

Министерство образования РФ

Воронежский госуниверситет

Физический факультет
Кафедра физики полупроводников и микроэлектроники

Методические указания

**Методы расчета
ионно-имплантированных структур**

(для студентов 4,5 курсов физического факультета
специальности 014100

"Микроэлектроника и полупроводниковые приборы")

Составили: Быкадорова Г.В.
Гольдфарб В.А.
Дикарев В.И.
Левин А.Ю.

Воронеж
2002

Методические указания составлены на кафедре физики полупроводников и микроэлектроники Воронежского государственного университета доцентами Быкадоровой Г.В. и Гольдфарбом В.А., заведующим лабораторией НИИЭТ Дикаревым В.И. и преподавателем ВГТА Левиным А.Ю. под редакцией доктора технических наук Ассессорова В.В.

В данных методических указаниях рассмотрены методы расчета концентрационных профилей и электрофизических параметров полупроводниковых структур, полученных ионной имплантацией.

Каждый раздел содержит физическую и математическую модели технологического процесса, задания и контрольные вопросы. Для ряда типовых задач приведены решения с соответствующим программным обеспечением, написанным на языке Паскаль и ориентированным на использование персональных компьютеров типа IBM.

Методические указания предназначены для проведения аудиторных занятий и самостоятельной работы студентов физического факультета 4 и 5 курсов по специальности 014100 "Микроэлектроника и полупроводниковые приборы", а также студентов 6 курса, обучающихся в магистратуре по направлению "Физика" (специализация "Полупроводниковые приборы и микроэлектроника") при изучении спецкурсов "Математическое моделирование технологических процессов в микроэлектронике", "Физические основы технологии полупроводниковых приборов и интегральных схем", "Физические основы микроэлектроники и наноэлектроники".

Печатается по решению НМС физического факультета от 14 июня 2002 г.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Распределение примеси при двойной последовательной имплантации	4
2. Определение энергии ионов и дозы имплантации, необходимых для получения заданных концентрации и глубины залегания р-п перехода.	13
3. Определение отношения минимальной к максимальной емкости МОП структуры с ионно-имплантированным каналом	17
Литература	25

1. Распределение примеси при двойной последовательной имплантации

Для создания транзисторных структур типа n-p-n с тонкими базовыми и эмиттерными областями последовательно проводят базовую имплантацию ионов акцепторной примеси с энергией E_a и дозой Q_a и эмиттерную имплантацию с энергией E_d и Q_d . Функционирование транзисторных структур накладывает следующие условия на режимы имплантации:

- $R_{Pa} > R_{Pd}$, где R_{Pa} и R_{Pd} – соответственно нормальные пробеги акцепторной и донорной примесей (условие для выбора энергий);
- $N_{maxa} < N_{maxd}$, где N_{maxa} , N_{maxd} – максимальные концентрации соответственно акцепторной и донорной примесей (условие для выбора доз имплантации).

В случае неусеченной гауссовской аппроксимации ионно-имплантированных профилей суммарное распределение будет иметь вид (рис.1):

$$N(x) = \frac{Q_a}{\sqrt{2p} \Delta R_{Pa}} \cdot \exp\left(-\frac{(x - R_{Pa})^2}{2\Delta R_{Pa}^2}\right) - \frac{Q_d}{\sqrt{2p} \Delta R_{Pd}} \cdot \exp\left(-\frac{(x - R_{Pd})^2}{2\Delta R_{Pd}^2}\right) - N_{ucx},$$

где ΔR_{Pa} и ΔR_{Pd} – среднеквадратичные отклонения нормальных пробегов соответственно акцепторной и донорной примесей.

Поскольку в реальных транзисторных структурах $N(x_{je}) \gg N_{ucx}$, то глубина залегания эмиттерного p-n перехода x_{je} может быть найдена из условия

$$\frac{Q_a}{\sqrt{2p} \Delta R_{Pa}} \cdot \exp\left(-\frac{(x_{je} - R_{Pa})^2}{2\Delta R_{Pa}^2}\right) = \frac{Q_d}{\sqrt{2p} \Delta R_{Pd}} \cdot \exp\left(-\frac{(x_{je} - R_{Pd})^2}{2\Delta R_{Pd}^2}\right).$$

Получаем квадратное уравнение, решение которого

$$x_{je} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{a},$$

где $b = -R_{Pa} \Delta R_{Pd}^2 + R_{Pd} \Delta R_{Pa}^2$; $a = \Delta R_{Pd}^2 - \Delta R_{Pa}^2$;

$$c = R_{Pa}^2 \Delta R_{Pd}^2 - R_{Pd}^2 \Delta R_{Pa}^2 - 2R_{Pa}^2 \Delta R_{Pd}^2 \cdot \ln \frac{Q_a \Delta R_{Pd}}{Q_d \Delta R_{Pa}}.$$

Глубина залегания x_{jk} коллекторного p-n перехода определяется из условия

$$\frac{Q_a}{\sqrt{2p} \Delta R_{Pa}} \cdot \exp\left(-\frac{(x_{jk} - R_{Pa})^2}{2\Delta R_{Pa}^2}\right) = N_{ucx},$$

откуда

$$x_{jk} = R_{Pa} + \Delta R_{Pa} \sqrt{2 \ln \frac{Q_a}{\sqrt{2\pi} \Delta R_{Pa} N_{исх}}}.$$

Толщина базовой области w может быть определена как $w \approx x_{jk} - x_{je}$.

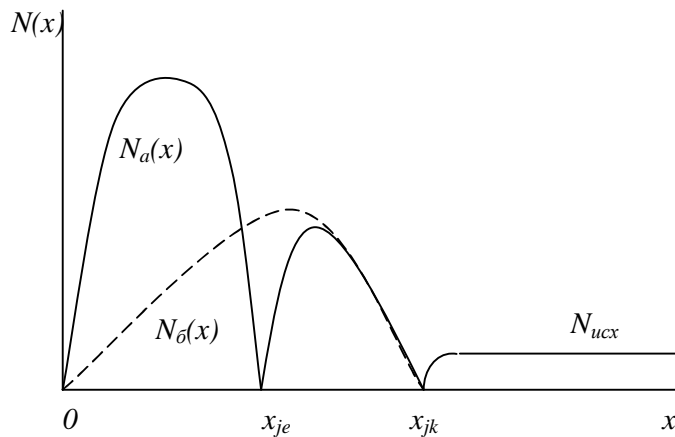


Рис.1. Результирующее распределение ионно-имплантированных примесей в n-p-n транзисторе

Задания

1. Рассчитать концентрационный профиль и глубины залегания коллекторного и эмиттерного p-n переходов в ионно-имплантированной транзисторной структуре, сформированной в кремниевой подложке марки КЭФ0.5. Базовая имплантация ионами бора проводится при энергии 100 кэВ и дозе 10 мкКл/см², а эмиттерная область имплантируется ионами фосфора с энергией 200 кэВ и дозой 200 мкКл/см².

