

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

*Методические указания по выполнению курсового проекта
для магистрантов по направлению
11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»,
магистерская программа «Твердотельная электроника»*

Томск 2017

Рецензент:

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

Данилина Т.И.

Технология кремниевой наноэлектроники: методические указания по выполнению курсового проекта для магистрантов по направлению 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника». – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2017. – 45 с.

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 ТЕМАТИКА КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ	6
3 ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ	7
4 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК	9
4.1 Электронно-лучевая литография	9
4.2 Ионная имплантация	12
4.3 Ионное и плазмохимическое травление микроструктур	19
5 ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСОВОГО ПРОЕКТА	20
6 ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ТД	25
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	28
ПРИЛОЖЕНИЕ А	30
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	45

1 ВВЕДЕНИЕ

Данное методическое пособие представляет собой методические указания по выполнению курсовых проектов для магистрантов по направлению 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника» по дисциплине «Технология кремниевой нанoeлектроники».

Анализ тенденций развития мировой микроэлектроники показывает, что ключевой задачей на ближайшее десятилетие является освоение производства сверхбольших (СБИС) и ультрабольших интегральных схем (УБИС). Количество транзисторов на одном кристалле ИС микропроцессора за ближайшие 10 лет должно возрасти от $1 \cdot 10^8$ до $3 \cdot 10^9$ штук, а физическая длина затвора транзистора уменьшится с 25 нм до 8 нм. Рост рабочих частот ИС обеспечивался пропорциональным уменьшением всех размеров транзистора (длины затвора, толщины подзатворного диэлектрика, расстояния исток – сток, толщины легированных областей и др.). Для обеспечения этих требований требуется совершенствование традиционных методов изготовления ИС и разработка принципиально новых решений. К таким методам относятся субмикронная литография (электронная, ионная и др.), ионная имплантация для формирования субмикронных p-n переходов, плазмохимическое травление глубоких тренчей, плазмохимическое осаждение нанослоев на основе high-k и low-k диэлектриков, формирование КНИ-структур методами SIMOX и Smart-Cut, FIB-технологии, методы формирования транзисторов на основе напряженного кремния и SiGe и технологические маршруты изготовления наноразмерных МОП, КМОП, BiCMOS и других ИС.

Процесс изучения дисциплины «Технология кремниевой нанoeлектроники» направлен на формирование у студентов направления подготовки 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника» следующих компетенций:

- способностью использовать на практике умения и навыки в организации исследовательских и проектных работ, в управлении коллективом (ОК-2);
- способностью использовать результаты освоения дисциплин программы магистратуры (ОПК-2);

- готовностью обеспечивать технологичность изделий электронной техники и процессов их изготовления, оценивать экономическую эффективность технологических процессов (ПК-13);

- способностью к организации и проведению экспериментальных исследований с применением современных средств и методов (ПК-4).

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

2 ТЕМАТИКА КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ

Тематика курсовых проектов соответствует содержанию дисциплины «Технология кремниевой нанoeлектроники» и учитывает современное состояние микро- и нанoeлектроники.

Целью курсовых проектов является разработка технологических процессов изготовления СБИС, расчеты параметров технологических процессов, выбор конкретных технологий и технологического оборудования.

Конкретные темы курсовых проектов относятся к области формирования супермелкозалегающих $p-n$ переходов с помощью ионной имплантации атомами отдачи, разработки технологии изготовления КМОП–СБИС с ретроградным распределением примеси в канале, формирования СБИС на основе гетероструктур Si_xGe_{1-x} с помощью ионной имплантации, формирования МОП–СБИС с супермелкозалегающими $p-n$ переходами с помощью аморфизации кремния и наклонной ионной имплантации, формирования элементов памяти на аморфном кремнии с однородным распределением примеси, применения ионной имплантации в технологии МОП–СБИС для снижения порогового напряжения, металлизация в технологии СБИС, формирования элементов нанoeлектроники с субмикронными размерами с помощью ионно–лучевой литографии, формирования гетеробиполярного транзистора с базой $p-SiGe$ с помощью ионной имплантации, формирования КМОП–СБИС с супермелкозалегающими $p-n$ переходами, разработки технологии МОП–СБИС на подложках «кремний на изоляторе», разработки технологии МОП–СБИС с LDD областями и самосовмещением.

Варианты заданий на курсовые проекты приведены в *приложении А*.

3 ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ

Работа в общем случае должна содержать:

- текстовый документ (ТД);
- графический материал.

Необходимость представления графического материала определяется заданием. ТД должен включать в указанной ниже последовательности:

- титульный лист;
- задание;
- содержание;
- введение;
- основную часть;
- заключение;
- список использованных источников;
- приложения.

ТД должен в краткой и четкой форме раскрывать творческий замысел работы, содержать описание методов исследования или расчетов, анализ результатов экспериментов и (или) расчетов, выводы. Текст должен сопровождаться иллюстрациями (графиками, эскизами, диаграммами, схемами и т.п.).

Форма титульного листа приведена в *приложении Б*.

В разделе «Введение» указывают основную цель работы, область применения разрабатываемой проблемы, ее научное, техническое значение и экономическую целесообразность для народного хозяйства.

Содержание основной части работы должно отвечать заданию и требованиям, изложенным в методических указаниях по данной дисциплине.

Заключение должно содержать краткие выводы по результатам выполненной работы, оценку полноты решения поставленных задач, рекомендации по конкретному использованию результатов работы, ее экономическую, научную, социальную значимость.

В список использованных источников включают все источники, на которые имеются ссылки в ТД. Источники в списке нумеруют в порядке их упоминания в тексте ТД.

При оформлении ТД, иллюстраций, приложений и др. следует руководствоваться образовательным стандартом ОС ТУСУР 01-2013 «Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля».

4 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

4.1 Электронно-лучевая литография

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

$$b_{min} = d_{min} + 2\Delta u.$$

Электронно-оптическая схема электронно-лучевой литографии приведена на рис. 4.1.

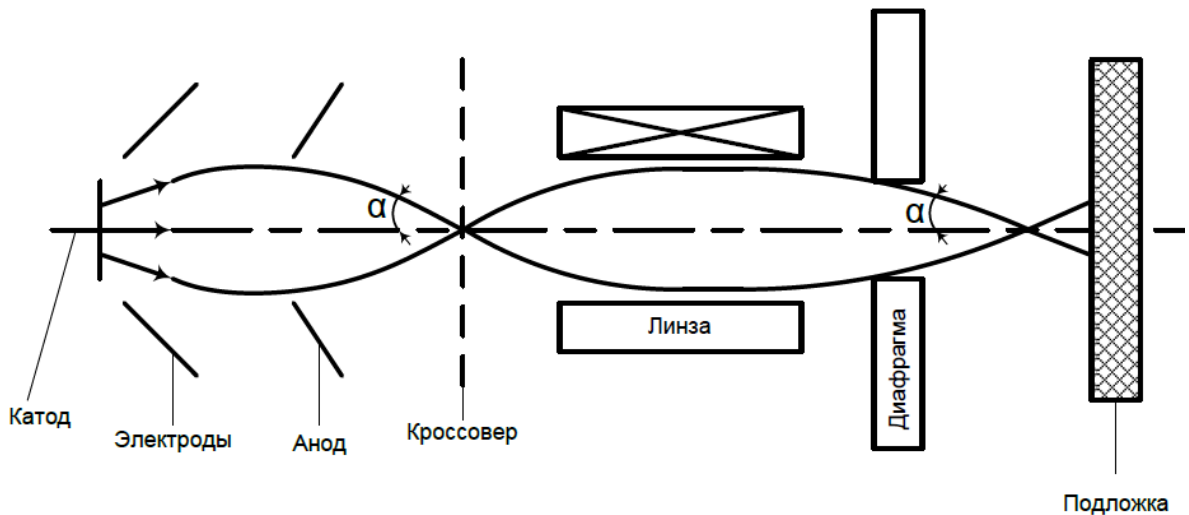


Рисунок 4.1 – Электронно-оптическая схема ЭЛЛ

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 – абберации (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 Δy_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:

$$\theta^2 = \frac{4 \cdot \pi \cdot N_0 \cdot h \cdot Z^2 \cdot e^4}{m^2 \cdot v_0^4 (4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0)^2} \cdot \ln \frac{4 \cdot \pi \cdot N_0 \cdot h \cdot Z^{\frac{4}{3}} \cdot e^4 \cdot a_0}{v_0^2 \cdot (\hbar)^2 \cdot (4 \cdot \pi^{1,5} \cdot \epsilon_0)^2},$$

где N_0 - атомная плотность электронорезиста;

h - толщина резиста;

v_0 - скорость электрона;

ϵ_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 ;

η – 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

ρ – 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 $^{-2} \cdot \Gamma \cdot \text{см}^{-2}$.

