

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы физики  
и исследований им. Ландау  
А.В. Рогачев**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Машинное (техническое) зрение
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра электродинамики сложных систем и нанопотоники
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 60 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: М.С. Никитин, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры электродинамики сложных систем и нанопотоники 26.02.2025

## Аннотация

Машинное (техническое) зрение – это техническая возможность видения в различных спектральных диапазонах электромагнитного излучения, которая интегрируется с существующими технологиями во многих областях жизнедеятельности человека новыми способами и применяется для решения реальных проблем.

Машинное (техническое) зрение – прикладная инновационная физико-техническая дисциплина, объединяющая достижения оптики, классической и квантовой электродинамики, фотоники, оптоэлектроники, биофизики и биохимии процессов зрения живых биологических организмов и компьютерного зрения, и имеющая неограниченный потенциал развития и применения в обычной жизни, промышленности, медицине, обороне и безопасности, сервисе, коммерции, на транспорте и пр. Видение (зрение) – один из главных каналов восприятия информации об окружающем мире.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- изучение физико-технических основ и принципов конструирования систем машинного (технического) зрения. Важность данного курса продиктована необходимостью в подготовке для высшей школы, научных учреждений и промышленности высококвалифицированных специалистов в области инновационных систем машинного зрения.

### Задачи дисциплины

- формирование базовых знаний в области систем машинного (технического) зрения, интегрирующих достижения таких дисциплин, как оптика, классическая и квантовая электродинамика, фотоника, оптоэлектроника, биофизика и биохимия процессов зрения живых биологических организмов и компьютерное зрение для подготовки студентов к эффективной работе в инновационной сфере деятельности – машинное (техническое) зрение;
- понимание принципов создания систем машинного зрения и особенностей их функциональных характеристик для различных задач и условий применения.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
УК-2 Способен управлять проектом на всех этапах его реализации	УК-2.4 Представляет публично результаты проекта (или отдельных его этапов) в форме отчетов, статей, выступлений на научно-практических конференциях, семинарах и т.п.
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость

на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- физико-технические основы и принципы конструирования систем машинного (технического) зрения.

уметь:

- анализировать задачу создания системы машинного зрения;
- планировать пути решения;
- предлагать и комбинировать способы решения.

владеть:

- системным научным подходом создания систем машинного (технического) зрения.

### 4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

#### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Машинное (техническое) зрение. Что это? Техничко-экономические аспекты прикладной дисциплины – машинное (техническое) зрение.	2			4
2	Зрение человека.	2			3

3	Принцип построения систем машинного (технического) зрения. Двумерное и трехмерное изображение.	2			5
4	Действие электромагнитного излучения на вещества.	2			3
5	Источники излучения для освещения объектов. Методы освещения объектов в системах машинного зрения.	2			5
6	Собственное (тепловое или температурное) равновесное и неравновесное излучение. Спонтанное и вынужденное излучение.	2			3
7	Лазеры и лазерное излучение.	2			5
8	Оптические компоненты систем машинного зрения.	2			3
9	Структура энергетических зон конденсированных сред. Монокристаллические, поликристаллические и аморфные вещества. Взаимодействие излучения с конденсированными средами. Фотоэффект.	2			5
10	Основные фотоэлектрические эффекты, используемые для создания высокочувствительных детекторов электромагнитного излучения и матриц фокальной плоскости на их основе.	2			3
11	Пиксель. Матрица фокальной плоскости. Матричное фотоприемное устройство. Система фотоэлектрических параметров приемников излучения.	2			5
12	Принципы формирования электронного изображения камерой с матричным фотоприемным устройством. Минимальное количество элементов разложения – пикселей. Градации оттенков изображения и их регистрация. Понятие об алгоритме обработки электронного изображения.	2			3
13	Конструкция камеры на основе кремниевой КМОП матрицы фокальной плоскости - пиксель, матрица и фотоприемное устройство. Неселективный (оттенки серого) и цветной варианты.	2			5
14	Конструкция камеры на основе матрицы фокальной плоскости из неохлаждаемых микроболометров - пиксель, матрица и фотоприемное устройство.	2			3
15	Конструкция камеры на основе криогенно охлаждаемых матриц фокальной плоскости на основе фотодиодов из InSb, HgCdTe и QWIP фоторезисторов на сверхрешетках АШВ - пиксель, матрица и фотоприемное устройство.	2			5

Итого часов	30			60
Подготовка к экзамену	0 час.			
Общая трудоёмкость	90 час., 2 зач.ед.			

#### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 1 (Осенний)

1. Машинное (техническое) зрение. Что это? Техничко-экономические аспекты прикладной дисциплины – машинное (техническое) зрение.

Машинное (техническое) зрение. Что это? Техничко-экономические аспекты прикладной дисциплины – машинное (техническое) зрение

Видение (зрение) – один из главных каналов восприятия информации об окружающем мире. До 80 % информации об окружающем мире человек получает с помощью зрения.

Машинное (техническое) зрение – это получение (захват) изображения из реальной окружающей среды техническими средствами видения и его анализ с использованием соответствующих алгоритмов для извлечения данных, требуемых для принятия решений и выполнения действий. Рабочие диапазоны длин волн электромагнитного излучения систем машинного (технического) зрения: ультрафиолетовый 0,1–0,4 мкм; видимый 0,4–0,78 мкм и инфракрасный 0,78–14 мкм. Одна из определяющих черт машинного зрения – это то, что оно работает именно с изображениями объекта, а не с отдельными характеристиками объекта.

Машинное (техническое) зрение – прикладная инновационная физико-техническая дисциплина, объединяющая достижения оптики, классической и квантовой электродинамики, фотоники, оптоэлектроники, биофизики и биохимии процессов зрения живых биологических организмов и компьютерного зрения, и имеющая неограниченный потенциал развития и применения в обычной жизни, промышленности, медицине, обороне и безопасности, сервисе, коммерции, на транспорте и пр.

Система машинного зрения – это синергия аппаратной части (железа) и аналитической части (алгоритма), к которой в настоящее время начинает активно добавляться искусственный интеллект (ИИ), то есть, вторая часть – это алгоритм + ИИ. Машинное зрение и компьютерное зрение.

Основные задачи, которые решает машинное зрение:

Обнаружение объекта на фоне окружающей обстановки.

Распознавание объекта.

Идентификация объекта.

Машинное и компьютерное зрение - основа нового технологического уклада в индустрии с широчайшим применением автоматизации и роботизации, получивший название «Индустрия 4.0».

#### 2. Зрение человека.

Восприятие зрением. Строение, структура и функции глаза. Процесс восприятия глазом визуального образа. Спектральная характеристика чувствительности глаза. Строение сетчатки глаза, фоторецепторы. Фотоэлектрические свойства фоторецепторов.

3. Принцип построения систем машинного (технического) зрения. Двумерное и трехмерное изображение.

Какие свойства систем машинного зрения являются привлекательными и полезными для человека? Точность, достоверность, высокое разрешение, воспроизводимость, высокая производительность, постоянная готовность к работе, высокая степень автоматизации. Одно из главных требований к системам машинного зрения – отсутствие субъективности,

Базовые законы физики, оптики и электродинамики, позволяющие создать релевантную требованиям человека систему машинного зрения. Что является главным? Геометрическая оптика или квантовая? Составные части систем машинного зрения. Электромагнитное излучение как носитель информации об объекте.

#### 4. Действие электромагнитного излучения на вещества.

Элементы, из которых состоит материя объектов (сред), представляет комбинацию трех типов основных элементарных частиц – протонов, нейтронов и электронов.

Эти частицы связаны между собой определенными силами, в частности, это связь электронов в атомах, химическая связь в молекулах и силы, соединяющие молекулы в твердых и жидких телах, все эти силы являются проявлениями электромагнитного взаимодействия электронов с ядрами, также электронов и ядер между собой. Для результата существенно, что электроны подчиняются квантовой механике, принципу Паули и статистике Ферми-Дирака.

Теория электромагнетизма приводит к выводу, что наряду со статическим электрическим полем, окружающим заряды, существуют специфические решения – поле, свободно распространяющееся в пространстве и описывающее электромагнитные волны (радиоволны, свет, рентгеновские лучи, гамма-лучи). Эйнштейн в 1905 г. пришел к выводу, что свет следует рассматривать как поток фотонов, т. е., особых частиц. Этот вывод был сделан на основании анализа опытных данных, ему предшествовало построение Планком теории теплового излучения. В работе Планка впервые в 1900 году была высказана мысль о существовании фотонов (квантов) и в физике появилась квантовая постоянная  $h$ . Вскоре множество опытов по химическому действию света, фотоэффекту и по рассеянию света электронами подтвердило фотонную теорию. Для результата существенно, что фотоны имеют значение спина 1, могут находиться в неограниченном количестве в одном энергетическом состоянии и подчиняются статистике Бозе-Эйнштейна.

