

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**Распределения ионно-имплантированных примесей
в многослойных структурах**

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. Построение профилей ионно-имплантированных примесей в многослойных структурах методом подбора доз.....	4
2. Построение профилей ионно-имплантированных примесей в двухслойных структурах методом составных профилей.....	13
3. Построение профилей ионно-имплантированных примесей в трехслойных структурах методом составных профилей.....	18
4. Построение профилей ионно-имплантированных примесей в многослойных структурах методом энергетических потерь.....	20
Литература	30

1. Построение ионно-имплантированных профилей в многослойных структурах методом подбора доз

В процессе ионного легирования пассивирующие пленки SiO_2 позволяют предохранить поверхность подложек от загрязнения и повреждений, а также аморфизировать поверхностный слой с целью устранения эффекта каналирования. Кроме того, пассивирующие пленки предотвращают обратную диффузию и испарение имплантированных ионов, обладающих высокой летучестью.

Метод подбора доз обладает высокой эффективностью при моделировании ионно-имплантированных профилей в многослойных структурах. С помощью этого метода можно получить приемлемую адекватность профиля распределения примеси с минимальными вычислительными затратами. Метод подбора доз основан на статистических распределениях примесей и численном интегрировании доз в каждом слое. Метод подбора доз реализуется по следующему алгоритму.

Пусть задана многослойная структура, содержащая N слоев (рис.1) с глубинами залегания границ раздела d_i ($i=1,2,\dots,N$). Распределение ионно-имплантированных примесей в каждом i -ом слое описывается функцией $f_i(x)$ с соответствующим нормирующим множителем N_{mi} , в качестве которой может быть выбрана любая из известных функций распределения (гауссовские, Пирсон-4 и т.д.).

Распределение внедренной примеси $n_1(x)$ в первом слое есть

$$n_1(x) = N_{m1}f_1(x). \quad (1)$$

Доза Q_1 , т. е. количество остановившихся ионов в первом слое, равна

$$Q_1 = \int_0^{d_1} N_{m1}f_1(x)dx.$$

Далее, полагая, что вся структура выполнена из материала слоя 2, определим глубину d_1' , на которой остановилось число ионов Q_1' , равное дозе Q_1 , из условия

$$Q_1' = Q_1 = \int_0^{d_1'} N_{m2}f_2(x)dx.$$

Таким образом, для определения профиля во втором слое необходимо сдвинуть исходный профиль второй среды на $\Delta d_1 = d_1' - d_1$ к границе раздела на глубине d_1 :

$$n_2(x) = N_{m2}f_2(x + \Delta d_1). \quad (2)$$

Перейдя к третьему слою, определим количество ионов, внедренных в первые два слоя,

$$Q_2' = Q_1 + \int_{d_1}^{d_2} N_{m2}f_2(x + \Delta d_1)dx.$$

В предположении, что вся структура выполнена из вещества слоя 3, определим глубину $d_2\zeta$ на которой остановилось то же число ионов $Q_2\zeta$ что и в предыдущих слоях:

$$Q_2' = \int_0^{d_2'} N_{m3} f_3(x) dx.$$

Из условия $Q_2 = Q_2'$ находим d_2' и, соответственно, величину сдвига $\Delta d_2 = d_2' - d_2$, на которую следует сместить исходный профиль третьей среды $N_{m3} f_3(x)$ к границе d_2 . Тогда распределение примеси в третьем слое будет

$$n_3(x) = N_{m3} f_3(x + \Delta d_2). \quad (3)$$

Аналогично рассчитываются профили во всех последующих слоях.

Рассмотрим построение профилей ионно-имплантированных примесей в многослойных структурах методом подбора доз с неусеченными гауссовскими распределениями.

В этом случае профили в каждом i -ом слое описываются неусеченными гауссианами

$$n_i(x) = \frac{Q}{\sqrt{2p} \Delta R_{pi}} \exp \left[-\frac{(x - R_{pi})^2}{2\Delta R_{pi}^2} \right]. \quad (4)$$

Согласно методу подбора доз, количество ионов, остановившихся в первом слое, равно

$$Q_1 = \int_{-\infty}^{d_1} n_1(x) dx = \frac{Q}{\sqrt{2p} \Delta R_{p1}} \int_{-\infty}^{d_1} \exp \left[-\frac{(x - R_{p1})^2}{2\Delta R_{p1}^2} \right] dx = \frac{Q}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \frac{d_1 - R_{p1}}{\sqrt{2}\Delta R_{p1}} \right].$$

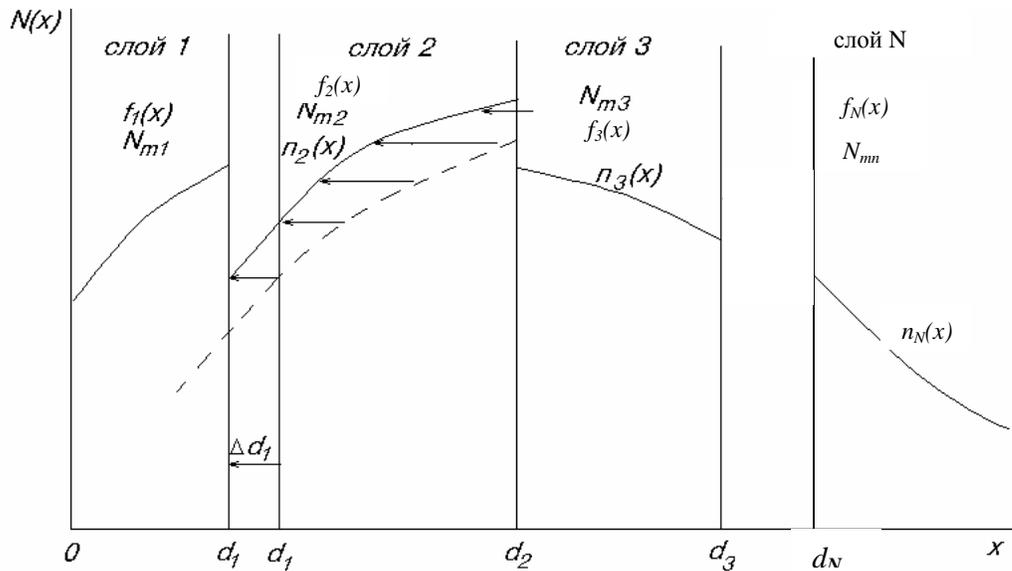


Рис. 1. Распределение ионно-имплантированной примеси в многослойной структуре

Из предположения, что вся структура выполнена из материала второго слоя, определим глубину d_1' , на которой остановилось число ионов Q_1' , равное Q_1 :

$$Q_1' = \int_{-\infty}^{d_1'} n_2(x) dx = \frac{Q}{\sqrt{2p\Delta R_{p2}}} \int_{-\infty}^{d_1'} e^{-\frac{(x-R_{p2})^2}{2\Delta R_{p2}^2}} dx = \frac{Q}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \frac{d_1' - R_{p2}}{\sqrt{2\Delta R_{p2}}} \right].$$

Тогда из условия $Q_1' = Q_1$, получим

$$d_1' = R_{p2} + (d_1 - R_{p1}) \frac{\Delta R_{p2}}{\Delta R_{p1}}. \quad (5)$$

Следовательно, сдвиг Dd_1 будет равен

$$Dd_1 = d_1' - d_1 = R_{p2} - d_1 + (d_1 - R_{p1}) \frac{\Delta R_{p2}}{\Delta R_{p1}},$$

а распределение во втором слое запишется как

$$n_2(x) = \frac{Q}{\sqrt{2p\Delta R_{p2}}} e^{-\frac{(x-d_1+(d_1-R_{p1})\frac{\Delta R_{p2}}{\Delta R_{p1}})^2}{2\Delta R_{p2}^2}}, \quad d_1 \leq x \leq d_2. \quad (6)$$

При переходе к третьему слою, обозначив $d_1 - (d_1 - R_{p1}) \frac{\Delta R_{p2}}{\Delta R_{p1}} \equiv R_{p2}'$, определим количество ионов, остановившихся в первых двух слоях,

$$Q_2 = Q_1 + \int_{d_1}^{d_2} n_2(x) dx = Q_1 + \frac{Q}{\sqrt{2p\Delta R_{p2}}} \int_{d_1}^{d_2} e^{-\frac{\left(x-d_1+(d_1-R_{p1})\frac{\Delta R_{p2}}{\Delta R_{p1}}\right)^2}{2\Delta R_{p2}^2}} dx.$$

Сделав замену переменной $z = (x - R_{p2}') / (\sqrt{2\Delta R_{p2}})$, получим

$$\begin{aligned} Q_2 &= Q_1 + \frac{Q}{p} \int_{\frac{d_1 - R_{p2}'}{\sqrt{2\Delta R_{p2}}}}^{\frac{d_2 - R_{p2}'}{\sqrt{2\Delta R_{p2}}}} e^{-z^2} dz = Q_1 + \frac{Q}{\sqrt{p}} \int_0^{\frac{d_2 - R_{p2}'}{\sqrt{2\Delta R_{p2}}}} e^{-z^2} dz - \frac{Q}{\sqrt{p}} \int_0^{\frac{d_1 - R_{p2}'}{\sqrt{2\Delta R_{p2}}}} e^{-z^2} dz = \\ &= Q_1 + \frac{Q}{2} \left[\operatorname{erf} \frac{d_2 - R_{p2}'}{\sqrt{2\Delta R_{p2}}} - \operatorname{erf} \frac{d_1 - R_{p2}'}{\sqrt{2\Delta R_{p2}}} \right]. \end{aligned}$$