Построить полученный результирующий профиль в полулогарифмических координатах $\lg |N(x)| - x$.

Примечание. Для вычисления параметров гауссовских распределений по энергии можно воспользоваться следующими аппроксимирующими полиномами:

- для ионов бора

$$\lg R_p = 0.613 + 0.8786 \cdot \lg E + 0.0773 \cdot (\lg E)^2 - 0.0262 \cdot (\lg E)^3;$$

$$\lg \Delta R_p = 0.482 + 0.8594 \cdot \lg E - 0.0616 \cdot (\lg E)^2 - 0.0135 \cdot (\lg E)^3;$$

- для ионов фосфора

$$\lg R_p = 0.682 + 0.1861 \cdot \lg E + 0.3769 \cdot (\lg E)^2 - 0.0581 \cdot (\lg E)^3;$$

$$\lg \Delta R_p = 0.401 + 0.2209 \cdot \lg E + 0.3478 \cdot (\lg E)^2 - 0.0711 \cdot (\lg E)^3.$$

Решение

Для расчета концентрационного профиля в заданной транзисторной структуре написана программа PR1, работающая в интерактивном режиме. Эта программа обладает элементами интеллекта и не только проводит расчет распределения ионно-имплантированных примесей любого типа, но и анализирует условия, при которых может быть сформирована транзисторная структура.

```

Program PR1(input,output);
{распределение примеси при двойной последовательной имплантации}
  label 1,3;
  const Pi=3.1415926;
      e=1.6e-19; csi=' '(155);
  type mas=array [0..100] of real;
  var Qe,Qb,ro,m,Ee,Eb,Rpe,Rpb,dRpe,dRpb,Xje,Xjk,Xmax,Ni,h,Dt,z:real;
      i:integer; X,N:mas; Ans,ans1,o,tip,tipb,tipe:char; f:text;
procedure junc_e(var x:real); {вычисление эмиттерного p-n перехода}
  var b,a,c:real;
begin
  a:=-dRpe*dRpe +dRpb*dRpb; b:=Rpd*dRpe*dRpe -Rpe*dRpb*dRpb;
  c:=(Rpb*Rpb)*(dRpe*dRpe)+(Rpe*Rpe)*(dRpb*dRpb);
  c:=c+2*(dRpb*dRpb)*(dRpe*dRpe)*ln(Qb*dRpe/Qe/dRpb);
  if (b*b-a*c)>=0 then x:=(-b+sqrt(b*b-a*c))/a else x:=-1 end;
procedure junc_k(var x:real); {вычисление коллекторного p-n перехода}
  var a:real;
begin
  a:=2*ln(Qb/sqrt(2*Pi)/dRpb/Ni);
  if a>=0 then x:=Rpb+dRpb*sqrt(a) else x:=-1 end;
procedure point(x:real; var N:real); {вычисление концентрации}
  begin
  N:=Qb/sqrt(2*Pi)/dRpb*exp(-(x-Rpb)*(x-Rpb)/2/(dRpb*dRpb));
  N:=(N-Qe/sqrt(2*Pi)/dRpe*exp(-(x-Rpe)*(x-Rpe)/2/(dRpe*dRpe))-Ni) end;
procedure boron(E:real; var Rp,dRp:real);
begin
z:= ln(E)/ln(10);
Rp:=0.613+0.8786*z+0.0773*z*z-0.0262*z*z*z;
dRp:=0.482+0.8594*z-0.0616*z*z-0.0135*z*z*z;
Rp:=exp(Rp*ln(10)); dRp:=exp(dRp*ln(10));
Rp:=Rp*1e-7; dRp:=dRp*1e-7
end;

```

```

procedure phosphorus(E:real; var Rp,dRp:real); {вычисление норм.
пробега и страгглинга для фосфора}
  begin
z:= ln(E)/ln(10);
Rp:=0.682+0.1861*z+0.3769*z*z-0.0581*z*z*z;
dRp:=0.401+0.2209*z+0.3478*z*z-0.0711*z*z*z;
  Rp:=exp(Rp*ln(10));
  dRp:=exp(dRp*ln(10));
  Rp:=Rp*1e-7;
  dRp:=dRp*1e-7 end;
begin
  repeat
3:   writeln(' ');
write(' ', 'Исходная подложка: n-типа (N) или p-типа(P)? ');
readln(tip);
  write(' ', 'удельное сопротивление в Ом*см ? ');
  readln(ro);
  if tip='N' then m:=1450 else m:=500; Ni:=1/(e*ro*m);
  repeat
    writeln(' ');
    for i:=1 to 10 do writeln(' ');
    write(' ', 'Базовая имплантация: ');
  write(' ', 'бор (B), фосфор (P) или другая примесь (D) ? ');
  readln(o);
  write(' ', 'энергия имплантации в кэВ ? ');
  readln(Eb);
  if o='D' then begin
    write(' тип примеси (N/P)? '); readln(tipb);
    write(' нормальный пробег в см? '); readln(Rpb);
    write(' страгглинг норм. пробега в см? ');
    readln(dRpb); end else
    if o='B' then begin tipb:='P'; boron(Eb,Rpb,dRpb); end
    else begin tipb:='N'; phosphorus(Eb,Rpb,dRpb); end;
  write(' доза имплантации в мкКл/см2 ? ');
  readln(Qb); Qb:=Qb*6.25e12;
  if tip=tipb then begin
    writeln(' !!! Эмиттерного перехода не образуется ');
    writeln(' Введите новую примесь (N) ');
    write(' или выход из программы (E) ? ');
    readln(ans) end
    else ans:='A';
  until ans<>'N';
  if ans='E' then goto 1;
  repeat

```

```

writeln(' ');
for i:=1 to 10 do writeln(' ');
write(' ', 'Эмиттерная имплантация: ');
write(' ', 'бор (B), фосфор (P) или другая примесь (D) ? ');
  readln(o);
write('      энергия имплантации в кэВ ? '); readln(Ee);
if o='D' then begin
      write('      тип примеси (N/P)? '); readln(tipe);
      write('      нормальный пробег в см? '); readln(Rpe);
write('страгглинг норм. пробега в см? ');
  readln(dRpe); end
  else if o='B' then begin tipe:='P'; boron(Ee,Rpe,dRpe); end
        else begin tipe:='N'; phosphorus(Ee,Rpe,dRpe); end;
write('      доза имплантации в мкКл/см2 ? ');
readln(Qe); Qe:=Qe*6.25e12;
if tipe=tipb then begin
  writeln('      !!! Коллекторного перехода не образуется ');
  writeln('      Введите новую примесь (N) ');
  write('      или выход из программы (E) ? ');
  readln(ans) end else ans:='A';
until ans<>'N';
  if ans='E' then goto 1; writeln;
if (Rpb>Rpe) and (Qb<Qe) then begin xmax:=3*Rpb;
junc_e(xje);
if xje=-1 then begin writeln('      !!! Эмиттерного перехода не образуется ');
      writeln('      Введите новую структуру (N) ');
      write('      или выход из программы (E) ? ');
      readln(ans); end ;
if ans='E' then goto 1 else if ans='N' then goto 3;
junc_k(xjk);
if xjk=-1 then begin
      writeln('      !!! Коллекторного перехода не образуется ');
      writeln('      Введите новую структуру (N) ');
      write('      или выход из программы (E) ? ');
      readln(ans); end;
if ans='E' then goto 1 else if ans='N' then goto 3;
h:=Xmax/20;
for i:=0 to 20 do begin x[i]:=i*h; point(x[i],N[i]); end;
writeln;
write('      Выводить таблицу на экран? (Y/N) ');
  readln(ans);
if ans in ['Y', 'y', 'Ы', 'ы'] then begin
  writeln(' -----');
  writeln(' |      X, мкм      |      N, см-3      |      Log(N)      |');

