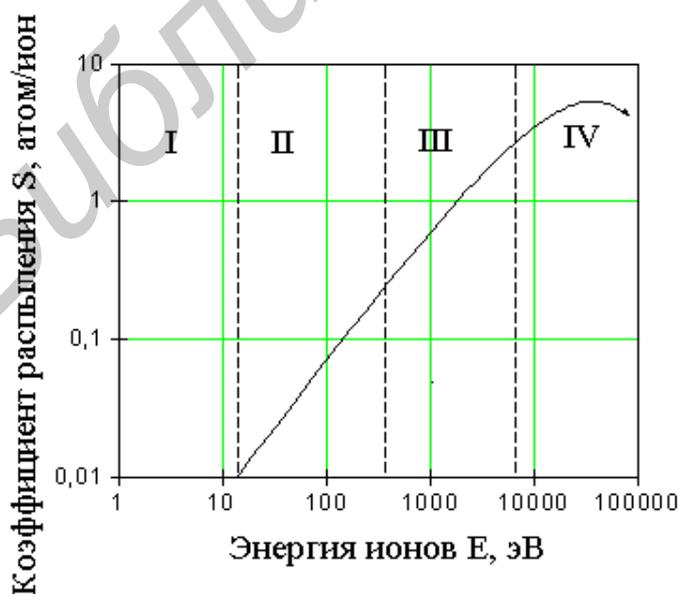


Рис. 8.3. Зависимость коэффициента распыления меди от энергии атомов аргона

Экспериментально установлено, что коэффициенты распыления материалов изменяются значительно сильнее в зависимости от природы ионов, чем от природы атомов мишени. В технологии полупроводниковых приборов в качестве рабочего газа распылительных камер используется почти исключительно аргон как наиболее доступный инертный газ, атомная масса Ar достаточно велика ($M_1 = 40$).

Коэффициент распыления имеет периодическую зависимость от атомного номера элемента мишени, объясняется она периодичностью изменения энергии связи атомов. В целом, однако, величина S мало отличается для различных материалов, изменение имеет место в пределах одного порядка. Для сравнения, скорость термического испарения может отличаться на несколько порядков.

Коэффициент распыления выражен в виде следующей зависимости:

$$S = K \frac{M_1 M_2}{\lambda(E)(M_1 + M_2)} E \cdot f(\alpha), \quad (8.6)$$

где K – коэффициент, учитывающий физическое состояние мишени, $\lambda(E)$ – длина свободного пробега иона в материале мишени как функция энергии E , $f(\alpha)$ – функция угла падения иона.

Процесс распыления идет путем последовательного удаления (травления) поверхностных слоев. Поскольку диффузией атомов из глубины мишени можно пренебречь, распыление многокомпонентных материалов будет происходить без фракционирования составляющих, несмотря на некоторые различия в коэффициенте распыления компонентов.

Измерения показывают, что обычно более 95% энергии ионов выделяется в мишени в виде тепла, поэтому распыление является с энергетической точки зрения весьма неэффективным процессом. Тем не менее, энергия распыленных атомов существенно выше, чем энергия испаренных частиц, что определяет особые условия образования пленки.

Повышенная энергия осаждаемых частиц и бомбардировка растущей пленки электронами приводит к увеличению скорости зародышеобразования пленки. Увеличивается адгезия пленки и ее плотность, но одновременно возрастают и внутренние механические напряжения. В пленке возможны радиационные повреждения, подложка дополнительно нагревается бомбардирующими частицами. Из-за того, что процесс ведется в среднем вакууме, происходит загрязнение пленки остаточными газами, а также продуктами распыления стенок камеры; атомы аргона внедряются в пленку, вызывая пористость ее. Применение обычных для термовакuumного напыления методов контроля толщины пленки с помощью свидетелей и кварцевого датчика для ИР, в среде высокопроводящей плазмы, исключено. Зато при стабилизированном процессе распыления толщина пленки может контролироваться простейшим способом – по времени напыления.

Разновидности метода ИР. Катодное распыление осуществляется в диодной распылительной системе на постоянном токе. Такая система наиболее проста по конструкции и в управлении процессом, позволяет получать однородные по толщине пленки на подложках большой площади.

Схематическая конструкция рабочей камеры приведена на рис. 8.4.

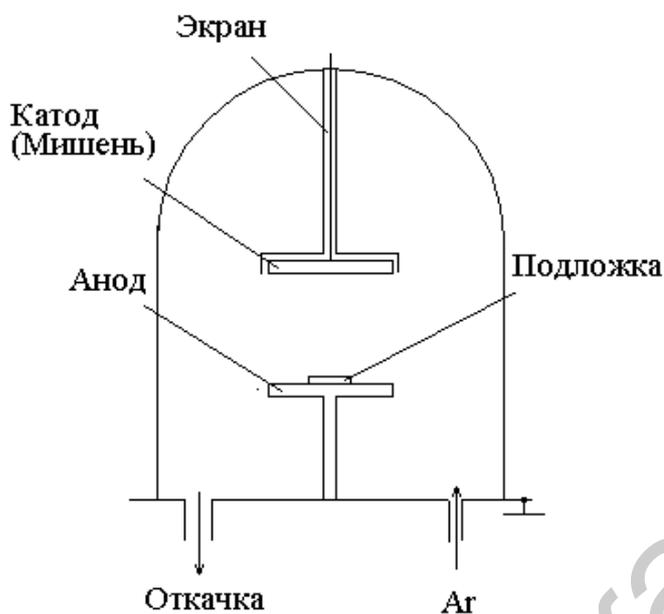


Рис. 8.4. Система катодного распыления

Диодная система состоит из заземленного анода и катода (мишени), выполненного из распыляемого материала. Катод находится под высоким отрицательным потенциалом $U_M = (3...5)$ кВ. Для ограничения распространения разряда, исключения распыления катода с обратной стороны имеется заземленный экран. Подложка располагается на аноде. Мишень охлаждается, температура подложки устанавливается исходя из требований к наносимой пленке.

Размеры распылительной системы выбираются исходя из требований к скорости напыления и однородности пленки по толщине. С увеличением расстояния мишень – подложка скорость напыления уменьшается ввиду того, что часть распыленных частиц, сталкиваясь с частицами газа в камере, возвращается назад на мишень. С уменьшением этого расстояния возрастает однородность пленки; однородность возрастает и с увеличением соотношения размеров мишени и подложки. Обычно расстояние мишень – подложка составляет 30...50 мм, размер мишени в 2...3 раза превышает размер подложки. Камера после откачки воздуха до высокого вакуума $10^{-5}...10^{-4}$ Па заполняется аргоном и постоянной его прокачкой в ней устанавливается давление $p_{Ar} = 2...7$ Па. Выбор такого рабочего давления газа основывается на следующем.

С увеличением давления p_{Ar} возрастает плотность плазмы и, следовательно, плотность тока, что должно привести к росту скорости напыления. Однако при этом за счет возвращения распыленных атомов на мишень уменьшается эффективный коэффициент распыления, и это приводит к уменьшению скорости напыления. К тому же, с увеличением p_{Ar} возрастает

пористость пленки и ее загрязненность. С другой стороны, при низких давлениях p_{Ag} , хотя коэффициент распыления и возрастает, количество ионов Ag^+ мало, что в итоге не приводит к росту скорости напыления. К тому же разряд становится неустойчивым.

Скорость напыления составляет 0,05...0,5 нм/с, что на 1...3 порядка меньше, чем при методе ТВИ. Контролируемыми параметрами процесса напыления являются напряжение на мишени U_M и ток мишени I_M или давление p_{Ag} .

Несмотря на низкую скорость напыления, катодное распыление находит, в силу своих достоинств, применение для получения пленок из тугоплавких металлов, прежде всего из тантала, а также из сплавов. Толщина таких пленок невелика (до 100...300 нм) и они используются чаще как резистивные. Важно, что такие пленки оказываются однородными по свойствам даже на подложках значительных размеров.

В описанной выше системе катодного распыления имеет место заметное загрязнение получаемых пленок. Источником загрязнения являются остаточные газы в камере, примеси в рабочем газе, пары масел, проникающие из насосов, десорбированные из стенок камеры и из мишени газы. Находясь в зоне разряда, все они подвергаются ионизации и потому имеют повышенную активность. В результате реакции на мишени, на подложке и в пролетном пространстве осаждаемая пленка загрязняется. Бомбардировка поверхности подложки электронами катализирует эти реакции. Необходимо также учитывать и распыление конструкционных материалов камеры. Газовые примеси и распыленные частицы посторонних материалов внедряются в растущую пленку.

Поэтому для получения более чистых пленок были предложены три варианта метода катодного распыления – геттерное распыление, распыление со смещением и распыление на переменном токе.

Геттерное распыление основано на свойстве наносимой пленки активно поглощать примесные газы. В рабочей камере распыляющий газ, прежде чем попасть в зону, где расположена подложка, проходит над поверхностью со свежесаженым материалом пленки (рис. 8.5).

Вначале происходит распыление мишени при закрытой заслонке, геттерирующая (поглощающая) пленка осаждается на охлаждаемые стенки камеры. По прошествии некоторого времени, достаточного для очистки газов внутри камеры и для очистки мишени от поверхностных загрязнений, открывается заслонка и производится напыление на нее в чистых условиях. Этим методом получают пленки тантала,

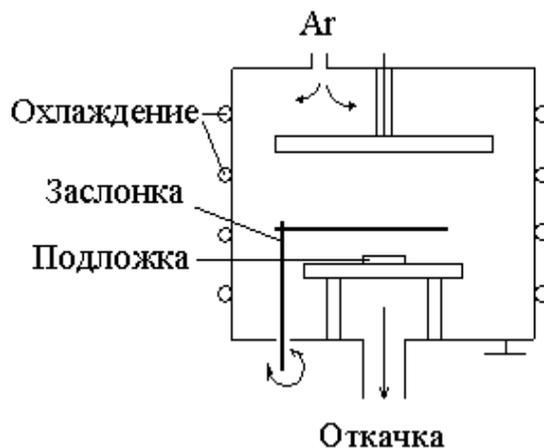


Рис. 8.5. Камера с геттерным распылением

ниобия и молибдена с удельным сопротивлением, приближающимся к сопротивлению массивных образцов.

Распыление со смещением предполагает бомбардировку растущей пленки ионами рабочего газа. При относительно небольшой энергии этих ионов они не вызывают распыления атомов основного вещества, но распыляют атомы слабо связанных с пленкой примесей. Например, весьма эффективно удаляются атомы кислорода при напылении молибдена и тантала.

При распылении со смещением подложка (напыляемая пленка) находится под отрицательным по отношению к аноду потенциалом $-U_{см}$. Это приводит к бомбардировке пленки ионами Ag^+ , энергия этих ионов определяется величиной $U_{см}$. Смещение влияет не только на количество примесей в пленке, но и на внутренние механические напряжения, на структуру, на магнитные свойства.

Распыление на переменном токе отличается от распыления со смещением тем, что отрицательное напряжение прикладывается к подложке не постоянно, а периодически, с частотой 50 Гц.

В полупериод, когда на мишени отрицательное напряжение, происходит ее распыление и осаждается пленка; в другой полупериод отрицательное напряжение, но значительно меньшей амплитуды оказывается на аноде (на подложке), пленка очищается от адсорбированных примесей.

