

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ФЕДЕРАЛЬНОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ТЕХНОЛОГИИ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Часть 1

Получение p-n переходов: технология и оборудование

Учебно-методическое пособие для вузов

Составители:

Е.С. Машкина,

Е.Н. Бормонтов

Издательско-полиграфический центр
Воронежского государственного университета

2013

Утверждено Научно-методическим советом физического факультета
от 18.04.2013 г., протокол № 4

Рецензент: доктор химических наук, доцент Тутов Е.А.

Учебно-методическое пособие подготовлено на кафедре физики полупроводников и микроэлектроники физического факультета Воронежского государственного университета.

Рекомендуется для самостоятельной работы студентов 3 и 4 курса физического факультета.

Для специальностей 010803 – Микроэлектроника и полупроводниковые приборы, 210100 – Электроника и наноэлектроника.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. Формирование p-n переходов методом диффузии	5
1.1. Физические основы процесса диффузии.....	5
1.2. Распределение примеси при диффузии.....	7
1.3. Способы проведения диффузионных процессов	12
1.4. Технологическое оборудование для проведения диффузионных процессов.....	15
2. Формирование p-n переходов методом ионного легирования.....	23
2.1. Физические основы ионного легирования.....	24
2.2. Каналирование ионов.....	28
2.3. Особенности технологии ионного легирования.....	29
2.4. Технологическое оборудование для ионного легирования	34
ВОПРОСЫ	44
ЛИТЕРАТУРА.....	46

ВВЕДЕНИЕ

Твердотельная электроника на сегодняшний день является одной из наиболее бурно развивающихся отраслей современной промышленности. На каждом новом этапе развития технологии производства интегральных микросхем (ИМС) создаются и модифицируются методы изготовления структур ИМС, отражающие последние достижения науки.

При производстве различных ИМС в текущий момент используется планарная технология, обеспечивающая воспроизводимые параметры интегральных элементов и групповые методы их производства. В планарной технологии многократно повторяются однотипные операции для создания различных по структуре ИМС. Элементы интегральных структур создаются в едином технологическом цикле на общей полупроводниковой подложке. Каждый элемент схемы формируется в отдельной изолированной области, а соединения между элементами выполняются путем металлизации на поверхности интегральной схемы.

В настоящее время существуют две основные технологии введения примесей в полупроводник для создания активных и пассивных элементов ИМС – диффузия и ионное легирование (ионная имплантация). Диффузия в полупроводниковых кристаллах представляет собой направленное перемещение примесных атомов в сторону убывания их концентрации. Метод ионного легирования основан на контролируемом внедрении в материал ускоренных в электростатическом поле ионизованных атомов и молекул. В качестве легирующих примесей в кремнии используются в основном элементы III и V группы.

1. ФОРМИРОВАНИЕ p-n ПЕРЕХОДОВ МЕТОДОМ ДИФФУЗИИ

1.1. Физические основы процесса диффузии

Перенос примеси при диффузии (гетеродиффузия) вследствие хаотического теплового движения атомов осуществляется в направлении убывания градиента концентрации.

В идеальных кристаллах диффузия происходит либо путем обмена мест между двумя соседними атомами, либо кольцевым обменом мест, что требует энергии, соизмеримой с энергией связи между атомами. В реальных кристаллах содержатся точечные дефекты Френкеля и Шоттки, концентрация которых экспоненциально возрастает с температурой.

Теория диффузии в реальных кристаллах, развитая Я. Френкелем, Р.Вагнером и В.Шоттки, предполагает три механизма:

- 1) взаимный обмен мест, как в идеальном кристалле;
- 2) диффузию по междоузлиям (междоузельный механизм)
- 3) диффузию по вакантным узлам (вакансионный механизм).

Скорость диффузии примесных атомов в металлах и полупроводниках обратно пропорциональна величине их растворимости.

Если атомы растворителя и растворенного вещества идентичны, то примесь проникает в кристаллическую решетку в основном по вакансиям, замещая узлы растворителя. В результате образуется твердый раствор замещения, и примесные атомы имеют большую величину растворимости. В том случае, когда атомы разнородны и растворяемый атом не может замещать узел или не может удержаться там вследствие слабой химической связи, диффузия идет в основном по междоузлиям. Это более быстрый механизм, но в междоузельном пространстве может разместиться гораздо меньшее число атомов, чем в вакансиях, что обуславливает малую растворимость.

В полупроводниках типа германия и кремния элементы III группы лучше растворимы, чем элементы II группы, которые в свою очередь обладают большей растворимостью, чем элементы I группы. Внутри группы максимальной растворимостью обладают более легкие элементы.

Известно, что элементы III группы быстрее диффундируют в кремнии, чем в германии, а элементы V группы – в германии. Это можно объяснить взаимодействием атомов примесей и вакансий с учетом размеров диффундирующих атомов. Установлено, что вакансии в Ge и Si являются акцепторами. Будучи заряженными, они вступают в кулоновское взаимодействие с диффундирующими ионами примеси, если тому способствуют размеры атомов. В Ge преобладает кулоновское взаимодействие, и доноры диффундируют быстрее, чем акцепторы. В Si, наоборот, преобладает влияние различия в размерах между примесными ионами и атомами решетки, вследствие чего акцепторы диффундируют быстрее доноров.

Диффузия элементов I (Li, K, Na, Cu, Au, Ag) и VIII (Fe, Co, Ni) групп с малыми ионными радиусами происходит по междоузельному механизму, а диффузия элементов III (B, Al, Ga, In) и V (P, Sb, As) групп – по вакансионному.

Математическое описание диффузионных процессов применительно к идеальным газам и растворам было впервые дано в 1855 г. А. Фиком, использовавшим уравнение теплопроводности Фурье.

Первый закон Фика определяет скорость проникновения атомов одного вещества в другое при постоянной во времени величине потока этих атомов и неизменном градиенте концентрации. Для одномерного случая плотность потока атомов примеси определяется уравнением:

$$J = -D \frac{dC}{dx} \left[\frac{at}{\text{см}^2 \cdot \text{с}} \right] \quad (1)$$

где D – коэффициент диффузии; dC/dx – градиент концентрации.

Коэффициент диффузии – это скорость, с которой система способна при заданных условиях выравнять разность концентраций. Эта скорость определяется температурой и зависит от энергии связи примесных атомов в решетке, количества вакансий, постоянной решетки и частоты колебаний атомов решетки:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right) \left[\frac{\text{см}^2}{\text{с}}\right] \quad (2)$$

где D_0 – частотный фактор, постоянная, численно равная коэффициенту диффузии при бесконечно большой температуре; ΔE – энергия активации примеси.

Второй закон Фика определяет скорость накопления растворенной примеси в любой плоскости, перпендикулярной к направлению диффузии. Для одномерного случая:

$$\frac{dC}{dt} = D \frac{d^2C}{dx^2} \quad (3)$$

где dC/dt – изменение концентрации диффундирующего вещества в зависимости от времени.

Изложенная элементарная теория диффузии предполагает, что один вид примеси диффундирует независимо от любого другого и что скорость диффузии, т.е. коэффициент диффузии не зависит от концентрации. Эти допущения, однако, позволяют получить достаточно хорошее совпадение теоретических и экспериментальных данных.

1.2. Распределение примеси при диффузии

В решение уравнения второго закона Фика (3) входит величина, называемая поверхностной концентрацией C_s , под которой понимается концентрация примеси, образовавшей твердый раствор с полупроводником в тонком поверхностном слое. Решения второго уравнения Фика получены при

условии, что диффузия идет в полубесконечное тело, т.е. в кристалл, имеющий бесконечно большой объем, при одной ограничивающей плоскости, на которую нанесена диффундирующая примесь.

При получении p-n переходов на Ge или Si, содержащих донорную примесь, в них вводят акцепторы. Часть акцепторов компенсируется исходными донорами, поэтому для создания p-n перехода всегда необходим избыток концентрации вводимой примеси над исходной. Избыток концентрации акцепторов уменьшается по глубине диффузионного слоя и обращается в нуль в некоторой узкой области взаимной компенсации, за которой возрастает избыток концентрации доноров вплоть до уровня в исходном материале.

Практическое значение имеют несколько способов распределения диффундирующей примеси.

Диффузия из источника с постоянной поверхностной концентрацией. Это возможно при условии равенства количества примеси, поступающей в поверхностный слой и уходящей в объем полупроводника. Такому требованию удовлетворяет источник диффузанта с бесконечно большим содержанием примесных атомов, обладающих в пределах источника большей подвижностью, чем в полупроводнике.

Обозначим:

C_S – поверхностная концентрация;

$C_{исх}$ – концентрация примеси в исходном образце;

$C(x, t)$ – концентрация диффундирующей примеси на любой глубине;

t – время диффузии;

x – расстояние от поверхности.

Начальные и граничные условия будут иметь вид:

– при $t = 0$ и всех $x > 0$ $C(x, 0) = 0$

- при всех $t > 0$ и $x = 0$, $C(0, t) = C_s$, т.е. поверхностная концентрация постоянна.

