

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

Факультет компьютерного проектирования

Кафедра электронной техники и технологии

**Я. А. Соловьёв, Г. М. Шахлевич, А. Н. Петлицкий**

**СПЕЦИАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ  
И СУБМИКРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ.  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано УМО по образованию в области информатики  
и радиоэлектроники в качестве пособия для специальности  
1-39 80 03 «Электронные системы и технологии»*

Минск БГУИР 2022

УДК [621.3.049.77+621.317]:076.5  
ББК 32.844.1я73+32.842я73  
С60

**Рецензенты:**

кафедра информационно-измерительной техники и технологий  
Белорусского национального технического университета  
(протокол №3 от 12.10. 2020);

профессор кафедры физики полупроводников и наноэлектроники  
Белорусского государственного университета  
доктор физико-математических наук, профессор Н. А. Поклонский

**Соловьёв, Я. А.**

С60

Специальные материалы и субмикронные компоненты. Лабораторный практикум : пособие / Я. А. Соловьёв, Г. М. Шахлевич, А. Н. Петлицкий. – Минск : БГУИР, 2022. – 104 с. : ил.  
ISBN 978-985-543-612-7.

Включает в себя лабораторные работы по исследованию дефектов кристаллического строения кремниевых подложек микросхем, топологии, элементного состава и электрофизических свойств субмикронных полупроводниковых структур, характеристик многослойных оптически прозрачных пленок на кремнии, а также моделированию и исследованию характеристик транзисторно-транзисторных логических микросхем и микросхем на КМОП-транзисторах.

Предназначено для закрепления теоретических знаний магистрантов, полученных ими на лекциях и в процессе самостоятельного изучения дисциплины, приобретения навыков исследования субмикронных кремниевых структур на современном оборудовании.

**УДК [621.3.049.77+621.317]:076.5  
ББК 32.844.1я73+32.842я73**

**ISBN 978-985-543-612-7**

© Соловьёв Я. А., Шахлевич Г. М.,  
Петлицкий А. Н., 2022  
© УО «Белорусский государственный  
университет информатики  
и радиоэлектроники», 2022

## Содержание

<b>Лабораторная работа №1. ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖЕК МИКРОСХЕМ</b> .....	4
<b>Лабораторная работа №2. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОСЛОЙНЫХ ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНЫХ ПЛЁНОК НА КРЕМНИИ</b> .....	20
<b>Лабораторная работа №3. ИССЛЕДОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ И ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР</b> ....	38
<b>Лабораторная работа №4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУБМИКРОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР</b> .....	55
<b>Лабораторная работа №5. ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРНО-ТРАНЗИСТОРНЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ</b> ..	72
<b>Лабораторная работа №6. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОСХЕМ НА КМОП-ТРАНЗИСТОРАХ</b> .....	88

## Лабораторная работа №1

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖЕК МИКРОСХЕМ

**Цель работы:** изучить виды дефектов кристаллической структуры и их связь с физическими свойствами полупроводниковых материалов и структур, влияние технологических процессов на дефектность структуры материалов микроэлектроники, теоретические основы контроля топологии методом оптической микроскопии; получить практические навыки подготовки образцов кристаллов и оптического контроля топологии и дефектов слоёв; исследовать влияние механической и термической обработок на плотность дефектов кремниевых подложек, особенности микроструктуры их поверхности в зависимости от способа обработки.

#### 1.1. Краткие теоретические сведения

##### 1.1.1. Виды дефектов кристаллической структуры и их влияние на физические свойства полупроводников

Любое отклонение от периодической структуры кристалла называется дефектом. В соответствии с протяженностью дефекта и характером вносимых им искажений решётки различают: точечные, линейные, поверхностные (плоскостные) и объёмные дефекты. Реальные кристаллы всегда несовершенны и многие важные свойства твёрдых тел обусловлены дефектами в такой же степени, как и природой первичного кристалла. Так, проводимость полупроводников может целиком зависеть от ничтожных количеств химически инородных примесей. Дефекты обуславливают окраску кристаллов и оказывают большое влияние на механические, магнитные, электрофизические и другие свойства, диффузию, тепло- и массоперенос.

Физические свойства материалов можно разделить на структурно-нечувствительные и структурно-чувствительные. Первые строго определены для данной фазы и зависят только от состава и кристаллической структуры вещества. Вторые связаны с особенностями реального строения материала, т. е. определяются дефектами решётки.

К *структурно-нечувствительным свойствам* относятся: плотность и модуль упругости (он обусловлен силами межатомного взаимодействия), теплофизические характеристики ( $T_{пл}$ , теплоёмкость и теплопроводность), магнитные свойства диа- и парамагнетиков, оптические и ядерные характеристики.

*Структурно-чувствительными свойствами* являются: сопротивление разрушению и пластичность, величина удельного сопротивления полупроводников и металлов, время жизни носителей заряда, характеристики массопереноса (диффузия), магнитные свойства ферромагнетиков и др.

Большинство дефектов электрически активны сами по себе и в силу того, что все протяжённые дефекты являются геттерами примесных атомов. Установлено, что вакансии и междоузельный атом в Si и Ge образуют систему энергетических уровней в запрещённой зоне (рис. 1.1). Эти уровни могут служить как источниками свободных электронов и дырок, так и центрами рекомбинации и рассеяния, что приводит к изменению электропроводности материала, уменьшает время жизни носителей заряда, сказывается на фотопроводимости и других характеристиках. Значительное влияние оказывают точечные дефекты (в первую очередь вакансии) на процессы диффузии и массопереноса. Их присутствие значительно увеличивает коэффициент диффузии легирующих примесей в Si и Ge.

Дислокации в полупроводниках заметно изменяют электрические свойства. Это связано с наличием вдоль оси дислокации ряда непарных валентных связей, которые влияют как на концентрацию, так и на рассеяние электронов проводимости. Установлено, что в Si и Ge дислокации действуют как акцепторы (энергия активации  $\sim 0,1$  эВ).

В силу существования вдоль линии дислокации объёмного заряда наблюдается заметное рассеяние носителей, особенностью которого является зависимость от ориентации (рис. 1.2). Электроны легко движутся вдоль дислокационной линии, но сильно рассеиваются при движении перпендикулярно ей, т. е. дислокации действуют как проводящие каналы.

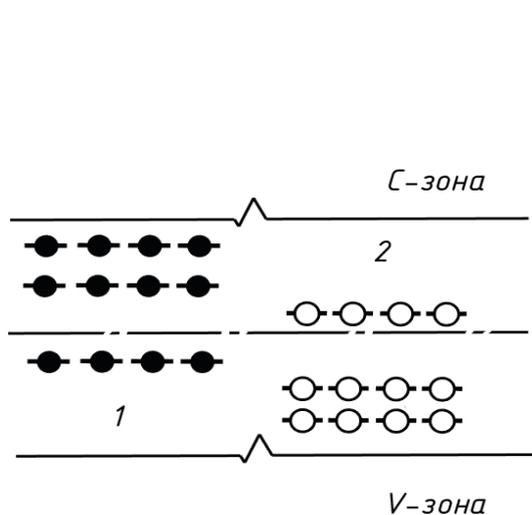


Рис. 1.1. Энергетические уровни вакансии 1 и междоузельного атома 2 в Si

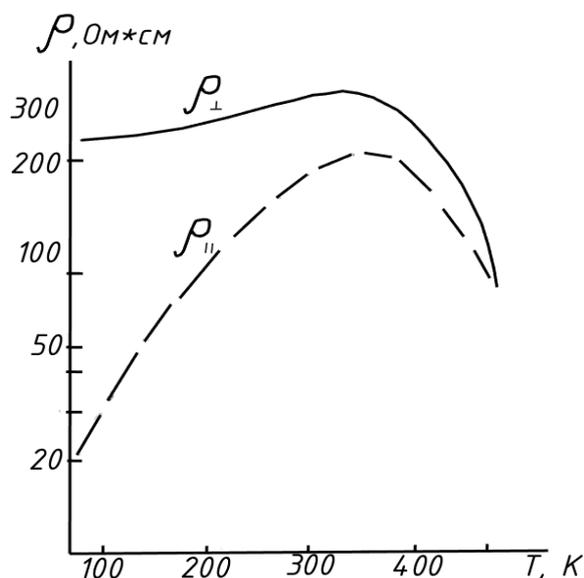


Рис. 1.2. Температурная зависимость удельного сопротивления Si n-типа параллельно  $\rho_{||}$  и перпендикулярно  $\rho_{\perp}$  дислокациям

Установлено, что линейные дефекты влияют на время жизни носителей заряда, диффузию и распределение примесей в полупроводниках.

Поверхностные и объёмные дефекты также в значительной степени определяют электрические свойства материалов, особенно тонкоплёночных.

### **1.1.2. Влияние технологических процессов на дефектообразование и физические свойства полупроводниковых структур**

При изготовлении изделий микроэлектроники полупроводниковые подложки подвергаются различным механическим и термическим воздействиям: шлифовке и полировке, травлению, окислению, диффузии примесей, ионному внедрению, вжиганию (термообработке) контактов, нанесению плёнок металлов и т. д. При этом в структурах возникают дефекты, снижающие их механическую прочность и ухудшающие электрические параметры приборов. Разнообразие и количество возникающих в процессе производства дефектов растёт по мере усложнения технологий.

Нарушения кристаллической структуры полупроводниковых пластин, обусловленные механической обработкой, и дефекты исходного полупроводникового материала развиваются и перемещаются в ходе технологических операций. Особо большую роль играют термические процессы. Однозначно установлено возникновение дислокаций и дефектов упаковки на механических нарушениях при термическом окислении пластин. На параметры приборов ощутимо влияет неравномерное распределение примесей, а оно тем более неоднородно, чем больше в материале дефектов, являющихся геттерами для них. Проводимость, как уже говорилось, крайне анизотропна по отношению к расположению рядов дислокаций (см. рис. 1.2). Поэтому дислокации с преципитатами электрически активных примесей могут образовывать высокопроводящие каналы, приводящие к деградации или ухудшению свойств мелкозалегающих переходов.

Дефекты упаковки, возникающие при термической обработке пластин и эпитаксии, связаны с наличием дислокаций с преципитатами быстро диффундирующих примесей. Они окружены зоной, в которой происходит генерация и рекомбинация носителей. Существует непосредственная корреляция между рекомбинацией неосновных носителей, наблюдаемой в таких зонах, и вольт-амперными характеристиками (ВАХ)  $p$ - $n$ -переходов.

Наиболее сложные по своей структуре несовершенства образуются при взаимодействии дефектов друг с другом и примесями. Электрическая активность несовершенства зависит от его положения по отношению к активным областям прибора. Различия в технологических особенностях изготовления приборов и их функциональном назначении приводят к тому, что влияние одноподобных дефектов будет неодинаковым. Так, в приборах, электрические характеристики которых чувствительны к свойствам границ раздела (например, МОП-структурах) или определяются свойствами тонкого приповерхностного слоя, дефекты, присущие исходной подложке (кластеры точечных дефектов, царапины), являются электрически активными до проведения термических процессов. Внутренние напряжения, связанные с

механической обработки поверхности или нанесением покрытий, сказываются на явлениях переноса заряда после термических операций.

Рассмотрим для примера роль дислокаций, возникающих в виде линий и полос скольжения под действием термических градиентов. Развитие скольжения приводит к тому, что одна часть пластины смещается относительно другой по плоскости скольжения, приводя к образованию на поверхности пластины «ступеньки», высота которой зависит от числа дислокаций в линии скольжения. На рис. 1.3 показано возникновение скольжения при базовой (а), эмиттерной (б) и разделительной (в) диффузии.

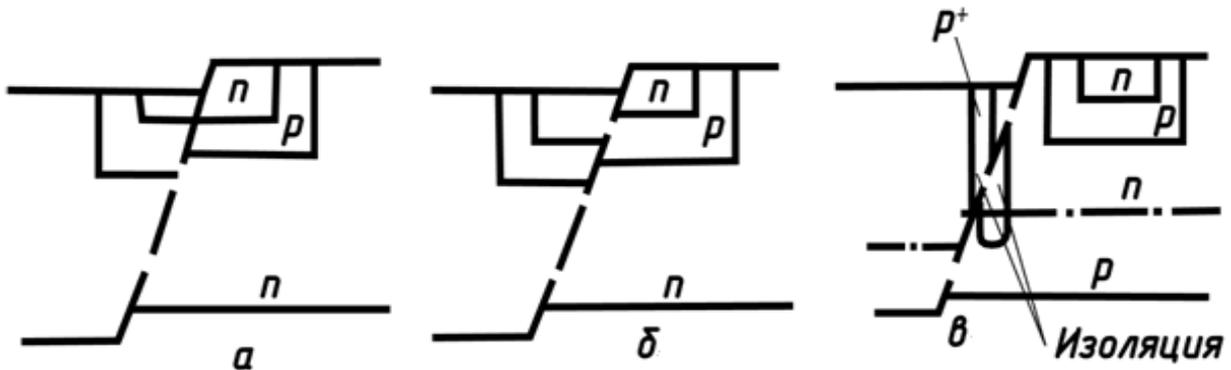


Рис. 1.3. Влияние линий скольжения на полупроводниковые структуры при базовой (а), эмиттерной (б) и разделительной (в) диффузии

В общем случае это приводит к увеличению площади перехода, изменяя его ёмкостные характеристики. Локальное сужение базы (рис. 1.3, а) приводит к увеличению её сопротивления и ухудшению частотных характеристик транзистора. В случае эмиттерной диффузии (рис. 1.3, б) могут образовываться проводящие каналы и расти токи утечки, а при разделительной диффузии (рис. 1.3, в) – нарушаться изоляция.

В настоящее время уменьшения влияния дефектов на параметры приборов обеспечивается контролируемым введением структурных несовершенств. На обратной (нерабочей) стороне пластины создаются повреждения, которые служат «геттером» для быстро диффундирующих примесей и дефектов. Повреждения вводятся методами механической обработки, диффузии, имплантации ионов, нанесением покрытий.

### 1.1.3. Методы исследования дефектов кристаллической структуры

Среди методов выявления и исследования дефектов кристаллического строения можно выделить следующие:

- выявление мест выхода дефектов на поверхность с помощью избирательного травления и наблюдения в оптический микроскоп;
- наблюдение дефектов в объеме с помощью рентгеновских лучей и электронной микроскопии (на просвет и сканированием).

**Метод избирательного травления с оптической микроскопией** находит широкое применение вследствие своей простоты и доступности. Его разрешение достигает 0,5 мкм, что является достаточным для наблюдения фигур травления на таких дефектах, как дислокации, дефекты упаковки, скопления точечных дефектов (кластеры), нарушения, вызванные механической обработкой.

Нарушения структуры вызывают локальное повышение напряжений и являются центрами сегрегации примесей. Это приводит к изменению скорости травления в областях, прилегающих к дефекту, т. е. к появлению на поверхности фигур травления. Так, в местах выхода на поверхность дефектов большой напряжённости, например, дислокаций, образуются пирамидальные ямки с остроконечной вершиной (рис. 1.4, *а*).

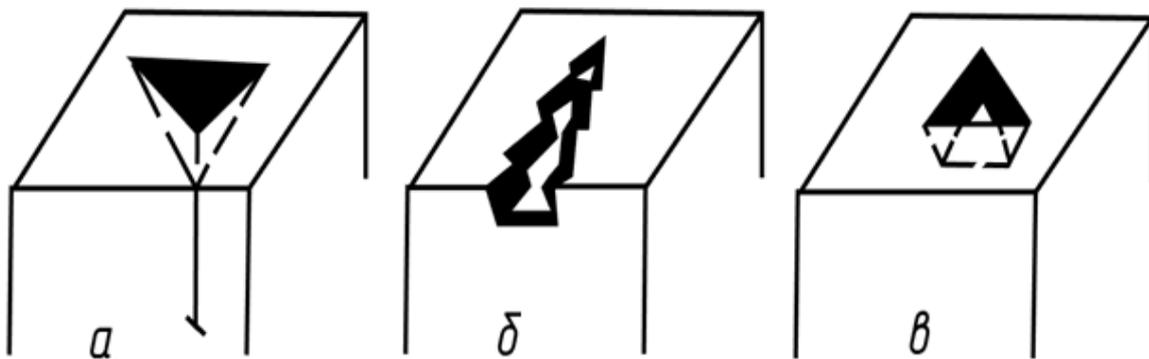


Рис. 1.4. Фигуры травления на дислокациях (*а*), трещинах (*б*) и точечных дефектах (*в*) (поверхность Si с ориентацией (111))

Дефекты малой протяженности (точечные дефекты, трещины, инородные включения) образуют плоскодонные ямки в виде усечённых пирамид (рис. 1.4, *б*, *в*). Форма ямок травления определяется ориентацией поверхности. К недостаткам метода можно отнести его разрушающий характер, невозможность получения информации о пространственном распределении дефектов, невысокую разрешающую способность.

**Методы рентгеновской дифракционной и электронной микроскопии.** При использовании методов рентгеновской дифракционной микроскопии изучаемая дифракционная картина может быть получена как от проходящих, так и от отражённых пучков. В зависимости от условий съёмки искажённые участки решётки могут дать как повышение, так и понижение интенсивности дифрагированных лучей. Основными причинами контраста микродефектов являются первичная экстинкция и аномальное прохождение излучения.

Для исследования локальных микронарушений используются методы Ланга, Бормана (аномального прохождения рентгеновских лучей) и двухкристального спектрометра. Методом Ланга исследуются тонкие кристаллы 100–200 мкм. Рентгеновские лучи (рис. 1.5) от точечного источника попадают на образец 1, установленный в отражающее положение. На плёнке 2

фокусируется дифрагированный пучок, прямой пучок отсекается диафрагмой 3, и получается изображение сечения кристалла. В результате дифракционного контраста нарушения структуры проявляются как тёмные области на светлом фоне.

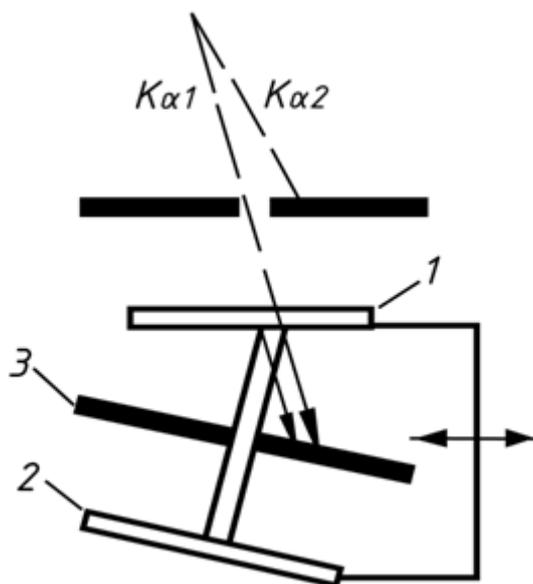


Рис. 1.5. Схема исследований по методу Ланга

Пространственное разрешение в рентгеновской микроскопии ограничивается разрешающей способностью высокочувствительной плёнки и не может быть выше 1 мкм. Поэтому указанные методы применяются для исследования больших площадей относительно толстых кристаллов с малой плотностью дефектов.

Метод дифракционной микроскопии позволяет исследовать малые площади тонких кристаллов (~ 1,0 мкм) с высоким разрешением (~ 0,2 нм). Этим методом изучаются дефекты малых размеров, распределение и особенности дислокационного строения и типы дислокаций, возникающих при диффузии (сплошной и локальной), ионной имплантации и других технологических операциях.

Возможность изучения электрически активных дефектов в полупроводниковых приборах даёт использование сканирующей электронной микроскопии в режиме наведённого тока и катодolumинесценции. Сущность метода состоит в следующем: сфокусированный электронный пучок сканируется по поверхности с *p-n*-переходом, при этом происходит образование электронно-дырочных пар, их диффузия и рекомбинация. Через *p-n*-переход протекает наведённый ток. При наличии дефектов вблизи или внутри *p-n*-перехода на них происходит рекомбинация, уменьшающая поток носителей в области пространственного заряда. Таким образом, выявляются структурные несовершенства на экране видеоконтрольного устройства. При приложении к

*p-n*-переходу смещающего напряжения может быть исследовано взаимодействие между дефектами и полем обеднения.

#### 1.1.4. Методика эксперимента

Методика эксперимента предназначена для подготовки образцов кристаллов ИМС для электронной оцифровки изображения топологии при последовательном удалении слоёв и оптического контроля дефектности слоёв и кремниевой подложки. Автоматизированная оцифровка изображения топологических слоёв ИМС позволяет существенно сократить сроки разработки ИМС, снизить количество ошибок при анализе топологии ИМС, обеспечить документирование результатов контроля дефектов слоёв ИМС. Ключевым фактором для достижения этих целей является обеспечение качественной подготовки поверхности кристалла.

При подготовке образцов для электронной оцифровки топологии ИМС производится последовательное удаление слоёв. Оно осуществляется после разгерметизации корпуса ИМС и извлечения из него кристалла. Основными операциями, обеспечивающими качественную подготовку поверхности ИМС, при последовательном удалении слоёв являются:

- разгерметизация корпуса;
- плазмохимическое травление пассивации (диэлектриков);
- удаление металлизации химическим травлением (Al с подслоями);
- нанесение планаризирующего слоя фоторезиста, контроль дефектов нижних слоёв;
- удаление диэлектрических и поликристаллических кремниевых слоёв химическим травлением;
- декорирование поверхности кремния;
- выявление сильно- и слаболегированных слоёв;
- электронная оцифровка изображения топологии ИМС.

При вскрытии пластмассового корпуса травлением в горячей концентрированной серной кислоте происходит окислительная деструкция пластмассы, при которой рвутся связи C–C, C–H, образуется углекислый газ, вода и освобождается от пластмассы кремниевый кристалл ИМС. Для того чтобы не травился Al на незащищённых пассивацией контактных площадках, травление следует производить в безводной серной кислоте. Для предотвращения обрыва золотых проволочек разварки вскрытую ИМС сначала опускают в четырёххлористый углерод, а только после некоторого выдерживания промывают в деионизованной воде. При использовании двухрядных пластмассовых корпусов для сохранения выводов и рамки подшлифованную ИМС рекомендуется закрепить в резиновый ластик.

Основу комплекса для электронной оцифровки топологии ИМС составляет оптический микроскоп *Leica INM100* – инспекционный микроскоп для электронной промышленности, снабжённый универсальной оптикой

третьего поколения *HCS – OPTICS*, с высоким оптическим разрешением и контрастом, с плавным автоматическим изменением апертурной диафрагмы.

Микроскоп оснащён прецизионным сканирующим столиком *LSTEP13* с минимальным шагом сканирования по осям *X* и *Y* 0,2 мкм и точностью позиционирования не хуже 0,1 мкм. Для печати получаемых изображений комплекс оснащён твердочернильным сублимационным принтером высокого разрешения *Tektronix 840 DP*.

Наличие сканирующего прецизионного столика позволяет оцифровывать топологию при большом увеличении, а затем «сшивать» в единое изображение отдельные записанные компьютером кадры. Количество кадров в «сшитом» изображении может достигать нескольких тысяч. Точность позиционирования столика позволяет совмещать кадры изображения без искажений и значительных рассовмещений, что существенно облегчает работу по анализу изображений.

Плазмохимическому травлению (ПХТ) подвергаются диэлектрики  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$ , а также  $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{TiN}$ .

При подготовке образцов для электронной оцифровки топологии ИМС производится многократное последовательное удаление слоёв. Так как скорость удаления слоёв зависит от состава материалов и микрорельефа, то по мере удаления верхних слоёв происходит значительное увеличение микрорельефа на поверхности кристалла (неоднородность травления, растравы, локальные остатки неудаленных слоёв, продукты травления, загрязнения). С увеличением количества удаленных слоёв неоднородность и микрорельеф поверхности кристалла значительно возрастают. Это приводит к существенному ухудшению качества образца из-за создания на поверхности сильно рассеивающего слоя и, соответственно, увеличения диффузной составляющей коэффициента отражения поверхности образца. В результате во многих случаях анализ мелких элементов топологии ИМС (дефектов) становится невозможным.

В качестве планаризирующего диэлектрика для сглаживания микрорельефа, имеющего близкий к пассивирующему диэлектрику показатель преломления, для обеспечения повышенного разрешения при анализе топологии и дефектов ИМС целесообразно использовать фоторезист, используемый в серийном производстве ИМС.

Декорирование областей полупроводниковых структур предназначено для выявления *p-n*-переходов и слоёв с различной концентрацией легирующей примеси на косых шлифах травлением в различных декорирующих травителях с целью контроля геометрических параметров активной структуры ИМС.

Выявление ионно-легированных и других слоёв связано с образованием окрашенных соединений либо с различной скоростью травления в зависимости от концентрации и типа легирующей примеси.

Состав и назначение травителей, применяемых для травления слоёв, выявления дефектов структуры и *p-n*-переходов, приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

## Состав и назначение травителя

Название травителя	Состав	Назначение
Сиртла	HF – 100 г; H <sub>2</sub> O – 100 г; CrO <sub>3</sub> – 50 г	Декорирование областей полупроводниковых структур
СП-4А	HNO <sub>3</sub> – 25 г; HF – 15 г; CH <sub>3</sub> COOH – 15 г	Полирование и травление поверхностей (111) и (100), выявление двойников и <i>p-n</i> -переходов
Секко	HF – 67 г; H <sub>2</sub> O – 33 г; K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> – 1,5 г	Выявление <i>p-n</i> -переходов и МОП-структур
SD-1	HNO <sub>3</sub> – 18 г; CH <sub>3</sub> COOH – 5 г; HF – 25 г; H <sub>2</sub> O – 10 г; Br <sub>2</sub> – 0,1 г	Выявление дислокаций на всех поверхностях
№11	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> : HNO <sub>3</sub> : CH <sub>3</sub> COOH : H <sub>2</sub> O = 73 % : 3,1 % : 3,3 % : 20,6 %	Травление алюминия и его сплавов
№17	NH <sub>4</sub> F : HF = 7 : 9 (в частях)	Травление SiO <sub>2</sub> , ФСС и БФСС
Для титана	40%-й раствор NH <sub>4</sub> F – 62 г; 70%-й раствор CH <sub>3</sub> COOH – 45 г, деионизованная H <sub>2</sub> O – 400 г	Травление титана и его сплавов

Для биполярных структур с ориентацией (111) используется универсальный селективный травитель Сиртла, дающий наилучшие результаты, когда структура защищена плёнкой двуокиси кремния, а также при очень хорошем качестве поверхности шлифа. Для выявления этим травителем *p-n*-переходов достаточно 5–6 с. Для выявления структур с различной концентрацией одной и той же примеси при разнице концентраций не менее чем в 10 раз минимальное время травления составляет 10 с. Недостаток травителя Сиртла – травление поверхности, если она не защищена, растравливание царапин.

Для выявления *p-n*-переходов в МОП-структурах с ориентацией (100) используется травление образцов во фтористоводородной кислоте под освещением. Недостатком метода является низкая стабильность выявления. Если слои во фтористоводородной кислоте не выявляются, используется травление во фтористоводородной кислоте с добавлением незначительных количеств сернокислой меди, также под освещением. Образец перед травлением необходимо очень тщательно промыть этиловым спиртом. Для выявления МОП-структур используется травитель Секко, который, как и травитель Сиртла, травит поверхность образца. При выявлении *p-n*-переходов в декорирующих травителях образуются окрашенные продукты химической или фотохимической реакции на поверхности областей различного типа

проводимости, при этом *n*-области окрашиваются в белый цвет, а *p*-области выглядят тёмными.

При воздействии фтористоводородной кислоты с добавлением сернистой меди на поверхности шлифа происходит осаждение меди. Эта реакция на *p*-областях протекает быстрее, они окрашиваются в золотистый цвет, на *n*-областях – медленнее и эти области выглядят более тёмными.

Методика выявления слаболегированных слоёв предназначена для определения зашивок ПЗУ методом декорирования слаболегированных слоёв кристаллов ПЗУ. Для улучшения равномерности травления используется смачиватель.

### **1.1.5. Средства измерения, материалы, реактивы**

Используется следующее оборудование и материалы:

- оптический микроскоп *INM100* с увеличением от 100<sup>x</sup> до 1500<sup>x</sup>;
- цифровая камера для микроскопов *Polaroid DMC le*;
- исследуемый образец кристалла ИМС или часть пластины ИМС;
- подложка для наклейки кристалла ИМС – кремниевая пластина;
- вытяжной шкаф и сушильный шкаф, нагретый до температуры от 90 до 110 °С, электронагревательное устройство;
- бинокулярный микроскоп с увеличением 500<sup>x</sup>;
- секундомер, пипетки, пинцеты, ластик, батиновые салфетки;
- лак по ФКСН.10101.00008, фоторезист по ФКСН.10200.00095;
- шкурка шлифовальная бумажная водостойкая;
- стаканы стеклянные емкостью 50, 100, 200, 400, 500, 1000 мл;
- ацетон, спирт этиловый ректифицированный;
- вода деионизованная марки А;
- травители Сиртла, Секко, №11, №17;
- кислота серная концентрированная;
- хрома (VI) окись, ч. д. а.;
- калий двухромовокислый, х. ч.;
- медь сернистая, ч. д. а.

## **1.2. Порядок выполнения работы**

### **1.2.1. Разгерметизация корпусов интегральных микросхем**

Для разгерметизации корпусов интегральных микросхем необходимо:

1. Проверить работу вытяжной вентиляции (скорость движения воздуха в вытяжной вентиляции В-12 должна быть не ниже 0,6 м/с).

2. Налить в ёмкость для травления концентрированную серную кислоту (не более 1/3 от объема), поставить её на нагревательное устройство. Выпаривать два часа при максимальном нагреве.

3. Не производить никаких других работ в это время в скафандре. Установить табличку: «Осторожно! Горячая серная кислота!». Плотнo закрыть шторки скафандра.

4. Шлифовальной бумагой обработать пластмассу с планарной стороны (приблизительно наполовину) так, чтобы над кристаллом толщина оставшейся пластмассы была меньше, чем на периферии.

5. Закрепить корпус ИМС в резиновый ластик (для предотвращения травления наружных выводов и разрушения рамки после вскрытия ИМС).

6. Надеть средства индивидуальной защиты: резиновые перчатки и халат хлопчатобумажный с кислотостойкой пропиткой.

7. Приготовить воду для промывки.

8. Опустить корпус ИМС, укрепленный в ластике, в обезвоженную серную кислоту на  $(3 \pm 2)$  мин. Температура нагрева кислоты должна быть максимально возможной для обычного нагревательного устройства.

9. Вскрытую ИМС промыть спиртом и высушить сжатым воздухом.

10. Проконтролировать качество вскрытия на микроскопе с увеличением от  $100\times$  до  $500\times$ .

11. Если ИМС недовскрыта, то её, не вынимая из ластика, высушить и подвергнуть повторному травлению, перед которым пинцет тщательно протереть бязевой салфеткой до полного удаления следов воды.

12. В 50 мл безводной серной кислоты можно вскрыть до трёх пластмассовых корпусов. Необходимо следить, чтобы вода не попадала в кислоту, т. к. это приводит к стравливанию Al на контактных площадках.

13. После окончания травления дождаться остывания отработанной серной кислоты, разбавить её водой до соотношения 1:10, осторожно слить в канализацию. Многократно прополоскать стакан для травления.

### **1.2.2. Плазмохимическое травление диэлектрических слоёв (пассивации и межслойных диэлектриков)**

Для плазмохимического травления диэлектрических слоёв на установке 08ПХО100Т-001 необходимо выполнить следующие операции:

1. Проконтролировать внешний вид кристалла.

2. Удалить остатки органических загрязнений с поверхности кристалла в плазме  $O_2$  (время обработки – 40 мин).

3. Произвести травление пассивации в плазме хладон-218  $C_3F_8$  (время травления  $(5 \pm 2)$  мин, несколько стадий).

4. Для многослойной структуры диэлектрика типа  $Si_3N_4 + TiN$  производить травление пассивации в плазме со второй стадией (время травления  $(40 \pm 20)$  мин, несколько стадий).

5. Травление  $TiN$  производится в элегазе  $SF_6$  (время травления  $(20 \pm 5)$  мин, несколько стадий).

6. Проконтролировать качество удаления TiN над верхним уровнем металлизации.

7. Плазмохимическую обработку поверхности кристалла произвести в плазме O<sub>2</sub> (время обработки 5 мин, несколько стадий).

8. Проконтролировать качество удаления пассивации под микроскопом на предмет отсутствия пассивации на дорожках металлизации.

### **1.2.3. Удаление металлизации химическим травлением (алюминий с подслоями), удаление диэлектрических (на основе SiO<sub>2</sub>) слоёв**

Для удаления слоя металлизации химическим травлением необходимо:

1. Надеть резиновые перчатки. Проверить работу вытяжной вентиляции.  
2. Налить в ёмкость для травления травитель №11, нагреть его до 50 °С на электроплитке, затем снять его.

3. Установить время на таймере 1 мин, поместить образец в травитель. После срабатывания таймера достать образец из травителя и промыть в деионизованной воде.

4. Проконтролировать полноту удаления Al под микроскопом, если необходимо, повторить п. 3.

5. Если после удаления Al остаются подслои тугоплавких металлов, например, Ti, то образец помещается в ёмкость с травителем для Ti на 15 с при комнатной температуре и эта процедура повторяется до полного удаления Ti.

6. Если после удаления Al остаются подслои W/Ti, то удаление подслоя производится в перекиси водорода, разбавленной деионизованной водой в пропорции 1:1, при температуре 80 °С. Контроль травления проводится каждые 15 с под микроскопом.

7. При наличии подслоя Ti (над или под Al) его удаление производится плазмохимическим методом.

8. Удаление диэлектрических слоёв на основе SiO<sub>2</sub> производится в травителе №17 (фосфорно-силикатное и боро-фосфорно-силикатное стекло) либо в разбавленной HF. Промывка в деионизованной воде, контроль под микроскопом проводится через 20 с.

9. Если межслойный диэлектрик представляет собой слой Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, то его удаление производить плазмохимическим методом.

### **1.2.4. Нанесение планаризирующего слоя фоторезиста, контроль дефектов нижних слоёв**

Для нанесения планаризирующего слоя фоторезиста и контроля дефектов нижних слоёв необходимо:

1. Подготовить образец с контролируемым слоем, проведя вскрытие диэлектрического слоя, нанесённого на контролируемый слой, путём удаления одного или нескольких верхних слоёв структуры, например:

- пассивации;
- пассивации с последующим удалением второго металла и частичное удаление межслойного диэлектрика;
- последующее удаление на предыдущем образце межслойного диэлектрика, первого металла и межслойного диэлектрика.

2. Проконтролировать визуально на оптическом микроскопе качество удаления верхних слоёв и отсутствие посторонних включений, затрудняющих наблюдение топологических элементов.

3. Протереть подложку, на которую будет наклеиваться исследуемый образец салфеткой, смоченной спиртом.

4. Проконтролировать на микроскопе планарность подложки на увеличении, которое будет использоваться при электронной оцифровке топологии слоя или дефекта.

5. Протереть обратную сторону исследуемого образца салфеткой, смоченной в спирте, проконтролировать планарность образца, лежащего на подложке. В случае неудовлетворительной планарности подшлифовать обратную сторону образца.

6. Нанести каплю химически стойкого лака на подложку, немного её размазать, наложить на неё образец и прижать через салфетку.

7. Проконтролировать планарность приклеенного образца на микроскопе, в случае необходимости повторить п. 5.

8. Приклеенный образец положить в сушильный шкаф для задубливания лака на время от 10 до 15 мин.

9. Дополнительно нанести на поверхность исследуемого образца планаризирующий диэлектрический слой, коэффициент преломления  $n$  которого составляет от 0,8 до 1,2 коэффициента преломления вскрытого диэлектрического слоя, а толщина  $d$ , мкм, удовлетворяет условию

$$B \leq d \leq \frac{\Delta f}{\sqrt{\frac{n^2 - A^2}{n^2 \cdot (1 - A^2)} - 1}}, \quad (1.1)$$

где  $B$  – средняя глубина неровностей поверхности диэлектрического слоя, мкм;

$\Delta f$  – глубина резкости объектива, мкм;

$n$  – показатель преломления планаризируемого вещества;

$A$  – апертура объектива.

Для этого необходимо пипеткой нанести одну-две капли фоторезиста и развести его десятью каплями ацетона. Размешать полученный раствор и нанести каплю смеси на поверхность образца и оставить для высыхания.

10. Проконтролировать на микроскопе при требуемом увеличении планарность нанесенной плёнки фоторезиста и при меньшем увеличении – отсутствие посторонних включений, затрудняющих наблюдение топологических элементов.

11. При некачественном нанесении смыть фоторезист с поверхности с помощью батистовой салфетки, смоченной в спирте, и повторить пп. 9, 10.

12. Произвести визуальный контроль дефектов нижних слоёв (электронную оцифровку слоя топологии) с помощью оптического микроскопа и цифровой камеры.

13. Задокументировать результаты на магнитном носителе.

### **1.2.5. Декорирование областей полупроводниковых структур**

Для декорирования областей полупроводниковых структур необходимо:

1. Приготовить травитель Сиртла и дать ему выстоять не менее 2 ч.  
2. Приготовить травитель состава: несколько кристаллов серноокислой меди, растворенных в HF.

3. Приготовить травитель Секко и дать ему выстоять не менее 2 ч.

4. Декорировать структуры биполярных ИМС:

4.1. Тщательно вымыть образец в этиловом спирте батистовой салфеткой и проконтролировать чистоту шлифа под микроскопом.