Распыление в **трехэлектродной системе** позволяет увеличить скорость напыления и получать более чистые пленки. Схема трехэлектродной распылительной камеры приведена на рис. 8.6. Распылительная система содержит три электрода: катод, анод и мишень. Накаливаемый проволочный катод является источником ионизирующих электронов, катод заземлен. Плоский анод находится под потенциалом $U_A = (50...150)$ В. В пространстве между анодом и катодом возникает дуговой разряд, поддерживаемый термоэлектронной эмиссией. Разряд может существовать при достаточно низких давлениях, вплоть до $10^{-1}...10^{-2}$ Па. Третий электрод – мишень находится под потенциалом $U_M = - (1,5...3)$ кВ. Положительные ионы инертного газа электрическим полем вытягиваются из плазмы дугового разряда, бомбардируют мишень и распыляют ее. Распыленные частицы осаждаются на подложку, установленную на подложкодержателе. Для исключения загрязнения катода материалом мишени и предотвращения его распыления катод защищен от прямого попадания частиц.

Плотность плазмы зависит от эмиссионной способности термокатода, напряжения анод –

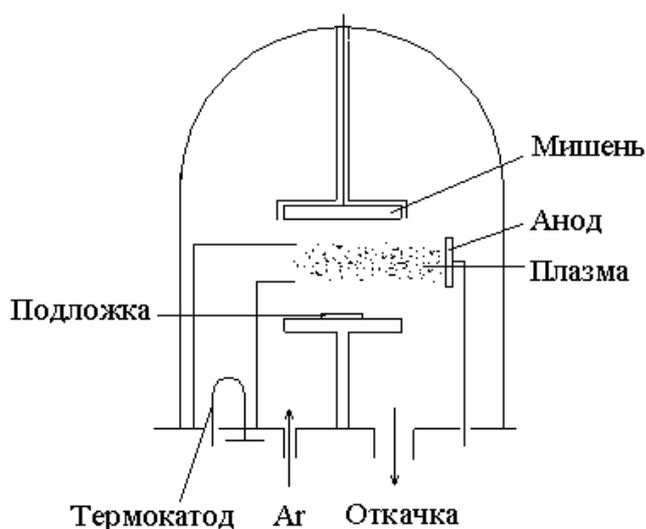


Рис. 8.6. Распыление в триодной системе

катод, давления рабочего газа. Для увеличения ионизирующей способности электронов в распылительную камеру часто вводят продольное, в направлении катод–анод, магнитное поле. При наличии продольного поля электроны начинают двигаться по спиральным траекториям вокруг силовых линий магнитного поля, что существенно повышает вероятность ионизации, плотность плазмы возрастает. В то же время на тяжелые ионы магнитное поле практически не действует.

Контролируемыми параметрами процесса напыления являются: давление p_{Ag} , ток накала катода, ток анода, ток мишени, напряжение на мишени U_M . Скорость напыления достигает 1...2 нм/с. Скорость напыления, а также равномерность пленки по толщине зависят от конструкции конкретной распылительной камеры.

Магнетронное распыление, являясь разновидностью ионного распыления, занимает среди методов получения пленок особое место благодаря своим исключительным возможностям. Имея все достоинства ионного распыления, магнетронное распыление свободно от ряда недостатков ИР. Прежде всего, существенно возросла скорость нанесения пленок – она приближается к значениям, характерным для термовакuumного испарения. Уменьшены радиационные повреждения осаждаемых пленок, снижен перегрев подложки; удается получить пленки с пониженным уровнем загрязнений. Магнетронная распылительная система (МРС) является более эффективной по сравнению с другими системами ИР.

Магнетронное распыление предложено сравнительно недавно, и хотя еще далеко не реализованы все его возможности, уже нашло широкое применение в технологии тонких пленок. В МРС возможно осуществлять распыление со смещением, реактивное и высокочастотное распыление. В микроэлектронном производстве с помощью магнетронного распыления получают пленки металлов и сплавов для проводников и контактных площадок ИМС, резистивные, диэлектрические и полупроводниковые пленки, магнитные и сверхпроводящие пленки.

Сущность магнетронного распыления. Основными элементами МРС являются катод-мишень, анод и магнитная система; подложки располагаются вблизи мишени параллельно ей. Анод обычно заземлен или имеет небольшой положительный потенциал, на мишень от источника питания подается отрицательное напряжение. В пространстве анод – катод создаются неоднородные электрическое и магнитное поля. Лавинный пробой разрядного промежутка начинается ионизацией газа свободными электронами. Однако в скрещенных электрическом и магнитном полях электроны двигаются по сложным циклоидальным траекториям неоднократно сталкиваясь с атомами газа; эффективность ионизации при этом велика. Тлеющий разряд в МРС возникает поэтому при меньшем напряжении анод – катод, чем в обычной диодной системе; по этой причине МРС считается низковольтной системой.

Эмитированные с катода под действием ионной бомбардировки электроны поддерживают и развивают разряд. Магнитным полем электроны как бы

прижаты к мишени, а электрическое поле тянет их к аноду. При столкновении с атомами газа электроны ионизируют их, постепенно теряя энергию, полученную в электрическом поле, и только после этого попадают на анод. Таким образом, большая часть энергии электронов уходит на ионизацию, благодаря чему увеличивается плотность плазмы, возрастает ионный ток на мишень, увеличивается скорость распыления и, следовательно, скорость напыления.

Важно, что на подложку, как и на анод, попадают низкоэнергетические электроны, которые не могут вызвать значительного перегрева ее. Это позволяет увеличивать скорость напыления без опасности разрушения подложки или недопустимого перегрева пленки.

Воздействие магнитного поля эквивалентно увеличению давления. Следовательно, при наличии магнитного поля достаточной величины процесс распыления с высокой скоростью можно вести при пониженном давлении. Локализация плазмы у мишени позволяет при МР использовать обычные для метода ТВИ методы контроля толщины и скорости напыления пленок с помощью свидетелей и кварцевого датчика.

Параметрами процесса магнетронного распыления являются: напряжение на мишени (и на аноде, если он не заземлен), ток разряда, плотность тока на мишень и удельная мощность, индукция магнитного поля, давление рабочего газа. Эти параметры определяют скорость нанесения пленок, величина их сильно зависит от конструкции МРС.

Обычно напряжение на мишени составляет 300...700 В, рабочее давление равно 0,13...0,66 Па, хотя возможно вести распыление в более широком диапазоне давлений, от 10^{-2} до 1 Па и выше; индукция магнитного поля у поверхности мишени 0,03...0,1 Т; плотность тока на мишень для МРС с плоским катодом составляет в среднем 200 мА/см², удельная мощность – 100 Вт/см².

Магнетронное распыление по сравнению с другими методами нанесения пленок обладает рядом достоинств, основным из которых являются: высокая скорость роста пленок, их хорошая адгезия и незначительное загрязнение посторонними газовыми включениями; низкая температура нагрева подложек; возможность распыления как проводников, так и диэлектриков и получение сверхтонких (менее 20 нм) пленок с меньшими радиационными дефектами; безинерционность процесса.

Магнетронное распыление применяют при изготовлении жидких кристаллов (сверх тонких прозрачных пленок), прецизионных фотошаблонов (тонких пленок хрома) и микросхем (пленки из алюминия, его сплавов, тугоплавких материалов).

Магнетронная распылительная система (рисунок 8.7) состоит из постоянного магнита 1, на котором расположена плоская мишень-катод 2, а над ней по периметру анод 3. Матируется эта система под колпаком вакуумно-распылительной установки рабочим газом, в которой после откачки служит аргон. При подаче питания от источника постоянного тока мишенью-катодом создается не однородное электрическое поле и аномальный тлеющий разряд,

под действием которых происходит образование плазмы и ионная бомбардировка мишени-катода.

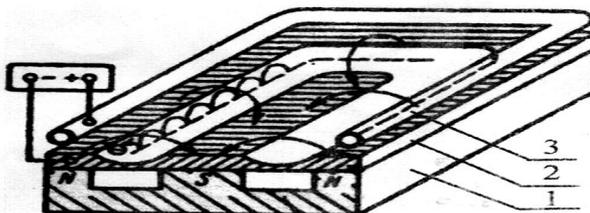


Рис. 8.7. Магнетронная распылительная система с плоской мишенью: 1 – постоянный магнит; 2 – мишень-катод; 3 – катод

Замкнутое магнитное поле распылительной системы локализует плазму непосредственно у поверхности распыляемой мишени. Под действием ионной бомбардировки выбитые катодом-мишенью электроны захватываются и удерживаются магнитным полем, совершая сложные циклические движения у поверхности мишени до тех пор, пока не произойдет их столкновение с атомами аргона. В результате столкновения электроны теряют большую часть энергии на ионизацию рабочего газа, что увеличивает концентрацию положительных ионов у поверхности мишени-катода, усиливает ее ионную бомбардировку, скорость распыления материала и осаждение пленки

Стабильность и воспроизводимость наносимых на подложки пленок зависит от оптимальных параметров магнетронной распылительной системы, основными из которых являются: напряжение питания электродов; ток разряда; плотность тока мишени; удельная мощность; индукция магнитного поля; рабочее давление.

Напряжение питания, подаваемое на электроды, обычно не превышает 1000 В. На мишень, как правило, подают отрицательный потенциал, а на анод – нулевой или положительный, в зависимости от конструкции системы. Ток разряда, зависящий от мощности источника, а также других параметров, подбирают экспериментально. Плотность тока на мишени колеблется от 40 до 200 А/см² и в центральной части зоны распыления может превышать эти значения. Удельная мощность лежит в интервале от 40 до 100 Вт/см² и определяется с условиями охлаждения и теплопроводностью распыляемого материала.

Важнейшим параметром магнетронных систем установок является вольтамперная характеристика разряда, зависящая от рабочего давления газа и индукции магнитного поля. С уменьшением давления в системе и индукции магнитного поля. Вольтамперные характеристики разряда сдвигаются в область больших рабочих напряжений.

Планарные магнетронные системы позволяют достичь скоростей распыления до двух микрометров в минуту. Недостатком такой системы

является то, что распылению подвергается узкая кольцевая область мишени, по этому коэффициент использования материала составляет около 26% от площади мишени.

Вакуумное оборудование для формирования пленок и последовательность проведения технологического процесса

Рассмотрим основные характеристики термовакуумной установки УВН-2М2 (рис. 8.8—8.9) (УРМ.3.279.017; УВН-75Р1). Данные установки периодического действия имеют рабочую камеру, в которой проводятся все стадии технологического процесса.

Такие установки еще используются в промышленном производстве, так как они просты по конструкции, легко перенастраиваются и довольно дешевы. Тонкие пленки, наносимые на таких установках, обеспечивают необходимое качество и воспроизводимость технических параметров.

Производительность установки периодического действия невелика, так как перед каждой очередной загрузкой партии подложек в рабочую камеру напускают атмосферный воздух.



Рис. 8.8. Внешний вид установки УВН-2М2



Рис. 8.9. Внешний вид подколпачного устройства установки УВН-2М2

На рис. 8.10. представлена схема установки УВН-2М.

