

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический  
университет»

Кафедра полупроводниковой электроники и наноэлектроники

### **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к выполнению лабораторных работ № 4—8  
по дисциплине «Основы технологии электронной  
компонентной базы» для студентов направления  
подготовки бакалавров 11.03.04 «Электроника  
и наноэлектроника» (профиль «Электронное  
машиностроение») очной формы обучения

Воронеж 2016

Составитель канд. техн. наук Г.И. Липатов

УДК 621.382

Методические указания к выполнению лабораторных работ № 4—8 по дисциплине «Основы технологии электронной компонентной базы» для студентов направления подготовки бакалавров 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» (профиль «Электронное машиностроение») очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. Г.И. Липатов. Воронеж, 2016. 49 с.

В методических указаниях изложены необходимые теоретические сведения, лабораторные задания и методика выполнения лабораторных работ «Изучение процесса диффузионного легирования кремневых подложек», «Изучение процессов напыления тонких металлических пленок», «Изучение технологии приварки проволочных выводов», «Оценка прочности соединений внутренних выводов». Тематика лабораторных работ подобрана так, что позволяет изучить основные закономерности технологических процессов изготовления полупроводниковых приборов и интегральных схем. Предназначены для студентов 3 курса, изучающих дисциплину «Основы технологии электронной компонентной базы».

Методические указания подготовлены в электронном виде в текстовом редакторе MS WORD 2007 и содержатся в файле Технология ЭКБ\_4-8.doc.

Табл. 4. Ил. 24. Библиогр.: 5 назв.

Рецензент канд. физ.-мат. наук, доц. Т.Г. Меньшикова

Ответственный за выпуск зав. кафедрой д-р физ.-мат. наук, проф. С.И. Рембеза

Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

© ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2016

## Лабораторная работа № 4

### ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ДИФФУЗИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖЕК

*Цель работы:* изучение процесса диффузионного легирования кремниевых подложек и методик определения глубины залегания  $p$ — $n$ -перехода и удельного сопротивления слоя.

#### Теоретические сведения

**Механизмы диффузии.** Диффузия примесей в монокристаллический материал является одной из основных технологических операций при создании полупроводниковых приборов.

*Диффузия* — это процесс переноса примесей из области с высокой в область с низкой концентрацией, стимулированный высокой температурой. Атомы электрически активных примесей, проходя через поверхность полупроводникового материала, диффундируют в решетку кристалла и образуют области  $p$ - или  $n$ -типа электропроводности. Методом диффузии формируют активные, пассивные элементы ИС и изоляцию.

Обычно используют локальную диффузию с применением защитных масок из диоксида кремния. Возможны четыре механизма диффузии: вакансионный, межузельный, эстафетный и краудинный.

*Вакансионный механизм* (рис. 1, а) обусловлен наличием в монокристалле точечных дефектов (вакансий — пустых, незанятых узлов кристаллической решетки) и межузельных атомов. При повышенной температуре атомы в узлах кристаллической решетки колеблются вблизи равновесного положения. Время

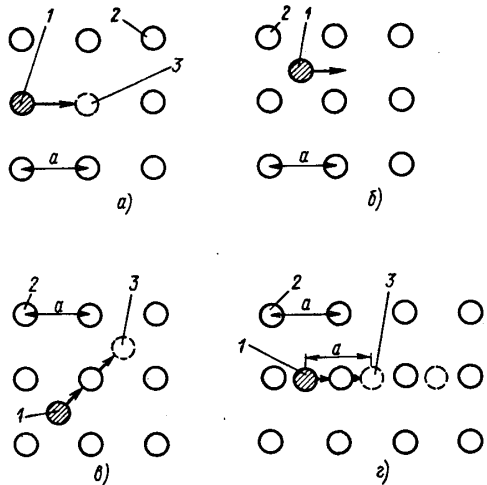


Рис. 1. Модели атомных механизмов диффузии в полупроводниковых материалах: а — вакансионный; б — межузельный; в — непрямого перемещения по междоузлиям (эстафетный); г — краудинный; 1 — атом примеси; 2 — собственный атом; 3 — вакансия

от времени они приобретают энергию, достаточную для того, чтобы удалиться из узла, и становятся межузельными. В решетке появляется вакансия. Соседний атом, будь то атом примеси или собственный атом полупроводникового материала, может мигрировать на место этой вакансии. Если мигрирующий атом является собственным, то происходит самодиффузия, а если примесным — примесная диффузия.

При *межузельном механизме* (рис. 1, б) атом переходит из одного положения в другое, не попадая при этом в узлы кристаллической решетки, т. е. происходит прямое перемещение атомов по междоузлиям. Такой механизм наиболее вероятен для примесей, атомы которых имеют малые размеры. Свободные атомы легче перемещаются по междоузлиям, так как они слабее связаны с решеткой, чем атомы, находящиеся в узлах.

На рис. 1, в показано движение межузельных атомов, когда в процессе перемещения они вытесняют атом из узла решетки и замещают его; вытесненный атом, в свою очередь, становится межузельным. Такой механизм перемещения собственных или примесных атомов называют механизмом непрямого перемещения атомов по междоузлиям или *эстафетным механизмом*. Если межузельный атом вытесняет атом, находящийся в узле, смещая его на период решетки  $a$  (рис. 1, г), то механизм диффузии называется *краудионным*.

Диффузия в кремний элементов III и V групп периодической системы происходит в основном по вакансионному механизму. Элементы I и VIII групп, имеющие малый ионный радиус, относятся к быстродиффундирующим примесям (в кремнии), их диффузия происходит по механизму прямого перемещения атомов по междоузлиям. Зависимость коэффициента диффузии от температуры подчиняется закону Аррениуса:

$$D = D_0 \exp(-\Delta E / kT),$$

где  $\Delta E$  — энергия активации процесса диффузии;  $k$  — постоянная Больцмана,  $8,62 \cdot 10^{-5}$  эВ/К.

**Виды и источники легирующих примесей.** В качестве легирующих примесей используют элементы III и V групп периодической системы. Для кремния — это бор В — акцепторная примесь, создающая области  $p$ -типа электропроводности, фосфор Р, мышьяк As и сурьма Sb — донорные примеси, создающие области  $n$ -типа. Акцепторные примеси диффундируют быстрее, чем донорные, из-за

меньшего ионного радиуса. Количество примеси, которое можно ввести в пластину, не превышает ее предельной растворимости при данной температуре в кремнии.

Источники легирующих примесей могут быть твердые, жидкие и газообразные. Так, источниками бора служат: твердые —  $B_2O_3$  и  $H_3BO_3$ , жидкий  $BBr_3$ , газообразные — галогениды бора  $BCl_3$ ,  $BF_3$ ,  $BI_3$  и диборан  $B_2H_6$ .

Источниками фосфора служат: твердые —  $P_2O_5$ , фосфаты аммония  $NH_4H_2PO_4$  и  $(NH_4)_2HPO_4$ , жидкие —  $POCl_3$ ,  $PBr_3$  и  $PCl_3$ , газообразный — фосфин  $PH_3$ .

В качестве источников мышьяка применяют: твердые — порошок кремния, легированный мышьяком до предела растворимости, оксид мышьяка  $As_2O_3$  и газообразный  $AsH_3$  (арсин).

Для диффузии сурьмы используют твердые источники — триоксид сурьмы  $Sb_2O_3$ , газообразный  $SbH_3$  (стибин).

При взаимодействии с поверхностью пластины источник примеси не должен образовывать трудноудаляемых соединений, осложняющих процесс диффузии. Кроме того, он должен иметь высокую степень чистоты, исключаящую загрязнения поверхности пластины. Важно, чтобы источник не был дефицитным, токсичным, взрывоопасным.

**Распределение примеси при диффузии из бесконечного и ограниченного источников.** При формировании ИС встречаются два случая диффузии: из бесконечного и ограниченного источников. Под диффузией из *бесконечного* (постоянного) источника понимают такое состояние системы, когда количество примеси, уходящее из приповерхностного слоя полупроводникового материала, восполняется равным количеством, поступающим извне. При этом поверхностная концентрация примеси остается постоянной, но резко убывает по глубине (рис. 2). Распределение концентрации примеси по глубине в этом случае описывается  $\text{erfc}$ -функцией:

$$N(x, t) = N_0 \text{erfc}(x / \sqrt{2Dt}), \quad (1)$$

где  $N_0$  — поверхностная концентрация примеси, принимая равной предельной растворимости  $N_s$  при температуре проведения процесса диффузии;  $D$  — коэффициент диффузии примеси;  $\text{erfc}\eta = 1 - \text{erf}\eta$  — функция дополнительная до единицы интеграла ошибок Гаусса  $\text{erf}\eta$ ,

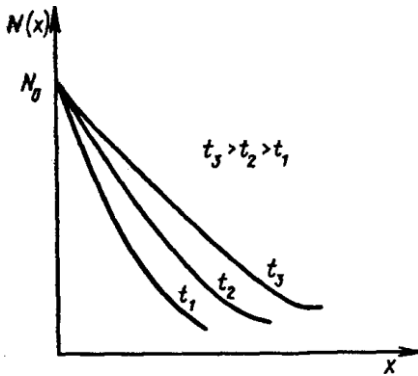


Рис. 2

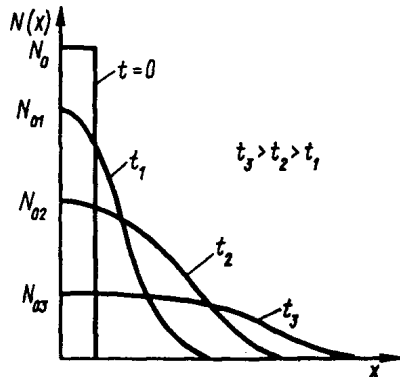


Рис. 3

$$\operatorname{erf} \eta = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\eta} \exp(-\eta^2) d\eta, \quad \eta = \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$$

Значения  $\operatorname{erfc}\eta$  приведены в таблице ниже.

$\eta$	$\operatorname{erfc}\eta$	$\eta$	$\operatorname{erfc}\eta$	$\eta$	$\operatorname{erfc}\eta$	$\eta$	$\operatorname{erfc}\eta$	$\eta$	$\operatorname{erfc}\eta$
0	1,00000	0,80	0,25790	1,60	0,02365	2,40	0,000689	3,20	$6,03 \cdot 10^{-6}$
0,10	0,88754	0,90	0,20390	1,70	0,01621	2,50	0,000407	3,30	$3,06 \cdot 10^{-6}$
0,20	0,77730	1,00	0,15730	1,80	0,01091	2,60	0,000236	3,40	$1,52 \cdot 10^{-6}$
0,30	0,67137	1,10	0,11980	1,90	0,00721	2,70	0,000134	3,50	$0,743 \cdot 10^{-6}$
0,40	0,57161	1,20	0,08969	2,00	0,004680	2,80	0,000075	3,60	$0,356 \cdot 10^{-6}$
0,50	0,47950	1,30	0,06599	2,10	0,002980	2,90	0,000041	3,70	$0,077 \cdot 10^{-6}$
0,60	0,39614	1,40	0,04772	2,20	0,001860	3,00	$22,50 \cdot 10^{-6}$	3,80	$0,035 \cdot 10^{-6}$
0,70	0,32220	1,50	0,03390	2,30	0,001140	3,10	$11,65 \cdot 10^{-6}$	3,90	$0,012 \cdot 10^{-6}$

Количество примеси, введенное в полупроводник (доза легирования), зависит как от предельной растворимости примеси при выбранной температуре диффузии, так и от температурно-временного воздействия ( $Dt$ ). Дозу легирования  $Q$ , т. е. общее количество атомов примеси, введенное в полупроводник за время диффузии через площадку в  $1 \text{ см}^2$ ,

$$Q = \int_0^{\infty} N(x) dx = \frac{2}{\sqrt{\pi}} N_0 \sqrt{Dt}. \quad (2)$$

При использовании *ограниченного* источника в приповерхностном слое имеется конечное количество атомов примеси (доза легирования), уходящие атомы не восполняются и поверхностная

концентрация примеси со временем уменьшается (рис. 3). Распределение концентрации примеси по глубине в этом случае описывается функцией Гаусса:

$$N(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right), \quad (3)$$

причем  $N_0 = Q/\sqrt{\pi Dt}$ .

$P-n$ -переход образуется на глубине  $x_j$ , где концентрация введённой примеси  $N(x, t)$  оказывается равной концентрации исходной примеси  $N_0$ , как показано на рис. 4.

Реальные распределения несколько сложнее за счет влияния диффузии, протекающей в других направлениях, отличных от нормали к поверхности пластины, и наличия ранее введенных в материал примесей.

При локальной диффузии следует учитывать искривление её фронта у края окна в маскирующем оксиде (рис. 5), которое увеличивает размеры диффузионной области на  $\Delta l$  и влияет на форму  $p-n$ -перехода. В структурах с малыми размерами окон глубина  $p-n$ -переходов может быть завышена и неоднородна по пластине. Значения  $\Delta l$  могут достигать  $0,8x_j$ .