При этих условиях решение второго закона Фика (3) имеет вид:

$$C(x, t) = C_s \operatorname{erfc} y,$$

$$y = \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad (4)$$

где $\operatorname{erfc} y$ – функция дополнения интеграла ошибок до единицы – error function complement. Сама функция ошибок обозначается erf .

Она широко употребляется в теории вероятностей и является интегралом:

$$\operatorname{erf} y = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^y \exp(-\lambda^2) d\lambda \quad (5)$$

Между обеими функциями существует простая связь:

$$\operatorname{erfc} y = 1 - \operatorname{erf} y = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_y^\infty \exp(-\lambda^2) d\lambda \quad (6)$$

Эти интегралы вычисляются либо с помощью рядов, либо из таблиц, либо заданы графически.

С учетом взаимной концентрации доноров и акцепторов можно записать:

$$C(x, t) = C_s \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} - C_{\text{исх}} \quad (7)$$

Исходная концентрация достаточно точно определяется по значению удельного сопротивления (ρ) и подвижности носителей (μ):

$$C_{\text{исх}} = \frac{1}{e \cdot \mu \cdot \rho} \quad (8)$$

P-n переход лежит на определенной глубине x_j (уравнение (7)), где суммарная концентрация $C(x, t)$ обращается в нуль и справедливо

$$\operatorname{erfc} \frac{x_j}{2\sqrt{Dt}} = \frac{C_{\text{исх}}}{C_s},$$

$$x_j = 2\sqrt{Dt} \cdot \operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{C_{\text{исх}}}{C_s} \right). \quad (9)$$

Для одной и той же температуры диффузии распределение концентрации изменяется со временем, и количество примеси Q в объеме полупроводника увеличивается, т.е.

$$Q = \int_0^{\infty} C(x) dx. \quad (10)$$

Имея в виду только диффундирующую примесь, получаем, что под каждым квадратным сантиметром поверхности содержится следующее количество атомов примеси:

$$Q = 2\sqrt{Dt} \cdot C_s \int_0^{\infty} \operatorname{erfc} y dy = 1.13 C_s \sqrt{Dt} \quad (11)$$

Это уравнение показывает, что количество примеси, введенное в полупроводник, возрастает с увеличением длительности выдержки t и температуры.

Диффузия из тонкого слоя с фиксированным количеством примеси. Пусть на поверхность пластины полупроводника нанесен тонкий слой примеси. При нагреве количество атомов на поверхности будет постоянно уменьшаться вследствие их ухода в объем п/п. В соответствии с этим будет изменяться величина поверхностной концентрации и распределение диффузионного потока.

Начальные и граничные условия запишутся так:

- при $t = 0$ и всех $x > 0$ $C(x, 0) = 0$
- при всех $t > 0$ и $x = 0$, $C(0, t) = 0$.

Решением второго закона Фика будет функция распределения Гаусса:

$$C(x, t) = C_s \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \quad (12)$$

Поверхностная концентрация изменяется со временем:

$$C_s = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \quad (13)$$

где Q – количество атомов примеси, первоначально приходящихся на единицу площади. Очевидно, Q будет являться и общим числом примеси под каждым квадратным сантиметром поверхности.

Суммарное распределение с учетом частичной компенсации имеет вид:

$$C(x, t) = C_s \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) - C_{исх} \quad (14)$$

Положение p-n перехода вычисляется из условия, что при $x = x_j$ концентрация $C(x, t) = 0$, тогда:

$$x_j = 2\sqrt{Dt} \cdot \sqrt{\ln \frac{C_s}{C_{исх}}} \quad (15)$$

Если поверхностная концентрация C_s точно неизвестна, но превосходит концентрацию примеси в исходном образце $C_{исх}$ в 10^3 - 10^5 раз (что наиболее часто имеет место), то положение p-n перехода можно вычислить с точностью до 10 %:

$$x_j = 5.4\sqrt{Dt} \quad (16)$$

Если нам известна глубина диффузии x_0 за время t_0 , то при той же температуре нетрудно вычислить время диффузии, необходимое для создания перехода на глубине x :

$$t = \left(\frac{x}{x_0}\right)^2 t_0. \quad (17)$$

1.3. Способы проведения диффузионных процессов

Одним из залогов успешного проведения диффузии является подготовка пластин полупроводника. Для сложных структур, где важно иметь плоский р-п переход, и для устройств с неглубоким залеганием р-п перехода обязательны механическое или химическое полирование поверхности перед диффузией. Для глубоких р-п переходов можно обойтись шлифованием. К используемым диффузантам предъявляются следующие требования:

- он должен обладать необходимой степенью полупроводниковой чистоты, чтобы не происходила диффузия нежелательных примесей;
- количество диффузанта должно быть таким, чтобы во время диффузии оно оставалось достаточным для обеспечения воспроизводимости результатов и изменялось в соответствии с требуемым режимом;
- он должен достаточно просто формироваться и полностью удовлетворять выбранному способу введения его в полупроводник;
- диффузант не должен давать нежелательных соединений с полупроводником, осложняющих процесс диффузии или дальнейшую обработку.

В зависимости от способа введения диффузанта в полупроводники различают два вида диффузии: диффузию из газовой и паровой фазы и диффузию из поверхностных источников.

Диффузия из газовой и паровой фазы. Если в какой-либо изолированный объем поместить пластину полупроводника и навеску примесного элемента и нагреть этот объем до некоторой температуры T , то вследствие сублимации примесного элемента в объеме вскоре установится определенное парциальное давление его паров.

Молекулы пара будут адсорбироваться на всех поверхностях, в том числе и на поверхности пластины, а если температура достаточно велика, то будут диффундировать вглубь.

Если приток новых молекул взамен ушедших в полупроводник осуществляется со скоростью, равной или большей скорости диффузии, то в поверхностном слое полупроводника устанавливается равновесная концентрация атомов, равная предельной растворимости при данной температуре.

Если приток новых молекул меньше скорости диффузии или они равны, но концентрация атомов в паре мала, то поверхностная концентрация определяется только парциальным давлением примесного пара.

В идеальном случае равновесная концентрация пропорциональна давлению пара и контролирование давления пара – удобное средство управления поверхностной концентрацией.

Так как равновесие на поверхности достигается за меньшее время, чем длительность диффузии, то поверхностную концентрацию можно считать постоянной. Поэтому при диффузии из газовой фазы распределение примеси описывается функцией дополнения к интегралу ошибок (4). При больших парциальных давлениях может образовываться жидкая фаза.

Если при взаимодействии диффузанта и полупроводника образуется химическое соединение, то это может препятствовать диффузии в полупроводник вследствие большой энергии связи атомов в соединении или служить преградой для проникновения новых атомов примеси через пленку химического соединения.

Диффузия из поверхностных источников. Этот вид диффузии осуществляется из слоя примеси, предварительно нанесенного на поверхность полупроводника. Мы всегда можем рассчитать собственную концентрацию примесных атомов (N_i) по формуле:

$$N_i = \frac{N_A d_i}{A_i}, \quad (18)$$

где $N_A = 6,025 \cdot 10^{23}$ ат/моль – число Авогадро; d_i – плотность примеси; A_i – атомный вес примеси.

Зная собственную концентрацию и геометрические размеры слоя, легко вычислить общее количество атомов и число атомов на каждом квадратном сантиметре поверхности.

Почти всегда на поверхности присутствует жидкая фаза, которая вступает во взаимодействие с полупроводником. Практически различают два типа взаимодействий на поверхности: образование сплава и химическое взаимодействие.

Примесные элементы, такие, как Al, In и Ga, могут быть нанесены на пластину полупроводника испарением в вакууме. При последующей диффузии на поверхности пластин образуется жидкий сплав, который при температуре диффузии быстро достигает концентрации доноров или акцепторов, определяемой фазовой диаграммой состояния. Поверхностная концентрация доноров или акцепторов, растворившихся в твердой фазе, определяется коэффициентом распределения $k = \frac{C_0}{C_L}$, постоянным для данной температуры. Таким образом, поверхностная концентрация определяется только термодинамическими свойствами системы примесь-полупроводник и равна предельной растворимости примеси при данной температуре диффузии.

Одним из недостатков этого способа, применяемого при создании интегральных микросхем, является трудность определения глубины диффузии, так как после охлаждения на поверхности полупроводника отлагается кристаллизованный слой. Кроме того, в течение диффузионного процесса происходит истощение жидкой фазы примесным элементом за счет диффузии и испарения или окисления поверхностного слоя. Так как коэффициент сегрегации обычно мал, то при толщине расплава порядка долей микрона и

больше его истощением за счет диффузии можно пренебречь. Влияние испарения при диффузии в атмосфере инертного газа сказывается тоже мало, если время диффузии не превосходит нескольких часов. Окисление в данном случае влияет наиболее сильно.

Второй тип взаимодействий на поверхности заключается в быстрой химической реакции доноров или акцепторов с полупроводником. По-видимому, здесь имеет место взаимодействие между жидкой поверхностной фазой, состоящей из окисла (например SiO_2), первоначально присутствующего на полупроводнике, и донорным либо акцепторным окислом, используемым при диффузии.