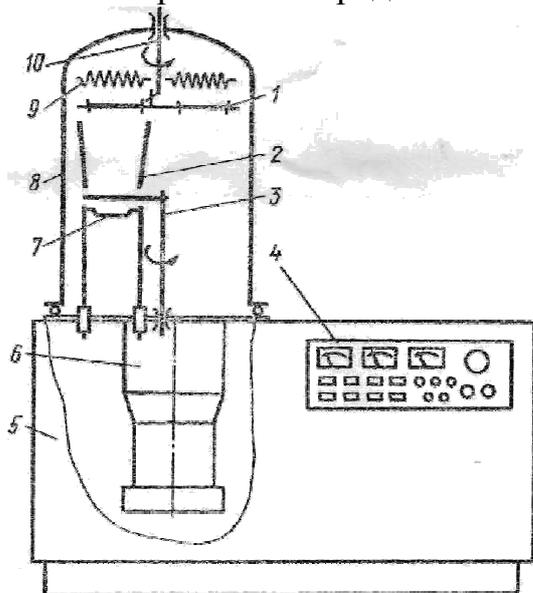


Рис. 8.10. Вакуумная установка УВН-2М2:

1 — подложкодержатель, 2 — экран, 3 — заслонка, 4 — пульт управления, 5 — каркас, 6 — насос, 7 — испаритель, 8 — рабочая камера, 9 — нагреватель, 10 — ввод вращения; 11 — резиновая прокладка

Рабочая камера (8) представляет собой колпак, который может быть поднят для смены подложек (пластин) испарителей (7) и осаждаемых материалов (навесок Al). Вакуумно-плотное соединение основания колпака с базовой плитой достигается с помощью резиновой прокладки (11). Сверху колпака размещен вакуумный ввод привода вращения для передачи вращения подложкодержателю (1). На базовой плите закреплен электро-механический привод, приводящий в движение заслонку (3), также размещены электрические вводы подачи тока на испаритель (7), а нагреватель подложек (9) помещен над подложкодержателем.

Вакуумная система этой установки состоит из парамаслянного насоса (6), азотной ловушки, механического насоса, вакуумного затвора, блока клапанов и вакуум-проводов. Подача жидкого азота в ловушку осуществляется от сосуда Дьюара с помощью автоматического питателя. Контроль вакуума осуществляется с помощью прибора ВИТ-2. Управление подачей тока на испарители, нагреватели осуществляется с помощью ручного управления с блока управления (4). Контроль толщины слоя металлизации осуществляется с помощью переносного прибора КИТ-1 при помощи кварцевого резонатора, помещенного внутри установки.

Последовательность процесса напыления на установке УВН-2М2

1. Нажать кнопку подъема колпака и поднять его выше подколпачного устройства
2. Установить чистое стекло в смотровой иллюминатор и закрепить его там с помощью металлической пружины
3. Открыть заслонку нажатием клавиши открытия заслонки
4. Из бюкса с навесками, залитыми спиртом, выложить их на фильтр и осушить. Поместить навеску Al на каждый изгиб испарителя по 5 штук с помощью пинцета.
5. Повторить переход 4 для второго испарителя.

6. Закрыть заслонку.
7. Взять пенал с пластинами. Поставить на столешницу установки. Открыть крышку и с помощью вакуумного пинцета загрузить контрольную пластину в одно из гнезд диска подложкодержателя. Загрузить рабочие пластины в оставшиеся гнезда диска подложкодержателя. Все гнезда диска подколпачного устройства должны быть закрыты пластинами.
8. Опустить колпак на опорную плиту, нажав кнопку опускания колпака вниз.
9. Включить тумблер подачи воды на колпак в положение «горячая вода».
10. Подключить питатель азота к сосуду Дьюара и открыть вентиль подачи осушенного воздуха. Выдержать до покрытия трубопровода инеем. Включить прибор ВИТ для контроля вакуума.
11. С помощью переключения клапанов, низкой и высоковакуумной откачки откачать рабочий объем до давления $5 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст., переключить тумблер подачи воды и продолжить откачку до $6 \cdot 10^{-6}$ мм.рт.ст. в положение «холодная вода».
12. Включить вращение подложкодержателя и с помощью ЛАТРа плавно установить скорость вращения 10-20 оборотов в мин.
13. Включить нагрев пластин на подложкодержателе и нагреть их до $T=280 \pm 20$ °С. Выждать 3-5 минут.
14. При достижении показания $T=220 \pm 20$ °С. Включить тумблер «Испаритель».
15. Подать ток на испаритель 50-60 А. Визуально следить за расплавлением навесок на испарителе. После образования капель, открыть заслонку и произвести напыление Al в течение 90 ± 30 секунд при токе 120 ± 20 А.
16. Закрыть заслонку.
17. Уменьшить ток до «0».
18. Охладить пластины до температуры 80-90 °С.
19. Отключить измеритель высокого вакуума ВИТ.
20. Закрыть высоковакуумный затвор.
21. Переключить тумблер подачи воды в положение «горячая вода».
22. Выдержать 5-8 минут. Отключить подачу воды на колпак, установив тумблер подачи воды в нейтральное положение.
23. Открыть вентиль напуска воздуха в колпак.
24. Поднять колпак вверх выше подколпачного устройства.
25. Открыть пенал и с помощью вакуумного пинцета переложить рабочие пластины из гнезд подложкодержателя в пенал. Выгрузить контрольную пластину.
26. Проконтролировать по контрольной пластине толщину и адгезию пленки Al. Проверить адгезию пленки Al на 2-х рабочих пластинах на расстоянии до 3 мм от края в 2-х местах.
27. Заполнить сопроводительный лист.

28. Заполнить операционный журнал (режимы, толщину, время окончания операции).
29. Передать рабочие пластины на следующую операцию.

Формирование пленок электронно-лучевым методом на установке 01НЭ-7-004 «Оратория-9»

Данная установка имеет большую цилиндрическую рабочую камеру. Внутри рабочей камеры расположены две электронно-лучевые пушки с магнитной отклоняющей системой блок ИК-нагрева, роторно-планетарное подколпачное устройство, датчик контроля температуры и толщины напыленной пленки КИТ-2. Весь технологический цикл напыления может производиться автоматически с заданием режимов по реле времени. Общее управление осуществляется блоком УСУПМ-1. Внешний вид подколпачного устройства данной установки представлен на рис. 8.11.



Рис. 8.11. Внешний вид подколпачного устройства установки «Оратория-9»

В состав вакуумной установки входит:

- 1) каркас, в котором размещается высоковакуумная система с рабочей камерой;
- 2) стойка питания и управления, служащая для автоматического управления вакуумной откачкой, устройством нагрева, вращением подложек, а также управление электронно-лучевыми пушками
- 3) две стойки управления, отдельно для каждой электронно-лучевой пушки.

Схематически данная установка представлена на рис. 8.12.

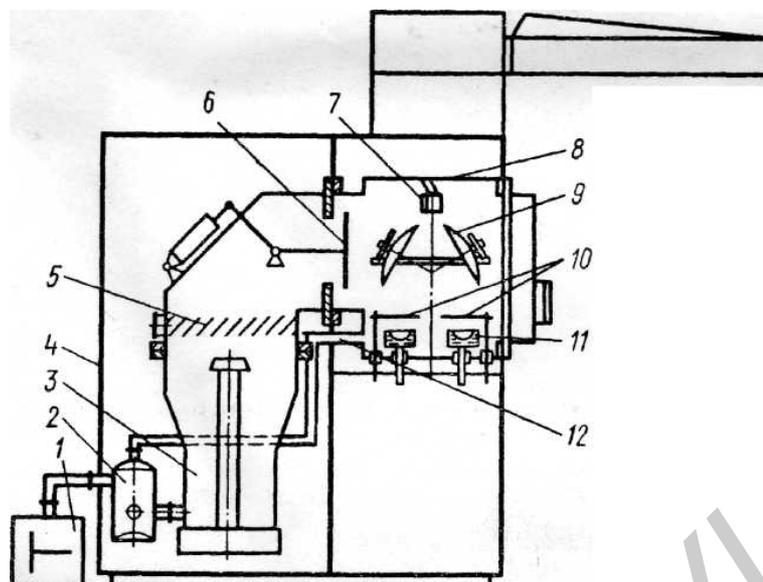


Рис. 8.12. Вакуумная установка 01НЭ-7-004 («Оратория-9»):

1,3 — форвакуумный и паромасляный насосы, 2,5- азотные ловушки, 4 - каркас, 6 — высоковакуумный затвор, 7 — кварцевый датчик, 8 — рабочая камера, 9 - планетарный подложкодержатель, 10 — заслонка, 11 — электронно-лучевой испаритель, 12 — обводная магистраль

С наружной стороны рабочей камеры 8, смонтированной в каркасе 4 установки, приварены трубки, по которым подается холодная вода при ее работе или горячая при обезгаживании, а также напуске воздуха (для снижения конденсации паров воды из атмосферы на внутренних стенках камеры). В открывающейся на петлях дверце имеется смотровое окно. В верхней части камеры размещены кварцевый датчик 7 для измерения толщины наносимой пленки и карусель с тремя планетарными подложкодержателями 9, а в нижней — два электронно-лучевых испарителя 11 и две заслонки 10 с электромагнитным приводом, а также нагреватели и датчик температуры подложек.

Для достижения высокого вакуума служит паромасляный насос 3, имеющий скорость откачки 9000 л/с, соединенный для создания предварительного вакуума с механическим форвакуумным насосом 1. Для уменьшения миграции масла в рабочую камеру на форвакуумном трубопроводе, а также на входном патрубке паромасляного насоса установлены соответственно азотные ловушки 2 и 5.

При работе установки 01НЭ-7-004 помещают в рабочую камеру (8) три подложкодержателя (9) с подложками и откачивают до высокого вакуума, после чего начинает вращаться планетарный механизм с подложками, включается нагреватель подложек и оба шкафа питания испарителей. После нагрева до заданной температуры и выдержки их при этой температуре включается накал каждого испарителя и выводится их ток эмиссии на заданное значение, достаточное для разогрева и обезгаживания испаряемых материалов. При обезгаживании луч сканирует по продольной оси тигля для разгонки шлаков из зоны испарения. В начале напыления производится

отпыл на заслонку, которая после разгонки шлаков открывается и распыляемый материал наносится на подложки. При напылении луч может быть в центре тигля или сканировать. После открытия заслонки запускается реле времени работы данного испарителя. После отключения обоих испарителей нагрев подложек отключается и реле времени начинает отсчитывать время остывания. По окончании этого времени подается сигнал «конец цикла» (в течение 10 секунд звучит звуковой сигнал). Установка может работать и в ручном режиме, при этом все команды для установки выполняет оператор, нажимая соответствующие кнопки на пульте управления, и выдерживает соответствующие токи, напряжения и длительности процесса, открывая и закрывая заслонки для обеспечения требуемой толщины формируемой пленки.

Электронно-лучевой источник представлен на рис. 8.13.

