

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет»

Кафедра полупроводниковых приборов и микроэлектроники

“УТВЕРЖДАЮ”

ДЕКАН РЭФ

д.т.н. Хрусталеv В. А.

“ ____ ” _____ г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
Специальные главы физики полупроводниковых приборов

Образовательная программа: 28.04.01 Нанотехнологии и микросистемная техника, магистерская программа: Материалы микро- и наносистемной техники

Курс: 1, семестр : 1

Факультет радиотехники и электроники,

		Семестр
№	Вид деятельности	1
1	Всего зачетных единиц (кредитов)	4
2	Всего часов	144
3	Всего занятий в контактной форме, час.	64
4	Лекции, час.	18
5	Практические занятия, час.	36
6	Лабораторные занятия, час.	0
7	из них в активной и интерактивной форме, час.	0
8	Аттестация, час.	2
9	Консультации, час.	8
10	Самостоятельная работа, час.	80
11	Виды самостоятельной работы (курсовой проект, курсовая работа, РГЗ, подготовка к контрольной работе)	РГЗ
12	Вид аттестации	Э

Рабочая программа составлена на основании федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению (специальности): 28.04.01 Нанотехнологии и микросистемная техника

ФГОС введен в действие приказом №990 от 09.09.2015 г. , дата утверждения: 05.10.2015 г.

Место дисциплины в структуре учебного плана: Блок 1, вариативная

Рабочая программа разработана на основе компетентностной модели выпускника по направлению (специальности): 28.04.01 Нанотехнологии и микросистемная техника

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры

ППиМЭ, протокол заседания кафедры №5 от 20.06.2017

Утверждена на совете факультета радиотехники и электроники, протокол № 6 от 21.06.2017

Программу разработал:

старший преподаватель, Калинин С. В.

Заведующий кафедрой:

с.н.с., д.ф-м.н. Гайслер В. А.

Ответственный за образовательную программу:

заведующий кафедрой Гайслер В. А.

1. Внешние требования

Таблица 1.1

Компетенция ФГОС: ПК.3 готовность разрабатывать физические и математические модели, проводить компьютерное моделирование исследуемых физических процессов в области нанотехнологии и микросистемной техники; в части следующих результатов обучения:
з31. знать физические особенности полупроводниковых интегральных резисторов, субмикронных и наномикронных КМОПТ на объемном кремнии и КНИ-структурах, высокочастотных транзисторов на гетероструктурах
з32. знать технологические особенности изготовления интегральных полупроводниковых резисторов, субмикронных и наномикронных транзисторов, используемых в современных СБИС и УБИС
у27. уметь применять математическое моделирование для анализа элементной базы субмикронных и наномикронных СБИС и УБИС
у28. уметь вычислять основные параметры современных полупроводниковых интегральных резисторов и транзисторов

2. Требования НГТУ к результатам освоения дисциплины

Таблица 2.1

Результаты изучения дисциплины по уровням освоения (иметь представление, знать, уметь, владеть)	Формы организации занятий
<i>Специальные главы физики полупроводниковых приборов</i>	
ПК.3.з31 знать физические особенности полупроводниковых интегральных резисторов, субмикронных и наномикронных КМОПТ на объемном кремнии и КНИ-структурах, высокочастотных транзисторов на гетероструктурах	
1. об основных физических особенностях и моделях для микро и наноструктур	Лекции; Практические занятия; Самостоятельная работа
2. об основных современных полупроводниковых микро и наноструктурах	Лекции; Практические занятия; Самостоятельная работа
ПК.3.з32 знать технологические особенности изготовления интегральных полупроводниковых резисторов, субмикронных и наномикронных транзисторов, используемых в современных СБИС и УБИС	
3. о современных тенденциях развития физики и технологии нанотранзисторов	Лекции; Практические занятия; Самостоятельная работа
ПК.3.з31 знать физические особенности полупроводниковых интегральных резисторов, субмикронных и наномикронных КМОПТ на объемном кремнии и КНИ-структурах, высокочастотных транзисторов на гетероструктурах	
4. Понятийный аппарат (терминологию) дисциплины	Лекции; Практические занятия; Самостоятельная работа
ПК.3.з32 знать технологические особенности изготовления интегральных полупроводниковых резисторов, субмикронных и наномикронных транзисторов, используемых в современных СБИС и УБИС	
5. Физику интегральных полупроводниковых резисторов	Лекции; Практические занятия; Самостоятельная работа
ПК.3.з31 знать физические особенности полупроводниковых интегральных резисторов, субмикронных и наномикронных КМОПТ на объемном кремнии и КНИ-структурах, высокочастотных транзисторов на гетероструктурах	
6. Физику процесса миниатюризации субмикронных и наномикронных КМОПТ	Лекции; Практические занятия; Самостоятельная работа
ПК.3.з32 знать технологические особенности изготовления интегральных полупроводниковых резисторов, субмикронных и наномикронных транзисторов, используемых в современных СБИС и УБИС	
7. Физику КМОПТ на напряженном кремнии	Лекции; Практические занятия; Самостоятельная работа

8. Физику КМОПТ на КНИ-структурах	Лекции; Практические занятия; Самостоятельная работа
ПК.3.31 знать физические особенности полупроводниковых интегральных резисторов , субмикронных и наномикронных КМОПТ на объемном кремнии и КНИ-структурах , высокочастотных транзисторов на гетероструктурах	
9. Физику основных эффектов в субмикронных и наномикронных КМОПТ	Лекции; Практические занятия; Самостоятельная работа
10. Физику высокочастотных транзисторов на гетеропереходах	Лекции; Самостоятельная работа
ПК.3.y28 уметь вычислять основные параметры современных полупроводниковых интегральных резисторов и транзисторов	
11. Численно вычислять основные параметры полупроводниковых интегральных резисторов	Лекции; Практические занятия; Самостоятельная работа
12. Численно вычислять основные параметры современных КМОПТ	Лекции; Практические занятия; Самостоятельная работа
ПК.3.y27 уметь применять математическое моделирование для анализа элементной базы субмикронных и наномикронных СБИС и УБИС	
13. Анализировать принципы действия высокоскоростных наномикронных транзисторов с помощью зонных диаграмм	Лекции; Практические занятия; Самостоятельная работа
14. Применения математических моделей для анализа элементной базы СБИС и УБИС	Лекции; Практические занятия; Самостоятельная работа