При температуре выдержки в реагирующей фазе устанавливается равновесная концентрация доноров или акцепторов. Скорость перехода примеси из этой фазы в полупроводник достаточно большая и распределение примеси соответствует случаю источника с постоянной поверхностной концентрацией.

Наиболее характерным примером диффузии из реагирующей поверхностной среды является диффузия из легкоплавких стеклообразных слоев. Если на поверхность кремния нанести тонкий слой P_2O_5 , то при достаточно большой температуре происходит реакция, в результате которой образуется стеклообразное соединение:



Фосфорносиликатное стекло растекается ровным тонким слоем по поверхности кремния и служит источником диффузии.

1.4. Технологическое оборудование для проведения диффузионных процессов

Для получения п/п приборов и ИМС с воспроизводимыми и стабильными параметрами необходимо, чтобы в диффузионных установках по всей

рабочей длине канала печи в течение длительного времени поддерживалась с высокой степенью точности заданная температура. В современном оборудовании температура поддерживается с точностью $\pm 0.2^{\circ}$ С при длине рабочего канала 300-400 мм, чему способствует автоматическая система терморегулирования.

Диффузию проводят в одно-, двух- или многозонных установках. Установка СДО-125/4 – установка с четырьмя рабочими каналами, установка СДД-13А – двухзонная одноканальная установка созданы на базе унифицированных элементов.

Установка СДО-125/4, предназначенная для проведения диффузионных процессов на кремнии в диапазоне температур от 500 до 1250⁰ С, имеет 4 рабочих канала – трубы из высокоглиноземистой керамики или кварца и состоит из двух частей: унифицированного основания и четырех камер нагрева. Основание служит для размещения четырехтрубной печи и систем автоматического регулирования температуры. Каждая система включает регулятор, силовой блок питания, компенсатор температуры холодного спая термопары. Основание изготавливается из стального профиля и с трех сторон закрыто съемными панелями, имеющими жалюзи, а с четвертой – приборным щитком. В рабочем состоянии установка опирается на домкратные винты. Регуляторы температуры смонтированы на выдвижных шасси, что облегчает их обслуживание.

Каждая нагревательная камера состоит из цилиндрической трубы с нагревательным элементом и теплоизоляцией, каркаса, основания с направляющими, боковых и торцевых крышек. Вводы термопар расположены сбоку. Витки нагревательного элемента спирального типа разделены керамическими изоляторами.

В установке применяется независимая трехканальная система регулирования температуры. При нагреве центральной секции установки термопа-

ра вырабатывает сигнал, сначала проходящий через устройство для компенсации температуры ее холодных концов. Далее термо-эдс поступает в блок задания температуры, где формируется сигнал рассогласования (между действительным и заданным напряжением), который через усилитель постоянного тока подается в функциональный преобразователь, где в зависимости от объекта регулирования к нему применяется тот или иной закон управления (пропорциональный, пропорционально-интегральный и т.д.). Затем сигнал поступает в блок тиристоров, которые управляют включением и отключением блока питания нагревательных элементов. При выводе температуры из допустимых пределов включается цепь сигнализации.

Несмотря на автоматическое регулирование установки, перед каждым очередным процессом контролируют как температуру, так и положение зон одинаковой температуры, пользуясь контрольной термопарой. Это необходимо делать во избежание случайного брака.

Метод открытой трубы. В этом методе в высокотемпературную печь помещается кварцевая труба с пластинами кремния, выходной конец которой открыт в атмосферу. Через входной конец трубы подается газ (не обязательно инертный), в который из первичного источника диффузии поступают соединения примеси. Источник примеси может быть твердым, жидким или газообразным. В первых двух случаях необходимое давление паров получают, подогревая первичный источник. Наиболее широко используются такие источники диффузии, как H_3BO_3 , VBr_3 , VCl_3 , V_2H_6 , P_2O_5 , $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$, POCl_3 , PBr_3 , PH_3 .

Рассмотрим схему установки для проведения диффузии методом открытой трубы (рис. 1).

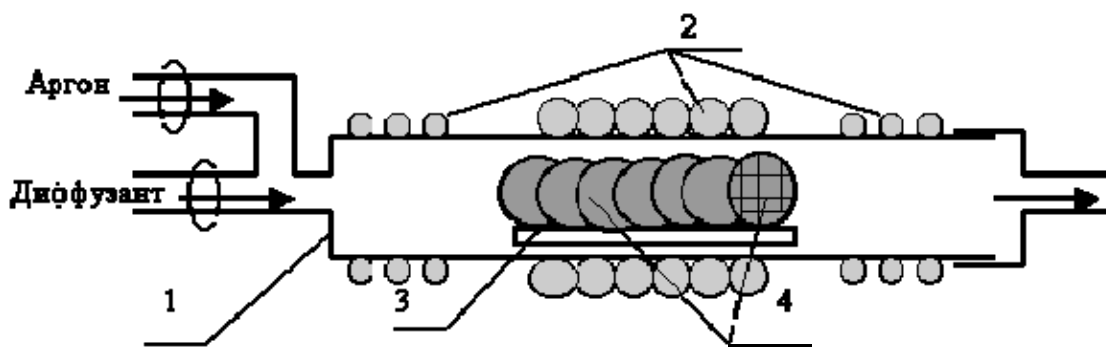


Рис. 1. Установка для проведения диффузии методом открытой трубы: 1 – труба печи; 2 – нагреватель; 3 – держатель; 4 – полупроводниковые пластины.

Камера представляет собой кварцевую (или керамическую) трубу 1, снабженную резистивными нагревателями 2 (3 секции с независимым регулированием температуры). Крайние секции поддерживают малый градиент температуры, обеспечивающий средней секции рабочую температуру до 1250°C с высокой точностью (до $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$). Именно в этой части камеры на кварцевом (или керамическом) держателе 3 располагаются обрабатываемые пластины 4, имеющие на рабочей поверхности оксидную маску. При выполнении загонки примеси или одностадийного процесса диффузии в камеру из внешнего источника непрерывно подается диффузонт, представляющий смесь легирующей примеси (акцептор бор или донор фосфор) с транспортирующим газом (аргон). Такая установка используется при диффузии из жидких и газообразных источников.

При работе с газообразным источником диффузанта используют баллон, содержащий смесь PH_3 (или B_2H_6) и инертного газа, например аргона. Газом-носителем может служить азот в смеси с кислородом.

В случае применения жидкого источника если газ насыщен примесью, то его концентрация в кремнии зависит только от температуры жидкого источника и рабочей температуры диффузии, но не от потока. Если в качестве жидких источников применяются галогены, то это способствует уменьше-

нию загрязнения реактора ионами металлов и формированию бездефектных областей, содержащих активные элементы.

При диффузии методом открытой трубы с использованием твердого источника тигель с источником в виде порошка находится в реакторе со стороны подачи газа-носителя перед лодочкой с пластинами кремния (или даже под ней). Состав несущего газа должен быть таким, чтобы не происходило окисления пластин полупроводника.

Наблюдаются случаи, когда в трубчатой двухзонной печи при использовании в качестве газов-носителей аргона или азота происходит эрозия поверхности кремния. Это явление может быть устранено, если добавить в газ-носитель небольшое количество кислорода. Для этого на входе в кварцевую трубу имеются два подводящих газ патрубков. По одному из них может подаваться основной инертный газ-носитель, по другому – кислород (или пары воды). При входе в трубу эти газы перемешиваются и затем поступают в зоны печи, где находятся диффузант и кремниевые образцы. Обычно расход газа-носителя регулируют в пределах 0.5-1.5 л/мин с помощью ротаметров, установленных на входе печи.

Диффузия в замкнутом объеме (бокс-метод). Метод основан на том, что при нагревании в замкнутом объеме кремниевых пластин с окислом на поверхности и находящейся в тигле смеси SiO_2 с окислом примеси, в боксе быстро устанавливается равновесие. Окисел примеси из смеси испаряется в атмосферу бокса и абсорбируется окислом на поверхности кремния до тех пор, пока содержание окиси примеси в окисле на поверхности кремния не станет равным его содержанию в смеси.

На рис. 2а устройство представляет собой вставленные одна в другую кварцевые ампулы. Внутри ампулы с малым диаметром помещают платиновый контейнер с диффузантом и кварцевую кассету с пластинами крем-

ния. Затем первая ампула вставляется в ампулу с большим диаметром, и вся система (полугерметичный контейнер) помещается в печь.

