

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**Диффузионное перераспределение
ионно-имплантированных примесей**

Практикум к спецкурсу “Моделирование в
микроэлектронике” по специальности 014100
"Микроэлектроника и полупроводниковые приборы"

Воронеж
2003

Утвержден научно-методическим советом физического факультета от 19 января 2003 г.

Составители: Быкадорова Г.В.
Гольдфарб В.А.
Кожевников В.А.
Науч. ред. Ассесоров В.В.

Практикум подготовлен на кафедре физики полупроводников и микроэлектроники Воронежского государственного университета.

Рекомендуется для студентов 4 и 5 курсов физического факультета специальности 014100 "Микроэлектроника и полупроводниковые приборы", а также студентов 6 курса, обучающихся в магистратуре по направлению "Физика" (программа "Физика полупроводников. Микроэлектроника").

СОДЕРЖАНИЕ

1. Диффузия примеси из ионно-имплантированного слоя с начальным гауссовским распределением.	4
2. Диффузия примеси из ионно-имплантированного слоя с начальным распределением Пирсон-4	10
3. Построение концентрационных профилей после диффузионной разгонки ионно-имплантированной примеси с помощью комбинированного распределения	20
Литература	25

1. Диффузия примеси из ионно-имплантированного слоя с начальным гауссовским распределением

Для полуограниченного кристалла особое значение во время диффузионного перераспределения имеют условия на границе, которые определяют вид решения второго уравнения Фика.

В большинстве встречающихся на практике случаев условия на поверхности полупроводниковой подложки могут быть сведены к двум предельным вариантам: отражающей границе или связывающей границе.

При диффузии в полуограниченной полупроводниковой подложке с отражающей границей поток J примеси через нее отсутствует в течение всего процесса диффузии. Согласно первому уравнению Фика,

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x},$$

откуда

$$\left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=0} = 0,$$

где C - концентрация примеси на глубине x ; D - коэффициент диффузии при данной температуре; t - время диффузии.

Распределение примеси в этом случае может быть представлено в виде

$$C(x,t) = \frac{1}{2\sqrt{pDt}} \int_0^{\infty} C(x,0) \left[e^{-\frac{(x-x')^2}{4Dt}} + e^{-\frac{(x+x')^2}{4Dt}} \right] dx', \quad (1)$$

где $C(x,0)$ - начальное распределение примеси.

Если же граница является связывающей, концентрация примеси на ней в течение всего процесса диффузии равна нулю, т. е. $C(0,t)=0$, и тогда распределение примеси имеет вид

$$C(x,t) = \frac{1}{2\sqrt{pDt}} \int_0^{\infty} C(x,0) \left[e^{-\frac{(x-x')^2}{4Dt}} - e^{-\frac{(x+x')^2}{4Dt}} \right] dx'. \quad (2)$$

При малых временах диффузии из ионно-имплантированного слоя, когда диффузионная длина \sqrt{Dt} сравнима со среднеквадратичным отклонением ΔR_p , форма исходного профиля оказывает влияние на конечное распределение, и расчет примесного профиля после диффузии проводится по приведенным выше формулам с использованием методов численного интегрирования.

Если начальное распределение может быть описано неусеченной гауссианой, распределение примеси после диффузионной разгонки описывается выражением

$$N(x,t) = \frac{Q}{\sqrt{2p\Delta R_p} \sqrt{1 + \frac{2Dt}{\Delta R_p^2}}} \left\{ e^{-\frac{(x-R_p)^2}{2\Delta R_p^2 + 4Dt}} \left[1 + \operatorname{erf} \frac{\frac{R_p\sqrt{4Dt}}{\sqrt{2\Delta R_p}} + \frac{x\sqrt{2\Delta R_p}}{\sqrt{4Dt}}}{\sqrt{2\Delta R_p^2 + 4Dt}} \right] \pm e^{\pm \frac{(x+R_p)^2}{2\Delta R_p^2 + 4Dt}} \left[1 + \operatorname{erf} \frac{\frac{R_p\sqrt{4Dt}}{\sqrt{2\Delta R_p}} - \frac{x\sqrt{2\Delta R_p}}{\sqrt{4Dt}}}{\sqrt{2\Delta R_p^2 + 4Dt}} \right] \right\}, \quad (3)$$

где знак "+" соответствует условию отражающей границы, а знак "-" - условию связывающей границы.

Если имплантация проводится в подложку с противоположным типом проводимости по отношению к типу легирующей примеси, то возможно возникновение одного или двух р-п переходов. В данной модели аналитическое выражение для глубин залегания р-п переходов отсутствует, поэтому величины x_{j1} и/или x_{j2} определяются как точки, где соответственно $N_i \approx 0$ и $N_{i+1} \approx 0$ и/или $N_i \approx 0$ и $N_{i+1} \approx 0$. Тогда $x_{j1,2} = (x_i + x_{i+1})/2$.

Задания

1. Рассчитать концентрационный профиль и глубину залегания р-п перехода при ионной имплантации кремниевой подложки марки КДБ20 сурьмы с энергией 50 кэВ и дозой 10 мкКл/см с последующей диффузионной разгонкой при температуре 1000 °С в течение 30 минут. Границу считать отражающей.

Построить полученный концентрационный профиль в полулогарифмических координатах.

Решение

Концентрация исходной примеси $N_{исх}$ в подложке марки КДБ20 оценивается по удельному сопротивлению $r=20 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ и подвижности дырок $m_p=500 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$:

$$N_{исх} = \frac{1}{em_p r} = \frac{1}{1.6 \cdot 10^{-14} \cdot 500 \cdot 20} = 6.25 \cdot 10^{-14} \text{ см}^{-3}.$$

По энергии имплантации $E=50 \text{ кэВ}$ находим параметры пробега ионов сурьмы в кремнии:

$$R_p = 330 \text{ \AA} = 3.3 \cdot 10^{-6} \text{ см};$$

$$\Delta R_p = 98 \text{ \AA} = 9.8 \cdot 10^{-7} \text{ см}.$$

При дозе $10 \text{ мкКл/см}^2 = 6.25 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ максимальная концентрация сурьмы в ионно-имплантированном слое равна

$$N_{\max} = \frac{Q}{\sqrt{2p} \Delta R_p} = \frac{6.25 \cdot 10^{13}}{\sqrt{2 \cdot 3.14 \cdot 9.8 \cdot 10^{-7}}} \approx 2.5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}.$$

В этом случае можно воспользоваться собственным коэффициентом диффузии сурьмы в кремнии и рассчитывать ее значение при заданной температуре по закону Аррениуса с частотным фактором и энергией активации:

$$D_0 = 12.9 \text{ см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с}); \quad \Delta E = 3.98 \text{ эВ}.$$

Вычисление *erf*-функции может быть проведено разложением подынтегральной функции ошибок Гаусса в ряд Тейлора. Концентрационный профиль рассчитывается на максимальную глубину $x_{\max} = R_p + 3\Delta R_p + 6\sqrt{Dt}$, чтобы охватить область возможного залегания p-n перехода.

