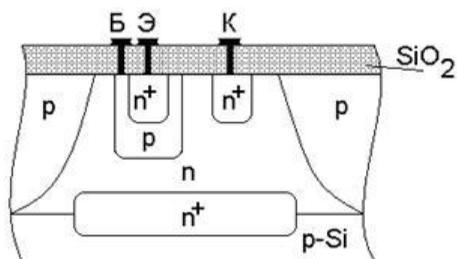


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

## ПРОЦЕССЫ МИКРО- И НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Методические указания  
к практическим занятиям



УДК 621.315.592

Процессы микро- и нанотехнологий: методические указания к практическим занятиям/ Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: М.В. Зубков, О.А. Максимов. Рязань, 2018. 16 с.

Приведены краткие теоретические сведения об особенностях процессов диффузии, ионного легирования и окисления полупроводниковых микро- и наноструктур. Представлены графические зависимости и таблицы, необходимые для проведения расчетов распределения легирующих примесей и толщин полупроводниковых и окисных слоев.

Предназначены для студентов направления 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника».

Табл. 1. Ил. 6.

*Диффузия, ионная имплантация, окисление*

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра микро- и нанoeлектроники Рязанского государственного радиотехнического университета (зав.кафедрой проф.Т.А. Холомина)

Составители: Процессы микро- и нанотехнологий  
Зубков Михаил Владимирович  
Максимов Олег Алексеевич

Редактор М.Е. Цветкова  
Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать . Формат бумаги 60x84 1/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл печ. л. 1,0.

Тираж 30 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

## 1. Расчет диффузионных структур

Диффузия легирующих примесей в полупроводниковые монокристаллы является основным методом изготовления полупроводниковых приборов и интегральных схем (ИС). С помощью процессов диффузии создаются р-п-переходы, резистивные слои, емкости, проводящие слои. Метод диффузии состоит в миграции через кристалл, нагретый до температуры порядка 1000 °С, легирующих атомов в сторону уменьшения их концентрации.

В основу теории диффузии положена аналогия между процессами переноса в жидких растворах и тепла за счет теплопроводности. Скорость переноса вещества через сечение единичной площади  $J$  или диффузионный поток описывается следующим уравнением:

$$J = -D[C(x, t)/x], \quad (1.1)$$

где  $C$  - концентрация растворенного вещества, которая, как предполагается, зависит только от  $x$  и  $t$ ;  $x$  - ось координат, совпадающая с направлением потока вещества;  $t$  и  $D$  - соответственно время и коэффициент диффузии. Знак минус в правой части 1.1 означает, что перенос вещества осуществляется в направлении уменьшения концентрации. Уравнение (1.1) называют первым законом Фика. Предполагая равновероятное перемещение атомов легирующей примеси во всех направлениях в кристалле, 1.1 записывают в виде

$$\partial C(x, t)/\partial t = D[\partial^2 C(x, t)/\partial x^2] \quad (1.2)$$

Уравнение (1.2) называют вторым законом Фика. Общее решение (1.2) имеет сложный вид. Однако при введении определенных начальных и граничных условий решения упрощаются. В полупроводниковой технологии наибольший интерес представляют два случая распределения примесных атомов.

### 1.1. Диффузия из бесконечного источника

Под термином "бесконечный источник" следует понимать источник с постоянной во времени концентрацией примеси  $C$ . Таким бесконечным источником может быть газовая фаза при диффузии в открытой трубе. Начальные и граничные условия можно записать:

- 1)  $C(x, 0) = 0$  ,
- 2)  $C(0, t) = C_0$  ,
- 3)  $C(\infty, t) = 0$  .

При этих условиях решение уравнения (1.2) имеет вид

$$C(x, t) = C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right), \quad (1.3)$$

где  $\operatorname{erf}$  – сокращенное обозначение функции ошибок Гаусса (от английского error function);  $x$  - глубина, соответствующая данной концентрации, см;  $t$  - длительность диффузии, с. В этом уравнении коэффициент диффузии  $D$  имеет размерность  $\text{см}^2/\text{с}$ , а поверхностная концентрация  $C_0$  –  $\text{см}^{-3}$ .

$$C(x, t) = C_0 \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right), \quad (1.4)$$

$$\operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{Dt}}} \exp(-t^2) dt .$$

Решение (1.3) может быть переписано в виде:

$$C(x, t) = C_0 \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right), \quad (1.5)$$

где  $\operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} = 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$  - дополнительная функция ошибок.