4.2. Протравить в травителе Сиртла косой шлиф в течение 5-6 с для выявления *p-n*-переходов.

4.3. Промыть образец деионизованной водой, протереть спиртом и проконтролировать под микроскопом результат травления.

5. Декорировать косые шлифы МОП-ИМС:

5.1. Поместить образец во фтористоводородную кислоту.

5.2. Включить подсветку на время 3–5 мин.

5.3. Промыть образец в деионизованной воде (30 с), промокнуть салфеткой, смоченной в спирте, и проконтролировать результат травления под микроскопом.

5.4. В случае невыявления *p-n*-переходов в HF тщательно вымыть образец этиловым спиртом и поместить его в травитель с серноокислой медью (см. п. 2) под светом на 30–40 с.

5.5. Промыть образец в деионизованной воде и промокнуть салфеткой, смоченной в спирте. Проконтролировать результат под микроскопом.

5.6. Для выявления *p-n*-переходов в травителе Секко достаточно травить образец 10 с под светом, промыть водой, протереть спиртом и проконтролировать результат травления под микроскопом.

### **1.2.6. Выявление слаболегированных слоёв для определения зашивки постоянного запоминающего устройства**

Для выявления слаболегированных слоёв необходимо:

1. Тщательно протереть образец салфеткой, смоченной спиртом.

2. Проконтролировать чистоту образца под микроскопом.

3. Поместить образец на 3–5 мин в ёмкость со смачивателем.

4. Промыть образец в проточной деионизованной воде в течение 5 мин.

5. Приготовить травитель состава: 20 мл HF, четыре капли концентрированной HNO<sub>3</sub> и четыре капли травителя Секко. Перемешать.
6. Поместить образец в приготовленный травитель на время от 15 с до 2 мин при включённой подсветке до сильного его потемнения.
7. Промыть образец в проточной деионизованной воде в течение 3–5 мин и высушить сжатым воздухом. Не протирать!
8. Результат выявления проконтролировать под микроскопом.

### 1.2.7. Электронная оцифровка изображения поверхности

Для проведения электронной оцифровки изображения необходимо:

1. Включить (последовательно!) камеру, микроскоп, компьютер.
2. Поместить на столик под микроскоп образец с топологическим слоем и выровнять его так, чтобы левый нижний угол образца совпадал с левым нижним углом окошка в программе управления работой камеры.
3. Вызвать на компьютере программы работы камеры *DMC1e* и сканирующего столика *Wincom32*, согласования работ камеры и столика *PLSaver*.
4. Включить подпрограмму «Настройка» *PLSaver*, в которой установить шаг сканирования и количество кадров по осям *X* и *Y*, выбрать каталог для записи, выбрать общую часть имени, установить резкость изображения, используя запись координат трёх точек плоскости кристалла.
5. Произвести сканирование и запись изображения необходимой площади образца в файлах формата *tiff*. Сканирование образца производится по оси *X* слева направо, по оси *Y* – снизу вверх.
6. После окончания сканирования и записи изображения закрыть программы *DMC1e*, *Wincom32*, *PLSaver*.
7. Открыть программу *Photoshop* и через команды **Файл, Автоматизация, Пакетная обработка** перевести записанные файлы из формата *tiff* в формат *bmp*.
8. Закрыть программу *Photoshop*. При необходимости произвести распечатку полученного изображения всего топологического слоя или отдельных фрагментов в указанном разработчиками масштабе.

### 1.3. Содержание отчёта

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения о дефектах кристаллического строения и их влиянии на свойства кремния и кремниевых структур.
3. Методы и оборудование для выявления дефектов кристаллического строения и топологии кремния и кремниевых структур.
4. Методика подготовки исследуемых образцов ИМС или кремниевых структур для оптического контроля дефектов топологии и структуры.

5. Результаты оцифровки и анализа дефектности кристаллического строения и топологии исследуемых образцов кремния и его структур.

6. Выводы.

#### 1.4. Контрольные вопросы

1. Какие бывают виды дефектов кристаллического строения, их взаимодействие между собой и с примесями?

2. Каково влияние дефектов на физические свойства полупроводников?

3. Как происходит образование дефектов в ходе технологических операций производства изделий микроэлектроники?

4. Каково влияние дефектов, вводимых в ходе технологических операций, на свойства кремния и кремниевых структур?

5. Какие существуют методы выявления дефектов кристаллического строения кремния и кремниевых структур?

6. В чём состоит необходимость автоматизированной оцифровки изображения топологических слоёв ИМС?

7. Какие основные операции обеспечивают качественную подготовку поверхности ИМС при последовательном удалении слоёв?

8. Какие травители используются для биполярных структур с ориентацией (111) и для выявления  $p$ - $n$ -перехода в МОП-структурах с ориентацией (100)? Каковы их недостатки?

9. Для чего предназначена методика выявления слаболегированных слоёв?

#### Список использованных источников

1. Кочемировский, В. А. Дефекты кристаллической структуры полупроводниковых материалов : учеб. пособие / В. А. Кочемировский, И. А. Соколов. – СПб. : СПбГУ, 2013. – 307 с.

2. Рейви, К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии / К. Рейви ; пер. с англ. В. В. Высоцкой, П. П. Поздеева, Т. М. Ткачёвой, О. П. Фёдоровой. – М. : Мир, 1984. – 472 с.

3. Матаре, Г. Электроника дефектов в полупроводниках / Г. Матаре. – М. : Мир, 1974. – 464 с.

4. Краткая энциклопедия по структуре материалов / под ред. Д. В. Мартина ; пер. с англ. А. А. Шустикова, под ред. Н. И. Бауровой. – М. : ИЦ «Техносфера», 2011. – 608 с.

5. Груздев, В. В. Входной и технологический контроль материалов и структур твердотельной электроники / В. В. Груздев, Ю. В. Колковский, Ю. А. Концевой. – М. : Техносфера, 2017. – 197 с.

## Лабораторная работа №2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОСЛОЙНЫХ ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНЫХ ПЛЁНОК НА КРЕМНИИ

**Цель работы:** изучить теоретические основы неразрушающего контроля толщин и оптических параметров наноплёнок методом спектральной эллипсометрии, получить практические навыки по определению толщины и коэффициента преломления оптически прозрачных плёнок в многослойных структурах.

#### 2.1. Краткие теоретические сведения

Уникальное сочетание физико-химических свойств  $\text{SiO}_2$  обуславливает его применение в качестве многофункционального диэлектрика.  $\text{SiO}_2$  используется в качестве диэлектрического слоя в МОП-структурах, электрической изоляции элементов ИС и межслойной изоляции многослойной металлизации, маски и источника диффузанта при легировании, защитного или пассивирующего покрытия, геттерирующих слоёв и др.

Свойства плёнок, используемые для указанных целей, должны удовлетворять ряду требований. Так, наиболее важными электрофизическими параметрами являются удельное сопротивление, пробивное напряжение и электрическая прочность, относительная диэлектрическая проницаемость, плотность поверхностных состояний и др. Важное значение имеет термическая и химическая стойкость. Но если для пассивирующих плёнок необходимо, чтобы относительная диэлектрическая проницаемость была минимальной, то для диэлектрика затвора МОП-транзисторов она должна быть максимальной для создания эффективного управляющего поля между затвором и полупроводником. Для маскирующих покрытий важна селективность по отношению к определённым технологическим факторам (реагентам, плазме, температуре и др.), отсутствие дефектов, адгезия к подложке. Во всех случаях плёнка должна быть однородна по структуре и составу, что наиболее полно реализуется в аморфных слоях.

##### 2.1.1. Получение плёнок $\text{SiO}_2$

Метод термического **окисления** – это окислительная обработка поверхности кремниевых пластин в среде сухого, влажного кислорода или парах воды при температурах 900–1350 °С. Кинетический закон роста оксидной плёнки имеет линейно-параболический вид. Линейный рост, когда толщина плёнки пропорциональна времени окисления, реализуется в начале процесса, когда поверхность кремния свободна, а также при температурах менее 1000 °С. В остальных случаях окисление протекает в соответствии с параболическим законом. Окисление в среде влажного кислорода или парах

воды при прочих равных условиях протекает с существенно большей скоростью, чем в среде сухого кислорода из-за значительно большей поверхностной концентрации окислителя.

Кроме температуры и давления окислителя, на скорость окисления существенно влияет концентрация примеси в подложке. Так, при окислении кремния с концентрацией фосфора  $10^{21}$  см<sup>-3</sup> при 850 °С и давлении водяного пара 120 атм. за 1 ч образуется слой толщиной 2 мкм. На чистом кремнии в тех же условиях образуется плёнка толщиной лишь 0,35 мкм.

Кристаллографическая ориентация поверхности кремния также влияет на скорость окисления. Так, скорость роста оксидной плёнки во влажном кислороде при 1000 °С для плоскости (100) составляет 0,502 нм/с, для (110) – 0,577 нм/с и для (111) – 0,580 нм/с.

«Скоростным» является также пироженное окисление кремния. Собственно пироженным является этап получения паров воды вне реактора при взаимодействии водорода и кислорода. Такой метод гарантирует получение высокочистых паров воды благодаря высокой чистоте исходных газов и синтезу воды в непосредственной близости от реактора.

По своим свойствам пленки SiO<sub>2</sub>, полученные термическим окислением, близки к стекловидному кремнезёму. Для улучшения их свойств при окислении в газовую среду вводят галогены (например, HCl). При этом увеличивается диэлектрическая прочность, уменьшается плотность поверхностных состояний, а также содержание примесей (за счёт образования летучих хлоридов), т. е. обеспечивается эффект геттерирования.

К недостаткам термического оксида кремния следует отнести высокие температуры обработки, что приводит к автолегированию и изменению параметров распределения примесей в активных областях полупроводниковых структур, при недостаточной очистке поверхности кремния перед окислением в плёнке возможно образование участков с микротрещинами, что снижает её защитные свойства и др.

«Прямым» методом получения SiO<sub>2</sub> является электрохимическое окисление кремния. Процесс проводят или в специальной электролитической ячейке, или в кислородсодержащей низкотемпературной плазме. Электролитом служит деионизованная вода, органические растворители, спирты, гликоли. Неорганические компоненты добавляются для регулирования проводимости. Подавая напряжение на электроды, создают условия для диссоциации молекул воды с образованием атомарного кислорода, окисляющего кремниевый анод.

Электрические и маскирующие характеристики анодных плёнок не выше оксидов, полученных во влажном кислороде. Лучшими свойствами обладают плёнки, сформированные низкотемпературным ионно-плазменным окислением. Скорость такого окисления составляет 8–10 нм/мин.

**К методам получения плёнок SiO<sub>2</sub> осаждением в вакууме** относятся термовакuumное испарение, катодное, ионно-плазменное и реактивное распыление. При термовакuumном испарении мишени из SiO<sub>2</sub> подвергаются термической диссоциации, поэтому состав осаждённых плёнок существенно

отличается от состава мишени –  $\text{SiO}_2$  частично восстанавливается до  $\text{SiO}$ . Если наличие  $\text{SiO}$  в плёнке недопустимо, её подвергают кратковременной термоокислительной обработке.

Эти недостатки отсутствуют при ионно-плазменном и реактивном распылении. В первом методе в качестве мишени используют плавленный кварц, во втором – исходным материалом является кремний. Скорость осаждения плёнок  $\text{SiO}_2$  этими методами достигает 100 нм/с и более.

В технологии полупроводниковых приборов и микросхем широко применяются методы осаждения  $\text{SiO}_2$  из рабочей среды, содержащей газообразный источник кремния. Для этого используют реакции пиролиза, окисления или гидролиза его легколетучих соединений  $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ ,  $\text{SiH}_4$ ,  $\text{SiCl}_4$  и др. Наиболее распространен пиролиз кремнийорганических соединений, при котором в качестве продукта реакции выделяется  $\text{SiO}_2$ .

Достоинствами метода являются высокие однородность, качество плёнки и воспроизводимость рельефа. Однако повышенные температуры процесса и выделение углеводородных радикалов затрудняют использование этого метода для плёнки  $\text{SiO}_2$  в контакте с алюминиевой металлизацией. Слои  $\text{SiO}_2$  поверх алюминия предпочтительнее осаждать силановым методом, хотя в этом случае плохо воспроизводится рельеф.

Дополнительную термообработку (около 900 °С) часто применяют для улучшения свойств плёнки  $\text{SiO}_2$  во всех методах осаждения. При выборе метода получения плёнки  $\text{SiO}_2$  необходимо учитывать назначение слоя, скорость роста, физико-химические особенности образующейся в данном методе плёнки, структуру, на которой формируется оксид, и другие требования.

### 2.1.2. Свойства и получение нитрида кремния

Нитрид кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$  является бинарным неорганическим химическим соединением, представляющим собой соединение кремния и азота. Нитрид кремния обладает высокой диэлектрической проницаемостью по сравнению с оксидом кремния. Слои  $\text{Si}_3\text{N}_4$  обладают хорошими маскирующими свойствами по отношению к ионам различных металлов, а также способностью маскировать полупроводник относительно действия кислорода и паров воды при температурах свыше 1000 °С. С использованием этого явления был разработан метод локального окисления кремния, который в настоящее время широко используется в технологии микроэлектронных устройств.

К основным характерным свойствам плёнок нитрида кремния относятся:

а) высокая диффузионная стойкость по отношению к влаге, ионам щелочных металлов, а также диффундирующим элементам, широко применяемых в электронной технике;

б) хорошие электроизолирующие и диэлектрические свойства;

в) повышенная химическая стойкость в агрессивных газовых и жидких средах (в том числе в условиях высоких температур), не исключающая, однако, проведения фотолитографических операций;

г) химическая инертность по отношению к материалам, широко применяемым в технологии полупроводниковых приборов;

д) высокая термическая стабильность.

Основные характеристики  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$  приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Свойства нитрида и диоксида кремния

Материал	Ширина запрещённой зоны $E_g$ , эВ	Относительная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon$	Коэффициент преломления $n$	Электрическая прочность $E$ , В/м	Плотность заряда на границе с Si $q$ , $\text{м}^{-2}$
$\text{SiO}_2$	8	4	1,5	$10^9$	$10^{14}$
$\text{Si}_3\text{N}_4$	4,5	6–9	2,0	$10^9$	$10^{16}$

Плёнки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  находят широкое применение в производстве интегральных микросхем и полупроводниковых приборов для защиты поверхности кремниевой, арсенид галлиевой подложек при осуществлении процессов локальной диффузии, локального окисления, локального травления, для защиты готовых структур от окружающей среды, а также в качестве диэлектрического слоя в МДМ- и МДП-структурах. Хорошее сочетание свойств можно достичь также в многослойных плёнках  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ .

Благодаря высокому показателю преломления, регулируемому соотношением потока рабочих газов, плёнки нитрида кремния нашли широкое применение в оптике (например,  $\text{NH}_3/\text{SiH}_4$  при плазмохимическом или магнетронном осаждении).

На практике для получения плёнок  $\text{Si}_3\text{N}_4$  прямое азотирование кремния не используется в силу высоких температур и малых скоростей роста. Обычно их получают по реакциям взаимодействия силана с аммиаком (или азотом) при температурах 100–400 °С. Диэлектрическая проницаемость и показатель преломления плёнок сильно зависят от условий синтеза. Среди вакуумных методов формирования плёнок  $\text{Si}_3\text{N}_4$  наибольшее распространение имеют:

а) плазмохимическое осаждение из газовой фазы (рис. 2.1, а) – реакция химического взаимодействия исходных газообразных реагентов в плазме тлеющего разряда;

б) магнетронное осаждение (рис. 2.1, б) – формирование тонкой плёнки нитрида кремния в результате распыления мишени в среде смеси газов Ar и  $\text{N}_2$  в плазме аномального тлеющего разряда.

Широкое применение в конструкции кремниевых приборов получили структуры оксид–нитрид–оксид (ОНО), имеющие по сравнению с оксидом более высокую эффективную диэлектрическую проницаемость. В запоминающих структурах  $\text{Si-SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2\text{-Si}$  нитрид кремния используется как активная среда.

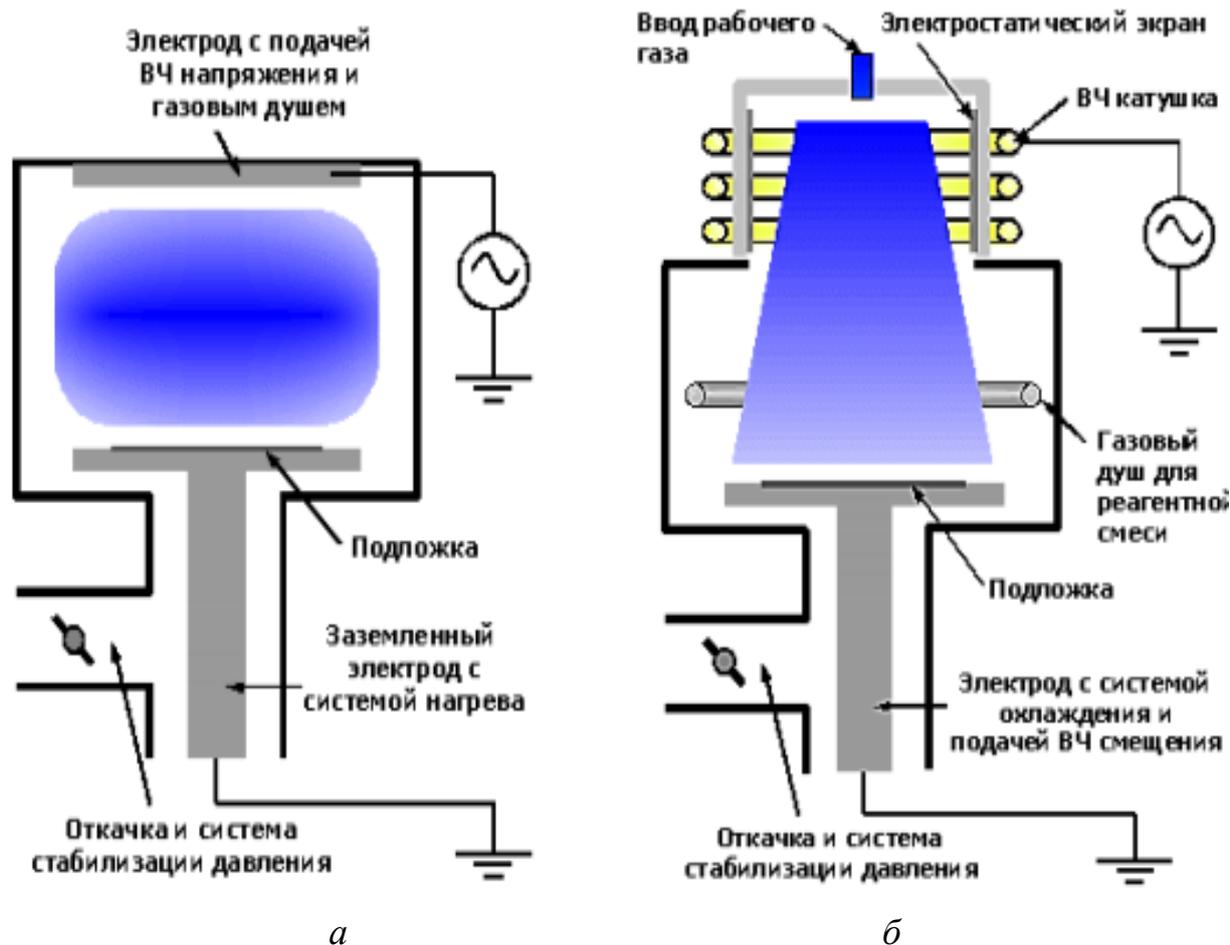


Рис. 2.1. Схемы плазмохимического осаждения  $\text{Si}_3\text{N}_4$ :  
*a* – магнетронное; *б* – с индукционным возбуждением плазмы

В настоящее время разрабатываются матрицы электрически перепрограммируемого запоминающего устройства (ЭППЗУ) на основе структуры ОНО емкостью  $10^{12}$  бит/кристалл. Время жизни электронов и дырок на ловушках в  $\text{Si}_3\text{N}_4$  при 300 К составляет 10 лет. ЭППЗУ на кремнии заменяют магнитные и оптические носители памяти.

### 2.1.3. Физические основы и применение эллипсометрии

Для проведения высокоточных измерений толщины одно- и многослойных тонкоплёночных структур, а также исследования спектральных оптических постоянных (показатель преломления и коэффициент поглощения) структурных свойств материалов применяется метод эллипсометрии. Под этим термином понимают оптический метод исследования поверхностей или объёмных сред, который основан на анализе амплитудных и фазовых изменений световой волны при её взаимодействии с исследуемым объектом. В более широком аспекте об эллипсометрии говорят, как о разделе оптики, в

котором рассматривается взаимодействие поляризованного света с отражающей поверхностью или слоистыми структурами. Если анализируют поляризационные свойства волны, прошедшей через среду, говорят об эллипсометрии пропускания. Однако чаще приходится иметь дело с волной, отражённой от поверхности образца. В этом случае говорят об отражательной эллипсометрии. Спектральный диапазон, в котором используется этот метод, перекрывает область от микроволнового (радиоволновая эллипсометрия) до мягкого рентгеновского излучения. Наиболее часто эллипсометрические исследования проводятся в диапазоне 220–1000 нм (ближний инфракрасный, видимый и ближний ультрафиолетовый диапазоны).

Области применения эллипсометрии и решаемые при этом задачи приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

#### Применение эллипсометрии в различных отраслях знаний

Область знаний	Решаемые задачи
Физика твёрдого тела	Изучение энергетической зонной структуры
Физика полупроводников, микро- и нано-электроника	Характеризация слоистых структур, измерение толщин сверхтонких слоёв, исследования быстропротекающих процессов
Физика поверхности	Исследования морфологии поверхности и сверхструктурных переходов, адсорбции и десорбции и др.
Технология полупроводниковых структур и материалов	Контроль толщины подзатворного диэлектрика, процессов эпитаксии, толщины, скорости роста, состава и структурного совершенства слоёв, качества межфазных границ, измерение температуры в условиях сверхвысокого вакуума и др.
Оптика и оптические технологии	Контроль толщины и оптических параметров многослойных интерференционных покрытий, качества обработки оптических деталей, измерение констант пьезо-, магнито- и электрооптических эффектов и др.
Биология и медицина	Исследования свёртываемости крови, адсорбции белков и иммунологических реакций, диагностика оптических свойств глазных сред и др.

Тонкие слои диэлектриков, полупроводников и металлов в различных сочетаниях используются в микро- и нанoeлектронике при создании полупроводниковых структур, нанесении пассивирующих, просветляющих или отражающих покрытий, для создания омических контактов и в целом ряде других случаев. Как правило, толщины таких слоёв должны быть выращены с прецизионной точностью. Например, ошибка в толщине просветляющего

покрытия, составляющая одну десятую длины волны в материале (т. е.  $\delta d \sim 10$  нм), может заметно повлиять на его спектральные характеристики. Особенно актуальной проблема измерения толщин сверхтонких слоёв становится в связи с переходом к субмикронным проектным нормам. Измерения оптических постоянных плёночных структур могут иметь как самостоятельное значение (например, при создании оптоэлектронных устройств), так и служить косвенной характеристикой их физических, структурных и иных свойств. Например, показатель преломления диоксида кремния зависит от его плотности, наличия пор и содержания гидроксильных групп. У  $\text{Si}_3\text{N}_4$  он существенно зависит от технологии изготовления.

Метод эллипсометрии является бесконтактным, экспрессным и технологичным. Его чувствительность к показателю преломления порядка  $10^{-3}$ , а к изменению толщины плёнки достигает долей атомарного слоя.

#### 2.1.4. Отражение плоской электромагнитной волны от исследуемой поверхности

Пусть плоскополяризованная волна падает на поверхность, расположенную в плоскости  $XY$ . Выберем оси  $X$  и  $Y$  так, чтобы её волновой вектор  $k_i$  лежал в плоскости  $XZ$  (рис. 2.2).

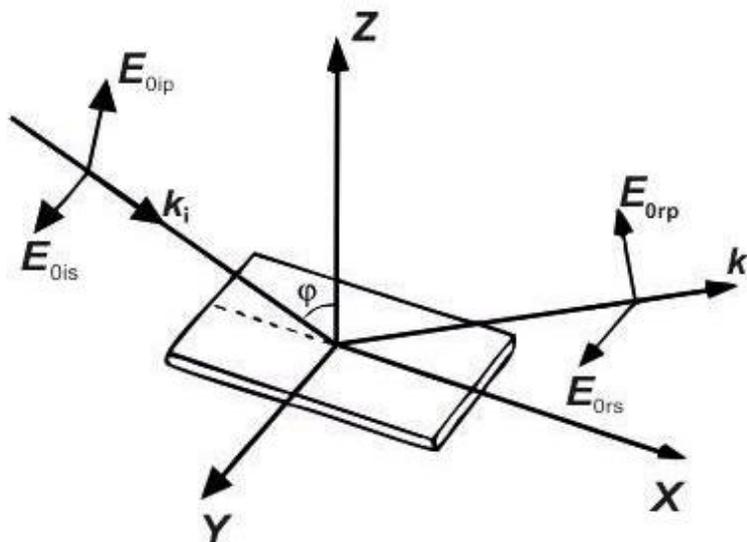


Рис. 2.2. Модель отражения плоской электромагнитной волны от поверхности

После отражения волна становится эллиптически поляризованной. Электрические векторы падающей ( $i$ ) и отраженной ( $r$ ) волн можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} E_i(r,t) &= E_{0i} \cdot \exp(i(\omega t - k_i r)), \\ E_r(r,t) &= E_{0r} \cdot \exp(i(\omega t - k_r r)), \end{aligned} \quad (2.1)$$

где  $k_i, k_r$  – волновые векторы;

$E_{0i}, E_{0r}$  – комплексные амплитуды падающей и отраженной волн;

$\omega$  – частота волны.

Плоскость, проведенная через векторы  $k_i$  и  $k_r$ , называется плоскостью падения света (на рис. 2.2 она совпадает с плоскостью  $XZ$ ). Для дальнейшего рассмотрения удобно разложить векторы амплитуд электрического поля на составляющие, лежащие в плоскости падения и перпендикулярно к ней ( $p$  и  $s$  компоненты):

$$\begin{aligned} E_{0i} &= e_p E_{0ip} + e_s E_{0is}, \\ E_{0r} &= e'_p E_{0rp} + e_s E_{0rs}, \end{aligned} \quad (2.2)$$

где  $e_p, e'_p$  и  $e_s$  – единичные векторы вдоль соответствующих направлений.

Комплексными коэффициентами отражения называются отношения амплитуд отраженной и падающей волн:

$$\begin{aligned} R_p &= E_{0rp}/E_{0ip}, \\ R_s &= E_{0rs}/E_{0is}. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Отраженный, эллиптически поляризованный свет характеризуется разностью фаз  $\Delta$  между компонентами электрического вектора света, параллельного плоскости падения  $E_p$  и перпендикулярного ей  $E_s$ :

$$\Delta = \Delta_p - \Delta_s \quad (2.4)$$

и отношением их амплитуд  $\psi$ , определяемым из выражения

$$\psi = \arctg \frac{|E_p|}{|E_s|}. \quad (2.5)$$

Эти параметры определяются свойствами отражающей поверхности, т. е. распределением оптических постоянных в приповерхностных слоях, геометрией поверхности (рельефом), а также внешними параметрами: углом между нормалью к поверхности и вектором  $k_i$ , (углом падения света  $\varphi$ ), показателем преломления внешней среды  $n_a$ , длиной волны  $\lambda$ , которые всегда считаются известными величинами. Поскольку значения коэффициентов отражения содержат в неявном виде информацию о структуре отражающей поверхности, то полезно измерить их амплитуды и фазы. Однако экспериментально при эллипсометрических измерениях определяются не сами коэффициенты отражения, а их отношение в виде

$$\rho = \operatorname{tg}\psi \cdot e^{i\Delta} = \frac{R_p}{R_s}. \quad (2.6)$$

Параметры  $\psi$  и  $\Delta$ , называемые эллипсометрическими параметрами или эллипсометрическими углами, определяются экспериментально. Физический смысл этих параметров:  $\operatorname{tg}\psi$  показывает отношение амплитуд коэффициентов отражения для  $p$ - и  $s$ -волн, а параметр  $\Delta$  равен разности между фазовыми скачками этих волн при отражении.

## 2.2. Оборудование и методики измерений

Стандартная конструкция эллипсометра состоит из руки-поляризатора с источником света (формирует пучок падающего поляризованного света), гониометра для задания угла падения света, координатного стола с перемещением по координатам  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  для размещения образца и руки-анализатора отражённого света (рис. 2.3). Неотъемлемой частью является вычислительный модуль со специализированным ПО для проведения измерений, сбора и анализа полученных данных.

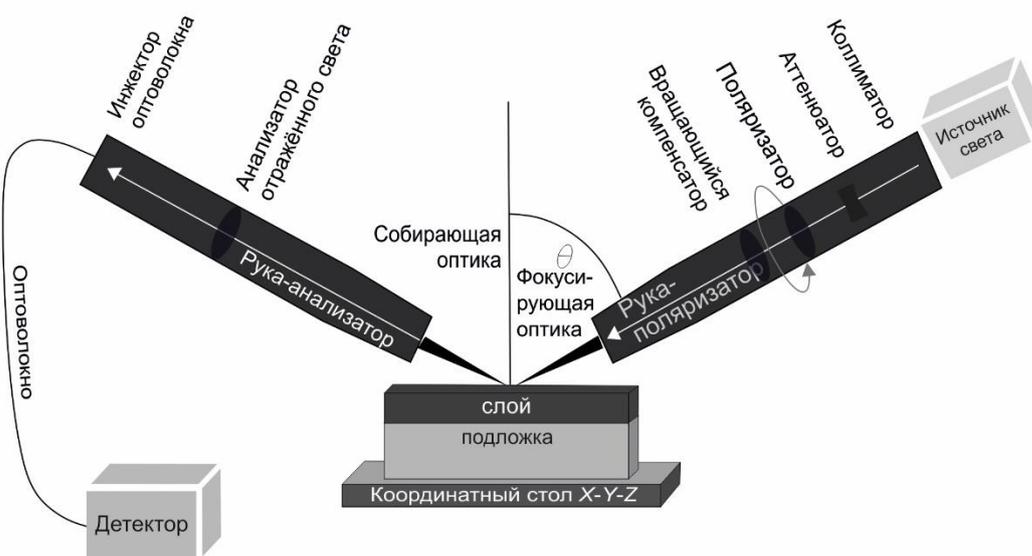


Рис. 2.3. Схема стандартной конструкции эллипсометра

Методика контроля многослойных субмикронных структур  $\text{Si-SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ ,  $\text{Si-SiO}_2\text{-поли-Si-SiO}_2$ , SiPOS (структур ОНО) предназначена для исследований методом спектральной эллипсометрии оптических параметров и толщин наноплёнок  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . От структуры и толщины этих слоёв зависят электрофизические характеристики формируемого диэлектрика.

Диапазон и погрешность измеряемых величин представлены в табл. 2.3.

Диапазоны и погрешности измеряемых величин

Наименование измеряемой величины	Диапазон измерений	Погрешность измерений
Показатель преломления плёнки $\text{Si}_3\text{N}_4$	1,8–2,2	0,001
Показатель преломления плёнок $\text{SiO}_2$	1,4–1,5	0,001
Показатель преломления плёнки $\text{SiPOS}$	1,5–4,5	0,001
Толщины плёнок $\text{SiO}_2$	0–80 нм	$\pm 0,1 \%$

В основу метода положено свойство изменения состояния поляризации электромагнитного излучения  $\lambda$  в диапазоне 200–2100 нм при отражении его от границы раздела плёнка – подложка со стороны контролируемой структуры и при преломлении на каждой границе структуры  $\text{SiO}_2\text{--Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{--SiO}_2$ .

Пусть  $s$  и  $p$  поляризованный свет, который под углом  $\varphi_0$  падает из воздуха ( $n_0 = 1$ ) на диэлектрическую плёнку  $\text{SiO}_2$ , затем, преломляясь, проходит плёнку  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , преломляясь проходит слой  $\text{SiO}_2$ , затем отражается от подложки  $\text{Si}$ , как показано на рис. 2.4. Толщины слоёв будут  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ , углы преломления света в слоях соответственно  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$ .

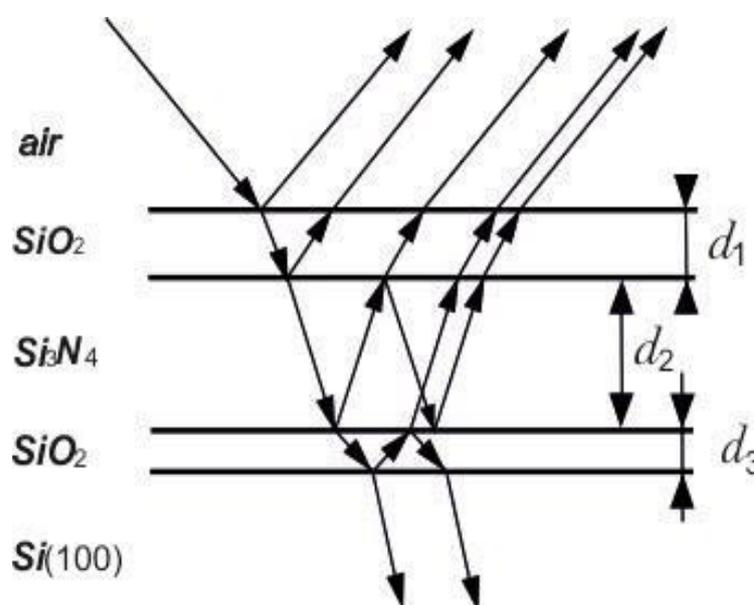


Рис. 2.4. Оптическая модель структуры

Для решения данной задачи используются численные методы решения обратных эллипсометрических задач. В качестве критерия адекватности модели реальному образцу обычно выбираются минимальные значения целевой функции или функционала невязки:

$$L(x_j) = \sum_{k=1}^m \{ [\psi_s(\varphi_0, \lambda_k) - \psi(\varphi_0, \lambda_k, x_j)]^2 + [\Delta_s(\varphi_0, \lambda_k) - \Delta(\varphi_0, \lambda_k, x_j)]^2 \}, \quad (2.7)$$

где  $\psi_s(\varphi_0, \lambda_k)$  – измеренные значения относительного изменения амплитуд двух взаимно перпендикулярных компонент электрического вектора;

$\psi(\varphi_0, \lambda_k, x_j)$  – расчётные значения относительного изменения амплитуд двух взаимно перпендикулярных компонент электрического вектора;

$\Delta_s(\varphi_0, \lambda_k)$  – экспериментальные значения изменения разности фаз электрического вектора падающей электромагнитной волны поляризованного света и волны, отражённой от исследуемой поверхности;

$\Delta(\varphi_0, \lambda_k, x_j)$  – расчётные значения изменения разности фаз электрического вектора падающей электромагнитной волны поляризованного света и волны, отраженной от исследуемой поверхности;

$x_j(\overline{1, n})$  – вещественные параметры электродинамической модели плоскостройной среды для  $n$  точек в спектре;

$\varphi_0$  – угол падения света на образец;

$\lambda_k$  – длина волны в точке спектра.

Пассивация поверхности кремния существенно влияет на рабочие характеристики и надёжность полупроводниковых приборов и интегральных схем. Среди материалов, используемых для пассивации высоковольтных приборов, SiPOS имеет такие преимущества, как стабильность работы прибора при воздействии ионной примеси и внешних полей, электрическая нейтральность. Для пассивации кремния оптимальными свойствами обладают плёнки SiPOS с содержанием кислорода 8–15 ат.%. Им свойственно значительное снижение обратного тока, высокое удельное сопротивление, минимизация плотности генерационно-рекомбинационных центров вблизи поверхности подложки, водонепроницаемость.

Оптические свойства плёнок SiPOS, такие как показатель преломления и поглощения, напрямую зависят от концентрации в них кислорода. При сравнительных измерениях концентрации кислорода на оже-спектрометре и показателя преломления плёнок на спектральном эллипсометре *Uvisel2* была построена калибровочная кривая для расчёта концентрации кислорода по показателю преломления, которая представлена на рис. 2.5.

Количественной мерой изменения поляризации света служат поляризационные углы  $\psi$  и  $\Delta$ , которые связаны со значением относительного коэффициента отражения  $R$ , как показано в формулах (2.3)–(2.5).

Уравнение (2.7) устанавливает связь между экспериментальными параметрами  $\psi$  и  $\Delta$ , оптическими характеристиками плёнок и их толщиной. Для анализа состояния эллиптичности света после отражения от анализируемой плёнки используется спектральный эллипсометр *Uvisel2* фирмы *Horiba* (Франция).

