

621.382.81(07)

Р 851

№ 1338

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

ТАГАНРОГСКИЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
им. В. Д. КАЛМЫКОВА

Т

РУКОВОДСТВО

К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Р

по курсу

**ТЕХНОЛОГИЯ МИКРОСХЕМ
И МИКРОПРОЦЕССОРОВ**

Часть 4

Т

**Для студентов специальности 0705
всех форм обучения
и специальности 0648 дневного обучения**

И

Таганрог 1987

УДК 621.382.81.002(076.5)+681.325.5—181.48(076.5)

Наумченко А. С., Королев А. Н., Милешко Л. П. Руководство к лабораторным работам по курсу «Технология микросхем и микропроцессоров». Ч. 4. — Таганрог: ТРТИ, 1987. — 50 с. + 4 вкл.

Содержатся руководства по выполнению лабораторных работ 8...11, связанных с исследованием техпроцессов ВЧ-распыления материалов, маскирования и сборки ИМС.

Приводятся методы расчета технологических параметров термически окисленных слоев кремния, технологические основы ВЧ-распыления материалов в кислородной плазме контрагированного разряда, термического окисления кремния, сварки и пайки в микроэлектронике. Дается описание технологического оборудования.

Табл. 16, ил. 15, библиогр. 19.

Рецензент И. П. Пивоваров, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. 3-да «Прибой».

8. ТЕХНОЛОГИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАСПЫЛЕНИЯ СЛОЖНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

8.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение технологических основ ВЧ-распыления диэлектриков и получение навыков работы с высокочастотным технологическим оборудованием.

8.2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ВЧ-РАСПЫЛЕНИЯ

8.2.1. Физические основы ВЧ-распыления

Использование систем ионного распыления для получения диэлектрических пленок возможно в двух случаях: при реактивном ионном распылении и при ВЧ-распылении. Реактивное распыление находит ограниченное применение, во-первых, из-за трудностей управления синтезом и стехиометрией конденсирующихся диэлектрических пленок, во-вторых, из-за ограниченной номенклатуры получаемых этим методом простых диэлектрических материалов (оксидов, нитридов, гидридов).

Более широкое применение для получения диэлектрических пленок (особенно сложного состава) в вакууме получил метод ВЧ-распыления.

Применение систем ионного распыления на постоянном токе не обеспечивает достаточной чистоты и равномерности по толщине осаждаемых материалов. Кроме того, в обычных системах распыления на постоянном токе диэлектрические мишени вообще не распыляются, т. к. при подаче на электроды (катод, анод) соответствующих потенциалов поверхность диэлектрической мишени практически мгновенно заряжается положительно. Глеющий разряд не зажигается и мишень не бомбардируется положительными ионами. Однако если подавать на катод (мишень) переменное напряжение соответствующей амплитуды, то при частотах выше пороговой на диэлектрической мишени образуется избыточный отрицательный заряд относительно плазмы, который не успевает компенсироваться за время прохождения отрицательной полу-

волны приложенного напряжения поступающими на поверхность мишени положительными ионами (в силу различной подвижности ионов и электронов). Наличие отрицательного смещения на мишени обеспечивает постоянную бомбардировку последней положительными ионами, что приводит к распылению материала диэлектрической мишени. Возникает, как говорят, высокочастотная разновидность тлеющего разряда.

При частотах приложенного напряжения меньше порогового система анод — рабочее пространство (вакуумный промежуток) — катод (мишень) работает, в основном, как обычный линейный конденсатор, т. е. будет происходить перезаряд емкости этого конденсатора без возникновения тлеющего разряда. На низких частотах тлеющий разряд будет существовать, но будет иметь две области темного катодного пространства: у катода (мишени) и у анода, т. е. в этом случае анод тоже будет распыляться и система ионного распыления будет иметь два катода (и не одного анода). Распыление на переменном токе низкой частоты тоже находит применение. Например, в системах с повышенной скоростью напыления недиэлектрических материалов.

В высокочастотном тлеющем разряде имеется также темное катодное пространство, величина которого определяется давлением рабочего газа, и положительный светящийся столб (область плазмы).

Важной особенностью процесса ВЧ-распыления является снижение минимального давления рабочего газа с ростом частоты приложенного напряжения. В системах распыления на постоянном токе поставщиком электронов является вторичная (холодная) эмиссия с электродов (в частности, с катода). Эти электроны затем разгоняются в электрическом поле темного катодного пространства и, получив достаточную энергию, ионизируют молекулы остаточного и рабочего газов в разрядном промежутке (в области положительного светящегося столба). Для обеспечения устойчивого тлеющего разряда в этих системах необходимо к электродам прикладывать значительные напряжения (более 500В). В случае ВЧ-разряда генерация дополнительного количества электронов происходит при ионизации газа в разрядном промежутке электронами, колеблющимися в поле высокой частоты. И поскольку электроны на пути своего колебательного движения будут сталкиваться с молекулами газов, то движение их будет приобретать хаотичный характер, а при этом электрон будет поглощать энергию поля различной полярности. Таким образом, электроны ВЧ-разряда приобретают энергию не столько за счет ускорения электрическим полем темного ка-

тодного пространства, сколько накапливая ее при осциллирующем движении в переменном электрическом поле. Особенностью ионного ВЧ-распыления является необходимость существенного различия площадей анода и мишени. Чем меньше размер мишени (по отношению к аноду), тем более высокое напряжение создается между плазмой и меньшим электродом (мишенью) и происходит распыление этого электрода. Большой электрод (анод), т. к. напряжение между ним и плазмой существенно меньше, распыляться практически не будет. Постоянная составляющая напряжения смещения на катоде (мишени) в установившемся режиме практически равна амплитуде приложенного переменного напряжения и, естественно, определяет среднюю энергию ионов, бомбардирующих мишень.

Так как в системе ВЧ-распыления можно несколько снизить давление рабочего газа, то для предотвращения потерь заряженных частиц из разрядного промежутка к нему прикладывается продольное магнитное поле, оказывающее фокусирующее действие на заряды ВЧ-плазмы. Типичная схема (асимметричная) ВЧ-распыления приведена на рис. 8.1, где 1 — ВЧ-генератор; 2 — высоковольтный вакуумный ввод; 3 — катод (мишень); 4 — магнитная система; 5 — подложка; 6 — анод (подложкодержатель); 7 — согласующее устройство.

В этой системе использовано согласующее устройство *RC*-типа, хотя в других литературных источниках (и в практике) чаще встречается *LC*-согласование [1]. Потенциал смещения на мишени можно менять не только увеличением площади анода, но и с помощью согласующей цепочки *RC*, добываясь поступления значительной части мощности ВЧ-генератора в разряд, т. е. на мишень. В асимметричной системе подложки также будут подвергаться бомбардировке, но сравнительно слабой, что важно для уменьшения газопоглощения растущей пленкой.

Проблема синтеза химически сложных диэлектрических материалов в тонких слоях при ВЧ-распылении требует введения в рабочий газ активных составляющих, например, кислорода, т. е. используется так называемое высокочастотное реактивное распыление. Причем в этих системах в рабочий газ (*Ar*) добавляется обычно до 20% реактивного газа, что в принципе не освобождает этот метод от типичных технологических трудностей напыления сложных химических материалов, т. е. в конденсирующихся пленках наблюдается нарушение стехиометрии и затруднен синтез химических соединений, аналогичных химическому составу исходного материала. В последние годы предложены методы, обеспечивающие сжатие и

увеличение степени ионизации плазмы тлеющего разряда — метод магнетронного распыления и метод контрагирования разряда. В системе магнетронного распыления используются скрещенные электрическое и магнитное поля, что позволяет существенно увеличить путь движения заряженных частиц (особенно электронов) в разрядном промежутке, за счет изменения траектории их движения (движение по спирали или циклонде). Использование магнетрона для ионного распыления материалов позволяет повысить степень вакуума в рабочем объеме и повысить скорость распыления. Однако магнетронное распыление при низком давлении рабочего газа ($< 0,133$ Па) не обеспечивает необходимого синтеза химических соединений при конденсации.

Для решения этой проблемы было предложено распыление материалов (в частности, окисных сложных диэлектриков) при высоком давлении реактивного газа [2]. Схема ВЧ-распыления в кислородной плазме высокого давления показана на рис. 8.2, где 1 — катод (мишень); 2 — заземленный экран; 3 — высоковольтный вакуумный ввод; 4 — согласующее устройство; 5 — ВЧ-генератор.

В этой системе анодом (вторым электродом) служит заземленная плита вакуумной установки, т. е. анод находится или на одном уровне вокруг катода (мишени) или даже ниже его. Это позволяет создавать в системе электродов резко неоднородное электрическое поле. Поэтому условия для разряда создаются в сравнительно ограниченной области рабочего пространства — около катода (мишени). Светящийся столб такого разряда имеет вид факела, отчего такой разряд называют факельным. В плазме факельного разряда при высоком давлении рабочего газа находится большое количество ионизированных молекул активного газа, что способствует синтезу химических соединений материалов, распыляемых с мишени. В таких системах подложки располагаются на специальных держателях (с заземлением или без) в плазме тлеющего разряда на расстоянии от мишени 4... 20 мм при давлении рабочего газа 13,3... 1,33 Па.

8.2.2. Технологическая реализация метода ВЧ-распыления с контрагированием разряда

Системы ионного ВЧ-распыления с контрагированием разряда используются в настоящее время для напыления сложных диэлектрических окисных материалов (например, сегнетоэлектриков) на подложки из металлов (Pt, нержавеющая сталь), диэлектриков (поликор, монокристаллы MgO), полупровод-

ников (Si). Эти системы гораздо проще магнетронных, обеспечивают лучшие условия синтеза сложных химических соединений, но имеют меньшие скорости напыления. За время эксплуатации этих систем удалось существенно упростить катодный узел по сравнению с существующими (рис. 8.3), где 1—мишень диэлектрическая; 2—плита вакуумной установки (заземлена); 3 — фторопластовое уплотнение (вакуумное и высоковольтное); 4 — устройство крепления катода; 5 — катод с системой охлаждения.

Достоинство этой конструкции в отсутствии экранов, а также в том, что вся система, кроме мишени, находится вне вакуума, что облегчает согласование такого катодного узла с выходом ВЧ-генератора и предотвращает развитие паразитных разрядов и локальных пробоев между катодом и анодом (плитой). Подложки располагаются в плазме разряда над поверхностью мишени на расстоянии $\geq 4 \dots 5$ мм. Давление рабочего газа (O_2) при напылении сегнетоэлектрических пленок составляет $133 \dots 79,8$ Па. Оптимальное расстояние $R_{\text{мп}}$ $12 \dots 17$ мм. Температура подложки $350 \dots 500^\circ\text{C}$. Удельная мощность, подводимая к мишени, $8 \dots 10$ Вт/см². Время напыления для получения пленки толщиной $0,3 \dots 0,4$ мкм — $45 \dots 60$ мин.

8.3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

8.3.1. В данной работе производится напыление на подложки из кремния тонкой пленки сегнетоэлектрического материала — титаната бария толщиной $0,3$ мкм (время напыления 50 мин). Перед напылением кремниевые пластины $\varnothing 76$ мм проходят химическую обработку — кипячение в толуоле с последующей промывкой в дистиллированной воде. Затем подложки помещаются в установку для ВЧ-распыления. Напыление пленок титаната бария осуществляется без специального подогрева подложки, т. к. в тлеющем контрапированном разряде при расстоянии мишень—подложка $15 \dots 17$ мм подложки саморазогреваются за $3 \dots 4$ мин до температуры $350 \dots 375^\circ\text{C}$. Полученные структуры сегнетоэлектрик—полупроводник металлизуются для создания системы М—СЭ—полупроводник—М. Металлизация осуществляется на установке для вакуумного напыления лаборантом в промежуток между двумя занятиями. На втором занятии студенты производят измерение С—V-характеристик названных структур при различных величинах прикладываемого на затвор напряжения ($5, 10, 15, 20, 25$ В).

8.3.2. Применяемые материалы и оборудование

1. Тoluол.
2. Вода деионизованная.
3. Спирт этиловый ректификат.
4. Фильтры обеззоленные.
5. Мишень из титаната бария.
6. Установка вакуумного напыления УВН-62П.
7. ВЧ-генератор — ВЧД2—1,6/40.
8. Согласующие устройства.
9. стакан полиэтиленовый.
10. Установка для снятия $C \rightarrow V$ -характеристик.

8.4. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Произвести напыление слоя СЭ материала на кремниевую подложку — 1 пластина.
2. Снять серию $C \rightarrow V$ -характеристик на характеристикографе.
3. Определить пороговые напряжения полученных структур и построить график зависимости $U_{пор} = f(U_1)$.

8.5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОГО ЗАДАНИЯ

Получить у лаборанта кремниевые пластины, прошедшие химическую обработку.

Поместить их на подложкодержатель. Установить необходимое расстояние мишень — подложка 15... 17 мм.

Откачать вакуумную систему до давления 1,33 Па, включив форвакуумный насос. Напустить в систему кислород до давления 26,6 Па.

Включить ВЧ-генератор. Проконтролировать начало зажигания разряда.

Произвести напыление пленки в течение 50 мин.

Выключить ВЧ-генератор.

Выдержать пластины в вакууме при постоянной подаче кислорода 20 мин, (охладив их до температуры $\sim 70^\circ\text{C}$).

Перекрыть доступ кислорода.

Выключить вакуумный насос.

Разгерметизировать вакуумную систему и извлечь кремниевую пластину из рабочего объема. Положить ее в чашку Петри, проложив фильтрами. Передать лаборанту на операцию металлизации.

Примечание. Включение и выключение установки ВЧ-распыления производится под руководством преподавателя или лаборанта.

На втором занятии, получив у лаборанта свои образцы со структурами металл—сегнетоэлектрик—полупроводник производим снятие $C-V$ -характеристик на характеристикографе.

Установить пластину со структурами в зондовое устройство. Скоммутировать 2—3 элемента. Включить характеристикограф (с помощью лаборанта), подать напряжение, автоматически изменяющееся в пределах заданного (± 5 , ± 10 , ± 15 , ± 25 В). Снять серию $C-V$ -характеристик. Определить значение порогового напряжения. Построить график зависимости $U_{\text{пор}} = f(U_3)$ для отрицательных и положительных значений U_3 .