**Способы проведения двухстадийной диффузии.** При создании элементов приборов часто используют *двухстадийную диффузию* (рис. 6). Для этого вначале в поверхность полупроводникового материала 2 с созданным на ней маскирующим слоем диоксида кремния 1 вводят определенное количество легирующей примеси из

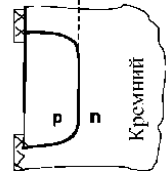
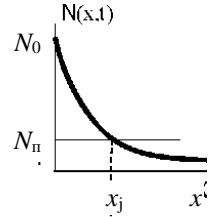


Рис. 4

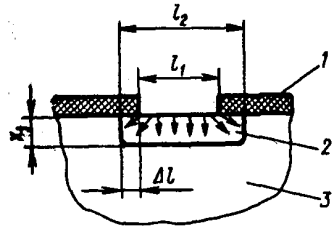


Рис. 5

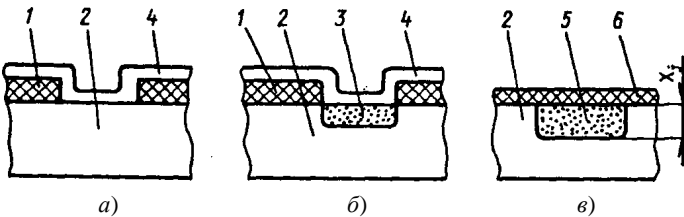


Рис. 6

бесконечного источника, создавая ее высокую поверхностную концентрацию при небольшой глубине диффузионной области («загонка» примеси) (рис. 6, а, б).

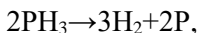
*Первую стадию* проводят при сравнительно невысоких температурах (950—1050 °С) в окислительной атмосфере. На поверхности образуется слой примесно-силикатного стекла 4 (поверхностный источник), под которым формируется высоколегированный объемный источник 3 (рис. 6, б).

*Вторую стадию* — диффузионный отжиг, называемую «разгонкой» (рис. 6, в), проводят, предварительно удалив примесно-силикатное стекло. Температура второй стадии выше (1050—1230) °С. Примеси, введенные на первой стадии, перераспределяются, их поверхностная концентрация уменьшается, а глубина проникновения в полупроводниковый материал увеличивается до заданного значения  $x_j$ . Создается требуемая диффузионная область 5. Температура и длительность второй стадии диффузии определяются заданными параметрами  $p$ — $n$ -перехода. Процесс ведут в окислительной среде, одновременно формируя маскирующий слой 6 для последующей фотолитографии.

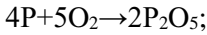
Необходимость проведения двухстадийной диффузии при легировании бором связана с тем, что требуется получать распределение со сравнительно невысокой поверхностной концентрацией, а с помощью одностадийной диффузии это не всегда удается. Для остальных примесей двухстадийная диффузия обеспечивает заданные параметры  $p$ — $n$ -переходов и возможность получения маскирующего оксида.

Двухстадийную диффузию проводят различными способами. Наиболее широко используют способ диффузии в открытой трубе (рис. 7). Он является основным для первой стадии. Кремниевые пластины 4 (от 50 до 200 шт.) загружают в лодочке в кварцевую трубу 3 через ее выходной конец, сообщающийся с атмосферой. Входной конец трубы соединен с газовой системой 1 подачи газа-носителя. Газообразные диффузаны подаются из баллона и перед входом в реактор смешиваются с азотом и кислородом. В зоне реакции образуется оксид легирующего элемента, а на поверхности кремниевых пластин выделяется элементарная примесь. Например, процесс диффузии фосфора сопровождается реакциями:

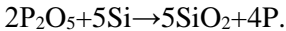
*в трубе*



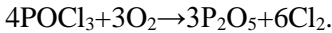




на поверхности кремния



Пары жидких диффузانتов из дозатора разбавляются газом-носителем и также образуют оксиды соответствующих элементов, например:



Диффузия из газообразных, жидких и поверхностных источников проводится в однозонной диффузионной печи с резистивными нагревателями 5 (рис. 7, а, в).

При проведении диффузии из твердого источника используют двухзонные печи с нагревателем 5 (рис. 7, б). При этом в низкотемпературной зоне помещают источник примеси 2, а в высокотемпературной — лодочку с пластинами 4. Газ-носитель, поступая из системы подачи 1, вытесняет из кварцевой трубы воздух, который удаляется через отверстие 6. Проходя через зону источника примеси, газ-носитель захватывает атомы примеси и переносит их в зону расположения пластин. Атомы адсорбируются на поверхности и диффундируют в глубь кремниевой пластины.

В качестве поверхностного источника используют легированные оксиды, примесно-силикатные стекла, слои легированного поликристаллического кремния. Диффузия проводят в слабо окислительной среде.

В качестве поверхностного источника используют легированные оксиды, примесно-силикатные стекла, слои легированного поликристаллического кремния. Диффузия проводят в слабо окислительной среде.

Способ диффузии в открытой трубе позволяет легко управлять составом парогазовой смеси, скоростью потока газа и обеспечивает

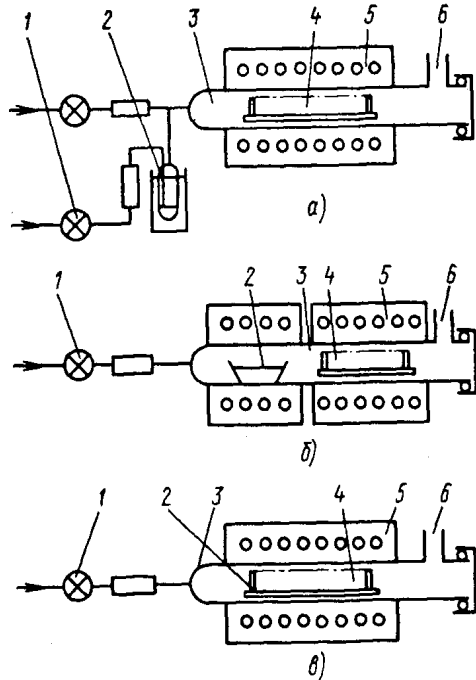


Рис. 7. Схема процесса диффузии в открытой трубе из газообразного или жидкого (а), твердого (б) и поверхностного (в) источников: 1 — газовая система; 2 — источник примеси; 3 — кварцевая труба; 4 — кремниевые пластины; 5 — нагреватель; б — выходное отверстие

требуемый профиль распределения примеси. Воспроизводимость параметров диффузии от пластины к пластине и по площади каждой пластины зависит от распределения температуры в рабочей зоне печи, числа пластин, их расположения относительно газового потока, типа диффузанта, чистоты проведения процесса и др.

### Лабораторное задание

1. Осуществить двухстадийную диффузию бора («загонка»— «разгонка») в кремний  $n$ -типа в проточной системе.

2. Измерить поверхностное сопротивление диффузионного слоя.

3. Рассчитать и построить график распределения примеси и определить глубину залегания  $p$ — $n$ -перехода.

4. Методом косого (сферического) шлифа определить глубину залегания  $p$ — $n$ -перехода экспериментально.

#### *Оборудование:*

1. Трубчатая однозонная печь горизонтального типа с рабочей температурой до 1200 °С типа СДО-125/3.

2. Pt-Pt/Rh-термопара.

3. Кварцевый держатель для пластин.

4. Приспособление для изготовления косого шлифа.

5. Металлографический микроскоп МИМ-7 или МИМ-8.

6. Установка для измерения сопротивления четырехзондовым методом.

7. Фторопластовый стакан.

8. Пинцет с фторопластовыми наконечниками.

9. Сушильный шкаф (120 °С).

#### *Материалы:*

1. Кремний  $n$ -типа с удельным сопротивлением 0,50—4,5 Ом см (в виде пластин, полированных до 14 класса чистоты поверхности).

2. Кислоты: плавиковая (48 %-я), азотная (70 %-я), соляная.

3. Растворители: толуол, этиловый спирт.

4. Аргон чистый.

5. Кислород.

6. Фильтровальная бумага.

Технология диффузионного легирования кремния

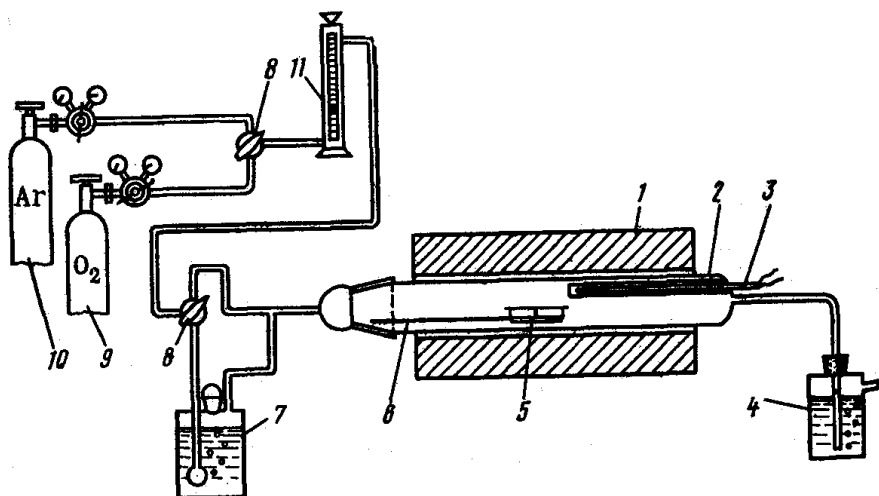


Рис. 8

Установка для диффузионного легирования кремния (рис. 8) аналогична установке для термического окисления кремния.

Поверхность оптически полированной пластины кремния *n*-типа обезжиривают в кипящем толуоле, затем кипятят в азотной кислоте до исчезновения бурых окислов азота, промывают дистиллированной водой и хранят в бюксе со спиртом. Кварцевую трубу, в которой будет проводиться процесс диффузии, необходимо промыть смесью  $\text{HNO}_3:\text{HCl}=1:3$ , затем водой и высушить в диффузионной печи. Такой же обработке подвергается и держатель пластин. Перед загрузкой пластины в диффузионную камеру измеряют поверхностное сопротивление четырехзондовым методом, используя стандартную компенсационную схему. Методика измерения и расчета поверхностной концентрации приведена ниже.

*Технологический режим загонки бора.* Предварительно печь разогревают до рабочей температуры в изотермической зоне  $1000 \pm 1$  °С в потоке аргона, отрегулированном так, чтобы через гидрозатвор проходило 3—5 пузырьков в секунду, что соответствует скорости потока 18—20 л/ч.

Кремниевую пластину помещают в держатель. Открыв шлиф (поток аргона не выключать), вдвигают пластину лицевой стороной назад в диффузионную трубу. Во избежание растрескивания пластины её помещают не сразу в рабочую зону, а предварительно в тече-

ние 5 мин выдержав при 400—500 °С. Загонку проводят в течение 20 мин.

В процессе загонки на поверхности кремния формируется относительно тонкий, насыщенный бором слой. Диффузия при «загонке» идет из бесконечного источника. По окончании процесса выдвигают держатель в зону 400—500 °С и после 5 мин выдержки вынимают из диффузионной трубы. Стравливают поверхностный слой  $B_2O_3$  и возможные следы  $SiO_2$  на поверхности пластины в плавиковой кислоте (фторопластовый стакан, пинцет с фторопластовыми наконечниками). Пластину тщательно промывают и этиловым спиртом, высушивают фильтровальной бумагой, вновь измеряют поверхностное сопротивление. По полученным данным рассчитывают поверхностную концентрацию диффузанта  $N_0$  и его общее содержание в пластине  $Q$ .

*Технологический режим разгонки бора.* Диффузионную печь нагревают до  $1200 \pm 1$  °С при потоке кислорода через барботер с кипящей водой 3—4 пузырька в секунду (расход кислорода 11—14 л/ч). Промытую спиртом и высушенную кремниевую пластину вдвигают в рабочую зону постепенно, выдержав «предварительно в зоне низкой температуры в течение 5 мин. Закрывают трубу шлифом, корректируют расход кислорода и проводят «разгонку» в течение 1 ч. При этом в окислительной атмосфере на поверхности пластины образуется слой боросиликатного стекла, который играет роль отражательной границы. Происходит дальнейшая диффузия бора в кремний из сформированного на первой стадии диффузии тонкого диффузионного слоя с высокой поверхностной концентрацией бора. Граница диффузионного слоя продвигается в глубь кристалла. Окончательное положение  $p$ — $n$ -перехода определяется временем диффузии при разгонке. По окончании процесса пластину постепенно выдвигают из рабочей зоны. Поверхностный слой боросиликатного стекла стравливают в плавиковой кислоте. После промывки и сушки пластины приступают к изучению диффузионного слоя.

*Оценка параметров диффузионных слоев.* Измерение поверхностного сопротивления (рис. 9) проводят четырехзондовым методом в пяти точках в

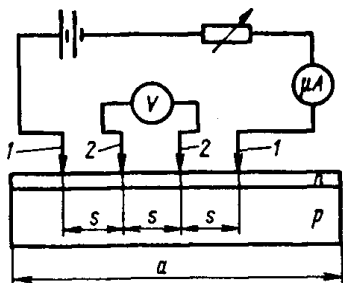


Рис. 9

средней части пластины и определяют среднее арифметическое. Расчет  $R_s$  осуществляют по формуле

$$R_s = \frac{\pi U}{\ln 2 I} = 4,5324 \frac{U}{I},$$

где  $U$  — напряжение, измеряемое на потенциальных зондах, мВ;  $I$  — ток через образец, мА. Формула, не учитывающая расстояние между зондами, пригодна для бесконечного слоя.

Для упрощения расчетов рекомендуется установить рабочий ток 4,5324 мА. Тогда поверхностное сопротивление будет численно равно падению напряжения на потенциальных зондах:  $R_s$  [Ом/□] =  $U$  [мВ]. Для определения фоновой концентрации доноров в исходной пластине кремния  $n$ -типа используют график рис. 10, принимая во внимание, что в данном случае  $R_s$  является мерой удельного сопротивления кремния, поскольку примесь распределена в исходном материале равномерно. Определенная таким образом концентрация доноров  $N_d$  необходима в дальнейшем для расчета глубины залегания  $p$ — $n$ -перехода.