3. Содержание и структура учебной дисциплины

Таблица 3.1

Темы лекций	Активные формы, час.	Часы	Ссылки на результаты обучения	Учебная деятельность
Семестр: 1				
Дидактическая единица: Физика интегральных полупроводниковых резисторов				
1. Полупроводниковые резисторы. Конструкция, модель и параметры	0	2	1, 11, 14, 2, 4, 5	Полупроводниковые диффузионные резисторы. Конструкция, модель и параметры диффузионных, пленочных и пинч-резисторов. Эффект ширины в интегральных диффузионных и полосковых резисторах. Температурная чувствительность полупроводниковых резисторов. Лазерная подгонка

2. Экспериментальные методики и тестовые структуры для полупроводниковых резисторов	0	2	1, 11, 14, 2, 4, 5	Тестовая структура и методика нахождения R_s и эффективной ширины полоскового резистора. Четырехзондовый метод Вальдеса. Электрофизическое обоснование четырехзондового метода. Метод Ван дер Пау. Структура "греческий крест" и ее преимущества перед полосковой структурой. Контактное сопротивление резистора и сопротивления растекания. Резисторы Кельвина. Конструкция, параметры, назначение.
3. Методы моделирования и расчета полупроводниковых резисторов	0	1	1, 11, 14, 2, 4	Коэффициент формы неполоסקового тонкопленочного резистора и полоскового со сложными контактами. Модель тонкопленочного однороднолегированного полоскового резистора со сложными контактами. Применение метода конформных отображений для нахождения сопротивления тонкопленочного резистора сложной формы.
Дидактическая единица: Физика миниатюризации субмикронных и наномикронных КМОПТ				
4. КМОП-технологии	0	2	1, 12, 14, 2, 3, 4, 6	КМОП-технологии. Закон Мура и три современных пути развития КМОП-технологии. Модель Шихмана-Ходжеса и ее "черный ящик". Процесс миниатюризации и его влияние на параметры КМОПТ
5. Основные особенности процесса миниатюризации	0	2	1, 12, 14, 2, 3, 4, 6, 9	Компромиссы миниатюризации. Зависимость граничной частоты КМОПТ от конструктивно-технологических параметров. Основные конструктивно-технологические способы увеличения быстродействия КМОПТ. Правила Деннарта и скейлинг параметров. Связь масштабирования по Деннарту с эффектами сильных полей. Основные проблемы миниатюризации межсоединений.
Дидактическая единица: Физика и технология КМОПТ на напряженном кремнии				

6. Физические основы напряженного кремния	0	1	1, 12, 13, 14, 2, 3, 4, 7	Напряженный кремний, гидростатическое сжатие и эффект Смита. Влияние анизотропных механических напряжений на структуру зоны проводимости в кремнии. Рост подвижности электронов. Влияние анизотропных механических напряжений на структуру валентной зоны в кремнии. Рост подвижности дырок. Особенности КМОПТ на напряженном кремнии
7. Технологии напряженного кремния	0	1	1, 12, 14, 2, 3, 4, 7	Технологии напряженного кремния 1 поколения. Основные источники механических напряжений(стрессоры) в технологиях 2 поколения. Напряженные КМОПТ, изготовленные по технологии сар-слоя (CELS). Напряженные МОПТ, изготовленные по технологии с запоминанием напряжения (STM) КМОПТ, изготовленные по технологии напряженных истоков/стоков (embedded). Комбинированные технологии напряженного кремния
Дидактическая единица: Физика и технология КМОПТ на КНИ-структурах				
8. КМОПТ на КНИ-структурах	0	2	1, 12, 14, 2, 3, 4, 8, 9	Основные особенности КМОПТ на структурах КНИ. Эффект "защелкивания" в структурах КМОПТ на объемном кремнии. Электрофизические особенности частично и полностью обедненных КМОПТ на структурах КНИ. Многослойные КМОПТ (FinFET).
9. Основные технологии для КНИ-структур	0	1	1, 12, 14, 2, 3, 4, 8	Технология SIMOX для КНИ. Достоинства и недостатки. Технология сращивания пластин (SMART CUT). Достоинства и недостатки. Мелкая траншейная изоляция в КНИ структурах (STI). Глубокая траншейная изоляция в структурах на объемном кремнии (DTI). Bosch-процесс
Дидактическая единица: Основные физические эффекты в субмикронных и наномикронных КМОПТ				

10. Геометрические и токовые эффекты в КМОПТ	0	1	1, 12, 13, 14, 2, 3, 4, 9	Короткоканальный эффект порогового напряжения Паразитные токовые эффекты короткого канала.
11. Эффекты сильных полей в КМОПТ	0	1	1, 12, 13, 14, 2, 3, 4, 9	Эффекты сильных полей в МОПТ: горячие электроны и лавинное умножение, ток в подложку, снижение барьера на истоке, биполярный и kink-эффекты. Методы технологической оптимизации структуры исток-стоков КМОПТ с целью снижения эффектов сильных полей
Дидактическая единица: Физические особенности и структуры высокочастотных транзисторов				
12. Физика высокочастотных транзисторов	0	2	1, 10, 12, 13, 14, 2, 3, 4	Физические процессы в гетеропереходах. Гетероструктурные биполярные транзисторы (НВТ). Варизонные гетеробиполярные транзисторы с Si-Ge базой. Транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT).