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:

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

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

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.

4.2 Ионная имплантация

Ионным легированием (ионной имплантацией) называют процесс внедрения ионов в твердое тело (мишень, подложка) с энергией, достаточной для проникновения в поверхностные слои. Наиболее общим применением ионной имплантации является процесс ионного легирования при изготовлении ИМС. Схема установки показана на рис. 4.2.

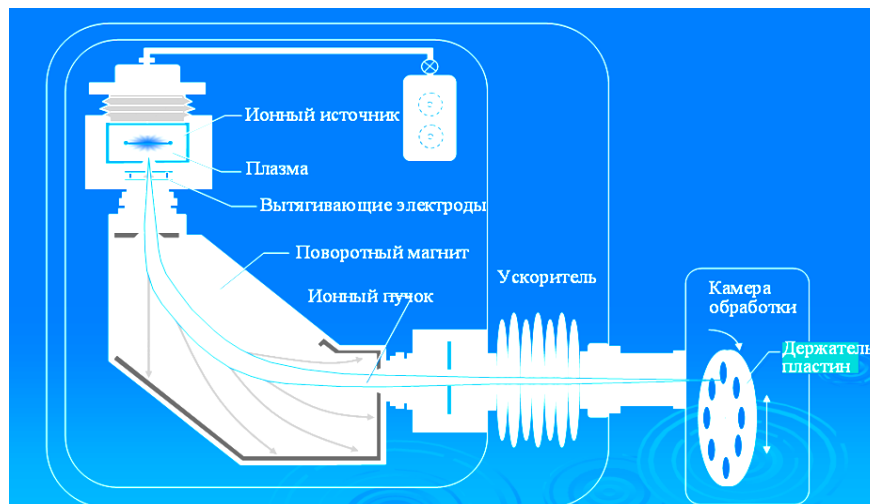


Рисунок 4.2 - Схема установки ионной имплантации

Состав установки ионной имплантации: ионный источник; экстрактор (вытягивающие электроды); магнитный сепаратор масс (поворотный магнит); ускоряющая система; сканирующая система; камера обработки подложек.

Ионный источник служит для ионизации молекул примеси и формирования ионного пучка. Ионы из ионного источника извлекаются под действием ускоряющего потенциала U . В сепараторе ионы движутся в постоянном маг-

нитном поле. Вектор магнитной индукции направлен перпендикулярно плоскости чертежа. Сила Лоренца искривляет траектории движения ионов по радиусу R :

$$R = \frac{mv}{qB},$$

где m/q – отношение массы иона к его заряду; v – скорость иона; B – величина индукции магнитного поля.

В свою очередь, скорость иона определяется

$$v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}$$

Таким образом, по радиусу R проходят только ионы примеси определенного сорта (m/q) и с постоянной энергией. Такие ионы облучают мишень (подложку из кремния). Параметры установок ионной имплантации: энергии ионов составляют 50–300 кэВ, а дозы облучения Q – от 10^{13} до 10^{17} ион/см².

При определении режимов ионной имплантации основными параметрами являются энергия ускоренных ионов и доза облучения. Ион с зарядом q под действием разности потенциалов U приобретает энергию

$$E_0 = qU$$

В общем случае заряд иона определяется $q = ne$, где n – кратность ионизации, которая обычно составляет $n = 1 \div 3$, e – заряд электрона.

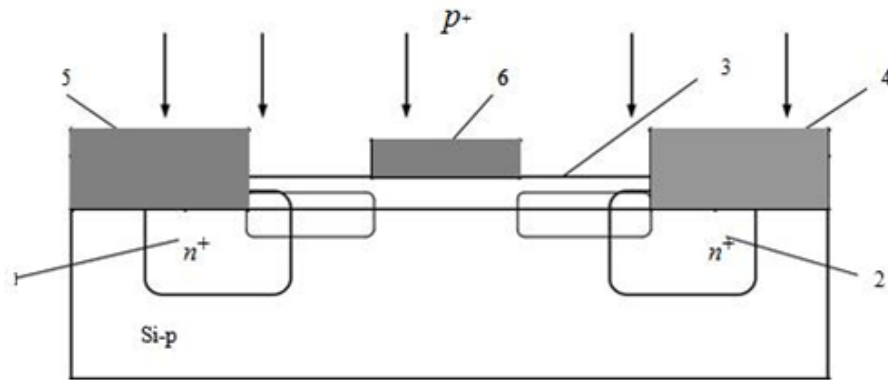
Для обозначения кратности ионизации применяют знак «+»: $^{31}P^+$, $^{31}P^{++}$, $^{31}P^{+++}$. Цифрой 31 обозначена атомная масса иона фосфора. Иногда для имплантации используют не моноатомные ионы, а молекулярные, например: $^{14}N_2^+$ – однократно ионизованная молекула азота с атомной массой 14 и молекулярным весом 28. Молекулярные ионы, внедряясь в кристалл, обычно сразу же распадаются на отдельные атомы. Для подсчета энергии, которой будет обладать каждый атом с массой M_I , входящий в ускоренный ион с молекулярной массой M_M используют соотношение

$$E_1 = E_0 \frac{M_1}{M_M}$$

Доза облучения (D) определяется плотностью ионного тока j и длительностью облучения t : $D = jt$ [Кл/м²]. Величина D не отражает в явном виде числа примесных ионов, поэтому принято выражать дозу в количестве частиц, внедренных на единицу поверхности:

$$Q = \frac{D}{q} = \frac{jt}{en} \text{ [ион/м}^2\text{]}.$$

Одно из первых практических применений технологии ионной имплантации связано с МДП-транзисторами. Структура МДП-транзистора показана на рис. 4.3. Техмаршрут изготовления МДП-транзисторов с применением ионной имплантации следующий.



1, 2 – области истока и стока; 3 – подзатворный диэлектрик; 4, 5 – электроды;
6 – затвор

Рисунок 4.3 - Структура МДП-транзистора

Области истока и стока получены ионной имплантацией. После окисления и фотолитографии вскрывают окно для выращивания подзатворного диэлектрика. Затем проводят фотолитографию и вскрывают окна под контакты к областям истока и стока. Напылив слой металла и выполнив фотолитографию, создают электроды стока, истока и затвор. Следующим этапом является создание самосогласованного затвора путем имплантации фосфора. Затвор играет роль маски, которая обеспечивает его самосовмещение, необходимое для точ-

ного примыкания области затвора к контактам истока и стока. В результате самосовмещения снижается паразитная емкость между затвором и стоком, что улучшает характеристики транзистора.

Ионная имплантация на операции самосовмещения осуществляется через тонкий слой подзатворного диэлектрика, например, SiO_2 .

