

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского»**

Физический факультет
Кафедра физики полупроводников, электроники и наноэлектроники

УТВЕРЖДЕНО
решением ученого совета ННГУ
протокол № 6 от «31» мая 2023 г.

Рабочая программа дисциплины
Конструирование микро- и наносистем

Уровень высшего образования
Бакалавриат

Направление подготовки: 28.03.01 Нанотехнологии и микросистемная техника
Направленность (профиль): материалы микро- и наносистемной техники

Форма обучения: очная

Нижегород, 2023

1. Место и цели дисциплины в структуре ООП

Дисциплина «Конструирования микро- и наносистем» относится к обязательным дисциплинам формируемой участниками образовательных отношений части образовательной программы по направлению подготовки 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника». Для усвоения данного курса необходимо изучить такие модули (дисциплины) в рамках образовательной программы бакалавра как «Общая физика», «Физика конденсированного состояния», «Физико-химические основы технологии формирования микро- и наноструктур», «Материалы и методы нанотехнологий», «Твердотельная электроника».

Цель освоения дисциплины «Конструирования микро- и наносистем»:

- формирование у студентов понимания основных принципов и подходов, применяемых при конструировании микро- и наносистем;
- формирование представлений об основных этапах конструирования микро- и наносистем.

Знания, полученные в ходе изучения дисциплины «Конструирования микро- и наносистем», необходимы для профессионального становления в будущей профессии.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	
ПК 2. Способен проводить физико-математическое моделирование исследуемых процессов нанотехнологии и объектов нано- и микросистемной техники с использованием современных компьютерных технологий	ПК-2.1. Знает основы физико-математического моделирования. ПК-2.2. Умеет строить физические и математические модели исследуемых процессов нанотехнологии и объектов нано- и микросистемной техники ПК-2.3. Владеет навыками использования стандартных программных средств компьютерного моделирования	Знать основные принципы и подходы для конструирования микро- и наносистем Уметь применять известные явления и эффекты в различных материалах для конструирования микро- и наносистем; Владеть навыками выбора материалов для конструирования микро- и наносистем	Вопросы по темам/разделам дисциплины. Комплект заданий для конструирования. Фонд тестовых заданий

3.1 Трудоемкость дисциплины

Общая трудоемкость	2 ЗЕТ
Часов по учебному плану	72
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	26
- занятия семинарского типа	26
- контроль самостоятельной работы	1
самостоятельная работа	19 (работа в семестре)
Промежуточная аттестация	8 семестр – зачет

3.2. Содержание дисциплины

№ п / п	Раздел Дисциплины	Семестр	Всего (часы)	в том числе				Самостоятельная работа обучающегося, часы
				контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы, из них				
				Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
1	Введение. Классификация электронных микро- и наносистем. Пассивные и активные элементы. Основные материалы для создания электронных микро-и наносистем	8	12	4	4		8	4
2	Гибридные микросхемы. Основные методы конструирования пассивных и активных элементов и блоков.	8	20	8	8		16	4
3	Конструирование микросхем на полевых транзисторах. Особенности конструирования КМОП-микросхем	8	16	6	6		12	4
4	Конструирование микросхем на биполярных транзисторах.	8	16	6	6		12	4

5	Основные подходы и принципы конструирования электронных устройств с нанометровыми проектными нормами.	8	7	2	2		4	3
	Промежуточная аттестация - зачет 1 час							

Содержание разделов дисциплины

1. Введение. Классификация электронных микро- и наносистем. Пассивные и активные элементы. Маркировка микросхем. Основные этапы конструирования. Конструкторская документация. Требования ГОСТов и ОСТов, понятие о техническом задании. Основные материалы для создания электронных микро-и наносистем.
2. Гибридные микросхемы. Основные методы конструирования пассивных и активных элементов и блоков. Материалы для плат и подложек. Материалы для резисторов. Методы расчета пленочных резисторов. Материалы для пленочных конденсаторов. Методы расчета пленочных конденсаторов. Расчет индуктивностей. Контактные площадки и токоведущие дорожки. Принципы компоновки элементов на плате гибридной микросхемы.
3. Конструирование микросхем на полевых транзисторах. Конструирование транзисторных ключей на однотипных ПТ. Особенности конструирования КМОП-микросхем. Паразитные эффекты в микросхемах на ПТ.
4. Конструирование микросхем на биполярных транзисторах. Особенности интегральных биполярных транзисторов. Расчет топологии БТ. Конструирование пассивных элементов в микросхемах на БТ.
5. Основные подходы и принципы конструирования электронных устройств с нанометровыми проектными нормами. FIN-FET-транзисторы. Биполярные СВЧ-транзисторы.

