

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра физической электроники

Т.И. Данилина

***ТЕХНОЛОГИЯ КРЕМНИЕВОЙ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ***

*Практико-ориентированное учебно-методическое пособие  
по аудиторным практическим занятиям и самостоятельной работе  
для магистрантов по направлению  
11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»  
профиль «Твердотельная электроника»*

Томск 2017

Рецензент:

к.т.н., доцент кафедры физической электроники Чистоедова И.А.

**Данилина Т.И.**

Технология кремниевой наноэлектроники: Практико-ориентированное учебно-методическое пособие. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2017. – 61 с.

Практико-ориентированное учебно-методическое пособие предназначено для магистрантов по направлению 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»

© Данилина Т.И.

2017

© Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2017

**СОДЕРЖАНИЕ**

1 ВВЕДЕНИЕ.....	4
2 ВАРИАНТЫ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ ДЛЯ АУДИТОРНЫХ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ.....	10
3 ДОМАШНЕЕ ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ .....	37
4 АУДИТОРНАЯ КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА .....	40
5 ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ .....	44
6 ТЕМЫ ДОКЛАДОВ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ.....	51
7 ЭКЗАМЕН.....	52
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА .....	56
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 .....	58
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 .....	59
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 .....	61

## 1 ВВЕДЕНИЕ

Микро- и нанoeлектроника является одним из важнейших катализаторов научно-технического прогресса современной цивилизации. Уровень развития и объемы производства ее основных изделий (интегральных микросхем (ИС)) во многом определяют потенциал государства. Анализ тенденций развития мировой микроэлектроники показывает, что ключевой задачей на ближайшее десятилетие является освоение производства сверхбольших и ультрабольших интегральных микросхем (СБИС, УБИС). Количество транзисторов на одном кристалле ИС-микروпроцессора за ближайшие 10 лет должно возрасти с  $4 \cdot 10^8$  до  $3 \cdot 10^9$  штук, а физическая длина затвора транзистора – уменьшиться с 25 до 8 нм.

Основным документом, регламентирующим развитие мировой микроэлектронной промышленности, является Международная технологическая дорожная карта для полупроводникового производства (The International Technology Roadmap for Semiconductors, ITRS).

Важно отметить, что основными целями ITRS являются формирование технических требований к приборам, технологиям и оборудованию, определение потенциальных путей решения имеющихся проблем, а также формирование календарного плана развития полупроводниковой промышленности.

До недавнего времени рост рабочих частот ИС обеспечивался пропорциональным уменьшением всех размеров транзистора (длины затвора, толщины подзатворного диэлектрика, расстояния исток – сток, толщины легированных областей и т.д.), т.е. достигался за счёт масштабирования размеров элементов (рис. 1.1).

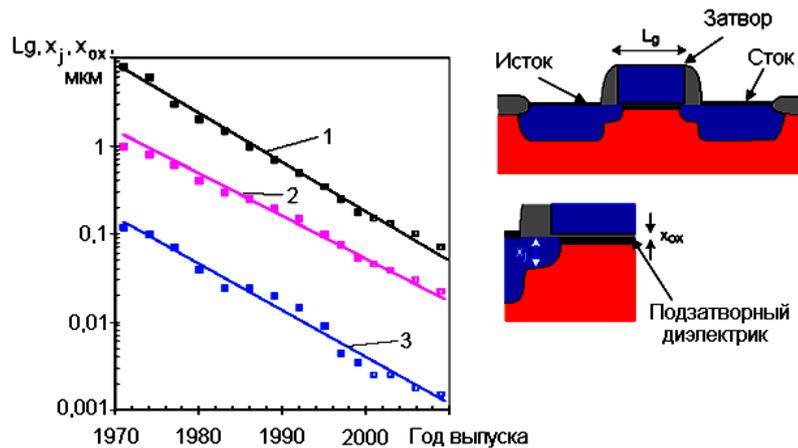


Рисунок 1.1 - Уменьшение размеров элементов транзисторов в зависимости от года выпуска ИС: 1 – длина затвора,  $L_g$ ; 2 – толщина легированных областей,  $X_j$ ; 3 – толщина подзатворного диэлектрика  $X_{ox}$

Уменьшение топологических размеров транзистора на 30% приводит к двукратному увеличению плотности их размещения на кристалле и к росту быстродействия примерно на 50%. Безусловно, интересен ответ на вопрос – когда же будет достигнут предел масштабирования транзистора и что нужно сделать для того, чтобы преодолеть этой предел? Оказывается, уже сегодня правило пропорционального масштабирования не выполняется. В основном это связано с тем, что с уменьшением размеров элементов транзистора и толщины подзатворного диэлектрика существенно возрастают ток транзистора в выключенном состоянии и ток утечки. Это приводит к росту активных потерь в транзисторе и к резкому увеличению количества выделяемого тепла. При этом в связи со всё уменьшающейся площадью транзистора становится всё более трудно отвести и рассеять это тепло. Один из выходов из сложившейся ситуации, который активно используется на практике, – это уменьшение напряжения питания ИС. Однако этого оказывается недостаточно, и для решения проблем, возникающих при масштабировании, привлекается множество других способов. Эти способы в основном связаны с изменением конструкции и технологии изготовления транзисторов.

Как уже отмечалось выше, ток в выключенном состоянии транзистора экспоненциально растёт по мере масштабирования размеров элементов микросхем. По данным компании Intel, с уменьшением длины канала с 0,5 до 0,07 мкм (при переходе к технологии с топологической нормой 0,13 мкм) ток транзистора в выключенном состоянии увеличился на четыре порядка величины – с менее чем 1 пА/мкм до ~10 нА/мкм. При переходе к 65-нм технологии (длина затвора 30 нм) величина тока транзистора в выключенном состоянии возрастет еще на порядок. В результате рассеиваемая мощность процессора с 1 млрд транзисторов будет на два порядка выше, чем у процессора со 100 млн транзисторов. Один из перспективных путей решения проблемы роста тока транзистора в выключенном состоянии, жизнеспособность которого доказана практикой, – это переход на подложки типа кремний-на-изоляторе (КНИ). В этом случае тонкий приповерхностный слой Si, в котором формируются все элементы ИС, отсечён от подложки слоем диэлектрика. В результате предотвращается растекание тока по объёму кремния и уменьшается величина тока в выключенном состоянии.

Более того, реализация ИС на КНИ-структурах решает целый ряд других проблем, которые по важности ничуть не уступают проблеме подавления тока транзистора в выключенном состоянии. Так, за счёт уменьшения паразитных ёмкостей стока и истока увеличивается рабочая частота транзистора, существенно упрощается технология изоляции отдельных транзисторов от подложки и друг от друга, повышается радиационная стойкость ИС. В силу всех этих причин структуры КНИ уже в ближайшее время станут доминирующими при изготовлении целого ряда микросхем.

Для производства КНИ структур используется две основные технологии: SIMOX, а так же одна из разновидностей бондинга – технология Smart Cut. Эти технологии реализуются с помощью ионной имплантации.

Для увеличения быстродействия транзистора необходимо уменьшать длину канала транзистора и увеличивать подвижность носителей заряда в канале.

Способ, который традиционно используется для удовлетворения требованиям закона Мура – это уменьшение длины затвора. Другая возможность увеличения быстродействия открывается, если традиционно используемый материал канала (кремний), заменить материалом с более высокой подвижностью носителей. Сегодня такой подход к решению проблемы масштабирования реализован для транзисторов различного типа проводимости. Так, найдены материалы канала, которые позволяют увеличить подвижность, как электронов, так и дырок в каналах *n*- и *p*-типа проводимости, соответственно. Среди этих материалов наибольшую практическую значимость имеют напряжённый кремний (strained silicon) и SiGe.

При масштабировании транзистора толщина подзатворного диэлектрика должна уменьшаться пропорционально уменьшению длины канала транзистора.

Это сопровождается сильным увеличением тока утечки затвора, а также уменьшением напряжения пробоя. Более того, существует физическое ограничение на минимальную толщину подзатворного диэлектрика, которое близко к 1–1,2 нм (нескольким монослоям молекул SiO<sub>2</sub>).

Наиболее приемлемое из возможных решений данных проблем – это замена материала подзатворного диэлектрика с традиционного SiO<sub>2</sub> на диэлектрик с более высокой диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  (high-k dielectric). К настоящему времени в качестве материала для такой замены исследовано большое количество самых разнообразных веществ: Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrSi<sub>x</sub>O<sub>y</sub>, ZrAl<sub>x</sub>O<sub>y</sub>, ZrN<sub>x</sub>O<sub>y</sub>, ZrO<sub>2</sub>, HfO<sub>2</sub>, La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Pr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Наиболее перспективным из них считается оксид гафния, HfO<sub>2</sub> ( $\epsilon = 22–30$ ), что связано с его высокой термостабильностью, большой шириной запрещенной зоны и неплохой совместимостью с традиционными процессами.

В связи с этим в настоящее время основные усилия сосредоточены не только на развитии технологий формирования элементов со всё уменьшающимися размерами, но и на нахождении способов устранения

конкретных причин, мешающих масштабированию. Среди методов решения проблемы масштабирования следует назвать следующие:

- 1) разработка новых субмикронных методов литографии (экстремальная ФЛ, ЭЛЛ, ИЛЛ);
- 2) использование новых полупроводниковых материалов для формирования канала транзистора (например, напряжённого Si (strained silicon)) или SiGe;
- 3) дополнительное прецизионное ионное легирование истока, стока и области канала транзистора;
- 4) замена затвора из легированного поликристаллического Si на металлический затвор (силициды металлов);
- 5) применение при формировании подзатворного диэлектрика материалов с высокой диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  (high- $k$  dielectric);
- 6) применение при формировании межуровневой изоляции материала с низкой диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  (low- $k$  dielectric);
- 7) замена алюминиевых проводников на медную межэлементную и межуровневую разводку;
- 8) формирование МОП-транзисторов на КНИ-подложках;
- 9) применение гетеробиполярных транзисторов.

В связи с вышесказанным можно констатировать, что в настоящее время большая часть технологического маршрута изготовления ИС подвергается значительной модернизации.

В соответствии с требованиями профессионального стандарта в результате изучения дисциплины «Технология кремниевой наноэлектроники» магистрант должен приобрести знания в области технологии сверхбольших и сверхбыстродействующих интегральных схем, по исследованиям в новых направлениях, по технико-экономическим и прогностическим исследованиям в отрасли, а также приобрести умения оценивать технические и экономические риски при выборе технологических процессов изготовления устройств кремниевой наноэлектроники.

Для реализации практико-ориентированных аудиторных практических занятий были разработаны индивидуальные задания, предусматривающие расчеты параметров технологических процессов, выбор конкретной технологии с учетом технико-экономических соображений. Обязательным элементом этих практик являются выводы с рекомендацией параметров технологических процессов и оборудованием.