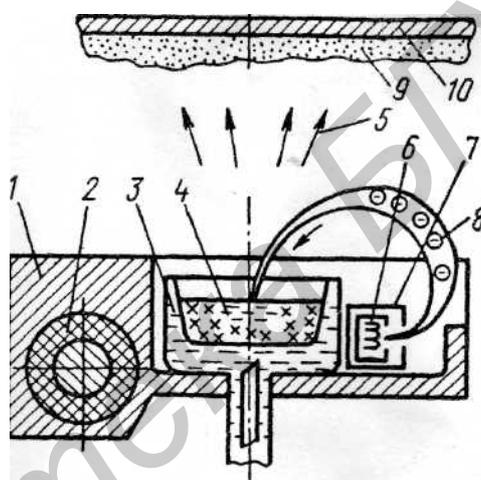


Рис.8.13. Электронно-лучевой испаритель:

1 - полюсный наконечник, 2 — электромагнит, 3 - водоохлаждаемый тигель, 4 - испаряемый материал, 5 - поток наносимого материала, 6 - термокатод, 7 - фокусирующая система, 8 - электронный луч, 9 - тонкая пленка, 10 - подложка

Электронно-лучевой испаритель состоит из трех основных частей: электронной пушки, отклоняющей системы и водоохлаждаемого тигля.

Электронная пушка служит для формирования потока электронов и состоит из вольфрамового термокатода 6 и фокусирующей системы 7. Электроны, излучаемые нагретым катодом, проходят через фокусирующую систему, ускоряются за счет разности потенциалов между катодом и анодом до 10 кВ) и формируются в электронный луч 8.

Отклоняющая система предназначена для создания магнитного поля, перпендикулярного направлению скорости движения электронов, выходящих из фокусирующей системы пушки, и состоит из полюсных наконечников 1 и электромагнита 2. Между полюсными наконечниками расположены водоохлаждаемый тигель 3 и электронная пушка. Отклоняя электронный луч магнитным полем, его направляют в центральную часть водоохлаждаемого тигля 3. В месте попадания луча в испаряемом материале создается

локальная зона испарения вещества из жидкой фазы. Нагретый электронно-лучевой бомбардировкой материал 4 испаряется, и поток паров 5 осаждается в виде тонкой пленки 9 на подложке 10. Изменяя ток в катушке электромагнита 2, можно сканировать лучом вдоль тигля, что обеспечивает лучшее образование зоны расплава, предотвращает образование "кратера" в испаряемом материале.

Медные водоохлаждаемые тигли емкостью 50 см³ и более обеспечивают длительную непрерывную работу без добавки испаряемого материала, который, кроме того, не контактирует в расплавленном виде с медными стенками тигля, а значит, и исключается их взаимодействие, загрязнение формируемой пленки материалом тигля.

Электронно-лучевые испарители могут быть одной многотигельной конструкции, с разворотом луча на 270 и 180°. При угле отклонения электронного луча до 270° исключается попадание испаряемого материала на катод и загрязнение наносимых пленок материалом катода, который во время работы также испаряется.

Установка УВНРЭ-Э60 (прототип УВН-Z400 фирмы Leybold Heraeus)

Данная установка была разработана для формирования слоев «просветленной оптики». Это значит, что требуется напылять до 10-14 слоев пленок металлов, окислов толщиной от 50 до 300 Å с оптическим контролем каждого слоя при помощи фотоэлектрического умножителя по пропусканию потока света через напыленное защитное стекло. Управление такими тонкими и сложными процессами заложено и проводится с помощью ЭВМ по требуемой программе техпроцесса. Данная установка разработана с безмасляной откачкой с помощью турбомолекулярного насоса (иногда используется диффузионный насос). Весь процесс задается в программе и воспроизводится с высокой точностью по электропараметрам: откачка высокого вакуума технологического процесса; температура нагрева и времени ее достижения и стабилизации; времени вывода пушки или испарителей на режим поддержания тока режима напыления, длительности отпыла на заслонку и подложки.

Электронно-лучевая пушка с косвенным нагревом танталового эмиттера обеспечивает стабильный ток электродов свободно формируется и управляется. Отклоняющая система имеет разворот луча на 90°, а сама электронно-лучевая пушка расположена вне рабочего объема, что удобно в эксплуатации. Тигельное устройство для распыления тонких слоев различных материалов представляет собой «револьверную головку» способную вращаться вокруг своей оси, в которой имеет место 6 отдельных малых тиглей вместимостью 50-150 грамм материала. Для улучшения охлаждения тигельное устройство выполнено из меди. Основным недостатком является невозможность напылять толстые пленки (электронно-лучевым способом).

Пластины как и в предыдущей установке крепятся на роторно-планетарном устройстве. Низкое расположение тиглей и удаленность от двух смотровых окон позволяет вести визуальный контроль за процессом. Кроме этого весь технологический процесс по электрическим, температурным, вакуумным и временным интервалам выведен на световой дисплей где он фиксируется все время виде графиков, имеющих разные цвета. Например, нагрев – красный; вакуум – зеленый; нагрев ЭЛИ – белый с отличительным номером. Нагрев пластин осуществляется тенами, что обеспечивает более ровный и равномерный нагрев подложек, вывод на рабочую температуру и стабилизация осуществляется автоматически. Только после поддержания заданной температуры в течение 5 минут начинается выполнение последующих переходов техпроцессов до полного выполнения всей программы.

Вид подколпачного устройства установки приведен на рис. 8.14.



Рис. 8.14. Вид подколпачного устройства установки УВНРЭ- Э60

Последовательность процесса напыления на установке УВНРЭ-Э60

1. Пластины со сформированными структурами помещаются на подложкодержатели и загружаются в вакуумную установку.
2. После закрытия двери вакуумной установки производится откачка вакуума из камеры до установленного предела $(1-4) \cdot 10^{-4}$ Па.
3. Включается вращение карусели с подложками.
4. Включается нагрев подложек до заданной температуры.
5. включается прогрев двух ЭЛИ (электронно-лучевых источников), то есть проверяется исправность и готовность ЭЛИ к работе (при закрытых заслонках).
6. Включается прогрев первой ЭЛИ.
7. Первый ЭЛИ выводится на рабочий режим для напыления.
8. Производится отпыл на заслонку.
9. Открывается заслонка и производится напыление металла на пластину.
10. Заслонка закрывается и первая ЭЛИ отключается.
11. Включается второй ЭЛИ.

12. Производится прогрев второй ЭЛИ, вывод на режим, отпыл на заслонку, затем напыление слоя по требованиям технологии.

13. Выключается прогрев второй ЭЛИ.

14. Включается первый резистивный испаритель, производится отпыл на заслонку и после этого производится напыление слоя металла.

15. Первый резистивный испаритель отключается.

16. Включается второй резистивный испаритель. Производится отпыл на заслонку и после этого осуществляется напыление слоя металла.

17. Отключается второй резистивный испаритель.

18. Через 20 минут после напыления со второго испарителя производится напуск азота в рабочую камеру.

19. Рабочие пластины выгружаются в пеналы по партиям в соответствии с маркировкой.

20. По контрольной пластине производится замер общей толщины металлизационной системы.

21. На части контрольной пластины процарапывается полоса и проверяется адгезия.

22. Все полученные данные записываются в журнал, переносятся в сопроводительный лист и передаются на следующую операцию.

Формирование металлических пленок магнетронным распылением

Установка магнетронного распыления непрерывного действия УВНМЭ-100/125.003 «Магна-2М» типичный представитель данного оборудования. В установках такого класса имеются 2 отдельные вакуумные системы, работающие вместе: первая вакуумная система имеет весь комплекс насосов необходимых для откачки высокого вакуума из рабочего объема; вторая вакуумная система, состоящая из предварительной откачки вакуума из шлюзов загрузки и выгрузки, обеспечения вакуумной связи с рабочим объемом и возможности разгерметизации шлюзов загрузки-выгрузки. Эти 2 вакуумные системы обеспечивают непрерывность процесса напыления. Вид данной установки представлен на рис. 8.15.

Основными частями установки являются:

- рабочая камера, размещенная на каркасе;
- агрегаты высоковакуумной откачки и откачки шлюзов (загрузки, выгрузки);
- нагреватель;
- устройство транспортировки пластин из шлюза загрузки до шлюза выгрузки;
- шкафы питания магнетронов, управления установкой в рабочем и наладочном режимах управления ионной зачисткой.



Рис.8.15. Установка «Магна-2М»

В шкафу управления имеется дисплей и микропроцессор на основе ЭВМ «Электроника», которая управляет транспортированием и нагревом подложек, напуском аргона в зоны распыления и травления, режимами работы 3-х магнетронов, шлюзовых устройств, а также ведет счет пластин, обеспечивает контроль всех систем и блокировку при отказе одной из них.

Для высоковакуумной откачки используются диффузионный насос НВ-5 и АВР-50. В некоторых вариантах вместо диффузионного насоса используется криогенный насос с предварительной откачкой также АВР-50 и азотной ловушки, расположенной в вакуумном трубопроводе над ним.

Схема установки «Магна-2М» представлена на рис. 8.16.

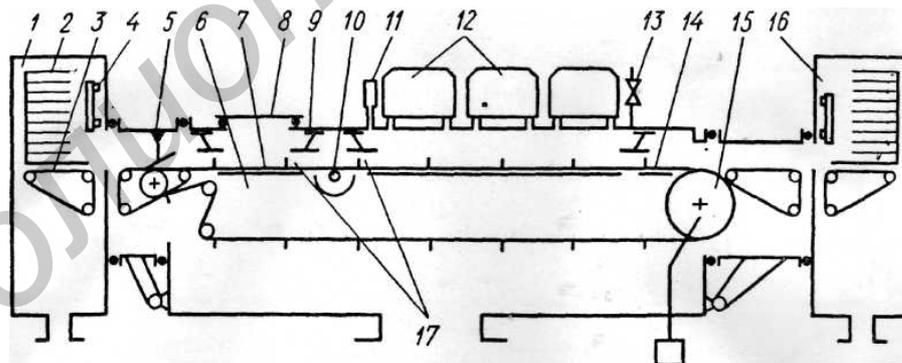


Рис. 8.16. Вакуумная установка "Магна-2М" для нанесения тонких пленок магнетронным распылением: 1, 16 - шлюзовые камеры, 2 - кассета, 3 — пассивы подачи подложек, 4 - затвор шлюзовой камеры, 5 - датчик подачи подложек на конвейер, 6 - рабочая камера, 7, 15 - конвейер и его привод, 8 - устройство ионной очистки подложек, 9 - уплотняющая диафрагма, 10 — нагреватель подложек, 11, 13 - датчик давления и вибрационный натекагель аргона, 12 - магнетроны, 14 - стол охлаждения подложек, 17 - щелевые каналы

Магна-2М" предназначена для нанесения тонких одно- и многослойных пленок из алюминия и его сплавов на кремниевые подложки диаметром 76, 100 и 125 мм магнетронным распылением. Установка состоит из двух 1 и 16 шлюзовых и одной 6 рабочей камер, системы транспортных устройств для перемещения полупроводниковых подложек между кассетами 2, трех магнетронных распылительных устройств (магратронов) 12 и микропроцессорной системы управления с дисплеем.

Шлюзовые камеры 1 и 16, предназначенные для загрузки и выгрузки кассет 2 с полупроводниковыми подложками, вначале откачиваются агрегатом АВР-50 с азотной ловушкой в течение определенного времени, а затем в них для очистки напускается азот. Работа камер так взаимосвязана, что при разгерметизации шлюзовой камеры давление аргона в рабочей почти не изменяется.

Рабочая камера 6 имеет три зоны: предварительной ионной очистки подложек, их нагрева кварцевой лампой и нанесения пленок. Зоны сообщаются через щелевые каналы, но в них поддерживается разное давление. Вакуумная система рабочей камеры представляет собой агрегат, состоящий из паромасляного диффузионного насоса НВ-5, азотной ловушки и механического насоса ВММ-18Г.

