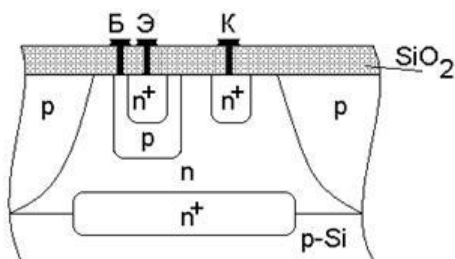


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

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 микроэлектроника».

Табл. 1. Ил. 6.

Диффузия, ионная имплантация, окисление

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

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

Процессы микро- и нанотехнологий
Составители: З у б к о в Михаил Владимирович
М а к с и м о в Олег Алексеевич

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

Подписано в печать . Формат бумаги 60х84 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 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 – 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 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):

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

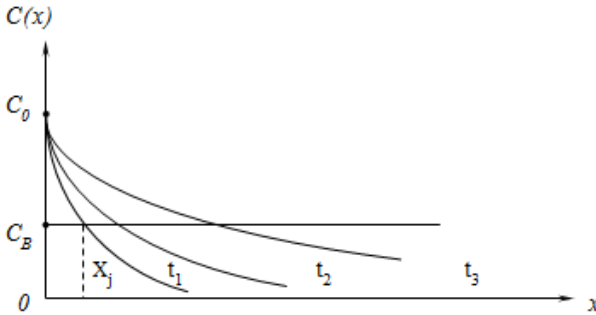


Рис. 1.1. Зависимость концентрации примеси от координаты при диффузии из бесконечного источника

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 (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 SiO_2 , которая представляет собой отражающую границу. Используя начальные и граничные условия:

$$1) \quad C(x, 0) = 0 ,$$

$$2) \quad C(x, \infty) = 0 ,$$

$$3) \quad N = \int_0^{\infty} C(x) dx , \quad \text{получают}$$

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

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.

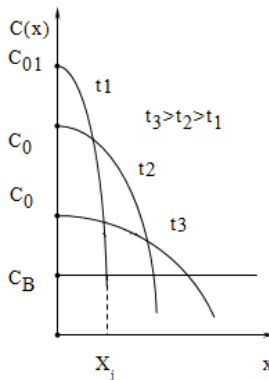


Рис. 1.2. Распределение примеси и определение глубины залегания р-п перехода при диффузии из источника с ограниченным содержанием примеси

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.

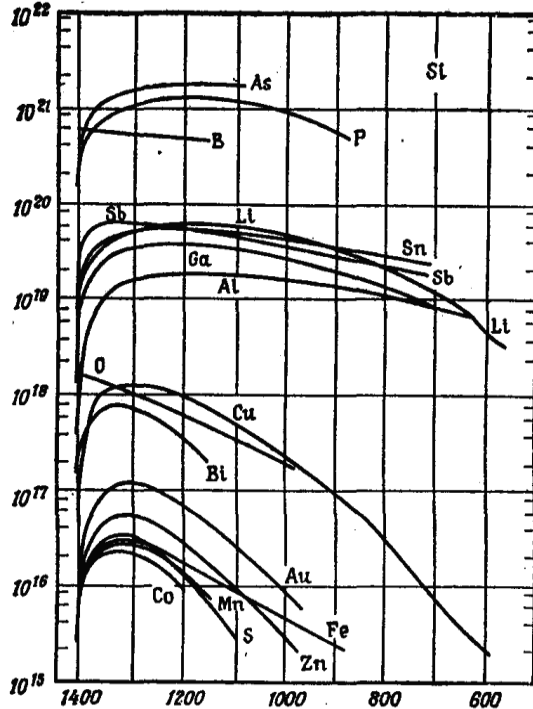


Рис 1.3. Зависимость предельной растворимости основной легирующей примеси в кремнии от температуры

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 , см²/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 ² /с	E , эВ	Элемент	D_0 , см ² /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 р-п 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:

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

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 ² /В*с	1417	1414	470.5
$M_{\min}$, см ² /В*с	52.5	68.5	44.9
α	0.719	0.719	0.719
N_0 , 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 ΔR_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^{-2} с различной энергией ионов.

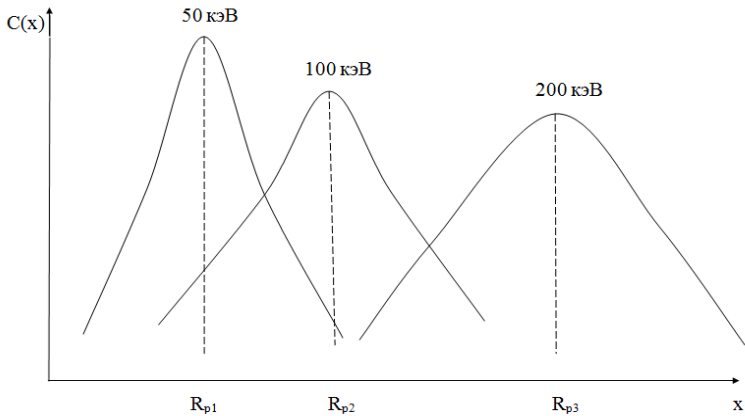


Рис. 2.1. Распределение примеси при ионной имплантации бора

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 ($2 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$ при 1050°C) значительно больше, чем коэффициент диффузии воды ($9 \cdot 10^{-10} \text{ см}^2/\text{с}$ при 1050°C), то образование гидроксильных групп у границы раздела кремний — оксид объясняется наличием не только молекул воды, но и водорода.