Из предположения, что вся структура выполнена из материала третьего слоя, определим глубину d_2' , на которой остановилось число ионов Q_2' , равное Q_2 :

$$Q_2' = \int_{-\infty}^{d_2'} n_3(x) dx = \frac{Q}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \frac{d_2' - R_{p3}}{\sqrt{2\Delta R_{p3}}} \right].$$

Из условия $Q_2' = Q_2$, получим

$$\frac{Q}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \frac{d_2' - R_{p3}}{\sqrt{2\Delta R_{p3}}} \right] = Q_1 + \frac{Q}{2} \left[\operatorname{erf} \frac{d_2 - R_{p2}}{\sqrt{2\Delta R_{p2}}} - \operatorname{erf} \frac{d_1 - R_{p2}}{\sqrt{2\Delta R_{p2}}} \right],$$

или

$$\operatorname{erf} \frac{d_2' - R_{p3}}{\sqrt{2\Delta R_{p3}}} = \frac{2}{Q} \left\{ Q_1 + \frac{Q}{2} \left[\operatorname{erf} \frac{d_2 - R_{p2}}{\sqrt{2\Delta R_{p2}}} - \operatorname{erf} \frac{d_1 - R_{p2}}{\sqrt{2\Delta R_{p2}}} \right] \right\} - 1.$$

Глубина d_2' находится из решения данного трансцендентного уравнения. Распределение в третьем слое с учетом $Dd_2 = d_2^{\zeta} - d_2$ запишется в виде

$$n_3(x) = \frac{Q}{\sqrt{2p\Delta R_{p3}}} \exp \left[-\frac{(x - \Delta d_2 - R_{p3})^2}{2\Delta R_{p3}^2} \right], \quad d_2 < x < d_3. \quad (7)$$

Обобщая приведенные выше рассуждения на случай i -го слоя, получим

$$\begin{aligned} Q_{i-1} &= Q_{i-2} + \frac{Q}{2} \left[\operatorname{erf} \frac{d_{i-1} - R_{p(i-1)}}{\sqrt{2\Delta R_{p(i-1)}}} - \operatorname{erf} \frac{d_{i-2} - R_{p(i-1)}}{\sqrt{2\Delta R_{p(i-1)}}} \right]; \\ R_{p(i-1)}' &= R_{p(i-1)} - (d_{i-2}' - d_{i-2}); \\ \operatorname{erf} \frac{d_{i-1}' - R_{pi}}{\sqrt{2\Delta R_{pi}}} &= \frac{2}{Q} Q_{i-1} - 1; \\ \Delta d_{i-1} &= d_{i-1}' - d_{i-1}; \\ n_i(x) &= \frac{Q}{\sqrt{2p\Delta R_{pi}}} \exp \left[-\frac{(x - \Delta d_{i-1} - R_{pi})^2}{2\Delta R_{pi}^2} \right], \quad d_{i-1} < x < d_i. \end{aligned} \quad (8)$$

Полученные рекуррентные соотношения (8) позволяют вычислить концентрационные профили ионно-имплантированных примесей в любой многослойной структуре с любым числом слоев.

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 $N_i \neq 0$ и $N_{i+1} \neq 0$ и/или $N_i \neq 0$ и $N_{i+1} \neq 0$. Тогда $x_{j1,2} = (x_j + x_{j+1})/2$.

Задания

1. Методом подбора доз с неусеченными гауссовскими распределениями рассчитать концентрационный профиль и глубину залегания р-п переходов при легировании структуры $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2\text{-Si}$ ионами бора с энергией 100 кэВ и дозой 5 мкКл/см². Исходная подложка кремния марки КЭФ7.5, толщины слоев нитрида кремния и окисла соответственно равны 0.07 и 0.02 мкм.

Построить результирующий график распределения примеси в исследуемой структуре в координатах $\ln(N)$ - x и глубину залегания р-п перехода.

Решение

Подложка кремния марки КЭФ7.5 имеет исходную концентрацию $N_{исх}$, которая оценивается по удельному сопротивлению $r=7.5$ Ом·см и подвижности основных носителей заряда $m_n=1400$ см²/(В·с):

$$N_{исх} = \frac{1}{er m_n} = \frac{1}{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 7.5 \cdot 1400} = 5.95 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}.$$

Поскольку толщины слоев нитрида кремния и окисла соответственно равны 0.07 и 0.02 мкм, то глубины залегания границ раздела будут $d_1=0.07$ мкм и $d_2=0.09$ мкм.

При энергии ионов бора $E=100$ кэВ параметры распределений в каждой среде заданной структуры $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2\text{-Si}$ соответственно равны:

$$\begin{aligned} R_{p1} &= 1.860 \cdot 10^{-5} \text{ см}; & DR_{p1} &= 4.01 \cdot 10^{-6} \text{ см}; \\ R_{p2} &= 2.467 \cdot 10^{-5} \text{ см}; & DR_{p2} &= 5.29 \cdot 10^{-6} \text{ см}; \\ R_{p3} &= 2.964 \cdot 10^{-5} \text{ см}; & DR_{p3} &= 7.33 \cdot 10^{-6} \text{ см}. \end{aligned}$$

Для решения задачи далее может быть использована программа PR1, написанная на языке Паскаль и реализованная в системе MS-DOS. Программа PR1 в интерактивном режиме позволяет рассчитать профиль и глубины залегания р-п переходов в многослойной структуре с любым числом слоев после ионной имплантации.

```

Program PR1;      {МЕТОД ПОДБОРА ДОЗ}
  const pi=3.1415926;
  var n,x:array[0..10,0..20] of double;
      d,d1,dd,ni,xj1,xj2:array[0..10] of double;
      rp,rp1,drp1,q:array[0..10] of double;
      p,doza,h,xmax,u,u1,rpm:double;
      k,m,i,j:integer; t:text; o,tip:char;
  function fn1(z:double):double;
  begin
    z:=z-dd[i-1]-rp[i]; z:=z/drp[i]*z/drp[i]/2;

```

```

    fn1:=doza*exp(-z)/(sqrt(2*pi)*drp[i])
end;
function erf(z:double):double; { вычисление erf-функции }
var s,sx:double; j:integer;
begin
    sx:=z; s:=z; j1:=1;
    repeat
        sx:=-sx*z/(2*j1+1)*z/j1*(2*j1-1); s:=s+sx; j1:=j1+1
    until abs(sx)<1e-10;
    erf:=s*2/sqrt(pi); end;
procedure delen; { метод бисекций }
var a,b,c,f:double;
begin
    a:=0.0; b:=xmax; u:=xmax/2;
    repeat
        u:=(a+b)/2; f:=(u-rp[i])/sqrt(2)*drp[i]; c:=erf(f);
        if c>(2*q[i-1]/doza-1) then a:=u else b:=u;
        f:=abs((c-(2*q[i-1]/doza-1))/c)
    until f<=0.001; end;
BEGIN
    writeln(' Исходная структура '); writeln(' ');
    write(' Число слоев? '); readln(m); writeln(' ');
    for i:=1 to m do begin
        writeln(' Параметры', i:2, ' слоя:');
        write(' Тип исходной примеси (n/p) или z, если ');
        write(' слой диэлектрика'); readln(tip);
        if tip<>'z' then begin
            write(' концентрация примеси в см-3? '); readln(ni[i]);
            end else ni[i]:=0.0;
        write(' нормальный пробег в см? '); readln(rp[i]);
        write(' сттрагглинг нормального пробега в см? ');
        readln(drp[i]);
        if i<>m then begin
            write(' толщина слоя в см? '); readln(d[i]) end;
            writeln(' ') end;
    write(' Доза имплантации в мкКл/см2? '); readln(doza);
    { данные контрольного примера:
    m:=3;
    ni[1]:=0.0; ni[2]:=0.0; ni[3]:=5.95e14;
    rp[1]:=1.86e-5; drp[1]:=4.01e-6;
    rp[2]:=2.467e-5; drp[2]:=5.29e-6;
    rp[3]:=2.96e-5; drp[3]:=7.33e-6;
    d[1]:=7e-6; d[2]:=2e-6; doza:=5.0;}

    doza:=6.25e12*doza; rpm:=rp[1];
    for i:=2 to m do if rp[i]>rpm then begin rpm:=rp[i]; j:=i end;