Для расчета концентрационного профиля и глубин залегания p-n переходов на языке Паскаль составлена программа PR1.

```

program PR1;
const pi=3.1416; k=8.62e-5;
var x, n: array[0..20] of double;
    doza, Rp,dRp, tem, time, d: double;
    ni, nm, xmax, h, xj1, xj2: double;
    i: integer; o: char;
    f: text;
function erf(z:double):double;
var s,sx: double; i: integer;
begin
    sx:=z; s:=z; j:=1;
    repeat
    sx:=-sx*z/(2*j+1)*z / j*(2*j-1); s:=s+sx; j:=j+1;
    until abs(sx)<1e-10;
    erf:=s*2/sqrt(pi); end;
function dsb (tem: doouble):double;
begin
    dsb:=12.9*exp(-3.98/(k*tem))
end;
function fn(z:doouble):double;
var z1;z2;z3;z4;z5:double;
begin
    z1:=sqrt(4*dsb(tem)*(time));
    z2:=Rp/dRp*z1/sqrt(2);
    z3:=z*sqrt(2)/z1*dRp;

```

```

z4:=sqrt(2*dRp*dRp+z1*z1);
z5:=1+erf((z2-z3)/z4);
z5:=exp(-(z+Rp)/z4*(z+Rp)/z4*z5);
z5:=exp(-(z-Rp)/z4*(z-Rp)/z4)*(1+erf((z2+z3)/z4));
fn:=nm*z5;
end;

```

Begin

```

writeln ( ' ');
write ( ' Исходная концентрация в подложке (см-3)? '); readln (ni);
write ( ' Доза имплантации (мкКл/см2)? '); readln (doza);
doza:=doza*6.25e+12;
write ( ' Нормальный пробег (см)? '); readln (Rp);
write ( ' Среднекв. Отклонение (см)? '); readln (dRp);
write ( ' Температура дифф. разгонки (гр. цельсия)? '); readln (tem);
tem:=tem+273;
write ( ' Время диффузии (мин.)? '); readln (time);
time:=time*60;
d:=dsb(tem); d:=d*time;
n:=xmax/20; nm:=doza/sqrt(pi*(2*dRp*dRp+4*d));
for i:=0 to 20 do begin
  x[i]:=i*h; n[i]:=fn(x[i]-ni);
end;
if nm>ni then begin
  xj1:=-1; xj2:=0.0;
  for i:=1 to 20 do begin
    if ((n[i-1]<=0.0) and (n[i]>=0.0)) then xj1:=(x[i-1]+x[i])/2;
    if ((n[i-1]>=0.0) and (n[i]<=0.0)) then xj2:=(x[i-1]+x[i])/2;
  end; end;
writeln ( ' ');
writeln ( ' Таблица распределения примеси ');
writeln ( ' '); writeln ( 'x, мкмN, см-3log|N| '); writeln ( ' ');
for i:=0 to 20 do
writeln (x[i]*1.0e4:18:3, ' n[i]:9, ln(abs(n[i]))/2.3:15:2);
writeln ( ' ');
write ( ' ');
if xj1<0.0 then
writeln ( 'Один p-n переход на глубине', xj2*1e4:5:2, 'мкм');
else begin write ( 'Два p-n перехода на глубинах');
writeln(xj1*1e4:5:2, 'мкм и', xj2*1e4:5:2, 'мкм') end;
writeln ( ' ')

```

End.

ТАБЛИЦА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИМЕСИ

x, МКМ	N, см ⁻³	log N
0.00	1.8E+019	19.28
0.01	1.8E+019	19.28
0.02	1.9E+019	19.29
0.03	1.8E+019	19.29
0.04	1.7E+019	19.26
0.05	1.6E+019	19.21
0.06	1.3E+019	19.13
0.06	9.7E+018	19.01
0.07	6.7E+018	18.85
0.08	4.3E+018	18.65
0.09	2.5E+018	18.41
0.10	1.3E+018	18.14
0.11	6.3E+017	17.82
0.12	2.8E+017	17.46
0.13	1.1E+017	17.06
0.14	4.0E+016	16.62
0.15	1.3E+016	16.13
0.16	3.5E+015	15.56
0.17	-3.4E+014	14.55
0.18	-5.6E+014	14.76

один p-n переход на глубине 0.17 мкм.

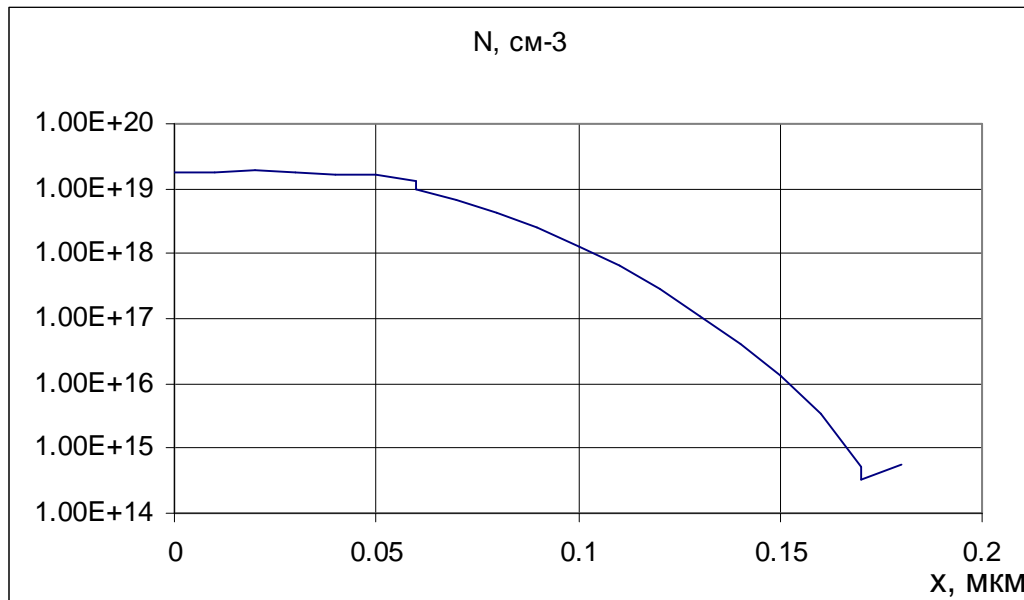


Рис.1. Распределение ионно-имплантированной сурьмы ($E=50$ кэВ, $Q=10$ мкКл/ см^2) после диффузионной разгонки при температуре 1000 °С в течение 30 минут в подложке марки КДБ20

2. Проводится внедрение ионов сурьмы в кремниевую подложку р-типа с удельным сопротивлением $20 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Режим имплантации: энергия 50 кэВ , доза $10 \text{ мкКл}/\text{см}^2$. Далее проводится диффузионная разгонка имплантированной сурьмы при температуре $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 30 мин .