Оформить отчет по лабораторной работе.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Технология тонких пленок. Справочник/Под ред. Л. Майссела и Р. Глэнга — М. Сов. радио, 1977 Т. I — 662 с
- 2 Фесенко Е. Г., Дудевич В. П. Физика тонких сегнетоэлектрических пленок. — Ростов н/Д. РГУ, 1978 — 283 с

9. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ТЕРМИЧЕСКОГО ОКИСЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖЕК

9.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Освоение метода термического окисления поверхности кремниевых подложек.
2. Освоение методики определения толщины получаемого на кремнии оксидного слоя.

9.2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

9.2.1. Применение оксидных пленок на кремнии в технологии интегральных схем

В планарной технологии интегральных схем широко применяются оксидные пленки на базе SiO_2 . Защита поверхности кремния при помощи SiO_2 имеет определенные преимущества по сравнению с покрытиями из других диэлектрических материалов, таких как Si_3N_4 , SiO .

Диоксид кремния SiO_2 — диэлектрик универсального применения. В нем удачно сочетаются высокая химическая стойкость в окислительной среде, склонность к стеклообразованию, способствующая формированию беспористых пленок, удовлетворительные электрофизические свойства. Крайне важно, что SiO_2 легко растворяется в плавиковой кислоте HF ,

обеспечивая тем самым возможность фотогравировки планарных структур. В то же время по отношению к смеси $\text{HF} + \text{HNO}_3$ пленка SiO_2 практически стабильна, что позволяет использовать ее в качестве маски при селективном травлении кремния.

Одной из важнейших функций пленки диоксида кремния является маскирование поверхности кремниевой подложки от попадания на нее атомов примеси, что позволяет осуществлять диффузию только в те области, которые свободны от слоя SiO_2 . Защитные свойства слоя SiO_2 , препятствующего проникновению примеси, связаны с тем, что бор или фосфор, взаимодействуя при температурах диффузии с SiO_2 , образуют на его поверхности боросиликатное или фосфорно-силикатное стекло. Состав стекла определяется количеством атомов бора или фосфора, заместивших в SiO_2 атомы кремния. Имеется резкая граница силикатного стекла и оксида кремния, которая постепенно смещается к поверхности кремниевой подложки. Поэтому диффузия бора или фосфора в кремний будет происходить лишь тогда, когда боро- или фосфорно-силикатное стекло достигает границы кремния.

Другой важной функцией, которую выполняют слои SiO_2 на поверхности кремниевой подложки, является защита р—п-переходов активных и пассивных элементов интегральной схемы. В результате этого стабилизируются их параметры, уменьшается влияние поверхности кремния на электрические характеристики элементов схемы.

Кроме перечисленных применений, слои SiO_2 служат изолирующим основанием для контактных площадок и проводящих коммутирующих металлических соединений.

Качество получаемых на кремнии пленок SiO_2 определяется их структурой — наличие макродефектов структуры пленки часто является причиной технологического брака. Различают три вида макродефектов структуры: 1) поры, образующиеся при несовершенном росте кристалла; 2) границы кристаллов, возникающие благодаря склонности стеклообразной пленки к рекристаллизации; 3) микротрещины, формирующиеся из-за несоответствия коэффициентов термического расширения подложки и пленки. Дефекты последних двух видов могут быть устранены подбором технологического режима. Причиной же порообразования могут служить загрязнения и структурные дефекты на исходной поверхности кремния. Часто поры могут образовываться за счет окклюзии (захвата) газов, а также при слиянии точечных дефектов (вакансий) в кластеры. Наличие пор в значительной мере осложняет использование оксидной пленки в качестве маскирующего по-

крытия (поскольку поры являются каналами для диффузии) и в качестве изоляции (вследствие возможных замыканий алюминиевой разводки на микросхему в результате снижения порогового напряжения пробоя). Как пассивирующее покрытие пленка также непригодна, потому что при этом не обеспечивается герметичность структуры.

9.2.2. Метод термического окисления кремния

Методы формирования кремнеоксидных слоев на кремнии можно разделить на два основных класса. К первому классу относятся методы, в основе которых лежит нанесение окислов извне, когда кремний выполняет роль инертной подложки, ко второму — методы прямого окисления кремния, когда подложка является одним из компонентов химического взаимодействия.

К методам создания оксидных пленок на кремнии нанесением материала извне относятся термическое или катодное распыление кремния в разреженной кислородной атмосфере, катодное напыление диоксида кремния, образование оксидной пленки при химическом взаимодействии в газовой фазе (пиролиз силана или кремнеорганических соединений в окислительной атмосфере, гидролиз галогенидов кремния).

К методам собственно окисления кремния относятся различные варианты термического оксидирования (обработка поверхности кремния в окислительной атмосфере при повышенных температурах), электродинамическое (анодное) оксидирование, а также окисление в кислородной плазме при относительно низких температурах (порядка 300...400°C).

Термическое окисление кремния является одним из наиболее технологических и широко применяемых на практике методов. Этот процесс проводят в различных окислительных средах: сухом и увлажненном кислороде, водяном паре при атмосферном и повышенном (до 500 атм) давлении. Часто используют комбинированные режимы окисления, иногда для ускорения термического окисления прибегают к использованию активаторов.

Как правило, термическое окисление проводят в проточных системах, но иногда используют и оксидирование в герметичных реакторах.

Метод термического окисления не лишен и некоторых недостатков. Так, при создании толстых (2...3 мкм) изолирующих пленок (при изготовлении интегральной схемы с диэлектрической изоляцией) этот метод неприемлем, поскольку уже при толщине оксида порядка 1,5 мкм скорость его роста пре-

небрежимо мала. Метод термического окисления невозможно применить и при пассивации готовых структур из-за температурных ограничений (не более 500°C при применении алюминиевой разводки).

Процесс термического окисления происходит в три стадии:

- адсорбция окисляющих веществ на поверхности оксида;
- диффузия окисляющих веществ через окисный слой;
- реакция этих веществ с кремнием на границе раздела кремний—оксид кремния.

Общий характер процесса термического окисления кремния может быть представлен кинетической кривой $d = f(\tau)$ (при $T = \text{const}$), где d — толщина пленки оксида; τ — время (рис. 9.1). Условно кривая может быть разбита на четыре участка. Участок I, соответствующий начальному периоду окисления, описывается линейной функцией $d = k\tau$ (k — константа). Скорость роста пленки на этом этапе процесса постоянна и определяется стадией реакции на поверхности кремния. (В реальных условиях обычно эту стадию не наблюдают, поскольку поверхность кремния уже покрыта тонким слоем оксида). По мере роста пленки все большую роль начинает играть диффузия окислителя к границе раздела Si—SiO₂. Поэтому на участке II линейная зависимость сменяется линейно-параболической $d^2 + cd = k\tau$ (c — константа), которая определяется конкуренцией поверхностной реакции и диффузии. Относительный вклад этих процессов на участке II определяется коэффициентом c (возрастание c соответствует увеличению вклада поверхностной реакции). Преимущественно диффузионный этап процесса окисления осуществляется на участке III, для которого кинетическая кривая отражается параболическим законом $d^2 = k\tau$ или $d = k'\tau^{1/2}$. Этот закон, вытекающий из линейно-параболического при $c = 0$ отвечает отсутствию вклада в кинетику процесса поверхностной реакции. При дальнейшем росте пленки диффузия кислорода через слой оксида затрудняется и скорость роста начинает убывать заметнее, чем на предыдущих участках. На участке IV кинетическая кривая приближается к некоторому предельному значению $d_{\text{макс}}$, характерному для данной температуры, и параболический закон сменяется параболически-логарифмическим $d = k' \lg(1 + c_1\tau) + c_2\tau^{1/2}$, где k' , c_1 , c_2 — константы), а затем логарифмическим законом $d = k' \lg(1 + c_1\tau)$ при $c_2 = 0$.

Таким образом, термическое окисление кремния в технологически приемлемых интервалах температуры и времени (в проточных системах) приводят к образованию пленок пре-

дельной толщины. Так, при температуре порядка 1200°C невозможно получить термический окисел на кремнии толщиной более 1,5 мкм.

Все перечисленные зависимости (кроме чисто логарифмической) можно объединить степенной функцией вида $d = k\tau^n$. В самом деле, при $n = 1$ получается линейная зависимость $d = k\tau$; при $n = 1/2$ — параболическая $d = k\tau^{1/2}$ или $d^2 = k'\tau$; при $1/2 < n < 1$ — линейно-параболическая. Если $n < 1/2$, то получается параболически-логарифмическая зависимость, причем, чем меньше показатель степени, тем больше вклад логарифмического закона. В пределе при $n = 0$ получается $d = k = d_{\text{макс}}$, т. е. прямая, параллельная оси абсцисс и определяющая предельную толщину окисла.

Свойства оксидных пленок на кремнии, полученных методом термического окисления, варьируются в довольно широких пределах в зависимости от атмосферы окисления. Экспериментально установлено, что воспроизводимость результатов для сухого и влажного кислорода от одного эксперимента к другому составляет $\pm 4\%$; при окислении в паре воспроизводимость хуже. Установлено также, что пленки SiO_2 , полученные во влажном кислороде, почти не имеют дефектов, в то время как в пленках, полученных в атмосфере пара, их много. Кроме того, пленки, полученные в атмосфере сухого кислорода, более чувствительны к очистке поверхности перед окислением. Коэффициент преломления имеет самые низкие значения у пленок, полученных в парах воды; плотность пленок, полученных в парах воды, несколько ниже, чем в сухом кислороде. В табл. 9.1 сопоставлены некоторые характеристики стеклообразных оксидных пленок на кремнии, полученных методом термического окисления в различных условиях.

Таблица 9.1

Свойства оксидных пленок на кремнии, полученных методом термического окисления в различных условиях

Атмосфера окисления	Плотность, г/см ³	Показатель преломления	Удельное сопротивление, Ом·см	Диэлектрическая прочность, В/см	Количество дефектов в пленке
Водяной пар	2.00..2.20	1.45..1.46	$10^{15}..10^{17}$	$(7..9) \cdot 10^6$	Много
Сухой кислород	2.24..2.27	1.460..1.466	$3 \cdot 10^{15}..$ $..2 \cdot 10^{16}$	$2 \cdot 10^6$	Разброс от партии к партии

Атмосфера окисления	Плотность, г/см ³	Показатель преломления	Удельное сопротивление, Ом·см	Диэлектрическая прочность, В/см	Количество дефектов в пленке
Влажный кислород	2,18...2,21	1,435...1,458	—	—	Разброс до 300 см ⁻²
Кварц (для сравнения)	2,20	1,458...1,460	10 ¹⁵ ...10 ¹⁶	(1...5)·10 ⁸	

Следует также отметить экспериментально доказанную аддитивность общего процесса окисления, т. е. возможность применения комбинаций метода термического окисления в различных средах и использование прерываний процесса окисления, поскольку предыдущее окисление не влияет на последующее так же, как и перерыв в окислении.

9.2.3. Методика определения толщины оксидного слоя на кремнии

Защитные свойства слоя SiO₂ во многом определяются его толщиной. Поэтому естественно, что определение толщины оксидного слоя является важной технологической операцией при изготовлении интегральных схем. Измерение толщины относительно тонкой пленки сопряжено с трудностями и требует применения специальных методов. Наиболее прост в исполнении метод цветных оттенков Ньютона, основанный на наблюдении интерференционных цветов в отраженном свете. Интерференционные цвета обусловлены двойным отражением и преломлением белого света, проходящего через прозрачную пленку оксида кремния и отражающегося от непрозрачной кремниевой подложки. При этом за счет разности хода лучей возникает интерференция и поэтому тонкая прозрачная пленка кажется в отраженном свете окрашенной. Цветность ее зависит только от толщины и показателя преломления

$$\Delta = 2nd \sin \alpha, \quad (9.1)$$

где Δ — разность хода лучей; n — показатель преломления пленки; α — угол отражения; d — толщина пленки. Если наблюдение отраженного света производить под прямым углом к поверхности пленки, то

$$\Delta = 2nd. \quad (9.2)$$

Отсюда, зная показатель преломления материала, легко определить толщину на основании цвета пленки. Для SiO_2 $d = \Delta/3$, т. к. $n = 1,5$.

Зависимость толщины пленки от наблюдаемого цвета (при перпендикулярном освещении образца) приведена в табл. 9.2. Цветовые оттенки в табл. 9.2 повторяются примерно через каждые 0,22 мкм, проходя весь спектр от фиолетового к красному краю. Поэтому для однозначного определения толщины необходимо знать порядок интерференции, т. е. какое по счету повторение цветов наблюдается. Для определения порядка интерференции на окисленную пластину осторожно наносят каплю плавиковой кислоты и в оксиде вытраивается лунка до поверхности кремния. По периферии этой лунки наблюдается ряд колец. Количество темных красно-фиолетовых колец и определяет порядок интерференции. Например, зеленый цвет оксида на втором кольце (полностью выявлено одно кольцо) соответствует толщине 0,33 мкм, а на четвертом кольце (полностью выявлены три кольца) — толщина 0,72 мкм. Этот простой, не требующий оборудования метод позволяет определить толщину оксида с погрешностью 5...10%. С увеличением толщины пленки погрешность возрастает. Методом цветовых оттенков нельзя определять толщину свыше 1,0 мкм, когда цветность практически пропадает.

Достаточно прост и инструментальный метод определения толщины оксида при помощи микроинтерферометра МИИ-4. Сущность этого метода заключается в измерении высоты «ступеньки» после травливания оксида с части пластины. При наблюдении ступеньки в поле зрения микроинтерферометра на фоне поверхности видны серии интерференционных полос, которые претерпевают излом на ступеньке. Толщина пленки пропорциональна сдвигу интерференционных полос одного порядка

$$d = (\Delta x/x) (\lambda/2), \quad (9.3)$$

где Δx — сдвиг центральной полосы (в относительных единицах); x — расстояние между соседними интерференционными полосами (в относительных единицах); λ — длина волны середины видимого спектра (0,55 мкм), $\lambda/2 = 0,27$ мкм соответствует сдвигу полос на ступеньке, высота которой соответствует расстоянию между соседними интерференционными полосами (в белом свете). Погрешность измерения толщины данным методом составляет примерно $\pm 300 \text{ \AA}$. Этот метод позволяет измерять толщину пленок SiO_2 до 20...30 мкм.