Измеряя поверхностное сопротивление после загонки бора,

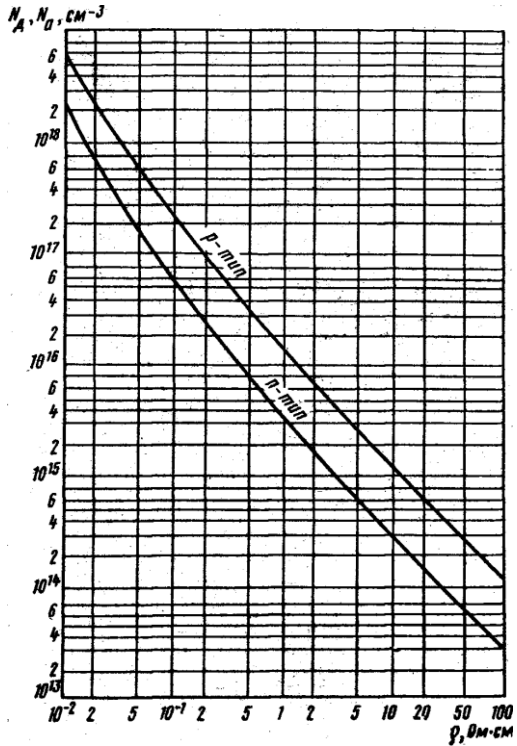


Рис. 10

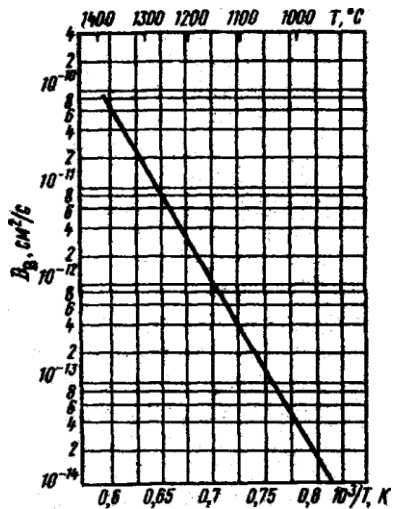


Рис. 11

определяют его *поверхностную концентрацию*  $N_0$  и *общее количество акцепторов*  $Q$  в тонком диффузионном слое. Поскольку при загонке диффузия идет из бесконечного источника в течение небольшого промежутка времени, толщина этого слоя принимается равной  $h \approx 5,4\sqrt{Dt}$ . Зависимость коэффициента диффузий бора от температуры, описываемая уравнением

$$D_B = 10,5 \exp(-3,6/kT),$$

приведена на рис. 11. Зная величины  $R_s$  и  $h$  при загонке, определяют среднюю проводимость слоя по формуле

$$\bar{\sigma} = 1/(R_s h).$$

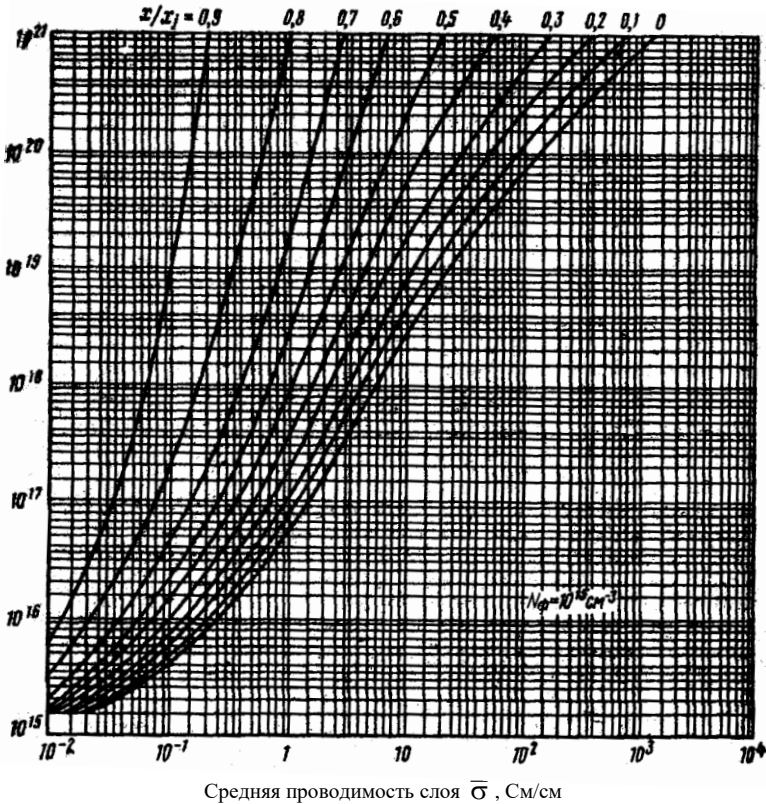


Рис. 12. Зависимость поверхностной концентрации от средней проводимости слоев  $p$ -типа в кремнии с фоновой концентрацией доноров  $N_{\phi} = 1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  при  $\text{erfc}$ -распределении

По рис. 12 определяют соответствующую поверхностную концентрацию бора  $N_0$ . Текущую координату  $x$  в определении  $\bar{c} = 1/[R_s(x_j - x)]$  принимают равной нулю, что соответствует поверхности. Тогда  $x_j$ , определяющая координату  $p$ — $n$ -перехода, равна толщине диффузионного слоя  $h$ . При этом условии поверхностную концентрацию  $N_0$  определяют (рис. 12) по кривой с параметром  $x/x_j=0$ . Изменяя  $x$  в пределах от 0 (поверхность) до  $x_j$  ( $p$ — $n$ -переход) и рассчитывая соответствующие значения  $\bar{c}$  и параметра  $x/x_j$ , по рис. 10 определяют концентрацию примеси на любом расстоянии от поверхности при erfс-распределении. Строят график  $N=f(x)$  в полулогарифмических координатах. По соотношению (2) рассчитывают общее количество бора  $Q$ , внедренного в кремний при загонке.

По полученным данным рассчитывают *глубину залегания*  $p$ — $n$ -перехода при «разгонке», используя соотношение (3), в предположении, что этот процесс представляет собой диффузию из ограниченного источника ( $Q$ ) с отражающей границей (окисел) в полуограниченное тело (пластину). При этом на границе  $p$ - и  $n$ -областей концентрация акцепторов  $N(x)$  должна равняться фоновой концентрации доноров в исходном кремнии (см. рис. 4). Рассчитанную исходя из уравнения (3) глубину залегания  $p$ — $n$ -перехода сравнивают с экспериментально определенной методом косого шлифа (см. ниже). По уравнению (3) также рассчитывают диффузионный профиль бора в кремнии  $N(x)$  при фиксированном времени разгонки (1 ч) через 0,25 мкм. Строят график в координатах  $\lg N(x)$  ( $\text{см}^{-3}$ ) —  $x$  (мкм).

### Экспериментальное изучение $p$ — $n$ -перехода

Толщину диффузионного слоя, а следовательно, и глубину залегания  $p$ — $n$ -перехода определяют методом косого или сферического шлифа. В первом случае зажатый в специальном приспособлении образец кремния сошлифовывают под углом  $\alpha=3$ — $5^\circ$  вращательными движениями по толстому зеркальному стеклу, на которое предварительно нанесена алмазная паста или водная суспензия микропорошка карбида кремния М10. Во втором случае стальной шарик диаметром  $D$  (30—100 мм) вращают, касаясь поверхности пластины. В место соприкосновения подается алмазная паста или оксид хрома. Образующаяся сферическая лунка должна быть глубже  $p$ — $n$ -перехода. Капля раствора, состоящего из 0,05—0,1 % азотной (70 %-ной) кислоты в 48 %-ной плавиковой кислоте, помещается на по-

верхность шлифа и через 2—3 мин при сильном освещении места контроля  $p$ -область темнеет, в то время как  $n$ -область остается светлой. Механизм окрашивания связан с образованием диоксида кремния на поверхности  $p$ -области, богатой необходимыми для окисления дырками. При освещении за счет фотоэффекта переход смещается в обратном направлении и это обеспечивает разную скорость травления областей  $p$ - и  $n$ -типов.

Измеряя с помощью инструментального микроскопа с микрометрической насадкой расстояние  $d$  от поверхности образца до  $p$ — $n$ -перехода вдоль косоуго шлифа или расстояние  $l$ , представляющее проекцию  $d$  на поверхность исходной пластины, находят глубину залегания  $p$ — $n$ -перехода:

$$x_j = d \sin \alpha = l \operatorname{tg} \alpha.$$

Во втором случае измеряя больший  $d_2$  и меньший  $d_1$  диаметры окрашенной (в случае диффузии акцепторов) или неокрашенной (в случае диффузии доноров) области, глубину залегания  $p$ — $n$ -перехода находят по формуле:

$$x_j = (d_2^2 - d_1^2) / (4D).$$

Экспериментально определенную глубину перехода сравнивают с теоретически рассчитанной.

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Лабораторное задание.
4. Описание установки диффузионного легирования.
5. График распределения примеси по глубине.
6. Результаты поверхностное сопротивление диффузионного слоя и глубины залегания  $p$ — $n$ -перехода.
7. Выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1. Понятие о диффузии примесей в полупроводник и основные процессы, определяющие её.
2. Что такое коэффициент диффузии?
3. Первое уравнение Фика и его физический смысл.
4. Второе уравнение Фика и его физический смысл.



5. Диффузия из бесконечного (постоянного) источника примеси. Математическая модель и её реальное применение.

6. Диффузия из ограниченного источника примеси. Математическая модель и её реальное применение.

7. Из каких соображений выбирают поверхностную концентрацию примеси?

8. Как условно изображают образование  $p$ — $n$ -перехода?

9. Чем отличаются распределения концентраций по глубине при диффузии из ограниченного и бесконечного источников?

10. Нарисовать распределение примеси при загонке при  $T_1 < T_2 < T_3$  и  $t = \text{const}$ .

11. Нарисовать распределение примеси при разгонке при  $t_1 < t_2 < t_3$  и  $T = \text{const}$ .

12. Техника проведения процессов диффузии (диффузия из газовой, жидкой и твердой фаз).

13. Охарактеризуйте основные диффузенты.

14. Объясните принцип работы установки, предназначенной для диффузионного легирования.

15. Объясните цель, задачи, метод диффузионного легирования. Последовательность операций, необходимых для проведения процесса диффузионного легирования.

## Лабораторные работы № 5, 6

### ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ НАПЫЛЕНИЯ ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

*Цель работы:* ознакомиться с методами вакуумного термического и магнетронного напыления тонких металлических пленок и получить практические навыки работы на технологическом и лабораторном оборудовании.

#### Теоретические сведения

В производстве полупроводниковых приборов и интегральных схем (ИС) широко используются тонкие металлические пленки, выполняющие роль коммутационных элементов и контактных площадок, а также резисторов и обкладок конденсаторов. В зависимости от назначения элементов ИС используют как пленки из алюминия, меди, никеля, хрома, титана, молибдена, платины, золота, так и много-

слоистые пленочные структуры.

Наибольшее распространение получили следующие методы нанесения тонких пленок:

термическим испарением материалов в вакууме (резистивным, высокочастотным, электронно-лучевым нагревом);

ионным распылением (катодным, ионно-плазменным, магнетронным).

*Термическое испарение в вакууме* по сравнению с другими методами обладает рядом преимуществ. Так, в высоком вакууме ( $10^{-4}$ — $10^{-7}$  Па) можно наносить особо чистые пленки, т.е. мало загрязненные молекулами остаточных газов ( $O_2$ ,  $H_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$  и др.). Относительная простота метода, а также возможность автоматизации процесса позволяют осаждать пленки с воспроизводимыми параметрами. Термическое испарение основано на создании направленного потока пара вещества и последующей его конденсации на поверхности подложек, температура которых существенно ниже температуры источника пара. Типовая рабочая камера установки термического испарения показана на рис. 1.

Процесс термического испарения состоит из трех основных этапов: испарения вещества; переноса его паров к подложкам; конденсации на них и образования пленочной структуры. При нагревании до определенной температуры вещество испаряется, кинетическая энергия его частиц (атомов и молекул) возрастает, в результате чего увеличивается вероятность разрывов межатомных и межмолекулярных связей. Отрываясь от поверхности, частицы вещества распространяются в свободном пространстве, образуя пар. При этом возможны две схемы испарения: твердая фаза — жидкая фаза — парообразная фаза и твердая фаза — парообразная фаза (сублимация). Вторую схему испарения также часто называют возгонкой. При этом частицы вещества испаряются с поверхности, создавая в замкну-

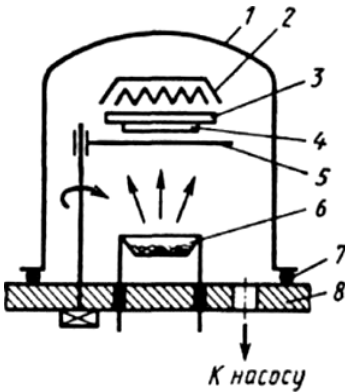


Рис. 1. Схема термического испарения в вакууме: 1 — колпак; 2 — нагреватель подложек; 3 — подложкодержатель; 4 — подложка; 5 — заслонка; 6 — испаритель; 7 — уплотнительная прокладка; 8 — опорная плита установки

том объеме  $V$  некоторое давление пара  $p$ . Одновременно происходит обратный процесс — конденсация. При  $V=\text{const}$ ,  $T=\text{const}$  и  $p=\text{const}$  скорости испарения  $v_{\text{и}}$  и конденсации  $v_{\text{к}}$  равны. Условия, при которых соблюдается равенство, называют равновесными (состояние насыщения), а образующийся при этом пар — насыщенным. Температуру, при которой давление насыщенного пара вещества равно 1 Па, называют *температурой испарения* ( $T$ ).