```

```

xmax:=rpm+6*drp[j]; d[0]:=0.0; d[m]:=xmax;
for i:=1 to i:=m-1 do d[i]:=d[i-1]+d[i];
dd[0]:=0.0: d1[1]:=rp[2]+(d[1]-rp[1])*drp[2]/drp[1];
dd[1]:=d1[1]-d[1];
q[1]:=doza/2*(1+erf((d[1]-rp[1])/(sqrt(2)*drp[1])));
for i:=3 to m-1 do begin
  rp1[i-1]-(d1[i-2]-d[i-2]-d[i-2]);
  q[i-1]:=erf((d[i-2]-rp1[i-1])/(sqrt(2)*drp[i-1]));
  q[i-1]:= erf((d[i-1]-rp1[i-1])/(sqrt(2)*drp[i-1]))-q[i-1];
  q[i-1]:=q[i-2]+dosa/2*q[i-1];
  delen; d1[i-1]:=u; dd[i-1]:=d1[i-1]-d[i-1] end;
for i:=1 to m do begin
  if i<>m then h:=(d[i]-d[i-1])/10 else h:=(xmax-d[i-1])/20;
  if i<>m then k:=10 else k:=20;
  for j:=0 to k do begin
    x[i,j]:=d[i-1]+h*j; n[i,j]:=fn1(x[i,j])-ni[i] end;
xj1[i]:=-1; xj2[i]:=-1; p=-1;
  for j:=1 to k do begin
    if ((n[i,j-1]<=0.0) and (n[i,j]>=0)) then xj1[i]:=(x[i,j-1]+x[i,j])/2;
    if ((n[i,j-1]>=0.0) and (n[i,j]<=0)) then
      xj2[i]:=(x[i,j-1]+x[i,j])/2;
    if (p<>xj1[i]) then begin
      if xj1[i]>=0.0 then begin p:= xj1[i] end end;
      if (p<>xj2[i]) then begin
        if xj2[i]>=0.0 then begin p:= xj2[i] end end;
      end end;
  writeln (' ');
  writeln (' таблица распределения примеси: ');
  writeln (' ');
  writeln (' x,мкм N,см-3 lg | N | ');
  for i:=1 to m do writeln (' ');
  writeln (' В ',i:2, '-ом слое: ');
  if i<> m then k:=10 else k:=20;
  for j:=0 to k do
writeln (x[i,j]*1e4:6:2, ' ,n[i,j]:9, ' ,ln(abs(n[i,j])):9);
  if ni[i]<>0.0 then if (xj1[i]>=0.0) and (xj2[i]>=0.0) then
writeln (' два p-n перехода на глубинах ',xj1[i]*1e4:5:2, ' мкм и
',xj1[i]*1e4:5:2, ' мкм)
else if xj2[i]>=0.0 then
writeln (' один p-n переход на глубине ',xj1[i]*1e4:5:2, ' мкм);
END.

```

В результате решения поставленной задачи с использованием данного программного обеспечения получены следующие результаты и построен график (рис.2).

ТАБЛИЦА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИМЕСИ

<i>x, мкм</i>	<i>N, см-3</i>	<i>Lg N/</i>
В 1-ом слое:		
0.00	9.36e+13	3.22e+01
0.01	2.07e+14	3.30e+01
0.01	4.45e+14	3.37e+01
0.02	9.26e+14	3.45e+01
0.03	1.87e+15	3.52e+01
0.04	3.66e+15	3.58e+01
0.04	6.96e+15	3.65e+01
0.05	1.28e+16	3.71e+01
0.06	2.30e+16	3.77e+01
0.06	3.98e+16	3.82e+01
0.07	6.70e+16	3.87e+01
в 2-ом слое:		
0.07	5.08e+16	3.85+01
0.07	5.66e+16	3.86e+01
0.07	6.30e+16	3.87e+01
0.08	7.00e+16	3.88e+01
0.08	7.78e+16	3.89e+01
0.08	8.62e+16	3.90e+01
0.08	9.54e+16	3.91e+01
0.08	1.05e+17	3.92e+01
0.09	1.16e+17	3.93e+01
0.09	1.28+17	3.94e+01
0.09	1.41e+17	3.95e+01
в 3-ем слое:		
0.09	4.58e+16	3.84e+01
0.12	1.44e+17	3.95e+01
0.15	3.73e+17	4.05e+01
0.19	7.93e+17	4.12e+01
0.22	1.39e+18	4.18e+01
0.25	2.00e+18	4.21e+01
0.28	2.37e+18	4.23e+01
0.32	2.32e+18	4.23e+01
0.35	1.86e+18	4.21e+01
0.38	1.23e+18	4.17e+01
0.41	6.74e+17	4.11e+01
0.45	3.03e+17	4.03e+01
0.48	1.12e+17	3.93e+01
0.51	3.36e+16	3.81e+01
0.54	8.00e+15	3.66e+01
0.57	1.18e+15	3.47e+01
0.61	-2.92e+14	3.33e+01

0.64	-5.53e+14	3.39e+01
0.67	-5.9e+14	3.40e+01
0.70	-5.95e+14	3.40e+01
0.74	-5.95e+14	3.40e+01

Один p-n переход на глубине 0.59 мкм в третьем слое.

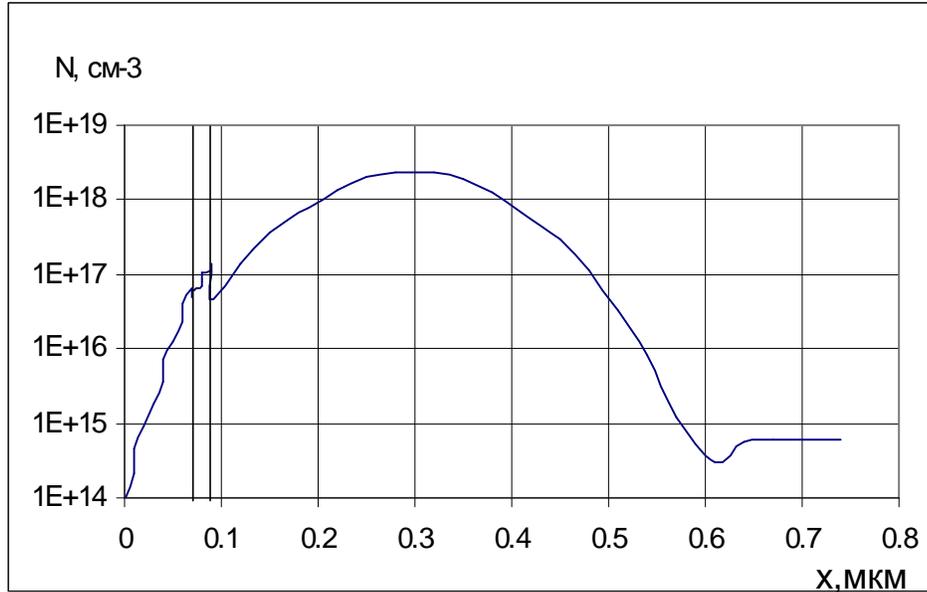


Рис. 2 Распределение в структуре $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2\text{-Si}$ бора, внедренного с энергией 100 кэВ и дозой 5 мкКл/см^2 в кремниевую подложку марки КЭФ7.5

Вопросы

1. С какой целью наносятся пассивирующие пленки при проведении ионной имплантации?
2. Может ли быть полностью устранен эффект каналирования аморфизацией окисными пленками?
3. В чем суть метода подбора доз?
4. Какие функции распределений могут быть использованы в методе подбора доз?
5. В каком случае величина сдвига Dd_i равна нулю?
6. Может ли величина сдвига Dd_i иметь отрицательное значение?
7. От чего зависит величина и знак сдвига Dd_i ?
8. Вывести рекуррентные соотношения (8) для случая построения профилей ионно-имплантированных примесей в многослойных структурах методом подбора доз с усеченными гауссовскими распределениями.
9. Вывести формулу для расчета глубин залегания p-n переходов в случае их формирования в i -ом слое ионно-имплантированной многослойной структуры, распределение примеси в которой находится методом подбора доз с неусеченными гауссианами.

10. Вывести формулу для расчета глубин залегания р-п переходов в случае их формирования в i -ом слое ионно-имплантированной многослойной структуры, распределение примеси в которой находится методом подбора доз с усеченными гауссианами.
11. Как могут быть найдены глубины залегания р-п переходов в случае их формирования в i -ом слое ионно-имплантированной многослойной структуры, распределение примеси в которой находится методом подбора доз с распределениями Пирсон-4?
12. Как могут быть найдены глубины залегания р-п переходов в случае их формирования в i -ом слое ионно-имплантированной многослойной структуры, распределение примеси в которой находится методом подбора доз с сопряженными гауссианами?
13. Почему на границах раздела сред наблюдаются скачки концентрации?
14. Когда скачок концентрации ионно-имплантированных примесей на границе раздела слоев положительный (отрицательный)?
15. В каком случае скачок концентрации ионно-имплантированных примесей на границе раздела двух сред равен нулю?

2. Построение ионно-имплантированных профилей в двухслойных структурах методом составных профилей

Для теоретического построения профилей в двухслойных структурах может быть использован метод составных профилей. Пусть отдельно известны профили распределения ионов в слоях окиси кремния SiO_2 и кремния Si при легировании дозой Q (рис. 3).

