Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Радиофизический факультет

УТВЕРЖДЕНО:

Декан

А. Г. Коротаев

Рабочая программа дисциплины

Оптическая микро- и наноэлектроника

по направлению подготовки

12.04.03 Фотоника и оптоинформатика

Направленность (профиль) подготовки:

Приборы и устройства нанофотоники

Форма обучения

Очная

Квалификация

Магистр

Год приема

2025

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ОП

А.П. Коханенко

Председатель УМК

А.П. Коханенко

Томск – 2025

1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

ОПК-1 Способен представлять современную научную картину мира, выявлять естественнонаучную сущность проблемы, формулировать задачи, определять пути их решения и оценивать эффективность выбора и методов правовой защиты результатов интеллектуальной деятельности с учетом специфики исследований и разработки приборов и систем, технологий производства оптических сред, материалов и устройств фотоники и оптоинформатики.

ПК-2 Способность к построению математических моделей объектов исследования и выбору численного метода их моделирования, разработке нового или выбору готового алгоритма решения задачи.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИОПК 1.1 Представляет современную научную картину мира, выявляет естественнонаучную сущность проблемы

ИПК 2.2 Определяет выходные параметры и функции разрабатываемой оптической системы связи, которые должны быть определены в результате моделирования его функционирования на основе физических процессов и явлений

1. Цели освоения дисциплины

Целью освоения дисциплины **Оптическая микро- и наноэлектроника** является обучение студентов новым принципам обработки и хранения информации, преобразования и приема излучения при помощи приборов микро- и наноэлектроники.

2. Место дисциплины в структуре магистерской программы

Данная дисциплина относится к курсам по выбору Блока 1 «Дисциплины (модули) профессионального цикла магистерской программы **Приборы и устройства нанофотоники**.

Для освоения дисциплины студент должен обладать:

- способностью использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования;
- способностью владеть методикой разработки математических и физических моделей исследуемых процессов, явлений и объектов в области микро и наноэлектроники;
- способностью оценивать научную значимость и перспективы прикладного использования результатов исследования;
- способностью проектировать микроэлементы и микроустройства, основанные на различных физических принципах действия;
- способностью разрабатывать элементы и устройства фотоники и оптоинформатики на основе существующей элементной базы микро и наноэлектроники.

От студента требуются знания физики твердого тела и процессов взаимодействия излучения с веществом, приобретенные в процессе бакалаврской подготовки.

Освоение данной дисциплины необходимо для освоения дисциплин «Волоконно-оптические линии связи» и «Основы тепловидения» данной магистерской программы, а также для проведения научно-исследовательской работы.

3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины

Способность к абстрактному мышлению, обобщению, анализу, систематизации и прогнозированию (ОК-1);

способность действовать в нестандартных ситуациях, нести ответственность за принятые решения (ОК-2);

способность к саморазвитию, самореализации, использованию творческого потенциала (ОК-3);

способность формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать и создавать критерии оценки (ОПК-1);

способность применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы (ОПК-2);

способность использовать иностранный язык в профессиональной сфере (ОПК-3);

готовность обосновать актуальность целей и задач проводимых научных исследований (ПК-1);

способность владеть методикой разработки математических и физических моделей исследуемых процессов, явлений и объектов, относящихся к профессиональной сфере (ПК-2);

способность оценивать научную значимость и перспективы прикладного использования результатов исследования (ПК-3);

способность владеть навыками компьютерного моделирования информационных сигналов и систем, синтеза кодов, количественного анализа характеристик информационных систем (ПК-4);

способность владеть приемами практического решения задач выбора и оценки эффективности различных архитектурных и структурных решений при компьютерном моделировании (ПК-5);

способность применять современные методики исследования основных физико-химических свойств оптических стекол и кристаллов, методики прогнозирования оптических и физико-химических параметров новых материалов (ПК-7);

способность разрабатывать фотонное устройство на основе элементной базы, выбирать необходимое оборудование и способ контроля параметров устройства (ПК-8);

способность владеть процедурами защиты интеллектуальной собственности (ПК-10);

способность готовить и согласовывать технические задания на проектные разработки (ПК-12);