Учебно-методическое пособие содержит варианты индивидуальных заданий для аудиторных практических занятий, тестовые контрольные задания, варианты домашних индивидуальных заданий, варианты аудиторных контрольных работ, темы докладов, вопросы для экзамена. В приложениях приведены справочные данные.

Автор выражает благодарность за помощь в подготовке учебно-методического пособия ассистента кафедры физической электроники Каранского В.В.

## 2 ВАРИАНТЫ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ ДЛЯ АУДИТОРНЫХ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

**2.1 Рассчитать разрешающую способность различных способов экспонирования для формирования субмикронных размеров маски в слое резиста на подложке**

Необходимо рассчитать разрешающую способность проекционной фотолитографии, электронно-лучевой литографии (ЭЛЛ), ионно-лучевой литографии (ИЛЛ) и рекомендовать методы и их параметры для обеспечения заданных размеров элементов. Варианты заданий приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Варианты заданий

Варианты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Размер элемента, $b_{min}$ , нм	210	180	150	130	110	90	65	45	40	32	28	22	20	15	10

### 2.1.1 Проекционная фотолитография

#### *Методические указания*

Схема проекционной фотолитографии приведена на рис. 2.1.

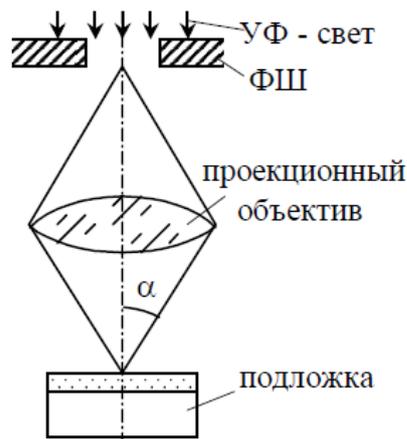


Рисунок 2.1 – Схема проекционной литографии

Разрешающая способность проекционной фотолитографии – минимальный передаваемый размер элемента  $b_{min}$  рассчитывается по формуле:

$$b_{min} = \frac{k_1 \cdot \lambda}{NA},$$

где  $\lambda$  – длина волны экспонирующего УФ излучения (436, 365, 250, 193 нм);

$k_1$  – технологический фактор, зависящий от параметров оптической системы ( $k_1=0,6-0,25$ );

$NA$  – числовая апертура проекционных линз ( $NA = 0,5 \div 0,9$ ).

Числовая апертура проекционных линз определяется соотношением:

$$NA = n \cdot \sin \alpha,$$

где  $n$  - коэффициент преломления среды в пространстве изображения, для деионизованной воды  $n = 1,43662$ ;

$\alpha$  - половина максимального угла сходимости лучей, приходящих в точку изображения на оптической оси проекционной системы (см. рис. 2.1).

**Выводы:** оценить влияние параметров проекционной фотолитографии ( $\lambda, k_1, NA$ ) на разрешающую способность и обосновать выбор этих параметров для получения заданного размера с учетом технико-экономических соображений.

### 2.1.2 Электронно-лучевая литография (ЭЛЛ)

Цель практики – Рассчитать разрешающую способность электронно-лучевой литографии при различных параметрах указанной установки. Оценить влияние ускоряющего напряжения и толщины резиста на разрешающую способность. Рекомендовать параметры установки для получения заданного размера.

Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2 – Варианты индивидуальных заданий

Вариант	$b_{min}$ , нм	Установка	$U_0$ , кВ	Диаметр электронного луча $d_{min}$ , нм
1	90	Raith 150 <sup>Two</sup>	30	2
2	65	JBX-5500FS	25	3
3	50	JBX-5500FS	50	2
4	45	JBX-6300FS	25	4
5	40	JBX-6300FS	50	3
6	32	JBX-6300FS	100	2

Продолжение табл. 2.2.

Вариант	$b_{min}$ , нм	Установка	$U_0$ , кВ	Диаметр электронного луча $d_{min}$ , нм
7	28	JBX-9300FS	50	7
8	22	JBX-9300FS	100	4
9	20	ELS-F125	125	1,7
10	18	ELS-F100	100	1,8
11	17	ELS-7500EX	50	2
12	15	EBPG5200	100	2

Примечание: 1) Raith 150<sup>Two</sup>: катод - автоэмиссионный катод Шоттки; ток луча – 5 пА-20 нА; 2) JBX-5500FS, JBX-6300FS: катод – ZrO/W; ток луча – 30 пА-20 нА; 3) JBX-9300FS: катод - ZrO/W; ток луча – 50 пА-100 нА; 4) ELS-F125, ELS-F100, ELS-7500EX: катод - ZrO/W; ток луча – 5 пА-100 нА; 5) EBPG5200: катод – термополевой катод Шоттки; ток луча – 5 пА-100 нА.

### Методические указания

Разрешающая способность ЭЛЛ определяется минимальным размером электронного луча  $d_{min}$  и рассеянием электронов  $\Delta y$  в слое резиста толщиной  $h$ :

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

Электронно-оптическая схема электронно-лучевой литографии приведена на рис. 2.2.

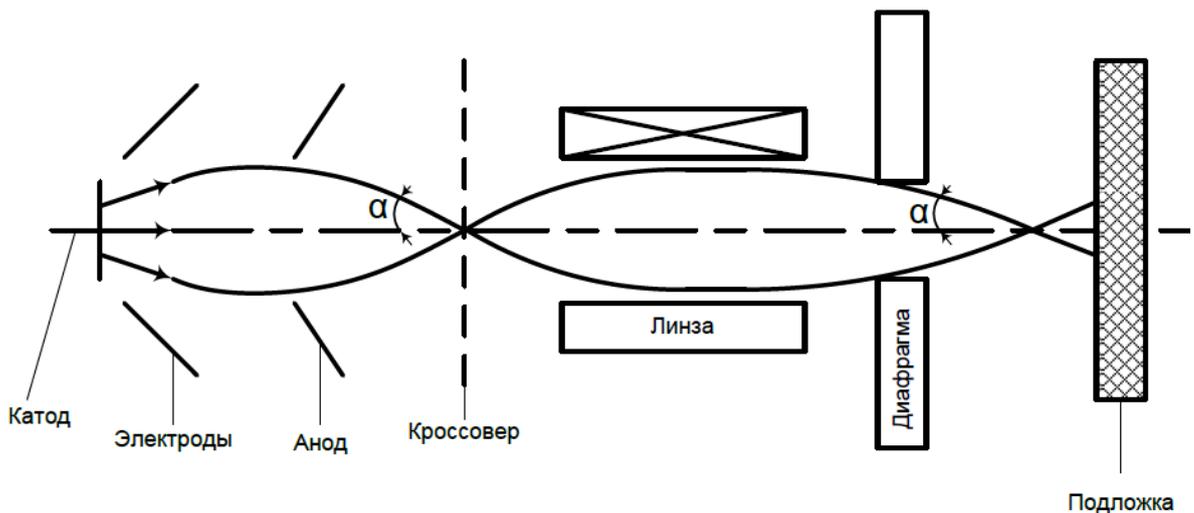


Рисунок 2.2 – Электронно-оптическая схема ЭЛЛ

За счет неравномерного распределения электронов по начальным скоростям и направлениям движения относительно поверхности катода

электронный луч увеличивается в диаметре до гауссовского диаметра  $d_g$  в плоскости кроссовера.

В электронно-оптической системе линзы размещены таким образом, чтобы формировать на подложке изображение кроссовера. При фокусировке электронного луча линзы вносят искажения – аберрации (хроматическая, сферическая), за счет чего происходит увеличение диаметра луча.

Также увеличение диаметра происходит за счет дифракции луча на ограничивающей диафрагме.

Таким образом, минимальный диаметр определяется следующим выражением:

$$d_{min} = \sqrt{d_g^2 + d_s^2 + d_c^2 + d_d^2},$$

где  $d_g$  - минимальный диаметр пятна, ограниченный поперечной составляющей тепловой скорости;

$d_s$  - диаметр кружка наименьшего рассеяния, возникающего вследствие сферической аберрации;

$d_c$  – диаметр кружка наименьшего рассеяния, возникающего вследствие хроматической аберрации;

$d_d$  – диаметр электронного луча с учетом дифракции.

Рассчитывать разрешающую способность следует по следующему алгоритму:

- Рассчитать вклад упругого рассеяния  $\Delta y_1$  по формуле:

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

где  $\bar{\theta}$  – средний угол рассеяния электронов;

$h$  – толщина резиста.

Среднеквадратическое угловое отклонение рассчитывается по следующей формуле:

$$\theta^2 = \frac{4 \cdot \pi \cdot N_0 \cdot h \cdot Z^2 \cdot e^4}{m^2 \cdot v_0^4 (4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0)^2} \cdot \ln \frac{4 \cdot \pi \cdot N_0 \cdot h \cdot Z^{\frac{4}{3}} \cdot e^4 \cdot a_0}{v_0^2 \cdot (\hbar)^2 \cdot (4 \cdot \pi^{1,5} \cdot \varepsilon_0)^2},$$

где  $N_0$  – атомная плотность электронорезиста;

$h$  – толщина резиста;

$v_0$  – скорость электрона;

$\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;

$a_0$  – первый радиус Бора;

$\hbar$  – приведенная постоянная Планка;

$Z$  – атомный номер резиста;

$m$  – масса электрона.

- Рассчитать вклад вторичных электронов, отраженных от подложки,  $\Delta y_{\text{отр}}$  электронного луча по формуле:

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

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

$\eta$  - коэффициент неупругого отражения электронов (0,2÷0,4);

Отношение  $\frac{Q_0}{Q_{\text{пор}}} = (2 - 8)$  для различных электронных резистов.

Энергия  $E_h$  определяется по формуле:

$$E_h = E_0 \sqrt{1 - \frac{h}{R_{B-T}}},$$

где  $R_{B-T}$  – проекционный пробег электронов по формуле Виддингтона-Томсона:

$$R_{B-T} = \frac{E_0^2}{\rho \cdot b_1},$$

где  $b_1$  – экспериментально определенная постоянная

$\rho$  – плотность резиста, выраженная в  $\Gamma/\text{см}^3$ ;

$E_0$  – первичная энергия электронов, которая определяется ускоряющим напряжением  $U_0$ , кэВ.

Величина  $1/b_1$  колеблется от  $2,1 \cdot 10^{-6}$  до  $2,54 \cdot 10^{-6}$  кэВ $^{-2} \cdot \text{г} \cdot \text{см}^{-2}$ .

Размерность рассчитанного проекционного пробега получится в см.

- Рассчитать суммарное уширение луча  $\Delta y = \Delta y_1 + \Delta y_{\text{отр}}$ ;
- Рассчитать разрешающую способность ЭЛЛ  $b_{\text{min}} = d_{\text{min}} + 2\Delta y$ .