Вместо  $\operatorname{erfc}$ -функции можно использовать аппроксимацию

$$\operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \approx \exp \left[ \left( -\frac{x}{2\sqrt{Dt}} + 0.3 \right)^2 \right]. \quad (1.6)$$

График функции (1.4) представлен на рис.1.1. Глубина, отсчитываемая от  $x = 0$ , на которой концентрация диффундирующей примеси равняется концентрации примеси в исходной пластине полупроводника  $C_B$ , называется глубиной залегания р-п перехода  $x_j$  (рис.1.1). При диффузии из бесконечного источника глубина залегания р-п перехода рассчитывается по формуле (1.7):

$$x_j = 2\sqrt{Dt} \left( \sqrt{\ln(C_0/C_B)} - 0.3 \right). \quad (1.7)$$

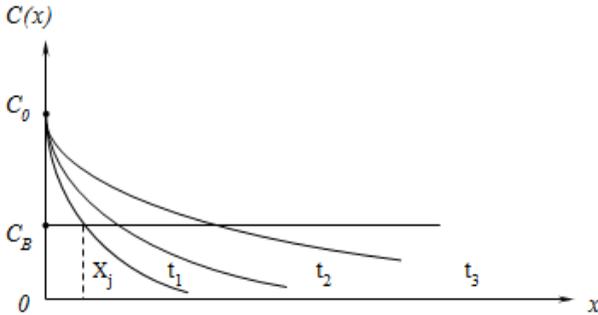


Рис. 1.1. Зависимость концентрации примеси от координаты при диффузии из бесконечного источника

## 1.2. Диффузия из источника с ограниченным содержанием примеси

Термин "ограниченное содержание примеси" означает, что перед началом диффузии на поверхности полупроводниковой пластины в бесконечно тонком слое содержится заданное количество атомов легирующей примеси  $N$  ( $\text{см}^{-2}$ ). Причем обеспечивается условие, препятствующее испарению примеси с поверхности, так как диффузия осуществляется при высоких температурах. Примером этого является диффузия в кремний из тонкого поверхностного слоя, защищенного пленкой  $\text{SiO}_2$ , которая представляет собой отражающую границу. Используя начальные и граничные условия:

- 1)  $C(x,0) = 0$  ,
- 2)  $C(x,\infty) = 0$  ,
- 3)  $N = \int_0^{\infty} C(x) dx$  , получают

$$C(x,t) = \frac{N}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) . \quad (1.7)$$

Полагая  $x = 0$ , определяют величину поверхностной концентрации:

$$C_0 = \frac{N}{\sqrt{\pi Dt}} . \quad (1.8)$$

Уравнение (1.8) называют гауссовым распределением. Глубина залегания р-п-перехода для этого случая:

$$x_j = 2\sqrt{Dt} \sqrt{\ln(C_0/C_B)} . \quad (1.9)$$

Для многих практических случаев глубина р-п перехода:

$$x_j \approx 6\sqrt{Dt} . \quad (1.10)$$

График функции (1.7) представлен на рис.1.2.

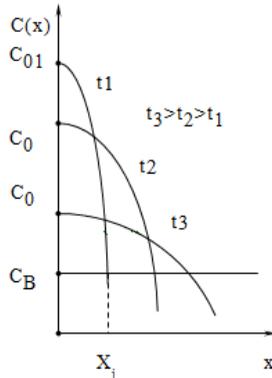


Рис. 1.2. Распределение примеси и определение глубины залегания р-п перехода при диффузии из источника с ограниченным содержанием примеси

### 1.3. Двухстадийная диффузия

В планарной технологии ИС, например при создании базовых областей биполярных транзисторов, диффузию проводят в две стадии. Вначале в течение короткого времени  $t_1$  при температуре  $T_1$ , лежащей в пределах 900-1000°C осуществляют загонку примеси, представляющую собой диффузию из бесконечного источника с постоянной поверхностной концентрацией  $C_{01}$ .