Считая границу связывающей, рассчитать концентрационный профиль и глубины залегания р-п переходов, а также определить количество сурьмы, покинувшей подложку за время диффузии. Сравнить полученные данные по концентрационному профилю и глубинам залегания р-п переходов с результатами задания 1.

3. В кремниевой пластине марки КДБ7.5 создан примесный слой имплантацией фосфора с энергией 180 кэВ и дозой $25 \text{ мкКл}/\text{см}^2$.

В приближении отражающей границы:

а) рассчитать и построить результирующий концентрационный профиль после активационного отжига при температуре $950 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 30 минут ;

б) исследовать температурную зависимость глубины залегания р-п переходов в диапазоне $800\div 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ при времени диффузионного отжига 45 минут ;

в) исследовать зависимость глубины залегания р-п перехода от времени диффузионного отжига в диапазоне от 0.5 до 3 часов при температуре $1000 \text{ }^\circ\text{C}$.

4. В пластине кремния р-типа с удельной электропроводностью $0.1 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ имплантацией сурьмы с энергией 80 кэВ и последующим диффузионным отжигом при температуре $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 45 мин создается примесный слой. В приближении отражающей границы определить, при какой дозе имплантации будет сформирован р-п переход на глубине 1.5 мкм .

5. Активная область полупроводниковой диодной р-п структуры создается в кремниевой пластине марки КЭФ10 внедрением бора с энергией 60 кэВ , дозой $200 \text{ мкКл}/\text{см}^2$ и последующим диффузионным отжигом при температуре $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 60 минут . Определить погрешность по глубине залегания р-п перехода при технологических нормах допусков по удельному сопротивлению исходной пластины кремния $\pm 20\%$. При диффузионном отжиге границу считать отражающей.

Вопросы

1. Какая граница называется отражающей? Приведите пример отражающей границы.
2. Какая граница называется связывающей? Приведите пример связывающей границы.
3. При каких условиях время диффузионной разгонки исходного ионно-имплантированного слоя считается малым (большим)?
4. Дайте определение коэффициента диффузии с микроскопической и макроскопической точки зрения.

5. Запишите второе уравнение Фика для полубесконечной подложки с соответствующими граничными и начальными условиями при диффузии из ионно-имплантированного слоя, начальное распределение которого аппроксимируется неусеченной гауссианой. Границу считать отражающей (связывающей).
6. Записать решение для задачи, поставленной в вопросе 5, при легировании изотипной подложки и подложки с противоположным типом проводимости.
7. При каких условиях в процессе имплантации примесью противоположного типа по отношению к исходной примеси в подложке не формируются p-n переходы?
8. Возможно ли образование двух p-n переходов при диффузионной разгонке ионно-имплантированного слоя, если граница является отражающей? При каких условиях образуется один p-n переход?

2. Диффузия примеси из ионно-имплантированного слоя с начальным распределением Пирсон-4

Большинство ионно-имплантированных профилей асимметрично и для их описания используется распределение Пирсон-4 без учета или с учетом эффекта каналирования.

В этом случае при малых временах термических отжигов, когда диффузионная длина примесей сравнима с параметрами распределений ионно-имплантированных примесей, концентрационный профиль находится в виде:

$$N(x, t) = \frac{1}{2\sqrt{pDt}} \left\{ \int_0^{R_0} N(x) \left[e^{-\frac{(x-x)^2}{4Dt}} \pm e^{-\frac{(x+x)^2}{4Dt}} \right] dx + N(R_0) \int_{R_0}^{\infty} e^{-\frac{x-R_0}{l}} \left[e^{-\frac{(x-x)^2}{4Dt}} \pm e^{-\frac{(x+x)^2}{4Dt}} \right] dx \right\}.$$

Приведенная формула соответствует случаю, когда учитывается эффект каналирования. Если расчеты проводятся без учета эффекта каналирования, то $R_0 \rightarrow \infty$, и используется только первое выражение, где $N(x)$ – распределение Пирсон-4.

Распределение Пирсон-4 учитывает четыре параметра: нормальный пробег R_p , страгглинг DR_p , параметр асимметрии g и затухание b .

Распределение Пирсон-4 есть решение дифференциального уравнения

$$\frac{dh(x)}{dx} = \frac{(x' - a)h(x)}{b_2x'^2 + b_1x' + b_0}, \quad (4)$$

где $h(x)$ - функция распределения, удовлетворяющая условию нормировки

$$\int_{-\infty}^{\infty} h(x) dx = 1;$$

a, b_0, b_1, b_2 - константы; $x' = x - R_p$.

Константы a, b_0, b_1, b_2 могут быть выражены через интегральные параметры распределения:

$$a = -g m_2^{1/2} (b + 3) / A;$$

$$b_0 = -m_2 (4b - 3g^2) / A;$$

$$b_1 = a;$$

$$b_2 = -(2b - 3g - 6) / A,$$

где $A = 10b - 12g^2 - 18$.

Нормированное затухание аппроксимируется квадратичным многочленом

$$b = 3,28g^2 + 0,39g + 3,08.$$

Проинтегрируем дифференциальное уравнение (4):

$$\begin{aligned} \int \frac{dh(x)}{h(x)} &= \int \frac{x' dx'}{b_2 x'^2 + b_1 x' + b_0} - \int \frac{a dx'}{b_2 x'^2 + b_1 x' + b_0} + C = \int \frac{\left(x' + \frac{b_1}{2b_2} - \frac{b_1}{2b_2}\right) dx'}{b_2 x'^2 + b_1 x' + b_0} - \\ &- \int \frac{a dx'}{b_2 x'^2 + b_1 x' + b_0} + C = \int \frac{\frac{2b_2}{2b_2} \left(x' + \frac{b_1}{2b_2}\right) dx'}{b_2 x'^2 + b_1 x' + b_0} - \int \frac{\left(\frac{b_1}{2b_2} + a\right) dx'}{b_2 x'^2 + b_1 x' + b_0} + C = \\ &= \frac{1}{2b_2} \ln |b_2 x'^2 + b_1 x' + b_0| - \left(\frac{b_1}{2b_2} + a\right) \frac{1}{b_2} \int \frac{dx'}{x'^2 + \frac{b_1}{b_2} x' + \frac{b_0}{b_2}} + C = \\ &= \frac{1}{2b_2} \ln |b_2 x'^2 + b_1 x' + b_0| - \left(\frac{b_1}{2b_2} + a\right) \frac{1}{b_2} \cdot \frac{2}{\sqrt{\left|\frac{4b_0}{b_2} - \frac{b_1^2}{b_2^2}\right|}} \operatorname{arctg} \frac{2x' + \frac{b_1}{b_2}}{\sqrt{\left|\frac{4b_0}{b_2} - \frac{b_1^2}{b_2^2}\right|}} + C. \end{aligned}$$

