

Министерство образования и науки РФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра физической электроники

Т. И. Данилина, И. А. Чистоедова

## ***ТЕХНОЛОГИЯ КРЕМНИЕВОЙ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ***

*Учебно-методическое пособие*

*по аудиторным практическим занятиям и самостоятельной работе для студентов направлений подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника», 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника»*

Томск 2018

Рецензент:

д.т.н., профессор кафедры физической электроники Смирнов С.В.

**Данилина Т.И., Чистоедова И.А.**

Технология кремниевой наноэлектроники: учебно-методическое пособие по аудиторным практическим занятиям и самостоятельной работе для студентов направлений подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника», 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника». – Томск: ТУСУР, Кафедра Физической электроники, 2018. – 61 с.

© Данилина Т.И., Чистоедова И.А., 2018

© Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ.....	4
2. ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ АУДИТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ .....	6
3. ДОМАШНЕЕ ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ .....	19
4. АУДИТОРНЫЕ КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ.....	22
5. ТЕСТОВЫЕ КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ .....	34
6. ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ .....	54
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.....	56
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 .....	57
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 .....	58
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 .....	61

## **1. ВВЕДЕНИЕ**

Учебно-методическое пособие по дисциплине «Технология кремниевой наноэлектроники» содержит варианты индивидуальных заданий для аудиторных практических занятий, краткие сведения по тематике заданий и методические указания для их выполнения, индивидуальные домашние задания, варианты аудиторных контрольных работ, тестовые задания, вопросы к экзамену, список рекомендуемой литературы, в приложениях приведены справочные данные.

В дисциплине «Технология кремниевой наноэлектроники» предметов изучения являются базовые технологии формирования изделий кремниевой наноэлектроники, в том числе интегральные схемы на основе МОП-транзисторов с субмикронными размерами (СБИС). К таким технологиям относятся субмикронная фотолитография (проекционная фотолитография, литография КУФ и ЭУФ-диапазона), пучковые методы литографии (электронно-лучевая, сканирующая ионная литография), технологии ионной имплантации с целью формирования мелкозалегающих p-n переходов МОП-транзисторов.

Основная цель практических занятий по «Технологии кремниевой наноэлектроники» направлена на формирование у студентов следующих умений:

- разрабатывать базовые технологические процессы изготовления наноразмерных кремниевых интегральных схем;
- оценивать технические и экономические риски при выборе технологических процессов изготовления устройств кремниевой наноэлектроники;

Для реализации таких умений требуются практические занятия по индивидуальным заданиям, в которых должны быть предусмотрены расчеты параметров технологических процессов, выбор конкретных технологий с учетом технико-экономических соображений, т.е. задания должны быть практико-ориентированные.

Учебно-методическое пособие содержит варианты индивидуальных заданий для аудиторных занятий по следующим темам:

1. Расчет параметров субмикронной проекционной фотолитографии для получения заданного размера  $b_{min}$ .
2. Расчет минимального диаметра электронного луча в сканирующей электронно-лучевой литографии;
3. Расчет проекционного пробега электронов и распределения объемной удельной энергии на толщине резиста.
4. Расчет разрешающей способности электронно-лучевой литографии.
5. Расчет зависимости ядерных и электронных потерь ионов и приведенной энергии  $\varepsilon$ . Расчет среднего полного пробега  $\bar{R}$ , проецированных пробегов  $\bar{R}_p$ , разбросов пробегов  $\Delta \bar{R}_p$ ,  $\Delta \bar{R}_\perp$ .
6. Расчет распределения внедренной примеси по глубине подложки без отжига и с отжигом радиационных дефектов.
7. Расчет количества дефектов и их распределения по глубине подложки.
8. Расчет параметров ионной имплантации при формировании базы и эмиттера биполярного транзистора.

Индивидуальные задания предусматривают расчеты параметров технологических процессов и выбор конкретной технологии. Индивидуальные задания представляют собой комплексные задания по всем разделам лекционного курса с элементами самостоятельного поиска материала. В приложении приведены справочные данные.

## 2. ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ АУДИТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ

### 2.1. Расчет параметров субмикронной проекционной фотолитографии для получения заданного размера $b_{min}$

1. Рассчитать параметры проекционной литографии ( $\lambda$ ,  $k_I$ ,  $N_A$ ) для получения заданной топологической нормы ( $b_{min}$ ) с учетом субмикронных размеров. Обосновать выбор этих параметров для получения заданного размера с учетом технико-экономических соображений.

Варианты заданий приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Варианты заданий по теме 2.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$b_{min}$ , нм	350	250	180	130	90	65	45	40	32

#### *Методические указания*

При расчете параметров проекционной литографии для получения заданной топологической нормы принять  $k_I=0,6-0,25$ ,  $N_A=0,5-0,9$ . Длина волны  $\lambda$  должна соответствовать существующим источникам излучения.

### 2.2. Расчет минимального диаметра электронного луча в сканирующей электронно-лучевой литографии

1. Рассчитать зависимости диаметра электронного луча на мишени с учетом тепловых скоростей  $d_G$ , сферической  $d_s$  и хроматической  $d_c$  aberrаций, дифракции  $d_d$  от угла схождения  $\alpha$  в диапазоне  $10^{-1}-10^{-4}$  рад. Определить оптимальный угол схождения  $\alpha_{opt}$  и минимальный диаметр  $d_{min}$ . Рекомендовать способы уменьшения диаметра электронного луча.

Варианты заданий приведены в таблице 2.2.

#### *Методические указания*

Электронно-оптическая система электронно-лучевой установки обеспечивает минимальный диаметр электронного луча на подложке.

Диаметр рассчитывается с учетом разброса тепловых скоростей электронов (гауссовский диаметр  $d_G$ ), сферической  $d_s$  и хроматической  $d_c$  aberrаций линз, дифракции  $d_d$ .

Таким образом, диаметр определяет сумма всех составляющих:

$$d_{min} = \sqrt{d_G^2 + d_s^2 + d_c^2 + d_d^2}.$$

Все составляющие зависят от угла сходимости луча к фокусу  $\alpha$ :

$$d_{min}^2 = \frac{1}{\alpha^2} \cdot \left[ \frac{I_0}{3,08В} + \frac{0,36 h}{2meU} \right] + \alpha^6 \cdot \left( \frac{1}{4} C_s^2 \right) + \alpha^2 \cdot \left( C_c \frac{\Delta U}{U} \right)^2,$$

где  $I_0$  – ток пучка;

$В$  – яркость луча;

$h$  – постоянная Планка;

$m, e$  – масса и заряд электрона;

$U$  – ускоряющее напряжение;

$C_s$  – коэффициент сферической aberrации;

$C_c$  – коэффициент хроматической aberrации;

$\Delta U/U$  – разброс электронов по энергиям, обусловленный влиянием термокатода и линзы (хроматической aberrации).

Из уравнения следует, что наименьший диаметр луча получается при некотором оптимальном значении угла сходимости  $\alpha$ .

При выполнении практики следует рассчитать зависимости всех составляющих электронного пучка ( $d_G, d_s, d_c, d_d$ ) от угла схождения  $\alpha$  в диапазоне ( $10^{-4} - 10^{-1}$ ) рад. По графикам определить оптимальный угол схождения  $\alpha_{opt}$  и минимальный диаметр луча.

**Выводы:** рекомендовать пути уменьшения диаметра с учетом конкретных исходных данных варианта.

Таблица 2.2 – Варианты заданий по теме 2.2.

Номер варианта	$T_k, \text{K}$	$j_k, \text{A/cm}^2$	$U_0, \text{kB}$	$I_0, \text{A}$	$C_s, \text{cm}$	$C_c, \text{cm}$	$\Delta U, \text{B}$
1	3000	10	20	$10^{-8}$	20	10	1,6
2	3000	10	20	$10^{-8}$	30	20	2
3	3000	10	30	$10^{-7}$	20	20	3
4	3000	10	30	$10^{-7}$	30	10	3,5
5	3000	10	30	$10^{-9}$	20	10	3
6	3000	10	20	$10^{-9}$	40	20	2,5
7	3000	10	40	$10^{-7}$	30	20	2
8	3000	10	20	$10^{-9}$	20	20	1,6
9	2000	100	30	$10^{-10}$	20	10	3
10	2000	100	30	$10^{-8}$	40	10	2,4
11	2000	100	20	$10^{-7}$	20	10	3,5
12	2000	100	20	$10^{-8}$	20	10	2,6
13	2000	100	30	$10^{-7}$	30	20	2,7
14	2000	100	40	$10^{-7}$	20	10	2,2
15	2000	100	30	$10^{-8}$	30	30	2,3
16	2000	100	40	$10^{-9}$	20	10	1,4
17	2000	100	25	$10^{-9}$	20	10	1,5
18	2000	100	35	$10^{-6}$	10	10	2,1
19	2000	100	35	$10^{-6}$	20	20	2,5
20	2000	100	25	$10^{-7}$	30	10	2,2

Примечание к таблице 2.2:  $T_k$  - температура катода;  $j_k$  - плотность тока эмиссии катода;  $U_0$  - ускоряющее напряжение;  $I_0$  - ток луча;  $C_s$  - коэффициент сферической абберации;  $C_c$  - коэффициент хроматической абберации;  $\Delta U$  - средний разброс энергий электронов.

### 2.3. Расчет проекционного пробега электронов и распределения объемной и удельной энергии по толщине

1. Рассчитать проекционный пробег электронов по формуле Виддингтона-Томсона  $R_{В-Т}$ . Рассчитать распределение эффективных энергетических потерь электронов  $(dE/dx)_{эф}$  и объемной удельной энергии  $Q$  по толщине резиста. Определить характерные точки в этих распределениях. Определить требуемую энергию электронов, исходя из условия максимального энерговыделения на глубине, равной половине толщины резиста.

#### *Методические указания*

Проекционный пробег электронов в резисте следует рассчитывать по формуле Виддингтона-Томсона  $R_{В-Т}$ . Затем рассчитать распределение эффективных энергетических потерь электронов  $(dE/dx)_{эф}$  и объемной удельной энергии по толщине резиста. Определить характерные точки в этих распределениях. Определить требуемую энергию электронов, исходя из условия максимального энерговыделения на глубине, равной половине толщине резиста.

Варианты заданий приведены в таблице 2.3.

Данные для электронорезиста ПММА:  $\rho = 1,2 \text{ г/см}^3$ ;  $Z=3,4$ ;  $M=6,3 \text{ г/моль}$ ,  $N_0=7 \cdot 10^{17} \text{ ат/см}^3$ .

*Выводы:* Обосновать выбор энергии электронов и толщины резиста, исходя из технико-экономических соображений.

Таблица 2.3 – Варианты заданий по теме 2.3.

Номер варианта	$E_0$ , кэВ	$h$ , мкм	$S_0$ , Кл/см <sup>2</sup>
1	20	0,5	$4 \cdot 10^{-5}$
2	20	0,6	$5 \cdot 10^{-5}$
3	30	0,7	$6 \cdot 10^{-5}$
4	30	0,8	$7 \cdot 10^{-5}$
5	30	0,9	$8 \cdot 10^{-5}$
6	20	1,0	$2 \cdot 10^{-5}$
7	40	1,1	$1 \cdot 10^{-5}$
8	20	1,2	$9 \cdot 10^{-6}$
9	30	0,3	$8 \cdot 10^{-6}$
10	30	1,4	$7 \cdot 10^{-6}$
11	20	0,5	$6 \cdot 10^{-6}$
12	20	0,6	$5 \cdot 10^{-6}$
13	30	0,5	$4 \cdot 10^{-6}$
14	40	0,4	$3 \cdot 10^{-6}$
15	30	0,7	$2 \cdot 10^{-6}$
16	40	0,8	$1 \cdot 10^{-6}$
17	25	0,6	$8 \cdot 10^{-7}$
18	35	1,0	$4 \cdot 10^{-7}$
19	35	0,9	$3 \cdot 10^{-7}$
20	25	0,8	$5 \cdot 10^{-7}$

Примечание к таблице 2.3:  $E_0$  - энергия электронов;  $h$  - толщина резиста;  $S_0$  - доза облучения.