Тонкий диффузионный слой, сформированный на первой стадии диффузии, является источником с ограниченным содержанием примеси для второй стадии – разгонки.

Разгонку проводят при более высокой температуре  $T_2$  порядка 1150 °C и времени  $t_2$ .

Зависимость предельной растворимости основной легирующей примеси в кремнии от температуры приведена на рис 1.3.

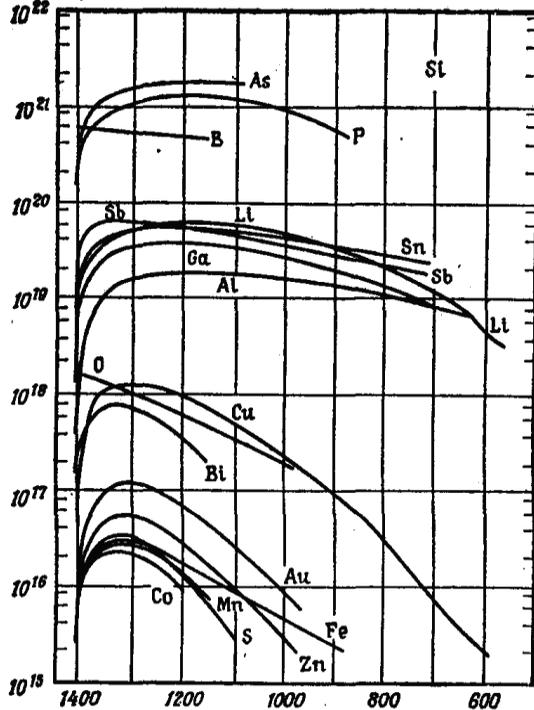


Рис 1.3. Зависимость предельной растворимости основной легирующей примеси в кремнии от температуры

### 1.4. Расчет коэффициента диффузии

Экспериментально установлено, что температурная зависимость коэффициента диффузии описывается уравнением:

$$D = D_0 \exp(-E/kT) , \quad (1.11)$$

где  $D_0$ , см<sup>2</sup>/с, - постоянная диффузии;  
 $E$ , эВ, - энергия активации;  $T$ , К, - температура;  
 $k = 8,63 \cdot 10^{-5}$ , эВ/К - постоянная Больцмана.

При температурах диффузии величину  $D_0$  рассматривают как не зависящую от температуры. Физический смысл энергии активации  $E$  в основном связан с энергией, необходимой для образования точечных дефектов в кристалле. Значения постоянных диффузии и энергии ионизации для примесей в кремнии приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

p - Si			n - Si		
Элемент	$D_0$ , см <sup>2</sup> /с	$E$ , эВ	Элемент	$D_0$ , см <sup>2</sup> /с	$E$ , эВ
B	10,5	3,69	P	3,85	3,66
Al	8	3,48	As	0,32	3,56
Ga	3,6	3,52	Sb	5,60	3,95
In	16,5	3,91	Bi	1033	4,65
Te	16,5	3,91	Li	0,0023	0,66

### 1.5. Расчет поверхностного сопротивления

Уровень легирования диффузионных слоев оценивают, измеряя их поверхностное сопротивление  $R_s$ . По данным измерений  $R_s$  определяют поверхностную концентрацию примеси в легированном слое, рассчитывают профиль распределения примеси (см. пп. 1.1-1.4) и контролируют его соответствие заданным требованиям. Поверхностное сопротивление определяется как сопротивление диффузионного резистора, толщина которого равна глубине залегания p-n перехода  $x_j$ , а длина и ширина равны друг другу и образуют квадрат со стороной  $l$ . Поэтому величину поверхностного сопротивления выражают в омах на квадрат ( Ом / □ ).

