

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

***ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ.  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ***

*Рекомендовано учебно-методическим объединением вузов Республики Беларусь по образованию в области информатики и радиоэлектроники в качестве пособия для студентов, получающих высшее образование по специальности 1-39 02 01 «Моделирование и компьютерное проектирование радиоэлектронных средств»*

Минск БГУИР 2012

УДК 621.3.049.77(076)

ББК 32.844.1я73

П79

**А в т о р ы:**

В. Е. Галузо, В. В. Мельничук, А. И. Пинаев, Г. Д. Ситник

**Р е ц е н з е н т ы:**

ректор учреждения образования «Минский государственный  
высший радиотехнический колледж»,  
кандидат педагогических наук С. Н. Анкуда;

доцент кафедры «Автоматизированные системы обработки информации»  
учреждения образования «Международный государственный  
экологический университет имени А. Д. Сахарова»,  
кандидат технических наук Б. А. Тонконогов

**Проектирование** интегральных микросхем. Лабораторный практи-  
кум : пособие / В. Е. Галузо [и др.]. – Минск : БГУИР, 2012. – 52 с. : ил.  
ISBN 978-985-488-841-5.

Приводится описание четырех лабораторных работ, посвященных моделирова-  
нию элементов и технологических операций производства полупроводниковых  
микросхем. Содержатся теоретические сведения и практические рекомендации по  
их выполнению. В каждой работе проводятся теоретические исследования с ис-  
пользованием программ компьютерного моделирования.

**УДК 621.3.049.77(076)**

**ББК 32.844.1я73**

**ISBN 978-985-488-841-5**

© УО «Белорусский государственный  
университет информатики  
и радиоэлектроники», 2012

## Содержание

<b>Введение</b> .....	4
<b>Лабораторная работа №1 Моделирование диффузионного легирования и термического окисления кремния</b> .....	5
1.1 Теоретические сведения .....	5
1.2 Проведение исследований .....	15
1.3 Содержание отчета .....	16
1.4 Контрольные вопросы .....	16
<b>Лабораторная работа №2 Моделирование ионного легирования</b> .....	17
2.1 Теоретические сведения .....	17
2.2 Проведение исследований .....	27
2.3 Содержание отчета .....	28
2.4 Контрольные вопросы .....	28
<b>Лабораторная работа №3 Моделирование интегрального биполярного транзистора</b> .....	29
3.1 Теоретические сведения .....	29
3.2 Проведение исследований .....	40
3.3 Содержание отчета .....	42
3.4 Контрольные вопросы .....	42
<b>Лабораторная работа №4 Моделирование интегральных полевых транзисторов</b> .....	43
4.1 Теоретические сведения .....	43
4.2 Проведение исследований .....	51
4.3 Содержание отчета .....	51
4.4 Контрольные вопросы .....	51
<b>Литература</b> .....	52

## ВВЕДЕНИЕ

Цель выполнения лабораторных работ: закрепление и расширение знаний, полученных студентами на лекциях, а также приобретение навыков проведения исследований связи конструктивно-технологических и электрофизических параметров элементов полупроводниковых интегральных микросхем (ИМС). На основе анализа результатов исследований студенты получают представление о возможных конструктивно-технологических способах совершенствования электрических характеристик элементов полупроводниковых ИМС.

Лабораторные работы практикума «Моделирование диффузионного легирования и термического окисления кремния» и «Моделирование ионного легирования» относятся к технологическому проектированию полупроводниковых ИМС и посвящены исследованию влияния режимов проведения основных технологических операций изготовления полупроводниковых ИМС (диффузионного легирования, термического окисления и ионного легирования) на параметры профиля легирования областей и полупроводниковых структур, а также окисных пленок.

Лабораторные работы «Моделирование интегрального биполярного транзистора» и «Моделирование интегральных полевых транзисторов» связаны с элементным проектированием и посвящены исследованию зависимости параметров электрической модели биполярного, полевого со структурой металл-диэлектрик-полупроводник и полевого с управляющим  $p-n$ -переходом транзисторов от физико-топологических параметров этих транзисторов.

Выполнение этих работ в первую очередь дает возможность ознакомиться с математическими моделями, реализуемыми в компьютерных программах, используемых для проведения исследований и решения задач технологического и элементного проектирования. При выполнении лабораторных работ с использованием компьютерных программ реализован системный подход к проектированию ИМС с последовательным и взаимосвязанным выполнением этапов проектирования.

Знания и практические навыки, полученные при выполнении этих работ, пригодятся при решении задач схемотехнического проектирования ИМС, а также в дипломном проектировании по данной тематике.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФфуЗИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОГО ОКИСЛЕНИЯ КРЕМНИЯ**

### *Цель работы:*

- изучить основы технологии и моделирования процессов диффузионного легирования и термического окисления кремния;
- исследовать влияние параметров полупроводниковых пластин, а также технологических режимов проведения легирования и окисления на профиль легирования биполярной транзисторной структуры.

Для достижения цели необходимо:

- 1) изучить физические основы диффузионного легирования и термического окисления кремния;
- 2) изучить технику проведения операций диффузионного легирования и термического окисления кремния;
- 3) изучить особенности моделирования процессов диффузионного легирования и термического окисления кремния;
- 4) провести теоретические исследования влияния технологических режимов и материалов, используемых при проведении операций диффузионного легирования и термического окисления, на профили распределения легирующих примесей, параметры диффузионных слоев и толщину пленки окиси кремния.

### **1.1. Теоретические сведения**

#### **1.1.1. Физические основы диффузионного легирования и термического окисления кремния**

Диффузионное легирование в технологии полупроводниковых интегральных микросхем (ИМС) используется как основная операция  $p$ - и  $n$ -переходов получения слоев  $p$ - и  $n$ -типов электропроводности в объеме полупроводниковой пластины. Широкое применение диффузионного легирования обусловлено возможностью создания легированных областей различной толщины с хорошо контролируруемыми электрофизическими параметрами и малыми искажениями (дефектами) кристаллической решетки.

Диффузией называют перенос вещества, обусловленный хаотическим тепловым движением атомов, возникающий вследствие наличия градиента концентрации данного вещества и направленный в сторону убывания этой концентрации в той среде, где происходит диффузия.

Пленки окиси кремния  $SiO_2$ , полученные с помощью термического окисления, используются и как технологические слои в производстве, и как элементы конструкции полупроводниковых ИМС. В производстве ИМС пленки  $SiO_2$

используются для маскирования поверхности кремниевых пластин при проведении операции локального диффузионного легирования. Как элемент конструкции пленки  $SiO_2$  используются для обеспечения диэлектрической межэлементной изоляции, а также в качестве подзатворного диэлектрика в структурах металл-диэлектрик-полупроводник.

Пленка  $SiO_2$  образуется в результате окисления поверхности кремниевой пластины в сухом кислороде или парах воды. При этом поскольку плотность образующейся пленки  $SiO_2$  в три раза меньше плотности кремния, то пленка как бы «растет» на поверхности пластины.

Операции диффузионного легирования и термического окисления кремния технологически совместимы и взаимосвязаны, поэтому рассматриваются в одной работе.

### **1.1.2. Техника проведения операций диффузионного легирования и термического окисления кремния**

Для формирования в кремниевой пластине легированных областей *p*- и *n*-типа электропроводности соответственно проводят диффузию донорной и акцепторной примесей в диапазоне температур 1000–1300 °С. При температуре процесса менее 1000 °С скорость диффузии очень мала. При температуре выше 1300 °С качество легированных диффузионных слоев неудовлетворительно вследствие образования дефектов поверхности пластин под действием высокой температуры.

С целью обеспечения чистоты процесса при высокой температуре диффузионное легирование проводят в трубах из кварцевого стекла, которые имеют высокую прозрачность для ИК-излучений и не «газят» (не испаряют адсорбированные примеси) при высокой температуре. Кремниевые пластины находятся в трубе в подложкодержателе, также изготовленном из кварцевого стекла. Через трубу пропускается поток газа-носителя (азота или аргона) в смеси с кислородом, к которым добавляются газообразные ( $B_2H_6$ ,  $PH_3$ ,  $AsH_3$ ) или парообразные (пары жидкостей  $PCl_3$ ,  $PBr_3$ ,  $BBr_3$ ,  $POCl_3$ ) диффузаны. Насыщение газаносителя парами диффузанта осуществляется путем его пропускания через барботер, в котором находится подогретый жидкий диффузант. Схема установки для получения диффузионных легированных слоев представлена на рис. 1.1.

Технологический процесс диффузионного легирования проводится в следующей последовательности. Сначала через трубу с кремниевыми пластинами прогоняют  $N_2$  для «промывки» системы (вытеснения загрязняющих газообразных примесей). Затем некоторое время пропускается смесь  $N_2$  с  $O_2$ , чтобы получить пленку  $SiO_2$ , защищающую поверхность кремниевой пластины от травления ее веществами, выделяющимися из диффузантов (например хлором) на следующих этапах процесса. Далее в трубу с пластинами подается газообразный или парообразный (с помощью газа-носителя  $N_2$ ) диффузант в смеси с  $O_2$ . При взаимодействии  $O_2$  с диффузантом и кремнием на поверхности пластины вырастает пленка окисла кремния  $SiO_2$ , содержащая окисел легирующей

примеси. Так образуются силикаты типа  $nB_2O_3 \cdot mSiO_2$  (боросиликатное стекло) или  $nP_2O_5 \cdot mSiO_2$  (фосфоросиликатное стекло).

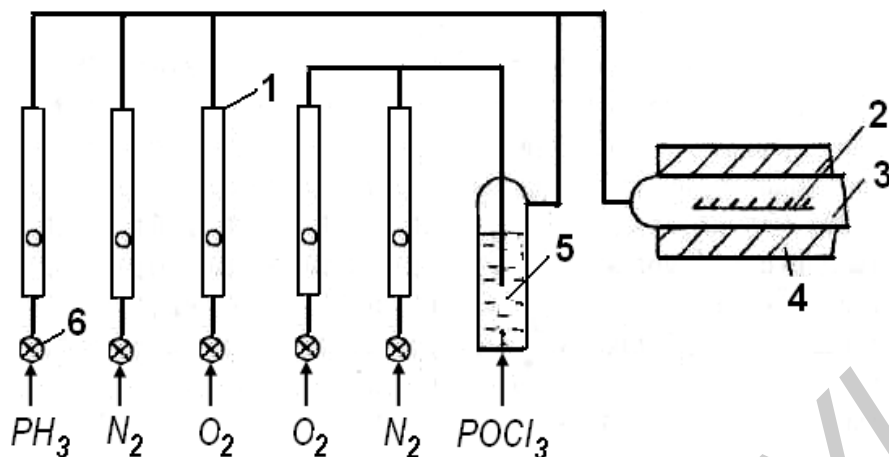


Рис. 1.1. Схема установки для получения диффузионных слоев легированием из  $POCl_3$  и  $PH_3$ :

- 1 – ротаметры для измерения расхода газов;
- 2 – пластина  $Si$ ;
- 3 – кварцевый реактор;
- 4 – диффузионная печь;
- 5 – барботер с жидким диффузантом;
- 6 – вентили

Концентрация окисла легирующей примеси в силикате растет при увеличении испарения диффузанта ( $POCl_3$ ) путем повышения температуры в барботере или расхода газообразного диффузанта ( $PH_3$ ). В обоих случаях расход диффузанта и других газов ( $N_2$ ,  $O_2$ ) контролируется ротаметрами. На границе силиката и кремния происходит реакция восстановления атомов легирующих примесей (бора, фосфора, мышьяка, сурьмы и т. д.), которые диффундируют в глубь пластины.

Эта первая стадия диффузии, в ходе которой в трубу подается диффузант из источника с его большим содержанием (источника бесконечной мощности) и образуется тонкий поверхностный сильнолегированный слой, называется «загонкой» легирующей примеси. Проводится она в течение короткого промежутка времени (1–30 мин) при сравнительно низкой температуре (900–1100 °С).

На последующей стадии при подаче в трубу только  $N_2$  и  $O_2$  происходит непосредственная высокотемпературная диффузия в глубь пластины на необходимую глубину из тонкого поверхностного легированного слоя (источника ограниченной мощности). Эта стадия называется «разгонкой» легирующей примеси и проводится при температуре 1000–1300 °С в течение длительного промежутка времени (от десятков минут до нескольких часов).

Проведение диффузии в две стадии имеет следующие достоинства:

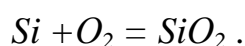
- лучшая управляемость процессом благодаря возможности его контроля после первой стадии «загонки»;

– облегчается маскирование, т. к. «загонка» проводится при температуре более низкой, чем «разгонка», и диффузия через маскирующий слой  $SiO_2$  на первой стадии практически исключена, а при «разгонке» диффузانت не подается.

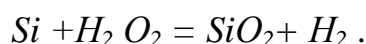
В две стадии создаются такие полупроводниковые области, к которым предъявляются высокие требования по параметрам профиля легирования этих областей: концентрация легирующей примеси (удельное сопротивление) и толщина. К ним относятся области базы биполярного транзистора (БТ) и диффузионного канала полевого транзистора с управляющим  $p$ - $n$ -переходом затвора (ПТУП). В одну стадию может создаваться область эмиттера и подконтактная область коллектора БТ, а также затвор  $n^+$ -типа ПТУП с  $p$ -каналом.

После осуществления каждой стадии диффузии в производстве полупроводниковых ИМС контролируется удельное сопротивление диффузионного слоя, которое зависит от его толщины и распределения концентраций легирующей примеси по глубине слоя (профиля легирования). Толщина слоя (глубина залегания  $p$ - $n$ -перехода) определяется с использованием шлифа (косого или шарового), выполненного на пластине с диффузионным слоем ( $p$ - $n$ -переходом). С целью четкого выделения легированных слоев шлиф подтравливают в растворе азотной и плавиковой кислот (при этом область  $p$ -типа окисляется и темнеет). Удельное сопротивление диффузионного слоя контролируется четырехзондовым методом, обеспечивающим высокую точность измерения благодаря исключению влияния переходных сопротивлений зонд-пластина.

Для формирования легированных областей  $p$ - и  $n$ -типа с необходимыми топологическими размерами диффузию проводят с использованием маскирующего слоя  $SiO_2$ . Чаще всего окисную пленку на поверхности кремниевой пластины выращивают методом термического окисления в открытой трубе (аналогично диффузионному легированию). Термическое окисление проводится как в сухом кислороде, так и в парах воды. В первом случае идет следующая химическая реакция:



Во втором случае  $N_2$  пропускают через деионизированную (не содержащую ионов, что исключает возможное накопление заряда на поверхности пластины, способного образовать посредством электростатической индукции проводящие каналы, увеличивающие токи утечки) воду и, увлажненный водяным паром, подают в трубу. При использовании водяного пара пленка  $SiO_2$  растет быстрее, но она менее прочная (менее плотная, рыхлая), чем в сухом кислороде. Это обусловлено тем, что на границе  $SiO_2 - Si$  идет химическая реакция



Образующийся  $H_2$  проходит сквозь растущий  $SiO_2$ , взрыхляя его и делая пористым. Эти поры обеспечивают доступ  $H_2 O_2$  и влажного кислорода к гра-



нице  $SiO_2 - Si$ , где идет реакция окисления, обуславливая большую скорость роста  $SiO_2$ .

Как правило, на практике окисление проводят в чередующихся средах «сухой кислород» и «пары воды» для того, чтобы получить пленку нужной толщины и прочности. При температуре процесса 850–1300 °С толщина пленок  $SiO_2$  составляет 0,2–1,2 мкм.

Главным достоинством метода термического окисления кремния является его совместимость с диффузией по оборудованию (может производиться в тех же печах) и технологическим операциям (при «разгонке» примеси может происходить термическое окисление).

Толщина и плотность пленки  $SiO_2$  определяют ее важные электрические характеристики: удельную емкость и пробивное напряжение.

### 1.1.3. Моделирование процессов диффузионного легирования и термического окисления кремния

Моделирование процесса диффузионного легирования сводится к расчету распределения легирующей примеси в полупроводниковой пластине при заданных значениях температуры, времени и характеристик легирующих примесей. Основу модели диффузионного процесса составляют решения второго закона Фика, который в случае одномерного распределения примеси описывается выражением

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 N}{\partial x^2}, \quad (1.1)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии легирующей примеси;  
 $N$  – концентрация легирующей примеси;  
 $t$  – время;  
 $x$  – координата, направленная вглубь пластины.

Коэффициент  $D$  (см<sup>2</sup>/с) является мерой скорости, с которой выравнивается разность концентраций примеси в объеме полупроводника.