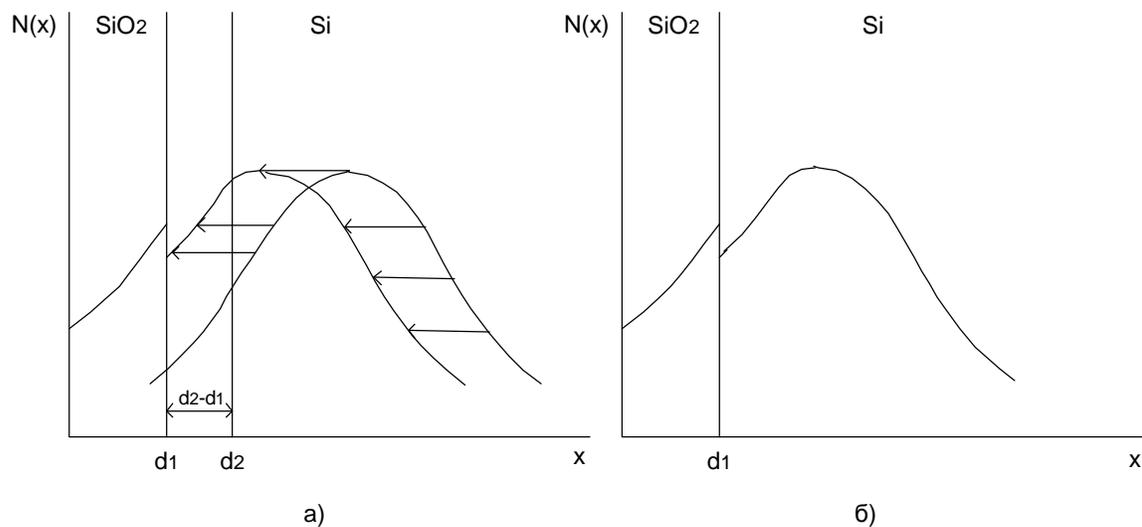


Рис. 3 Профили распределения имплантированных ионов в средах SiO_2 и Si (а) и результирующий профиль (б)

На профиле SiO_2 проведем сечение на глубине d_1 , равной толщине слоя SiO_2 . Дозы имплантированных ионов слева и справа от сечения равны соответственно Q_1 и Q_2 .

На профиле в кремнии проведем сечение на глубине d_2 так, чтобы количество ионов слева Q_1' было равно Q_1 , а количество ионов справа $Q_2'=Q_2$. Составив теперь части профилей Q_1' и Q_2' , получим искомый профиль (рис.2,б).

Поскольку легирование области кремния ведется через слой SiO_2 , то имплантация проводится при достаточно высоких энергиях, при которых для основных примесей выполняется условие $R_p \gg 3\Delta R_p$. Следовательно, в приближении неусеченной гауссианы

$$Q_1 = \int_{-\infty}^{d_1} N_1(x) dx = \frac{Q}{\sqrt{2p\Delta R_{p1}}} \int_{-\infty}^{d_1} \exp\left[-\frac{(x-R_{p1})^2}{2\Delta R_{p1}^2}\right] dx = \frac{Q}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \frac{d_1 - R_{p1}}{\sqrt{2}\Delta R_{p1}}\right),$$

$$Q_1' = \frac{Q}{\sqrt{2p\Delta R_{p2}}} \int_{-\infty}^{d_2} \exp\left[-\frac{(x-R_{p2})^2}{2\Delta R_{p2}^2}\right] dx = \frac{Q}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \frac{d_2 - R_{p2}}{\sqrt{2p\Delta R_{p2}}}\right),$$

где R_{p1} , R_{p2} - нормальные пробеги ионов в слоях SiO_2 и Si соответственно; $\bullet R_{p1}$, $\bullet R_{p2}$ - стратглинги пробегов в слоях SiO_2 и Si соответственно.

Из равенства $Q_1=Q_1'$ следует

$$\operatorname{erf} \frac{d_1 - R_{p1}}{\sqrt{2}\Delta R_{p1}} = \operatorname{erf} \frac{d_2 - R_{p2}}{\sqrt{2}\Delta R_{p2}},$$

откуда

$$\frac{d_1 - R_{p1}}{\sqrt{2}\Delta R_{p1}} = \frac{d_2 - R_{p2}}{\sqrt{2}\Delta R_{p2}}, \text{ и } d_2 = R_{p2} + (d_1 - R_{p1}) \frac{\Delta R_{p2}}{\Delta R_{p1}}.$$

В области SiO_2 профиль описывается гауссианой

$$N_1(x) = \frac{Q}{\sqrt{2p\Delta R_{p1}}} \exp\left[-\frac{(x-R_{p1})^2}{2\Delta R_{p1}^2}\right], \quad 0 \leq x \leq d_1. \quad (9)$$

В области кремния вследствие сдвига исходного распределения на отрезок $d_2 - d_1$ распределение имеет вид

$$N_2(x) = \frac{Q}{\sqrt{2p\Delta R_{p2}}} \exp\left[-\frac{(x+(d_2-d_1)-R_{p2})^2}{2\Delta R_{p2}^2}\right] = \frac{Q}{\sqrt{2p\Delta R_{p2}}} \times$$

$$\times \exp\left[-\frac{(x-d_1+(d_1-R_{p1})\frac{\Delta R_{p2}}{\Delta R_{p1}})^2}{2\Delta R_{p2}^2}\right], \quad x \geq d_1. \quad (10)$$

Погрешность аппроксимации распределения во втором слое составляет величину

$$h = \frac{R_{p2} - R_{p1} \frac{\Delta R_{p2}}{\Delta R_{p1}}}{R_{p2}}. \quad (11)$$

Если имплантируется структура с кремниевой подложкой противоположного типа проводимости по отношению к типу легирующей примеси, то возможно возникновение одного или двух р-п переходов.

Проанализируем условия формирования р-п переходов, глубины залегания $x_{j1,2}$ которых находятся из условия

$$N_2(x_{j1,2}) - N_{ucx} = 0,$$

где N_{ucx} - концентрация исходной примеси в слое кремния. Тогда

$$x_{j1,2} = d_1 - (d_1 - R_{p1}) \frac{\Delta R_{p2}}{\Delta R_{p1}} \pm \Delta R_{p2} \sqrt{2 \ln \frac{Q}{\sqrt{2p} \Delta R_{p2} N_{ucx}}}. \quad (12)$$

Случай формирования двух р-п переходов изображен на рис.4

Общим условием формирования р-п переходов является неравенство $N_2(R_m) > N_{ucx}$, т. е. концентрация внедренной примеси в точке максимума R_m должна быть больше концентрации исходной примеси N_{ucx} в слое кремния. Точка максимума R_m определяется из аналитического выражения (10):

$$R_m = d_1 - (d_1 - R_{p1}) \frac{\Delta R_{p2}}{\Delta R_{p1}}, \quad (13)$$

а значение $N_2(R_m) = \frac{Q}{\sqrt{2p} \Delta R_{p2}}$.

Далее возможны следующие варианты.

1. $R_m < d_1$, т. е. максимум распределения находится в слое SiO_2 , и в этом случае первый переход отсутствует, но:
 - а) если $x_{j2} < d_1$, то это физически означает, что нет и второго р-п перехода;
 - б) если $x_{j2} \leq d_1$, то формируется второй р-п переход на глубине x_{j2} .
2. $R_m = d_1$, т. е. максимум распределения находится на границе раздела $\text{SiO}_2\text{-Si}$, и тогда формируется один р-п переход на глубине x_{j2} .
3. $R_m > d_1$, т. е. максимум распределения находится в слое кремния, и в этом случае:
 - а) если $N_2(d_1) > N_{ucx}$, то формируется один р-п переход на глубине x_{j2} ;
 - б) если $N_2(d_1) \leq N_{ucx}$, то формируются два р-п перехода с глубинами залегания x_{j1} и x_{j2} .

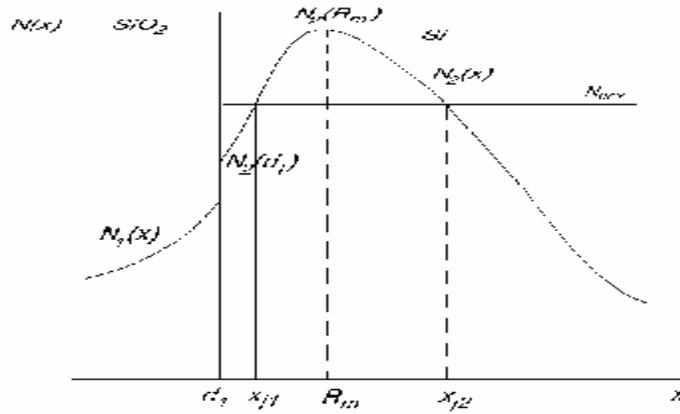


Рис. 4. Распределение примесей в двухслойной структуре SiO₂-Si в случае формирования двух p-n переходов

Метод составных профилей позволяет моделировать и скачок концентрации на границе раздела SiO₂-Si, который возникает вследствие разности тормозных способностей слоев SiO₂ и Si.

Задания

1. Рассчитать концентрационный профиль при имплантации структуры SiO₂-Si с толщиной окисла 0,05 мкм и подложкой собственного кремния ионами бора с энергией 75 кэВ и дозой $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.
2. Рассчитать концентрационный профиль и глубину залегания p-n перехода при имплантации структуры SiO₂-Si с окислом толщиной 0.1 мкм и подложкой кремния марки КДБ12 ионами фосфора с энергией 100 кэВ и дозой 0.3 мкКл/см^2 .

Построить графики распределения ионно-имплантированного фосфора в координатах $\ln N(x) - x$.