#### 2.4. Расчет разрешающей способности электронно-лучевой литографии

1. Рассчитать уширение электронного луча при прохождении слоя резиста толщиной  $h$  для вариантов заданий, приведенных в таблице 2.3. Используя данные, полученные при выполнении заданий 2.2 и 2.3, оценить разрешающую способность электронной литографии.

##### *Методические указания*

Разрешающую способность ЭЛЛ оценивают минимальным размером элемента  $b_{min}$ , который определяется минимальным диаметром электронного луча  $d_{min}$  и рассеянием электронов  $\Delta u$  в слое резиста толщиной  $h$ :

$$b_{min} = d_{min} + 2 \Delta y,$$

где  $\Delta y$  – суммарное уширение за счет упругого рассеяния электронов  $\Delta y_1$  и за счет вторичных электронов, отраженных от подложки  $\Delta y_{отр}$ .

Рассчитывать разрешающую способность следует по следующему алгоритму:

1) рассчитать вклад упругого рассеяния по формуле:

$$\Delta y_1 = h \cdot \bar{\theta},$$

где ( $\bar{\theta}$  – средний угол рассеяния электронов,  $h$  – толщина резиста);

2) рассчитать вклад вторичных электронов по формуле

$$\Delta y_{отр} = h \cdot \sqrt{\sqrt{\frac{E_0 \cdot Q_0 \cdot \eta}{E_h \cdot Q_{пор}}} - 1},$$

$E_h$  – энергия электронов, прошедших резист толщиной  $h$ ;

$\eta$  – коэффициент неупругого отражения электронов.

$$E_h = E_0 \sqrt{1 - \frac{\hbar}{R_{B-T}}}. \quad \eta = (Z - 8) / (2 \cdot Z). \quad \eta \approx 0,2 - 0,4.$$

Отношение  $Q_0 / Q_{пор}$  для электронных резистов колеблется в пределах 2–8.

**Выводы:** Оценить влияние тока пучка  $I_0$  и энергии электронов  $E_0$  на  $b_{min}$ . Рекомендовать параметры ЭЛЛ для получения субмикронных размеров элементов (для повышения разрешающей способности).

**2.5. Расчет зависимости ядерных и электронных потерь ионов и приведенной энергии  $\varepsilon$ . Расчет среднего полного пробега  $\overline{R}$ , проецированных пробегов  $\overline{R}_p$ , разбросов пробегов  $\Delta\overline{R}_p$  и  $\Delta\overline{R}_\perp$**

1. Рассчитать зависимость ядерных и электронных потерь от приведенной энергии  $\varepsilon$  в диапазоне  $\varepsilon = 0-3$ . Рассчитать полный пробег  $\overline{R}$ , проецированный пробег  $\overline{R}_p$  и разбросы пробегов  $\Delta\overline{R}$  и  $\Delta\overline{R}_p$  по теории ЛШШ для энергии ионов 100 кэВ.

Варианты индивидуальных заданий приведены в таблице 2.4.

*Методические указания*

Ядерные и электронные потери рассчитываются по теории ЛШШ в безразмерных параметрах энергии  $\varepsilon$  и пробега  $\rho$ . Результаты расчетов следует представить графически в зависимости от  $\varepsilon^{1/2}$ . На графиках следует указать характерные точки  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  и  $\varepsilon$  - безразмерную энергию, соответствующую энергии 100 кэВ для заданного типа ионов.

*Выводы:* на структуре показать  $\overline{R}_p$ ,  $\Delta\overline{R}_p$  и  $\Delta\overline{R}_\perp$ , на графиках показать, как изменятся значения  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  и  $\varepsilon$  для тяжелых и легких ионов. Сделать вывод, какие преобладают потери при смене сорта ионов.

**2.6. Расчет распределения внедренной примеси по глубине подложки без отжига и с отжигом радиационных дефектов**

Рассчитать распределение внедренной примеси по глубине без отжига и с отжигом. Определить глубину залегания  $p$ - $n$  перехода.

*Методические указания*

Распределение внедренной примеси по глубине  $N(x)$  при ионной имплантации описывается законом Гаусса:

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

где  $x$  – расстояние от поверхности вглубь полупроводника в направлении падения ионов.

При ионной имплантации максимум концентрации примеси  $N(x) = N_{max}$  будет на глубине  $x = \bar{R}_p$ , а при  $x = x_{p-n}$   $N(x) = N_{ucx}$ . Характер распределения ( $N_{max}$ ,  $x_{p-n}$ ) зависит от параметров ионной имплантации: энергии ионов  $E$ , дозы облучения  $Q$ .

От энергии ионов зависит  $\bar{R}_p$ , а от дозы – концентрация внедренной примеси в подложке.

Для того чтобы удалить вносимые ионной имплантацией радиационные дефекты, необходима последующая термообработка (отжиг). В процессе отжига может происходить термическая диффузия внедренной примеси. Влияние отжига на распределение внедренной примеси описывается уравнением

$$N(x,t) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \cdot (\Delta \bar{R}_p^2 + 2Dt)^{1/2}} \cdot \exp \left[ -\frac{(x - \bar{R}_p)^2}{2 \cdot \Delta \bar{R}_p^2 + 4Dt} \right],$$

где  $D$  – коэффициент диффузии примеси, соответствующей по значению коэффициенту диффузии при традиционном диффузионном процессе;  $t$  – время диффузии.

Варианты заданий представлены в таблице 2.4.

**Выводы:** результаты расчетов следует представить на одном графике и сделать вывод, какой вид отжига имеет место при заданных исходных параметрах отжига. Затем рекомендовать оптимальный способ отжига (высокотемпературный, низкотемпературный, БТО), исходя из технико-экономических соображений.

Таблица 2.4– Варианты заданий по теме 2.5 и теме 2.6.

Номер варианта	Подложка	Ион	$Q$ , ион/см <sup>2</sup>	$C_{исх}$ , см <sup>-3</sup>	$T_0$ , °C	$t_0$ , мин	$\Delta E$ , эВ	$D_0$ , см <sup>2</sup> /с	$R_{p1}$ , мкм	$\Delta R_{p1}$ , мкм		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
1	Si	B	$10^{12}$	$10^{15}$	1050	15	3,7	11,5	0,309	0,07		
2		Al	$10^{13}$		1000	20	3,5	10				
3		Ga	$10^{15}$		1050	25	3,5	3,3				
4		In	$10^{14}$		1027	20	3,9	16				
5		Te	$10^{14}$		1027	15	3,9	16				
6	Si	P	$10^{15}$	$10^{16}$	1050	30	4,4	1400	0,103	0,03		
7		As	$10^{15}$		1077		3,6	0,44			0,05	0,016
8		Sb	$10^{14}$		1080		3,9	4				
9		Bi	$10^{13}$		1100		4,6	770				
10		Au	$10^{13}$		727		1,1	$9,5 \cdot 10^{-3}$				
11	Ge	Te	$10^{13}$	$10^{15}$	700	20	2,0	$2,6 \cdot 10^{-5}$	0,05	0,017		
12		S	$10^{14}$		700		2,8	$4 \cdot 10^3$				
13		Se	$10^{12}$		750		4,16	$3 \cdot 10^3$				
14		Sn	$10^{13}$		750		2,5	$6 \cdot 10^{-4}$				
15		Zn	$10^{13}$		800		1,5	$8 \cdot 10^{-5}$				
16	Ge	Cd	$10^{12}$	$10^{15}$	700	20	2,43	$1,3 \cdot 10^{-2}$				
17		Ga	$10^{14}$		850		1,8	$3 \cdot 10^{-5}$				
18		Au	$10^{14}$		900		1,1	$1 \cdot 10^{-3}$				
19		Ag	$10^{15}$		900		2,5	$4 \cdot 10^{-4}$				

Примечание к таблице 2.4: физические постоянные приведены в приложении 1, а атомные номера и массы - в приложении 2. При расчете  $\varepsilon$  заряд электрона надо подставлять в системе СГС, а энергию  $E_0$  - в эрг. Характеристики полупроводников - в приложении 3.  $Q$  - доза облучения;  $C_{исх}$  - исходная концентрация примеси в подложке;  $T_0$ ,  $t_0$  - температура и время после имплантационного отжига;  $D_0$  - постоянная;  $\Delta E$  - энергия активации диффузии;  $R_{p1}$ ,  $\Delta R_{p1}$  - параметры пробега ионов в  $SiO_2$  при  $E_0=100$  кэВ; коэффициент распыления  $K$  для кремния ионами аргона при  $E_0=5$  кэВ равен 1,45; а для германия -  $K=2,6$ .

## 2.7. Расчет количества дефектов и их распределения по глубине подложки

1. Рассчитать количество дефектов и их распределение по глубине.

Варианты индивидуальных заданий приведены в табл.2.5.

*Методические указания*

Распределение концентрации дефектов по глубине  $N_D(x)$  описывается уравнением Гаусса:

$$N_D(x) = \frac{\overline{N_{\text{см}}} Q}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta R_{pD}} \exp\left(-\frac{(x - \overline{R_{pD}})^2}{2\Delta R_{pD}^2}\right),$$

где  $\overline{N_{\text{см}}}$  - количество смещенных атомов одним ионом;

$\overline{R_{pD}}, \Delta R_{pD}$  - средний проецированный пробег дефектов и среднее отклонение от него.

Концентрация дефектов в слое внедрения определяется по формуле:

$$\overline{N_D} = \frac{\overline{N_{\text{см}}} Q}{R_{pD}},$$

При концентрации дефектов, соизмеримой с атомной плотностью кремния (20-100 %)  $N_0$ , наступает полная аморфизация.

При  $\overline{N_D} = N_0$  доза облучения соответствует дозе аморфизации, т.е.

$$Q_A = \frac{N_0 \overline{R_{pD}}}{\overline{N_{\text{см}}}},$$

*Выводы:* результаты расчетов представить на одном графике с распределением внедренных ионов по глубине. Сделать выводы о характере распределения дефектов. Рассчитать зависимости концентрации дефектов от дозы и определить дозу аморфизации.

## 2.8. Расчет параметров ионной имплантации при формировании базы и эмиттера биполярного транзистора

1. Рассчитать распределение концентрации примеси при изготовлении биполярного транзистора. Данные для расчета: эмиттер - As,  $E_0=100$  кэВ,  $Q=10^{15}-10^{16}$  см<sup>-2</sup>;  $T_0=1000^\circ\text{C}$ ,  $t_0=20-30$  мин; база - бор,  $E_0=200$  кэВ,  $Q=2\cdot 10^{12}-10^{13}$  см<sup>-2</sup>;  $T_0=850^\circ\text{C}$ ,  $t_0=20$  мин. Определить глубину залегания  $p-n$  переходов. В коллекторе  $N_{исх}=10^{14}$  см<sup>-3</sup>.

### Методические указания

При расчете параметров ионной имплантации необходимо обеспечить заданные значения глубины залегания перехода эмиттер-база -  $x_{э-б}$ , глубины залегания перехода база-коллектор -  $x_{б-к}$ , максимальной концентрации примеси в эмиттере -  $N_{maxЭ}$ , в базе -  $N_{maxБ}$  при постоянной исходной концентрации примеси в коллекторе -  $N_k$ .