Величину поверхностного сопротивления можно рассчитать по формуле:

$$R_s = \frac{\rho}{x_j} = \frac{1}{\sigma \cdot x_j} , \quad \text{Ом / □ .}$$

Средняя проводимость равна:

$$\sigma = \frac{q}{x_j} \int_0^{x_j} \mu(N) N(x) dx, \quad (1.12)$$

где  $\mu(N)$  - исходная зависимость подвижности носителей заряда от концентрации,  $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл - заряд электрона,  $N(x)$  – зависимость концентрации примеси от координаты. Подвижность электронов и дырок в кремнии при 300 К в зависимости от концентрации примесей рассчитывают по формуле:

$$\mu = \mu_{\min} + \frac{\mu_{\max} - \mu_{\min}}{1 + \left(\frac{N(x)}{N_0}\right)^\alpha}, \quad \mu_n = 0.145 \left(\frac{300}{T}\right)^{2.6}, \quad \mu_p = 0.05 \left(\frac{300}{T}\right)^{2.3},$$

где  $\mu_{\min}$ ,  $\mu_{\max}$  - постоянные величины, зависящие от типа легирующей примеси.

Кривая концентрационной зависимости  $N(x)$  может быть получена с использованием следующих значений параметров (табл.1.2) исходя из закона распределения примеси для данного вида диффузии.

Таблица 1.2

Параметр	Мышьяк	Фосфор	Бор
$M_{\max}$ , см <sup>2</sup> /В*с	1417	1414	470.5
$M_{\min}$ , см <sup>2</sup> /В*с	52.5	68.5	44.9
$\alpha$	0.719	0.719	0.719
$N_0, \text{м}^{-3}$	$9.2 \cdot 10^{22}$	$9.2 \cdot 10^{22}$	$2.23 \cdot 10^{23}$

## 2. Расчет структур, полученных ионной имплантацией

Метод ионной имплантации является основным в планарной технологии. При изготовлении биполярных транзисторов ионную имплантацию применяют для получения эмиттера, базы, коллектора, сильнолегированных приконтактных областей и т.д. Основными преимуществами этого метода по сравнению с диффузией являются возможность прецизионного контроля количества внедренной примеси и высокая однородность концентрации по поверхности пластины.

### 2.1. Основные параметры ионной имплантации

Средний нормальный пробег иона  $R_p$  и его среднеквадратичное отклонение  $\Delta R_p$  представляют собой проекцию траектории пробега ионов на направление первоначальной скорости и разброс этого параметра. Величина  $R_p$  описывается нормальным законом распределения случайных чисел. Доза облучения - это количество частиц, бомбардирующих единицу поверхности за данное время. Если известны плотность ионного тока  $j$  и время  $t$ , то доза облучения  $N$ , рассчитывается по формуле:

$$N = jt/qn \quad , \quad (2.1)$$

где  $n=1,2,3$  - кратность ионизации.

## 2.2. Распределение примеси при ионной имплантации

Если пренебречь каналированием, например, используя неориентированное внедрение, то распределение примеси, как и для случая диффузии из ограниченного источника, описывается кривой Гаусса:

$$C(x) = \frac{N}{\sqrt{2\pi} \Delta R_p} \exp \left[ -\frac{1}{2} \cdot \frac{(x - R_p)^2}{(\Delta R_p)^2} \right] . \quad (2.2)$$

Максимум концентрации примеси в отличие от случая введения ее методом диффузии залегает не на поверхности, а на глубине  $x = R_p$ :

$$C_{\max} = 0,4N/\Delta R_p \quad . \quad (2.3)$$

В качестве примера на рис. 2.1 приведены распределения для бора, внедренного в кремний с дозой  $10^{12}$  см<sup>-2</sup> с различной энергией ионов.