Зависимость коэффициента диффузии от температуры и характеристик легирующей примеси (табл. 1.1) описывается выражением

$$D = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_{акт}}{k \cdot T}\right), \quad (1.2)$$

где  $D_0$  – коэффициент диффузии примеси при бесконечно большой температуре, см<sup>2</sup>/с;

$E_{акт}$  – энергия активации диффузии, т. е. энергия, необходимая для элементарного скачка диффундирующего атома примеси, эВ;

$k$  – постоянная Больцмана,  $k=8,6 \cdot 10^{-5}$  эВ/град;  
 $T$  – температура процесса.

Таблица 1.1

Характеристики легирующих примесей

Примесь	Тип проводимости	Коэффициент $D_0$ , см <sup>2</sup> /с	Энергия активации $E_{акт}$ , Эв	Предельная растворимость, см <sup>-3</sup>	Температура максимальной растворимости, °С
Бор	$p$	5,1	3,7	$5 \cdot 10^{20}$	1300
Фосфор	$n$	10,5	3,7	$1.5 \cdot 10^{21}$	1150
Мышьяк	$n$	3,0	3,9	$2 \cdot 10^{21}$	1100
Сурьма	$n$	8,0	4,0	$6 \cdot 10^{19}$	1300

Скорость процесса диффузии, характеризуемая коэффициентом диффузии, определяется следующими физическими эффектами:

– возникновение в полупроводниковой пластине внутреннего электрического поля из-за различной скорости диффузии ионов легирующей примеси и электронов, которое приводит к увеличению коэффициента  $D$ ;

– взаимодействие между ионами донорных и акцепторных легирующих примесей, приводящее к образованию ионных комплексов – кластеров – и уменьшению коэффициента диффузии;

– генерация вакансий и дефектов в полупроводниковом кристалле вследствие различия размеров атомов примеси и полупроводника, приводящая к росту коэффициентов диффузии. Этот эффект наблюдается при высокой концентрации диффундирующего фосфора. В случае изготовления биполярных транзисторов этот эффект проявляется в заглублении базы при диффузии эмиттера (эффект эмиттерного выталкивания). Этот эффект имеет место в случае формирования  $n^+$ -области, легированной фосфором, в области  $p$ -типа, легированной бором.

Влияние электрического поля на эффективный коэффициент диффузии  $D_{эф}$  может быть учтено с помощью фактора поля  $h$ :

$$D_{эф} = D \cdot h, \quad (1.3)$$

$$h = 1 + \left[ 1 + 4 \left( \frac{n_i}{N} \right)^2 \right]^{-1/2}, \quad (1.4)$$

где  $n_i$  – концентрация носителей заряда в беспримесном полупроводнике,

$$n_i = n_{i0} \cdot \exp\left(\frac{E_g}{kT}\right). \quad (1.5)$$

Здесь  $n_{i0} = 10^{10} \text{ см}^{-3}$  для кремния;

$E_g$  – ширина запрещенной зоны полупроводника.

Коэффициент диффузии бора с учетом эффекта кластерообразования может быть рассчитан следующим образом:

$$D_{\text{эф}} = D / \left[ 1 + m^2 \left( \frac{N}{N^*} \right)^{m-1} \right], \quad (1.6)$$

где  $m$  – число атомов в кластере (для бора  $m=12$ );

$N^*$  – равновесная константа кластерообразования, характеризующая значение концентрации, при которой начинается сильное влияние эффекта кластерообразования:

$$N^* = 4,9 \cdot 10^{23} \exp(-0,9/kT). \quad (1.7)$$

Для моделирования эффекта эмиттерного выталкивания в биполярном транзисторе вводят соответствующий коэффициент, отражающий генерацию вакансий в участке кремния под сильнолегированной областью  $n^+$ -типа эмиттера  $f_{er}$ . Генерация вакансий приводит к тому, что коэффициенты диффузии акцепторных примесей, например бора и сурьмы, в этой области необходимости увеличить в  $f_{er}$  раз, т. е.

$$D_{\text{эф}} = D \frac{D_p^*}{D_p} = D \cdot f_{er}, \quad (1.8)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии бора (сурьмы) в отсутствие диффузии фосфора;  $D_p^*$  и  $D_p$  – коэффициенты диффузии фосфора с учетом генерации вакансий и без них.

Коэффициент диффузии  $D_p^*$  определяется выражением

$$D_p^* = D_p + D_p \left\{ \frac{C_p^3}{n_e^2 \cdot n_i} \exp\left(\frac{3\Delta E_g}{kT}\right) \left[ 1 + \exp\frac{0,3}{kT} \right] \exp\left[\frac{-(x-x_e)}{L}\right] \right\}, \quad (1.9)$$

где  $C_p$  – концентрация фосфора на поверхности пластины;

$n_e \approx 9,65 \cdot 10^{21} \exp(-0,39/kT)$  – характерная концентрация электронов;

$x_e$  – глубина, на которой достигается концентрация  $n_e$ ;

$L$  – длина, на которую диффундируют вакансии в подложке ( $L \approx 25$  мкм).

Сужение запрещенной зоны, обусловленное сильным легированием, описывается выражением

$$\Delta E_g = q \left[ \ln \frac{N}{10^{17}} + \sqrt{\left( \ln \frac{N}{10^{17}} \right)^2 + 0,5} \right], \quad (1.10)$$

где  $q$  – заряд электрона.

Уравнение диффузии (1.1) имеет два возможных решения для случаев «загонки» и «разгонки» примеси.

В случае «загонки» легирующей примеси, т. е. диффузии из неограниченного источника, это решение имеет вид

$$N(x) = N_{нов} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_{эф}t}}, \quad (1.11)$$

где  $N_{нов}$  – концентрация легирующей примеси на поверхности пластины, соответствующая предельной растворимости примеси в полупроводнике при температуре диффузии (см. табл. 1.1).

В случае диффузии из поверхностного источника ограниченной мощности («разгонке») при решении уравнения диффузии получают распределение концентрации примеси в виде функции Гаусса:

$$N(x) = \frac{2N_{нов}}{\pi} \sqrt{\frac{D_{эф1} \cdot t_1}{D_{эф2} \cdot t_2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_{эф2} \cdot t_2}\right) \quad (1.12)$$

где  $D_{эф1}$  и  $D_{эф2}$  – эффективные коэффициенты диффузии примесей на этапах «загонки» и «разгонки»;

$t_1$  и  $t_2$  – времена проведения «загонки» и «разгонки».

При изготовлении полупроводниковой микросхемы диффузия примесей проводится многократно. В таком случае при расчете распределения примеси необходимо суммировать значения  $D_{эfi} \cdot t_{эfi}$ , соответствующие каждой диффузии. Так, например, при изготовлении интегрального эпитаксиально-планарного  $n$ - $p$ - $n$  БТ в эпитаксиальный слой коллектора  $n$ -типа с концентрацией донорной примеси в нем  $N_{д\text{ ус}}$  проводится двухстадийная диффузия бора для создания базы  $p$ -типа, а затем одностадийная диффузия фосфора для формирования эмиттера  $n^+$ -типа.

На рис. 1.2 представлены графики зависимостей концентраций донорных и акцепторных легирующих примесей (рис. 1.2, а) и результирующее распреде-

ление всех легирующих примесей в *n-p-n* БТ (рис. 1.2, б)

Результирующее распределение примесей описывается выражением

$$N(x) = |N_{\partial \text{ucx}} - N_a(x) + N_{\partial}(x)| = |N_{\partial \text{ucx}} - \frac{2N_{a \text{ нос}}}{\pi} \sqrt{\frac{D_{a1}t_1}{D_{a2}t_2 + D_{a3}t_3}} \exp\left[\frac{x^2}{4(D_{a1}t_1 + D_{a2}t_2 + D_{a3}t_3)}\right] + N_{\partial \text{ нос}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_{\partial 3}t_3}}\right)|, \quad (1.13)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – времена «загонки» и «разгонки» акцепторной примеси (бора);

$D_{a1}, D_{a2}, D_{a3}$  – эффективные коэффициенты диффузии (индекс «эф» опущен) акцепторной примеси на этапах «загонки» и «разгонки» и при диффузии донорной примеси;

$t_3$  и  $D_{\partial 3}$  – время и эффективный коэффициент диффузии донорной примеси (фосфора).

Как уже отмечалось, диффузия примесей ведется в среде кислорода с образованием на поверхности пластины пленки  $\text{SiO}_2$ .

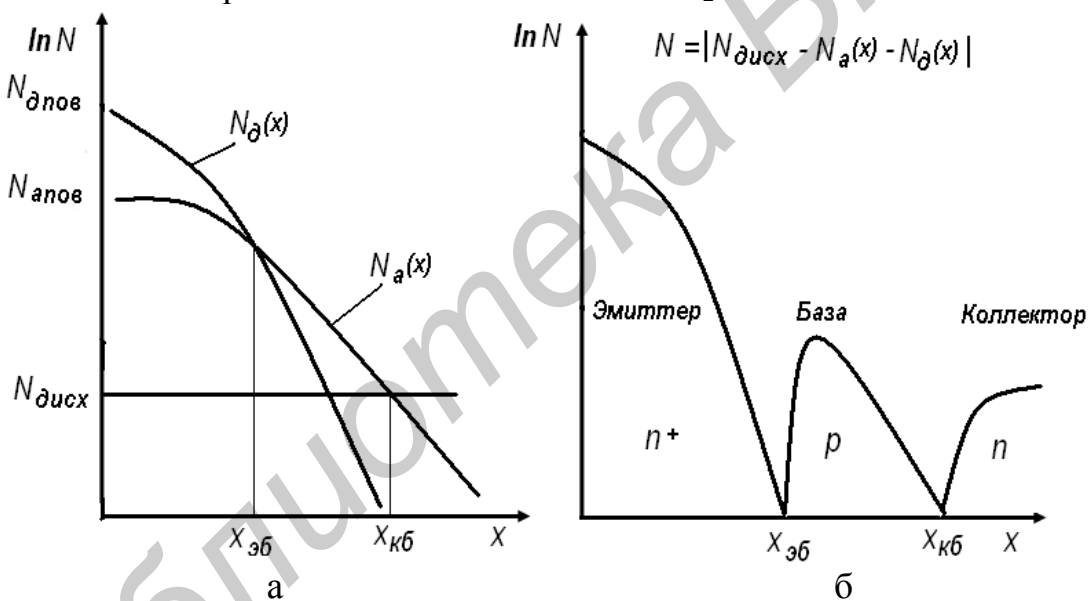


Рис. 1.2. Распределения легирующих примесей в интегральном эпитаксиально-планарном *n-p-n* БТ:

а – донорных и акцепторных примесей;

б – результирующее распределение

Кроме того, для получения диффузионных областей необходимых топологических размеров выращивается маскирующая пленка  $\text{SiO}_2$ . И в первом, и во втором случаях на границе раздела  $\text{Si} - \text{SiO}_2$  происходит перераспределение (сегрегация) легирующей примеси между растущим слоем  $\text{SiO}_2$  и кремниевой пластиной. На рис.1.3 приведены профили распределения примеси бора и фосфора, где  $m_s$  – коэффициент сегрегации, равный отношению концентрации примеси в полупроводнике к концентрации примеси, внедрившейся в окисел. Для фосфора и мышьяка  $m_s=50$ . Для бора зависимости  $m_s(T)$ : при окислении в

сухом кислороде  $m_s = 13.4 \exp\left(\frac{-0.33}{kT}\right)$  и во влажном кислороде  $m_s = 65.2 \exp\left(\frac{-0.66}{kT}\right)$ .

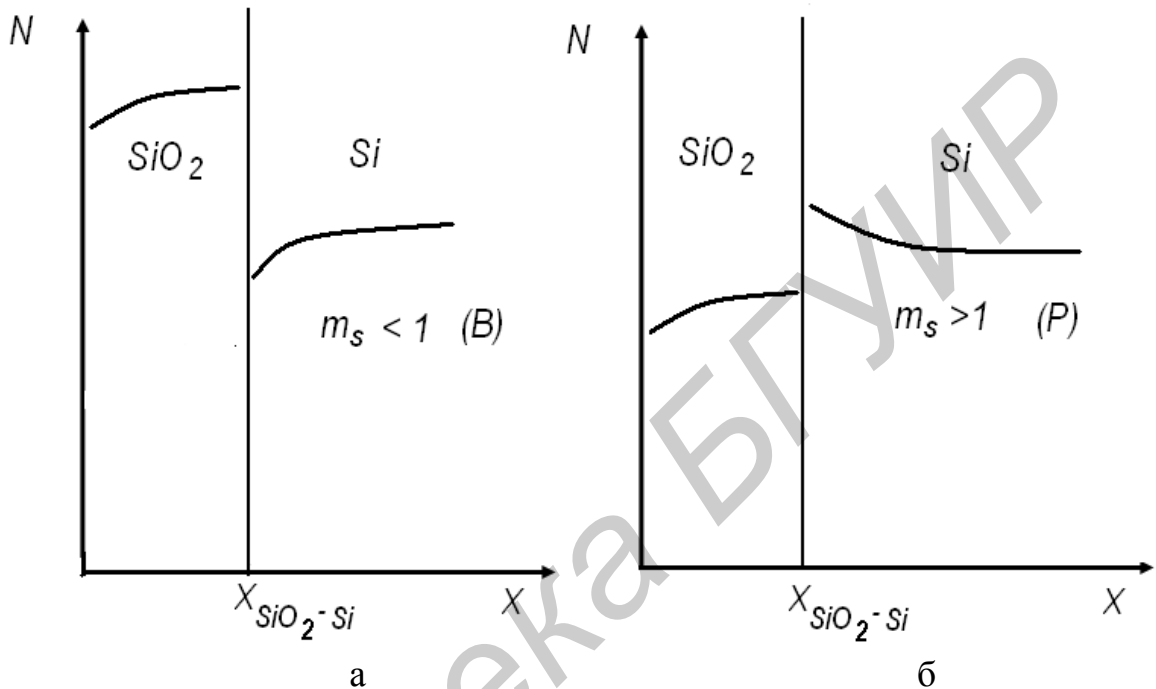


Рис. 1.3. Эффекты перераспределения примесей:

- а –  $m_s < 1$ , быстрый диффузант в  $SiO_2$  (бор);
- б –  $m_s > 1$ , медленный диффузант в  $SiO_2$  (фосфор)

Как видно из рис. 1.3, при окислении поверхности кремниевой пластины концентрация бора на поверхности падает, а фосфора растет. Перераспределение легирующей примеси на поверхности пластины под пленкой  $SiO_2$  зависит от температуры, времени и среды проведения термического окисления, которые выбираются из условия получения пленки с необходимыми характеристиками (удельная емкость, пробивное напряжение и т. д.), и в первую очередь толщиной.

Кинетика роста пленки  $SiO_2$  при термическом окислении кремния в различных средах моделируется следующими выражениями:

при окислении в парах воды

$$h^2 = 4.16 \cdot 10^3 \cdot P^{1.6} t \cdot \exp(-1.7/kT); \quad (1.14)$$

при окислении в сухом кислороде

$$h^2 = 1.4 \cdot 10^3 \cdot P^{0.8} \cdot t \cdot \exp(-1.7/kT), \quad (1.15)$$

где  $h$  – толщина пленки, нм;

$P$  – давление пара или кислорода в трубе, Па;

$t$  – время, с.

## 1.2. Проведение исследований

1.2.1. Используя программу DOM моделирования операций диффузии легирующих примесей и термического окисления кремния, провести следующие теоретические исследования.

1.2.1.1. Влияние времени «загонки» и «разгонки» на результирующий профиль распределения легирующих примесей в биполярном  $n-p-n$ -транзисторе.

1.2.1.2. Влияние температуры «загонки» и «разгонки» на результирующий профиль распределения легирующих примесей в биполярном  $n-p-n$ -транзисторе.

1.2.1.3. Влияние температуры и времени диффузии фосфора на результирующий профиль распределения легирующих примесей в биполярном  $n-p-n$ -транзисторе.

1.2.1.4. Влияние характеристик легирующих примесей на результирующий профиль распределения легирующих примесей в биполярном  $n-p-n$ -транзисторе.

1.2.1.5. Влияние концентрации донорной примеси в эпитаксиальном слое на результирующий профиль распределения легирующих примесей в биполярном  $n-p-n$ -транзисторе.