```



```

writeln('-----');
for i:=0 to 20 do
  writeln(' | ',x[i]*1e4:2:2,' | ',N[i]:9,' | ');
  writeln('ln(abs(N[i]))/ln(10):2:3,');
  write(' <BK>');
  readln;
writeln(' Глубины p-n переходов: эмиттерного Xjэ=',xje*1e4:2:2,' мкм');
writeln(' коллекторного Xjk=',xjk*1e4:2:2,' мкм');
end; writeln;
writeln(' Следующая структура (N) ');
write(' или выход из программы (E) ? ');
readln(ans1);
end else begin writeln(' !!! НЕ ВЫПОЛНЯЮТСЯ УСЛОВИЯ');
if Rpb<Rpe then writeln(' Rpb<Rpe, а должно быть Rpb>Rpe ');
if Qb>Qe then writeln(' Qb>Qe, а должно быть Qb<Qe ');
writeln(' Новая структура (N) ');
write(' или выход из программы (E) ? '); readln(ans1);
end;
until ans1='E';
1: end.

```

Результаты расчета по условиям данной задачи представляются в следующем виде:

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИМЕСИ
ПРИ ДВОЙНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ**
Образовалась N-P-N структура

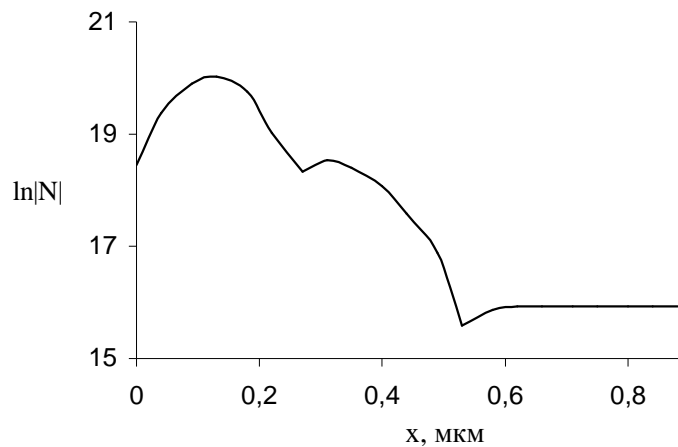
ТАБЛИЦА: Распределение примеси по структуре

x , мкм	N , см ⁻³	Log N
0.00	-2.80E+18	18.448
0.04	-2.35E+19	19.371
0.09	-7.89E+19	19.897
0.13	-1.06E+20	20.026
0.18	-5.65E+19	19.752
0.22	-1.04E+19	19.015
0.27	2.17E+18	18.336
0.31	3.43E+18	18.535
0.35	2.49E+18	18.395
0.40	1.20E+18	18.078
0.44	3.82E+17	17.582

0.49	7.67E+16	16.885
0.53	3.89E+15	15.590
0.58	-7.39E+15	15.869
0.62	-8.54E+15	15.931
0.66	-8.62E+15	15.935
0.71	-8.62E+15	15.936
0.75	-8.62E+15	15.936
0.80	-8.62E+15	15.936
0.84	-8.62E+15	15.936
0.88	-8.62E+15	15.936

Глубины p-n переходов: эмиттерного $x_{jэ}=0.25$ мкм
коллекторного $x_{jk}=0.54$ мкм

По результатам расчетов можно построить график распределения примесей в полученной транзисторной структуре.



2. Транзисторная структура n-p-n типа в кремниевой подложке с исходной концентрацией $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ создается двойной последовательной имплантацией ионов бора и фосфора.

В первом приближении без учета перераспределения примесей в процессе активационных отжигов определить:

- суммарный концентрационный профиль, если базовая область формировалась внедрением бора с энергией 120 кэВ и дозой 8 мкКл/см², а эмиттерная – имплантацией фосфора с энергией 200 кэВ и дозой 150 мкКл/см²;
- зависимость глубины залегания коллекторного p-n перехода от дозы имплантации бора в диапазоне 5÷100 мкКл/см² при энергии 120 кэВ;
- зависимость глубины залегания коллекторного p-n перехода от энергии имплантации бора в диапазоне 100÷150 кэВ при дозе 10 мкКл/см²;

- г) зависимость глубины залегания эмиттерного р-п перехода от энергии ионов фосфора в диапазоне 100÷250 кэВ при дозе 150 мкКл/см², если базовая имплантация ионов бора проводилась с энергией 120 кэВ и дозой 10 мкКл/см²;
 - д) зависимость глубины залегания эмиттерного р-п перехода от дозы имплантации ионов фосфора в диапазоне 100÷200 мкКл/см² при энергии 200 кэВ, если базовая имплантация ионов бора проводилась с энергией 100 кэВ и дозой 10 мкКл/см²;
 - е) при какой энергии максимум концентрации ионов бора находится на глубине залегания эмиттерного р-п перехода, если имплантация фосфора проводится при энергии 180 кэВ с дозой 150 мкКл/см², а доза имплантации бора равна 10 мкКл/см²;
 - ж) энергию ионов бора, при которой глубина залегания эмиттерного р-п перехода будет равна 0.5 мкм, если доза имплантации фосфора равна 150 мкКл/см², а базовая имплантация ионами бора проводилась с энергией 120 кэВ и дозой 8 мкКл/см²;
 - и) зависимость толщины базовой области от энергии ионов фосфора в диапазоне 100÷250 мкКл/см² при дозе имплантации фосфора 150 мкКл/см² и базовой имплантации ионами бора с энергией 120 кэВ и дозой 10 мкКл/см²;
 - к) зависимость толщины базовой области от энергии ионов бора в диапазоне 100÷150 кэВ при дозе 10 мкКл/см², если эмиттерная область создавалась внедрением ионов фосфора с энергией 180 кэВ и дозой 150 мкКл/см².
3. Высокочастотные биполярные транзисторы с двукратно имплантированной базой создаются в кремниевой подложке n⁺-типа проводимости, на которой наращен n-эпитаксиальный слой толщиной 3 мкм с удельным сопротивлением 8 Ом·см.