Распределение примеси при ионной имплантации рассчитывается по следующему уравнению:

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

Максимальная концентрация примеси  $N_{max}$  будет при  $x = \bar{R}_p$  и тогда

$$N_{max} = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \Delta R_p} = \frac{Q}{R_p},$$

Отсюда

$$Q = N_{max} \bar{R}_p,$$

При  $x = x_{p-n}$  концентрация примеси  $N(x) = N_{исх}$  и тогда

$$N_{исх} = \frac{Q}{R_p} \exp\left(-\frac{(x_{p-n} - R_p)^2}{2\Delta R_p^2}\right) \text{ или } N_{исх} = N_{max} \exp\left(-\frac{(x_{p-n} - R_p)^2}{2\Delta R_p^2}\right).$$

Решаем это уравнение относительно  $x_{p-n}$  и получаем

$$X_{p-n} = \overline{R_p} \pm \Delta \overline{R_p} \sqrt{2 \ln \frac{N_{\max}}{N_{\text{исх}}}},$$

По этому уравнению рассчитывается зависимость  $x_{p-n}$  от энергии ионов с использованием теории ЛШШ для расчета  $\overline{R_p}$ ,  $\Delta \overline{R_p}$ .

По этой зависимости для заданного значения  $x_{p-n}$  определяется энергия ионов и для этой энергии рассчитывается  $\overline{R_p}$ .

Доза ионной имплантации рассчитывается как

$$Q = N_{\max} \overline{R_p},$$

Распределение примеси для базы рассчитывается аналогично для  $N_{\text{исх}}=N_k$ . Эмиттер формируется при имплантации ионов в область базы и исходная концентрации для эмиттера будет равна концентрации примеси в базе при  $x=x_{э-б}$ .

Варианты индивидуальных заданий приведены в таблице 2.5.

*Выводы:* представить структуру заданного транзистора, выбрать примеси и произвести расчеты. Представить распределение примесей в биполярном транзисторе. Рекомендовать параметры ионной имплантации для формирования базы и эмиттера с учетом технико-экономических соображений.

Таблица 2.5 – Варианты индивидуальных заданий по теме 2.8

Транзистор коллектор- база- эмиттер	Вариант	$x_{э-б},$ нм	$x_{б-к},$ нм	$N_{maxэ},$ $см^{-3}$	$N_{maxб},$ $см^{-3}$	$N_k, см^{-3}$
<i>n-p-n</i>	1	200	700	$10^{21}$	$5,5 \cdot 10^{19}$	$2 \cdot 10^{16}$
<i>p-n-p</i>	2	400	1000	$7 \cdot 10^{20}$	$3 \cdot 10^{19}$	$2 \cdot 10^{16}$
<i>n-p-n</i>	3	600	1300	$4 \cdot 10^{20}$	$10^{19}$	$2 \cdot 10^{16}$
<i>p-n-p</i>	4	1200	2000	$2 \cdot 10^{20}$	$7 \cdot 10^{18}$	$2 \cdot 10^{16}$
<i>n-p-n</i>	5	700	1600	$10^{20}$	$5 \cdot 10^{18}$	$2 \cdot 10^{16}$
<i>p-n-p</i>	6	200	1200	$8 \cdot 10^{19}$	$3 \cdot 10^{18}$	$2 \cdot 10^{16}$
<i>n-p-n</i>	7	200	700	$7 \cdot 10^{19}$	$10^{18}$	$2 \cdot 10^{16}$
<i>p-n-p</i>	8	400	1000	$5 \cdot 10^{19}$	$9 \cdot 10^{17}$	$2 \cdot 10^{16}$
<i>n-p-n</i>	9	600	1300	$10^{21}$	$5 \cdot 10^{19}$	$10^{16}$
<i>p-n-p</i>	10	1200	2000	$8 \cdot 10^{20}$	$3 \cdot 10^{19}$	$10^{16}$
<i>n-p-n</i>	11	700	1600	$5 \cdot 10^{20}$	$2 \cdot 10^{19}$	$10^{16}$
<i>p-n-p</i>	12	200	1200	$3 \cdot 10^{20}$	$10^{19}$	$10^{16}$
<i>n-p-n</i>	13	200	700	$2 \cdot 10^{20}$	$8 \cdot 10^{18}$	$10^{16}$
<i>p-n-p</i>	14	400	1000	$9 \cdot 10^{19}$	$6 \cdot 10^{18}$	$10^{16}$
<i>n-p-n</i>	15	600	1300	$7 \cdot 10^{19}$	$5 \cdot 10^{18}$	$10^{16}$

### 3. ДОМАШНЕЕ ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

#### Вариант 1

Исследовать влияние ускоряющего напряжения, толщины и характеристик резиста, материала подложки на параметры рассеяния.

#### Вариант 2

Представить схему установки последовательной электронно-лучевой литографии и рассчитать зависимость диаметра луча на подложке от тока электронного луча в диапазоне  $10^{-12}$ - $10^{-6}$  А. Найти компромисс между разрешающей способностью и временем экспонирования.

#### Вариант 3

Оценить факторы, определяющие время экспонирования при электронной литографии. Рассчитать оптимальное время экспонирования, определив минимальное значение тока луча и другие параметры электронно-лучевой установки. Расчет сделать на получение линии шириной 0,1 мкм.

#### Вариант 4

Представить схему последовательной электронной литографии. Объяснить появление эффектов близости. Исследовать влияние толщины резиста на получение изображения малых экспонируемых областей  $b$  при их близком расположении  $a$ . Сформулировать условие, необходимое для обеспечения минимального расстояния  $a$ .

#### Вариант 5

Рассчитать ограничения на параметры электронно-лучевой установки, когда надо учитывать влияние дифракции.

### Вариант 6

Оценить факторы, определяющие время экспонирования при электронной литографии. Рассчитать оптимальное время экспонирования для резистов с различной чувствительностью.

### Вариант 7

Рассчитать для какой разрешающей способности электронной литографии необходимо учитывать явление дифракции в зависимости от ускоряющего напряжения.

### Вариант 8

Рассчитать пробеги легких и тяжелых ионов в GaAs при  $E_0=100$  кэВ. Ионы - H, S. Сравнить распределение ионов по глубине при  $Q=\text{const}$ ;  $C_{\text{исх}}=\text{const}$ . Области применения.

### Вариант 9

Рассчитать распределение концентрации примеси по глубине при имплантации ионов В в кремний при  $E_0=100$  кэВ без отжига и с отжигом.  $Q=\text{const}$ ;  $C_{\text{исх}}=\text{const}$ . Исследовать влияние параметров отжига на глубину залегания p-n переходов. Рекомендовать параметры отжига для обеспечения субмикронных  $x_{p-n}$ .

### Вариант 10

Получить резисторы для СБИС путем имплантации ионов бора с энергией 70-100 кэВ. Рассчитать необходимые дозы облучения и режимы отжига для изменения сопротивления от 10 Ом/□ до 100 Ом/□.

### Вариант 11

Радиационные дефекты, приводящие к образованию аморфного слоя. Рассчитать дозу аморфизации для кремния при бомбардировке ионами бора и фосфора. Рассмотреть зависимость критической дозы от энергии ионов в диапазоне 50-200 кэВ и от температуры мишени.

### Вариант 12

Каналирование ионов. Получить условия каналирования при различных энергиях ионов. Мишень - кремний. Ионы - бор, фосфор. Энергия ионов 50-150 кэВ. Доза облучения  $10^{12}$ - $10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>.

### Вариант 13

Рассмотреть получение изолирующих слоев в GaAs путем последовательных имплантаций ионов кислорода (или бора, азота, гелия, протонов) с различными энергиями при дозах  $Q > 2 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup>. Рассчитать требуемые параметры ионной имплантации для различных ионов.

### Вариант 14

Рассчитать ядерное и электронное торможение в зависимости от энергии ионов для различных пар ион-вещество. Произвести сопоставление. Определить характерные значения энергий ионов  $E_1$   $E_2$   $E_3$ , соответствующие точкам  $\varepsilon_1$   $\varepsilon_2$   $\varepsilon_3$ . Материал мишени - кремний; ионы - бор, фосфор.

### Вариант 15

Радиационные дефекты в полупроводнике, возникающие при ионном легировании. Рассчитать количество дефектов и их распределение для тяжелых и легких ионов в зависимости от дозы облучения. Мишень - кремний. Ионы - бор, мышьяк.  $j_1=0,08$ ;  $j_2=0,4$ ;  $j_3=2,3$ ;  $j_4=4,6$  мкА/см<sup>2</sup>.

### Вариант 16

Ионное легирование кремния через маски с размерами 1 и 10 мкм. Рассчитать образование боковых профилей распределения внедренной примеси при бомбардировке ионами фосфора.

### Вариант 17

Рассчитать распределение концентрации примеси по глубине при имплантации ионов P, As, Sb, Bi, Au в кремний. Изменением параметров ионной имплантации обеспечить получение заданного  $x_{p-n} = \text{const}$ .

**Вариант 18**

Рассчитать режимы высокотемпературного отжига после имплантации ионов В и Те в кремний, при которых глубина залегания р-п перехода увеличится на 0,1 мкм.

**Вариант 19**

Рассчитать распределение концентрации примеси с учетом и без учета эффекта распыления для легких и тяжелых ионов.

**Вариант 20**

Сформировать мелкозалегаяющие области истока-стока МОП-транзистора. Рассчитать параметры ионной имплантации для обеспечения концентрации примеси  $N_{\max}=10^{20} \text{ см}^{-3}$ ,  $x_{\text{р-п}}=50 \text{ нм}$ ,  $N_{\text{исх}}=10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

**Вариант 21**

Рассчитав значение длины пробега и величины потери энергии иона на ядерное торможение для ионов мышьяка с энергией 30 кэВ, доказать, что дефектная область траектории иона является аморфной. Дефектная область, формируемая одиночным ионом, имеет диаметр 3 нм.

**4. АУДИТОРНЫЕ КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ****4.1. Контрольная работа № 1****Вариант 1**

1. Как получается рисунок при последовательной ЭЛЛ.
2. Каким образом для электронной пушки обеспечить малое значение угла схождения  $\alpha$  (для уменьшения aberrаций) при достаточной  $I_{\max}$ ? Рассмотреть этот вопрос теоретически и практически.
3. Представить механизмы рассеяния пучка электронов при электронно-лучевом экспонировании.

### Вариант 2

1. Рассчитать  $\lambda$  электронов, имеющих энергию 20 кэВ.
2. Пояснить, что такое яркость электронных пушек и рассчитать эту величину для двух типов катодов: термокатод из вольфрамовой проволоочки -  $T_k=3000$  К,  $j_k=10$  А/см<sup>2</sup>; термокатод в виде стержня из гексаборида лантана -  $T_k=2000$  К,  $j_k=100$  А/см<sup>2</sup>. Ускоряющее напряжение 20 Кв.
3. Определить минимальное число электронов, которое необходимо для экспонирования резиста с чувствительностью  $10^{-5}$  Кл/см<sup>2</sup>.

### Вариант 3

1. Почему разрешающая способность электронной литографии выше, чем оптической?
2. Пояснить, как понимать "диаметр сфокусированного луча" и рассчитать эту величину для электронных пушек с различной яркостью:  $B_1=5 \cdot 10^4$ ,  $B_2=10^6$ ,  $B_3=10^9$  А·см<sup>-2</sup>·ср<sup>-1</sup>.  $\alpha=10^{-2}$  рад,  $I_0=1 \cdot 10^{-6}$  А.
3. Рассмотреть взаимосвязь между минимальной шириной экспонируемой линии и дозой облучения для уровня  $N_{\min}=200$ .

### Вариант 4

1. Свойства электронных резистов.
2. Рассчитать наименьший диаметр электронного луча при наличии сферической аберрации. Показать, где находится этот диаметр.  $C_s=40$  см,  $\alpha=10^{-2}$  рад.
3. Последовательная электронная литография. Почему этот метод рекомендуется для изготовления эталонных шаблонов?

### Вариант 5

1. Показать на структуре проецированный пробег электронов и максимум энергетических потерь.

2. Рассчитать наименьший диаметр электронного луча при наличии хроматической аберрации. Показать, где находится этот диаметр.  $C_c=10$  см,  $\Delta U=7$  В,  $U=20$  Кв.  $\alpha=10^{-2}$  рад.
3. Объяснить появление эффектов близости (внешний и внутренний) в электронной литографии. Указать пути их уменьшения.