3. Структура SiO₂-Si с окислом толщиной 0.1 мкм и на кремниевой подложке марки КДБ4.5 имплантируется ионами мышьяка с дозой 1 мкКл/см^2 . Определить минимальную энергию, при которой формируются два p-n перехода. Определить диапазон энергий, при которых формируется один p-n переход. При каких энергиях не формируются p-n переходы?
4. Провести численный эксперимент по исследованию зависимости коэффициента пропускания T при внедрении ионов сурьмы в структуру SiO₂-Si:

$$T = \frac{Q_2}{Q} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \frac{d_1 - R_{p1}}{\sqrt{2\Delta R_{p1}}},$$

где Q_2 – количество ионов, прошедших в слой кремния:

- а) от энергии в диапазоне 10÷150 кэВ при дозе имплантации 10 мкКл/см^2 и толщине окисла 0.03 мкм;

- б) от дозы имплантации в диапазоне $1 \div 100 \text{ мкКл/см}^2$ при энергии 80 кэВ и толщине окисла 0.03 мкм ;
- в) от толщины окисла в диапазоне $0.01 \div 0.1 \text{ мкм}$ при энергии 80 кэВ и дозе имплантации 10 мкКл/см^2 .
5. Исследовать зависимость модального пробега ионов мышьяка при имплантации кремниевой подложки с термическим окислом:
- а) от энергии в диапазоне $10 \div 120 \text{ кэВ}$ при толщинах окисла $0.02, 0.04, 0.06, 0.08$ и 0.12 мкм ;
- в) от толщины окисла в диапазоне $0.02 \div 0.12 \text{ мкм}$ при $40, 80, 120 \text{ кэВ}$.

Построить зависимости:

$$\frac{|R_m - R_p|}{R_p} \cdot 100 = f_d(E), \quad \frac{|R_m - R_p|}{R_p} \cdot 100 = f_E(d).$$

6. Исследовать зависимость величины скачка концентрации на границе раздела структуры $\text{SiO}_2\text{-Si}$ при имплантации ионами фосфора:
- а) от энергии в диапазоне $20 \div 150 \text{ кэВ}$ при дозе 1 мкКл/см^2 и толщине окисла 0.07 мкм ;
- б) от толщины окисла в диапазоне $0.02 \div 0.12 \text{ мкм}$ при энергии 70 кэВ и дозе 1 мкКл/см^2 .
- в) от дозы имплантации в диапазоне $0.5 \div 100 \text{ мкКл/см}^2$.
7. Структура $\text{SiO}_2\text{-Si}$ с толщиной окисла 0.01 мкм и кремниевой подложкой марки КЭФ4 имплантируется бором с энергией 75 кэВ и дозой 10 мкКл/см^2 . Методом составных профилей рассчитать глубину залегания p-n перехода.

Как и на сколько изменится глубина залегания сформированного p-n перехода, если считать, что параметры распределения ионов бора в окисле совпадают с параметрами распределения ионов бора кремнии, т.е. $R_{p1} = R_{p2}$ и $DR_{p1} = DR_{p2}$?

8. Оценить погрешность аппроксимации распределения концентрации внедренного мышьяка в слое кремния по методу составных профилей в диапазоне энергий от $10 \div 200 \text{ кэВ}$ при дозе имплантации 10 мкКл/см^2 .
9. Кремниевая пластина марки КЭФ2 с термически выращенным слоем окисла толщиной 0.1 мкм облучается ионами бора с дозой $6.25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Используя метод энергетических потерь, оценить, при каких энергиях:
- а) p-n переходы отсутствуют;
- б) формируется один p-n переход;
- в) формируются два p-n перехода.
10. Провести численные эксперименты методом энергетических потерь по исследованию коэффициента пропускания $T = \frac{Q_2}{Q}$ (Q_2 – количество ионов, прошедших в слой кремния) при внедрении ионов сурьмы в двухслойную структуру $\text{SiO}_2\text{-Si}$:
- а) от энергии в диапазоне $20 \div 120 \text{ кэВ}$ при дозе 20 мкКл/см^2 ;
- б) от дозы имплантации в диапазоне $1 \div 100 \text{ мкКл/см}^2$ при энергии 100 кэВ и толщине окисла 0.04 мкм ;

- в) от толщины слоя SiO_2 в диапазоне $0.005 \div 0.5$ мкм при энергии имплантации 100 кэВ и дозе 20 мкКл/см².
11. При описании ионно-имплантированных профилей методом энергетических потерь, исследовать зависимости модального пробега ионов бора при легировании двухслойной структуры $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Si}$:
- а) от энергии в диапазоне $10 \div 120$ кэВ при толщине окисла 0.1 мкм;
- б) от толщины окисла в диапазоне $0.01 \div 0.1$ мкм при энергии 60 кэВ.

Вопросы

1. Записать функцию распределения примеси и нарисовать концентрационный профиль при ионной имплантации двухслойной структуры $\text{SiO}_2\text{-Si}$ для случая изотипного легирования.
2. Записать функцию распределения примеси и нарисовать концентрационный профиль при ионной имплантации двухслойной структуры $\text{SiO}_2\text{-Si}$ в случае, когда подложка легирована примесью противоположного типа с концентрацией $N_{исх}$.
3. Какие условия необходимы для образования р-п перехода при ионном легировании двухслойной структуры $\text{SiO}_2\text{-Si}$? Возможно ли образование двух р-п переходов?
4. Объясните причину возникновения скачка концентрации внедренной примеси на границе раздела двухслойной структуры $\text{SiO}_2\text{-Si}$.
5. Нарисуйте распределение примеси в структуре $\text{SiO}_2\text{-Si}$ при внедрении бора (фосфора).
6. Показать, что слой SiO_2 обладает коэффициентом пропускания T :

$$T = \frac{Q_2}{Q} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \frac{d_1 - R_{p1}}{\sqrt{2} \Delta R_{p1}},$$

где Q_2 - число ионов, прошедших через слой SiO_2 в кремний.

7. Как зависит от дозы имплантации модальный пробег?

3. Построение ионно-имплантированных профилей в трехслойных структурах методом составных профилей

Для построения профилей распределения ионно-имплантированных примесей в многослойных структурах может быть использован любой из методов, но с каждым новым слоем сложность расчетов значительно увеличивается.

На практике легирование более чем трехслойных структур встречается крайне редко. При этом, как правило, практический интерес представляет профиль распределения примеси в слое полупроводника, а не в защитных слоях. Учитывая это, рассмотрим ионное легирование трехслойной структуры типа $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2\text{-Si}$, применив метод составных профилей, рассмотренный в п. 2.

Пусть дана структура (рис.5), состоящая из кремниевой подложки с нанесенными на ее поверхность защитными слоями окисла SiO_2 толщиной

d_2 и нитрида кремния Si_3N_4 толщиной d_1 . При заданной энергии внедряемых ионов имеем R_p, R_{p1}, R_{p2} - нормальные пробеги соответственно для кремния, $\text{Si}_3\text{N}_4, \text{SiO}_2$; $\Delta R_p, \Delta R_{p1}, \Delta R_{p2}$ - среднеквадратичные отклонения соответственно для кремния, $\text{Si}_3\text{N}_4, \text{SiO}_2$.

Поскольку распределение в двухслойном диэлектрике можно характеризовать количеством остановившихся в нем ионов, то идея расчета профиля в кремнии сводится к применению метода составных профилей в двухслойной структуре $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Si}$, в которой диэлектрический слой SiO_2 заменяется эквивалентным по своим тормозным способностям слоем Si_3N_4 толщиной d_2' . Учитывая, что чем больше R_p , тем толще слой d , необходимый для реализации заданной тормозной способности, запишем

$$\frac{d_2'}{d_2} = \frac{R_{p1}}{R_{p2}} = g, \text{ или } d_2' = d_2 g.$$

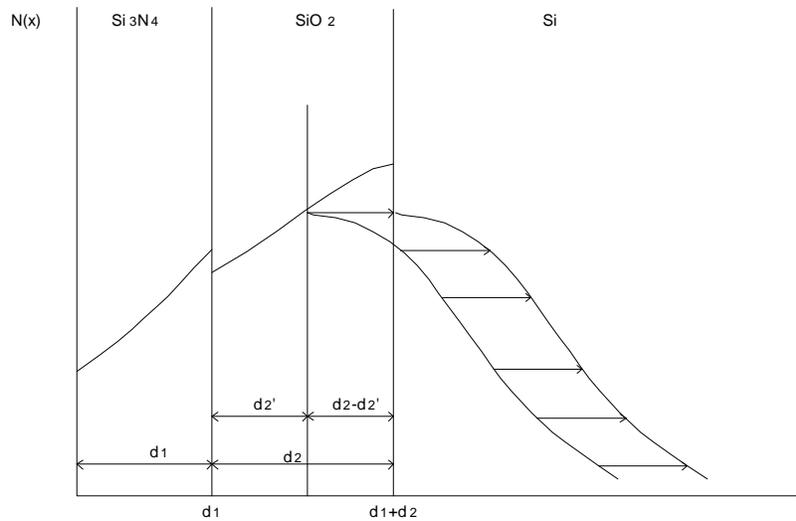


Рис. 5. Построение концентрационного профиля в трехслойной структуре $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2\text{-Si}$ методом составных профилей

Следовательно, тормозная способность слоя Si_3N_4 толщиной $d = d_1 + d_2' = d_1 + d_2 g$ равна тормозной способности двухслойного диэлектрика $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ с толщиной $d_1 + d_2$.

Согласно методу составных профилей, распределение ионно-имплантированной примеси в структуре $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Si}$ будет

$$N(x') = \begin{cases} \frac{Q}{\sqrt{2p\Delta R_{p1}}} e^{-\frac{(x'-R_{p1})^2}{2\Delta R_{p1}^2}}, & x' \leq d, \\ \frac{Q}{\sqrt{2p\Delta R_p}} e^{-\frac{\left(x'-d+(d-R_{p1})\frac{\Delta R_p}{\Delta R_{p1}}\right)^2}{2\Delta R_p^2}}, & x' \geq d. \end{cases} \quad (14)$$

Преобразование координат при этом имеет вид

$$\begin{aligned}x' &= x, & x &\leq d_1; \\x' &= d + (x - d_1)g, & d_1 &\leq x \leq d_1 + d_2; \\x' &= x - d_2(1 - g), & x &\geq d_1 + d_2.\end{aligned}$$

Анализ условий возникновения и формирования р-п переходов в данной задаче аналогичен случаям, рассмотренным в п.2.