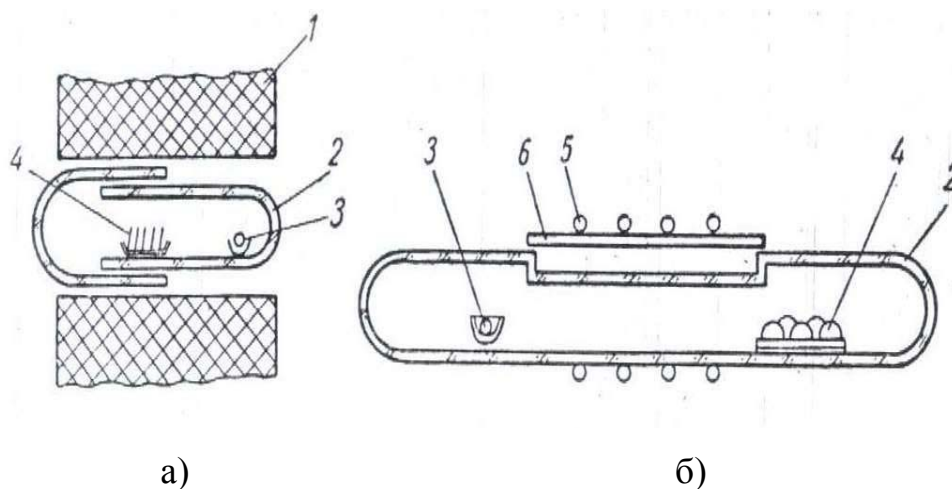


Рис.2. Схема устройства для диффузии примесей по методу замкнутого объема: а – ампула в ампуле; б – ампула с окном, закрываемым платиновой фольгой. 1 – силитовая печь; 2 – кварцевая ампула; 3 – лодочка с диффузантом; 4 – пластины кремния; 5 – платиновая проволока; 6 – платиновая фольга.

Другой тип полугерметичного контейнера приведен на рис. 2б. Он состоит из кварцевой ампулы, у которой верхняя часть срезана по образующей цилиндра. Внутри ампулы помещают источник примеси и кварцевые пластины. Затем края среза закрываются кварцевой крышкой. Для уплотнения между краями среза и крышкой прокладывают тонкую платиновую фольгу. Крышку закрепляют платиновой проволокой. Контейнер этого типа имеет меньшую утечку паров диффузанта, чем контейнер, состоящий из двух ампул.

Источником бора в этом методе служит окись бора или борная кислота, помещаемые в специальный алундовый тигелек. Для диффузии фосфора используют P_2O_5 и его смесь с CaO . Точка плавления смеси (93% P_2O_5 , 7% CaO) – $500^\circ C$.

Диффузионная однозонная система жидкостной и газовой обработки «Оксид 3Д» предназначена для групповой газотермической обработки кремниевых пластин при проведении процессов жидкостной и газовой диффузии в производстве СБИС.

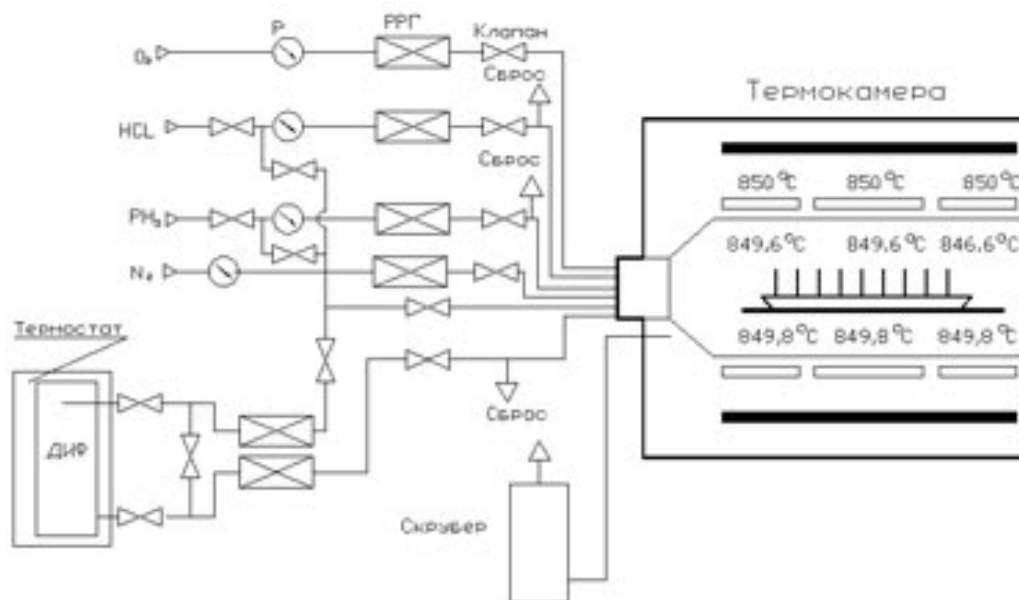


Рис. 3. Схема установки термодиффузии «Оксид 3Д».

Оснащение установки:

- Загрузочная бесконтактная система консольного типа с устройствами поперечной подачи ламинарного потока обеспыленного воздуха.
- Трехреакторная, трехсекционная электропечь горизонтального типа.
- Устройство газораспределения с электронными регуляторами расхода газа и регулятором расхода реагентов POCl_3 и VBr_3 для процессов жидкостной диффузии.
- Фильтры тонкой очистки по всем газовым магистралям.
- Скруббер орошения для удаления вредных примесей из отработанных газов.
- Шкафы для баллонов с газами-реагентами.
- Программные и аппаратные средства блокировки и безопасности.

Микропроцессорная система управления (МПСУ) обеспечивает: работу установки в автоматическом режиме; стабилизацию и допусковый контроль параметров технологического процесса; диагностику работоспособности узлов и систем; архивацию полученных данных, библиотека рецептов технологических процессов.

Особенности установки: низкая привносимая дефектность; высокая воспроизводимость процессов; профилирование рабочей тепловой зоны; управление температурой в реакторе с компенсацией дестабилизирующих факторов (изменение напряжения сети, подача рабочих газов, ввод лодочки и т.п.); управление скоростью разогрева и охлаждения реакторов; управление загрузкой-выгрузкой лодочек с пластинами, подачей и расходами рабочих газов.

Максимальный диаметр обрабатываемых пластин 150-200 мм, количество реакторов 3, количество одновременно обрабатываемых пластин в каждом реакторе до 150.

Длина рабочего хода загрузочного устройства не менее 1900 мм, диапазон скоростей перемещения загрузочного устройства 75/1500 мм/мин. Диапазон рабочих температур 400/1250°C, длина рабочей тепловой зоны не менее 900 мм.

Неравномерность распределения температуры в пределах длины рабочей тепловой зоны в диапазоне температур:

- от 400 до 600°C - 1,5°C
- свыше 600 до 800°C - 0,75°C
- свыше 800 до 1250°C - 0,5°C

Нестабильность поддержания температуры (среднеквадратическое отклонение) в рабочей тепловой зоне в течение 72 ч в диапазоне температур: от 400 до 600°C $\pm 1,5^\circ\text{C}$, свыше 600 до 800°C $\pm 1^\circ\text{C}$, свыше 800°C до 1250°C $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

Время разогрева электропечи до максимальной рабочей температуры 2.5 ч. Средняя скорость нагрева рабочей тепловой зоны в диапазоне температур свыше 600°C до 1250 °C не менее 15°C/мин. Средняя скорость охлаждения рабочей тепловой зоны в диапазоне температур от 1250°C до 800 °C не менее 0.5°C/мин.

Погрешность поддержания заданного расхода газа $\pm 2\%$. Диапазон регулирования расхода реагента на один реактор: POCl_3 – 40/400 мг/мин, VBr_3 – 50/500 мг/мин.

2. ФОРМИРОВАНИЕ p-n ПЕРЕХОДОВ МЕТОДОМ ИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

Ионное легирование материалов (ионная имплантация) в настоящее время становится основным технологическим процессом из применяемых для модификации электрофизических, химических. Оптических, механических и других свойств поверхностных слоев материала.

Метод ионного легирования основан на контролируемом внедрении в материал ускоренных в электростатическом поле ионизованных атомов и молекул.

Особенно перспективным метод ионного легирования оказался для твердотельной электроники. Идея ионного легирования п/п материалов была предложена У.Шокли в 1954 г. Этот метод обладает преимуществами по сравнению с диффузией, сплавлением, легированием из расплава, эпитаксиальным наращиванием. К этим преимуществам относятся: универсальность, т.е. возможность внедрения любой примеси в любой материал; локальность воздействия; достаточно низкие температуры процесса; возможность строгого дозирования примесей; простота управления; высокая чистота вводимых примесей.

2.1. Физические основы ионного легирования

Движение ионов, внедренных в твердое тело, носит сложный характер. В результате столкновений с атомами вещества ионы тормозятся и рассеиваются, при этом выбивая атомы подложки из их узлов, т.е. создавая так называемые радиационные дефекты.

За исключением случая каналирования ионов, любое кристаллическое вещество можно рассматривать как аморфное, т.е. ион при движении в кристалле видит хаотическое расположение атомов.

Для описания движения иона в твердом теле используется несколько упрощающих предположений. Во-первых, рассматриваются парные столкновения ион-атом, и в первом приближении влиянием кристаллической решетки на процесс столкновения пренебрегают. Справедливость этого предположения подтверждается тем, что передаваемая ионом атому вещества энергия (порядка 1000 эВ), много больше энергии смещения атома из узла решетки (30 эВ).