Расчеты выполнять для электронорезиста ПММА 950К со следующими параметрами:

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

$$S_0 = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Кл/см}^2 \text{ (при 30 кВ)}; S_{\text{пор}} = 10^{-5} \div 10^{-7} \text{ Кл/см}^2$$

**Выводы:** оценить влияние ускоряющего напряжения и толщины резиста на разрешающую способность. Ускоряющее напряжение для всех установок изменяется в пределах от 20 кВ до 100 кВ. Толщина резиста изменяется в пределах от 45 до 100 нм. Обосновать выбор параметров ЭЛЛ для получения заданного размера.

### Литература

1. Данилина Т.И., Кагадей В.А., Анищенко Е.В. Технология кремниевой наноэлектроники: Учебное пособие. – 2 изд. – Томск: ТУСУР, 2015. – 319 с.

### 2.1.3 Ионно-лучевая литография (ИЛЛ)

Цель практики - Рассчитать разрешающую способность ионно-лучевой литографии при различных параметрах указанной установки.

Варианты заданий и параметры конкретных установок приведены в табл.

2.3.

Таблица 2.3 – Варианты индивидуальных заданий

№	Установка	Сорт ионов	Энергия луча, кэВ	Ток луча	Удельная яркость ионного источника, $A/(cm^2 \cdot sr \cdot kV)$
1	IONLine	Ga	35	10 пА	$10^8$
2	IONLine	Ga	35	100 пА	$10^8$
3	IONLine	Ga	35	1 нА	$10^8$
4	IONLine	Ga	1	10 пА	$10^8$
5	IONLine	Ga	1	100 пА	$10^8$
6	IONLine	Ga	1	1 нА	$10^8$
7	IONLine	Au	35	10 пА	$10^9$
8	IONLine	Au	35	100 пА	$10^9$
9	IONLine	Au	35	1 нА	$10^9$
10	IONLine	Si	35	10 пА	$10^9$
11	IONLine	Si	35	100 пА	$10^9$
12	IONLine	Si	35	1 нА	$10^9$
13	Nova 600	Ga	5-30	1 пА-20 нА	$10^9$
14	JIB-4600 F	Ga	1-30	до 30 нА	$10^9$
15	LYRA3 XM	Ga	0,5-30	1 пА-50 нА	$10^9$
16	ORION NanoFab	He	10-35	0,1-100 пА	$5 \cdot 10^5$

Примечание: коэффициент сферической абберации  $C_s=(1-10)$  см

1) IONLine – Ga, Au, Si, Ge –  $U_0 = (1-35)$  кВ,  $I_0=1$ пА-30нА; 2) Nova 600 – Ga –  $U_0 = (5-30)$  кВ,  $I_0=1$ пА-20нА; 3) JIB-4600 F – Ga –  $U_0 = (1-30)$  кВ,  $I_0=$ до 30нА; 4) LYRA3 XM – Ga –  $U_0 = (0,5-30)$  кВ,  $I_0=1$ пА-50нА; 5) ORION NanoFab – He –  $U_0 = (10-35)$  кВ,  $I_0=0,1-100$ .

#### Методические указания

Для определения минимального диаметра ионного луча на подложке следует воспользоваться соотношением:

$$d_{min} = (C_s^{2/3} \cdot \frac{16 \cdot I_0}{3 \cdot \pi^2 \cdot B})^{3/8},$$

где  $B$  – яркость ионного источника;

$I_0$  – ток луча;

$C_S$  – коэффициент сферической aberrации фокусирующей системы.

Разрешающая способность ИЛЛ, как и случаи ЭЛЛ, рассчитывается по выражению:

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

Рассчитывать разрешающую способность ионно-лучевой литографии следует по следующему алгоритму:

- Рассчитать минимальный диаметр ионного луча  $d_{min}$ ;
- Рассчитать уширение диаметра ионного луча  $\Delta y$  за счет поперечного отклонения ионов на границе подложка-резист и каскада вторичных соударений

$$\Delta y = h \cdot k,$$

где  $h$  – толщина резиста;

$k$  – коэффициент пропорциональности.

Коэффициент пропорциональности равен:

$$k = \left[ \frac{M_2}{3M_1} + (8\pi a^2 \cdot N_0^{2/3} \cdot \frac{Z_1^{2/3} \cdot M_2}{Z_2^{2/3} \cdot M_1})^2 \right]^{1/2},$$

где  $N_0$  – атомная плотность атомов вещества (резиста);

$Z_1, Z_2$  – атомные номера соответственно иона и резиста.

$a$  – параметр экранирования:

$$a = \frac{0,885a_0}{(z_1^{\frac{2}{3}} + z_2^{\frac{2}{3}})^{1/2}},$$

где  $a_0$  – радиус боровской орбиты, равный  $0,529 \cdot 10^{-8}$  см.

- Рассчитать разрешающую способность ИЛЛ
- $$b_{min} = d_{min} + 2\Delta y.$$

Расчеты выполнять, как и в случае электронно-лучевой литографии, для резиста ПММА 950К. За молекулярную массу атома мишени принять молекулярную массу одной атомарной цепочки равной 6,3 г/моль,  $Z=3,4$ .

**Выводы:** оценить влияние параметров ( $I_0, C_S$ ) установки на диаметр ионного луча и на разрешающую способность. Сравнить разрешающую способность ЭЛЛ и ИЛЛ литографий при одинаковых диаметрах электронного и ионного лучей.

### Литература

1. Данилина Т.И., Кагадей В.А., Анищенко Е.В. Технология кремниевой нанoeлектроники: Учебное пособие. – 2 изд. – Томск: ТУСУР, 2015. – 319 с.

## 2.2 Получение сверхмелких р-п переходов в МОП – транзисторах

Цель практики – рассчитать параметры ионной имплантации для получения заданной глубины залегания р-п перехода ( $x_{p-n}$ ).

Глубины залегания р-п переходов диктуются топологической нормой интегральных схем и регламентируются Международной технологической дорожной картой, приведенной в табл. 2.4 [1].

Таблица 2.4 – Международная технологическая дорожная карта

Год	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Топологическая норма	24	22	20	18	17	15,3	14	12,8	11,7	10,6	9,7
Глубина р-п перехода для планарных КМОПТ, нм	10	8,5	7,2	6	5						
Глубина р-п перехода для ПТ на КНИ структуре, нм		7,7	6,8	6	5,4	4,8	4,4	4			
Глубина р-п перехода для ПТ с несколькими затворами, нм		17,7	15,8	14	12,5	11,2	10,1	9	8,1	7,2	6,4

На основании дорожной карты составлены индивидуальные варианты заданий (табл. 2.5).

Таблица 2.5 - Индивидуальные варианты заданий для расчета энергии и дозы ионной имплантации

Вариант	$x_{p-n}$ , нм	$N_{max}$ , см <sup>-3</sup>	$N_{исх}$ , см <sup>-3</sup>
1	7	$10^{20}$	$10^{17}$
2	5,5	$10^{20}$	$10^{17}$
3	15,8	$10^{21}$	$10^{16}$
4	10	$10^{21}$	$10^{16}$
5	15	$10^{21}$	$10^{17}$
6	17,7	$10^{21}$	$10^{17}$
7	8,5	$10^{21}$	$10^{16}$
8	8	$10^{20}$	$10^{17}$
9	12	$10^{21}$	$10^{16}$
10	6,4	$10^{20}$	$10^{17}$
11	17	$10^{21}$	$10^{16}$
12	4,8	$10^{20}$	$10^{17}$
13	14	$10^{21}$	$10^{16}$
14	12,5	$10^{20}$	$10^{17}$
15	7,5	$10^{21}$	$10^{16}$

Расчеты следует выполнять с использованием моноиона бора, сложных молекул ( $BF_2, B_{10}H_{14}, B_{18}H_{22}$ ) и для кластеров с числом атомов бора в одном кластере не более 100.

Для всех вариантов рассчитать требуемые параметры ионной имплантации (энергию ионов и дозу легирования) для получения заданного  $x_{p-n}$ .

#### **Методические указания**

Для того чтобы построить профиль распределения примеси по глубине, необходимо воспользоваться уравнением:

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

Глубина залегания p-n перехода находится по формуле:

$$x_{p-n} = \bar{R}_p + \Delta\bar{R}_p \cdot \sqrt{2 \cdot \ln \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta\bar{R}_p \cdot N_{исх}}}.$$

Максимальная концентрация внедренной примеси равна  $N_{max} = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta \bar{R}_p}$

и располагается на глубине  $x = \bar{R}_p$ . Откуда выражаем дозу ионной имплантации:

$$Q = N_{max} \cdot \sqrt{2\pi} \cdot \Delta \bar{R}_p.$$

Так как,  $\Delta \bar{R}_p^2 = \frac{\bar{R}_p^2}{2\pi}$ , то можно записать:

$$Q = \bar{R}_p \cdot N_{max}.$$

Преобразуем формулу для глубины залегания р-п перехода:

$$x_{p-n} = \bar{R}_p + \Delta \bar{R}_p \cdot \sqrt{2 \cdot \ln \frac{\bar{R}_p \cdot N_{max}}{\bar{R}_p \cdot N_{исх}}} = \bar{R}_p + \Delta \bar{R}_p \cdot \sqrt{2 \cdot \ln \frac{N_{max}}{N_{исх}}}.$$

Для определения энергии ионной имплантации необходимо построить зависимость среднего проецированного пробега от энергии по теории ЛШШ [2]. Затем построить зависимость глубины залегания р-п перехода от энергии. Рекомендуемый диапазон энергий от 100 эВ до 50 кэВ.

Для получения заданного  $x_{p-n}$  при заданной максимальной концентрации примеси  $N_{max} = const$  и  $N_{исх} = const$  доза имплантации является и энергия ионов одинаковой как для моноиона бора, так и для молекулярного иона и кластера. Это связано с тем, что при соударении с поверхностью кремния молекулярный ион и/или кластер массой  $M_M$  диссоциируют и только атомы бора  $M_B$  внедряются вглубь полупроводника. Поэтому дозу на установке необходимо скорректировать в сторону уменьшения, а энергию ионов тяжелых молекул в сторону увеличения в соответствии с соотношением

$$E_M = E_B \left( \frac{M_M}{M_B} \right).$$

Из построенного профиля распределения примеси следует определить глубину залегания р-п перехода и сравнить полученное значение с требуемым исходным данным.

В выводах по выполненной практической работе следует привести: дозу и энергию имплантации для моноиона бора, молекулярного иона бора и кластерного иона бора, а также рекомендовать технологию получения мелкозалегающих p-n переходов.

### Литература

1 International Technology Roadmap for Semiconductors. – [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.itrs.net> (дата обращения 1.11.2015).

2. Данилина Т.И., Кагадей В.А., Анищенко Е.В. Технология кремниевой нанoeлектроники: Учебное пособие. – 2 изд. – Томск: ТУСУР, 2015. – 319 с.

### 2.3 Формирование структур кремний на изоляторе (КНИ) по SIMOX технологии с помощью ионной имплантации

Цель практики – Рассчитать параметры ионной имплантации, которые обеспечат требуемую концентрацию кислорода, толщину слоя  $\text{SiO}_2$ , при этом должен получиться отсеченный слой Si заданной толщины.