#### Вариант 6

1. Объяснить разброс электронов по тепловым скоростям.
2. Рассчитать, при каком угле сходимости  $\alpha$  необходимо учитывать явления дифракции электронного луча при прохождении ограничивающей апертуры? Показать, где находится диафрагма с ограничивающей апертурой.  $U=15$  Кв.  $\alpha=10^{-4}$ - $10^{-2}$  рад.
3. Показать типичные характеристики экспонирования позитивного и негативного электронных резистов.

#### Вариант 7

1. Показать на рисунке возникновение сферической аберрации в ЭЛУ.
2. Как изменится ток на образец при уменьшении диаметра электронного пятна с 10 до 0,1 мкм, если при диаметре пятна 10 мкм ток оставляет  $10^{-5}$  А?
3. Рассмотреть причины возникновения разброса энергий электронов в электронном луче. Каким образом разброс энергий электронов ограничивает минимальный размер пятна электронного луча на мишени?

#### Вариант 8

1. Показать на рисунке возникновение хроматической аберрации в ЭЛУ.
2. Как изменится диаметр электронного пятна на мишени, если необходимо увеличить ток с  $10^{-8}$  до  $10^{-5}$  А?
3. Оценить факторы, определяющие время экспонирования при последовательной электронной литографии.

### Вариант 9

1. Рассчитать зависимость максимальной плотности тока  $j_{\max}$  от угла схождения луча  $\alpha$  в диапазоне от  $10^{-4}$  до  $10^{-1}$  рад. Используется термокатод:  $T_{\kappa}=3000$  К,  $j_{\kappa}=10$  А/см<sup>2</sup>. Ускоряющее напряжение 15 Кв.
2. Объяснить зависимость скорости проявления позитивного резиста от дозы облучения электронами.
3. Рассмотреть ограничения электронно-лучевой литографии, связанные с резистом.

### Вариант 10

1. Преимущества и недостатки ЭЛЛ.
2. Каким образом для электронной пушки обеспечить малое значение угла схождения  $\alpha$  (для уменьшения абберации) при достаточной  $I_{\max}$ ? Рассмотреть этот вопрос теоретически и практически.
3. Рассмотреть взаимосвязь между минимальной шириной экспонируемой линии и дозой облучения.

### Вариант 11

1. Сферическая абберация. Что такое кружок наименьшего рассеяния?
2. Рассчитать минимальный диаметр луча, ограниченный поперечной составляющей тепловой скорости, в зависимости от угла сходимости  $\alpha$  при следующих исходных данных:  $T_{\kappa}=3000$  К,  $j_{\kappa}=10$  А/см<sup>2</sup>,  $U_0=20$  Кв,  $I_0=10^{-8}$  А.  $\alpha=10^{-1}-10^{-4}$  рад.
3. Чувствительность электронных резистов.

### Вариант 12

1. Объяснить распределение энергетических потерь по глубине.
2. Дать понятие "яркость" электронных пушек и рассчитать эту величину для термокатада на вольфраме:  $T_{\kappa}=3000$  К,  $j_{\kappa}=10$  А/см<sup>2</sup>,  $U=30$  Кв.

3. Объяснить, почему в электронно-лучевой литографии можно пренебречь явлениями дифракции.

#### Вариант 13

1. Хроматическая аберрация. Что такое кружок наименьшего рассеяния?
2. Дать понятие "гауссовский" диаметр луча и подсчитать его при следующих исходных данных:  $T_k=3000$  К,  $j_k=10$  А/см<sup>2</sup>,  $I_0=10^{-9}$  А.  $\alpha=10^{-2}$  рад.
3. Нарисовать ход лучей электронов в электронно-лучевой установке.

#### Вариант 14

1. Показать на рисунке угол сходимости и положение кроссовера в электронно-лучевой установке.
2. Изменение эффективных энергетических потерь от глубине. Показать положение характерных точек.
3. Позитивный и негативный эффекты при электронно-лучевом экспонировании.

#### Вариант 15

1. Объяснить взаимосвязь времени экспонирования, плотности тока и чувствительности резиста.
2. Рассчитать влияние угла сходимости  $\alpha$  на диаметр кружка рассеяния, возникающего вследствие сферической аберрации:  $C_s=20$  см,  $\alpha=10^{-1}-10^{-4}$  рад.
3. Характеристики источников электронов для электронно-лучевых установок.

#### Вариант 16

1. Что такое оптимальный угол сходимости луча в электронно-лучевой установке?

2. Проекционный пробег электронов по формуле Виддингтона-Томсона. Рассчитать пробег при  $E_0=10-40$  кэВ.
3. Как образуется минимальный диаметр электронного луча на мишени?

#### Вариант 17

1. Показать на структуре проецированный пробег электронов и эффективные энергетические потери.
2. Объяснить взаимосвязь минимального количества электронов для экспонирования с шириной экспонируемой линии.
3. Как получить наименьший диаметр луча на мишени?

#### Вариант 18

1. Чем определяется ширина экспонированной линии в электронно-лучевой литографии?
2. Рассчитать наименьший диаметр луча на мишени:  $I_0=10^{-9}$  А,  $B=10^6$  А/см<sup>2</sup>·ср,  $C_s=30$  см.
3. Дать понятие эффективных энергетических потерь.

#### Вариант 19

1. Механизмы рассеяния электронов в резисте.
2. Дать понятие "гауссовский" диаметр луча и рассчитать его для источника электронов на основе полевых эмиттеров с яркостью  $B=10^8$  А/см<sup>2</sup>·ср;  $I_0=10^{-7}$  А,  $\alpha=10^{-2}$  рад.
3. Проанализировать зависимость времени экспонирования от чувствительности резиста.

#### Вариант 20

1. Ограничения электронно-лучевой литографии, связанные с минимальным количеством электронов.

2. Дать понятие "яркость" электронных пушек и рассчитать эту величину для термокатода из гексаборида лантана  $T_k=2000$  К,  $j_k=100$  А/см<sup>2</sup>.
3. Объяснить влияние отраженных электронов на уширение экспонируемой линии.

## 4.2. Контрольная работа № 2

### Вариант 1

1. Что такое доза облучения, энергия и скорость ионов? Определить энергию молекулярного иона  $BF_2$ , ускоренного потенциалом 30 Кв.  $M_B=10,8$ ,  $M_F=19$ .
2. Рассчитать длину пробега ионов мышьяка в кремнии, приняв  $\left(\frac{dE}{dx}\right)_a = 10^3$  кэВ/мкм и  $\left(\frac{dE}{dx}\right)_y = 3 \cdot 10^2$  кэВ/мкм при энергии 100 кэВ. Объяснить полученные результаты.
3. Виды дефектов при ионном легировании. Определить число смещенных атомов кремния при начальной энергии ионов 50 кэВ.  $E_{cm}=15$  эВ.

### Вариант 2

1. Определить параметры, которые будут определять время ионной имплантации?
2. Объяснить характер распределения примеси при ионной имплантации.
3. Что такое точечные дефекты? Рассчитать концентрацию этих дефектов при бомбардировке мишени из кремния ионами бора с дозой  $10^{13}$  см<sup>-2</sup>.  $E_{cm}=15$  эВ. Ядерные потери составляют 16 кэВ/мкм.

### Вариант 3

1. Определить дозу облучения  $Q$ , если  $D=1,6$  Кл/м<sup>2</sup> для однократно и для трижды ионизированных моноатомных частиц.

2. Рассчитать потери энергии иона за счет ядерного торможения  $\left(\frac{d\varepsilon}{d\rho}\right)_я$ , используя аналитическую аппроксимацию. Объяснить эту зависимость.  $\varepsilon=0,05-10$ ;  $A=0,45$ ;  $B=0,3$ .
3. Сравнить распределение примеси по глубине при ионной имплантации с распределением дефектов при прочих равных условиях.

#### Вариант 4

1. Что происходит при высокотемпературном отжиге радиационных дефектов?
2. Рассчитать длину пробега ионов бора в кремнии, приняв  $\left(\frac{dE}{dx}\right)_я=30$  кэВ/мкм и  $\left(\frac{dE}{dx}\right)_э=3\cdot 10^2$  кэВ/мкм при энергии 100 кэВ. Объяснить полученные результаты.
3. Явление аморфизации полупроводника при ионном легировании.

#### Вариант 5

1. Объяснить, что дает быстрый термический отжиг?
2. Что дает легирование кластерными ионами по сравнению с моноионами?
3. Особенности возникновения радиационных дефектов при легировании тяжелыми ионами. Рассчитать зависимость полного числа дефектов от дозы облучения в диапазоне  $10^{11}-10^{13}$  см<sup>-2</sup>. Как изменится характер этой зависимости при дальнейшем увеличении дозы? Мишень - кремний, ионы - фосфор,  $E_{см}=15$  эВ. Потери энергии равны  $5\cdot 10^2$  кэВ/мкм.

### Вариант 6

1. Определить время процесса, необходимое для ионной имплантации с дозой  $10^{13}$  см<sup>-2</sup>, если плотность тока в ионном пучке составляет  $1,6 \cdot 10^{-8}$  А/см<sup>-2</sup>.
2. Проблемы легирования глубоких «тренчей».
3. Особенности легирования монокристаллов, эффект «каналирования». Сравнить распределение примесей для монокристаллов и аморфных тел.

### Вариант 7

1. Что такое доза облучения?
2. Зачем используется имплантация ионов бора различных масс?
3. Представить профили концентрации акцепторной примеси, введенной имплантацией в полупроводник с исходной концентрацией  $N = \text{const}$ , при создании  $p$ - $n$  перехода ионами низкой энергии;  $n$ - $p$ - $n$  структуры ионами высокой энергии,  $p$ - $n$  перехода с постоянной концентрацией примеси в легированной области ионами разных энергий.

### Вариант 8

1. Сравнить распределение концентрации примеси при ионном легировании и диффузии.
2. Что такое  $\bar{R}$ ,  $\bar{R}_p$  и  $\Delta \bar{R}_p$ ? Рассчитать максимальную концентрацию примеси бора в кремнии, если доза облучения составляет  $10^{13}$  см<sup>-2</sup> и  $\Delta \bar{R}_p = 0,14$  мкм.
3. Как создать очень мелкий  $p^+$  слой имплантацией ионов бора с энергией 50 кэВ?

### Вариант 9

1. Какую дозу получит мишень при облучении ионным пучком с плотностью тока  $1 \text{ мА/см}^2$ ?
2. Представить гауссовское распределение концентрации примеси по глубине и определить отношение концентрации примеси на глубине  $x = \bar{R}_p \pm \Delta \bar{R}_p$  к максимальной концентрации.
3. Радиационные дефекты. Как рассчитать дозу аморфизации?

### Вариант 10

1. Что такое боковое рассеяние и когда его надо учитывать?
2. Показать распределение внедренной примеси и дефектов по глубине.
3. Виды дефектов при ионном легировании. Определить число смещенных атомов кремния при энергии ионов  $50 \text{ кэВ}$ .  $E_{\text{см}} = 15 \text{ эВ}$ ;  $E_{\text{я}} \approx E_0$ .

### Вариант 11

1. Что такое низкотемпературный и высокотемпературный отжиги?
2. С помощью каких параметров ионной имплантации можно управлять глубиной залегания  $x_{\text{p-n}}$ .
3. Определить дозу облучения  $Q$ , если  $D = 1 \text{ Кл/м}^2$  для однократно и для трижды ионизированных ионов.

### Вариант 12

1. Дать понятие полного и проецированного пробегов.
2. Способы управления  $x_{\text{p-n}}$  при ионной имплантации.
3. Технология загонки примеси при ионной имплантации. На что влияет боковое рассеяние ионов?

### Вариант 13

1. Эффект каналирования.
2. Что ограничивает получение ионов с низкой энергией менее  $1 \text{ кэВ}$ ?

3. Задачи, которые решает отжиг структур после ионной имплантации.