Таблица 9.2

Определение толщины пленок методом цветowych оттенков Ньютона

d , мкм	Порядок интерференции	Оттенок
0,050	I	Бежевый
0,0700		Коричневый
0,0960		Темно-коричнево-красный
0,1020		Индиго
0,1433		Голубовато-серый
0,1590		Светло-голубой
0,1688		Зелено-голубой
0,1700		Металлический
0,1786		Бледно-зеленый
0,1836		Желто-зеленый
0,1883		Светло-зеленый
0,1916		Зелено-желтый
0,1963		Золотисто-желтый
0,2000		Светло-золотистый
0,2200		Золотистый
0,2216		Оранжевый
0,2490		Светло-красный
0,2500	Красный	
0,2700	Красно-фиолетовый	
0,2753	II	Пурпурный
0,2810		Пурпурно-фиолетовый
0,2886		Фиолетовый
0,3000		Фиолетово-голубой
0,3033		Индиго
0,3100		Голубой
0,3160		Темно-голубой
0,3200		Зелено-голубой
0,3400		Светло-зеленый
0,3500		Зеленый
0,3780		Желтовато-зеленый
0,3830		Грязно-зеленый
0,3900		Желтый
0,4100		Светло-оранжевый
0,4193		Телесный
0,4200		Темно-розовый
0,4400		Красный
0,4476	Фиолетово-красный	
0,4586	Фиолетовый	
0,4600	Красно-фиолетовый	
0,4757	III	Голубовато-фиолетово-серый
0,4800		Голубовато-фиолетовый
0,4980		Голубой
0,4983		Зелено-голубой
0,5000		Голубовато-зеленый
0,5200		Зеленый
0,5403		Тускло-зеленый
0,5526		Желто-зеленый

d , мкм	Порядок интерференции	Оттенок
0,5606		Зелено-желтый
0,5703		Желто-серый
0,5800		Светло-оранжевый
0,5813		Сиреневато-серовато-красный
0,6000		Темно-розовый
0,6088		Карминово-красный
0,6300		Фиолетово-красный
0,6423	IV	Серовато-красный
0,6690		Голубовато-серый
0,6800		Голубоватый
0,6826		Голубовато-зеленый
0,7200		Зеленый
0,7700		Желтоватый
0,7793		Бледно-розовый
0,8000		Оранжевый
0,8200		Желтовато-розовый
0,8500		Светло-красновато-фиолетовый
0,8600		V
0,8700	Голубовато-фиолетовый	
0,8893	Бледно-зелено-голубоватый	
0,8900	Голубой	
0,9200	Голубовато-зеленый	
0,9500	Желто-зеленый	
0,9700	Желтый	

9.3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

9.3.1. Лабораторное задание

1. Получить пленки SiO_2 на кремнии методом термического окисления во влажном кислороде.

2. Измерить толщину полученных оксидных пленок методом цветowych оттенков Ньютона и при помощи микроинтерферометра МИИ-4.

9.3.2. Оборудование

1. Трубчатая однозонная печь горизонтального типа с рабочей температурой до 1200°C .

2. Кварцевая труба с шлифом.

3. Кислородный баллон с редуктором.

4. Pt — Pt/Rh — термopapa.

5. Потенциометр ПП-63.

6. Кварцевые держатели для пластины.

7. Установка вакуумного напыления.
8. Микронтерферометр МИИ-4.
9. Фторопластовый стакан.
10. Пинцет с фторопластовыми наконечниками.
11. Секундомер.
12. Корундовая игла.
13. Линейка.
14. Бюкс.

9.3.3. Материалы

1. Кремний *n*-типа с удельным сопротивлением 0,50... 4,5 Ом · см (в виде пластины, полированных алмазной пастой).
2. Кислота плавиковая (49%-я).
3. Кислота азотная (конц.).
4. Лак ХСЛ.
5. Растворители: толуол, этиловый спирт.
6. Алюминий (в виде тонкой проволоки).
7. Фильтровальная бумага.

9.3.4. Технология термического окисления кремния

Установка для термического окисления кремния (рис. 9.2) состоит из горизонтальной трубчатой печи 8, в которой помещена кварцевая труба (реактор) 9 со шлифом 6. В реактор при помощи держателя 11, изготовленного из кварца, помещаются пластины кремния 7 в вертикальном положении перпендикулярно истоку газа. Водяной пар, генерируемый в барботере 5 при температуре 90... 100°C потоком кислорода из баллона 1 через редуктор 2, ротаметр 3 и кран 4 подается в реакционную камеру. Термопара 10 позволяет контролировать температуру окисления. При помощи двухходового крана 4 в камеру можно пропускать или сухой, или увлажненный кислород.

Полированную с двух сторон алмазной пастой пластину разрезают при помощи линейки и корундовой иглы на шесть секторов (для экономии материала), последние обезжиривают кипячением в толуоле в течение 5 мин, после чего кипятят в концентрированной азотной кислоте до удаления бурых паров NO₂, быстро и многократно промывают в дистиллированной воде, затем в течение 2—3 мин обрабатывают плавиковой кислотой (фторопластовая посуда!) для удаления оксида с поверхности и вновь тщательно промывают дистиллированной водой. Подготовленные к окислению шесть секторов пластины хранят в бюксах под слоем этилового спирта.

При подготовке установки к работе включают печь и выводят ее на режим (1150°C) при потоке влажного кислорода через реакционную камеру 20...30 л/ч (по ротаметру). Барботер разогревают до 95°C, шесть секторов, полученных из одной пластины, вынимают из бокса со спиртом, высушивают между листками фильтровальной бумаги и помещают в кварцевый держатель. Открыв входной шлиф реакционной камеры, вдвигают держатель с образцами в изотермическую зону печи. Закрыв камеру (поток кислорода через барботер отрегулирован!), начинают процесс окисления.

Через 10, 20, 30, 40, 50 и 60 мин (по секундомеру), выдвигая держатель, снимают по одной пластине и определяют толщину полученного окисла. На основании полученных данных строят кинетическую кривую (изотерму) в координатах: толщина окисла d , мкм; время τ , мин и $\lg d - \lg \tau$ (рис. 9.3, а, б). По углу наклона в логарифмических координатах определяют показатель степени в уравнении $d = k\tau^n$ и делают вывод о характере окисления (линейный, параболический и т. п. законы).

9.3.5. Техника измерения толщины окисных пленок на кремнии

Толщину сравнительно тонких (до 1 мкм) пленок определяют методом цветовых оттенков Ньютона (см. табл. 9.2). Для определения ее на поверхности оксида с помощью заостренной фторопластовой палочки наносят каплю плавиковой кислоты. После протравливания оксида до поверхности кремния пластину промывают дистиллированной водой, подсчитывают число темных красно-фиолетовых колец для оценки порядка интерференции и определяют цветность оксида при перпендикулярном падении дневного света.

Толщину пленок более 1 мкм, на которых отдельные цвета спектра уже неразличимы, рекомендуется определять при помощи микронинтерферометра МИИ-4. Для этого половину пластины закрывают лаком ХСЛ, высушивают под электрической лампой в течение 20 мин, а затем травлят оксид с незащищенной части пластины в плавиковой кислоте. При этом на поверхности подложки образуется ступенька. Для улучшения отражательной способности поверхности рекомендуется напылить в вакууме алюминий слоем около 500 Å (рис. 9.4).

Пластины помещают на предметный столик интерферометра МИИ-4 таким образом, чтобы ступенька попадала в поле

зрения и была расположена в окуляре вертикально. Фокусировку производят при отключенной интерференционной призме (см. инструкцию к МИИ-4) После этого вводят призму и наблюдают излом интерференционных полос на ступеньке (рис. 9.5). При помощи окуляр-микрометра измеряют сначала расстояние между средней наиболее интенсивной линией и соседней (сверху или снизу) — x делений. Затем определяют сдвиг средней полосы на ступеньке — Δx делений. Тогда величина сдвига в долях интервала между соседними интерференционными полосами равна $\Delta x/x$, а толщина окисла $d = 0,27 \Delta x/x$, мкм.

9.4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Лабораторное задание.
3. Описание установки термического окисления.
4. Результаты кинетических исследований термического окисления во влажном кислороде в виде графиков $d = f(\tau)$, $\lg d - \lg \tau$ с расчетом показателя степени в кинетическом уравнении $d = k\tau^n$ и выводом о характере процесса.
5. Описание методики и результатов определения толщины термического окисла.
6. Технологическая карта процесса термоокисления кремния в атмосфере влажного кислорода.
7. Выводы по работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Парфенов О Д — Технология микросхем. — М: Высш школа, 1986. — 320 с.
- 2 Блинов И Г, Кожытов Л. В — Оборудование полупроводникового производства — М: Машиностроение, 1986. — 264 с.

10. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ПРОЦЕССА ФОТОЛИТОГРАФИИ НА ТОЧНОСТЬ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ РАЗМЕРОВ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОСХЕМ

10.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование при помощи метода планирования эксперимента влияния различных факторов фотолитографического процесса на точность передачи размеров элементов топологического рисунка с фотошаблона на фоторезистивный слой на кремниевых подложках.

10.2 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССА ФОТОЛИТОГРАФИИ

Пользуясь литературой [1, 3, 6—11], необходимо ознакомиться с основами фотолитографии, изучить методики измерений и составления уравнения регрессии.

Литографией называется процесс создания на поверхности подложки рельефа вспомогательной или основной маски (защитного покрытия). Маски из резистивных материалов используются для формирования рисунка рабочих областей или основных масочных слоев (например, в слое SiO_2 на Si).

Литографический процесс включает в себя следующие основные операции: нанесение на подложку вещества чувствительного к излучению — резиста; экспонирование резиста путем воздействия на него актиничным излучением; проявление скрытого изображения обработкой в проявителях и получение защитного рельефа.

Актиничное излучение — излучение, энергия кванта которого достаточна для воздействия на светочувствительный состав, что вызывает фотохимические реакции и изменение физических и химических свойств облученных областей покрытия.

10.2.1. Виды литографии

В зависимости от вида облучения: ультрафиолетового, электронного, рентгеновского и ионного, литографию делят на фото-, электроно-, рентгено- и ионолитографию, соответственно (табл. 10.1). Согласно этому различают фото-, электроно-, рентгено- и ионорезисты. Известны два типа фотолитографии — контактная и проекционная. Перенос изображения фотошаблона на подложку в первом случае осуществляется методом контактной фотопечати, а во втором случае — проекционный. Проекционная печать по сравнению с контактной обеспечивает больший срок службы фотошаблонов и отсутствие искажений, связанных с износом фотошаблонов, но требует более дорогостоящего оборудования.

Контактный метод является основным в полупроводниковой промышленности, т. к. прост, дешев и высокопроизводителен. Анализ современного состояния методов фотолитографии показывает, что не все возможности контактной фотолитографии до конца реализованы. Так, в ряде случаев удается улучшить результаты путем оптимизации фотолитографического процесса методом планирования эксперимента.

Методы электронно-лучевой и рентгеновской литографии являются перспективными для получения элементов субмик-

ронных размеров. Принципы переноса изображения заданной конфигурации на поверхности подложки, используемые в электронно-лучевой и рентгеновской литографии, показаны на рис. 10.1 и 10.2.

На рис. 10.1: 1 — электронная пушка; 2 — устройство за-
пирающая луча; 3 — первая конденсорная линза; 4 — вторая
конденсорная линза; 5 — верхние отклоняющие катушки;
6 — третья конденсорная линза; 7 — проектируемый шаблон;
8 — первая проекционная линза; 9 — апертура; 10 — вторая
проекционная линза; 11 — детекторы вторичных электронов;
12 — подложка с электронорезистом. На рис. 10.2: 1 — анод;
2 — рентгеновские лучи; 3 — маска; 4 — рентгенорезист;
5 — пластина (основание); 6 — метка совмещения; 7 — де-
тектор рентгеновского излучения.

Таблица 10.1

Сравнительные характеристики методов литографии

Метод литографии	Стандарт- ная ширина линии, мкм	Плотность дефектов, см ⁻²	Произво- димость, штук/ пласт/ч	Относительная стоимость
Контактная фотолитография	3	2,5	50	1
Проекционная фотолитография	2	1	65	6,2
Проекционная фотолитография с применением УФ света	1	1	50	6,7
Проекционная фотолитография с использованием повторителей	1	1	20	11,7
Электронилитография	0,5	0,5	10	50
Рентгенолитография	0,3	1	20	10

10.2.2. Фотошаблоны

Прежде чем приступить к фотолитографическим операциям, необходимо изготовить фотооригинал и на его основе фотошаблон или комплект фотошаблонов.

Применяют эмульсионные, металлизированные и прозрачные (цветные) фотошаблоны. Эмульсионные фотошаблоны изготавливают на «безусадочной» фотопленке и на фотопластинах.

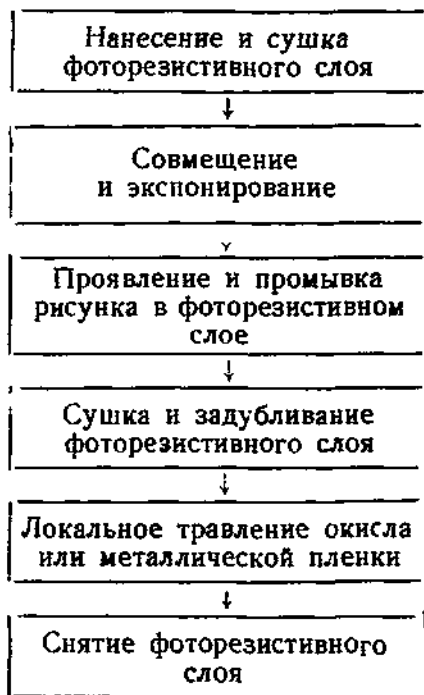
Для изготовления металлизированных фотошаблонов используют оптическое стекло К-8 с рисунком, выполненным в слое хрома. Они имеют ряд преимуществ перед эмульсионны-

ми: высокая износостойкость, механическая и термическая стабильность, влагостойкость, резко очерченные края рисунка, отсутствие вуали и др.

Транспарентный фототаблон — фототаблон, рисунок которого сформирован в диэлектрическом слое, не пропускающим активное и пропускающим неактивное для фоторезиста излучение. Например, слой оксида железа полупрозрачен для видимого и непрозрачен для ультрафиолетового света.

Схематическое изображение рельефа для негативного (а) и позитивного (б) фоторезистов приведено на рис. 10.3, где 1 — оптимальное время экспонирования; 2 — недостаточное время экспонирования; 3 — завышенное время экспонирования.

10.2.3. Схема технологического процесса фотолитографии



При проведении нескольких последовательных процессов фотолитографии для совмещения элементов рисунка на фототаблоне с рисунком на поверхности подложки используют

реперные знаки, представляющие собой вписывающиеся друг в друга фигуры. Качество применяемых фотошаблонов во многом определяет качество фотолитографии.

