

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

УТВЕРЖДЕНО

решением президиума Ученого совета ННГУ

протокол № 1 от 16.01.2024 г.

Рабочая программа дисциплины

Радиационная стойкость изделий электроники и нанoeлектроники

Уровень высшего образования

Магистратура

Направление подготовки / специальность

11.04.04 - Электроника и нанoeлектроника

Направленность образовательной программы

Твердотельная электроника и нанoeлектроника

Форма обучения

очная

г. Нижний Новгород

2024 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.ДВ.01.01 Радиационная стойкость изделий электроники и наноэлектроники относится к части, формируемой участниками образовательных отношений образовательной программы.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

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	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
ПК-3: Способность применять фундаментальные представления о физических явлениях для достижения требуемых функциональных качеств приборов, схем и устройств электроники и наноэлектроники	ПК-3.1: Знает фундаментальные основы физических явлений и процессов, лежащих в основе работы приборов и устройств электроники и наноэлектроники ПК-3.2: Умеет проводить экспериментальные работы по отработке и внедрению новых технологических процессов производства изделий электроники и наноэлектроники ПК-3.3: Имеет опыт разработки методик экспериментальной проверки технологических процессов и исследования параметров наноструктурированных материалов	ПК-3.1: Знание фундаментальных основ физических явлений и процессов, лежащих в основе работы приборов и устройств электроники и наноэлектроники ПК-3.2: Умение проводить экспериментальные работы по отработке и внедрению новых технологических процессов производства изделий электроники и наноэлектроники ПК-3.3: Опыт разработки методик экспериментальной проверки функциональных качеств приборов, схем и устройств электроники и наноэлектроники	Задачи	Зачёт: Контрольные вопросы

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость, з.е.	2
Часов по учебному плану	72

в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	16
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	16
- КСР	1
самостоятельная работа	39
Промежуточная аттестация	0 Зачёт

3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе			
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них			Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа (практические занятия/лабораторные работы), часы	Всего	
	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0
Введение	3	2	0	2	1
Внешние воздействующие факторы	12	2	4	6	6
Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом	16	4	4	8	8
Электронная аппаратура космического применения и военного назначения	24	4	4	8	16
Методы испытаний на стойкость к воздействию радиационных факторов и импульсную электрическую прочность	16	4	4	8	8
Аттестация	0				
КСР	1			1	
Итого	72	16	16	33	39

Содержание разделов и тем дисциплины

1. Введение. Применимость радиационно-стойких изделий микроэлектроники, основные понятия и термины.
2. Внешние воздействующие факторы
 - 2.1. Классификация ВВФ
 - 2.2. Условия эксплуатации изделий электронной техники
 - 2.3. Предъявление требований к изделиям электронной техники в части воздействия ВВФ
3. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом.
 - 3.1. Виды ионизирующего излучения
 - 3.2. Ионизационные потери ядерных частиц
 - 3.3. Дефектообразование
 - 3.4. Ядерные реакции

- 4. Электронная аппаратура космического применения и военного назначения.
 - 4.1. Внешние воздействующие факторы космического пространства и ядерного взрыва
 - 4.2. Радиационные условия космического пространства и ядерного взрыва (ЯВ)
 - 4.3. Основные радиационные эффекты в ЭКБ при воздействии факторов КП и ЯВ
 - 4.3.1 Структурные повреждения
 - 4.3.2 Поверхностные радиационные эффекты
 - 4.3.3. Локальные ионизационные эффекты
 - 4.4. Методы прогнозирования отказов и сбоев ЭКБ при воздействии радиации космического пространства и ядерного взрыва
 - 4.4.1. Структурные повреждения
 - 4.4.2. Поверхностные радиационные эффекты
 - 4.4.3. Локальные радиационные эффекты
- 5. Методы испытаний на стойкость к воздействию радиационных факторов и импульсную электрическую прочность
 - 5.1. Цели и задачи испытаний
 - 5.2. Методы испытаний ЭКБ на стойкость к импульсным РВ по объемным ионизационным (мощности дозы) эффектам
 - 5.2.1. Испытания с использованием лазерных имитаторов
 - 5.2.2. Испытания с использованием источников импульсного тормозного гамма-рентгеновского излучения
 - 5.3. Методы испытаний ЭКБ по ионизационным (дозовым) эффектам
 - 5.3.1. Испытания с использованием рентгеновского имитатора
 - 5.3.2. Испытания с использованием изотопных источников
 - 5.3.3. Испытания с использованием источников импульсного электронного, тормозного рентгеновского, гамма-нейтронного и протонного излучений
 - 5.4. Методы испытаний микросхем на РС по эффектам структурных повреждений
 - 5.4.1. Испытания с использованием изотопного имитационного источника
 - 5.4.2. Испытания с использованием источника импульсного гамма-нейтронного излучения
 - 5.4.3. Испытания с использованием ускорителя протонов
 - 5.5. Методы испытаний микросхем на РС по локальным радиационным эффектам
 - 5.5.1. Испытания с использованием лазерного имитатора
 - 5.5.2. Испытания с использованием изотопного имитатора
 - 5.5.3. Испытания с использованием ускорителей протонов
 - 5.5.4. Испытания с использованием ускорителей ионов
 - 5.6. Испытания микросхем на импульсную электрическую прочность

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся включает в себя подготовку к контрольным вопросам и заданиям для текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведенным в п. 5.