4. Образовательные технологии

Занятия по дисциплине проводят в лекционной форме, в форме практических занятий, а также в форме самостоятельной работы студентов. На лекциях студенты знакомятся с основными этапами конструирования, требованиями ГОСТов и ОСТов к процессу конструирования и конструкторской документации, знакомятся с основными методами и подходами при конструировании. На практических занятиях они приобретают навыки конструирования конкретных элементов, микроблоков для микросхем, учатся рассчитывать топологию элементов, приобретают навыки компоновки элементов на плате микросхемы.

5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины.

Самостоятельная работа студентов включает в себя активное изучение лекционного материала вместе с выполнением конструкторских заданий при использовании соответствующих разделов учебных пособий.

Для прохождения аттестации по предмету проводится зачет, включающий в себя защиту отчетов по индивидуальным конструкторским заданиям и собеседование.

При подготовке к зачету по предмету используются следующие контрольные вопросы:

При подготовке к собеседованию по предмету используются следующие контрольные вопросы:

1. Основные типы электронных микросхем.
2. Классификация и маркировка микросхем. Гибридные микросхемы: основные этапы конструирования.
3. Принципы конструирования пленочных резисторов.
4. Принципы конструирования пленочных конденсаторов и индуктивностей.
5. Монолитные полупроводниковые микросхемы: основные этапы конструирования.
6. Интегральный биполярный транзистор: конструктивные и технологические особенности
7. Аналоговые и логические микросхемы на биполярных транзисторах.
8. Микросхемы на полевых транзисторах: особенности конструирования.
9. Микросхемы КМОП.
10. Основные подходы для конструирования интегральных полевых транзисторов.
11. Микросхемы на КНС- и КНИ-структурах.
12. 3d-транзисторы.
13. Особенности микросхем на GaAs.
14. Конструктивные особенности микросхем ВЧ- и СВЧ-диапазона.

6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине

6.1 Перечень компетенций выпускников образовательной программы, в формировании которых участвует дисциплина, с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений) приведён выше (раздел 2). Ниже приведена таблица образовательных дескрипторов (отличительных признаков уровней освоения компетенций).

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	Шкала оценивания сформированности компетенций						
	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	Не зачтено			зачтено			
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки.	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок.	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки.	Продemonстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания но не в полном объеме.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продemonстрированы все основные умения, решены все основные задачи с отдельным и несущественным недочетом, выполнены все задания в полном объеме.	Продemonстрированы все основные умения, Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие владения материалом. Невозможность оценить наличие навыков вследствие	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки.	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторым	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без	Продemonстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок	Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

	отказа обучающегося от ответа	Имели место грубые ошибки.	некоторыми недочетами	и недочетами	ошибок и недочетов.	и недочетов.	
--	-------------------------------	----------------------------	-----------------------	--------------	---------------------	--------------	--

6.2. Описание шкал оценивания

Промежуточный контроль качества усвоения студентами содержания дисциплины проводится в виде зачета (6 семестр), на котором определяются:

- уровень усвоения студентами основного учебного материала по дисциплине;
- уровень понимания студентами изученного материала;
- способности студентов использовать полученные знания для выполнения конкретных заданий.

Критерии выставления оценки при сдаче зачета:

Зачтено	Студент отвечает полностью на вопросы, показывая удовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. При ответе на дополнительные вопросы допускаются незначительные неточности.
Не зачтено	Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий.

6.3. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине, характеризующие этапы формирования компетенций

Для оценивания результатов обучения в виде *знаний, умений и владений* используются следующие процедуры и технологии:

- для оценивания результатов обучения в виде *знаний* используется фронтальный опрос на занятиях;

- для оценивания результатов обучения в виде *умений* используются задания на конструирование элементов и микроблоков микросхем, включающих несколько вопросов в виде краткой формулировки действий (комплекса действий) для проведения необходимых операций и количественных оценок, которые следует выполнить, или описание результата, который можно считать достоверным.

- для оценивания результатов обучения в виде *владений* используются комплексные задания, требующие поэтапного решения в типичной ситуации и развернутого ответа.

Типовые вопросы для фронтальных опросов:

1. Какие материалы применяются в качестве подложек для ГИС?
2. Расшифровать маркировку микросхемы.
3. Какие основные «паразитные» элементы могут возникать в полупроводниковых ИС?