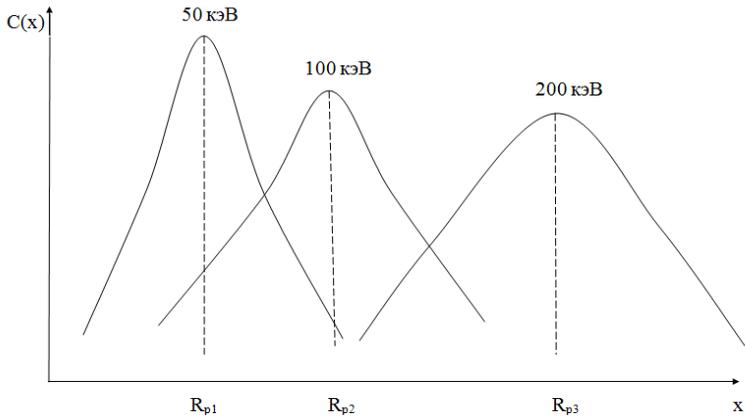


Рис. 2.1. Распределение примеси при ионной имплантации бора

### 3. Расчет распределения концентрации примеси при имплантации через слой оксида

#### 3.1. Термическое окисление кремния в парах воды

Для получения защитных диэлектрических пленок на кремнии используют термическое окисление в парах воды высокой чистоты (порядка 10—20 МОм·см). Высокотемпературную реакцию кремния с водяным паром используют в том случае, когда количество пара не ограничивает скорость реакции. Для поддержания необходимого парциального давления водяных паров у поверхности кремниевых пластин воду подогревают.

Структурное формирование пленки оксида происходит за счет диффузионного переноса воды через слой оксида к поверхности кремния. На структурное формирование пленки оксида оказывает влияние водород, образующийся в процессе реакции окисления и диффундирующий в глубь пластины. Так как коэффициент диффузии водорода ( $2 \cdot 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/с при 1050 °С) значительно больше, чем коэффициент диффузии воды ( $9 \cdot 10^{-10}$  см<sup>2</sup>/с при 1050 °С), то образование гидроксильных групп у границы раздела кремний — оксид объясняется наличием не только молекул воды, но и водорода.

При температурах процесса окисления выше 1100 °С образование слоя оксида идет согласно параболическому закону и описывается выражением  $x^2 = Bt$ . При температурах процесса ниже

1100°C рост пленки оксида по линейному закону имеет место в том случае, когда скорость окисления ограничена скоростью химической реакции на границе кремний — оксид. На участке линейного роста скорость реакции зависит от количества свободных связей атомов кремния, которые могут реагировать с молекулами воды на границе раздела кремний— оксид. Большое влияние на скорость роста оксидной пленки оказывают ориентация подложки, тип электропроводности и концентрация примеси исходной подложки.

Высокая концентрация примеси в подложке влияет либо на скорость реакции окисления на границе раздела кремний — оксид, либо на коэффициенты диффузии окислителей. Так, наличие в исходной подложке фосфора в первую очередь оказывает влияние на скорость реакции окисления. Поверхность кристалла с высокой концентрацией фосфора окисляется значительно быстрее, чем слабелегированная поверхность. Это справедливо для низкотемпературного диапазона (600—1100 °C).

При термическом окислении растущий оксид оттесняет фосфор в глубь кристалла кремния и, таким образом, в оксидном слое концентрация фосфора весьма мала. Для бора картина обратная: растущий оксид включает в себя большое количество бора, что приводит к ускорению диффузии окисляющих веществ. Поэтому кремний с высокой концентрацией бора окисляется быстрее как в высокотемпературной, так и в низкотемпературной области.

На рис. 3.1 приведены графики зависимости изменения толщины оксида в атмосфере влажного кислорода от времени проведения процесса окисления для различных температур.