При выполнении практического задания в качестве исходных данных следует руководствоваться Международной технологической дорожной картой, приведенной в табл. 2.6 для различных топологических норм ИМС на КНИ-структурах [1].

Таблица 2.6 - Технологическая дорожная карта по КНИ-структурам

Начало производства	Толщина отсеченного слоя Si, нм	Толщина слоя $\text{SiO}_2$ , нм
2003	50-70	145
2004	35-70	145
2005	20-70	100-145
2006	20-70	100-145
2007	15-70	20-145
2008	15-70	20-145
2009	10-70	15-145
2010	5-70	10-145
2011	3-70	7-145
2012	2,2-70	5,4-145

На основании дорожной карты составлены индивидуальные варианты заданий (табл. 2.7).

Таблица 2.7 - Индивидуальные варианты заданий для расчета параметров имплантации для получения КНИ – структур

Вариант	Толщина отсеченного слоя кремния, нм	Толщина слоя двуокиси кремния, нм
1	60	150
2	55	145
3	50	140
4	45	135
5	40	130
6	35	125
7	30	120
8	25	115
9	20	110
10	60	150
11	55	145
12	50	140
13	45	135
14	40	130
15	35	125

SIMOX (Separation by Implantation of Oxygen – разделение (слоёв) с помощью имплантации кислорода) технологии – это метод создания КНИ-структуры, в котором захороненный слой  $\text{SiO}_2$  формируется с помощью высокодозовой имплантации ионов кислорода в кремний, и последующего высокотемпературного отжига имплантированной структуры, приводящего к диффузии кислорода в область с максимальной концентрацией кислорода и дефектов ( $\cong R_p$ ) и формированию сплошного слоя диэлектрика. При этом верхний отсечённый слой Si остаётся практически свободным от кислорода и радиационных дефектов, а его толщина задаётся энергией ионов кислорода.

#### ***Методические указания***

Типичный профиль распределения концентрации кислорода по глубине для формирования КНИ-структур по SIMOX технологии показан на рис. 2.4, из которого следуют выводы, представленные ниже:

1) Концентрация кислорода в отсеченном слое кремния должна быть меньше, чем атомная плотность кремния ( $N_0 = 5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ ).

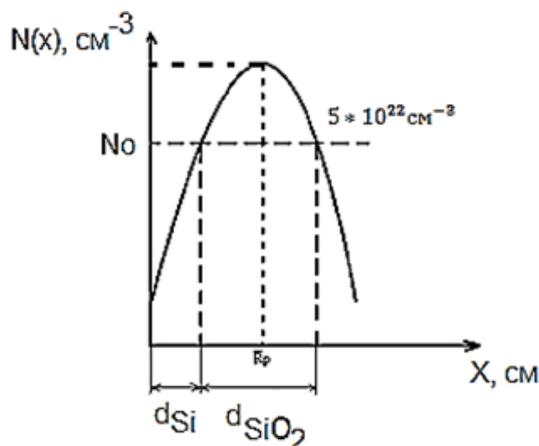


Рисунок 2.4 - Профиль распределения концентрации примеси по глубине

2) Для получения  $\text{SiO}_2$  стехиометрического состава требуется два атома кислорода на каждый атом кремния, т.е.  $N_{\text{O}_2} = 2 \cdot 5 \cdot 10^{22} = 1 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3}$ . Условно можно принять, что границы образования  $\text{SiO}_2$  соответствует концентрация кислорода  $N_{\text{O}_2} = 5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ .

3) Из рис.2.4 следует, что средний проецированный пробег равен:

$$\overline{R_p} = \frac{d_{\text{SiO}_2}}{2} + d_{\text{Si}}.$$

Для обеспечения полученного  $\overline{R_p}$  необходимо рассчитать требуемую энергию ионов кислорода, воспользовавшись теорией ЛШШ [2]. Рекомендуемый диапазон энергии от 10 кэВ до 200 кэВ. Для расчетов параметров берем молекулярный ион кислорода

Например, для среднего проецированного пробега 110 нм необходима энергия ионов кислорода 93 кэВ.

Для того чтобы построить профиль распределения кислорода по глубине, необходимо воспользоваться выражением:

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

Максимальная концентрация внедренной примеси равна  $N_{max} = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta \bar{R}_p}$  и располагается на глубине  $x = \bar{R}_p$ . Откуда выражаем дозу ионной имплантации:

$$Q = N_{max} \cdot \sqrt{2\pi} \cdot \Delta \bar{R}_p.$$

Так как,  $\Delta \bar{R}_p^2 = \frac{\bar{R}_p^2}{2\pi}$ , то можно записать:

$$Q = \bar{R}_p \cdot N_{max} = \bar{R}_p \cdot N_{O_2}.$$

Для среднего проецированного пробега 110 нм, доза ионной имплантации равна:

$$Q = \bar{R}_p \cdot N_{O_2} = 1,1 \cdot 10^{-5} \cdot 1 \cdot 10^{23} = 1,1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}.$$

Откуда видно, что для получения КНИ-структур необходима высокодозовая ионная имплантация кислорода в кремний.

Из построенного профиля распределения примеси по глубине определить толщины отсеченного слоя Si и захороненного слоя SiO<sub>2</sub>, и сравнить полученные значения с исходными данными.

В выводах по выполненной практической работе рекомендовать параметры ионной имплантации и практическую реализацию для получения КНИ-структуры.

### **Литература**

1. International Technology Roadmap for Semiconductors. – [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.itrs.net> (дата обращения 1.11.2015).
2. Данилина Т.И., Кагадей В.А., Анищенко Е.В. Технология кремниевой наноэлектроники: Учебное пособие. – 2 изд. – Томск: ТУСУР, 2015. – 319 с.

## 2.4 Формирование подзатворных диэлектриков в технологии наноразмерных МОП интегральных схем

Цель практики – Рассчитать толщину слоев подзатворных диэлектриков на основе high-k диэлектриков в однослойной и двухслойной структурах. Для однослойных high-k диэлектриков рассчитать требуемое число циклов при атомно-слоевом осаждении. Варианты заданий приведены в табл. 2.8.

Таблица 2.8 - Индивидуальные варианты заданий

Вариант	Диэлектрик	Диэлектрическая проницаемость	Постоянная решетки, Å
1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8	4,758
2	ZrO <sub>2</sub>	18	5,07
3	HfO <sub>2</sub>	22	3,08
4	TiO <sub>2</sub>	70	4,584
5	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	17	5
6	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12	4,8
7	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21	4,9
8	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9	5
9	Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11	4,8
10	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	11	5,1
11	Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25	5
12	SiO <sub>x</sub> N <sub>y</sub>	8	4,7
13	Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14	4,8
14	Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12	4,9
15	TiO <sub>2</sub>	90	5

### *Методические указания*

Расчеты следует проводить по следующему алгоритму.

1. Рассчитать требуемую толщину однослойного high-k диэлектрика вместо SiO<sub>2</sub> при сохранении емкости затвора.

2. Рассчитать толщину high-k диэлектрика для двухслойной комбинации SiO<sub>2</sub> - high-k диэлектрик.

3. Рассчитать требуемое число монослоев для high-k диэлектриков, сформированных методом атомно-слоевого осаждения (ALD).

Для выполнения первого задания следует воспользоваться формулой для плоского конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \cdot S}{d},$$

где  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума;

$S$  – площадь затвора;

$d$  – толщина подзатворного диэлектрика;

$\varepsilon$  – диэлектрическая постоянная high-k диэлектрика.

В качестве исходных параметров принять диэлектрическую постоянную слоя  $\text{SiO}_2$   $\varepsilon=3,9$ , толщину слоя  $\text{SiO}_2$  –  $d=1,2$  нм. Расчеты выполнить для указанного high-k диэлектрика из табл. 2.8.

При выполнении второго задания следует принять толщину  $\text{SiO}_2$ , равной 1 нм,  $\varepsilon=3,9$ . При расчетах следует учесть, что для двухслойного диэлектрика емкость рассчитывается как

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2} \quad C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2},$$

где  $C_1$  – емкость с диэлектриком  $\text{SiO}_2$  ( $\varepsilon_1=3,9$ ) толщиной  $d_1=1$  нм;

$C_2$  – емкость с high-k диэлектриком,  $\varepsilon_2, d_2$ .

Для выполнения третьего задания следует воспользоваться расчетным значением толщины однослойного high-k диэлектрика из первого задания. Толщина монослоя определяется постоянной решетки оксида. Результаты расчетов округлить до целого числа.

В выводах следует отразить следующее.

1. Проанализировать результаты расчетов и обосновать необходимость применения high-k диэлектриков.
2. Рекомендовать комбинацию подзатворных диэлектриков для наноразмерных МОП транзисторов.
3. Рекомендовать конкретную технологию получения high-k диэлектриков.

## 2.5 Формирование глубоких тренчей в технологии кремниевой наноэлектроники

Цель практики – Рассчитать требуемую анизотропию и селективность травления для обеспечения заданной глубины травления. Рекомендовать методы травления. Варианты заданий приведены в табл. 2.9.

Таблица 2.9 - Варианты заданий

Вариант	Материал маски	Размер окна в маске, мкм	Материал рабочего слоя	Глубина травления, мкм	Наклон боковых стенок, град.
1	ОПМ	0,175	Si	6	88
2	SiO <sub>2</sub>	0,5	Si	10	89
3	ОПМ	0,3	Si	4	87
4	SiN	0,5	Si	10	89
5	ОПМ	1	Au	2	87
6	ОПМ	1	Si	10	87
7	SiO <sub>2</sub>	0,6	Si	10	88
8	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1	GaAs	50	89
9	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10	GaAs	70	87
10	SiO <sub>2</sub>	1	Si	5	88
11	ОПМ	0.2	Au	2	89
12	SiO <sub>2</sub>	1	Si	10	88
13	SiN	5	Si	30	88
14	ОПМ	0.1	Si	4	88
15	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5	GaAs	50	87

Примечание: ОПМ – органические полимерные маски; угол наклона – это угол между горизонтальной поверхностью подложки и наклонной боковой поверхностью канавки.

### *Методические указания*

Глубоким травлением считается процесс травления, когда глубина травления больше ширины окна  $b_M$ . В технологии СБИС размеры окон обычно менее 1 мкм при глубине травления до (6-10) мкм. В микросистемной технике глубина травления доходит до 400 мкм. Профиль травления характеризуется глубиной травления и углом наклона боковой стенки канавки. Аспектное соотношение полученного профиля характеризует отношение глубины травления к ширине канавки. Идеальные вертикальные боковые стенки

соответствуют углу  $90^\circ$ . Процесс травления характеризуется анизотропией травления  $A$ :

$$A = \frac{V_B}{V_\Gamma},$$

где  $V_B$ ,  $V_\Gamma$  – соответственно вертикальная и горизонтальная скорости травления подложки (рабочего слоя).

