

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Наклонная ионная имплантация

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

Воронеж
2003

Утвержден научно-методическим советом физического факультета
от 9 января 2003 г.

Составители: Бормонтов Е.Н.
Быкадорова Г.В.
Григорьев Р.Г.
Науч. ред. Петров Б.К.

Практикум подготовлен на кафедре физики полупроводников
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

Введение	4
1. Распределения ионно-имплантированных примесей при наклонной имплантации.....	5
2. Локальная наклонная имплантация.....	12
2.1. Распределение примесей при наклонной имплантации с учетом бокового рассеяния под край защитной маски.....	12
2.2. Распределение примесей при наклонной имплантации с учетом бокового рассеяния под края щели в защитной маске.....	23
Литература	29
Приложение. Аппроксимирующие полиномы для расчета параметров распределений основных примесей в кремнии.....	30

Введение

Постоянная минимизация элементов в современных сверхбольших интегральных схемах приводит к необходимости формирования мелкозалегающих легированных слоев с субмикронными размерами. В важных для практических применений случаях максимум концентрации ионно-имплантированной примеси должен находиться в пределах $5\div 10$ нм от поверхности подложки. Такое распределение имплантированной примеси может быть достигнуто лишь применением низкоэнергетических ионных пучков с энергией менее нескольких килоэлектронвольт. Однако большинство технологических установок не в состоянии обеспечить стабильные пучки столь низких энергий. В последнее время для формирования мелкозалегающих слоев используется ионная имплантация наклонными пучками, которая позволяет получить необходимое распределение имплантированной примеси в энергетическом диапазоне, доступном для современных ускорителей [2,5].

Применение наклонных пучков может достаточно сильно повлиять на боковое распределение примеси. Для современных сверхбольших интегральных схем с высокой плотностью приборов на кристалле необходимость рассмотрения подобного рода двумерных эффектов имеет принципиальное значение [4,5], поскольку измерение двумерного распределения концентрации имплантированной примеси в мелкозалегающих слоях является очень сложной практической задачей. Поэтому теоретические исследования и математическое моделирование приобретают в этом случае особую важность.

Так, при создании методом наклонной имплантации истоковых и стоковых областей современных МОП транзисторов теневой эффект приводит к различию распределения концентрации примеси в истоковых и стоковых областях [3,4]. Вследствие этого возникает асимметрия и рассогласование электрических характеристик субмикронных МОП транзисторов при работе в прямом и обратном включении. Степень асимметрии и рассогласования характеристик МОП транзисторов снижается при имплантации с поворотом подложек последовательно на 90° с 25%-ной дозой имплантации в каждом из четырех положений [3].

Столь актуальные в технологии современной микро- и нанoeлектроники вопросы математического моделирования наклонной имплантации практически не рассмотрены в существующей учебно-методической литературе, поэтому данные методические указания помогут студентам в освоении рассматриваемой темы.

1. Распределения ионно-имплантированных примесей при наклонной имплантации

При внедрении ускоренных ионов в полубесконечную подложку под углом q к нормали максимум распределения смещается к поверхности. При этом значение среднеквадратичного отклонения DR вносит вклад как продольное среднеквадратичное отклонение DR_p , так и среднеквадратичное поперечное отклонение DR_{\perp} [1]. В результате распределение примеси $N(x)$ по нормали к поверхности при наклонной имплантации имеет вид:

- в случае неусеченной гауссианы, когда $R_p \geq 3DR_p$,

$$N(x) = \frac{Q}{\sqrt{2p}\Delta R} \cdot e^{-\frac{(x-R_p \cos q)^2}{2\Delta R^2}}; \quad (1.1)$$

- в случае усеченной гауссианы, когда $R_p < 3DR_p$,

$$N(x) = \frac{Q}{\sqrt{\frac{p}{2}}\Delta R \left(1 + \operatorname{erf}\left(\frac{R_p \cos q}{\sqrt{2}\Delta R}\right)\right)} \cdot e^{-\frac{(x-R_p \cos q)^2}{2\Delta R^2}}, \quad (1.2)$$

где $\Delta R^2 = \Delta R_p^2 \cos^2 q + \frac{1}{2}\Delta R_{\perp}^2 \sin^2 q$;

Q - доза имплантации;

$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{p}} \int_0^z e^{-z^2} dz$ - интеграл функции ошибок Гаусса.

Если исходная подложка легирована примесью противоположного типа с исходной концентрацией N_{ucx} , то возможно формирование одного или двух p-n переходов (рис.1), глубины $x_{j1,2}$ залегания которых находятся из условия $N(x_{j1,2}) - N_{ucx} = 0$.

Для случая неусеченной гауссианы при наклонной имплантации глубины залегания p-n переходов рассчитываются по формуле

$$x_{j1,2} = R_p \cos q \pm \Delta R \sqrt{2 \ln \frac{Q}{\sqrt{2p}\Delta R N_{ucx}}}. \quad (1.3)$$

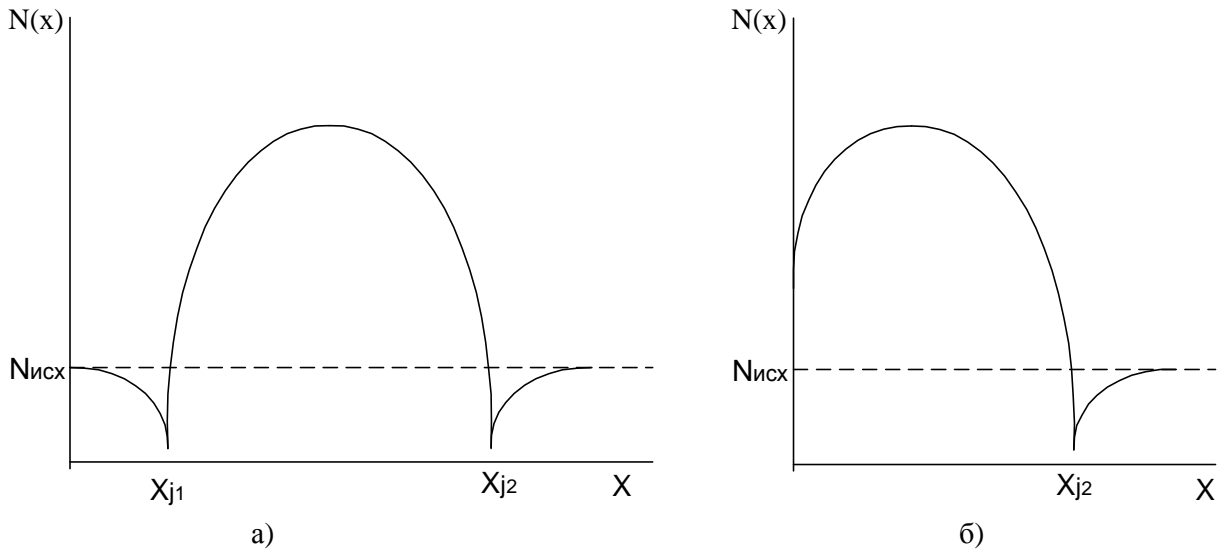


Рис. 1. Распределения ионно-имплантированной примеси по глубине x в случае образования одного р-п перехода (б) и двух р-п переходов (а)

Задания

1. Проводится наклонная имплантация ионов фосфора в подложку кремния марки КДБ2. Энергия ионов составляет 60 кэВ, доза имплантации – 10^{12} ион/см², а угол наклона пучка ионов относительно нормали равен 20°. Рассчитать концентрационный профиль распределения ионов фосфора и построить график полученного профиля в координатах $N(x)$ - x .

Решение

Концентрация исходной примеси $N_{исх}$ в данной кремниевой подложке оценивается по удельному сопротивлению $r = 2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ и подвижности дырок при данной температуре $m_p = 500 \text{ см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$:

$$N_{исх} = \frac{1}{r m_p q} = \frac{1}{2 \cdot 500 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}} = 6.25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}.$$

По энергии ионов с помощью аппроксимирующих полиномов, приведенных в приложении, рассчитываются параметры распределения ионов фосфора в кремнии, которые при энергии 60 кэВ составили следующие значения:

$$R_p = 7.31 \cdot 10^{-6} \text{ см}; \quad \Delta R_p = 3.0 \cdot 10^{-6} \text{ см}; \quad \Delta R_{\perp} = 2.25 \cdot 10^{-6} \text{ см}.$$

Расчет концентрационного профиля будет проводиться для усеченной гауссианы, поскольку $7.31 \cdot 10^{-6} \text{ см} \leq 3 \cdot 3.3 \cdot 10^{-6} \text{ см}$.

Максимальная глубина x_{max} , на которую рассчитывается концентрационный профиль, должна превышать глубину залегания второго р-п перехода x_{j2} : $x_{max} = x_{j2} + \Delta R$.

Задав число точек по координате x , в которых будут рассчитываться значения концентрации, например 20, получим шаг h : $h=x_{max}/20$.