К системе транспортных устройств относятся конвейер 7 и резиновые пассики 3, подающие подложки из кассет на конвейер и с конвейера в кассеты.

Последовательность технологического процесса

1. Заморозить азотные ловушки, нажав кнопки «», «» в магистралях паромасляного насоса и агрегата откачки шлюзовых камер установки.
2. Включить с помощью выключателя СЕТЬ вакуумметр ВМБ-14 установки.
3. Открыть высоковакуумный затвор, нажав кнопки «», «» и откачать рабочую камеру до давления не выше $6,7 \cdot 10^{-4}$ Па ($5 \cdot 10^{-6}$ мм. рт. ст.).
4. Установить ключ микропроцессора в положение ПРОГРАММИР.
5. Нажать на дисплее кнопки Д, ПРМ и цифру номера процесса.
6. С помощью кнопок «» и «» подвести маркер на экране дисплея к необходимой строке и запрограммировать программу в режиме «Тренировка_1» Включить вакуумметр ВИ-14, включив тумблер СЕТЬ. Тумблеры УСТАНОВКА НУЛЯ и УСТАНОВКА ТОКА ЭМИССИИ должны находиться в выключенном состоянии. Прогреть вакуумметр ВИ-14 в течение 30 мин.
7. Установить тумблеры УСТАНОВКА НУЛЯ и УСТАНОВКА ТОКА ЭМИССИИ в положение ИЗМЕРЕНИЕ.
8. Нажать на дисплее кнопки Д, С1 и цифру номера выбранного процесса.

9. Проверить обработку программы по экрану дисплея.
10. Проверить запись в сопроводительном листе о проведении предыдущей операции и подписи оператора. Количество поступивших пластин должно соответствовать количеству пластин, указанных в сопроводительном листе.
11. Взять контейнер с пластинами двумя руками за торцы и поставить на стол в чистой зоне около камеры загрузки.
12. Нажать кнопку  на пульте управления шлюзовой камерой загрузки и произвести напуск осушенного воздуха (или N₂) в шлюз загрузки.
13. Проверить чистоту пинцета 7890-8599 на контрольной пластине, предварительно протерев его спиртом.
14. Повернуть кассету с пластинами в вертикальное положение и установить на столик камеры загрузки. Примечание:
При напылении металлизации за два прохода контролировать толщину слоев при каждом проходе и общую толщину слоя после двух проходов по технологической карте «Контроль адгезии и толщина напыленного слоя металлов»
15. Проверить через смотровое окно положение приемной кассеты в камере загрузки во избежание боя пластин. Кассета должна находиться в крайнем верхнем положении
16. Взять крышку контейнера за торцы двумя руками, переместить к себе и закрыть контейнер
17. Установить сменную кассету в камеру выгрузки установки
18. Закрыть затвор камеры выгрузки и проследить через смотровое окно за опусканием кассеты до крайнего нижнего положения
19. Открыть затвор камеры выгрузки при появлении на дисплее сигнала «Выгружать можно», снять крышку с контейнера за торцы двумя руками, переместить к себе и положить справа, перпендикулярно контейнеру.
20. Взять крайнюю правую пластину за непланарную сторону, проверить под сфокусированным светом осветителя качество напыленной пленки и поместить в крайний левый паз кассеты.
21. Подсчитать годные пластины в кассете. Заполнить сопроводительный лист и передать пластины далее по маршруту.
22. Проводить при замене дисков очистку рабочей камеры.
23. Провести контрольный процесс согласно дРО.045.448 ТИ по режимам в следующих случаях:
 - в начале первой смены;
 - после ремонта механического или диффузионного насосов агрегата;
 - по указанию технолога при возникновении сомнений в воспроизводимости свойств пленок металла.
24. Закрыть дверцу шлюзовой камеры загрузки. Устройство автоматически произведет откачку из камеры и откроет затвор.

2. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством вакуумной установки, конструкцией камер, схемы вакуумной системы, приборов контроля и управления техпроцессом.
2. Под руководством преподавателя провести формирование пленок металла.
3. Измерить толщину полученных пленок на микроскопах МИИ-4, рассчитать скорость нанесения пленок и производительность установки.
4. Изучить конструкции испарителей, магнетронов, электронно-лучевых испарителей, кварцевого датчика, нагревателей, натекаателей, шлюзового устройства.
5. По индивидуальному заданию преподавателя подготовить детальное описание конструкции и принципа работы одного из узлов вакуумной установки.
6. Оформить отчет по лабораторной работе.

3. Содержание отчета.

1. Цель работы.
2. Структурная схема установки.
3. Последовательность выполнения операции напыления на УВН.
4. Принцип работы данной установки вакуумного напыления.
5. Результаты расчета скорости напыления, толщины, производительность.
6. Результаты выполнения индивидуального задани .
7. Выводы по работе.

4. Контрольные вопросы.

1. В чем сущность ТВИ, магнетронного и ИПР методов напыления?
2. Каковы методы повышения равномерности распределения толщины пленки по подложке?
3. Какие типы испарителей с резистивным нагревом вы знаете?
4. Как устроены проволочные и ленточные испарители?
5. Каков принцип действия тигельных испарителей?
6. Как происходит магнетронное распыление?
7. Как происходит ускорение электронов?
8. Для чего в установке Магна- 2М две вакуумные системы?
9. Каковы устройства и принцип действия электронно-лучевого испарителя?

Список литературы

1. Технология тонких пленок. Справочник в 2-х томах. М.: Советское радио: Том 1 – 662 с., Том 2 – 768 с.;
2. Данилин Б.С. Получение тонкопленочных элементов микросхем. Москва: Энергия 1977.– 153 с.
3. Минайчев В.Е. Нанесение пленок в вакууме. Книга 6. М.: «Высшая школа» 1990. –105 с.
4. Моряков О.С. Элионная обработка. Кн. 6. М.: Высшая школа, 1990.– 127с.
5. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. М., Высшая школа, 1990.– 320 с.
6. Вакуумная техника. Справочник. Под ред. Е.О. Фролова, В.Е. Минайчева . М.:, Машиностроение, 1985.– 360 с.

Библиотека БГУИР

Лабораторная работа №9

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГЕРМЕТИЗАЦИИ ИЗДЕЛИЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ ПРЕССОВАНИЕМ ПЛАСТМАСС

Цель работы

Исследование процесса герметизации полупроводниковых приборов в корпусе ТО-220 с помощью пластмасс и изучение устройства и режимов работы гидравлического пресса-полуавтомата на примере гидравлического пресса-полуавтомата ДГ2432А.

1. Теоретические сведения

Корпус является одной из важнейших частей конструктивного оформления полупроводникового прибора, в значительной степени определяющей параметры приборов во времени, их надежность при работе в аппаратуре и механическую прочность. Корпус служит для защиты полупроводникового кристалла от различных факторов окружающей среды, включая повышенную влажность, механические нагрузки, электромагнитные излучения, воздействие агрессивных сред т.д. Он должен обеспечивать коммутацию электрических сигналов и подвод электропитания к кристаллу, отводить выделяемое им тепло, допускать проверку электрических параметров схемы и применение высокопроизводительных, главным образом автоматизированных, процессов сборки интегральных микросхем (ИМС) и их монтажа в аппаратуру. Корпус ИМС должен сохранять ее работоспособность при повышенных (до 125 °С и более) и пониженных (до -60 °С) температурах.

В самом общем виде корпуса принято делить на керамические (металлокерамические), стеклокерамические, металlostеклянные и пластмассовые корпуса. В такой классификации учитывается, прежде всего, какой материал конструкции корпуса служит механической опорой для монтируемого кристалла и каким материалом осуществляется изоляция выводов. Загерметизированный корпус образует замкнутый объем, в котором располагается кристалл и соединяющие его с внутренними контактными площадками корпуса (траверсами) проволочные проводники.

Каждый из перечисленных выше типов корпусов имеет свои достоинства и недостатки.

Герметизация полупроводниковых изделий пластмассой применяется для изделий массового и серийного производства, к которым не предъявляются повышенных требований к эксплуатации (повышенная защита от окружающей среды, повышенный теплоотвод и др.). Влагоустойчивость таких корпусов ниже, чем вакуумплотных. Поэтому для изделий с повышенными требованиями к эксплуатации применяют вакуумплотные керамические (металлокерамические), стеклокерамические или

металлостеклянные корпуса. Соответственно для каждого типа корпуса существует свой отдельный метод герметизации.

Данная лабораторная работа проводится на примере герметизации полупроводниковых приборов в корпус ТО-220. Корпус ТО-220 (рис.1) представляет собой пластмассовый корпус со следующими габаритными размерами: ШхВхД $10,5\pm 0,5$ мм х $4,5\pm 0,3$ мм х $29,05\pm 1,35$ мм.

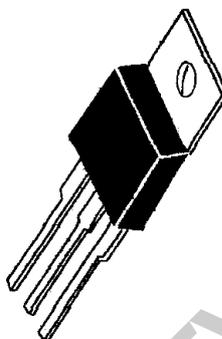


Рис. 9.1. Внешний вид полупроводникового прибора в корпусе ТО-220

1.1 Основные свойства и характеристики пластмасс

Герметизация полупроводниковых приборов методом прессования пластмасс основана на свойстве ряда полимерных материалов расплавляться и течь под действием температуры и давления, заполняя при этом пустоты металлической формы с изделиями.

К пластмассам (пресс-материалам) предъявляются следующие основные требования:

- 1) хорошая текучесть при минимальном давлении для сохранения целостности полупроводникового прибора в процессе заливки;
- 2) строго определенное время сохранения текучести (до заполнения прессформы);
- 3) стабильность при хранении в течение 4-6 месяцев;
- 4) отсутствие абразивного воздействия на пресс-форму;
- 5) малая адгезия к стенкам формы (легкая выгрузка залитого прибора);
- 6) влагостойкость;
- 7) совместимость по коэффициенту температурного расширения (КТР) с материалом выводов;
- 8) отсутствие ионных примесей;
- 9) высокая теплопроводность;
- 10) быть механически прочными, выдержать определённые ударные нагрузки, вибрацию и ускорение;
- 11) обладать высокими диэлектрическими свойствами (малыми диэлектрическими потерями, высокими удельным сопротивлением и электрической прочностью);
- 12) способность к хорошему измельчению;
- 13) быть дешевым;
- 14) обеспечивать товарный вид изделия.

Основные свойства пресс-материалов определяются их компонентами: смолой, отвердителем, катализатором, пластификатором, модификатором, наполнителем, аппретом и другими необходимыми добавками.

Смолы выполняют роль связки. Сейчас при герметизации полупроводниковых приборов широко применяются эпоксидные смолы благодаря таким техническим характеристикам, как низкая стоимость и высокая производительность процессов переработки. Эпоксидные смолы отличаются прочностью, высокими вязкостью и температурой стеклования, электроизоляцией, не изменяющейся при старении, негорючестью, хорошей адгезией к различным материалам, малым КТР, незначительной усадкой, а при отверждении – высокой химической стойкостью. Наиболее часто используются эпоксидноволачные смолы, реже бифенольные.

Отвердители служат для полимеризации эпоксидных смол и перевода их структуры в трехмерную сетку. Они обеспечивают вязкотекучие свойства до начала отверждения и необходимую скорость этого процесса.