1.2.1.6. Влияние давления кислорода и паров воды на зависимость толщины пленки  $SiO_2$  от времени термического окисления кремния и результирующий профиль распределения легирующих примесей в биполярном  $n-p-n$ -транзисторе.

1.2.1.7. Влияние температуры процесса окисления кремния в кислороде и парах воды на временную зависимость толщины пленки  $SiO_2$  и результирующий профиль распределения легирующих примесей в биполярном  $n-p-n$ -транзисторе.

1.2.2. Используя программу моделирования диффузии и окисления, решить следующие задачи.

1.2.2.1. Определить технологические режимы диффузии и параметры эпитаксиального слоя для получения диффузионных слоев с параметрами, заданными преподавателем.

1.2.2.2. Определить технологические режимы термического окисления кремния для получения пленки  $SiO_2$  с параметрами, заданными преподавателем.

### **1.3. Содержание отчета**

1. Цель работы.
2. Задачи исследования
3. Результаты исследований (рассчитанные профили легирования и временные зависимости толщины пленки окисла кремния).
4. Выводы по работе (что установлено, обоснование полученных результатов).

### **1.4. Контрольные вопросы**

1. Физические основы теории проведения диффузионного легирования и термического окисления кремния.
2. Техника проведения диффузионного легирования и термического окисления кремния.
3. Моделирование процессов диффузионного легирования и термического окисления кремния.
4. Параметры диффузионных слоев и окисных пленок.
5. Влияние технологических режимов и исходных материалов (подложки, диффузантов, окислительной среды) на параметры диффузионных слоев и окисных пленок кремния.
6. Обоснование результатов теоретических исследований.



## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

*Цель работы:*

– изучить основы технологии и моделирования ионного легирования;  
– исследовать влияние параметров полупроводниковых пластин, а также технологических режимов проведения ионного легирования на профиль легирования.

Для достижения цели необходимо:

- 1) изучить физические основы ионного легирования полупроводника;
- 2) изучить технологические особенности процесса ионного легирования;
- 3) ознакомиться с основами моделирования профиля легирования при ионной имплантации;
- 4) провести теоретические исследования влияния технологических режимов ионной имплантации и последующего отжига на параметры профиля легирования в кремнии.

### 2.1. Теоретические сведения

#### 2.1.1 Физические основы процесса ионного легирования полупроводника

Ионное легирование (ИЛ) используется в технологии полупроводниковых ИМС для создания областей  $p$ - и  $n$ -типа электропроводности путем внедрения в полупроводниковую пластину ионов легирующих примесей, ускоренных до высоких энергий.

Широкое использование ИЛ в технологии полупроводниковых ИМС обусловлено следующими его преимуществами в сравнении с диффузионным легированием:

- высокая точность воспроизведения профиля легирования благодаря хорошей управляемости процессом;
- легирование любыми примесями независимо от их предельной растворимости;
- низкая температура процесса, не влияющая на профиль легирования ранее сформированных слоев;
- возможность создания в объеме полупроводника легированных слоев, расположенных на некотором расстоянии от поверхности;
- малый боковой уход примеси под маскирующий слой, что позволяет создавать легированные области с малыми топологическими размерами.

Недостатками ИЛ являются:

- образование большого числа дефектов при внедрении (имплантации) ионов легирующей примеси;

- трудность получения глубоких (более 1 мкм) легированных слоев;
- сложность и большая стоимость оборудования.

ИЛ используется для создания тонких эмиттерных и базовых областей биполярных транзисторов, мелких и слаболегированных областей высокоомных резисторов, встроенных каналов МДП транзисторов, точной регулировки порогового напряжения МДП транзисторов и других целей.

Наиболее широкое применение ИЛ получило как технологическая операция «загонки» точно дозированного количества примеси и формирования тонкого легированного поверхностного слоя, используемого в качестве источника примеси при последующей ее «разгонке».

Суть процесса ИЛ состоит в следующем. Ионы легирующей примеси, ускоренные до большой энергии, внедряются в глубь электрически нейтральной полупроводниковой пластины, расположенной на «заземленном» катоде. Глубина проникновения ионов зависит от их энергии и характеризуется средним нормальным пробегом  $R_p$ . Поскольку ионы при внедрении сталкиваются с атомами кристаллической решетки и их энергия рассеивается, то их пробег имеет среднеквадратичное отклонение  $\Delta R_p$ . Вся совокупность пробегов отдельных ионов группируется по закону нормального распределения со значением среднего пробега  $R_p$  и его отклонением  $\Delta R_p$ .

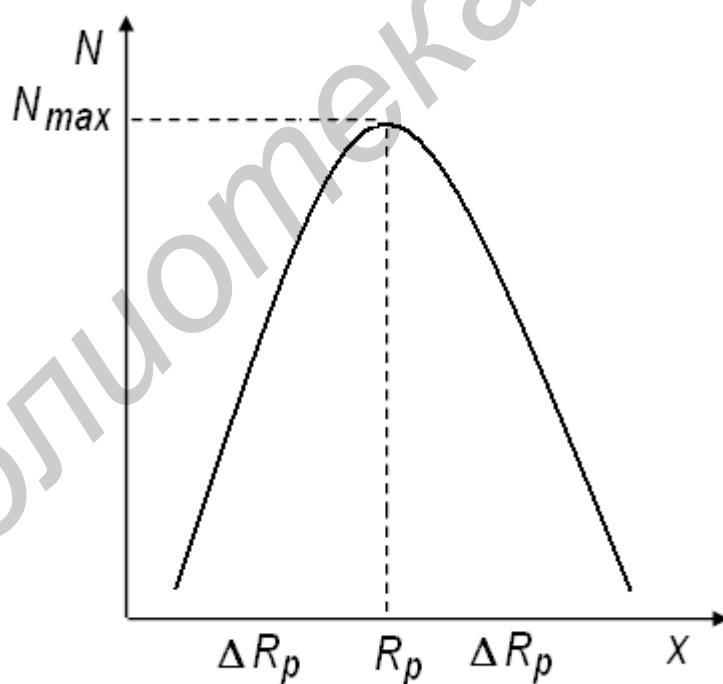


Рис. 2.1. Распределение имплантированных ионов

При внедрении в полупроводник ионы примеси, сталкиваясь с атомами кристаллической решетки, могут выбивать их из узлов, вызывая нарушение

кристаллической структуры полупроводника, которое приводит к изменению его физических свойств (может стать аморфным). Большинство внедренных ионов находится в междоузлиях кристаллической решетки. Внедренные положительные ионы заряжают пластину, вызывая приток в нее через катод электронов, которые нейтрализуют заряд ионов, превращая их в атомы. Для перевода их в узлы и восстановления кристаллической структуры полупроводника производят отжиг. В процессе отжига атомы легирующей примеси занимают вакантные узлы. Таким образом, весь процесс ИЛ можно разбить на два этапа: ионную имплантацию (непосредственное внедрение ионов) и отжиг.

С целью уменьшения нарушений и дефектов в кристаллической структуре ионная имплантация (ИИ) проводится через тонкую окисную пленку на поверхности полупроводниковой пластины (например пленку  $SiO_2$  в случае легирования кремниевых пластин).

### 2.1.2. Техника проведения процесса ионного легирования

Схема установки ИИ приведена на рис. 2.2.

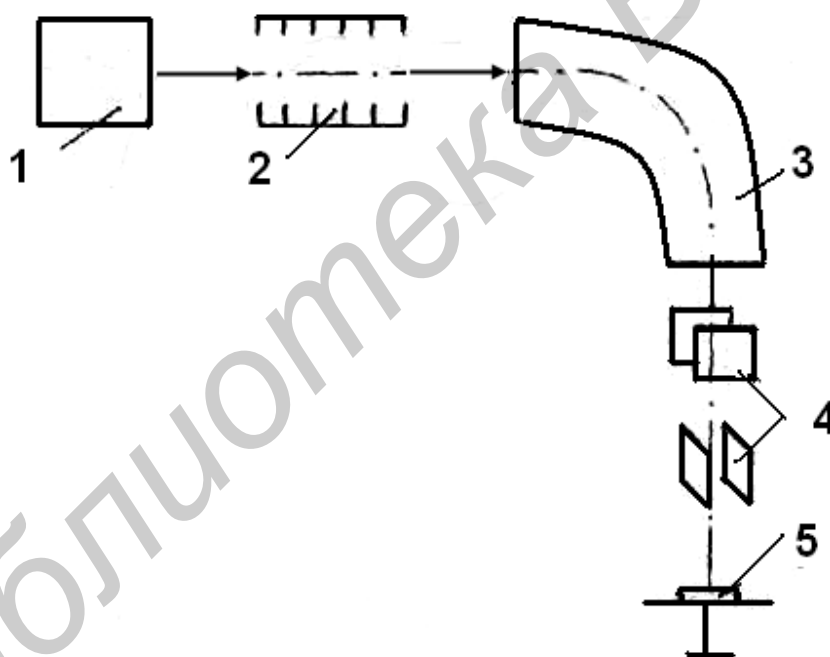


Рис. 2.2. Схема установки ИИ:

- 1 – источник ионов; 2 – ионный ускоритель; 3 – магнитный сепаратор;
- 4 – система фокусировки и сканирования ионного пучка;
- 5 – пластина кремния

Источник ионов 1 состоит из рабочей камеры, в которой производится ионизация паров легирующих примесей; электрического зонда, вытягивающего ионы; электростатической фокусирующей линзы. Ионизация осуществляется электронной бомбардировкой, в ходе которой эмитируемые подогреваемым ка-

тодом электроны ускоряются электрическим полем и ионизируют при столкновении атомы паров легирующих примесей (например пары нагретого красного фосфора).

Положительные ионы выводятся из камеры зондом, фокусируются и ускоряются ионным ускорителем 2, на ускоряющий электрод которого подается напряжение  $U=20-200$  кВ.

Сепарирование ионов, осуществляемое в магнитном сепараторе 3, обеспечивает высокую чистоту легирования. Магнитное поле с индукцией  $B$ , действуя на движущиеся со скоростью  $v$  ионы массой  $m$  и зарядом  $q$ , «заставляет» их двигаться по дуге окружности радиусом  $r = mv/qB$ , т. е. при постоянных  $v$  и  $B$  радиус траектории иона определяется соотношением его массы и заряда. Если ионный пучок содержит примеси других элементов, то в магнитном сепараторе он подвергается разделению на несколько пучков с различными траекториями. Радиус дуги сепаратора соответствует радиусу траектории ионов легирующей примеси. Ионные пучки с траекторией, не соответствующей радиусу дуги сепаратора, касаются его стенок и остаются в нем. Ионы легирующей примеси на выходе сепаратора ускоряются для достижения необходимой энергии.

Система фокусировки и сканирования 4 обеспечивает необходимую плотность ионного пучка и перемещает (сканирует) его по поверхности полупроводниковой пластины 5. Для исключения рассеивания ионов на атомах среды и обеспечения тем самым воспроизводимости плотности и энергии ионов в пучке в установке ИИ поддерживается вакуум около  $10^{-4}$  Па.

В промышленности наиболее широкое распространение получили установки типа «Везувий».

### 2.1.3. Режимы ИИ

Основными технологическими режимами операции ИИ являются энергия ускоренных ионов и доза облучения. Ион с зарядом  $q$  (Кл) под действием разности потенциалов  $U$  (В) приобретает энергию  $E$  (Дж):

$$E = q \cdot U . \quad (2.1)$$

На практике энергию ионов обычно выражают в электрон-вольтах (эВ) или кило электрон-вольтах (кэВ). Так как кратность ионизации примеси обычно составляет  $n=1,2$  или 3 электрона, то

$$q = n \cdot e , \quad (2.2)$$

где  $e$  – заряд электрона.

Доза облучения – это количество частиц, бомбардирующих единицу поверхности за данное время. Доза облучения  $Q$  (Кл/м<sup>2</sup>) определяется плотностью

ионного тока  $j$  (А/м<sup>2</sup>) и длительностью облучения  $t$  (с):

$$Q = j \cdot t. \quad (2.3)$$

На практике обычно плотность ионного тока выражают в мкА/см<sup>2</sup>, поэтому дозу облучения выражают в мкКл/см<sup>2</sup>. Чтобы выразить дозу в количестве частиц  $N_0$ , внедренных на единицу поверхности (ион/м<sup>2</sup>), величину  $Q$  делят на заряд одного иона:

$$N_0 = Q / q = j \cdot t / n \cdot e = 0,6 \cdot 10^{19} \cdot Q / n. \quad (2.4)$$

#### 2.1.4. Источники ионов

Соединения легирующих примесей, используемые для получения ионов, могут находиться в газообразном, жидком и твердом исходном состояниях. Для ионизации соединений легирующих примесей, находящихся в исходном жидком и твердом состоянии, используют их пары.

Из газообразных следует отметить соединение  $BF_3$ , используемое для получения ионов бора.

Наиболее широко применяют жидкие вещества, в частности хлориды  $BCl_3$ ,  $BBr_3$ ,  $PCl_3$ , хорошо испаряющиеся при комнатной температуре. Максимальные дозы облучения достигаются при использовании твердых источников ионов в элементарном виде. Эти вещества требуют нагрева для получения достаточного давления паров: красный фосфор – 175 °С, мышьяк – 260 °С, сурьма – 580 °С.

Благодаря сепарированию ионов легирующих примесей к рабочим веществам не предъявляют жестких требований по чистоте в отличие от диффузионного легирования полупроводников.

#### 2.1.5. Маскирующие пленки при ИИ

Селективное легирование при ИИ выполняют с помощью маскирования, которое обеспечивается использованием защитных пленок определенной толщины.

Наиболее удобно при маскировании использовать пленки  $SiO_2$  и  $Si_3N_4$ , т. к. они являются самыми распространенными маскирующими материалами и в других процессах технологии ИМС. Минимальная толщина защитной маски зависит от вида и энергии ионов легирующей примеси (рис. 2.3).

Маскирование фоторезистами применяют в тех случаях, когда имплантацию проводят при низких дозах. При дозах выше  $10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> происходит полимеризация фоторезиста, который становится трудно растворимым в обычных растворителях.

Маскирование пленками металлов и поликристаллического кремния особенно широко используют для получения самосовмещенных структур в произ-

водстве МДП ИМС. Наибольшее применение нашли пленки алюминия, золота, молибдена и поликристаллического кремния толщиной 0,5–1,0 мкм.

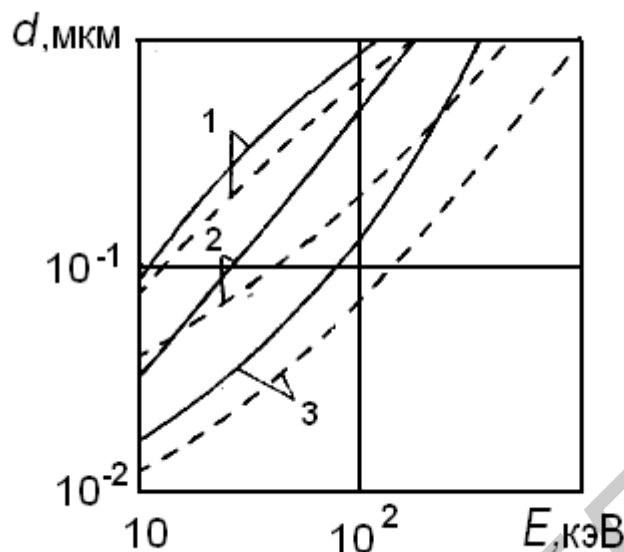


Рис. 2.3. Зависимости минимальной толщины маскирующих пленок  $SiO_2$  (—),  $Si_3N_4$  (----) от энергии ионов: 1 – бора, 2 – фосфора, 3 – мышьяка

### 2.1.6. Послеимплантационный отжиг

Возможны два способа применения ИИ: имплантация как стадия «загонки» примеси для последующей диффузионной «разгонки» с целью реализации необходимой структуры и имплантация для непосредственного создания структуры без последующего диффузионного перемещения внедренной примеси.

В первом случае используется наиболее распространенный прием – сочетание ИИ и диффузии. ИИ используется для предварительной «загонки» строго фиксированного количества примеси с высокой воспроизводимостью параметров от процесса к процессу и высокой однородностью распределения по поверхности полупроводниковых пластин. Диффузия служит для последующей «разгонки» внедренной примеси с целью обеспечения нужного профиля распределения атомов с требуемой глубиной залегания  $p$ - $n$ -перехода и концентрацией примесей. При этом точность и воспроизводимость профиля легирования существенно выше, чем при использовании чисто диффузионных процессов. Одновременно при «разгонке» примеси, которая производится при температурах  $T > 800$  °С, происходит активация имплантированной примеси (атомы примеси занимают места в свободных узлах кристаллической решетки) и устранение дефектов кристаллической структуры, образующихся на этапе «загонки».