способность участвовать в монтаже, наладке, испытаниях и сдаче в эксплуатацию опытных образцов (ПК-17);

способность оценивать инновационно-технологические риски при внедрении новых технологий (ПК-21);

готовность обосновать актуальность целей и задач проводимых научных исследований в области разработки, производства и эксплуатации приборов квантовой электроники и фотоники на основе наноструктурированных материалов, а также контроля их параметров (ПСК-1);

способность владеть методикой разработки математических и физических моделей исследуемых процессов, явлений и объектов в области разработки, производства и эксплуатации приборов квантовой электроники и фотоники на основе наноструктурированных материалов, а также контроля их параметров (ПСК-2);

способность оценивать научную значимость и перспективы прикладного использования результатов исследования в области разработки, производства и эксплуатации приборов квантовой электроники и фотоники на основе наноструктурированных материалов, а также контроля их параметров (ПСК-3);

способность применять современные методики исследования и прогнозирования оптических и физико-химических свойств наноструктурированных материалов (ПСК-4);

способность разрабатывать фотонное устройство, использующее элементную базу на основе наноструктурированных материалов, выбирать необходимое оборудование и способ контроля параметров устройства (ПСК-5);

способность участвовать в монтаже, наладке, испытаниях и сдаче в эксплуатацию опытных образцов, использующих элементную базу на основе наноструктурированных материалов (ПСК-7).

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- **Знать:**
современное состояние динамично развивающегося раздела функциональной оптоэлектроники - оптических приборов микро- и наноэлектроники;
физические основы работы МДП-структур, дискретных МДП-приборов и ПЗС-устройств различного назначения.
- **Уметь:**
пользоваться полученными знаниями для постановки и интерпретации результатов экспериментов в области нанофотоники.
- **Владеть:**
навыками решения физические и инженерные задачи по созданию приборов приема и обработки оптических сигналов и проектированию оптических систем различного назначения;
методиками расчета идеальных ВФХ МДП-структур.

4. Структура и содержание дисциплины

1. Основы физики МДП-структур. Идеальная МДП-структура. Энергетическая диаграмма идеальной МДП-структуры при различных напряжениях. Режимы обогащения, обеднения, инверсии, сильной инверсии. Зависимости напряженности поля, поверхностного заряда, дифференциальной емкости от поверхностного потенциала. Емкость плоских зон. Область пространственного заряда. Пороговое напряжение. Распределения потенциала, заряда, напряженности поля в МДП-структуре. Вольт-фарадная характеристика идеальной МДП-структуры (низкочастотная, высокочастотная, импульсная). Поверхностные состояния, разность работ выхода из металла и полупроводника, заряд и проводимость диэлектрика. Реальные МДП-структуры, особенности ВФХ реальных МДП-структур. Неравновесное обеднение МДП-структур. Рекомбинация и генерация носителей заряда в неравновесной МДП-структуре, диффузионные процессы. Время хранения. МДП-структура со ступенчатым, произвольным профилем распределения примеси.

2. Методики исследования и технология создания МПП-структур. Технология изготовления МДП-структур. Типичные параметры Si-SiO₂-структур. Методы улучшения свойств Si-SiO₂-структур. Свойства МДП-структур из германия, арсенида галлия, узкозонных полупроводников. Методики исследований свойств МДП-структур (электрофизические, фотоэлектрические, структурные, локальные). Метод эквивалентных схем. ЭС идеальной МДП-структуры, реальных МДП-структур (учет поверхностных состояний, проводимости диэлектрика и т.п.).

3. Фотоэлектрические свойства МДП-структур. Механизмы образования фотоэдс в МДП-структурах (барьерная, диффузионная, фотомагнитная, диффузионная). Зависимости фотоэдс от напряжения смещения, частоты, температуры, интенсивности светового потока. Шумы в МДП-структурах. Регистрация излучения равновесным фотоприемником (выражение для пороговой мощности, зависимости от напряжения, частоты). Регистрация излучения квазиравновесным, неравновесным МДП-фотоприемником, по сквозному току. Сравнение различных способов фотоприема.