#### Вариант 14

1. Способы получения супермелкозалегающих  $p$ - $n$  переходов.
2. Виды потерь и их зависимости от энергии ионов.
3. Почему максимальное количество дефектов располагается ближе к поверхности, чем  $R_p$  для внедренной примеси?

#### Вариант 15

1. Что такое доза облучения, энергия и скорость ионов? Определить энергию атомов, входящих в однократно заряженную молекулу  $BF_2^+$ , ускоренную потенциалом 100 Кв.  $M_B=10,8$ ;  $M_F=19$ .
2. Зачем нужен масс-сепаратор в установках ионной имплантации?
3. Представить профили концентрации примеси, введенной диффузией и ионной имплантацией.

#### Вариант 16

1. Представить распределение концентрации примеси при создании двух  $p$ - $n$  переходов с помощью ионной имплантации.
2. Быстрый термический отжиг.
3. Что такое ядерная и электронная тормозные способности?

#### Вариант 17

1. Сравнить механизмы отжига радиационных дефектов при высокотемпературном и лазерном отжиге.
2. Рассчитать полный пробег ионов фосфора в кремнии, приняв электронную тормозную способность  $S_e=354,6$  кэВ/мкм и ядерную тормозную способность  $S_я=390,4$  кэВ/мкм при энергии ионов 100 кэВ. Объяснить полученные результаты.

3. Представить распределение концентрации примеси при легировании ионами с различной энергией при постоянной дозе.

#### Вариант 18

1. Как получить ионный пучок с ионами одного типа ( $m/q$ ) и одной энергии (монопучок)?
2. Особенности легирования кластерными и молекулярными ионами.
3. Распределение концентрации примеси с учетом и без учета эффекта каналирования.

#### Вариант 19

1. Что такое  $\bar{R}_p$ ,  $\Delta\bar{R}_p$ ,  $\Delta\bar{R}_\perp$ ?
2. Виды потерь и их зависимость от энергии ионов в безразмерных параметрах.
3. Что такое радиационные дефекты?

#### Вариант 20

1. Определить время ионной имплантации при дозе имплантации  $10^{14}$
2. Что такое «наклонная» имплантация ионов и для каких целей она используется?
3. Каким образом можно получить  $n-p-n$  структуру за один процесс ионной имплантации?

## 5. ТЕСТОВЫЕ КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Чему будет равна энергия ионов бора в ионизированной молекуле фторида бора  $BF_2^+$ , ускоренной потенциалом 50 кэВ?  
а) 9,8 кэВ;      б) 11 кэВ;      в) 50 кэВ.
2. Чему будет равна энергия двухкратнозаряженного иона азота  $N^{++}$ , ускоренного потенциалом 50 кэВ?  
а) 50 кэВ;      б) 80 кэВ;      в) 100 кэВ.
3. Чему будет равна доза облучения  $Q$  с размерностью [ион/см<sup>2</sup>], если она для однократнозаряженных ионов составляет  $D=100$  мкКл/см<sup>2</sup>?  
а)  $6,25 \cdot 10^{14}$ ;      б)  $1 \cdot 10^{14}$ ;      в)  $6,25 \cdot 10^{15}$ .
4. Что представляет собой проецированный пробег ионов в твердом теле?  
а) полный путь иона;  
б) проекция полного пути на направление первоначального движения иона (направление  $x$ );  
в) проекция пути на направление  $y$ .
5. Зависимость ядерных потерь от  $\varepsilon^{1/2}$  может быть представлена в виде:  
а) прямой;      б) кривой с максимумом;      в) кривой с минимумом.
6. Зависимость электронных потерь от  $\varepsilon^{1/2}$  может быть представлена в виде:  
а) прямой;      б) кривой с максимумом;      в) кривой с минимумом.
7. Распределение внедренной примеси при ионной имплантации описывается гауссианой, максимум которой лежит:

а) на поверхности; б) на глубине  $\overline{R_p}$ ; в) на глубине  $2\overline{R_p}$ .

8. Глубина залегания  $p$ - $n$  перехода с увеличением дозы облучения:

а) не изменяется; б) возрастает; в) уменьшается.

9. Глубина залегания  $p$ - $n$  перехода с увеличением энергии ионов:

а) не изменяется; б) возрастает; в) уменьшается.

10. Глубина залегания  $p$ - $n$  перехода с увеличением исходной концентрации в полупроводнике:

а) не изменяется; б) возрастает; в) уменьшается.

11. Пробег ионов в монокристаллических мишенях по сравнению с аморфными:

а) не изменяется; б) увеличивается; в) уменьшается.

12. Глубина залегания  $p$ - $n$  перехода в монокристаллической мишени по сравнению с аморфной:

а) увеличивается; б) уменьшается; в) не изменяется.

13. Концентрация радиационных дефектов в слое внедрения при увеличении дозы облучения:

а) не изменяется; б) увеличивается; в) уменьшается.

14. Концентрация радиационных дефектов в слое внедрения при увеличении потерь на ядерное торможение:

а) не изменяется; б) увеличивается; в) уменьшается.

15. Какой процесс оказывает основное влияние на рост количества радиационных дефектов?

а) увеличение ядерных потерь;

- б) уменьшение ядерных потерь;
- в) увеличение электронных потерь.

16. Явление аморфизации монокристаллического полупроводника возникает, когда количество смещенных атомов (дефектов):

- а) соизмеримо с плотностью атомов в полупроводнике;
- б) меньше в 10 раз;
- в) меньше в 100 раз.

17. При низкотемпературном отжиге радиационных дефектов глубина залегания  $p$ - $n$  перехода:

- а) не изменяется; б) увеличивается; в) уменьшается.

18. При высокотемпературном отжиге радиационных дефектов глубина залегания  $p$ - $n$  перехода:

- а) не изменяется; б) увеличивается; в) уменьшается.

19. Положение максимума концентрации внедренной примеси при ионной имплантации при увеличении температуры отжига:

- а) не изменяется; б) увеличивается; в) уменьшается.

20. Глубина залегания  $p$ - $n$  перехода с увеличением температуры отжига:

- а) не изменяется; б) увеличивается; в) уменьшается.

21. При внедрении ионов сурьмы с энергией 100 кэВ в кремний проецированный пробег  $\bar{R}_p$  составляет 0,045 мкм,  $\Delta\bar{R}_p=0,013$  мкм. Рассчитать глубину залегания  $p$ - $n$  перехода при дозе облучения  $10^{12}$  ион/см<sup>2</sup> и исходной концентрации в полупроводнике  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>:

а) 0,1 мкм;      б) 0,2 мкм;      в) 0,3 мкм.

22. При внедрении ионов аргона с энергией 100 кэВ в кремний проецированный пробег  $\overline{R_p}$  составляет 0,1 мкм,  $\Delta\overline{R_p}=0,039$  мкм. Рассчитать глубину залегания  $p$ - $n$  перехода при дозе облучения  $10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> и исходной концентрации в полупроводнике  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>:

а) 0,1 мкм;      б) 0,3 мкм;      в) 0,5 мкм.

23. При внедрении ионов мышьяка с энергией 100 кэВ в кремний проецированный пробег  $\overline{R_p}$  составляет 0,063 мкм,  $\Delta\overline{R_p}=0,021$  мкм. Рассчитать глубину залегания  $p$ - $n$  перехода при дозе облучения  $10^{12}$  ион/см<sup>2</sup> и исходной концентрации в полупроводнике  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>:

а) 0,02 мкм;      б) 0,15 мкм;      в) 0,5 мкм.

24. При внедрении ионов бора с энергией 100 кэВ в кремний проецированный пробег  $\overline{R_p}$  составляет 0,3 мкм,  $\Delta\overline{R_p}=0,077$  мкм. Рассчитать глубину залегания  $p$ - $n$  перехода при дозе облучения  $10^{13}$  ион/см<sup>2</sup> и исходной концентрации в полупроводнике  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>:

а) 0,1 мкм;      б) 0,6 мкм;      в) 1,2 мкм.

25. При внедрении ионов золота с энергией 100 кэВ в кремний проецированный пробег  $\overline{R_p}$  составляет 0,042 мкм,  $\Delta\overline{R_p}=0,01$  мкм. Рассчитать глубину залегания  $p$ - $n$  перехода при дозе облучения  $10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> и исходной концентрации в полупроводнике  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>:

а) 9,09 мкм;      б) 0,18 мкм;      в) 0,27 мкм.

26. При внедрении ионов неона с энергией 100 кэВ в кремний проецированный пробег  $\overline{R_p}$  составляет 0,274 мкм,  $\Delta\overline{R_p}=0,152$  мкм. Рассчи-

тать глубину залегания  $p$ - $n$  перехода при дозе облучения  $10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> и исходной концентрации в полупроводнике  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>:

- а) 0,5 мкм;      б) 1 мкм;    в) 1,5 мкм.

27. При внедрении ионов фосфора с энергией 100 кэВ в кремний проецированный пробег  $\bar{R}_p$  составляет 0,124 мкм,  $\Delta\bar{R}_p=0,05$  мкм. Рассчитать глубину залегания  $p$ - $n$  перехода при дозе облучения  $10^{15}$  ион/см<sup>2</sup> и исходной концентрации в полупроводнике  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>:

- а) 0,4 мкм;      б) 0,8 мкм;      в) 1 мкм.

28. При внедрении ионов алюминия с энергией 100 кэВ в германий проецированный пробег  $\bar{R}_p$  составляет 0,085 мкм,  $\Delta\bar{R}_p=0,054$  мкм. Рассчитать глубину залегания  $p$ - $n$  перехода при дозе облучения  $10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> и исходной концентрации в полупроводнике  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>:

- а) 1 мкм;    б) 0,68 мкм;    в) 0,34 мкм.

29. При внедрении ионов мышьяка с энергией 100 кэВ в германий проецированный пробег  $\bar{R}_p$  составляет 0,036 мкм,  $\Delta\bar{R}_p=0,02$  мкм. Рассчитать глубину залегания  $p$ - $n$  перехода при дозе облучения  $10^{15}$  ион/см<sup>2</sup> и исходной концентрации в полупроводнике  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>:

- а) 0,14 мкм;    б) 0,28 мкм;    в) 0,42 мкм.

30. При внедрении ионов бора с энергией 100 кэВ в германий проецированный пробег  $\bar{R}_p$  составляет 0,253 мкм,  $\Delta\bar{R}_p=0,122$  мкм. Рассчитать глубину залегания  $p$ - $n$  перехода при дозе облучения  $10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> и исходной концентрации в полупроводнике  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>:

- а) 0,4 мкм;      б) 0,8 мкм;      в) 1,2 мкм.

31. При внедрении ионов бериллия с энергией 100 кэВ в германий процированный пробег  $\overline{R_p}$  составляет 0,32 мкм,  $\Delta\overline{R_p}=0,14$  мкм. Рассчитать глубину залегания  $p$ - $n$  перехода при дозе облучения  $10^{16}$  ион/см<sup>2</sup> и исходной концентрации в полупроводнике  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>:
- а) 0,079 мкм;    б) 0,79 мкм;    в) 7,9 мкм.
32. При внедрении ионов кадмия с энергией 100 кэВ в германий процированный пробег  $\overline{R_p}$  составляет 0,033 мкм,  $\Delta\overline{R_p}=0,014$  мкм. Рассчитать глубину залегания  $p$ - $n$  перехода при дозе облучения  $10^{16}$  ион/см<sup>2</sup> и исходной концентрации в полупроводнике  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>:
- а) 0,8 мкм;    б) 8 мкм;    в) 0,08 мкм.
33. При внедрении ионов магния с энергией 100 кэВ в германий процированный пробег  $\overline{R_p}$  составляет 0,09 мкм,  $\Delta\overline{R_p}=0,06$  мкм. Рассчитать глубину залегания  $p$ - $n$  перехода при дозе облучения  $10^{16}$  ион/см<sup>2</sup> и исходной концентрации в полупроводнике  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>:
- а) 0,3 мкм;    б) 0,5 мкм;    в) 1 мкм.
34. При внедрении ионов фосфора с энергией 100 кэВ в германий процированный пробег  $\overline{R_p}$  составляет 0,07 мкм,  $\Delta\overline{R_p}=0,05$  мкм. Рассчитать глубину залегания  $p$ - $n$  перехода при дозе облучения  $10^{16}$  ион/см<sup>2</sup> и исходной концентрации в полупроводнике  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>:
- а) 0,5 мкм;    б) 0,25 мкм;    в) 0,75 мкм.
35. При внедрении ионов кислорода с энергией 100 кэВ в германий процированный пробег  $\overline{R_p}$  составляет 0,15 мкм,  $\Delta\overline{R_p}=0,084$  мкм. Рассчитать глубину залегания  $p$ - $n$  перехода при дозе облучения  $10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> и исходной концентрации в полупроводнике  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>:
- а) 0,6 мкм;    б) 0,9 мкм;    в) 0,3 мкм.