Катализаторы ускоряют протекание реакций, приводящих к пространственному сшиванию полимера, и влияют на диэлектрические и влагопоглощающие свойства композиций. В качестве катализаторов часто используются амины.

Пластификаторы (полисульфид, полибутадион и др.) снижают напряжение усадки, увеличивают пластичность компаундов, сокращают время литьевого прессования.

Модификаторы способствуют уменьшению внутренних напряжений, одновременно повышая ударопрочность. В качестве модификаторов применяют различные каучуки.

Наполнители вводятся для увеличения модуля упругости, твердости, теплопроводности, уменьшения КТР, коэффициента сжатия при отверждении, а также для улучшения перерабатываемости и снижения стоимости. На долю наполнителя приходится до 70% общей массы пресс-композиции. Максимально возможное количество наполнителя в системе определяется допустимой вязкостью композиции. Наиболее часто в качестве наполнителя применяют двуокись кремния (кварц) в двух аллотропических формах: аморфной и кристаллической (как правило, их сочетание). Введение наполнителей может сопровождаться загрязнением композиции различными примесями.

Аппретов усиливают сцепление между органическими полимерами и поверхностями неорганических наполнителей. При этом образуется система с улучшенными механическими свойствами, повышенной влагостойкостью и стойкостью к старению в неблагоприятных условиях. В качестве аппретов часто используют силаны.

Для надежной герметизации полупроводниковых приборов необходимо, чтобы пресс-материалы обладали достаточно высокой эластичностью, КТР, сопоставимым с материалами конструкции полупроводниковых приборов, повышенными теплостойкостью, теплопроводностью, влагостойкостью, хорошими электроизоляционными свойствами и к тому же не содержали

загрязняющих примесей. При создании пресс-композиций с заданными свойствами необходимо учитывать влияние различных, порой противоречивых, факторов. Например, при большой усадке облегчается извлечение материала из прессформы и уменьшается влагопоглощение. Но этого можно достичь и применением пластификаторов или аппретов. Их введение в компаунд уменьшает модуль упругости и вязкости, повышает прочность на изгиб. Пластификаторы снижают хрупкость эпоксидной смолы, увеличивают стойкость пластмассового корпуса к механическим воздействиям и улучшают работоспособность его конструкции. В то же время они уменьшают термохимическую стойкость, увеличивают диэлектрические потери, снижают температуру стеклования (что ухудшает тепловые характеристики пресс-композиций) и могут увеличить водопоглощение. Иными словами, создать универсальную, на все случаи жизни, пресс-композицию невозможно. Необходимая пресс-композиция выбирается исходя из ее физико-механических свойств и возможности обеспечить технологический процесс герметизации.

Основные марки пресс-материалов, используемых в серийном производстве, и их основные характеристики представлены в таблице 9.А1.

Таблица 9.1 Основные характеристики пресс-материалов

Марка пресс-материала	Температура предварительного нагрева таблетки пресс-материала, °С	Температура герметизации, °С	Давление прессования, Па (кГ/см ²)	Давление смыкания прессы, Па (кГ/см ²)
MG40F, MG40F-25, MG40F-40	85-100	150-180	294·10 ⁴ – 707,6·10 ⁴ (30-72)	1364·10 ⁴ – 1840·10 ⁴ (150-300)
MG17F – 0309, MG20F – 0340	77-94	160-190	294·10 ⁴ – 882·10 ⁴ (30-90)	
ЕМЕ 9100ХК	70-90	160-180	196·10 ⁴ – 686·10 ⁴ (20-70)	
Пласкон S-7, Пласкон 3400	93-104	160-180	294·10 ⁴ – 588·10 ⁴ (30-60)	

1.2 Герметизация прессованием пластмасс

В производстве дискретных полупроводниковых приборов и интегральных микросхем применяются в основном два способа герметизации прессованием: прямое и литьевое.

При прямом прессовании пресс-материал помещают непосредственно в пресс-форму, при литьевом – в загрузочную камеру.

Герметизация прямым прессованием (рис. 9.2) происходит следующим образом. В пресс-форму 2 загружают арматуру изделия и таблетированный или порошкообразный материал 3. При смыкании пресс-формы пресс-материал под воздействием теплоты и давления, развиваемого прессом, переходит в пластическое состояние и заполняет формирующую полость 4. По окончании выдержки опрессованные изделия вынимают из пресс-форм. При компрессионном прессовании давление не остается постоянным. В начале прессования, когда пресс-материал переходит в пластифицированное состояние, заполняет формирующую полость пресс-формы и начинает полимеризоваться, давление достигает максимума. К этому времени формирующая полость заполняется полностью, но пластмасса еще не затвердела. При дальнейшей выдержке высокое давление сохранять не нужно. Выдержку проводят при незначительном давлении, необходимом для противодействия давлению паров, летучих веществ и воды, выделяемых пресс-материалом.

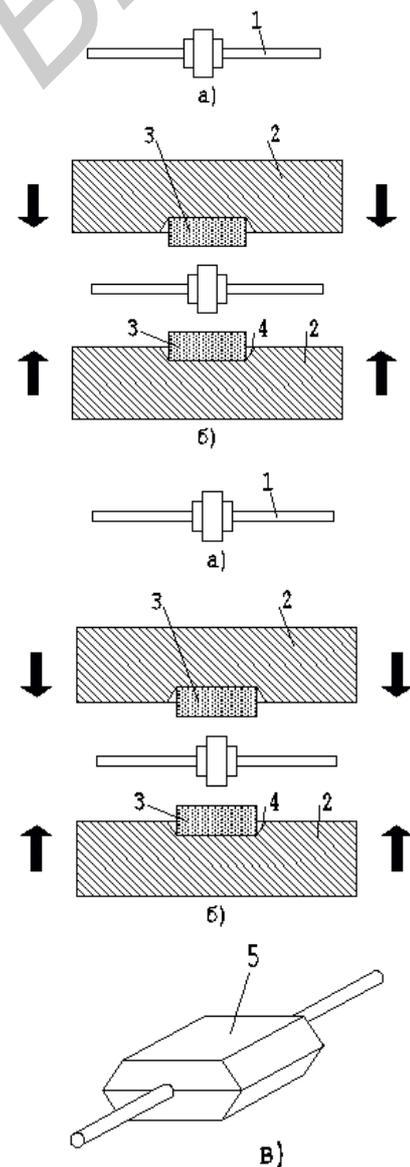


Рис. 9.2. Последовательность операций герметизации методом прямого прессования: *а* – арматура, *б* – размещение арматуры в пресс-форме, *в* – готовый прибор; *1* – арматура выпрямительного диода, *2* – пресс-форма, *3* – пресс-материал, *4* – формирующая полость пресс-формы

Основными операционными параметрами технологического процесса прессования являются:

- 1) температура;
- 2) удельное давление;
- 3) продолжительность выдержки герметизируемых изделий под давлением в пресс-форме.

Оптимальные технологические режимы прессования выбираются в результате предварительных расчетов и оценки качества загерметизированных образцов (визуально, сравнением физико=механических показателей и полноты отверждения). Давление прессования определяют по формуле

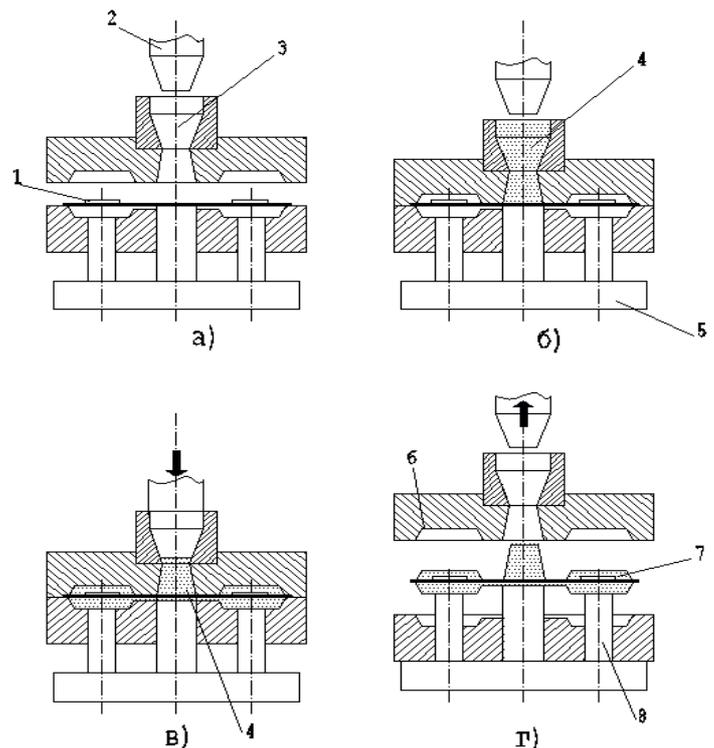
$$P_{пр} = P_{уд} \cdot S_{зк} / (\eta \cdot S_{пл}), \quad (1)$$

где $P_{уд}$ – удельное давление прессования (зависит от размеров и конфигурации корпуса, конструкции пресс-формы, партии пресс-материала, предварительного подогрева); $S_{зк}$ – площадь горизонтальной проекции загрузочной камеры; η – КПД гидравлического пресса; $S_{пл}$ – площадь поперечного сечения плунжера пресса.

Наиболее широкое применение в условиях серийного производства полупроводниковых приборов нашел метод литьевого прессования.

При литьевом прессовании (рис. 9.3) загрузочная камера пресс-формы отделена от формующей полости. Пресс-материал помещают в загрузочную камеру, где он подвергается воздействию теплоты и давлению пуансона. Переходя в полужидкое состояние, пресс-материал по специальным каналам – литникам поступает в формующую полость пресс-формы, в рабочих гнездах которой размещена арматура полупроводниковых изделий. При этом обеспечивается полный равномерный прогрев всего пресс-материала.

Рис. 9.3. Последовательность операций при герметизации методом литьевого прессования:
а – размещение арматуры в пресс-форме, **б** – загрузка пресс-материала, **в** – прессование; **г** – извлечение изделия из формы, **1** – рамка выводная с кристаллами, подлежащими герметизации, **2** – пуансон (трансфер), **3** – загрузочная камера, **4** – пресс-материал, **5** – выталкиватель, **6** – матрица, **7** – загерметизированный прибор, **8** – колонки



Технологический процесс литьевого прессования на съемных пресс-формах состоит из подготовки пресс-форм и размещения в них рамок выводных (арматур) с напаянными и разваренными кристаллами полупроводниковых приборов, собственно литья, доделочных операций, контроля качества опрессованных приборов.

При заполнении пресс-формы пластмассы, будучи достаточно вязкими жидкими композициями, могут вызывать повреждения изделий и монтажных соединений. Эти повреждения могут появиться в результате возникновения механических воздействий на детали изделий из-за гидравлического сопротивления протеканию пластмассы в оформляющей полости пресс-форм.

При герметизации пластмассами способом литьевого прессования большое значение приобретает точная дозировка пресс-материала, загружаемого в загрузочную камеру. Такая дозировка обычно обеспечивается предварительным таблетированием пресс-материала, т.е. его механическим прессованием в твердые таблетки различной формы на специальных таблеточных машинах.