Для решения данной задачи составлена программа на языке Паскаль.

```

program Nakl;
const pi=3.1415926; eq=1.6e-19;
var N,x:array [0..200] of double;
    q,e,Rp,dRp1,dRp2,dR,tetta,xj1,xj2:double;
    econs,Nmax,Nicx,ro,mu,xmax,h:double;
    j,j1:integer; o,tip:char;
function lg(z:double):double;
begin lg:=ln(z)/2.3; end;
function Rpp(E1:double):double;
var lgRp:double; i:integer;
    a:array[0..3] of double;
begin
    E1:=ln(lg(E1)); lgRp:=0.0;
    a[0]:=0.682; a[1]:=0.1861; a[2]:=0.3769; a[3]:=-0.0581;
    for i:=0 to 3 do lgRp:=lgRp+a[i]*exp(i*E1);
    Rpp:=exp(2.3*lgRp)*1e-7;
end;
function dRpp1(E1:double):double;
var lgRp:double; i:integer;
    a:array[0..3] of double;
begin
    E1:=ln(lg(E1)); lgRp:=0.0;
    a[0]:=0.401; a[1]:=0.2209; a[2]:=0.3478; a[3]:=-0.0711;
    for i:=0 to 3 do lgRp:=lgRp+a[i]*exp(i*E1);
    dRpp1:=exp(2.3*lgRp)*1e-7;
end;
function dRpp2(E1:double):double;
var lgRp:double; i:integer;
    a:array[0..3] of double;
begin
    E1:=ln(lg(E1)); lgRp:=0.0;
    a[0]:=0.205; a[1]:=0.537; a[2]:=0.051; a[3]:=0.015;
    for i:=0 to 3 do lgRp:=lgRp+a[i]*exp(i*E1);
    dRpp2:=exp(2.3*lgRp)*1e-7;
end;
function erf(z:double):double;
var s,sx:double; j2:integer;
begin
    sx:=z;s:=z;j2:=1;
    repeat
        sx:=-sx*z/(2*j2+1)*z/j2*(2*j2-1);

```

```

s:=s+sx; j2:=j2+1
until abs(sx)<1e-10;
erf:=s*2/sqrt(3.141592653589);
end;
begin
writeln(' '); write('Исходная подложка: тип (n) или (p)? '); readln (tip);
if tip='n' then mu:=1400 else mu:=500;
write(' ', удельное сопротивление в Ом*см? '); readln(ro);
Nicx:=1/(ro*eq*mu);
write(' ', энергия в кэВ ? '); readln(e);
Rp:=Rpp(e);
dRp1:=dRpp1(e); dRp2:=dRpp2(e);
write(' ', доза в ион/см2 '); readln(q);
write(' ', угол падения ионов в градусах? '); readln(tetta); tetta:=tetta*pi/180;
dR:=dRp1*dRp1*cos(tetta)*cos(tetta);
dR:=dR+dRp2*dRp2*sin(tetta)*sin(tetta)/2; dR:=sqrt(dR);
j1:=20;
if Rp>=3*dRp1 then begin
xj2:=Rp*cos(tetta)+dR*sqrt(2*ln(q/(sqrt(2*pi)*dR*Nicx)));
xmax:=xj2+dR;
h:=xmax/j1; Nmax:=q/(sqrt(2*pi)*dR);
for j:=0 to j1 do
begin
x[j]:=h*j;
econs:=x[j]-Rp*cos(tetta);
N[j]:=Nmax*exp(-econs*econs/(2*dR1*dR1))-Nicx;
writeln(x[j]*1e4:7:3, ' mkm ', ' ', N[j]:10, ' cm-3 ');
end;
end
else begin
Nmax:= q/(sqrt(pi/2)*dR);
Nmax:=Nmax/(1+erf(Rp*cos(tetta)/(sqrt(2)*dR)));
xj2:=Rp*cos(tetta)+dR*sqrt(2*ln(Nmax/Nicx));
xmax:=xj2+dR;
h:=xmax/j1;
for j:=0 to j1 do
begin
x[j]:=h*j;
econs:=x[j]-Rp*cos(tetta);
N[j]:=Nmax*exp(-econs*econs/(2*dR*dR))-Nicx;
writeln(x[j]*1e4:7:3, ' mkm ', ' ', N[j]:10, ' cm-3 ');
end;
end;
end;
readln(o)
end.

```


В результате вычислений по данной программе получены следующие результаты:

x, мкм	N, см ⁻³	x, мкм	N, см ⁻³
0	1.9E+15	0.096	8.8E+16
0.009	9.3E+15	0.105	6.4E+16
0.017	2.1E+16	0.114	4.2E+16
0.026	3.8E+16	0.122	2.4E+16
0.035	5.9E+16	0.131	1.1E+16
0.044	8.3E+16	0.14	3.1E+15
0.052	1E+17	0.149	-1.7E+15
0.061	1.2E+17	0.157	-4.2E+15
0.07	1.2E+17	0.166	-5.4E+15
0.079	1.2E+17	0.175	-5.9E+15
	0.087	1E+17	

Данная задача эффективно решается средствами MathCAD 2000. Ниже приведен листинг решения задачи на Mathcad 2000 и график распределения суммарной концентрации фосфора и исходной примеси в подложке (рис.2).

$$q_e := 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot \text{Kul} \quad \text{Kul} \equiv A \cdot \text{sec} \quad \theta := 20 \cdot \frac{\pi}{180} \quad Q := 10^{12} \text{cm}^{-2}$$

$$R_p := 7.31 \cdot 10^{-6} \text{cm} \quad \Delta R_p := 3.0 \cdot 10^{-6} \text{cm} \quad \Delta R_t := 2.55 \cdot 10^{-6} \text{cm}$$

$$\Delta R := \sqrt{\Delta R_p^2 \cdot \cos(\theta)^2 + \frac{1}{2} \Delta R_t^2 \cdot \sin(\theta)^2}$$

$$X_m := R_p + 4 \cdot \Delta R_p$$

$$N_i := \frac{1}{q_e \cdot 500 \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{sec}} \cdot 2 \cdot \text{ohm} \cdot \text{cm}}$$

$$N(x) := \frac{Q}{\sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \Delta R \cdot \left(1 + \text{erf} \left(R_p \cdot \frac{\cos(\theta)}{\sqrt{2} \Delta R} \right) \right)} \cdot e^{-\frac{(x - R_p \cdot \cos(\theta))^2}{2 \cdot \Delta R^2}}$$

$$N_f(x) := |N(x) - N_i|$$

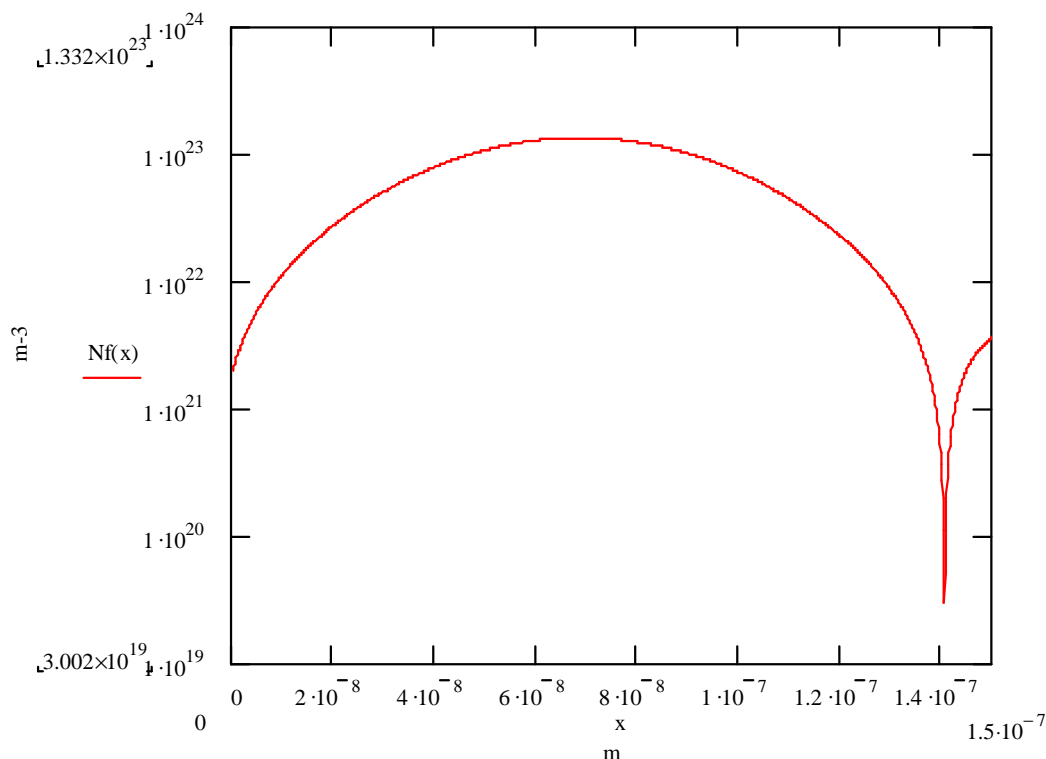


Рис.2. График распределения фосфора, внедренного в кремниевую подложку марки КДБ2 с энергией 60 кэВ и дозой 10^{12} ион/ см^2 под углом 20° относительно нормали к поверхности подложки

2. Рассчитать и построить график распределения по глубине примеси бора, внедренной в кремниевую пластину n-типа с исходной концентрацией $1.2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, в случае наклонной имплантации под углом 10° к нормали при энергии ионов бора 100 кэВ и дозе $85 \text{ мкКл}/\text{см}^2$. Определить глубину залегания сформированного p-n перехода.
3. Рассчитать и построить график распределения по глубине примеси бора, внедренного в кремниевую пластину n-типа с исходной концентрацией $1.2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, в случае наклонной имплантации ионов фторида бора BF_2^+ под углом 20° к нормали при энергии 100 кэВ и дозе $85 \text{ мкКл}/\text{см}^2$. Сравнить полученный концентрационный профиль с распределением, рассчитанным в задании 3 данного раздела. Изменится ли максимальная концентрация в примесном слое и координата её залегания? Сместится ли глубина залегания сформированного p-n перехода и на сколько процентов по отношению к глубине залегания p-n перехода, сформированного в условиях задания 3?
4. Проводится внедрение бора методом ионной имплантации в пластину кремния с целью создания примесного слоя с максимальной концентрацией 10^{18} см^{-3} и глубиной залегания p-n перехода 0.4 мкм. Найти необходимую энергию ионов бора и дозу при нормальной имплантации и определить угол наклона

внедряемых ионов бора относительно нормали, если необходимо уменьшить глубину залегания p-n перехода в полтора раза.