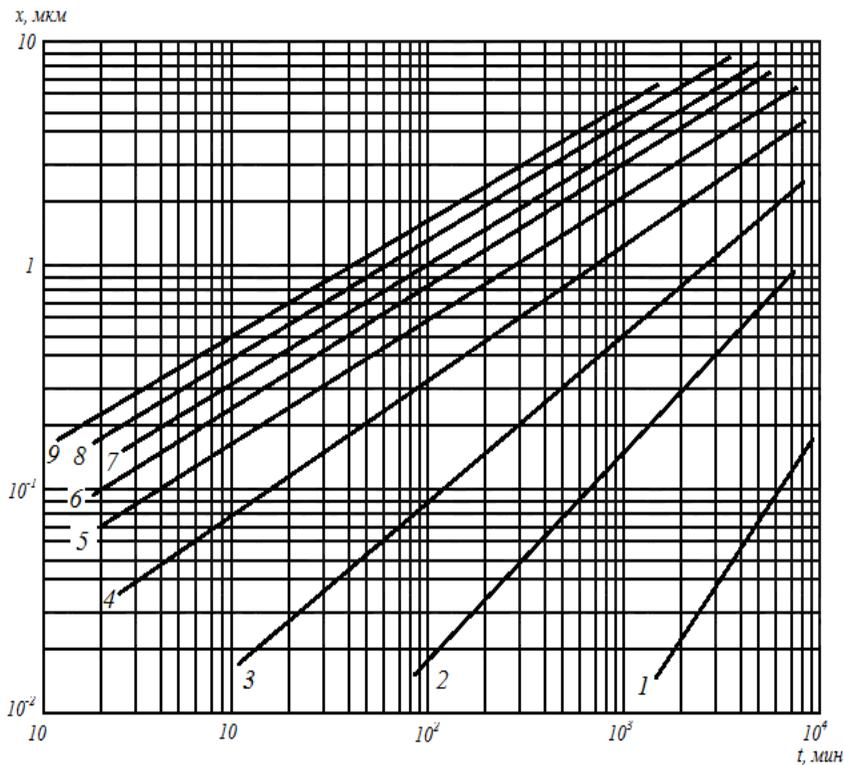


Рис. 3.1. Зависимость толщины пленки  $\text{SiO}_2$ , выращенной в атмосфере водяного пара, от времени для температур, °C:

1 — 600; 2 — 700; 3 — 800; 4 — 900; 5 — 1000; 6 — 1100; 7 — 1200; 8 — 1300; 9 — 1400

### 3.2. Термическое окисление кремния в сухом кислороде

Отличием метода окисления в сухом кислороде от окисления в парах воды является то, что в первом случае веществом,

диффундирующим сквозь растущую пленку оксида, является не вода, а ионы кислорода. Необходимо отметить, что коэффициент диффузии кислорода в пленке оксида ( $2,8 \cdot 10^{-14}$  см<sup>2</sup>/с при 1050 °С) значительно меньше, чем у водорода и воды при тех же условиях. Поэтому скорость роста оксидной пленки в сухом кислороде меньше, чем в парах воды.

Так как в процессе образования оксидных пленок отсутствуют водород и пары воды, то в структуре выращенного оксида нет гидроксильных групп (ОН). Высокая энергия активации процесса окисления кремния в сухом кислороде и отсутствие гидроксильных групп приводят к образованию прочных связей кислорода с кремнием в структуре получаемого оксидного слоя кремния.

Как и при окислении в парах воды, кинетика окисления в области низких температур определяется в большей мере скоростью реакции на границе раздела кремний — оксид, чем диффузией кислорода. Отклонение закона роста пленки оксида в сторону линейности обычно имеет место при температурах ниже 1000 °С.

На рис. 3.2 приведены графики зависимости изменения толщины оксида в атмосфере сухого кислорода от времени проведения процесса окисления для различных температур.

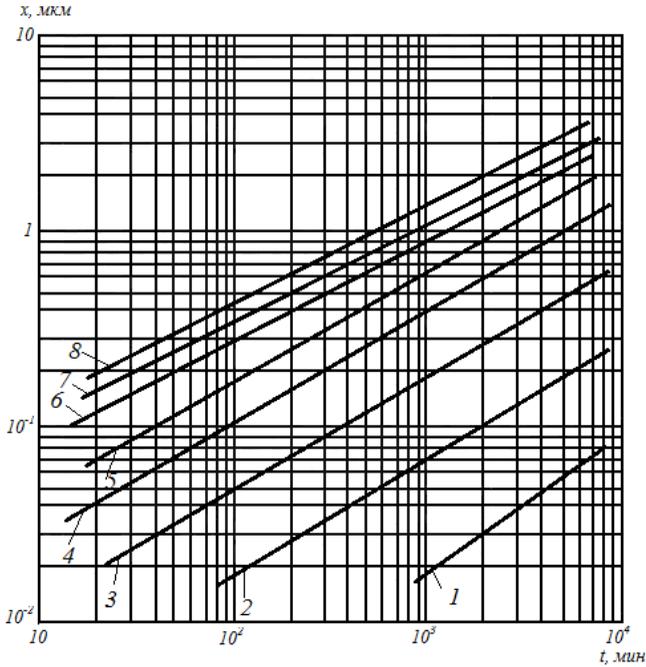


Рис. 3.2. Зависимость толщины пленки  $\text{SiO}_2$  выращенной в атмосфере сухого кислорода, от времени для температур,  $^{\circ}\text{C}$ :