Тогда

$$\ln h(x) = \frac{1}{2b_2} \ln |b_2 x'^2 + b_1 x' + b_0| - \frac{\frac{b_1}{b_2} + 2a}{\sqrt{\left|4b_0 b_2 - b_1^2\right|}} \operatorname{arctg} \frac{2b_2 x' + b_1}{\sqrt{\left|4b_0 b_2 - b_1^2\right|}} + C,$$

откуда

$$h(x) = |b_2 x'^2 + b_1 x' + b_0|^{\frac{1}{2b_2}} \exp \left[- \frac{\frac{b_1}{b_2} + 2a}{\sqrt{\left|4b_0 b_2 - b_1^2\right|}} \operatorname{arctg} \frac{2b_2 x' + b_1}{\sqrt{\left|4b_0 b_2 - b_1^2\right|}} \right].$$

По определению, функция распределения $h(x)$ есть

$$h(x) = \frac{N(x)}{N_0},$$

где N_0 определяется из условия нормировки на дозу

$$Q = \int_0^{\infty} N(x) dx = N_0 \int_0^{\infty} h(x) dx.$$

Тогда распределение концентрации будет иметь вид

$$N(x) = N_0 \left| b_2 x'^2 + b_1 x' + b_0 \right|^{\frac{1}{2b_2}} \exp \left[- \frac{\frac{b_1}{b_2} + 2a}{\sqrt{|4b_0 b_2 - b_1^2|}} \operatorname{arctg} \frac{2b_2 x' + b_1}{\sqrt{|4b_0 b_2 - b_1^2|}} \right]. \quad (5)$$

Концентрационный профиль в области отрицательного градиента имеет экспоненциальный характер. Этот участок получил название экспоненциального "хвоста", а его наличие указывает на присутствие эффекта каналирования (рис.2).

В этом случае распределение ионно-имплантированной примеси аппроксимируется в следующем виде

$$N'(x) = \begin{cases} N(x), & 0 \leq x \leq R_0; \\ N(R_0) \cdot e^{-\frac{x-R_0}{I}}, & x > R_0, \end{cases} \quad (6)$$

где $N(x)$ - любое из известных распределений; R_0 - координата точки сопряжения заданного распределения с экспоненциальным "хвостом", причем $R_0 > R_m$ (R_m - координата точки максимума концентрации); I - характеристическая длина экспоненциального "хвоста".

Анализ экспериментальных данных и численные расчеты показывают, что в первом приближении величина I не зависит от дозы и энергии имплантации. Значение координаты R_0 зависит от дозы и энергии ионов и может быть найдено из соотношения

$$F^* = \frac{N(R_m)}{N(R_0)}, \quad (7)$$

которое существенно зависит только от дозы для заданной комбинации ион-мишень. Значения I и параметра F^* для ионов бора и фосфора при их внедрении в монокристаллический кремний приведены в табл. 1.

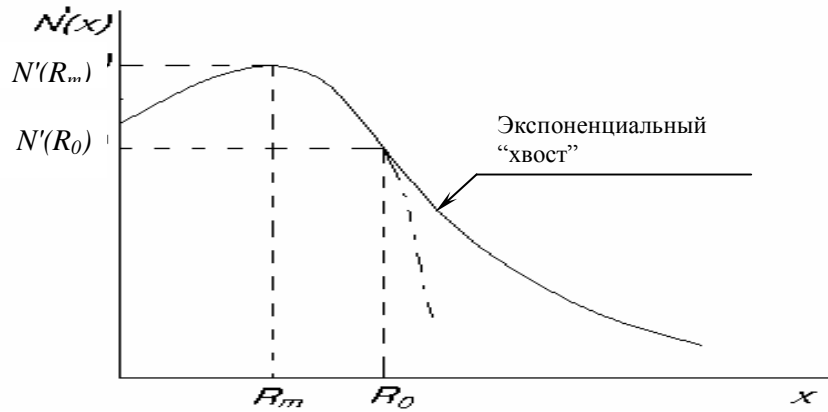


Рис. 2. Распределение ионно-имплантированной примеси в разориентированной кристаллической мишени с учетом эффекта каналирования

Анализ аппроксимирующего распределения (б) показывает, что доза имплантации Q' , определяемая несобственным интегралом

$$Q' = \int_0^{\infty} N'(x) dx,$$

будет больше исходной дозы имплантации Q .

Для устранения этого недостатка можно провести нормировку распределения (б) на дозу имплантации. В этом случае, определив нормирующий коэффициент $S=Q/Q'$, необходимо умножить все значения концентрации $N(x)$ на S , т.е.

$$N''(x) = SN'(x).$$

Таблица 1

Значения параметров I и F^* для кремниевых подложек

Доза, см ⁻²	Тип примеси	
	бор $I=0.045$ мкм	фосфор $I=0.067$ мкм
$< 10^{13}$	2.0	5
10^{13}	2.3	17
$5 \cdot 10^{13}$	2.6	40
10^{14}	6.0	44
$5 \cdot 10^{14}$	10.2	51
10^{15}	12.5	55
$5 \cdot 10^{15}$	13.0	62
10^{16}	14.3	71
$5 \cdot 10^{16}$	21.0	150

Если имплантация проводится в кремниевую подложку с противоположным типом проводимости по отношению к типу легирующей примеси, то возможно возникновение одного или двух р-п переходов. В данной модели аналитическое выражение для глубин залегания р-п переходов отсутствует, поэтому величины x_{j1} и/или x_{j2} определяются как точки, где соответственно $N_i \leq 0$ и $N_{i+1} \geq 0$ и/или $N_i \geq 0$ и $N_{i+1} \leq 0$. Тогда

$$x_{j1,2} = (x_j + x_{j+1})/2.$$

Задания

1. Рассчитать концентрационный профиль и глубины залегания р-п переходов после диффузионной разгонки при температуре 1000 °С в течение 1 часа примеси бора, имплантированной с энергией 100 кэВ и дозой 20 мкКл/см² в кремниевую подложку марки КЭФ7.5.