Самостоятельная работа студентов предусматривает выполнение домашних заданий, изучение рекомендованной литературы и подготовку к зачету.

5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)

5.1 Типовые задания, необходимые для оценки результатов обучения при проведении текущего контроля успеваемости с указанием критериев их оценивания:

5.1.1 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ПК-3:

1. Объяснить, почему элементы четвертой группы образуют кристаллы с полупроводниковыми свойствами.
2. Объяснить, почему щелочноземельные элементы в кристаллическом состоянии являются металлами.
3. Определить форму зоны Бриллюэна решетки со структурой алмаза.
4. Какую массу следует взять для электронов при их движении под действием сил инерции или гравитации?
5. Объясните, почему запрещены процессы взаимодействия фононов, описываемые произведениями операторов вторичного квантования, содержащими только операторы рождения фононов или эрмитово сопряженными таким произведениям.
6. Изобразите в схемах расширенных и приведенных зон нормальное рассеяние электронов на фононах и рассеяние с перебросом в металле в пространстве волнового вектора.
7. Объясните, почему у хорошо проводящих электрический ток металлов, таких как медь, серебро, золото, сверхпроводимость не обнаруживается даже при температурах в доли градуса Кельвина. Вместе с тем, у хуже проводящих в нормальном состоянии металлов (ртуть, свинец, ниобий) сверхпроводимость наблюдается до температуры 10К, т.е. они являются "хорошими" сверхпроводниками.

Критерии оценивания (оценочное средство - Задачи)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Студент отвечает полностью на вопросы, показывая удовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. При ответе на дополнительные вопросы допускаются незначительные неточности. Понимание механизмов воздействия ионизирующих излучений на ЭКБ, умение делать простейшие оценки и прогнозы радиационной стойкости.
не зачтено	Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. Отсутствие понимания механизмов воздействия ионизирующих излучений на ЭКБ, неумение делать простейшие оценки и прогнозы радиационной стойкости.

5.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине при промежуточной аттестации

Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения)	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено		зачтено				

ения компет							
<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. Ошибок нет.	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 отдельными и несущественными недочетами, 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 базовых навыков. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов	Продemonстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов	Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

Шкала оценивания при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне выше предусмотренного программой
	отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».

	удовлетворительно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
	плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

5.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения на промежуточной аттестации с указанием критериев их оценивания:

5.3.1 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-3

1. Дайте определение внешним воздействующим факторам (ВВФ). Каким образом они классифицируются?
2. Раскройте понятия стойкости, прочности и устойчивости изделий к ВВФ. Какими параметрами характеризуется стойкость изделий к ВВФ?
3. Каким образом унифицируются климатические и механические условия эксплуатации?
4. Чем отличаются условия и требования, предъявляемые к изделиям, при эксплуатации и хранении?
5. Какие существуют иерархические уровни нормативных документов, в которых определены требования к изделиям в части воздействия ВВФ?
6. Какие механизмы взаимодействия ионизирующего излучения с веществом характерны для каждого вида ионизирующего излучения?
7. Чем отличаются структурные потери энергии частиц от ионизационных?
8. Как зависят ионизационные потери и пробеги ядерных частиц в кремнии от их массы?
9. Как изменяются линейные потери энергии частицы вдоль трека в веществе?
10. Перечислите типы частиц корпускулярных ионизирующих излучений с зарядом < 3 зарядов электрона.
11. Что такое экстраполированный пробег электрона в веществе?
12. Чем отличается эффект Комптона от фотоэффекта?
13. Расположите следующие типы электромагнитных излучений в порядке возрастания энергии кванта: ультрафиолетовое, микроволновое, инфракрасное.
14. Расположите следующие типы частиц в порядке возрастания массы покоя: α -частица, нейтрон, позитрон, средние ионы.
15. Чем отличается доза, создаваемая ИИ в веществе, от кермы?
16. Перечислите естественные и искусственные радиационные факторы КП?
17. Опишите структуру и состав радиационных поясов Земли. Каким образом основные радиационные факторы для космических аппаратов зависят от типа орбиты?
18. К изменению каких параметров приводит накопление заряда в окисле в МОП и биполярных транзисторах? Нарисуйте зависимость сдвига порогового напряжения от поглощенной дозы для n- и p-канального МОП-транзистора.