4. Дискретные фоточувствительные МДП-приборы. МДП-фотодиоды и фотоэлементы. МДП-фотодиоды и фотоэлементы с туннельно-тонким диэлектриком. Эффект внутреннего усиления в МДП-фотодиодах (усиление фототока в туннельных МДП-фотодиодах на основных носителях, лавинные МДП-фотодиоды). МДП-фотодиоды с индуцированным инверсионным каналом, с резистивным затвором, координатно-чувствительные МДП-фотопреобразователи. МДП-фототранзисторы. Фоторезисторные характеристики структур ДП и МДП. Параметры фоторезисторов. МДП-фотоварикапы. Поверхностная фотоемкость в низкочастотном, высокочастотном режиме. МДП-элементы фотопамяти. Особенности фотоэлектрических свойств МНОП-структур. Оптическая запись информации в МНОП-структуре. МДП-элементы фотопамяти с

сегенетоэлектрическими слоями, элементы оптической памяти на основе МДПДМ-структур.

5. Основные принципы работы и технология создания ПЗС. Устройство и принципы работы ПЗС. Динамика переноса заряда. Разновидности ПЗС. ПЗС с поверхностным каналом. Объемные ПЗС. Приборы с зарядовой инжекцией. Методы ввода и детектирования сигнала. Технология изготовления ПЗС с алюминиевыми затворами. Современная технология изготовления ПЗС. Последовательность технологических операций. Технология ПЗС с поликремневыми электродами.

6. Использование ПЗС в системах обработки и хранения информации. Применение ПЗС в устройствах обработки сигналов. Линии задержки (входные устройства, линейность, шумы). Трансверсальные фильтры на ПЗС (согласованные, полосовые фильтры, применения). Мультиплексоры, рекурсивные фильтры, корреляторы. Цифровая логика на ПЗС. Устройства на ПЗС и на ПАВ. Электрооптические системы с ПЗС (считывающие устройства, фильтрация сигналов, преобразование формата, управление фоном). Применение ПЗС в звуковой локации, телефонии, радиолокации. Применение ПЗС в запоминающих устройствах. Работа ПЗС в цифровом режиме (основные элементы ПЗС ЗУ, методы ввода и вывода заряда для ПЗС-регистра, регенераторы сигнала). Организация ПЗС ЗУ (ЗУ с синхронным тактированием, ЗУ с последовательно-параллельно-последовательной организацией). Принципы конструирования и рабочие параметры ПЗС ЗУ. Эволюция ПЗС ЗУ. Сравнение характеристик ПЗС ЗУ и МОП ЗУ с произвольной выборкой.

7. ПЗС-фотоприемники. Воздействие освещения на элемент ПЗС. Линейные приемники изображения. Организация линейных формирователей видеосигнала (ФВС). Примеры линейных ФВС. Матричные приемники изображения. Организация и примеры матричных ФВС. Приборы с зарядовой инжекцией (методы считывания, рабочие характеристики, особые свойства). Ограничения на предельные параметры ПЗИ приемников. Режим временной задержки и накопления сигнала. Потери при переносе заряда. Частотно-контрастные и спектральные характеристики ФВС. Темновой ток, дефекты изображения и ложные изображения ФВС. Прием изображения при низких уровнях освещенности (охлаждаемые приемники, приемники с предварительным электронным усилением изображения). Приемники ИК-диапазона. Монолитные приемники ИК-диапазона (примесные, с собственной проводимостью). Гибридные ИК-фотоприемники на ПЗС. Кремниевые ИК-приемники на барьерах Шоттки. Применение ПЗС в аппаратуре массового выпуска: цифровых фотоаппаратах и видеокамерах, сканерах. Перспективы применения ПЗС. Ожидаемые параметры приборов на основе ПЗС. Методы оптимизации параметров ПЗС. Перспективные технологии изготовления ПЗС. Последние достижения в области ПЗС.