5. Исследовать зависимость глубины залегания p-n перехода от угла падения относительно нормали при наклонной имплантации ионами сурьмы с энергией 120 кэВ и дозой 100 мкКл/см² кремниевой подложки марки КДБ2.
6. Пластина кремния p-типа с исходной концентрацией $1.5 \cdot 10^{14}$ см⁻³ легируется методом наклонной имплантации ионами фосфора в два этапа. На первом этапе угол наклона ионного потока с нормалью составляет 15°, а энергия и доза имплантации соответственно равны 80 кэВ и 200 мкКл/см². На втором этапе энергия ионов фосфора равна 50 кэВ, доза имплантации 150 мкКл/см², а угол наклона составляет 40°. Найти суммарное распределение внедренной и исходной примесей и определить глубину залегания сформированного p-n перехода.
7. Пластина кремния марки КДБ7 имплантируется ионами мышьяка с дозой $5 \cdot 10^{14}$ см⁻² и углом наклона относительно нормали 10°. Энергия внедряемых ионов мышьяка 100 кэВ задается с погрешностью $\pm 10\%$. Рассчитать статистический разброс глубин залегания максимума концентрации примесного слоя и сформированного p-n перехода по формулам:

$$\frac{|x_{\max} - x_{\max 10}|}{x_{\max 0}} \cdot 100\%;$$

$$\frac{|x_{j0} - x_{j10}|}{x_{j0}} \cdot 100\%,$$

где x_{\max} , $x_{\max 10}$ – глубины залегания максимума концентрации соответственно при 100 кэВ и (100±10) кэВ; x_{j0} , x_{j10} – глубины залегания p-n переходов соответственно при 100 кэВ и (100±10) кэВ.

Вопросы

1. Записать неусеченное гауссовское распределение примеси при наклонной имплантации в случае легирования изотипной подложки с исходной концентрацией $N_{исх}$.
2. Записать усеченное гауссовское распределение примеси при наклонной имплантации в случае легирования изотипной подложки с исходной концентрацией $N_{исх}$.
3. Вывести формулы для расчета максимальной концентрации и определения координаты максимума распределения при наклонной имплантации для случая неусеченной гауссианы.
4. Вывести формулы для расчета максимальной концентрации и определения координаты максимума распределения при наклонной имплантации для случая усеченной гауссианы.
5. Вывести формулу для расчета глубин залегания p-n переходов при наклонной имплантации в случае усеченной гауссианы.

6. Записать распределение примеси при наклонной имплантации для случая неусеченной гауссианы с учетом эффекта каналирования.
7. Записать распределение примеси при наклонной имплантации для случая усеченной гауссианы с учетом эффекта каналирования.

2. Локальная наклонная имплантация

2.1. Распределение примесей при наклонной имплантации с учетом бокового рассеяния под край защитной маски

При наклонной имплантации вблизи края защитной маски толщиной d ($d \gg R_p + 3DR_p$) в зависимости от ориентации пучка ионов и его угла отклонения от нормали могут быть два случая: имплантация под край защитной маски (рис. 3,а) и имплантация с образованием теневого участка у края защитной маски (рис. 3,б) [1].

В обоих случаях при наклонной имплантации под углом q относительно нормали к поверхности распределение ионно-имплантированных примесей по глубине $N(x)$ описывается неусеченной (1.1) или усеченной (1.2) гауссианами.

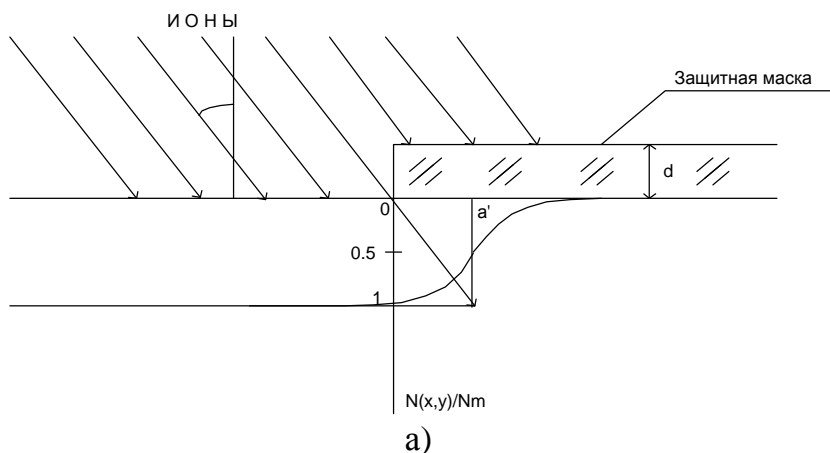
На заданной глубине x перераспределение ионно-имплантированных примесей за счет бокового рассеяния будет описываться по модели диффузии в неограниченном теле из полубесконечного пространства:

- при имплантации под край защитной маски

$$N(x, y) = \frac{N(x)}{2} \operatorname{erfc} \frac{y - a'}{\sqrt{2\Delta R_{\perp}}}; \quad (2.1)$$

- при имплантации с образованием теневого участка у края защитной маски

$$N(x, y) = \frac{N(x)}{2} \operatorname{erfc} \frac{a'' - y}{\sqrt{2\Delta R_{\perp}}} = \frac{N(x)}{2} \left(2 - \operatorname{erfc} \frac{y - a''}{\sqrt{2\Delta R_{\perp}}} \right). \quad (2.2)$$



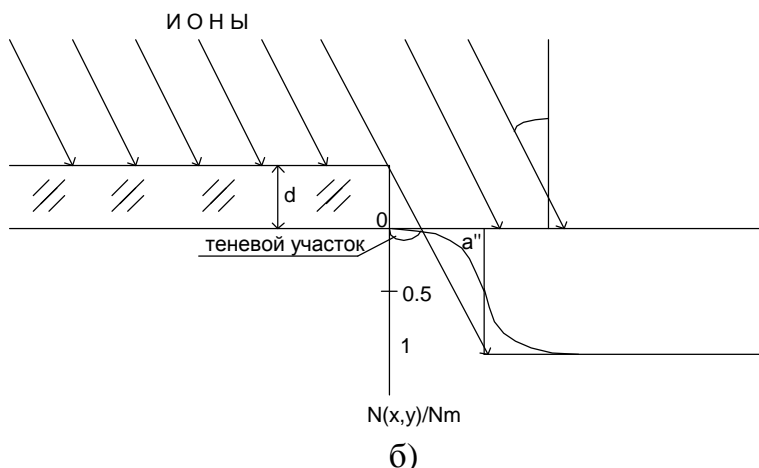


Рис. 3. Формирование нормированных боковых профилей распределения наклонно имплантированных примесей:
 а) имплантация под край защитной маски;
 б) имплантация с образованием теневого участка у края защитной маски

В формулах (2.1) и (2.2) из геометрических соображений имеем

$$\Delta R'_{\perp} = \Delta R_{\perp} \sin q; a' = x \cdot \operatorname{tg} q; a'' = (x + d) \operatorname{tg} q.$$

В случае легирования подложки с противоположным типом проводимости и исходной концентрацией примеси N_{ucx} из условия $N(x_{j1,2}, y) = N_{ucx}$ можно получить аналитическую зависимость глубин залегания $x_{j1,2}(y)$ сформированных р-п переходов.

Например, если наклонно имплантируемый профиль описывается по глубине неусеченной гауссианой (1.1), а имплантация проводится под край защитной маски, то распределение у края защитной маски будет иметь вид

$$N(x) = \frac{Q}{2\sqrt{2p}\Delta R} e^{-\frac{(x - R_p \cos q)^2}{2\Delta R^2}} \operatorname{erfc} \frac{y - a'}{\sqrt{2}\Delta R'_{\perp}}, \quad (2.3)$$

а зависимость $x_{j1,2}(y)$ глубины залегания сформированных р-п переходов есть функция

$$x_{j1,2}(y) = R_p \cos q \pm \Delta R \sqrt{2 \ln \frac{Q \cdot \operatorname{erfc} \frac{y - a'}{\sqrt{2}\Delta R'_{\perp}}}{2\sqrt{2p}\Delta R N_{ucx}}}. \quad (2.4)$$

Задания

1. На кремниевую пластину р-типа с удельным сопротивлением 2 Ом·см наносится защитный слой окисла толщиной 4 мкм, в котором травлением создается щель шириной 100 мкм. Наклонная имплантация бора проводится под край защитной маски под углом 10° относительно нормали к кремниевой пластине при энергии 50 кэВ и дозе 150 мкКл/см^2 :
- рассчитать и построить график распределения нормированного бокового концентрационного профиля $N(x=\text{const}, y)/Nm$;
 - рассчитать и построить графики нормированных концентрационных профилей по глубине: $N(x, y=10 \text{ мкм})/Nm$; $N(x, y=a)/Nm$; $N(x, y=\sqrt{2}\Delta R_{\perp})/Nm$.

Решение

Ниже приведен листинг решения задачи на Mathcad 2000 и графики распределений нормированного бокового концентрационного профиля (рис.4) и нормированных концентрационных профилей по глубине (рис.5).