Поверхность эпитаксиального слоя маскируется окислами SiO₂ толщиной 0.8 мкм протравленной частью толщиной 0.12 мкм на площади, включающей базовую область. Энергия поверхностной ионной имплантации атомов бора составляет 40 кэВ, а доза равна 10 мкКл/см². Энергия глубокой ионной имплантации атомов бора составляет 160 кэВ, при дозе 0.5 мкКл/см². Низкотемпературный отжиг базовой области проводится в инертной атмосфере аргона при температуре 900 °С в течение 10 минут.

Затем стравливается маскирующий слой SiO₂ в области эмиттера и проводится формирование эмиттера внедрением ионов мышьяка с энергией 500 кэВ и дозой 1000 мкКл/см². Низкотемпературный отжиг эмиттерной области проводится в инертной атмосфере при температуре 1000 °С в течение 25 минут.

Рассчитать и построить суммарный концентрационный профиль, а также определить:

- а) глубины залегания эмиттерного и коллекторного р-п переходов;
- б) глубину залегания точки перегиба с минимальной концентрацией на профиле базовой примеси, созданной двукратной имплантацией бора;

- в) интервал Dx от точки минимума до точки второго пика концентрации в базовом профиле;
- г) ширину базового слоя;
- д) число Гуммеля.
4. Провести численные эксперименты по исследованию влияния технологических режимов создания эмиттерных и базовых областей на коэффициент инжекции γ биполярного транзистора с двукратно имплантированной базой (задание 3):

$$g = 1 - \frac{D_3 W_6 C_6}{D_6 W_3 L_3 C_3},$$

где D_3, D_6 – коэффициенты диффузии эмиттерной и базовой примесей; W_6 – ширина базы; L_3 – характеристическая длина эмиттерной примеси, причем

$$\frac{D_3 W_6}{D_6 L_3} \cong 1.$$

Следовательно,

$$g = 1 - \frac{C_6}{C_3}.$$

В предположении резкого р-п перехода, что правомерно для распределений мышьяка, усредненные концентрации в областях эмиттера C_3 и базы C_6 , равны соответственно

$$C_3 = \frac{\int_0^{x_{j3}} C(x, t) dx}{x_{j3}}; \quad C_6 = \frac{\int_{x_{j3}}^{x_{j6}} C(x, t) dx}{x_{j6} - x_{j3}};$$

- а) определить интервал дозы эмиттерной имплантации, в котором эмиттерный р-п переход будет локализован на отрезке Dx между минимумом и вторым пиком базовой концентрации;
- б) рассчитать зависимость отношения $S = C_6 / C_3$ от дозы эмиттерной имплантации в интервале $500 \div 2500$ мкКл/см²;
- в) определить временной интервал отжига эмиттерной примеси, в котором эмиттерный р-п переход будет локализован на отрезке Dx между минимумом и вторым пиком базовой концентрации;
- г) рассчитать зависимость параметра S от времени отжига эмиттерной примеси в интервале от 25 до 55 минут.
5. Предложите технологические режимы базовой имплантации ионами мышьяка и эмиттерной имплантации ионами бора для создания в кремниевой пластине р-типа с удельным сопротивлением 7.5 Ом·см р-п-р транзисторной структуры с

глубиной залегания эмиттерного p-n перехода 0.45 мкм и толщиной базовой области 0.3 мкм.

Вопросы

1. Почему в условиях данной задачи ионно-имплантированные профили могут быть аппроксимированы как для бора, так и для фосфора неусеченными гауссианами?
2. Охарактеризуйте зависимость глубины залегания эмиттерного и коллекторного p-n переходов от режимов ионной имплантации.
3. Как зависят глубины залегания p-n переходов от исходной концентрации в подложке?

2. Определение энергии ионов и дозы имплантации, необходимых для получения заданных концентрации и глубины залегания p-n перехода

На практике часто возникают обратные задачи по определению режимов имплантации для создания структур с заданными параметрами.

Если требуется создать p-n переход с глубиной залегания x_j и максимальной концентрацией имплантированной примеси в активной области N_{max} , то необходимо определить режим ионного легирования: энергию ионов E и дозу имплантации Q .

В приближении гауссова распределения ионно-имплантированных примесей

$$N(x) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \cdot \exp\left[-\frac{(x - R_p)^2}{2\Delta R_p^2}\right] - N_{исх},$$

где $N(x)$ – концентрация примесей на глубине x ; R_p – нормальный пробег ионов; ΔR_p – среднеквадратичное отклонение нормального пробега; $N_{исх}$ – концентрация примеси противоположного типа в подложке (рис.2), глубина залегания p-n перехода определяется из условия $N(x_j)=0$:

$$x_j = R_p + \Delta R_p \sqrt{2 \ln(N_{max}/N_{исх})},$$

где максимальная концентрация N_{max} равна

$$N_{max} = Q/(\sqrt{2\pi}\Delta R_p).$$

Параметры R_p и ΔR_p имеют сложную функциональную зависимость от энергии ионов $R_p(E)$ и $\Delta R_p(E)$. Для практических целей по табличным данным могут быть найдены аппроксимирующие многочлены для зависимостей $R_p = R_p(E)$ и $\Delta R_p = \Delta R_p(E)$, следовательно, из выражения для расчета глубины залегания p-n

перехода можно определить энергию внедряемых ионов. Для этой цели может быть предложен следующий алгоритм поиска. Представим выражение для определения глубины залегания p-n перехода в виде системы уравнений

$$\begin{cases} x = x_j ; \\ x = \varphi(E) = R_p(E) + \Delta R_p(E) \sqrt{2 \ln(N_{\max} / N_{\text{исх}})} . \end{cases}$$

Решение полученной системы можно представить графически (рис.3).

Для нахождения энергии E_j , при которой $x_j = j(E_j)$, можно применить следующий итерационный процесс. Сначала из физических соображений задаются границы интервала энергий E_1 и E_2 . Затем для энергии \bar{E} в середине интервала $[E_1, E_2]$

$$\bar{E} = \frac{E_1 + E_2}{2}$$

вычисляется значение функции $j(\bar{E})$ с использованием аппроксимирующих формул для $R_p(E)$ и $\Delta R_p(E)$.