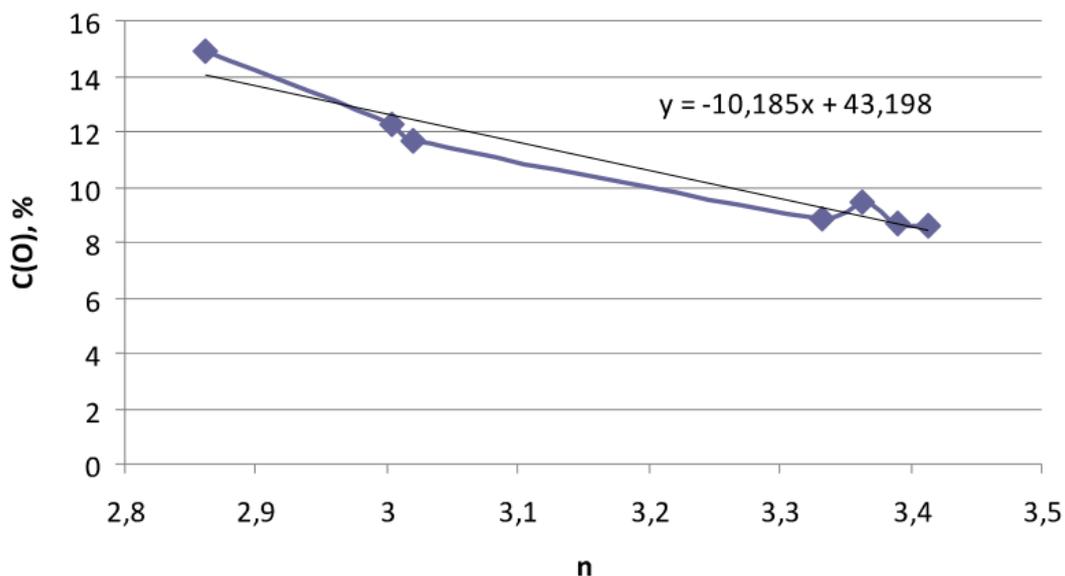


Рис. 2.5. Калибровочная кривая зависимости показателя преломления от концентрации кислорода в плёнках SiPOS

В ОАО «Интеграл» эллипсометрический анализ тонких плёнок осуществляется комбинированным методом. Значения углов атаки поверхности подложки поляризатором и анализатором измеряются при помощи ручного эллипсометра. Значения углов как исходные данные вносятся в ПК с предустановленным ПО для вычисления толщины плёночного покрытия.

Для вычисления точного значения толщины покрытия исследуемого образца по полученным экспериментальным данным необходимо запустить программу *Elipsometry*, ярлык которой находится на рабочем столе (рис. 2.6).

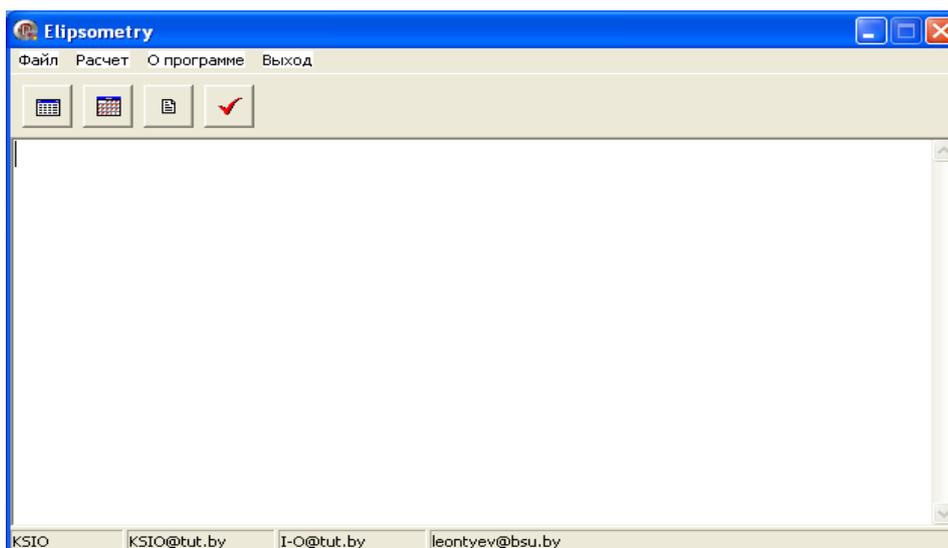
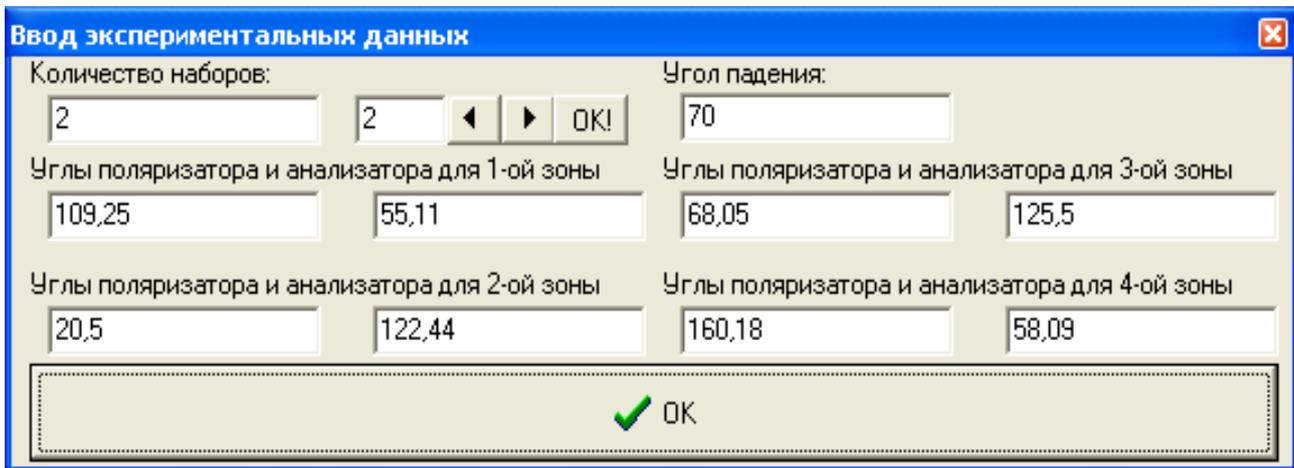


Рис. 2.6. Начальное окно программы *Elipsometry*, используемой для лабораторных исследований

Для введения исходных данных, требуемых для осуществления автоматизированного расчёта на пользовательском интерфейсе программы, следует нажать кнопку  и перейти в окно, изображённое на рис. 2.7.



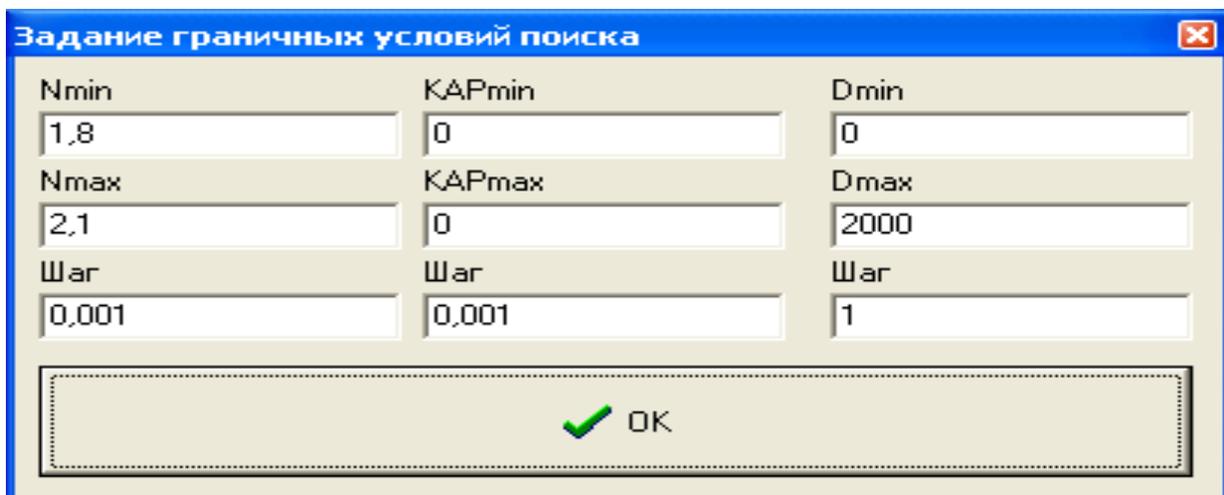
Количество наборов:	2	2	◀	▶	OK!	Угол падения:	70	
Углы поляризатора и анализатора для 1-ой зоны	109,25	55,11				Углы поляризатора и анализатора для 3-ой зоны	68,05	125,5
Углы поляризатора и анализатора для 2-ой зоны	20,5	122,44				Углы поляризатора и анализатора для 4-ой зоны	160,18	58,09

✔ OK

Рис. 2.7. Окно ввода исходных данных

В открытом окне задаются исходные данные в виде углов поляризатора и анализатора для нескольких измеренных зон. Введённые данные сохраняются в памяти программы при нажатии кнопки **OK**.

Для задания граничных условий расчёта (рис. 2.8) следует использовать кнопку .



Nmin	1,8	KAPmin	0	Dmin	0
Nmax	2,1	KAPmax	0	Dmax	2000
Шаг	0,001	Шаг	0,001	Шаг	1

✔ OK

Рис. 2.8. Окно для задания граничных условий поиска

После подтверждения введённых условий поиска вводится число слоёв на подложке (рис. 2.9). Количество слоёв больше двух требует поэтапных расчётов для последовательного определения толщины каждого из них.



Рис. 2.9. Окно для настройки числа слоёв, подвергнутых анализу

Кнопка **OK** сохраняет введённые значения настроек. Кнопка , доступная в начальном окне программы (рис. 2.10), запускает расчёт. Искомое значение толщины покрытия вместе с сопутствующими данными и отчётом выводятся в текстовую область.

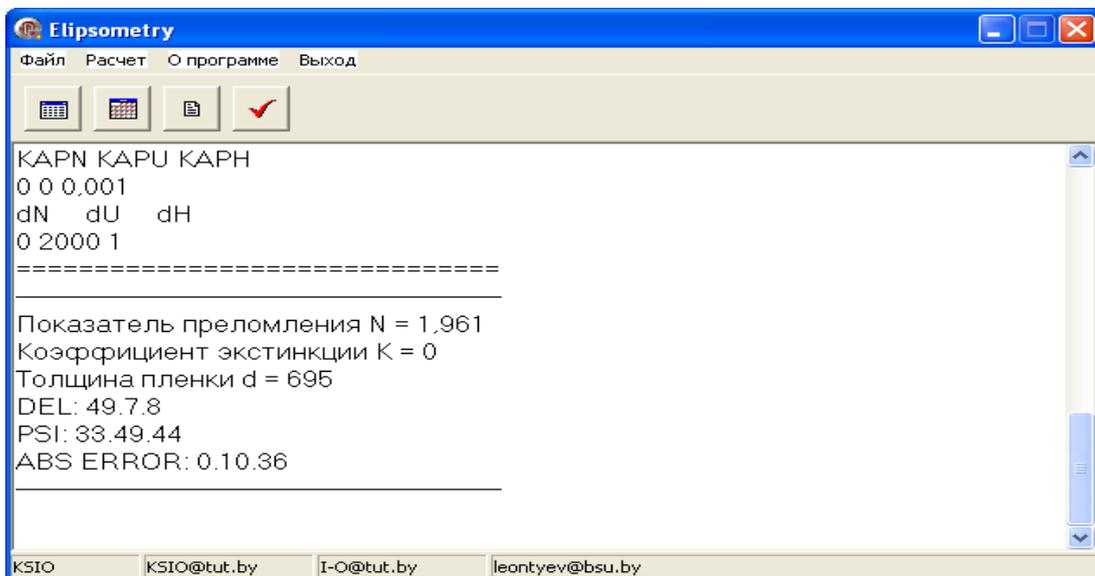


Рис. 2.10. Начальное окно с результатами

Данный метод не предъявляет высоких требований к оборудованию и отличается быстротой и низкими материальными и трудозатратами на проведения исследований, что делает его актуальным в условиях непрерывного потокового лабораторного анализа образцов на наличие дефектов и брака.

## 2.3. Порядок выполнения работы

### 2.3.1. Определение толщины слоёв и состава эталонной структуры

Для определения толщины слоёв и состава эталонной структуры необходимо выполнить следующие действия:

1. Протереть предметный столик спектрального эллипсометра бязью, смоченной спиртом.

2. Включить компьютер, управляющий спектральным эллипсометром, кнопкой **СЕТЬ**. Войти в программное обеспечение *DeltaPsi2*, нажав её значок.

3. Открыть закладку *Manual Measurement*  в строке командных кнопок. Включить ксеноновую лампу, для чего нажать значок лампы .

4. Прогреть лампу в течение 20 мин для стабильности измерений.

5. Открыть окно *Sample Vision* на закладке *Manual Measurement*  и нажать кнопку *Reference Sample*, после чего столик перемещается так, что излучение ксеноновой лампы падает на эталонный образец. Выставить отражённое пятно излучения от эталонного образца в центр экрана кнопками подъёма и опускания столика.

6. Закрывать закладку *Manual Measurement* .

7. Открыть основной узел **Библиотека пользователя** в дереве программы слева, нажав вкладку *User Library*.

8. Открыть вкладку *Acquisition Routines* и выбрать программу по сбору данных 0,6–6,0 eV, 0,1–1.acq. В открывшемся окне установить параметры эллипсометра для проведения измерений: *Acquisition Type* – *Reflection Ellipsometry*; *Integration Time* – 1000 ms; *Integration Time Mode* – *Fixed*; *Adjustment Mode* – *Automatic*; *Spot Size* – 2030×705 мкм (70°); *Acquisition Mode* – *Standard*; *Configuration Choice* – *Standard II: M = 0°, A = + 45°*; *Incidence Angle* – 70°; *Spectral range* – *Manual*; *Spectral Unit* – eV; *Start* – 0,6; *End* – 6,0; *Step* – 0,01.

9. Запустить измерение, нажав кнопку , ввести имя партии в строку *Lot name* – GC ВМА, имя образца «*Reference Sample*» в строку *Sample name*, затем нажать кнопку  для подтверждения.

10. Открыть вкладку *Results* в основном узле **Библиотека пользователя** после проведения измерений.

11. Открыть директорию *Acquisition Data*, а затем папку с датой измерения образца и найти файл полученных экспериментальных данных по присвоенному ранее имени.

12. Открыть вкладку *Models* в основном узле **Библиотека пользователя**, в ней выбрать и открыть модель *Etalon850.mdl*.

13. Перенести файл полученных экспериментальных данных в открывшееся окно модели в строку .

14. Запустить процесс расчёта, нажав кнопку .

15. Сохранить полученный результат, нажав кнопку  в основном узле **Библиотека пользователя** во вкладке *Model Results*.

### 2.3.2. Определение оптических свойств и концентрации кислорода в структурах SiPOS

Для определения оптических свойств и концентрации кислорода в структурах SiPOS необходимо:

1. Протереть предметный столик спектрального эллипсометра бязью, смоченной спиртом.

2. Открыть закладку *Manual Measurement* .

3. Открыть окно *Sample Vision* на данной закладке и выставить излучение ксеноновой лампы кнопками подъёма и опускания столика так, чтобы отражённое пятно от образца находилось в центре экрана. Открыть окно *Tilt Vision* и нажать клавишу *Avtotilt*, при этом происходит совмещение меток и отражённых лучей двух излучателей для выравнивания столика в горизонтальной плоскости.

4. Закрыть закладку *Manual Measurement* .

5. Открыть основной узел **Библиотека пользователя** в дереве программы слева, нажав вкладку *User Library*.

6. Открыть вкладку *Acquisition Routines* и выбрать файл программы по сбору данных 3,0–6,0 eV, 0,1–1.acq. Указать следующие параметры: *Acquisition Mode* – *Variable Angle*; *Acquisition Type* – *Reflection Ellipsometry*; *Integration Time* – 1000 ms; *Integration Time Mode* – *Fixed*; *Adjustment Mode* – *Automatic*; *Spot Size* – 2030×705 мкм (70°); *Configuration Choice* – *Standard II: M = 0°, A = + 45°*; *Incidence Angle* – 70°, 73°, 76°; *Spectral range* – *Manual*; *Spectral Unit* – eV; *Start* – 3,0; *End* – 5,5; *Step* – 0,005.

7. Запустить измерение, нажав кнопку , ввести в строку *Lot name* – *GC BMA*, имя образца в строку *Sample name* – *ОНО*, затем нажать кнопку  для подтверждения проведения измерений.

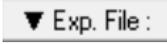
8. Убрать образец с предметного столика после окончания измерений.

9. Открыть вкладку *Results* в основном узле **Библиотека пользователя**.

10. Открыть директорию *Acquisition Data*, затем папку с датой проведения измерений и выбрать файл полученных экспериментальных данных.

11. Открыть директорию *Models* в основном узле **Библиотека пользователя**. Выбрать модель SiPOS – *Si.mdl*, щелкнуть левой кнопкой мыши

на ней и открыть данную модель для расчета толщины и показателя преломления пленки SiPOS.

12. Перенести файл полученных экспериментальных данных в открывшееся окно модели в строку .

13. Запустить процесс расчёта, нажав кнопку .

14. Сохранить полученный результат, нажав кнопку  в основном узле **Библиотека пользователя** во вкладке *Model Results*.

15. Открыть закладку *Manual Measurement* .

16. Выключить питание ксеноновой лампы, нажав значок лампы .

17. Закрыть закладку *Manual Measurement* .

18. Закрыть окно модели.

19. Закрыть программу *DeltaPsi2*.

20. Открыть программу *Excel* с калибровочным графиком.

21. Рассчитать концентрацию кислорода в плёнке SiPOS по калибровочному графику (см. рис. 2.5), отметив на оси X полученные значения показателя преломления и сняв результат с оси Y.

22. Оформить протокол исследований по форме, указанной преподавателем.

23. Выключить компьютер.

## 2.4. Содержание отчёта

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Скриншот файла данных результатов измерений эталонного образца.
4. Результаты измерений толщины слоёв и оптических свойств эталонной структуры.
5. Скриншот файла данных результатов измерений исследуемой тонкоплёночной структуры.
6. Результаты измерений толщины слоёв и оптических свойств исследуемой тонкоплёночной структуры.
7. Выводы по работе.

## 2.5. Контрольные вопросы

1. Что такое поляризация света?
2. На чём основан метод эллипсометрии?
3. Какова область использования эллипсометрического метода измерений?
4. Что такое комплексные коэффициенты отражения? Каково физическое значение модуля комплексного коэффициента отражения?

5. Какой физический смысл имеют эллипсометрические параметры? Поясните их связь между собой.

6. Каково устройство базового эллипсометра?

7. Какие свойства и области применения тонкоплёночных структур типа Si-SiO<sub>2</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-SiO<sub>2</sub>-Si вы можете назвать?

8. Какие методы формирования плёнок SiO<sub>2</sub> и Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> на кремнии вам известны? Поясните их.

### Список использованных источников

1. Практикум по физической химии: физические методы исследования / В. П. Агеев [и др.]. – М. : Академия, 2014. – 528 с.

2. Скалецкая, И. Е. Введение в прикладную эллипсометрию : учеб. пособие. В 3 ч. / И. Е. Скалецкая. – СПб. : СПбГУ ЛИТМО, 2014. – 172 с.

3. Физические измерения в микроэлектронике / В. А. Пилипенко [и др.]. – Минск : БГУ, 2003. – 171 с.

4. Эллипсометрия – прецизионный метод контроля тонкоплёночных структур с субнанометровым разрешением / В. И. Швец [и др.] // Российские нанотехнологии. – 2009. – Т. 4. – №3–4. – С. 72–84.

## Лабораторная работа №3

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ И ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

**Цель работы:** изучить теоретические основы растровой электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа, получить практические навыки контроля геометрических размеров топологических элементов на поверхности, сколах полупроводниковых пластин и кристаллов, качественного и количественного элементного состава поверхности.

#### 3.1. Краткие теоретические сведения

##### 3.1.1. Растровая электронная микроскопия

Растровые электронные микроскопы нашли широкое применение в материаловедении, т. к. из-за особенностей конструкции линз и принципа формирования изображения (использование волновой природы квантовых частиц) они имеют ряд преимуществ по сравнению с любыми оптическими микроскопами:

- большая глубина резкости позволяет исследовать не только шлифы, но и объекты с рельефной поверхностью (изломы, порошки, ткани и т. п.);

- возможность получения существенно больших увеличений. Даже у лучших оптических микроскопов граница предельных увеличений составляет порядка  $\times 2000$  крат, в то время как растровые электронные микроскопы позволяют получать увеличения до  $\times 1\,000\,000$  крат;

- возможность получения более чётких и наглядных контрастных изображений многофазовых образцов благодаря тому, что контраст изображения в растровых электронных микроскопах формируется в зависимости от атомного номера вещества.

##### 3.1.2. Процессы, происходящие при взаимодействии пучка электронов с твёрдым телом

Электроны зонда, обладающие высокой энергией  $E_0$ , с огромной скоростью падают на поверхность образца и проникают на некоторую глубину, испытывая многочисленные взаимодействия как с ядрами атомов вещества, так и со связанными и слабосвязанными электронами. При этом они постепенно теряют первоначальную энергию и направленность движения. Взаимодействие ускоренного электрона первичного пучка с материалом вещества может быть *упругим* и *неупругим*. *Упругое* рассеяние, возникающее в результате электростатического взаимодействия первичного пучка электронов с ядрами атомов вещества, происходит практически без потери первоначальной энергии электронами пучка и изменяется только направление движения электронов.

При *неупругом* рассеянии, возникающем в результате взаимодействия первичного пучка электронов с электронами атомов вещества, часть первоначальной энергии электрона пучка затрачивается на взаимодействие с веществом и помимо изменения направления движения уменьшается его энергия. Поведение каждого отдельного электрона в материале образца может сильно изменяться. Рассеяние подчиняется статистическим закономерностям. Процесс неупругого рассеяния электронов в материале образца можно моделировать *методом Монте-Карло* (рис. 3.1), который позволяет рассчитать траектории отдельных электронов. В идеальном варианте метода расстояние, пройденное электронами между соударениями, величина потери энергии и угол отклонения рассчитываются с помощью вероятностных функций, используя случайные числа для выбора значений каждой из вышеперечисленных величин.

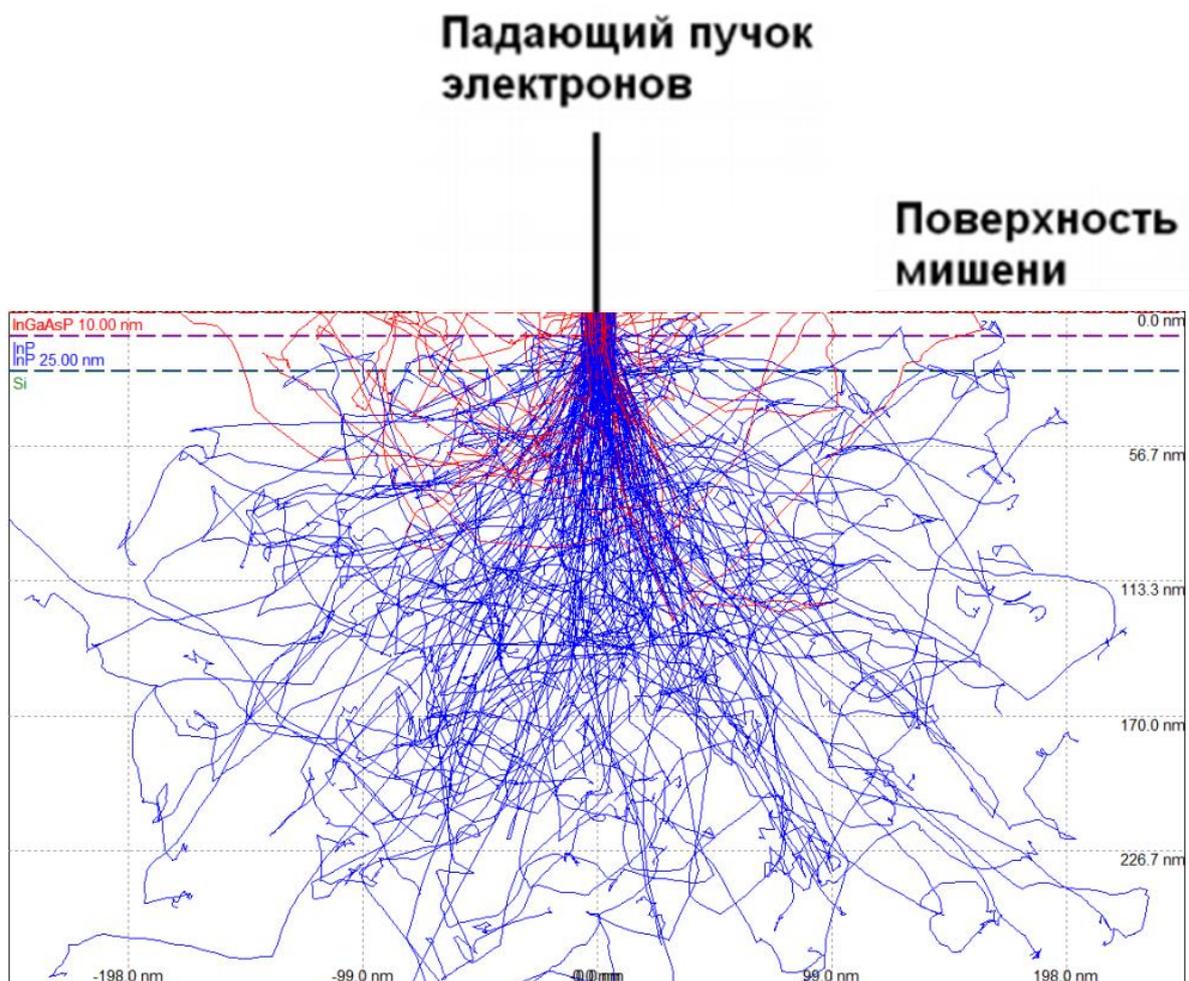


Рис. 3.1. Модель случайного рассеяния электронов первичного пучка в образце (*метод Монте-Карло*)

При случайных столкновениях электроны первичного пучка в образце движутся неравномерно, причём потери энергии возрастают при увеличении длины пути. В этом случае нельзя точно определить траекторию движения электронов, но можно ввести (и измерить) два критических параметра длины,

описывающих глубину проникновения электронов, а также границу области их движения. Рассеяние электрона является *неупругим* в пределах области, в которой его энергия превышает тепловой уровень (рис. 3.2). *Длину свободного пробега*  $x_D$  электрона в материале вещества определяют как глубину, при достижении которой электрон может двигаться равновероятно во всех трёх направлениях. На глубинах менее  $x_D$  имеется преимущественное движение электрона вдоль оси первичного пучка.

*Глубину проникновения* определяют как уровень  $x_R$ , на котором энергия уменьшается до теплового уровня, т. е. пока электроны первичного пучка в конечном счёте не придут в состояние покоя и не поглотятся в объёме образца.



Рис. 3.2. Неупругое рассеяние электрона в пределах области, в которой его энергия превышает тепловой уровень

Тепловая энергия ( $E$ ) определяется уравнением

$$E = kT, \quad (3.1)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;

$T$  – температура.

Таким образом, на всем расстоянии  $x < x_R$  энергия  $E > kT$ .

И  $x_D$ , и  $x_R$  уменьшаются при увеличении атомного номера  $Z$  мишени и уменьшении энергии первичного пучка  $E_0$ . Пробег электрона с начальной энергией  $E_0$  вдоль своей траектории  $x_R$  можно определить следующим образом:

$$x_R = \int_0^E \frac{1}{\rho S} dE, \quad (3.2)$$

где  $x_R$  – глубина проникновения электрона в мишень;

$E_0$  – энергия первичного пучка;

$E$  – энергия электронов, прошедших в твёрдой мишени сквозь слой толщиной  $x$ ;

$\rho$  – плотность вещества;

$S$  – тормозная способность вещества.

Существует несколько способов решения данного интеграла. Простейшая формула для определения глубины проникновения электронов исходит из закона Томсона – Уиддингтона, в соответствии с которым

$$x_R = \frac{E_0^2}{c\rho}, \quad (3.3)$$

где  $c$  – постоянная, которая приблизительно равна  $3 \cdot 10^{11}$  ( $\text{эВ}^2 \cdot \text{см}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ ).

Из полученной формулы (3.3) следует, что пробег электрона в образце возрастает пропорционально квадрату энергии падающих электронов, хотя известно, что «постоянная»  $c$  в действительности увеличивается с ростом  $E_0$ , так что  $x_R$  растёт несколько медленнее, чем по квадратичному закону.

Попадая на образец, первичный электронный пучок вызывает появление нескольких продуктов взаимодействия в зоне генерации («груши взаимодействия»), регистрация которых позволяет получить необходимую информацию об образце: из образца могут вылетать электроны (оже-электроны, вторичные электроны и отражённые электроны), рентгеновские кванты, фотоны и выделяться тепло (рис. 3.3).



Рис. 3.3. Схема описания процессов, происходящих при взаимодействии первичного пучка электронов с материалом образца

*Обратнорассеянными*, или отраженными (ОЭ), называют электроны первичного пучка, которые после столкновений с атомами мишени испытывают упругое обратное рассеяние на угол более чем  $90^\circ$  и выходят из образца наружу. Электроны отражаются назад в поверхностном слое, толщина

которого примерно равна длине свободного пробега электрона. Поскольку при упругом рассеянии происходит лишь незначительный обмен энергией, большая часть отражённых электронов выходит из образца с энергиями, не намного меньшими энергии первичного пучка. Доля отражённых электронов зависит от атомного номера материала, возрастая от приблизительно 10 % для углерода до приблизительно 50 % для урана, и почти не зависит от энергии пучка. Коэффициент обратного рассеяния ( $\eta$ ) сильно зависит от атомного номера, поскольку вероятность больших углов рассеяния возрастает с увеличением атомного номера  $Z$  (рис. 3.4).

К *вторичным* относят электроны, изначально находившиеся в образце и получившие от первичных электронов достаточно энергии для выхода из образца. Вторичные электроны (ВЭ) представляют собой электроны с малой энергией ( $< 50$  эВ), которые покидают поверхность в случае, когда их энергия выше, чем работа выхода (2–6 эВ). Низкая кинетическая энергия вторичных электронов сильно ограничивает их длину свободного пробега. Как следствие, вторичные электроны преимущественно образуются только в тонком слое материала (1–10 нм) внутри пятна, на которое упал первичный луч. Коэффициент эмиссии вторичных электронов определяется как количество электронов, выбитых из поверхности материала одним первичным электроном. Он всегда больше единицы и может достигать нескольких сотен.

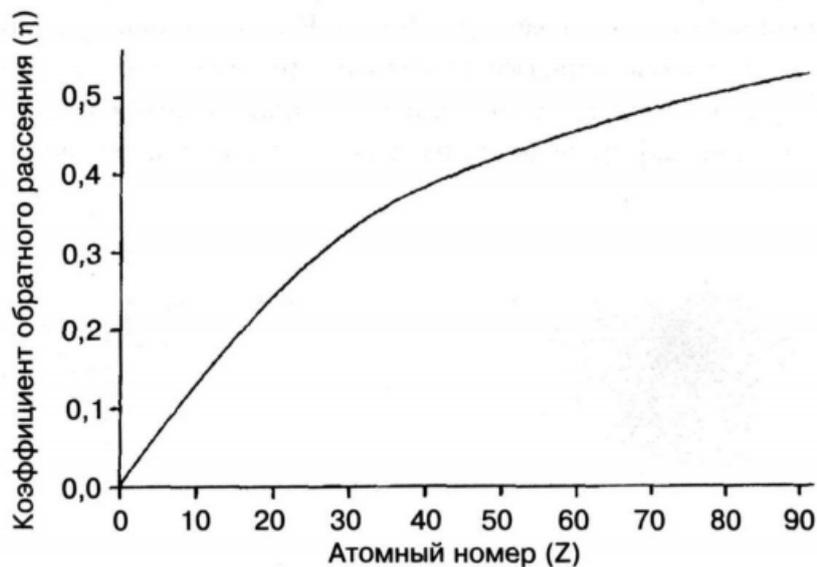


Рис. 3.4. Зависимость коэффициента обратного рассеяния ( $\eta$ ) от атомного номера материала образца ( $Z$ )

Таким образом, вторичные и отраженные электроны можно различить по их кинетической энергии (рис. 3.5).

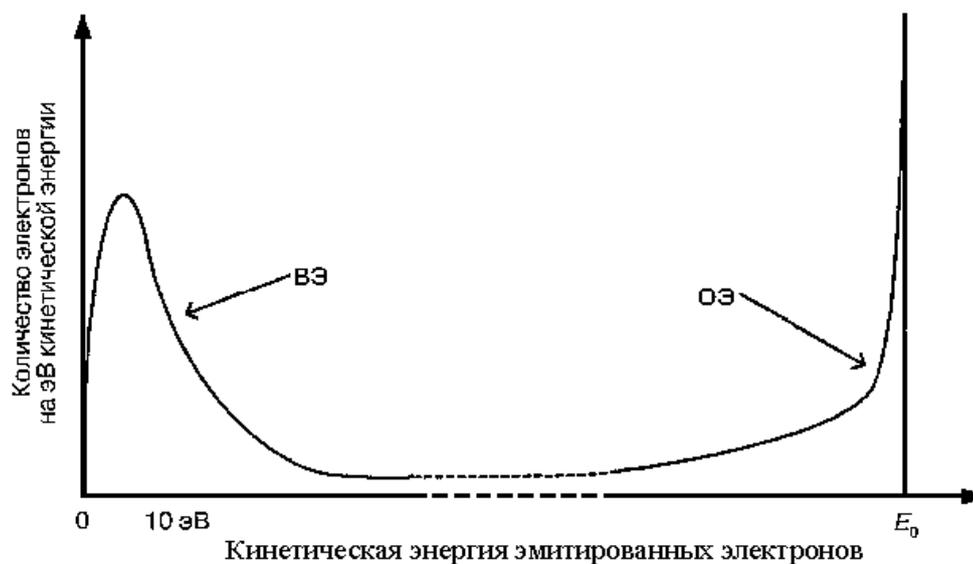


Рис. 3.5. Распределение по кинетической энергии вторичных (ВЭ) и отраженных (ОЭ) электронов, эмитированных из образца

Эмиссия *вторичных электронов* определяется четырьмя факторами:

- *работой выхода*, т. е. энергией, которую нужно передать электрону вещества, чтобы он смог покинуть материал. Типичные значения работы выхода равны нескольким электрон-вольтам. Работа выхода зависит от состава и структуры (упаковки атомов) поверхности, а также от наличия поверхностно-адсорбированных атомов и загрязняющей пленки;

- *энергией и интенсивностью* пучка. Казалось бы, увеличение энергии первичного электрона должно увеличивать количество вторичных электронов. Однако при этом уменьшаются потери энергии в приповерхностной области, и доля достигающих поверхность вторичных электронов уменьшается. С другой стороны, количество вторичных электронов всегда прямо пропорционально току первичного пучка;

- *плотностью образца*, хотя этот фактор влияет на коэффициент эмиссии вторичных электронов незначительно;

- *топографией поверхности*. Наиболее сильно на выход вторичных электронов влияют неровности поверхности. Выступающие из поверхности области (имеющие положительный радиус кривизны) имеют повышенный выход вторичных электронов. Напротив, в углублениях (отрицательная кривизна) выход вторичных электронов понижен вследствие их возврата в образец. Использование вторичных электронов наилучшим образом подходит для изучения неровных поверхностей, что позволяет получить высокое разрешение и хорошую контрастность. Следует отметить, что повышенный коэффициент эмиссии могут иметь и области, находящиеся по соседству с выступающими деталями, если они находятся от них на расстоянии порядка длины свободного пробега электронов в материале вещества. В результате выступающие детали могут выглядеть крупнее, чем они есть на самом деле.

Точно так же и размер тёмной области, имеющей отрицательную кривизну, может превышать реальный размер углубления. Таким образом, углубления «затеняются», а выступы «осветляются», что может ввести в заблуждение, особенно при высоких степенях увеличения на пределе разрешения.

### **3.1.3. Рентгеноспектральный микроанализ**

Принцип электронно-зондового микроанализа был впервые запатентован Хилльером в США в 1947 г., а практическое воплощение получил в 1948 г. Дальнейшие разработки были направлены на комбинирование возможностей растровых электронных микроскопов и рентгеновских микроанализаторов. Были созданы растровые микроскопы, снабжённые рентгеновскими спектрометрами для локального анализа.

В электронно-зондовом микроанализе рентгеновское излучение в исследуемом образце возбуждают электронным пучком. Для идентификации элементов, содержащихся в образце, и определения их концентрации измеряют длину волны и интенсивность соответствующих линий рентгеновского спектра. Основное достоинство метода – возможность локального определения химического состава вещества – реализуется благодаря использованию электронного пучка, сфокусированного в узкий зонд.

### **3.1.4 Понятие характеристического рентгеновского излучения**

При взаимодействии первичного пучка электронов с материалом образца из прилегающих к поверхности слоёв атомов выбиваются электроны. Эти электроны называются вторичными и улавливаются детекторами при получении картинки в растровом электронном микроскопе. Рассмотрим подробнее процессы, происходящие в атоме материала образца при взаимодействии с первичным электронным пучком.

Каждый электрон в атоме вещества находится на определённом энергетическом уровне. В нормальном атоме все энергетические уровни, вплоть до уровней валентных электронов, заполнены. Удаление электрона с одного из энергетических уровней всегда связано с ионизацией атома. Первичные электроны, взаимодействуя с веществом мишени, способны ионизовать его атомы. При этом могут выбиваться даже те электроны, которые сильно связаны с ядром. В ионизованном состоянии атом обладает повышенной энергией. Возвращение в нормальное состояние атома будет происходить следующим образом (рис. 3.6). Вакансия на ионизованном уровне может быть заполнена электроном, находившимся на внешних оболочках атома. Чем большей энергией обладает атом в начальном возбуждённом состоянии, тем большее число различных переходов он может совершить, возвращаясь в нормальное состояние. Возвращаясь в состояние с минимальной энергией (нормальное состояние), атомы вещества выделяют энергию в виде кванта *характеристического* рентгеновского излучения, т. к. каждый элемент будет

испускать кванты со строго определённой энергией, свойственной его атомам. Так как с разных орбиталей атомов на поверхности может выбиваться несколько электронов, то и потеря энергий у элемента может быть несколько, соответственно возникает набор линий квантов *характеристического* рентгеновского излучения.