Задание

1. На кремниевой подложке марки КЭФ4 сформированы слои окисла толщиной 0,03 мкм и нитрида кремния толщиной 0,1 мкм. Рассчитать концентрационный профиль и оценить глубину залегания р-п перехода при внедрении в структуру $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2\text{-Si}$ ионов бора с энергией 100 кэВ и дозой 5 мкКл/см².

Методом составных профилей построить полученный концентрационный профиль в полулогарифмических координатах $\lg N(x)$ - x .

Вопросы

1. Записать функцию распределения примеси и нарисовать концентрационный профиль при ионной имплантации трехслойной структуры $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2\text{-Si}$ для случая изотипного легирования.
2. Записать функцию распределения примеси и нарисовать концентрационный профиль при ионной имплантации трехслойной структуры $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2\text{-Si}$ в случае, когда подложка легирована примесью противоположного типа по отношению к типу внедряемой примеси.
3. Какие условия необходимы для образования р-п переходов в рассматриваемой структуре при ионном легировании?
Нарисуйте концентрационные профили:
 - а) для случая отсутствия р-п переходов;
 - б) для случаев формирования одного р-п перехода;
 - в) для случая формирования двух р-п переходов.
4. Запишите аналитические выражения для нахождения точки максимума и максимальной концентрации в условиях данной задачи.
5. Выведите формулы для вычисления глубин залегания р-п переходов.
6. Выведите формулу для нахождения толщины "скрытого слоя" в условиях данной задачи.

4. Построение ионно-имплантированных профилей в двухслойных структурах методом энергетических потерь

Построение профилей ионно-имплантированных примесей в многослойных структурах методом энергетических потерь позволяет при

незначительных затратах машинного времени достигнуть удовлетворительной точности, сравнимой с точностью моделирования методами Монте-Карло и кинетического уравнения Больцмана.

Рассмотрим метод энергетических потерь на примере двухслойной структуры типа $\text{SiO}_2\text{-Si}$. Пусть на поверхности данной структуры с толщиной окисла d нормально падает моноэнергетический пучок ионов с энергией E_0 и дозой Q .

Поскольку легирование области кремния проводится через слой SiO_2 , то необходимы достаточно высокие энергии, при которых в большинстве случаев выполняется условие $3\Delta R_p < R_p$, следовательно, распределение примеси для обеих сред может быть описано неусеченной гауссианой.

В слое SiO_2 профиль $n_1(x)$ будет гауссовским (рис.6)

$$n_1(x) = \frac{Q}{\sqrt{2p}\Delta R_{p1}(E_0)} e^{-\frac{(x-R_{p1}(E_0))^2}{2\Delta R_{p1}^2(E_0)}}, \quad 0 \leq x \leq d, \quad (15)$$

где $R_{p1}(E_0)$, $\Delta R_{p1}(E_0)$ - нормальный пробег и среднеквадратичное отклонение при энергии E_0 для первой среды.

На границу раздела $\text{SiO}_2\text{-Si}$ с координатой d вследствие статистического характера энергетических потерь приходит немонотонный пучок ионов с энергиями из диапазона $0 \leq E \leq E_0$ и функцией распределения $p(E, d)$.

Функция распределения $p(E, d)$ есть вероятность того, что ион, внедренный в мишень с начальной энергией E_0 , на глубине d будет иметь энергию E . Функция $p(E, d)$ удовлетворяет условию нормировки на число ионов, достигших границы раздела $\text{SiO}_2\text{-Si}$:

$$\int_0^{E_0} p(E, d) dE = \int_d^\infty n_1(x) dx = \frac{Q}{\sqrt{2p}\Delta R_{p1}(E_0)} \int_d^\infty e^{-\frac{(x-R_{p1}(E_0))^2}{2\Delta R_{p1}^2(E_0)}} dx.$$

Проведя замену переменных $z = \frac{x - R_{p1}(E_0)}{\sqrt{2\Delta R_{p1}(E_0)}}$, получим

$$\int_0^{E_0} p(E, d) dE = \frac{Q}{2} \operatorname{erfc} \frac{d - R_{p1}(E_0)}{\sqrt{2\Delta R_{p1}(E_0)}}. \quad (16)$$

В слое кремния профиль $n_2(x)$ находится суперпозицией гауссиан, соответствующих непрерывному ряду значений энергий из диапазона $0 \leq E \leq E_0$ с соответствующими дозами $dQ = p(E, d)dE$:

$$n_2(x) = \frac{1}{\sqrt{2p}} \int_0^{E_0} \frac{p(E, d)}{\Delta R_{p2}(E)} \cdot e^{-\frac{(x-R_{p2}(E))^2}{2\Delta R_{p2}^2(E)}} dE. \quad (17)$$

Функцию распределения $p(E, d)$ можно с приемлемой точностью определить по статистике пробегов, исходя из следующих соображений.

Во-первых, функция $p(0,d)$ есть распределение остановившихся ионов (их энергия стала равной нулю) по глубинам d , т. е. она должна совпадать с относительной вероятностью $p'(d)$ остановки иона на глубине d в первой среде

$$p(0,d) = p'(d) = \frac{n_1(d)}{Q} = \frac{1}{\sqrt{2p}\Delta R_{p_1}(E_0)} \cdot e^{-\frac{(d-R_{p_1}(E_0))^2}{2\Delta R_{p_1}^2(E_0)}}. \quad (18)$$

Во-вторых, на поверхности $x=0$ все ионы имеют энергию E_0 , т. е. распределение $p(E,0)$ есть d -функция

$$p(E,0) = d(E - E_0) = \begin{cases} 1, & E = E_0, \\ 0, & E \neq E_0. \end{cases} \quad (19)$$

Для промежуточных значений энергий $0 < E < E_0$ необходимо получить такую функцию распределения ионов по глубинам, чтобы при $E \rightarrow 0$ и $E \rightarrow E_0$ она переходила в уже известные $p(0,d)$ и $p(E,0)$. Естественно предположить, что искомая функция распределения будет гауссовской с максимумом на промежуточной глубине

$$R_{p_1}(E) = R_{p_1}(E_0) \left(1 - \frac{E}{E_0}\right)$$

со среднеквадратичным отклонением

$$\Delta R_{p_1}(E) = \Delta R_{p_1}(E_0) \left(1 - \frac{E}{E_0}\right).$$

Таким образом, можно построить поверхность распределения $p(E,d)$ по энергиям ионов, прошедших расстояние d (рис.7).

Если через заданную координату d провести плоскость, перпендикулярную плоскости pOE , то эта плоскость пересечет поверхность распределения пробегов по искомой кривой распределения по энергиям. В общем случае кривая $p(E,d)$ не будет гауссовской. Если $d \rightarrow 0$, то гауссовское распределение достаточно верно, но вблизи $R_{p_1}(E_0)$ функцию $p(E,d)$ необходимо, по крайней мере, аппроксимировать сопряженной гауссианой, и тогда функция распределения ионов по энергиям будет иметь вид

$$p(E,d) = \begin{cases} p_0 e^{-\frac{(E-E_c)^2}{2\Delta E_c^2}}, & 0 \leq E \leq E_c; \\ p_0 e^{-\frac{(E-E_c)^2}{2\Delta E_+^2}}, & E_c \leq E \leq E_0, \end{cases} \quad (20)$$

где p_0 - нормирующий множитель; $E_c, \Delta E_-, \Delta E_+$ - параметры сопряженного гауссовского распределения по энергиям.

Параметры распределения по энергиям находятся по статистическим параметрам пробегов $R_{p_1}(E_0)$ и $\Delta R_{p_1}(E_0)$ построением проекций максимумов и среднеквадратичных отклонений на плоскость $E0d$ (рис.8).