Таблица 3.2

Темы практических занятий	Активные формы, час.	Часы	Ссылки на результаты обучения	Учебная деятельность
Семестр: 1				
Дидактическая единица: Физика интегральных полупроводниковых резисторов				

1. Конструкция, модель и параметры полупроводниковых интегральных резисторов	0	12	1, 11, 14, 2, 4, 5	Конструкция, модель и параметры диффузионных, пленочных и пинч-резисторов. Эффект ширины в интегральных диффузионных и полосковых резисторах. Температурная чувствительность полупроводниковых резисторов. Коэффициент формы неполоевого тонкопленочного резистора и полоскового со сложными контактами. Модель тонкопленочного однороднолегированного полоскового резистора со сложными контактами. Применение метода конформных отображений для нахождения сопротивления тонкопленочного резистора сложной формы. Тестовая структура и методика нахождения R_s и эффективной ширины полоскового резистора. Четырехзондовый метод Вальдеса. Тестовая структура и методика нахождения R_s и эффективной ширины полоскового резистора. Четырехзондовый метод Вальдеса. Электрофизическое обоснование четырехзондового метода. Метод Ван дер Пау. Структура "греческий крест" и ее преимущества перед полосковой структурой. Контактное сопротивление резистора и сопротивления растекания. Резисторы Кельвина.
Дидактическая единица: Физика миниатюризации субмикронных и наномикронных КМОПТ				
2. Современные микро- и наноКМОПТ	0	12	1, 12, 14, 2, 3, 4, 6, 9	КМОПТ-технологии. Закон Мура и три современных пути развития КМОП-технологии. Модель Шихмана-Ходжеса и ее "черный ящик". Процесс миниатюризации и его влияние на параметры КМОПТ Правила Деннарта и скейлинг параметров. Компромиссы миниатюризации. Зависимость граничной частоты КМОПТ от конструктивно-технологических параметров
Дидактическая единица: Физика и технология КМОПТ на напряженном кремнии				

3. КМОПТ на напряженном кремнии	0	6	1, 12, 13, 14, 2, 3, 4, 7	Напряженный кремний, гидростатическое сжатие и эффект Смита. Влияние анизотропных механических напряжений на структуру зоны проводимости в кремнии. Рост подвижности электронов. Влияние анизотропных механических напряжений на структуру валентной зоны в кремнии. Рост подвижности дырок. Особенности КМОПТ на напряженном кремнии. Технологии напряженного кремния 1 и 2 поколений
Дидактическая единица: Физика и технология КМОПТ на КНИ-структурах				
4. КМОПТ на КНИ-структурах	0	6	1, 12, 13, 14, 2, 3, 4, 8, 9	Основные особенности КМОПТ на структурах КНИ. Эффект "защелкивания" в структурах КМОПТ на объемном кремнии. Электрофизические особенности частично и полностью обедненных КМОПТ на структурах КНИ. Многоступенчатые КМОПТ (FinFET)

4. Самостоятельная работа обучающегося

№	Виды самостоятельной работы	Ссылки на результаты обучения	Часы на выполнение	Часы на консультации
Семестр: 1				
1	РГЗ	11, 12, 13	12	0
Подготовка отчета по РГЗ: Двумерное моделирование транзисторов в TCAD MicroTec : методическое руководство по курсовому проектированию для 4 курса РЭФ по направлениям 210100 - Электроника и микроэлектроника и 210600 - Нанотехнология / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост.: Е. А. Макаров и др.]. - Новосибирск, 2009. - 83 с. : ил., табл.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000121588				
2	Подготовка к занятиям	10, 4, 5, 6, 7, 8, 9	40	0
Работа с конспектом лекций и рекомендованной литературой : Двумерное моделирование транзисторов в TCAD MicroTec : методическое руководство по курсовому проектированию для 4 курса РЭФ по направлениям 210100 - Электроника и микроэлектроника и 210600 - Нанотехнология / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост.: Е. А. Макаров и др.]. - Новосибирск, 2009. - 83 с. : ил., табл.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000121588				
3	Дополнительная учебная деятельность	10, 4, 5, 6, 7, 8, 9	4	0
Работа с иностранной литературой и публикациями из Интернета: Двумерное моделирование транзисторов в TCAD MicroTec : методическое руководство по курсовому проектированию для 4 курса РЭФ по направлениям 210100 - Электроника и микроэлектроника и 210600 - Нанотехнология / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост.: Е. А. Макаров и др.]. - Новосибирск, 2009. - 83 с. : ил., табл.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000121588				
4	Подготовка к аттестации	1, 10, 11, 12, 13, 14, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9	24	8

Подготовка к защите тем (дидактических единиц: Двумерное моделирование транзисторов в TCAD MicroTес : методическое руководство по курсовому проектированию для 4 курса РЭФ по направлениям 210100 - Электроника и микроэлектроника и 210600 - Нанотехнология / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост.: Е. А. Макаров и др.]. - Новосибирск, 2009. - 83 с. : ил., табл.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000121588

5. Технология обучения

Для организации и контроля самостоятельной работы обучающихся, а также проведения консультаций применяются информационно-коммуникационные технологии (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Деятельность	Информационно-коммуникационные технологии
Информирование	e-mail
Консультирование	e-mail
Контроль	e-mail
Размещение учебных материалов	e-mail

6. Правила аттестации обучающихся по учебной дисциплине

Для аттестации обучающихся по дисциплине используется балльно-рейтинговая система (БРС), позволяющая выставять оценки по традиционной шкале и 15-уровневой ECTS.

Краткая информация о БРС приведена в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Оцениваемые виды деятельности обучающихся	Мин. балл	Максимальный балл
Семестр: 1		
<i>Лекция:</i>	2	4
<i>Практические занятия:</i>	22	44
<i>РГЗ:</i>	6	12
Контролирующие материалы (список вопросов) приводятся в "Двумерное моделирование транзисторов в TCAD MicroTес : методическое руководство по курсовому проектированию для 4 курса РЭФ по направлениям 210100 - Электроника и микроэлектроника и 210600 - Нанотехнология / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост.: Е. А. Макаров и др.]. - Новосибирск, 2009. - 83 с. : ил., табл.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000121588 "		
<i>Экзамен:</i>	20	40
Контролирующие материалы (список вопросов) приводятся в "Двумерное моделирование транзисторов в TCAD MicroTес : методическое руководство по курсовому проектированию для 4 курса РЭФ по направлениям 210100 - Электроника и микроэлектроника и 210600 - Нанотехнология / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост.: Е. А. Макаров и др.]. - Новосибирск, 2009. - 83 с. : ил., табл.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000121588 "		

В таблице 6.2 представлено соответствие форм контроля заявляемым требованиям к результатам освоения дисциплины.