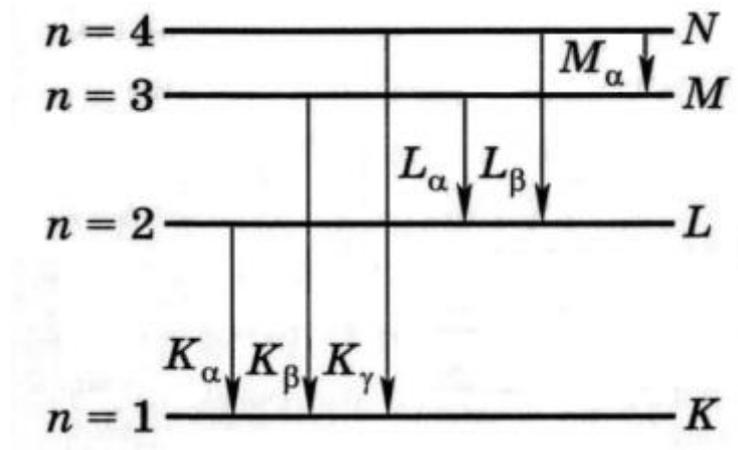


Рис. 3.6. Схема электронных переходов в атоме вещества:  
 $n = 1, 2, 3, 4$  – главные квантовые числа;  $K, L, M, N$  – электронные оболочки

Энергия характеристического рентгеновского кванта зависит от атомного номера  $Z$  данного атома, участвующего в процессе, и от квантовых чисел ( $n$ ) энергетических уровней, участвующих в электронном переходе. Частота характеристического излучения атомов элемента ( $\nu$ ) может быть рассчитана по уравнению

$$\nu = RF^2 \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \quad (3.4)$$

где  $R$  – константа Ридберга ( $R = 3,289842 \cdot 10^{15}$  Гц);

$F$  – эффективный заряд ядра;

$n$  – главные квантовые числа.

Эффективный заряд ядра можно вычислить по формуле

$$F = Z - \sigma, \quad (3.5)$$

где  $Z$  – заряд ядра, равный порядковому номеру элемента в периодической системе Д. И. Менделеева;

$\sigma$  – постоянная экранирования.

*Характеристическое* рентгеновское излучение может классифицироваться по следующей схеме. Оболочка электрона, на который была создана исходная вакансия внутреннего уровня, соответствующая квантовому числу  $n_1$ , представлена заглавной буквой. Таким образом,  $K$  означает, что  $n_1 = 1$ ;

$L$  означает, что  $n_1 = 2$ ;  $M$  означает, что  $n_1 = 3$  и т. д. К данному латинскому символу присоединяется буква греческого алфавита, которая представляет собой изменение квантового числа:  $\alpha$  означает, что  $(n_2 - n_1) = 1$ ;  $\beta - (n_2 - n_1) = 2$ ;  $\gamma - (n_2 - n_1) = 3$ . Иногда добавляется числовой индекс для отображения того факта, что некоторые энергетические уровни расщепляются на компоненты с несколько различными энергиями в результате квантовомеханических эффектов.

Непрерывное *тормозное* излучение возникает за счёт рассеяния падающих электронов атомными ядрами, т. е. первичные электроны взаимодействуют с электрическим полем ядер атомов мишени. Это взаимодействие сопровождается потерей их энергии и торможением. Это так называемый фон, который присутствует на каждом из спектров при микрорентгеноспектральном анализе. Поскольку электроны могут проходить на различных расстояниях от атомных ядер мишени, степень их взаимодействия с электрическим полем ядер будет также различной, следовательно, тормозное излучение будет иметь сплошной спектр. Поскольку тормозное излучение испускается первичными электронами, его спектральный состав слабо зависит от химического состава мишени.

Так как квант характеристического рентгеновского излучения обладает как свойствами частицы, так и свойствами волны, существует два типа детекторов (спектрометров) для проведения микрорентгеноспектрального анализа исследуемого участка поверхности образца.

### 3.1.5. Виды получаемых со спектрометров сигналов

Рентгеновский сигнал от обоих спектрометров можно представить в трёх различных видах:

а) в виде *спектра* (рис. 3.7). Он позволяет определить химический состав мишени. Спектр можно получить, направив первичный пучок электронов в определённую область поверхности образца. Этот способ называют точечным анализом. Кроме того, спектр можно получить, сканируя пучком по выбранной области. Типичное время экспозиции, требуемое для обнаружения всех элементов с концентрацией выше нескольких процентов, равно 100 с;

б) в виде *линии сканирования*. В этом случае пучок движется вдоль выбранной области образца (обычно путём дискретных шагов). Количество событий, соответствующих одной или нескольким характеристическим рентгеновским линиям, показывается в зависимости от координаты пучка;

в) в виде *элементной карты*, в которой регистрация определённого характеристического рентгеновского кванта отображается появлением точки на экране. Одновременно может быть показано распределение нескольких элементов. Отметим, что время получения карты ограничено нестабильностью пучка и постепенным загрязнением образца.

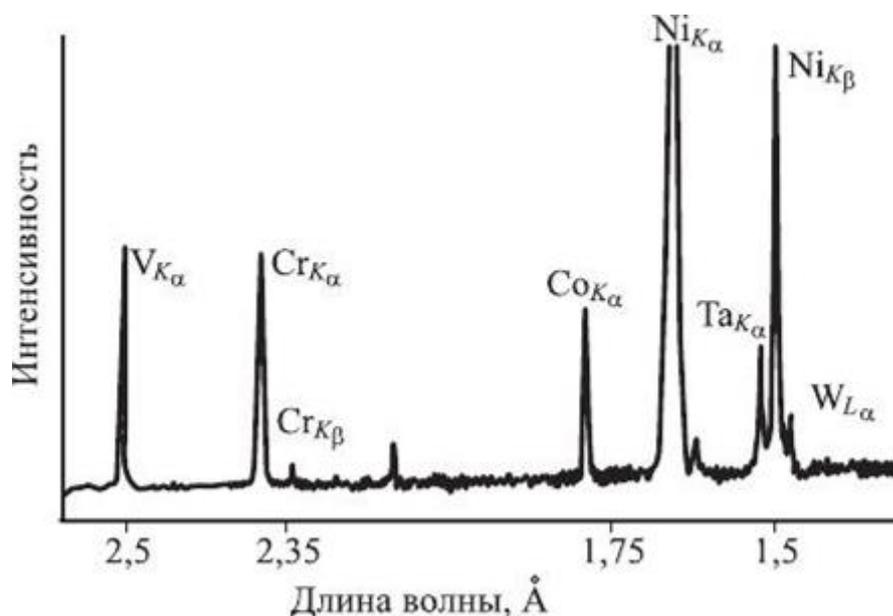


Рис. 3.7. Фрагмент спектра характеристического рентгеновского излучения сплава тугоплавких металлов

Серьёзной проблемой для количественного определения является углерод. Углеводороды, главным источником которых является диффузионный паромасляный насос, адсорбируются на внутренних поверхностях прибора. В результате «расщепления» их электронным пучком на поверхности образца образуется слой углерода, уменьшающий интенсивность рентгеновского излучения в основном за счёт уменьшения энергии электронов первичного пучка в углеродной плёнке. Большие трудности возникают также при попытке определения малых содержаний углерода, поскольку на полезный сигнал накладывается интенсивность  $K_{\alpha}$ -линии углерода от поверхностной плёнки.

Другой существенный источник экспериментальных погрешностей связан с нестабильностью работы микроанализатора в процессе проведения анализа (дрейф). Одна из основных причин дрейфа – деформация нити катода электронной пушки в ходе анализа.

*Локальность* микроанализа определяется зоной генерации, или «грушей взаимодействия». Размер области генерации зависит от энергии первичного падающего пучка и от атомного номера вещества (от его плотности). Примеры для малого по плотности кремния и для большого по плотности вольфрама приведены на рис. 3.8.

Наибольшее распространение получили спектрометры двух разновидностей:

– спектрометр энергетической дисперсии позволяет за несколько минут получить полный спектр образца и определить его качественный и количественный химический состав. Его чувствительность составляет приблизительно 0,5 массовых процентов и требования к полировке образца не слишком высокие;

– спектрометр волновой дисперсии для последовательного получения спектра по элементам. Эксперимент более длительный, требуется тщательная полировка образца. Чувствительность метода составляет приблизительно 0,01 массовых процентов, разрешение между перекрывающимися пиками высокое.

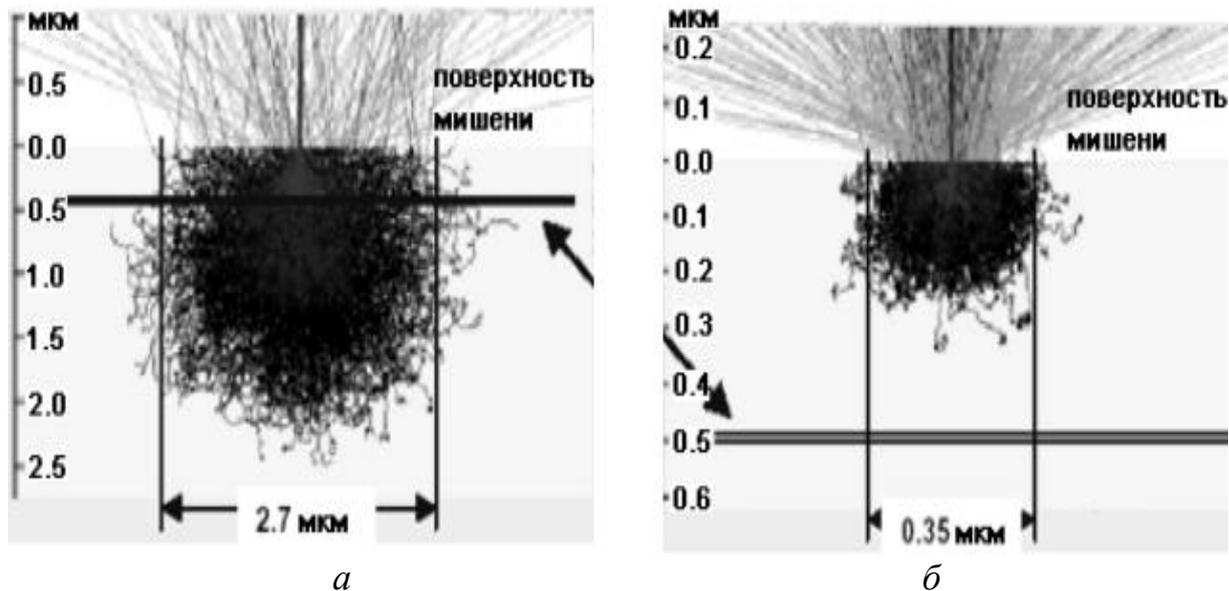


Рис. 3.8. Область генерации рентгеновского излучения при ускоряющем напряжении  $E_0 = 20$  кВ:

*a* – в кремнии (плотность  $2,33$  г/см<sup>3</sup>); *б* – в вольфраме (плотность  $19,3$  г/см<sup>3</sup>)

### 3.2. Устройство и работа растрового электронного микроскопа

Растровый электронный микроскоп в материаловедении применяют для исследования поверхности рельефных образцов. Для более ясного представления о принципах его работы необходимо пояснить понятие «растровое изображение». Допустим, что у нас есть идеальный диск тёмного цвета, который находится на белом листе (рис. 3.9, *a*), и необходимо получить с него «слепок» в виде матрицы, количество ячеек в которой будет задаваться нами, а значения в ячейке – 0 или 1 – будут задавать цвет – белый или чёрный. Накладывая мнимую сетку и выбирая размер ячейки (размер матрицы), можно получить «слепок» диска различного вида: матрица  $63 \times 63$  – рис. 3.9, *б*; матрица  $126 \times 126$  – рис. 3.9, *в*; матрица  $252 \times 252$  – рис. 3.9, *г*.

Принцип получения изображения заключается в модуляции яркости монитора видеоконтрольного устройства сигналами, пропорциональными числу зарегистрированных электронов соответствующим детектором, при сканировании сфокусированного электронного зонда по поверхности объекта. Отношение размера изображения на мониторе к размеру растра на образце определяет увеличение микроскопа.

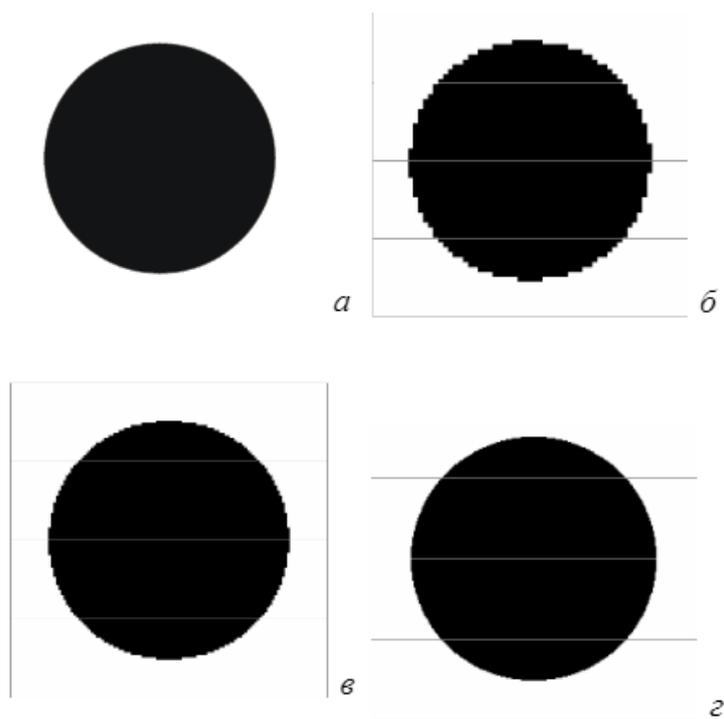


Рис. 3.9. Объяснение понятия «растровое изображение»:  
*a* – идеальный диск тёмного цвета на белом листе; *б* – вид диска в матрице  $63 \times 63$ ; *в* – вид диска в матрице  $126 \times 126$ ; *г* – вид диска в матрице  $252 \times 252$

Микроскоп S-4800 (рис. 3.10) представляет собой стационарную автоматизированную многофункциональную измерительную систему и состоит из электронно-оптической системы (колонны), камеры объектов с механизмом перемещения объектов, двух детекторов вторичных электронов, детектора отражённых электронов, детектора прошедших электронов (для режима «на просвет»), вакуумной системы, видеоконтрольного устройства, блока питания.



Рис. 3.10. Внешний вид растрового микроскопа S-4800

Микроскоп обеспечивает работу в режимах регистрации вторичных и отражённых электронов и в режиме «на просвет».

Назначение и основные технические характеристики растрового электронного микроскопа S-4800 приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Назначение и основные технические характеристики растрового электронного микроскопа S-4800

Назначение	Технические характеристики
Анализ микрорельефа поверхности твердотельных образцов. Изучение структуры сколов с предварительной подготовкой (препарированием) образцов. Измерение линейных размеров в микронном и субмикронном диапазонах. Анализ мелкодисперсных частиц. Качественный и количественный рентгеновский микроанализ с высокой локальностью	Разрешение электронно-оптической системы: 1 нм. Диапазон увеличений: 20–800.000 <sup>x</sup> . Диапазон ускоряющих напряжений: – 0,5–30 кВ – в обычном режиме; – 0,1–2,0 кВ – в режиме замедления. Давление в рабочей камере: ~10 <sup>-8</sup> Па. Рабочее расстояние между линзой и образцом: 1,5–40,0 мм. Максимальный размер образцов: 200×200×2 мм <sup>3</sup> . Регистрация изображения в режиме вторичных и отраженных электронов. Измерение линейных размеров ≥ 0,05 мкм с погрешностью ±5 %

При работе микроскопа обеспечиваются безопасные условия труда оператора. При максимальных значениях ускоряющего напряжения и тока зонда мощность эквивалентной дозы рентгеновского излучения в любой доступной точке на расстоянии 10 см от поверхности колонны и камеры объектов микроскопа не превышает 1 мкЗв/ч.

Управление микроскопом осуществляют с помощью встроенного контроллера и внешней ПЭВМ с использованием специализированного программного обеспечения S-4800 *Scanning Electron Microscope*.

Главное окно этой программы приведено на рис. 3.11.

**Title bar** (область заголовка) отображает заголовок окна.

**Minimize button** (свернуть) позволяет свернуть окно в панель задач.

**Size button** позволяет развернуть окно по размеру экрана.

**Close button** позволяет закрыть окно программы.

**Menu bar** (область меню) выводит выпадающие списки. Нажатие на один из выпадающих пунктов позволяет выполнить данную команду.

**Control Panel** (панель управления) содержит кнопки часто используемых команд.

**Operation Panel** (панель операций) содержит основные операции. На рис. 3.11 приведён полноэкранный режим сканирования.

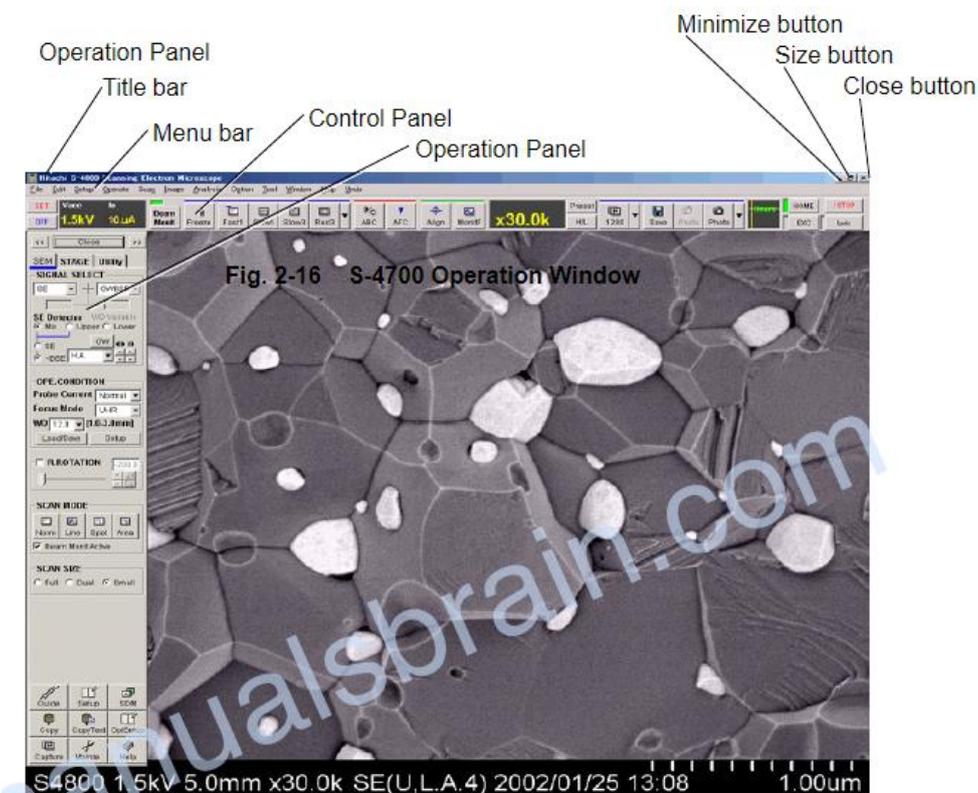


Рис. 3.11. Главное окно программы (полноэкранный режим)

На рис. 3.12 приведено основное окно результатов сканирования.

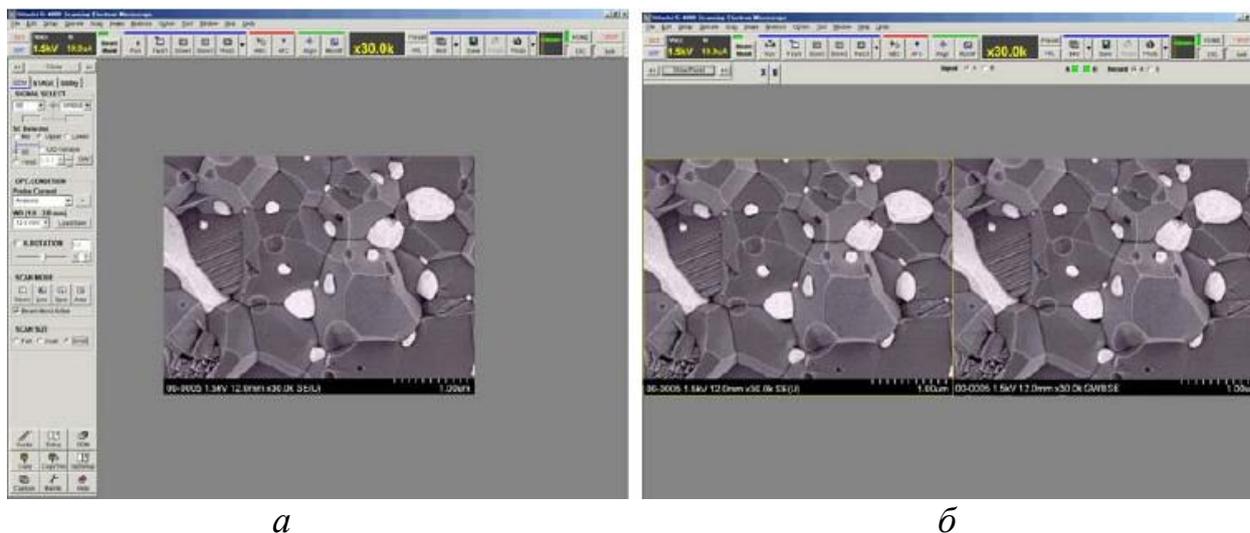


Рис. 3.12. Основное окно результатов сканирования: *а* – режим малого экрана; *б* – режим двойного экрана

Диалоговое окно **Сохранить изображение** (рис. 3.13) используется для сохранения сканированных или захваченных изображений.

Чтобы сохранить сканированные изображения, используйте кнопку **Быстрое сохранение** на панели управления. Используйте кнопку сохранения в окне захваченных изображений, чтобы сохранить захваченные изображения.

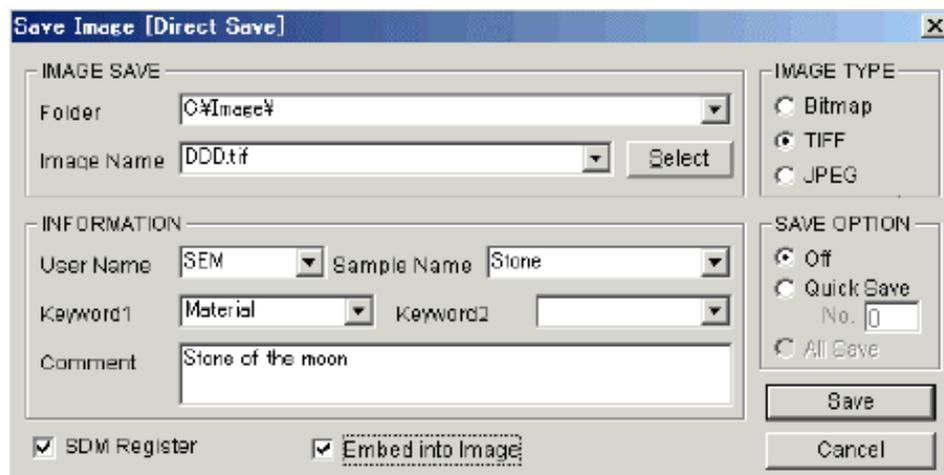


Рис. 3.13. Окно сохранения изображения

### 3.3. Порядок выполнения работы

Получение изображений поверхности объектов в растровом электронном микроскопе, а также их обработка с применением встроенной программы предполагает выполнение следующих действий:

- 1) включить системы электрического питания;
- 2) включить системный блок ПЭВМ РЭМ;
- 3) получить от преподавателя образцы для исследования;
- 4) провести шлюзование полученных образцов;
- 5) включить высокое напряжение и ток накала;
- 6) выставить предметный столик с исследуемыми образцами в рабочее положение ( $WD = 4 \dots 6$  мм);
- 7) получить изображение предметного столика при обзорном увеличении  $40\text{--}100\times$ ;
- 8) с помощью джойстика переместить предметный столик в положение для исследования;
- 9) получить изображение исследуемого объекта во вторичных электронах при рабочем увеличении  $1000\text{--}5000\times$ ;
- 10) измерить характерные детали поверхностного рельефа исследуемого объекта с помощью встроенной измерительной системы;
- 11) произвести фотографирование поверхности исследуемого объекта, полученного во вторичных электронах;

12) получить изображение исследуемого объекта в отражённых электронах при рабочем увеличении  $1000\text{--}5000^{\times}$ ;

13) произвести фотографирование поверхности исследуемого объекта в отражённых электронах, сравнить с изображением, полученном во вторичных электронах;

14) получить по возможности изображение исследуемого объекта при высоком увеличении  $250\ 000\text{--}450\ 000^{\times}$  во вторичных или отражённых электронах (в зависимости от качества и информативности изображения);

15) произвести фотографирование поверхности исследуемого объекта;

16) провести аналогичные действия (см. пп. 9–15) на других образцах, полученных от преподавателя и помещённых в колонну микроскопа (см. п. 4);

17) сравнить полученные изображения для различных образцов (описать словами основные особенности и указать количественные характеристики деталей поверхностного рельефа).

### **3.4. Содержание отчета**

1. Цель работы.

2. Краткие теоретические сведения.

3. Фотография поверхности исследуемого объекта, полученного во вторичных электронах.

4. Фотография поверхности исследуемого объекта в отражённых электронах.

5. Сравнение изображений из п. 3 и п. 4.

6. Фотографии объектов, полученных по возможности при высоком увеличении  $250\ 000\text{--}450\ 000^{\times}$  во вторичных или отражённых электронах (в зависимости от качества и информативности изображения).

7. Сравнение полученных изображений для различных образцов (описать основные особенности и указать количественные характеристики деталей поверхностного рельефа).

### **3.5. Контрольные вопросы**

1. Каковы основные характеристики упругого и неупругого взаимодействия вещества с пучком электронов?

2. Каким методом можно моделировать процесс неупругого рассеяния электронов?

3. Каков процесс образования вторичных и отражённых электронов?

4. Что такое характеристическое рентгеновское излучение?

5. Какие различия существуют между энергодисперсионным и волнодисперсионным спектрометрами?

6. В чём заключаются физические основы рентгеноспектрального микроанализа?

7. Какова область применения РЭМ и рентгеноспектрального микроанализа?

8. Каковы основные виды погрешностей определения состава при рентгеноструктурном анализе?

### **Список использованных источников**

1. Суворов, Э. В. Материаловедение: методы исследования структуры и состава материалов : учеб. пособие / Э. В. Суворов. – М. : Изд-во Юрайт, 2019. – 180 с.

2. Власов, А. И. Электронная микроскопия : учеб. пособие / А. И. Власов, К. А. Елсуков, И. А. Косолапов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. – 168 с.

3. Растровая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ : учеб. пособие / И. Ю. Пашкеев [и др.]. – Челябинск : Изд. центр ЮУрГУ, 2015. – 47 с.

4. Физические измерения в микроэлектронике / В. А. Пилипенко [и др.]. – Минск : БГУ, 2003. – 171 с.

5. Справочник пользователя для Hitachi Microscope & Magnifier S-4800 [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа : <https://manualsbrain.com/ru/manuals/789157>.

## Лабораторная работа №4

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУБМИКРОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

**Цель работы:** изучить теоретические основы тестового контроля параметров полупроводниковых структур, получить практические навыки контроля качества плёночных структур Si–SiO<sub>2</sub> методом анализа заряда пробоя и термополевых испытаний.

#### 4.1. Краткие теоретические сведения

Основными методами исследования электрофизических характеристик субмикронных полупроводниковых структур являются: контроль величины заряда пробоя (ВЗП) диэлектрических слоёв и термополевые испытания (ТПИ) таких слоёв для оценки миграции быстродиффундирующих ионов. Первый предназначен для контроля (ВЗП) подзатворного и туннельного диэлектриков, контроля скрытых дефектов, снижающих надёжность ИМС с проектными нормами до 0,18 мкм, второй – для проведения ТПИ диэлектрических слоёв кремниевых ИМС с проектными нормами до 0,18 мкм, контроля параметров их зарядовой стабильности и оценки величины объёмной концентрации подвижных ионных загрязнений в диэлектрике. Диапазон толщин подзатворных, изолирующих, базовых, межслойных, пассивирующих диэлектриков – 5–1500 нм.

##### 4.1.1. Методики контроля заряда пробоя диэлектрических слоёв

Тонкий подзатворный диэлектрик во многом определяет надёжность ИМС. Надёжность бездефектного окисла, как правило, значительно превышает требуемые нормы. Наличие дефектов существенно снижает надёжность диэлектрика и её экспрессный контроль является весьма актуальным.

Метод основан на статистическом измерении величины заряда пробоя диэлектрического слоя на выборке тестовых структур (ТС). На всей выборке измеряется величина заряда пробоя и после измерений определяется количество ТС, имеющих ВЗП меньше установленного критерия. Критерий бракования ТС по величине заряда пробоя устанавливается для каждого типа ИМС. Критерий надёжности подзатворного диэлектрика задаётся по допустимому количеству бракованных ТС в измеренной выборке. Данный критерий устанавливается на основе закона распределения Пуассона при задании необходимого уровня доверительной вероятности, например, величиной 0,95. Если в измеренной выборке количество бракованных структур больше допустимого, то подзатворный диэлектрик считается ненадёжным.

Измерения величины заряда пробоя диэлектрического слоя производятся при пропускании через ТС ступенчато-нарастающего тока (*I*-развёртка). Это обеспечивает возможность проведения экспресс-анализа на ТС малой площади

( $\sim 100 \times 100$  мкм<sup>2</sup>), которые располагаются на дорожках скрайбирования пластин.

Для анализа и установления природы дефектов используется три типа *тестовых структур*:

– затвор по периметру выходит на слой *LOCOS (Local Oxidation of Silicon)*. Площадь структуры  $S$ , длина  $L$  примерно равна ширине  $W$ ;

– затвор по периметру расположен на анализируемом тонком диэлектрике. Площадь структуры  $S$ , длина  $L$  намного больше ширины  $W$ ;

– по периметру затвора сформирована область истока/стока. Площадь структуры  $S$ , длина  $L$  намного больше ширины  $W$ .

Величина площади ТС  $S_{ТС}$  является важным параметром, определяющим достоверность проведения контроля. Она должна выбираться как можно большей. Рекомендуемая величина площади – от  $0,07 \times 0,07$  мм<sup>2</sup> до  $5,0 \times 5,0$  мм<sup>2</sup>.

**Количество тестовых структур для измерений.** При контроле качества подзатворного диэлектрика контроль величины заряда пробоя проводится в пяти точках на одной пластине из партии, если другое количество измерений не оговорено. Измерения проводятся крестообразно (начиная со второго модуля от края пластины, но не менее одного сантиметра от края пластины).

При лабораторных исследованиях и проведении аттестации новых техпроцессов количество ТС (объём выборки  $N$ ) должно составлять не менее 30 шт.

Допустимая плотность дефектов  $D_0$  определяется выражением

$$D_0 = \frac{-I_n(P)}{S_{ИМС}}, \quad (4.1)$$

где  $S_{ИМС}$  – активная площадь затвора контролируемой ИМС, см<sup>2</sup>.

На рис. 4.1, *а* приведены зависимости величины объёма выборки  $N$  от  $S_{ТС}$  для допустимой плотности дефектов  $D_0 = 1000 \dots 0,001$  деф./см<sup>2</sup>.

В случае использования минимального объёма выборки при лабораторных исследованиях и аттестации новых техпроцессов допускается наличие не более 10 % ТС с зарядом ниже нормы.

На рис. 4.1, *б* приведены зависимости допустимой плотности дефектов  $D_0$  от активной площади затвора  $S_{ИМС}$  для значений доверительной вероятности  $P$ , равной 0,6; 0,9; 0,95; 0,99 и 0,999.

**Параметры тока развёртки** включают:

–  $I_{нач}$  – начальный ток развёртки. Типичная величина плотности начального тока развёртки составляет 10 мкА/см<sup>2</sup>;

–  $S$  – число ступенек на декаду. Для обеспечения максимальной точности целесообразно использовать  $S = 50$  (вносит наименьший процент вклада последней ступени в общую величину заряда пробоя  $Q_{laststep} = 4,49$  %);

–  $t_{дек}$  – время нарастания тока на одну декаду порядка 500 мкс;

–  $E_{\max}$  – максимальная напряженность поля составляет 25 МВ/см для толщин подзатворного диэлектрика  $h_d < 20$  нм и 15 МВ/см для  $h_d \geq 20$  нм.

Критерий завершения измерений (пробой) выбирается по снижению напряжения на структуре при её пробое до уровня  $U_{\text{изм}} < 0,85 U_{\max}$ .

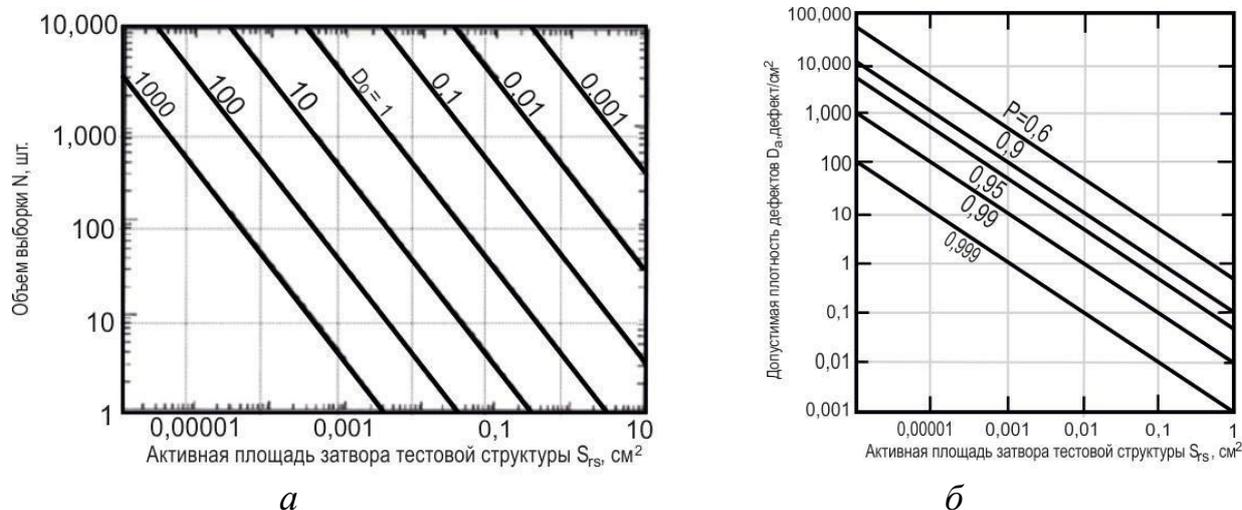


Рис. 4.1. Зависимости:

*а* – величины объёма выборки  $N$  от площади ТС  $S_{\text{ТС}}$  для диапазона допустимой плотности дефектов  $D$ ; *б* – допустимой плотности дефектов  $D_0$  от активной площади затвора  $S_{\text{ИМС}}$  при разных уровнях доверительной вероятности

**Заряд пробоя** диэлектрика  $Q_{bd}$ , Кл/см<sup>2</sup>, каждой ТС определяется по формуле

$$Q_{bd} = \frac{I_{\text{нач}} \cdot t_{\text{нач}} + \sum_{i=1}^{i_{bd}} I_{n_i} t_{\text{шаг}}}{S}, \quad (4.2)$$

где  $I_{\text{нач}}$  – начальный ток развёртки, А;

$T_{\text{нач}}$  – начальное время развёртки, с;

$I$  – ток через структуру на  $i$ -м шаге, А;

$t_{\text{шаг}}$  – длительность шага, с;

$S$  – площадь ТС, см<sup>2</sup>.

Типичная величина заряда пробоя  $Q_{bd}$  составляет 0,1–10 Кл/см<sup>2</sup>.

**Анализ результатов.** После измерений и расчёта величины заряда пробоя проводится обработка данных. Для этого используется представление результатов измерений на основе распределения Вейбулла:

$$F = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{Q}{Q_{bd}} \right)^\beta \right], \quad (4.3)$$

где  $F$  – вероятность отказа ТС при протекании через диэлектрик заряда;

$Q_{bd}$  – величина плотности заряда, протекшего через диэлектрик, Кл/см<sup>2</sup>;  
 $Q$  – величина плотности заряда пробоя, характерная для всей выборки ТС (характеристическая величина заряда пробоя), Кл/см<sup>2</sup>;  
 $\beta$  – константа, равная тангенсу угла наклона линейной части области собственного пробоя на графике распределения Вейбулла (см. рис. 4.2).