Концентрационный профиль рассчитывается в приближении четырех параметров с учетом эффекта каналирования. Границу считать отражающей. Построить полученный концентрационный профиль в полулогарифмических координатах.

Решение

Концентрация примеси в исходной подложке марки КЭФ7.5 оценивается по удельному сопротивлению $r=7.5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ и подвижности электронов $m_i=1400 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$:

$$N_{\text{исх}} = \frac{1}{em_p r} = \frac{1}{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 7.5 \cdot 1400} \approx 6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}.$$

По энергии имплантации 100 кэВ находим параметры распределения ионно-имплантированного бора в кремнии:

$$\begin{aligned} R_p &= 2964 \text{ \AA} = 2.964 \cdot 10^{-5} \text{ см}; \\ \Delta R_p &= 733 \text{ \AA} = 7.33 \cdot 10^{-6} \text{ см}; \\ \gamma &= -1.26. \end{aligned}$$

По дозе имплантации $20 \text{ мкКл}/\text{см}^2 = 20 \cdot 6.25 \cdot 10^{12} = 1.25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ находим параметры экспоненциального “хвоста” при внедрении ионов бора в разориентированную кристаллическую кремниевую мишень:

$$\begin{aligned} I &= 0.045 \text{ мкм} = 4.5 \cdot 10^{-6} \text{ см}; \\ F^* &= 10.2. \end{aligned}$$

Для определения координаты точки сопряжения R_0 может быть использован следующий алгоритм. Первоначально рассчитывается исходный концентрационный профиль $N_i(x_i)$ в приближении четырех параметров без учета эффекта каналирования. Максимальная глубина x_{max} принимается равной

$$x_{max} = R_p + 4(R_p + I) + 3\sqrt{Dt}.$$

При 20 интервалах расчета шаг по глубине принимается равным $h=x_{max}/20$, тогда $x_i=i \cdot h$, где $i=0,1,2,\dots,20$.

На полученном профиле определяется максимальное значение концентрации $N(R_m)$ и соответствующий модальный пробег R_m , с учетом которых из трансцендентного уравнения

$$N(R_0) = \frac{N(R_m)}{F^*}$$

методом простых итераций находится концентрация $N(R_0)$ и точка R_0 .

Поскольку концентрация ионно-имплантированного бора не превышает величины N_m :

$$N_m = \frac{Q}{\sqrt{2p} \Delta R_p} = \frac{20 \cdot 6.25 \cdot 10^{12}}{\sqrt{2 \cdot 3.14 \cdot 7.33 \cdot 10^{-6}}} \approx 6.8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3},$$

а температура диффузионной разгонки равна выше 900 °C, что можно воспользоваться собственным коэффициентом диффузии бора в кремнии и рассчитать его по формуле Аррениуса с частотным фактором и энергией активации:

$$D_0 = 2.5 \text{ см}^2 / (B \times c);$$

$$\Delta E = 3.51 \text{ эВ}.$$

При нахождении концентрационного профиля после диффузионной разгонки несобственный интеграл может быть вычислен методом Гаусса с увеличивающейся верхней границей.

Для решения данной задачи составлена программа PR2, которая написана на Паскале и приводится ниже.

Program PR2;

```

const pi=3.1416; k=8.62e-5;
var x, n: array[0..20] of real;
    ni, rp, drp, g, beta, doza, b0, b1, b2, a1 : real;
    l, f, nm, n1, n2, v, t1, t2, xj1, xj2, xmax: real;
    temp, time, rm, r0, nrm, nr0, h, dt : real;
    y, y1, int1, int2 : real;
    i: integer; o: char; t: text;
function db (z: real):real;

```

```

begin db:=2.5*exp(-3.51/(k*z)) end;
function ph (z:real) : real;
var z1;z2;z3:real;
begin
z :=(z-rp)/drp; z1:=sqrt(abs(4.0*b0*b2-b1*b1));
z2:=0,5/b2*ln(abs(b2*z*z+b1*z+b0));
z3:=b1*(1.0/b2+2.0)/z1*arctan((2.0*b2*z+b1)/z1);
ph:=exp(z2-z3) end;
function fn1(s:real):real;
vars1, s2, s3: real;
begin
s3 :=s; s1 :=(s-x[i])/4/dt*(s-x[i]);
s2 :=(s+x[i])/4/dt*(s+x[i]);
fn1:=ph(s3)*(exp(-s1)+exp(-s2)) end;
function fn2(s:real):real;
vars1, s2: real;
begin
s1 :=(s-x[i])/4/dt*(s-x[i]); s2 :=(s+x[i])/4/dt*(s+x[i]);
fn2:=n2*exp(-(s-r0)/1)*(exp(-s1)+ exp(-s2)) end;
function gauss8(function fi1(z:real) : real; a, b : real;) : real;
{интегрирование методом Гаусса}
var xi, ai : array[1..8] of real; b11, b22, gs, x2 : real;
j : integer;
begin
ai[1] := 0.10122854; ai[2] := 0.22238103;
ai[3] := 0.31370664; ai[4] := 0.36268378;
xi[5] := 0.18343364; xi[6] := 0.52553241;
xi[7] := 0.79666648; xi[8] := 0.96028985;
for j:=5 to 8 do begin
xi[9-i] := -xi[j]; ai[j] :=ai[9-j] end;
b11:=(b+a)/2; b22:=(b-a)/2; gs:=0.0;
for j:=1 to 8 do begin
x2:=b11+b22*xi[j]; gs:=gs+ai[j]*fi1(x2) end;
gauss8 := gs*b22 end;
Begin
ni := 6.0e14; {концентрация исх. примеси в см-3}
rp := 2.964e-5; {нормальный пробег в см}
drp:=7.33e-6; {среднекв. отклонение в см}
g:= -1.26; {коэффициент асимметрии}
doza:= 1.25e14; {доза имплантации в см-2}
l:=4.5e-6; {характеристическая длина эксп. “хвоста” в см}
f:=10.2; {параметр F}
temp:=1000.0; {температура диффуз. разгонки}
temp:=temp+273.0;
time:=3600.0; {время диффуз. разгонки }
dt:=db(temp)*time;