19. Какой по знаку заряд несут поверхностные состояния в n-канальных и p-канальных МОП- транзисторах? К изменению каких параметров приводит образование поверхностных состояний в МОП-транзисторах?
20. Перечислите основные радиационные эффекты в элементах ЭРИ при воздействии высокоэнергетических ядерных частиц космического пространства и методы защиты от них. Какие параметры используются для описания отказов от одиночных высокоэнергетических ядерных частиц.
21. Перечислите основные механизмы собирания заряда с трека ядерной частицы, проходящего через закрытый pn-переход.
22. Перечислите основные поражающие факторы ПП и ИС для ЯВ в космосе и ЯВ в атмосфере.
23. Как и почему трансформируется форма импульса нейтронного излучения ЯВ в космосе с увеличением расстояния от эпицентра?
24. В чем разница жесткого и мягкого спектра рентгеновского излучения ЯВ? Как трансформируется спектр рентгеновского излучения ЯВ при прохождении через защитные экраны?
25. Чем обусловлена модуляция проводимости полупроводника при воздействии импульсного ионизирующего излучения? Какова форма ионизационной реакции проводимости при воздействии импульса гамма-излучения с типовой для ЯВ формой? Чем определяется длительность спада импульса ионизационной реакции проводимости?
26. Каков механизм образования ионизационного тока в закрытом p-n переходе? На какие составляющие можно разложить ионизационный ток закрытого p-n перехода при воздействии импульсного ионизирующего излучения? Нарисуйте форму ионизационного тока при воздействии импульса ионизирующего излучения прямоугольной формы. Чем обусловлен быстрый фронт и затянутый спад импульса ионизационного тока?
27. Перечислите обратимые и необратимые ионизационные эффекты в ПП и ИС при воздействии импульсного ионизирующего излучения.
28. За счет чего возникает электромагнитный импульс (ЭМИ) ЯВ? В чем отличие атмосферного ЯВ и ЯВ в вакууме с точки зрения формирования ЭМИ?
29. Как энергия ЭМИ передается полупроводниковым структурам элементной базы электронных устройств? Нужно ли учитывать непосредственное влияние ЭМИ ЯВ на ПП и ИС?
30. Как классифицируются эффекты в ПП и ИС от воздействия одиночного импульса напряжения (ОИН)?
31. Что понимается под испытаниями ЭРИ? Какие существуют основные виды испытаний в зависимости от целей испытаний?
32. Перечислите этапы типовой последовательности при проведении радиационных испытаний?
33. Какие источники испытательного воздействия могут использоваться при радиационных испытаниях? В чем отличие воздействия моделирующих установок и имитаторов? Как обеспечивается адекватность при испытании на имитаторах?
34. Какие существуют преимущества и недостатки использования моделирующих установок при радиационных испытаниях?
35. Перечислите преимущества и недостатки рентгеновских и лазерных (по объемным ионизационным эффектам) имитационных методов радиационных испытаний. Какие существуют физические ограничения применимости этих имитационных методов?

36. Перечислите преимущества и недостатки лазерных (по локальным ионизационным эффектам) имитационных методов радиационных испытаний. Какие существуют физические ограничения применимости этих имитационных методов?

37. Чем характеризуется импульсная электрическая прочность ПП и ИС?

38. Почему измерения импульсной электрической прочности ПП и ИС производятся как минимум при трех длительностях ОИН?

Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Студент отвечает полностью на вопросы зачета, показывая удовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. При ответе на дополнительные вопросы допускаются незначительные неточности. Понимание механизмов воздействия ионизирующих излучений на ЭКБ, умение делать простейшие оценки и прогнозы радиационной стойкости.
не зачтено	Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. Отсутствие понимания механизмов воздействия ионизирующих излучений на ЭКБ, неумение делать простейшие оценки и прогнозы радиационной стойкости.

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

Основная литература:

1. Рикетс Л. У. Электромагнитный импульс и методы защиты / пер. с англ. В. Л. Литвинова, Ю. И. Чуракова ; под ред. Н. А. Ухина. - М. : Атомиздат, 1979. - 327 с. : ил. - 4.20., 2 экз.
2. Агаханян Татевос Мамиконович. Радиационные эффекты в интегральных микросхемах / под ред. Т. М. Агаханяна. - М. : Энергоатомиздат, 1989. - 252, [1] с. : ил. - ISBN 5-283-02963-8 : 3.20., 2 экз.

Дополнительная литература:

1. Мухин Константин Никифорович. Экспериментальная ядерная физика : [в 2 кн.]. Кн. 1. Физика атомного ядра, ч. 2 : Ядерные взаимодействия. - 5-е изд., перераб. и доп. - М. : Энергоатомиздат, 1993. - 316 с. : ил. - 1187.50., 1 экз.
2. Кузнецов Николай Викторович. Радиационная стойкость кремния. - М. : Энергоатомиздат, 1989. - 95 с. : ил. - 1.30., 1 экз.
3. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов : в 2 кн. [Кн.] 1 / пер. с англ. В. А. Гергеля, В. В. Ракитина ; под ред. Р. А. Суриса. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Мир , 1984. - 455 с. : ил. - 2.20., 16 экз.

Программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины):

Интернет-ресурс справочной и математической литературы со свободным доступом
www.eqworld.ipmnet.ru

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения, компьютерами.

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 ОС ННГУ по направлению подготовки/специальности 11.04.04 - Электроника и нанoeлектроника.

Автор(ы): Пузанов Александр Сергеевич, кандидат физико-математических наук.

Заведующий кафедрой: Павлов Дмитрий Алексеевич, доктор физико-математических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 09.01.2024, протокол № б/н.