Строится распределения Вейбулла, т. е. зависимость процента отказов с накоплением (интегральной) от величины логарифма заряда пробоя диэлектрика  $\log Q_{bd}$ . Кроме того, по оси ординат может откладываться функция

$$\ln \left\{ \ln \left( \frac{100}{100 - \text{процент отказов}} \right) \right\}.$$

На распределении выделяются две моды – ТС с наличием дефектов (левая ветвь) и ТС без дефектов (правая ветвь) (см. рис. 4.2).

Распределение Вейбулла часто является бимодальным, базируется на большом количестве измерений и даёт следующие параметры:

- $F_0$ , процент дефектных структур (зависит от площади ТС);
- область собственного пробоя диэлектрика (правая ветвь). Она определяет среднее значение величины заряда пробоя;
- область пробоя структур с дефектами (левая ветвь). Наклон данной ветви свидетельствует о природе дефектов.

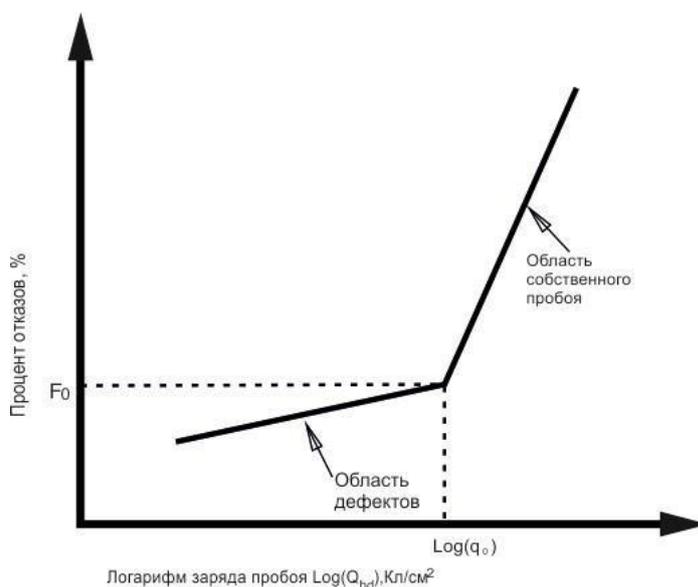


Рис. 4.2. Схематическое изображение распределения Вейбулла

#### 4.1.2. Моделирование величины заряда пробоя подзатворного диэлектрика ИМС по параметрам тестовых структур

В процессе изготовления ИМС измерение величины заряда пробоя производится на ТС, расположенных в тестовых модулях пластины или на

периферии кристалла. Из-за ограниченных размеров областей для размещения ТС для измерений должен использоваться МОП-конденсатор площадью  $10^{-2}$  мм<sup>2</sup>. Площадь подзатворного диэлектрика ИМС составляет 5–10 % площади кристалла. Для ИМС с размером кристалла 6×6 мм<sup>2</sup> и проектными нормами 0,8 мкм это приблизительно 2 мм<sup>2</sup>, а для ИМС ОЗУ ёмкостью 1 Мбит с проектными нормами 0,35 мкм – около 10 мм<sup>2</sup> (кристалл 10×10 мм<sup>2</sup>). То есть подзатворный диэлектрик ИМС в тысячу раз больше по площади ТС и результаты измерения величины заряда пробоя на ТС и ИМС будут существенно отличаться. Это требует моделирования величины заряда пробоя подзатворного диэлектрика ИМС по результатам измерения параметров ТС.

Для ИМС заряд пробоя  $Q_{bd \text{ ИМС}}$ , Кл/см<sup>2</sup>, рассчитывается по формуле

$$Q_{bd \text{ ИМС}} = Q_{bd \text{ ТС}} \left[ \frac{S_{\text{ТС}}}{S_{\text{ИМС}}} \right]^{\frac{1}{\beta}}, \quad (4.4)$$

где  $Q_{bd \text{ ТС}}$  – заряд пробоя ТС, Кл/см<sup>2</sup>;

$S_{\text{ТС}}$  – площадь ТС, см<sup>2</sup>;

$S_{\text{ИМС}}$  – площадь ИМС, см<sup>2</sup>.

На рис. 4.3 приведена зависимость величины  $Q_{bd \text{ ИМС}}/Q_{bd \text{ ТС}}$  от  $S_{\text{ТС}}/S_{\text{ИМС}}$  для различных значений  $\beta$ . С её помощью можно определить величину заряда пробоя диэлектрика для ИМС по измеренной величине заряда пробоя на ТС.

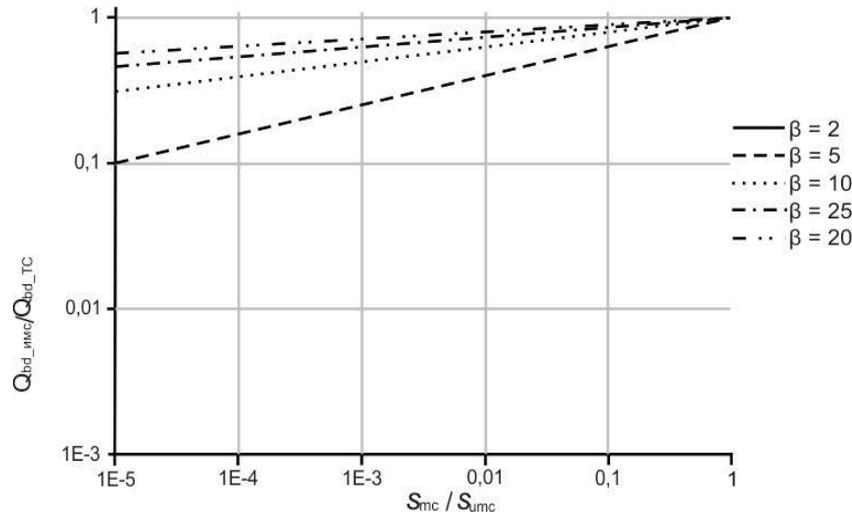


Рис. 4.3. Зависимость величины  $Q_{bd \text{ ИМС}}/Q_{bd \text{ ТС}}$  от  $S_{\text{ТС}}/S_{\text{ИМС}}$  для различных значений  $\beta$

На рис. 4.4 приведена зависимость количества дефектов  $S_{\text{ТС}} \cdot D$  от объёма выборки  $N$  при количестве бракованных структур в выборке от 0 до 50. Она используется для установления реальной плотности дефектов подзатворного диэлектрика ИМС. Для этого необходимо:

– на оси абсцисс отложить точку с заданным объёмом выборки;

- от этой точки провести перпендикуляр к оси абсцисс;
- найти точку пересечения перпендикуляра с кривой, соответствующей данному количеству забракованных ТС в выборке;
- из данной точки провести линию, параллельную оси абсцисс;
- при пересечении этой линии с осью ординат определить значение  $S_{ТС} \cdot D$ ;
- рассчитать реальную плотность дефектов  $D$ , деф./см<sup>2</sup>, по формуле

$$D = \frac{S_{ТС} \cdot D}{S_{ТС}}. \quad (4.5)$$

Если реальная плотность дефектов  $D$  меньше допустимой плотности  $D_0$ , диэлектрик считается надёжным.

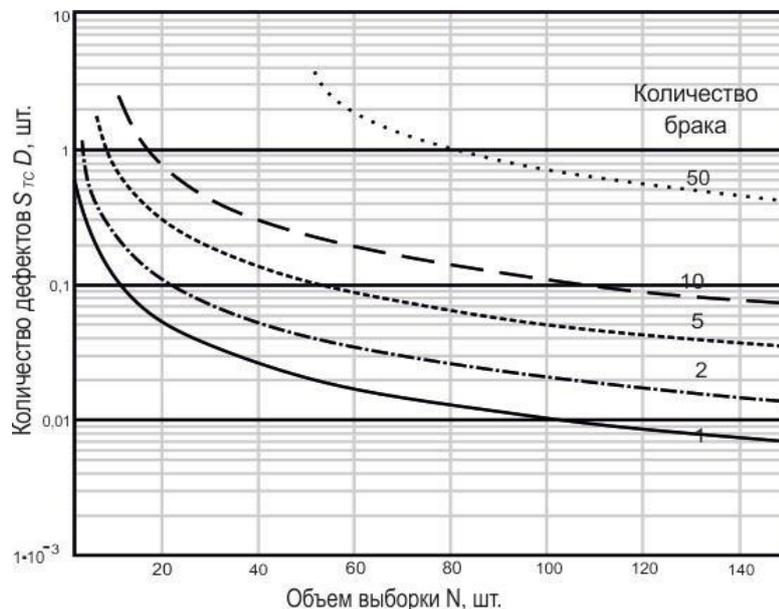


Рис. 4.4. Зависимость параметра  $S_{ТС} \cdot D$  от объёма выборки  $N$  при количестве бракованных структур в выборке от 0 до 50

#### 4.1.3. Оценка миграции быстро диффундирующих ионов методом термополевых испытаний диэлектрических слоёв

Надёжность ИМС во многом определяется ионными загрязнениями диэлектрических слоёв. При изготовлении ИМС используются следующие материалы и методы формирования диэлектрических слоёв:

- подзатворный диэлектрик – высокотемпературные процессы окисления Si в различных средах (пирогенное, в парах воды, сухом кислороде и др.);
- изолирующие LOCOS, ДТО, базовые диэлектрики – высокотемпературные длительные процессы окисления кремния для создания изоляции элементов ИМС;

– межслойные, пассивирующие диэлектрики – процессы осаждения слоёв (разложение кремнийорганических соединений, пиролитическое осаждение).

Такие слои содержат различные загрязнения, обусловленные загрязнениями исходных материалов, газов, осадки, технологических камер оборудования. Исключить их полностью за счёт повышения степени чистоты материалов, реагентов, осадки практически невозможно, поскольку в технологическом процессе могут быть неконтролируемые источники загрязнений, в том числе и после осаждения диэлектрического слоя.

Зарядовые свойства слоёв Si–SiO<sub>2</sub> во многом определяют параметры и надёжность ИМС. Их анализ становится наиболее актуальным в связи с переходом к субмикронным проектным нормам и уменьшением толщины подзатворного диэлектрика. При проектных нормах 0,35 мкм его толщина составляет 7,0 нм. Так как этот диэлектрик формируется термическим окислением, дефекты поверхностного слоя кремния формируют дефекты в структуре диэлектрика и во многом определяют зарядовые свойства системы Si–SiO<sub>2</sub>.

На рис. 4.5 схематически изображено расположение зарядов в системе Si–SiO<sub>2</sub>. Для их обозначения используются:

- $Q$  – эффективный заряд, приходящийся на единицу площади границы Si–SiO<sub>2</sub>, Кл/см<sup>2</sup>;
- $N$  – концентрация зарядов на границе, см<sup>-2</sup> ( $N = Q/e$ , где  $e$  – заряд электрона).

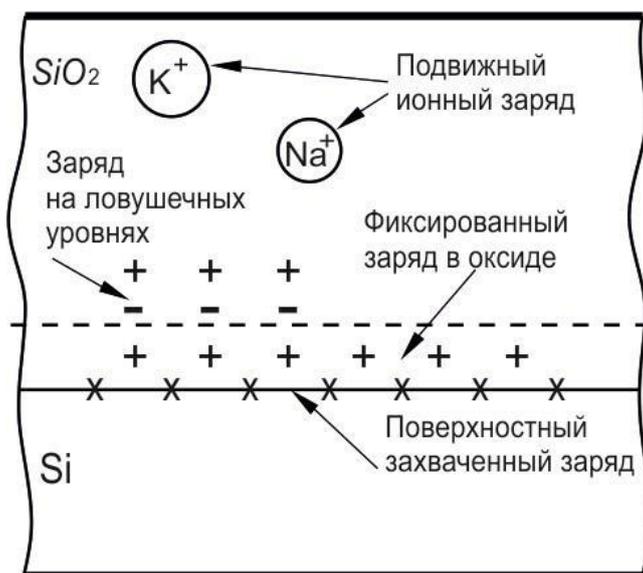


Рис. 4.5. Типы зарядов в системе Si–SiO<sub>2</sub>

Эти величины описывают эффективный заряд, приведённый к границе раздела Si–SiO<sub>2</sub>, в то время как на некотором расстоянии от этой границы действительная плотность заряда может быть значительно больше.

Фиксированный заряд в оксиде ( $Q$ ,  $N$ ) – положительный заряд, обусловленный структурными дефектами в слое оксида толщиной менее 2,5 нм

у границы раздела Si–SiO<sub>2</sub>. Этот заряд появляется в процессе окисления кремния, его плотность зависит от среды и температуры окисления, условий охлаждения и ориентации кремния.

Подвижный ионный заряд ( $Q_m, N_m$ ) обусловлен присутствием ионов примесей, таких как Li<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, H<sup>+</sup>. К этому типу заряда относятся также отрицательные ионы (например, гидроксильные группы и др.) и ионы тяжёлых металлов, но их подвижность при температурах менее 500 °С низка. Кроме того, тяжёлые металлы вносят опосредованный вклад в величину заряда за счёт изменения (нарушения) структуры оксида.

Поверхностный захваченный заряд ( $Q_{it}, N_{it}$ ) – положительный или отрицательный заряд, обусловленный структурными дефектами поверхности, возникающими в процессе окисления кремния, примесями металлов на границе раздела Si–SiO<sub>2</sub>, и дефектами, приводящими к нарушению связей. Эти заряды локализованы на границе раздела Si–SiO<sub>2</sub>. Поверхностные состояния, приводящие к появлению поверхностного захваченного заряда, электрически связаны с нижерасположенным кремнием и поэтому могут заряжаться или разряжаться в зависимости от поверхностного потенциала. Большую часть поверхностного захваченного заряда нейтрализует низкотемпературный (450 °С) отжиг в среде H<sub>2</sub>. Именно этот тип заряда часто называют поверхностными состояниями, быстрыми состояниями, пограничными состояниями и др.

Заряд на ловушечных уровнях в оксиде ( $Q_{ot}, N_{ot}$ ) может быть положительным или отрицательным в зависимости от захвата дырок или электронов ловушками, образованными в объёме оксида в процессе его формирования. Он может возникнуть и в результате радиационной ионизации, инжекционных потоков или других подобных процессов. В отличие от фиксированного заряда его также можно нейтрализовать низкотемпературным отжигом (500 °С), хотя нейтральные ловушки при этом могут остаться.

Среди ионных загрязнений особое значение имеют подвижные ионы Li<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> и др., обладающие малым ионным радиусом, что обуславливает их высокую подвижность в слое SiO<sub>2</sub> в режимах эксплуатации ИМС (при температуре до 150 °С и напряжении питания 23 В). В этом случае из-за перераспределения ионов по толщине диэлектрика могут с течением времени изменяться электрические характеристики ИМС вплоть до их отказа. Для установления наличия подвижных ионных загрязнений и их уровня используются ТПИ.

После формирования МОП-структуры подвижные ионы в диэлектрике имеют исходное распределение по толщине  $d$  диэлектрика, схематически представленное на рис. 4.6, *a*. Каждый заряд величиной  $e$ , находящийся на расстоянии  $d_{Si}$  от границы раздела кремний – диэлектрик в приповерхностном слое кремния, наводит заряд величиной  $q^*$ , вычисляемый по формуле

$$Dq^* = e \frac{d - d_{Si}}{d}, \quad (4.6)$$

где  $q$  – заряд электрона, Кл;

$d$  – толщина диэлектрика, нм;

$d_{\text{Si}}$  – расстояние от границы раздела кремний – диэлектрик, нм.

Наведённые заряды изменяют потенциал и приводят к изменению поверхностных свойств кремния. Как следует из формулы (4.6), степень влияния ионов сильно зависит от расстояния до границы раздела.

В общем случае ионы щелочных металлов подвижны даже при комнатной температуре, однако при  $T > 150$  °С скорость дрейфа возрастает настолько, что в электрическом поле  $E = 2$  МВ/см за 5 мин все подвижные заряды при отрицательной полярности напряжения на затворе перемещаются к границе раздела диэлектрик – затвор (рис. 4.6, б) либо к границе кремний – диэлектрик при положительной полярности напряжения на затворе (рис. 4.6, в). При этом степень влияния зарядов в случае, изображённом на рис. 4.6, б, будет минимальна, а в случае, изображённом на рис. 4.6, в, – максимальна.

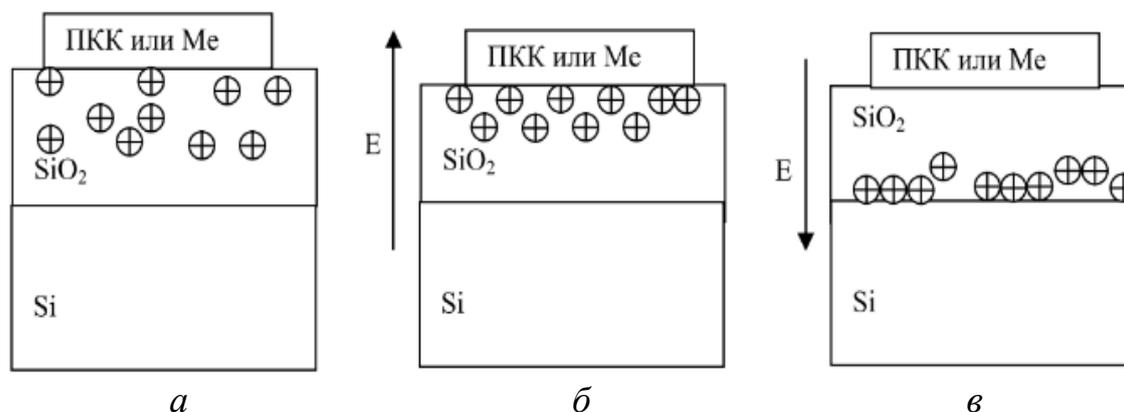


Рис. 4.6. Распределение подвижных ионов по толщине диэлектрика:  
*a* – исходное; *б* – после ТПИ при отрицательной полярности поля;  
*в* – после ТПИ при положительной полярности поля

Задачей ТПИ является оценка изменения параметров МОП-структуры после её перевода в состояние принудительного распределения подвижных ионов вблизи границы раздела Si–SiO<sub>2</sub> (см. рис. 4.6, в) относительно исходного состояния (см. рис. 4.6, а). Процедура ТПИ состоит из следующих операций:

– измерение исходной ВФХ для МОП-конденсатора либо сток-затворной  $I_d = F(V_g)$  ВАХ для МОП-транзистора при температуре  $(22 \pm 5)$  °С;

– выдержка структуры при  $T = 200$  °С в течение 5 мин с приложением положительного потенциала на затвор относительно подложки величиной, соответствующей напряжённости поля в диэлектрике  $E = 2$  МВ/см;

– остывание образца до температуры  $(22 \pm 5)$  °С без снятия напряжения на затворе;

– измерение конечной ВФХ для МОП-конденсатора либо сток-затворной  $I_d = F(V_g)$  ВАХ для МОП-транзистора.

Изменение параметров МОП-структуры оценивается по величине сдвига напряжения плоских зон  $\Delta V_{fb}$  для МОП-конденсаторов либо по величине сдвига порогового напряжения  $\Delta V_{th}$  для МОП-транзисторов. При этом для МОП-конденсаторов возможно также определять абсолютные значения плотности заряда подвижных ионов как разность встроенных зарядов после и до ТПИ.

Для подзатворного диэлектрика с толщиной  $\text{SiO}_2$   $d = 100$  нм и поликремниевым затвором в КМОП- и БиКМОП-технологии приняты следующие нормы:

- модуль сдвига величины напряжения плоских зон или модуль сдвига величины порогового напряжения должен быть менее либо равен 100 мВ;
- для алюминиевого затвора модуль сдвига величины напряжения плоских зон или порогового напряжения должен быть менее либо равен 500 мВ;
- для диэлектриков остальных типов (межслойные, изолирующие, пассивирующие) с толщиной диэлектрика менее 100 нм модуль сдвига величины нормированного напряжения плоских зон  $\Delta V_{fb \text{ норм}}$  должен быть менее либо равен 400 мВ.

Модуль сдвига величины нормированного напряжения плоских зон  $\Delta V_{fb \text{ норм}}$  – это нормированное на толщину окисла 100 нм значение плоских зон, рассчитываемое по формуле

$$\Delta V_{fb \text{ норм}} = \Delta V_{fb} \frac{d}{100}, \quad (4.7)$$

где  $\Delta V_{fb}$  – величина сдвига напряжения плоских зон, В;

$d$  – толщина диэлектрика, нм.

Модуль сдвига нормированного порогового напряжения  $\Delta V_{th \text{ норм}}$  для диэлектриков толщиной менее 100 нм должен быть менее либо равен 400 мВ. Он рассчитывается по формуле

$$\Delta V_{th \text{ норм}} = \Delta V_{th} \frac{d}{100}, \quad (4.8)$$

где  $\Delta V_{th}$  – величина сдвига порогового напряжения, В;

$d$  – толщина диэлектрика, нм.

Объёмная концентрация подвижных ионных загрязнений в диэлектрическом слое  $N_{ion}$ ,  $\text{см}^{-3}$ , рассчитывается по формуле

$$N_{ion} = 2,1 \cdot 10^{14} \cdot \frac{\Delta V_{fb}}{D_{ox}^2}, \quad (4.9)$$

где  $\Delta V_{fb}$  – величина сдвига напряжения плоских зон после ТПИ, В;

$D_{ox}$  – толщина двуокиси кремния, мкм.

#### 4.1.4. Требования к тестовым структурам

Контроль диэлектрических слоёв на термополевою стабильность проводится на рабочих пластинах перед операцией финишного контроля ИМС или на пластинах-спутниках со специально подготовленными тестовыми МОП-структурами. В качестве ТС используются тестовый МОП-конденсатор или МОП-транзистор, располагаемые в тестовых модулях или на периферии рабочего кристалла. Конденсаторным диэлектриком является подзатворный диэлектрик или комбинация из подзатворного (термического окисла толщиной до 50 нм) и исследуемого межслойного или пассивирующего диэлектрика. В качестве нижней обкладки используется кремний с концентрацией легирующей примеси  $10^{14}$ – $10^{17}$  см<sup>-3</sup>. Площадь активной верхней обкладки (затвора) МОП-структуры –  $10^{-2}$ – $1$  мм<sup>2</sup>. Размер контактной площадки к каждой обкладке – не менее  $80 \times 100$  мкм<sup>2</sup>. Периодичность контроля, место контроля на пластине и объём выборки пластин – в соответствии с ТД на изделие.

Конструктивные особенности вариантов тестового МОП-конденсатора приведены на рис. 4.7, б и в.



Рис. 4.7. Варианты тестового МОП-конденсатора:  
а – с расположением затвора на подзатворном диэлектрике;  
б – с выходом затвора на толстый диэлектрик (*LOCOS*)

В качестве затвора используются:

- слой алюминия толщиной от 300 до 2000 нм;
- поликристаллический кремний (ПКК), легированный примесью *n*-типа толщиной от 150 до 500 нм.

Площадь ТС рассчитывается так, чтобы ёмкость окисла МОП-структуры была в пределах от 10 до 2000 пФ.

ТПИ могут проводиться на рабочих *p*- и *n*-канальных, паразитных, единичных и объединённых транзисторах с отдельным затвором с размерами контактной площадки не менее 80–100 мкм.

## 4.2. Порядок выполнения работы

### 4.2.1. Исследование заряда пробоя диэлектрических слоёв

Средства измерения и вспомогательные материалы:

- прецизионные анализаторы параметров полупроводниковых приборов В1500А, НР4156В или измеритель ИППГ-1;

- микрозондовые манипуляторы модели 7000, ЭМ-6040А или зондовая станция *Summit11000AP* фирмы *Cascade*;
- тест *J-Ramp* программы *EasyExpert* или элемент ВЗП с тестом *TDDDB* в управляющей программе измерителя ИППП-1;
- персональный компьютер с пакетом программ *STATISTICA*;
- исследуемые пластины с тестовыми МОП-конденсаторами.

Ход работы:

1. Выбрать необходимый уровень доверительной вероятности  $P$  из значений 0,6; 0,7; 0,9; 0,95; 0,99; 0,999 для расчёта объёма выборки  $N$ .

По суммарной активной площади затвора ИМС  $S_{\text{ИМС}}$  и установленной доверительной вероятности  $P$ , пользуясь зависимостью допустимой плотности дефектов  $D_0$  от площади затвора ИМС  $S_{\text{ИМС}}$  при разных уровнях доверительной вероятности (см. рис. 4.1, б), определить допустимую плотность дефектов  $D_0$  для данного изделия.

*Примечание.* При отсутствии информации о величине активной площади затвора  $S_{\text{ИМС}}$  считать её равной 0,02–0,06 площади кристалла ИМС.

Исходя из полученных  $D_0$  и  $S_{\text{ТС}}$ , пользуясь зависимостью объёма выборки  $N$  от площади ТС  $S_{\text{ТС}}$  для значений в диапазоне допустимой плотности дефектов  $D_0 = 1000 \dots 0,001$  деф./см<sup>2</sup> (см. рис. 4.1, а), определить необходимый объём выборки  $N$  (минимальное число измерений на пластине).

2. Измерить величину  $Q_{bd}$  на пластине, для чего:

- установить исследуемую пластину на столик микроманипулятора и закрепить её вакуумным прижимом;
- установить зонды микроманипулятора на исследуемую МОП-структуру;
- загрузить программу *EasyEXPERT*. Загрузить пользователя. В *Category* выбрать раздел *Reliability*. В окне *Library* выбрать тест *J-Ramp*. При необходимости ввести изменения в параметры программы;
- в открывшемся окне ввести параметры: полярность (тип канала), размер структуры (длину и ширину затвора), время интегрирования, время измерений, выбрать зонды, контактирующие с ТС, начальную и конечную границу измерений по току и ограничение по напряжению;
- запустить измерения и после их окончания выписать заряд пробоя тестовой структуры  $Q_{bd}$  (точка перед резким (не менее 15 %) падением измеренного напряжения);
- провести испытания  $N$  (объём выборки) точек на пластине.

3. Построить распределение Вейбулла.

3.1. Запустить программу *STATISTICA*.

3.2. Изменить количество необходимых строк открывшейся таблицы на значение числа измеренных ТС. Для чего на панели инструментов выбрать следующую последовательность команд: **Вставка** → **Добавить регистры**.

3.3. В окне *How many* задать добавочное количество строк, в окне *Insert after case* – номер строки, после которой будут добавлены новые строки.

3.4. Изменить наименование столбца *VAR1* на шифр исследуемого изделия, дважды щёлкнув левой кнопкой мыши по ячейке с названием столбца.

3.5. Ввести в каждую ячейку столбца с названием шифра исследуемого изделия значения заряда пробы.

3.6. Построить распределения Вейбулла, для чего на панели инструментов выбрать последовательность команд: **Статистика** → **Индустриальная статистика & Сигма шесть** → **Анализ процесса *Make Weibull paper*** → **ОК**.

3.7. Нажать ***Variables*** и выбрать имя необходимого столбца.

3.8. Для построения графика нажать ***P-plot (paper)***. В новом окне появится график типа, показанного на рис. 4.8.

3.9. Сохранить таблицу и график под оригинальными именами.

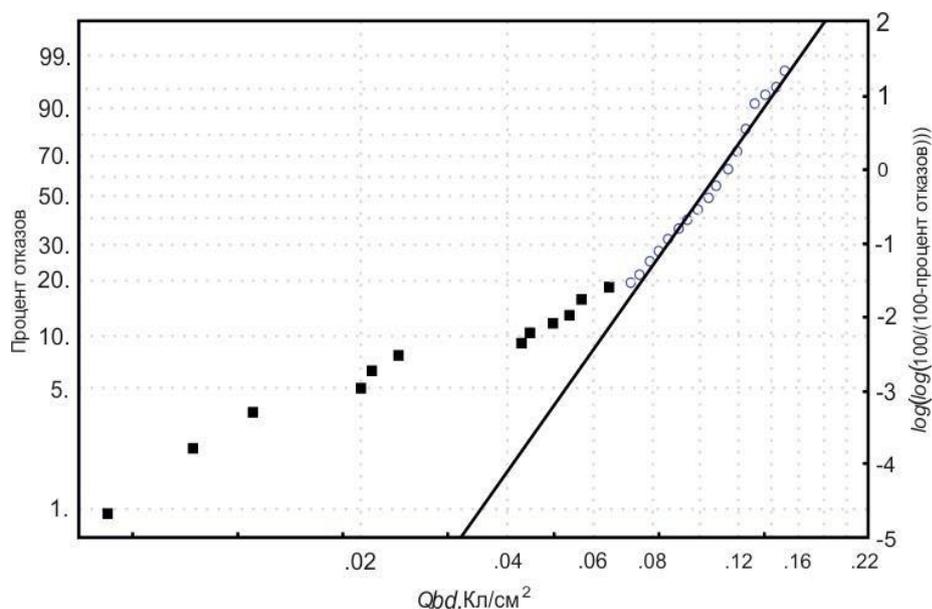


Рис. 4.8. Распределение Вейбулла, полученное с помощью пакета программ **STATISTICA**

4. Построить гистограмму распределения величины  $Q_{bd}$ .

4.1. Нажать кнопку **Графики** в главном меню, в выпадающем меню выбрать закладку **Гистограммы**.

4.2. В окне нажать кнопку **Переменные**. В новом окне выбрать имя необходимого столбца и нажать **ОК**.

4.3. Нажать закладку **Дополнительно**, в открывшемся меню в окне **Тип подгонки** выбрать **Weibull**, в окне **Тип графика** – **Regular**, также отметить **Остановка между столбцами** и **Показ процентов**. Нажать **ОК**.

В новом окне появится гистограмма распределения величины  $Q_{bd}$ , как показано на рис. 4.9, а.

5. Построить топограмму распределения величины  $Q_{bd}$  по пластине.

5.1. В главном меню выбрать **Графики**, в выпадающем меню – **3D Последовательные графики** и перейти в меню **Сырые графики данных...**

5.2. В новом окне нажать кнопку **Переменные**, в новом окне выбрать имя необходимого столбца и нажать **ОК**.

5.3. На закладке **Дополнительно**, в окне **Тип графика** выбрать *Surface* и нажать **ОК**.

В новом окне появится топограмма распределения величины  $Q_{bd}$  по пластине, как показано на рис. 4.9, б.

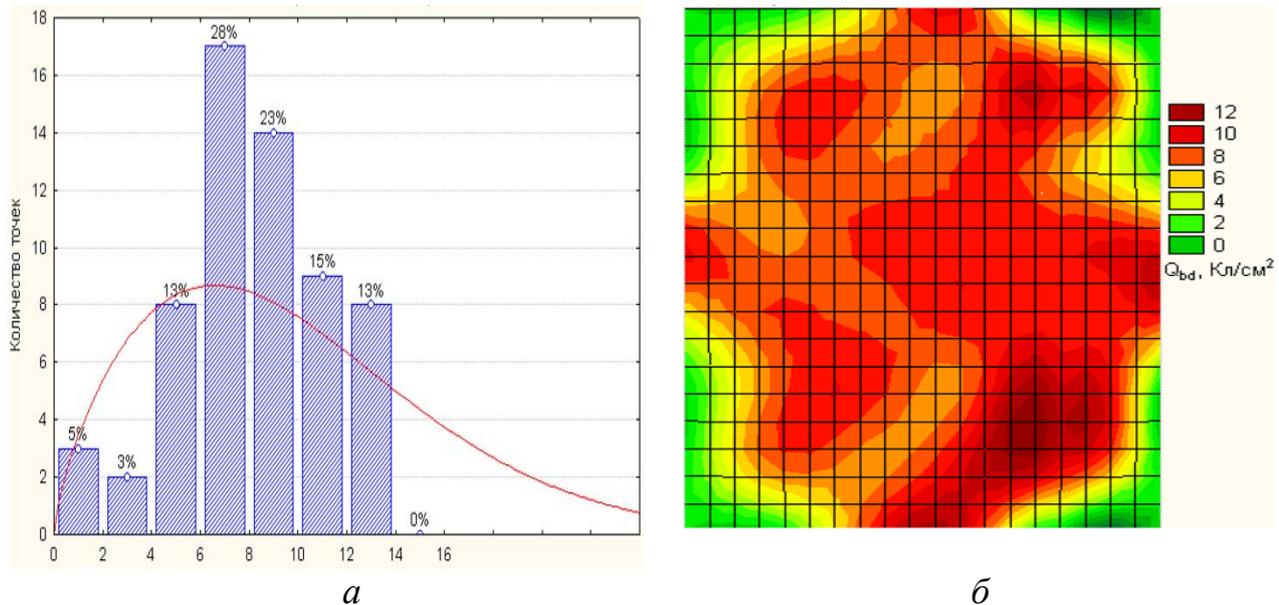


Рис. 4.8. Гистограмма распределения величины  $Q_{bd}$  (а) и цветовая топограмма распределения заряда пробоя по пластине, отражающая расположение дефектных областей (б)

6. В текстовом редакторе *Word* оформить результаты исследований, в которых привести сводную таблицу, содержащую следующие параметры контроля времязависимого пробоя:

- наименование ИМС, площадь ТС  $S_{ТС}$ , активную площадь затворов ИМС  $S_{ИМС}$ , толщину подзатворного диэлектрика  $h_{д}$ , объём выборки  $N$ , доверительную вероятность  $P$  при принятии решения о надёжности, допустимое количество забракованных ТС  $N_{БРдоп}$  в выборке, допустимую величину  $Q_{hd}$  (критерий забракования), количество забракованных ТС в выборке  $N_{БРизм}$ , текущую плотность дефектов  $D$ ;

- параметры распределения Вейбулла: тангенс угла наклона 1 – ветвь собственного пробоя, тангенс угла наклона 2 – ветвь пробоя по дефектам, характеристический заряд  $Q_{bd0}$  – величина заряда, соответствующая 63,1 % отказов с накоплением. Она соответствует условию

$$\ln \left\{ \ln \left\{ \frac{100}{100 - \text{процент отказов}} \right\} \right\}. \quad (4.10)$$

## 4.2.2. Термополевые испытания диэлектрических слоёв для оценки миграции быстродиффундирующих ионов

Средства измерения и вспомогательные материалы:

- автоматизированная измерительная система *HP4061A*, состоящая из *LCR* измерителя *HP4275A (E4980A)* и измерителя малых токов *HP4140B*;
- нагревательный столик типа *Tempchuck System, model TC100*, обеспечивающий нагрев пластины до 250 °С;
- источник питания Б5-48 или Б5-50;
- манипулятор многозондовый в светозащитном экранирующем боксе;
- ПЭВМ;
- исследуемые пластины с тестовыми МОП-конденсаторами или МОП-транзисторами, пластины-спутники с тестовыми МОП-структурами.

### Ход работы:

1. Подготовить измерительную систему *HP4061A* к работе.
2. Смочить столик манипулятора спиртом (одна или две капли).
3. Положить на столик рабочую пластину или пластину-спутник с тестовыми МОП-структурами.
4. Установить зонд манипулятора на исследуемую МОП-структуру.
5. Переключить измерительную систему *HP4061A* в режим измерения ёмкости, нажав кнопку **FUNCTION C** на панели (для измерения ВФХ МОП-конденсаторов), или в режим измерения тока, нажав кнопку **FUNCTION I** (для измерения ВАХ МОП-транзисторов).
6. Откалибровать **LCR** измеритель.
7. Запустить программу **HFALL** (для ВФХ МОП-конденсаторов) или программу **IVALL** (для ВАХ МОП-транзисторов).
8. В **HFALL** ввести нижний и верхний предел напряжения смещения (В), площадь затвора (см<sup>2</sup>) или толщину окисла (нм), частоту измерений, температуру (°С), выбрать материал затвора.
9. В **IVALL** ввести нижний и верхний предел напряжения смещения, задержку на шаг в секундах, режим усреднения и порядок измерений.
10. Провести измерения исходных высокочастотных ВФХ МОП-конденсатора или ВАХ МОП-транзистора при температуре пластины 25 °С. Расположение измеренных точек фиксируется. Место контроля на пластине и количество контролируемых точек – в соответствии с заданием.
11. Записать исходные значения напряжения плоских зон  $V_{fb}$  и плотности заряда в диэлектрике  $Q_{ss}/q$  для МОП-конденсатора (значение порогового напряжения  $V_{th}$  для МОП-транзистора).
12. Нагреть образец на нагревательном столике до температуры 200 °С.
13. Подать испытательное поле на исследуемые МОП-структуры напряжённостью  $E = 2$  МВ/см с положительной полярностью на затворе.
14. Выдержать образец при  $T = 200$  °С и  $E = 2$  МВ/см в течение 5 мин.
15. Охладить образец до температуры не более 40 °С при поданном испытательном поле.

16. Измерить конечную ВФХ для МОП-конденсатора либо ВАХ для МОП-транзистора.

17. Записать конечные значения напряжения плоских зон  $V_{fb}$  и плотности заряда в диэлектрике  $Q_{ss}/q$  для МОП-конденсатора (значение порогового напряжения  $V_{fb}$  для МОП-транзистора).

Обработка и оформление результатов измерения:

1. Рассчитать сдвиг напряжения плоских зон  $\Delta V_{fb}$  или сдвиг порогового напряжения  $\Delta V_{th}$  и изменение плотности заряда в диэлектрике  $\Delta Q_{ss}/q$ , см<sup>-2</sup>, по следующим формулам:

$$\Delta V_{fb} = V_{fb\text{конечное}} - V_{fb\text{исходное}}, \quad (4.11)$$

где  $V_{fb\text{конечное}}$  – напряжения плоских зон после ТПИ, В;

$V_{fb\text{исходное}}$  – исходное напряжения плоских зон, В;

$$\Delta V_{th} = V_{th\text{конечное}} - V_{th\text{исходное}}, \quad (4.12)$$

где  $V_{th\text{конечное}}$  – пороговое напряжение после ТПИ, В;

$V_{th\text{исходное}}$  – исходное пороговое напряжение, В;

$$\Delta Q_{ss}/q = Q_{ss}/q_{\text{конечное}} - Q_{ss}/q_{\text{исходное}}, \quad (4.13)$$

где  $Q_{ss}/q_{\text{конечное}}$  – плотность заряда в диэлектрике после ТПИ, см<sup>-2</sup>;

$Q_{ss}/q_{\text{исходное}}$  – исходная плотность заряда в диэлектрике, см<sup>-2</sup>.