8. Матрицы фокальной плоскости. Архитектура матриц фокальной плоскости. Монолитные матрицы фокальной плоскости. Прибора с зарядовой связью. Прибора с зарядовой инжекцией. Матрицы зарядового изображения. ПЗС с межстрочным переносом, приборы с вытягиванием заряда. МФП с МОП-транзисторами. Гибридные матрицы фокальной плоскости. Прямая инжекция. Буферизованная прямая инжекция. Модуляция изолятора. Применения и направления технологии.

9. Инфракрасные приемники на структурах с квантовыми ямами и квантовыми точками. Сравнительная характеристика инфракрасных фоториетников на квантовых ямах и квантовых точках. Фотодетекторы на квантовых ямах. Конструкции фотодетекторов. Фототранзистор с горячими электронами. Многоцветные детекторы на квантовых ямах. Фотодетекторы на структурах с квантовыми точками. Свойства гетероструктур и квантовых точек $Si_{1-x}Ge_x-Si$. Фотоприемники с квантовыми точками $Ge-Si$.

10. Фотоприемные устройства. Матрицы фотоприемников. Понятие о фотоприемных устройствах. Параметры фотоприемных устройств. Количество

чувствительных элементов фотоприемного устройства. Фоточувствительные КМОП-матрицы. Фотоприемные устройства инфракрасного диапазона. Многоцветные инфракрасные матрицы на основе гетероструктур HgCdTe.

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 зачетных единицы 144 часа

№ п/п	Раздел дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)				Формы текущего контроля успеваемости (по неделям семестра) Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
				лекции	Лаб. работы	семинары	Самост. работа	
1	Основы физики МДП-структур	2	1	1	-	2	8	Устный опрос
2	Методики исследования и технология создания МПП-структур	2	1-2	2	-	2	8	Устный опрос
3	Фотоэлектрические свойства МДП-структур	2	2-4	1	-	2	8	Устный опрос
4	Дискретные фоточувствительные МДП-приборы	2	4-6	1	-	2	8	Устный опрос
5	Основные принципы работы и технология создания ПЗС	2	6-8	1	-	2	8	Устный опрос
6	Использование ПЗС в системах обработки и хранения информации	2	8-10	2	-	2	8	Устный опрос
7	ПЗС-фотоприемники	2	10-12	1	-	2	8	Устный опрос
8	Матрицы фокальной плоскости	2	12-14	1	-	4	8	Устный опрос
9	Инфракрасные приемники на структурах с квантовыми ямами и квантовыми точками	2	14-16	1	-	4	4	Устный опрос
10	Фотоприемные устройства. Матрицы фотоприемников.	2	16-18	1		2	4	Устный опрос
	Итоговый контроль по						36	Экзамен

	дисциплине						
ИТОГО		12	-	24	108		

5. Образовательные технологии

При реализации дисциплины используются проблемные лекции, лекции-дискуссии, занятия с применением затрудняющих условий. При проведении семинаров предусматривается участие ведущих специалистов НОЦ «Функциональные материалы радио- и оптоэлектроники».

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

Видами самостоятельной работы обучающегося по данной дисциплине являются:

- подготовка ответов на контрольные вопросы;
- подготовка докладов на семинарах.

Темы семинаров

1. Методики расчета идеальных и реальных вольт-фарадных характеристик.
2. Электронные эквивалентные схемы МДП-структур в различных режимах работы.
3. Механизмы формирования фото-эдс в МДП-структурах.
4. МДП-структура как фоточувствительный элемент фотоприемника.
5. Сравнение характеристик приборов с зарядовой связью и с зарядовой инжекцией.
6. Применение приборов с зарядовой связью в устройствах обработки информации.
7. Характеристики монолитных матриц фокальной плоскости: ПЗС, ПЗИ, матрицы с прямой инжекцией, матрицы зарядового изображения.
8. Применение квантово-размерных структур в приборах нанофотоники и наноэлектроники: нанолазеры, нанофотоприемники, нанотранзисторы, оптические модуляторы.
9. Механизмы поглощения излучения при межзонных и межподзонных оптических переходах в низкоразмерных структурах.
10. Инфракрасные фотодетекторы на квантовых ямах, сверхрешетках и на квантовых точках.
11. Многоцветные фотоприемники на квантовых ямах.
12. Матричные фотоприемники на квантово-размерных структурах.