Во втором случае использования ИИ после имплантации производят отжиг, задача которого заключается лишь в устранении нарушений кристалличе-

ской решетки и электрической активации внедренных примесей. Если дозы ИИ были малы, то восстановление кристаллической структуры кремния происходит при  $T \leq 300$  °С. В случае больших доз дефекты образуют сплошной аморфный слой, для рекристаллизации которого необходима температура  $T \geq 600$  °С. Отжиг приводит к тому, что смещённые атомы возвращаются в свои равновесные положения в кристаллической решетке. Одновременно обеспечивается электрическая активация примесей. При этом диффузионными процессами можно пренебречь.

### 2.1.7. Моделирование распределения примесей после ИЛ

«Загонка». Самой простой функцией, описывающей распределение имплантированной примеси по глубине, является распределение Гаусса:

$$N(x) = \frac{N_0}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \exp\left[-\frac{(x - R_p)^2}{2\Delta R_p^2}\right], \quad (2.5)$$

где  $x$  – расстояние от поверхности в глубь полупроводниковой пластины в направлении падения ионного пучка.

Анализ выражения (2.5) показывает, что функция Гаусса симметрична относительно  $x = R_p$ , при этом максимум концентрации имплантированной примеси в отличие от диффузии залегает не на поверхности, а на глубине  $x = R_p$  и равен

$$N_{max} = 0,4 \cdot N_0 / \Delta R_p . \quad (2.6)$$

Выражение (2.5) наиболее широко используют для оперативных оценочных расчетов распределения концентрации имплантированных ионов. Однако экспериментально наблюдаемые распределения ионов большинства используемых примесей оказываются существенно асимметричными даже при значительном разориентировании подложки-мишени и ионного потока, что не отражается гауссовским распределением. Это обусловлено главным образом игнорированием эффектов каналирования, всегда в той или иной степени проявляющихся при имплантации.

Наиболее точный расчет концентрационных профилей имплантированных примесей производится с использованием других, более сложных функций распределения, в частности распределения Пирсона:

$$N(x) = N_0 \cdot f(x) . \quad (2.7)$$

Функция Пирсона  $f(x)$  определяется следующим образом:

$$f(x) = K \left[ B_0 + B_1(x - R_p) + B_2(x - R_p)^2 \right]^{1/2 - B_2} \times \exp \left[ -\frac{B_1 / B_2 + 2B_1}{\sqrt{4B_2B_0 - B_1^2}} \operatorname{arctg} \frac{2B_2(x - R_p) + B_1}{\sqrt{4B_2B_1 - B_1^2}} \right]. \quad (2.8)$$

Эмпирические коэффициенты, входящие в (2.8), определяются из условия наилучшего соответствия расчетных и экспериментальных зависимостей  $N(x)$  и рассчитываются следующим образом:

$$B_0 = -\Delta R_p^2 (4\beta - 3\gamma^2) / A; \quad (2.9)$$

$$B_1 = -\Delta R_p \cdot \gamma (\beta + 3) / A; \quad (2.10)$$

$$B_2 = -(2\beta - 3\gamma^2 - 6) / A; \quad (2.11)$$

$$A = 10\beta - 12\gamma^2 - 18; \quad (2.12)$$

$$K = B_0^{-1/2 - B_2}; \quad (2.13)$$

$$\beta = 1.5 \left[ 48 + 39\gamma^2 + 6(\gamma^2 + 4)^{3/2} \right] / (32 - \gamma^2) \quad (2.14)$$

Значения коэффициента  $\gamma$  для различных энергий приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Значения параметра  $\gamma$  в функции распределения Пирсона  
(для ионов бора)

$E,$ кэВ	10	30	50	70	100	200	300	400	600	800
$\gamma$	-0,3	-0,55	-1,0	-1,0	-1,3	-2,15	-2,25	-2,75	-2,6	-3,3

Сравнение распределений Гаусса и Пирсона с экспериментальным концентрационным профилем (рис. 2.4) показывает, что наиболее точным является распределение Пирсона.



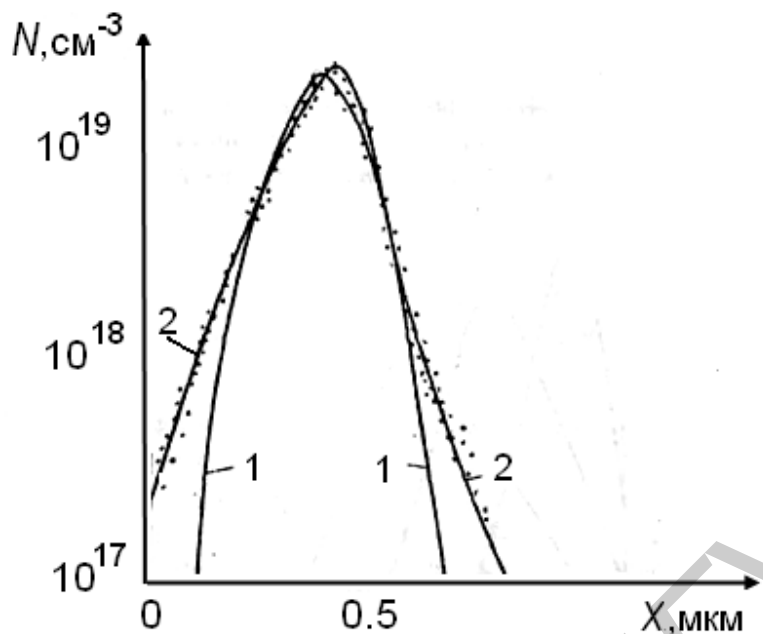


Рис. 2.4. Сравнение экспериментально полученного (....) распределения бора (энергия  $E=150$  кэВ, доза  $N_0=5 \cdot 10^{14}$  см $^{-3}$ ) с распределениями: 1 – Гаусса; 2 – Пирсона

Типичные концентрационные профили распределения имплантированных ионов при различных значениях энергии и дозы после «загонки» приведены на рис. 2.5 и 2.6.

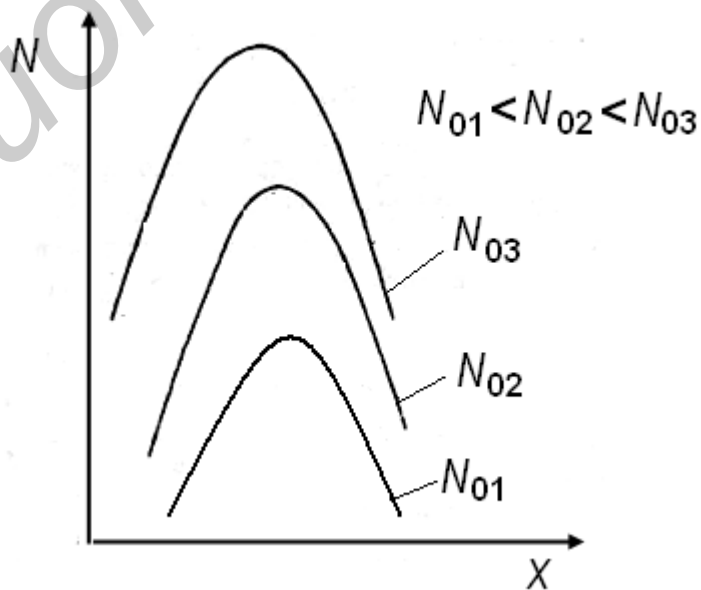


Рис. 2.5. Семейство профилей распределения имплантированных ионов при постоянной энергии и различных дозах  $N_0$

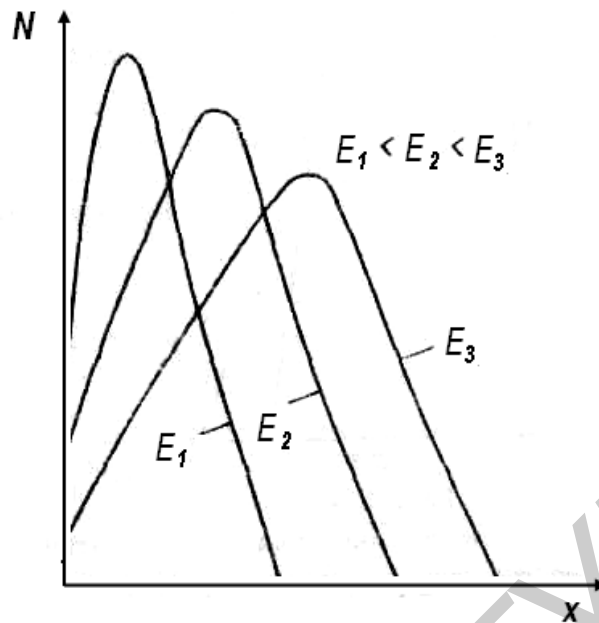


Рис. 2.6. Семейство профилей распределения имплантированных ионов при различных энергиях  $E$  и постоянной дозе

«Загонка» через тонкий окисел. В технологии ИИ часто используют легирование кремния через пленку окисла (для ослабления эффекта каналирования, получения очень тонких легированных слоев, получения монотонно изменяющихся концентрационных профилей и др.). В этом случае расчет концентрационного профиля в кремнии осуществляется с использованием выражений (2.5) или (2.7), причем длина пробега в полупроводнике  $R_p$  уменьшается.

«Разгонка». Диффузия примесей из имплантированного слоя («разгонка») проходит из источника с ограниченным содержанием примеси, как правило, длительное время при повышенных температурах. При расчете концентрационного профиля на этапе «разгонки» следует учесть наличие предварительного распределения примеси, созданного имплантацией.

Результирующее распределение примеси после «разгонки» для случая распределения Гаусса определяется следующим образом:

$$N(x) = \frac{N_a}{\sqrt{2\pi} \sqrt{\Delta R_p^2 + 2Dt}} \exp\left[-\frac{(R_p - x)^2}{2(\Delta R_p^2 + 2Dt)}\right], \quad (2.15)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии имплантированной примеси, определяемый температурой «разгонки»;

$t$  – время «разгонки».

Типичные профили распределения концентраций примесей при различных температурах «разгонки» приведены на рис. 2.7.

Следует отметить, что профили распределения примесей после «разгонки» характеризуются сравнительно слабым спадом концентрации в приповерх-

ностной зоне и более резким в глубине слоя, т. е. имеет место интенсификация процесса диффузии в приповерхностный слой. Ускоряющим фактором является наличие большого числа радиационных дефектов, распад которых при нагреве сопровождается появлением потока избыточных вакансий.

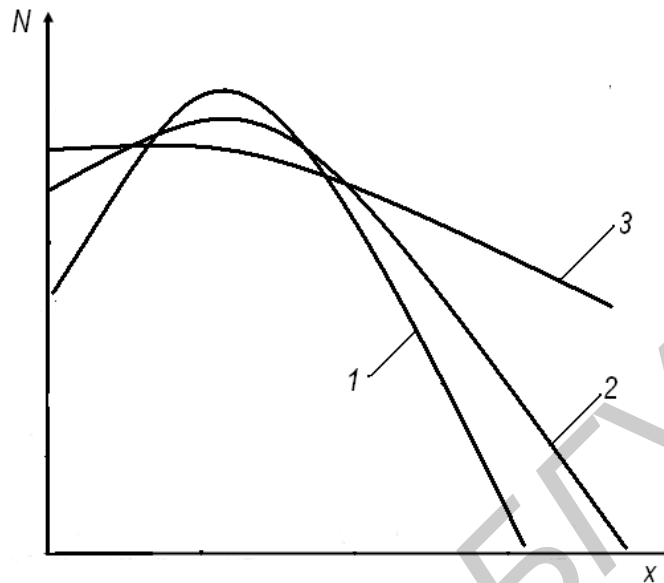


Рис. 2.7. Семейство профилей при различных температурах «разгонки» имплантированной примеси:

- 1 – до «разгонки» (после имплантации);
- 2 – после «разгонки» при температуре  $T_1$ ;
- 3 – после «разгонки» при температуре  $T_2 > T_1$ .

## 2.2. Проведение исследований

2.2.1 Используя программу моделирования ионного легирования, исследовать:

- влияние энергии ионов на концентрационные профили после имплантации и после «разгонки»;
- влияние дозы ионов на концентрационные профили после имплантации и после «разгонки»;
- влияние материала легирующей примеси на профили после имплантации и после «разгонки»;
- зависимость результирующего концентрационного профиля от температуры и времени «разгонки» примесей.
- влияние толщины окисной пленки, через которую проводится имплантация, на характеристики концентрационного профиля.

2.2.2. Используя программу, определить режимы имплантации (доза, энергия), обеспечивающие получение ионно-легированного слоя с заданными параметрами (исходная концентрация примесей в подложке  $N_{исх}$ , материал имплантируемой примеси, глубины залегания верхнего  $x_в$  и нижнего  $x_н$   $p$ - $n$ -переходов, ограничивающих слой). Определить минимальную толщину защитной пленки, обеспечивающей селективное проведение имплантации.

2.2.3. Определить режимы «разгонки» примеси (время и температуру), обеспечивающие заданное преподавателем увеличение толщины имплантированного слоя с параметрами, заданными преподавателем.

### **2.3. Содержание отчета**

1. Цель работы.
2. Задачи исследования.
3. Основные теоретические сведения и расчетные соотношения, используемые при выполнении работы.
4. Результаты исследований (семейства концентрационных профилей при различных режимах проведения ионного легирования) и расчетов (рассчитанные параметры процесса ионного легирования на этапах имплантации и «разгонки», обеспечивающие получение слоя с заданными характеристиками), разрез структуры слоя, концентрационный профиль в слое после имплантации и после «разгонки».
5. Выводы по работе.

### **2.4. Контрольные вопросы**

1. Достоинства и недостатки метода ионного легирования.
2. Физические основы ионного легирования полупроводника.
3. Технологические особенности процесса ионного легирования.
4. Необходимость послеимплантационного отжига и его разновидности.
5. Моделирование ионного легирования.
6. Влияние технологических режимов и исходных материалов на параметры ионно-легированных слоев.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

*Цель работы:*

Исследовать зависимость электрических параметров интегрального биполярного  $n-p-n$  транзистора (БТ) от конструктивно-технологических параметров.

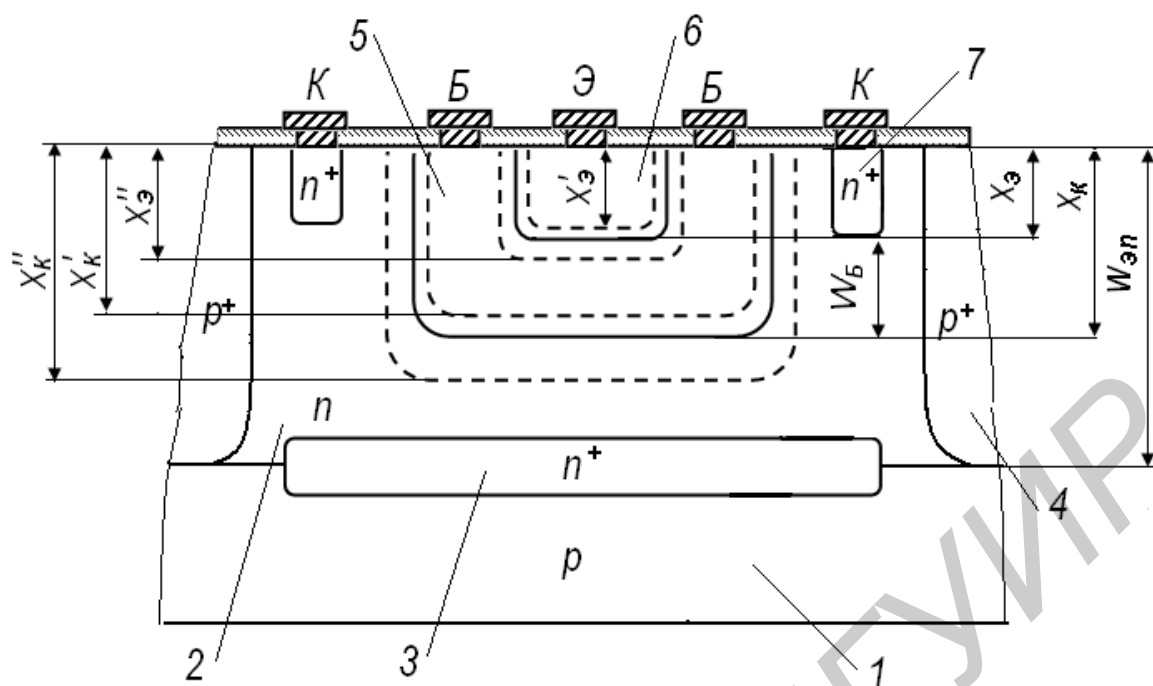
Для достижения цели необходимо:

- 1) изучить конструкцию интегрального  $n-p-n$  БТ;
- 2) изучить физико-топологическую модель интегрального  $n-p-n$  БТ;
- 3) провести теоретические исследования зависимости параметров электрической модели интегрального  $n-p-n$  БТ от физико-топологических параметров.