2. В случае толстых диэлектриков ( $d > 100$  нм) рассчитать  $\Delta V_{fb\text{норм}}$  или  $\Delta V_{fb\text{норм}}$  по формуле (4.7) или (4.8).

3. Записать рассчитанные значения параметров.

### 4.3. Содержание отчёта

1. Цель работы.

2. Краткие теоретические сведения.

3. Результаты исследования заряда пробоя диэлектрических слоёв:

– величины допустимой плотности дефектов  $D_0$  и необходимого объёма выборки  $N$ ;

– таблица значений измеренных зарядов пробоя тестовых структур  $Q_{bd}$ ;

– графическое изображение и параметры распределения Вейбулла, гистограмма распределения величины  $Q_{bd}$  и топограмма распределения величины  $Q_{bd}$  по пластине.

4. Результаты термополевых испытаний диэлектрических слоёв и оценки миграции быстро диффундирующих ионов:

– исходные (при 25 °С) вольт-фарадные характеристики тестовых структур МОП-конденсаторов и исходные значения напряжения плоских зон;

- исходные (при 25 °С) вольт-амперные характеристики и плотности заряда в диэлектрике тестовых структур МОП-транзисторов;
- конечные значения указанных характеристик после термополевых испытаний;
- расчётные значения сдвига напряжения плоских зон  $\Delta V_{fb}$  и изменение плотности заряда в диэлектрике  $\Delta Q_{sslq}$ .

5. Выводы.

#### 4.4. Контрольные вопросы

1. Какие существуют основные методы контроля электрофизических характеристик субмикронных полупроводниковых структур?
2. Для каких полупроводниковых структур важно контролировать заряд пробоя диэлектрических слоёв?
3. Каково основное назначение термополевых испытаний диэлектрических слоёв кремниевых ИМС?
4. Какова методика контроля заряда пробоя диэлектрических слоёв?
5. Как строится и какие параметры тестовых структур позволяет определить распределение Вейбулла?
6. Каковы цели и методика моделирования величины заряда пробоя подзатворного диэлектрика ИМС?
7. Какие бывают и на что влияют ионные загрязнения диэлектрических слоёв ИМС?
8. Какие известны зарядовые свойства слоёв Si–SiO<sub>2</sub> и их параметры, назначение термополевых испытаний МОП-конденсаторов и МОП-транзисторов?
9. Какие требования предъявляются к тестовым структурам для ТПИ и как определяются сдвиг напряжения плоских зон  $\Delta V_{fb}$  и изменение плотности заряда в диэлектрике  $\Delta Q_{sslq}$ ?

#### Список использованных источников

1. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов. В 2 кн. Кн. 2 / С. Зи. – М. : Мир, 1984. – 456 с.
2. Малер, Р. Элементы интегральных схем / Р. Малер, Т. Кейминс. – М. : Мир, 1989. – 630 с.
3. Пасынков, В. В. Полупроводниковые приборы / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин. – М. : Лань, 2009. – 480 с.
4. Кусакин, Д. С. Измерительно-аналитический комплекс для локального исследования вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик полупроводников / Д. С. Кусакин, В. Г. Литвинов. – СПб. : Вестник РГРТУ, 2016. – №56. – С. 177–182.
5. Физические измерения в микроэлектронике / В. А. Пилипенко [и др.]. – Минск : БГУ, 2003. – 171 с.

## Лабораторная работа №5

### ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРНО-ТРАНЗИСТОРНЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

**Цель работы:** изучить особенности режимов работы и параметров интегральных схем транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ); исследовать передаточные и переходные характеристики ТТЛ-схем; приобрести навыки работы с интегральными схемами и навыки расчёта схем с помощью программы *SPICE*-моделирования.

#### 5.1. Краткие теоретические сведения

Интегральные схемы транзисторно-транзисторной логики – это схемы, во входной цепи которых используются многоэмиттерные транзисторы (МЭТ). Различают ТТЛ-схемы с простым и сложным инвертором. Использование сложного инвертора позволяет увеличить коэффициент разветвления по выходу и повысить помехоустойчивость. Уровень логического нуля ТТЛ-схем равен напряжению коллектор – эмиттер насыщенного транзистора  $U_{КЭнас}$  (около 50 мВ). Уровень логической единицы схемы с простым инвертором практически равен напряжению питания, уровень логической единицы схемы со сложным инвертором равен напряжению питания за вычетом падения напряжения на двух открытых *p-n*-переходах (1,4 В).

##### 5.1.1. Принцип работы ТТЛ-схем

ТТЛ с простым инвертором (рис. 5.1) состоит из входного каскада на многоэмиттерном транзисторе  $T1$ , база которого подключена к источнику питания  $E$  через сопротивление  $R1$ , и из выходного каскада, который представляет собой простой инвертор на транзисторе  $T2$ .

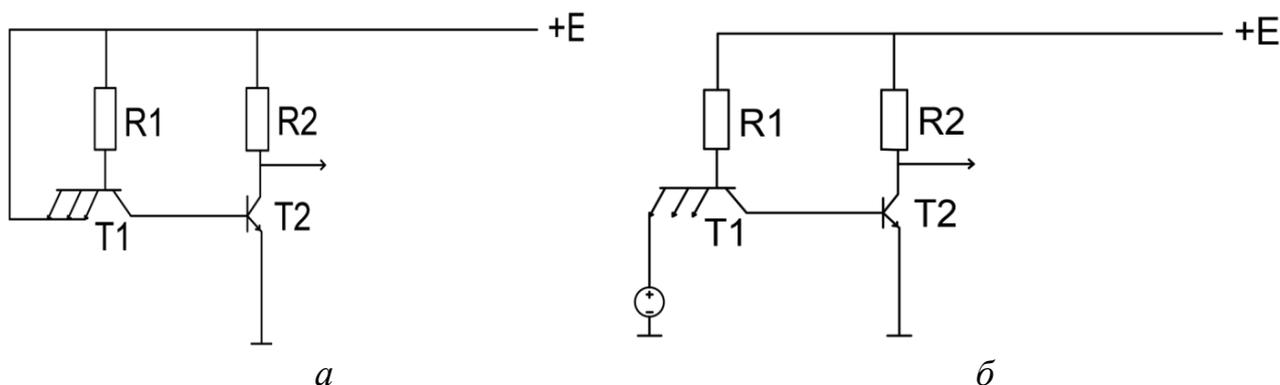


Рис. 5.1. Работа ТТЛ-схемы с простым инвертором при подаче логической единицы на все входы (а) и при подаче нуля на один вход (б)

При подаче на все выходы-эмиттеры потенциала уровня логической единицы (см. рис. 5.1, *а*) каждый переход база – эмиттер  $T1$  закрыт, т. к. на эмиттере и на базе высокий потенциал. На базе  $T1$  напряжение близко к  $+E$  и его достаточно, чтобы открыть два перехода (от базы  $T1$  до земли): база – коллектор  $T1$  и база – эмиттер  $T2$ . Ток протекает от  $E$  через  $R1$ , открытый переход база – коллектор  $T1$  и открытый переход база – эмиттер  $T2$ . Поскольку  $T2$  открыт и насыщен, то на выходе схемы (коллекторе  $T2$ )  $U_{\text{вых}} = U_{\text{КЭнас}} = 50$  мВ – низкий потенциал, т. е. логический ноль.

При подаче на один из входов-эмиттеров потенциала уровня логического нуля (см. рис. 5.1, *б*), т. е. некоторого остаточного напряжения  $U_{\text{ост}} = U_{\text{КЭнас}}$  (50–100 мВ) с выхода предыдущей схемы, переход база – эмиттер  $T1$  открывается (т. к. база  $T1$  подключена к  $+E$  через  $R1$ ). Потенциал базы  $T1$  равен

$$U_{\text{Б, T1}} = U_{\text{ост}} + U_{\text{БЭпр}} = 0,05 + 0,7 = 0,75 \text{ В.}$$

Этого потенциала недостаточно для открывания двух переходов (от базы  $T1$  до земли): база – коллектор  $T1$  и база – эмиттер  $T2$ . Транзистор  $T2$  заперт, на выходе схемы – уровень логической единицы, т. е.  $U_{\text{вых}} = E$ .

Для увеличения помехоустойчивости и порога переключения в схему ТТЛ добавляется диод (рис. 5.2, *а*). Теперь, чтобы  $T2$  открылся, потенциал на базе  $T1$  должен быть больше на 0,6 В (напряжение открывания диода), чем в предыдущей схеме. Дополнительное сопротивление  $R3$  служит для стекания заряда, накопленного в базе  $T2$  при его насыщении. Однако диод уменьшает базовый ток  $T2$ , а следовательно, степень его насыщения.

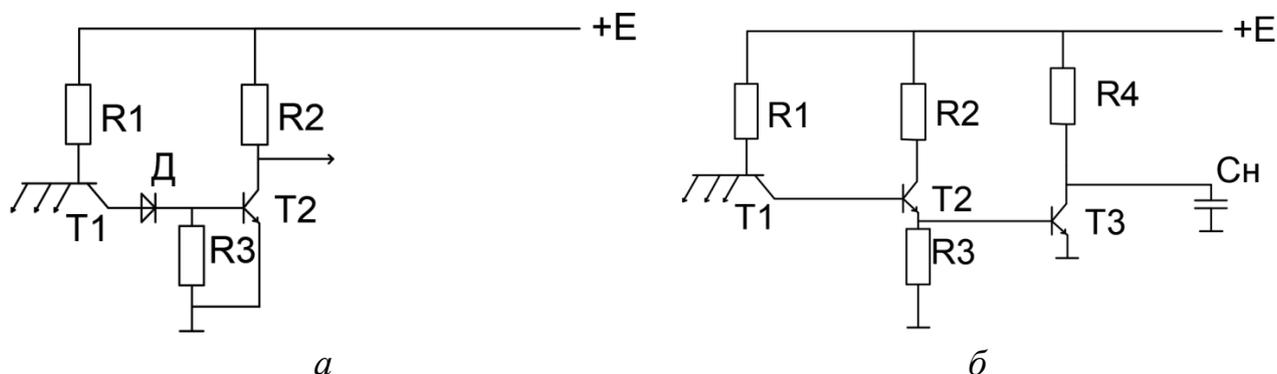


Рис. 5.2. ТТЛ-схемы с дополнительным диодом для повышения помехоустойчивости (*а*) и дополнительным транзистором (*б*)

Для увеличения тока базы  $T2$  и регулировки его в требуемых пределах вместо диода включается дополнительный транзистор  $T3$  (рис. 5.2, *б*). Подключение  $T2$  позволяет создать вариант схемы с более мощным выходным каскадом на  $T3$ . Регулируя величину  $R2$ , можно установить требуемый ток  $T3$ . При работе на нагрузочную ёмкость  $C_n$  во время переходного процесса её зарядка от  $+E$  происходит через сопротивление  $R4$ , а разрядка на землю – через

насыщенный  $T3$ . Поскольку сопротивление  $R1$  (единицы килоом) существенно больше сопротивления насыщенного транзистора  $T3$  (десятки ом), то длительность процесса заряда ёмкости  $C_n$  существенно больше длительности её разряда.

Для уменьшения длительности процесса заряда его необходимо осуществлять также через некоторый открытый транзистор, который, в свою очередь, должен быть закрыт при открытом транзисторе  $T3$ . Таким образом, формируется сложный выходной каскад, управляемый транзистором  $T2$ , и получается ТТЛ-схема со сложным инвертором (рис. 5.3).

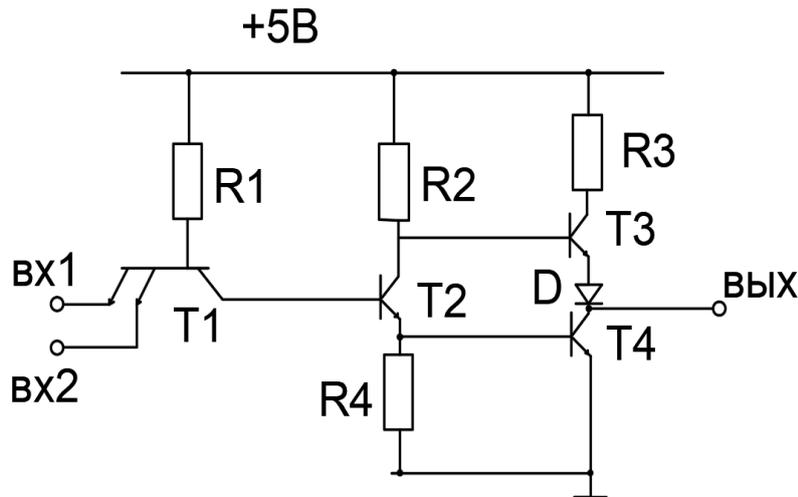


Рис. 5.3. ТТЛ-схема со сложным инвертором

Типовые значения сопротивлений ТТЛ-элемента со сложным инвертором:  $R1 = 4 \text{ кОм}$ ,  $R2 = 1,6 \text{ кОм}$ ,  $R3 = 130 \text{ Ом}$ ,  $R4 = 1 \text{ кОм}$ .

Введём обозначения:

1)  $U_{БЭ(БК)}$  – падение напряжения на открытом переходе база – эмиттер (база – коллектор) транзистора (0,6–0,7 В);

2)  $U_d$  – падение напряжения на открытом диоде (0,6–0,7 В);

3)  $U_{КЭнас}$  – напряжение насыщения коллектор – эмиттер транзистора (0,05–0,1 В).

## 5.1.2. Методика эксперимента

### 5.1.2.1. Анализ передаточной характеристики $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$

Пусть на один из входов ТТЛ-схемы со сложным инвертором (см. рис. 5.3) подаётся напряжение, изменяющееся от уровня логического нуля до уровня логической единицы, на другой вход подано постоянное напряжение, соответствующее логической единице. Работа многоэмиттерного транзистора в данной схеме аналогична работе в схеме с простым инвертором (см. рис. 5.1).

При  $U_{\text{вх}} = U_0 = U_{\text{КЭнас}}$  (см. рис. 5.3) потенциал этого эмиттера транзистора мал, переход база – эмиттер транзистора  $T1$  открыт, на базе  $T1$

$$U_{\text{Б},T1} = U_{\text{КЭнас}} + U_{\text{БЭ}}. \quad (5.1)$$

Его недостаточно для открывания трёх переходов (от базы  $T1$  до земли): база – коллектор  $T1$ , база – эмиттер  $T2$ , база – эмиттер  $T4$ . Поэтому ток коллектора  $T1$  практически равен нулю, потенциалы на базах транзисторов  $T2$  и  $T4$  близки к нулю и эти транзисторы закрыты. Так как  $T2$  закрыт, то его ток коллектора близок к нулю, а потенциал коллектора – к напряжению питания  $E$ , т. е.  $U_{\text{К},T2} = E$ . Поскольку база транзистора  $T3$  соединена с коллектором  $T2$ , потенциал базы  $T3$  высок, транзистор  $T3$  и диод  $D$  открыты, ток на выход (в нагрузку) течёт от источника питания через  $R2$  (базовый ток  $T3$ ). На выходе схемы высокий уровень напряжения, соответствующий логической единице. (Если нагрузка не подключена к выходу схемы, то выходного тока нет, но получается делитель напряжения из открытых  $T3$ , диода  $D$ , имеющих малое сопротивление, и закрытого  $T4$ , имеющего высокое сопротивление.) Выходное напряжение (пренебрегая падением напряжения на  $R2$ ) равно

$$U_{\text{вых}} = U^1 = E - U_{\text{БЭ},T3} - U_{\text{д}}. \quad (5.2)$$

Рассмотренному режиму соответствует участок  $I$  передаточной характеристики элемента ТТЛ (рис. 5.4,  $a$ ).

При увеличении напряжения на входе до 0,6–0,7 В, переход база – эмиттер  $T1$  начинает закрываться, входной ток (ток эмиттера  $T1$ ) уменьшается, потенциал базы  $T1$  возрастает, переходы база – коллектор  $T1$  и база – эмиттер  $T2$  открываются.  $T2$  переходит в нормальный активный (усилительный) режим, его коллекторный и эмиттерный токи растут (участок II, см. рис. 5.4,  $a$ ), напряжение на его коллекторе уменьшается на величину

$$\Delta U_{\text{К},T2} = -R2/R1 \Delta U_{\text{вх}},$$

где  $R2/R1$  – коэффициент усиления каскада на транзисторе  $T2$ .

Через эмиттерный повторитель на  $T3$  уменьшение  $\Delta U_{\text{К},T2}$  передаётся на выход:

$$U_{\text{вых}} = E - R2/R1 \Delta U_{\text{вх}} - U_{\text{БЭ},T3} - U_{\text{д}}. \quad (5.3)$$

На участке III (см. рис. 5.4,  $a$ ) входное напряжение увеличивается до 1,2–1,3 В, переход база – эмиттер транзистора  $T1$  закрывается, потенциал базы  $T1$  ещё больше повышается,  $T2$  входит в режим насыщения, падение напряжения на  $R4$  начинает открывать  $T4$ , начинает закрываться  $T3$ .  $T4$  переходит в активный (усилительный) режим. Коэффициент усиления каскада на  $T4$  велик (десятки раз), т. к. в цепи его эмиттера нет сопротивления, а

сопротивление закрывающегося  $T3$  велико. Соответственно, выходное напряжение резко падает.

На участке IV (см. рис. 5.4, *a*) транзисторы  $T2$  и  $T4$  насыщены,  $T3$  и диод  $D$  закрыты (т. к. на базе  $T3$  низкий потенциал), выходное напряжение равно напряжению насыщения транзистора  $T4$ , т. е. напряжению логического нуля:

$$U_{\text{вых}} = U_0 = U_{\text{КЭ нас. } T4}.$$

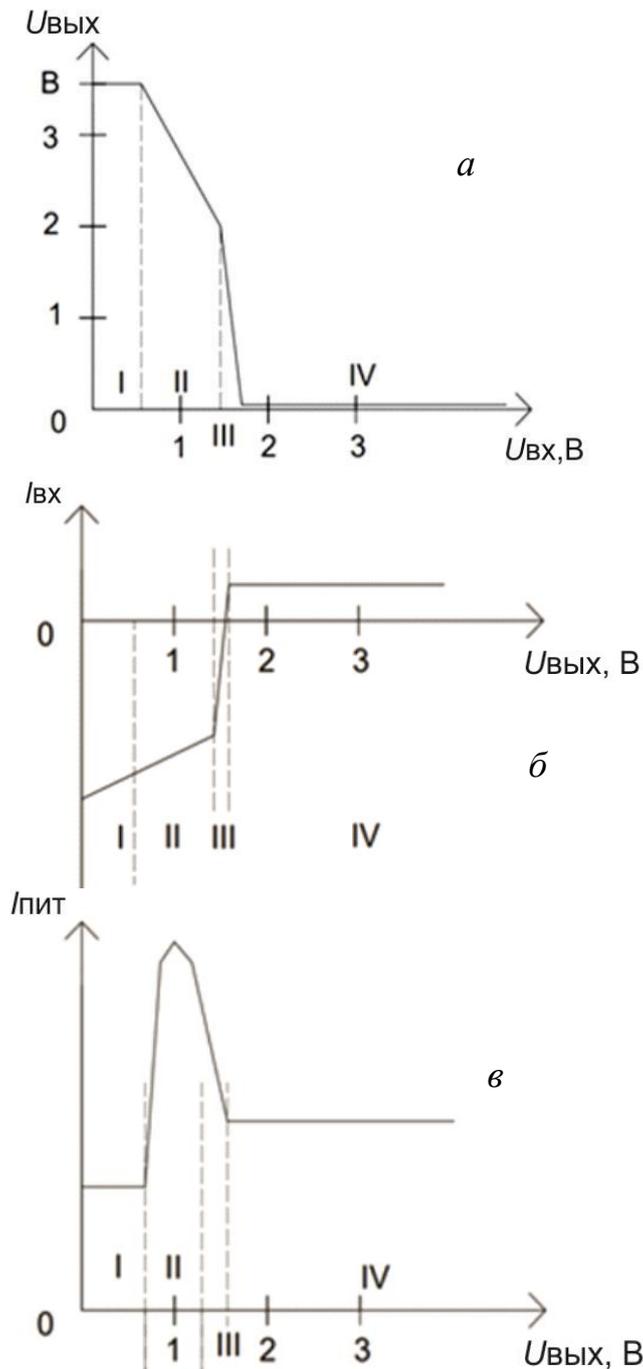


Рис. 5.4. Типовые характеристики ТТЛ-схемы со сложным инвертором:  
*a* – передаточная характеристика; *б* – входная характеристика;  
*в* – зависимость тока потребления от входного напряжения

### 5.1.2.2. Анализ входной характеристики $I_{вх} = f(U_{вх})$

На первом и втором участках входным током является эмиттерный ток открытого перехода база – эмиттер транзистора  $T1$ , ограниченный сопротивлением  $R1$  (см. рис. 5.4, б). При увеличении входного напряжения  $U_{вх}$  величина входного тока уменьшается в соответствии с выражением

$$I_{вх} = 1/R1(E - U_{БЭ1} - U_{вх}). \quad (5.4)$$

На третьем участке с ростом входного напряжения переход база – эмиттер  $T1$  закрывается, потенциал базы  $T1$  растёт, открывается переход база – коллектор  $T1$ . Ток, текущий через сопротивление  $R1$ , разветвляется, часть, текущая через переход база – эмиттер, резко уменьшается, а часть, текущая через переход база – коллектор в базу транзистора  $T2$ , – резко увеличивается.

На четвёртом участке входной ток определяется током обратно смещённого перехода база – эмиттер  $T1$ , т. е.  $I_{вх} = I_{Э0}$ .

### 5.1.2.3. Анализ тока потребления $I_{пит} = f(U_{вх})$

Токи, потребляемые в режимах логического нуля и логической единицы, значительно меньше, чем при переключении. При переключении имеется участок II (см. рис. 5.4, в), когда оба транзистора  $T3$  и  $T4$  открыты ( $T3$  ещё не закрылся, а  $T4$  уже открылся), и возникает бросок тока потребления через открытые транзисторы  $T3$  и  $T4$ . Для ограничения амплитуды этого тока в схему включают резистор с небольшим сопротивлением ( $R3 = 100...160$  Ом). В табл. 5.1 приведены типовые параметры логических ТТЛ-схем со сложным инвертором.

Таблица 5.1

Типовые параметры логических ТТЛ-схем со сложным инвертором

Типовые параметры	Значение
1	2
Номинальное напряжение источника питания	5 В ( $\pm 5\%$ )
Уровни логического нуля на выходе	не более 0,4 В
Уровни логической единицы на выходе	не менее 2,4 В
Помехоустойчивость по единице/нолю	не менее 0,4 В/0,4 В
Входной ток низкого уровня	не более 1,6 мА
Входной ток высокого уровня	не более 0,04 мА
Потребляемая статическая мощность на один логический элемент	не более 20 мВт

1	2
Ток потребления при низком уровне выходного напряжения	не более 22 мА
Ток потребления при высоком уровне выходного напряжения	не более 8 мА
Время задержки распространения при включении	не более 15 нс
Время задержки распространения при выключении	не более 22 нс
Коэффициент разветвления по выходу	10

## 5.2. Порядок выполнения работы

Объектом исследования является интегральная микросхема 155ЛА3, которая вмонтирована в измерительный блок (рис. 5.5).

К внешним выводам блока подключаются два вольтметра, два амперметра, генератор импульсного напряжения, двухканальный осциллограф. Также требуются источники регулируемого и нерегулируемого напряжения (5 или 6,3 В), конденсатор ёмкостью 100 пФ.

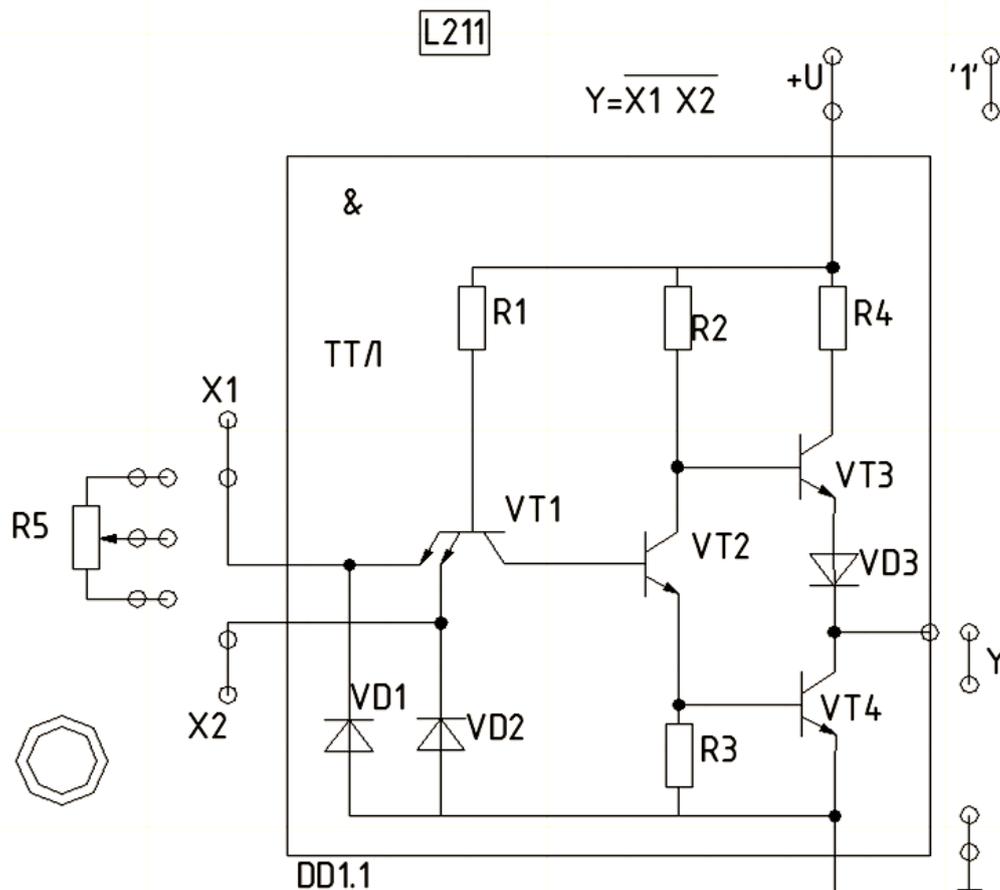


Рис. 5.5. Схема включения ТТЛ-микросхемы 155ЛА3 в лабораторный макет

Снятие статических характеристик  $U_{\text{вых}}, I_{\text{вх}}, I_{\text{потр}} = f(U_{\text{вх}})$  производится по схеме, изображённой на рис. 5.6.

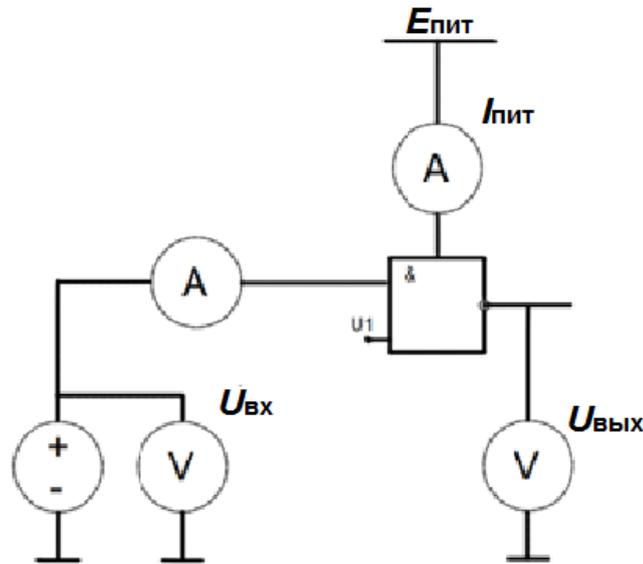


Рис. 5.6. Схема подключения измерительных приборов для исследования статических характеристик  $U_{\text{вых}}, I_{\text{вх}}, I_{\text{потр}} = f(U_{\text{вх}})$  ТТЛ-схемы

### 5.2.1. Исследование статических характеристик

Для исследования статических характеристик необходимо:

1. Подключить источник регулируемого напряжения через амперметр (для измерения  $I_{\text{вх}}$ ) к одному из входов микросхемы, остальные входы соединить с выходом нерегулируемого источника питания. Разъём питания микросхемы через амперметр (для измерения  $I_{\text{потр}}$ ) подключить к нерегулируемому источнику питания.

2. Измерить величины напряжения на одном из входов, на выходе схемы, входной ток на том же входе, ток питания при изменении напряжения на входе от 0 до  $E_{\text{пит}}$ . Результаты измерений занести в таблицу (табл. 5.2).

Таблица 5.2

#### Результаты измерений напряжения и тока питания

$U_{\text{вых}}$							
$I_{\text{вх}}$							
$I_{\text{потр}}$							
$f(U_{\text{вх}})$							

Характеристики должны содержать по 10–15 точек, причем 6–8 из них должны находиться на втором и третьем участках, т. е. соответствовать

выходному напряжению в промежутке, не включающем  $U_0$  и  $U_1$ , одна из точек должна соответствовать наибольшему значению тока потребления, эту точку следует обнаружить и зафиксировать.

3. По результатам измерений на отдельных полях построить графики характеристик  $U_{\text{вых}}, I_{\text{вх}}, I_{\text{потр}} = f(U_{\text{вх}})$ .

В программах MS Excel, OpenOffice следует выбирать тип графика «точечный», а не «график» (даёт равномерный шаг по осям).

Примеры измеренных характеристик приведены в табл. 5.3 и на рис. 5.7.

Таблица 5.3

Пример измеренных статических характеристик ТТЛ-схемы –  
зависимости  $U_{\text{вых}}, I_{\text{вх}}, I_{\text{потр}} = f(U_{\text{вх}})$

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$U_{\text{вых}}, \text{В}$	$I_{\text{потр}}, \text{мА}$	$I_{\text{вх}}, \text{мкА}$
1	2	3	4
5,000	0,024	16,2	21
4,000	0,025	16,2	18,4
1,698	0,025	16,2	-10
1,519	0,026	16,2	-100
1 430	0,029	16,2	-210
1,415	0,040	16,2	-243
1,370	0,300	16,2	-253
1,350	0,410	16,2	-267
1,306	0,511	16,2	-282
1,280	0,600	16,2	-290
1,250	0,715	16,2	-300
1,210	0,870	17,9	-314
1,193	0,950	25,4	-319
1,189	1,040	45,6	-320
1,180	1,200	21,2	-323
1,179	1,250	17,9	-325
1,178	1,650	15,8	-334
1,185	1,940	13,6	-339
1,161	2,510	13,6	-345
0,971	3,200	13,6	-389
0,519	3,540	13,6	-486

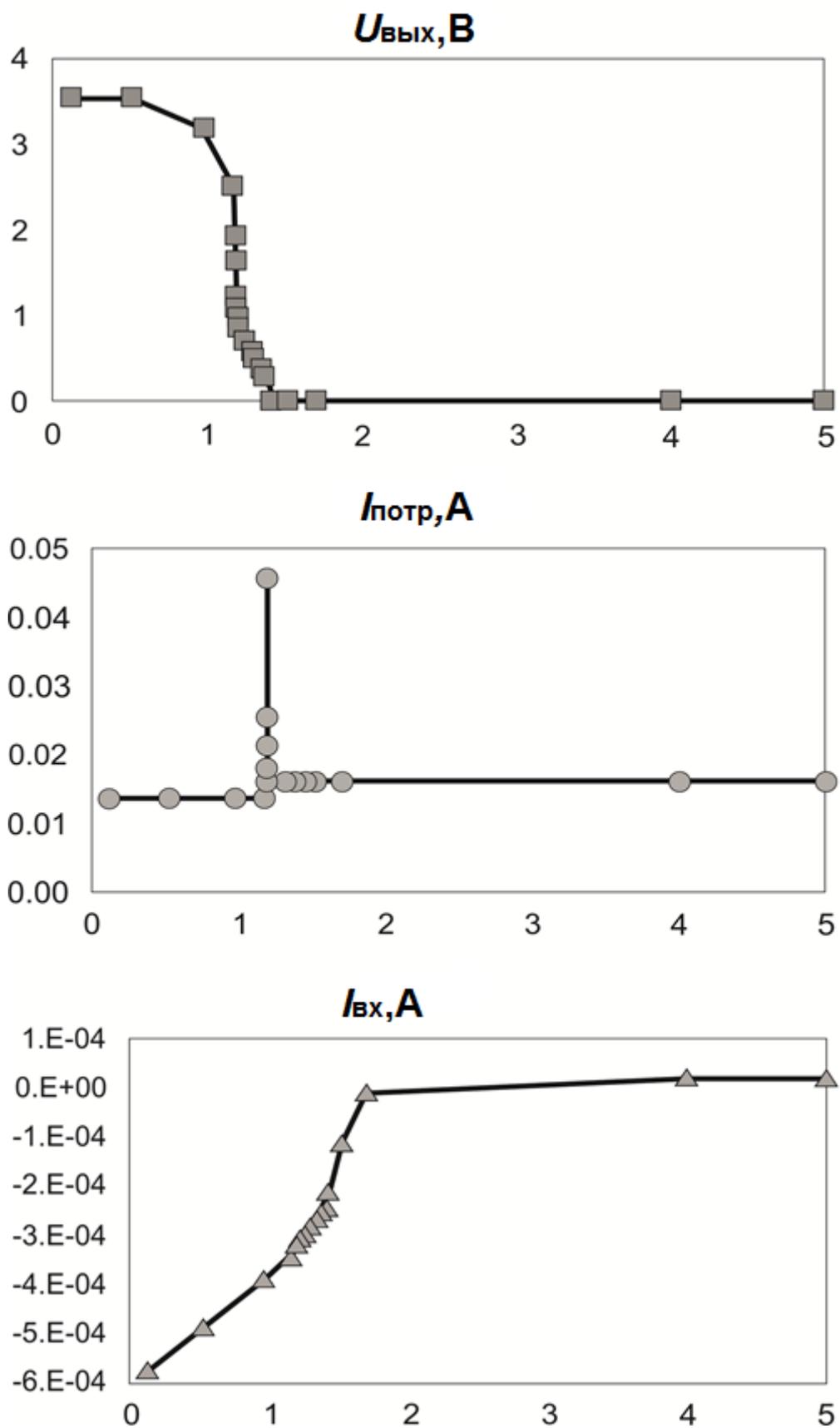


Рис. 5.7. Примеры измеренных статических характеристик ТТЛ-схемы: зависимости выходного напряжения, тока, потребляемого от источника питания, и входного напряжения

## 5.2.2. Исследование динамических характеристик ТТЛ-схемы

Снятие динамических характеристик  $U_{\text{вых}}(t)$ ,  $U_{\text{вх}}(t)$  производится по схеме, изображённой на рис. 5.8. Без подключения  $C_{\text{нагр}}$  нагрузочной ёмкостью является входная ёмкость осциллографа величиной 10–20 пФ.

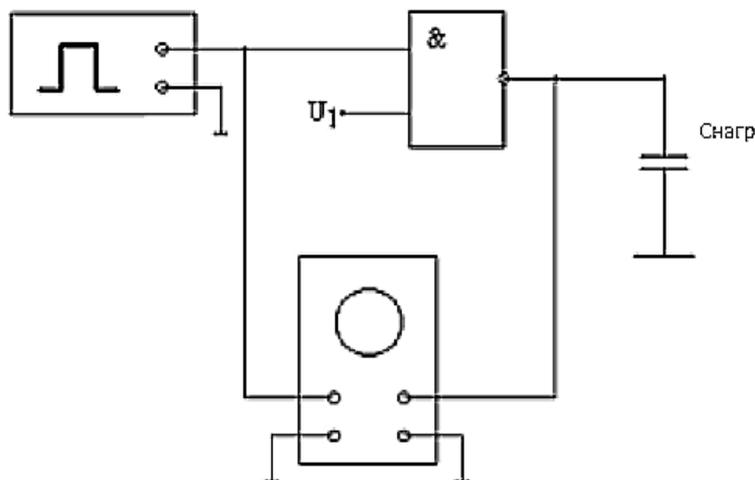


Рис. 5.8. Схема подключения измерительных приборов для исследования динамических характеристик  $U_{\text{вых}}(t)$ ,  $U_{\text{вх}}(t)$  ТТЛ-схемы

Для исследования динамических характеристик необходимо:

1. Подключить генератор прямоугольных импульсов к одному из входов схемы, туда же подключить первый канал осциллографа. Остальные входы схемы подключить к источнику питания. Разъём питания микросхемы подключить к нерегулируемому источнику питания и выставить напряжение питания 5 В. Подключить второй канал осциллографа к выходу схемы.

2. Настроить амплитуду на генераторе и осциллографе: выставить амплитуду  $U_{\text{вых}}$  генератора, равную уровню логической единицы, – 5 В; выставить цену деления по оси напряжений первого канала осциллографа так, чтобы плоские верхняя и нижняя части импульса совпали с линиями 100 % и 0 % на его экране.