Таблица 6.2

Коды компетенций ФГОС	Результаты обучения	Формы контроля	
		Защита РГЗ	Экзамен
ПК.3	331. знать физические особенности полупроводниковых интегральных резисторов, субмикронных и наномикронных КМОПТ на объемном кремнии и КНИ-структурах, высокочастотных транзисторов на гетероструктурах	+	+
	332. знать технологические особенности изготовления интегральных полупроводниковых резисторов, субмикронных и наномикронных транзисторов, используемых в современных СБИС и УБИС		+

	у27. уметь применять математическое моделирование для анализа элементной базы субмикронных и наномикронных СБИС и УБИС		+
	у28. уметь вычислять основные параметры современных полупроводниковых интегральных резисторов и транзисторов		+

Фонд оценочных средств по дисциплине представлен в приложении № 1 к рабочей программе.

7. Литература

Основная литература

1. Зебрев Г. И. Физические основы кремниевой нанoeлектроники : учебное пособие / Г. И. Зебрев. - М., 2011. - 240 с. : ил., схемы
2. Мартинес-Дуарт Д. М. Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники / Дж. М. Мартинес-Дуарт, Р. Дж. Мартин-Палма, Ф. Агулло-Руеда ; пер. с англ. А. В. Хачояна : под ред. Е. Б. Якимова. - М., 2009. - 367 с. : ил.
3. Старосельский В. И. Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники : учебное пособие [для вузов по направлению 210100 "Электроника и микроэлектроника"] / В. И. Старосельский. - М., 2011. - 463 с. : ил., табл.

Дополнительная литература

1. Шур М. С. Физика полупроводниковых приборов. Кн. 1 : В 2-х кн. :Пер. с англ.. - М., 1992. - 479с. : ил.
2. Nano-CMOS Design for Manufacturability : Robust Circuit and Physical Design for sub-65 nm technology nodes / Ban Wong [et al.]. - Hoboken, NJ, 2009. - XV, 385 p. : ill.. - Пер. загл.: Нано-CMOS проектирование с учетом технологичности.
3. Hull R. Into The Nano Era [electronic resource] : : Moore's Law Beyond Planar Silicon CMOS / / edited by Robert Hull, Jurgen Parisi, R. M. Osgood, Hans Warlimont, Howard R. Huff. - Berlin, Heidelberg ;, 2009. : v.: digital // Springer eBooks. - Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-74559-4>
4. Мартюшов К. И. Методы расчета резисторов / К. И. Мартюшов, Ю. В. Зайцев, А. И. Тихонов. - М., 1971. - 206, [1] с. : ил.

Интернет-ресурсы

1. ЭБС НГТУ : <http://elibrary.nstu.ru/>
2. ЭБС «Издательство Лань» : <https://e.lanbook.com/>
3. ЭБС IPRbooks : <http://www.iprbookshop.ru/>
4. ЭБС "Znanium.com" : <http://znanium.com/>
5. :

8. Методическое и программное обеспечение

8.1 Методическое обеспечение

1. Двумерное моделирование транзисторов в TCAD MicroТес : методическое руководство по курсовому проектированию для 4 курса РЭФ по направлениям 210100 - Электроника и микроэлектроника и 210600 - Нанотехнология / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост.: Е. А. Макаров и др.]. - Новосибирск, 2009. - 83 с. : ил., табл.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000121588

8.2 Специализированное программное обеспечение

- 1 MathCAD

9. Материально-техническое обеспечение

Компьютерный класс

№	Наименование	Назначение
1	Компьютерный класс (Компьютеры объединены в локальную сеть с выходом в Internet)	Компьютеры объединены в локальную сеть с выходом в Internet

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет»

Кафедра полупроводниковых приборов и микроэлектроники

“УТВЕРЖДАЮ”
ДЕКАН РЭФ
д.т.н., профессор В.А. Хрусталеv
“ ” _____ г.

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Специальные главы физики полупроводниковых приборов

Образовательная программа: 28.04.01 Нанотехнологии и микросистемная техника,
магистерская программа: Материалы микро- и наносистемной техники

1. Обобщенная структура фонда оценочных средств учебной дисциплины

Обобщенная структура фонда оценочных средств по дисциплине **Специальные главы физики полупроводниковых приборов** приведена в Таблице.

Таблица

Формируемые компетенции	Показатели сформированности компетенций (знания, умения, навыки)	Темы	Этапы оценки компетенций	
			Мероприятия текущего контроля (курсовой проект, РГЗ(Р) и др.)	Промежуточная аттестация (экзамен, зачет)
ПК.3/НИ готовность разрабатывать физические и математические модели, проводить компьютерное моделирование исследуемых физических процессов в области нанотехнологии и микросистемной техники	з31. знать физические особенности полупроводниковых интегральных резисторов, субмикронных и наномикронных КМОПТ на объемном кремнии и КНИ-структурах, высокочастотных транзисторов на гетероструктурах	1.1 Полупроводниковые резисторы. Конструкция, модель и параметры Дидактическая единица:1 Физика интегральных полупроводниковых резисторов 1.1 Конструкция, модель и параметры полупроводниковых интегральных резисторов 1.2 Экспериментальные методики и тестовые структуры для полупроводниковых резисторов 1.3 Методы моделирования и расчета полупроводниковых резисторов Дидактическая единица:2 Физика миниатюризации субмикронных и наномикронных КМОПТ 2.2 Современные микро- и наноКМОПТ 2.4 КМОП-технологии 2.5 Основные особенности процесса миниатюризации Дидактическая единица:3 Физика и технология КМОПТ на напряженном кремнии 3.3 КМОПТ на напряженном кремнии Дидактическая единица:4 Физика и технология КМОПТ на КНИ-структурах 4.4 КМОПТ на КНИ-структурах 4.8 КМОПТ на КНИ-структурах 4.9 Основные технологии для КНИ-структур Дидактическая единица:5 Основные физические эффекты в субмикронных и наномикронных КМОПТ 5.10 Геометрические и токовые эффекты в КМОПТ 5.11 Эффекты сильных полей в КМОПТ Дидактическая единица:6 Физические особенности и структуры высокочастотных транзисторов 6.12 Физика высокочастотных транзисторов	РГЗ	Экзамен, вопросы по темам: «Физика интегральных полупроводниковых резисторов», «Физика миниатюризации субмикронных и наномикронных КМОПТ», «Физика и технология КМОПТ на напряженном кремнии», «Физика и технология КМОПТ на КНИ-структурах», «Физические особенности и структуры высокочастотных транзисторов».