Селективность травления  $S$  – это отношение скорости травления подложки  $V_\Pi$  к скорости травления маски  $V_M$ :

$$S = \frac{V_\Pi}{V_M}.$$

Через маску толщиной  $d_M$  можно протравить подложку на глубину  $d_\Pi = d_M \cdot \frac{V_\Pi}{V_M}$ .

Например, ионно-плазменное травление нитрида кремния в ICP – плазме обеспечивает скорости травления 0,4-0,6 мкм/мин,  $A=4$ ,  $S=18:1$  (к  $\text{SiO}_2$ ).

Для реализации глубокого травления необходимы высокие скорости травления до 10 мкм/мин и при травлении на глубину до 100 мкм требуется  $A \geq 30$ ,  $S \geq 75:1$ .

В табл. 2.10 приведены значения скоростей травления материалов, полученные в следующих условиях: энергия ионов аргона 1 кэВ, плотность тока 1 мА/см<sup>2</sup>, давление остаточных газов  $6,6 \cdot 10^{-3}$  Па.

Таблица 2.10 – Скорость травления различных материалов по действию пучка ионов аргона

Распыляемый материал	Скорость травления, нм/мин	Распыляемый материал	Скорость травления, нм/мин
Кремний	36	Алюминий	44,4
Арсенид галлия	260	Цирконий	32
$\text{SiO}_2$ (термический)	42	Ниобий	30
$\text{SiO}_2$ (напыленный)	38	Железо	32
Фоторезист KTRF	39	Оксид железа	66
Фоторезист AZ1350	60	Молибден	40

Продолжение табл. 2.10.

Распыляемый материал	Скорость травления, нм/мин	Распыляемый материал	Скорость травления, нм/мин
Электронный резист ПММА	84	Титан	20
Серебро	200	Хром	20
Золото	160	Оксид алюминия	13

Из табл. 2.10 видно, что скорости травления большинства металлов лежат в диапазоне (20-40) нм/мин, что сравнимо со скоростями травления кремния, двуокси кремния и фоторезистов. При переходе от чистых металлов (алюминия, железа) к их оксидам скорость травления уменьшается, что подтверждает возможность использования металлических масок при травлении в присутствии кислорода.

Рекомендуемая последовательность расчетов.

1. Определить требуемую толщину маски при травлении подложки (рабочего слоя) на заданную глубину. Для получения высокого разрешения отношение толщины маски к толщине рабочего материала должно быть как можно меньше, так как разрешение маски увеличивается с уменьшением ее толщины, а разрешение в рабочем материале улучшается из-за ослабления эффектов переосаждения. С другой стороны необходимо учитывать, что толщина маски к концу процесса травления должна быть достаточной, чтобы выполнять защитные функции.

2. Рассчитать требуемую анизотропию и селективность травления для получения заданной глубины травления.

3. Определить аспектное отношение сформированного профиля травления.

4. Предложить практическую реализацию с учетом различных методов травления.

В выводах отразить следующее.

Расчетные значения по анизотропии и селективности проанализировать с учетом практической реализации и сделать рекомендации по выбору параметров по анизотропному травлению глубоких тренчей.

### Литература

1. Данилина Т.И., Кагадей В.А., Анищенко Е.В. Технология кремниевой наноэлектроники: Учебное пособие. – 2 изд. – Томск: ТУСУР, 2015. – 319 с.

## 2.6 Формирование LDD областей в технологии МОП СБИС

Цель практики – Рассчитать параметры ионной имплантации для формирования слаболегированных LDD областей с одновременным самосовмещением областей истока и стока с затвором.

Глубины залегания p-n переходов диктуются топологической нормой МОП-СБИС и регламентируются Международной технологической дорожной картой, приведенной в табл. 2.11.

Таблица 2.11 – Международная дорожная карта с размера p-n переходов

Год	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Топологическая норма	24	22	20	18	17	15,3	14	12,8	11,7	10,6	9,7
Глубина p-n перехода для планарных КМОПТ, нм	10	8,5	7,2	6	5						
Глубина p-n перехода для ПТ на КНИ структуре, нм		7,7	6,8	6	5,4	4,8	4,4	4			
Глубина p-n перехода для ПТ с несколькими затворами, нм		17,7	15,8	14	12,5	11,2	10,1	9	8,1	7,2	6,4

### Методические указания

На основании дорожной карты в соответствии с заданной топологической нормой выбирается толщина мелкозалегających LDD областей, она должна быть меньше, чем  $x_{p-n}$  для областей истока-стока.

На операции самосовмещения при ионной имплантации в качестве маски используется сам затвор, поэтому ионная имплантация реализуется через подзатворный диэлектрик.

При построения профиля в двухслойных структурах исходят из гауссовского распределения пробегов ионов в обеих составляющих мишени. Пусть известны порознь пробеги  $\bar{R}_{p1}$  и  $\Delta\bar{R}_{p1}$  в маскирующем слое толщиной  $d_1$  и пробеги  $\bar{R}_{p2}$  и  $\Delta\bar{R}_{p2}$  в полупроводнике. Распределения концентрации примеси в маскирующем слое  $N_1(x)$  и в полупроводнике  $N_2(x)$  определяются следующими выражениями:

$$N_1(x) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta\bar{R}_{p1}} \cdot \exp\left[-\frac{(x - \bar{R}_{p1})^2}{2 \cdot \Delta\bar{R}_{p1}^2}\right], \quad 0 \leq x \leq d_1,$$

$$N_2(x) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \Delta\bar{R}_{p2}} \cdot \exp\left[-\frac{\{x + (d_1 - \bar{R}_{p1}) \cdot \Delta\bar{R}_{p2} / \Delta\bar{R}_{p1}\}^2}{2 \cdot \Delta\bar{R}_{p2}^2}\right], \quad x \geq d_1.$$

Выводы:

1. Назначение LDD областей.
2. Расчеты параметров ионной имплантации через слой SiO<sub>2</sub> для формирования LDD-областей заданной толщины.
3. Рекомендации по практической реализации ионной имплантации.

### Литература

- 1 International Technology Roadmap for Semiconductors. – [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.itrs.net> (дата обращения 1.11.2015).
2. Данилина Т.И., Кагадей В.А., Анищенко Е.В. Технология кремниевой нанoeлектроники: Учебное пособие. – 2 изд. – Томск: ТУСУР, 2015. – 319 с.

## 2.7 Формирование гетеробиполярных транзисторов с базой p-SiGe с помощью ионной имплантации

Цель практики – Рассчитать параметры ионной имплантации для формирования областей базы транзистора на основе SiGe.

Выбор параметров ионной имплантации следует делать, исходя из следующих соображений. Требуемая энергия и доза ионов германия рассчитывается из условия обеспечения глубины базы и ее толщины. Толщина базы p-SiGe для гетеробиполярных транзисторов составляет (50-100) нм. Доза легирования рассчитывается из условия получения слоя с составом  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ , т.е.  $N_{\text{Ge}} = N_0 \cdot \frac{1-x}{x}$  ( $N_0$  – атомная плотность кремния). В этом слое на один атом кремния должно приходиться  $\frac{1-x}{x}$  атомов германия.

Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 2.12. В качестве исходных данных заданы параметры n-p-n биполярных транзисторов, сформированных ионной имплантацией. Глубина залегания перехода эмиттер-база -  $x_{э-б}$ , глубина залегания перехода база-коллектор  $x_{б-к}$ ; максимальная концентрация примеси в эмиттере –  $N_{\text{maxэ}}$ , в базе -  $N_{\text{maxб}}$ ; концентрация в коллекторе -  $N_{\text{к}}$ ; средний проецированный пробег  $\bar{R}_{\text{рб}}$  для бора,  $\bar{R}_{\text{рэ}}$  для фосфора;  $d$  – толщина базы.

Таблица 2.12 – Варианты индивидуальных заданий

Вариант	$x_{э-б}$ , нм	$x_{б-к}$ , нм	$N_{\text{maxэ}}$ , $\text{см}^{-3}$	$N_{\text{maxб}}$ , $\text{см}^{-3}$	$N_{\text{к}}$ , $\text{см}^{-3}$	$\bar{R}_{\text{рб}}$ , нм	$\bar{R}_{\text{рэ}}$ , нм	x	d, нм
1	20	70	$10^{21}$	$5,5 \cdot 10^{19}$	$2 \cdot 10^{16}$	27,4	8,57	0,6	50
2	35	95	$8 \cdot 10^{20}$	$3 \cdot 10^{19}$	$2 \cdot 10^{16}$	37,5	16	0,7	60
3	45	115	$6 \cdot 10^{20}$	$10^{19}$	$2 \cdot 10^{16}$	47,2	21,6	0,8	70
4	60	140	$4 \cdot 10^{20}$	$7 \cdot 10^{18}$	$2 \cdot 10^{16}$	59,8	28,1	0,9	80
5	70	160	$10^{20}$	$5 \cdot 10^{18}$	$2 \cdot 10^{16}$	69	36	0,6	90
6	20	120	$10^{20}$	$3 \cdot 10^{18}$	$2 \cdot 10^{16}$	53	9	0,7	100
7	35	85	$10^{21}$	$10^{18}$	$2 \cdot 10^{16}$	40	14	0,8	50
8	45	105	$9 \cdot 10^{20}$	$5,5 \cdot 10^{19}$	$2 \cdot 10^{16}$	40,5	23,1	0,9	60
9	50	120	$7 \cdot 10^{20}$	$3 \cdot 10^{19}$	$10^{16}$	46,8	27	0,6	70
10	60	140	$5 \cdot 10^{20}$	$10^{19}$	$10^{16}$	57,2	28,4	0,7	80
11	70	160	$5 \cdot 10^{20}$	$2 \cdot 10^{19}$	$10^{16}$	63	34,4	0,8	90
12	20	120	$3 \cdot 10^{20}$	$10^{19}$	$10^{16}$	47,8	9,1	0,9	100
13	35	85	$10^{21}$	$5 \cdot 10^{18}$	$10^{16}$	35,4	15,7	0,6	50
14	45	105	$5 \cdot 10^{20}$	$3 \cdot 10^{18}$	$10^{16}$	45	30,5	0,7	60
15	60	130	$10^{20}$	$10^{18}$	$10^{16}$	58,9	31,4	0,8	70

### **Методические указания**

С целью выбора исходных данных для расчета параметров ионной имплантации для формирования SiGe-базы следует сначала представить распределение примеси в биполярном n-p-n транзисторе, эмиттер и база которого получены с помощью ионной имплантации соответственно фосфора и бора. Затем из этого распределения определить требуемое значение проецированного пробега ионов германия, если принять, что

$$\bar{R}_{p_{Ge}} = x_{э-б} + \frac{1}{2} d_{базы}.$$

Для обеспечения полученного значения  $\bar{R}_{p_{Ge}}$  необходимо рассчитать требуемую энергию ионов, воспользовавшись теорией ЛШШ [1]. Рекомендуемый диапазон энергий для мышьяка до 100 кэВ, для бора до 200 кэВ.