При нанесении пленок вещество должно испаряться в *молекулярном режиме*, при котором молекулы перемещаются от испарителя к подложке прямолинейно, без столкновений и рассеяния. Эти условия достигаются при давлении остаточных газов  $p < 10^{-2}$  Па, а насыщенного пара  $p_s < 10^2$  Па. При таком режиме скорость испарения, которую можно оценить по формуле

$$v_{\text{и}} = 0,058 p_s \sqrt{M/T},$$

оказывается невысокой. Здесь  $M$  — молекулярная масса испаряемого вещества,  $T$  — температура испарения. При  $p_s > 10^2$  Па скорость испарения оказывается настолько велика, что над поверхностью подложек образуется слой пара, затрудняющий молекулярное истечение пара. При  $p > 10^{-2}$  Па также создаются условия для немоллекулярного режима испарения, так как длина свободного пробега частиц меньше расстояния между подложкой и испарителем. Кроме того, форма молекулярного пучка должна быть такой, чтобы обеспечивалась максимальная направленность движения частиц испаряемого вещества к подложке. Для осаждения равномерной по толщине пленки плотность падающего пучка частиц должна быть одинаковой по всей площади поверхности подложки.

Кроме того, присутствующие при большом давлении в рабочей камере остаточные ( $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ) газы не только уменьшают среднюю длину свободного пробега молекул, но насыщают пленку, химически взаимодействуют с ней, образуя соединения, изменяющие первоначальные свойства осаждаемого вещества.

Конденсация пара зависит от температуры подложки и плотности молекулярного пучка. Приближаясь к подложке, частицы вещества попадают в поле сил притяжения ее поверхностных атомов и молекул. Вместе с тем на очень близком расстоянии на частицы вещества действуют также силы отталкивания. Атомы (молекулы) испаряемого вещества, достигшие подложки, могут мгновенно отразиться от нее (упругое столкновение), адсорбироваться и через неко-

торое время вновь отразиться (реиспариться), а также адсорбироваться и после кратковременной миграции по поверхности остаться на ней, т. е. происходит конденсация. Если энергия связи частиц вещества с атомами подложки больше средней энергии атомов подложки, они конденсируются, а в ином случае отражаются от нее. Температура подложки, выше которой все частицы вещества отражаются от ее поверхности и пленка при этом не образуется, называемая *критической температурой*, зависит от физико-химических свойств материалов осаждаемой пленки и подложки, а также от состояния поверхности подложки.

Наименьшую плотность, при которой частицы осаждаемого вещества конденсируются на подложке при данной ее температуре, называют *критической плотностью молекулярного потока*. При «нахождении» молекулами осаждаемого вещества мест, соответствующих минимуму свободной энергии системы молекула—подложка, образуются зародыши. Рост зародышей происходит в результате присоединения новых молекул, мигрирующих по поверхности или попадающих на зародыш непосредственно из пространства между источником и подложкой. Размер зародыша, при котором он обладает минимальной устойчивостью, называется *критическим*. Зародыш критического размера распадается даже при удалении от него всего одной молекулы и, наоборот, при добавлении ее становится более устойчивым. При росте и объединении зародышей образуются островковые структуры, а затем — сплошная пленка.

Конденсация вещества на подложке определяется *коэффициентом конденсации (аккомодации)*:  $\alpha_k = n_k / n_{об}$ , где  $n_{об}$  — количество атомов или молекул, достигающих поверхности в единицу времени;  $n_k$  — количество частиц, закрепляющихся на поверхности в единицу времени.

Скоростью испарения, зависящей от температуры, определяется производительность процесса, возможность химического взаимодействия остаточных газов и испаряемого вещества, а также условия его кристаллизации на подложке. Так, при низких скоростях испарения в пролетном пространстве успевают произойти химические реакции и образуются оксиды, гидриды, нитриды и другие соединения, обладающие иными, чем осаждаемое вещество, свойствами и скоростями миграции по поверхности подложки. В результате изменяются условия кристаллизации, структура и электрические параметры осаждаемой пленки.

Температура подложки определяет взаимодействие ее материала с остаточными газами, а также интенсивность химического взаимодействия этих газов и материала пленки. При повышении температуры улучшается десорбция, уменьшается газонасыщение и создаются условия термодинамического равновесия. В результате формируются сплошные и бездефектные пленки, обладающие хорошей адгезией, имеющие ненапряженную структуру и оптимальные размеры зерен. Однако значительное повышение температуры подложки увеличивает критический размер зародышей и может привести к сохранению островковой структуры, что, в свою очередь, вызывает неравномерность пленки по толщине и ухудшение ее электрофизических параметров. Это особенно важно при изготовлении тонкопленочных резисторов (толщина пленки 0,35—0,6 мкм). Обычно температуру подложек выбирают в интервале от 30 до 400 °С.

Цель термической обработки осажденных пленок — снятие в них напряжений и предотвращение рекристаллизации, которая может происходить при повышенных температурах, возникающих при прохождении тока через элементы. Правильный выбор температуры термообработки  $T_{об}$ , ее длительности и давления остаточных газов  $p$  способствует стабилизации структурных, а следовательно, и электрофизических параметров пленок. Так, для большинства резистивных пленок  $T_{об}=300—450$  °С; длительность — 1—4 ч,  $p=10^{-3}—10^{-4}$  Па. Ухудшение вакуума, т. е. увеличение давления, интенсифицирует процессы химического взаимодействия испаряемого вещества с остаточными газами.

В зависимости от способа нагрева осаждаемого вещества различают *резистивные, электронно-лучевые и индукционные испарители*.

Резистивные испарители изготовляют из проволоки и лент тугоплавких металлов, а также из графита и диборида титана  $TiB_2$ . Некоторые типы нагревателей показаны на рис. 2. Недостатки резистивных испарителей — загрязнение наносимой пленки материалом нагревателя или тигля, малый срок службы, невозможность испарения тугоплавких материалов.

Электронно-лучевые испарители (рис. 3, а) основаны на преобразовании кинетической энергии электронов в энергию нагрева при бомбардировке ими испаряемого материала. Эти испарители применяются при нанесении пленок тугоплавких материалов, не за-

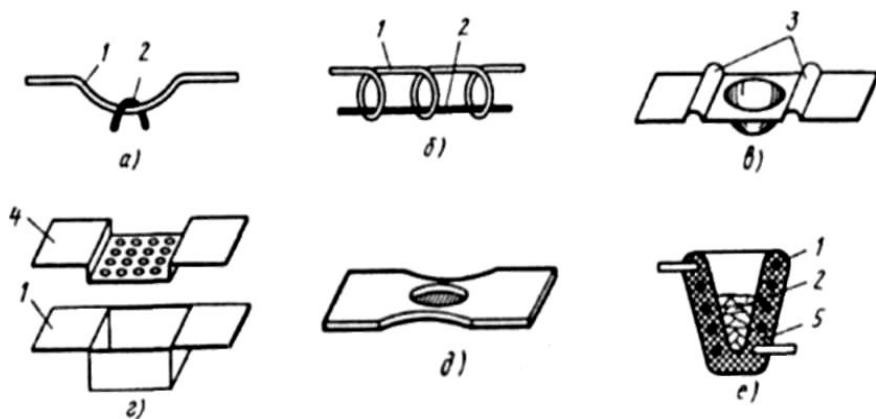


Рис. 2. Типы резистивных испарителей: *а, б* — проволочные; *в—д* — ленточные; *е* — тигельный; 1 — нагреватель; 2 — испаряемое вещество; 3 — компенсаторы; 4 — крышка; 5 — тигель

грязнят камеру материалом нагревателя и тигля и могут быть использованы более длительное время, чем резистивные. Однако при электронной бомбардировке некоторые материалы разлагаются на фракции с выделением газообразных веществ. Обычно площадь сфокусированного электронного пучка 3—60 мм<sup>2</sup>, напряжение на аноде — 6—10 кВ, скорость испарения — до 5 мг/с.

Индукционные испарители (рис. 3, б) основаны на разогреве

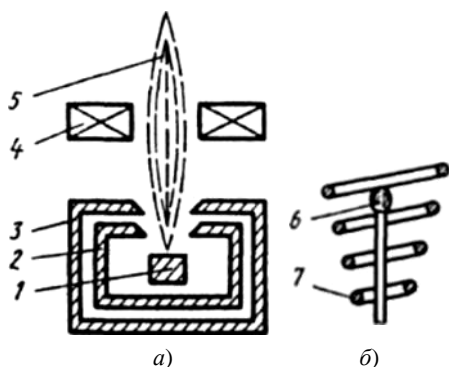


Рис. 3. Электронно-лучевой (*а*) и индукционный (*б*) испарители: 1 — катод; 2 — управляющий электрод; 3 — анод; 4 — магнитная фокусирующая система; 5 — электронный пучок; 6 — испаряемый материал; 7 — индуктор

материала высокочастотным магнитным полем, создаваемым индуктором. Основной недостаток этих испарителей — значительная зависимость скорости испарения вещества от его массы.

*Катодное, ионно-плазменное и магнетронное распыление* существенно отличаются от термического испарения. Так, при катодном распылении материалов процесс ведут при давлении 0,01—1 Па, скорость роста пленки меньше, чем при тер-

мическом испарении и она формируется в газовом разряде. Катодное распыление основано на том, что поток положительно заряженных ионов газа (например, аргона), получивших энергию от сотен электрон-вольт до единиц килоэлектрон-вольт, направляют на мишень, выполненную из распыляемого вещества. Ионной бомбардировкой из мишени выбиваются частицы вещества, которые оседают на подложке в виде тонкой пленки. В зависимости от способов ионизации газа, т. е. создания плазмы и распыления мишени, ионные источники подразделяют на диодные, триодные и магнетронные.

В диодных источниках поток электронов, необходимый для ионизации рабочего газа, образуется в результате автоэлектронной эмиссии. В таких источниках бомбардируемая ионами газа мишень одновременно является катодом и поэтому называется *катодом-мишенью*. Осаждение вещества происходит на подложку, располагаемую на аноде. Если распыляемая мишень металлическая, то распыление ведется при постоянном токе, а если диэлектрическая, — при переменном. Во втором случае при отрицательной полярности мишень распыляется, а при положительной с нее снимается накопленный отрицательный заряд. Диодные системы (рис. 4, а) наиболее просты и состоят из катода-мишени 1, анода 3 и подложки 2, размещенных в рабочей камере, в которой первоначально создается вакуум  $10^{-4}$ — $10^{-3}$  Па; затем в камеру напускается инертный газ до давления 1,3—13 Па. При подаче на электроды напряжения 1—5 кВ электроны с катода-мишени устремляются в сторону анода, ионизируя инертный газ, в результате чего возникает тлеющий разряд и образу-

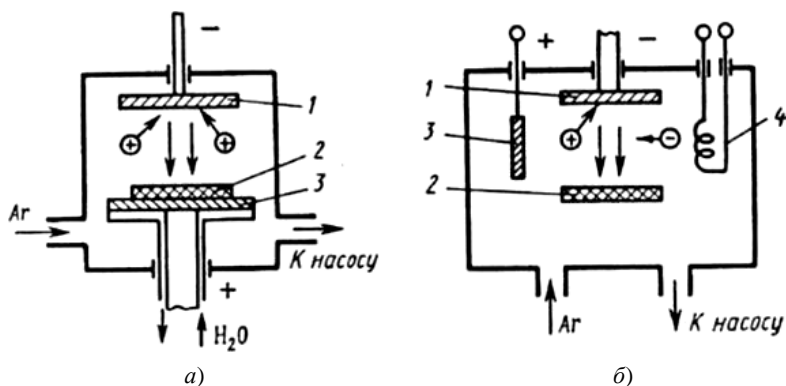


Рис. 4. Диодный (а) и триодный (б) ионные источники испарения:  
1 — катод-мишень, 2 — подложка, 3 — анод, 4 — термокатод

ется плазма. Схема ионизации рабочего газа выглядит следующим образом:  $\text{Ar} + e^- \rightarrow \text{Ar}^+ + 2e^-$ . Положительные ионы плазмы, ускоряясь в электрическом поле, устремляются к катоду-мишени, бомбардируют и распыляют ее.

В триодных источниках, называемых также *ионно-плазменными* (рис. 4, б), третий электрод выполняет функцию термоэмиссионного катода, увеличивая концентрацию электронов, а следовательно, и ионизированных атомов рабочего газа (аргона). Причем увеличение количества ионов аргона возможно при уменьшении его давления до  $10^{-2}$ — $10^{-1}$  Па, что обеспечивает нанесение пленок, не загрязненных посторонними примесями. Кроме того, наличие термокатода позволяет приблизить мишень к подложке, что увеличивает скорость нанесения пленки. Как и в диодных источниках, рабочую камеру предварительно откачивают до давления порядка  $10^{-4}$  Па. Затем подают ток накала на вольфрамовый термокатод, который разогревается до температуры возникновения термоэлектронного тока высокой плотности. Напряжение между раскаленным термокатодом и анодом равно 200 В, а давление аргона в рабочей камере —  $10^{-2}$ — $10^{-1}$  Па. Электроны, испускаемые термокатодом, ионизируют молекулы аргона, которые после подачи отрицательного потенциала на катод-мишень (3—5 кВ), вытягиваясь из плазмы, бомбардируют и распыляют ее поверхность.