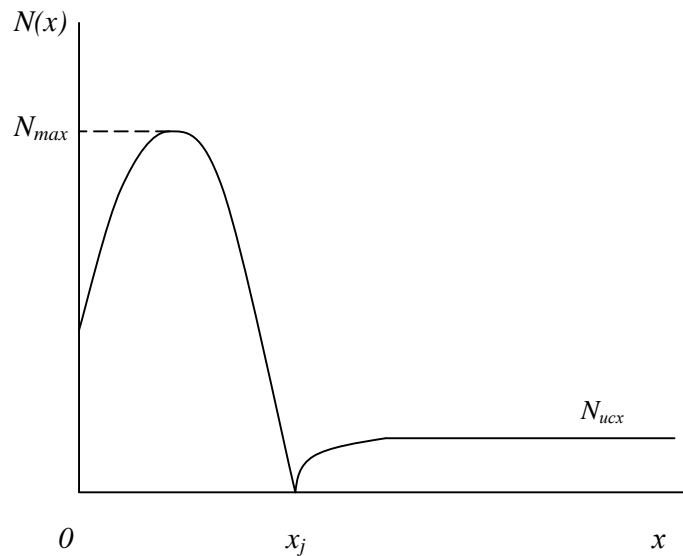


Рис.2. Распределение ионно-имплантированной примеси

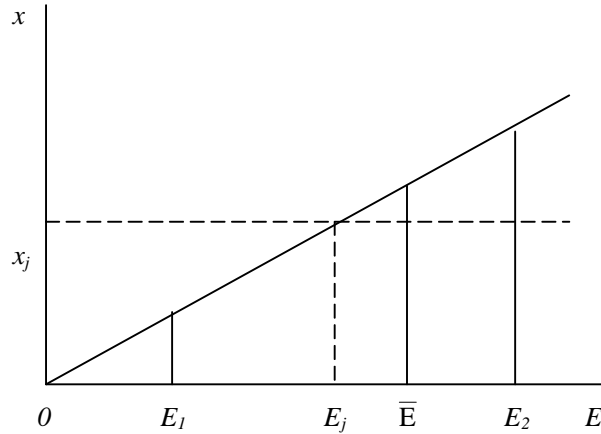


Рис.3. Графическое представление решения системы для определения энергии ионов

Если $|x_j - j(\bar{E})| \leq e$, где e - погрешность определения x_j , то искомая энергия $E_j = \bar{E}$. Если $|x_j - j(\bar{E})| > e$, тогда при $x_j < j(\bar{E})$ за правую границу интервала энергий берется значение \bar{E} , то есть $E_2 = \bar{E}$, а при $x_j > j(\bar{E})$ изменяется левая граница: $E_1 = \bar{E}$, и далее для нового интервала энергий находится середина \bar{E} и процесс продолжается до тех пор, пока не выполнится условие $|x_j - j(\bar{E})| \leq e$.

По найденному значению энергии E_j определяется $\Delta R_p(E_j)$ и вычисляется доза имплантации:

$$Q = \sqrt{2\pi} N_{\max} \Delta R_p(E_j).$$

Задания

1. Рассчитать энергию ионов E и дозу имплантации Q , необходимых для получения ионно-имплантированного профиля с максимальной концентрацией 10^{17} см^{-3} и глубиной залегания p-n перехода 0.3 мкм при внедрении ионов бора в подложку кремния КЭФ7.5.

Решение

Исходная концентрация в подложке кремния марки КЭФ7.5 оценивается по удельному сопротивлению $\rho = 7.5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ и подвижности электронов $m_n = 1400 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$:

$$N_{\text{исх}} = \frac{1}{e r m_n} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 7,5 \cdot 1400} = 6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}.$$

Для нахождения параметров пробегов R_p и ΔR_p ионов бора в кремнии при

заданной энергии можно воспользоваться аппроксимирующими полиномами (раздел 1, задание 1).

Максимальная граница по энергии может быть принята равной энергии, при которой $x_j \cong R_p$, т.е. в данном случае $E_2 \cong 100$ кэВ.

Для вычисления энергии и дозы имплантации по предложенному в данном разделе алгоритму составлена программа PR2.

```

Program PR2(input,output);
  const pi=3.145926; eps=0.001;
  var xj,q,es,e1,e2,nm,ni,z:real;
  function log(x:real):real;
  begin log:=ln(x)/2.3 end;
  function rp(e:real):real;
  var y:real;
  begin
    y:=log(e); y:=0.613+0.8786*y+0.0773*y*y-0.0262*y*y*y;
    y:=y*2.3; rp:=exp(y)*1e-7 end;
  function drp(e:real):real;
  var y:real;
  begin
    y:=log(e); y:=0.482+0.8594*y-0.0616*y*y-0.0135*y*y*y;
    y:=y*2.3; drp:=exp(y)*1e-7 end;
  function fi(e:real):real;
  var y,y1:real;
  begin
    y:=rp(e); y1:=drp(e);
    fi:=rp(e)+drp(e)*sqrt(2*ln(nm/ni) end;
BEGIN
xj:=3.0e-5; nm:=1e17; ni:=1/(1.6*0.13*7.5)*1e15;
e1:=0.0; e2:=100.0;
  repeat
    es:=(e1+e2)/2.0; z:=fi(es);
    if xj<=z then e2:=es else e1:=es;
  until abs((xj-z)/(xj+z))<=eps;
    q:=sqrt(2.0*pi)*nm*drp(es);
  writeln; writeln(' энергия имплантации равна ',es:6:2,' кэВ');
  writeln(' доза имплантации равна ',q:9,' см-2'); writeln
END.

```

В результате решения получим:
 энергия имплантации равна 46.48 кэВ;
 доза имплантации равна $1.2 \cdot 10^{12}$ см⁻².

2. Кремниевая пластина р-типа с исходной концентрацией $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ имплантируется фосфором. Максимальная концентрация примесного слоя должна составить величину 10^{18} см^{-3} , а глубина залегания р-п перехода 0.25 мкм может иметь допуск $\pm 40\%$.
Определить интервал энергий и соответствующих ему доз, при которых могут быть реализованы заданные параметры формируемой структуры.
3. Можно ли на ускорителе с максимальной энергией до 100 кэВ создать в германиевой подложке р-типа с исходной концентрацией 10^{15} см^{-3} примесный слой мышьяка с максимальной концентрацией $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и глубиной залегания р-п перехода 0.4 мкм?
4. Предложите режимы ионной имплантации для получения в подложке из арсенида галлия р-типа с исходной концентрацией $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ примесного слоя п-типа с максимальной концентрацией 10^{17} см^{-3} и глубиной залегания р-п перехода 0.15 мкм, создаваемого внедрением селена.
5. Предложите технологические режимы создания ионно-имплантированного слоя:
 - а) толщиной 0.25 мкм с максимальной концентрацией 10^{18} см^{-3} внедрением мышьяка в кремниевую подложку марки КДБ5;
 - б) с максимальной концентрацией $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и глубиной залегания р-п перехода 0.3 мкм внедрением бора в кремний п-типа с удельной электропроводностью $0.5 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$;
 - в) с концентрацией в точке максимума $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и глубиной залегания р-п перехода 0.2 мкм при внедрении в кремний марки КДБ4 ионов мышьяка;
 - г) толщиной 0.25 мкм с концентрацией в точке максимума $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ внедрением в кремний р-типа с удельным сопротивлением $4.5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ионов сурьмы;
 - д) с максимальной концентрацией $7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и глубиной залегания р-п перехода 0.1 мкм при внедрении ионов фосфора в германий р-типа с удельной электропроводностью $1 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$;
 - е) с глубиной залегания 0.15 мкм и концентрацией в точке максимума $8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в подложке арсенида галлия п-типа с исходной концентрацией 10^{12} см^{-3} при внедрении ионов бора.

