

**Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»**

**Направление подготовки/специальность: 11.04.04 Электроника и нанoeлектроника**

**Наименование образовательной программы: Лазерная и оптическая измерительная электроника**

**Уровень образования: высшее образование - магистратура**

**Форма обучения: Очная**

**Оценочные материалы  
по дисциплине  
Статистические методы в квантовой электронике**

**Москва  
2023**

## ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ РАЗРАБОТАЛ:

Преподаватель

(должность)

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Лапицкий К.М.
	Идентификатор	R34188c97-LapitskyKM-ff585e2b

(подпись)

К.М.  
Лапицкий

(расшифровка  
подписи)

## СОГЛАСОВАНО:

Руководитель  
образовательной  
программы

(должность, ученая степень,  
ученое звание)

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Скорнякова Н.М.
	Идентификатор	R984920bc-SkorniakovaNM-67f74b6

(подпись)

Н.М.  
Скорнякова

(расшифровка  
подписи)

Заведующий  
выпускающей кафедры

(должность, ученая степень,  
ученое звание)

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Скорнякова Н.М.
	Идентификатор	R984920bc-SkorniakovaNM-67f74b6

(подпись)

Н.М.  
Скорнякова

(расшифровка  
подписи)

## ОБЩАЯ ЧАСТЬ

Оценочные материалы по дисциплине предназначены для оценки: достижения обучающимися запланированных результатов обучения по дисциплине, этапа формирования запланированных компетенций и уровня освоения дисциплины.

Оценочные материалы по дисциплине включают оценочные средства для проведения мероприятий текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации.

Формируемые у обучающегося компетенции:

1. ПК-2 Способен применять современные методы исследования, представлять и аргументировано защищать результаты выполненной работы

ИД-1 Знает методы синтеза и исследования моделей

и включает:

**для текущего контроля успеваемости:**

Форма реализации: Письменная работа

1. Тест 1 (Контрольная работа)

2. Тест 2 (Контрольная работа)

3. Тест 3 (Контрольная работа)

Форма реализации: Смешанная форма

1. Защита лабораторных работ (Дискуссия)

## БРС дисциплины

1 семестр

Раздел дисциплины	Веса контрольных мероприятий, %				
	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4
	Срок КМ:	4	8	12	16
Статистические характеристики оптического поля					
Случайные переменные в оптике	+			+	
Прохождение случайного светового сигнала через устройства, чувствительные к поляризации	+			+	
Случайные процессы в оптике	+			+	
Спектральный анализ случайного оптического поля					
Фурье-преобразование случайных оптических сигналов	+			+	
Спектральное представление случайных процессов в оптике			+	+	
Теория частичной когерентности					
Комплексное представление случайного оптического поля			+	+	

Временная когерентность оптического излучения		+		+
Пространственная когерентность оптического излучения		+		+
Методы измерения статистических характеристик случайного оптического поля				
Основы интерферометрических измерений когерентности			+	+
Измерение спектральной плотности оптических волн классическими спектрометрами			+	+
Вес КМ:	20	30	20	30

\$Общая часть/Для промежуточной аттестации\$

## СОДЕРЖАНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ

### *I. Оценочные средства для оценки запланированных результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с индикаторами достижения компетенций*

Индекс компетенции	Индикатор	Запланированные результаты обучения по дисциплине	Контрольная точка
ПК-2	ИД-1 <sub>ПК-2</sub> Знает методы синтеза и исследования моделей	Знать: Принципы статистического подхода к теоретическому описанию оптического излучения. (КМ-1 и КМ-4) Уметь: Синтезировать и исследовать модели объектов и процессов в системах квантовой электроники статистическими методами. (КМ-2 и КМ-4) Формулировать цели и задачи научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития квантовой электроники, а также обоснованно выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства	Тест 1 (Контрольная работа) Тест 2 (Контрольная работа) Тест 3 (Контрольная работа) Защита лабораторных работ (Дискуссия)

		решения сформулированных задач. (КМ-3 и КМ-4)	
--	--	---	--

## II. Содержание оценочных средств. Шкала и критерии оценивания

### КМ-1. Тест 1

**Формы реализации:** Письменная работа

**Тип контрольного мероприятия:** Контрольная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 20

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Студенту выдается вариант, состоящий из 3 задач. На решение задач отводится 2 академических часа.