Особенностью триодных источников распыления является

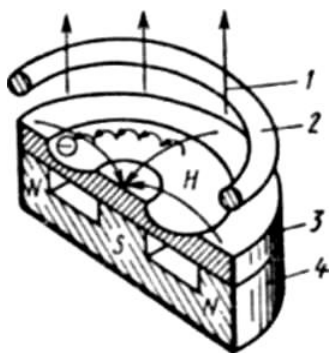


Рис. 5. Схема магнетронного распыления: 1 — поток распыляемого вещества; 2 — кольцевой анод; 3 — катод-мишень; 4 — магнитная система

безынерционность: распыление после снятия потенциала с катода-мишени мгновенно прекращается. Так как энергия ионов, распыляющих мишень, очень велика, в разрядной камере и на мишени выделяется большое количество теплоты. Поэтому такие системы требуют охлаждения.

В магнетронных источниках (рис. 5), выполненных на основе диодных систем, в разрядном промежутке одновременно с электрическим действует магнитное поле, что позволяет без увеличения концентрации электронов повысить плотность плазмы.

На электроны, эмитированные ав-



тоэмиссионным катодом-мишенью 3 и движущиеся к кольцевому аноду 2 в приложенном между ними электрическом поле, действует магнитное поле  $H$ , направленное перпендикулярно электрическому. При переkreщивании полей путь движения электронов удлиняется (они движутся по спирали), что повышает вероятность их столкновения с молекулами рабочего газа. В результате при давлении  $10^{-2}$ — $10^{-1}$  Па создается высокая концентрация ионов газа, которые движутся к катоду-мишени, бомбардируя ее и распыляя с большой интенсивностью. Поток 1 распыляемого вещества устремляется к подложке и осаждается на ней в виде пленки. Достоинства магнетронных систем, используемых для распыления металлов и диэлектриков, являются: низкое рабочее давление, позволяющее уменьшить количество газовых включений в осаждаемой пленке; высокая скорость нанесения пленки; надежность и стабильность параметров напылительной системы; широкий диапазон толщин пленок при их высокой адгезии и однородности.

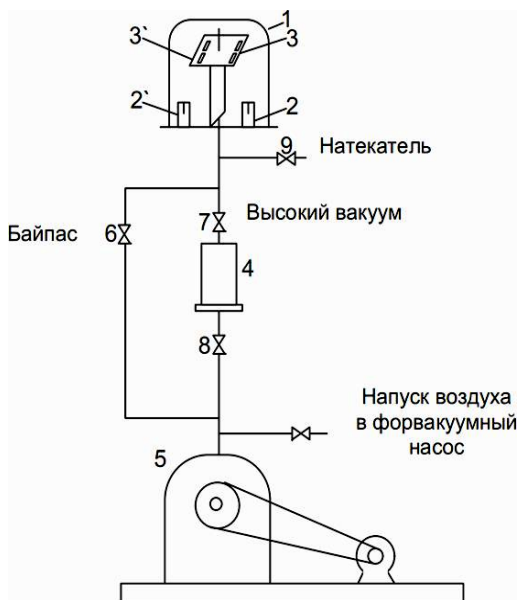


Рис. 6. Схема установки вакуум-термического напыления: 1 — стеклянный колпак; 2 и 2' — испарители для меди и алюминия соответственно; 3 и 3' — подложкодержатели соответственно для меди и алюминия; 4 — диффузионный насос; 5 — форвакуумный насос; 6 — кран вакуумной магистрали БАЙПАС; 7 — кран «ВЫСОКИЙ ВАКУУМ»; 8 — кран «ФОРВАКУУМ»

### Описание лабораторной установки

I. Напыление тонких металлических пленок методом вакуумного испарения осуществляется на установке вакуум-термического напыления, схема которой показана на рис. 6. Основной частью установки является вакуумный колпак 1, устанавливаемый на метал-

лической подставке с резиновой прокладкой. Рабочее пространство под колпаком разделено на две части, соответственно на камеры для напыления алюминия и меди.

*ВНИМАНИЕ!* Для обеспечения чистоты получаемых пленок не допускается менять местами испарители для алюминия и меди.

Навеска металла в виде отрезка проволоки помещается в соответствующий испаритель 2 или 2' под колпаком. Подложки помещаются на подложкодержатели 3 и 3' в непосредственной близости от испарителей 2 и 2'. Откачка системы осуществляется форвакуумным (5) и диффузионным насосами до давления  $10^{-4}$  мм рт. ст. Вакуумные краны, диффузионный и форвакуумный насосы, а также вакуумные магистрали смонтированы под защитным кожухом.

*ВНИМАНИЕ!* Разбирать защитный кожух с целью получения доступа к вакуумным магистралям категорически запрещается.

Тумблеры управления насосами и вентили вакуумных кранов выведены на переднюю панель защитного кожуха. Испарители управляются от отдельного блока в составе установки.

II. Нанесение пленок меди методом магнетронного распыления осуществляется на установке, вакуумная схема которой показана на рис. 7. Магнетронная распылительная система смонтирована на металлическом фланце, соединенном с вакуумной системой трубопроводом. Распылительная мишень (катод) толщиной 10 мм и диамет-

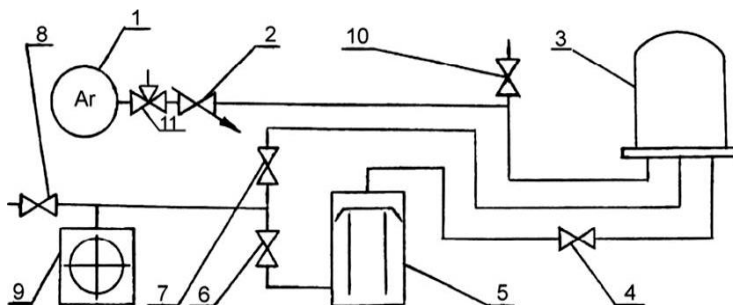


Рис. 7. Вакуумная схема установки магнетронного распыления: 1 — объем с рабочим газом (хлорвиниловая емкость); 2 — натекатель; 3 — распылительная камера с магнетроном; 4 — кран «ДИФфуЗИОННЫЙ НАСОС»; 5 — диффузионный насос; 6 — кран «ФОРВАКУУМНЫЙ НАСОС»; 7 — кран «БАЙПАС»; 8 — клапан напуска воздуха; 9 — форвакуумный насос; 10 — напуск воздуха в рабочую камеру; 11 — трехходовой кран напуска рабочего газа (атмосферы)

ром рабочей части 50 мм изготовлена из меди вакуумной плавки и закрепляется на корпусе магнетрона через резиновое уплотнение прижимным фланцем. Постоянное магнитное поле создается магнитным блоком, состоящим из центрального и периферических постоянных магнитов, закрепленных на основании блока, в свою очередь изготовленного из магнитомягкого материала. Магнитный блок создает над поверхностью катода магнитное поле порядка 0,02—0,05 Тл. Составляющая этого поля параллельна плоскости катода. Мишень магнетрона имеет принудительное охлаждение проточной водой. Анод изготовлен из латунной трубки и также охлаждается проточной водой. Расстояние от катода до анода составляет 25 мм.

Анод и корпус магнетрона закреплены на фланце с помощью изолированных стоек (на схеме не показаны). Питание разрядной цепи магнетрона осуществляется от источника постоянного тока с напряжением до 2000 В и максимальным током до 1 А. Подложкодержатель расположен от мишени на расстоянии, которое можно менять в пределах от 35 мм до 90 мм. Подложки закрепляются на подложкодержателе с помощью зажимов так, чтобы обеспечивался хороший (равномерный) тепловой контакт подложки с подложкодержателем. Подложкодержатель имеет нулевой потенциал, то есть заземлен. Между подложкодержателем и мишенью магнетрона расположен дополнительный торообразный электрод диаметром 140 мм, изготовленный из меди. Медные трубки охлаждения анода и мишени магнетрона, являющиеся одновременно электрическими выводами этих электродов, изолированы от фланца керамическими изоляторами и герметизированы клеем К-400. Вывод дополнительного электрода также изолирован и герметизирован. Напуск атмосферного воздуха и рабочих газов осуществляется через трубку, выходной конец которой расположен во фланце магнетронного узла. Давление рабочего газа устанавливается с помощью натекателя.

III. Для оценки качества сцепления металлических пленок с подложкой используется ультразвуковой дезинтегратор типа. Дезинтегратор также может быть использован для смешивания, диспергирования, эмульгирования и отмывки. Его принцип действия заключается в генерации ультразвуковой энергии и введении ее в исследуемую среду. Введение энергии в исследуемую среду осуществляется концентратором (сонотродом). Ультразвуковая энергия вырабатывается в керамическом преобразователе, питаемом от генератора мощности частотой 22 кГц. Рабочая частота автоматически поддержива-

ется на резонансной частоте механических колебаний преобразователя посредством системы обратной связи. Это позволяет преобразовывать энергию с максимальной эффективностью. Введение ультразвуковой энергии в жидкость вызывает образование в ней кавитационных пузырьков. Сокращения кавитационных пузырьков служат источником ударных волн. Они создают значительные давления и механические силы. Интенсивность этих явлений можно регулировать путем изменения амплитуды колебаний, что позволяет интенсифицировать процессы коагуляции, разрыва, смешения, отщепления пленок и загрязнений. Рабочая частота прибора  $22 \pm 1,65$  кГц; стабилизированная амплитуда колебаний на конце концентратора соответственно в пяти диапазонах составляет: 1—8 мкм, 2—10 мкм, 3—12 мкм, 4—14 мкм, 5—16 мкм; максимальная выходная мощность — 180 Вт. Прибор начинает работать немедленно после включения. Непрерывная работа может осуществляться до 4 ч после включения. В приборе использован пьезокерамический преобразователь типа «сэндвич». Концентратор имеет наконечник из химически нейтрального материала. Может использоваться рабочий объем сосуда до 40 мл. Органы управления ультразвуковым дезинтегратором выведены на лицевую панель отдельного блока управления.

Исследуемые образцы помещают в сосуд с дистиллированной водой (или другой жидкостью — по заданию преподавателя), сосуд помещают на основание прибора и затем концентратор концом опускают в жидкость на глубину не менее 0,5—1 см от поверхности жидкости. Затем устанавливается необходимый режим работы прибора и включается сетевой тумблер. Для анализа результатов обработки необходимо точно зафиксировать время обработки. По истечении необходимого времени сетевой тумблер выключают, образцы извлекают и подвергают анализу — либо визуальному осмотру, либо рассмотрению под микроскопом. Перед тем как рассматривать образцы под микроскопом, они должны быть высушены.

## Материалы и оборудование

В зависимости от вида задания студенту выдаются следующие материалы и комплектующие:

необходимое количество подложек для нанесения тонких металлических пленок;

реактивы и отмывочные средства для очистки подложек;

протирачный материал (фильтровальная бумага);

навески напыляемых материалов;  
пинцет;  
комплект лабораторной посуды;  
микроскоп.

## Лабораторное задание

1. Проведение очистки подложек по одной из методик, предложенной преподавателем;
2. Нанесение на подложки тонких металлических пленок (по заданию преподавателя);
3. Анализ адгезионных характеристик и оценка качества полученных слоев на подложках.

## Порядок выполнения работы

### *Вариант 1. Вакуум-термическое напыление пленок*

1. Получить у преподавателя необходимое количество подложек и навески металла.

2. Очистить поверхности подложек в следующей последовательности:

обезжиривание путем кипячения в 20 %-ном растворе соды;

обработка хромовой смесью. Подложки помещают в плоскую фарфоровую чашку, заливают хромовой смесью, нагревая до температуры 50—70 °С, и выдерживают при этой температуре 3—5 мин;

обработанную хромовой смесью подложку моют сначала водопроводной, а затем дистиллированной водой;

вымытую подложку ставят в сушильный шкаф и сушат при температуре 120—130 °С в течение 15—20 мин.

При обработке подложек **категорически!** запрещается брать их руками. Необходимо пользоваться пинцетом.

*Внимание! Визуально чистые подложки должны быть без разводов и следов от остатков отмывочных растворов.*

3. Подготовить установку и загрузить очищенные образцы в подложкодержатели. Для этого необходимо:

проверить первоначальное положение вакуумных кранов установки («НАПУСК ВОЗДУХА В НАСОС» — открыт; «БАЙПАС» — закрыт; «НАТЕКАТЕЛЬ» — открыт);

снять защитную сетку со стеклянного колпака установки;

снять колпак и установить его на специальном держателе;

осторожно, не касаясь плоскости подложек руками, установить их в подложкодержатели установки и закрепить прижимами;

при необходимости добавить образец для испарения в тигель нагревательного элемента — медь в тигель с медью, а алюминий — в тигель с алюминием;

протереть уплотнительную прокладку колпака изопропиловым спиртом, используя пинцет и вату;

установить стеклянный колпак по возможности как можно ровнее и затем установить защитную сетку;

установить водяным вентилем требуемый напор воды для охлаждения диффузионного насоса (помечен риской).

4. Включить питание установки на пульте управления.

5. Закрыть кран «НАПУСК ВОЗДУХА В НАСОС» и включить кнопкой на панели управления установкой форвакуумный насос.

6. Закрыть кран «НАТЕКАТЕЛЬ», открыть кран «БАЙПАС» и произвести предварительную откачку рабочего объема испарительных камер через магистраль байпаса.

7. Проверить факт начавшейся откачки объема под стеклянным колпаком (стрелка вакуумметра не должна быть в крайнем левом положении). Если откачка началась успешно, можно продолжать выполнение работы.