10.2.4. Оборудование для фотолитографии

При наличии фотолитографического оборудования, обеспечивающего автоматическое проведение всех операций, контактная фотолитография позволяет изготовить элементы размером $2 \cdot 2,5$ мкм [4].

Сравнительная характеристика установок контактного совмещения и экспонирования дана в табл. 10.2.

Теоретически возможности фотолитографии определяются длиной волны используемого света и составляют $0,3 \dots 0,4$ мкм, однако на практике они не достигаются.

Ограничение минимального размера обусловлено дифракционными эффектами, возникающими из-за наличия зазора между шаблоном и подложкой, который достигает иногда десятка микрометров.

Реализовать размеры близкие к теоретическим, удается, используя гибкие фотошаблоны, которые позволяют свести к минимуму зазор между фотошаблоном и подложкой. В данном случае усложняется конструкция устройств совмещения гибкого фотошаблона с образцом, повышаются требования к поверхности подложки и требуется более высокая обеспыленность среды по сравнению с обычной фотолитографией [4].

10.2.5. Фоторезисты

Под действием актиничного излучения в фоторезисте происходят фотохимические процессы, которые могут привести к уменьшению растворимости экспонированной области (негативные фоторезисты) или к повышению растворимости экспонированной области (позитивные фоторезисты).

В облучаемых участках негативного фоторезиста протекает реакция фотополимеризации или иницированной сшивки линейных полимеров [6]. После проявления на подложке остается рельефное изображение из облученного фоторезиста (рис. 10.3, а), обладающее защитными свойствами.

В случае позитивного фоторезиста в облучаемых участках происходит реакция фотолиза (разложения) с образованием веществ, растворимых в проявителе. В результате проявления на подложке остается рельефное изображение необлученного фоторезиста (рис. 10.3, б), обладающее резистивными свойствами.

Таблица 10.2.

Сравнительная характеристика установок контактного совмещения
и экспонирования с визуальным контролем [5]

Параметры	Модель, фирма-готовитель				
	ЭМ—576 СССР	СА-280 ОН США	I и B 2180 VEB, ГДР	PLA—520A CANON Япония	PLA 500A CANON Япония
Погрешность совмещения элементов фотошаблона и подложки, мкм	0,5	0,5	0,3	0,2	0,75
Размер минимального элемента изображения на подложке, мкм	2	1	1	0,5	3
Диаметр подложки, мм	До 100	До 100	До 76	До 100	До 125
Производительность, шт/ч	160	—	130...150	90...100	100
Увеличение микроскопа, крат	≤ 257	—	200	—	—

В состав фоторезистов входят следующие компоненты: светочувствительные составляющие, пленкообразующие продукты и растворители.

Позитивные фоторезисты (типы ФП) изготавливаются на основе светочувствительных соединений нафтохинондиазидов (НХД).

Негативные фоторезисты (типа ФН) можно разбить на три группы:

1) на основе эфиров коричной кислоты и поливинилового спирта — поливинил-циннаматы (ПВЦ) (ФН-5ТК и ФН-4ТВ с добавкой оптического сенсбилизатора);

2) на основе циклокаучуков с добавкой сшивающего сенсбилизатора (ФН-11);

3) на основе фотополимеризующихся композиций (акриловые или стирольные сополимеры) с добавкой инициатора полимеризации (ФСТ, ФПК-4В).

Характеристики и составы ряда отечественных фоторезистов приведены в табл. 10.3.

Фоторезисты характеризуют следующими параметрами: разрешающей способностью, светочувствительностью, стойкостью к воздействию агрессивных факторов, адгезией и стабильностью [6].

Разрешающая способность (РС) — число полос из фоторезиста, разделенных промежутками такой же ширины на длине 1 мм (число линий на мм). РС зависит от толщины фоторезистивного слоя и применяемого фотолитографического оборудования. При толщине слоя позитивных фоторезистов 0,2...0,3 мкм достигается предельная РС 1000...2000 лин./мм. Однако такой толщины пленки фоторезиста нельзя получить с малой дефектностью.

Поэтому обычно используют фоторезистивные слои с толщиной не менее 0,7...1 мкм. Характеризуя РС фоторезиста, целесообразно указывать минимальные размеры воспроизводимых элементов при данной толщине пленки фоторезиста в стабильных условиях экспонирования и проявления.

Светочувствительность — величина, обратная времени экспонирования, требующегося для перевода фоторезиста в нерастворимое (ФН) или растворимое (ФП) состояние.

Стойкость к воздействию агрессивных факторов определяется по числу дефектов в слое фоторезиста на единице площади после воздействия травителей на подложку (щелочестойкость, кислотостойкость).

Адгезия фоторезиста к подложке определяет уход размеров элементов в процессе проявления и подтравливания при последующем формировании рельефа, характеризует возмож-

ность применения определенного фоторезиста на данном типе подложки.

Стабильность определяет воспроизводимость элементов минимальных размеров при использовании различных партий фоторезиста и при различных сроках и условиях их хранения.

10.2.6. Технологические операции процесса фотолитографии

Создание элементов микросхем при помощи метода фотолитографии осуществляется по технологической схеме, показанной на рис. 10.4.

Нанесение фоторезиста

Для нанесения фоторезиста используются методы пульверизации (распыление или электростатическое осаждение), окунание пластины и центрифугирование. Выбор способа нанесения фоторезистивного слоя производится в зависимости от назначения слоя фоторезиста, его свойств и вязкости.

Для удаления посторонних примесей фоторезист перед нанесением фильтруется.

Наибольшее распространение получил метод центрифугирования — растекание фоторезиста под действием центробежных сил. Обработанную (хорошо смачивающуюся фоторезистом) подложку помещают на столик центрифуги и подают на нее порцию фоторезиста из дозатора. Пластина укрепляется на столике центрифуги с помощью механических фиксаторов или с помощью вакуумного присоса.

Скорость вращения центрифуги 1000...6000 об/мин, время центрифугирования 20...30 с.

Этим способом целесообразно наносить фоторезистивные слои толщиной до 2 мкм. Толщину слоя фоторезиста выбирают из условий, обеспечивающих наименьшее количество дефектов и наибольшую разрешающую способность. Более толстые слои фоторезиста содержат меньше «проколов», но при этом их разрешающая способность уменьшается.

Возможно двукратное нанесение фоторезиста с промежуточной подсушкой нанесенного слоя. В результате подрастворения первого слоя повторное нанесение не обеспечивает удвоения толщины фоторезиста (так, для фоторезиста ФП-383 один слой ~ 0,8 мкм; два слоя ~ 1,2 мкм) [7].

Толщина пленки фоторезиста $\delta_{фр}$ связана с кинематической вязкостью ν фоторезиста и с угловой скоростью вращения центрифуги ω следующим выражением:

Основные параметры жидких фоторезистов [7]

Марка фоторезиста	Назначение	Спектральная чувствительность, нм	Характеристики по ТУ			Проявитель	Состав	
			Разрешение, лин/мм	Толщина пленки, мкм	Минимальные размеры элементов при толщине фоторезиста 0,8 мкм		Растворитель	Сухие компоненты
ФП-983	Полупроводники, ИС, металлические пленки	330...480	400	1,0 ± 0,1	1	2% Na ₃ PO ₄	Диоксан	НХД (продукт 383) ФФС
ФП-Р11-7 (6-14-1061-74)	То же и окисные пленки	—	400	0,9 ± 0,2	1,5	0,5% КОН	ДМФ, МЦА, МЭК	НХД (продукт 7), ФФС
ФН-5ТК (6-14-252-77)	Полупроводники, металлические пленки	250...460	15...20 мкм	1,0	4	Толуол, ТХЭ	МЦА	ПВЦ + оптический сенсibilизатор тиазолин
ФН-11 (6-14-631-77)	Полупроводники, сталь	330...380	10 мкм	1,5...2,0	5	Уайтспирит	Кснлол, толуол	Циклокаучук + сливающий агент — бисазид

Примечание. МЦА — метилцеллозольвацетат, ТХЭ — трихлорэтилен, ФФС — фенолформальдегидные смолы, ДМФ — диметилформамид, МЭК — метилэтилкетон, ДЭК — диэтилкетон, ПВЦ — поливинилпирролидон; НХД — нафтохинондиазид.

$$\delta_{\text{фр}} = k_0 \sqrt{v \omega},$$

где k_0 — коэффициент, учитывающий концентрацию фоторезиста.

В процессе хранения вязкость фоторезистов изменяется. Поэтому скорость вращения центрифуги выбирают в зависимости от величины вязкости фоторезиста, измеренной перед его нанесением.

Толщина и равномерность фоторезистивного слоя зависят от скорости центрифугирования. При скоростях центрифугирования менее 2000 об/мин разброс по толщине достигает $\pm 10\%$. При больших скоростях (4000...5000 об/мин) получают более тонкие пленки фоторезиста с разбросом по толщине не выше $\pm 2\%$.

Выбор толщины фоторезиста осуществляют путем компромиссного решения, обеспечивающего получение заданной толщины пленки с учетом равномерности слоя и минимального числа «проколов» в нем.

Зависимость времени экспонирования t_e от температуры сушки T_c представлена на рис. 10.4.

Недостатки метода центрифугирования: наличие валика фоторезиста на краях подложки, размеры которого зависят от вязкости фоторезиста, скорости вращения и геометрии пластины; наличие внутренних напряжений и проколов, образующихся за счет засасывания пылинок к центру вращающейся пластины [7].

Для получения слоев фоторезиста толщиной ≥ 3 мкм следует использовать способ пульверизации или применять сухой пленочный фоторезист.

При двухсторонней фотолитографии наилучшим методом является окунание подложки в жидкий фоторезист.

Сушка фоторезистивного слоя

Первая сушка фоторезиста проводится для удаления растворителя и окончательного формирования слоя фоторезиста, а также для повышения адгезии к оксидной или металлической пленке. После сушки фотослой не должен быть липким при контакте с фотошаблоном и должен обеспечивать стойкость фоторезиста в проявителе. В процессе сушки в фоторезистивном слое создаются внутренние напряжения, поэтому сушку необходимо производить при постепенном увеличении температуры, а распределение тепла по подложке должно быть равномерным. От этой операции зависят время экспонирования и точность передачи размеров.

Взаимосвязь температуры сушки и времени экспонирования показана на рис. 10.5.

Как следует из графика изменение температуры в области 1 вызывает значительное изменение времени экспозиции; при сушке в области 2 оптимальных температур время экспозиции изменяется меньше.

Режим сушки должен отвечать следующим основным требованиям:

растворитель должен удаляться без нарушения резистивного слоя;

для лучшей адгезии температура сушки должна приближаться к температуре плавления пленкообразующего агента фоторезиста;

сушка не должна приводить к термической сшивке полимерной основы, что может вызвать сложность экспонирования и увеличение времени проявления фоторезиста;

время сушки при выбранной температуре ограничено стойкостью светочувствительной составляющей фоторезиста [7].

Сушка осуществляется при защите от пыли и активного излучения. Для каждого фоторезиста существуют определенные температурные режимы обработки (табл. 10.4).

Кроме термической сушки для жидких фоторезистов используют инфракрасную сушку, при температуре 120...130°C. Это позволяет сформировать фотослой за 2...3 мин. Применение СВЧ-печей для сушки фоторезиста уменьшает время сушки до 2...3 с, сокращая также время экспонирования и проявления фоторезистивного слоя.

Экспонирование фотослоя

Экспонирование — это создание требуемого рельефа в пленке фоторезиста при помощи фотошаблона под действием активного излучения.

Выбор источников облучения определяется спектральными характеристиками фоторезиста. Область спектрального поглощения современных фоторезистов лежит в диапазоне длин волн 250...480 нм. В связи с этим в качестве активных источников применяются ртутно-кварцевые лампы ДРШ-250, ДРШ-500 с освещенностью (30...50) · 10³ люкс с параллельным пучком лучей и высокой равномерностью освещений. Экспонирование производится через фотошаблон. Время экспонирования определяется интенсивностью излучения и толщиной фоторезистивного слоя.

При контроле с помощью микроскопа в случае недоэкспонирования наблюдается размытость края фоторезиста, а при

перезэкспонировании — двойной край (клин фоторезиста) (рис. 10.3).

При использовании любого фоторезиста для каждой партии фоторезиста подбирают режим экспонирования и проявления. Эти операции неразрывно связаны между собой. Поэтому снимают характеристическую кривую точности передачи размеров в зависимости от времени проявления при постоянном времени экспонирования и в зависимости от времени экспонирования при постоянном времени проявления. Время экспонирования считается оптимальным, если после проявления толщина рельефа фоторезиста составляет не менее 90% толщины нанесенного слоя [7]. При правильном подборе времени экспонирования край изображения должен быть четким, а рисунок фоторезиста должен геометрически соответствовать рисунку фотошаблона.

Проявление рисунка в фоторезистивном слое

При проявлении фоторезиста удаляются необлученные (для негативных фоторезистов) и облученные (для позитивных фоторезистов) участки в соответствующих растворах или парах проявителя. Составы проявителей и режимы проявления некоторых фоторезистов указаны в табл. 10.4.

Время проявления фотослоя зависит от его толщины. Для тонких слоев фоторезиста достаточна обработка в неподвижной ванне или в ванне при движении проявителя относительно слоя фоторезиста [7].

После проявления подложки промывают и сушат на центрифуге или в потоке очищенного воздуха.

Задубливание фоторезистивного слоя

Эта операция позволяет удалить растворитель и повысить адгезию к пластине. Режимы второй сушки приведены в табл. 10.4. От температуры, характера ее изменения и времени задубливания зависит точность передачи размеров элементов. Во избежание оплавления краев фоторезистивного слоя необходимо использовать плавное или ступенчатое повышение температуры. Ограничивающим фактором является трудность удаления задубленного фоторезиста. Задубливание может осуществляться обработкой ИК-лучами или в СВЧ-сушильных печах.