3. Определение отношения минимальной к максимальной емкости МОП структуры с ионно-имплантированным каналом

В качестве параметра C-V характеристики МОП структуры типа $\text{SiO}_2\text{-Si}$ с ионно-имплантированным каналом (рис.4), оценивающего уровень (дозу) имплантации, может быть использовано отношение минимальной емкости C_{mix} равновесной высокочастотной C-V характеристики к ее максимальному значению C_{max} (рис.5).

В общем случае распределение примеси при ионной имплантации через слой окисла является неравномерным и представлено на рис.6. Модель для расчета параметра $G = C_{min}/C_{max}$ МОП структуры с нелинейным распределением примеси

сводится к нахождению отношения минимальной к максимальной емкостей эквивалентной структуры с равномерным распределением примеси, обеспечивающей равное число ионизированных примесей при равной ширине обедненного слоя полупроводника. В модели разность работ выхода между металлом и полупроводником, а также заряд на границе SiO₂-Si полагаются равными нулю, поскольку они приводят к сдвигу C-V характеристики вдоль оси напряжений и изменению дифференциальной емкости. Отношение же минимальной к максимальной емкости зависит только от уровня легирования полупроводника.

Отношение C_{min}/C_{max} высокочастотной C-V характеристики в случае равномерно легированной подложки есть

$$G = \frac{C_{min}}{C_{max}} = \left(1 + \frac{2\epsilon_0\epsilon_{SiO_2}|U_K|}{eN_a\epsilon_{Si}d^2} \right)^{-1/2}, \quad (1)$$

где G - параметр, равный отношению C_{min}/C_{max} ($C_{max} = C_{ox}$); ϵ_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума; ϵ_{SiO_2} - диэлектрическая проницаемость окисла; ϵ_{Si} - диэлектрическая проницаемость кремния; e - заряд электрона; N_a - концентрация примесных носителей заряда в полупроводнике; d - толщина окисного слоя; U_3 - напряжение на затворе, соответствующее максимальной ширине обедненного слоя W и равное

$$U_3 = \frac{qN_a W^2}{2e_{Si}e_0} + \frac{qN_a W}{C_{ox}}.$$

При напряжении на затворе U_3 емкость структуры минимальна и соотношение (1) позволяет рассчитать параметр G . Число ионизированных примесей в области обеднения под затвором равно Q и есть интеграл

$$Q = \int_d^{W+d} N_a(x) dx. \quad (2)$$

Соответственно, средняя концентрация в приповерхностном слое будет равна

$$N_a = \frac{Q}{W}. \quad (3)$$

С учетом равенства

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_{Si}|U_{Si}|}{qN_a}}, \quad (4)$$

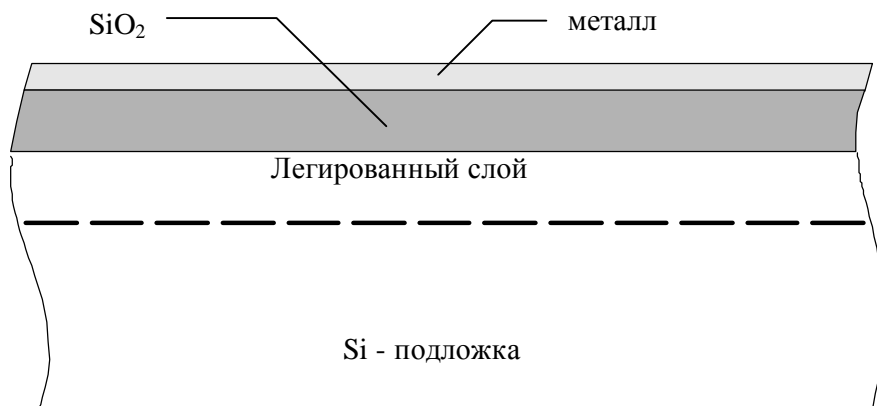


Рис.4. МОП структура типа SiO_2 -Si с ионно-имплантированным каналом

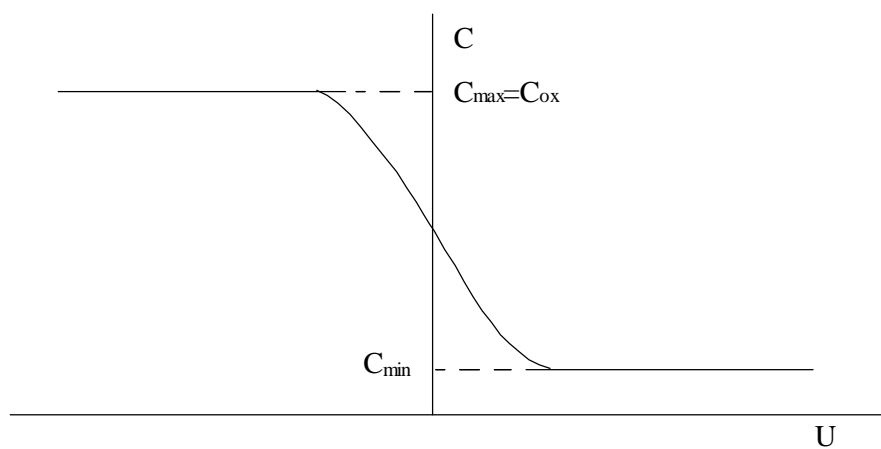


Рис.5. Равновесная высокочастотная C-V характеристика МОП структуры

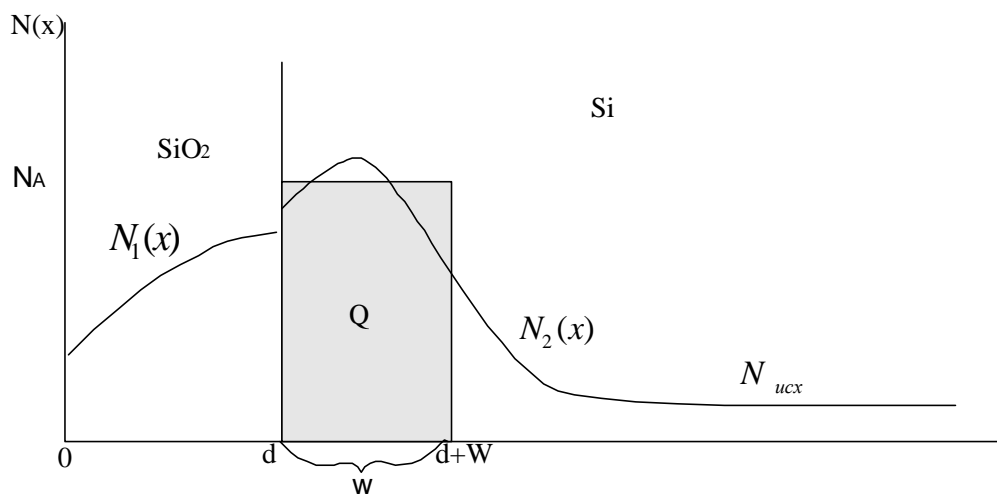


Рис.6. Распределение ионно-имплантированной примеси в двухслойной структуре SiO_2 -Si

где $U_{si} = 2 \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a}{n_i}$ – разность потенциалов между уровнем Ферми в легированном полупроводнике и уровнем Ферми в собственном полупроводнике; n_i – собственная концентрация носителей заряда при температуре T .