Типовые задачи и задания:

1. Рассчитать топологию и сконструировать гибридную микросхему.

1. Усилительный каскад для ГИС.

Напряжение питания $V_{\Pi}=+10$ В

Предельная частота $f=100$ КГц

Транзистор КТ206А

$R_1=90$ КОм

$R_2=10$ КОм

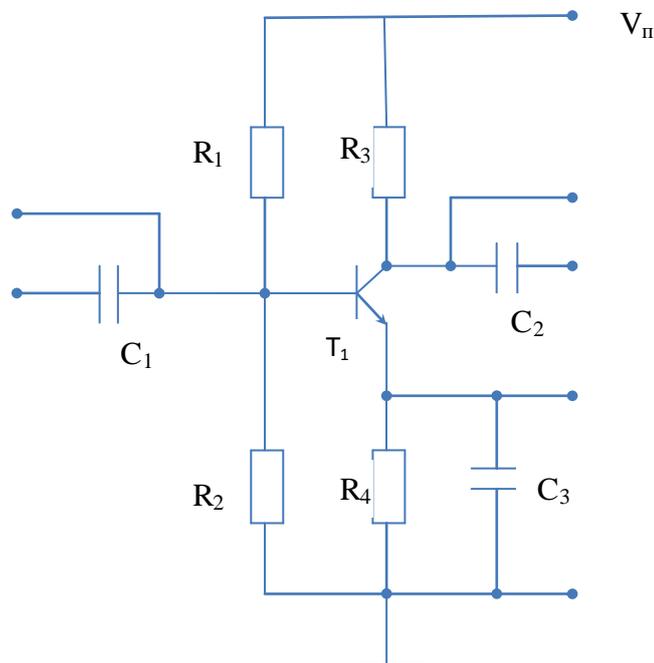
$R_3=1,5$ КОм

$R_4=500$ Ом

$C_1=10$ нФ

$C_2=10$ нФ

$C_3=500$ нФ



2. Рассчитать физическую структуру интегрального планарного биполярного n-p-n-транзистора.

Рабочие параметры транзистора:

1) Предельное напряжение коллектор-эмиттер $V_{кэ}=+15$ В;

- 2) Предельный ток коллектора $I_k = 5 \text{ мА}$;
- 3) Предельная частота генерации $f_{\text{ген}} \geq 10 \text{ МГц}$;
- 4) Последовательное сопротивление коллектора $r_k' \leq 1 \text{ КОм}$;
- 5) Последовательное сопротивление базы $r_b' \leq 200 \text{ Ом}$;
- 6) Статический коэффициент усиления тока базы в схеме ОЭ $\beta \geq 80$.

Исходная пластина кремния:

$$100 \frac{12 \text{ КЭФ } 1,0}{250 \text{ КДБ } 12} ;$$

подвижность дырок $\mu_p = 450 \text{ см}^2/\text{Вс}$;
 подвижность электронов $\mu_n = 1300 \text{ см}^2/\text{Вс}$;
 время жизни неравновесных носителей $\tau = 10^{-5} \text{ с}$.

Технологические возможности:

- 1) Диффузия бора, фосфора на глубины до 15 мкм;
- 2) Ионная имплантация бора, фосфора с энергиями 40-100 КэВ;
- 3) Термическое окисление кремния с толщинами SiO_2 до 0,5 мкм;
- 4) Фотолитография с минимальным размером $2,5 \pm 0,1 \text{ мкм}$.

3. Рассчитать физическую структуру планарного полевого транзистора на МОП-структуре синдуцированным n-каналом (МОП-структуру считать идеальной)

Рабочие параметры транзистора:

- 1) Предельное напряжение исток-сток $V_{\text{ис}} = +10 \text{ В}$;
- 2) Предельный ток стока $I_c = 5 \text{ мА}$;
- 3) Предельная частота $f \geq 1 \text{ МГц}$;
- 4) Предельное напряжение затвор-сток $V_{\text{зи}} = 15 \text{ В}$;
- 5) Пороговое напряжение $V_{\text{зи}} = +1,5 \text{ В}$;
- 6) Крутизна $S \geq 5 \text{ мА/В}$ при $V_{\text{зи}} = +5 \text{ В}$;

Исходная пластина кремния:

$$100 \frac{3 \text{ КДБ } 5,0}{250 \text{ КЭФ } 20}$$

подвижность дырок $\mu_p = 450 \text{ см}^2/\text{Вс}$;
 подвижность электронов $\mu_n = 1300 \text{ см}^2/\text{Вс}$;
 время жизни неравновесных носителей $\tau = 10^{-5} \text{ с}$.