Перечень контрольных вопросов для самостоятельной работы

1. Идеальная МДП-структура. Энергетическая диаграмма идеальной МДП-структуры при различных напряжениях.
2. Режимы обогащения, обеднения, инверсии, сильной инверсии. Зависимости напряженности поля, поверхностного заряда, дифференциальной емкости от поверхностного потенциала.
3. Распределения потенциала, заряда, напряженности поля в МДП-структуре.
4. Вольт-фарадная характеристика идеальной МДП-структуры (низкочастотная, высокочастотная, импульсная).
5. Реальные МДП-структуры, особенности ВФХ реальных МДП-структур.
6. Неравновесное обеднение МДП-структур. Рекомбинация и генерация носителей заряда в неравновесной МДП-структуре.
7. Время хранения. МДП-структура со ступенчатым, произвольным профилем распределения примеси.
8. Технология изготовления МДП-структур.
9. Типичные параметры Si-SiO₂-структур. Методы улучшения свойств Si-SiO₂-структур.

10. Свойства МДП-структур из германия, арсенида галлия, узкозонных полупроводников.
11. Методики исследований свойств МДП-структур (электрофизические, фотоэлектрические, структурные, локальные).
12. Метод эквивалентных схем. ЭС идеальной МДП-структуры, реальных МДП-структур (учет поверхностных состояний, проводимости диэлектрика и т.п.).
13. Механизмы образования фото-ЭДС в МДП-структурах (барьерная, диффузионная, фотомагнитная, диффузионная).
14. Зависимости фото-ЭДС в МДП-структурах от напряжения смещения, частоты, температуры, интенсивности светового потока.
15. Регистрация излучения равновесным фотоприемником (выражение для пороговой мощности, зависимости от напряжения, частоты).
16. Регистрация излучения квазиравновесным, неравновесным МДП-фотоприемником, по сквозному току.
17. МДП-фотодиоды и фотоэлементы с туннельно-тонким диэлектриком.
18. Эффект внутреннего усиления в МДП-фотодиодах (усиление фототока в туннельных МДП-фотодиодах на основных носителях, лавинные МДП-фотодиоды).
19. Координатно-чувствительные МДП-фотопреобразователи.
20. МДП-фототранзисторы.
21. Фоторезисторные характеристики структур ДП и МДП. Параметры фоторезисторов.
22. МДП-фотоварикапы. Поверхностная фотоёмкость в низкочастотном, высокочастотном режиме
23. МДП-элементы фотопамати. Особенности фотоэлектрических свойств МНОП-структур. Оптическая запись информации в МНОП-структуре.
24. Устройство и принципы работы ПЗС. Динамика переноса заряда.
25. Разновидности ПЗС. ПЗС с поверхностным каналом. Объемные ПЗС.
26. Технология ПЗС с поликремневыми электродами.
27. Линии задержки на ПЗС.
28. Трансверсальные фильтры на ПЗС (согласованные, полосовые фильтры, применения). Мультиплексоры, рекурсивные фильтры, корреляторы.
29. Применение ПЗС в запоминающих устройствах. Работа ПЗС в цифровом режиме (основные элементы ПЗС ЗУ, методы ввода и вывода заряда для ПЗС-регистра, регенераторы сигнала).
30. Организация ПЗС ЗУ (ЗУ с синхронным тактированием, ЗУ с последовательно-параллельно-последовательной организацией). Принципы конструирования и рабочие параметры ПЗС ЗУ.
31. Линейные приемники изображения на основе ПЗС. Организация линейных формирователей видеосигнала (ФВС). Примеры линейных ФВС.
32. Матричные приемники изображения. Организация и примеры матричных ФВС.
33. Приборы с зарядовой инъекцией (методы считывания, рабочие характеристики, особые свойства). Ограничения на предельные параметры ПЗИ приемников.
34. Прием изображения при низких уровнях освещенности (охлаждаемые приемники, приемники с предварительным электронным усилением изображения).
35. Монолитные ИК-фотоприемники на ПЗС (примесные, с собственной проводимостью).
36. Гибридные ИК-фотоприемники на ПЗС. Кремниевые ИК-приемники на барьерах Шоттки.
37. Принципы размерного квантования.
38. Типы квантово-размерных структур.
39. Энергетический спектр частиц в системах пониженной размерности: квантовые ямы.
40. Энергетический спектр частиц в системах пониженной размерности: квантовые нити.
41. Энергетический спектр частиц в системах пониженной размерности: квантовые точки.
42. Энергетический спектр частиц в системах пониженной размерности: сверхрешетки.