3. Подобрать частоту выходного сигнала генератора и цену деления по оси времени осциллографа так, чтобы процесс переключения  $U_0 \rightarrow U_1$  занимал как можно большую часть экрана осциллографа.

4. Определить значения времени задержки и фронта переключения (рис. 5.9) и занести данные в таблицу (табл. 5.4).

5. Сфотографировать экран осциллографа с указанием развёрток по горизонтали и вертикали.

6. Повторить пп. 3–5 для процесса переключения  $U_1 \rightarrow U_0$ .

7. Повторить пп. 3–6 для значения нагрузочной ёмкости 100 пФ.

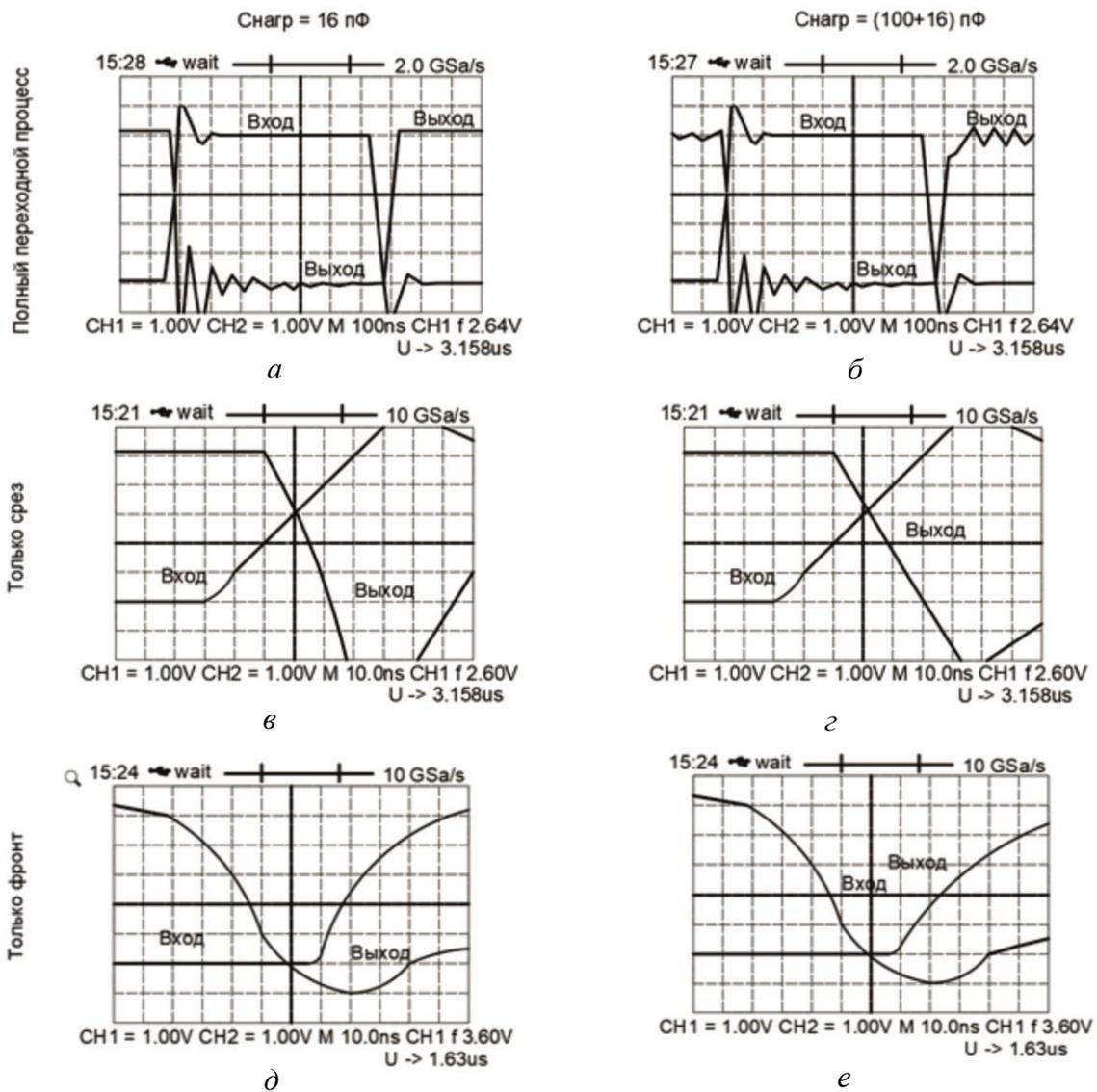


Рис. 5.9. Примеры измеренных переходных характеристик  $U_{\text{ВЫХ}}(t)$ ,  $U_{\text{ВХ}}(t)$  ТТЛ-схемы:

для случая, когда нагрузкой является только ёмкость осциллографа 16 пФ (левый столбец), и с дополнительной нагрузочной ёмкостью 100 пФ (правый столбец); полная характеристика (а, б); только срез (в, г); фронт (д, е)

На рис. 5.9 приведены вход схемы – канал 1 (CH1), выход – канал 2 (CH2), значения развёртки по вертикали и горизонтали.

Таблица 5.4

### Результаты исследования динамических характеристик ТТЛ-схемы

$C_{\text{нагр}}$							
$t_3^{10}$							
$t_3^{01}$							
$t_{\phi}^{10}$							
$t_{\phi}^{01}$							

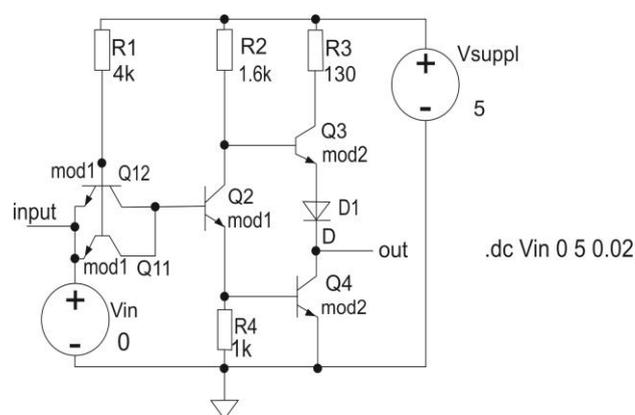
### 5.2.3. Задание для работы с программой SPICE-моделирования

1. Построить в программе SPICE-моделирования схемы для расчёта статических (рис. 5.10, а) и динамических (рис. 5.10, б) характеристик ТТЛ-схемы со сложным инвертором. Использовать параметры модели биполярного транзистора, приведённые на этих рисунках.

2. Рассчитать статические характеристики при изменении входного напряжения от 0 до 5 В с мелким шагом (не больше 0,02 В). Построить графики  $U_{\text{вых}}, I_{\text{вх}}, I_{\text{потр}} = f(U_{\text{вх}})$  каждый на своём поле.

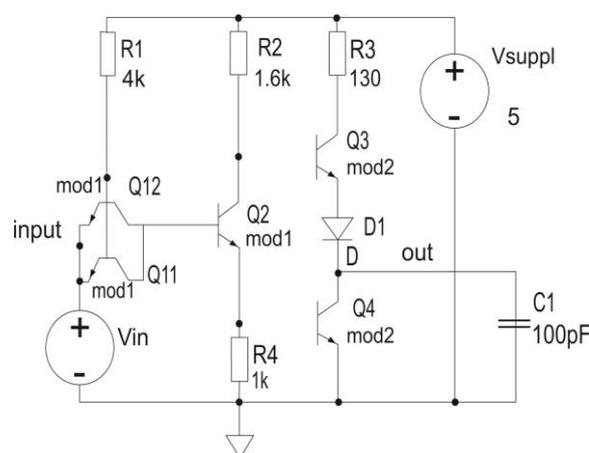
3. Повторить пп. 1 и 2 при значении коэффициента разветвления  $N$  1 и 3 (т. е. подключить к выходу схемы дополнительно ещё одну такую же схему, а затем – три такие же схемы параллельно, как показано на рис. 5.11). Сравнить результаты.

4. Рассчитать динамические характеристики (рис. 5.10, б) одновременно при трёх значениях ёмкости нагрузки: 16, 50, 100 пФ. Построить графики  $U_{\text{вых}}(t), U_{\text{вх}}(t)$  на общем поле. Подобрать частоту входного импульса напряжения и время расчёта так, чтобы диапазон времени по горизонтальной оси вмещал два полных импульса, а переходные процессы  $U_1 \rightarrow U_0$  и обратно занимали каждый примерно по одной восьмой части импульса. Значения переднего и заднего фронтов импульса  $U_{\text{вх}}$  взять равными 30 нс.



```
.model mod1 NPN (Is=1e-15 Bf=100 Br=5
+ Vaf=74 Var=30 Rb=200 Rc=90
+ Cje=0.08pF Cjc=0.1pF Tf=0.2e-9 TR=2e-9)
.model mod2 NPN (Is=1.e-15 Bf=1== Br=5
+ Vaf=74 Var=30 Rb=70 Rc=80
+ Cje=0.24pF Cjc=0.3pF Tf=0.2e-9 TR=2e-9)
```

а



```
.model mod1 NPN (Is=1e-15 Bf=100 Br=5
+ Vaf=74 Var=30 Rb=200 Rc=90
+ Cje=0.08pF Cjc=0.1pF Tf=0.1e-9 TR=1e-9)
.model mod2 NPN (Is=1.e-15 Bf=1== Br=5
+ Vaf=74 Var=30 Rb=70 Rc=80
+ Cje=0.24pF Cjc=0.4pF Tf=0.2e-9 TR=2e-9)
PULSE (0 5 100n 30n 30n 700n 1500n 3)
.tran 0 3u 0 5n
```

б

Рис. 5.10. Схема и исходные данные для расчёта в программе SPICE статических (а) и динамических (нагрузочная ёмкость  $C1 = 100$  пФ) (б) характеристик ТТЛ-схемы



Рис. 5.11. Схема подключения нагрузочных элементов для получения коэффициента разветвления  $N = 3$  при моделировании схемы

Примеры расчётов статических и динамических характеристик ТТЛ-схемы приведены на рис. 5.12–5.14.

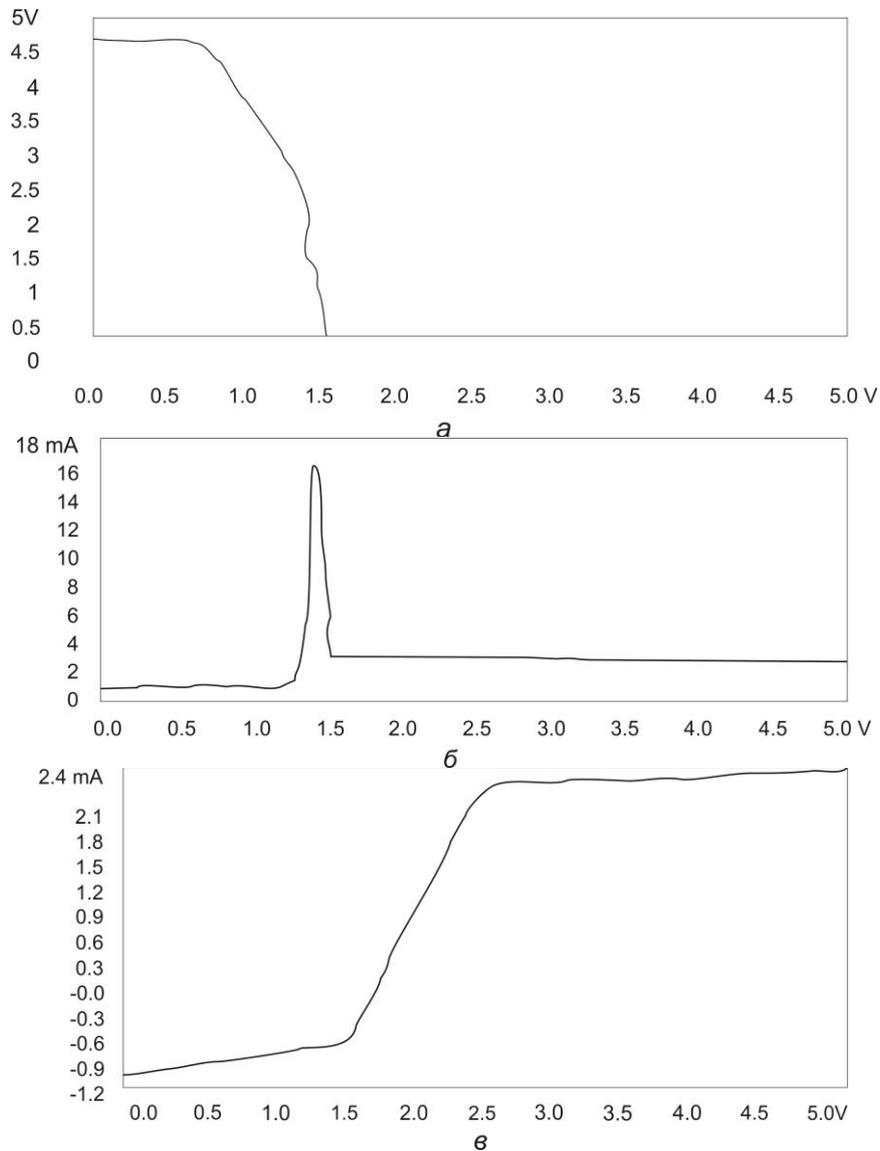


Рис. 5.12. Пример расчёта в программе *SPICE* статических характеристик ТТЛ-схемы: выходного напряжения (*а*), потребляемого (*б*) и входного (*в*) токов

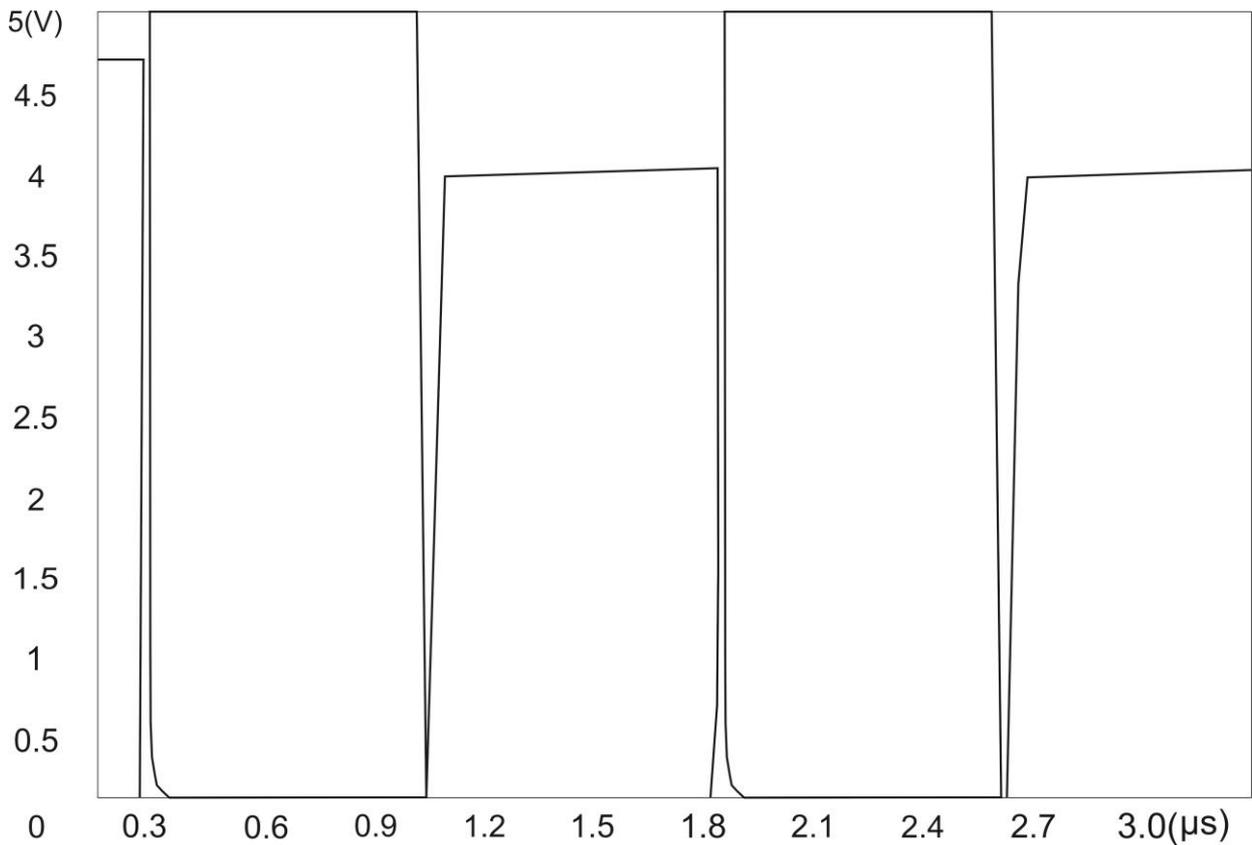


Рис. 5.13. Пример расчёта в программе *SPICE* динамических характеристик ТТЛ-схемы: входного и выходного напряжений (для нагрузочной ёмкости  $C1 = 100$  пФ)

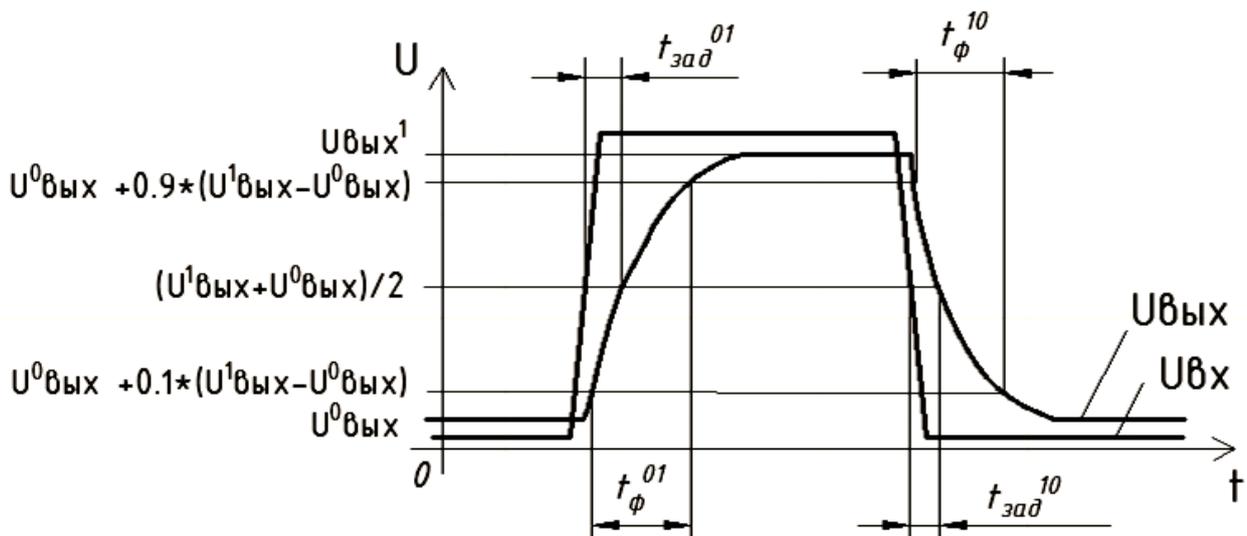


Рис. 5.14. Иллюстрация вычислений значений времён задержек и фронтов переключения по результатам измерений (расчёта) переходных характеристик схемы

### 5.3. Содержание отчёта

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Схемы измерений характеристик ТТЛ-вентиля.
4. Таблицы экспериментальных данных и графики.
5. Рисунки с экрана осциллографа входных и выходных сигналов ТТЛ-схемы.
6. Схемы для компьютерного расчёта характеристик из программы *SPICE*-моделирования для всех пунктов задания.
7. Распечатки графиков характеристик, рассчитанных с помощью программы *SPICE*-моделирования.
8. Выводы.

### 5.4. Контрольные вопросы

1. Каков принцип работы ТТЛ-схемы с простым и сложным инвертором?
2. Зачем нужен диод в выходной цепи?
3. Какие преимущества даёт использование сложного инвертора?
4. Чему равны логические уровни в ТТЛ-схемах с простым и сложным инверторами? В чём причина их различия?
5. Чему равны пороги переключения в ТТЛ-схемах с простым и сложным инверторами?
6. Зачем нужен диод в выходной цепи ТТЛ-схемы со сложным инвертором?
7. Как зависит потребляемый схемой ток от входного напряжения?
8. Чем определяется длительность переходных процессов в ТТЛ-схемах?

### Список использованных источников

1. Электроника интегральных схем / К. О. Петросянц [и др.] ; под ред. К. О. Петросянца. – М. : СОЛОН-Пресс, 2017. – 556 с.
2. Джонс, М. Х. Электроника – практический курс / М. Х. Джонс. – М. : Техносфера, 2013. – 512 с.
3. Новожилов, О. П. Электротехника и электроника : учебник / О. П. Новожилов. – М. : Юрайт, 2016. – 654 с.
4. Якубовский, С. В. Аналоговые и цифровые интегральные схемы / С. В. Якубовский, М. А. Барканов. – М. : Радио и связь, 1984. – 432 с.
5. Сохор, Ю. Н. Моделирование устройств в пакете LTspice / Ю. Н. Сохор. – Псков : ППИ, 2008. – 56 с.
6. Щука, А. А. Электроника. В 4 ч. Ч. 2 : Микроэлектроника / А. А. Щука ; под ред. А. С. Сигова. – М. : Юрайт, 2016. – 326 с.

## Лабораторная работа №6

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОСХЕМ НА КМОП-ТРАНЗИСТОРАХ

**Цель работы:** изучить особенности режимов работы и параметров интегральных схем на КМОП-транзисторах; исследовать их передаточные и переходные характеристики; приобрести навыки работы с интегральными схемами этого класса; научиться рассчитывать схемы с помощью программы *SPICE*-моделирования.

#### 6.1. Краткие теоретические сведения

##### 6.1.1. Электрические схемы и структуры КМОП-схем

В полевом транзисторе регулирование тока осуществляется изменением проводимости проводящего канала с помощью поперечного электрического поля. В отличие от биполярного ток полевого транзистора является потоком основных носителей. Электроды полевого транзистора называют истоком (И), стоком (С) и затвором (З). Управляющее напряжение прикладывается между затвором и истоком. От его величины зависит проводимость канала, следовательно, и величина тока. Таким образом, полевой транзистор можно рассматривать как источник тока, управляемый напряжением затвор – исток. Если амплитуда управляющего сигнала велика, сопротивление канала может изменяться в очень больших пределах, т. е. полевой транзистор можно использовать в качестве электронного ключа.

По конструкции полевые транзисторы могут быть с управляющим *p-n*-переходом и с металлическим затвором, изолированным от канала диэлектриком. Транзисторы второго вида называют МДП-транзисторами (металл – диэлектрик – полупроводник). Если диэлектриком является  $\text{SiO}_2$ , используется название МОП-транзисторы (металл – оксид – полупроводник).

Проводимость канала полевого транзистора может быть электронной или дырочной. Соответственно транзисторы – *n*-канальными или *p*-канальными.

Название КМОП расшифровывается как «комплементарные (взаимодополняющие) МОП» и означает, что в структуре интегральной схемы имеются МОП-транзисторы с каналами различного типа. Условием комплементарности является также равенство (по модулю) пороговых напряжений и крутизны транзисторов.

Простейшей КМОП-схемой является инвертор (рис. 6.1). Он работает следующим образом:

– если входное напряжение  $U_{\text{вх}} = 0$ , то нижний транзистор закрыт, т. к. для него напряжение  $U_{\text{зс}} = 0$ , а верхний транзистор открыт, т. к. для него  $U_{\text{зс}}$  отрицательно ( $-5 \text{ В}$ ). В результате выходное напряжение  $U_{\text{вых}} = +5 \text{ В}$ ;

– если входное напряжение  $U_{вх} = +5$  В, то открыт нижний транзистор, т. к. для него напряжение  $U_{зс} = +5$  В, а верхний транзистор закрыт, т. к. для него  $U_{зс} = 0$ . В результате  $U_{вых} = 0$ .

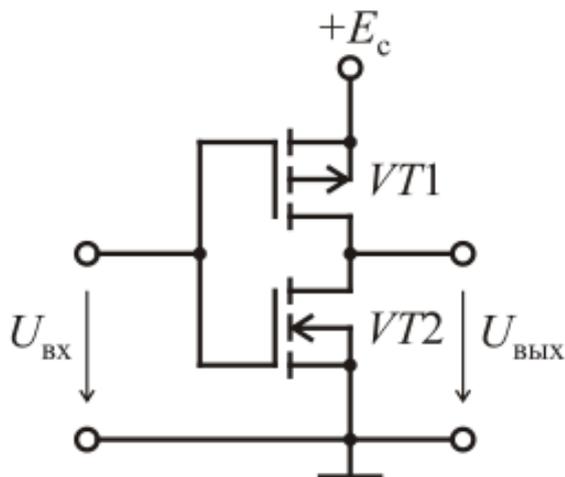


Рис. 6.1. Электрическая схема КМОП-пары (инвертора)

Для улучшения характеристик интегральных схем на МОП-транзисторах применяют **принцип масштабирования**: геометрические размеры МОП-структур изменяют на величину  $S < 1$ . Величина  $S$  обычно равна 0,7 для каждой последующей разрабатываемой технологии. Например, если МОП-транзисторы имели минимальную длину канала  $L = 0,7$  мкм, то для следующего технологического процесса МОП-транзисторы будут иметь минимальную длину канала  $L = 0,7 \times S \sim 0,5$  мкм и т. д. При этом будут изменяться и другие характеристики МОП-структур.

Масштабирование МОП-структур даёт следующие преимущества:

- уменьшение размеров элементов и соответственно размеров кристалла увеличивает количество кристаллов на пластине;
- снижается время задержки логических элементов, тем самым увеличиваются рабочие частоты;
- уменьшается потребляемая мощность и др.

В табл. 6.1 приведены данные по минимальному размеру затвора МОП-транзистора, напряжению питания и рабочей частоте микропроцессоров с различными проектными нормами.

Таблица 6.1

$E_{пит}$  и  $f_{раб}$  микропроцессоров с различными  $L_{min}$  затвора МОП-транзисторов

$L_{min}$ , мкм	2	1,2	0,8	0,5	0,35	0,25	0,18	0,13
$E_{пит}$ , В	5	5	5	3,3	3,3	2,5	1,8	1,5
$f_{раб}$ , ГГц	0,07	0,25	0,35	0,7	1,5	2,5	2,8	3,2

Современные КМОП-схемы устойчиво работают в широком диапазоне питающих напряжений (3–15 В), что позволяет сопрягать их со схемами другого типа (например, ТТЛ) и с операционными усилителями.

Параметры логических схем с КМОП-структурой близки к идеальным: они имеют симметричную передаточную характеристику с высокой помехозащищённостью, большое входное и малое выходное сопротивление, предельно малое потребление мощности в статическом режиме, большую нагрузочную способность.

Развитие КМОП-технологии, обеспечивающей простоту изготовления, малое потребление энергии, высокое быстродействие и в итоге низкую стоимость в расчёте на вентиль, дало импульс развитию всей цифровой электронике, позволило ей стать доминирующей технологией для создания электронных устройств различного назначения.

### 6.1.2. Передаточная характеристика КМОП-схем

Рассмотрим передаточную характеристику КМОП-инвертора (см. рис. 6.1), состоящего из двух транзисторов:  $n$ -канального, нижнего на схеме (активного), и верхнего  $p$ -канального (нагрузочного). Транзисторы соединяются стоками, т. е. исток  $n$ -канального транзистора имеет потенциал земли, а исток  $p$ -канального – потенциал источника питания. Передаточной характеристикой (рис. 6.2) называется зависимость выходного напряжения логического элемента от напряжения на его входе. При выводе передаточной характеристики будем использовать следующие выражения, описывающие поведение транзисторов в различных режимах и не учитывающие эффекты второго порядка: эффект модуляции длины канала и эффект влияния подложки:

1) в крутой (триодной) области:

$$I_C = \beta \left[ (V_{зи} - V_{пор}) V_{си} - \frac{1}{2} V_{си}^2 \right]; \quad (6.1)$$

2) в пологой (пентодной) области:

$$I_C = \frac{\beta}{2} (V_{зи} - V_{пор})^2, \quad (6.2)$$

где  $V_{пор}$  – пороговое напряжение транзистора, В;

$\beta$  – удельная крутизна транзистора, А/В<sup>2</sup>, ( $\beta = W/L \cdot k_p = W/L \cdot \mu C_{ок}$ , где  $k_p$  – параметр крутизны, А/В<sup>2</sup>;  $\mu$  – подвижность носителей заряда, см<sup>2</sup>/(В·с);  $C_{ок}$  – удельная ёмкость подзатворного оксида, Ф/м<sup>2</sup>).

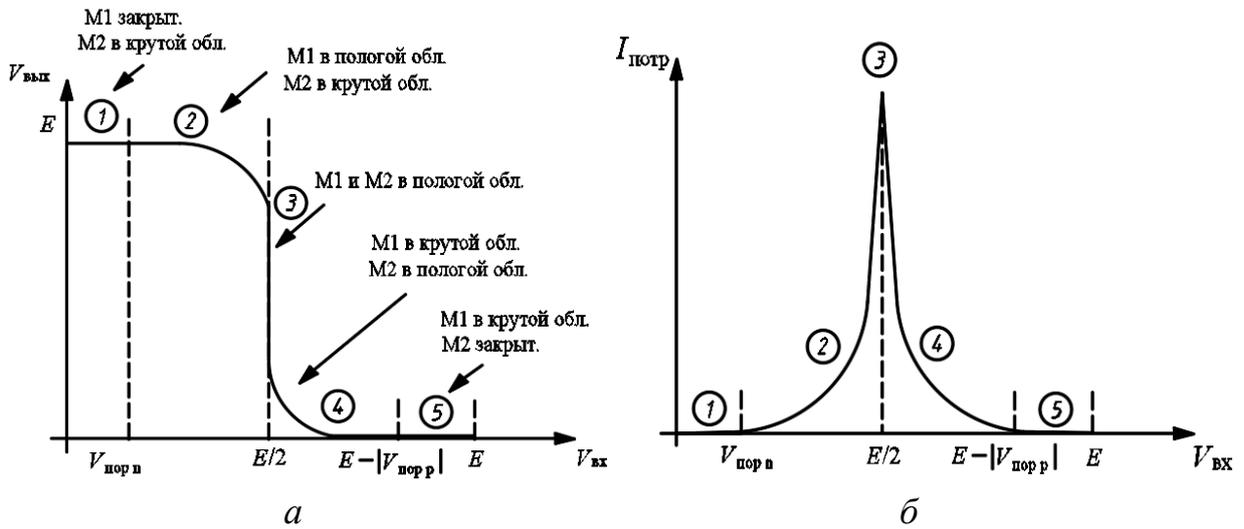


Рис. 6.2. Зависимость выходного напряжения (а) и потребляемого тока (б) КМОП-инвертора от входного напряжения

Значения параметров  $V_{\text{пор}}$  и  $\mu$  различаются для  $n$ - и  $p$ -канальных транзисторов и обозначаются соответственно  $V_{\text{пор } n}$  и  $V_{\text{пор } p}$ ,  $\mu_n$  и  $\mu_p$ .

На передаточной характеристике можно выделить несколько областей:

1. *Входное напряжение меньше порогового напряжения  $n$ -канального транзистора.* Этот транзистор закрыт. Напряжение затвор – исток  $p$ -канального транзистора больше его порогового напряжения  $V_{\text{пор}}$  (по модулю), поэтому он полностью открыт. Напряжение на выходе равно напряжению питания, потребляемый ток равен нулю.

2. *Входное напряжение больше порогового напряжения  $n$ -канального транзистора, но меньше половины напряжения питания.* Этот транзистор начинает открываться и переходит из пологой (пентодной) области характеристики в крутую (триодную). Тогда  $p$ -канальный транзистор начинает закрываться и переходит из крутой (триодной) области в пологую (пентодную). Для нахождения выражения для передаточной характеристики приравняем токи  $n$ - и  $p$ -канального транзисторов.

Ток  $p$ -канального транзистора

$$I_{Cp} = \beta_p((U_{\text{вх}} - E - V_{\text{пор}})(U_{\text{вых}} - E) - 1/2(U_{\text{вых}} - E)^2). \quad (6.3)$$

Ток  $n$ -канального транзистора

$$I_{Cn} = 1/2\beta(U_{\text{вх}} - V_{\text{пор}})^2. \quad (6.4)$$

Полагая  $I_{Cp} = I_{Cn}$ , получим

$$U_{\text{вых}} = (U_{\text{вх}} - V_{\text{пор}}) + (U_{\text{вх}} - V_{\text{пор}})^2 - 2(U_{\text{вх}} - 1/2E - V_{\text{пор}})E - \beta_n/\beta_p(U_{\text{вх}} - V_{\text{пор}})^2. \quad (6.5)$$

3. В области входного напряжения, равного  $E/2$ , передаточная характеристика идёт практически вертикально, при  $E/2$  оба транзистора открыты в одинаковой степени, потребляемый ток максимален.

4. Входное напряжение больше  $E/2$  и меньше  $(E - V_{пор})$ . Картина аналогична (симметрична) участку 2. Но теперь транзисторы меняются ролями:  $n$ -канальный транзистор в крутой области,  $p$ -канальный – в пологой. Напряжение на выходе уменьшается.

Ток  $n$ -канального транзистора

$$I_{Cn} = \beta_n((U_{вх} - V_{пор})U_{вых} - 1/2 \cdot U_{вых}^2). \quad (6.6)$$

Ток  $p$ -канального транзистора

$$I_{Cp} = 1/2 \cdot \beta_p(U_{вх} - E - V_{пор})^2. \quad (6.7)$$

Полагая  $I_{Cp} = I_{Cn}$ , получим

$$U_{вых} = (U_{вх} - V_{он}) - (U_{вх} - V_{он})^2 - \beta_p/\beta_n(U_{вх} - E - V_{пор})^2. \quad (6.8)$$

5. Входное напряжение больше  $(E - V_{ор})$  и меньше напряжения питания.  $n$ -канальный транзистор полностью открыт,  $p$ -канальный – закрыт (его напряжение затвор – исток меньше порогового). Напряжение на выходе и потребляемый ток равен нулю, т. к.  $p$ -канальный транзистор закрыт.

Отличительной чертой КМОП-схем является то, что на первом и пятом участках схема тока не потребляет (т. к. закрыт соответственно  $n$ -канальный или  $p$ -канальный транзистор). В этом состоянии потребляемая схемой мощность обусловлена только токами утечки через обратно смещённые переходы сток – подложка, исток – подложка. При комнатной температуре эти токи не превышают долей микроампера и обусловленное им потребление мощности очень мало. Максимум потребляемого тока наблюдается в точке входного напряжения, равного  $E/2$  (см. рис. 6.2, б).

### 6.1.3. Переходная характеристика КМОП-схем

Длительности переходных процессов в КМОП-схемах (величины фронтов) зависят от паразитных ёмкостей схемы и величины токов их заряда и разряда (рис. 6.3). Длительность положительного фронта, т. е. рост сигнала от логического нуля до логической единицы, определяется зарядом паразитной ёмкости от источника питания через  $p$ -канальные нагрузочные транзисторы. Длительность отрицательного фронта, т. е. уменьшение сигнала от логической единицы до логического нуля, определяется разрядом паразитной ёмкости через  $n$ -канальные активные транзисторы на землю. Паразитная ёмкость включает в себя следующие составляющие:

- ёмкости сток-подложка активных и нагрузочных транзисторов;
- ёмкость нагрузки, подключённой к выходу логической схемы;
- ёмкости межсоединений.

Времена задержек и фронтов переключения можно оценить следующим образом:

$$t_3^{10} \approx 0,7R_{\text{ср.}p}C_{\text{наг.}p}; \quad t_3^{01} \approx 0,7R_{\text{ср.}n}C_{\text{наг.}p};$$

$$t_{\Phi}^{10} \approx 2,2R_{\text{ср.}n}C_{\text{наг.}p}; \quad t_{\Phi}^{01} \approx 0,7R_{\text{ср.}p}C_{\text{наг.}p},$$

где  $R_{\text{ср.}n}$   $R_{\text{ср.}p}$  – средние значения сопротивления в открытом состоянии  $n$ - и  $p$ -канального транзистора соответственно;

$C_{\text{наг.}p}$  – нагрузочная ёмкость.