а)

$$\theta := 10 \cdot \frac{\pi}{180} \quad d := 4 \cdot 10^{-4} \text{ см} \quad Q := 150 \cdot 6.25 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$$

$$R_p := 1.586 \times 10^{-5} \text{ см} \quad \Delta R_p := 4.99 \times 10^{-6} \text{ см} \quad \Delta R_t := 5.3 \times 10^{-6} \text{ см}$$

$$\Delta R := \sqrt{\Delta R_p^2 \cdot \cos(\theta)^2 + \frac{1}{2} \Delta R_t^2 \cdot \sin(\theta)^2}$$

$$X_m := R_p + 4 \cdot \Delta R_p$$

$$\Delta R't := \Delta R_t \cdot \sin(\theta) \quad a'(x) := x \cdot \tan(\theta)$$

$$x := R_p + 0 \cdot \sqrt{2} \cdot \Delta R_p$$

$$y := (-1 \cdot 10^{-8}) \text{ см}, 10^{-10} \text{ см}.. 2 \cdot 10^{-5} \text{ см}$$

$$N_m := \frac{Q}{\sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \Delta R} \quad N(x) := N_m \cdot e^{-\frac{(x - R_p \cos(\theta))^2}{2 \Delta R^2}}$$

$$N_f(x, y) := \frac{-N(x)}{2} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{y - a'(x)}{\sqrt{2} \cdot \Delta R't}\right)$$

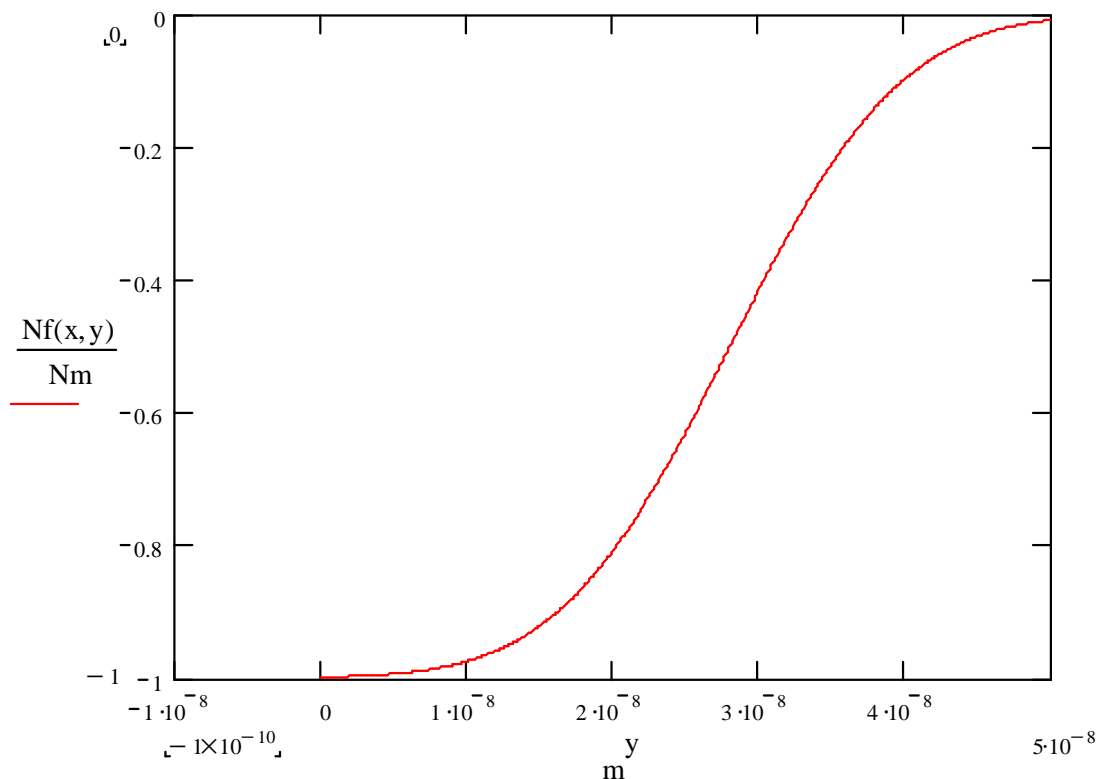


Рис. 4. График распределения нормированного бокового концентрационного профиля при наклонной имплантации под углом 10° относительно нормали к кремниевой пластине ионов бора с энергией 50 кэВ и дозой 150 мкКл/см^2

б)

$$\theta := 10 \cdot \frac{\pi}{180} \quad d := 4 \cdot 10^{-4} \text{ cm} \quad Q := 150 \cdot 6.25 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$$

$$Rp := 1.586 \times 10^{-5} \text{ cm} \quad \Delta Rp := 4.99 \times 10^{-6} \text{ cm} \quad \Delta Rt := 5.3 \times 10^{-6} \text{ cm}$$

$$\Delta R := \sqrt{\Delta Rp^2 \cdot \cos(\theta)^2 + \frac{1}{2} \Delta Rt^2 \cdot \sin(\theta)^2}$$

$$Xm := Rp + 4 \cdot \Delta Rp$$

$$\Delta R't := \Delta Rt \cdot \sin(\theta) \quad a' := Rp \cdot \cos(\theta) \cdot \tan(\theta)$$

$$x := (0) \text{ cm}, 10^{-6} \text{ cm}.. 2 \cdot 10^{-4} \text{ cm} \quad y1 := -10 \cdot 10^{-4} \text{ cm} \quad y2 := a' \quad y3 := \sqrt{2} \Delta R't$$

$$N_m := \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta R} \quad N(x) := N_m \cdot e^{-\frac{(x-Rp \cdot \cos(\theta))^2}{2 \cdot \Delta R^2}}$$

$$N_f(x, y) := \frac{N(x)}{2} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{y - a'}{\sqrt{2} \cdot \Delta R' t}\right)$$

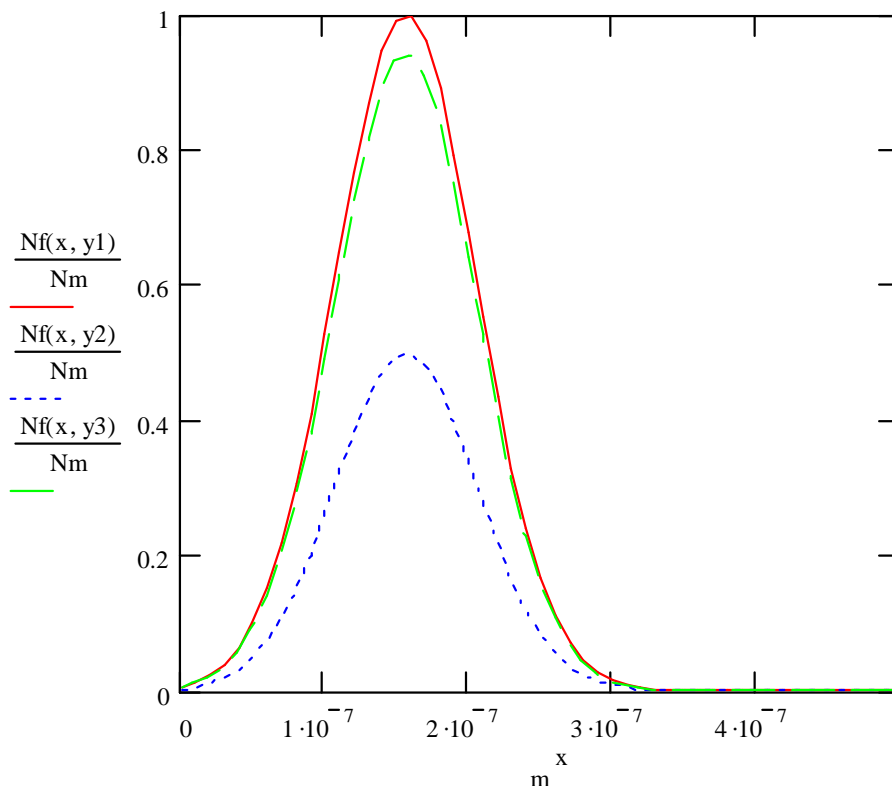


Рис. 5. Графики распределений нормированных концентрационных профилей по глубине при наклонной имплантации под углом 10° относительно нормали к кремниевой пластине ионов бора с энергией 50 кэВ и дозой 150 мкКл/см^2

2. Проводится наклонная имплантация под углом 40° относительно нормали к кремниевой пластине марки КЭФ2 ионами бора с энергией 60 кэВ и дозой 80 мкКл/см^2 . На пластине предварительно сформирована защитная маска толщиной 2 мкм и при имплантации образуется теневой участок:
 - а) рассчитать глубины залегания р-п переходов при $y = a'' - \sqrt{2} \cdot \Delta R_\perp$; $y = a''$; $y = a'' + \sqrt{2} \Delta R_\perp$;
 - б) построить график распределения нормированного бокового концентрационного профиля $N(x, y)/N_m$;
 - в) рассчитать и построить графики нормированных концентрационных профилей по глубине: $N(x, y = a'' + \sqrt{2} \Delta R_\perp)/N_m$; $N(x, y = a'')/N_m$;
 - г) построить график зависимости глубин залегания сформированных р-п переходов $x_{j1,2}(y)$.

Решение

Ниже приведен листинг решения задачи на Mathcad 2000 и графики распределений двумерного бокового распределения примеси (рис. 6), нормированных концентрационных профилей по глубине (рис. 7) и графики зависимостей глубин залегания p-n переходов (рис. 8).

a)

$$q_e := 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot K_{ul} \quad K_{ul} \equiv A \cdot \text{sec}$$

$$N_i := \frac{1}{q_e \cdot 1400 \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{sec}} \cdot 2 \cdot \text{ohm} \cdot \text{cm}}$$

$$\theta := 40 \cdot \frac{\pi}{180} \quad d := 2 \cdot 10^{-4} \text{cm} \quad Q := 80 \cdot 6.25 \cdot 10^{12} \text{cm}^{-2}$$

$$R_p := 1.872 \times 10^{-5} \text{cm} \quad \Delta R_p := 5.48877 \times 10^{-6} \text{cm} \quad \Delta R_t := 6.03578 \times 10^{-6} \text{cm}$$

$$\Delta R := \sqrt{\Delta R_p^2 \cdot \cos(\theta)^2 + \frac{1}{2} \Delta R_t^2 \cdot \sin(\theta)^2}$$

$$\Delta R't := \Delta R_t \cdot \sin(\theta) \quad a''(x) := (x + d) \cdot \tan(\theta) \quad x := R_p \cdot \cos(\theta)$$

$$y_1(x) := a''(x) - \sqrt{2} \cdot \Delta R't \quad y_2(x) := a''(x) \quad y_3(x) := a''(x) + \sqrt{2} \cdot \Delta R't$$

$$x_{j1}(x, y) := R_p \cdot \cos(\theta) - \Delta R \cdot \sqrt{2 \cdot \ln \left[\frac{Q \cdot \left[2 - \text{erfc} \left[\frac{(y - a''(x))}{\sqrt{2} \cdot \Delta R_t} \right] \right]}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot \Delta R \cdot N_i} \right]}}$$

$$x_{j2}(x, y) := R_p \cdot \cos(\theta) + \Delta R \cdot \sqrt{2 \cdot \ln \left[\frac{Q \cdot \left[2 - \text{erfc} \left[\frac{(y - a''(x))}{\sqrt{2} \cdot \Delta R_t} \right] \right]}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot \Delta R \cdot N_i} \right]}}$$