43. Статистика носителей заряда в низкоразмерных структурах: с двумерным электронным газом.
44. Статистика носителей заряда в низкоразмерных структурах: с одномерным электронным газом.
45. Статистика носителей заряда в низкоразмерных структурах: с нульмерным электронным газом.
46. Особенности фононного спектра в низкоразмерных структурах.
47. Туннелирование через квантово-размерные структуры.
48. Квантовый эффект Холла.
49. Принцип действия нанотранзистора.
50. Оптические свойства квантово-размерных структур.
51. Механизмы рекомбинации в гетероструктурах и квантовых ямах.
52. Фотоэлектрические явления в квантовых ямах.
53. Поглощение света при межподзонных переходах.
54. Лазеры с квантовыми ямами и квантовыми точками.
55. Оптические модуляторы на квантово-размерных структурах.
56. Инфракрасные фотодетекторы на квантовых ямах, сверхрешетках и на квантовых точках.
57. Многоцветные фотоприемники на квантовых ямах.
58. Матричные фотоприемники на квантово-размерных структурах.
59. Принципы организации оптической связи в фотоприемниках на квантово-размерных структурах.

Перечень контрольных вопросов для экзамена

1. Вольт-фарадные характеристики МДП-структур
2. Режим неравновесного обеднения в МДП-структурах
3. Отличия реальных МДП-структур от идеальных МДП-структур
4. Энергетические диаграммы реальных и идеальных МДП-структур
5. Механизмы образования фотоэдс в МДП-структурах
6. Метод эквивалентных схем
7. Методы исследования свойств реальных МДП-структур
8. Энергетические диаграммы реальных и идеальных МДП-структур
9. Фотоэлектрические характеристики реальных и идеальных МДП-структур
10. Время хранения в МДП-структурах
11. Элементы фотопамати на основе МДП-структур
12. МДП-варикапы и МДП-фотоварикапы
13. МДП-фотодиоды и МДП-фотоэлементы
14. Технология дискретных МДП-структур
15. МДП-фоторезисторы
16. Координатно-чувствительные МДП-фотоприемники
17. МДП-варикапы и МДП-фотоварикапы
18. Элементы фотопамати на основе МДП-структур
19. Методы внутреннего усиления в МДП-структурах
20. МДП-фотодиоды с индуцированным инверсионным каналом
21. ПЗС-фотоприемники видимого диапазона
22. Устройство и принцип действия ПЗС
23. ПЗС-фотоприемники инфракрасного диапазона
24. Применение ПЗС для обработки информации
25. Технология ПЗС
26. Приборы с зарядовой инжекцией
27. ПЗС-фотоприемники инфракрасного диапазона

28. Устройство и принцип действия ПЗС
29. ПЗС фотоприемные устройства, действующие в режиме временной задержки и накопления
30. ПЗС-фотоприемники видимого диапазона
31. Архитектура матриц фокальной плоскости
32. Сравнение инфракрасных фоториетмников на квантовых ямах и квантовых точках
33. Фототранзистор с горячими электронами
34. Многоцветные детекторы на квантовых ямах
35. Фоточувствительные КМОП- матрицы
36. Многоцветные инфракрасные матрицы на основе гетероструктур HgCdTe

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература

1. Войцеховский А. В., Ижнин И. И., Савчин В. П., Вакив Н. М. Физические основы полупроводниковой фотоэлектроники. – Томск: Издательский Дом ТГУ, 2013. - 560 с.
2. Игнатов А. Н. Оптоэлектроника и нанофотоника. - СПб: Лань, 2011. - 538 с.
3. Старосельский В.И. Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники. – Москва: Юрайт, 2014. – 463 с.
4. Основы физики полупроводников. Нанофизика и технические приложения / М. Грундман; пер. с англ. под ред. В. А. Гергеля. - Москва: Физматлит, 2012. - 771 с.
5. Ткаченко Ф.А. Электронные приборы и устройства. - Минск: Новое знание, 2011. – 682 с.