Доза легирования рассчитать как

$$Q = N_{Ge} \cdot \bar{R}_{p_{Ge}}.$$

Из построенного профиля распределения примеси германия в кремнии определить толщину p-SiGe базы.

Выводы:

1. Представить распределение примеси в биполярном транзисторе в соответствии с вариантом задания.
2. Обосновать выбор параметров ионной имплантации для германия.
3. Выполнить расчеты и представить распределение примеси германия в кремнии.
4. Рекомендовать конкретную технологию.

### **2.8 Формирование элементов памяти на аморфном кремнии p-типа с помощью ионной имплантации**

Цель практики – Рассчитать параметры ионной имплантации для формирования слоя аморфного кремния заданной толщины с однородным распределением примеси.

Варианты заданий приведены в табл. 2.13.

Таблица 2.13 – Индивидуальные варианты заданий.

Вариант	Ион	Толщина аморфного слоя кремния, мкм
1	Ge	0,1
2	Ge	0,15
3	Ge	0,2
4	Ar	0,15
5	Ar	0,25
6	Ar	0,3
7	Si	0,25
8	Si	0,35
9	Si	0,45
10	Ge	0,3
11	Ge	0,4
12	Ge	0,5
13	Si	0,5
14	Ar	0,4
15	Ar	0,5

### **Методические указания**

При выполнении практического задания необходимо сформировать элементы памяти на основе аморфизированного слоя кремния на подложке Si р-типа с концентрацией носителей  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Слой аморфного кремния должен иметь однородное распределение примеси, что обычно достигается за счет ионной имплантации в несколько этапов при разных энергиях и дозах ионов.

Если реализовать ионную имплантацию в один этап, то толщина аморфизированного слоя примерно равна  $2\bar{R}_{pD}$  ( $\bar{R}_{pD}$  – средний проецированный пробег для дефектов). Зная  $\bar{R}_{pD}$  можно определить требуемую энергию ионов для обеспечения заданной толщины кремния, предварительно рассчитав зависимость  $\bar{R}_{pD}$  от энергии для заданного типа ионов.

Доза легирования  $Q$  рассчитывается, исходя из требований обеспечения получения аморфного слоя, т.е.  $Q = Q_A$  по формуле

$$N_D = \frac{\bar{N}_{\text{см}} \cdot Q_A}{\bar{R}_{pD}},$$

где  $\bar{N}_{\text{см}}$  – число смещенных атомов, создаваемых одним ионом;

$Q_A$  – доза аморфизации;

$\bar{R}_{pD}$  – средний проецированный пробег для дефектов;

$N_D$  – количество дефектов, соответствующее условию обеспечения аморфизации, т.е.  $N_D = (0,2 - 1) \cdot N_0$  ( $N_0$  – атомная плотность кремния,  $5 \cdot 10^{22}$  атм/см<sup>3</sup>).

Расчеты дозы аморфизации следует производить по методике, изложенной в учебном пособии [1].

Алгоритм расчета следующий:

- 1) рассчитать количество смещенных атомов, создаваемых одним ионом  $\bar{N}_{\text{см}}$ ;
- 2) рассчитать общее количество дефектов,  $N_D = \bar{N}_{\text{см}} \cdot Q$ ;
- 3) рассчитать  $\bar{R}_{pD}$  и  $\Delta\bar{R}_{pD}$  в зависимости от энергии ионов, выбрать энергию ионов для обеспечения заданной толщины аморфного кремния;
- 4) рассчитать распределение концентрации дефектов по глубине  $N_D(x)$ :

$$N_D(x) = \frac{\bar{N}_{\text{см}} \cdot Q}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta\bar{R}_{pD}} \cdot \exp\left(-\frac{(x - \bar{R}_{pD})^2}{2 \cdot \bar{R}_{pD}^2}\right).$$

По результатам расчетов следует построить профили распределения дефектов по глубине и определить толщину аморфизированного слоя кремния, исходя из граничной концентрации дефектов, равной  $(0,2 - 1) \cdot N_0$ .

Сделать выводы о пригодности имплантации в один этап при выбранных энергии и дозе для решения поставленной задачи.

При использовании ионной имплантации в три этапа следует для каждого этапа скорректировать энергии и дозы для получения слоя аморфного кремния заданной толщины с однородным распределением примеси.

Выводы:

1. Представить ожидаемое распределение примеси для получения слоя аморфного Si заданной толщины при ионной имплантации в один и три этапа.
2. Обосновать выбор параметров.

3. Рекомендовать конкретную технологию.

**Литература**

1. Данилина Т.И., Кагадей В.А., Анищенко Е.В. Технология кремниевой наноэлектроники: Учебное пособие. – 2 изд. – Томск: ТУСУР, 2015. – 319 с.

### 3 ДОМАШНЕЕ ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

#### Вариант 1

Разработать технологический маршрут изготовления КМОП-инвертора с использованием областей LDD, карманов n и p-типов с ретроградным распределением примеси и операции самосовмещения.

#### Вариант 2

Рассмотреть возможность уменьшения глубины залегания p-n перехода за счет аморфизации приповерхностных слоев кремния.

#### Вариант 3

Разработать технологический маршрут изготовления монолитной интегральной схемы BIFET. Слои гетеробиполярного транзистора НВТ расположены на поверхности p-HEMT структуры. НВТ и p-HEMT разделены высоколегированным слоем GaAs, который является активным слоем p-HEMT и высоколегированным коллектором НВТ.

#### Вариант 4

Рассмотреть возможность уменьшения глубины залегания p-n перехода за счет наклонной имплантации. Рассчитать зависимость  $x_{p-n}$  от угла наклона.

#### Вариант 5

Разработать технологический маршрут изготовления интегральной схемы BIFET по гибридной технологии. Подложка – GaAs. FET-слои выращены одновременно со структурой НВТ: рабочий слой и стоп-слой совмещены со слоем эмиттера.

## Вариант 6

Рассмотреть возможность получения супермелкозалегающих p-n переходов путем легирования атомами отдачи. Рассчитать параметры ионной имплантации для реализации этого метода.

## Вариант 7

Разработать технологический маршрут изготовления интегральной схемы SiGe BiCMOS: definition, содержащей гетеробиполярный транзистор с базой SiGe, КМОП, резисторы на основе поликремния.

## Вариант 8

Каналирование ионов. Получить условия каналирования при различных энергиях ионов. Рассчитать распределение концентрации примеси на глубине с учетом эффекта каналирования. Мишень – кремний. Ионы – бор, фосфор. Энергия ионов 50-150 кэВ. Доза облучения  $10^{12}$ - $10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>.

## Вариант 9

Разработать технологический маршрут изготовления интегральной схемы, содержащей гетеробиполярные транзисторы SiGe на КНИ-подложках.

## Вариант 10

Рассмотреть возможность применения ионной имплантации для формирования каналов с ретроградным распределением примеси. Рассчитать требуемые параметры ионной имплантации.

## Вариант 11

Разработать технологический маршрут изготовления SiGe BiCMOS на подложке Si-p- и с коллектором – n+. База – p-SiGe. Контакт эмиттера – металл или силицид металла.

### Вариант 12

Рассмотреть боковое рассеяние ионов и рассчитать его влияние на распределение примеси при ионной имплантации через окно заданного размера. Сформулировать условия, когда боковое рассеяние надо учитывать.

### Вариант 13

Рассмотреть формирование LDD областей в технологии МОП-СБИС и предусмотреть одновременное самосовмещение областей стока-истока с затвором. Рассчитать требуемые параметры ионной имплантации.

### Вариант 14

Сформировать биполярный р-п-р транзистор и рассчитать параметры ионной имплантации для формирования базы и эмиттера. Коллектор – эпитаксиальный слой кремния.

### Вариант 15

Разработать технологический маршрут изготовления КМОП-СБИС на КНИ-подложках с каналом на основе напряженного кремния. Рассчитать параметры ионной имплантации для формирования слоев SiGe в областях истока и стока и в слоях под каналом.

## 4 АУДИТОРНАЯ КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

### Вариант 1

1. Почему разрешающая способность электронной литографии выше, чем оптической?
2. Объяснить, зачем при ионной имплантации ионов бора используют тяжелые молекулы, содержащие бор.

### Вариант 2

1. Как получается рисунок при последовательной ЭЛЛ?
2. Представить распределение бора по глубине при ионной имплантации моноионов бора и кластерных ионов при одинаковом ускоряющем напряжении и дозе облучения на установке. Кластер состоит из 50 атомов.

### Вариант 3

1. Рассмотреть взаимосвязь между минимальной шириной экспонируемой линии и диаметром сфокусированного луча.
2. Рассчитать параметры ионной имплантации для молекулы  $B_{10}H_{14}$ , если энергия моноионов бора составляет 0,1 кэВ, а доза облучения –  $5 \cdot 10^{13}$  ион/см<sup>2</sup>.

### Вариант 4

1. Объяснить влияние энергии электронов на разрешающую способность ЭЛЛ.
2. Как изменится  $x_{p-n}$ , если для легирования бором вместо моноиона бора взять молекулярный ион  $B_{18}H_{22}$ , при прочих равных условиях

## Вариант 5

1. Как следует выбирать параметры установки ЭЛЛ ( $I_0$ ,  $U_0$ ), если требуется обеспечить требуемую разрешающую способность?
2. Как надо изменить параметры ионной имплантации при получении заданного  $x_{p-n}$ ,  $N_{max}$ ,  $N_{исх}$ , если заменить моноионы бора на молекулярный ион  $B_{18}H_{22}$ .

## Вариант 6

1. Объяснить влияние толщины резиста на разрешающую способность проекционной и ЭЛЛ.
2. Объяснить, зачем делается предварительная аморфизация приповерхностного слоя кремния при формировании супермелкозалегающих p-n переходов.

## Вариант 7

1. Объяснить, к чему приведет увеличение тока в пучке  $I_0$  при ЭЛЛ?
2. Объяснить, какое необходимо получить распределение кислорода при формировании захороненного слоя  $SiO_2$  по SIMOX-технологии.

## Вариант 8

1. Объяснить, из каких соображений следует выбирать материал и конструкцию катода для установки ЭЛЛ?
2. Объяснить, как рассчитать дозу кислорода, которая потребуется для формирования стехиометрического слоя  $SiO_2$  по SIMOX-технологии.

## Вариант 9

1. Сравнить методы экспонирования резиста (проекторная ФЛ и электронно-лучевая литография) и рекомендовать наиболее подходящий метод для получения размеров менее 20 нм с учетом технико-экономических соображений.
2. Представить распределение примеси кислорода по глубине в SIMOX-технологии для получения заданной толщины отсеченного слоя Si и SiO<sub>2</sub>.

## Вариант 10

1. Из каких соображений следует выбирать ток пучка  $I_0$  при ЭЛЛ?
2. Объяснить, при решении каких задач используется ионная имплантация в кремний через слой SiO<sub>2</sub> и представить распределение примеси для двух толщин SiO<sub>2</sub>.