В результате получаем систему трех уравнений (2)-(4) с тремя неизвестными Q , N_a , W . Эта система может быть решена методом итераций с интегрированием по методу Гаусса на восьмиточечном шаблоне.

В расчетах профиль ионно-имплантированной примеси при легировании через слой окисла толщиной d аппроксимируется по методу составных профилей:

$$N_a = \frac{D}{\sqrt{2\pi}\Delta R_{p2}} \exp \left[- \frac{\left(x - d + (d - R_{p1}) \frac{\Delta R_{p2}}{\Delta R_{p1}} \right)^2}{2\Delta R_{p2}^2} \right] + N_{исх},$$

где N_a – результирующая концентрация примеси; $N_{исх}$ – исходная концентрация в подложке; R_{p1} – нормальный пробег ионов в окисле; $\Delta R_{p1}, \Delta R_{p2}$ – среднеквадратичные отклонения пробегов в окисле и кремнии соответственно; D – доза легирования.

Исходная концентрация в подложке рассчитывается по удельному сопротивлению r :

$$N_{исх} = \frac{1}{qm_{n,p}r},$$

где $m_{n,p}$ – подвижность электронов или дырок в полупроводнике.

В качестве начального приближения решения полученной системы (2)-(4) можно выбрать следующие значения :

$$W_0 = R_{p1}; \quad N_0 = [N_2(d) + N_2(R_{p1})]/2; \quad Q_0 = D/2.$$

Задания

1. Рассчитать зависимость параметра G от дозы имплантации в диапазоне $0 \div 0.5$ мкКл/см² при легировании фосфором с энергией 100 кэВ кремниевой подложки марки КЭФ7.5 через окисел толщиной 0.076 мкм.

Построить график зависимости параметра G от дозы имплантации .

Решение

Исходная концентрация кремниевой подложки оценивается по удельному сопротивлению $r = 7.5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$:

$$N_{\text{всх}} = \frac{1}{r e m_n} = \frac{1}{7.5 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 1400} = 6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}.$$

Находим параметры распределений для ионов фосфора в кремнии и окиси кремния при энергии 100 кэВ:

$$R_{p1} = 9.98 \cdot 10^{-6} \text{ см}; \Delta R_{p1} = 3.31 \cdot 10^{-6} \text{ см}; \Delta R_{p2} = 4.57 \cdot 10^{-6} \text{ см}.$$

Для расчета параметра G от дозы имплантации в диапазоне $0 \div 0.5 \text{ мкКл}/\text{см}^2$ с шагом $h_g = 0.025 \text{ мкКл}/\text{см}^2$ составлена программа PR3. Решение системы (2)÷(4) находится методом простых итераций с интегрированием по методу Гаусса на восьмиточечном шаблоне.

```
PROGRAM PR3( INPUT, OUTPUT ); { программа расчета параметра G }
const k =1.38e-23; { постоянная Больцмана, Дж / К }
      q =1.6e-19; { заряд электрона, Кл }
      pi =3.1415926;
      eps0 =8.85e-14; { диэл. проницаемость вакуума, Ф/см }
      epssio2=3.9; { относ.диэл. прониц. SiO2 }
      epssi=11.9; { относ.диэл. прониц. Si }
      ni=1.45e+10; { собств. концентрация носителей в Si, см-3 }
      t=300.0; { температура, К }
var doza,G:array[0..20] of real;
      x1, k2, k3, ns,d,h,rp1,drp1,drp2,w,w1,n,n1,c1,u1,u2,u3:real;
      i:integer; f:text; o:char;
function fn1(z:real):real;
begin
  fn1:=exp(-(k2-z)*(k2-z)/(2*drp2*drp2))/(sqrt(2*pi)*drp2) end;
function gauss8(a,b:real):real; { вычисление интеграла методом Гаусса }
var xi,ai:array[1..8] of real;
      b1,b2,gs,x2:real; j:integer;
begin
  ai[1]:=0.10122854;ai[2]:=0.22238103; ai[3]:=0.31370664; ai[4]:= 0.36268378;
  xi[5]:=0.18343364; xi[6]:=0.52553241; xi[7]:=0.79666648; xi[8]:=0.96028985;
  for j:=5 to 8 do begin
    xi[9-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]*fn1(x2); end;
  gauss8:=gs*b2; end;
```

BEGIN

```

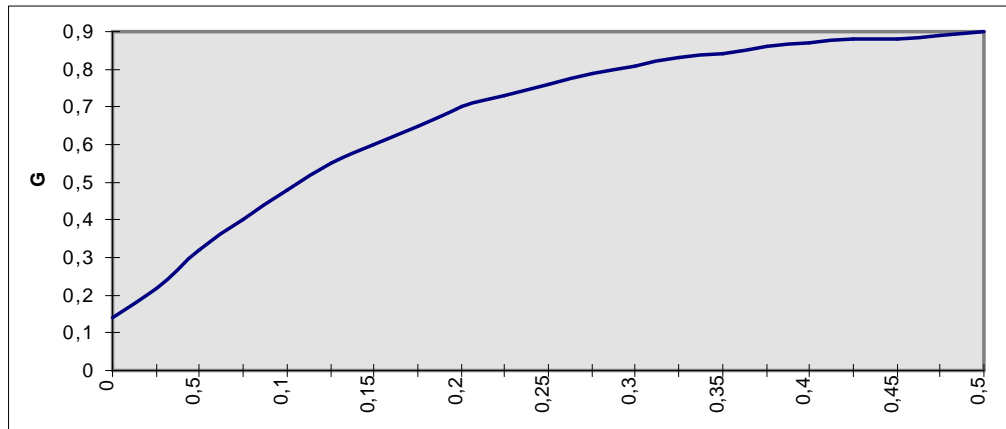
ns:=6e+14; d:=7.6e-6; h:=0.025; rp1:=9.98e-6;
drp1:=3.31e-6; drp2:=4.57e-6;
k2:=d+(rp1-d)*drp2/drp1; k3:=(4.0*eps0*epssi*k*t)/(q*q);
for i:=0 to 20 do begin
  if i:=0 then begin doza[i]:=0.0; n:=ns end else begin
doza[i]:=h*i;
w1:=rp1;
n1:=6.25e+12*doza[i]*(fn1(d)+fn1(rp1))/2;
repeat
w:=w1; n:=n1;
w1:=sqrt(k3*abs(2.3*ln(n/ni))/n);
n1:=6.25e+12*doza[i]*gauss8(d, w+d)/w+ns;
until (abs(w1-w)/(w1+w)<0.001) and (abs(n1-n)/(n1+n)<0.001)
  end;
c1:=eps0*epssio2/d;
u1:=(2.0*k*t*2.3*ln(n/ni))/q;
u2:=sqrt(2.0*q*q*n*eps0*epssi*abs(u1))/c1;
u3:=abs(u1+u2);
G[i]:=1/sqrt(1+2*eps0*epssio2*epssio2*u3/(q*n*epssi*d*d)) end;
writeln;
writeln(' доза,мкКл/см2 G'); writeln;
for i:=0 to 20 do writeln(doza[i]:12:3,G[i]:17:2);
writeln;
END.