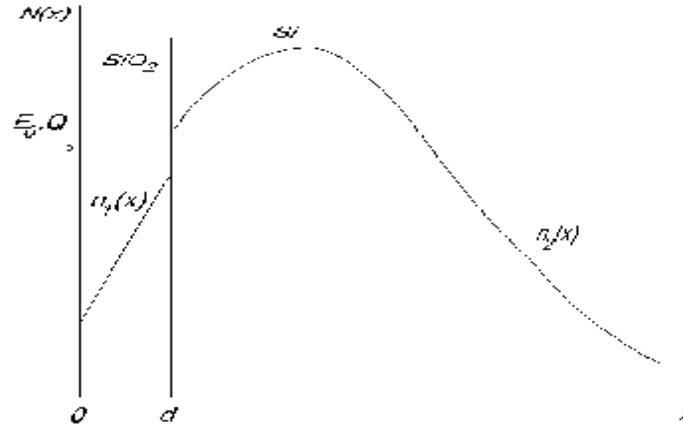


Рис.6. Распределение примесей при имплантации двухслойных мишеней

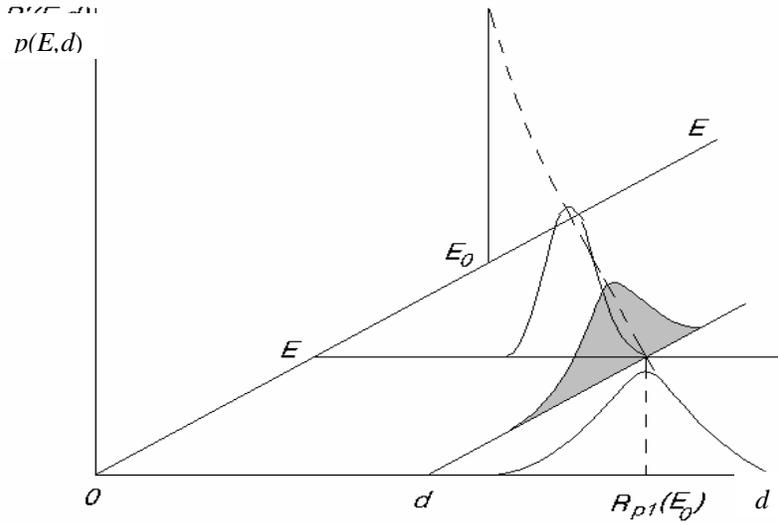


Рис. 7. Поверхность распределения вероятности пробегов при ионном внедрении

Исходя из геометрических соображений, получим

$$E_c = E_0 \left(1 - \frac{d}{R_{p1}(E_0)} \right); \quad E_{c+} = E_0 \left(1 - \frac{d}{R_{p1}(E_0) + \Delta R_{p1}(E_0)} \right);$$

$$E_{c-} = E_0 \left(1 - \frac{d}{R_{p1}(E_0) - \Delta R_{p1}(E_0)} \right).$$

Тогда ΔE_- и ΔE_+ будут определены как

$$\Delta E_+ = E_{c+} - E_c = \frac{E_0 d \Delta R_{p1}(E_0)}{R_{p1}(E_0)(R_{p1}(E_0) + \Delta R_{p1}(E_0))};$$

$$\Delta E_- = E_{c-} - E_c = \frac{E_0 d \Delta R_{p1}(E_0)}{R_{p1}(E_0)(R_{p1}(E_0) - \Delta R_{p1}(E_0))}. \quad (21)$$

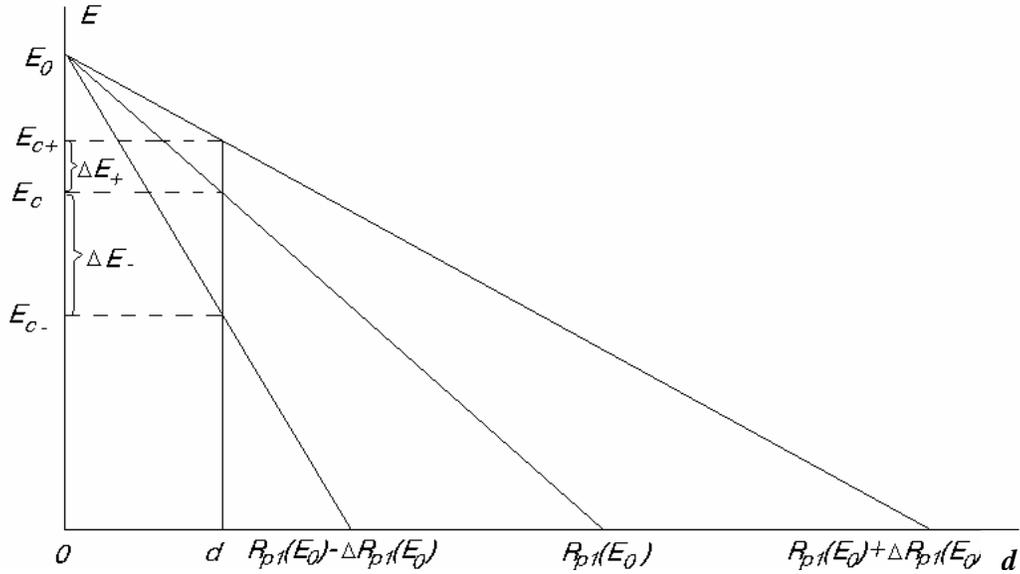


Рис.8. Проекция максимумов и среднеквадратичных отклонений на плоскость $E0d$

Постоянная p_0 определяется из условия нормировки на число ионов, прошедших первую среду,

$$\int_0^{E_0} p(E, d) dE = \sqrt{\frac{p}{2}} p_0 \left[\Delta E_- \operatorname{erfc} \frac{E_c}{\sqrt{2\Delta E_-}} + \Delta E_+ \operatorname{erfc} \frac{E_0 - E_c}{\sqrt{2\Delta E_+}} \right].$$

Учитывая, что число ионов, достигших границы d , равно $\frac{Q}{2} \operatorname{erfc} \frac{d - R_{p1}(E_0)}{\sqrt{2\Delta R_{p1}(E_0)}}$, получим

$$p_0 = \frac{\frac{Q}{2} \operatorname{erfc} \frac{d - R_{p1}(E_0)}{\sqrt{2\Delta R_{p1}(E_0)}}}{\Delta E_- \operatorname{erfc} \frac{E_c}{\sqrt{2\Delta E_-}} + \Delta E_+ \operatorname{erfc} \frac{E_0 - E_c}{\sqrt{2\Delta E_+}}}. \quad (22)$$

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, которые могут быть рассчитаны по методу, изложенному в п.1.

Задания

1. Методом энергетических потерь рассчитать концентрационный профиль в структуре $\text{SiO}_2\text{-Si}$ с подложкой кремния марки КДБ10 и толщиной окисла 0.12 мкм при внедрении ионов фосфора с энергией 100 кэВ и дозой 10 мкКл/см².

Определить глубину залегания р-п перехода. Построить концентрационный профиль в полулогарифмических координатах $\ln N(x)$ - x .

Решение

Концентрация исходной примеси в подложке оценивается по удельному сопротивлению $r=10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ и подвижности дырок $m_p=500 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$:

$$N_{исх} = \frac{1}{erm_p} = \frac{1}{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 10 \cdot 500} = 1.25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}.$$

Максимальная глубина x_{max} , на которой будет рассчитан концентрационный профиль, находится как:

$$x_{max} = R_{p2}(100) + 6\Delta R_{p2}(100) = 1.238 \cdot 10^{-5} + 6 \cdot 4.57 \cdot 10^{-6} \approx 4 \cdot 10^{-5} \text{ см}.$$

Задав 20 точек x_i , в которых будут определены значения концентрации $N_i(x_i)$, получим шаг по глубине

$$h_x = x_{max} / 20 = 4 \cdot 10^{-5} / 20 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ см}.$$

Вычисление *erf*-функции может быть проведено разложением подынтегральной функции в ряд Тейлора, а интегрирование при нахождении концентрационного профиля в слое кремния можно провести по методу Гаусса на восьмиточечном шаблоне.

Для расчета параметров пробегов ионов фосфора в кремнии при заданных энергиях из диапазона 0÷100 кэВ можно использовать аппроксимирующие степенные полиномы.

Для вычисления концентрационного профиля методом энергетических потерь в заданной структуре SiO₂-Si при внедрении ионов фосфора на языке Паскаль составлена программа PR3.

```
Program pr3; {Метод энергетических потерь}
Const pi=3.1415926; e1=1.6-19;
var n,x:array[0..200] of double;
    n1,n2:double;
    ro,m,ni,h,d,e0,Q,ec,ep,en,po:double;
    temp,rp1,drp1,xmax,xj1,xj2:double;
    i,i1:integer; f:text; tip,o:char;
function fn1(z:double):double;
begin
    fn1:=Q*exp(-(x[i]-rp1)/drp1*(x[i]-rp1)/drp1/2); end;
function erf(z:double):double;
var s,sx:double; j: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 log(z:double):double;
begin log:=ln(z)/2.3 end;
function rp2(e:double):double;
var Y:double;
begin
  Y:=log(e); Y:=0.682+0.1861*Y+0.3769*Y*Y-0.0581*Y*Y*Y;
  Y:=Y*2.3; Rp2:=exp(Y)*1e-7 end;
function drp2(e:double):double;
var Y:double;
begin
  Y:=log(e); Y:=0.401+0.2209*Y+0.3478*Y*Y-0.0711*Y*Y*Y;
  Y:=2.3*Y; drp2:=exp(Y)*1e-7; end;
function fn2(e:double):double;
var p,p1:double;
begin
  if e<ec then p:=(e-ec)/en else p:=(e-ec)/ep;
  p1:=(x[i]-d-rp2(e))/drp2(e); p:=-0.5*(p*p+p1*p1);
  fn2:=po*exp(p)/drp2(e) end;
function gauss8(a,b:double):double;
var xi,ai:array[1..8] of double;
  b1,b2,gs,x2:double; 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-j]:=-xi[j]; ai[j]:=ai[9-j] end;
  b1:=(b+a)/2; b2:=(b-a)/2; gs:=0.0;
  for j:=1 to 8 do begin x2:=b1+b2*xi[j]; gs:=gs+ai[j]*fn2(x2) end;
  gauss8:=gs*b2 end;
BEGIN
  writeln(' ');
  write(' Подложка n-типа (n) или p-типа (p)? '); readln(tip);
  if tip='n' then m:=1450 else m:=500;
  write(' удельное сопротивление в Омсм? '); readln(ro);
  ni:=1/(ro*e1*m); writeln(' ');
  write(' толщина окисла в микронах? '); readln(d); d:=d*1e-4;
  write(' энергия ионов фосфора в кэВ? '); readln(e0);
  write(' нормальный пробег фосфора в SiO2 в см? ');
  readln(drp1);
  write(' доза имплантации в мкКл/см2? '); readln(Q);
  Q:=Q*6.25e12; xmax:=rp1+9*drp1; h:=xmax/20;