## Вариант 11

1. Каким образом выбрать установку ЭЛЛ для получения заданного размера  $b_{\min}$ ?
2. Обосновать выбор параметров ионной имплантации для формирования низколегированных областей истока-стока МОП-транзисторов (LDD-области).

## Вариант 12

1. Объяснить влияние толщины резиста на разрешающую способность электронно-лучевой и ионно-лучевой литографии.
2. Обосновать выбор технологии ионной имплантации для формирования каналов с ретроградным распределением примеси. Представить требуемое распределение примеси в канале.

## Вариант 13

1. Как следует выбирать параметры установки ЭЛЛ ( $I_0$ ,  $U_0$ ) для обеспечения высокой разрешающей способности?
2. Обосновать выбор параметров ионной имплантации для формирования областей истока-стока с концентрацией более  $10^{20}$  см<sup>-3</sup> и глубиной  $x_{p-n}$  менее 10 нм. Предложить практическую реализацию.

## Вариант 14

1. Как изменится диаметр электронного пучка на подложке, если необходимо увеличить ток с  $10^{-8}$  до  $10^{-5}$  А?
2. Обосновать выбор параметров ионной имплантации для формирования металлического затвора из силицида металла  $CoSi_2$ .

## Вариант 15

1. Объяснить, при каких условиях необходимо в ЭЛЛ учитывать явления дифракции.
2. Обосновать выбор параметров ионной имплантации для формирования в канале МОП-транзистора слоя  $Si_{0,7}Ge_{0,3}$  с целью создания напряженного кремния для канала.

## Вариант 16

1. Объяснить, какую выбрать энергию электронов 100 кэВ или 10 кэВ с целью уменьшения эффекта рассеяния электронов в слое резиста.
2. Объяснить необходимость формирования низколегированных LDD-областей в МОП-транзисторах с помощью ионной имплантации.

## 5 ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Ионно-лучевое травление является результатом:
  - а) физического распыления ионами инертных газов;
  - б) распыления и химической реакции;
  - в) распыления ионами инертных газов в высоком вакууме;
  - г) травление за счет радикалов ХАЧ;
  - д) термического испарения;
  - е) химических реакций.
  
2. Плазменное травление является результатом:
  - а) физического распыления ионами инертных газов;
  - б) распыления и химической реакции;
  - в) распыления ионами инертных газов в высоком вакууме;
  - г) травления за счет радикалов ХАЧ.
  
3. Плазмохимическое травление является результатом:
  - а) физического распыления в условиях газового разряда ионами инертных газов;
  - б) физического распыления ионами инертных газов в условиях высокого вакуума;
  - в) травления ХАЧ в условиях воздействия плазмы;
  - г) травления ХАЧ в условиях высокого вакуума.
  
4. Реактивное ионно-лучевое травление является результатом:
  - а) физического распыления ионами инертных газов в условиях высокого вакуума;
  - б) травления радикалами ХАЧ в плазме;
  - в) распыление ионами химически активных частиц в высоком вакууме.

5. Степень анизотропии травления определяется следующим образом:

$$\text{а) } \frac{V_B}{V_\Gamma}; \quad \text{б) } \frac{V_\Gamma}{V_B}; \quad \text{в) } \frac{V_{\text{подл}}}{V_{\text{пл}}}; \quad \text{г) } \frac{V_{\text{пл}}}{V_{\text{подл}}}.$$

где  $V_B$ ,  $V_\Gamma$  – соответственно скорости травления в вертикальном и горизонтальном направлениях;  $V_{\text{пл}}$ ,  $V_{\text{подл}}$  – соответственно скорости травления пленки и подложки.

6. Селективность травления определяется следующим образом:

$$\text{а) } \frac{V_B}{V_\Gamma}; \quad \text{б) } \frac{V_\Gamma}{V_B}; \quad \text{в) } \frac{V_{\text{подл}}}{V_{\text{пл}}}; \quad \text{г) } \frac{V_{\text{пл}}}{V_{\text{подл}}}.$$

где  $V_B$ ,  $V_\Gamma$  – соответственно скорости травления в вертикальном и горизонтальном направлениях;  $V_{\text{пл}}$ ,  $V_{\text{подл}}$  – соответственно скорости травления пленки и подложки.

7. Какой получится размер окна в пленке толщиной 0,5 мкм в результате изотропного травления, если размер маски 1 мкм?

- а) 1 мкм;
- б) 1,5 мкм;
- в) 2 мкм;
- г) 2,5 мкм.

8. Какой получится размер линии в пленке толщиной 1 мкм в результате анизотропного травления с  $A=10$ , если размер маски 1 мкм?

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

9. Какой получится размер окна в пленке толщиной 1 мкм в результате анизотропного травления с  $A=100$ , если размер маски 1 мкм?

- а) 1 мкм;
- б) 1,01 мкм;
- в) 1,02 мкм;
- г) 1,03 мкм.

10. Чему равна селективность травления, если скорость травления пленки в два раза больше скорости травления подложки?

- а) 0,5;
- б) 1;
- в) 1,5;
- г) 2.

11. Где надо установить подложку при плазменном травлении?

- а) на катоде;
- б) на аноде;
- в) на держателе, вынесенном в область высокого вакуума;
- г) на стенке рабочей камеры.

12. Где надо установить подложку при ионно-лучевом травлении?

- а) на катоде;
- б) на аноде;
- в) на держателе, вынесенном в область высокого вакуума;
- г) на стенке рабочей камеры.

13. Какой сорт ионов используется при реализации ионно-лучевого травления?

- а)  $CF_3^+$ ; б)  $Ar^+$ ; в)  $CF_4^+$ .

14. При каком отношении  $S_0/S_{Вч}$  достигается большое отрицательное смещение на катоде?

- а)  $S_0 > S_{Вч}$ ; б)  $S_0 < S_{Вч}$ ; в)  $S_0 = S_{Вч}$ ;

15. Анизотропия травления будет выше при:

- а)  $S_0 > S_{Вч}$ ; б)  $S_0 < S_{Вч}$ ; в)  $S_0 = S_{Вч}$ ;

16. Скорость ионно-лучевого травления с увеличением коэффициента распыления:

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

17. Для обеспечения высокой разрешающей способности ионно-лучевого травления необходимы маски:

- а) с высоким коэффициентом распыления;  
б) с низким коэффициентом распыления;  
в) разрешающая способность не зависит от коэффициента распыления.

18. Для обеспечения высокой разрешающей способности боковые стенки маски должны быть:

- а) вертикальными;  
б) горизонтальными;  
в) под углом  $45^\circ$

19. В качестве рабочего газа в реактивных методах травления кремния используются молекулы и атомы:

- а)  $\text{CF}_4$ ;
- б) Ar;
- в) Si.

20. Скорость реактивного ионного травления кремния при введении кислорода до 40%:

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

21. Скорость реактивного ионного травления кремния при введении кислорода до 12%:

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

22. Какой выбрать вариант травления кремния для обеспечения максимальной скорости?

- а) травление ионами  $\text{Ar}^+$ ;
- б) травление  $\text{XeF}_2$ ;
- в) травление  $\text{Ar}^+ + \text{XeF}_2$ .

23. Для увеличения селективности травления Si через маску  $\text{SiO}_2$  следует добавить в плазму  $\text{CF}_4$ :

- а) 12%  $\text{O}_2$ ;
- б) 40%  $\text{H}_2$ ;
- в) 40% Ar

24. Скорость травления с увеличением мощности разряда:

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

25. Скорость травления с увеличением расхода газа:

- а) увеличивается;
- б) уменьшается;
- в) сначала увеличивается, затем уменьшается.

26. Что такое «загрузочный эффект» при плазмохимическом травлении (ПХТ)?

- а) увеличение скорости травления при увеличении площади травления;
- б) уменьшение скорости травления при увеличении площади травления;
- в) скорость травления не изменяется при увеличении площади травления.

27. Основное достоинство ИЛТ заключается:

- а) в высокой скорости травления;
- б) высокой разрешающей способности;
- в) в высокой селективности.

28. Основное достоинство ПХТ в  $CF_4$  заключается:

- а) в высокой скорости травления;
- б) высокой разрешающей способности;
- в) в высокой селективности и скорости травления.

29. Основными условиями реализации ПХТ являются:

- а) протекание химической реакции на поверхности подложки;
- б) образование ХАЧ в плазме;

в) протекание химической реакции на подложке и образование легколетучего продукта реакции.

30. Что дает плазмохимическое осаждение (ПХО)  $\text{SiO}_2$  по сравнению с химическим?

- а) увеличение скорости образования пленок  $\text{SiO}_2$ ;
- б) повышение качества пленок;
- в) повышение качества пленок при одновременном уменьшении температуры подложки во время осаждения.

31. Получение пленок  $\text{SiO}_2$  высокого качества плазмохимическим методом реализуется:

- а) за счет протекания химической реакции при высокой температуре подложки;
- б) за счет протекания химической реакции в плазме при низкой температуре подложки;
- в) за счет воздействия плазмы.

32. Скорость плазмохимического осаждения пленок  $\text{SiO}_2$  с увеличением мощности разряда:

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

## 6 ТЕМЫ ДОКЛАДОВ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Современное состояние технологии многоуровневой системы металлизации кремниевых ИС.
2. Инженерия затвора МОП-транзистора.
3. Инженерия канала МОП-транзистора.
4. Монокристаллические полупроводниковые слои на аморфных подложках.
5. Селективная гетероэпитаксия в технологии BiCMOS.
6. Атомно-слоевое осаждение диэлектриков.
7. Перспективные методы нанолитографии.
8. Наноимпринтинг. Современные проблемы формирования трехмерных СБИС.
9. Конструкционно-технологический базис для создания МОП-транзисторов с субмикронными размерами.
10. Физическая структура МОП-транзисторов (МОПТ).
11. Формирование SiGe наноструктур методом ионной имплантации.
12. Технологический маршрут изготовления ViFET структур.
13. Применение ионной имплантации для решения проблем КМОП-СБИС.
14. Проблемы металлизации СБИС с n и p каналами.
15. Новые типы транзисторов для СБИС с улучшенными характеристиками.
16. Формирование межэлементных соединений и межуровневой разводки.
17. Применение ионной имплантации в микро- и нанотехнологиях.
18. Управление пороговым напряжением в МОП-транзисторах с помощью ионной имплантации.

## 7 ЭКЗАМЕН

### Вариант 1

1. Рассмотреть возможность уменьшения глубины залегания р-n перехода за счет аморфизации приповерхностных слоев кремния.
2. Сравнение электронной и ионной литографии.

### Вариант 2

1. Объяснить появление эффекта близости. Исследовать влияние толщины резиста на получение малых экспонируемых областей при их близком взаимном расположении.
2. Оценить глубину залегания р-n перехода при легировании моноионами бора и кластерными ионами.