При формировании СБИС на биполярных транзисторах базу и эмиттер формируют с помощью ионной имплантации. Для получения резкого $p-n$ перехода эмиттер легируют ионами мышьяка, а базу – ионами бора. Коллектор получают или в эпитаксиальном слое или за счет диффузии соответствующей примеси.

Преимущества ионной имплантации проявляются в возможности создания очень мелких $p-n$ переходов для СБИС. Требования формирования $n+$ слоев для СБИС, залегающих на небольшой глубине, можно удовлетворить с помощью процесса ионной имплантации мышьяка. Ионы мышьяка имеют малый проецированный пробег, например, при энергии 50 кэВ он составляет 0,03 мкм. Внедрение тяжелых ионов приводит к образованию аморфного слоя, так что для получения легированных слоев без заметной диффузии примесных атомов используют низкотемпературный отжиг при температурах ниже 900 °С.

Решение проблемы с имплантацией бора на небольшую глубину облегчается использованием ионизированных молекул фторида бора BF_2 .

Диссоциация молекулы BF_2 при первом ядерном столкновении приводит к образованию низкоэнергетических ионов бора

$$E_B = \left(\frac{M_D}{M_{BF_2}} \right) \cdot E_0 = \left(\frac{11}{49} \right) \cdot E_0.$$

При первичной энергии ионов $E_0 = 50$ кэВ ионы бора будут иметь энергию 11,2 кэВ и соответственно проецированный пробег 0,03 мкм.

Формирование сверхмелких (менее 50 нм) имплантированных слоёв является одной из главных и наиболее интересных задач в области ионного легирования Si .

Формирование сверхмелких переходов лимитируется:

- глубиной пробега ионов в полупроводниковом материале (энергией и массой ионов, эффектом каналирования ионов);
- глубиной диффузии примеси при термообработке, необходимой для активации примеси и отжига имплантационных дефектов (кратковременно ускоренной диффузией примеси).

Методы решения задачи:

- Имплантация.
- Уменьшение энергии ионов.
- Увеличение массы ионов (молекулярные ионы, кластерные ионы).
- Предварительная аморфизация приповерхностного слоя, имплантацией нелегирующей примеси (например, Si^+ или Ge^+ для Si).

Предварительная аморфизация выполняется имплантацией ионов Si^+ или Ge^+ , которые не являются мелкими примесями и не изменяют концентрацию носителей заряда. Эффект предварительной аморфизации заключается в уменьшении глубины залегания примеси после имплантации, а также после активационного отжига.

Возможность увеличения массы ионов бора за счет использования борсодержащих ионов видна из дорожной карты, представленной в табл. 4.1. В таблице приведены данные по топологическим нормам (НР), x_{p-n} и энергиям.

Таблица 4.1 - Энергия имплантации различного типа борсодержащих ионов

Ион	НР 65 нм $x_{p-n} = 15$ нм	НР 45 нм $x_{p-n} = 9,5$ нм	НР 4 нм $x_{p-n} = 5,5$ нм
B_{11}	200 эВ	< 100 эВ	< 50 эВ
РАI+ B_{11}	500 эВ	250 эВ	< 125 эВ
BF_2	880 эВ	200 эВ	< 100 эВ
РАI+ BF_2	2,2 кэВ	1,5 кэВ	< 750 эВ
$B_{10}H_{14}$	2–5 кэВ	1–2 кэВ	> 500 эВ
РАI+ $B_{10}H_{14}$	5 кэВ	2,5 кэВ	> 1,2 кэВ
$B_{18}H_{22}$	>5 кэВ	2–4 кэВ	> 1,5 кэВ

Например, для получения $x_{p-n} = 15$ нм для ионов BF_2 требуется энергия 880 эВ, а с аморфизацией – 2,2 кэВ.

Традиционные методы ионной имплантации становятся малопродуктивными в диапазоне энергий ионов ниже 5 кэВ, что связано с неизбежным падением тока пучка, формируемого ионной оптикой. Использование оксидных и резистивных масок для дополнительного торможения высокоэнергетичных ионов при ультрамелком легировании поверхностных областей кремния существенно усложняет технологию.

Применение известных подходов к формированию мелких сильнолегированных областей не предпочтительно из-за ряда причин. В частности, источник, нанесенный в виде тонкой пленки на поверхность кремния, не обеспечивает нужной воспроизводимости параметров прибора. Лазерное легирование в принципе позволяет получать суб-50 нм, *p-n*-переходы без генерации дефектов, однако из-за малости лазерного пятна этот метод не удовлетворяет требованиям производительности. Применение традиционных имплантеров позволяет обеспечить набор необходимой дозы (10^{15} см^{-2}) и приемлемо низкое сопротивление мелкого *p-n*-перехода, однако традиционные имплантеры очень дороги и не обеспечивают желаемой низкой стоимости обработки пластин. В промышленном имплантере *Eaton GSD* снижение энергии от 10 до 2 кВ для имплантации вызывает снижение ионного тока с 5 до 1 мА. С увеличением диаметра пластин (до 300 мм, например) производительность традиционных имплантеров становится неудовлетворительной из-за малости площади сечения пучка.

Альтернативным способом ультрамелкого легирования, позволяющим разрешить эту проблему, является метод широкоапертурной плазменно-иммерсионной ионной имплантации (ПИИИ). В отличие от традиционных имплантеров, иммерсионный режим дает сокращение времени набора дозы в десятки раз с возможностью прецизионной регулировки энергии ионов в суб-1 кэВ диапазоне. В то же время отсутствие сепарации ионов по массам предъявляет повышенные требования к разработке конкретных процессов имплантации.

В современных УБИС ДОЗУ размер элемента памяти, содержащего МДП-транзистор и конденсатор, достигается малым благодаря тому, что кон-

денсатор формируется в глубоком «трэнче», который реализуется анизотропным плазмохимическим травлением с последующим окислением и заполнением, например сильнолегированным поликремнием. Чтобы обеспечить хороший омический контакт к «внешней» обкладке конденсатора, стенки трэнча должны быть сильнолегированными с высокой конформностью. Применение для этих целей традиционного имплантера требует длительной имплантации с изменением *in situ* угла наклона вращающейся пластины. Правильный выбор давления и ускоряющего напряжения в ПИЗ³ позволяет обеспечить необходимое угловое распределение ионов и успешно реализовать конформное легирование стенок и дна «трэнча» с аспектным отношением порядка 10, например, с размерами, показанными на рис. 4.4.

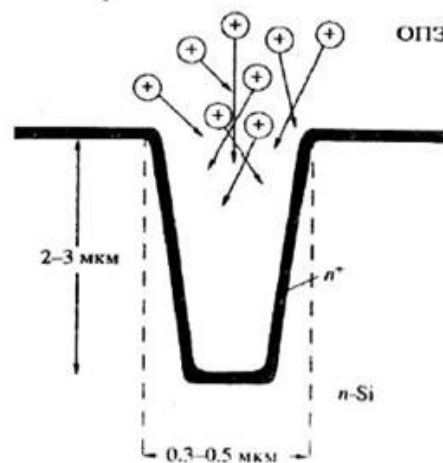


Рисунок 4.4 - Конформное легирование глубоких трэнчей: оптимальный выбор рабочего давления в ПИЗ позволяет оптимизировать распределение ионов по углам таким образом, что стенки трэнча легируются в равной степени с дном «трэнча» и поверхностью пластины

Методом имплантации возможно формирование:

- «скрытых» слоев диэлектриков, например SiO_2 , для формирования КНИ-структур;
- «скрытых» слоев силицидов с металлической проводимостью, например, слоев $CoSi_2$ для транзисторов с металлической базой;

– «скрытых» слоев $SiGe$ в Si для гетеропереходных биполярных транзисторов с $SiGe$ – базой.