Основные режимы обработки фоторезистов [7, 8]

Таблица 10.4

Тип фоторезиста	Скорость вращения центрифуга, об/мин	Сушка фоторезистивного слоя		Время экспонирования (лампа ДРШ-250)	Состав растворов и режимы проявления	Задубливание фоторезистивного слоя	
		T°, C	t, мин			T°, C	t, мин
Негативный ФН-11	1000	100	10...30	5	Раствор толуола (1 ч) и ксилола (1 ч) при комнатной температуре, в течение 110...120 с	100	30
Позитивный ФП-383	2000	20...25 и 100 или 85	10 15 30	40...50	Раствор натрия фосфорно-кислого трехзамещенного при комнатной температуре, в течение 40...50 с	120...150	15
ФПРН-7	2000	20...25 и 100	20 15	15...20	Раствор гидрата окиси калия (500 г) в воде (100 мл) при комнатной температуре, в течение 30...50 с	20...25 и 10	20 20

Локальное травление

Способ, режим и состав среды травления выбирают в зависимости от материала (пленки термической двуокиси кремния, алюминия и др. металлов) и требований к точности воспроизведения геометрии топологического рисунка. Составы травителей и режимы травления изучаются в лабораторном практикуме по физико-химическим основам технологии РЭА.

Снятие фоторезистивного слоя

Применяют два способа снятия: мокрый (жидкий) и сухой (плазмохимический). В первом случае фотослой удаляется в жидкостях: щелочных растворах, кислотах, органических растворителях. Использование различных составов для удаления фоторезистов определяется степенью его задубливания.

Фоторезист ФН-11 снимается в смеси кислоты и толуола.

Позитивные фоторезисты удаляют обработкой:

— в ацетоне или диметилформамиде + ПАВ («Прогресс») (при слабом задубливании фоторезиста):

— в окисляющих агентах (горячая концентрированная серная кислота).

Мокрые способы имеют недостатки: большая трудоемкость, загрязнение подложек продуктами реакций, зависимость процессов от режимов задубливания.

Сухой метод снятия фоторезиста основан на плазмохимическом травлении слоя фоторезиста в кислородосодержащей атмосфере с добавками азота 1...10% и общем давлении ~ 1 Па или в кислородной плазме ВЧ-разряда.

10.2.7. Виды брака при фотолитографии

Дефекты фотолитографической обработки можно условно разбить на три группы по типу нарушения окисной пленки на кремневых подложках: сплошные, граничные и локализованные [9].

К сплошным дефектам относятся такие нарушения окисного рельефа, как наличие тонкой пленки «остаточного» оксида в окнах или, напротив, полное стравливание защитных участков пленки термической двуокиси кремния.

Граничными дефектами называются такие нарушения по краям окисловых окон, как клин, растравы, выступы и т. д. К этой группе дефектов относятся изменение заданных геометрических размеров окон и ошибки при совмещении.

Локализованные дефекты: отверстия в окисле («проколы») или островки окисла, оставшиеся на вытравленных участках.

Появление таких сплошных дефектов, как стравливание окисла, свидетельствует либо о грубых нарушениях технологии, либо о критичности фотолитографического процесса [9].

Недостаточная кислотостойкость фоторезиста, низкое качество шаблонов, плохая адгезия фоторезиста к подложкам, небольшие отклонения в технологии приводят к серьезному ухудшению результатов. Из нарушений процесса фотолитографии, вызывающих растравливание, наиболее вероятны: пересушка, приводящая к разрушению слоя, и перетравливание.

Основные типы фотолитографических дефектов, видов брака с указанием возможных причин возникновения представлены в табл. 10.5.

Таблица 10.5

Виды дефектов фотолитографии и возможные причины их возникновения

Виды дефектов	Причины дефектов
Неровный край (зазубрины на границе проявления)	Загрязнения на поверхности фотошаблона и в фоторезисте.
Неполное проявление	Наличие зазора между фотошаблоном и подложкой при экспонировании
После проявления удален весь фоторезист	Недостаточное задубливание пленки фоторезиста.
Включения и локальные «проколы» в слое фоторезиста	Недостаточное время экспонирования
Увеличенные размеры элементов топологического рисунка	Превышение температуры первой сушки фоторезистивного слоя.
Рельеф нечеткий, слабый	Некачественная подготовка поверхности пластин.
Рельеф нечеткий, слабый	Недостаточное время или низкая температура сушки.
Рельеф нечеткий, слабый	Загрязнение поверхности пластин или плохая фильтрация фоторезиста.
Рельеф нечеткий, слабый	Низкая адгезия фоторезиста. Переэкспонирование. Высокая температура или величина pH проявителя. Наличие зазора между подложкой и фотошаблоном при экспонировании.
Рельеф нечеткий, слабый	Некачественный фоторезист. Велика экспозиция (для позитивного фоторезиста) или мала экспозиция (для негативного фоторезиста). Отсутствие должного контакта при экспонировании. Фотошаблон ошибочно прижат к слою обратной стороной. Некачественное проявление.

10.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА В ФОТОРЕЗИСТИВНОМ СЛОЕ МЕТОДОМ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Математическое моделирование технологических процессов изделий микроэлектроники с целью их оптимизации уменьшает стоимость и сокращает сроки разработок. Современные экспериментально-статистические методы построения математических моделей — методы планирования эксперимента — успешно применяются при оптимизации электрохимических процессов, при разработке новых материалов, при оптимизации процессов фотолитографии [12] и т. д. [13, 14].

Для получения математической модели технологического процесса формирования резистивного рельефа в качестве функции отклика y выбрано отклонение размеров элементов после проявления от исходных на фотошаблоне. В общем случае режим процесса определяют следующие факторы: толщина фоторезиста, температура и время сушки, время экспонирования, концентрация и температура проявителя.

В настоящей работе проводился полный факторный эксперимент (ПФЭ) типа 2^3 . Независимыми переменными являлись:

- x_1 — толщина фоторезиста, мкм;
- x_2 — время первой сушки, с;
- x_3 — время экспонирования, с.

Фоторезист ФП-383 наносили при скоростях вращения центрифуги 1000 и 3000 об/мин, соответствующих нижнему (—1) и верхнему (+1) уровню фактора x_1 . Сушка фоторезистивного слоя осуществлялась при 90°C, в течение 10 (—1) и 30 (+1) мин соответственно. Экспонирование производилось в течение 10 с (—1) и 40 с (+1). Проявляли фоторезистивный слой в 0,5%-м растворе гидроксида калия при комнатной температуре.

План эксперимента приведен в табл. 10.6, порядок обработки результатов измерений и получения натурального уравнения регрессии показан в табл. 10.7 и 10.8, где m — число контролируемых элементов.

Номера подложек совпадают с номерами опытов N .

Значения \bar{y}_j получают из результатов измерений размеров (в делениях на шкале окулярных микрометров микроскопов ПМТ-3 или МИИ-4) трех различных элементов на фотошаблоне y_ϕ и на подложке y_* по формуле

$$\bar{y}_j = \frac{(y'_\phi - y'_n) + (y''_\phi - y''_n) + (y'''_\phi - y'''_n)}{3} k,$$

где k — цена деления, мкм; j — номер подложки; $y'_\phi, y''_\phi, y'''_\phi$ — результаты измерений размеров первого, второго и третьего y'_n, y''_n, y'''_n — результаты измерений размеров соответственно первого, второго и третьего элементов на подложке; $\Delta y_j = y'_\phi - y'_n$.

Измерение толщины фоторезиста производится на МИИ-4 по инструкции, имеющейся в лаборатории.

Цена деления k определяется при помощи микрометра.

10.4. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Получить у лаборанта фотошаблон и 8 кремниевых подложек с нанесенным защитным рельефом.
2. Измерить размеры элементов, заданных преподавателем, на фотошаблоне и на подложках. Подложки брать только пинцетом.
3. Обработать результаты измерений в последовательности, рекомендованной в табл. 10.6... 10.8 и получить натуральное уравнение регрессии.
4. Проанализировать полученное уравнение. Указать, какова степень и характер влияния выбранных факторов на точность передачи размеров элементов; каким образом можно повысить точность воспроизведения размеров и какой опыт в табл. 10.6 отражает эту закономерность.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Чистяков Ю. Д., Райнова Ю. П. Физико-химические основы технологии микроэлектроники. — М.: Металлургия, 1979. — 408 с.
2. Корнюшин Н. Д. Методы переноса изображения в производстве полупроводниковых приборов и ИС/ЗЭТ. — 1977. — Вып. 18 (164). — С. 3 — 39.
3. Черняев В. Н. Технология производства интегральных микросхем. — М.: Энергия, 1977. — 367 с.
4. Киселева Э. Н., Креймер А. А. Технология акустоэлектронных приборов//Расчет и конструирование АПВ-фильтров. — Новосибирск, 1982. — С. 152 — 170.
5. Масленников П. Н., Лаврентьев К. А., Гингос А. Д. и др. Оборудование полупроводникового производства. — М.: Радио и связь, 1981. — 336 с.
6. Пресс Ф. П. Фотолитографические методы в технологии полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. — М.: Сов. радио, 1978. — 95 с.
7. Справочник по расчету и конструированию СВЧ-полосковых устройств/Под ред. В. И. Вольмана. — М.: Радио и связь, 1982. — 328 с.
8. Будылинский И. П., Морозов Г. В. Технология гибридных интегральных схем СВЧ. — М.: Высш. школа, 1980. — 285 с.

- 9 Пресс Ф. П. Фотолитография в производстве полупроводниковых приборов. — М.: Энергия, 1966 — 200 с
10. Иванов-Есипович Н К Физико-химические основы производства радиоэлектронной аппаратуры — М.: Высш. школа, 1979. — 205 с.
11. Прищепов Г. Ф. Полный факторный эксперимент в процессах производства РЭА и ЭВА — Таганрог: ТРТИ, 1979 — 20 с
12. Лейзерович М.А., Любомиров А.М., Максимова Л. И. и др. Оптимизация процесса обратной фотолитографии методами планирования эксперимента//Электронная техника. Сер. Технол. орган произв. и оборудован. — 1979 — Вып 3 (94) — С 71—76
13. Ипполитов В.М. Особенности применения методов планирования эксперимента при разработке технологических процессов в электронной технике//Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ — 1984. — Вып 3 (363) — С 50—54
14. Барабашук В. И., Креденцер Б. П., Мирошниченко В. И. Планирование эксперимента в технике. — Киев: Техника, 1984. — 200 с

ПРИЛОЖЕНИЯ

I. Значения *t*-критерия (критерия Стьюдента)

<i>N</i> (<i>m</i> -1)	<i>q</i>				
	0,10	0,05	0,02	0,01	0,001
1	6,31	12,71	31,82	63,66	636,62
2	2,92	4,30	6,97	9,93	31,60
3	2,35	3,18	4,54	5,84	12,94
4	2,13	2,78	3,75	4,60	8,61
5	2,02	2,57	3,37	4,03	6,86
6	1,94	2,45	3,14	3,71	5,96
7	1,90	2,37	3,00	3,50	5,41
8	1,86	2,31	2,90	3,36	5,04
9	1,83	2,26	2,82	3,25	4,78
10	1,81	2,23	2,76	3,17	4,59
11	1,80	2,20	2,72	3,11	4,44
12	1,78	2,18	2,68	3,06	4,32
13	1,77	2,16	2,65	3,01	4,22
14	1,76	2,15	2,62	2,98	4,14
15	1,75	2,13	2,60	2,95	4,07
16	1,75	2,12	2,58	2,92	4,02
24	1,71	2,06	2,49	2,80	3,75

II. Значения критерия Кохрена G_{1-q} для $q = 0,05$

N	m-1									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	9985	9750	9392	9057	8772	8534	8332	8159	8010	7880
3	9669	8709	7977	7457	7071	6771	6530	6333	6167	6025
4	9065	7679	6841	6287	5895	5598	5365	5175	5017	4884
5	8412	6838	5981	5441	5065	4783	4564	4387	4241	4118
6	7808	6161	5321	4803	4447	4184	3980	3817	3682	3568
7	7271	5612	4800	4307	3974	3726	3535	3384	3259	3154
8	6798	5157	4377	3910	3595	3362	3185	3043	2926	2829
9	6385	4775	4027	3584	3286	3067	2901	2768	2659	2568
10	6020	4450	3733	3311	3029	2823	2666	2541	2439	2353

Все значения G_{1-q} меньше единицы, поэтому в таблице приведены лишь знаки, следующие после запятой

III. Значения критерия Фишера для $q = 0,05$

$N-d$	$N(m-1)$							
	1	2	3	4	5	6	12	4
1	161,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234,0	244,9	249,0
2	18,5	19,2	19,2	19,3	19,3	19,3	19,4	19,5
3	10,1	9,6	9,3	9,1	9,0	8,9	8,7	8,6
4	7,7	6,9	6,6	6,4	6,3	6,2	5,9	5,8
5	6,6	5,8	5,4	5,2	5,1	5,0	4,7	4,5
6	6,0	5,1	4,8	4,5	4,4	4,3	4,0	3,8
7	5,6	4,7	4,4	4,1	4,0	3,9	3,6	3,4
8	5,3	4,5	4,1	3,8	3,7	3,6	3,3	3,1
9	5,1	4,3	3,9	3,6	3,5	3,4	3,1	2,9
10	5,0	4,1	3,7	3,5	3,3	3,2	2,9	2,7
11	4,8	4,0	3,6	3,4	3,2	3,1	2,8	2,6
12	4,8	3,9	3,5	3,3	3,1	3,0	2,7	2,5
13	4,7	3,8	3,4	3,2	3,0	2,9	2,6	2,4
14	4,6	3,7	3,3	3,1	3,0	2,9	2,5	2,3
15	4,5	3,7	3,3	3,1	2,9	2,8	2,5	2,2
16	4,5	3,6	3,2	3,0	2,9	2,7	2,4	2,1
20	4,4	3,5	3,1	2,9	2,7	2,6	2,3	2,1

11. ТЕХНОЛОГИЯ СБОРКИ ИМС И МИКРОПРОЦЕССОРОВ

11.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение технологических процессов сборки ИМС.

Исследование технологического процесса присоединения гибких выводов в ИМС.

Приобретение навыков работы на технологическом оборудовании для присоединения гибких выводов в ИМС.

11.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ СБОРКИ

Сборочные операции ИМС являются операциями индивидуальной обработки в отличие от группового характера операций технологического процесса по изготовлению кристалла полупроводниковой или модуля гибридно-пленочной ИМС.

Основными сборочными операциями при изготовлении ИМС, микропроцессоров и микросборок являются:

- 1) разделение пластин и подложек на кристаллы и модули;
- 2) крепление кристаллов и моделей к корпусу ИМС (крепление навесных активных элементов к основанию модуля ГИС);
- 3) контактирование ИМС (создание внутренних и внешних выводов);
- 4) герметизация ИМС;
- 5) контроль электрических параметров и проведение испытаний;
- 6) заключительные операции сборки ИМС (окраска, лакировка, маркировка, лужение выводов).