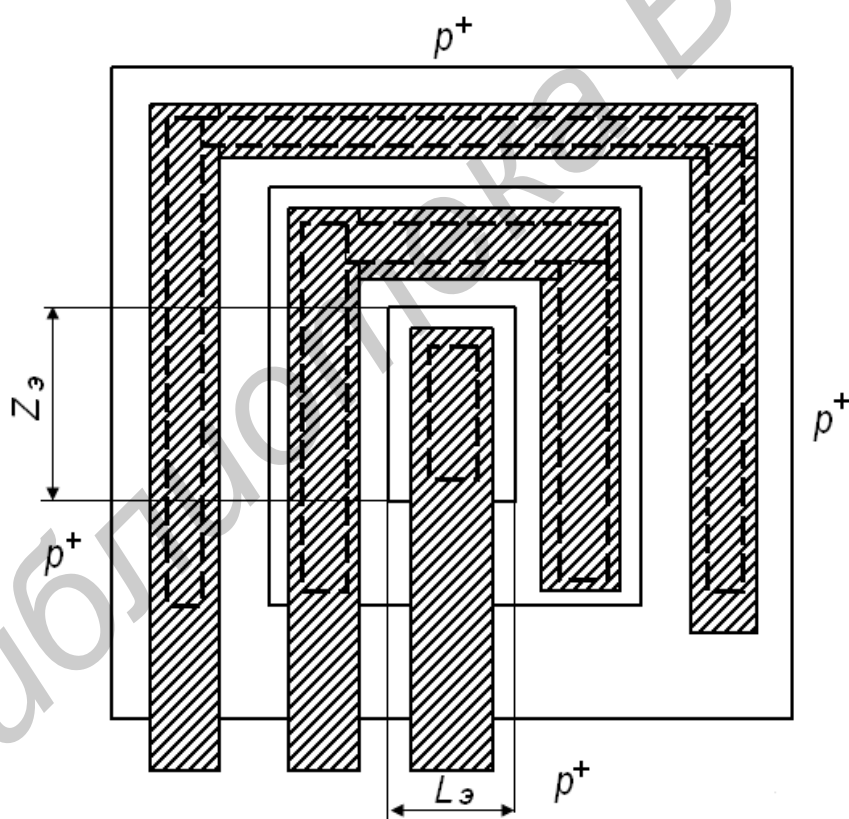
### 3.1. Теоретические сведения

#### 3.1.1. Конструкция интегрального $n-p-n$ БТ

Интегральным называется БТ, входящий в состав полупроводниковой ИМС. Конструкция интегрального БТ зависит от метода межэлементной изоляции в объеме полупроводниковой пластины и соответствующим технологическим процессом изготовления полупроводниковой ИМС. Наибольшее применение в производстве аналоговых низкочастотных полупроводниковых ИС малой степени интеграции нашла эпитаксиально-планарная технология с разделительной диффузией. Разрез структуры, эскиз топологии и профиль легирования интегрального  $n-p-n$  БТ, изготовленного по такой технологии, приведены на рис. 3.1.



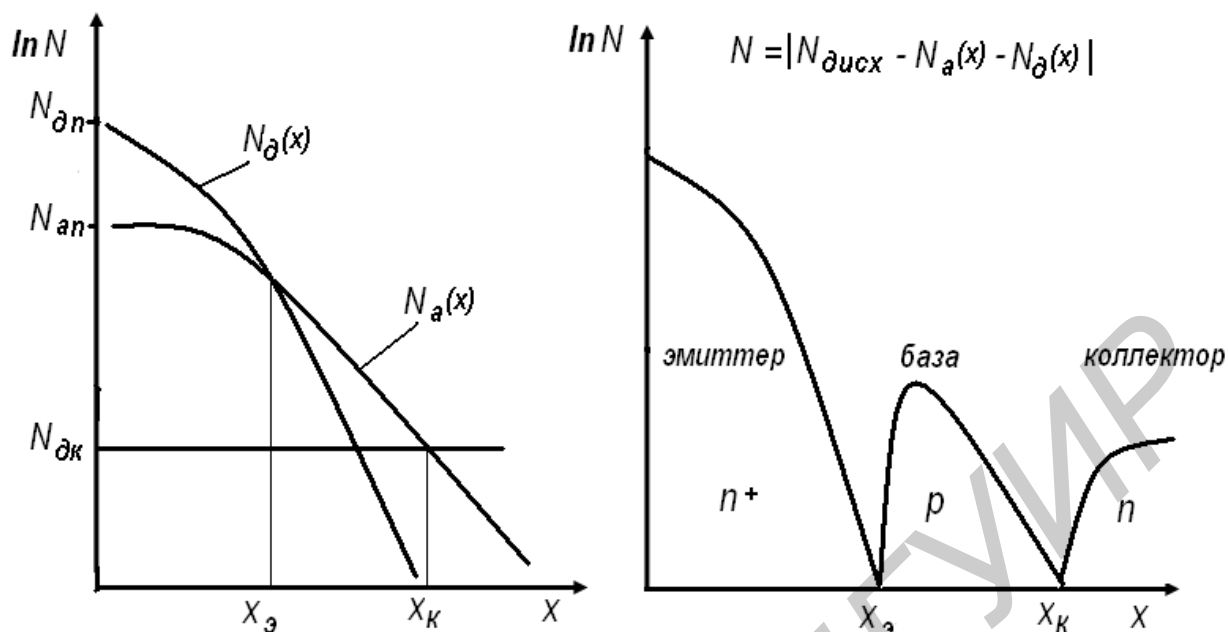
а



б

Рис. 3.1. Разрез структуры, эскиз топологии и распределение легирующих примесей в БТ:

а – разрез структуры; б – эскиз топологии;  
в, г – распределение легирующих примесей



В

Рис. 3.1. Окончание

Структура БТ (рис. 3.1,а) состоит из следующих элементов:

- 1 – подложка  $p$ -типа, обеспечивающая механическую прочность структуры;
- 2 – эпитаксиальный слой коллектора  $n$ -типа;
- 3 – диффузионная скрытая коллекторная область  $n^+$ -типа, уменьшающая сопротивление коллектора  $n$ -типа;
- 4 – область разделительной диффузии  $p^+$ -типа, обеспечивающая электрическую изоляцию БТ от других элементов ИС;
- 5 – диффузионная область базы  $p$ -типа;
- 6 – диффузионная область эмиттера  $n^+$ -типа;
- 7 – диффузионная подконтактная область коллектора  $n^+$ -типа, исключая вследствие высокой степени легирования образование выпрямляющего перехода между алюминиевым контактом и слаболегированной областью коллектора  $n$ -типа.

Следует отметить, что скрытая коллекторная область 3 не касается базы  $p$ -типа, т. е. не образует с ней  $p$ - $n$ -переход, а значит,  $p$ - $n$ -переход коллектор–база будет слаболегированным, и это обеспечит повышенное напряжение пробоя этого  $p$ - $n$ -перехода, что будет показано ниже. Кроме того, эта область, расположенная параллельно области коллектора  $n$ -типа и вследствие высокого легирования (низкого сопротивления) уменьшающая сопротивление коллектора, обеспечивает увеличение граничной частоты (будет показано ниже).

К области разделительной диффузии  $p^+$ -типа 4 прикладывается самый низкий потенциал в ИМС, который будет и на подложке  $p$ -типа 1, т. к. они со-

прикасаются. В результате  $p$ - $n$ -перехода область разделительной диффузии – коллектор, подложка – коллектор, подложка – скрытая коллекторная область будут смещены в обратном направлении, что и обеспечит электрическую межэлементную изоляцию. Высокий уровень легирования области разделительной диффузии обеспечивает снижение тока через обратносмещенный  $p$ - $n$ -переход, образованный этой областью с коллектором, и тем самым увеличение сопротивления изоляции.

Структура этого транзистора называется планарной потому, что все ее области выходят на поверхность пластины и имеют выводы, расположенные в одной плоскости, форма и расположение которых поясняются эскизом топологии БТ (рис. 3.1, б).

Контакт к области базы с трех сторон окружает область эмиттера, что обеспечивает малое значение сопротивления базы току базы, протекающему от контакта базы к эмиттеру. Контакт к области коллектора также с трех сторон окружает базу, что обеспечивает меньшее значение сопротивления коллектора току коллектора, протекающему от базы к контакту коллектора. Уменьшение этих сопротивлений приводит к увеличению граничной частоты усиления, что будет показано ниже. На топологии ширина контактного окна (обозначена штриховой линией). Расстояния от контактных окон до соседних  $p$ - $n$ -переходов имеют равную величину.

### 3.1.2. Физико-топологическая модель интегрального биполярного $n$ - $p$ - $n$ -транзистора

Физико-топологическая модель – модель расчета электрических параметров, исходными параметрами которой являются электрофизические характеристики полупроводниковой структуры и топологические размеры транзистора (см. рис. 3.1). Электрофизические характеристики: концентрация собственных носителей заряда, ширина запрещенной зоны и диэлектрическая проницаемость полупроводника, времена жизни, тепловые скорости, концентрации и сечения ловушек захвата, подвижности, коэффициенты диффузии и концентрации примесных электронов и дырок. Многие из этих параметров зависят от профиля легирования (распределения концентрации легирующих примесей вглубь) транзисторной структуры.

Топологические размеры (см. рис. 3.1, а): длина эмиттера  $L_э$ ; ширина эмиттера  $Z_э$ .

Параметры профиля легирования: концентрация донорной примеси в эпитаксиальном коллекторном слое  $N_{dк}$ , глубины залегания  $p$ - $n$ -переходов коллектор–база  $x_к$  и эмиттер–база  $x_э$ , концентрации акцепторной примеси на поверхности базы  $N_{aнов}$  и донорной примеси на поверхности эмиттера  $N_{dнов}$ , толщина эпитаксиальной пленки  $W_{эп}$ .

Распределение концентрации акцепторной примеси при формировании базы путем двухстадийной диффузии находим из выражения



$$N_a(x,t) = \frac{2N_{an}}{\pi} \sqrt{\frac{D_{1a} \cdot t_{1a}}{D_{2a} \cdot t_{2a}}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_{2a} \cdot t_{2a}}\right), \quad (3.1)$$

где  $t_{1a}$  и  $t_{2a}$  – время «загонки» и «разгонки» акцепторной примеси;

$D_{1a}$  и  $D_{2a}$  – коэффициенты диффузии акцепторной примеси при «загонке» и «разгонке».

Распределение концентрации донорной примеси при формировании эмиттера путем одностадийной диффузии рассчитывается по формуле

$$N_d(x,t) = N_{d\text{нов}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_d t_d}}\right) \quad (3.2)$$

где  $D_d$  и  $t_d$  – коэффициент и время диффузии донорной примеси.

Коэффициент диффузии определяется выражением

$$D = D_o \exp(\Delta E/kT), \quad (3.3)$$

где  $D_o$  – постоянная коэффициента диффузии примеси;

$\Delta E$  – энергия активации примеси;

$k$  – постоянная Больцмана;

$T$  – абсолютная температура диффузии примеси.

Согласно (3.1) и (3.2), для расчета концентрации на любой глубине  $x$  транзисторной структуры необходимо знать значения времени диффузии  $t_{2a}$  и  $t_d$  ( $t_{1a}$  задается), которые определяются при решении уравнений

$$N_a(x_k, t_{2a}) = N_{d\text{к}}, \quad (3.4)$$

$$N_d(x_э, t_d) = N_a(x_э, t_{2a}). \quad (3.5)$$

Уравнения (3.4) и (3.5) являются условиями образования  $p$ - $n$ -перехода. При решении этих уравнений относительно  $t_{2a}$  и  $t_d$  величины  $N_{a\text{нов}}$ ,  $N_{d\text{нов}}$ ,  $N_{d\text{к}}$ ,  $x_э$ ,  $x_к$  являются исходными параметрами модели и задаются разработчиком.

Интегральные БТ работают при малых токах коллектора  $I_k$  (1–1000 мкА). При таких токах коллектора статический коэффициент передачи тока в схеме с общим эмиттером может быть рассчитан по формуле

$$B_{cm} = I_k / (I_{\bar{\sigma}u} + I_{\bar{\sigma}\text{нов}} + I_{\bar{\sigma}p-n}) \quad (3.6)$$

где  $I_{\bar{\sigma}u}$  – составляющая тока базы, обусловленная инжекцией дырок из базы в эмиттер;

$I_{\delta \text{ нов}}$  и  $I_{\delta p-n}$  – составляющие тока базы, обусловленные рекомбинацией на поверхности пассивной базы и в области пространственного заряда (ОПЗ)  $p-n$ -перехода база – эмиттер.

Для БТ, включенного по схеме с общим эмиттером (ОЭ), соблюдается следующее соотношение между токами эмиттера  $I_{\varepsilon}$ , коллектора  $I_{\kappa}$  и базы  $I_{\delta}$ :

$$I_{\varepsilon} = I_{\kappa} + I_{\delta} \quad (3.7)$$

Для типичных значений  $B_{cm} > 20$  можно с погрешностью менее 5 % записать  $I_{\varepsilon} = I_{\kappa}$ .

Ток  $I_{\varepsilon}$  обусловлен движением электронов, инжектированных из эмиттера в базу от эмиттерного к коллекторному  $p-n$ -переходу. Движение электронов по базе обусловлено двумя механизмами: диффузией и дрейфом. Диффузия электронов происходит из-за возникновения градиента электронов в результате увеличения их концентрации у эмиттерного края базы вследствие инжекции. Дрейф (движение под действием электрического поля) электронов по базе обусловлен наличием в ней ускоряющего поля, образующегося в неравномерно легированной (диффузионной) базе в результате диффузии дырок от эмиттерного к коллекторному краю базы. Возникает это поле в части базы, расположенной под эмиттером (активная база). С учетом вышеизложенного, ток эмиттера может быть рассчитан по следующей формуле:

$$I_{\varepsilon} = S_{\varepsilon} [q \cdot \mu_n(x) \cdot E(x) \cdot n_p(x) + q \cdot D_n(x) \cdot dn(x)/dx], \quad (3.8)$$

где  $S_{\varepsilon}$  – площадь донной (активной) части  $p-n$ -перехода база – эмиттер;

$q$  – заряд электрона;

$\mu_n(x)$  – подвижность электронов в базе;

$E(x)$  – напряженность поля в базе;

$n_p(x)$  – концентрация электронов, инжектированных в базу;

$D_n(x)$  – коэффициент диффузии электронов в базе;

$dn(x)/dx$  – градиент электронов в базе.

Концентрация инжектированных электронов описывается выражением

$$n_p(x) = n_{p o}(x_{\varepsilon}) \cdot \exp(U_{\delta \varepsilon} / \varphi_T), \quad (3.9)$$

где  $n_{p o}(x_{\varepsilon})$  – равновесная концентрация электронов в базе (при напряжении базы – эмиттера  $U_{\delta \varepsilon} = 0$ ), которая определяется соотношением

$$n_{p o}(x_{\varepsilon}) = n_i^2 / p_{p o} = n_i^2 / |N_a(x_{\varepsilon}) - N_d(x_{\varepsilon})|, \quad (3.10)$$

где  $n_i$  – концентрация собственных носителей зарядов в кремнии.

Согласно (3.9) и (3.10), при уменьшении концентрации  $|N_a(x_{\varepsilon}) - N_d(x_{\varepsilon})|$

увеличивается концентрация инжектированных электронов в базу. Поскольку концентрация примесей в донной части эмиттера меньше, чем в боковой, то инжекция электронов в донной части эмиттера будет больше. Кроме того, в базе под эмиттером имеет место ускоряющее поле. Следовательно, наибольший ток эмиттера протекает через дно эмиттерной области и часть базы, расположенной под ней. Поэтому базу под эмиттером называют «активной», а область базы, окружающую эмиттер, – «пассивной».