Одной из наиболее продвинутых технологий является технология формирования методом имплантации кислорода КНИ-структур типа «кремний – двуокись кремния – кремний». В этой технологии необходимо обеспечить высокие дозы кислорода, превышающие 10^{17} см⁻², и высокие температуры при последующем отжиге для обеспечения твердофазной реакции образования слоя SiO_2 (*SIMOX*).

Применение ПИЗ для формирования КНИ-структур позволило сократить время набора дозы (на два порядка величины по сравнению с применением традиционных имплантеров) и существенно снизить стоимость технологии.

4.3 Ионное и плазмохимическое травление микроструктур

По физико-химическому механизму взаимодействия с поверхностью обрабатываемого материала различают три основных вида вакуумно-плазменного (сухого) травления: ионное, плазмохимическое и реактивное ионное травление.

Ионно-лучевое травление (ИЛТ) связано с процессом физического распыления поверхности ионами инертных газов с энергией $E_0 \geq 1$ кэВ. Процесс распыления при постоянной энергии ионов и постоянной плотности тока характеризуется коэффициентом распыления K .

Разрешающая способность ИЛТ оценивается величиной бокового подтравива δ и углом наклона профиля травления φ при заданной толщине d_n . Она зависит от коэффициентов распыления маски и подложки и угла наклона маски относительно направления падения ионов α . При расчетах δ и $tg\varphi$ можно брать не отношение коэффициентов распыления, а отношение скоростей травления для соответствующих материалов.

При выборе маскирующих материалов сначала определяют минимальную толщину маски, которая требуется при травлении на заданную глубину. Затем рассчитывается угол α маски, необходимый для обеспечения подтравива δ при заданном коэффициенте анизотропии A .

5 ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Тема – Формирование гетеробиполярного транзистора с базой $p\text{-Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ с помощью ионной имплантации.

Для формирования гетеробиполярного транзистора с помощью ионной имплантации основными параметрами являются энергия ионов и доза легирования. Прежде чем рассчитывать параметры ионной имплантации для гетеробиполярного транзистора с базой $p\text{-Si}_x\text{Ge}_{1-x}$, необходимо рассчитать энергию ионов и дозу для получения эмиттера и базы в классическом биполярном транзисторе.

За основу расчетов взята теория Линдхарда-Шарфа-Шиотта (ЛШШ), которая позволяет рассчитать пробеги ионов в твердых телах.

Для формирования базы $n^+p\text{-n}$ гетеробиполярного транзистора в качестве легирующей примеси для смены типа проводимости проводится ионная имплантация бора. Максимальная концентрация легирующей примеси в базе составляет $5,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, а глубина залегания перехода база коллектор – 70 нм. Для определения энергии ионной имплантации, необходимо рассчитать зависимость глубины залегания $p\text{-n}$ перехода (мм) от энергии (эВ) (рис. 5.1). При заданной глубине залегания $p\text{-n}$ перехода и исходной концентрации $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ энергия ионов составила 6,4 кэВ.

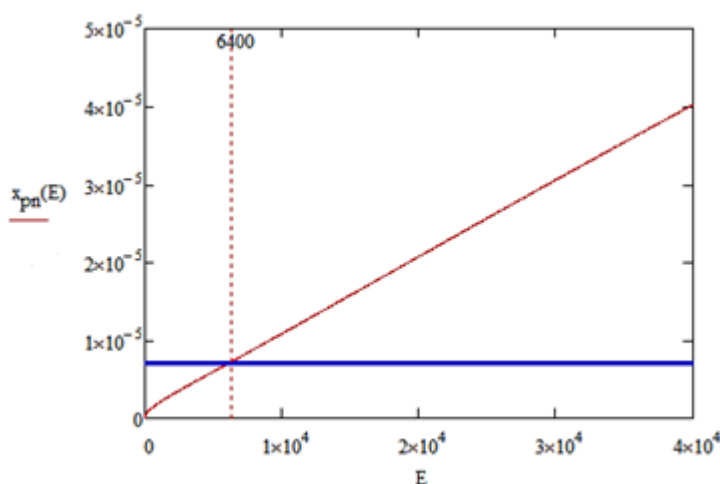


Рисунок 5.1 – Зависимость глубины залегания $p\text{-n}$ перехода от энергии ионов бора

Следующим этапом является расчет зависимости среднего проецированного пробега ионов (мм) от энергии (эВ) (рис. 5.2). При энергии ионов 6,4 кэВ, величина среднего проецированного пробега составила 28,3 нм.

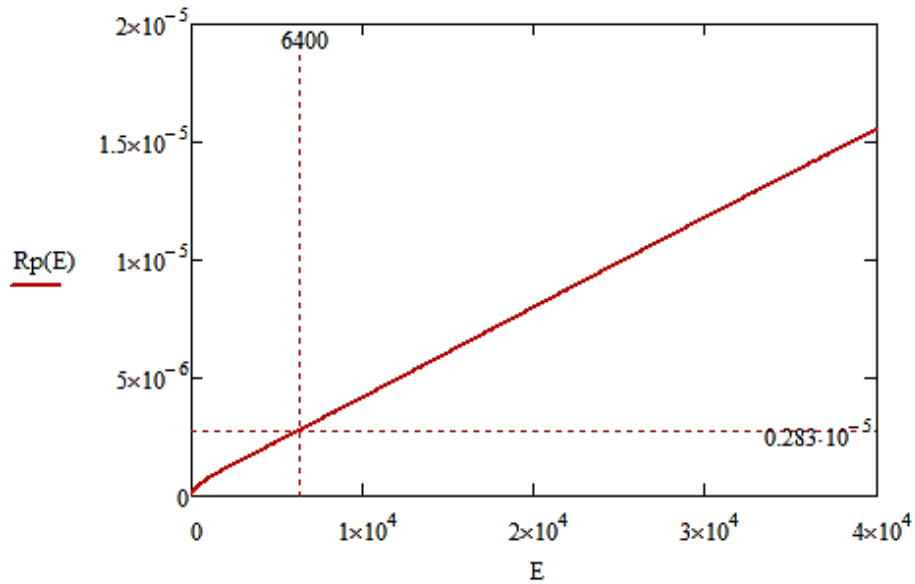


Рисунок 5.2 – Зависимость среднего проецированного пробега от энергии

Аналогичным образом определяются параметры ионной имплантации для формирования эмиттера. Параметры ионной имплантации для формирования базы и эмиттера приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1 – Параметры ионной имплантации

Параметр	Значение
Энергия ионов для формирования базы	6,4 кэВ
Доза легирования для формирования базы	$1,6 \cdot 10^{14}$ ион/см ²
Энергия ионов для формирования эмиттера	4 кэВ
Доза легирования для формирования эмиттера	10^{15} ион/см ²

На рис. 5.3 представлен профиль распределения примеси в биполярном транзисторе.