#### Краткое содержание задания:

1. Найти среднее значение, дисперсию, ширину функции плотности вероятности (ПВ) на уровне 0,5, коэффициенты асимметрии и эксцесса случайной величины, имеющей нормальное распределение вероятностей.
2. Найти Фурье-образ для импульса гауссовой формы и проверить соотношение взаимности расчетом произведения длительности импульса и ширины реальной части его спектра по уровню 0,5.
3. Определить характеристическую функцию и рассчитать по ней среднее значение, дисперсию, коэффициенты асимметрии и эксцесса случайной величины, имеющей нормальное распределение вероятностей.

#### Контрольные вопросы/задания:

<p>Знать: Принципы статистического подхода к теоретическому описанию оптического излучения. (КМ-1 и КМ-4)</p>	<ol style="list-style-type: none"><li>1.Что характеризует коэффициент асимметрии распределения случайной величины? Как он связан с моментами распределения?</li><li>2.Запишите выражения для расчета <math>k</math>-го центрального момента закона распределения вероятности случайной величины. Чему равен 1-ый центральный момент? Какой вероятностный смысл имеет 2-ый центральный момент?</li><li>3.Как рассчитать начальные моменты закона распределения случайной величины с помощью характеристической функции?</li><li>4.Доказать теорему о свертке для преобразования Фурье.</li></ol>
---	---

#### Описание шкалы оценивания:

*Оценка: 5*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 90*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "отлично" выставляется, если намечен рациональный путь решения всех задач, получен верный конечный результат в виде формулы и численного значения, с корректным указанием всех единиц измерения.

*Оценка: 4*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 70*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "хорошо" выставляется, если намечен рациональный путь решения 2 из 3 задач, получен верный конечный результат в виде формулы и численного значения, с корректным указанием всех единиц измерения, либо верно решены 3 задачи с незначительными ошибками в расчётах.

*Оценка: 3*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 50*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "удовлетворительно" выставляется, если намечен рациональный путь решения 1 из 3 задач, получен верный конечный результат в виде формулы и численного значения, с корректным указанием всех единиц измерения, либо верно решены 2 задачи с незначительными ошибками в расчётах.

## **КМ-2. Тест 2**

**Формы реализации:** Письменная работа

**Тип контрольного мероприятия:** Контрольная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 30

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Студенту выдается вариант, состоящий из 3 задач. На решение задач отводится 2 академических часа.

### **Краткое содержание задания:**

1. Автокорреляционная функция процесса имеет вид  $B(\tau) = 25 \exp(-4|\tau|) \cos(2\pi\nu_0\tau) + 16$ .  
Определите среднее значение, дисперсию, спектральную плотность.
2. Рассчитать степень пространственной когерентности излучения в точках экрана, удаленного на 1 м от пространственно некогерентного квазимонохроматического источника с  $\langle \lambda \rangle = 500$  нм, представляющего собой прямоугольную щель шириной 0,1 мм и высотой 10 мм. Плоскости экрана и источника параллельны. На каком максимальном расстоянии друг от друга можно расположить отверстия в плоскости экрана, чтобы видность интерференционной картины, получаемой в результате наложения волн, дифрагируемых на этих отверстиях, составляла не менее 0,5? Как должны быть ориентированы эти отверстия относительно щели?
3. Получить уравнения распространения взаимной когерентности  $G_{12}(t)$ , исходя из определения  $G_{12}(t)$  и волнового уравнения для  $E(\mathbf{r}, t)$ .

### **Контрольные вопросы/задания:**

Уметь: Синтезировать и исследовать модели объектов и процессов в системах квантовой электроники статистическими методами. (КМ-2 и КМ-4)	1. Каким образом количество продольных мод резонатора влияет на степень пространственной когерентности лазерного излучения? 2. Влияет ли степень взаимной когерентности двух интерферирующих пучков света на видность интерференционной картины? Ответ обоснуйте. 3. Сформулируйте теорему Винера-Хинчина.
---	--

### **Описание шкалы оценивания:**

*Оценка: 5*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 90*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "отлично" выставляется, если намечен рациональный путь решения всех задач, получен верный конечный результат в виде формулы и численного значения, с корректным указанием всех единиц измерения.

*Оценка: 4*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 75*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "хорошо" выставляется, если намечен рациональный путь решения 2 из 3 задач, получен верный конечный результат в виде формулы и численного значения, с корректным указанием всех единиц, либо верно решены 3 задачи с незначительными ошибками в расчётах.

*Оценка:* 3

*Нижний порог выполнения задания в процентах:* 50

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "удовлетворительно" выставляется, если намечен рациональный путь решения 1 из 3 задач, получен верный конечный результат в виде формулы и численного значения, с корректным указанием всех единиц измерения, либо верно решены 2 задачи с незначительными ошибками в расчётах.

### **КМ-3. Тест 3**

**Формы реализации:** Письменная работа

**Тип контрольного мероприятия:** Контрольная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 20

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Студенту выдается вариант, состоящий из 3 задач. На решение задач отводится 2 академических часа.

#### **Краткое содержание задания:**

1. Измерения показали, что среднеквадратичная флуктуация частоты излучения одномодового одночастотного гелий-неонового лазера без системы стабилизации определяется техническими факторами и составляет  $10^6$  Гц. Оценить время и длину когерентности излучения данного лазера.
2. Лазерное излучение с длиной волны 632,8 нм представлено двумя продольными модами одинаковой интенсивности. Построить график степени временной когерентности  $|g(t)|$ , рассчитать время и длину когерентности такого излучения, если длина резонатора лазера составляет 0,5 м. Считать, что уширение линий, соответствующих отдельным модам, пренебрежимо мало.
3. Определить характерные времена и длины когерентности излучения гелий-неонового лазера 632,8 нм с длиной резонатора  $L=1,5$  м, если лазер работает в режиме одновременной генерации 10 продольных мод одинаковой интенсивности и уширение каждой отдельной линии составляет  $10^6$  Гц. Построить график степени временной когерентности.

#### **Контрольные вопросы/задания:**

Уметь: Формулировать цели и задачи научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития квантовой электроники, а также обоснованно выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства решения сформулированных задач. (КМ-3 и КМ-4)	<ol style="list-style-type: none"><li>1.Перечислите основные методы измерения взаимной когерентности?</li><li>2.Что такое взаимная когерентность излучения?</li><li>3.На чём основан принцип работы интерферометра Майкельсона для измерения взаимной когерентности?</li></ol>
---	--

#### **Описание шкалы оценивания:**

*Оценка:* 5

*Нижний порог выполнения задания в процентах:* 90

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "отлично" выставляется, если намечен рациональный путь решения всех задач, получен верный конечный результат в виде формулы и численного значения, с корректным указанием всех единиц измерения.

*Оценка:* 4

*Нижний порог выполнения задания в процентах:* 70

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "хорошо" выставляется, если намечен рациональный путь решения 2 из 3 задач, получен верный конечный результат в виде формулы и численного значения, с корректным указанием всех единиц измерения, либо верно решены 3 задачи с незначительными ошибками в расчётах.

*Оценка:* 3

*Нижний порог выполнения задания в процентах:* 50

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "удовлетворительно" выставляется, если намечен рациональный путь решения 1 из 3 задач, получен верный конечный результат в виде формулы и численного значения, с корректным указанием всех единиц измерения, либо верно решены 2 задачи с незначительными ошибками в расчётах.

#### **КМ-4. Защита лабораторных работ**

**Формы реализации:** Смешанная форма

**Тип контрольного мероприятия:** Дискуссия

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 30

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Студенту выдается по одному вопросу на каждую лабораторную работу. На подготовку к ответу отводится 30 минут.

#### **Краткое содержание задания:**

1. Каким образом соответствие гистограммы выборки и законы распределения вероятности зависят от числа элементов выборки и шага случайной величины?
2. Каким образом основные статистические параметры распределения вероятности связаны с моментами этого распределения?
3. Как закон распределения мгновенной интенсивности монохроматического излучения зависит от его степени поляризации?
4. Нарисуйте сигнал ЛДА и ЛВА.

#### **Контрольные вопросы/задания:**

<p><b>Знать:</b> Принципы статистического подхода к теоретическому описанию оптического излучения. (КМ-1 и КМ-4)</p>	<p>1. Как связаны интегральный и дифференциальный законы распределения вероятности случайной величины? 2. Какому закону распределения подчиняется действительная часть комплексной амплитуды напряженности электрического поля хаотичного излучения, мнимая часть?</p>
<p><b>Уметь:</b> Синтезировать и исследовать модели объектов и процессов в системах квантовой электроники статистическими методами. (КМ-2 и КМ-4)</p>	<p>1. Что такое матрица когерентности? Каким образом определяются ее элементы? Какими свойствами она обладает? 2. Какие статистические характеристики временной когерентности случайного оптического сигнала Вам известны? В чем они заключаются?</p>
<p><b>Уметь:</b> Формулировать цели и задачи научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития</p>	<p>1. Какие возможности создания статистических моделей случайных величин и случайных процессов существуют в среде MathCAD?</p>

квантовой электроники, а также обоснованно выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства решения сформулированных задач. (КМ-3 и КМ-4)	
---	--

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка: 5*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 90*

*Описание характеристики выполнения знания: Оценка "отлично" выставляется, если дан корректный и исчерпывающий ответ на основные и дополнительные вопросы.*

*Оценка: 4*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 75*

*Описание характеристики выполнения знания: Оценка "хорошо" выставляется, если дан в целом корректный и исчерпывающий ответ на основные и дополнительные вопросы, но допущены незначительные ошибки или неточности.*

*Оценка: 3*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 60*

*Описание характеристики выполнения знания: Оценка "удовлетворительно" выставляется, если ответы на все вопросы даны преимущественно верно.*

# СОДЕРЖАНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

## 1 семестр

**Форма промежуточной аттестации:** Зачет с оценкой

### Пример билета

1. Плотность вероятности напряженности и интенсивности поляризованного и неполяризованного теплового излучения.
2. Измерение спектральной плотности оптических волн классическими спектрометрами. Аппаратная функция спектрального прибора. Разрешающая способность. Элементы теории восстановления сигналов.

### Процедура проведения

Зачет проводится письменно. Студенту выдается билет с 2 теоретическими заданиями. Время проведения зачета - 2 астрономических часа.

### *1. Перечень компетенций/индикаторов и контрольных вопросов проверки результатов освоения дисциплины*

**1. Компетенция/Индикатор:** ИД-1<sub>ПК-2</sub> Знает методы синтеза и исследования моделей

### Вопросы, задания

1. Плотность вероятности напряженности и интенсивности поляризованного и неполяризованного теплового излучения.
2. Функция взаимной когерентности. Волновые уравнения, описывающие распространение функции взаимной когерентности. Распространение взаимной спектральной плотности.
3. Плотность вероятности напряженности и мгновенной интенсивности одномодового и многомодового лазерного излучения.
4. Комплексное представление случайного оптического поля. Аналитический сигнал. Преобразование Гильберта.
5. Функция когерентности и односторонняя спектральная плотность оптических колебаний. Теорема Винера-Хинчина.
6. Анализ функций когерентности и спектральной плотности излучения ансамбля осцилляторов при естественном, доплеровском и диффузионном механизме релаксации.
7. Однородное и неоднородное уширения спектральных линий. Когерентные свойства излучения тепловых источников.
8. Временная когерентность одночастотного и многочастотного лазерного излучения.
9. Частичная поляризация излучения. Прохождение случайного светового сигнала через устройства, чувствительные к поляризации. Матрица когерентности. Степень поляризации.
10. Пространственная когерентность. Теорема Ван Циттерта-Цернике.
11. Пространственная когерентность одномодового и многомодового лазерного излучения.
12. Измерение спектральной плотности оптических волн классическими спектрометрами. Аппаратная функция спектрального прибора. Разрешающая способность. Элементы теории восстановления сигналов.
13. Полуклассическая теория фотоэлектрической регистрации. Статистика фотоотсчетов. Параметр вырождения.

14. Спекл-эффекты при формировании изображения
15. Интерферометрия интенсивностей. Эксперимент Брауна-Твисса. Звездная интерферометрия интенсивностей.
16. Спектрометрия флуктуаций интенсивности. Режимы прямого детектирования и фотогетеродинамирования.
17. Лазерная интерферометрия интенсивностей.

### Материалы для проверки остаточных знаний

1. Какому распределению плотности вероятности случайной величины соответствует выражение  $w(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}\right)$ ?

Ответы:

- а) Нормальное распределение
- б) Равномерное распределение
- в) Рэлеевское распределение
- г) Экспоненциальное распределение

Верный ответ: а)

2. Что показывает гистограмма массива выборочных значений случайной величины?

Ответы:

- а) Вероятность каждого значения массива
- б) Интегральный закон распределения случайной величины
- в) Число попаданий выборочных значений случайной величины в некоторые заданные интервалы ее значений
- г) Основные статистические параметры плотности вероятности случайной величины

Верный ответ: в)

3. На основе какой теоремы можно утверждать, что действительная и мнимая часть комплексной амплитуды напряженности поля хаотического излучения подчиняются нормальному закону распределения вероятности?

Ответы:

- а) Теорема Винера-Хинчина
- б) Центральная предельная теорема теории вероятности
- в) Теорема Ван-Циттерта-Цернике
- г) Теорема о свертке

Верный ответ: б)

4. Что характеризует коэффициент асимметрии плотности вероятности  $w(x)$  случайной величины?

Ответы:

- а) Смещение среднего значения случайной величины  $x$  относительно нулевого значения
- б) Ширину распределения плотности вероятности  $w(x)$
- в) Остроту вершины функции плотности вероятности  $w(x)$  относительно остроты вершины гауссовой функции
- г) Степень асимметрии функции плотности вероятности  $w(x)$  относительно среднего значения

Верный ответ: г)

5. Что характеризует коэффициент эксцесса плотности вероятности  $w(x)$  случайной величины?

Ответы:

- а) Смещение среднего значения случайной величины  $x$  относительно нулевого значения
- б) Ширину распределения плотности вероятности  $w(x)$
- в) Остроту вершины функции плотности вероятности  $w(x)$  относительно остроты вершины гауссовой функции
- г) Степень асимметрии функции плотности вероятности  $w(x)$  относительно среднего значения

Верный ответ: в)

6. Как связаны функция плотности вероятности и характеристическая функция случайной величины?

Ответы:

- а) Парой преобразований Фурье
- б) Парой преобразований Гильберта
- в) Парой преобразований Лапласа
- г) Парой Z-преобразований

Верный ответ: а)

7. Аппаратная функция линейной системы с постоянными параметрами может быть определена как

Ответы:

- а) Фурье-образ выходного сигнала
- б) Отношение выходного сигнала системы к входному сигналу
- в) Разность между выходным и входным сигналами системы
- г) Отклик системы на  $\delta$ -образное воздействие

Верный ответ: г)

8. О чем гласит теорема о свертке двух функций?

Ответы:

- а) Фурье-образ результата свертки двух функций равен произведению Фурье-образов этих функций
- б) Свертке во временной области соответствует свертка в частотной области
- в) Фурье-образ результата свертки двух функций равен отношению Фурье-образов этих функций
- г) Фурье-образ результата свертки двух функций равен сумме Фурье-образов этих функций

Верный ответ: а)

9. Как связаны между собой действительная и мнимая части аналитического представления оптического сигнала?

Ответы:

- а) Парой преобразований Фурье
- б) Парой преобразований Гильберта
- в) Парой преобразований Лапласа
- г) Парой Z-преобразований

Верный ответ: б)

10. Что называется временем когерентности?

Ответы:

- а) Время полного колебания оптического сигнала
- б) Минимальное время усеченной реализации случайного процесса, достаточное для его полного статистического описания
- в) Величина, обратная несущей частоте оптического сигнала
- г) Характерное время затухания степени временной когерентности

Верный ответ: г)

11. При каком механизме уширения спектра излучения контур спектральной линии описывается функцией Лоренца?

Ответы:

- а) однородный механизм уширения
- б) неоднородный механизм уширения
- в) диффузионный механизм уширения
- г) смешанный механизм уширения

Верный ответ: а)

12. При каком механизме уширения спектра излучения контур спектральной линии описывается гауссовой функцией?

Ответы:

- а) однородный механизм уширения
- б) неоднородный механизм уширения
- в) диффузионный механизм уширения
- г) смешанный механизм уширения

Верный ответ: б)

13. С помощью какого прибора можно осуществить измерение поперечной пространственной когерентности?

Ответы:

- а) Лазерный рефрактометр
- б) Интерферометр по схеме Юнга
- в) Лазерный доплеровский анемометр
- г) Лазерный виброметр

Верный ответ: б)

14. С помощью какого прибора можно осуществить измерение временной когерентности?

Ответы:

- а) Лазерный рефрактометр
- б) Лазерный доплеровский анемометр
- в) Лазерный виброметр
- г) Интерферометр Майкельсона

Верный ответ: г)

15. Что характеризует степень когерентности квазимонохроматического оптического сигнала?

Ответы:

- а) Ширину спектральной линии сигнала
- б) Состояние поляризации сигнала
- в) Согласованность флуктуаций медленно меняющихся амплитуд и фаз сигнала
- г) Форму волнового фронта сигнала

Верный ответ: в)

## **II. Описание шкалы оценивания**

*Оценка: 5*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 70*

*Описание характеристики выполнения знания: Работа выполнена в рамках "продвинутого" уровня. Ответы даны верно, четко сформулированные особенности практических решений*

*Оценка: 4*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 60*

*Описание характеристики выполнения знания: Работа выполнена в рамках "базового" уровня. Большинство ответов даны верно. В части материала есть незначительные недостатки*

*Оценка: 3*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 50*

*Описание характеристики выполнения знания: Работа выполнена в рамках "порогового" уровня. Основная часть задания выполнена верно. на вопросы углубленного уровня*

## **III. Правила выставления итоговой оценки по курсу**