$$x_{j1}(x, y_1(x)) = -5.843 \times 10^{-8} \text{m} \quad x_{j2}(x, y_1(x)) = 3.452 \times 10^{-7} \text{m}$$

$$x_{j1}(x, y_2(x)) = -7.07 \times 10^{-8} \text{m} \quad x_{j2}(x, y_2(x)) = 3.575 \times 10^{-7} \text{m}$$

$$x_{j1}(x, y_3(x)) = -7.643 \times 10^{-8} \text{m} \quad x_{j2}(x, y_3(x)) = 3.632 \times 10^{-7} \text{m}$$

b)

$$\theta := 10 \cdot \frac{\pi}{180} \quad d := 4 \cdot 10^{-4} \text{ cm} \quad Q := 150 \cdot 6.25 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$$

$$R_p := 1.586 \times 10^{-5} \text{ cm} \quad \Delta R_p := 4.99 \times 10^{-6} \text{ cm} \quad \Delta R_t := 5.3 \times 10^{-6} \text{ cm}$$

$$\Delta R := \sqrt{\Delta R_p^2 \cdot \cos(\theta)^2 + \frac{1}{2} \Delta R_t^2 \cdot \sin(\theta)^2}$$

$$\Delta R't := \Delta R_t \cdot \sin(\theta) \quad a'(x) := x \cdot \tan(\theta) \quad a''(x) := (x + d) \cdot \tan(\theta)$$

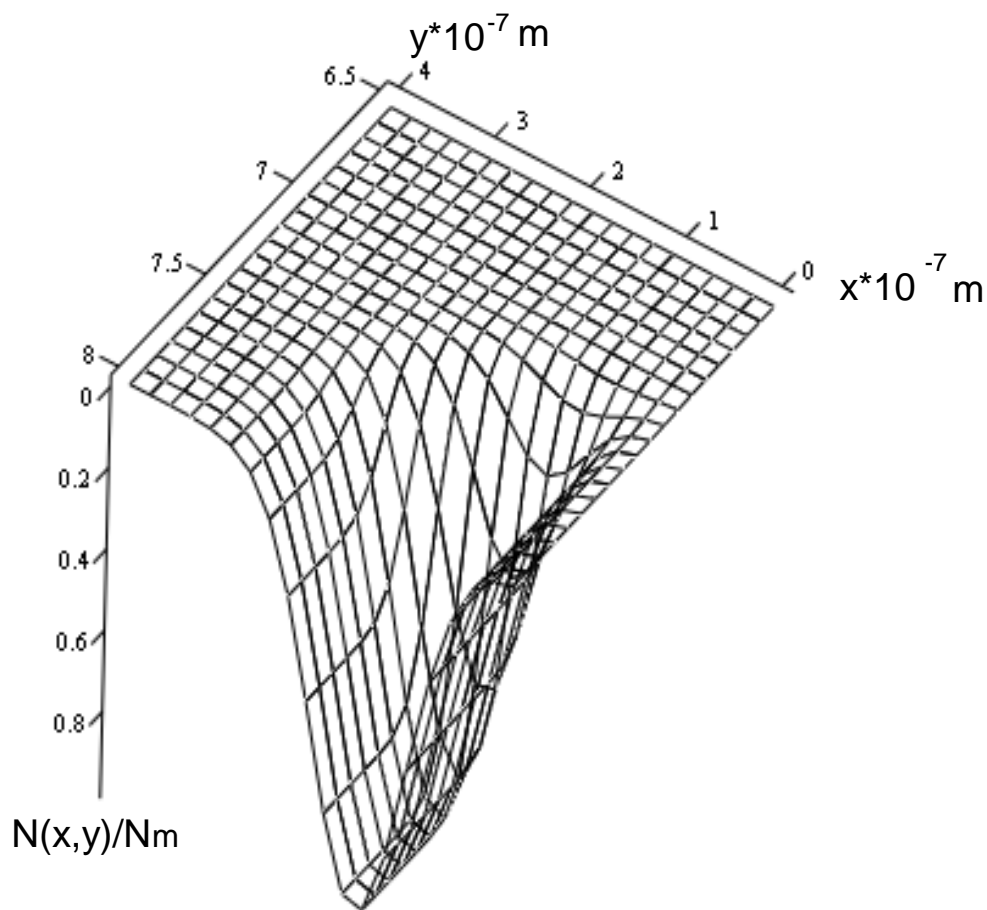
$$N_m := \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta R} \quad N(x) := N_m \cdot e^{-\frac{(x - R_p \cdot \cos(\theta))^2}{2 \cdot \Delta R^2}}$$

$$N_f(x, y) := \frac{N(x \cdot 10^{-7})}{2} \cdot \left(2 - \operatorname{erfc} \left(\frac{y \cdot 10^{-7} - a''(x \cdot 10^{-7})}{\sqrt{2} \cdot \Delta R't} \right) \right) \cdot N_m^{-1}$$

$$x1 := 0 \cdot \text{ m} \quad x2 := 4 \cdot \text{ m}$$

$$y1 := 6.5 \cdot \text{ m} \quad y2 := 8 \cdot \text{ m}$$

$$N_n := \text{CreateMesh}(N_f, x1, x2, y1, y2)$$



Nn

Рис.6. Двумерный график нормированного бокового распределения под краем защитной маски толщиной 2 мкм с образованием теневого участка при наклонной имплантации под углом 40° относительно нормали к поверхности кремниевой пластины ионами бора с энергией 60 кэВ и дозой 80 мкКл/см^2

в)

$$\theta := 10 \cdot \frac{\pi}{180} \quad d := 4 \cdot 10^{-4} \text{ cm} \quad Q := 150 \cdot 6.25 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$$

$$R_p := 1.586 \times 10^{-5} \text{ cm} \quad \Delta R_p := 4.99 \times 10^{-6} \text{ cm} \quad \Delta R_t := 5.3 \times 10^{-6} \text{ cm}$$

$$\Delta R := \sqrt{\Delta R_p^2 \cdot \cos(\theta)^2 + \frac{1}{2} \Delta R_t^2 \cdot \sin(\theta)^2}$$

$$\Delta R't := \Delta R_t \cdot \sin(\theta) \quad a'' := (R_p \cdot \cos(\theta) + d) \cdot \tan(\theta)$$

$$N_m := \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta R} \quad N(x) := N_m \cdot e^{-\frac{(x - R_p \cdot \cos(\theta))^2}{2 \cdot \Delta R^2}}$$

$$y_1 := a'' + \sqrt{2} \Delta R t \quad y_2 := a''$$

$$N_f(x, y) := \frac{N(x)}{2} \cdot \left(2 - \operatorname{erfc} \left(\frac{y - a''}{\sqrt{2} \cdot \Delta R t} \right) \right)$$

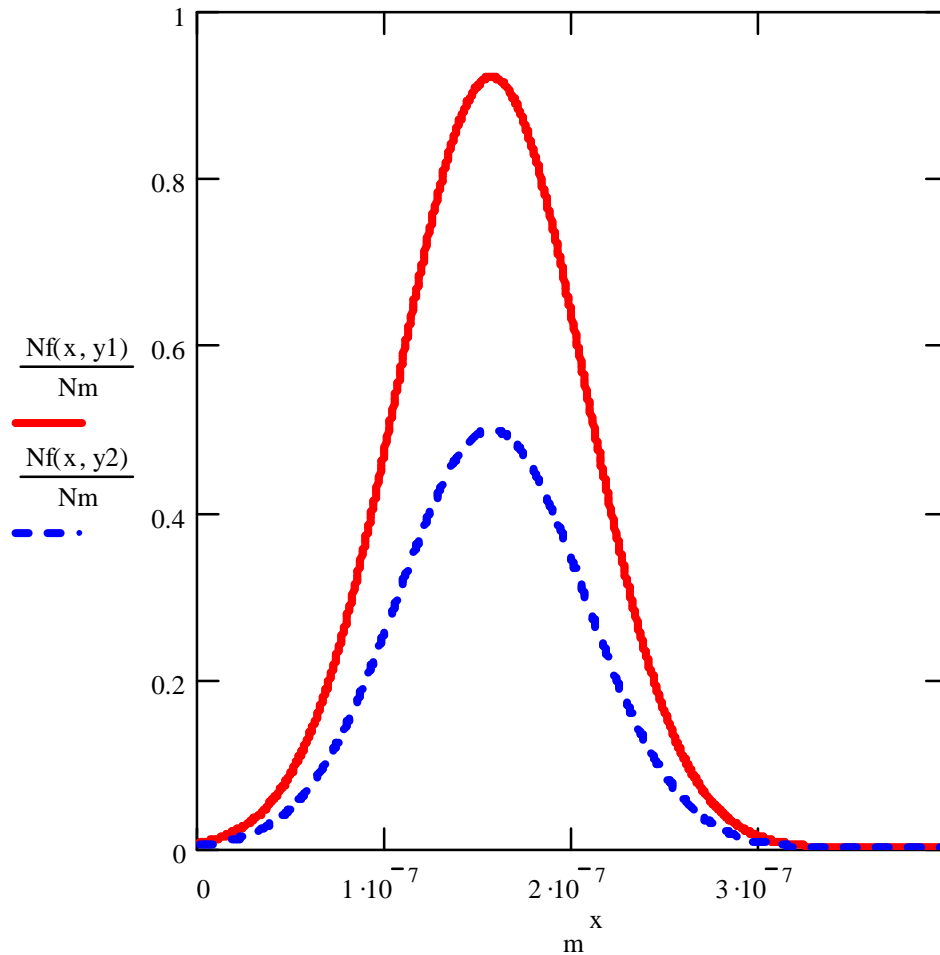


Рис. 7. Графики распределений нормированных концентрационных профилей по глубине вблизи края защитной маски толщиной 2 мкм при наклонной имплантации под углом 40° относительно нормали с образованием теневого участка ионов бора с энергией 60 кэВ и дозой 80 мкКл/см²