8. Через 5—10 мин закрыть кран «БАЙПАС» и открыть краны диффузионного насоса. *ВНИМАНИЕ! Диффузионный насос во избежание выхода из строя никогда нельзя подключать к атмосфере.*

9. При достижении давления в системе  $10^{-1}$  мм рт. ст. или 12 делений по шкале вакуумметра (положение отмечено красной риской) включить кнопкой на панели управления установкой диффузионный насос.

10. Откачать систему до предельного вакуума (примерно  $10^{-4}$  мм рт. ст., стрелка вакуумметра при этом будет в крайнем правом положении) и на протяжении всего процесса откачки и работы на установке следить за напором воды.

11. При достижении требуемого вакуума (примерно  $10^{-4}$  мм рт. ст.) произвести напыление пленок алюминия или меди. Для этого необходимо:

не изменяя положение вакуумных кранов подать напряжение на нагревательные элементы испарителей (перевести переключатель из вертикального положения в одно из положений «медь» или «алю-

миний» соответственно, включив предварительно блок питания испарителей в сеть 220 В);

плавно увеличивать напряжение на испарителе ручкой «ЛАТР», смонтированной на верхней панели блока управления испарителями, до тех пор, пока не заметим слабое свечение раскалившегося нагревательного элемента испарителя;

увеличив еще напряжение на испарителе примерно на 10 %, зафиксировать момент увеличения давления в системе (стрелка вакуумметра отклонится влево примерно на  $\frac{1}{4}$  шкалы). Этот момент будет характеризоваться максимальной скоростью роста пленки на подложке;

сразу после увеличения давления в системе резко снять напряжение на испарителе до нуля (этот момент еще будет характеризоваться ростом пленки на подложке до момента остывания испарителя).

12. В таком положении подложки должны остыть практически до комнатной температуры (примерно в течение 15—20 мин). В противном случае после разгерметизации установки пленка металла на подложках окислится.

13. При необходимости дожидаться откачки установки до прежнего разрежения (примерно  $10^{-4}$  мм рт. ст.) и по аналогии напылить пленку другого металла, используя второй испаритель (п.п. 11 и 12);

14. Произвести разгерметизацию колпака установки и выгрузку подложек с напыленными пленками в следующей последовательности:

закрывать кран «ВЫСОКИЙ ВАКУУМ» и проверить, закрыт ли кран «БАЙПАС». Если он оказался открыт, то вы плохо изучили предыдущие пункты описания работы, и вам необходимо его закрыть;

плавно открывая кран «НАТЕКАТЕЛЬ» напустить воздух под колпак установки;

снять защитную сетку с колпака установки;

осторожно снять колпак, установив его на специальном держателе, и извлечь подложки с пленками из подложкодержателей, по возможности не касаясь плоскости подложек руками.

15. Если необходимо дальнейшее нанесение пленок на другие подложки, то необходимо их установить на подложкодержателе, далее по приведенной выше методике установить колпак и защитную

сетку, предварительно протерев уплотнительное кольцо изопропиловым спиртом, закрыть кран «НАТЕКАТЕЛЬ» и «ФОРВАКУУМ» и произвести предварительную откачку подколпакового объема установки до давления  $10^{-1}$  мм рт. ст. через магистраль байпаса, соответственно открыв кран «БАЙПАС». После достижения давления в системе  $10^{-1}$  мм рт. ст. закрыть кран «БАЙПАС», открыть краны «ФОРВАКУУМ» и «ВЫСОКИЙ ВАКУУМ» и откачать систему диффузионным насосом до предельного вакуума (примерно до  $10^{-4}$  мм рт. ст.). Далее можно приступить к напылению пленок на подложки (для этого повторите п.п. 11—14 данного описания).

#### 16. Порядок выключения установки.

Если на все подложки пленки нанесены, то необходимо приступить к выключению установки. Для этого необходимо выполнить следующие действия:

еще раз проверить правильно ли установлены вакуумные краны: при разгерметизированном колпаке кран «НАТЕКАТЕЛЬ» — открыт, кран «ВЫСОКИЙ ВАКУУМ» — закрыт, кран «БАЙПАС» — закрыт, кран «ФОРВАКУУМ» — открыт и производится постоянная откачка диффузионного насоса, кран «НАПУСК ВОЗДУХА В НАСОС» — закрыт, так как работает форвакуумный насос;

кнопкой на панели управления выключить диффузионный насос, при этом соответствующая лампочка погаснет;

в таком состоянии, при непрерывной откачке диффузионного насоса форвакуумным насосом, установку следует выдержать в течение 30—40 мин для полного остывания диффузионного насоса;

далее необходимо закрыть кран «ФОРВАКУУМНЫЙ НАСОС», кнопкой на панели управления установкой выключить питание форвакуумного насоса и напустить воздух в форвакуумный насос, осторожно открыв кран «НАПУСК ВОЗДУХА В НАСОС»;

нажать красную кнопку полного выключения питания установки, перекрыть вентилем воду для охлаждения диффузионного насоса;

отключить от сети 220 В блок питания испарителями.

17. Параллельно с остыванием диффузионного насоса произвести визуальный или под микроскопом (по заданию преподавателя) осмотр подложек с напыленными пленками. Результаты осмотра занести в таблицу в форме, представленной в табл. 1.

18. В зависимости от задания преподавателя исследовать качество сцепления пленки металла с подложкой, используя ультразву-



Таблица 1

## Результаты лабораторных исследований

Номер образца	Способ получения	Характеристики внешнего вида (краткое описание)	Причины возможного брака

ковой дезинтегратор UD-20 (режим и время обработки подложек ультразвуком уточнить у преподавателя). Результаты исследований занести в таблицу в форме, представленной в табл. 2.

Таблица 2

## Результаты обработки образцов ультразвуком

Номер образца	Длительность обработки, с	Режим обработки	Характерные признаки изменения внешнего вида

*Вариант 2. Получение металлических пленок на подложках методом магнетронного распыления*

1. Получить у преподавателя необходимое количество подложек, очистить их от органических и неорганических примесей кипячением в концентрированном растворе кальцинированной соды, а затем протравить в течение 3—5 мин в хромовой смеси. При необходимости оценить чистоту тестовой подложки по краевому углу смачивания.

2. Установить чистую подложку на подложкодержателе рабочей камеры установки.

3. Установить колпак рабочей камеры установки.

4. Убедиться в наличии установленной емкости с рабочим газом (азотом).

5. Включить и отрегулировать водяное охлаждение диффузионного насоса.

6. Включить электропитание установки магнетронного распыления.

7. Проверить положение вакуумных кранов: «НАТЕКАТЕЛЬ» — закрыт, «БАЙПАС» — открыт, краны «ФОРВАКУУМНЫЙ НАСОС» и «ДИФфуЗИОННЫЙ НАСОС» — закрыты.

8. Тумблером «ФОРВАКУУМНЫЙ НАСОС» включить форвакуумный насос установки магнетронного распыления. При этом загорится индикатор «ФОРВАКУУМНЫЙ НАСОС ВКЛЮЧЕН».

9. Перекрыть кран «НАПУСК РАБОЧЕГО ГАЗА», полностью открыть «НАТЕКАТЕЛЬ» и откачать газовую магистраль до давления  $10^{-1}$  мм рт. ст. или 12 делений по шкале вакуумметра ВИТ-3.

10. При достижении давления в системе  $10^{-1}$  мм рт. ст. или 12 делений по шкале вакуумметра ВИТ-3 тумблером «диффузионный насос» включить диффузионный насос. При этом загорится индикатор «диффузионный насос включен».

11. Далее вакуумные краны привести в следующее положение: «БАЙПАС» — закрыт, краны «ФОРВАКУУМНЫЙ НАСОС» и «ДИФФУЗИОННЫЙ НАСОС» — открыты.

12. Откачать систему до предельного вакуума (примерно 90 делений по шкале вакуумметра ВИТ-3). Строго следить за напором воды.

13. При достижении требуемого разрежения в системе полностью закрыть «НАТЕКАТЕЛЬ» и переключить трехходовой кран «НАПУСК РАБОЧЕГО ГАЗА» на подачу рабочего газа (аргона).

14. Продолжить откачку системы до достижения предельного вакуума (примерно  $10^{-4}$  мм рт. ст.), при этом стрелка вакуумметра отклонится в крайнее правое положение.

15. С помощью «НАТЕКАТЕЛЯ» установить требуемое давление рабочего газа в камере (желательно, чтобы оно было точно равно  $8 \cdot 10^{-2}$  мм рт. ст. — 80 делений по шкале вакуумметра).

16. Включить тумблер «ВЫСОКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ». При этом включится индикатор «высокое напряжение включено».

17. Поворачивая ручку ЛАТРа установить требуемое напряжение зажигания разряда, при этом газовый разряд можно будет визуально наблюдать через прозрачное стекло колпака напылительной камеры. Рекомендуемый ток распыления мишени 100 мА (20 делений по шкале миллиамперметра). С этого момента начинается процесс распыления мишени и осаждение пленки на подложке.

18. После получения пленки нужной толщины напряжение на мишени ручкой ЛАТРа уменьшить до нуля. Выключить тумблер «ВЫСОКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ».

19. «Промыть» вакуумную распылительную камеру рабочим газом до остывания подложки, то есть после выключения разряда в течение 5 мин не закрывать «НАТЕКАТЕЛЬ».

20. Закрыть «НАТЕКАТЕЛЬ», перекрыть трехходовой кран «НАПУСК РАБОЧЕГО ГАЗА» и кран «ДИФФУЗИОННЫЙ НАСОС». Дать подложкам окончательно остыть в течение 3—5 мин.

21. Переключить трехходовой кран на подачу воздуха, полностью открыть «НАТЕКАТЕЛЬ» и напустить воздух под колпак распылительной камеры.

22. Снять стеклянный колпак, установить его на специальном держателе и извлечь подложки.

23. Если необходимо продолжить напыление пленок на другие предварительно очищенные подложки, то надо:

установить их на подложкодержателе, закрыть распылительную камеру стеклянным колпаком, привести вакуумные краны «НАТЕКАТЕЛЬ», «ДИФФУЗИОННЫЙ НАСОС», «ФОРВАКУУМНЫЙ НАСОС» в положение «ЗАКРЫТЫ» и только после этого открыть кран «БАЙПАС»;

перекрыть кран «НАПУСК РАБОЧЕГО ГАЗА», полностью открыть «НАТЕКАТЕЛЬ» и откачать газовую магистраль до давления  $10^{-1}$  мм рт. ст. или 12 делений по шкале вакуумметра ВИТ-3;

перейти к п.9 и повторить последовательность работы на установке до п.22.

24. Порядок выключения установки магнетронного распыления.

Непосредственно после извлечения подложки с пленкой из подложкодержателя положения вакуумных кранов должны быть следующими: трехходовой кран «НАПУСК РАБОЧЕГО ГАЗА» — открыт на атмосферу; «НАТЕКАТЕЛЬ» — полностью открыт, «ДИФФУЗИОННЫЙ НАСОС» и «БАЙПАС» — закрыты, «ФОРВАКУУМНЫЙ НАСОС» — открыт. В таком состоянии напылительная камера разгерметизирована, оба насоса работают, форвакуумный насос непрерывно откачивает диффузионный насос;

перекрыть трехходовой кран и выключить тумблер «ДИФФУЗИОННЫЙ НАСОС»;

через 25—30 мин выключить тумблер «ФОРВАКУУМНЫЙ НАСОС»;

закрыть воду;

отключить установку от электросети.

25. Параллельно с остыванием диффузионного насоса произвести визуальный или под микроскопом осмотр подложек с нанесенными пленками. Результаты осмотра занести в таблицу в форме, представленной в табл. 1.

26. В зависимости от задания преподавателя исследовать качество сцепления пленки металла с подложкой, используя ультразву-

ковой дезинтегратор (режим и время обработки подложек ультразвуком уточнить у преподавателя). Результаты исследований занести в таблицу в форме, представленной в табл. 2.

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Лабораторное задание.
4. Протокол выполнения операций при работе на установке.
5. Результаты выполнения работы (образцы подложек с напыленными пленками, заполненные формы таблиц).
6. Выводы по работе, в которых должны быть отражены возможные причины возникновения брака при напылении пленок.

### Контрольные вопросы

1. Приведите примеры использования тонких металлических пленок в технологии микроэлектроники.
2. Охарактеризуйте метод термического испарения в вакууме для целей получения тонких металлических пленок (возможности метода, область применения, преимущества и недостатки).
3. Охарактеризуйте метод термического испарения в вакууме с точки зрения динамики процесса (стадии процесса, влияние условий, наиболее благоприятный режим проведения процесса).
4. Охарактеризуйте аппаратное оформление установки термического испарения в вакууме (наиболее важные блоки установки, их назначение).
5. Зачем необходимо проводить термическую обработку пленки после ее нанесения?
6. Охарактеризуйте различные типы испарителей в составе установки вакуумного напыления (возможности, принцип действия, преимущества, недостатки).
7. Охарактеризуйте метод магнетронного распыления для целей получения тонких металлических пленок (возможности метода, область применения, преимущества и недостатки).
8. Охарактеризуйте метод магнетронного распыления с точки зрения динамики процесса (стадии процесса, влияние условий, наиболее благоприятный режим проведения процесса).

9. Охарактеризуйте аппаратное оформление установки магнетронного распыления (наиболее важные блоки установки, их назначение).

10. Под действие чего происходит распыление катода-мишени. Механизм ионизации рабочего газа. Критерии выбора рабочего газа.