36. При внедрении ионов серы с энергией 100 кэВ в германий проецированный пробег  $\bar{R}_p$  составляет 0,067 мкм,  $\Delta\bar{R}_p=0,044$  мкм. Рассчитать глубину залегания  $p$ - $n$  перехода при дозе облучения  $10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> и исходной концентрации в полупроводнике  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>:
- а) 0,28 мкм;    б) 0,56 мкм;    в) 0,84 мкм.
37. При внедрении ионов селена с энергией 100 кэВ в германий проецированный пробег  $\bar{R}_p$  составляет 0,035 мкм,  $\Delta\bar{R}_p=0,02$  мкм. Рассчитать глубину залегания  $p$ - $n$  перехода при дозе облучения  $10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> и исходной концентрации в полупроводнике  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>:
- а) 0,14 мкм;    б) 0,42 мкм;    в) 0,84 мкм.
38. При внедрении ионов теллура с энергией 100 кэВ в германий проецированный пробег  $\bar{R}_p$  составляет 0,0284 мкм,  $\Delta\bar{R}_p=0,012$  мкм. Рассчитать глубину залегания  $p$ - $n$  перехода при дозе облучения  $10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> и исходной концентрации в полупроводнике  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>:
- а) 1 мкм;    б) 0,5 мкм;    в) 0,1 мкм.
39. При внедрении ионов водорода с энергией 100 кэВ в германий проецированный пробег  $\bar{R}_p$  составляет 0,87 мкм,  $\Delta\bar{R}_p=0,18$  мкм. Рассчитать глубину залегания  $p$ - $n$  перехода при дозе облучения  $10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> и исходной концентрации в полупроводнике  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>:
- а) 8,4 мкм;    б) 1,68 мкм;    в) 16,8 мкм.
40. При внедрении ионов цинка с энергией 100 кэВ в германий проецированный пробег  $\bar{R}_p$  составляет 0,038 мкм,  $\Delta\bar{R}_p=0,02$  мкм. Рассчитать глубину залегания  $p$ - $n$  перехода при дозе облучения  $10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> и исходной концентрации в полупроводнике  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>:

а) 0,14 мкм;      б) 0,28 мкм;      в) 0,42 мкм.

41. Гауссовский диаметр электронного луча с увеличением тока луча:  
а) увеличивается;      б) уменьшается;      в) не изменяется.
42. Гауссовский диаметр электронного луча с увеличением яркости электронной пушки:  
а) не изменяется;      б) увеличивается;      в) уменьшается.
43. Какой выбрать тип катода для уменьшения гауссовского диаметра электронного луча:  
а) термокатод из вольфрама;  
б) термокатод из гексаборида лантана;  
в) полевой эмиттер.
44. Сферическая абберация обусловлена:  
а) действием фокусирующего поля линзы;  
б) разбросом скоростей электронов;  
в) дифракцией.
45. Хроматическая абберация обусловлена:  
а) действием фокусирующего поля линз;  
б) разбросом скоростей электронов;  
в) дифракцией.
46. Увеличение угла схождения лучей  $\alpha$  сферическую и хроматическую абберации:  
а) увеличивает;      б) уменьшает;      в) не изменяет.
47. Какая абберация будет расти быстрее всего с увеличением  $\alpha$ :

а) сферическая; б) хроматическая; в) дифракция.

48. Рассчитать чувствительность электронного резиста при следующих условиях:  $j=10 \text{ А/м}^2$ ,  $t=100 \text{ мкс}$ .

а)  $10^{-6} \text{ Кл/см}^2$ ; б)  $10^{-7} \text{ Кл/см}^2$ ; в)  $10^{-5} \text{ Кл/см}^2$ .

49. Рассчитать чувствительность электронного резиста при следующих условиях:  $j=100 \text{ А/м}^2$ ,  $t=10 \text{ мкс}$ .

а)  $10^{-6} \text{ Кл/см}^2$ ; б)  $10^{-7} \text{ Кл/см}^2$ ; в)  $10^{-5} \text{ Кл/см}^2$ .

50. Рассчитать чувствительность электронного резиста при следующих условиях:  $j=1 \text{ А/м}^2$ ,  $t=100 \text{ мкс}$ .

а)  $10^{-6} \text{ Кл/см}^2$ ; б)  $10^{-7} \text{ Кл/см}^2$ ; в)  $10^{-5} \text{ Кл/см}^2$ .

51. На какой глубине эффективные энергетические потери будут равны нулю:

а)  $x=0$ ; б)  $x=\delta_0$ ; в)  $x=R_{B-T}$ .

52. Максимум эффективных энергетических потерь находится при:

а)  $x=0$ ; б)  $x=\delta_0$ ; в)  $x=R_{B-T}$ .

53. Чему равны эффективные энергетические потери при  $x=0$ :

а)  $\frac{E_0}{R_{B-T}}$ ; б)  $\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\max}$ ; в) 0.

54. Проекционный пробег электронов с увеличением энергии электронов  $E_0$ :

а) увеличивается пропорционально  $E_0$ ;

б) уменьшается пропорционально  $E_0$ ;

в) увеличивается пропорционально  $E_0^2$ .

55. Рассеяние электронов в резисте приводит к изменению размера электронного луча:  
а) увеличивает; б) уменьшает; в) не изменяет.
56. Уширение электронного луча за счет упругого рассеяния с увеличением толщины резиста  $h$  возрастает:  
а) пропорционально  $h$ ; б)  $h^2$ ; в)  $h^{3/2}$ .
57. Уширение электронного луча за счет упругого рассеяния с увеличением энергии электронов  $E_0$ :  
а) уменьшается; б) увеличивается; в) не изменяется.
58. Минимальная ширина разрешаемой линии ( $b_{\min}$ ) в электронно-лучевой литографии с увеличением чувствительности резиста:  
а) уменьшается; б) увеличивается; в) не изменяется.
59. Гауссовский диаметр электронного луча с увеличением температуры катода:  
а) уменьшается; б) увеличивается; в) не изменяется.
60. Диаметр электронного луча с увеличением яркости электронной пушки:  
а) увеличивается; б) уменьшается; в) не изменяется.
61. Рассчитать диаметр электронного луча, обусловленный сферической абберацией, при следующих исходных данных:  $C_s=20$  см,  $\alpha=10^{-2}$  рад:  
а) 0,1 мкм; б) 0,2 мкм; в) 0,3 мкм.

62. Рассчитать диаметр электронного луча, обусловленный сферической aberrацией, при следующих исходных данных:  $C_s=40$  см,  $\alpha=10^{-2}$  рад:  
а) 0,1 мкм; б) 0,2 мкм; в) 0,3 мкм.
63. Рассчитать диаметр электронного луча, обусловленный сферической aberrацией, при следующих исходных данных:  $C_s=20$  см,  $\alpha=5 \cdot 10^{-2}$  рад:  
а) 125 мкм; б) 12,5 мкм; в) 0,12 мкм.
64. Рассчитать диаметр электронного луча, обусловленный сферической aberrацией, при следующих исходных данных:  $C_s=40$  см,  $\alpha=10^{-4}$  рад:  
а) 0,25 мкм; б) 0,025 мкм; в) 2,5 мкм.
65. Рассчитать диаметр электронного луча, обусловленный сферической aberrацией, при следующих исходных данных:  $C_s=40$  см,  $\alpha=10^{-2}$  рад:  
а) 0,1 мкм; б) 0,2 мкм; в) 0,3 мкм.
66. Рассчитать диаметр электронного луча, обусловленный сферической aberrацией, при следующих исходных данных:  $C_s=10$  см,  $\alpha=10^{-1}$  рад:  
а) 5 мкм; б) 10 мкм; в) 50 мкм.
67. Рассчитать диаметр электронного луча, обусловленный сферической aberrацией, при следующих исходных данных:  $C_s=40$  см,  $\alpha=5 \cdot 10^{-3}$  рад:  
а) 0,001 мкм; б) 0,0025 мкм; в) 0,005 мкм.

68. Рассчитать диаметр электронного луча, обусловленный сферической aberrацией, при следующих исходных данных:  $C_s=20$  см,  $\alpha=10^{-2}$  рад:
- а) 0,1 мкм;      б) 0,2 мкм;      в) 0,3 мкм.
69. Рассчитать диаметр электронного луча, обусловленный хроматической aberrацией, при следующих исходных данных:  $C_c=10$  см,  $\alpha=10^{-2}$  рад,  $U=20$  кВ,  $\Delta U=5$  В:
- а) 0,25 мкм;      б) 0,5 мкм;      в) 1 мкм.
70. Рассчитать диаметр электронного луча, обусловленный хроматической aberrацией, при следующих исходных данных:  $C_c=20$  см,  $\alpha=10^{-2}$  рад,  $U=10$  кВ,  $\Delta U=2$  В:
- а) 0,3 мкм;      б) 0,4 мкм;      в) 0,5 мкм.
71. Рассчитать диаметр электронного луча, обусловленный хроматической aberrацией, при следующих исходных данных:  $C_c=20$  см,  $\alpha=10^{-1}$  рад,  $U=10$  кВ,  $\Delta U=7$  В:
- а) 14 мкм;      б) 0,17 мкм;      в) 1,7 мкм.
72. Рассчитать диаметр электронного луча, обусловленный хроматической aberrацией, при следующих исходных данных:  $C_c=10$  см,  $\alpha=10^{-2}$  рад,  $U=30$  кВ,  $\Delta U=5$  В:
- а) 14 мкм;      б) 0,17 мкм;      в) 1,7 мкм.
73. Рассчитать диаметр электронного луча, обусловленный хроматической aberrацией, при следующих исходных данных:  $C_c=10$  см,  $\alpha=10^{-3}$  рад,  $U=30$  кВ,  $\Delta U=3$  В:
- а) 0,5 мкм;      б) 0,1 мкм;      в) 0,01 мкм.

74. Рассчитать диаметр электронного луча, обусловленный хроматической aberrацией, при следующих исходных данных:  $C_c=20$  см,  $\alpha=10^{-2}$  рад,  $U=10$  кВ,  $\Delta U=4$  В:  
а) 0,01 мкм;      б) 0,8 мкм;      в) 0,1 мкм.
75. Рассчитать диаметр электронного луча, обусловленный хроматической aberrацией, при следующих исходных данных:  $C_c=20$  см,  $\alpha=10^{-4}$  рад,  $U=20$  кВ,  $\Delta U=2$  В:  
а) 0,002 мкм;      б) 0,01 мкм;      в) 0,1 мкм.
76. Рассчитать диаметр электронного луча, обусловленный хроматической aberrацией, при следующих исходных данных:  $C_c=10$  см,  $\alpha=10^{-3}$  рад,  $U=30$  кВ,  $\Delta U=4$  В:  
а) 0,01 мкм;      б) 0,1 мкм;      в) 1 мкм.
77. Рассчитать диаметр электронного луча, обусловленный дифракцией луча на ограничивающей диафрагме, при следующих условиях:  $\alpha=10^{-2}$  рад,  $U=10$  кВ:  
а) 0,7 нм;      б) 7 нм;      в) 70 нм.
78. Рассчитать диаметр электронного луча, обусловленный дифракцией луча на ограничивающей диаграмме, при следующих условиях:  $\alpha=10^{-3}$  рад,  $U=10$  кВ:  
а) 70 нм;      б) 7 нм;      в) 0,7 нм.
79. Рассчитать диаметр электронного луча, обусловленный дифракцией луча на ограничивающей диаграмме, при следующих условиях:  $\alpha=10^{-2}$  рад,  $U=20$  кВ:  
а) 0,5 нм;      б) 1 нм;      в) 1,5 нм.