ПК.3/НИ	з32. знать технологические особенности изготовления интегральных полупроводниковых резисторов, субмикронных и наномикронных транзисторов, используемых в современных СБИС и УБИС	Дидактическая единица:1 Физика интегральных полупроводниковых резисторов 1.1 Конструкция, модель и параметры полупроводниковых интегральных резисторов 1.1 Полупроводниковые резисторы. Конструкция, модель и параметры 1.2 Экспериментальные методики и тестовые структуры для полупроводниковых резисторов Дидактическая единица:2 Физика миниатюризации субмикронных и наномикронных КМОПТ 2.2 Современные микро- и наноКМОПТ 2.4 КМОП-технологии 2.5 Основные особенности процесса миниатюризации Дидактическая единица:3 Физика и технология КМОПТ на напряженном кремнии 3.3 КМОПТ на напряженном кремнии 3.6 Физические основы напряженного кремния 3.7 Технологии напряженного кремния Дидактическая единица:4 Физика и технология КМОПТ на КНИ-структурах 4.4 КМОПТ на КНИ-структурах 4.8 КМОПТ на КНИ-структурах 4.9 Основные технологии для КНИ-структур Дидактическая единица:5 Основные физические эффекты в субмикронных и наномикронных КМОПТ 5.10 Геометрические и токовые эффекты в КМОПТ Дидактическая единица:6 Физические особенности и структуры высокочастотных транзисторов 6.12 Физика высокочастотных транзисторов	РГЗ	Экзамен, вопросы по темам: «Физика интегральных полупроводниковых резисторов», «Физика миниатюризации субмикронных и наномикронных КМОПТ», «Физика и технология КМОПТ на напряженном кремнии», «Физика и технология КМОПТ на КНИ-структурах», «Физические особенности и структуры высокочастотных транзисторов».
ПК.3/НИ	у27. уметь применять математическое моделирование для анализа элементной базы субмикронных и наномикронных СБИС и УБИС	Дидактическая единица:1 Физика интегральных полупроводниковых резисторов 1.3 Методы моделирования и расчета полупроводниковых резисторов Дидактическая единица:2 Физика миниатюризации субмикронных и наномикронных КМОПТ 2.2 Современные микро- и наноКМОПТ Дидактическая единица:3 Физика и технология КМОПТ на напряженном кремнии 3.3 КМОПТ на напряженном кремнии 3.6 Физические	РГЗ	Экзамен, вопросы по темам: «Физика интегральных полупроводниковых резисторов», «Физика миниатюризации субмикронных и наномикронных КМОПТ», «Физика и технология КМОПТ на напряженном кремнии», «Физика и технология КМОПТ на КНИ-структурах», «Физические особенности и структуры высокочастотных

		основы напряженного кремния Дидактическая единица:4 Физика и технология КМОПТ на КНИ-структурах 4.4 КМОПТ на КНИ-структурах Дидактическая единица:5 Основные физические эффекты в субмикронных и наномикронных КМОПТ 5.10 Геометрические и токовые эффекты в КМОПТ 5.11 Эффекты сильных полей в КМОПТ Дидактическая единица:6 Физические особенности и структуры высокочастотных транзисторов 6.12 Физика высокочастотных транзисторов		транзисторов».
ПК.3/НИ	у28. уметь вычислять основные параметры современных полупроводниковых интегральных резисторов и транзисторов	1.1 Полупроводниковые резисторы. Конструкция, модель и параметры Дидактическая единица:1 Физика интегральных полупроводниковых резисторов 1.1 Конструкция, модель и параметры полупроводниковых интегральных резисторов 1.3 Методы моделирования и расчета полупроводниковых резисторов Дидактическая единица:2 Физика миниатюризации субмикронных и наномикронных КМОПТ 2.2 Современные микро- и наноКМОПТ 2.4 КМОП-технологии Дидактическая единица:3 Физика и технология КМОПТ на напряженном кремнии 3.3 КМОПТ на напряженном кремнии Дидактическая единица:4 Физика и технология КМОПТ на КНИ-структурах 4.4 КМОПТ на КНИ-структурах Дидактическая единица:5 Основные физические эффекты в субмикронных и наномикронных КМОПТ 5.10 Геометрические и токовые эффекты в КМОПТ 5.11 Эффекты сильных полей в КМОПТ	РГЗ	Экзамен, вопросы по темам: «Физика интегральных полупроводниковых резисторов», «Физика миниатюризации субмикронных и наномикронных КМОПТ», «Физика и технология КМОПТ на напряженном кремнии», «Физика и технология КМОПТ на КНИ-структурах».

2. Методика оценки этапов формирования компетенций в рамках дисциплины.

Промежуточная аттестация по дисциплине проводится в 1 семестре - в форме экзамена, который направлен на оценку сформированности компетенций ПК.3/НИ.

Экзамен проводится в устной форме, по билетам.

Кроме того, сформированность компетенции проверяется при проведении мероприятий текущего контроля, указанных в таблице раздела 1.

В 1 семестре обязательным этапом текущей аттестации является расчетно-графическое задание (работа) (РГЗ(Р)). Требования к выполнению РГЗ(Р), состав и правила оценки сформулированы в паспорте РГЗ(Р).

Общие правила выставления оценки по дисциплине определяются балльно-рейтинговой системой, приведенной в рабочей программе учебной дисциплины.

На основании приведенных далее критериев можно сделать общий вывод о сформированности компетенции ПК.3/НИ, за которые отвечает дисциплина, на разных уровнях.

Общая характеристика уровней освоения компетенций.