г)

$$q_e := 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot \text{Kul} \quad \text{Kul} \equiv A \cdot \text{sec}$$

$$\theta := 40 \cdot \frac{\pi}{180} \quad d := 2 \cdot 10^{-4} \text{cm} \quad Q := 80 \cdot 6.25 \cdot 10^{12} \text{cm}^{-2}$$

$$R_p := 1.872 \times 10^{-5} \text{cm} \quad \Delta R_p := 5.48877 \times 10^{-6} \text{cm} \quad \Delta R_t := 6.03578 \times 10^{-6} \text{cm}$$

$$\Delta R := \sqrt{\Delta R_p^2 \cdot \cos(\theta)^2 + \frac{1}{2} \Delta R_t^2 \cdot \sin(\theta)^2}$$

$$\Delta R_t' := \Delta R_t \cdot \sin(\theta) \quad a'' := (R_p \cdot \cos(\theta) + d) \cdot \tan(\theta)$$

$$N_i := \frac{1}{q_e \cdot 1400 \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{sec}} \cdot 2 \cdot \text{ohm} \cdot \text{cm}} \quad y := (0) \text{cm}, 10^{-6} \text{cm}.. 2 \cdot 10^{-4} \text{cm}$$

$$x_{j1}(y) := R_p \cdot \cos(\theta) - \Delta R \cdot \sqrt{2 \cdot \ln \left[\frac{Q \cdot \left[2 - \text{erfc} \left(\frac{y - a''}{\sqrt{2} \cdot \Delta R_t} \right) \right]}{2 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \Delta R \cdot N_i} \right]}}$$

$$x_{j2}(y) := R_p \cdot \cos(\theta) + \Delta R \cdot \sqrt{2 \cdot \ln \left[\frac{Q \cdot \left[2 - \text{erfc} \left(\frac{y - a''}{\sqrt{2} \cdot \Delta R_t} \right) \right]}{2 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \Delta R \cdot N_i} \right]}}$$

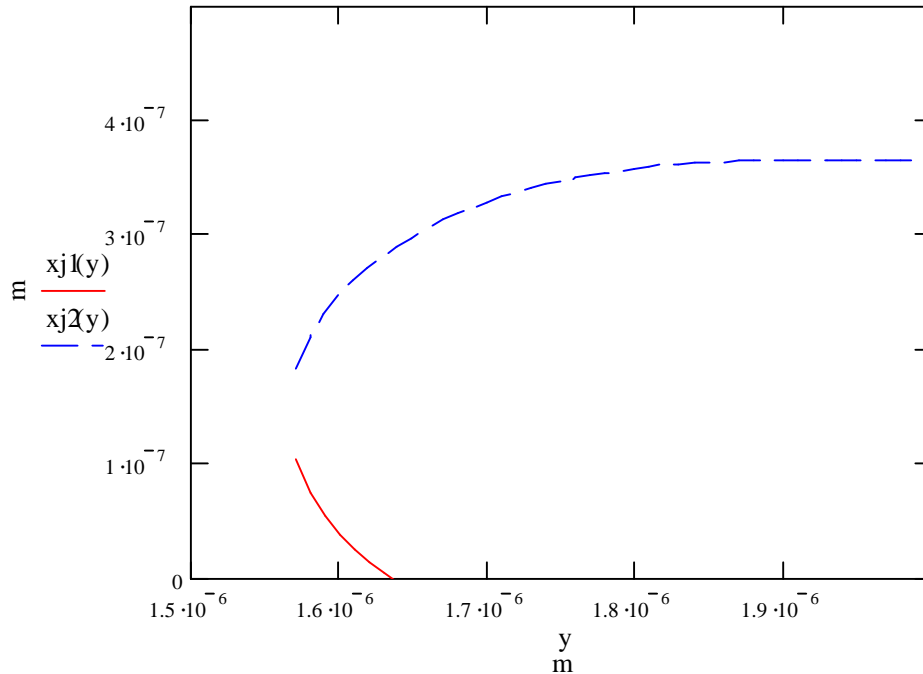


Рис. 8. Графики зависимости глубин залегания сформированных р-п переходов под краем защитной маски толщиной 2 мкм при наклонной имплантации с образованием теневого участка под углом 40° относительно нормали к подложке марки КЭФ2 ионами бора с энергией 60 кэВ и дозой 80 мкКл/см^2

3. Исследовать зависимость глубины залегания сформированных р-п переходов $x_{j1,2}(y)$ от угла падения относительно нормали к поверхности кремниевой пластины марки КДБ7 при имплантации под край окисной маски толщиной 3 мкм ионов фосфора с энергией 75 кэВ и дозой 120 мкКл/см².
4. Исследовать зависимость глубины залегания сформированных р-п переходов $x_{j1,2}(y)$ от угла падения относительно нормали к поверхности кремниевой пластины n-типа с исходной концентрацией $5 \cdot 10^{14}$ см⁻³ ионов бора с энергией 50 кэВ и дозой 200 мкКл/см², если около края защитной маски из окиси кремния толщиной 4 мкм образуется теневой участок.
5. При имплантации мышьяка под край окисной маски толщиной 2.5 мкм угол наклона потока ионов относительно нормали к поверхности кремниевой пластины марки КДБ4.5 составил 20°. Рассчитать и построить:
 - а) зависимость глубины залегания $x_{j1,2}(y)$ сформированных р-п переходов при внедрении ионов мышьяка с энергией 100 кэВ и дозой 10^{15} см⁻²;
 - б) графики нормированных концентрационных профилей по глубине: $N(x, y=5 \text{ мкм})/Nm$; $N(x, y=0)/Nm$; $N(x, y = \sqrt{2}\Delta R_{\perp})/Nm$;
 - в) график распределения нормированного бокового концентрационного профиля $N(x=const, y)/Nm$.
6. Проводится наклонная имплантация ионами сурьмы кремниевой подложки р-типа с удельной электропроводностью $0.2 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. Вблизи края защитной маски, получаемой термическим окислением в атмосфере водяного пара при температуре 1000 °С течение 30 минут, образуется теневой участок вследствие наклона пучка ионов относительно нормали к поверхности кремния под углом 30°. Энергия ионов сурьмы равна 90 кэВ, а доза имплантации - 10^{14} см⁻². Рассчитать и построить:
 - а) графики нормированных концентрационных профилей по глубине: $N(x, y=0 \text{ мкм})/Nm$; $N(x, y=a'')/Nm$; $N(x, y = a'' + \sqrt{2}\Delta R_{\perp})/Nm$;
 - б) рассчитать и построить график распределения нормированного бокового концентрационного профиля $N(x=const, y)/Nm$;
 - в) зависимость $x_{j1,2}(y)$ глубины залегания сформированных р-п переходов.

Вопросы

1. Записать распределение примеси под краем защитной маски, если профиль наклонно имплантируемых примесей по глубине описывается усеченной гауссианой.
2. Найти аналитическую зависимость глубин залегания $x_{j1,2}(y)$ сформированных р-п переходов в случае описания по глубине наклонно имплантируемых примесей усеченной гауссианой.
3. Записать распределение примеси в области теневого участка у края защитной маски, если профиль наклонно имплантируемых примесей по глубине описывается:
 - а) неусеченной гауссианой;

- б) усеченной гауссианой.
4. Записать распределение примеси в области теневого участка у края защитной маски, если профиль наклонно имплантируемых примесей по глубине описывается:
 - а) неусеченной гауссианой с учетом эффекта каналирования;
 - б) усеченной гауссианой с учетом эффекта каналирования.
 5. В условиях вопроса 3 найти аналитическую зависимость глубин залегания $x_{j1,2}(y)$ сформированных p-n переходов.
 6. В условиях вопроса 4 найти аналитическую зависимость глубин залегания $x_{j1,2}(y)$ сформированных p-n переходов.
 7. Нарисовать и сравнить два профиля распределения примесей под краем защитной маски, если профили наклонно имплантируемых примесей по глубине описываются неусеченными гауссианами при $DR_{p1} < DR_{p2}$ и $DR_{p1} < DR_{p2}$.

2.2. Распределение примесей при наклонной имплантации с учетом бокового рассеяния под края щели в защитной маске

При наклонной имплантации через щель в защитной маске (рис. 9) под углом q относительно нормали к поверхности у правого края щели внедрение ионов происходит под защитный слой, а у левого края щели образуется теневая область.

Учитывая результаты, полученные в п. 2.1, можно построить распределение примесей с учетом бокового рассеяния ионов, наклонно имплантированных через щель в защитной маске размером $2a$:

$$N(x, y) = \frac{N(x)}{2} \left[\operatorname{erfc} \frac{a'-y}{\sqrt{2\Delta R'_\perp}} - \operatorname{erfc} \frac{a''-y}{\sqrt{2\Delta R'_\perp}} \right], \quad (2.5)$$

где $\Delta R'_\perp = \Delta R_\perp \sin q$; $a' = -a + (d+x) \operatorname{tg} q$; $a'' = a + x \operatorname{tg} q$.