Подвижность  $\mu_n(x)$  и коэффициент диффузии  $D_n(x)$  растут с уменьшением концентрации легирующей примеси в базе (благодаря уменьшению столкновений с ионами легирующей примеси).

Напряженность поля  $E(x)$  равна

$$E(x) = \varphi_T \ln[N_a(x_3'')/N_{\delta \kappa}] / (x'_\kappa - x_3''), \quad (3.11)$$

где  $\varphi_T = k \cdot T / q$  – температурный потенциал.

Из выражения (3.11) следует, что  $E(x)$  увеличивается при уменьшении концентрации  $N_{\delta \kappa}$  и координаты  $x'_\kappa$ .

Границы ОПЗ  $p$ - $n$ -переходов  $x'_\kappa$  и  $x_3''$  рассчитываются следующим образом. Переход база – эмиттер можно считать плавным. Ширина его ОПЗ равна

$$l_{\delta 3} / 2 = x_3 - x_3' = x_3'' - x_3 = 1/2 \sqrt{\frac{12 \varepsilon \varepsilon_0 \varphi_3}{q a(x_3)}}, \quad (3.12)$$

где  $a(x_3) = dn(x_3)/dx$  – градиент распределения концентрации легирующих примесей в ОПЗ  $p$ - $n$ -перехода база – эмиттер;

$\varepsilon \varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость кремния;

$\varphi_3$  – потенциальный барьер  $p$ - $n$ -перехода база – эмиттер.

Потенциальный барьер  $p$ - $n$ -перехода база – эмиттер рассчитывается по формуле

$$\varphi_3 = \varphi_T \ln \left[ \frac{N_a(x_3)^2}{n_i^2} \right]. \quad (3.13)$$

Ширина ОПЗ  $p$ - $n$ -перехода коллектор – база

$$l_{\kappa \delta} = L_a + \sqrt{L_a^2 + 2 \varepsilon \varepsilon_0 (\varphi_\kappa + U_{\kappa \delta}) / q N_{\delta \kappa}}, \quad (3.14)$$

где  $L_a = W_{\delta} / \ln[N_a(x_3)/N_{\delta \kappa}]$  – характеристическая длина в распределении акцепторов в базе;

$\varphi_\kappa$  и  $U_{\kappa \delta}$  – потенциальный барьер и напряжение на  $p$ - $n$ -переходе коллектор – база.

Потенциальный барьер  $p$ - $n$ -перехода коллектор – база находится из выражения

$$\varphi_{\kappa} = \varphi_T \ln(N_{\partial \kappa}^2 / n_i^2). \quad (3.15)$$

Из соотношений (3.12) – (3.15) следует, что ширина  $p$ - $n$ -переходов база – эмиттер и коллектор – база увеличивается при уменьшении концентрации легирующих примесей в них, в частности при уменьшении  $N_a(x_э)$  и  $N_{\partial \kappa}$ .

Напряжение  $U_{\kappa \bar{\delta}}$  при включении БТ по схеме с общим эмиттером (ОЭ) определяется из соотношения

$$U_{\kappa \bar{\delta}} = U_{\kappa \bar{\delta}} - I_{\kappa} R_{\kappa}, \quad (3.16)$$

где  $U_{\kappa \bar{\delta}}$  – напряжение питания коллектора в схеме с ОЭ;

$R_{\kappa}$  – сопротивление области коллектора, по которой течет ток  $I_{\kappa}$ .

Граница ОПЗ  $p$ - $n$ -перехода коллектор – база в базе  $x'_{\kappa}$  равна

$$x'_{\kappa} = x_{\kappa} - L_a \ln \left[ 1 + \sqrt{1 + \frac{\varepsilon \varepsilon_0 (\varphi_{\kappa} + U_{\kappa \bar{\delta}})}{q N_{\partial \kappa} L_a^2}} \right]. \quad (3.17)$$

Сопротивление области коллектора в соответствии с рис. 3.1,б определяется выражением (при этом сопротивление скрытой коллекторной области  $n^+$ -типа и подконтактной области  $n^+$ -типа не учитываются)

$$R_{\kappa} = \frac{2W_{эп} - x'_{\kappa} - x_э}{S_э \cdot q \cdot \mu_n(x_{\kappa}) N_{\partial \kappa}}. \quad (3.18)$$

Градиент  $dn/dx$  можно определяется соотношением

$$dn/dx = n_p(x_э) / (x'_{\kappa} - x_э) \quad (3.19)$$

или, в соответствии с выражениями (3.9),

$$dn/dx = \frac{n_{po}(x''_э) \exp(U_{\bar{\delta}э} / \varphi_T)}{x'_{\kappa} - x''_э}, \quad (3.20)$$

С учетом (3.10), (3.11) и (3.20) выражение (3.8) можно преобразовать к следующему виду:

$$I_э = I_{эo} \exp(U_{\bar{\delta}э} / \varphi_T), \quad (3.21)$$

где  $I_{\varepsilon o} = q \cdot S_{\varepsilon} \cdot n_{p o}(x_{\varepsilon}) [\mu_n(x) \cdot E(x) + D_n(x)/(x'_k - x_{\varepsilon})]$  – начальное (при  $U_{\varepsilon \varepsilon} = 0$ ) значение тока эмиттера.

Инжекционная составляющая тока базы  $I_{\varepsilon u o}$  определяется выражением

$$I_{\varepsilon u} = I_{\varepsilon u o} \exp(U_{\varepsilon \varepsilon} / \varphi_T) \quad (3.22)$$

где  $I_{\varepsilon u o} = q \cdot S_{\varepsilon} \cdot p_{n o}(x_{\varepsilon}') [D_p(x_{\varepsilon}') / \sqrt{D_p(x_{\varepsilon}') \tau_p - \mu_p(x) E(x)}]$  – начальное значение тока;  
 $p_{n o}(x_{\varepsilon}') = n_i^2 / [N_d(x_{\varepsilon}') - N_a(x_{\varepsilon}')]$  – равновесная концентрация дырок в эмиттере;  
 $D_p(x_{\varepsilon}')$  – коэффициент диффузии дырок в эмиттере;  
 $\tau_p$  – время жизни инжектированных дырок в эмиттере;  
 $\mu_p(x)$  – подвижность дырок в эмиттере;  
 $E(x) = \varphi_T \ln[N_{\delta \text{ нов}} / N_{\delta}(x_{\varepsilon}')]$  – напряженность тормозящего поля в эмиттере, образующегося в результате диффузии электронов от поверхности к  $p$ - $n$ -переходу эмиттер – база.

Рекомбинационная составляющая тока базы  $I_{\varepsilon \text{ нов}}$  описывается выражением

$$I_{\varepsilon \text{ нов}} = I_{\varepsilon \text{ нов } o} \exp(U_{\varepsilon \varepsilon} / 2\varphi_T), \quad (3.23)$$

где  $I_{\varepsilon \text{ нов } o} = 0,5q \cdot n_i \cdot N_t \sqrt{S_n \cdot V_{tn} \cdot S_p \cdot V_{tp}} D_{n \text{ нов}} \cdot \tau_{n \text{ нов}} P_{\varepsilon}$  — начальное значение тока;

$N_t$  – концентрация ловушек захвата электронов и дырок;

$S_n, S_p$  – сечения ловушек захвата электронов и дырок;

$V_{tn}, V_{tp}$  – тепловые скорости электронов и дырок;

$D_{n \text{ нов}}$  – коэффициент диффузии электронов на поверхности пассивной базы;

$\tau_{n \text{ нов}}$  – время жизни электронов на поверхности пассивной базы;

$P_{\varepsilon}$  – периметр эмиттера.

Ток  $I_{\varepsilon \text{ нов}}$  в отличие от других составляющих тока базы пропорционален не площади, а периметру эмиттера. Последнее обстоятельство необходимо учитывать при анализе зависимости коэффициента передачи тока от топологических размеров эмиттера (отношения площади к периметру).

Рекомбинационная составляющая тока базы  $I_{\varepsilon p-n}$  находится из выражения

$$I_{\varepsilon p-n} = I_{\varepsilon p-n o} \exp(U_{\varepsilon \varepsilon} / 2\varphi_T), \quad (3.24)$$

где  $I_{\varepsilon p-n o} = \frac{q \cdot S_{\varepsilon} \cdot n_i \cdot l_{\varepsilon \varepsilon} \cdot \varphi_T}{\sqrt{\tau_{n o} \tau_{p o} \varphi_{\varepsilon}}}$  – начальное значение тока;

$\tau_{n o}$  и  $\tau_{p o}$  – времена жизни электронов и дырок в ОПЗ  $p$ - $n$ -перехода эмиттер база.

Времена  $\tau_{n o}$  и  $\tau_{p o}$  уменьшаются с ростом концентрации легирующих примесей в ОПЗ.

На рис. 3.2 приведены графики зависимостей всех рассмотренных токов от напряжения  $U_{\varepsilon \varepsilon}$ .

Следует отметить, что рекомбинационные токи слабее зависят от напряжения база – эмиттер, что учитывается коэффициентом два в знаменателе экспоненциальных множителей выражений (3.23) и (3.24).

С учетом (3.6) и графиков, приведенных на рис. 3.2,а, можно построить график зависимости  $B_{cm}(I_k)$ , представленный на рис.3.2,б.

Сильная зависимость коэффициента передачи тока от тока коллектора имеет место в диапазоне рабочих токов коллектора БТ. Поэтому при проведении исследований зависимости коэффициента  $B_{cm}$  от конструктивно-технологических параметров необходимо поддерживать ток  $I_k$  постоянным, что обеспечивается соответствующим изменением напряжения прямого смещения на  $p-n$ -переходе база – эмиттер  $U_{бэ}$ . Напряжение  $U_{бэ}$ , с учетом

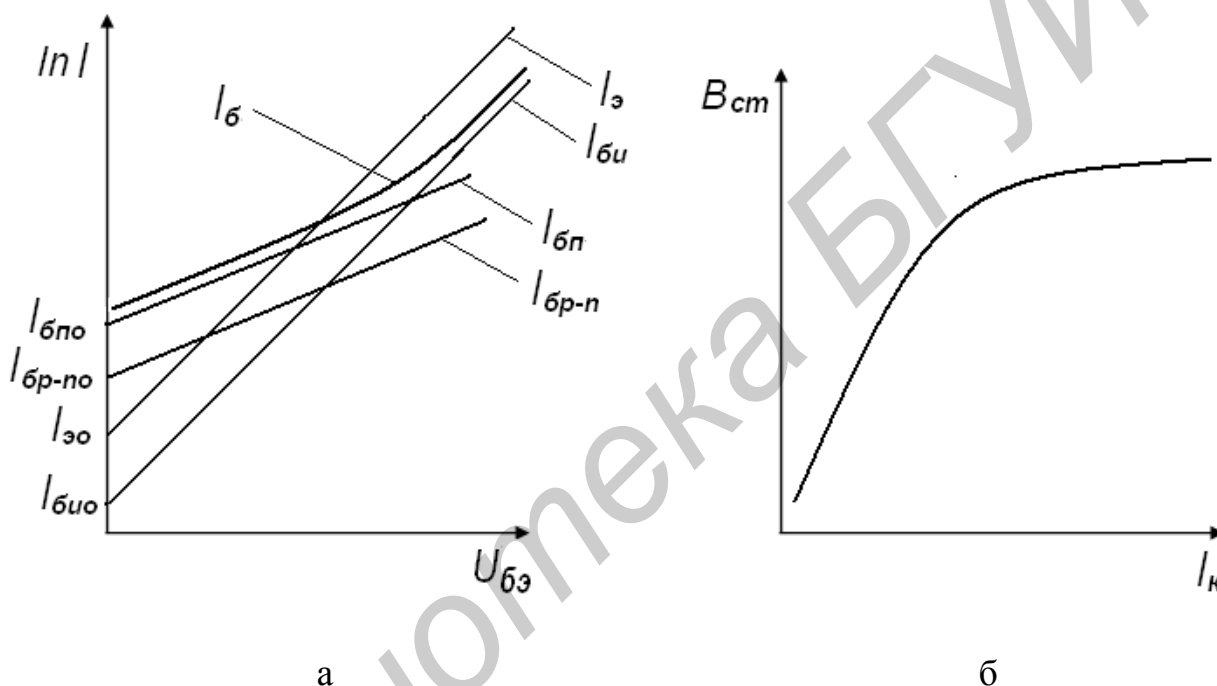


Рис. 3.2. Графики зависимостей:  
а – токов  $I_{э}$ ,  $I_{бу}$ ,  $I_{бпо}$ ,  $I_{бр-п}$  от напряжения  $U_{бэ}$ ;  
б – коэффициента передачи тока  $B_{cm}$  от коллектора  $I_k$

принятого ранее допущения  $I_{э} = I_k$  и соотношения (3.21), может быть рассчитано по формуле

$$U_{бэ} = \varphi_T \ln(I_k / I_{эо}). \quad (3.25)$$

Из выражения (3.25) следует, что при увеличении  $I_{эо}$ , которое может произойти при изменении конструктивно-технологических параметров БТ (при проведении соответствующих исследований), напряжение  $U_{бэ}$  уменьшится, что приведет к уменьшению составляющих тока базы и увеличению коэффициента передачи тока в схеме с общим эмиттером  $B_{cm}$ .

Граничная частота усиления БТ определяется выражением

$$f_T = 1/2\pi(\tau_1 + \tau_2 + \tau_3), \quad (3.26)$$

где  $\tau_1 = C_{\bar{b}\bar{z}}(\varphi_T / I_{\bar{z}} + R_{\bar{b}} / B_{cm})$  – постоянная цепи заряда барьерной емкости  $p$ - $n$ -перехода база – эмиттер  $C_{\bar{b}\bar{z}}$ ;

$\tau_2 = L_a(x'_k - x'_z) / D_n(x''_z)$  – время пролета электронов через квазинейтральную базу;

$\tau_3 = C_{\bar{k}\bar{b}}(R_k + R_{\bar{b}})$  – постоянная цепи заряда барьерной емкости  $p$ - $n$ -перехода коллектор – база  $C_{\bar{k}\bar{b}}$ .

Барьерная емкость  $C_{\bar{b}\bar{z}}$ , состоит из двух параллельно включенных емкостей донной и боковой частей  $p$ - $n$ -перехода база – эмиттер:

$$C_{\bar{b}\bar{z}} = C_{\bar{b}\bar{z} \text{ дон}} + C_{\bar{b}\bar{z} \text{ бок}}, \quad (3.27)$$

где  $C_{\bar{b}\bar{z} \text{ дон}} = \varepsilon\varepsilon_0 \cdot Z_{\bar{z}} \cdot L_{\bar{z}} / l_{\bar{b}\bar{z}}(x_z)$  – емкость донной части  $p$ - $n$ -перехода база – эмиттер;

$$C_{\bar{b}\bar{z} \text{ бок}} = \varepsilon\varepsilon_0 P_{\bar{z}} \int_0^{x_z} \frac{dx}{l_{\bar{b}\bar{z} \text{ бок}}(x)} \text{ – емкость боковой части } p\text{-}n\text{-перехода база – эмиттер;}$$

Поскольку ширина ОПЗ зависит от концентрации легирующей примеси в  $p$ - $n$ -переходе, а она в боковой части  $p$ - $n$ -перехода изменяется по глубине, то  $C_{\bar{b}\bar{z} \text{ бок}}$  также зависит от глубины и с учетом двумерного распределения донорной примеси может быть определена из выражения

$$l_{\bar{b}\bar{z} \text{ бок}} = \sqrt[3]{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 [\phi_{\bar{k}\bar{z} \text{ бок}}(x) - U_{\bar{b}\bar{z}}]}{q [dN_{\bar{d}}(x, y) / dy]}}, \quad (3.28)$$

где  $N_{\bar{d}}(x, y) = N_{\bar{d} \text{ нов}} \cdot \text{erfc} [(x + 1,5y) / 2\sqrt{D_0 t_0}]$  – двумерное распределение донорной (эмиттерной) примеси;

$\phi_{\bar{k}\bar{z} \text{ бок}}(x)$  – контактная разность потенциалов боковой части  $p$ - $n$ -перехода база – эмиттер (зависит от глубины по той же причине, что и ширина  $l_{\bar{b}\bar{z} \text{ бок}}$ ).