Ниже порогового. Уровень выполнения работ не отвечает большинству основных требований, теоретическое содержание курса освоено частично, пробелы могут носить существенный характер, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы не достаточно, большинство предусмотренных программой обучения учебных заданий не выполнены или выполнены с существенными ошибками.

Пороговый. Уровень выполнения работ отвечает большинству основных требований, теоретическое содержание курса освоено частично, но пробелы не носят существенного характера, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом в основном сформированы, большинство предусмотренных программой обучения учебных заданий выполнено, некоторые виды заданий выполнены с ошибками.

Базовый. Уровень выполнения работ отвечает всем основным требованиям, теоретическое содержание курса освоено полностью, без пробелов, некоторые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы недостаточно, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, качество выполнения ни одного из них не оценено минимальным числом баллов, некоторые из выполненных заданий, возможно, содержат ошибки.

Продвинутый. Уровень выполнения работ отвечает всем требованиям, теоретическое содержание курса освоено полностью, без пробелов, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, качество их выполнения оценено числом баллов, близким к максимальному.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет»
Кафедра полупроводниковых приборов и микроэлектроники

Паспорт экзамена

по дисциплине «Специальные главы физики полупроводниковых приборов», 1 семестр

1. Методика оценки

Экзамен проводится в устной форме, по билетам. Билет формируется по следующему правилу:

первый вопрос выбирается из диапазона вопросов соответствующих одной из шести тематик, изученных в ходе семестра,
второй вопрос выбирается из диапазона вопросов соответствующих другой тематике (из оставшихся пяти возможных).

Форма экзаменационного билета

НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
Факультет РЭФ

Билет № _____

к экзамену по дисциплине «Специальные главы физики полупроводниковых приборов»

- 1 Модель тонкопленочного однороднолегированного полоскового резистора со сложными контактами.
2. Напряженные КМОПТ, изготовленные по технологии сар-слоя (CELS).

Утверждаю: зав. кафедрой _____ проф. Гайслер В.А.

(подпись)

(дата)

2. Критерии оценки

Ответ на экзаменационный билет считается **неудовлетворительным**, если студент при ответе на вопросы не дает определений основных понятий, не способен показать причинно-следственные связи явлений, при решении задачи допускает принципиальные ошибки, оценка составляет менее 20 баллов.

- Ответ на экзаменационный билет засчитывается на **пороговом** уровне, если студент при ответе на вопросы дает определение основных понятий, может показать причинно-следственные связи явлений, при решении задачи допускает непринципиальные ошибки, оценка составляет 20-25 баллов.

- Ответ на экзаменационный билет засчитывается на **базовом** уровне, если студент при ответе на вопросы формулирует основные понятия, законы, дает характеристику процессов, явлений, проводит анализ причин, условий, может представить качественные характеристики процессов, не допускает ошибок при решении задачи, оценка составляет 26-34 *баллов*.
- Ответ на экзаменационный билет (тест) билет засчитывается на **продвинутом** уровне, если студент при ответе на вопросы проводит сравнительный анализ подходов, проводит комплексный анализ, выявляет проблемы, предлагает механизмы решения, способен представить количественные характеристики определенных процессов, приводит конкретные примеры из практики, не допускает ошибок и способен обосновать выбор метода решения задачи, оценка составляет 35-40 *баллов*.

Экзамен считается сданным, если средняя сумма баллов по всем вопросам составляет не менее 20 баллов (по 40 балльной шкале).

Коэффициент, с которым учитывается полученная сумма баллов в общей оценке по дисциплине, определяется Правилами аттестации исходя из того, что максимальное количество баллов за экзамен не может превышать 40 баллов.

3. Шкала оценки

В общей оценке по дисциплине экзаменационные баллы учитываются в соответствии с правилами балльно-рейтинговой системы, приведенными в рабочей программе дисциплины.

4. Вопросы к экзамену по дисциплине «Специальные главы физики полупроводниковых приборов»

«Физика интегральных полупроводниковых резисторов»

- 1.1 Полупроводниковые диффузионные резисторы. Конструкция, модель и параметры.
- 1.2 Полупроводниковые пленочные резисторы. Конструкция, модель и параметры.
- 1.3 Эффект ширины в интегральных диффузионных и полосковых резисторах.
- 1.4 Пинч-резисторы. Конструкция, модель и параметры
- 1.5 Температурная чувствительность полупроводниковых резисторов. Лазерная подгонка.
- 1.5 Тестовая структура и методика нахождения R_s и эффективной ширины полоскового резистора.
- 1.6 Четырехзондовый метод Вальдеса
- 1.7 Электрофизическое обоснование четырехзондового метода.
- 1.8 Метод Ван дер Пау. Структура «греческий крест» и ее преимущества перед полосковой структурой.
- 1.9 Коэффициент формы неполоסקового тонкопленочного резистора и полоскового со сложными контактами.
- 1.10 Модель тонкопленочного однороднолегированного полоскового резистора со сложными контактами.
- 1.11 Применение метода конформных отображений для нахождения сопротивления тонкопленочного резистора сложной формы.
- 1.12 Контактное сопротивление резистора и сопротивления растекания.
- 1.13 Резисторы Кельвина. Конструкция, параметры, назначение.

«Физика миниатюризации субмикронных и наномикронных КМОПТ»

- 2.1 КМОП-технологии
- 2.2 Закон Мура и три современных пути развития КМОП-технологии
- 2.3 Модель Шихмана-Ходжеса и ее «черный ящик».
- 2.4 Процесс миниатюризации и его влияние на параметры КМОПТ
- 2.5 Компромиссы миниатюризации

- 2.6 Зависимость граничной частоты КМОПТ от конструктивно-технологических параметров
- 2.7 Основные конструктивно-технологические способы увеличения быстродействия КМОПТ
- 2.8 Правила Деннарта и скейлинг параметров
- 2.9 Связь масштабирования по Деннарту с эффектами сильных полей
- 2.10 Основные проблемы миниатюризации межсоединений

«Физика и технология КМОПТ на напряженном кремнии»

- 3.1 Напряженный кремний, гидростатическое сжатие и эффект Смита
- 3.2 Влияние анизотропных механических напряжений на структуру зоны проводимости в кремнии.
Рост подвижности электронов.
- 3.3 Влияние анизотропных механических напряжений на структуру валентной зоны в кремнии.
Рост подвижности дырок.
- 3.4 Особенности КМОПТ на напряженном кремнии
- 3.5 Технологии напряженного кремния 1 поколения.
- 3.6 Основные источники механических напряжений(стрессоры) в технологиях 2 поколения.
- 3.7 Напряженные КМОПТ, изготовленные по технологии сар-слоя (CELS).
- 3.8 Напряженные МОПТ, изготовленные по технологии с запоминанием напряжения (STM)
- 3.9 КМОПТ, изготовленные по технологии напряженных истоков/стоков (embedded)
- 3.10 Комбинированные технологии напряженного кремния.