Сборочные операции представляют значительные трудности для полной автоматизации технологического процесса изготовления микроэлектронных изделий. Однако в последние годы разработан целый ряд автоматов и полуавтоматов с программаторами, которые позволяют в значительной степени автоматизировать трудоемкий процесс сборки ИМС. Процесс автоматизации сборки ИМС значительно облегчается, если использовать гибкие носители (например, на полиимидной пленке), групповую пайку и «шариковые» (столбиковые) выводы в ИМС.

Перед операцией разделения пластины на кристаллы (или подложки на модули) производится зондовый контроль ИМС с отбраковкой на автоматах и полуавтоматах (типа ЭМ-627 и ЭМ-630). В этих установках используются вычислительные

управляющие комплексы, позволяющие перемещать пластину с определенным шагом под зондами, производить контроль электрических параметров по заданным тестам, производить пометку (краской) негодных кристаллов для последующей отбраковки [2]. После разбраковки ИМС пластины поступают на операцию разделения.

Операция разделения, как правило, состоит из двух основных частей: нанесения рисок (скрайбирование) и ломки.

Скрайбирование осуществляется механическими, лазерными и электронно-лучевыми методами. Наибольшее распространение получили методы скрайбирования алмазным резцом и лазерным лучом. Алмазным скрайбером на пластины наносят риски (шириной 20...40 мкм, глубиной 10...15 мкм) со стороны структур в двух взаимно перпендикулярных направлениях по границам между отдельными ИМС. Для скрайбирования используются установки типа «Алмаз-М». Основной недостаток скрайбирования — неровный (рваный) край реза, который приводит при ломке к сколам и другим дефектам этого метода разделения. Преимущество метода механического скрайбирования:

- малая ширина риски, что позволяет более эффективно использовать площадь пластины полупроводникового материала,

- высокая производительность (более 10-и пластин Ø 76 мм в ч),

- возможность быстрой переналадки оборудования.

Более перспективным является метод лазерного скрайбирования. Риски (более широкие, чем при механическом скрайбировании) при лазерном скрайбировании получаются с гладкими ровными краями, поэтому качество последующей ломки более высокое.

После скрайбирования осуществляется ломка пластин на кристаллы (подложек на модули). Разламывание производят валиком на гибком основании, гибкой лентой или на сферической опоре. При ломке валиком пластину помещают рисками вниз на гибкую (резиновую) основу и прокатывают по ней стальным или резиновым валиком (катком) в двух направлениях, параллельных линиям реза. При прокатывании наблюдается иногда произвольная ломка (не по рискам) и сколы, что объясняется несовпадением направления прокатки с линиями реза. Указанных недостатков лишен способ разламывания пластин с помощью гибкой ленты. На обратную сторону пластины наносят быстро высыхающую эмульсию, которая образуя пленку, удерживает кристаллы после ломки. Пластины размещают на стальной пружинной ленте и прижи-

мают резиновой лентой. Совместно передвигаясь, система (пружинной лентой вниз) приобретает определенный радиус кривизны. В этом месте и происходит ломка пластин на кристаллы.

Однако наиболее производительной является ломка на стальной полусфере. Пластина с кристаллами обязательно квадратной формы и определенного размера размещается на полусфере соответствующего диаметра и прижимается к ней гибкой резиновой мембраной (например, откачивая воздух из зазора сфера—мембрана). Разламывание производится одновременно в двух направлениях. Но этот метод обладает существенным недостатком: для каждого типоразмера кристалла требуется полусфера только определенного диаметра.

Для более толстых (≥ 400 мкм) пластин полупроводниковых материалов для разделения используются способы резки, например, алмазным диском или ультразвуковым методом. Резка алмазным диском отличается высокой скоростью, высокой точностью резания, хорошей геометрией реза (без сколов), не требует специальной ориентации пластин по кристаллографическим плоскостям и др. преимуществами.

Ультразвуковая резка осуществляется специальным инструментом с размером ячеек равным размеру кристалла. Резка осуществляется частями образива, взвешенными в жидкости (масле) и совершающими колебательные движения частотой ≥ 15 кГц по направлению к пластине. Колебания рабочей среды обеспечиваются ультразвуковой установкой. Ультразвуковая резка используется, в основном, для разделения круглых или фигурных кристаллов, для образования выступов и углублений в полупроводниковых материалах.

После разделения производится отбраковка негодных (меченых краской) кристаллов вручную или на полуавтоматической установке.

Присоединение кристаллов к основанию корпуса или на подложку модуля ИМС осуществляется пайкой эвтектическими припоями, приклеиванием токопроводящими и нетокопроводящими клеями и с помощью стекол. При выборе способа крепления кристаллов принимают во внимание конструктивные особенности ИМС, ее электрические и тепловые характеристики, тип корпуса и другие показатели. Способы крепления кристаллов подробно изложены в [1].

Присоединение пайкой производится, в основном, эвтектическими припоями систем Au—Si, Au—Ge, температура плавления которых не превышает 375°C .

Иногда используются и низкотемпературные припой систем Pb—Sn, Pb—Sn—Bi, Sn—Bi. Применение низкотемпера-

турных припоев требует специальной обработки тыльной поверхности пластин (кристаллов), т. е. нанесения металлических пленок, способных к облуживанию (например, структур $V + Cu$, $Cr + Au$). Пайка, как правило, осуществляется в конвейерных печах с помощью специальных кассет. В настоящее время имеется целый ряд установок для монтажа кристаллов на подложку модуля ГИС или в корпуса приборов [1]. Основным инструментом такой установки является рабочий наконечник с вакуумным захватом и фиксатором положения, управляемый программатором (мини-ЭВМ). Для каждого типоразмера кристаллов необходим свой наконечник, рабочая часть которого соответствует конфигурации и размеру обрабатываемого кристалла. Нагрев паяемой системы осуществляется снизу со стороны корпуса или сверху рабочим наконечником (термодом). Хорошие результаты при пайке дает наложение УЗ-колебаний (УЗ-пайка). Основным достоинством присоединения пайкой является наличие хороших электрического и теплового контактов между кристаллом и корпусом.

Несколько хуже в этом отношении, но проще технологически, метод крепления кристаллов приклеиванием. Клеевое соединение даже из электропроводящих клеев обладает сравнительно высоким тепловым сопротивлением, малой механической прочностью (из-за разности ТКЛР материала подложки-корпуса и кристалла, низкой адгезии клея к корпусу и кристаллу и возникновения внутренних механических напряжений в клеевом шве). Особенно плохо ведут себя клеевые соединения при тепловых ударах, термоциклировании и динамических нагрузках.

Клеевые композиции на основе эпоксидных, полиэфирных, кремний-органических смол сохраняют прочность при температурах $\geq 270^\circ C$ (например, клен К-400, К-350-61, ВК-4, ВК-8, ВК-32-300).

Токопроводящие клен (контактолы) марок К-I, К-II, К-III, ВК-20Т изготавливаются на основе эпоксидного или нитроклеев с добавлением 26% по массе мелкодисперсного порошка серебра.

Для присоединения кристаллов к подложкам или корпусам ИМС используется то же оборудование, что и для автоматизированной пайки. Используемые клеевые материалы (кроме контактолов) требуют горячей сушки при температуре от 60 до $200^\circ C$ в течение $1,5 \dots 2$ ч, что резко снижает производительность процесса присоединения.

Сравнительно редко для крепления кристаллов к корпусам или подложкам используются легкоплавкие бесщелочные

свинцово-боросиликатные стекла. Толщина стеклянного шва не более 10—20 мкм. Рабочая температура присоединения не более 500°C (при использовании тугоплавких боросиликатных стекол — 950.. 1000°C). Спай металл-стекло получается высокопрочным, если на поверхности металла имеется окисная пленка.

Основной недостаток этого метода присоединения — нарушение механической прочности соединения вследствие растрескивания стекла (по причине нарушения технологического режима, либо вследствие получения толстого шва >20 мкм).

Следующая важнейшая операция сборки ИМС — создание внутренних и внешних выводов, с помощью которых ИМС (или навесной дискретный элемент) подсоединяется в электрическую схему.

Основные требования к контактным выводам и методам их создания — достаточная прочность (не ниже 70% прочности присоединяемой проволоки),

- малое омическое сопротивление контакта,
- высокая линейность вольт-амперной характеристики контакта металл-полупроводник,
- высокая производительность процесса контактирования,
- возможность автоматизации.

В микроэлектронике используются два типа выводов: гибкие (проволочные) и жесткие (балочные, шариковые). Гибкие выводы создаются индивидуальной обработкой. Жесткие — индивидуальной и групповой.

В качестве материала для гибких выводов используются проволока из золота (ЗЛ 999), Ø 25... 60, меди марки ММ, Ø 50... 100 и алюминия, Ø 50... 100 мкм. При монтаже толстопленочных ГИС используют медную луженую проволоку Ø 100... 150 мкм.

Для присоединения выводов в ИМС (для контактирования) применяются следующие методы:

- термокомпрессионная сварка,
- сварка давлением с косвенным импульсным подогревом,
- сварка сдвоенным («расщепленным») электродом,
- ультразвуковая сварка,
- пайка (индивидуальная и групповая).

Термокомпрессионная сварка представляет собой сварку давлением с косвенным подогревом. Различают две разновидности термокомпрессионной сварки:

- клиновое соединение (рис. 11.1) и

— соединение, получаемое с помощью оплавленного шарика (рис. 11.2).

На рис. 11.1: 1 — рабочий столик; 2 — подложка; 3 — присоединяемый провод; 4 — инструмент для сварки;

на рис. 11.2: 1 — рабочий столик; 2 — подложка; 3 — оплавленный золотой шарик; 4 — проволока для выводов; 5 — головка рабочего инструмента; 6 — газовая горелка.

Термокомпрессионная сварка широко применяется для присоединения гибких (золотых или алюминиевых) выводов к кремниевым кристаллам или к тонким металлическим пленкам. Термокомпрессионная сварка осуществляется при одновременном приложении давления и подогрева к соединяемым материалам. При этом за счет нагрева повышается способность свариваемых материалов к упругой и пластической деформации. А приложение давления способствует разрушению окисных пленок (например, в системе Al—Si, пленок SiO_2 и Al_2O_3), твердость которых при нагреве практически не изменяется, на сравнительно упругих (пластичных) поверхностях свариваемых материалов. Разрушенные пленки окислов в дальнейшем за счет пластического течения деформируемого металла удаляются из зоны контакта. В зоне контакта в результате пластической деформации соединяемых материалов уменьшается число микровыступов (по которым в первый момент осуществляется касание — контактирование), в результате чего площадь фактического касания соединяемых поверхностей увеличивается. При сближении поверхностей соединяемых материалов (в точках касания) на расстояние, близкое к межатомным, возникают силы связи (Ван-дер-Ваальса, обменные, атомные), обуславливающее их сцепление (адгезию). Однако на этом процесс редко останавливается. Значительная часть межсоединений осуществляется по схеме токохимических реакций, т. е. на первом этапе возникает сцепление за счет физических сил адгезии, а на втором этапе или за счет образования химических связей (соединений), или за счет протекания диффузии и образования интерметаллических или металлосилицидных химических соединений, т. е. за счет образования на втором этапе переходного слоя между соединяемыми материалами. Вероятность образования переходного слоя в значительной степени зависит от способности соединяемых материалов образовывать низкотемпературные эвтектики (как в системах: Au—Si, Al—Si). В последнем случае адгезия выше [3].

Важным фактором при сварке является температура. Чем выше температура, тем при меньших давлениях начинается заметное сцепление. На рис. 11.3 приведена зависимость проч-

ности соединения от температуры процесса. Возникновение сцепления зависит от величины прикладываемого давления. Как следует из экспериментальных исследований [3] оптимальное давление находится в диапазоне $(7 \dots 15) \cdot 10^7$ Па. При большем давлении прочность термокомпрессионного соединения падает из-за большой деформации проволочного вывода и появления трещин в кристалле полупроводника. Время сварки определяется экспериментально и для различных систем находится в пределах от 1...2 до 10 с.

Рекомендуемые режимы термокомпрессионной сварки приведены в табл. 11.1.

Таблица 11.1

Режимы сварки

Материал полупроводника или пленки	Температура подогрева, °C	Удельное давление, 10^7 Па	Деформация вывода, %	Время сварки, с
Вывод — золото				
Кремний	350	14...15	60	5...10
Al напыленный на SiO ₂	350	10...11	50	1...3
Вывод — алюминий				
Кремний	450	7	60	10
Al на SiO ₂	400	6...7	60	1...3

В промышленности для создания термокомпрессионных соединений используются установки типа «Контакт-3М, 5М».

Ультразвуковая сварка отличается от термокомпрессионной наложением на рабочий инструмент (клин) продольных УЗ-колебаний частотой не более 50 кГц, амплитудой до 10 мкм. При этом облегчается процесс разрушения и удаление из зоны контакта окисных пленок, смятие (деформация) микровыступов, увеличение площади фактического касания. Сцепление возрастает. Поэтому с помощью УЗ-сварки можно соединить даже те системы, которые не свариваются термокомпрессионной. Схема установки для УЗ-сварки приведена на рис. 11.4, где 1 — магнитострикционный преобразователь; 2 — волновод; 3 — крепежные детали установки; 4 — концентратор УЗ-энергии; 5 — рабочий инструмент; 6 — крепежный винт; 7 — проволока; 8 — подложка; 9 — рабочий стол.

Сварка расщепленным электродом напоминает термокомпрессионную. Отличие состоит в способе нагрева места сварки. Нагрев осуществляется пропусканием электрического тока через зону сварки между изолированными друг от друга половинками электрода (рис. 11.5).

На рис. 11.5 представлена схема устройства для сварки расщепленным электродом, где 1 — рабочий столлик; 2 — подложка с пленкой; 3 — привариваемый проводник; 4 — электроды; 5 — изолирующий слой (слюда). Качество сварки зависит от начального контактного электрического сопротивления и сопротивления свариваемых материалов. Энергия для нагрева подается в виде импульсов тока длительностью 0,01 с от конденсатора через импульсный трансформатор (табл. 11.2).