```

В результате расчета по программе PR3 получены следующие результаты.

Доза, мкКл/см ²	параметр <i>G</i>	Доза, мкКл/см ²	параметр <i>G</i>
0.000	0.14	0.250	0.76
0.025	0.22	0.275	0.79
0.050	0.32	0.300	0.81
0.075	0.40	0.325	0.83
0.100	0.48	0.350	0.84
0.125	0.55	0.375	0.86
0.150	0.60	0.400	0.87
0.175	0.65	0.425	0.88
0.200	0.70	0.450	0.88
0.225	0.73	0.475	0.89
		0500	0.90

На основании полученных результатов ниже построен график зависимости параметра G от дозы имплантации.



2. Рассчитать зависимость параметра G от дозы имплантации в диапазоне $0 \div 1$ мкКл/см² при внедрении бора с энергией 90 кэВ в кремниевую подложку р-типа с удельным сопротивлением 4 Ом-см через слой окисла толщиной 0,1 мкм. Построить график зависимости $G(D)$.
3. Провести численные эксперименты по исследованию влияния на параметр G технологических режимов и параметров МОП тест-структуры при внедрении в нее ионов бора, рассчитав и построив:
 - а) зависимость количества ионов бора, проникших в кремний, от энергии ионов в диапазоне 30÷150 кэВ при дозе имплантации 1 мкКл/см² и толщине окисла 0,09 мкм;
 - б) зависимость количества ионов бора, проникших в кремний, от дозы имплантации в диапазоне 0,01÷1 мкКл/см² при энергии 90 кэВ и толщине окисла 0,09 мкм
4. Для кремниевой МОП тест структуры с подложкой п-типа с исходной концентрацией [] и толщиной окисла 0,3 мкм при имплантации ионами мышьяка рассчитать и построить график зависимости G :
 - а) от дозы в диапазоне $0 \div 1$ мкКл/см² при энергии 120 кэВ;
 - б) от энергии в диапазоне 30 ÷ 150 кэВ при дозе 0,5 мкКл/см²;
 Распределение мышьяка считать гауссовским (неусеченная гауссиана).
5. МОП тест-структура с окислом толщиной 0,075 мкм и кремниевой подложкой р-типа с удельным сопротивлением 6 Ом-см имплантируется ионами бора с энергией 70 кэВ.

- Рассчитать дозу имплантации, при которой параметр G равен 0.4.
6. Рассчитать и построить зависимость параметра G от дозы имплантации бора в кремний марки КДБ12.5 через окисел толщиной 0.076 мкм при энергиях 30, 50 и 70 кэВ в диапазоне доз $0 \div 0.6$ мкКл/см².
 7. Исследовать зависимость параметра G от дозы имплантации фосфора в кремний марки КЭФ7.5 через окисел толщиной 0.076 мкм для энергий 60, 80 и 100 кэВ в диапазоне доз $0 \div 0.6$ мкКл/см².
 8. Исследовать зависимость параметра G от дозы имплантации фосфора с энергией 100 кэВ через окисел толщиной 0.07 мкм в кремний с удельным сопротивлением 0.1, 1, 4, 4.5, 7 и 20 Ом·см в диапазоне доз $0 \div 0.5$ мкКл/см².
 9. Рассчитать и построить зависимость параметра G от дозы при имплантации фосфора с энергией 100 кэВ в кремний марки КЭФ7.5 через окисел различной толщины: 0.04, 0.07, 0.09 и 0.12 мкм. Исследуемый диапазон доз $0 \div 0.6$ мкКл/см².

Вопросы

1. Что такое доза имплантации?
2. Нарисуйте идеальную высокочастотную $C-V$ характеристику с полупроводником р-типа (n-типа).
3. Как изменится идеальная $C-V$ характеристика МОП структуры с подложкой р-типа (n-типа) при наличии положительного (отрицательного) заряда в окисле?
4. Как изменится идеальная $C-V$ характеристика МОП структуры с подложкой р-типа (n-типа) при наличии положительной (отрицательной) разности работ выхода?
5. Почему исходные ионно-имплантированные профили в каждой среде аппроксимируются неусеченной гауссианой при построении в двухслойной структуре результирующего распределения по методу составных профилей?
6. В чем физическая причина возникновения скачка концентрации на границе раздела двух сред при ионной имплантации многослойных структур? Какой знак может иметь этот скачок?
7. Почему при определении параметра G не учитывается заряд в окисле и разность работ выхода металл-полупроводник в тестовой МОП структуре?

ЛИТЕРАТУРА

1. Березин Б.И., Мочалкина О.П. Технология и конструирование интегральных микросхем. – М.: Радио и связь, 1992. – 319 с.
2. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. – М.: Наука, 1986. – 320 с.
3. Буренков А.Ф., Крупнов Ю.Т., Курьязов В.Д. Аналитическая модель для построения глубинных профилей внедрения примеси при ионной имплантации. – Микроэлектроника. – 1992. – Т.21, вып.2. – С. 94 – 97.
4. Курносое А.И., Юдин Б.Б. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных схем. – М.: Высшая школа, 1986. – 388 с.
5. Матсон Э.А. Конструирование и расчет микросхем и элементов ЭВА. – Минск: Высшая школа, 1979. – 192 с.
6. Пичугин И.Г., Таиров Ю.Н. Технология полупроводниковых приборов. – М.: Высшая школа, 1984. – 288 с.
7. Плис А.И., Сливина Н.А. Лабораторный практикум по высшей математике, – М.: Высшая школа, 1994. – 416 с.
8. Риссел У., Руге И. Ионная имплантация. – М.: Наука, 1983. – 322 с.
9. Таблицы параметров пространственного распределения ионно - имплантированных примесей. /Буренков А.Ф. и др. – Минск: Изд-во БГУ, 1980. – 288 с.
10. Технология СБИС. В 2 - х кн. / Под ред. Зи С. – М.: Мир, 1986. – Т. 1. – 404 с.; Т. 2. – 433 с.
11. Ассессоров В.В. Математическое моделирование распределений ионно-имплантированных примесей. – Воронеж: ВГУ, 2002. – 100 с.

Составили: Быкадорова Галина Владимировна
Гольдфарб Владимир Абрамович
Дикарев Владимир Иванович
Левин Александр Юрьевич
Ассессоров Валерий Викторович

Редактор: Бунина Т.Д.