Во-вторых, принято считать, что несмотря на дискретный характер передачи энергии при своем движении в твердом теле, ион теряет энергию непрерывно. Поэтому вводится понятие энергетических потерь иона в твердом теле, численно равных потере энергии иона на единице длины его пробега.

В-третьих, передача энергии от иона атому осуществляется в результате упругих и неупругих столкновений. При упругих столкновениях рассматривается в основном ядерный механизм торможения. Упругим столкновением атомов с электронами пренебрегают. Неупругие столкновения в основном связаны с электронами вещества. Потери энергии при таких соударениях обусловлены возбуждением и ионизацией атомов и молекул. Неупругими соударениями с ядрами, вызывающими тормозное излучение,

возбуждение ядра или ядерные реакции, будем пренебрегать из-за относительной малости изменения энергии ионов.

Энергия облучения E_0 – энергия, приобретаемая атомом или молекулярным ионом с зарядом q под действием разности потенциалов U :

$$E_0 = qU = neU, \quad (19)$$

где n – кратность ионизации ионов ($n=1, 2, 3$), e – заряд электрона.

Молекулярные ионы, внедряясь в кристалл, распадаются на атомные ионы. При этом энергия атомных ионов есть:

$$E_i = E_0 \cdot \frac{M_i}{M_0}, \quad (20)$$

где E_i , M_i – энергия и масса атомного иона; E_0 , M_0 – энергия и масса молекулярного иона.

Доза облучения Q – заряд ионов, проходящих через единицу поверхности мишени за время имплантации t : $Q = Jt$, где J – плотность ионного тока.

Поверхностная концентрация N_s падающих ионов определяется дозой облучения

$$N_s = \frac{Q}{q} = \frac{J \cdot t}{n \cdot e} = 6.25 \cdot 10^{12} Q/n \text{ ион/см}^2 \quad (21)$$

доза выражается в мкКл/см².

Основной теорией, описывающей процессы при движении ионов в твердых телах, является теория Линхарда, Шарффа и Шиотта – теория ЛШШ. Эта теория позволяет рассчитать энергетические потери, параметры пробегов, профили распределения радиационных дефектов и внедряемых примесей.

В теории ЛШШ вводится понятие электронной и ядерной тормозных способностей, выражающих энергетические потери на единице длины, приходящиеся на один атом.

Расчет ядерной тормозной способности S_n проводится в соответствии с законами классической механики. Электронное торможение связано с неупругим рассеянием падающих ионов на электронах вещества, как свободных, так и связанных. Во втором случае потери энергии иона, пролетающего мимо атома, связаны с ионизацией или возбуждением атома.

Чтобы рассчитать выражение для электронной тормозной способности S_e в случае не слишком высоких значений скорости иона, в теории ЛШШ сделаны следующие предположения: 1) все электроны вещества считаются свободными, 2) падающий ион теряет свою энергию как при столкновениях с электронами, так и при возбуждении их в объеме, удаленном от траектории иона, а также при плазменных резонансных колебаниях электронного газа. В этом случае электронная тормозная способность пропорциональна скорости иона или квадратному корню из его энергии.

Ядерное торможение существенно при малых энергиях.

Для ионов ряда элементов от В до Sb максимальная энергия лежит в интервале $3 \cdot 10^3 - 6 \cdot 10^5$ кэВ.

Для тяжелых ионов (атомное число $Z > 20$) в широком интервале энергий в аморфных веществах будет преобладать ядерное торможение. Для легких ионов ($Z < 10$) необходимо учитывать оба механизма торможения.

Средний пробег иона с начальной энергией E_0 определяется формулой:

$$R = \frac{1}{N} \int_0^{E_0} \frac{dE}{S_n + S_e}, \quad (22)$$

где N – собственная концентрация атомов тормозящего вещества.

С достаточно хорошим приближением выражения для ядерной и электронной тормозных способностей записываются в виде:

$$S_n = 2.8 \cdot 10^{-15} \frac{Z_1 Z_2}{(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{1/2}} \cdot \frac{A_1}{A_1 + A_2},$$

$$S_e = 3.25 \cdot 10^{-17} \frac{Z_1 + Z_2}{\sqrt{A_1}} \cdot \sqrt{E} = k\sqrt{E} \quad (23)$$

где Z – заряд иона, A – атомная масса, индексы 1 и 2 относятся к налетающему иону и атому мишени.

Помимо среднего пробега иона R существует понятие нормального пробега (R_p) – это средний пробег в направлении первоначальной траектории иона. Между общим и нормальным пробегами существует приближительное соотношение:

$$R_p = \frac{R}{1 + \frac{1}{3\mu}}$$

$$\mu = \frac{A_1}{A_2} \quad (24)$$

Выражение для нормального пробега имеет вид:

$$R_p = \frac{2}{Nk^2(1 + \frac{1}{3\mu})} \left[S_e - S_n \ln \left(1 + \frac{S_e}{S_n} \right) \right] \quad (25)$$

Среднеквадратичное отклонение пробега (ΔR_p) определяется следующим образом:

$$\frac{\Delta R_p^2}{R_p^2} \approx \frac{\Delta R^2}{R^2} = \frac{2}{3} \cdot \frac{A_1 A_2}{(A_1 + A_2)^2} \quad (26)$$

Распределение концентрации примеси в полупроводнике с исходной концентрацией $C_{исх}$, легированным ионным внедрением имеет вид распределения Гаусса:

$$C(x) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - R_p}{\Delta R_p} \right)^2 \right] \pm C_{исх} \quad (27)$$

Глубина залегания p-n перехода при $C(x)=C_{исх}$ тогда будет выражаться следующим образом:

$$x_j = R_p \pm \Delta R_p \sqrt{2 \ln \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \Delta R_p C_{исх}}} \quad (28)$$

2.2. Каналирование ионов

В монокристаллах существуют такие направления, вдоль которых атомы решетки образуют своеобразные каналы, ограниченные параллельными цепочками атомов. Так для монокристаллов типа алмаза ось канала совпадает с направлением [110]. Если на такую решетку посмотреть под углом большим, чем 10 градусов к направлению [110], то расположение атомов будет представляться хаотическим, близким к структуре аморфного вещества.

Движение быстрых ионов вдоль канала, когда ионы незначительно рассеиваются атомами монокристалла, называется каналированием ионов.

Ионы тормозятся в узкой области вдоль канала. Пробег их в случае каналирования может на порядок превышать статистический пробег.

Если ион будет двигаться к оси кристалла под углом больше определенного критического, то такой ион будет рассеиваться, как в аморфной мишени. Для существования эффекта каналирования необходимо, чтобы ионы попадали в канал под углами меньшими, чем критический. Значение критических углов для широкого класса пар ион-мишень составляет 3-6 градусов. Таким образом, если падающий пучок ионов ориентирован вдоль кристаллографической оси в пределах критического угла каналирования, то существенная часть падающих ионов будет направлена по каналам, если же углы падения превышают критический, то кристаллическое вещество будет по существу неотличимо от аморфного.

На эффект каналирования влияет температура мишени, доза облучения, разориентировка и разупорядочение поверхности. Так при повышении

температуры увеличивается амплитуда колебаний атомов, что приводит к снижению максимальной глубины внедренных атомов – максимального пробега каналированных ионов. Увеличение дозы ионов, падающих на поверхность вещества, приводит к возрастанию количества дефектов и, следовательно, к разрушению каналов. При интегральной дозе облучения свыше 10^{12} ион/см² пробег значительно уменьшается и наблюдается эффект насыщения. При дозах $Q=7.2 \cdot 10^{14}$ ион/см² эффект каналирования практически отсутствует.

Максимальный пробег каналированных ионов примерно на порядок превышает величину нормального пробега ионов. Так при каналировании ионов фосфора в кремний с энергией 110 кэВ при дозе $Q=1.5 \cdot 10^{13}$ ион/см² максимальный пробег каналированных ионов составляет 1.4 мкм, в то время как средний нормальный пробег ионов составляет 0.15 мкм.

2.3. Особенности технологии ионного легирования

В настоящее время в твердотельной все чаще используют многокомпонентные материалы, например полупроводниковые соединения GaAs, GaP и др.

При расчете распределения имплантируемых ионов по длинам пробегов в сложных материалах возникают определенные трудности. Если облучается двухкомпонентный материал с большими и близкими по значению атомными номерами, то можно рассматривать материал как однокомпонентное вещество со средними массой и порядковым номером. Так, для арсенида галлия пробеги ионов можно приближенно рассчитывать как для германия ($Z=32$). Если же атомные номера отличаются сильно, то используются более сложные выражения.

Распределение в мишени имплантируемых ионов зависит от дозы облучения, т.е. числа ионов, падающих на единицу площади. Это связано с

тем, что при увеличении дозы начинают играть роль два процесса: аморфизация приповерхностного слоя вещества вследствие роста концентрации радиационных дефектов и распыление поверхности материала бомбардирующими ионами.