80. Рассчитать диаметр электронного луча, обусловленный дифракцией луча на ограничивающей диаграмме, при следующих условиях:  $\alpha=10^{-3}$  рад,  $U=30$  кВ:
- а) 0,4 нм;      б) 4 нм;      в) 40 нм.
81. Рассчитать минимальный диаметр электронного луча на мишени при следующих условиях:  $I_0=10^{-8}$  А,  $B=1 \cdot 10^5$  А/(см<sup>2</sup>·ср),  $C_s=20$  см:
- а) 0,11 мкм;      б) 0,22 мкм;      в) 0,44 мкм.
82. Рассчитать минимальный диаметр электронного луча на мишени при следующих условиях:  $I_0=10^{-7}$  А,  $B=5 \cdot 10^4$  А/(см<sup>2</sup>·ср),  $C_s=20$  см:
- а) 0,07 мкм;      б) 0,7 мкм;      в) 1 мкм.
83. Рассчитать минимальный диаметр электронного луча на мишени при следующих условиях:  $I_0=10^{-9}$  А,  $B=1 \cdot 10^5$  А/(см<sup>2</sup>·ср),  $C_s=20$  см:
- а) 1 мкм;      б) 0,1 мкм;      в) 0,01 мкм.
84. Рассчитать минимальный диаметр электронного луча на мишени при следующих условиях:  $I_0=10^{-10}$  А,  $B=5 \cdot 10^4$  А/(см<sup>2</sup>·ср),  $C_s=10$  см:
- а) 0,04 мкм;      б) 0,08 мкм;      в) 0,12 мкм.
85. Рассчитать минимальный диаметр электронного луча на мишени при следующих условиях:  $I_0=10^{-7}$  А,  $B=10^6$  А/(см<sup>2</sup>·ср),  $C_s=30$  см:
- а) 0,25 мкм;      б) 0,5 мкм;      в) 0,75 мкм.
86. Рассчитать минимальный диаметр электронного луча на мишени при следующих условиях:  $I_0=10^{-9}$  А,  $B=5 \cdot 10^5$  А/(см<sup>2</sup>·ср),  $C_s=10$  см:
- а) 0,01 мкм;      б) 0,04 мкм;      в) 0,4 мкм.

87. Рассчитать минимальный диаметр электронного луча на мишени при следующих условиях:  $I_0=10^{-8}$  А,  $B=10^6$  А/(см<sup>2</sup>·ср),  $C_s=10$  см:  
а) 0,04 мкм; б) 0,08 мкм; в) 0,12 мкм.
88. Рассчитать минимальный диаметр электронного луча на мишени при следующих условиях:  $I_0=10^{-7}$  А,  $B=10^5$  А/(см<sup>2</sup>·ср),  $C_s=20$  см:  
а) 0,1 мкм; б) 0,5 мкм; в) 1 мкм.
89. Рассчитать минимальный диаметр электронного луча на мишени при следующих условиях:  $I_0=10^{-10}$  А,  $B=10^6$  А/(см<sup>2</sup>·ср),  $C_s=10$  см:  
а) 0,01 мкм; б) 0,1 мкм; в) 1 мкм.
90. Рассчитать минимальный диаметр электронного луча на мишени при следующих условиях:  $I_0=10^{-9}$  А,  $B=10^6$  А/(см<sup>2</sup>·ср),  $C_s=20$  см:  
а) 0,01 мкм; б) 0,04 мкм; в) 0,4 мкм.
91. Рассчитать оптимальное время экспонирования в электронно-лучевой литографии при следующих условиях:  $S_0=10^{-5}$  Кл/см<sup>2</sup>,  $C_s=20$  см,  $d_{\min}=0,1$  мкм,  $B=5 \cdot 10^4$  А/(см<sup>2</sup>·ср):  
а) 16,3 мкс; б) 1,63 мкс; в) 0,16 мкс.
92. Рассчитать оптимальное время экспонирования в электронно-лучевой литографии при следующих условиях:  $S_0=10^{-5}$  Кл/см<sup>2</sup>,  $C_s=15$  см,  $d_{\min}=0,2$  мкм,  $B=5 \cdot 10^5$  А/(см<sup>2</sup>·ср):  
а) 84 нс; б) 168 нс; в) 42 нс.
93. Рассчитать оптимальное время экспонирования в электронно-лучевой литографии при следующих условиях:  $S_0=10^{-6}$  Кл/см<sup>2</sup>,  $C_s=10$  см,  $d_{\min}=0,5$  мкм,  $B=1 \cdot 10^4$  А/(см<sup>2</sup>·ср):  
а) 1,76 нс; б) 17,6 нс; в) 176 нс.

94. Рассчитать оптимальное время экспонирования в электронно-лучевой литографии при следующих условиях:  $S_0=10^{-5}$  Кл/см<sup>2</sup>,  $C_s=20$  см,  $d_{\min}=1$  мкм,  $B=10^5$  А/(см<sup>2</sup>·ср):  
а) 176 нс;      б) 17,6 нс;      в) 1,76 нс.
95. Рассчитать оптимальное время экспонирования в электронно-лучевой литографии при следующих условиях:  $S_0=10^{-5}$  Кл/см<sup>2</sup>,  $C_s=40$  см,  $d_{\min}=0,1$  мкм,  $B=5 \cdot 10^5$  А/(см<sup>2</sup>·ср):  
а) 2,6 мкс;      б) 0,26 мкс;      в) 26 мкс.
96. Рассчитать оптимальное время экспонирования в электронно-лучевой литографии при следующих условиях:  $S_0=10^{-6}$  Кл/см<sup>2</sup>,  $C_s=20$  см,  $d_{\min}=0,01$  мкм,  $B=5 \cdot 10^4$  А/(см<sup>2</sup>·ср):  
а) 0,8 мкс;      б) 1,6 мкс;      в) 2,4 мкс.
97. Рассчитать оптимальное время экспонирования в электронно-лучевой литографии при следующих условиях:  $S_0=10^{-5}$  Кл/см<sup>2</sup>,  $C_s=10$  см,  $d_{\min}=0,5$  мкм,  $B=10^4$  А/(см<sup>2</sup>·ср):  
а) 1,4 мкс;      б) 2,8 мкс;      в) 4,2 мкс.
98. Рассчитать оптимальное время экспонирования в электронно-лучевой литографии при следующих условиях:  $S_0=5 \cdot 10^{-6}$  Кл/см<sup>2</sup>,  $C_s=40$  см,  $d_{\min}=0,03$  мкм,  $B=5 \cdot 10^4$  А/(см<sup>2</sup>·ср):  
а) 1 мкс;      б) 2 мкс;      в) 3 мкс.
99. Рассчитать оптимальное время экспонирования в электронно-лучевой литографии при следующих условиях:  $S_0=10^{-4}$  Кл/см<sup>2</sup>,  $C_s=20$  см,  $d_{\min}=1$  мкм,  $B=1 \cdot 10^6$  А/(см<sup>2</sup>·ср):  
а) 0,9 мкс;      б) 1,8 мкс;      в) 18 мкс.

100. Рассчитать оптимальное время экспонирования в электронно-лучевой литографии при следующих условиях:  $S_0=10^{-5}$  Кл/см<sup>2</sup>,  $C_s=10$  см,  $d_{\min}=0,4$  мкм,  $B=1 \cdot 10^5$  А/(см<sup>2</sup>·ср):  
а) 0,1 мкс;      б) 0,2 мкс;      в) 0,3 мкс.
101. Для анизотропного травления показатель анизотропии:  
а) равен 1;      б) больше 1;      в) меньше 1.
102. Для идеального изотропного травления показатель анизотропии:  
а) равен 1;      б) больше 1;      в) меньше 1.
103. Какой можно получить минимальный размер  $b_{\min}$  при травлении через маску шириной  $b_m=0,5$  мкм и толщине травимого слоя  $d=0,5$  мкм при коэффициенте анизотропии  $A=10$ :  
а) 0,5 мкм;      б) 0,6 мкм;      в) 0,7 мкм.
104. Какой можно получить минимальный размер  $b_{\min}$  при травлении через маску шириной  $b_m=0,3$  мкм и толщине травимого слоя  $d=0,5$  мкм при коэффициенте анизотропии  $A=20$ :  
а) 0,3 мкм;      б) 0,35 мкм;      в) 0,4 мкм.
105. Какой можно получить минимальный размер  $b_{\min}$  при травлении через маску шириной  $b_m=1$  мкм и толщине травимого слоя  $d=0,5$  мкм при коэффициенте анизотропии  $A=100$ :  
а) 1 мкм;      б) 0,5 мкм;      в) 10 мкм.
106. Ионное травление является процессом:  
а) физического распыления;  
б) термического испарения;  
в) химических реакций.

107. Скорость ионного травления с увеличением коэффициента распыления:
- а) увеличивается; б) уменьшается; в) не изменяется.
108. Скорость ионного травления с увеличением плотности ионного тока:
- а) увеличивается; б) уменьшается; в) не изменяется.
109. Боковой уход размеров вытравливаемого ионно-лучевым травлением профиля в подложке  $\delta$  с увеличением коэффициента распыления маски:
- а) увеличивается; б) уменьшается; в) не изменяется.
110. Боковой уход размеров вытравливаемого ионно-лучевым травлением профиля в подложке  $\delta$  с увеличением коэффициента распыления подложки:
- а) увеличивается; б) уменьшается; в) не изменяется.
111. Плазмохимическое травление является процессом:
- а) физического распыления;
  - б) термического испарения;
  - в) химического взаимодействия между ХАЧ и травимым материалом.
112. Селективностью травления подложки относительно маски  $S_{\text{пм}}$  является отношение скоростей травления подложки  $V_{\text{тр.п}}(0)$  и маски  $V_{\text{тр.м}}(0)$  в нормальном (угол  $\alpha=0^\circ$ ) и в тангенциальном  $V_{\text{тр.п}}(90)$  и  $V_{\text{тр.м}}(90)$  (боковом  $\alpha=90^\circ$ ) направлениях:
- а)  $V_{\text{тр.п}}(0)/V_{\text{тр.п}}(90)$ ;

б)  $V_{\text{тр.м}}(0)/V_{\text{тр.м}}(90)$ ;

в)  $V_{\text{тр.п}}(0)/V_{\text{тр.м}}(0)$ .

113. Анизотропией травления подложки является отношение скоростей травления подложки  $V_{\text{тр.п}}(0)$  и маски  $V_{\text{тр.м}}(0)$  в нормальном (угол  $\alpha=0^\circ$ ) и в тангенциальном  $V_{\text{тр.п}}(90)$  и  $V_{\text{тр.м}}(90)$  (боковом  $\alpha=90^\circ$ ) направлениях:

а)  $V_{\text{тр.п}}(0)/V_{\text{тр.п}}(90)$ ;

б)  $V_{\text{тр.м}}(0)/V_{\text{тр.м}}(90)$ ;

в)  $V_{\text{тр.п}}(0)/V_{\text{тр.м}}(0)$ .

114. Анизотропией травления маски является отношение скоростей травления подложки  $V_{\text{тр.п}}(0)$  и маски  $V_{\text{тр.м}}(0)$  в нормальном (угол  $\alpha=0^\circ$ ) и в тангенциальном  $V_{\text{тр.п}}(90)$  и  $V_{\text{тр.м}}(90)$  (боковом  $\alpha=90^\circ$ ) направлениях:

а)  $V_{\text{тр.п}}(0)/V_{\text{тр.п}}(90)$ ;

б)  $V_{\text{тр.м}}(0)/V_{\text{тр.м}}(90)$ ;

в)  $V_{\text{тр.п}}(0)/V_{\text{тр.м}}(0)$ .