```



```

beta:=3.28*g*g+0.39*g+3.08;
a1:=10.0*beta-12.0*g*g-18.0; b0:= -(4.0*beta-3.0*g*g)/a1;
b1:= -g*(beta+3.0)/a1; b2:= -(2.0*beta-3.0*g*g-6.0)/a1;
xmax:=rp+8*drp+1+3*sqrt(dt); h:=xmax/20.0;
v:=rp; n1:=gauss8(ph, 0.0, v);
repeat
  nm:=n1; n1:=gauss8(ph, 0.0, v);
until abs((nm-n1)/nm)<=0.001;
nm:=doza/nm;
for i:=0 to 20 do begin x[i]:=i*h; n[i]:=nm*ph(x[i]) end;
nrm:=n[0];
for i:=0 to 20 do if nrm<n[i] then begin
  nrm:=n[i]; rm:=x[i] end;
v:=nrm/f; t1:=rm; t2:=2*rm;
repeat
  r0:=(t2+t1)/2; nr0:=nm*ph(r0);
  if v>nr0 then t2:=r0 else t1:=r0
until abs((nr0-v)/(nr0+v))<0.001;
n1:=0.5/sqrt(pi*dt); n2:=ph(r0);
for i:=0 to 20 do begin y:=rp;
int1:= gauss8(fn1, 0.0, y);
repeat
  y1:=y; y:=y+1.0e-6;
if y1<=r0 then int2:=gauss8(fn1,y1, y); else int2:=gauss8(fn2,y1, y);
  int1:=int1+int2;
until abs(int2/int1)<=0.001;
n[i]:=n1*nm*int1-ni end;
if nrm>ni then begin xj1:= -1.0; xj2:=0.0;
  for i:=1 to 20 do begin
    if ((n[i-1]<=0.0) and (n[i]>=0.0)) then xj1:=(x[i-1]+x[i])/2.0;
    if ((n[i-1]>=0.0) and (n[i]<=0.0)) then xj2:=(x[i-1]+x[i])/2.0;
  end; end; writeln ( ' ');
writeln ( ' Таблица распределения примеси ');
writeln ( ' '); writeln ( 'x, мкмN, см-3 log|N| ');
writeln ( ' ');
for i:=0 to 20 do
writeln (x[i]*1.0e4:18:2, ' n[i]:9, ln(abs(n[i]))/2.3:15:2); writeln ( ' ');
if nrm>ni then if nrm>ni then
writeln ( 'Один p-n переход на глубине', xj2*1e4:5:2, 'мкм');
else begin write ( 'Два p-n перехода на глубинах');
writeln(xj1*1e4:5:2, 'мкм и', xj2*1e4:5:2, 'мкм') end;
writeln ( ' ');
End.

```

При решении поставленной задачи по данной программе были получены следующие результаты и построен график (рис.3).

ТАБЛИЦА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИМЕСИ

$x, \text{ мкм}$	$N, \text{ см}^{-3}$	$\log \hat{\sigma} N \hat{\sigma}$
0.00	1.21E+018	18.10
0.06	1.39E+018	18.16
0.13	1.85E+018	18.29
0.19	2.43E+018	18.41
0.25	2.89E+018	18.48
0.31	3.03E+018	18.50
0.38	2.76E+018	18.46
0.44	2.19E+018	18.36
0.50	1.50E+018	18.20
0.56	8.94E+017	17.97
0.63	4.62E+017	17.68
0.69	2.08E+017	17.34
0.75	8.18E+016	16.93
0.81	2.81E+016	16.47
0.88	8.37E+015	15.94
0.94	1.95E+015	15.31
1.00	7.60E+013	13.90
1.06	-4.29E+014	14.65
1.13	-5.58E+014	14.76
1.19	-5.90E+014	14.79
1.25	-5.97E+014	14.79

один p-n переход на глубине 1.03 мкм.

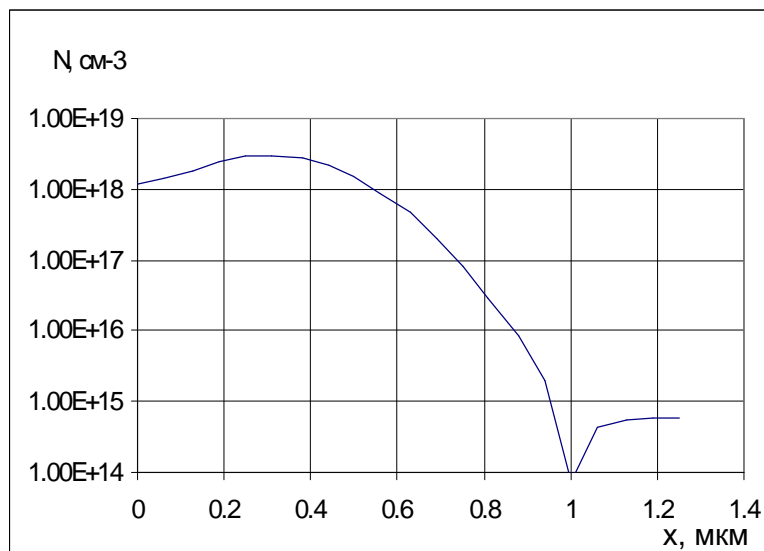


Рис.3. Распределение ионно-имплантированного бора ($E=100$ кэВ, $Q=20$ мкКл/ см^2) после диффузионной разгонки при температуре 1000 °С в течение 1 часа в подложке марки КДБ7.5

2. В условиях задания 1 рассчитать и построить концентрационный профиль и глубины залегания р-п переходов без учета эффекта каналирования. Сравнить полученные данные с результатами задания 1.
3. Проводится активационный отжиг ионно-имплантированного примесного слоя, полученного в кремнии р-типа с удельным сопротивлением $2 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ при внедрении ионов мышьяка при энергии 60 кэВ и дозе $10 \text{ мкКл}/\text{см}^2$.

Аппроксимируя концентрационный профиль распределением Пирсон-4, считая границу отражающей и не учитывая эффекта каналирования, найти:

- а) концентрационный профиль при температуре отжига $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 30 минут;
 - б) зависимость глубины залегания р-п перехода от температуры в диапазоне $800\text{-}1200 \text{ }^\circ\text{C}$ при времени отжига в 1 час;
 - в) зависимость глубины залегания р-п перехода от времени отжига в диапазоне $0,25\div 2$ часа при температуре $1000 \text{ }^\circ\text{C}$;
 - г) зависимость координаты точки максимума концентрации от температуры отжига в диапазоне $800\div 1250 \text{ }^\circ\text{C}$ при времени отжига 45 минут.
4. Разориентированная кремниевая подложка п-типа с удельной электропроводностью $0,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ имплантируется ионами бора с энергией 100 кэВ и дозой $20 \text{ мкКл}/\text{см}^2$ с последующей диффузионной разгонкой.