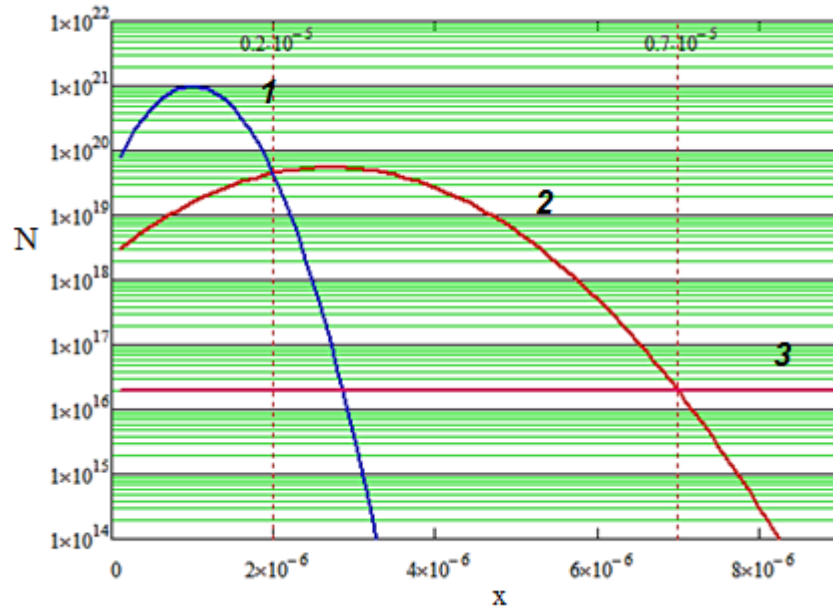


Рисунок 5.3 – Распределение примеси в биполярном транзисторе: 1 – в эмиттере; 2 - в базе; 3 – в коллекторе

В табл. 5.2 представлены параметры ионной имплантации для формирования базы $p\text{-Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ с разным содержанием x .

Таблица 5.2 – Параметры ионной имплантации для формирования базы $p\text{-Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ с разным содержанием x

Параметр	Значение
Мольная доля	0,6
Энергия ионов	31 кэВ
Доза легирования	$9,5 \cdot 10^{16}$ ион/см ²
Мольная доля	0,8
Энергия ионов	33 кэВ
Доза легирования	$3,6 \cdot 10^{16}$ ион/см ²

На рис. 5.4-5.5 приведены распределения примеси в гетеробиполярном транзисторе при мольной доли 0,6 и 0,8 соответственно.

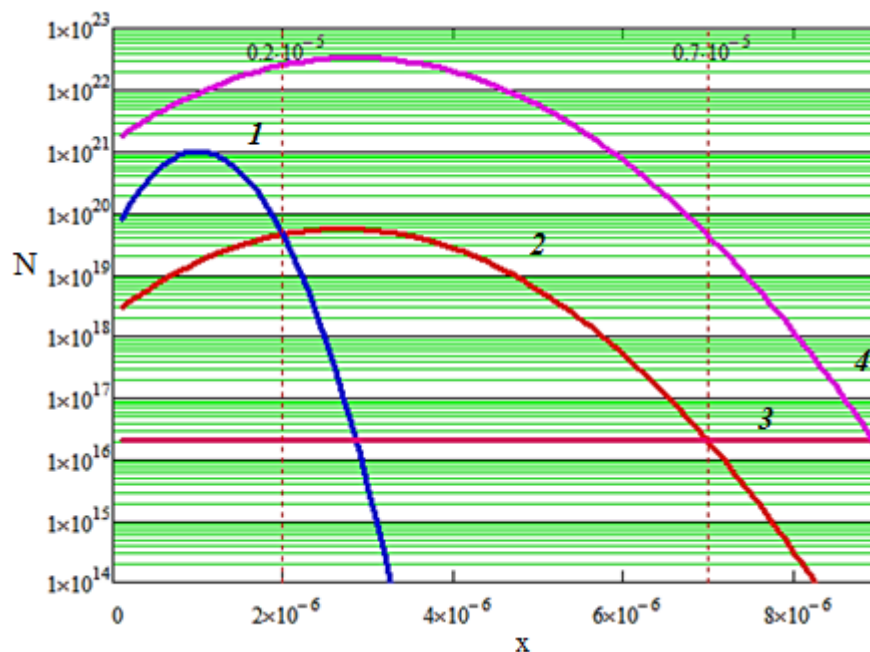


Рисунок 5.4 – Распределение примеси в гетеробиполярном транзисторе с базой $p\text{-Si}_{0,6}\text{Ge}_{0,4}$: 1 – в эмиттере; 2 - в базе; 3 – в коллекторе; 4 – в базе $p\text{-Si}_{0,6}\text{Ge}_{0,4}$

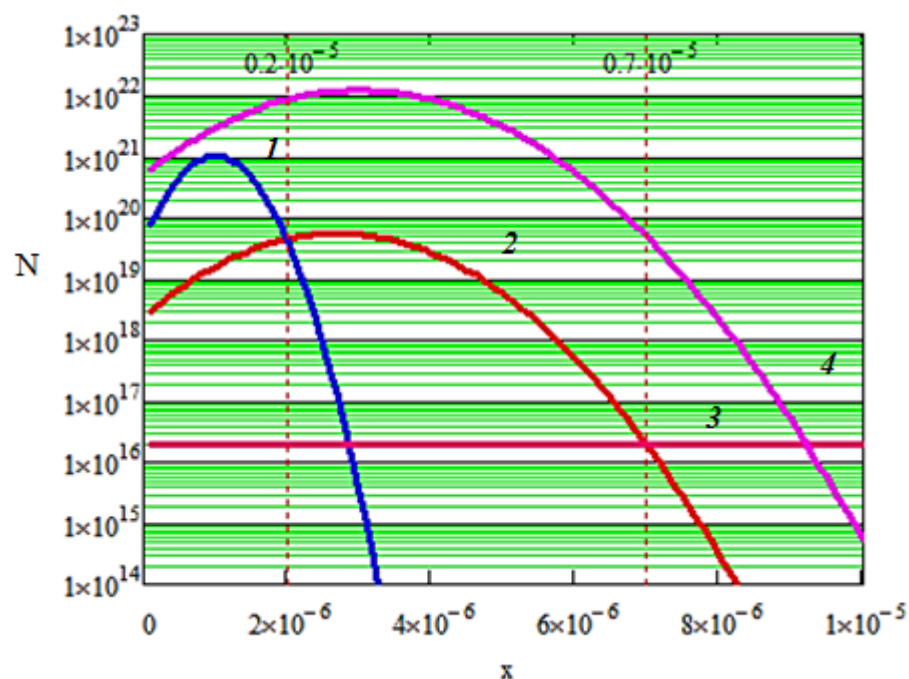


Рисунок 5.5 – Распределение примеси в гетеробиполярном транзисторе с базой $p\text{-Si}_{0,8}\text{Ge}_{0,2}$: 1 – в эмиттере; 2 - в базе; 3 – в коллекторе; 4 – в базе $p\text{-Si}_{0,8}\text{Ge}_{0,2}$

Результатом работы является расчет параметров ионной имплантации для формирования гетеробиполярного транзистора с базой $p\text{-Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ и получения

профиля распределения примеси в нем. Для формирования гетеробиполярного транзистора с базой $p\text{-Si}_{0,6}\text{Ge}_{0,4}$ энергия ионов составила 31 кэВ, доза легирования – $9,5 \cdot 10^{16}$ ион/см², а для гетеробиполярного транзистора с базой $p\text{-Si}_{0,8}\text{Ge}_{0,2}$ энергия ионов - 33 кэВ, доза легирования – $3,6 \cdot 10^{16}$ ион/см².

Известно, атомы германия диффундируют на глубину, соответствующую максимальной концентрации дефектов. В результате база получается более узкой с четкими границами.

При проведении литературного обзора в одной из работ, было сказано, что при проведении отжига можно получить более узкое распределение примеси, и в этом случае, можно достаточно просто оценить толщину базы.

6 ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ТД

Общая информация

1. Работа должна быть выполнена печатным способом с использованием компьютера и принтера на одной стороне листа белой бумаги одного сорта формата А4 (210·297 мм). Приводимые в работе таблицы и иллюстрации большого размера допускается выполнять на других стандартных форматах, при этом они должны быть сложены на формат А4 «гармоникой» по ГОСТ 2.501.

2. В оформлении всех структурных элементов и частей работы следует придерживаться единообразного стиля.

3. Текст работы должен быть напечатан с полуторным междустрочным интервалом и размером шрифта 12-14 пунктов. Отдельные знаки допускается вписывать от руки пастой, чернилами или тушью черного цвета.