При температурах процесса окисления выше 1100°C 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 слаболегированная 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.

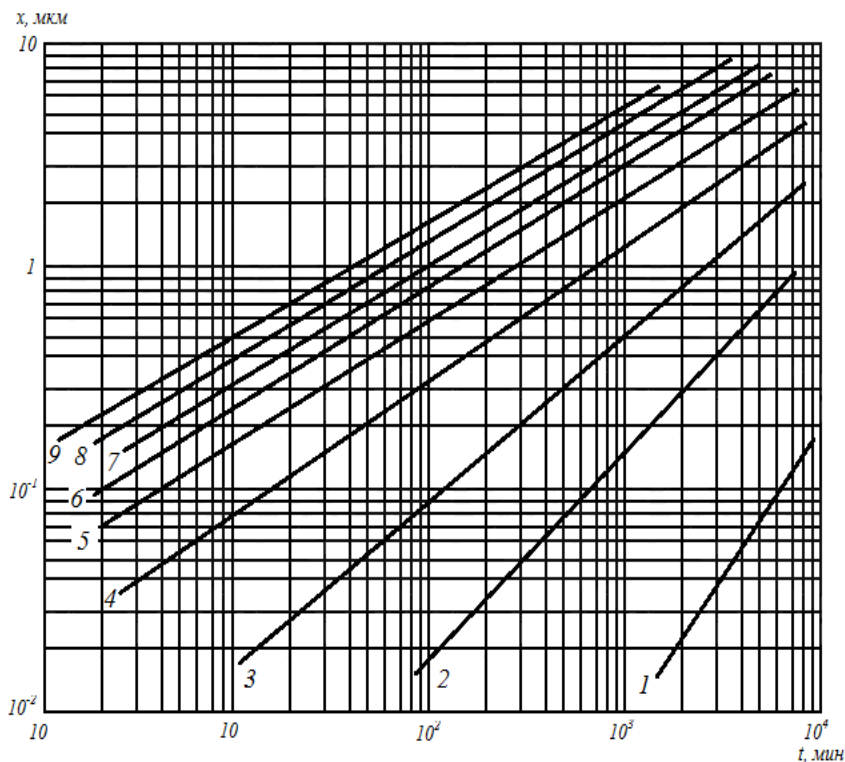


Рис. 3.1. Зависимость толщины пленки SiO_2 , выращенной в атмосфере водяного пара, от времени для температур, $^{\circ}\text{C}$:

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 ($2,8 \cdot 10^{-14}$ см²/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.

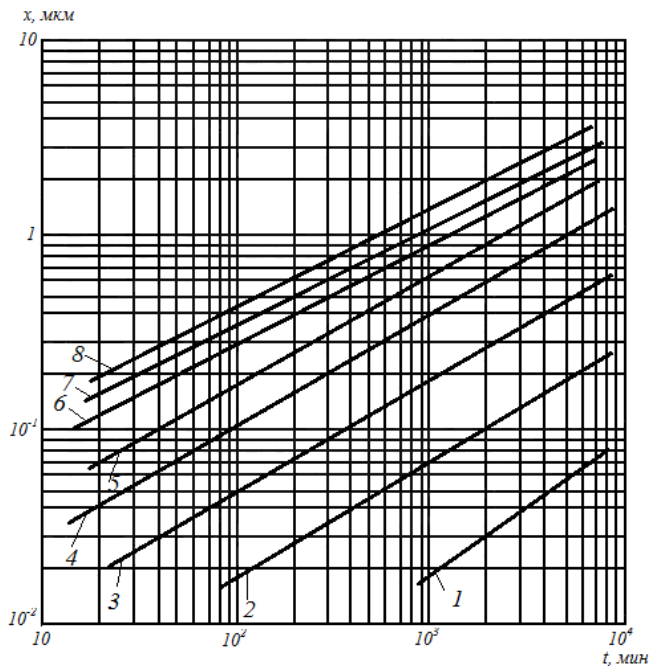


Рис. 3.2. Зависимость толщины пленки SiO_2 выращенной в атмосфере сухого кислорода, от времени для температур, $^{\circ}\text{C}$:

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 п-р-п-структуре, полученной последовательной диффузией бора и фосфора в кремний с электропроводностью п-типа и удельным сопротивлением $0,1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, проводимой в режимах: 1200°C , 1 ч, 1100°C , 2 ч.

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

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

6. Рассчитать распределение примеси при двухстадийной диффузии бора в кремний, проводимой в режиме: 1050°C , 10 мин, 1150°C , 2 ч.

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

8. Построить распределение примеси и рассчитать глубину залегания р-п-перехода в случае диффузии бора из источника с ограниченным содержанием примеси в кремний п-типа с удельным сопротивлением $1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, если диффузия проводилась в режимах: 1000°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 р-п-перехода со значением, полученным из графика профиля распределения.

10. Построить распределение примеси и рассчитать глубину залегания р-п-перехода в случае диффузии фосфора из источника с ограниченным содержанием примеси в кремний р-типа с удельным сопротивлением $4 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, если диффузия проводилась в режимах: 1070°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 р-п-перехода со значением, полученным из графика профиля распределения.

12. В кремниевую пластину вводится фосфор из газового источника при 975°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°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 п-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.