Сопротивление базы  $R_{\bar{b}}$  можно представить состоящим из двух последовательно включенных сопротивлений активной и пассивной базы, по которым протекает ток базы от соответствующего вывода до  $p$ - $n$ -перехода эмиттер – база:

$$R_{\bar{b}} = R_{\bar{b} a} + R_{\bar{b} \text{ пас}}, \quad (3.29)$$

где  $R_{\bar{b} a} = L_{\bar{z}} / \left[ 2qZ_{\bar{z}} \int_{x''_z}^{x'_k} q\mu_p(x) N_{\Sigma}(x) dx \right]$  – сопротивление активной части базы;

$R_{б\text{нас}} = d_{эб} / 12qZ_э \int_0^{x_к} q\mu_p(x)N(x)dx$  – сопротивление пассивной части базы;

$d_{эб}$  – расстояние от края эмиттера до контакта к базе.

Барьерная емкость  $C_{кб}$  по аналогии с емкостью  $C_{бэ}$  также состоит из двух параллельно включенных емкостей донной и боковой частей  $p$ - $n$ -перехода коллектор – база:

$$C_{кб} = \epsilon\epsilon_0(S_{кб\text{дон}} + S_{кб\text{бок}}) / l_{кб}, \quad (3.30)$$

где  $S_{кб\text{дон}}$  и  $S_{кб\text{бок}}$  – площади донной и боковой частей  $p$ - $n$ -перехода коллектор – база.

Поскольку коллектором является равномерно легированный эпитаксиальный слой, то концентрации легирующей примеси в боковой и донной частях этого  $p$ - $n$ -перехода одинакова, а значит, и постоянна толщина ОПЗ  $l_{кб}$ .

Напряжения лавинного пробоя плавного  $p$ - $n$ -перехода база – эмиттер рассчитывается по формуле

$$U_{бэ\text{проб}} = 60 \left| \frac{3 \cdot 10^{20}}{a(x_э)} \right|^{2/5} \left( \frac{\Delta E}{1,1} \right)^{6/5},$$

а резкого  $p$ - $n$ -перехода коллектор – база – по формуле

$$U_{кб\text{проб}} = 60 \left| \frac{10^{16}}{N_{дж}} \right|^{3/4} \left( \frac{\Delta E}{1,1} \right)^{3/2}.$$

### 3.2. Проведение исследований

3.2.1. Изучить структуру, топологию и профиль легирования интегрального эпитаксиально-планарного  $n$ - $p$ - $n$  БТ.

3.2.2. Изучить физико-топологическую модель интегрального эпитаксиально-планарного  $n$ - $p$ - $n$  БТ.

3.2.3. С помощью программы NPN физико-топологического моделирования  $n$ - $p$ - $n$  БТ провести теоретические исследования зависимостей:

–  $B_{см}(x_э)$ ,  $B_{см}(N_{дж})$ ,  $B_{см}(N_{дон})$ ,  $B_{см}(S_э/P_э)$ ,  $B_{см}(W_б)$ ;

–  $f_T(x_э)$ ,  $f_T(N_{дж})$ ,  $f_T(L_э, Z_э)$ ,  $f_T(W_б)$ ;

–  $U_{кб\text{проб}}(N_{дж})$ ,  $U_{кб\text{проб}}(N_{дон})$ ,  $U_{бэ\text{проб}}(x_э)$ .

После загрузки программы на экране монитора появится надпись «Выбор варьируемого параметра» и ниже список варьируемых параметров.



Нажать клавишу F4, и в линейке «Выбор варьируемых параметров» появится курсор. Клавишами выбора установить курсор на параметре, который будет изменяться при проведении исследований.

Нажать клавишу ENTER, и в списке исходных данных для моделирования появятся строки с минимальным и максимальным значениями варьируемых параметров и шагом их изменения. В этих и во всех остальных строках необходимо указать численные значения параметров. Ниже приводится список параметров и возможный диапазон их изменения (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Параметры и диапазоны их изменения

Параметр	Значение	
	минимальное	максимальное
$I_k, A$	$10^{-6}$	$10^{-2}$
$U_{кЭ}, B$	1	10
$L_э, см$	$15 \cdot 10^{-4}$	$10^{-2}$
$Z_э, см$	$15 \cdot 10^{-4}$	$10^{-2}$
$X_э, см$	$5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$
$X_k, см$	$10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$
$W_{эп}, см$	$2 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$
$N_{д\ нов}, см^{-3}$	$10^{19}$	$10^{21}$
$N_{a\ нов}, см^{-3}$	$10^{17}$	$10^{20}$
$N_{эп} (N_{дк}), см^{-3}$	$5 \cdot 10^{14}$	$10^{16}$
$T_c, K$	223	353

Задавая минимальное и максимальное значения варьируемых параметров, следует выдерживать следующие соотношения между ними:

$$\begin{aligned} x_э &< x_k; \\ N_{д\ нов} &> N_{a\ нов}; \\ W_{эп} &> x_k. \end{aligned}$$

Во время расчета на экране может появиться сообщение «Нарушается условие существования транзисторной структуры». Это возможно в том случае, когда  $x_k < x_э$ . Для исключения этого необходимо увеличить толщину базы  $W_б$ .

Значения неварьируемых параметров в списке указываются преподавателем.

После формирования списка исходных данных клавишей F2 «Расчет» программа запускается на счет.

По окончании расчета на экране появится надпись «Результаты расчета», которые состоят:

- из значений удельных сопротивлений квадрата областей эмиттера  $R_{э\ пов}$ , пассивной базы  $R_{н\ б\ пов}$ , активной базы  $R_{а\ б\ пов}$  и коллектора  $R_{кол\ пов}$ ;
- из удельных значений барьерных емкостей  $p$ - $n$ -переходов база–эмиттер  $C_{бэ\ о}$  и база – коллектор  $C_{бэ\ о}$ ;
- значений электрических параметров БТ.

Значения удельных сопротивлений и емкостей необходимы для конструктивного расчета резисторов и конденсаторов соответственно. Сопротивление  $R_{н\ б\ пов}$  используется для расчета резисторов на основе базы, а сопротивление  $R_{а\ б\ пов}$  – пинч-резисторов на основе базы.

3.2.4. Оформить результаты исследований в виде таблиц.

3.2.5. На основании физико-топологической модели дать анализ результатов проведенных исследований с указаниями физических причин, их обуславливающих.

3.2.6. Сделать общий вывод по работе, в котором указать основные способы улучшения электрических параметров БТ путем изменения его конструктивно-технологических параметров.

### 3.3. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Эскизы структуры и топологии интегрального БТ.
3. Таблицы результатов исследований.
4. Анализ физических причин, обусловивших полученные зависимости, в соответствии с п. 3.2.5.
5. Общие выводы по работе в соответствии с п. 3.2.6.

### 3.4. Контрольные вопросы

1. Структура, топология и профиль легирования интегрального  $n$ - $p$ - $n$  БТ (назначение областей, особенности топологии, технология изготовления).
2. Физико-топологическая модель интегрального  $n$ - $p$ - $n$  БТ (основные электрические параметры и электрофизические характеристики).
3. Зависимость электрических параметров БТ от конструктивно-технологических параметров (через электрофизические характеристики).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

### *Цель работы:*

Исследовать зависимость электрических параметров полевых транзисторов с управляющим  $p$ - $n$ -переходом (ПТУП) и затвором типа металл–диэлектрик–полупроводник (МДП ПТ) от конструктивных параметров.

Для достижения цели необходимо:

- 1) изучить конструкции МДП ПТ и ПТУП;
- 2) изучить физико-топологические модели МДП ПТ и ПТУП;
- 3) теоретически исследовать зависимость параметров электрических моделей МДП ПТ и ПТУП от их конструктивно-технологических параметров.

### 4.1. Теоретические сведения

#### 4.1.1. Физико-топологическая модель МДП полевого транзистора

Рассматривается одномерная физико-топологическая модель МДП ПТ с коротким каналом (канал, длина которого влияет на величину порогового напряжения).

##### 4.1.1.1. Исходные параметры модели

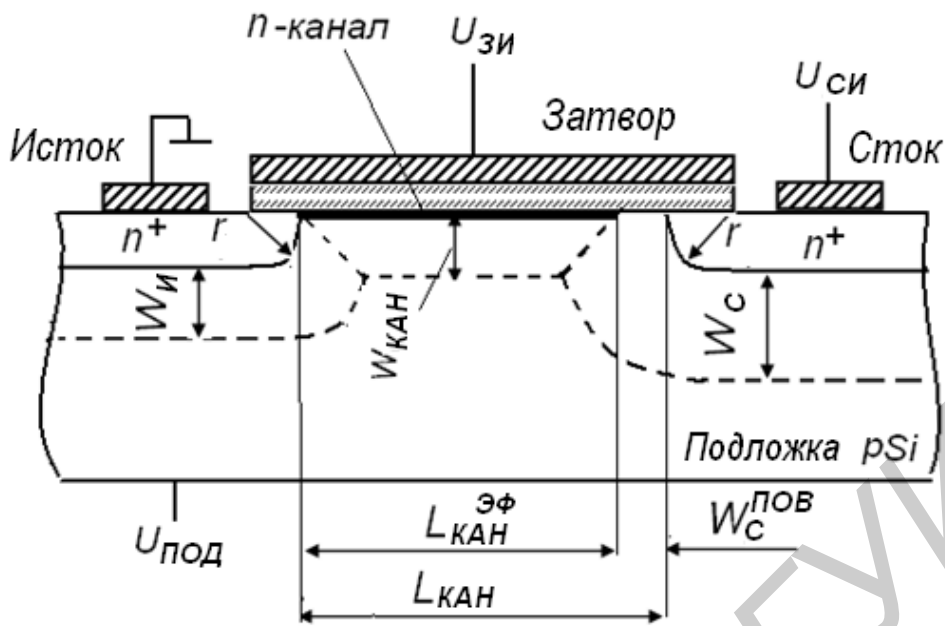
Физические параметры: напряжение плоских зон  $U_{FB}$ , относительная диэлектрическая проницаемость подзатворного окисла кремния  $\varepsilon_{окс}$  и кремния  $\varepsilon_{Si}$ , диэлектрическая постоянная  $\varepsilon_0$ .

Топологические размеры МДП ПТ (рис. 4.1, а): длина канала  $L_{кан}$ , ширина канала  $Z_{кан}$ .

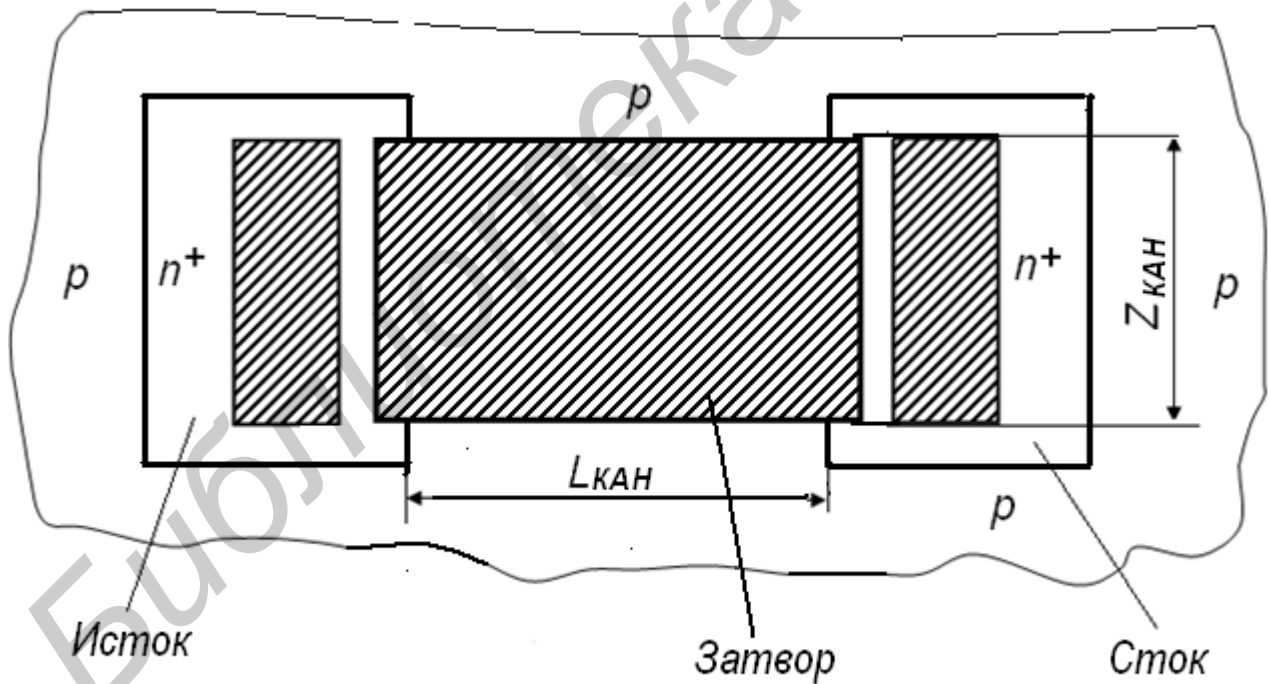
Параметры структуры МДП ПТ (рис. 4.1, б): толщина подзатворного диэлектрика  $t_{окс}$ , толщина областей истока и стока  $r$ , концентрация примеси в подложке  $N_{под}$ .

С целью упрощения анализа сделаны следующие допущения:

- подложка легирована равномерно;
- потенциал на поверхности канала равен удвоенному потенциалу Ферми ( $\varphi_{нов} = 2\varphi_F$ );
- вывод истока заземлен;
- $p$ - $n$ -переходы сток – подложка и исток – подложка резкие, и их глубины залегания в боковом и вертикальном направлениях равны  $r$ ;
- контактная разность потенциалов  $p$ - $n$ -перехода стока (истока) равна потенциалу  $\varphi_{нов}$ .



а



б

Рис. 4.1. Разрез структуры и эскиз топологии МДП ПТ:  
 а – разрез структуры;  
 б – эскиз топологии

#### 4.1.1.2. Пороговое напряжение

Напряжение на затворе, при котором на поверхности подложки вследствие инверсии типа электропроводности образуется проводящий канал, называется пороговым.

Пороговое напряжение МДП ПТ с коротким каналом определяется формой области пространственного заряда (ОПЗ) под каналом. В случае трапециевидальной формы (см. рис. 4.1, а) пороговое напряжение рассчитывается по формуле [3]

$$U_{пор} = U_{FB} + 2\phi_F + \frac{qN_{под} W_{кан}}{2C_{окс} L_{кан}} \left\{ \begin{array}{l} (L_{кан} - W_c^{нов}) + \sqrt{(r + W_u)^2 - W_{кан}^2} + \\ + \sqrt{(r + W_c)^2 - W_{кан}^2} - r \end{array} \right\}, \quad (4.1)$$

где  $W_{кан}$ ,  $W_u$ ,  $W_c$ ,  $W_c^{нов}$  – толщины ОПЗ под каналом, истока, стока в объеме подложки и под затвором соответственно;

$C_{окс} = \epsilon_{окс} \epsilon_0 / t_{окс}$  – удельная емкость МДП затвора.

Толщина  $W_{кан}$  определяется выражением [3]

$$W_{кан} = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(\phi_s + U_{под})}{qN_{под}}}, \quad (4.2)$$

где  $q$  – заряд электрона;

$U_{под}$  – потенциал подложки.

Толщины  $W_u$ ,  $W_c$  рассчитываются по формулам [3]

$$W_u = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(\phi_{p-n} + U_{под})}{qN_{под}}}; \quad (4.3)$$

$$W_c = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(\phi_{p-n} + U_{под} + U_{см})}{qN_{под}}}, \quad (4.4)$$

где  $\phi_{p-n}$  – контактная разность потенциалов  $p-n$ -переходов стока и истока;

$U_{см}$  – напряжение сток – исток.

Область пространственного заряда  $W_c^{нов}$  появляется у стокового конца канала после его перекрытия при напряжении  $U_{см}$  больше напряжения насыщения  $U_{нас}$  и может быть рассчитана по формуле [3]

$$W_c^{нов} = \sqrt{\frac{U_{см} - U_{нас}}{a} + \left(\frac{E_{нас}}{2a}\right)^2} - \frac{E_{нас}}{2a}, \quad (4.5)$$

где  $a = \frac{qN_{\text{под}} V^{\text{нас}} + J_c}{\varepsilon \varepsilon_0 V^{\text{нас}}}$ ;

$U_{\text{нас}} = U_{\text{зи}} - U_{\text{пор}}$  – напряжение на стоке, при котором происходит перекрытие канала у стокового конца;

$E_{\text{нас}} = U_{\text{нас}} / L_{\text{кан}}^{\text{эф}}$  – напряженность поля вдоль канала после его перекрытия;

$V^{\text{нас}} = E_{\text{нас}} \cdot \mu^{\text{эф}}$  – дрейфовая скорость носителей в канале после перекрытия

$J_c = 2 \cdot I_c / Z_{\text{кан}} \cdot r$  – плотность тока стока;

$I_c$  – ток стока.