4. Текст работы следует выполнять, устанавливая размеры полей: левое - 30 мм, правое - 10 мм, верхнее - 20 мм, нижнее - 20 мм. Абзацный отступ должен быть одинаковым по всему тексту работы и равен пяти знакам, выравнивание текста - по ширине.

5. При выполнении работ по реальной тематике допускается использование листов с рамками и основными надписями по формам, установленным соответствующими стандартами проектной документации (например, ГОСТ 2.106 для конструкторских документов).

Требования к тексту работы

1. В ТД не допускается:

- применять для одного и того же понятия различные научно-технические термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;
- применять произвольные словообразования;
- применять индексы стандартов (ГОСТ, ГОСТ Р, ОСТ и т.п.) технических условий (ТУ) и других документов без регистрационного номера;

- использовать в тексте математические знаки и знак (диаметр), а также знаки № (номер) и % (процент) без числовых значений.

Следует писать: «температура минус 20 С»; «значение параметра больше или равно 35» (но не «температура - 20 С» или «значение параметра ≥ 35 »).

2. Условные буквенные обозначения, изображения или знаки должны соответствовать принятым в действующем законодательстве и государственных стандартах.

В тексте ТД перед обозначением параметра дают его наименование, напри-мер: «температура окружающей среды Т»).

3. В ТД следует применять стандартизованные единицы физических величин, их наименования и обозначения в соответствии с ГОСТ 8.417.

Таблицы

1. Таблицы применяют для лучшей наглядности и удобства сравнения показателей.

2. Графу «№ п/п/ (номер по порядку)» в таблицу включать не допускается.

3. Все таблицы нумеруют в пределах раздела арабскими цифрами. Над левым верхним углом таблицы помещают надпись «Таблица» с указанием номера таблицы, например: «Таблица 2.1» (первая таблица второго раздела).

4. Если таблица имеет название, то его помещают после номера таблицы через тире, с прописной буквы.

5. На все таблицы должны быть ссылки в тексте ТД.

6. Таблицу следует располагать в ТД непосредственно после абзаца, где она упоминается впервые, или на следующем листе (странице).

Иллюстрации

1. Иллюстрации помещаются в ТД для пояснения текста и должны быть выполнены в соответствии с требованиями государственных стандартов.

2. В тексте ТД все иллюстрации (фотографии, схемы, чертежи и пр.) именуются рисунками.

3. Рисунки нумеруются в пределах раздела (приложения) арабскими цифрами, например: «рисунок 1.2» (второй рисунок первого раздела); «рисунок В.3» (третий рисунок приложения В).

4. Иллюстрации при необходимости могут иметь наименование и пояснительные данные (подрисуночный текст).

5. Слово «рисунок», его номер и наименование помещают ниже изображения и пояснительных данных симметрично иллюстрации, например: «Рисунок 1.3»; «Рисунок В.2 – Схема алгоритма».

6. На все иллюстрации должны быть ссылки в тексте ТД.

7. Иллюстрации должны размещаться сразу после ссылки или на следующем листе (странице).

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилина, Т.И., Кагадей, В.А., Анищенко, Е.В. Технология кремниевой наноэлектроники: Учебное пособие. – 2 изд. – Томск: ТУСУР, 2015. – 319 с.
2. Таруи, Я. Основы технологии СБИС: пер. с яп.: под ред. В.Г. Ржанова / Я. Таруи. - М.: Радио и связь, 1985. - 479 с.
3. 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.
4. Курносков, А.И., Юдин, В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных схем / А.И. Курносков, В.В. Юдин. – М.: ВШ, 1986. – 386 с.
5. Броддай, И., Мерей, Дж. Физические основы микротехнологии: пер. с англ. / И. Броддай, Дж. Мерей. – М.: Мир, 1985. – 494 с.
6. Мейер Дж., Эрикссон Л., Дэвис Дж. Ионное легирование полупроводников (кремний и германий) : пер. с англ / Дж. Мейер, Л. Эрикссон. – М.: Мир, 1973. – 296 с.
7. Технология СБИС. Т.1 / Под ред. С. Зи; Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 404 с.
8. Риссел, Х., Руге, И. Ионная имплантация / Х.Риссел, И.Руге .- М.:Наука,1983. -360с.
9. Плазменная технология в производстве СБИС: пер.с англ.: под ред. Н. Айнспрука и Д. Брауна. - М.: Мир, 1987. - 469 с.
10. 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.
11. Киреев, В.Ю. Введение в технологии микроэлектроники и нанотехнологии / В.Ю. Киреев. - М.: ФГУП «ЦНИИХМ», 2008. – 431 с.
12. Путря, М.Г. Плазменные методы формирования трехмерных структур СБИС / М.Г. Путря.; учеб.пособие. - М.: МИЭТ, 2005. – 235 с.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. Технология СБИС. Т.2 / Под ред. С. Зи; пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 444 с.

17. 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.

18. 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.

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 А

Варианты заданий по курсовому проекту

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

Кафедра физической электроники

ЗАДАНИЕ

на курсовое проектирование по дисциплине
Технология кремниевой наноэлектроники

Студенту группы _____ факультета электронной техники

(Ф.И.О.)

1. Тема проекта:

Применение ионной имплантации для самосовмещения затвора и канала в технологии МОП – СБИС.

2. Исходные данные к проекту:

p – канальный МОП – транзистор; исток и сток получены с помощью ионной имплантации; затвор – поли-Si.

3. Содержание пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов):

1. Анализ МОП – СБИС. Выбор исходных данных для расчетов.

2. Технология самосовмещения с помощью ионной имплантации.

3. Расчет емкости перекрытия стока затвором.

4. Расчеты параметров ионной имплантации для самосовмещения. Рекомендации.

4. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

Фрагменты СБИС, расчетные зависимости, техмаршрут МОП – СБИС с самосовмещением.

Дата выдачи задания « _____ » _____ 20__ г.

Руководитель _____

Срок сдачи студентом законченного отчета « _____ » _____ 20__ г.

Задание принял к исполнению _____ « _____ » _____ 20__ г.
(подпись студента)

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

Кафедра физической электроники

ЗАДАНИЕ
на курсовое проектирование по дисциплине
Технология кремниевой наноэлектроники

Студенту группы _____ факультета электронной техники

 (Ф.И.О.)

1. Тема проекта:

Формирование супермелкозалегающих p – n переходов с помощью ионной имплантации атомами отдачи.

2. Исходные данные к проекту:

Примесь – акцептор.

Глубина x_{p-n} – менее 10 нм.

3. Содержание пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов):

1. Анализ современных МОП_СБИС.

2. Физика и технология ионной имплантации.

3. Легирование атомами отдачи.

4. Расчеты параметров ионной имплантации.

5. Обсуждение результатов расчетов и рекомендации по выбору параметров ионной имплантации для получения заданной глубины x_{p-n} .

4. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

Фрагменты СБИС, расчетные зависимости.

Дата выдачи задания « _____ » _____ 20__ г.

Руководитель _____

Срок сдачи студентом законченного отчета « _____ » _____ 20__ г.

Задание принял к исполнению _____ « _____ » _____ 20__ г.

(подпись студента)

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

Кафедра физической электроники

ЗАДАНИЕ
на курсовое проектирование по дисциплине
Технология кремниевой наноэлектроники

Студенту группы _____ факультета электронной техники

 (Ф.И.О.)

1. Тема проекта:

Разработка технологии изготовления КМОП – СБИС с ретроградным распределением при-
меси в канале.

2. Исходные данные к проекту:

Топологическая норма – менее 90 нм.

3. Содержание пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов):

1. Анализ КМОП – СБИС. Выбор исходных данных для расчетов. Короткоканальные эффек-
ты МОП – транзисторов.