Чтобы зарегистрировать фотоны электромагнитного излучения от объекта нужно, чтобы фотоны достигли границы вещества, с помощью которого мы хотим их обнаружить, и, соответственно, произошло взаимодействие фотонов с веществом, вызывающее некий эффект: отражение, поглощение, преломление, пропускание, возбуждение электронной или фоновой или молекулярной подсистем и т. д. Эффект взаимодействия может быть селективным (то есть, в некоторых узких интервалах длин волн) или неселективным (то есть, в широких интервалах длин волн).

#### 5. Источники излучения для освещения объектов. Методы освещения объектов в системах машинного зрения.

Если от объекта не исходят фотоны (излучение), то его изображение не может быть получено системой машинного зрения. Камеры не видят объекты, они только регистрируют пространственное распределение излучения, отраженного от объекта или прошедшего сквозь объект, или испущенного объектом. Освещение в системе машинного зрения управляет тем, как объект выглядит для камер.

Электромагнитное излучение, посредством которого осуществляется видение объекта – это стационарный, модулированный или импульсный поток фотонов равновесного (собственного) излучения или внешнего некогерентного, или когерентного (многомодового или одномодового) излучения.

Когерентное и некогерентное излучение. Монохроматичное и немонахроматичное излучение.

Источники излучения. Методы освещения объектов.

Не существует программного алгоритма, способного выявить особенности или дефекты объекта, если они должным образом не освещены, то есть от них нет излучения или интенсивность излучения недостаточна для корректной визуализации.

#### 6. Собственное (тепловое или температурное) равновесное и неравновесное излучение. Спонтанное и вынужденное излучение.

Собственное (тепловое или температурное) излучение тел (сред) имеет фундаментальное значение для визуализации как самих излучающих тел, так и объектов, на которые оно попадает.

Физические закономерности формирования собственного (теплого или температурного) излучения тел (сред) позволяют объяснить принцип действия источников излучения всех типов, включая лазеры.

Принцип неопределенности и нулевые колебания поля

Существует соотношение неопределенности Гейзенберга, гласящее, что:  $\Delta x \Delta p_x \approx h$ ,  $\Delta y \Delta p_y \approx h$ ,  $\Delta z \Delta p_z \approx h$ .

Применительно к электромагнитному полю не могут одновременно обращаться в нуль магнитное и электрическое поля. Квантовая механика предсказывает, что возможные значения полной энергии осциллятора есть  $E_n = (n+1/2)h\nu$  с произвольным целым  $n$ , где  $h$  – постоянная Планка,  $\nu$  – частота осциллятора. «Половинка»  $1/2h\nu$  – энергия нижнего (основного) уровня осциллятора (нулевые колебания поля).

Если осциллятор может обмениваться энергией с какими-то другими телами, то он отдает или получает энергию только определенными порциями, кратными  $h\nu$ .

Бесконечное число колебаний поля приходится на единицу объема вакуума. То есть, всегда существуют колебания поля с любой частотой  $\nu$ . Это, с одной стороны, реальность, потому что всегда происходит переход атомной или ионной системы из возбужденного состояния в стационарное за конечное время, что невозможно без взаимодействия с каким-либо электромагнитным полем. То есть, даже в отсутствие целых фотонов, всегда наличествует электромагнитное поле половинок  $1/2h\nu$ , которое способствует переходу системы из возбужденного состояния в низшее энергетическое состояние со спонтанным испусканием фотона. Но, с другой стороны, в таком случае электромагнитная энергия вакуума должна быть бесконечной, чего нет в реальности. Теоретическая катастрофа, называемая коротковолновой или ультрафиолетовой катастрофой квантовой электродинамики есть, реальной физической катастрофы нет.

Закон сохранения энергии при спонтанном испускании фотона.