```

```

ec:=e0*(1.0-d/rp1); ep:=e0*d/rp1*drp1/(rp1+drp1);
en:=e0*d/ rp1*drp1/(rp1-drp1);
po:=(d-rp1)/(sqrt(2)*drp1); po:=Q/2*(1-erf(po));
po:=po/(en*erf(ec/(sqrt(2)*en))+ep*erf((e0-ec)/(sqrt(2)*ep)));
Q:=Q/(sqrt(2*pi)*drp1); i:=0; x[0]:=0.0;
repeat
if      x[i]<=d      then      n[i]:=fn1(x[i])      else
n[i]:=gauss8(0.0,e0)/sqrt(2.0*pi)-ni;
i:=i+1; x[i]:=i*h
until x[i]>xmax;
i1:=i-1; xj1:=-1.0; xj2:=0.0;
for i:=1 to i1 do begin
if (n[i-1]<=0.0) and (n[i]>=0.0) then xj1:=(x[i-1]+x[i])/2.0-d;
if (n[i-1]>=0.0) and (n[i]<=0.0) then xj2:=(x[i-1]+x[i])/2.0-d
end;
writeln(' ');
writeln(' таблица распределения примеси '); writeln(' ');
writeln(' x, мкм          C,см-3          log(C) '); writeln(' ');
for i:=0 to i1 do
writeln(x[i]*1e4:18:2,' ',n[i]:9,log(abs(n[i])):15:2);
writeln(' ');
i:=i+1; x[i]:=d; n1:=fn1(x[i]); i:=i+1; x[i]:=d;
n2:=gauss8(0.0,e0)/sqrt(2.0*pi)-ni;
writeln(' концентрация на границе раздела в слое окисла');
write(' ',n1:9,' см-3');
writeln(' и в слое кремния ',n2:9,' см-3'); writeln(' ');
if xj1<0.0 then
write(' 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(' от границы раздела SiO2-Si'); writeln(' ');

```

END.

Результатом работы программы является следующая таблица и построенный график (рис.9).

Таблица распределения примеси

<i>x, мкм</i>	<i>C, см-3</i>	<i>Log(C)</i>
0.00	9.60e+16	17.00
0.02	4.90e+17	17.71
0.04	1.75e+18	18.26
0.06	4.33e+18	18.66
0.08	7.50e+18	18.90
0.10	9.04e+18	18.98

0.12	1.02e+19	19.03
0.12	4.74e+18	18.70
0.14	2.11e+18	18.35
0.16	8.75e+17	17.96
0.18	3.32e+17	17.54
0.20	1.13e+17	17.07
0.22	3.78e+16	16.60
0.24	1.10e+16	16.06
0.26	2.31e+15	15.38
0.28	-2.62e+14	14.43
0.30	-9.96e+14	15.02
0.32	-1.19e+15	15.09
0.34	-1.24e+15	15.11
0.36	-1.25e+15	15.11
0.38	-1.25e+15	15.11

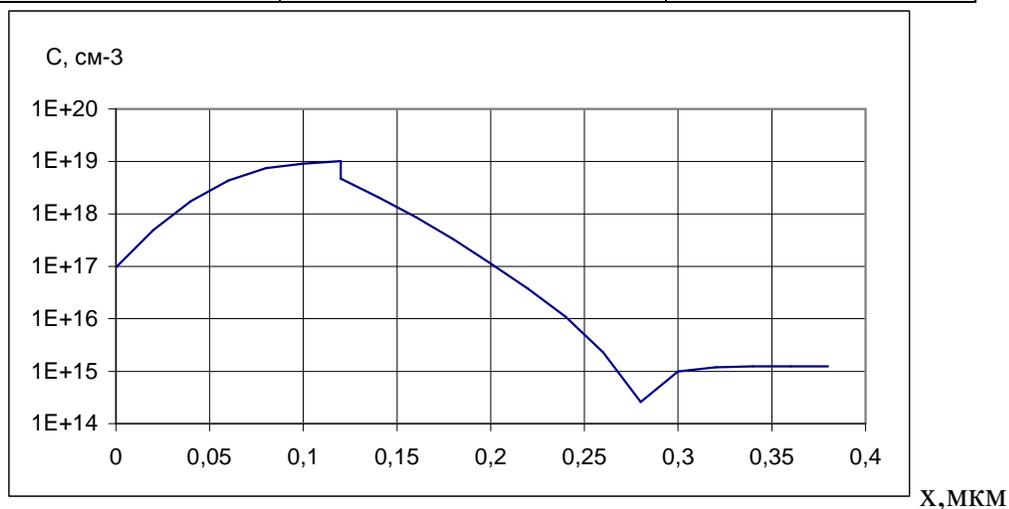


Рис. 2. Распределение в структуре SiO_2 - Si фосфора, внедренного с энергией 100 кэВ и дозой $12 \text{ мкКл}/\text{см}^2$ в кремниевую подложку марки КДБ10

2. На кремниевой подложке p -типа с удельным сопротивлением $5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ термически наращивается слой окисла толщиной $0,05 \text{ мкм}$. Полученная структура имплантируется ионами мышьяка с энергией 100 кэВ и дозой $100 \text{ мкКл}/\text{см}^2$.

Пользуясь для описания концентрационного профиля методом энергетических потерь, оценить абсолютную и относительную погрешность по глубине залегания p - n перехода при нормах допуска по удельному сопротивлению $\pm 20 \%$.

3. В условиях задания 2 данного раздела оценить абсолютную и относительную погрешность по глубине залегания p - n перехода при нормах допуска по толщине окисла $\pm 10\%$.
4. Структура SiO_2 - Si с кремниевой подложкой типа КДБ7 и толщиной окисла $0,03 \text{ мкм}$ имплантируется ионами сурьмы.

Рассчитать методом энергетических потерь и построить графики зависимости глубины залегания р-n переходов в кремнии:

- а) при энергии 120 кэВ и дозах имплантации из диапазона $10 \div 100 \text{ мкКл/см}^2$;
 - б) при дозе имплантации 10 мкКл/см^2 и энергиях из диапазона $20 \div 120 \text{ кэВ}$.
5. Определить, при какой энергии имплантации согласно методу энергетических потерь максимум концентрации внедренной в структуру $\text{SiO}_2\text{-Si}$ примеси бора находится на границе раздела, если толщина слоя окисла равна 0.03 мкм .
 6. При имплантации ионами фосфора с энергией 100 кэВ структуры $\text{SiO}_2\text{-Si}$ и построении концентрационного профиля методом энергетических потерь исследовать функцию распределения по энергии $p(E, d)$ на заданной глубине границы раздела $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 0.01 ; 0.03 ; 0.05 ; 0.08 ; 0.10 ; 0.13 и 0.15 мкм .
 7. Исследовать методом энергетических потерь зависимости количества ионов, достигших границы раздела в двухслойной структуре $\text{SiO}_2\text{-Si}$, облучаемой ионами бора:
 - а) от дозы имплантации в диапазоне $10 \div 100 \text{ мкКл/см}^2$ при первоначальной энергии 100 кэВ и толщине окисла 0.1 мкм ;
 - б) при энергии имплантации в диапазоне от $10 \div 100 \text{ кэВ}$ при толщине окисла 0.1 мкм и дозе 50 мкКл/см^2 ;
 - в) от толщины окисла в диапазоне $0.02 \div 0.2 \text{ мкм}$ при дозе имплантации 50 мкКл/см^2 и энергии 100 кэВ.

Вопросы

1. Что такое доза имплантации?
2. Какие условия необходимы для образования р-n переходов при ионном легировании двухслойных структур?
3. Объясните причину возникновения скачка концентрации ионно-имплантированной примеси на границе раздела двухслойной структуры.
4. Показать, что слой SiO_2 обладает коэффициентом пропускания T :

$$T = \frac{Q_2}{Q} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \frac{d - R_{p1}(E_0)}{\sqrt{2\Delta R_{p1}(E_0)}},$$

где Q_2 - число ионов, прошедших через слой SiO_2 в кремний.

5. Почему для описания распределений ионно-имплантированных примесей в рассматриваемых средах многослойных структур могут быть использованы неусеченные гауссианы?
6. Может ли метод энергетических потерь быть применен для структур, в слоях которых распределения примесей описываются усеченными гауссианами? сопряженными гауссианами? распределением Пирсон-4?

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. МОП-СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов / Под ред. П.Антонетти, Д.Антониадиса, Д. Даттона и др. – М.: Радио и связь, 1988. – 496 с.
4. Ревелева М.А. Моделирование процессов распределения примеси в полупроводниковых структурах / М.А. Ревелева. – М.: МГИЭТ(ТУ), 1996. – 196 с.
5. Буренков А.Ф. 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.
6. Технология СБИС / Под ред. С. Зи : В 2-х кн. – М.: Мир, 1986. – Кн.1. – 404 с.; Кн.2. – 416 с.

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

Редактор: Тихомирова О.А.