Если наклонно имплантируемый профиль описывается по глубине усеченной гауссианой (1.2), то распределение примесей с учетом бокового рассеяния [1] будет иметь вид

$$N(x, y) = \frac{Q}{2\sqrt{\frac{p}{2}\Delta R(1+\operatorname{erf}\frac{R_p \cos q}{\sqrt{2\Delta R}})}} \cdot e^{-\frac{(x-R_p \cos q)^2}{2\Delta R^2}} \left[\operatorname{erfc} \frac{a'-y}{\sqrt{2\Delta R'_\perp}} - \operatorname{erfc} \frac{a''-y}{\sqrt{2\Delta R'_\perp}} \right]. \quad (2.6)$$

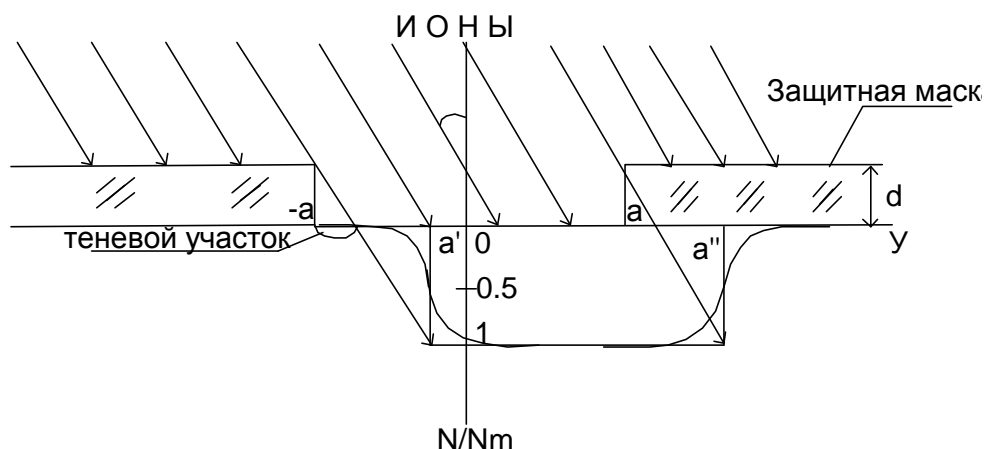


Рис. 9. Формирование нормированных профилей распределения примесей при наклонной имплантации через щель шириной $2a$ в защитной маске

В случае легирования подложки с противоположным типом проводимости и исходной концентрацией примеси N_{ucx} из условия $N(x_{j1,2}, y) = N_{ucx}$ можно получить аналитическую зависимость для глубин залегания $x_{j1,2}(y)$ сформированных p-n переходов

$$x_{j1,2}(y) = R_p \cos q \pm \Delta R \sqrt{2 \ln \frac{Q \left[\operatorname{erfc} \frac{a'-y}{\sqrt{2\Delta R'_\perp}} - \operatorname{erfc} \frac{a''-y}{\sqrt{2\Delta R'_\perp}} \right]}{2 \sqrt{\frac{p}{2}} \Delta R (1 + \operatorname{erf} \frac{R_p \cos q}{\sqrt{2\Delta R}}) N_{ucx}}}}. \quad (2.7)$$

Задания

- Проводится наклонная имплантация сурьмы в щель шириной 5 мкм в окисном слое толщиной 1.5 мкм. Угол наклона ионного пучка составляет 10° относительно нормали к поверхности кремниевой пластины p-типа с удельным сопротивлением $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Энергия ионов сурьмы равна 100 кэВ, а доза – 10^{14} см^{-2} . Рассчитать и построить:
 - распределение нормированной концентрации сурьмы при заданной глубине залегания примесного слоя $N(x = \text{const}, y) / Nm$;
 - графики нормированных концентрационных профилей по глубине: $N(x, y = 0 \text{ мкм}) / Nm$; $N(x, y = a' + \sqrt{2\Delta R'_\perp}) / Nm$; $N(x, y = a') / Nm$;
 - зависимость $x_{j1,2}(y)$ глубины залегания сформированных p-n переходов.

Решение

Ниже приведен листинг решения задачи на Mathcad 2000 и графики распределений нормированной концентрации под краем щели в защитной маске (рис. 10, 11) и по глубине (рис. 12).

a)

$$N_i := 5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3} \quad \theta := 10 \cdot \frac{\pi}{180} \quad d := 1.5 \cdot 10^{-4} \text{ cm} \quad a := 5 \cdot 10^{-5} \text{ cm} \quad Q := 1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$$

$$R_p := 5.805 \times 10^{-6} \text{ cm} \quad \Delta R_p := 1.825 \times 10^{-6} \text{ cm} \quad \Delta R_t := 1.194 \times 10^{-6} \text{ cm}$$

$$\Delta R := \sqrt{\Delta R_p^2 \cdot \cos(\theta)^2 + \frac{1}{2} \Delta R_t^2 \cdot \sin(\theta)^2}$$

$$\Delta R_t' := \Delta R_t \cdot \sin(\theta) \quad a'(x) := -a + (d + x) \cdot \tan(\theta) \quad a''(x) := a + x \cdot \tan(\theta) \quad x := R_p + \Delta R_p$$

$$N_m := \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta R} \quad N(x) := N_m \cdot e^{-\frac{(x - R_p \cdot \cos(\theta))^2}{2 \cdot \Delta R^2}}$$

$$N_f(x, y) := \frac{-N(x)}{2} \cdot \left(\operatorname{erfc}\left(\frac{a'(x) - y}{\sqrt{2} \cdot \Delta R_t'}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{a''(x) - y}{\sqrt{2} \cdot \Delta R_t'}\right) \right)$$

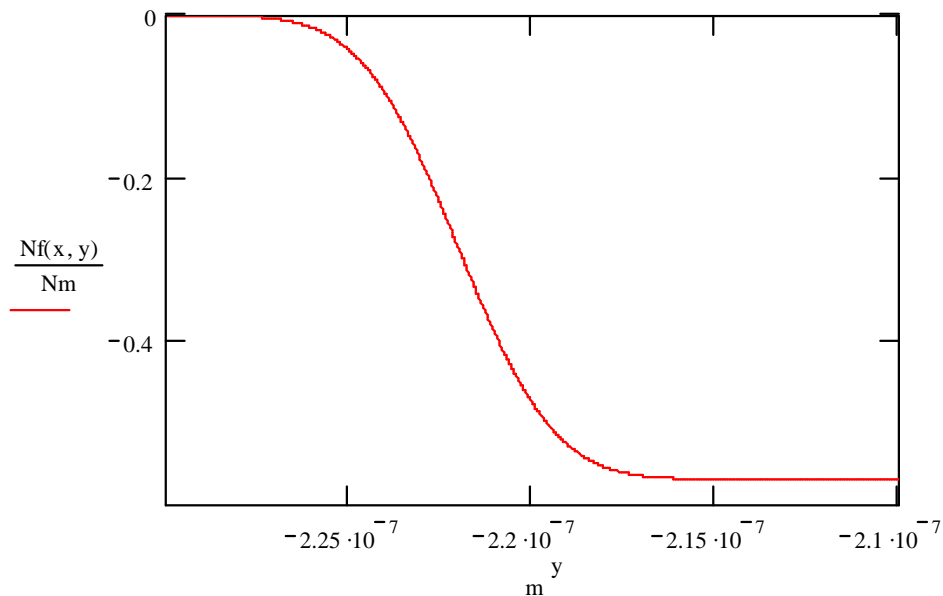


Рис.10. График распределения нормированного бокового профиля вблизи края маски толщиной 1.5 мкм при наклонной имплантации в щель шириной 5 мкм под углом 10° к нормали с образованием теневого участка ионов сурьмы с энергией 100 кэВ и дозой 10^{14} cm^{-2}

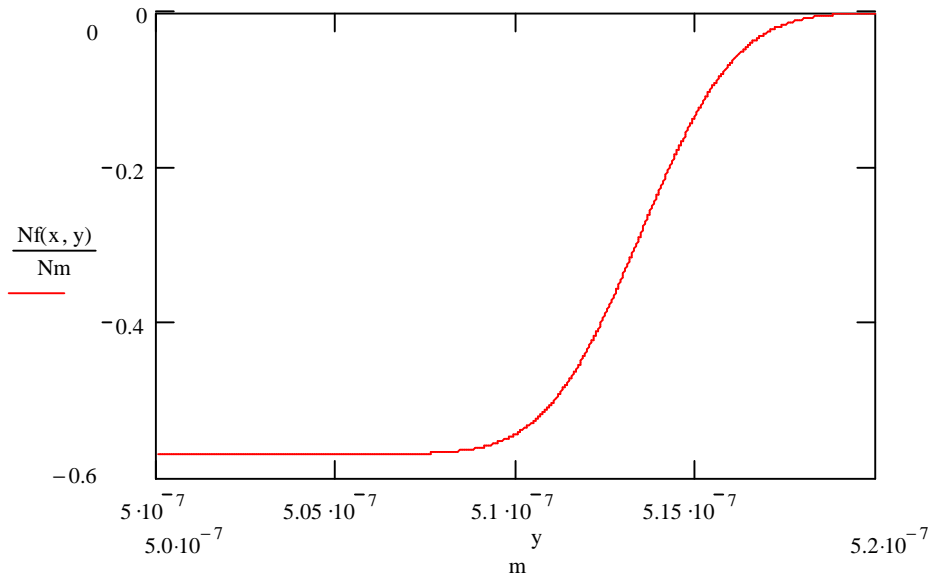


Рис.10. График распределения нормированного бокового профиля вблизи края маски толщиной 1.5 мкм при наклонной имплантации в щель шириной 5 мкм под углом 10° относительно нормали сурьмы с энергией 100 кэВ и дозой 10^{14} см^{-2}

б)

$$N_i := 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3} \quad \theta := 10 \cdot \frac{\pi}{180} \quad d := 1.5 \cdot 10^{-4} \text{ см} \quad Q := 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \quad a := 2.5 \cdot 10^{-4} \text{ см}$$

$$R_p := 5.805 \times 10^{-6} \text{ см} \quad \Delta R_p := 1.825 \times 10^{-6} \text{ см} \quad \Delta R_t := 1.194 \times 10^{-6} \text{ см}$$

$$\Delta R := \sqrt{\Delta R_p^2 \cdot \cos^2(\theta) + \frac{1}{2} \Delta R_t^2 \cdot \sin^2(\theta)}$$

$$\Delta R't := \Delta R_t \cdot \sin(\theta) \quad a'(x) := -a + (x + d) \cdot \tan(\theta) \quad a''(x) := a + x \cdot \tan(\theta)$$

$$x := (0) \text{ см}, 10^{-8} \text{ см}.. 0.75 \cdot 10^{-4} \text{ см}$$

$$y_1 := 0 \quad y_2(x) := a'(x) \quad y_3(x) := a'(x) + \sqrt{2} \cdot \Delta R't$$

$$N_m := \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta R} \quad N(x) := N_m \cdot e^{-\frac{(x - R_p \cdot \cos(\theta))^2}{2 \cdot \Delta R^2}}$$

$$N_f(x, y) := \frac{N(x)}{2} \cdot \left(\operatorname{erfc}\left(\frac{a'(x) - y}{\sqrt{2} \cdot \Delta R't}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{a''(x) - y}{\sqrt{2} \cdot \Delta R't}\right) \right)$$