Таблица 11.2

Режим сварки расщепленным электродом

Контактная площадка			Проводник		Напряже- ние на пер- вой обмо- тке транс- форматора, В	Время сварки, С	Усилие сварки, Н
Мате- риал пленки	Под- слой	Толщи- на, мкм	Мате- риал	Ø, мкм			
Au	Cr	0,5	Au	40	60	0,5	30·10 ⁻²
Au	Cr	0,5	Al	100	70	0,4	75·10 ⁻²
Ni	Ta	0,5	Cu	60	120	0,6	60·10 ⁻²

Сварка с косвенным импульсным подогревом V-образным электродом является разновидностью термокомпрессионной сварки. Сущность этого метода сварки заключается в следующем: через инструмент пропускается импульс электрического тока длительностью 0,01 ... 2 с. При этом торцовая часть инструмента, находящаяся в контакте со свариваемой системой, нагревается. Происходит локальный разогрев места сварки. Рекомендуемые режимы сварки с косвенным импульсным подогревом приведены в табл. 11.3.

Таблица 11.3

Режимы сварки с косвенным импульсным подогревом

Материал проволоки	Диаметр проволоки, мкм	Материал подложки	Напряже- ние, В	Длитель- ность импуль- са, С	Усилие сжатия, ×10 ² Н
Al	100	Au на ситалле	110	0,2	150
Al	100	Si полированный	125		150
Al	30	Si металлизированный	120		60
Au	50	Au на ситалле	105		80

Соединение пайкой в настоящее время начали широко использовать при монтаже ИМС с шариковыми (столбиковыми) выводами и толстопленочных ИМС. Переход на жесткие (бес-

проволочные) выводы при монтаже ИМС обусловлен необходимостью повышения надежности изделий микроэлектроники. В настоящее время используются два основных метода соединения с помощью шариковых выводов: метод перевернутого кристалла (рис. 11.6, б) и метод монтажа балочный проводник — шариковый вывод (рис. 11.6, а).

На рис. 11.6 приведены схемы монтажа ИМС с шариковыми выводами, где «а»: 1 — рабочий столлик, 2 — кристалл ИМС, 3 — гибкое основание, 4 — шариковый вывод ИМС, 5 — балочный вывод «паучка», 6 — термод; «б»: 1 — рабочий столлик с подогревом; 2 — подложка, 3 — контактная площадка, 4 — шариковый вывод, 5 — кристалл ИМС.

В случае использования метода перевернутого кристалла монтаж ИМС производится на печатную плату (подложку) с контактными площадками с помощью шариковых выводов ИМС.

Во втором случае осуществляется монтаж ИМС с шариковыми выводами на гибкий носитель с балочными «паучковыми» выводами.

Шариковые выводы формируются на заключительном этапе технологического процесса изготовления ИМС. Структура шарикового вывода показана на рис. 11.7, где 1 — подложка ИМС; 2 — диэлектрик SiO_2 ; 3 — адгезионный слой; 4 — напыленный слой меди; 5 — электролитически осажденная полусфера из меди; 6 — слой припоя.

На контактную площадку ИМС наносится адгезионный слой и проводящий слой меди толщиной 1,5...2 мкм вакуумно-термическим напылением, затем электролитическим осаждением вырастает полусферический выступ из меди высотой 20...25 мкм, а на этот выступ осаждается электролитический слой припоя системы олово-висмут толщиной 5...10 мкм. Общая высота выступа 27...35 мкм.

При монтаже методом перевернутого кристалла основную трудность представляет процесс совмещения, который должен обеспечивать надежный электрический и механический контакт шариковых выводов с контактными площадками подложки. Совмещение производится или с помощью полупрозрачного зеркала или с помощью специальных направляющих. Однако процент вывода годных изделий в этом случае невысок. Для снижения брака используется метод монтажа шариковых выводов ИМС на балочные выводы «паучка» на гибком основании. В качестве гибких носителей используется 2- или 3-слойная фольгированная полиимидная пленка. Толщина Al или Cu фольги 35...50 мкм, толщина полиимидной пленки ~70 мкм. В этом случае процесс совмещения легко визуализи-

зруется. Пайка осуществляется термодом групповым методом.

В настоящей работе исследуются процессы термокомпрессионной и УЗ-сварки гибких выводов ИМС.

Порядок работы на оборудовании и его краткое описание находятся на рабочих местах.

11.3. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Исследовать влияние температуры сварки на качество термокомпрессионного соединения.
2. Исследовать процесс ультразвуковой сварки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бер А. Ю., Мяснер Ф. Е. Сборка полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. — М.: Высш. школа, 1981. — 284 с.
 2. Парфенов О. Д. Технологии микросхем: Учебное пособие для вузов. — М.: Высш. школа, 1985. — 255 с.
 3. Колобов Н. А. Основы технологии электронных приборов: Учебное пособие для вузов. — М.: Высш. школа, 1980. — 288 с.
-

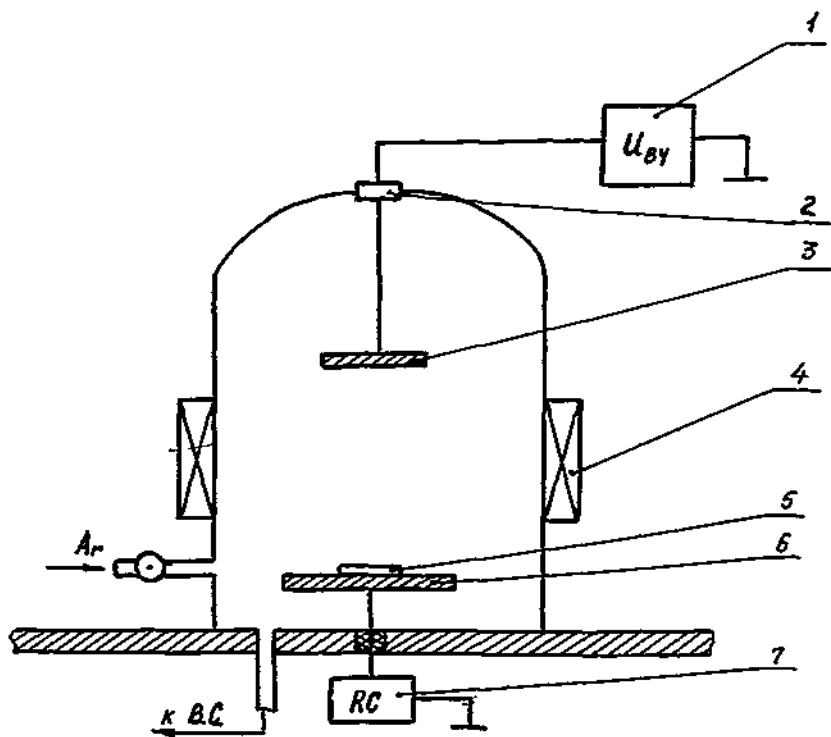


Рис.8.1.

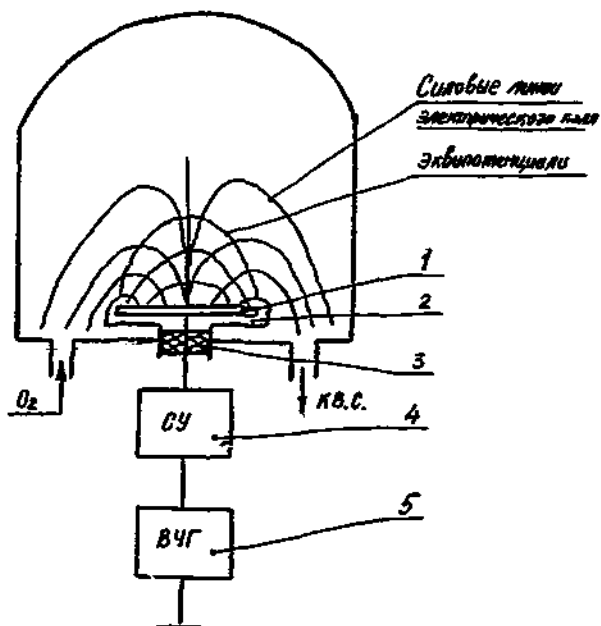
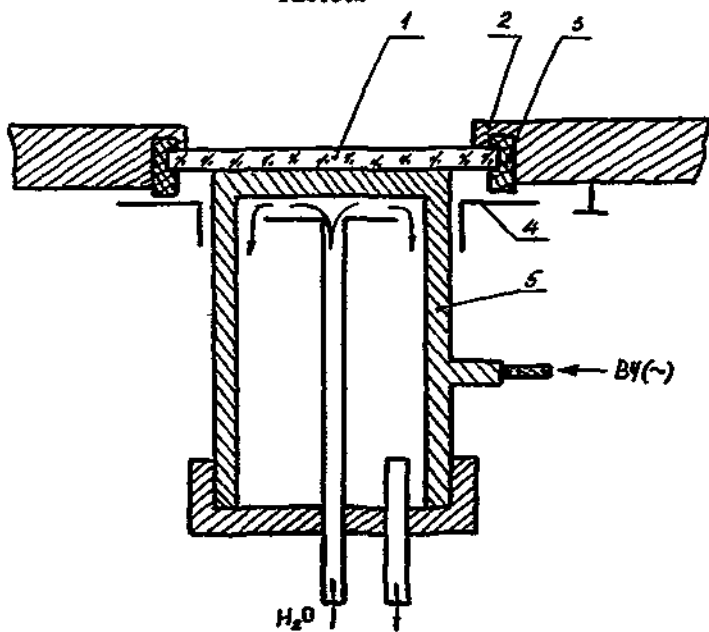


Рис.8.2



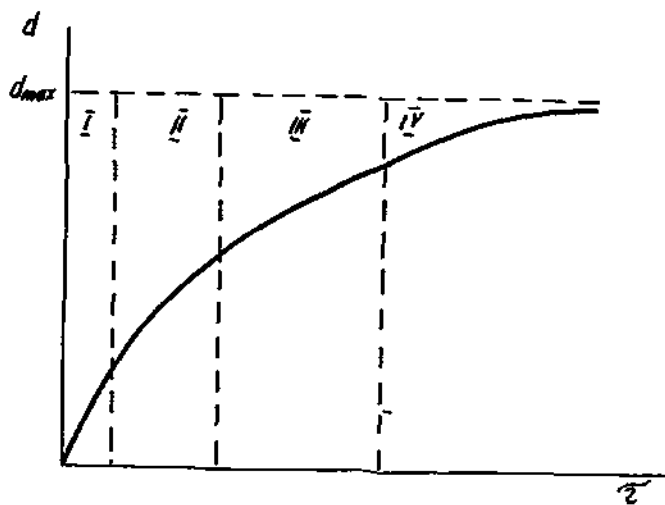


Рис.9.1

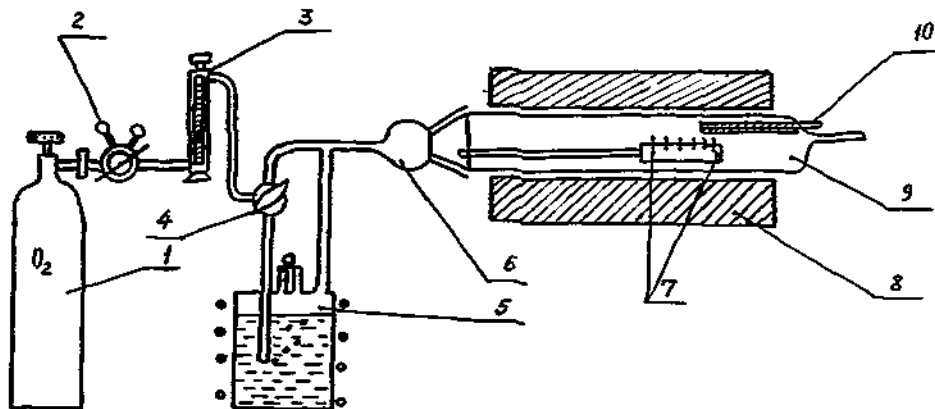


Рис.9.2

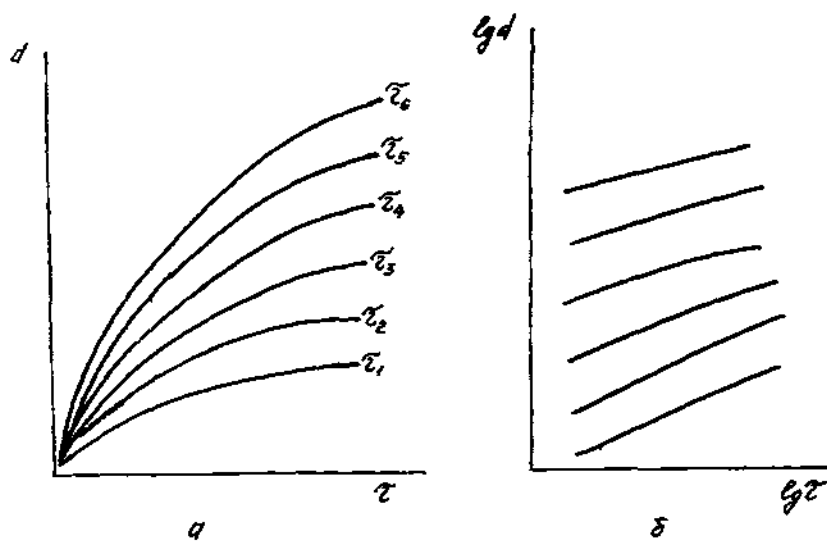


Рис.9.3

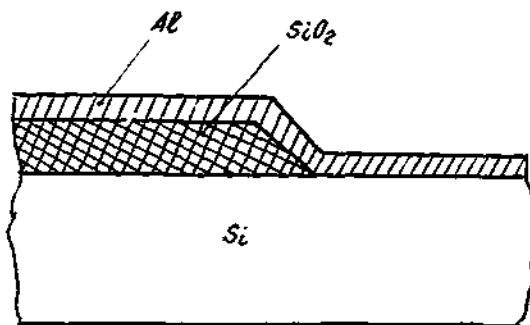


Рис.9.4.