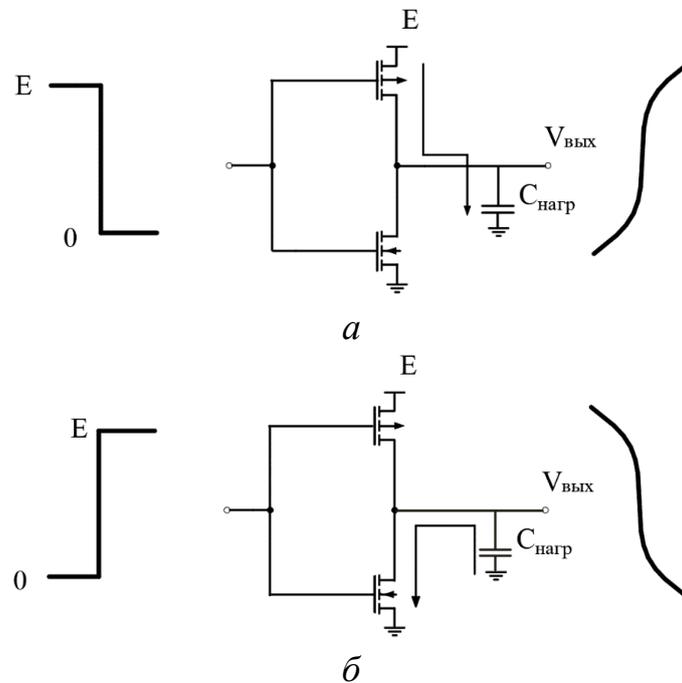


Рис. 6.3. Процесс зарядки (а) и разрядки (б) паразитной ёмкости

В динамическом режиме КМОП-микросхемы потребляют динамическую мощность для периодической перезарядки паразитных ёмкостей:

$$P_{\text{дин}} = f E^2 C_{\text{н}}, \quad (6.9)$$

где  $f$  – рабочая частота;  
 $E$  – напряжение питания;  
 $C_{\text{н}}$  – паразитная ёмкость.

### 6.1.4. Логические элементы на КМОП-транзисторах

Логические схемы 2ИЛИ-НЕ и 2И-НЕ приведены на рис. 6.4. Видно, что функция ИЛИ реализуется за счёт параллельного включения активных (нижних) транзисторов, а функция И – соответственно за счёт последовательного включения. По сравнению со схемами на однотипных ( $n$ -канальных) транзисторах КМОП-схемы требуют больше транзисторов для реализации логических функций и занимают на кристалле большую площадь за счёт создания кармана.

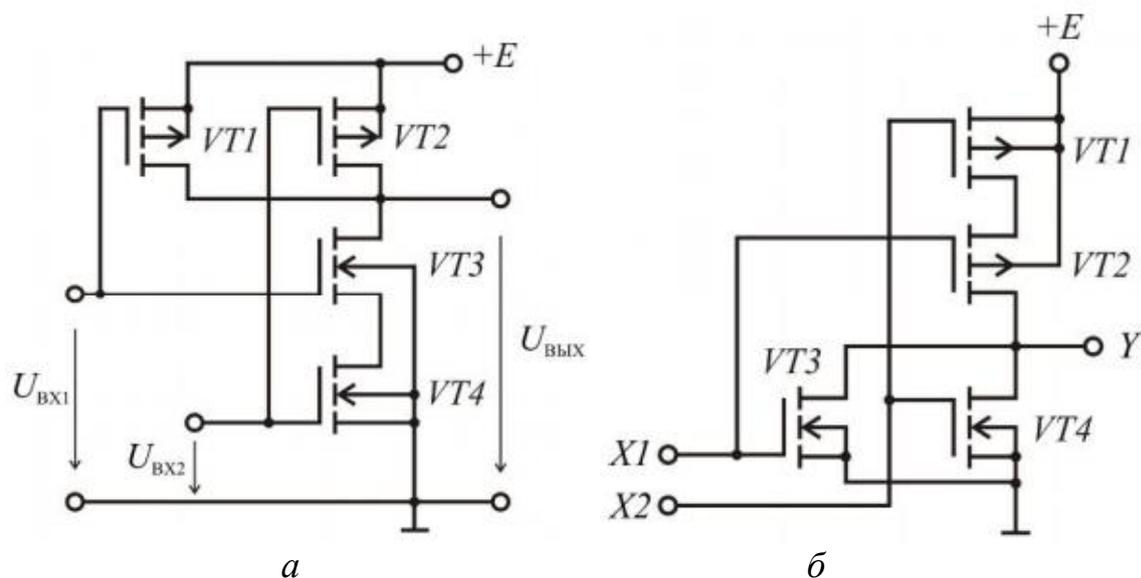


Рис. 6.4. Логические схемы 2И-НЕ (а) и 2ИЛИ-НЕ (б)

Схема КМОП-элемента, реализующего операцию 2И-НЕ, показана на рис. 6.5, а. Транзисторы  $VT1$  и  $VT2$  с каналом  $p$ -типа соединены параллельно, а  $n$ -канальные транзисторы  $VT3$  и  $VT4$  – последовательно. Подложки и истоки  $VT1$  и  $VT2$  соединены с положительным полюсом источника питания, поэтому  $U_{зи1} = U_{вх1} - E$ ,  $U_{зи2} = U_{вх2} - E$ .

Пусть на обоих входах действует напряжение низкого уровня:  $U_{вх1} = U_{вх2} = 0$ . Поскольку  $U_{зи3} = U_{вх1} = 0$ ,  $U_{зи4} = U_{вх2} = 0$ , транзисторы  $VT3$  и  $VT4$  закрыты. При этом  $U_{зи1} = U_{зи2} = -E$  и транзисторы  $VT1$  и  $VT2$  открыты. Упрощённо цепь на рис. 6.4, а можно представить эквивалентной схемой, показанной на рис. 6.5, а. Напряжения на открытых транзисторах  $VT1$  и  $VT2$  пренебрежимо малы, и выходное напряжение  $U_{вых} \sim E$ .

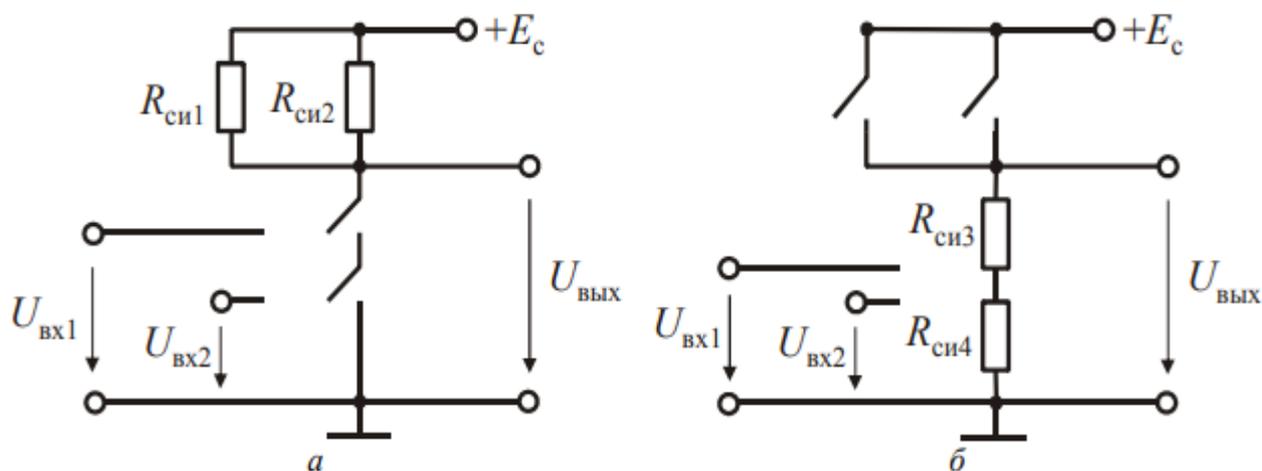


Рис. 6.5. Эквивалентные схемы логических элементов 2И-НЕ (а) и 2ИЛИ-НЕ (б)

Рассмотрим случай, когда  $U_{\text{вх1}} = U_{\text{вх2}} = E$ . Теперь  $U_{\text{зи1}} = U_{\text{зи2}} = 0$  и транзисторы  $VT1$  и  $VT2$  закрыты, а  $VT3$  и  $VT4$  – открыты.

Эквивалентная схема логического элемента 2ИЛИ-НЕ показана на рис. 6.5, б. Этот логический элемент имеет два входа. Каждый новый вход требует включения двух дополнительных транзисторов:  $p$ -канального в параллельную цепь и  $n$ -канального в последовательную. Это приводит к увеличению площади, занимаемой логическим элементом. Увеличивается и паразитная ёмкость, ограничивающая быстродействие схемы. Поэтому число входов у элементов КМОП-логики, как правило, не превышает четырёх.

КМОП-элементы ИЛИ-НЕ занимают на кристалле большую площадь, чем элементы И-НЕ, т. к. последовательно соединённые  $p$ -канальные транзисторы должны иметь большую ширину канала, чем при параллельном соединении. Поэтому в схемах высокой степени интеграции для экономии площади кристалла целесообразно использовать элементы И-НЕ.

## 6.2. Порядок выполнения работы

Объектом исследования является микросхема  $L212$ , смонтированная в измерительный стенд (рис. 6.6) и имеющая внешние дополнительные приборы и устройства: два вольтметра, миллиамперметр, генератор импульсов, осциллограф. Для выполнения работы также требуется источник регулируемого постоянного напряжения и источник нерегулируемого постоянного напряжения величиной 5 или 6,3 В.

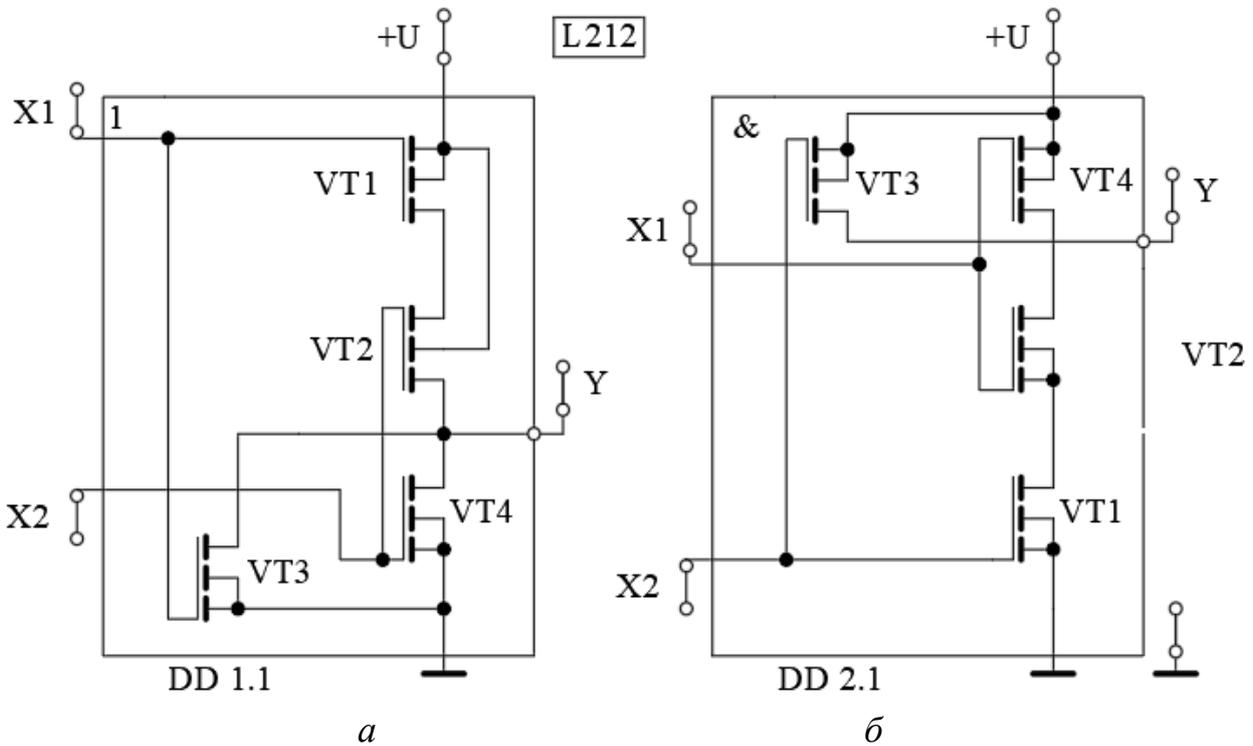


Рис. 6.6. Блоки лабораторного стенда для измерения передаточной (а) и переходной (б) характеристик КМОП-схемы 2И-НЕ

### 6.2.1. Исследование передаточной характеристики КМОП-схемы 2И-НЕ

Исследование передаточной характеристики  $V_{\text{вых}} = f(V_{\text{вх}})$  и зависимости потребляемого тока  $I_{\text{потр}}$  от входного напряжения  $V_{\text{вх}}$  проводится по схеме, изображённой на рис. 6.7, а.

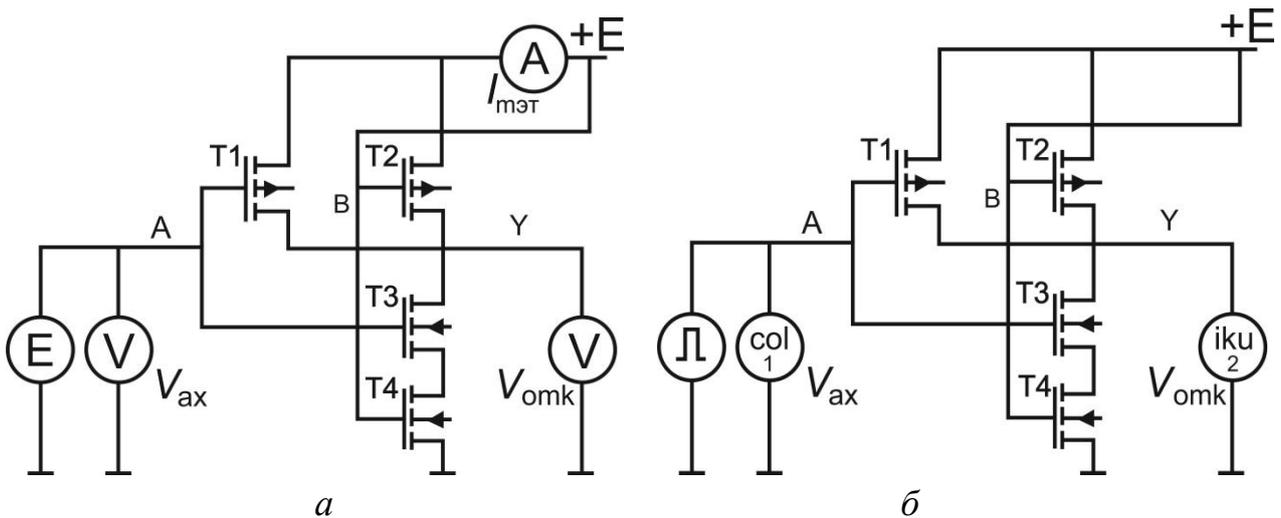


Рис. 6.7. Схемы измерения передаточной (а) и переходной (б) характеристик КМОП-схемы 2И-НЕ

Последовательность действий:

1. Подключить источник регулируемого напряжения к одному из входов микросхемы, с нерегулируемым источником питания соединить остальные входы и разъём питания через миллиамперметр (для измерения тока питания).

2. Измерить величину напряжения на регулируемом входе и выходе схемы, а также ток питания при измерении напряжения на входе от 0 до  $E$ . Результаты измерений занести в таблицу (табл. 6.2).

Указания. Характеристики должны содержать по 10–15 точек, причём 7–10 из них должны находиться на 2–4-м участках, т. е. соответствовать входному напряжению в промежутке между  $V_{пор,л}$  и  $E - |V_{пор,р}|$ . Одна из точек должна соответствовать наибольшему значению тока потребления.

Таблица 6.2

Результаты измерений передаточной характеристики

$V_{вх}$								
$V_{вых}$								
$I_{потр}$								

3. По результатам измерений построить графики характеристик  $V_{вых}$ ,  $I_{потр} = f(V_{вх})$  в программах *MS Excel*, *OpenOffice Calc* и т. п., тип графика «точечный».

Пример измерения статических характеристик приведён на рис. 6.8.

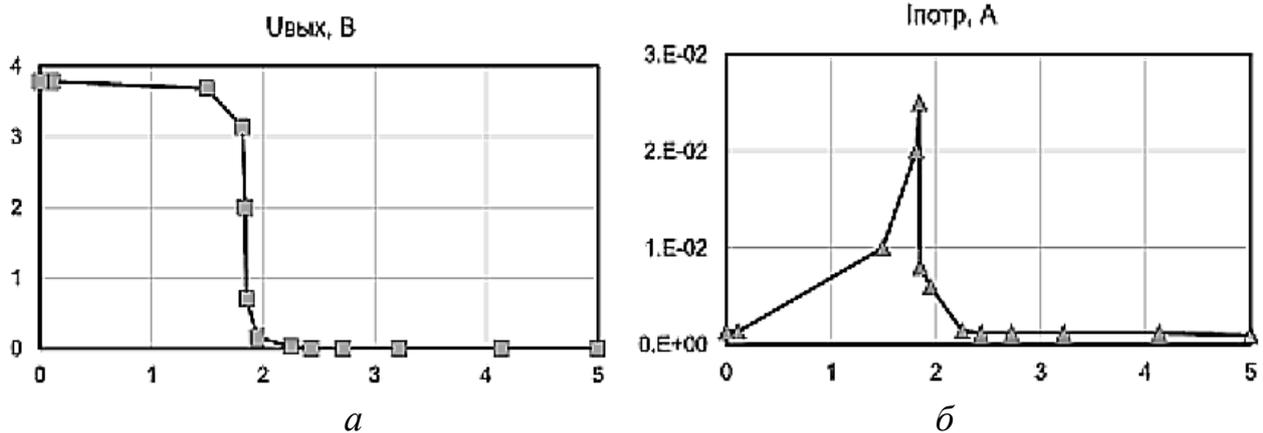


Рис. 6.8. Примеры измеренных статических характеристик  $V_{вых} = f(V_{вх})$  (а) и  $I_{потр} = f(V_{вх})$  (б) КМОП-схемы 2И-НЕ

## 6.2.2. Исследование переходной характеристики КМОП схемы 2И-НЕ

Снятие переходных (динамических) характеристик  $V_{\text{вых}}(t)$ ,  $V_{\text{вх}}(t)$  проводится по схеме, изображённой на рис. 6.7, б, в следующей последовательности:

1. К одному из входов схемы подключить генератор прямоугольных импульсов и первый канал осциллографа. Остальные входы и разъём питания микросхемы соединить с нерегулируемым источником питания. Подключить второй канал осциллографа к выходу схемы.

2. Выставить амплитуду выходного напряжения генератора, равную напряжению питания; плавно выставить цену деления по оси напряжений первого канала осциллографа так, чтобы плоские верхняя и нижняя части импульса совпали с линиями 100 % и 0 % на экране осциллографа.

3. Подобрать частоту выходного сигнала генератора и цену деления по оси времени осциллографа так, чтобы процесс переключения  $U_0 \rightarrow U_1$  занимал как можно большую часть экрана осциллографа.

4. Определить значения времени задержки и фронта переключения (рис. 6.9) и занести данные в таблицу (табл. 6.3).

5. Сфотографировать (сохранить) экран осциллографа с указанием разверток по горизонтали и вертикали.

6. Повторить пп. 3–5 для процесса переключения  $U_0 \rightarrow U_1$ .

7. Повторить пп. 3–6 для значения нагрузочной ёмкости 100 пФ.

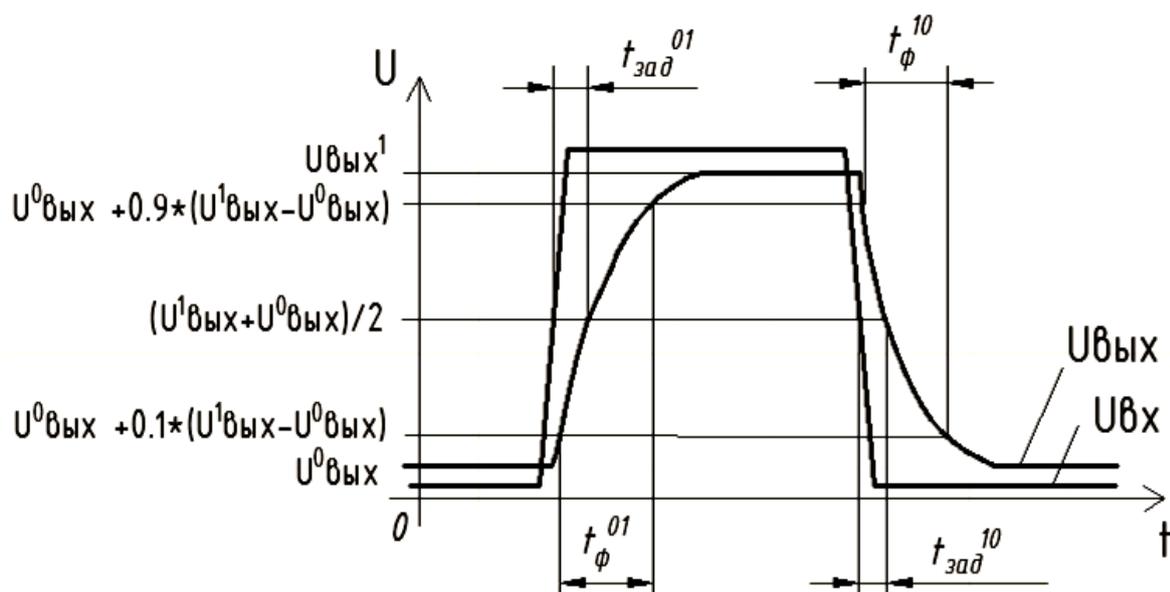


Рис. 6.9. Вычисление значений времён задержек и фронтов переключения по результатам расчёта/измерения переходной характеристики схемы

## Результаты измерений переходной характеристики

$C_H$ , пФ							
$t_3^{10}$ , нс							
$t_3^{01}$ , нс							
$t_\phi^{10}$ , нс							
$t_\phi^{01}$ , нс							

Примеры измеренных переходных характеристик КМОП-схемы 2И-НЕ, а также значения развертки по вертикали и горизонтали приведены на рис. 6.10. Вход схемы – канал 1 (CH1), выход – канал 2 (CH2).

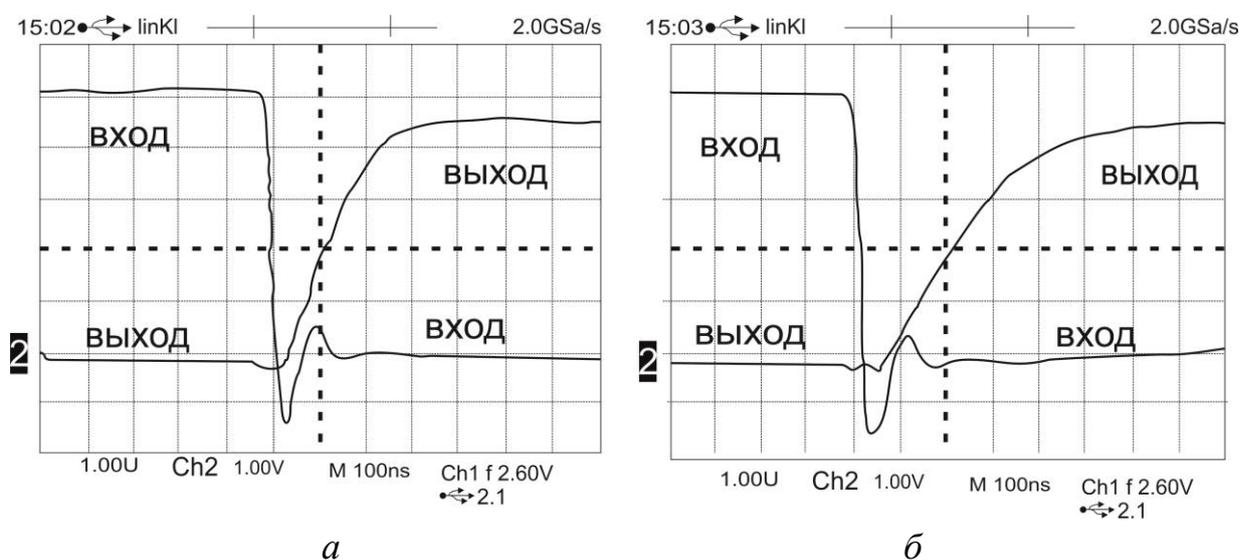


Рис. 6.10. Пример измеренных переходных характеристик логического элемента 2И-НЕ с нагрузочной ёмкостью 16 пФ (а) и 100 пФ (б)

### 6.2.3. Расчёт характеристик в программе SPICE-моделирования

Для построения передаточной характеристики КМОП-схем будем использовать следующие параметры модели транзисторов:

1) *n*-канальный:

$Level = 1$ ;  $VT_0 = 1$ ;

$kp = 100e - 6$ ;

$W = 10u$ ;  $L = 1u$ ;

$cgdo = 13e - 11$ ;

$cgso = 13e - 11$ ;

2) *p*-канальный:  
 $Level = 1$ ;  $VT_0 = -1$ ;  
 $kp = 100e - 6$ ;  
 $W = 10\mu$ ;  $L = 1\mu$ ;  
 $cgdo = 1e - 10$ ;  
 $cgso = 1e - 10$ .

Построенные в программе *Multisim* 14.1 схемы логических элементов 2И-НЕ и 2ИЛИ-НЕ, необходимые для расчёта, приведены на рис. 6.11.

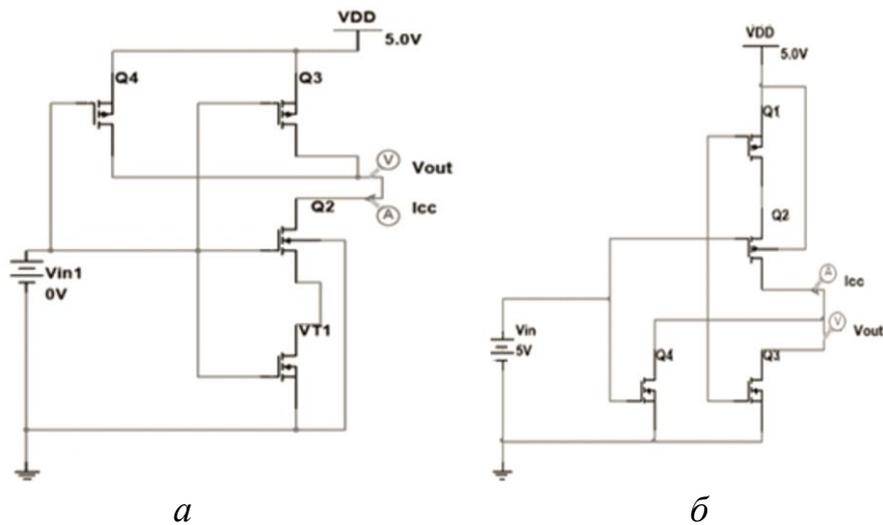


Рис. 6.11. Схемы для расчёта передаточной характеристики логических элементов 2И-НЕ (а) и 2ИЛИ-НЕ (б)

Порядок выполнения этапа моделирования характеристик:

1. Рассчитать статические характеристики при изменении входного напряжения от 0 до 5 В с мелким шагом (не больше 0,01 В). Построить графики  $V_{\text{ВЫХ}}$ ,  $I_{\text{ПОТР}} = f(V_{\text{ВХ}})$ . Определить статические логические параметры схемы: логические уровни, параметры помехоустойчивости. Пример зависимостей приведён на рис. 6.12.

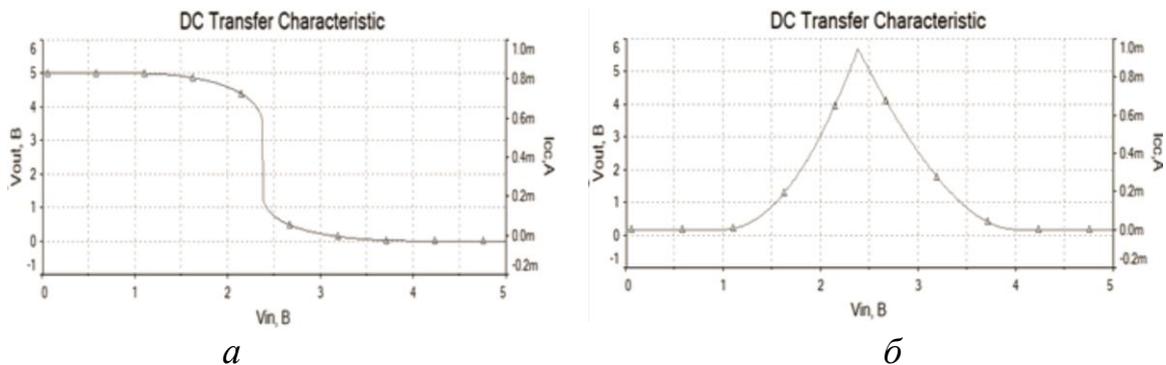


Рис. 6.12. Зависимость выходного напряжения (а) и потребляемого тока (б) КМОП-схемы 2ИЛИ-НЕ от входного напряжения

2. Сравнить результаты моделирования и измерений, убедиться в адекватности моделирования.

3. Повторить п. 1 для следующих условий:

- увеличенной в 2 раза ширине затвора обоих транзисторов;
- увеличенных в 1,5 раза пороговых напряжениях транзисторов;
- увеличенном пороговом напряжении только одного транзистора.

4. Сравнить результаты п. 3 и объяснить влияние указанных факторов на передаточные характеристики схемы.

5. Рассчитать динамические характеристики при значениях ёмкости нагрузки 16, 50 и 100 пФ, построить графики  $V_{\text{ВЫХ}}(t)$ ,  $V_{\text{ВХ}}(t)$ . Определить динамические логические параметры схемы (времена фронтов и задержек переключения) при значениях переднего и заднего фронта импульса 30 нс. Построенные в программе *Multisim* 14.1 схемы логических элементов 2И-НЕ и 2ИЛИ-НЕ, необходимые для расчёта переходных характеристик, приведены на рис. 6.13, а пример зависимостей – на рис. 6.14.

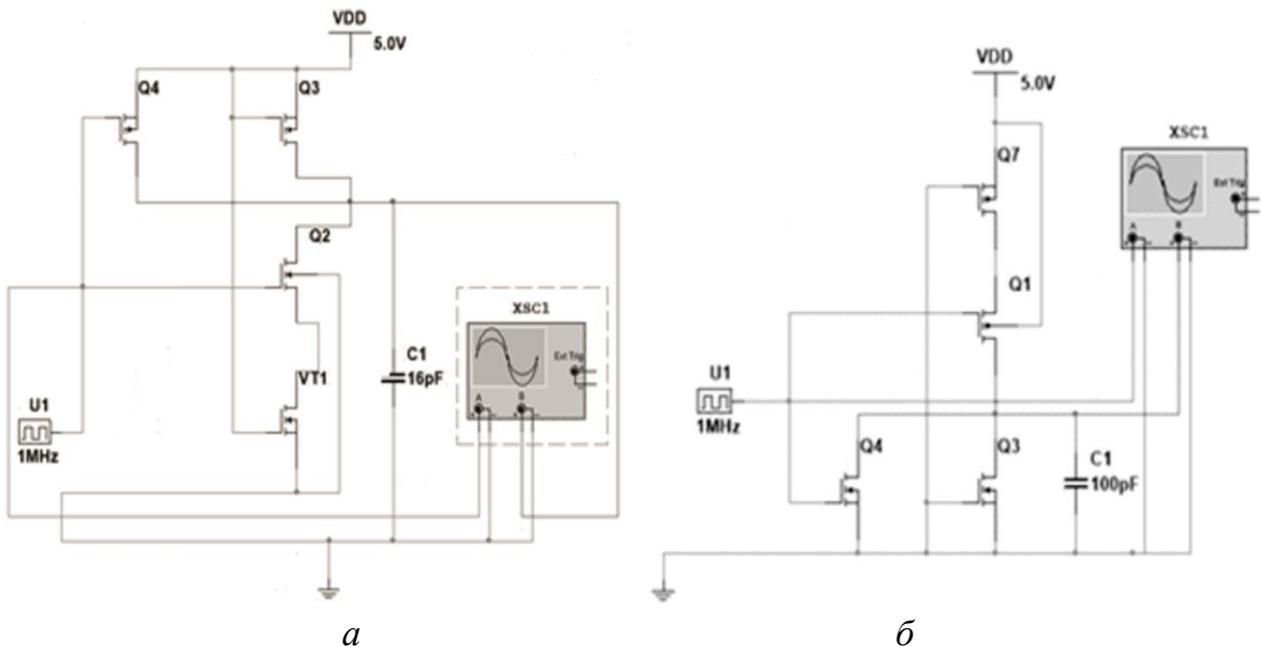


Рис. 6.13. Схема для измерения переходной характеристики КМОП-элементов 2И-НЕ (*a*) и 2ИЛИ-НЕ (*б*) в программе *Multisim* 14.1

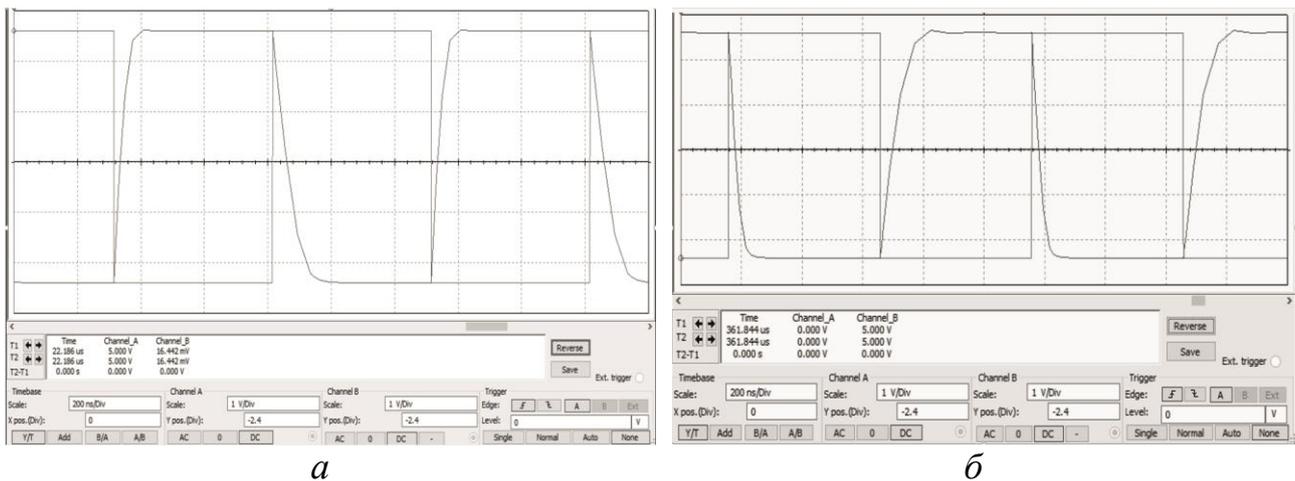


Рис. 6.14. Пример переходных характеристик входного и выходного напряжений КМОП-элементов 2И-НЕ (а) и 2ИЛИ-НЕ (б)

6. Сравнить результаты моделирования и измерений.
7. Рассчитать динамические характеристики при значении ёмкости нагрузки, равной 50 пФ, для следующих условий:
  - увеличенной в 2 раза ширине затвора обоих транзисторов;
  - увеличенных в 1,5 раза пороговых напряжений транзисторов;
  - увеличенном пороговом напряжении только одного транзистора.
8. Сравнить результаты п. 7 и объяснить влияние указанных факторов на динамические логические характеристики схемы.

### 6.3. Содержание отчёта

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Схемы измерений передаточных и переходных характеристик КМОП-логических элементов 2И-НЕ и 2ИЛИ-НЕ.
4. Таблицы экспериментальных данных и графики.
5. Рисунки с экрана осциллографа входных и выходных сигналов КМОП-схем.
6. Схемы для компьютерного расчёта характеристик из программы *SPICE*-моделирования для всех пунктов задания.
7. Распечатки графиков характеристик, рассчитанных с помощью программы *SPICE*-моделирования.
8. Выводы.

### 6.4. Контрольные вопросы

1. Каковы условия комплементарности КМОП-схем, достоинства электронных устройств на КМОП-транзисторах?

2. Какие существуют виды и особенности логических КМОП-схем?
3. Каковы особенности передаточной характеристики КМОП-инвертора?
4. Каковы переходные процессы в КМОП-схемах и методы уменьшения их длительности?
5. Как обеспечивается помехоустойчивость по положительным и отрицательным помехам КМОП-схем?
6. Какой порядок формирования исходных данных для моделирования передаточных и переходных характеристик логических элементов на КМОП-транзисторах?
7. Какие конструкторско-технологические приёмы позволяют увеличить быстродействие КМОП-схем?

### **Список использованных источников**

1. Электроника интегральных схем / К. О. Петросянц [и др.] ; под ред. К. О. Петросянца. – М. : СОЛОН-Пресс, 2017. – 556 с.
2. Джонс, М. Х. Электроника – практический курс / М. Х. Джонс. – М. : Техносфера, 2013. – 512 с.
3. Рабаи, Ж. М. Цифровые интегральные схемы. Методология проектирования / Ж. М. Рабаи, А. Чандракасан, Б. Николич. – М. : Вильямс, 2016. – 912 с.
4. Бирюков, С. А. Применение цифровых микросхем серии ТТЛ и КМОП / С. А. Бирюков. – М. : ДМК, 2000. – 240 с.
5. Сохор, Ю. Н. Моделирование устройств к пакету LTspice / Ю. Н. Сохор. – Псков : ППИ, 2008. – 56 с.

*Учебное издание*

**Соловьёв** Ярослав Александрович  
**Шахлевич** Григорий Михайлович  
**Петлицкий** Александр Николаевич

**СПЕЦИАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ  
И СУБМИКРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ.  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

ПОСОБИЕ

Редактор *Е. С. Юрец*  
Корректор *Е. Н. Батурчик*  
Компьютерная правка, оригинал-макет *В. М. Задоля*

Подписано в печать 04.04.2022. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 6,16. Уч.-изд. л. 6,5. Тираж 30 экз. Заказ 13.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,  
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.  
Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск