

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 нанoeлектроники

УТВЕРЖДЕНО
решением ученого совета ННГУ
протокол № 13 от «30» ноября 2022 г.

**Рабочая программа дисциплины
«Радиационная стойкость изделий электроники и нанoeлектроники»**

Уровень высшего образования
Магистратура

Направление подготовки
11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника»

Направленность (профиль)
Твердотельная электроника и нанoeлектроника

Форма обучения
Очная

Нижегород, 2023

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Радиационная стойкость изделий электроники и нанoeлектроники» относится к формируемой участниками образовательных отношений части основной образовательной программы по направлению подготовки 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника», магистерская программа по профилю «Твердотельная электроника и нанoeлектроника», и является дисциплиной по выбору. Для усвоения данного курса необходимо изучить некоторые модули (дисциплины) в рамках образовательной программы бакалавра по направлению 11.03.04 – «Электроника и нанoeлектроника», 28.03.01 – «Нанотехнологии и микросистемная техника», или 03.03.02 - «Физика» предшествующими дисциплинами: атомная и ядерная физика, физика конденсированного состояния, физика полупроводников, квантовая теория твердого тела, физические основы электроники, основы технологии электронной компонентной базы. Данный курс предлагает более высокий уровень подготовки по сравнению с освоенным ранее курсом «Твердотельная электроника», «Микроэлектроника и твердотельная электроника» в рамках образовательной программы бакалавра по направлению 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника».

Целями освоения дисциплины «Радиационная стойкость изделий электроники и нанoeлектроники» являются:

- Изучение основных факторов и характеристик ионизирующего излучения ядерного взрыва, стационарного оборудования и космического пространства.
- Дать основные сведения о проблемах проектирования специальной радиационно-стойкой микроэлектронной компонентной базы для радиоэлектронной аппаратуры, работающей в условиях воздействия импульсных, стационарных ионизирующих излучений, а также факторов космического пространства.
- Формирование знаний и умений в области радиационной физики полупроводников и интегральных микросхем (ИМС).
- Освоение расчётно-экспериментальных методов подтверждения и прогнозирования радиационной стойкости ИМС современных технологий КМОП/КНД.
- Изучение основ взаимодействия ионизирующих излучений различных источников с реальными конструкциями и материалами ИМС.
- Дать представление об основных типах и параметрах моделирующих и имитирующих испытательных установок.

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

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих 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	
ПК-3. Способность применять фундаментальные	ПК-3.1. Знание фундаментальных основ физических явлений и	Знать физические и математические модели	Вопросы по темам/разделам

представления о физических явлениях для достижения требуемых функциональных качеств приборов, схем и устройств электроники и наноэлектроники	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	приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения. Уметь использовать стандартные программные средства их компьютерного моделирования, реализовывать оригинальные модели в виде пакетов прикладных программ. Владеть представлениями о конструктивно-технологических методах, обеспечивающих повышенную стойкость изделий микроэлектроники к воздействию ионизирующих излучений различной природы, навыками применения основных методов математической физики и физики полупроводников к анализу процессов, происходящих при воздействии радиационного излучения на конструктивные материалы полупроводниковых приборов.	дисциплины. Комплект задач и заданий к практическим занятиям
--	---	--	---

3. Структура и содержание дисциплины «Радиационная стойкость изделий электроники и наноэлектроники»

3.1 Трудоемкость дисциплины

Общая трудоемкость	2 ЗЕТ
Часов по учебному плану	72
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	16
- занятия семинарского типа	16
самостоятельная работа	39 (работа в семестре)
Промежуточная аттестация	1 семестр – зачет

3.2. Содержание дисциплины

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля), форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	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	Занятия лабораторного типа	Консультации	Всего	
1. Введение	4	3	-	-	-	3	1
2. Внешние воздействующие факторы	14	7	-	-	-	7	7
3. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом	14	7	-	-	-	7	7
4. Электронная аппаратура космического применения и военного назначения	28	3	-	-	-	13	15
5. Методы испытаний на стойкость к воздействию радиационных факторов и импульсную электрическую прочность	14	6	-	-	-	6	8
Зачет – 1 час							

Содержание разделов 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. Образовательные технологии

Занятия по дисциплине проходят в лекционной форме, практических занятий и в форме самостоятельной работы обучающихся. Самостоятельная работа включает в себя выполнение домашних заданий и теоретическую подготовку к практическим занятиям по материалам лекций и рекомендованной литературе, приведенной в конце данной программы.

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

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

Оценочные средства для контроля текущей успеваемости включают в себя устный опрос на занятиях в процессе решения вышеприведенных задач, активность в обсуждении качественных вопросов.

Для контроля промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины «Радиационная стойкость изделий электроники и нанoeлектроники» используются нижеприведенные вопросы.

Вопросы для контроля

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 высокоэнергетичных ядерных частиц космического пространства и методы защиты от них. Какие параметры используются для описания отказов от одиночных высокоэнергетичных 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?

6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)

6.1. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	Шкала оценивания сформированности компетенций						
	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	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные	Продемонстрированы основные умения. Решены типовые	Продемонстрированы все основные умения. Решены все	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные	Продемонстрированы все основные умения, решены все	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные

	умений вследствие отказа обучающегося от ответа	умения. Имели место грубые ошибки.	задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания но не в полном объеме.	основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами	задачи. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	основные задачи с отдельным и несущественным недочетами, выполнены все задания в полном объеме.	задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Владение</u>	Отсутствие владения материалом. 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	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторым и недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов.	Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов.	Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

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 освоения компетенции	Отличительные признаки
Начальный	<ul style="list-style-type: none"> - владеет терминами и основными понятиями радиационно-стойкой микроэлектроники; - корректно объясняет суть внешних воздействующих факторов КП и ЯВ; - способен сопоставлять характеристики и физику ионизирующих излучений
Базовый	<ul style="list-style-type: none"> - выявляет взаимосвязь между структурой электронной компонентной базы и ее стойкостью к воздействию ионизирующего излучения; - применяет законы, правила, алгоритмы, теоретические модели

	<p>при проектировании радиационно-стойких изделий микроэлектроники;</p> <ul style="list-style-type: none"> - знает фундаментальные основы процессов модификации и функционирования материалов, компонентов и устройств электроники и микроэлектроники при радиационных воздействиях; - знает пути повышения радиационной стойкости, электронной компонентной базы, материалов и компонентов электроники и микроэлектроники; - знает принципы выбора материалов для обеспечения радиационной стойкости изделий микроэлектроники.
Высокий	<ul style="list-style-type: none"> - знает современные технологические методы формирования материалов и электронной компонентной базы для обеспечения радиационной стойкости изделий электроники; - владеет основами схемотехнических и топологических решений при создании ЭКБ, стойкой к факторам ЯВ и КП; - формулирует выводы результатов прогнозирования радиационной стойкости ЭКБ при расчётно-экспериментальных методах испытаний; - оценивает соответствие теории и эксперимента при различных видах воздействия ионизирующего излучения; - оценивает научную и прикладную значимость результатов проведения испытаний изделий микроэлектроники на стойкость к ионизирующему излучению.

Промежуточный контроль качества усвоения студентами содержания дисциплины проводится в виде зачета (1 семестр), на которых определяются:

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

Зачет проводится по активности на практических занятиях и знания теоретических разделов дисциплины, запланированных для изучения в семестре.

Критерии выставления оценки при сдаче зачета:

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.

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

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

- для оценивания результатов обучения в виде **знаний** используются фронтальный опрос на практических занятиях;
- для оценивания результатов обучения в виде **умений** используются простые задания для выполнения на практических занятиях и зачёте, включающих несколько вопросов в виде краткой формулировки действий (комплекса действий) для проведения необходимых технологических операций и измерений, которые следует выполнить, или описание результата, который можно считать достоверным.
- для оценивания результатов обучения в виде **владения** используются комплексные задания практических занятий и зачёта, требующие поэтапного решения в типичной ситуации и развернутого ответа.
- для проведения **итогового контроля** сформированности компетенции используются ответы на зачёте.

6.3. Типовые контрольные задания для оценки сформированности компетенции ПК-3

Для оценки результатов обучения, характеризующих сформированность компетенций, используются билеты, состоящие из 2-х вопросов, составленных на основе контрольных вопросов (п. 5).

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины "Радиационная стойкость изделий электроники и наноэлектроники"

а) основная литература:

1. Яненко А.В., Никифоров А.Ю., Скоробогатов П.К., Чумаков А.И. / Экстремальная электроника // Учебное пособие Национально-исследовательского ядерного университета «МИФИ», 2014. – 246 с.
<https://drive.google.com/drive/folders/0B2cr1af6LKtVX3FLUjRaOURoVzg>
2. Рикетс Л.У., Бриджес Дж. Э., Майлетта Дж. Электромагнитный импульс и методы защиты/ Пер. с англ. – М.: Атомиздат, 1979. -2
3. Агаханян Т.М., Аствацатурьян Е.Р., Скоробогатов П.К. Радиационные эффекты в интегральных микросхемах / Под ред. Т.М. Агаханяна. – М.: Энергоатомиздат, 1989. -2

б) дополнительная литература:

1. ГОСТ 26883-86. Группа Т00. Внешние воздействующие факторы. Термины и определения and definitions. – Введ. 01.07.1987. – Изд.офиц. – М.: Изд-во стандартов, 1986. Открытый
2. ГОСТ 21964-76. Группа Т00. Внешние воздействующие факторы. Номенклатура и характеристики. – Введ. 01.07.1987. – Изд.офиц. – М.: Изд-во стандартов, 1988.

Открытый доступ.

3. ГОСТ 9.102-91. Группа Т90. Единая система защиты от коррозии и старения. Воздействие биологических факторов на технические объекты. Термины и определения // Unified system of corrosion and ageing protection. Influence of biological factors on technical objects. Terms and definitions. - Введ. 01.01.1991. – Изд.офиц. – М.: Изд-во стандартов, 1992. Открытый доступ.
4. ГОСТ 15150-69. Группа Г08. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды//Machines, instruments and other industrial articles. Applications for different climatic regions. Categories, operating, storage and transportation conditions as to environment climatic factors influence. – Введ. 01.01.1971. – Изд.офиц. – М.: Изд-во стандартов, 2008. Открытый доступ.
5. ГОСТ 17516-72. Группа Е08. Изделия электротехнические. Условия эксплуатации в части воздействия механических факторов внешней среды//Electrical articles. Operating conditions as to environment mechanical aspects influence. – Введ. 01.07.1973. – Изд.офиц. – М.: Изд-во стандартов, 1984. Открытый доступ.
6. ГОСТ 16962-71. Группа Э20. Изделия электронной техники и электротехники. Механические и климатические воздействия. Требования и методы испытаний. = Electronic and electrical equipment. Mechanical and climatic influences/ Requirements and test methods. – Введ. 01.07.1971. – Изд.офиц. – М.: Изд-во стандартов, 1978. Открытый доступ.
7. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика. В 2-х томах. Том. 1. Физика ядерного ядра. - М.: Энергоатомиздат, 1983. -2
8. Барашенков В.С. Сечения взаимодействия частиц и ядер с ядрами. – Дубна: ОИЯИ. 1993. -2
9. Barth J. Applying modeling space radiation environments. 1997 IEEE Nuclear and Space Radiation Effects. Short Course. Applying Computer Simulation Tools to Radiation Effects Problems. 21 July 1997. Snowmass Conference Center. Snowmass Village, Colorado. Pp. 11-183. ieee-npss.org
10. Кузнецов Н.В., Соловьев Г.Г. Радиационная стойкость кремния. – М.: Энергоатомиздат, 1989. -1
11. Srour J.R., Hartmann R.A., Othmer S. Transient and permanent effects of neutron bombardment on a commercially available n-buried channel CCD. IEEE Trans. Nucl. Sci., vol.NS-27, 1980. – p.1402. 1980. ieee-npss.org
12. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х книгах. Кн.1. / Пер с англ. - 2-е переработ. и доп. Изд. - М.: МИР, 1984. -456 с. -12
13. Alexander D.R. Transient Ionizing Radiation Effects in Devices and Circuits // IEEE Trans. – 2003. Vol. NS-50. ieee-npss.org
14. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические военного назначения. Испытания на импульсную электрическую прочность. РДВ 319.03.30-98, 22 ЦНИИ МО, 1998. 10. ГОСТ РВ 20.57.308-98. Открытый доступ.
15. ГОСТ 16504-81. Группа Т00. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения // The state system of testing products. Product test and quality inspection. General terms and definitions. – Введ. 01.01.1982. – Изд.офиц. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2000. Открытый доступ.
16. РД В 319.03.31-99. Рациональный состав и последовательность испытаний изделий электронной техники на радиационную стойкость. Руководящий документ МО РФ, 1999. Открытый доступ.
17. РД В 319.03.22-97. Микросхемы интегральные и полупроводниковые приборы. Методы контроля радиационной стойкости на этапах разработки, производства и

поставки. Общие методики имитационных испытаний. Руководящий документ МО РФ, 1997. Открытый доступ.

18. РД В 319.03.52-2004. Микросхемы интегральные и полупроводниковые приборы. Методы контроля радиационной стойкости на этапах разработки, производства и поставки. Общая методика лазерных имитационных испытаний в широком диапазоне уровней и длительностей импульсов специальных факторов, а также температуры среды. - М.: МО РФ, 2004. Открытый доступ.
19. ОСТ 11.073.013-03. Часть (10). Микросхемы интегральные. Методы испытаний. Испытания на стойкость к воздействию специальных факторов и импульсную электрическую прочность. Открытый доступ.
20. РД В 319.03.24-97. Методы испытаний и оценки стойкости больших и сверхбольших интегральных схем к одиночным сбоям от воздействия отдельных высокоэнергетических тяжелых заряженных частиц и протонов космического пространства. Руководящий документ МО РФ, 1997. Открытый доступ.

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

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

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины «Радиационная стойкость изделий электроники и наноэлектроники»

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

Материально-техническое обеспечение дисциплины «Радиационная стойкость изделий электроники и наноэлектроники» обусловлено наличием необходимого количества учебников в библиотеке, некоторые из них представлены на сайте физического факультета в электронном виде. Кроме того, при необходимости выполнения некоторых математических расчетов студенты могут воспользоваться техническими возможностями терминал-класса с установленным лицензионным программным обеспечением.

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 11.04.04 – «Электроника и наноэлектроника».

Автор:

к.ф.-м.н., г.н.с. филиала РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седатова», И.Б. Яшанин.

Рецензент:

заведующий кафедрой теоретической физики, д.ф.-м.н. В.А. Бурдов

Заведующий кафедрой физики полупроводников, электроники

и нанoeлектроники д.ф.-м.н. профессор Д. А. Павлов

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии физического факультета ННГУ, протокол б/н от «17» ноября 2022 г.

Председатель
Учебно-методической комиссии
физического факультета ННГУ Перов А.А.