2. Физика и технология ионной имплантации.

3. Расчеты параметров ионной имплантации для обеспечения ретроградного распределения
примеси.

4. Разработка техмаршрута изготовления КМОП – СБИС.

4. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

Фрагменты СБИС, расчетные зависимости, техмаршрут.

Дата выдачи задания « _____ » _____ 20__ г.

Руководитель _____

Срок сдачи студентом законченного отчета « _____ » _____ 20__ г.

Задание принял к исполнению _____ « _____ » _____ 20__ г.

(подпись студента)

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

Кафедра физической электроники

ЗАДАНИЕ
на курсовое проектирование по дисциплине
Технология кремниевой наноэлектроники

Студенту группы _____ факультета электронной техники

 (Ф.И.О.)

1. Тема проекта:

Формирование СБИС на основе гетероструктур Si_xGe_{1-x} с помощью ионной имплантации.

2. Исходные данные к проекту:

СБИС на МОП – транзисторах на основе напряженного кремния при использовании Si_xGe_{1-x} в областях истока – стока и в канале; метод – ионная имплантация; подложка – Si; ионы – Ge^+

3. Содержание пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов):

1. Области применения. Фрагменты СБИС, выбор исходных данных.

2. Методы получения гетероструктур Si_xGe_{1-x} .

3. Расчеты требуемой дозы и энергии ионов.

4. Распределение примеси без и с отжигом.

5. Обсуждение результатов расчетов.

4. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

Фрагменты СБИС, техмаршруты, расчетные зависимости.

Дата выдачи задания « _____ » _____ 20__ г.

Руководитель _____

Срок сдачи студентом законченного отчета « _____ » _____ 20__ г.

Задание принял к исполнению _____ « _____ » _____ 20__ г.

(подпись студента)

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

Кафедра физической электроники

ЗАДАНИЕ
на курсовое проектирование по дисциплине
Технология кремниевой наноэлектроники

Студенту группы _____ факультета электронной техники

 (Ф.И.О.)

1. Тема проекта:

Формирование МОП – СБИС с супермелкозалегающими р – n переходами с помощью амор-
 физации кремния.

2. Исходные данные к проекту:

x_{p-n} – менее 10 нм;

Метод – предварительная аморфизация кремния с помощью ионной имплантации.

3. Содержание пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов):

1. Анализ СБИС. Выбор исходных данных для расчетов.

2. Физика и технология ионной имплантации.

3. Расчеты параметров ионной имплантации для аморфного и монокристаллического крем-
 ния.

4. Расчеты профиля распределения примеси.

5. Техмаршрут изготовления СБИС.

4. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

Фрагменты СБИС, расчетные зависимости, техмаршрут.

Дата выдачи задания « _____ » _____ 20__ г.

Руководитель _____

Срок сдачи студентом законченного отчета « _____ » _____ 20__ г.

Задание принял к исполнению _____ « _____ » _____ 20__ г.

(подпись студента)

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

Кафедра физической электроники

ЗАДАНИЕ
на курсовое проектирование по дисциплине
Технология кремниевой наноэлектроники

Студенту группы _____ факультета электронной техники

 (Ф.И.О.)

1. Тема проекта:

Формирование супермелкозалегающих p – n переходов с помощью наклонной ионной им-
плантации в технологии МОП – СБИС.

2. Исходные данные к проекту:

x_{p-n} – менее 10 нм для областей истока – стока с концентрацией $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$

3. Содержание пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов):

1. Анализ МОП – СБИС. Выбор исходных данных для расчетов.

2. Физика и технология ионной имплантации.

3. Расчеты параметров ионной имплантации для получения заданного значения x_{p-n} .

4. Исследование влияния угла падения ионов на x_{p-n} .

5. Техмаршрут.

4. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

Фрагменты СБИС, расчетные зависимости, техмаршрут.

Дата выдачи задания « _____ » _____ 20__ г.

Руководитель _____

Срок сдачи студентом законченного отчета « _____ » _____ 20__ г.

Задание принял к исполнению _____ « _____ » _____ 20__ г.

(подпись студента)

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

Кафедра физической электроники

ЗАДАНИЕ
на курсовое проектирование по дисциплине
Технология кремниевой наноэлектроники

Студенту группы _____ факультета электронной техники

 (Ф.И.О.)

1. Тема проекта:

Формирование элементов памяти на аморфном кремнии с однородным распределением при-
меси.

2. Исходные данные к проекту:

Ионы – Ge⁺, Si⁺, Ar⁺. Метод – ионная имплантация в три этапа.

Толщина аморфного слоя – 0,3 мкм. Подложка Si – p – типа с концентрацией 10¹⁶ см⁻³.

3. Содержание пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов):

1. Анализ различных элементов памяти и их технологии изготовления.

2. Применение ионной имплантации для изготовления элементов памяти. Явление аморфи-
зации.

3. Расчеты параметров ионной имплантации для ионов Ge, Si, Ar.

4. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

Дата выдачи задания « _____ » _____ 20__ г.

Руководитель _____

Срок сдачи студентом законченного отчета « _____ » _____ 20__ г.

Задание принял к исполнению _____ « _____ » _____ 20__ г.

(подпись студента)

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

Кафедра физической электроники

ЗАДАНИЕ
на курсовое проектирование по дисциплине
Технология кремниевой наноэлектроники

Студенту группы _____ факультета электронной техники

 (Ф.И.О.)

1. Тема проекта:

Применение ионной имплантации в технологии МОП – СБИС для снижения порогового напряжения.

2. Исходные данные к проекту:

p – канальный транзистор, толщина слоя SiO₂ – 50-100 нм

3. Содержание пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов):

1. Анализ МОП – СБИС, в том числе по пороговому напряжению.

2. Физика и технология ионной имплантации.

3. Расчеты распределения примеси через окисный слой и $\Delta U_{\text{пор}}$ от дозы и энергии ионов.

4. Обсуждение результатов расчетов и рекомендации.

5. Техмаршрут МОП – СБИС.

4. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

Фрагменты СБИС, расчетные зависимости, техмаршрут.

Дата выдачи задания « _____ » _____ 20__ г.

Руководитель _____

Срок сдачи студентом законченного отчета « _____ » _____ 20__ г.

Задание принял к исполнению _____ « _____ » _____ 20__ г.

(подпись студента)

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

Кафедра физической электроники

ЗАДАНИЕ
на курсовое проектирование по дисциплине
Технология кремниевой наноэлектроники

Студенту группы _____ факультета электронной техники

 (Ф.И.О.)

1. Тема проекта:

Проблемы металлизации в технологии СБИС.

2. Исходные данные к проекту:

МОП – СБИС с субмикронными размерами; топологическая норма – менее 45 нм;

Материалы металлизации – Al, W, Cu.

Методы получения: для Al, Cu – термическое испарение, для W - CVD осаждение.

3. Содержание пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов):

1. Закон Мура. Проблемы металлизации при переходе к СБИС.

2. Исследования RC – цепей для внутриуровневой металлизации в зависимости от размеров и материалов. Расчеты времени задержки.

3. Расчеты режимов осаждения металлов.

4. Технология формирования металлизации внутри уровней и между уровнями.

4. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

Фрагменты СБИС, графики, техмаршруты.

Дата выдачи задания « _____ » _____ 20__ г.

Руководитель _____

Срок сдачи студентом законченного отчета « _____ » _____ 20__ г.

Задание принял к исполнению _____ « _____ » _____ 20__ г.

(подпись студента)

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

Кафедра физической электроники

ЗАДАНИЕ
на курсовое проектирование по дисциплине
Технология кремниевой наноэлектроники

Студенту группы _____ факультета электронной техники

 (Ф.И.О.)