Электромагнитная энергия вакуума бесконечна, но при рассмотрении любого процесса, например испускания фотона возбужденным атомом при обязательном участии нулевого поля,  $A^* \rightarrow A + \text{emission}(h\nu)$ , эта бесконечность сокращается. Если процесс происходит в объеме  $V$  и плотность энергии вакуума обозначена  $E_V$ , то уравнение сохранения (полной) энергии  $E_{\text{tot}}$  имеет вид:

$$E_{\text{tot}} = \text{const} = E_V V + E(A^*) = E_V V + E_A + h\nu$$

Независимо от того, равна нулю или конечна, или бесконечна величина  $E_V$ , получим закон сохранения энергии в обычной форме:

$$E(A^*) = E_A + h\nu.$$

Согласно общепринятым в настоящее время в науке и практике представлениям (третьему началу термодинамики) температура равная нулю по абсолютной шкале температур недостижима. При температуре  $T > 0$  все частицы – атомы, молекулы, ионы и другие атомные и ионные системы, составляющие различные формы материи в любом месте и в любой момент времени обладают определенной энергией теплового движения. В явлениях теплового излучения переход в возбужденное состояние осуществляется в результате теплового движения атомов, молекул или ионов, то есть за счет внутренней энергии тела (среды). Излучение фотонов теплового излучения происходит в результате переходов атомов, молекул и других атомных и ионных систем из состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией. Тепловое излучение отличается от других видов излучения (люминесценции) только способом перехода излучающих систем в возбужденное состояние, а именно, за счет внутренней энергии тела (среды).

Равновесное и неравновесное излучение. Вывод формулы Планка. Спонтанное и вынужденное излучение.

## 7. Лазеры и лазерное излучение.

Машинное (техническое) зрение с использованием источников лазерного излучения имеет большие перспективы применения для получения детальных изображений с существенной информацией об объектах. Это касается получения высокоточных двумерных и трехмерных геометрических изображений объектов, спектроскопических образов, создаваемых путем регистрации распределения специфического поглощения лазерного излучения на поверхности или внутри объекта, изображений в поляризованном лазерном излучении, изображений при освещении объектов коллимированным пучком излучения, в том числе находящихся на значительном удалении, изображений с применением дальнометрии (LIDAR) и пр.

Основные типы лазеров для систем машинного зрения: твердотельные, волоконные, газовые, эксимерные, на красителях, полупроводниковые инжекционные (диодные), квантовокаскадные.

Принцип работы лазера. Создание условий превалирования вынужденных переходов над спонтанными

Физика лазеров разных типов и характеристики лазерного излучения

## 8. Оптические компоненты систем машинного зрения.

Линзы, зеркала, линзовые объективы, зеркальные объективы, жидкие линзы, оптика на основе метаповерхностей.

## 9. Структура энергетических зон конденсированных сред. Монокристаллические, поликристаллические и аморфные вещества. Взаимодействие излучения с конденсированными средами. Фотоэффект.

Особенности атомной структуры конденсированных сред в кристаллическом, поликристаллическом и аморфном состоянии. Трансляционная симметрия, ближний и дальний порядок. Эмпирическое правило Иоффе-Регеля. Формирование квази-сплошных энергетических зон при образовании конденсированного состояния вещества. Разрешенные и запрещенные энергетические зоны. Плотность состояний. «Хвосты» плотности состояний, энергетические уровни примесных атомов, «примесные зоны» в запрещенной зоне. Термические (собственные) переходы электронов в возбужденное состояние и переходы электронов при поглощении фотонов. Фотоэффект. Механизмы рекомбинации возбужденных электронов в твердых телах.

## 10. Основные фотоэлектрические эффекты, используемые для создания высокочувствительных детекторов электромагнитного излучения и матриц фокальной плоскости на их основе.

Фотовольтаический эффект – фотодиод. Фотопроводимость собственная и примесная – собственный и примесный фоторезистор. Фотопроводимость в сверхрешетках с квантовыми ямами – фоторезистор QWIP (Quantum Well Infrared Photoconductor). Терморезистивный (боллометрический) эффект – микроболометр.

Механизмы формирования сигнала при поглощении фотонов электромагнитного излучения. Источники собственных и внешних шумов.

## 11. Пиксель. Матрица фокальной плоскости. Матричное фотоприемное устройство. Система фотоэлектрических параметров приемников излучения.

Пиксель – элементарная фоточувствительная ячейка, детектирующая излучение от фрагмента объекта и формирующая электрический сигнал фрагмента изображения. Матрица (мозаика) фокальной плоскости представляет собой множество пикселей, расположенных в виде определенного топологического рисунка, на поверхность которой оптическая система камеры проецирует оптическое изображение объекта. Топология матрицы, количество пикселей и соотношение шага пикселей (расстояния между центрами) и длины волны регистрируемого излучения в значительной мере определяет качество и достоверность изображения объекта - соответствие полученного цифрового изображения оптическому.

Общепринятая система фотоэлектрических параметров приемников излучения.



12. Принципы формирования электронного изображения камерой с матричным фотоприемным устройством. Минимальное количество элементов разложения – пикселей. Градации оттенков изображения и их регистрация. Понятие об алгоритме обработки электронного изображения.

Особенности формирования изображения из сигналов отдельных пикселей матрицы. Минимальное количество пикселей для формирования комфортного визуального и цифрового изображения. Передача оттенков образа объекта. Что такое обнаружение, распознавание и идентификация объекта по изображению. Понятие об алгоритме обработки электронного изображения. Принципы формирования достоверного изображения камерой.

13. Конструкция камеры на основе кремниевой КМОП матрицы фокальной плоскости - пиксель, матрица и фотоприемное устройство. Неселективный (оттенки серого) и цветной варианты.

КМОП технология – основная технология производства матриц фокальной плоскости современных камер видимого диапазона спектра. Одно из основных преимуществ кремния – матрица фокальной плоскости и интегральная схема первичной обработки сигналов пикселей (фотодиодов) - мультиплексор изготавливаются на единой подложке. Другим важнейшим преимуществом использования кремния для изготовления матриц фокальной плоскости видимого диапазона спектра – это возможность получения предельных (пороговых) характеристик пикселей при нормальных условиях и температуре окружающей среды. Изображения, получаемые современными камерами, имеют очень высокое геометрическое разрешение на уровне 1,5–2 мкм.

Конструктивные особенности пикселя. Неселективный и цветной варианты матриц.

Примеры матриц и камер. Технические характеристики передовых камер.

14. Конструкция камеры на основе матрицы фокальной плоскости из неохлаждаемых микроболометров - пиксель, матрица и фотоприемное устройство.

Неохлаждаемые микроболометры – основной тип матриц фокальной плоскости для массового производства современных камер тепловизоров, работающих в длинноволновом инфракрасном диапазоне спектра 8–14 мкм. Основные преимущества матричных фотоприемных устройств на основе микроболометров – может эффективно работать при температуре окружающей среды (нет необходимости в криогенном охлаждении), устройство очень компактно, имеет маленькую массу и низкое энергопотребление. Специфической особенностью эффективной работы микроболометра является рабочая среда – высокий вакуум (~10<sup>-5</sup> мбар) в рабочей полости устройства, в которой смонтирована матрица. Рабочий длинноволновый инфракрасный диапазон спектральной чувствительности 8–14 мкм обеспечивает видение в условиях плохой освещенности (в темное время суток), тумана, дыма и других метеорологических помех для видения. Камеры на основе микроболометров обладают разрешением изображения объекта по температуре (теплового контраста) порядка 30–50 мК и геометрическим разрешением на уровне длины волны 10–12 мкм. Недостаток – низкое быстродействие 10<sup>-1</sup>–10<sup>-2</sup> с, поскольку принцип работы тепловой – нагрев-охлаждение чувствительной мембраны.

Конструктивные особенности пикселя, матрицы и гибридной сборки с мультиплексором. Примеры камер. Технические характеристики передовых камер.

15. Конструкция камеры на основе криогенно охлаждаемых матриц фокальной плоскости на основе фотодиодов из InSb, HgCdTe и QWIP фоторезисторов на сверхрешетках АІІВV - пиксель, матрица и фотоприемное устройство.

Криогенно охлаждаемые матрицы на основе фотодиодов из InSb, HgCdTe и QWIP фоторезисторов на сверхрешетках АПВ – основной тип матриц фокальной плоскости для производства специальных современных тепловизионных камер, работающих в инфракрасных диапазонах спектра 3–5 и 8–14 мкм. Основные преимущества криогенно охлаждаемых матричных фотоприемных устройств – возможность достижения пороговых теоретических значений чувствительности пикселей и, как следствие, максимально возможных дальностей обнаружения, распознавания и идентификации слабо нагретых объектов. Достигнутый уровень температурного контраста изображения порядка 10 мК, может быть, в дальнейшем улучшен до 1 мК и менее. Другие существенные преимущества – высокое быстродействие пикселей фотодиодного типа  $10^{-7}$ – $10^{-9}$  с, геометрическое разрешение на уровне длины волны, возможность мультиспектральной регистрации. Матрицы фокальной плоскости на основе QWIP фоторезисторов на сверхрешетках АПВ обладают очень высокой однородностью, но существенно уступают по чувствительности и быстродействию матрицам на основе фотодиодов.