## Лабораторная работа № 7

### ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИВАРКИ ПРОВОЛОЧНЫХ ВЫВОДОВ

*Цель работы:* ознакомиться с методами приварки проволочных выводов полупроводниковых приборов и интегральных схем и получить практические навыки работы на технологическом оборудовании, позволяющем выполнять ультразвуковую приварку выводов.

#### Теоретические сведения

Кристалл полупроводникового прибора может выполнять свои функции только после присоединения к его активным областям металлических проводников — выводов, которые служат для подключения к корпусам, выводным рамкам, а затем — к внешним электрическим цепям.

Разработка новых типов ИС, особенно БИС и СБИС, ориентирована на использование автоматического сборочного оборудования с электронными сканирующими устройствами и системами опико-телевизионного контроля. Уже используются в производстве автоматы производительностью до 10—15 тысяч соединений в час и выше. Автоматизация процессов монтажа микросоединений, являясь одной из сложнейших инженерных задач, выдвигает повышенные требования к микропроводе, покрытиям контактных площадок кристаллов и травящим корпусов и микросварочному инструменту.

В производстве широко используется метод проволочного присоединения, при котором в качестве выводов служат гибкие металлические проводники из алюминия, золота, меди и платины. Проволочное присоединение обеспечивает высокую надежность микросоединений, легкость контроля и возможность автоматизации технологического процесса сборки.

**Проволока микронных размеров.** Миниатюризация в электронике вызывает необходимость использовать на сборочных опера-

циях проволоку диаметром до 0,018 мм. При сварке на автоматических установках иногда происходят обрывы проволоки.

Наиболее широко используется алюминиевая проволока. Сварку осуществляют внахлест и реже встык шариком.

При сварке алюминиевой проволокой встык шариком получение качественных соединений зависит от технологии образования шарика на конце проволоки. Алюминиевые шарики диаметром от 1,7 до 2,5 диаметра проволоки можно получить, регулируя время разряда и плотность тока.

Для формирования соединений различными способами в производстве изделий микроэлектроники широко используется золотая проволока.

Известен способ получения высокопрочной проволоки диаметром 0,025 мм из золота для сборки изделий микроэлектроники. Способ основан на получении порошка золота с добавками иттрия или церия. При получении порошка редкоземельный элемент частично окисляется. Для завершения окисления порошок выдерживают в окислительной атмосфере при повышенной температуре, а затем формируют из него пруток. Из прутка известными методами вытягивают проволоку диаметром от 0,025 мм. Данная технология обеспечивает высокие механические и электрические свойства золотой проволоки.

Для сборки некоторых изделий рекомендуется использовать вместо золотой медную проволоку. Проволоку изготавливают из слитка меди с содержанием серы и серебра до  $2 \cdot 10^{-4}$  %, селена и теллура — до  $1 \cdot 10^{-4}$  %, содержание других примесей меньше  $10^{-3}$  %. Такая проволока имеет следующие свойства: предел прочности на разрыв —  $(1,37—3,24) \cdot 10^2$  МПа, твердость по Виккерсу — в пределах 38—50. Уменьшение содержания примесей в сочетании с соответствующим отжигом позволяет улучшить характеристики проволоки применительно к технологии сборки приборов.

Для автоматизированной термокомпрессионной сварки (ТКС) выводов ИС используется высокочистая медная проволока, содержащая 99,999 % Cu. Такую проволоку получают способами вакуумной плавки и зонной очистки.

Проволоку микронных размеров из меди получают различными способами. Одним из методов получения бескислородной меди и других высокочистых материалов на основе меди предлагается в материале при плавке добавлять элементы Mg, Ca, Ti, Zr, Li, Na, K и др.

При прокатке меди в нее попадают частицы стали, образующиеся за счет износа валков. Поэтому чистота медных заготовок зависит от износостойкости рабочих органов волочильного оборудования и качества смазки. Замена стальных валков на керамические значительно снижает износ и, соответственно, загрязнение меди.

Установлено, что основной причиной обрывов в основном являются включения в меди исходного прутка. Согласно рентгеновскому анализу, в 54 % случаев включения представляют собой алюминий и кремний, выделяемые из огнеупоров, а в 35 % — это железо и легирующие добавки из углеродистых сталей волочильного инструмента. Остальные 11 % приходятся на другие материалы.

Для формирования внутренних соединений в микродатчиках кроме золотой и алюминиевой проволоки рекомендуется использовать платиновую проволоку. Результаты исследований микросоединений платиновой проволоки диаметром 0,032 мм на кремниевой подложке с Ti или Al/SiO<sub>2</sub>-подслоем толщиной 0,3 мкм, выполненных ультразвуковой сваркой (УЗС), показывают, что данные микросоединения имеют следующие параметры: прочность на разрыв 13 сН, контактное сопротивление в среднем 0,05 Ом. Испытания сварных соединений платиновой проволокой с Pt/Ti покрытием сапфировых подложек при 900 °С в среде чистого кислорода в течение 1 ч не показали изменений качества микросоединений.

**Инструмент для микросварки.** Повышение производительности и надежности проволочной сборки самым тесным образом связано с материалом и конструкцией микросварочного инструмента. Для образования микросоединений широкое распространение получил инструмент из металлокерамических твердых сплавов. Следует отметить, что эти сплавы обладают невысокой стойкостью при монтаже проволочных соединений. Для изготовления микросварочного инструмента применяется также керамика и сталь. Керамический материал на основе Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> обладает высокой твердостью и отсутствием адгезии с золотом. Стойкость стального инструмента значительно повышается упрочнением его поверхности различными методами химико-термической обработки.

Для уменьшения схватывания инструмента с присоединяемыми выводами его рабочую площадку покрывают специальными сплавами. Так, нанесение на инструмент из сплава ВК6М защитного покрытия из карбида титана и оксида циркония увеличивает срок его службы в два—три раза.

При формировании шарика в процессе проволочной сборки на конце проволоки при возникновении электрической дуги наблюдается осаждение мелких капель металла на торце капилляра. Данные покрытия уменьшают возможность осаждения металла на рабочую поверхность сварочного инструмента. Предложена конструкция керамического капилляра, на рабочую поверхность которого нанесено покрытие из оксидов алюминия или кремния толщиной 22—30 нм.

Повышение прочности и надежности сварных соединений ТКС проволокой диаметром 0,010—0,030 мм достигаются за счет формы рабочей площадки капилляра в виде двух цилиндрических полостей. Верхняя полость имеет диаметр на 0,003—0,008 мм больше диаметра проволоки, нижняя — на 0,005—0,01 мм больше диаметра проволоки, а высота нижней полости составляет 0,01—0,05 мм.

Нижний конец инструмента для термозвуковой разварки кристаллов ИС, имеющих контактные площадки размером  $75 \times 75$  мкм и шагом 90 мкм, золотой проволокой диаметром 0,025 мм встык заострен на  $30^\circ$  и имеет рабочую часть выпуклой формы. Капилляр для протяжки проволоки заканчивается полостью, имеющей диаметр несколько меньше диаметра оплавленного шарика. Полость образована двумя или тремя поверхностями с различной конусностью (от  $15^\circ$  до  $90^\circ$ ), что позволяет, несмотря на изменения диаметра шарика, получать стабильные по размерам сварные соединения на кристалле.

**Монтаж проволочных микросоединений.** Наиболее широкое применение при монтаже проволочных выводов в полупроводниковых приборах и ИС нашли следующие методы монтажа: ультразвуковая сварка (УЗС), сварка давлением с косвенным импульсным нагревом (СКИН), ультразвуковая сварка с косвенным импульсным нагревом (УЗСКИН), односторонняя контактная сварка, термокомпрессионная сварка и пайка. Внешний вид микросоединений, выполненных различными методами сварки, представлен на рис. 1.

В настоящее время основными способами монтажа внутренних соединений в изделиях микроэлектроники являются термокомпрессионная сварка и ультразвуковая сварка.

При ТКС один из соединяемых материалов (обычно вывод) должен обладать достаточно высокой пластичностью. Металлы при этом способе монтажа нагреваются до температуры начала рекристаллизации (отжига) или несколько выше, но на  $20^\circ\text{C}$  ниже самой низкой температуры эвтектики системы.



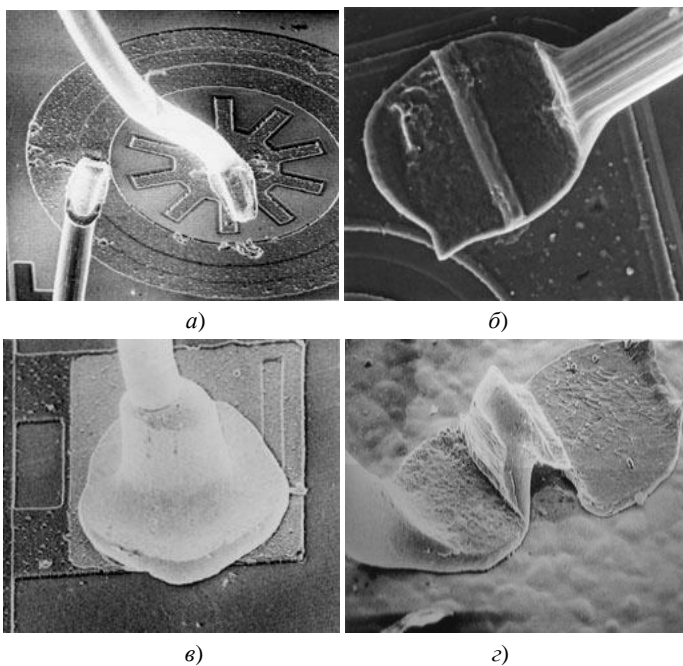


Рис. 1. Внешний вид соединений, выполненных различными методами микросварки: *а* — ультразвуком; *б* — термокомпрессией внахлест; *в* — термокомпрессией с образованием шарика; *з* — расщепленным электродом. Увеличение 150× (*а*) и 350× (*б*—*з*)

При ТКС все материалы можно разделить на три группы:

1) металлы с хорошей взаимной диффузией в твердом состоянии (Ag-Au, Au-Cu); они образуют ряд твердых растворов и обладают наилучшей свариваемостью.

2) материалы, образующие между собой низкотемпературные эвтектики (Al-Si, Au-Si); они обладают удовлетворительной свариваемостью.

3) металлы, взаимная диффузия которых приводит к образованию интерметаллических соединений и эвтектик (Au-Al, Au-Sn); при тщательном соблюдении технологии сборки они обеспечивают необходимое качество соединений.

На эффективность и качество микросварных соединений при ТКС влияют оксидные пленки, находящиеся на поверхности контактных площадок кристаллов.

Основными параметрами процесса ТКС являются:  
усилие сжатия соединяемых элементов;  
температура нагрева соединения;  
длительность выдержки под давлением.

При ультразвуковой микросварке (УЗС) соединение металлов в твердом состоянии осуществляется за счет возбуждения в свариваемых деталях упругих колебаний ультразвуковой частоты при одновременном создании определенного давления. В результате возникновения трения на поверхности раздела между соединяемыми телами происходит разрушение оксидных и адсорбированных пленок и образование физического контакта и развитие очагов схватывания между соединяемыми деталями.

Основными параметрами процесса УЗС являются:

амплитуда колебаний рабочего торца инструмента, которая зависит от электрической мощности преобразователя и конструктивного исполнения колебательной системы;

усилие сжатия свариваемых элементов;

длительность включения ультразвуковых колебаний (время сварки).

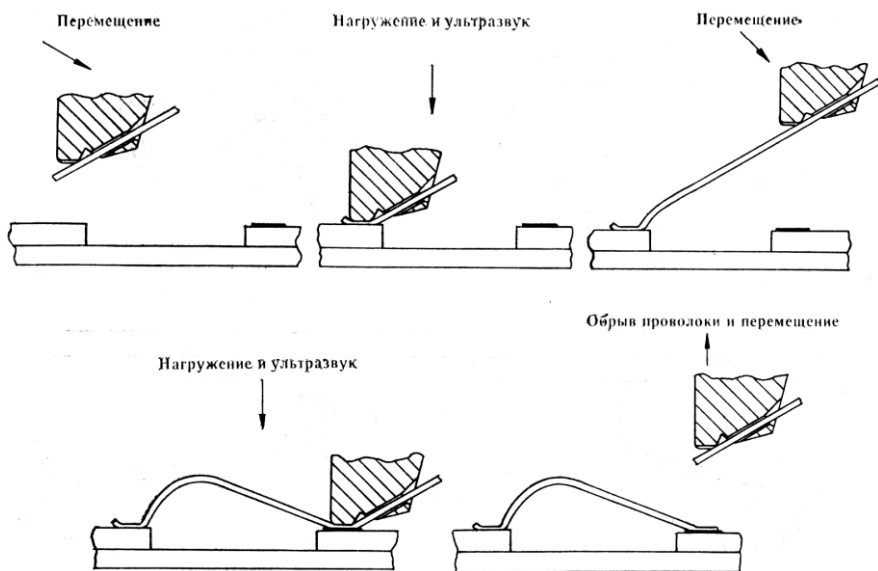


Рис. 2. Последовательность формирования проволочной перемычки при сварке внахлест

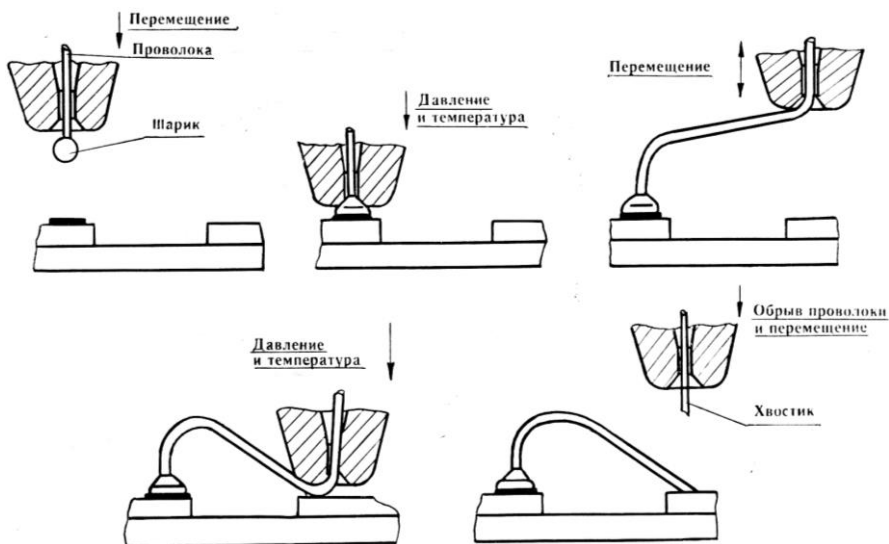


Рис. 3. Последовательность формирования проволочной перемычки при первой сварке встык

На рис. 2 представлена последовательность формирования проволочной перемычки между кристаллом и траверсой корпуса при сварке внахлест, а на рис. 3 — встык оплавленным шариком.