«Физика и технология КМОПТ на КНИ-структурах»

- 4.1 Основные особенности КМОПТ на структурах КНИ
- 4.2 Эффект «защелкивания» в структурах КМОПТ на объемном кремнии.
- 4.3 Технология SIMOX для КНИ. Достоинства и недостатки.
- 4.4 Технология сращивания пластин (SMART CUT). Достоинства и недостатки.
- 4.5 КМОП на КНИ. Структуры LDD и HALO.
- 4.6 Траншейная изоляция в КНИ структурах (STI и DTI). Bosch-процесс.
- 4.7 Электрофизические особенности частично и полностью обедненных КМОПТ на структурах КНИ.
- 4.8 Многозатворные КМОПТ (FinFET).

«Основные физические эффекты в субмикронных и наномикронных КМОПТ»

- 5.1 Управляемость зарядов в канале КМОПТ
- 5.2 Короткоканальный эффект порогового напряжения
- 5.3 Эффект DIBL.
- 5.4 Паразитные токовые эффекты короткого канала.
- 5.5 Эффекты сильных полей в МОПТ: горячие электроны и лавинное умножение.
- 5.6 Эффекты сильных полей в МОПТ: ток в подложку, снижение барьера на истоке, биполярный и kink-эффекты.
- 5.7 Методы технологической оптимизации структуры истоков-стоков КМОПТ с целью снижения эффектов сильных полей.

«Физические особенности и структуры высокочастотных транзисторов»

- 6.1 Физические процессы в гетеропереходах. Зонные диаграммы.
- 6.2 Гетероструктурные биполярные транзисторы (HBT)
- 6.3 Варизонные гетеробиполярные транзисторы с Si-Ge базой.

6.4 Транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT)

Вопросы составил _____доц. Калинин С.В. декабрь 20__

Паспорт расчетно-графического задания (работы)

по дисциплине «Специальные главы физики полупроводниковых приборов», 1 семестр

1. Методика оценки

В рамках расчетно-графического задания (работы) по дисциплине студенты должны рассчитать параметры транзистора (биполярного или полевого) в соответствии с исходными данными варианта.

При выполнении расчетно-графического задания (работы) студенты должны, используя исходные данные, подобрать рассчитать структуру транзистора, соответствующую заданным геометрическим и технологическим параметрам и по этой структуре рассчитать ВАХ транзистора и его электрофизические параметры.

При формировании структуры транзистора необходимо предусмотреть достаточное расстояние между сильно легированными диффузионными областями одного типа для предотвращения их смыкания.

Обязательными структурными частями РГЗ являются:

- краткое описание проектируемой структуры с поясняющими рисунками и обоснованным выбором дополнительных геометрических и физических параметров, необходимых для двумерного моделирования транзистора;
- входной командный файл для технологического приложения, обеспечивающий расчет структуры транзистора;
- одномерные профили легирования в характерных сечениях транзистора, обеспечивающие геометрические параметры транзистора в соответствии с вариантом расчета;
- входной командный файл для электрофизического приложения, обеспечивающий электрофизический расчет;
- рассчитанные ВАХ и электрофизические параметры транзистора и напряжения отсечки

Оцениваемые позиции соответствуют описанной выше структуре РГЗ.

2. Критерии оценки

- Работа считается **не выполненной**, если выполнены не все части РГЗ(Р), отсутствует модель техпроцесса, нет корректных расчетных оценок заданных геометрических и технологических параметров, не представлены главные результаты расчета: одномерные профили легирования в характерных сечениях транзистора, его ВАХ и электрофизические параметры. Оценка в этом случае составляет 0-5 баллов.
- Работа считается выполненной **на пороговом** уровне, если некоторые части РГЗ(Р) выполнены формально: нет анализа и обоснования выбора технологических и электрофизических моделей, в процессе расчета не обеспечены требуемые выходные параметры задания. Оценка в этом случае составляет 6-7 баллов.
- Работа считается выполненной **на базовом** уровне, если моделирование техпроцесса и электрофизический расчет ВАХ и электрофизических параметров целом выполнено с незначительными недочетами. Оценка в этом случае составляет 8-10 баллов.
- Работа считается выполненной **на продвинутом** уровне, если моделирование

технологического процесса и электрофизический расчет выполнены в полном объеме и все выходные параметры вычислены в заданных диапазонах. Оценка в этом случае составляет 11-12 баллов.

3. Шкала оценки

В общей оценке по дисциплине баллы за РГЗ(Р) учитываются в соответствии с правилами балльно-рейтинговой системы, приведенными в рабочей программе дисциплины.