б) дополнительная литература

1. Мартинес-Дуарт Дж.М., Мартин-Палма Р.Дж., Агулло-Руеда Ф. «Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники», М.Техносфера,2007, 368с.
2. Щука А. А. «Наноэлектроника», М.Изд-во:МФТИ, 2008, 464с.
3. Гаман В.И. «Физика полупроводниковых приборов», Томск: Изд-во НТЛ, 2000, 426 с.
4. Борисенко В.Е., Воробьева А.И. «Наноэлектроника», М, Бином, 2009, 223с.
5. Войцеховский А.В., Давыдов В.Н. «Фотоэлектрические МДП-структуры из узкозонных полупроводников», Томск, Радио и связь, 1990, 327 с.
6. Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридчин В.А. «Основы наноэлектроники». Учебное пособие. Новосибирск: Логос, 2006, 494 с
7. Зи С. «Физика полупроводниковых приборов», М.: Энергия, 1973, 656 с
8. Носов Ю.Р., Шилин В.А. «Основы физики приборов с зарядовой связью», М.: Наука, 1986, 320 с. Приборы с зарядовой связью, под ред. М.Хоувза, Д.Моргана,М.: Энергоатомиздат, 1981, 376 с. Приборы с зарядовой связью, под ред. Д.Ф. Барба, М.: Мир, 1982, 240 с.
9. Секен К., Томпсет М. «Приборы с зарядовой связью», М.: Мир, 1978,320с..
10. Пресс Ф.Л. «Формирователи видеосигнала на приборах с зарядовой связью», М.: «Радио и связь», 1981, 136 с.
11. Рогальский А. «ИК детекторы». Пер. с англ. под редакцией Войцеховского А.В. Новосибирск: Наука, 2003, 636 с.
12. Воробьев Л.Е., Ивченко Е.Л., Фирсов Д.А., Шалыгин В.А. «Оптические свойства наноструктур». Учебное пособие. Санкт-Петербург: Наука, 2001, 188 с.
13. Воробьев Л.Е., Данилов С.Н., Зегря Г.Г., Фирсов Д.А., Шалыгин В.А., Яссиевич И.Н., Берегулин Е.В. «Фотоэлектрические явления в полупроводниках и размерно-квантовых структурах». Учебное пособие. Санкт-Петербург: Наука, 2001, 248 с.
14. Шик А.Я, Бакуева Л.Г., Мусихин СФ., Рыков СА. «Физика низкоразмерных систем». Учебное пособие. Санкт-Петербург: Наука, 2001, 160 с.

15. Зуев В.А., Саченко А.В. «Неравновесные приповерхностные процессы в полупроводниках и полупроводниковых приборах», М.: Советское радио, 1977, 256 с.
16. Ржанов А.В. «Свойства структур металл-диэлектрик-полупроводник», М.: Наука, 1976, 280 с.
17. Овсяк В.Н. «Электронные процессы в полупроводниках с областями пространственного заряда», Новосибирск, Наука, 1984, 253 с.
18. Кузнецов Ю.А., Шилин В.А. «Микросхемотехника БИС на приборах с зарядовой связью», М.: «Радио и связь», 1988, 160 с.
19. Мартынов В.Н., Кольцов Г.Н. «Полупроводниковая оптоэлектроника», М.: «Мисис», 1999, 400 с.

в) Интернет-ресурсы

1. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU: <http://elibrary.ru/>
2. Электронная библиотека ТГУ: <http://www.lib.tsu.ru/ru>
3. Электронный ресурс SPIE Digital Library: <http://www.spiedigitallibrary.org>
4. Электронный ресурс ScienceDirect: <http://www.sciencedirect.com/>
5. Электронный ресурс SpringerLink: <http://link.springer.com/>
6. Электронный ресурс Elsevier: <http://www.elsevier.com/>