1 — 700 ; 2 — 800; 3 — 900; 4—1000; 5—1100; 6 — 1200; 7 — 1300; 8 — 1400

### Задачи

1. Чем определяется поверхностная концентрация примеси после проведения диффузии из бесконечного источника при заданной температуре:

- 1) фоновая концентрация примеси в подложке;
- 2) доза легирования;
- 3) предельная растворимость;
- 4) время диффузии?

2. От какого параметра зависит коэффициент диффузии:

- 1) температура;
- 2) концентрация легирующей примеси;

3) давление в реакционной системе;

4) все указанные выше параметры?

3. Рассчитать профиль распределения концентрации примеси в n-p-n-структуре, полученной последовательной диффузией бора и фосфора в кремний с электропроводностью n-типа и удельным сопротивлением  $0,1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , проводимой в режимах:  $1200^\circ\text{C}$ , 1 ч,  $1100^\circ\text{C}$ , 2 ч.

4. Рассчитать профиль распределения концентрации примеси в n-p-n-структуре, полученной последовательной диффузией бора и фосфора в кремний с электропроводностью p-типа и удельным сопротивлением  $0,7 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , проводимой в режимах:  $1250^\circ\text{C}$ , 1,5 ч,  $1050^\circ\text{C}$ , 3 ч.

5. Определить глубину залегания p-n-перехода в случае двухстадийной диффузии фосфора в кремний с электропроводностью p-типа с удельным сопротивлением  $10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , проводимой в режиме:  $1050^\circ\text{C}$ , 10 мин,  $1150^\circ\text{C}$ , 2 ч.

6. Рассчитать распределение примеси при двухстадийной диффузии бора в кремний, проводимой в режиме:  $1050^\circ\text{C}$ , 10 мин,  $1150^\circ\text{C}$ , 2 ч.

7. Определить глубину залегания p-n-перехода в случае двухстадийной диффузии бора в кремний с электропроводностью n-типа с удельным сопротивлением  $1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , проводимой в режиме:  $1000^\circ\text{C}$ , 13 мин,  $1120^\circ\text{C}$ , 3 ч.

8. Построить распределение примеси и рассчитать глубину залегания p-n-перехода в случае диффузии бора из источника с ограниченным содержанием примеси в кремний n-типа с удельным сопротивлением  $1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , если диффузия проводилась в режимах:  $1000^\circ\text{C}$ , 1 ч,  $N = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ .

9. Рассчитать поверхностное сопротивление диффузионного слоя для данных, приведенных в задании № 8. Сравнить аналитическую глубину залегания p-n-перехода со значением, полученным из графика профиля распределения.

10. Построить распределение примеси и рассчитать глубину залегания p-n-перехода в случае диффузии фосфора из источника с ограниченным содержанием примеси в кремний p-типа с удельным сопротивлением  $4 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , если диффузия проводилась в режимах:  $1070^\circ\text{C}$ , 1 ч,  $N = 2,7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ .

11. Рассчитать поверхностное сопротивление диффузионного слоя для данных, приведенных в задании № 10. Сравнить аналитическую глубину залегания p-n-перехода со значением, полученным из графика профиля распределения.

12. В кремниевую пластину вводится фосфор из газового источника при  $975\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 30 мин. Определить глубину перехода

а) для подложки р-типа с удельным сопротивлением  $0,3\text{ Ом}\cdot\text{см}$ ;

б) для подложки р-типа с удельным сопротивлением  $20\text{ Ом}\cdot\text{см}$ .

Принять, коэффициент диффузии фосфора  $10^{-13}\text{ см}^2/\text{с}$ .

13. От каких технологических параметров **в основном** зависит глубина залегания р-п-перехода в диффузионных структурах?

1) температура;

2) фоновая концентрация примеси в подложке;

3) энергия иона;

4) коэффициент диффузии, время диффузии.