### Лабораторное задание

Сформировать проволочные перемычки между контактными площадками кристалла и траверсами корпуса ультразвуковой сваркой на режимах, обеспечивающих максимальную прочность микросоединений. Для соединений использовать проволоку марки АК0,9ПМ диаметром 35 мкм. Материал контактных площадок кристаллов — алюминиевая металлизация, траверсов корпуса — золотое гальваническое покрытие.

Исследовать под микроскопом характер деформаций сварных соединений.

Полученные образцы сохранить для выполнения следующей лабораторной работы.

*Оборудование:*

установка ультразвуковой сварки внутренних выводов ЭМ-4370;

микроскоп для анализа деформации сварных соединений МБС-1 или МБС-2.

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Лабораторное задание.
4. Протокол выполнения операций при работе на установке приварки выводов.
5. Результаты выполнения работы.
6. Выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1. Охарактеризуйте проволоки микронных диаметров, используемые для создания внутренних выводов полупроводниковых приборов.
2. Конструкции микросварочного инструмента для различных способов монтажа.
3. Охарактеризуйте метод УЗС внутренних выводов с точки зрения динамики процесса (стадии процесса, влияние условий, наиболее благоприятный режим проведения процесса).
4. Охарактеризуйте аппаратное оформление установки УЗС (наиболее важные блоки установки, их назначение).
5. Охарактеризуйте метод ТКС внутренних выводов с точки зрения динамики процесса (стадии процесса, влияние условий, наиболее благоприятный режим проведения процесса).
6. Охарактеризуйте аппаратное оформление установки ТКС (наиболее важные блоки установки, их назначение).
7. Охарактеризуйте метод ТЗС внутренних выводов с точки зрения динамики процесса (стадии процесса, влияние условий, наиболее благоприятный режим проведения процесса).
8. Охарактеризуйте аппаратное оформление установки ТЗС (наиболее важные блоки установки, их назначение).
9. Последовательность формирования проволочной перемычки при сварке встык и внахлест.

## Лабораторная работа № 8

# ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ ВНУТРЕННИХ ВЫВОДОВ

*Цель работы:* ознакомиться с методами контроля качества сварных соединений внутренних выводов и получить практические навыки работы на контрольно-измерительном оборудовании, применяемом на участке приварки выводов.

### Теоретические сведения

**Анализ качества микросоединений.** На деградацию соединений золотой проволоки к алюминиевому покрытию, сформированных ТКС, влияют загрязнения алюминиевых контактных площадок органическими газовыми выделениями из эпоксидных клеящих электропроводных материалов (при монтаже кристалла). Предполагается, что органические вещества (вместе с пленкой  $Al_2O_3$ ), находящиеся в объеме контакта Au-Al в результате электрохимических процессов в условиях повышенной влажности и температуры снижают качество контактов. Существенное улучшение прочности соединений Au-Al достигается плазменной очисткой контактных площадок в атмосфере  $N_2+O_2$ .

Прочность микросоединений проволоки с контактными площадками кристалла и внешними выводами ИС можно контролировать следующим способом. Изделие помещается в поле постоянного магнита, а через выводы пропускается электрический ток, величина которого циклически изменяется. При взаимодействии электрического тока и магнитного поля в проволоке возникают усилия, нагружающие микросоединения. Подбором соответствующих величин тока и магнитного поля обеспечивается неразрушающий контроль сварных микросоединений.

Контроль высоты петли проволочного соединения кристалла ИС с выводной рамкой может осуществляться специальным прибором, представляющим собой два ролика из диэлектрического материала, которые, прокатываясь по выводной рамке, пропускают между собой кристалл с проволочными проводниками. Ролики расположены на одной оси с электропроводящим цилиндром. При касании одним из проводников цилиндра замыкается электрическая цепь, что фиксирует дефект сборки.

Для определения разрушающих усилий термокомпрессионных микросоединений ИС используется установка, в состав которой входят механизмы для крепления кристалла, захвата свободного конца вывода, последовательного увеличения нагрузки и регистрации её величины. Момент отрыва вывода регистрируется с помощью приспособления для оптического и акустического контроля.

Предложен способ разрушающего контроля прочности микросварных соединений при выборе режимов ТКС. Испытания проводятся на установке, оборудованной патроном, зажимающим вывод с приложением вертикального усилия, преобразователем акустических колебаний, возникающих в результате приложения растягивающих нагрузок, и считывающей и анализирующей системой, оснащенной ЭВМ. Способ позволяет точно определить вид отказа в реальном масштабе времени.

Большое внимание уделяется надежности микросварных соединений медной проволоки с алюминиевыми пленками. Отмечается, что для получения удовлетворительной свариваемости шарика медной проволоки с алюминиевой металлизацией кристаллов методом термовзвучковой сварки необходимо повышение твердости пленки алюминия. Рекомендуется увеличивать твердость пленочной металлизации путем уменьшения скорости осаждения пленок, а также путем их легирования 4 % меди и 1 % кремния.

В некоторых типах приборов осуществляется монтаж алюминиевой микропроволоки с медным покрытием корпусов. Прочность таких сварных соединений ниже, чем с золотым покрытием, так как необходима повышенная деформация алюминиевого вывода при сварке. В целом технологический процесс сборки таких приборов значительно усложняется из-за необходимости применения защитной среды, строго контролируемой на отсутствие кислорода и серы. Исследования температурной стабильности микросварных соединений данной системы показали, что при температуре 150 °С не наблюдается изменения их параметров и образования интерметаллических соединений. При более высоких температурах (250 °С) наблюдаются интерметаллические фазы, а по периметру соединения появляются пустоты, снижающие механическую прочность и ухудшающие электрические параметры контактов.

При исследовании свариваемости золотых проводников с медной металлизацией корпусов отмечалась сложность выбора температуры подогрева корпуса: при низкой температуре снижается эффек-

тивность сварки, а при высокой происходит окисление поверхности металлизации. Испытания контактов золото–медь показали, что при температуре нагрева 150 °С не зафиксировано образование интерметаллических соединений даже после 26000 ч обработки. При более высоких температурах становится заметным образование интерметаллических соединений, например после 50 ч нагрева при температуре 250 °С образуется соединение  $Cu_3Au$ . Прочность микросварных контактов при этом быстро не изменяется, хотя после длительного хранения надежность соединения падает.

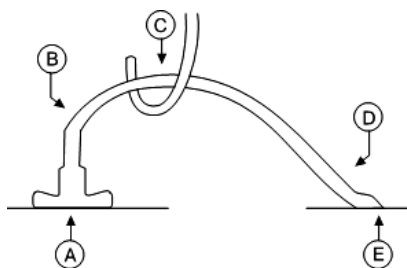


Рис. 1. Возможные места отрыва или обрыва проволоки

и сопутствующих им пустот, При проведении испытаний методом натяжения проволоочной переемычки до её разрушения необходимо определить место обрыва микросварного соединения: был ли это отрыв проволоки в месте сварки или её разрыв (рис. 1). При выборе способа создания и отработки режимов сварки необходимо добиваться такого положения, при котором разрушение соединения происходит в точках В или D. Если отрыв происходит в точках А, С, Е, то необходимо проверить режимы сварки, металлизацию, настройку оборудования, конструкцию сварочного инструмента или испытательного приспособления. При испытаниях на отрыв усилие измеряется в граммах.

*Испытание сварного соединения на обрыв.* При оптимизации процедуры сварки первым исследуемым параметром является прочность проволоки на отрыв, которое измеряется в ходе проведения испытаний натяжением (приложение эталонного усилия в граммах путем натяжения проволоки с помощью крючка до ее разрыва или отрыва). Испытание натяжением — это относительный тест для различных конструкций микросхем и приборов. Для этих целей применяются различные приспособления или установки. В качестве хорошего примера такого оборудования можно привести многофункциональную автоматическую станцию Condor (рис. 2) производства компании XYZTEC Precision Technology, Нидерланды, которая предназначена для проверки в автоматическом или ручном режимах различных типов соединений на сдвиг, обрыв, растяжение и прочее с нагрузкой до 40 кг.



Рис. 2. Станция тестирования Condor

При тестировании проволочных соединений методом натяжения, прочность на отрыв зависит от конфигурации натяжного механизма, точки прикрепления крючка, разницы горизонтальных уровней свариваемых деталей и угла натяжения. Для получения абсолютных значений предела прочности на разрыв методика или средство тестирования должны быть нормированы. Когда проводятся испытания, важно определить место обрыва сварки: был ли это отрыв проволоки в месте сварки или ее разрыв (см. рис. 1).

При правильном натяжении проволока должна разорваться в точках «В» или «D». Если отрыв происходит в точках «А», «С», «Е», то необходимо проверить параметры сварки, металлизацию, настройки оборудования, конструкцию сварочного инструмента или испытательного крючка.

Обычно при испытании сварки на обрыв усилие измеряется в граммах. Измеренное значение не всегда является реальным пределом прочности. Только в том случае, когда углы натяжения проволоки в первой и второй точках сварки составляют ровно  $30^\circ$ , измеренное значение является реальным.

Таблица 1  
Коэффициенты для вычисления реального разрывного усилия

Угол натяжения проволоки в точках сварки	Коэффициент
$10^\circ$	2,88
$20^\circ$	1,46
$30^\circ$	1,00
$40^\circ$	0,79
$50^\circ$	0,65
$60^\circ$	0,58
$70^\circ$	0,53

Истинное значение прочности на отрыв может быть одинаковым для разных значений усилия в граммах, приложенных в одном случае для длинной/высокой петли, в другом — для короткой/низкой петли.

Для оценки реального разрывного усилия рассчитаны определенные коэффициенты, на которые умножают измеренное значение усилия. Значения данных коэффициентов и их зависимость от угла натяжения приведены в табл. 1.

В том случае, когда одна точка сварки выше другой по уровню, для по-



лучения реального разрывного усилия необходимо сдвинуть крючок в сторону сварки, расположенной выше по уровню, и, таким образом, выровнять углы натяжения проволоки.

### Лабораторное задание

1. На установке тестирования определить прочность полученных при выполнении предыдущей лабораторной работы микросоединений. При испытаниях фиксировать прочность микросоединений и характер разрушения контактов. Результаты испытаний свести в таблицу в форме, представленной в табл. 2.

Таблица 2

Результаты испытаний проволочных микросоединений выбранных случайным образом тестовых образцов

Номер образца	Прочность соединения $P$ , гс	Характер разрушения (на кристалле или корпусе)

2. Построить гистограмму и интегральное распределение прочности.

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Лабораторное задание.
4. Результаты выполнения работы в виде таблицы, гистограммы и графика.
5. Выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1. Что влияет на деградацию соединений проволоки с пленкой?
2. Каковы наиболее вероятные места разрушения проволочных микросоединений?
3. Какова причина разрушения контактов из-за явления «пурпурной чумы»?
4. Каков порядок проведения испытаний сварного соединения на обрыв?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коледов Л.А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок / Л.А. Коледов. М.: Радио и связь, 1989. 400 с.
2. Черняев В.М. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров / В.М. Черняев. М.: Радио и связь, 1987. 464 с.
3. Блинов И.Г. Оборудование полупроводникового производства / И.Г. Блинов, Л.В. Кожитов. М.: Машиностроение, 1986. 264 с.
4. Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники. В 10-и кн. — М.: Высш. шк., 1989.
5. Липатов Г.И. Технология материалов и изделий электронной техники: учеб. пособие. В 4-х частях / Г.И. Липатов. Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2005—2010.

## СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 4 .....	1
ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ДИФФУЗИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖЕК .....	1
Лабораторные работы № 5, 6 .....	15
ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ НАПЫЛЕНИЯ ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК.....	15
Лабораторная работа № 7 .....	35
ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИВАРКИ ПРОВОЛОЧНЫХ ВЫВОДОВ .....	35
Лабораторная работа № 8 .....	43
ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ ВНУТРЕННИХ ВЫВОДОВ .....	43
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	48

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ № 4—8 по дисциплине  
«Основы технологии электронной компонентной базы»  
для студентов направления подготовки бакалавров  
11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» (профиль  
«Электронное машиностроение»)  
очной формы обучения

Составитель Липатов Геннадий Иванович

В авторской редакции

Компьютерный набор Г.И. Липатова

Подписано в печать 24.02.2016.

Уч.-изд. л. 3,0.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный  
технический университет»

394026 Воронеж, Московский просп., 14