Радиационные дефекты. При торможении в мишени ионы передают атомам решетки энергию, которая может превышать значения энергии связи атомов. Выбитые из своих мест атомы, в свою очередь, могут сместить другие атомы, т.е. вызвать каскад столкновений. В этом случае вдоль траектории иона накапливаются вакансии, междоузельные атомы и объемные дефекты решетки (кластеры). При значительных дозах облучения отдельные кластеры перекрываются и образуется сплошной аморфный слой, т.е. структура, где отсутствует дальний порядок.

Число атомов решетки, смещенных одним ионом, оценивается по следующей формуле (модель упругих шаров):

$$N_d = \frac{E}{2E_d}, \quad (29)$$

где E – энергия иона, $E_d = 5-80$ эВ – пороговая энергия смещения атомов мишени (для кремния $E_d = 22$ эВ).

Следовательно, при энергии иона $E = 100$ кэВ число смещенных им атомов составляет $N_d \sim (2-3)10^3$. Можно ввести понятие глубины концентрации дефектов x_d , т.е. расстояния, на котором концентрация дефектов максимальна.

Радиационные дефекты сильно влияют на процесс каналирования ионов. С увеличением дозы облучения растет число радиационных дефектов, вследствие этого уменьшается число ионов в каналах из-за их рассеяния за пределы канала.

Ионное распыление поверхности мишени. При легировании материалов большими дозами ионов, особенно тяжелых, наблюдается сильный эффект распыления поверхности мишени вплоть до насыщения, когда число имплантируемых ионов становится равным числу распыляемых.

Толщина распыленного слоя материала мишени равна:

$$d = \frac{S}{N_2} Q, \quad (30)$$

где S – коэффициент распыления, N_2 – плотность атомов в мишени, Q – доза облучения.

Для тяжелых ионов ($M_1 > 30$) толщина распыляемого слоя пропорциональна дозе облучения.

Профиль легирования с учетом распыления материала мишени определяется теперь выражением:

$$C(x) = \frac{N_2}{2S} \left(\operatorname{erf} \frac{x - \bar{R}_p + Q \frac{S}{N_2}}{\sqrt{2\Delta\bar{R}_p}} - \operatorname{erf} \frac{x - \bar{R}_p}{\sqrt{2\Delta\bar{R}_p}} \right), \quad (31)$$

где S – коэффициент распыления.

Насыщение профиля легирования происходит при равенстве чисел внедренных ионов и распыленных с поверхности мишени атомов, распределение внедряемых ионов по глубине описывается выражением

$$C(x) = \frac{N_2}{2S} \operatorname{erfc} \frac{x - \bar{R}_p}{\sqrt{2\Delta\bar{R}_p}}. \quad (32)$$

Максимум концентрации внедренных ионов теперь находится на поверхности мишени ($x=0$). Максимальное значение концентрации определяется выражением:

$$C_{\max} = \frac{N_2}{2S} \operatorname{erfc} \frac{\bar{R}_p}{\sqrt{2\Delta\bar{R}_p}} \approx \frac{C}{S}. \quad (33)$$

Эта максимальная концентрация не зависит от дозы имплантации Q , а определяется в основном отношением атомной плотности материала к коэффициенту распыления.

Для ионов мышьяка с энергией 45 кэВ при легировании кремния максимальная объемная концентрация мышьяка составляет $\sim 2 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$.

Нагрев материала мишени. Нагрев при ионном легировании становится существенным при больших дозах облучения, т.е. при высоких плотностях ионного тока и больших временах обработки. Плотность мощности выделяемой теплоты равна

$$q = \frac{E_0}{e} j_i = \frac{eUQ}{\tau}, \quad (34)$$

где E_0 – энергия иона, j_i – плотность ионного тока, Q – доза облучения, τ – время облучения.

В стационарном режиме если взять модель поверхностного источника и пренебречь лучистым теплообменом с поверхности температуру поверхности можно определить по следующей формуле

$$T = \frac{2q\sqrt{a\tau}}{\sqrt{\pi\chi}} + T_0, \quad (35)$$

где T_0 – начальная температура образца, q – плотность мощности выделяемой энергии, a – температуропроводность материала, χ – коэффициент теплопроводности.

Если взять платину толщиной 0.3 мм, для плотности тока ионов $j_i = 100 \text{ мкА/см}^2$ ($Q \sim 10^{16} \text{ ион/см}^2$, $\tau = 5-10 \text{ с}$) с энергией $E_0 = 100 \text{ кэВ}$ перегрев поверхности составит 30-50 градусов, что несущественно.

Если же теплоотвод происходит за счет лучистого теплообмена, то температура образца в стационарном режиме будет определяться следующим выражением:

$$T = \left(\frac{q}{2\varepsilon\sigma} + T_0 \right)^{1/4}, \quad (36)$$

где $\varepsilon \leq 1$ – излучательная способность образца, $\sigma \approx 5.67 \cdot 10^{-12}$ Вт/см²·К⁴ – постоянная Стефана-Больцмана излучения черного тела. В этом случае при тех же режимах $T = 700-800$ С. При таких температурах становятся существенными и процессы диффузии.

Отжиг ионно-легированных слоев. Созданные в результате ионной бомбардировки радиационные дефекты можно устранить отжигом. Отжиг ионно-легированных слоев вещества необходим еще и по другой причине. Так как цель легирования – изменение электрофизических свойств материала, например типа проводимости, то внедренные атомы примеси должны быть электрически активны. Это означает, что ион примеси должен заменить атом вещества в узле решетки и вступить в электронные связи с соседними атомами.

подавляющая часть атомов, возникших из внедренных ионов, после окончания процесса легирования электронейтральна и находится в междоузлиях. Отжиг, т.е. нагрев вещества до определенной температуры в течение некоторого времени, приводит к термической активации примесных атомов и ускорению процесса диффузии, в результате которой происходят восстановление структуры решетки и замещение атомов вещества атомами примеси. В технологии м/э обычно используют два метода отжига: термический и лазерный.

При *термическом* отжиге равномерно нагревается весь образец, определенные области которого подвергнуты легированию. Так, германий нагревается до температуры 380⁰ С, а кремний – до 570⁰ С в течение 30-40 мин. При таких режимах нагрева решетка вещества успевает восстановиться благодаря диффузии.

При *лазерном* отжиге нагреву сфокусированным лучом лазера подвергается только легированная область материала. Плотность мощности луча составляет $3.5-5 \cdot 10^7$ Вт/см², длительность импульса 30-100 нс. Обычно используется рубиновый лазер с длиной волны 0.694 мкм или лазер на стекле с неодимом с длиной волны 1.06 мкм.

Механизм лазерного отжига уже нельзя объяснить только процессами диффузии. Наиболее приемлемое объяснение эффекта отжига заключается в том, что в зоне воздействия лазерного луча происходит плавление материала, время пребывания в расплавленном состоянии составляет $10^{-8}-10^{-7}$ с. Затем наступает кристаллизация вещества при очень большой скорости 10^8-10^9 К/с. Высокая напряженность электрического поля во время импульса может приводить к ионизации примесей, что ускоряет процесс отжига ионно-легированного слоя.

При термическом отжиге проводимость п/п меньше, что связано с неполной активацией примесных атомов и наличием значительного числа дефектов.

Помимо термического и лазерного методов отжига в настоящее время начинают использовать электронно-лучевой метод, который по своему механизму близок к лазерному, а также отжиг с помощью некогерентного мощного оптического излучения. Источником такого излучения являются импульсные лампы, которые применяются в системах накачки лазеров.

2.4. Технологическое оборудование для ионного легирования

Модифицирование поверхностных слоев материалов ионами определенного выбранного вида осуществляется на специальных технологических ускорителях – ионно-лучевых установках легирования. Диапазон энергий, в пределах которого обычно ускоряют ионы, распространяется от 20 до 450 кэВ, и высокими энергиями 0.6-1 МэВ.

Схемы установок одноступенчатые и содержат следующие основные узлы: система напуска рабочего вещества, источник ионов, система формирования ионного луча, ионопровод, сепаратор ионов, система доускорения, камера с образцами, системы откачки, блок питания ионного источника, блок вытягивающего и фокусирующего напряжения, блок питания сепаратора ионов, блок контроля дозы облучения. На рис.4 представлена схема типичной установки ионного легирования.