Конструктивные особенности пикселя, матрицы и гибридной сборки с мультиплексором. Примеры камер. Технические характеристики передовых камер.

## **5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)**

Учебная аудитория, оснащенная компьютером и проектором.

## **6. Перечень рекомендуемой литературы**

### Основная литература

1. Зрение человека и электронное зрение [Текст]/А. Роуз, -М., Мир, 1977
2. Общий курс физики. Оптика [Текст] : учеб. пособие для вузов / Д. В. Сивухин. — М. : Наука, 1980. — 752 с.
3. Оптоэлектроника видимого и инфракрасного диапазонов спектра [Текст] : учеб. пособие для вузов / Л. Н. Курбатов. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : Физматкнига, 2013. — 400 с.
4. Оптика [Текст] : учеб. пособие для физ. спец. вузов / Г. С. Ландсберг. — 6-е изд., стереотип. — М. : Физматлит, 2003, 2006, 2010. — 848 с.
5. Теоретическая физика [Текст] : В 10 т. Т. 8 / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Электродинамика сплошных сред учеб. пособие для вузов - М. Наука, 1982
6. Атом в сильном световом поле [Текст]/Н. Б. Делоне, В. П. Крайнов, -М., Энергоатомиздат, 1984
7. Физика полупроводников [Текст] : учеб. пособие для вузов / В. Л. Бонч-Бруевич, С. Г. Калашников. — М. : Наука, 1990. — 688 с.
8. Полупроводники [Текст] = Semiconductors : [учеб. пособие для вузов] / Р. Смит ; пер. с англ. под ред. Н. А. Пенина. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Мир, 1982. — 560 с.
9. Фотоэлектрические явления в полупроводниках [Текст]/С. М. Рывкин, -М, Физматлит, 1963
10. Handbook of Machine and Computer Vision. Editor Alexander Hornberg. Wiley-VCH Verlag, 2017, 862 p.
11. В. Г. Волков, П. Д. Гиндин. Техническое зрение. Инновации. Техносфера. Москва. 2014, 840 с.
12. L. Allen, J. H. Eberly. Optical resonance and two-level atoms. Wiley. 1975, 233 p.

### Дополнительная литература

1. Квантовая электроника [Текст]. Ч. 1 / А. М. Прохоров, Л. С. Корниенко ; Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова ; Науч.-исслед. ин-т ядерной физики ; Отд-ние ядерной физики физ. фак. МГУ ; Кафедра атомной физики и электронных явлений - М. МГУ, 1973
2. Основы теории полупроводниковых приборов [Текст]/Г. Е. Пикус, -М., Наука, 1965
3. Инфракрасное излучение нагретых тел [Текст]/М. А. Брамсон, -М., Наука, 1964

4. Я. Б. Зельдович. Теория вакуума, быть может, решает загадку космологии. УФН, 1976, т. 120, вып. 4, с. 479–503
5. Н. Г. Басов. Полупроводниковые квантовые генераторы. Нобелевская лекция. УФН, 1965, т. 85, вып. 4, с. 585–598
6. Mikhail Nikitin, Albina Drugova, Viacheslav Kholodnov and Galina Chekanova. Simulation of Small-pitch High-density Photovoltaic Infrared Focal Plane Arrays. Intech. In book: Advances in Photodiodes, Prof. Gian Franco Dalla Betta (Ed.), 2011, pp. 95-120, ISBN: 978-953-307-163-3
7. М. А. Брамсон. Справочные таблицы по инфракрасному излучению нагретых тел. Наука. Москва, 1964, 318 с.

## **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

<http://www.edu.ru> – федеральный портал «Российское образование».  
<http://www.exponenta.ru> – образовательный математический сайт.  
<http://mathnet.ru> – общероссийский математический портал.  
<http://benran.ru> –библиотека по естественным наукам Российской академии наук.