### Вариант 3

1. Применение ионного легирования для самосовмещения затвора с областями стока-истока в МДП-транзисторах.
2. Формирование подзатворных диэлектриков в технологии наноразмерных КМОП-интегральных схем.

### Вариант 4

1. Субмикронная фотолитография.
2. Формирование силицидных пленок с помощью ионной имплантации.

### Вариант 5

1. Технология электронно-лучевой литографии. Время экспонирования.
2. Транзисторы с каналом на основе напряженного кремния и SiGe.

## Вариант 6

1. Рассмотреть возможность управления профилем распределения примеси и глубиной залегания  $x_{p-n}$  при ионном легировании.
2. Технология анизотропного травления для формирования «тренчей».

## Вариант 7

1. Рассмотреть боковое рассеяние ионов и его влияние на распределение примеси при ионной имплантации через окно заданного размера. Сформулировать условие, когда боковое рассеяние следует учитывать.
2. Оценить требуемую анизотропию травления пленки для реактивного ионно-лучевого травления с точностью 20 % при  $b_m=1$  мкм.

## Вариант 8

1. Рассмотреть возможность формирования структуры с однородным распределением примеси для элементов памяти на основе аморфного кремния.
2. Анизотропия и селективность травления при ионно-лучевом травлении глубоких профилей.

## Вариант 9

1. Атомно-слоевое осаждение пленок.
2. Проблемы межуровневой изоляции в технологии СБИС.

## Вариант 10

1. Рассмотреть формирование LDD областей в технологии МОП СБИС и предусмотреть одновременное самосовмещение областей истока - стока с затвором.
2. Объяснить влияние энергии электронов на разрешающую способность ЭЛЛ.

## Вариант 11

1. Объяснить влияние толщины резиста на разрешающую способность ЭЛЛ и ионно-лучевой литографии.

2. Плазмохимическое травление (ПХТ). Достоинства и недостатки по сравнению с ионно-лучевым травлением.

## Вариант 12

1. Как следует выбирать параметры установки ЭЛЛ ( $I_0$ ,  $U_0$ ) для обеспечения высокой разрешающей способности.

2. Рассмотреть возможность применения ионной имплантации для формирования каналов МОП-транзисторов с ретроградным распределением примеси.

## Вариант 13

1. Обосновать выбор параметров ионной имплантации для формирования областей истока-стока с концентрацией более  $10^{20}$  см<sup>-3</sup> и глубиной  $x_{p-n}$  менее 10 нм.

2. Как следует выбирать ток пучка электронов  $I_0$  при ЭЛЛ?

## Вариант 14

1. Сравнить методы экспонирования резиста (проекционная ФЛ и электронно-лучевая литография) и рекомендовать наиболее подходящий метод для получения размеров менее 65 нм с учетом технико-экономических соображений.

2. Обосновать выбор параметров ионной имплантации в SIMOX-технологии для получения заданной толщины отсеченного слоя Si и SiO<sub>2</sub>.

## Вариант 15

1. Представить технологию изготовления биполярного транзистора с помощью ионной имплантации для формирования базы и эмиттера. Коллектор - эпитаксиальный слой. Представить распределение примеси для n-p-n транзистора.

2. На какую глубину  $d_{\Pi}$  можно протравить подложку через маску толщиной  $d_m$  при ионном травлении.

**РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Таруи, Я. Основы технологии СБИС: пер. с яп.: под ред. В.Г. Ржанова / Я. Таруи. - М.: Радио и связь, 1985. - 479 с.
2. 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.
3. Курносков, А.И., Юдин, В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных схем / А.И. Курносков, В.В. Юдин. – М.: ВШ, 1986. – 386 с.
4. Броудай, И., Мерей, Дж. Физические основы микротехнологии: пер. с англ. / И. Броудай, Дж. Мерей. – М.: Мир, 1985. – 494 с.
5. Мейер Дж., Эрикссон Л., Дэвис Дж. Ионное легирование полупроводников (кремний и германий) : пер. с англ / Дж. Мейер, Л. Эрикссон. – М.: Мир, 1973. – 296 с.
6. Технология СБИС. Т.1 / Под ред. С. Зи; Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 404 с.
7. Риссел, Х., Руге, И. Ионная имплантация / Х.Риссел, И.Руге .- М.:Наука,1983. -360с.
8. Плазменная технология в производстве СБИС: пер.с англ.: под ред. Н. Айнспрука и Д. Брауна. - М.: Мир, 1987. - 469 с.
9. Данилина, Т.И., Смирнов, С.В. Ионно-плазменные технологии в производстве СБИС / Т. И. Данилина, С. В. Смирнов. – Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2000. – 140 с.
10. Киреев, В.Ю. Введение в технологии микроэлектроники и нанотехнологии / В.Ю. Киреев. - М.: ФГУП «ЦНИИХМ», 2008. – 431 с.
11. Путря, М.Г. Плазменные методы формирования трехмерных структур / М.Г. Путря. СБИС; учеб.пособие. - М.: МИЭТ, 2005. – 235 с.
12. Берлин, Е., Двинин, С., Сейдман, Л. Вакуумная технология и оборудование для нанесения и травления тонких пленок / Е. Берлин, С. Двинин, С. Сейдман. - М.:Техносфера, 2007. – 176 с.

13. Галперин, В.А., Данилкин, Е.В., Мочалов, А.И. Процессы плазменного травления в микро- и нанотехнологиях / В.А. Галперин, Е.В. Данилкин, А.И. Мочалов. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. – 286 с.
14. Громов, Д.Г., Мочалов, А.И., Сулимин, А.Д., Шевяков, В.И. Металлизация ультрабольших интегральных схем / Д.Г. Громов, А.И. Мочалов, А.Д. Сулимин, В.И. Шевяков. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 277 с.
15. Технология СБИС. Т.2 / Под ред. С. Зи; пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 444 с.
16. Королев, М.А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем: в 2 ч. / М.А.Королев, Т.Ю.Крупкина, М.А.Ревелева: под ред. Ю.А.Чаплыгина Ч.1: Технологические процессы изготовления кремниевых интегральных схем и их моделирование.- М.:БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009.- 397 с.
17. Королев, М.А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем: в 2 ч./М.А.Королев, Т.Ю.Крупкина, М.Г.Путря, В.И.Шевяков: под ред. Ю.А.Чаплыгина Ч.2: Элементы и маршруты изготовления кремниевых ИС и методы их математического моделирования.- М.:БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009.- 422 с.
18. Асеев, А.Л. Перспективы применения структур «кремний на изоляторе» в микро-, наноэлектронике и микросистемной технике / А.Л. Асеев и др.//Микросистемная техника. - 2002. - №9, С.25-29.
19. Лапшинов, Б.А. Технология литографических процессов / Б.А. Лапшинов. - Учебное пособие.- Московский гос.ун-т электроники и математики. - 2011. - 95 с.
20. Красников, Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов / Г.Я. Красников: М.: Техносфера, 2011.- 800 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

### 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 <sup>-1</sup>
Масса покоя электрона	$m_e$	9,1	$10^{-31}$ кг
Постоянная Планка	$h$	6,62	$10^{-34}$ Дж·с
Атомная единица массы	$a.е.м.$	1,66	$10^{-27}$ кг
Газовая постоянная	$R$	8,3	Дж · моль <sup>-1</sup> град <sup>-1</sup>
Постоянная Больцмана	$k$	1,38	$10^{-23}$ Дж · град <sup>-1</sup>
Первый радиус Бора	$a_0$	5,29	$10^{-11}$ м
Диэлектрическая проницаемость вакуума	$\epsilon_0$	8,85	$10^{-12}$ Ф · м <sup>-1</sup>

### СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ЕДИНИЦАМИ ИЗМЕРЕНИЯ

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

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

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

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

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

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

**ПРИЛОЖЕНИЕ 2**  
**ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ**

Периоды	Ряды	Группы элементов									
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		
1	I	1 <b>H</b> 1,008							2 <b>He</b> 4,0		
2	II	3 <b>Li</b> 6,94	4 <b>Be</b> 9,01	5 <b>B</b> 10,81	6 <b>C</b> 12,0	7 <b>N</b> 14,01	8 <b>O</b> 16,0	9 <b>F</b> 19,0	10 <b>Ne</b> 20,18		
3	III	11 <b>Na</b> 23	12 <b>Mg</b> 24,30	13 <b>Al</b> 26,98	14 <b>Si</b> 28,09	15 <b>P</b> 30,97	16 <b>S</b> 32,06	17 <b>Cl</b> 35,45	18 <b>Ar</b> 40,0		
4	IV	19 <b>K</b> 39,10	20 <b>Ca</b> 40,08	21 <b>Sc</b> 44,96	22 <b>Ti</b> 47,90	23 <b>V</b> 50,94	24 <b>Cr</b> 52,0	25 <b>Mn</b> 54,9	26 <b>Fe</b> 55,8	27 <b>Co</b> 58,9	28 <b>Ni</b> 58,7
	V	29 <b>Cu</b> 63,55	30 <b>Zn</b> 65,38	31 <b>Ga</b> 69,72	32 <b>Ge</b> 72,5	33 <b>As</b> 74,92	34 <b>Se</b> 79,0	35 <b>Br</b> 79,9	36 <b>Kr</b> 83,8		

<b>5</b>	<b>VI</b>	<b>37</b> <i>Rb</i> 85,5	<b>38</b> <i>Sr</i> 87,6	<b>39</b> <i>Y</i> 88,9	<b>40</b> <i>Zr</i> 91,2	<b>41</b> <i>Nb</i> 92,9	<b>42</b> <i>Mo</i> 96,0	<b>43</b> <i>Tc</i> 98,9	<b>44</b> <i>Ru</i> 101,0	<b>45</b> <i>Rh</i> 102,9	<b>46</b> <i>Pd</i> 106,4
	<b>VII</b>	<b>47</b> <i>Ag</i> 107,9	<b>48</b> <i>Cd</i> 112,4	<b>49</b> <i>In</i> 114,8	<b>50</b> <i>Sn</i> 118,8	<b>51</b> <i>Sb</i> 121,8	<b>52</b> <i>Te</i> 127,6	<b>53</b> <i>I</i> 126,9	<b>54</b> <i>Xe</i> 131,3		
<b>6</b>	<b>VIII</b>	<b>55</b> <i>Cs</i> 132,9	<b>56</b> <i>Ba</i> 137,3	<b>La- Lu</b>	<b>72</b> <i>Hf</i> 178,5	<b>73</b> <i>Ta</i> 180,9	<b>74</b> <i>W</i> 183,8	<b>75</b> <i>Re</i> 186,2	<b>76</b> <i>Os</i> 190,2	<b>77</b> <i>Ir</i> 192,2	<b>78</b> <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, $\rho / \text{см}^3$	Атомная плотность $N_0 \cdot 10^{22}, \text{ атом} / \text{см}^3$	Энергия сублимации, $E_{\text{суб}}, \text{ эВ}$	Пороговая энергия, $E_{\text{п}}, \text{ эВ}$
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		