К преимуществам таблетирования порошкообразных материалов относят: уменьшение объема исходного материала, а, следовательно, и размеров загрузочных камер прессформы и упрощения их загрузки; сокращение потерь сырья; ускорение процесса предварительного подогрева и сокращение цикла прессования.

Наиболее удобно герметизировать прессованием арматуру полупроводниковых приборов, собранных на рамках, где имеются специальные технологические отверстия, которые совмещают с фиксирующими штырьками пресс-форм для точной посадки арматуры в формирующие полости.

Качество герметизации в большой степени зависит от конструкции пресс-форм, которые являются сложным и дорогостоящим технологическим приспособлением.

Устройство пресс-форм разнообразно и зависит от конструкции герметизируемого изделия, имеющегося оборудования и требуемой производительности. Пресс-формы, используемые для трансферного литья, по характеру эксплуатации могут быть съемными и стационарными; по количеству одновременно прессуемых изделий – одно- и многогнездными; по положению плоскости разъема – с одной или несколькими плоскостями разъема.

В одногнездных пресс-формах за один цикл прессования герметизируется одно изделие, в многогнездных – сразу несколько и даже несколько десятков или сотен.

1.3 Контроль качества герметизации

Надежность полупроводниковых изделий электронной техники в процессе работы в аппаратуре и при хранении в значительной степени

определяется состоянием корпуса. Чтобы убедиться, что корпуса надежно защищают полупроводниковые изделия, их подвергают контролю.

Методы контроля должны обладать высокой чувствительностью и в то же время быть экономичными.

Для пластмассовых корпусов основным критерием контроля надежности является их влагоустойчивость. С этой целью проводят следующие виды испытаний:

1. ускоренные испытания с целью оценки влагоустойчивости кристалла в пластмассовом корпусе при следующих условиях – температура окружающей среды 85°C , относительная влажность 85%, время выдержки 100 часов;

2. испытание на влагостойкость с целью ускоренного возникновения повреждения от влажности механизма пластмассового корпуса при следующих условиях – температура окружающей среды 130°C , относительная влажность 85%, непрерывное измерение 1000 часов.

Кроме исследований на воздействие влаги, влияние которой на параметры изделий наиболее сильно, существуют и другие методы испытаний и контроля. К ним относятся:

- в соляном тумане;
- при низкой и высокой температуре;
- при пониженном атмосферном давлении;
- на устойчивость к солнечной радиации и термоударам;
- к воздействию песка и пыли.

2 УСТРОЙСТВО И РЕЖИМЫ РАБОТЫ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРЕССА-ПОЛУАВТОМАТА ДГ2432А

Для герметизации прессованием пластмасс обычно используют гидравлические прессы, на которых задаются режимы герметизации (температура, давление, время выдержки под давлением и др.).

Основными характеристиками гидравлических прессов являются: рабочее давление, определяющее возможность герметизации конкретных приборов и микросхем; размеры плиты стола и величина рабочего хода плунжера, определяющие габариты пресс-форм.

Рассмотрим устройство и режимы работы гидравлического пресса-полуавтомата ДГ2432А (рис. 9.4). Данный пресс-полуавтомат предназначен для формования изделий из прессматериала методом прямого и литьевого прессования и относится к прессам ускоренного прессования. ДГ2432А оснащен гидроблоком аккумулятора, который обеспечивает высокие начальные скорости рабочих ходов ползуна или выталкивателя (при литьевом прессовании) регулируемые в широком диапазоне. Это позволяет вести ускоренное прямое прессование с высокотемпературным (до $120 - 130^{\circ}\text{C}$) предварительным подогревом прессматериала или получать тонкие армированные изделия при литьевом прессовании. Кроме того, пресс может быть эффективно использован для производства тонкостенных изделий

методом прямого прессования в прессформах нагретых до температуры 200 – 220 °С. Аппаратура пресса предусматривает работу в полуавтоматическом и наладочном режимах.



Рис. 9.4. Внешний пресса-полуавтомата ДГ2432А

При прямом или литьевом прессовании система управления прессом обеспечивает автоматическое поддержание заданной температуры матрицы и пуансона и режимы работы:

- с выталкивателем и без него;
- с отключением двигателя на время выдержки под давлением и без отключения двигателя;
- с подпрессовками и без подпрессовок.

Циклограмма работы пресса-полуавтомата ДГ2432А приведена на рис. 9.5.

Основной несущей конструкцией пресса является станина, в верхнюю поперечину которой встроен главный цилиндр. На цилиндре установлен бак и клапан наполнения. В нишах станины расположены цилиндры возврата, трубопроводы, механизм конечных выключателей ползуна.

Электроаппаратура пресса размещена в отдельном шкафу, закрепленном на фундаменте справа от станины пресса. Гидроагрегат закреплен на фундаменте слева от пресса.

Внешний вид пульта управления и схема пульта управления гидравлического пресса-полуавтомата ДГ2432А приведены на рис. 9.6 и 9.7.

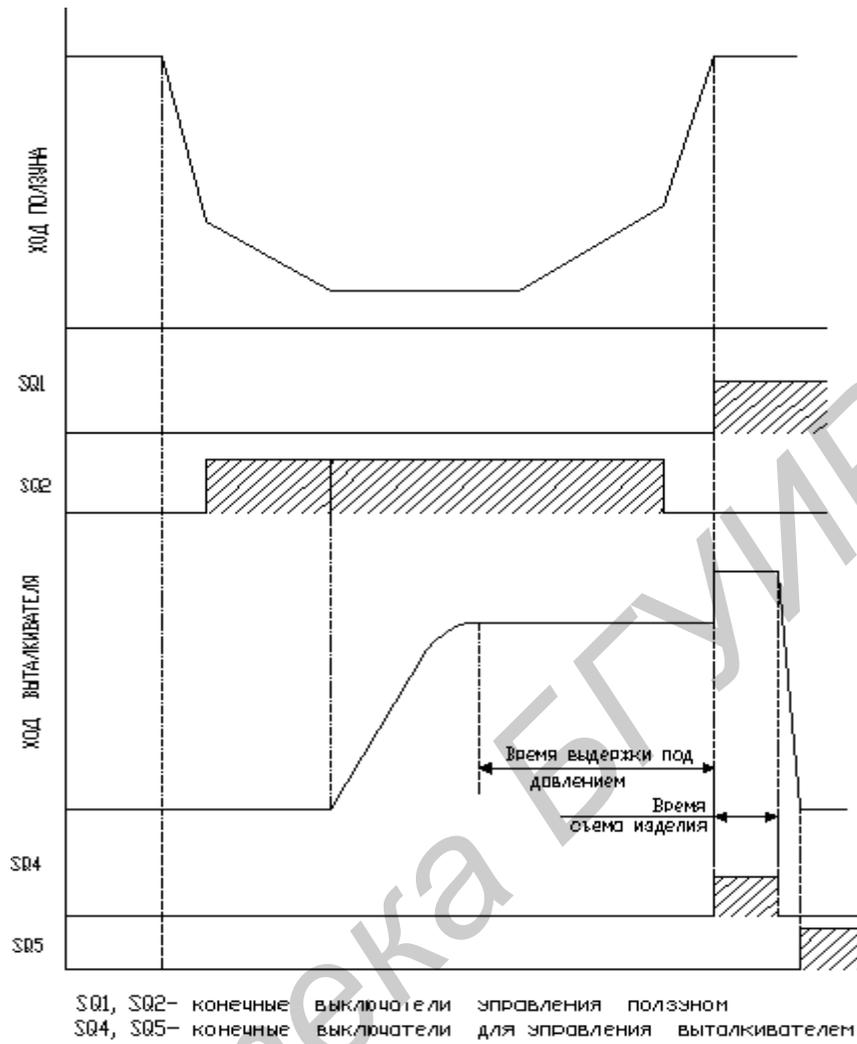


Рис. 5. Циклограмма работы гидравлического пресса-полуавтомата ДГ2432А



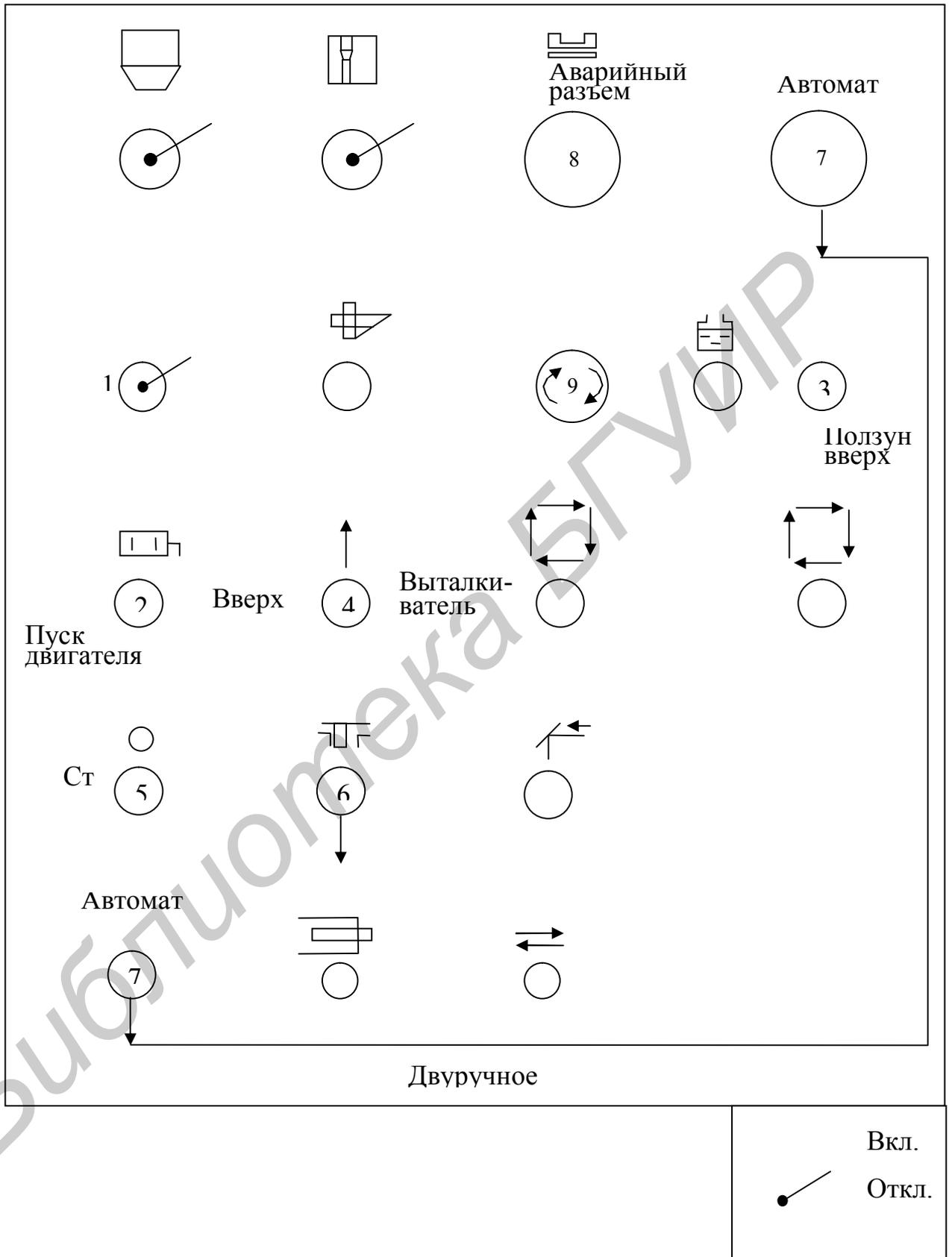


Рис. 9.7. Схема пульта управления гидравлического пресса-полуавтомата ДГ2432А

9.2 Порядок выполнения работы

1. Изучить описание лабораторной работы, инструкцию к технологическому оборудованию.