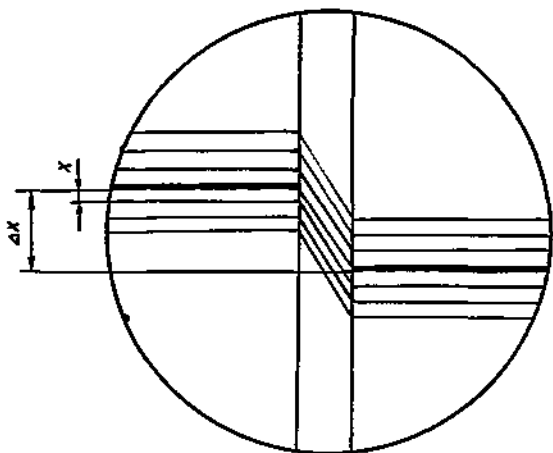


Рис.9.5

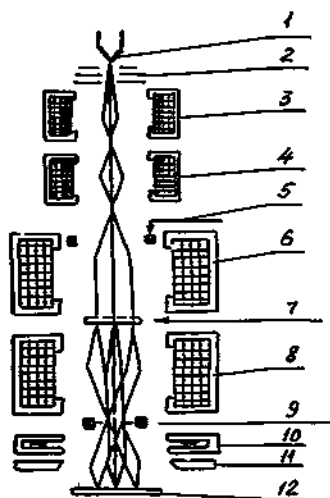


Рис.10.1

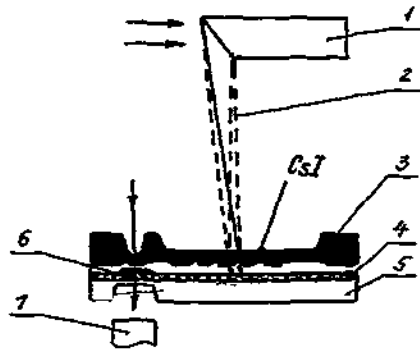


Рис.10.2

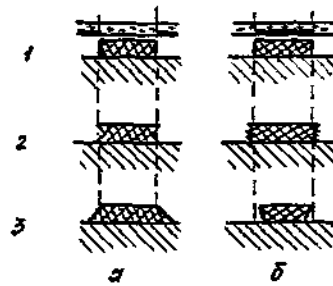


Рис.10.3

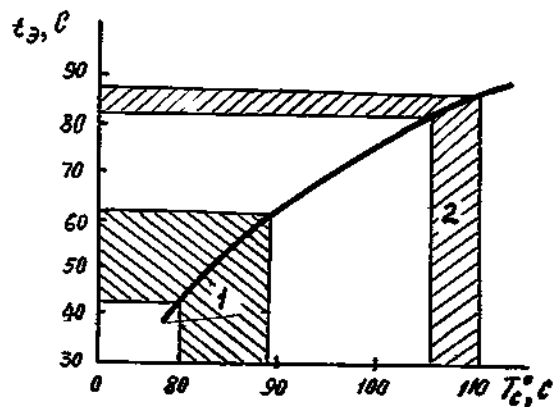


Рис.10.4

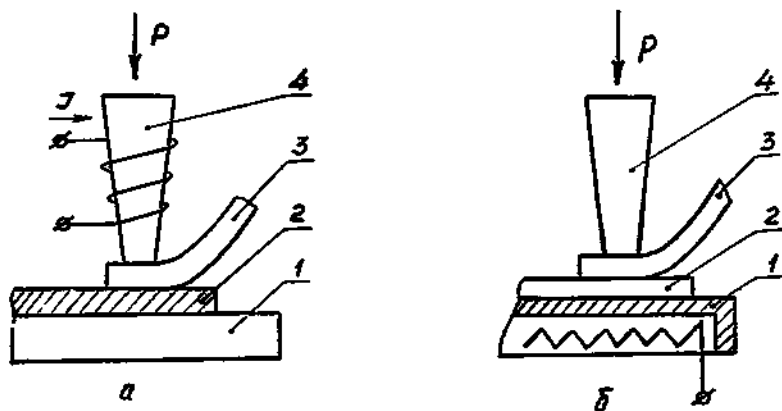


Рис.11.1

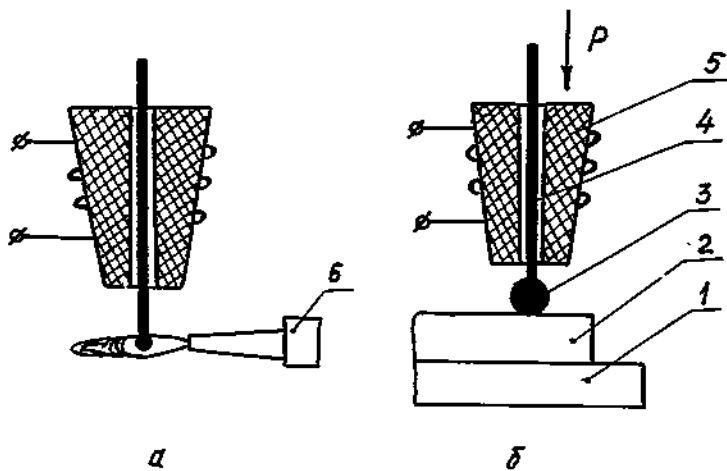


Рис. II.2

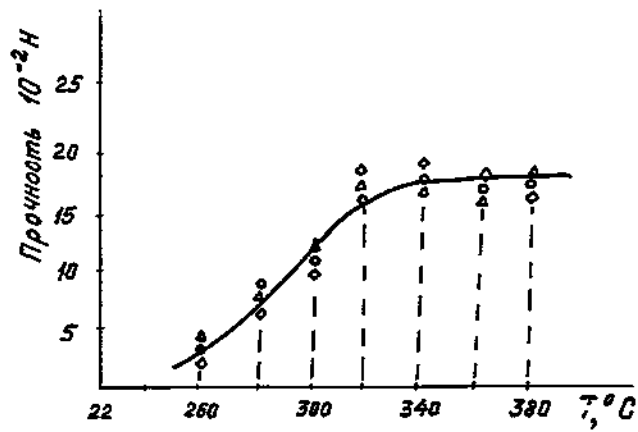


Рис. II.3

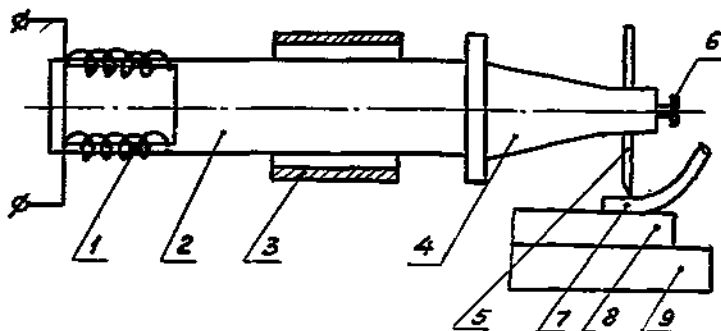


Рис. II.4

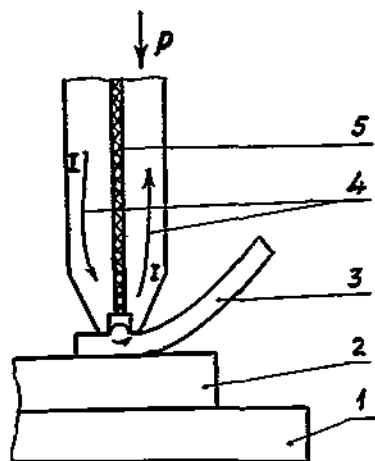
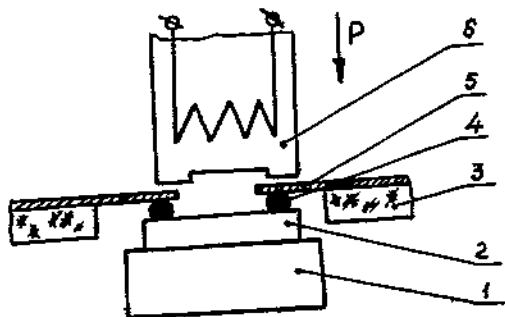
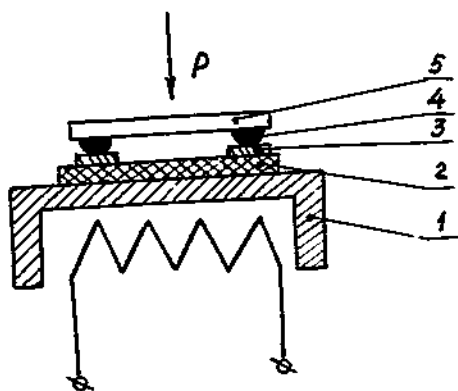


Рис. II.5



a



b

Рис. II.6.

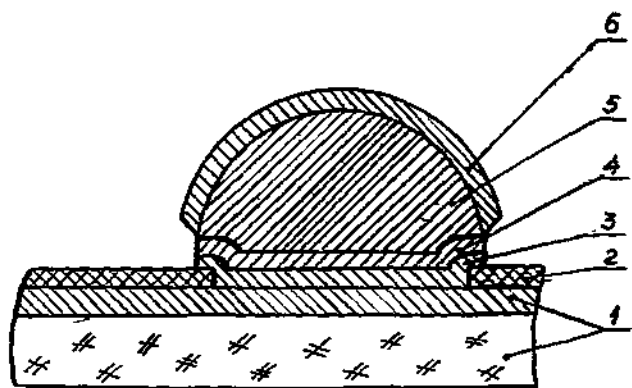


Рис. II.7.

Таблица 10.6

План и результаты эксперимента

N	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	Y _φ ^I	Y _φ ^{II}	Y _φ ^{III}	Y _n ^I	Y _n ^{II}	Y _n ^{III}	ΔY _i ^I	ΔY _i ^{II}	ΔY _i ^{III}	$\bar{y}_i = \frac{\Delta y^I + \Delta y^II + \Delta y^III}{3} \cdot K$
1	+	-	-	-	+	+	+	Y _φ ^I	Y _φ ^{II}	Y _φ ^{III}	Y _n ^I	Y _n ^{II}	Y _n ^{III}	ΔY _i ^I	ΔY _i ^{II}	ΔY _i ^{III}	
2	+	+	-	-	-	-	+	-II-	-II-	-II-							
3	+	-	+	-	-	+	-	-II-	-II-	-II-							
4	+	+	+	-	+	-	-	-II-	-II-	-II-							
5	+	-	-	+	+	-	-	-II-	-II-	-II-							
6	+	+	-	+	-	+	-	-II-	-II-	-II-							
7	+	-	+	+	-	-	+	-II-	-II-	-II-							
8	+	+	+	+	+	+	+	-II-	-II-	-II-	Y _{n1} ^I	Y _{n1} ^{II}	Y _{n1} ^{III}	ΔY ₁ ^I	ΔY ₁ ^{II}	ΔY ₁ ^{III}	

Таблица 10.7

Порядок обработки результатов эксперимента [11]

Дисперсии S_j^2	y теоретическое \hat{y}_j	$(y_j - \hat{y}_j)^2$
$S_1^2 = \frac{1}{2} [(\Delta y_1' - \bar{y}_1)^2 + (\Delta y_1'' - \bar{y}_1)^2 + (\Delta y_1''' - \bar{y}_1)^2] =$	$\hat{y}_1 = b_0 - b_1 - b_2 - b_3 + b_{12} + b_{13} + b_{23} =$	
$S_2^2 =$	$\hat{y}_2 =$	
$S_3^2 =$	$\hat{y}_3 =$	
$S_4^2 =$	$\hat{y}_4 =$	
$S_5^2 =$	$\hat{y}_5 =$	
$S_6^2 =$	$\hat{y}_6 =$	
$S_7^2 =$	$\hat{y}_7 =$	
$S_8^2 = \frac{1}{2} [(\Delta y_8' - \bar{y}_8)^2 + (\Delta y_8'' - \bar{y}_8)^2 + (\Delta y_8''' - \bar{y}_8)^2] =$	$\hat{y}_8 = b_0 + b_1 + b_2 + b_3 + b_{12} + b_{13} + b_{23} =$	

Получение математической модели [11]

Таблица 10.8

$\begin{matrix} \bar{y}_1 & \bar{y}_2 & \bar{y}_3 & \bar{y}_0 & \bar{y}_5 & \bar{y}_6 & \bar{y}_7 & \bar{y}_8 \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ b_0 = & + & + & + & + & + & + & + \\ & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ b_1 = & + & - & + & - & + & - & + \\ & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ b_2 = & - & + & + & - & - & + & + \\ & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ b_3 = & - & - & - & + & + & + & + \\ & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ b_{12} = & + & - & - & + & + & - & + \\ & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ b_{15} = & + & - & + & - & - & + & + \\ & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ b_{25} = & + & + & - & - & - & + & + \end{matrix}$								Значимость коэффициентов	Воспроизводимость опытов	Адекватность модели
$b_i = \frac{b_i}{\Delta X_i} = \dots b_{12} = \frac{b_{12}}{\Delta X_1 \cdot \Delta X_2} = \dots$								$S_B^2 = \frac{S^2}{N \cdot m}$ $B_K = t_K \cdot S_B \quad \alpha = 0,05$ <p>Табл. Стьюдента (приложение 1) $B > B_K$ "B" значим. $B < B_K$ "B" не значимые приравнять 0</p>	$\sum S_j^2 = S_1^2 + S_2^2 + \dots$ $S^2 = \frac{\sum S_j^2}{N}$ $G_p = \frac{\max S_j^2}{\sum S^2}$ <p>Табл. Кокрена (приложение 2) $G_p < G_K$ Опыт воспроизвод. $G_p > G_K$ Увелич. ΔX</p>	$F_p = \frac{S_B^2}{S^2}$ $S_{a0}^2 = m \cdot \frac{\sum (\bar{y}_j - \bar{y}_j^{\wedge})^2}{N-d}$ <p>d - колич. значимых B, вкл. B₀</p> <p>Табл. Фишера (приложение 3) $F_p < F_K$ Модель адекватна $F_p > F_K$ Уменьшить ΔX</p>
b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	У			
МКМ		МКМ/С	МКМ/С				МКМ			
<p>Результат: линейная математическая модель процесса $y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + \dots$</p>										

**Наумченко Александр Серафимович,
Королев Алексей Николаевич,
Милешко Леонид Петрович**

**РУКОВОДСТВО К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ
ПО КУРСУ
«ТЕХНОЛОГИЯ МИКРОСХЕМ И МИКРОПРОЦЕССОРОВ»
ЧАСТЬ 4**

Для студентов специальности 0705 всех форм обучения
и специальности 0648 дневного обучения

*Ответственный за выпуск Наумченко А. С.
Редактор Федулеев Б. А.
Корректоры Шмакова Г. Я., Шацкая Н. В.*

Сдано в набор 20.10.86 г. Подписано к печати 14.07.87 г.
Формат 60 × 84^{1/16}. Бумага оберточная. Гарнитура литературная
Высокая печать. Усл.-п. л. — 3,5. Уч.-изд. л. — 3,0.
Заказ № 593. Тир. 300 экз.
Бесплатно

Редакционно-издательский отдел Таганрогского радиотехнического
института им. В. Д. КАЛЫКОВА
Таганрог, 15, Некрасовский переулок, 44
Типография ТРТИ
Таганрог, 15, Энгельса, 1