Аппроксимируя концентрационный профиль после ионной имплантации распределением Пирсон-4, с учетом эффекта каналирования и считая границу связывающей, найти:

- а) концентрационный профиль после диффузионной разгонки при температуре отжига $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 45 минут;
- б) зависимость глубины залегания р-п переходов от температуры в интервале от 800 до $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ при времени диффузионной разгонки 30 минут;
- в) зависимость глубин залегания р-п переходов от времени диффузионной разгонки в интервале от 20 минут до 2 часов при температуре $1050 \text{ }^\circ\text{C}$;
- г) температурную зависимость количества бора, покинувшего подложку в интервале от $800\div 1300 \text{ }^\circ\text{C}$ при времени диффузионной разгонки 45 минут;
- д) временную зависимость количества бора, покинувшего подложку, в интервале от 20 минут до 2 часов при температуре $1050 \text{ }^\circ\text{C}$;
- е) зависимость координаты точки максимума концентрации от времени диффузионной разгонки в диапазоне от 20 минут до 2,5 часов при температуре $1050 \text{ }^\circ\text{C}$;
- ж) зависимость координаты точки максимума концентрации от температуры в диапазоне $800\div 1300 \text{ }^\circ\text{C}$ при времени диффузионного отжига 30 минут;

- з) время диффузионной разгонки, в течение которого половина примеси бора покинет подложку при температуре 1050 °С;
- и) время, в течение которого максимальная концентрация бора уменьшится в 10 раз.

Вопросы

1. Запишите второе уравнение Фика для полубесконечной подложки с соответствующими граничными и начальными условиями при диффузии из ионно-имплантированного слоя, начальное распределение которого аппроксимируется функцией Пирсон-4. Границу считать отражающей (связывающей).
2. Записать решение для задачи, поставленной в вопросе 1, при легировании изотипной подложки и подложки с противоположным типом проводимости.
3. В чем физическая причина возникновения асимметрии ионно-имплантированных профилей?
4. Какие распределения, аппроксимирующие асимметричные ионно-имплантированные профили, Вы знаете?
5. Что такое коэффициент затухания?
6. При каких условиях в процессе имплантации примесью противоположного типа по отношению к исходной примеси в подложке не формируются р-п переходы?
7. Возможно ли образование двух р-п переходов при диффузионной разгонке ионно-имплантированного слоя, если граница является отражающей? При каких условиях образуется один р-п переход?

3. Построение концентрационных профилей после диффузионной разгонки ионно-имплантированной примеси с помощью комбинированного распределения

Диффузия из ионно-имплантированных слоев служит для активации и последующей разгонки примесей. При низких дозах имплантации $Q < 100 \text{ мкКл/см}^2$ диффузия примесей из ионно-имплантированного слоя идет как диффузия из ограниченного источника и в ряде случаев распределение концентрации $N(x)$ можно оценить с помощью комбинированного распределения

$$N(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{p} \sqrt{2\Delta R_p^2 + Dt}} \cdot e^{-\frac{(x-R_p)^2}{2(\Delta R_p^2 + Dt)}}, \quad (8)$$

где Q - доза имплантации; R_p и ΔR_p - нормальный пробег и страгглинг внедряемых ионов; D - коэффициент диффузии при заданной температуре; t - время диффузии.

Это распределение при больших временах разгонки (т.е. $(R_p, DR_p) \ll \sqrt{Dt}$), когда определяющим является не форма профиля, а доза легирования, переходит в распределение при диффузии из бесконечно тонкого слоя с отражающей границей

$$N(x,t) = \frac{Q}{2\sqrt{pDt}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4Dt}}.$$

При временах разгонки, когда $DR_p \ll \sqrt{Dt}$, комбинированное распределение переходит в неусеченную гауссиану

$$N(x,t) = \frac{Q}{\sqrt{2p\Delta R_p}} \cdot e^{-\frac{(x-R_p)^2}{2\Delta R_p^2}}.$$

Если подложка легирована исходной примесью противоположного типа с концентрацией N_{ucx} , то возможно возникновение одного или двух р-п переходов, глубины залегания которых находятся из условия $N(x_{j1,2}) - N_{ucx} = 0$:

$$\frac{Q}{\sqrt{p} \sqrt{2\Delta R_p^2 + Dt}} \cdot e^{-\frac{(x_{j1,2}-R_p)^2}{2(\Delta R_p^2 + 2Dt)}} - N_{ucx} = 0,$$

$$x_{j1,2} = R_p \pm \sqrt{2(\Delta R_p^2 + 2Dt) \ln \frac{Q}{\sqrt{p} \sqrt{2\Delta R_p^2 + Dt} N_{ucx}}}. \quad (9)$$

Задания

1. С помощью комбинированного распределения рассчитать концентрационный профиль и глубину залегания р-п перехода при ионной имплантации кремниевой подложки марки КДБ20 фосфором с энергией 50 кэВ и дозой 10 мкКл/см² с последующей диффузионной разгонкой при температуре 1000 °С в течение 30 минут. Границу считать отражающей.

Построить полученный концентрационный профиль в полулогарифмических координатах.

Решение

Решение данной задачи проведено в системе Mathcad 2000 Professional. По энергии имплантации для ионов фосфора определены нормальный пробег и среднеквадратичное отклонение, а коэффициент

диффузии фосфора рассчитывается по закону Аррениуса с частотным множителем $1.2 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}$ и энергией активации 2.5 эВ .

Исходная концентрация примеси в кремниевой подложке марки КДБ20 оценивается по удельному сопротивлению $20 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ при подвижности основных носителей дырок $500 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

$$N_i := \frac{1}{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot A \cdot \text{sec} \cdot 20 \cdot \text{ohm} \cdot \text{cm} \cdot 500 \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{sec}}} \quad Q := 6.25 \cdot 10^{13} \cdot \text{cm}^{-2}$$

$$D := 1.2 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{sec}} \cdot e^{\frac{-2.5}{8.62 \cdot 10^{-5} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 1273 \cdot \text{K}}} \quad t := 3600 \cdot \text{sec}$$

$$R_p := 2.964 \cdot 10^{-5} \cdot \text{cm} \quad \Delta R_p := 7.3 \cdot 10^{-6} \cdot \text{cm}$$

$$x := 0 \cdot \text{cm}, 5 \cdot 10^{-6} \cdot \text{cm}, 6 \cdot 10^{-4} \cdot \text{cm}$$

$$N(x) := 2.751 \cdot 10^{18} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot e^{\frac{-(x-R_p)^2}{2 \cdot (\Delta R_p^2 + D \cdot t)}}$$

$$x_{j1} := R_p + \sqrt{2 \cdot (\Delta R_p^2 + 2 \cdot D \cdot t) \cdot \ln \left(\frac{Q}{\sqrt{\pi} \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta R_p^2 + D \cdot t} \cdot N_i} \right)} \quad x_{j1} = 1.63 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$x_{j2} := R_p - \sqrt{2 \cdot (\Delta R_p^2 + 2 \cdot D \cdot t) \cdot \ln \left(\frac{Q}{\sqrt{\pi} \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta R_p^2 + D \cdot t} \cdot N_i} \right)} \quad x_{j2} = -1.037 \times 10^{-6} \text{ m}$$