2. Получить у преподавателя вариант задания для проведения герметизации ИМС, партию рамок выводных и пресс-материал (2 таблетки по 100 г. или 3 таблетки по 85 г.) в соответствии с вариантом задания.

3. Повернуть ключ на пульте управления вправо (см. рис. 9.6).

4. Нажать кнопку РУЧНОЕ УПРАВЛЕНИЕ  на задней панели шкафа управления.

5. Нажать кнопку ПУСК ДВИГАТЕЛЯ  и кнопку ПЛУНЖЕР ВВЕРХ. При этом верхняя плита пресс-формы поднимается вверх.

6. Нажать кнопку СТОП .

7. Нажать кнопку АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕЖИМА  на задней панели шкафа управления.

8. Протереть верхнюю и нижнюю рабочие части пресс-формы бязью, смоченной спиртом, обдуть при необходимости сжатым воздухом.

9. Взять пинцетом или пальцами за торцы рамку с изделиями из тары.

10. Проверить визуально изделия на наличие помятых проволочных выводов, а также касаний выводов друг с другом.

Если не возможно визуально определить наличие касания проволочных выводов, контролировать изделия под микроскопом при увеличении 16^{\times} .

При обнаружении касаний проволочных выводов сообщить преподавателю.

11. Уложить рамку с изделиями на штыри кассеты, не допуская деформации рамки.

12. Повторить переходы 9-11 до заполнения всех гнезд кассеты.

13. Закрепить рамки с изделиями нажатием на рычаги кассеты.

14. Перевернуть кассету, взяв ее за ручки, перекрестным движением рук, и установить ее на пресс-форму, совместив ловители кассеты с гнездами в прессформе.

15. Отжать рычаги кассеты от себя.

При этом произойдет перегрузка рамок с изделиями в пресс-форму.

Рамки с микросхемами должны быть уложены так, чтобы первый вывод микросхемы совпадал с ключом корпуса на пресс-форме.

Допускается производить укладку рамок выводных в пресс-форму в ручную.

16. Снять аккуратно кассету с пресс-формы и поместить ее на рабочее место.

17. Проверить визуально качество укладки рамок с изделиями.

Рамки должны быть плотно надеты на фиксаторы и не должно быть смещения изделий относительно гнезд пресс-формы.

18. Произвести подогрев таблеток пресс-материала на установке высокочастотного разогрева таблеток, для чего:

- открыть крышку установки;
- поместить на пластину установки таблетки пресс-материала;
- закрыть крышку, при этом автоматически начнется разогрев таблеток;
- вынуть таблетки из установки после автоматического подъема крышки;
- проверить достаточность нагрева: таблетка должна иметь более темный цвет, чем до разогрева и слегка деформироваться при нажатии пальцами.

Время от подъема крышки установки высокочастотного разогрева таблеток до смыкания плит прессформы должно быть не более 30 с.

19. Поместить таблетки в камеру пресс-формы.

20. Нажать кнопку ПУСК ДВИГАТЕЛЯ  и две кнопки одновременно АВТОМАТ.

При этом произойдет смыкание пресс-формы и герметизация в автоматическом режиме.

Во время процесса герметизации проверять по манометру давление смыкания на соответствие таблице 1.

По окончании процесса герметизации произойдет автоматическое раскрытие прессформы.

21. Нажать кнопку СТОП .

22. Снять рамки с изделиями и поместить на рабочее место.

При затрудненном снятии изделий с фиксаторов обработать рамки сжатым воздухом не менее 2-5 с и снять изделия с помощью пинцета, не допуская деформации изделий.

Допускается в случае сильной адгезии пресс-материала к поверхности пресс-формы производить смачивание поверхности прессформы смазкой силиконовой, распыляя ее с расстояния 20-30 см.

После смачивания поверхности пресс-формы силиконовой смазкой сделать 2-3 опрессовки пресс-материалом, используя рамки-пустышки.

23. Нажать кнопку ПУСК ДВИГАТЕЛЯ .

24. Нажать кнопку ВЫТАЛКИВАТЕЛЬ ВНИЗ . Произойдет опускание плунжера.

25. Нажать кнопку СТОП .

26. Снять остатки облоя с верхней и нижней частей прессформы и литьевой камеры с помощью сетки или щетки.

27. Удалить частицы с пресс-формы сжатым воздухом с помощью клапана.

28. Повторить переходы 8-27 для следующей загрузки.

29. Поместить изделия в тару.

30. Повторить переходы 8-29 для всей партии.

После герметизации всей партии изделий произвести замер габаритных размеров всех корпусов с помощью штангенциркуля, смещение корпуса

относительно рамки выводной и смещение верхней части корпуса загерметизированных изделий относительно нижней части под микроскопом при увеличении 16^{\times} , используя окуляр 8^{\times} со шкалой. Размеры должны соответствовать указанным в таблице 2.

Таблица 9.2 Контролируемые габаритные размеры и смещения корпуса загерметизированных приборов в корпусе ТО-220

Длина (ширина) корпуса, мм	Толщина корпуса, мм	Смещение корпуса относительно рамки выводной, мм не более	Смещение верхней части относительно нижней, мм не более	Время выдержки в прессформе, мин
$9,4 \pm 0,11$ ($10,1 \pm 0,18$)	4,8-0,2	–	–	4 ± 1

Проверить визуально качество герметизации в соответствии с таблицей 9.3.

При обнаружении полностью или частично незагерметизированных изделий произвести повторную опрессовку, предварительно удалив литники на всех изделиях рамки, не нарушая целостности переключки, поместив рамку в ту же пресс-форму, где герметизировалась рамка, так, чтобы литники находились с недопрессованной стороны корпуса.

При этом необходимо предварительно нанести царапину скальпелем (ножом) на кромке рамки выводной, отмечая незагерметизированные изделия. После повторной опрессовки нанести царапину скальпелем (ножом) на лицевую поверхность корпусов, подвергшихся допрессовке для последующей сдачи этих изделий в изолятор брака.

Таблица 9.3. Требования к внешнему виду изделий в корпусе ТО-220

Что проверяется	Технические требования
1. Внешний вид корпуса	<p>Допускается:</p> <p>1.1 Наличие облоя в уголках между корпусом и выводами на расстоянии не более 1,5мм от корпуса.</p> <p>1.2 Наличие облоя по контуру корпуса и между выводами в плоскости их выхода из корпуса размером не более 0,2мм.</p> <p>1.3 Сколы в местах отрыва литников глубиной не более 0,5мм.</p> <p>1.4 Отдельные неровности на поверхности корпуса в пределах допусков на размеры.</p> <p>1.5 Незначительные царапины на поверхности корпуса, не препятствующие однозначному чтению маркировки.</p> <p>1.6 Следы от литников и выталкивателей в пределах габаритных размеров.</p> <p>1.7 Неметаллические включения в прессовочном материале.</p> <p>1.8 Следа от толкателей пресс-формы на поверхности корпуса или выступы от толкателей прессформы в пределах габаритных размеров;</p> <p>1.9 Незначительная деформация выводов;</p> <p>1.10 Наличие заусенцев в местах вырубки не более 0,1мм.</p> <p>1.11 Раковины, пузыри, сколы на поверхности корпуса глубиной до 0,3мм и размером не более 0,5мм в количестве не более 2 шт.</p> <p>1.12 Наличие облоя на боковых поверхностях теплоотвода до мест вырубки, сколы облоя на боковых поверхностях теплоотвода и корпуса в месте границы раздела пластмассового корпуса и теплоотвода размерами до 1,5мм.</p> <p>1.13 Наличие облоя на выводах на расстоянии не более 2мм от корпуса.</p> <p>1.14 Отдельные неровности на поверхности корпуса в пределах допуска на размеры, не препятствующие нанесению и чтению маркировки;</p> <p>1.15 Незначительные царапины на поверхности корпуса;</p> <p>Не регламентируется:</p> <ul style="list-style-type: none"> - цвет пластмассы (по образцам); - форма концов выводов. <hr/> <p>Не допускаются:</p> <ul style="list-style-type: none"> - наличие пресс-материала на поверхности теплоотвода; - недопрессовка приборов; - сплошная заливка выводов пресс-материалом; - выход облоя за перемычку рамки; - сколы, трещины на корпусе прибора; - закусывание выводов; - деформация отверстия теплоотвода.

ВАРИАНТ ЗАДАНИЯ

Вариант задания	Марка пресс-материала	Температура герметизации, °С	Давление прессования, Па	Время выдержки в пресс-форме, мин
1	MG40F	150 – 180	$300 \cdot 10^4$	3
2		150	$300 \cdot 10^4 - 600 \cdot 10^4$	3
3		180	$300 \cdot 10^4 - 600 \cdot 10^4$	3
4		170	$300 \cdot 10^4$	2 – 5

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Последовательность операций при герметизации методом прямого и литьевого прессования.
3. Требования к внешнему виду загерметизированных изделий в корпусе ТО-220.
4. Режимы проведения операции герметизации.
5. Контроль габаритных размеров и смещения корпуса загерметизированных изделий в корпусе ТО-220.
6. Оценка качества герметизации в зависимости от технологических режимов герметизации.
7. Выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каково назначение процесса герметизации изделий полупроводниковой электроники прессованием пластмасс.
2. Назовите способы герметизации изделий полупроводниковой электроники.
3. Каковы различия между компрессионным и трансферным прессованием?
4. Основные характеристики и режимы работы гидравлического пресса.
5. Основные требования к внешнему виду загерметизированных изделий в корпусе ТО-220.
6. Какой метод герметизации лежит в основе лабораторной работы? В чем его преимущество по сравнению с другими способами герметизации?

ЛИТЕРАТУРА

1. Бер А.Ю., Минскер Ф.Е. Сборка полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. - М.: Высш. шк., 1986.
2. Емельянов В.А. Корпусирование интегральных схем. - Мн.: Полифакт, 1998.
3. Антонов В.А. Технология производства электровакуумных и полупроводниковых приборов. – М.: Высш. шк., 1979.
4. Балашов Ю.С., Зенин В.В., Сегал Ю.Е. Сборочные операции и их контроль в микроэлектронике. - Воронеж, 1999.

Библиотека БГУИР

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

по дисциплинам

“ТЕХНОЛОГИЯ ИЗДЕЛИЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ”

“СПЕЦИАЛЬНОЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ
ОБОРУДОВАНИЕ”

для студентов специальностей
«Проектирование и производство РЭС»
и «Электронно оптические системы и комплексы»

Ответственный за выпуск Н.М. Тарасевич

Подписано в печать Формат 60x84 1/16. Бумага

Гарнитура

Печать . Усл. печ. л. Уч.- изд. л. Тираж 150 экз.

Заказ

Издатель и полиграфическое исполнение:

“ИНТЕГРАЛПОЛИГРАФМАШ”

Лицензия ЛП №.

Лицензия ЛВ №.

220013, Минск, Корженевского.