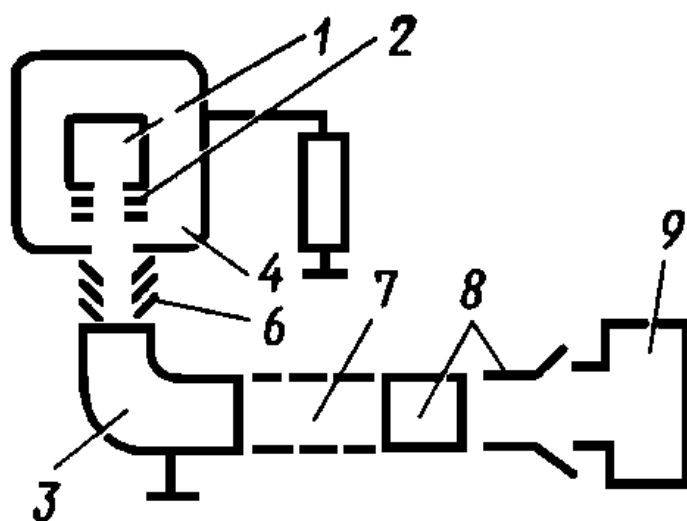


Рис. 4. Схема установки ионного легирования: 1 – ионный источник; 2 - вытягивающий и фокусирующий электроды; 3 – масс-сепаратор; 4 – узел, находящийся под высоким потенциалом; 5 – регулируемая диафрагма; 6 - ускоряющая система; 7 – фокусирующая линза; 8 – система электростатического отклонения и сканирования пучка; 9 – приемная камера.

Основные требования к установкам: возможность работы как с одно-, так и многозарядными ионами различных изотопов; обеспечение ускорения ионов в широком диапазоне энергий до 1 МэВ; точное регулирование дозы при ее постоянстве в процессе обработки мишени-образца; возможность прецизионной взаимной ориентации ионного луча и образца; точное регулирование температуры образца в широком интервале; обеспечение в ионо-

проводе и рабочей камере высокого вакуума с отсутствием в остаточной газовой среде углеводородов; модульное исполнение установки с возможностью замены узлов и блоков; высокая производительность; длительная и стабильная работа источника ионов и других узлов ускорителя; однородность дозы по большой площади мишени и воспроизводимость результатов при выбранном типе ионов.

Все типы установок по системам ускорения ионов условно делятся на 3 группы: с ускорением до сепаратора и (или) после сепаратора. В устройствах первой группы ионы вытягиваются из выходной щели источника напряжением 5-15 кВ и далее получают приращение энергии в многоэлектродной системе с постоянной напряженностью электрического поля. После сепаратора выделенный поток направляется в рабочую камеру. Как сепаратор, так и рабочая камера находятся под нулевым потенциалом.

Во второй группе установок вытягивание ионов из источника и формирование потока осуществляется с помощью относительно невысокого напряжения. Установки этой группы относятся к устройствам с послеускорением ионов. Рабочая камера или располагаемые внутри нее держатели пластин находятся под высокими потенциалом.

Установки третьей группы чаще используют для легирования высокоэнергетическими ионами со сравнительно малыми массовыми числами. В них применяется две системы ускорения. Если приемное устройство заземлено, то под высоким напряжением находятся источник ионов и масс-сепаратор.

Установки малых и средних доз характеризуются пучками с интенсивностью от 1 до 500-800 мкА. В сильноточных установках больших доз сила тока ионного пучка достигает 1-20 мА. Оба типа установок работают в области энергий до 500 кэВ. В установках третьей группы достигаются энергии 1 МэВ и выше, но токи не превышают единиц микроампер.

Ионные источники. Одним из основных узлов любого технологического ускорителя является ионный источник. Ионный источник состоит из собственно источника ионов и устройства их экстракции. Атомы имплантируемой примеси могут вводиться в ионный источник либо напуском (в виде газа), либо испарением (жидкой или твердой примеси). В ионном источнике они ионизируются и вытягиваются соответствующим потенциалом в ускоритель, где приобретают нужную энергию. К источнику ионов предъявляют следующие требования: стабильность пучка во времени; получение ионов с определенным зарядом, нужной плотности тока при низких экстрагирующих напряжениях; простота замены легирующих элементов; простота управления и замены самого источника. С помощью одного источника невозможно удовлетворить все требования, поэтому используется набор источников с разными ионами. Имеется несколько типов источников ионов: с горячим, холодным и полым катодами (дуговые); дуоплазмотроны; источники с ВЧ- и СВЧ - возбуждением; с поверхностной ионизацией.

Ионный источник должен обеспечить возбуждение атомов рабочего газа до энергии, превышающей потенциал ионизации атома, для образования положительно заряженных ионов. Большинство источников включает следующие конструктивные элементы: разрядную или ионизационную камеру, которая обычно является несущей конструкцией источника; анод, предназначенный для создания электрического поля внутри разрядной камеры; источник электронов (термокатод), инжектирующий электроны для ионизации газа; магнитную систему, повышающую эффективность ионизации и плотность плазмы; электроды, экстрагирующие ионы, и электроды первичной фокусировки пучка. Работу источника ионов обеспечивают вспомогательные устройства: система подачи газа; устройство испарения вещества; источники питания. Наиболее простые распространенные источники с горячим катодом исполняются в различных конструктивных вариан-

тах. Источником электронов является катод прямого или косвенного накала, электроны эмитируются перпендикулярно поверхности нити накала с плотностью тока порядка 1 А/см^2 .

Система извлечения ионов, формирования и ускорения ионных пучков. Из любого типа источника ионы необходимо эффективно извлечь и сформировать ускоренный поток требуемого поперечного сечения. В плазменных источниках эмитирующей поверхностью является граница раздела плазмы. Для извлечения ионов в стенке разрядной камеры выполняется отверстие, формирующее первоначальный профиль потока. На небольшом расстоянии (несколько мм) от отверстия располагают вытягивающий электрод (экстрактор) с отверстием, по форме подобным отверстию в стенке разрядной камеры. На экстрактор подают вытягивающий потенциал, ускоряющий ионы от границы плазмы. Форма границы плазмы в области первого отверстия зависит от конфигурации сжимающего плазму электрода, концентрации заряженных частиц в ней, силы отбираемого тока и вытягивающего напряжения. Она может быть плоской, вогнутой, выпуклой и в общем случае подвижной.

Обычно одиночные зазоры обеспечивают надежную работу при ускоряющих напряжениях не выше 25-30 кВ. С целью ускорения ионов до энергий до 400 кэВ в установках применяются многозазорные ускорительные секции. Полное ускоряющее напряжение, подаваемое на всю секцию, с помощью делителя напряжения равномерно распределяется между отдельными зазорами в секции. Т.о., потенциал постепенно увеличивается вдоль оси секции при постоянной и одинаковой напряженности электрического поля в каждом одиночном зазоре. Энергия ионов в каждом зазоре обычно увеличивается не более чем на 15-20 кэВ.

Системы формирования ионных потоков. К ним относятся линзы, фокусирующие пучки до требуемых поперечных размеров. В ионно-

лучевых установках, рассчитанных на небольшие силы ионного тока чаще используют электростатические линзы. Конструктивно они могут быть выполнены в виде диафрагм с отверстием, иммерсионных и одиночных линз. Расчет их геометрии принципиально не отличается от расчета электронных линз, т.к. траектории и электронов, и ионов в электростатических полях линз одинаковы. Линзы создают на пути движения ионов участок неоднородного, обычно аксиально-симметричного, электростатического поля, к которому с обеих сторон примыкают эквипотенциальные области. Область до линзы называют пространством объектов, после – пространством изображений. Если по оси движения пучка изменяется потенциал, то пучок меняет направление движения. Следовательно, изменяя градиент потенциала, можно добиваться различных коэффициентов преломления в широких пределах.

Линзы могут быть нескольких типов – иммерсионные (бипотенциальные) и одиночные электростатические, составленные из комбинаций соосных цилиндров, а также диафрагм и цилиндров.

С повышением плотности тока и при больших энергиях ионов (выше 1 МэВ) эффективность электростатических линз снижается. В таких установках используют квадрупольные, в частности магнитные линзы. Они выполняются в виде четырех длинных магнитных стержней с чередующейся полярностью.

Масс-сепараторы. Для ионного легирования обычно необходимы ионы конкретного изотопа с определенной зарядностью. Например, с целью формирования акцепторного слоя в кремнии его легируют ионами изотопа бора $^{11}\text{B}^+$, а донорного слоя – изотоп фосфора $^{31}\text{P}^+$.

В потоках же, извлекаемых из ионных источников, всегда содержатся ионы других элементов, в частности материалов электродов, рабочего и остаточного газов и др. С целью выделения из общего потока ионов опреде-

ленного сорта используют специальные системы разделения ионов по отношениям их масс к заряду – масс-сепараторы. Сепарация основана на взаимодействии движущихся ионов с магнитным и (или) электростатическим полем.

В установках ионной имплантации получили распространение два типа сепараторов: с разделением ионов в однородном постоянном поле секторного магнита и фильтр Вина, где одновременно на ионы действуют взаимно ортогональные магнитные и электрические поля. Фильтр Вина целесообразно использовать, если в установке сила тока не превышает 10^{-4} А.

Перестройку сепаратора с одного вида ионов на другой осуществляют изменением индукции магнитного поля или вытягивающего напряжения.

Системы сканирования. Ионный пучок, транспортируемый по ионопроводу, имеет круглое или прямоугольное сечение. Для легирования пластин большой площади необходимо или расфокусировать его, или сканировать им по поверхности пластины. Расфокусировку пучка используют редко, т.к. вследствие неравномерности плотности тока не удастся одинаково пролегировать требуемую площадь. Сканирование пучком осуществляют путем отклонения его электрическим полем в одном или двух взаимно перпендикулярных направлениях. Большая однородность дозы достигается при электростатическом отклонении в одном направлении и механическом перемещении мишени в перпендикулярном.