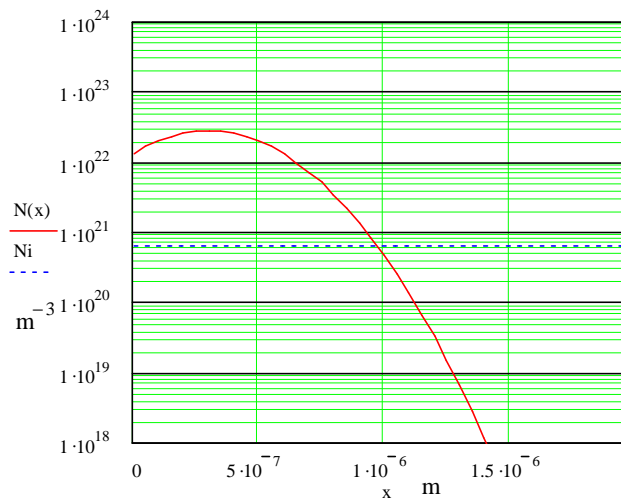


Рис.1. Распределение ионно-имплантированного фосфора ($E=50 \text{ кэВ}$, $Q=10 \text{ мкКл}/\text{см}^2$) после диффузионной разгонки при температуре $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 30 минут в подложке марки КДБ20

2. Германиевая подложка р-типа с удельным сопротивлением $1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ имплантируется сурьмой с энергией 80 кэВ и дозой $20 \text{ мкКл}/\text{см}^2$. Используя комбинированное распределение рассчитать:
- концентрационный профиль ионно-имплантированного мышьяка, суммарный профиль и построить их в полулогарифмических координатах $\lg N(x,t) - x$;
 - концентрационный профиль после диффузионной разгонки при температуре $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 2 часов;
 - температурную зависимость глубины залегания р-п перехода в интервале $800 \div 1250 \text{ }^\circ\text{C}$ при времени диффузионного отжига 1 час;
 - зависимость глубины залегания р-п перехода от времени в интервале от 10 минут до 3 часов при температуре $1050 \text{ }^\circ\text{C}$;
 - температурную зависимость поверхностной концентрации сурьмы в диапазоне $800 \div 1300 \text{ }^\circ\text{C}$ при времени диффузии 1 час;
 - временную зависимость поверхностной концентрации сурьмы в диапазоне от 10 минут до 3 часов при температуре диффузии $1000 \text{ }^\circ\text{C}$;
 - время диффузионного отжига, при котором концентрация сурьмы на поверхности будет максимальна при температуре $1050 \text{ }^\circ\text{C}$;
 - время диффузионного отжига, при котором максимальная концентрация сурьмы будет равна концентрации исходной примеси в подложке, если температура отжига равна $1050 \text{ }^\circ\text{C}$;
 - при каких временах образуются два р-п перехода, один р-п переход, отсутствует р-п переход, если температура отжига $1100 \text{ }^\circ\text{C}$.
3. Проводится имплантация кремниевой подложки ионами бора с энергией 120 кэВ . Определить, при каких временах диффузионного отжига можно воспользоваться для расчета концентрационного профиля неусеченной гауссианой, если температура отжига равна $900 \text{ }^\circ\text{C}$.
4. В кремниевой подложке р-типа с исходной концентрацией 10^{17} см^{-3} формируется “скрытый” слой имплантацией фосфора с энергией 180 кэВ и дозой $100 \text{ мкКл}/\text{см}^2$. Используя комбинированное распределение, определить:
- времена диффузионной разгонки, при которых образуется “скрытый” слой, если температура разгонки равна $1100 \text{ }^\circ\text{C}$;
 - при каком времени диффузионной разгонки концентрация примеси в “скрытом” слое максимальна, если температура разгонки равна $1000 \text{ }^\circ\text{C}$.

Вопросы

- Запишите второе уравнение Фика для полубесконечной подложки с соответствующими граничными и начальными условиями при диффузии из ионно-имплантированного слоя, начальное распределение которого аппроксимируется неусеченной гауссианой. Границу считать отражающей (связывающей).

2. При каких условиях в процессе имплантации примесью противоположного типа по отношению к типу исходной примеси в подложке не формируются р-п переходы?
3. Возможно ли образование двух р-п переходов при диффузионной разгонке ионно-имплантированного слоя, если граница является отражающей? При каких условиях образуется один р-п переход?

Литература

1. Ассессоров В.В. Математическое моделирование распределений ионно-имплантированных примесей / В.В. Ассессоров. - Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та, 2002. - 100 с.
2. Бубенников А.Н. Физико-технологическое проектирование биполярных элементов кремниевых БИС / А.Н. Бубенников, А.Д. Садовников. - М.: Радио и связь, 1991. - 288 с.
3. Быкадорова Г.В. Математическое моделирование технологических процессов в микроэлектронике. / Г.В.Быкадорова, Л.А. Битюцкая, В.А. Гольдфарб, под общ. ред. И.С. Суровцева. - Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та, 1997. Ч.1: Диффузия. - 116 с.
4. МОП-СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов / Под ред. П.Антонетти, Д.Антониадиса, Д. Даттона и др. – М.: Радио и связь, 1988. – 496 с.
5. Ревелева М.А. Моделирование процессов распределения примеси в полупроводниковых структурах / М.А. Ревелева. – М.: МГИЭТ(ТУ), 1996. – 196 с.
6. Таблицы параметров пространственного распределения ионно-имплантированных примесей / А.Ф. Буренков, Ф.Ф. Комаров, М.А. Кумахов и др. – Минск: Изд-во БГУ, 1980. – 352 с.

Составили: Быкадорова Галина Владимировна
Гольдфарб Владимир Абрамович
Кожевников Владимир Андреевич
Асессоров Валерий Викторович

Редактор: Тихомирова О.А.