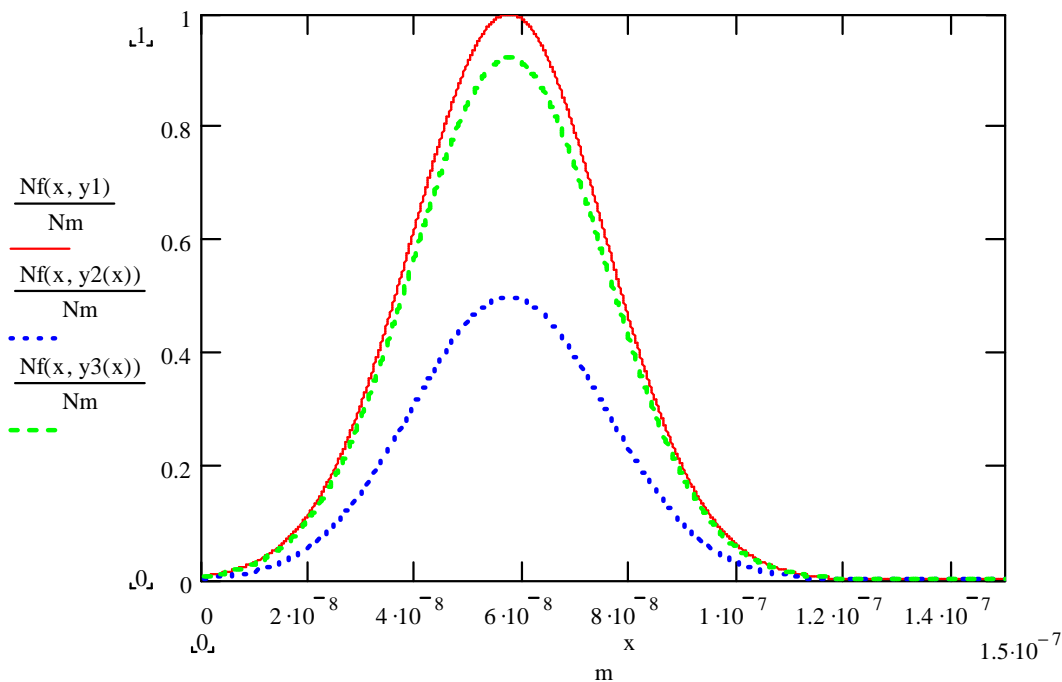


Рис. 12. Графики распределений нормированных концентрационных профилей по глубине вблизи края защитной маски толщиной 1.5 мкм при наклонной имплантации в щель шириной 5 мкм под углом 10° относительно нормали ионов сурьмы с энергией 100 кэВ и дозой 10^{14} см^{-2}

2. На кремниевой пластине марки КДБ7 во влажной атмосфере термически наращивается слой окисла при температуре 900°C в течение 50 минут, а затем вытравливается щель шириной 4 мкм, в которую проводится наклонная имплантация ионов мышьяка под углом 15° относительно нормали к поверхности кремния. С учетом бокового рассеяния под края защитной маски найти:
 - а) распределение нормированной концентрации мышьяка $N(x=\text{const}, y)/Nm$ при энергии ионов 90 кэВ и дозе имплантации 100 мкКл/см^2 ;
 - б) графики нормированных концентрационных профилей по глубине: $N(x, y=0 \text{ мкм})/Nm$; $N(x, y=a')/Nm$; $N(x, y=a'')/Nm$; $N(x, y = a'' + \sqrt{2}\Delta R_\perp)/Nm$; $N(x, y = a' + \sqrt{2}\Delta R_\perp)/Nm$; $N(x, y = \pm a'')/Nm$, если энергия ионов мышьяка была 100кэВ, а доза имплантации составила 200 мкКл/см^2 ;
 - в) зависимость от энергии ионов мышьяка в диапазоне $50 \div 120 \text{ кэВ}$ глубин залегания примесного слоя с концентрацией 10^{17} см^{-3} на границе $y=a$, если доза имплантации составила 200 мкКл/см^2 ;
 - г) линии равной концентрации 10^{16} см^{-3} и 10^{17} см^{-3} внедренного мышьяка при энергии 90 кэВ и дозе имплантации 100 мкКл/см^2 ;
 - д) зависимость $x_{j1,2}(y)$ глубин залегания сформированных p-n переходов при следующем режиме имплантации: $E=100 \text{ кэВ}$, $Q=150 \text{ мкКл/см}^2$.

3. Проводится наклонная имплантация ионами бора кремниевой пластины n-типа с удельной электропроводностью $0.2 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ через щель размером $2 \times 2 \text{ мкм}$ в защитной маске толщиной 1.5 мкм . Ионы бора с энергией 75 кэВ и дозой 150 мкКл/см^2 внедряются под углом 25° относительно нормали к кремниевой подложке. Для того чтобы избежать формирования теневого участка, легирование проводится в два этапа с равными дозами имплантации и поворотом пластины на 180° . Рассчитать и построить:
- а) график распределения нормированного бокового концентрационного профиля $N(x=\text{const}, y)/Nm$;
 - б) графики нормированных концентрационных профилей по глубине: $N(x, y=0 \text{ мкм})/Nm$; $N(x, y=a')/Nm$; $N(x, y=a'')/Nm$; $N(x, y = a'' + \sqrt{2\Delta R_\perp})/Nm$; $N(x, y = -a'' + \sqrt{2\Delta R_\perp})/Nm$; $N(x, y = \pm a)/Nm$;
 - в) линии равной концентрации N_m , 10^{17} см^{-3} , 10^{16} см^{-3} ;
 - г) зависимость $x_{j,2}(y)$ глубин залегания сформированных p-n переходов.

Вопросы

1. Как изменится распределение (2.6) при учете эффекта каналирования?
2. Записать распределение примеси при наклонной имплантации через щель шириной $2a$ в защитной маске с учетом бокового рассеяния и эффекта каналирования, если профиль по глубине описывается неусеченной гауссианой.
3. В условиях вопроса 2 найти аналитическую зависимость глубин залегания $x_{j,2}(y)$ сформированных p-n переходов.
4. Нарисовать и сравнить два профиля ионно-имплантированных примесей при наклонной имплантации, если профили внедренных примесей имеют следующие параметры: $DR_{p1} > DR_{p2}$ и $DR_{p^1} > DR_{p^2}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Асессоров В.В. Математические модели распределений ионно-имплантированных примесей / В.В. Асессоров. – 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. Красников Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов / Г.Я. Красников: В 2-х кн. – М.: Техносфера, 2002. - Ч.1. - 416 с.
4. МОП-СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов/ Под ред. П.Антонетти, Д.Антониадиса, Д. Даттона, У. Оулдхема. – М.: Радио и связь,
5. Технология СБИС / Под ред. С. Зи : В 2-х кн. – М.: Мир, 1986. – Кн.1. – 404 с.; Кн.2. – 416 с.

Приложение

Аппроксимирующие полиномы для расчета параметров распределений основных примесей в кремнии:

- для ионов бора

$$\lg R_p = 0,613 + 0,8786 \cdot \lg E + 0,0773 \cdot (\lg E)^2 - 0,0262 \cdot (\lg E)^3;$$

$$\lg \Delta R_p = 0,482 + 0,8594 \cdot \lg E - 0,0616 \cdot (\lg E)^2 - 0,0135 \cdot (\lg E)^3;$$

$$\lg \Delta R_{\perp} = 0,506 + 0,556 \cdot \lg E + 0,239 \cdot (\lg E)^2 - 0,081 \cdot (\lg E)^3;$$

- для ионов фосфора

$$\lg R_p = 0,682 + 0,1861 \cdot \lg E + 0,3769 \cdot (\lg E)^2 - 0,0581 \cdot (\lg E)^3;$$

$$\lg \Delta R_p = 0,401 + 0,2209 \cdot \lg E + 0,3478 \cdot (\lg E)^2 - 0,0711 \cdot (\lg E)^3;$$

$$\lg \Delta R_{\perp} = 0,205 + 0,537 \cdot \lg E + 0,051 \cdot (\lg E)^2 + 0,015 \cdot (\lg E)^3;$$

- для ионов мышьяка

$$\lg R_p = 0,585 + 0,4843 \cdot \lg E + 0,0299 \cdot (\lg E)^2 + 0,0174 \cdot (\lg E)^3;$$

$$\lg \Delta R_p = 0,192 + 0,3995 \cdot \lg E + 0,109 \cdot (\lg E)^2 - 0,0074 \cdot (\lg E)^3;$$

$$\lg \Delta R_{\perp} = 0,042 + 0,553 \cdot \lg E - 0,042 \cdot (\lg E)^2 + 0,029 \cdot (\lg E)^3;$$

- для ионов сурьмы

$$\lg R_p = 0,597 + 0,606 \cdot \lg E - 0,0767 \cdot (\lg E)^2 + 0,0327 \cdot (\lg E)^3;$$

$$\lg \Delta R_p = 0,104 + 0,4905 \cdot \lg E + 0,0103 \cdot (\lg E)^2 + 0,0124 \cdot (\lg E)^3;$$

$$\lg \Delta R_{\perp} = -0,047 + 0,629 \cdot \lg E - 0,096 \cdot (\lg E)^2 + 0,032 \cdot (\lg E)^3.$$

Здесь энергия задается в килоэлектронвольтах, а значения нормальных пробегов и среднеквадратичных отклонений получаются в нанометрах.

Составили: Бормонтов Евгений Николаевич
Быкадорова Галина Владимировна
Григорьев Роман Григорьевич
Науч. ред.: Петров Борис Константинович

Редактор: Бунина Т.Д.