Устройства контроля ионного тока и дозы легирования. В процессе настройки установки и проведения легирования необходимо периодически контролировать силу ионного тока до сепаратора, силу тока выделяемых ионов после сепаратора и измерять дозу имплантируемых ионов. Регистрацию силы тока осуществляют с помощью коллекторов – цилиндров Фарадея. Если необходимо измерить силу тока пучка, то цилиндр Фарадея с

помощью определенного механизма на время помещают на оси движения потока.

Один или несколько коллекторов устанавливают в рабочей камере для непрерывного контроля тока и измерения полной дозы легирования. Обычно коллекторы располагают между обрабатываемыми пластинами. Равномерность легирования по площади пластин можно контролировать с помощью синтетических пленок типа «фтирос», изменяющих свой цвет под действием имплантируемых ионов. При этом различают разницу в дозах ~ 5 %.

Рабочие камеры. В них устанавливают подвижные держатели легируемых пластин. В некоторых установках с целью повышения производительности процесс пластины размещают в несколько рядов по цилиндрической поверхности барабана. В полуавтоматических установках применяется загрузка партий пластин через вакуумный шлюз. Затем каждую пластину механически сканируют перед неподвижным лучом с помощью рычажного секторного держателя внутри камеры. После полного набора дозы пластина с рамкой перемещается во вторую шлюзовую камеру.

Вакуумные системы. Они обеспечивают вакуум на уровне 10^{-4} - 10^{-5} Па, необходимый для хорошей фокусировки потока, его транспортировки без потерь, снижения вероятности процессов перезарядки и нейтрализации ионов.

Для процессов ионной имплантации важен также состав остаточных газов, особенно в области мишени. Загрязнение поверхности мишени молекулами масел из насосов может вызвать загрязнение легирующих материалов. Поэтому в установках используют вымораживающие азотные ловушки и экраны, но наиболее эффективным способом является применение безмаслянных средств откачки: турбомолекулярных и ионно-геттерных насосов, а для предварительной откачки – охлаждаемых цеолитовых насосов.

В России выпускается ряд установок для ионной имплантации, объединенных названием «Везувий», различающиеся техническими характеристиками, а также установки «Вита», «Доза», «Лада–30М», «Декрет». Они характеризуются диапазоном энергии от десятков килоэлектронвольт до нескольких мегаэлектронвольт и плотностью ионного тока 10^{10} - 10^{19} ион/см².

Например, установка «*Везувий -9*» является универсальной установкой высокоэнергетической имплантации и предназначена для легирования полупроводниковых приборов и интегральных микросхем увеличенной глубины, технология изготовления которых не допускает высокотемпературных обработок. Источник ионов позволяет получать многозарядные ионы фосфора, мышьяка, сурьмы с током до 600 мкА. Максимальная энергия ионов 1,8 МэВ (достигается за счет применения двух и трехзарядных ионов). Контейнер имеет 18 сменных кассет, в которых можно разместить 54 пластины диаметром 100 мм. Режим обработки групповой или поштучный.

Установки «*Везувий-3, 5*» предназначены для выполнения технологических процессов ионной имплантации малых и больших доз в производстве полупроводниковых приборов и интегральных микросхем с большим запуском полупроводниковых пластин. Повышенная производительность обеспечивается наличием двух унифицированных приемных камер групповой обработки, попеременно подключаемых к непрерывно работающему инжектору ионов для сокращения вспомогательного времени загрузки-выгрузки пластин. Диапазон энергии ионов (20-150) кэВ, ток однозарядных ионов фтора – 1000 мкА, ток однозарядных ионов бора – 300 мкА.

Новые серии установок «Везувий»: «Везувий 13» – установка малых и средних доз, «Везувий 12» установка больших доз, и установка «Везувий 15М», рассчитанная на возможность работы с энергиями ионов до 600 кэВ и на использование многозарядных ионов.

Установка ионно-лучевой имплантации «Лада-30М» является ионно-лучевой установкой имплантации средних и больших доз. Технические характеристики данной установки приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Технические характеристики установки ионно-лучевой имплантации «Лада-30М».

Диапазон энергий	10-180 кэВ
Максимальный ток пучка: В ⁺ Р ⁺ As ⁺	1.0 мА 4.0 мА 4.0 мА
Неравномерность дозы	1%
Максимальная производительность: пластины диаметром 100 мм пластины диаметром 150 мм	95 пластин в час 30 пластин в час

Установка ионно-лучевой имплантации «Декрет». Ионно-лучевая установка имплантации средних и больших доз с дисковым приемным устройством для пластин диаметром 150 мм. Технические характеристики данной установки приведены в Таблице 2.

Таблица 2. Технические характеристики установки ионно-лучевой имплантации «Декрет».

Диапазон энергий	10-180 кэВ
Максимальный ток пучка: В ⁺ Р ⁺ As ⁺	3.0 мА 8.0 мА 8.0 мА
Неравномерность дозы	1%
Максимальная производительность: при дозе $6.25 \cdot 10^{15}$ ион/см ² при дозе $1.6 \cdot 10^{15}$ ион/см ²	56 пластин в час 78 пластин в час

ВОПРОСЫ

1. Назовите основные механизмы диффузии примеси в полупроводниках.
2. Что такое коэффициент диффузии?
3. Какими законами описываются процессы создания диффузионных областей?
4. Сформулируйте граничные и начальные условия при диффузии из источника с постоянной поверхностной концентрацией. Как можно определить в этом случае глубину залегания p-n перехода?
5. Сформулируйте граничные и начальные условия при диффузии из тонкого слоя с фиксированным количеством примеси. Как можно определить в этом случае глубину залегания p-n перехода?
6. Назовите требования, предъявляемые к диффузантам.
7. Каковы способы проведения диффузии из газовой и паровой фазы?
8. Каковы способы проведения диффузии из поверхностных источников?
9. В чем особенности технологического оборудования для проведения диффузионных процессов?
10. Перечислите виды установок для проведения диффузионных процессов.
11. Каковы преимущества метода ионного легирования по сравнению с диффузией?
12. Какие упрощающие предположения используются для описания движения ускоренных ионов в твердом теле?
13. Что такое доза облучения?
14. Что такое ядерная и электронная тормозные способности?
15. Как можно определить глубину залегания p-n перехода в случае ионной имплантации?

16. Что такое каналирование ионов?
17. Во сколько раз может изменяться максимальный пробег ионов в случае каналирования?
18. В каком случае в двухкомпонентных материалах для расчетов пробегов ионов имплантированных примесей можно использовать методы расчетов для однокомпонентных систем?
19. Что такое радиационные дефекты? Какие существуют способы устранения радиационных дефектов?
20. Что такое ионное распыление поверхности мишени? В каких случаях наблюдается этот эффект?
21. В каких случаях при ионном легировании возникает существенный нагрев материала мишени?
22. С какой целью применяется отжиг ионно-имплантированных слоев?
23. Нарисуйте блок-схему типичной установки ионного легирования.
24. Какие существуют типы установок ионного легирования?
25. Какие требования предъявляются к источникам ионов?
26. Каким образом происходит извлечение ионов из источника, формирование и ускорение ионных пучков?
27. С какой целью в установках ионного легирования используются масс-сепараторы?
28. Каким образом в установках ионной имплантации производится контроль ионного тока и дозы легирования?
29. Каковы особенности вакуумных систем, применяемых в установках ионного легирования?
30. Какие установки ионного легирования используются при имплантации больших, средних и малых доз?

ЛИТЕРАТУРА

1. Курносков А.И. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / А.И. Курносков, В.В. Юдин. – М.: Высшая школа, 1986. – 368 с.
2. Таиров Ю.М. Технология полупроводниковых и диэлектрических приборов / Ю.М. Таиров, В.Ф. Цветков. – СПб. : Лань, 2002. – 422 с.
3. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники / И.П.Степаненко. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2004. – 488 с.
4. Болтакс Б.И. Диффузия и точечные дефекты в полупроводниках / Б.И. Болтакс. – Л. : Наука, 1972. – 384 с.
5. Риссел Х. Ионная имплантация / Х. Риссел, И. Руге. – М. : Наука, 1983 . – 360 с.
6. Пасынков В.В. Материалы электронной техники / В. В. Пасынков, В. С. Сорокин. – СПб. : Лань, 2001. – 366 с.
7. Попов В.Ф. Процессы и установки электронно-ионной технологии / В.Ф. Попов, Ю.Н. Горин. – М. : Высшая школа, 1988. – 255 с.

Учебное издание

ТЕХНОЛОГИИ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Часть 1

Получение p-n переходов: технология и оборудование

Учебно-методическое пособие для вузов

Составители:

Машкина Екатерина Сергеевна,

Бормонтов Евгений Николаевич