Технологические возможности:

- 1) Диффузия бора, фосфора на глубины до 15 мкм;
- 2) Ионная имплантация бора, фосфора с энергиями 40-100 КэВ;
- 3) Термическое окисление кремния с толщинами SiO₂ до 0,5 мкм;
- 4) Фотолитография с минимальным размером 2,5 ± 0,1 мкм.

6.5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания.

1. Ефремова Н.Ф. Подходы к оцениванию компетенций в высшем образовании. Учеб. пособие. М.: Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов. 2010. 216 с.
2. Положение о фонде оценочных средств, утверждённое приказом ректора ННГУ от 10.06.2015 г. № 247-ОД.
3. Положение о проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся в Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского [Электронный ресурс]: <http://www.qa.unn.ru/files/quality/procedure/polozhenie-21-05-08.pdf>.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины «Ионно-лучевые методы формирования микро- и наноструктур»

а) основная литература:

1. Торгонский Л.А. Проектирование интегральных микросхем и микропроцессоров: Учебное пособие. В 3-х разделах. — Томск: ТУСУР. 2011. (http://kibevs.tusur.ru/sites/default/files/upload/manuals/torgonskiy_pims/uchebnoeposobie_r1_1.pdf)
2. Шелохвостов, В.П. Проектирование интегральных микросхем: учеб. пособие / В.П. Шелохвостов, В.Н. Чернышов. – 2-е изд., стер. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. (http://www.tstu.ru/book/elib/pdf/2008/cheloh_t.pdf)
3. Кротова, Елена Ивановна. Основы конструирования и технологии производства РЭС: учебное пособие / Е.И. Кротова; Яросл. гос. ун-т им. П.Г. Демидова. – Ярославль: ЯрГУ, 2013. (<http://www.lib.uniyar.ac.ru/edocs/iuni/20130708.pdf>)

б) дополнительная литература:

1. Н.А. Аваев, Ю.Е. Наумов, В.Т. Фролкин. Основы микроэлектроники. – М.: Радио и связь, 1991.
2. И.Е. Ефимов, И.Я. Козырь, Ю.И. Горбунов. Микроэлектроника. – М.: Лань, 2008.
3. В.А. Гуртов. Твердотельная электроника. – М.: Техносфера, 2005 (интернет-версия: <http://dssp.petrstu.ru/book/main.shtml/>)
4. В.В. Пасынков, Л.К. Чиркин, А.Д. Шинков. Полупроводниковые приборы. – М.: ВШ, 1987; М.: изд. «Лань», 2001; М.: ВШ, 2003.
5. И.М. Викулин, В.И. Стафеев. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Сов. Радио, 1980, 1990.
6. В.И. Гаман. Физика полупроводниковых приборов. – Томск: изд. НТЛ, 2000.
7. С.Зи. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Мир, 1984, т.1, 2.

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы

1. Научная электронная библиотека (электронная библиотека периодических изданий - доступ через компьютеры, подключенные к сети ННГУ): <https://elibrary.ru/defaultx.asp>.
2. Электронная база данных по свойствам полупроводниковых материалов: <http://www.matprop.ru>.
3. Электронная база данных по физическим, химическим и структурным свойствам веществ и соединений (доступ через компьютеры, подключенные к сети ННГУ): <http://www.springermaterials.com>.

Учебно-методическое обеспечение дисциплины «Конструирования микро- и наносистем» обусловлено наличием необходимого количества учебников в библиотеке и на сайте ННГУ в электронном виде.

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Помещения представляют собой учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных программой, оснащенные оборудованием и техническими средствами обучения: специализированной мебелью, меловыми или магнитно-маркерными досками, ноутбуком и проектором для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

Программа составлена в соответствии с требованиями установленного ННГУ образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 28.03.01 "Нанотехнологии и микросистемная техника".

Автор:

к.ф.-м. н., доцент кафедры физики полупроводников,
электроники и наноэлектроники

В.В.Карзанов

Рецензент:

заведующий кафедрой
теоретической физики, д.ф.-м.н.

В.А. Бурдов

Заведующий кафедрой
физики полупроводников, электроники
и наноэлектроники д.ф.-м.н. профессор

Д. А. Павлов

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии физического факультета ННГУ, протокол б/н от «20» мая 2023 г.

Председатель Учебно-методической комиссии
физического факультета ННГУ

А.А. Перов