115. На какую глубину можно протравить подложку  $d_{\text{п}}$  через маску толщиной  $d_{\text{м}}=1\text{мкм}$ , если коэффициент распыления подложки в два раза больше коэффициента распыления маски:

а) 1 мкм;      б) 2 мкм;    в) 3 мкм.

116. Какую надо выбрать толщину маски  $d_{\text{м}}$ , чтобы протравить подложку на глубину  $d_{\text{п}}=1\text{ мкм}$ , при равных коэффициентах распыления подложки и маски:

а) 1 мкм;      б) 2 мкм;    в) 3 мкм.

117. Какую надо выбрать толщину маски  $d_m$ , чтобы протравить подложку  $d_p=1$  мкм при условии, что коэффициент распыления маски в два раза меньше коэффициента распыления подложки:

- а) 0,5 мкм;      б) 1 мкм;    в) 1,5 мкм.

118. На какую глубину можно протравить подложку  $d_p$  через маску толщиной  $d_m=1$  мкм, если коэффициент распыления подложки в два раза меньше коэффициента распыления маски:

- а) 1,5 мкм;      б) 1 мкм;    в) 0,5 мкм.

119. Зависимость скорости плазмохимического травления от расхода рабочего газа имеет вид:

- а) кривой с максимумом;  
б) кривой с минимумом;  
в) прямой.

120. Для плазмохимического травления материалов необходимо, чтобы выполнялось условие:

- а)  $T_{пр} \ll T_{исп}$ ;      б)  $T_{пр} \approx T_{исп}$ ;      в)  $T_{пр} \gg T_{исп}$ ,

где  $T_{пр}$ ,  $T_{исп}$  соответственно температура процесса и температура испарения образующихся продуктов реакции.

## 6. ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ

Приведенные ниже варианты вопросов предназначены для проведения экзамена.

1). Области применения имплантации.

2). Чем определяется время экспонирования при электронно-лучевой литографии?

3). Субмикронная фотолитография.

4). Модель ПХТ. Влияние температуры подложки на процесс травления.

5). Каналирование ионов.

6). Синтез материалов с помощью ионной имплантации (оксиды, силициды).

7). Разрешающая способность электронно-лучевой литографии.

8). Сухое травление: плазменное (ПХИ и РИД) и ионно-пучковое травление. Типы и особенности процессов.

9). Пробеги ионов в твердых телах.

10). Электронно-оптическая система ЭЛУ.

11). Субмикронная проекционная фотолитография.

12). Механизмы энергетических потерь при ионном легировании.

13). Механизмы ионного травления. Параметры.

14). Технология формирования структур «кремний на изоляторе» с помощью ионной имплантации.

15). Формирование электронных лучей субмикронных размеров.

16). Чем определяется длина волны экспонирующего излучения в электронно-лучевой литографии?

17). Влияние поперечной составляющей тепловой скорости электронов на разрешающую способность электронной литографии.

18). Радиационные дефекты. Образование аморфной фазы. Использование радиационных дефектов на практике.

19). Быстрый термический отжиг. Области применения.

20). Характеристики методов травления (жидкостное, ионное, плазмохимическое).

21). Распределение внедренной примеси по глубине при ионной имплантации. Образование p-n перехода.

22). Методы импульсного отжига.

23). Взаимодействие электронов с резистом. Энергетические потери. Рассеяние электронов.

24). Способы формирования супермелкозалегающих p-n переходов.

25). Чему равна селективность травления, если скорость травления фоторезиста в два раза больше скорости травления подложки?

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Процессы микро- и нанотехнологии : учебное пособие для вузов / Т. И. Данилина [и др.] ; Федеральное агентство по образованию, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (Томск). - Томск : ТУСУР, 2005. - 316 с.
2. Технология кремниевой наноэлектроники : учебное пособие / Т. И. Данилина, В. А. Кагадей, Е. В. Анищенко ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. - 2-е изд. - Томск : ТУСУР, 2015. - 319 с.
3. Парфенов О.Д. Технология микросхем. - М.: Высшая школа, 1986. -315 с.
4. Электронно-лучевая технология в изготовлении микроэлектронных приборов / Под ред. Дж.Р.Брюэра; Пер. с англ. Под ред. Ф.П. Пресса. – М.: Радио и связь, 1984. – 336 с.
5. Курносков А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных схем. – М.: ВШ, 1986. – 386 с.
6. Мейер Дж., Эрикссон Л., Дэвис Дж. Ионное легирование полупроводников (кремний и германий) / Пер. с англ. – М.: Мир, 1973. – 296 с.
7. Технология СБИС. Т.1 / Под ред. С. Зи; Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 404 с.
8. Технология СБИС. Т.2 / Под ред. С. Зи; Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 444 с.
9. Данилина Т.И., Смирнов С.В. Ионно-плазменные технологии в производстве СБИС. – Томск: Томс.гос.ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2000. – 140 с.
- 10.Риссел, Х., Руге, И. Ионная имплантация / Х. Риссел, И. Руге. – М.: Наука, 1983. – 360 с.

### Основные физические постоянные

Постоянные	Символ	Значение	Единицы СИ
Элементарный заряд	$e$	1,6	$10^{-19}$ Кл
Число Авогадро	$N_A$	6,02	$10^{23}$ моль $^{-1}$
Масса покоя электрона	$m_e$	9,1	$10^{-31}$ кг
Постоянная Планка	$h$	6,62	$10^{-34}$ Дж·с
Атомная единица массы	$a. e. m.$	1,66	$10^{-27}$ кг
Газовая постоянная	$R$	8,3	Дж·моль $^{-1}$ ·град $^{-1}$
Постоянная Больцмана	$k$	1,38	$10^{-23}$ Дж·град $^{-1}$
Первый радиус Бора	$a_0$	5,29	$10^{-11}$ м
Диэлектрическая проницаемость вакуума	$\epsilon_0$	8,85	$10^{-12}$ Ф·м $^{-1}$

### СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ЕДИНИЦАМИ ИЗМЕРЕНИЯ

$$1 \text{ Дж} = 0,24 \text{ кал}; 1 \text{ кал} = 4,19 \text{ Дж}$$

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ эрг} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 3,83 \cdot 10^{-20} \text{ кал}$$

$$1 \text{ м} = 10^{10} \text{ А}^\circ = 10^9 \text{ нм} = 10^6 \text{ мкм} = 10^3 \text{ мм} = 10^2 \text{ см}$$

$$\text{Заряд электрона } e = 4,8 \cdot 10^{-10} \text{ СГС} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$\text{Газовая постоянная } R = 8,31 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} = 1,987 \text{ кал} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$$

$$\text{Постоянная Больцмана } k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} = 8,63 \cdot 10^{-5} \text{ эВ} \cdot \text{К}^{-1}$$

## ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ

Периоды	Ряды	Группы элементов								
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	
1	I	1 H 1,008							2 He 4,0	
2	II	3 Li 6,94	4 Be 9,01	5 B 10,81	6 C 12,0	7 N 14,01	8 O 16,0	9 F 19,0	10 Ne 20,18	
3	III	11 Na 23	12 Mg 24,30	13 Al 26,98	14 Si 28,09	15 P 30,97	16 S 32,06	17 Cl 35,45	18 Ar 40,0	

4	<b>IV</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>28</b>
		<i>K</i> 39,10	<i>Ca</i> 40,08	<i>Sc</i> 44,96	<i>Ti</i> 47,90	<i>V</i> 50,94	<i>Cr</i> 52,0	<i>Mn</i> 54,9	<i>Fe</i> 55,8	<i>Co</i> 58,9	<i>Ni</i> 58,7
5	<b>V</b>	<b>29</b>	<b>30</b>	<b>31</b>	<b>32</b>	<b>33</b>	<b>34</b>	<b>35</b>	<b>36</b>		
		<i>Cu</i> 63,55	<i>Zn</i> 65,38	<i>Ga</i> 69,72	<i>Ge</i> 72,5	<i>As</i> 74,92	<i>Se</i> 79,0	<i>Br</i> 79,9	<i>Kr</i> 83,8		
6	<b>VI</b>	<b>37</b>	<b>38</b>	<b>39</b>	<b>40</b>	<b>41</b>	<b>42</b>	<b>43</b>	<b>44</b>	<b>45</b>	<b>46</b>
		<i>Rb</i> 85,5	<i>Sr</i> 87,6	<i>Y</i> 88,9	<i>Zr</i> 91,2	<i>Nb</i> 92,9	<i>Mo</i> 96,0	<i>Tc</i> 98,9	<i>Ru</i> 101,0	<i>Rh</i> 102,9	<i>Pd</i> 106,4
6	<b>VII</b>	<b>47</b>	<b>48</b>	<b>49</b>	<b>50</b>	<b>51</b>	<b>52</b>	<b>53</b>	<b>54</b>		
		<i>Ag</i> 107,9	<i>Cd</i> 112,4	<i>In</i> 114,8	<i>Sn</i> 118,8	<i>Sb</i> 121,8	<i>Te</i> 127,6	<i>I</i> 126,9	<i>Xe</i> 131,3		
6	<b>VIII</b>	<b>55</b>	<b>56</b>		<b>72</b>	<b>73</b>	<b>74</b>	<b>75</b>	<b>76</b>	<b>77</b>	<b>78</b>
		<i>Cs</i> 132,9	<i>Ba</i> 137,3	<b>La- Lu</b>	<i>Hf</i> 178,5	<i>Ta</i> 180,9	<i>W</i> 183,8	<i>Re</i> 186,2	<i>Os</i> 190,2	<i>Ir</i> 192,2	<i>Pt</i> 195,0

	<b>IX</b>	<b>79</b> <i>Au</i> 197	<b>80</b> <i>Hg</i> 200,6	<b>81</b> <i>Tl</i> 204,3	<b>82</b> <i>Pb</i> 207,2	<b>83</b> <i>Bi</i> 209,0	<b>84</b> <i>Po</i> (209)	<b>85</b> <i>At</i> (210)	<b>86</b> <i>Rn</i> (222)
<b>7</b>	<b>X</b>	<b>87</b> <i>Fr</i> (223)	<b>88</b> <i>Ra</i> 226	<b>Ac- (Lr)</b>	<b>104</b> <i>Ku</i> (261)	<b>105</b> <i>Ns</i> (261)			

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

## Параметры металлов и полупроводников

Материал	Плотность материала, $\frac{г}{см^3}$	Атомная плотность $N_0 \cdot 10^{22}, \frac{атом}{см^3}$	Энергия сублимации, $E_{суб.}, \text{эВ}$	Пороговая энергия, $E_{пор.}, \text{эВ}$
Mg	1,74	4,31	1,59	6,8
Al	2,7	6,04	3,26	13,5(13)
Si	2,42	5,04	3,91	16,1
Ti	4,52	5,66	4,34	17,5(20)
V	6,11	6,63	3,7	14(23)
Cr	7,19	7,64	3,68	15(22)
Fe	7,87	8,48	4,15	17,1(14-20)
Ni	8,9	9,03	4,41	18,3(7-21)
Cu	8,96	8,52	3,56	15(12-17)
Ge	5,32	4,53	3,77	16,5(25)
Nb	8,57	5,45	7,5	35,6(27)
Mo	10,2	6,39	6,9	33,2(24)
Ag	10,5	5,85	2,7	13,7(15)
Ta	16,6	5,52	8,7	58,7(26)
W	19,3	6,09	8,76	59,5(35)
Pt	21,6	6,61	5,56	3,9(27)
Au	19,32	2,90	3,92	28(20)
C		11,3	7,41	10
GaAs	5,3	2,18	2,35	
SiO <sub>2</sub>	2,65	3,68		