Эффективная подвижность носителей заряда  $\mu^{\text{эф}}$  определяется выражением [3]

$$\mu^{\text{эф}} = \mu / [F_1(E_1) \cdot F_2(E_{11})], \quad (4.6)$$

где  $\mu$  – подвижность носителей заряда в полупроводнике в слабых электрических полях;

$F_1(E_1)$  и  $F_2(E_{11})$  – функции, описывающие влияние перпендикулярного  $E_1$  и продольного  $E_{11}$  полей в канале на подвижность носителей заряда.

Подвижность

$$\mu = 1 / (1/\mu^{\text{сп}} + 1/\mu^{\text{и}}), \quad (4.7)$$

где  $\mu^{\text{сп}}$  и  $\mu^{\text{и}}$  – подвижности, определяемые рассеянием на кристаллической решетке и ионизированных примесях соответственно.

Подвижность

$$\mu^{\text{сп}} = \mu^{\circ} (T/300\text{K})^{-\alpha}, \quad (4.8)$$

где  $\mu^{\circ}$  и  $\alpha$  – константы для данного типа полупроводника;

$T$  – температура окружающей среды.

Подвижность

$$\mu^{\text{и}} = \mu^{\text{max}} \left[ 1 + \frac{N^{\text{отн}}}{N_{\text{sub}}} \left( \frac{T}{300\text{K}} \right) \right], \quad (4.9)$$

где  $\mu^{\text{max}}$  и  $N^{\text{отн}}$  – константы для выбранного типа полупроводника.

Функция

$$F_1(E_1) = 1 + \beta E_1 = 1 + \beta \frac{C_{\text{окс}}}{4\varepsilon_{\text{окс}} \varepsilon_0} U_{\text{нас}}, \quad (4.10)$$

где  $\beta$  – эмпирический коэффициент ( $\beta = 10^{-6}$  см/В).

Функция

$$F_2(E_{11}) = 1 + \left( \frac{\mu E_{нас}}{V^{max}} \right), \quad (4.11)$$

где  $V^{max}$  – максимальная скорость носителей заряда в полупроводнике ( $V^{max} = 10^7$  см/с).

С ростом напряжений  $U_{си}$  и  $U_{под}$ , а также при уменьшении длины  $L_{кан}$  форма ОПЗ под каналом из трапецеидальной превратится в треугольную. Приведенные аналитические выражения будут приемлемы и в этом случае.

#### 4.1.1.3. Ток стока

Ток стока в области насыщения определяется соотношением [3]

$$I_{с\,нас} = \frac{0,5z\mu^{эф}C_{окс}}{L_{кан} - W_c^{нов}} (U_{зи} - U_{пор})^2. \quad (4.12)$$

При расчете тока  $I_{с\,нас}$  учитываются зависимости  $U_{пор}$ ,  $W_c^{нов}$  и  $\mu^{эф}$  от напряжения  $U_{си}$ .

#### 4.1.1.4. Крутизна

Усилительные свойства МДП ПТ определяются крутизной его передаточной вольт-амперной характеристики (ВАХ)  $I_{с\,нас} = f(U_{зи})$ , которая рассчитывается по формуле [3]

$$S = \left. \frac{\partial I_{с\,нас}}{\partial U_{зи}} \right|_{U_{си}=U_{нас}} = \frac{C_{окс}\mu^{эф}Z_{кан}}{L_{кан} - W_c^{нов}} (U_{зи} - U_{пор}). \quad (4.13)$$

### 4.1.2. Физико-топологическая модель полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом

Рассматривается физико-топологическая аналитическая модель ПТУП с экспоненциальным распределением примеси в канале *p*-типа (канал формируется диффузионным легированием).

#### 4.1.2.1. Принятые допущения:

- *p-n*-переходы затворов смещены в обратном направлении и токи через них равны нулю;
- ток стока протекает только по проводящей части канала, ограниченной ОПЗ *p-n*-переходов затворов;
- *p-n*-переход верхнего затвора является плавным, а нижнего – резким.

#### 4.1.2.2. Исходные параметры модели

Параметры структуры ПТУП (рис. 4.2, а): глубины залегания  $p$ - $n$ - переходов верхнего  $x_{31}$  и нижнего  $x_{32}$  затворов, толщина канала  $A_{кан}$ .

Топологические размеры (рис. 4.2, б): длина канала  $L_{кан}$  и ширина канала  $Z_{кан}$ .

Параметры профиля легирования (рис. 4.2, в): концентрация донорной примеси в нижнем затворе  $N_{Д32}$ ,  $N_M$  и  $x_M$  – значение и координата максимальной концентрации примесей в канале.

Профиль легирования  $p$ -канального ПТУП рассчитывается аналогично  $n$ - $p$ - $n$  БТ (выражения (3.1)–(3.5)). Распределение примесей в канале для удобства интегрирования описывается функцией

$$N(x) = N_{Д32} \exp[g(x - x_{32})] - N_{Д32}, \quad (4.14)$$

где  $g = \ln[N_{max} / N_{Д32}] / (x_{32} - x_{max})$  – параметр распределения результирующей примеси  $N(x) = |N_A(x) - N_D(x)|$  в канале.

#### 4.1.2.3. Напряжение отсечки канала

$$U_O = [q / (2 \cdot \epsilon_{Si} \cdot \epsilon_0 \cdot g^2) \cdot N_{Д32} \cdot \exp(A_{кан} \cdot g)] - \varphi_3, \quad (4.15)$$

где  $\varphi_3$  – контактная разность потенциалов  $p$ - $n$ -переходов затворов.

#### 4.1.2.4 Ток стока

$$I_C = Z_{кан} \cdot E_y \cdot \int_{x_{p1}}^{x_{p2}} q \cdot \mu^{ЭФ} \cdot N(x) dx, \quad (4.16)$$

где  $E_y = dW(y)/dy$  – напряженность электрического поля вдоль канала;

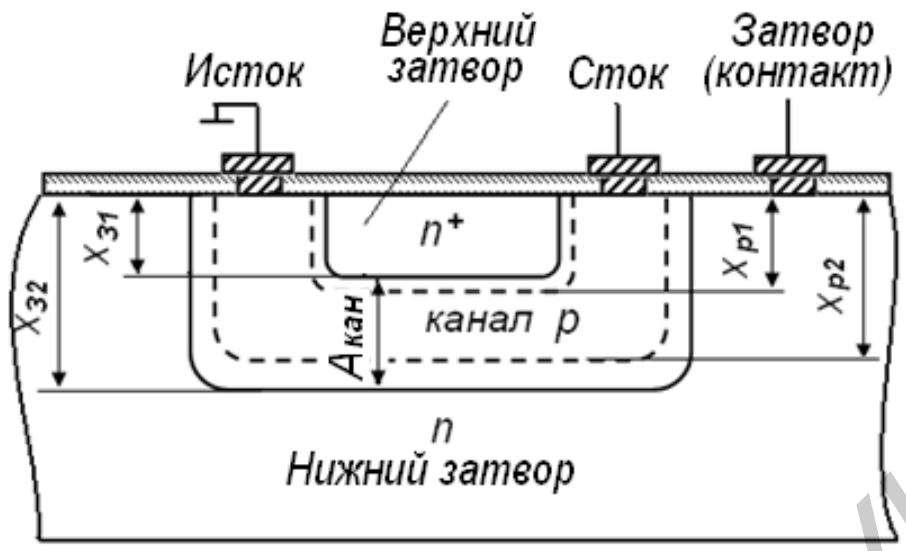
$x_{p1}$  и  $x_{p2}$  – координаты границ ОПЗ  $p$ - $n$ -переходов верхнего и нижнего затворов в канале  $p$ -типа.

Потенциал

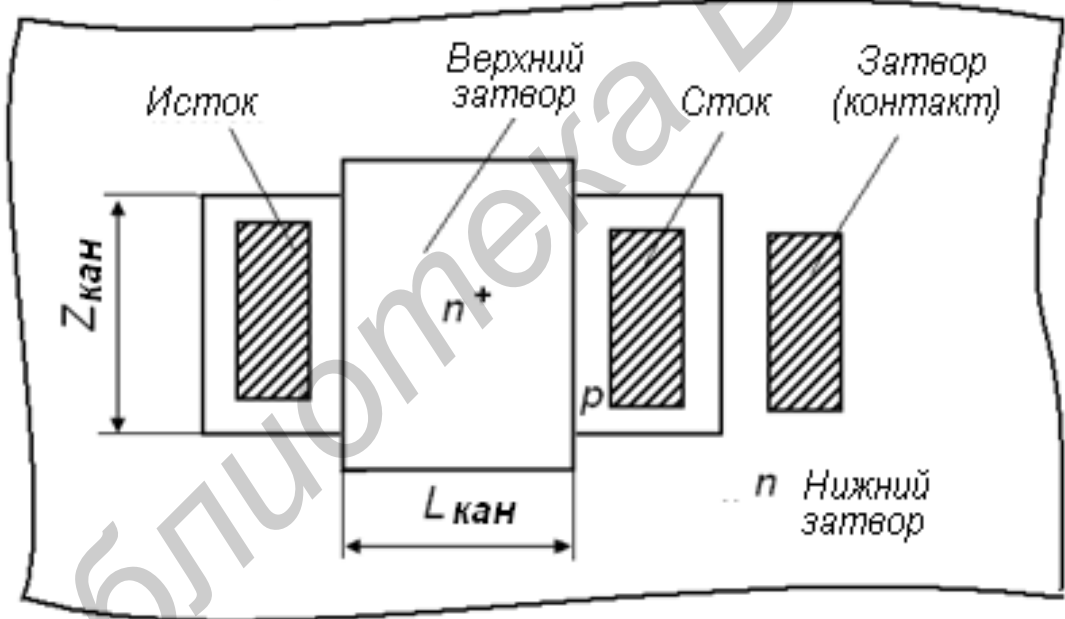
$$W(y) = \varphi_3 + U_{зи} + U(y), \quad (4.17)$$

где  $U(y)$  – падение напряжения сток–исток вдоль канала.





а



б

Рис. 4.2. Структура, эскиз топологии и профиль легирования ПТУП:  
 а – структура; б – эскиз топологии; в – профиль легирования

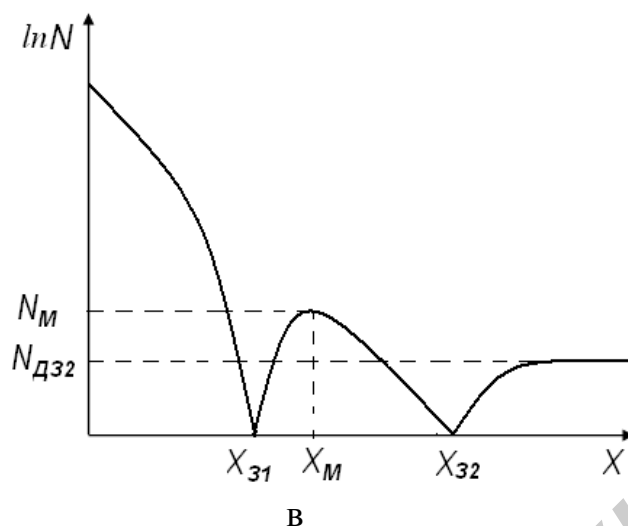


Рис. 4.2. Окончание

Напряжение  $U(y)$  в режиме насыщения изменяется от 0 при  $y = 0$  до напряжения стока насыщения  $U_{с\text{нас}} = U_o - U_{зи}$  при  $y = L_{\text{кан}}$  (стоковый конец канала).

Подвижность  $\mu^{\text{эф}}$  рассчитывается согласно (4.6) – (4.9), (4.11). В (4.11) напряженность  $E_{\text{нас}} = U_{с\text{нас}}/L_{\text{кан}}$ .

Координаты границ ОПЗ с учетом принятых допущений:

$$x_{p1} = x_{31} + 0,5 \cdot A_{\text{кан}} \cdot \left( \frac{W(y)}{U_o + \phi_3} \right)^{1/3}, \quad (4.18)$$

$$x_{p2} = x_{32} - \left[ A_{\text{кан}} + \frac{1}{2g} \ln \left( \frac{W(y)}{U_o + \phi_3} \right) \right], \quad (4.19)$$

Поскольку пределы интегрирования в (4.16) зависят от потенциала  $W(y)$ , то выражение для тока стока насыщения имеет вид

$$I_{с\text{нас}} = \frac{zq\mu^{\text{эф}}}{L} \int_{U_{зи} + \phi_3}^{U_o + \phi_3} \frac{N(x_{p1}) - N(x_{p2})}{g} dW, \quad (4.20)$$

Интеграл в (4.20) вычисляется с учетом (4.18) и (4.19).

#### 4.1.2.5 Крутизна передаточной ВАХ в насыщении

$$S_{нас} = \left. \frac{dI_c}{dW_{зи}} \right|_{W_{зи}=U_{зи}+\phi_3} = \frac{zq\mu^{эф}}{L_{кан} \cdot g} [N(x_{p1}) - N(x_{p2})]. \quad (4.21)$$

При определении  $S_{нас}$  координаты  $x_{p1}$  и  $x_{p2}$  рассчитываются по (4.18) и (4.19) для  $W(y) = \phi_3 + U_{зи}$ .

### 4.2. Проведение исследований

#### 4.2.1. Провести теоретические исследования МДП ПТ.

Используя программу *MOS*, исследовать:

- зависимости напряжения  $U_{пор}$  от напряжения  $U_{си}$ ;
- зависимости напряжения  $U_{пор}$ , крутизны  $S$  и тока  $I_{с\,нас}$  от конструктивно-технологических параметров МДП ПТ (концентрации  $N_{под}$ , толщины  $t_{окс}$ , длины  $L_{кан}$ , ширины  $Z_{кан}$  и глубины  $r$ );

#### 4.2.2. Провести теоретические исследования ПТУП.

Используя программу *JEET*, исследовать:

- зависимости напряжения  $U_o$ , тока  $i_{с\,нас}$  и крутизны  $S_{нас}$  от конструктивно-технологических параметров ПТУП (длины  $L_{кан}$ , ширины  $Z_{кан}$  и толщины  $W_{кан}$  канала, концентрации примеси в нижнем затворе  $N_{Д\,32}$  и другие по указанию преподавателя)

### 4.3 Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Задачи исследований.
3. Эскизы топологии и структуры МДП ПТ и ПТУП
3. Результаты теоретических исследований (графики результатов расчета).
4. Выводы (что установлено, обоснование полученных результатов, рекомендации по улучшению электрических параметров МДП ПТ и ПТУП).

### 4.4 Контрольные вопросы

1. Физико-топологические модели МДП ПТ и ПТУП.
2. Конструкции и технологические процессы изготовления интегральных МДП ПТ и ПТУП.
3. Объяснить результаты теоретических исследований.

## Литература

1. Черняев, В. Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров : учебник для вузов / В. Н. Черняев. – М. : Радио и связь, 1987. – 464 с.
2. Пономарев, М. Ф. Конструкции и расчет микросхем и микроэлементов ЭВА : учебник для вузов / М. Ф. Пономарев. – М. : Радио и связь, 1982. – 288 с.
3. Галузо, В. Простая аналитическая модель МДППТ в режиме сильной инверсии : доклады по электронной физике / В. Галузо, Ю. Синконен. – Отани-еми, 1988. – 20 с.
4. Кобболд, Р. Теория и применение полевых транзисторов / Р. Кобболд ; пер. с англ. – Л. : Энергия, 1975. – 304 с.
5. Матсон Э. А. Конструкции и технология микросхем : учебное пособие для вузов / Э. А. Матсон. – Минск : Выш. шк., 1985. – 207 с.

Библиотека БГУИР

*Учебное издание*

**Галузо Валерий Евгеньевич**  
**Мельничук Виталий Витальевич**  
**Пинаев Александр Иванович**  
**Ситник Геннадий Демьянович**

***ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ.  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ***

**ПОСОБИЕ**

**Редактор Н. В. Гриневич**  
**Корректор И. П. Острикова**  
**Компьютерная верстка Ю. Ч. Ключевич**

Подписано в печать 11.05.2012. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 3,26. Уч.-изд. л. 3,0. Тираж 100 экз. Заказ 762.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.  
220013, Минск, П. Бровки, 6