4. Примерный перечень тем РГЗ(Р)

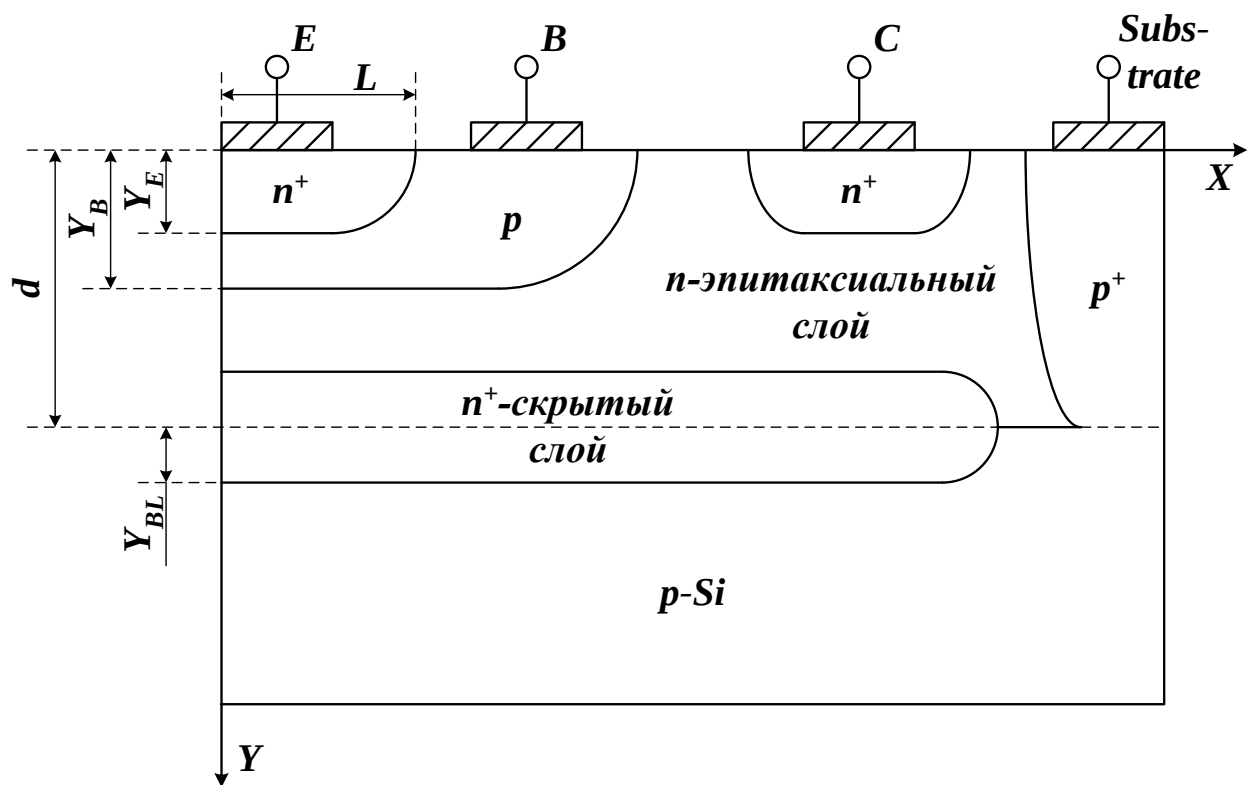
Варианты биполярных *N-P-N* транзисторов

№ варианта	Эмиттер			База		Коллектор (эпит. слой)		Скрытый слой		Подложка
	F_E , мкм ²	N_{E0} , см ⁻³	Y_E , мкм	N_{B0} , см ⁻³	Y_B , мкм	N_C , см ⁻³	d , мкм	N_{BL} , см ⁻³	Y_{BL} , мкм	N_S , см ⁻³
1	3,0	4e20	0,5	2e18	0,8	4e16	4,0	2e19	0,5	9e14
2	4,0	3e20	0,4	5e18	0,6	3e16	2,0	5e19	0,3	8e14
3	8,0	2e20	0,6	4e18	0,9	2e16	5,0	4e19	0,6	7e14
4	5,0	1e20	0,7	2e18	0,9	1e16	6,0	2e19	0,7	6e14
5	2,0	5e20	0,3	3e18	0,6	5e16	3,0	3e19	0,4	1e15
6	5,0	2e20	0,6	1e18	0,8	2e16	5,0	1e19	0,6	7e14
7	4,0	1e20	0,5	1e18	0,7	1e16	4,0	1e19	0,5	6e14
8	8,0	4e20	0,7	5e18	1,0	4e16	6,0	5e19	0,7	9e14
9	2,0	3e20	0,3	3e18	0,5	3e16	2,0	3e19	0,3	8e14
10	3,0	5e20	0,4	4e18	0,7	5e16	3,0	4e19	0,4	1e15

F_E – площадь эмиттера; N_{E0} – максимальная концентрация примеси в эмиттере;

Y_E – глубина залегания эмиттерного *p-n*-перехода; N_{B0} – максимальная концентрация примеси в базе; Y_B – глубина залегания базового слоя (коллекторного

p-n-перехода); N_C – концентрация примеси в эпитаксиальной пленке; d – толщина эпитаксиальной пленки; N_{BL} – максимальная концентрация примеси в скрытом слое; Y_{BL} – глубина залегания скрытого слоя относительно граничной линии, определяемой толщиной эпитаксиальной пленки; N_S – концентрация примеси в подложке.



Варианты МОП-транзисторов

№ вари- анта	Исток-сток		Канал			Затвор	Подло жка
	$N_{D0},$ $см^{-3}$	$Y_{SD},$ $мкм$	$N_{A0},$ $см^{-3}$	$Y_{CH},$ $мкм$	$L,$ $мкм$	$d_{OX},$ $ангст$	$N_A,$ $см^{-3}$
1	2e19	0,3	5e16	0,20	5,0	450	9e14
2	5e19	0,2	6e16	0,30	3,0	300	8e14
3	4e19	0,2	7e16	0,10	1,0	250	7e14
4	1e19	0,3	9e16	0,15	2,0	400	6e14
5	3e19	0,5	8e16	0,25	4,0	350	1e15
6	6e18	0,4	1e17	0,10	2,0	500	7e14
7	5e18	0,5	5e17	0,30	1,0	250	6e14
8	9e18	0,4	4e17	0,25	5,0	350	9e14
9	7e18	0,6	2e17	0,15	3,0	300	8e14
10	8e18	0,6	3e17	0,20	4,0	250	1e15

N_{D0} – максимальная концентрация доноров в исток-стоках; Y_{SD} – глубина залегания исток-стоковых $p-n$ -переходов; N_{A0} – максимальная концентрация акцепторов в области подлегирования канала; Y_{CH} – толщина области подлегирования канала; L – длина канала; d_{OX} – толщина подзатворного

окисла; N_A – концентрация акцепторов в подложке.