1. Тема проекта:

Формирование элементов наноэлектроники с субмикронными размерами с помощью ионно –
 лучевой литографии.

2. Исходные данные к проекту:

Ионы – Ga⁺, He⁺.

Топологическая норма – менее 45 нм.

3. Содержание пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов):

1. Анализ современных СБИС. Вывод исходных данных для расчетов.

2. Обзор систем (установок) для сканирующей ИЛЛ.

3. Физика и технология ионно – лучевой литографии.

4. Расчеты параметров ионно – лучевой литографии (d_{\min} , Δy) в зависимости от I_0 , U_0 , h .

5. Анализ результатов расчетов с рекомендациями по параметрам для получения заданных
 размеров.

4. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

Установки ИЛЛ, фрагменты СБИС, расчетные зависимости.

Дата выдачи задания « _____ » _____ 20__ г.

Руководитель _____

Срок сдачи студентом законченного отчета « _____ » _____ 20__ г.

Задание принял к исполнению _____ « _____ » _____ 20__ г.

(подпись студента)

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

Кафедра физической электроники

ЗАДАНИЕ
на курсовое проектирование по дисциплине
Технология кремниевой наноэлектроники

Студенту группы _____ факультета электронной техники

(Ф.И.О.)

1. Тема проекта:

Инженерия затвора в технологии МОП – СБИС с субмикронными размерами

2. Исходные данные к проекту:

МОП – СБИС. Материал затвора – поли- Si, силицид кобальта $CoSi_2$. Метод получения $CoSi_2$ – ионная имплантация Co^+ .

3. Содержание пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов):

1. Анализ МОП – СБИС. Переход к затворам на основе металлов, силицидов металлов.

2. Выбор исходных данных для расчетов.

3. Ионная имплантация. Расчеты параметров ионной имплантации. Распределение примеси.

4. Техмаршрут изготовления МОП – СБИС с затвором на основе силицида кобальта.

4. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

Фрагменты СБИС, техмаршруты, расчетные зависимости.

Дата выдачи задания « _____ » _____ 20__ г.

Руководитель _____

Срок сдачи студентом законченного отчета « _____ » _____ 20__ г.

Задание принял к исполнению _____ « _____ » _____ 20__ г.

(подпись студента)

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

Кафедра физической электроники

ЗАДАНИЕ
на курсовое проектирование по дисциплине
Технология кремниевой наноэлектроники

Студенту группы _____ факультета электронной техники

 (Ф.И.О.)

1. Тема проекта:

Формирование гетеробиполярного транзистора с базой p-Si_xGe_{1-x} с помощью ионной им-
плантации.

2. Исходные данные к проекту:

n⁺ - p - n транзистор; толщина базы – 50-100 нм – Si_xGe_{1-x} (x=0,6-0,9);

эмиттер – ионная имплантация As,

база – ионная имплантация бора,

Si_xGe_{1-x} – ионная имплантация Ge⁺.

3. Содержание пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов):

1. Анализ СБИС с гетеробиполярными транзисторами. Выбор исходных данных для расче-
тов.

2. Физика и технология ионной имплантации.

3. Расчеты параметров ионной имплантации для формирования эмиттера и базы n⁺-p-n тран-
зистора.

4. Расчеты параметров ионной имплантации для формирования p – Si_xGe_{1-x} базы при различ-
ных x.

4. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

Фрагменты СБИС, расчетные зависимости, техмаршрут.

Дата выдачи задания « _____ » _____ 20__ г.

Руководитель _____

Срок сдачи студентом законченного отчета « _____ » _____ 20__ г.

Задание принял к исполнению _____ « _____ » _____ 20__ г.

(подпись студента)

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

Кафедра физической электроники

ЗАДАНИЕ
на курсовое проектирование по дисциплине
Технология кремниевой наноэлектроники

Студенту группы _____ факультета электронной техники

 (Ф.И.О.)

1. Тема проекта:

Формирование КМОП – СБИС с супермелкозалегающими p – n переходами.

2. Исходные данные к проекту:

Топологическая норма – менее 32 нм. Подложка – Si, карман – n, p. Истоки – стоки – p⁺, n⁺.

3. Содержание пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов):

1. Области применения. Выбор исходных данных для расчетов.

2. Расчеты профилей распределения примесей.

3. Выбор основных параметров имплантации.

4. Исследование влияния массы ионов на x_{p-n}.

4. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

Фрагменты СБИС, зависимости, распределение примеси, техмаршруты.

Дата выдачи задания « _____ » _____ 20__ г.

Руководитель _____

Срок сдачи студентом законченного отчета « _____ » _____ 20__ г.

Задание принял к исполнению _____ « _____ » _____ 20__ г.

(подпись студента)

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

Кафедра физической электроники

ЗАДАНИЕ
на курсовое проектирование по дисциплине
Технология кремниевой наноэлектроники

Студенту группы _____ факультета электронной техники

 (Ф.И.О.)

1. Тема проекта:

Разработка технологии МОП – СБИС на подложках «кремний на изоляторе».

2. Исходные данные к проекту:

SIMOX, SmartCat. Технология – ионная имплантация. Ионы – кислород, водород.

3. Содержание пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов):

1. Анализ МОП – СБИС на КНИ - подложках. Преимущества КНИ – подложек.

2. Технологии изготовления КНИ – подложек.

3. Физика и технология ионной имплантации.

4. Расчеты параметров ионной имплантации.

5. Техмаршрут изготовления МОП – СБИС на КНИ – подложках.

4. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

Фрагменты СБИС, схемы технологических процессов изготовления КНИ – структур, расчет-
 ные зависимости.

Дата выдачи задания « _____ » _____ 20__ г.

Руководитель _____

Срок сдачи студентом законченного отчета « _____ » _____ 20__ г.

Задание принял к исполнению _____ « _____ » _____ 20__ г.

(подпись студента)

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

Кафедра физической электроники

ЗАДАНИЕ
на курсовое проектирование по дисциплине
Технология кремниевой наноэлектроники

Студенту группы _____ факультета электронной техники

 (Ф.И.О.)

1. Тема проекта:

Разработка технологии МОП – СБИС с LDD областями и самосовмещением.

2. Исходные данные к проекту:

Исток – сток – p⁺ - x_{p-n} (в зависимости от топологической нормы).

LDD – V⁺, концентрация 10¹⁷ – 10¹⁸ см⁻³. Глубина LDD = 1/2 x_{p-n}. Метод – ионная имплантация через слой SiO₂.

3. Содержание пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов):

1. Анализ МОП – СБИС с различными топологическими нормами. Области применения ионной имплантации.

2. Назначение LDD – областей.

3. Физика и технология ионной имплантации.

4. Расчеты параметров ионной имплантации.

5. Разработка техмаршрута изготовления МОП – СБИС.

4. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

Фрагменты СБИС, расчетные зависимости, техмаршрут.

Дата выдачи задания « _____ » _____ 20__ г.

Руководитель _____

Срок сдачи студентом законченного отчета « _____ » _____ 20__ г.

Задание принял к исполнению _____ « _____ » _____ 20__ г.

(подпись студента)

ПРИЛОЖЕНИЕ Б**Пример оформления титульного листа**

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра физической электроники (ФЭ)

**ФОРМИРОВАНИЕ ГЕТЕРОБИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА С БАЗОЙ
p-Si_xGe_{1-x} С ПОМОЩЬЮ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ**

Курсовой проект

по дисциплине «Технология кремниевой наноэлектроники»

ФЭТ КП. ХХХХХХ.ХХХ ПЗ

Студент гр. 315-М
_____ В.В. Каранский
«__» _____ 2016 г.

Руководитель
профессор кафедры ФЭ, к.т.н.
_____ Т.И. Данилина
оценка _____
«__» _____ 2016 г.

Томск 2016