## **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

На лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

## **9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Студент, изучающий курс «Методы вычислительной электродинамики», должен уметь активно и целенаправленно применять в различных сочетаниях знания, полученные в области математики, электродинамики и численных методов.

В процессе изучения курса студент должен изучить приёмы оценки рассеивающих свойств объектов из геометрических соображений и методом физической оптики, а также изучить подходы к решению прикладных задач электродинамики методом собственных функций, методами конечных элементов и конечных разностей, методами поверхностных и объёмных интегральных уравнений, с использованием декомпозиционного подхода и «сразу», методом конечных разностей во временной области, методами геометрической и физической теории дифракции. Конкретная реализация электродинамического метода определяется способом аппроксимации решения, применяемыми приёмами интегрирования и дифференцирования, решения СЛАУ и другими. В связи со сложностью алгоритмов вычислений и зачастую высокой размерностью задач, в ходе изучения курса студент получает представление о рациональных приёмах программирования, в том числе о распараллеливании вычислений. Наконец, при изучении курса студент осваивает навыки работы с публикациями по тематике численных методов прикладной электродинамики в различных источниках: отечественных и зарубежных монографиях и учебниках, в научной периодической литературе, в электронных ресурсах Интернет.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;

- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра электродинамики сложных систем и нанофотоники
<b>курс:</b>	<u>1</u>
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет	
<b>Разработчик:</b>	М.С. Никитин, канд. физ.-мат. наук

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
УК-2 Способен управлять проектом на всех этапах его реализации	УК-2.4 Представляет публично результаты проекта (или отдельных его этапов) в форме отчетов, статей, выступлений на научно-практических конференциях, семинарах и т.п.
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Машинное (техническое) зрение» обучающийся должен:

**знать:**

- физико-технические основы и принципы конструирования систем машинного (технического) зрения.

**уметь:**

- анализировать задачу создания системы машинного зрения;
- планировать пути решения;
- предлагать и комбинировать способы решения.

**владеть:**

- системным научным подходом создания систем машинного (технического) зрения.

### **3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю**

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия или в конце занятия по пройденной теме.

### **4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся**

1. Что такое машинное (техническое) зрение? Какие основные задачи оно призвано решать?
2. Основные составные части системы машинного (технического) зрения. Рабочие спектральные диапазоны излучения систем машинного зрения и почему выбор сделан именно на них?
3. Типы фоторецепторов глаза человека. Сколько фоторецепторов в сетчатке глаза, их типичные размеры и спектральные характеристики?
4. Что такое когерентное и некогерентное электромагнитное излучение? Суммарная интенсивность освещения объекта при одновременном действии двух и более источников когерентного или некогерентного освещения.
5. Что такое резонансное поглощение фотона атомом (двухуровневой системой)?
6. Что такое спонтанное и вынужденное излучение? Что такое нулевые колебания поля?
7. Что такое собственное (тепловое, температурное) излучение?
8. Что такое пиксель изображения? Матрица (мозаика) фокальной плоскости как базовая фоточувствительная структура для формирования электронного изображения.
9. Зрение человека. Строение, структура и функции глаза
10. Базовые принципы построения систем машинного зрения. Геометрическая и квантовая оптика. Классическая и квантовая электродинамика.
11. Механизм поглощения фотона в двухуровневой системе. Испускание фотона. Спонтанное и вынужденное излучение.
12. Равновесное и неравновесное излучение. Вывод формулы Планка.
13. Как обеспечить превалирование вынужденного излучения над спонтанным. Принцип работы лазера.
14. Структура энергетических зон конденсированных сред. Монокристаллические, поликристаллические и аморфные вещества. Взаимодействие излучения с конденсированными средами.
15. Фотоэффект и его использование для регистрации излучения. Физическая модель основных типов фотоэффекта.
16. Принципы получения 2D и 3D изображений объектов.

Примеры билетов:

Билет 1.

1. Механизм поглощения фотона в двухуровневой системе. Испускание фотона. Спонтанное и вынужденное излучение.
2. Равновесное и неравновесное излучение. Вывод формулы Планка.

Билет 2.

1. Что такое резонансное поглощение фотона атомом (двухуровневой системой)?
2. Что такое спонтанное и вынужденное излучение? Что такое нулевые колебания поля?

## Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

## 5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Дифференцированный зачёт проводится в устной форме по билетам. В каждом билете представлено два теоретических вопроса. При проведении зачёта и экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку.

Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.