14. Рассчитать профиль распределения примеси в транзисторной п-р-п- структуре, полученной методом двойной ионной имплантации для следующих режимов технологического процесса: подложка Si п-типа  $\rho=1\text{ Ом}\cdot\text{см}$ ; имплантация бора с дозой  $N=2\cdot 10^{11}\text{ см}^{-2}$  и энергией  $E=30\text{ кэВ}$ ; имплантация фосфора дозой  $N=2\cdot 10^{12}\text{ см}^{-2}$  и энергией  $E=50\text{ кэВ}$ .

15. Определить глубину залегания р-п-переходов, толщину базы, поверхностное сопротивление эмиттера и базы в транзисторной п-р-п-структуре, полученной методом двойной ионной имплантации (использовать данные задания № 14).

16. Определить температуру разгонки мышьяка, предварительно внедренного с помощью ионной имплантации в кремний р-типа с удельным сопротивлением  $1\text{ Ом}\cdot\text{см}$ , если распределение концентрации обладает следующими параметрами:  $x_j = 0,5\text{ мкм}$ ,  $C_o = 1,5\cdot 10^{20}\text{ см}^{-3}$ ,  $t = 1\text{ ч}$ .

17. Определить температуру разгонки мышьяка, предварительно внедренного с помощью ионной имплантации в кремний р-типа с удельным сопротивлением  $3\text{ Ом}\cdot\text{см}$ , если распределение концентрации обладает следующими параметрами:  $x_j = 0,7\text{ мкм}$ ,  $C_o = 2,5\cdot 10^{19}\text{ см}^{-3}$ ,  $t = 2\text{ ч}$ .

18. Построить распределение примеси алюминия, внедренной в кремний п-типа с помощью ионной имплантации, для следующих режимов технологического процесса:  $N=1\cdot 10^{12}\text{ см}^{-2}$ ,  $E=20\text{ кэВ}$ ,  $\rho=10\text{ Ом}\cdot\text{см}$ .

19. Используя данные приведенные в задании № 18, провести разгонку ионно-имплантированного слоя при температуре  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 1 ч. Определить глубину залегания р-п-перехода.

20. Определить поверхностное сопротивление кремния после разгонки примеси из ионно-имплантированного слоя, используя исходные данные, приведенные в заданиях 18, 19.

21. При какой температуре производят отжиг кремниевых структур после проведения операции ионной имплантации фосфора?

- 1) 100 °С;
- 2) 10000 °С;
- 3) 600 °С;
- 4) 1100 °С?

22. Определить время окисления кремния при использовании трехступенчатого способа термического окисления (сухой, влажный, сухой кислород) при температуре 1200 °С, если необходимо вырастить пленку толщиной 1 мкм.

23. В каких случаях применяют окисление в сухом кислороде:

- 1) Для создания маскирующего покрытия.
- 2) Для выращивания подзатворного диэлектрика.
- 3) Для защиты поверхности кристалла от внешних факторов
- 4) Для сокращения времени проведения процесса окисления?

24. Кремниевая пластина легируется дозой ионов фосфора, равной  $3 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ , имеющих энергию 50 кэВ ( $R_p=63 \text{ нм}$ ,  $\Delta R_p=27 \text{ нм}$ ), с целью формирования контактов транзистора.

а) Если пластина затем окисляется, следует ли учитывать эффекты, связанные с зависимостью скорости окисления от концентрации легирующей примеси?

б) Перед окислением проводится диффузия фосфора в течение 60 мин при 1000 °С. Будет ли в этом случае играть роль зависимость скорости окисления от концентрации легирующей примеси?

в) Рассмотреть вновь пункты а и б, если легирование фосфором осуществляется при энергии ионов 150 кэВ ( $R_p=180 \text{ нм}$ ,  $\Delta R_p=64 \text{ нм}$ ).

25. После того как в пластину кремния n-типа вблизи ее поверхности введен бор с высокой концентрацией, часть пластины покрывается слоем поликристаллического кремния с высокой концентрацией кристаллических дефектов. Затем пластина окисляется и оказывается, что в участках, которые не были перед окислением покрыты поликремнием, глубина перехода намного больше. Объяснить этот результат.