

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

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы  
электроники, фотоники и  
молекулярной физики  
А.С. Батурин**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Методы печатной электроники
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: электроника и квантовые технологии Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра нанометрологии и наноматериалов
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 0 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: В.В. Иванов, д-р физ.-мат. наук, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедры нанометрологии и наноматериалов 22.01.2024

## Аннотация

Дисциплина «Методы печатной электроники» предназначена для формирования у обучающихся специализированных представлений о технологических подходах, принципах функционирования оборудования, материалах печатной электроники и сферах применения. Курс включает в себя понятия технологий и устройств печатной электроники, типов и способов приготовления чернил для устройств печати, основные типы полупроводниковых материалов нового поколения для изготовления активных элементов электроники, материалы для формирования прозрачных электродов оптоэлектронных устройств методами печати. Задачей дисциплины является: углубление базовых и формирование специализированных знаний и представлений о принципах технологий печатной электроники, основных типах устройств печати и принципах их работы, об основных типах материалах, используемых для изготовления активных элементов печатной электроники.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

Формирование у обучающихся специализированных представлений о технологических подходах, принципах функционирования оборудования, материалах печатной электроники и сферах применения. Курс включает в себя понятия технологий и устройств печатной электроники, типов и способов приготовления чернил для устройств печати, основные типы полупроводниковых материалов нового поколения для изготовления активных элементов электроники, материалы для формирования прозрачных электродов оптоэлектронных устройств методами печати.

### Задачи дисциплины

Углубление базовых и формирование специализированных знаний и представлений о принципах технологий печатной электроники, основных типах устройств печати и принципах их работы, об основных типах материалах, используемых для изготовления активных элементов печатной электроники.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
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
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

- принципы, лежащие в основе работы устройств печатной электроники;
- подходы к разработке чернил для печати принтерами;
- теоретические основы методов аттестации и исследования полупроводниковых материалов для печатной электроники;
- достоинства и недостатки различных полупроводниковых материалов для печатной электроники;
- основные поисковые системы, базы данных и ведущие периодические издания по печатной электронике.

уметь:

- различать основные виды полупроводниковых материалов для печатной электроники;
- объяснять принципы работы различных устройств печатной электроники, выбирать тип устройства для конкретных задач, - характеризовать и анализировать результаты печати;
- рационально сочетать различные методы аттестации и исследования материалов для печатной электроники;
- оценивать целесообразность применения полупроводниковых и металлических материалов исходя из физико-химических и технических характеристик;
- анализировать научную литературу с целью выбора информации о работе, перспективах и характеристиках различных технологий печати, оценивать перспективы развития новых видов устройств печати, подбирать полупроводниковые и другие необходимые материалы для печати активных элементов электроники.

владеть:

- основными теориями и концепциями, описывающими принципы работы устройств печатной электроники;
- основными методами характеристики полупроводниковых и других материалов для печати активных элементов электроники;
- навыками моделирования процессов, происходящих в устройствах печатной электроники;
- навыками к интерпретации и обсуждения результатов проведенного исследования, основываясь на современной литературе по технологиям и устройствам печатной электроники.

#### 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	Введение в печатную электронику. Место и тенденции развития печатной электроники в области микроэлектронике		2		2
2	Свойства наноразмерных объектов, проявляемые в составе чернил (жидких дисперсий)		4		4
3	Бесконтактные методы печати: струйная печать		4		4
4	Бесконтактные методы печати: аэрозольная струйная печать		2		2
5	Бесконтактные методы печати: прямой лазерный перенос материала (ПЛП)		2		2
6	Наноимпринтная литография. Особенности формирования заданного рисунка с помощью штампа		2		2
7	Материалы печатной электроники - углеродные нанотрубки (УНТ)		2		2

8	Материалы печатной электроники - графен		2		2
9	Неорганические полупроводники в печатной электронике		4		4
10	Полупроводниковые нанокристаллы, свойства и применения		2		2
11	Оптика металлических наноструктур: наноплазмоника		2		2
12	Прозрачные проводники для оптоэлектронных приборов, основные требования		2		2
Итого часов			30		30
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

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

##### Семестр: 2 (Весенний)

##### 1. Введение в печатную электронику. Место и тенденции развития печатной электроники в области микроэлектронике

Классификация методов печатной электроники. Ключевые процессы технологий печатной электроники: конструирование и приготовление чернил разного типа, реализация процессов печати на подложках, постобработка напечатанных структур. Области применений методов печати для создания элементов микроэлектроники

##### 2. Свойства наноразмерных объектов, проявляемые в составе чернил (жидких дисперсий)

Виды жидких дисперсий и методы их характеристики. Понятия двойного электрического слоя и  $\zeta$  –потенциала частиц в жидких дисперсиях. Методы диспергирования и стабилизации жидких дисперсий. Методы измерений  $\zeta$  –потенциала и распределения наночастиц по размерам в составе дисперсий: акустическая спектроскопия, динамическое рассеяние света

##### 3. Бесконтактные методы печати: струйная печать

Виды устройств струйной печати по режимам выброса жидкости: непрерывная печать, печать по требованию. Принципы печати по требованию с термическим и пьезоэлектрическим активатором печати. Параметры, определяющие качество струйной печати: поверхностное натяжение, инерция и вязкость чернил. Приемы предотвращения эффекта «кофейного пятна». Основные технические характеристики струйных принтеров. Варианты применений струйной печати

##### 4. Бесконтактные методы печати: аэрозольная струйная печать

Преимущества метода аэрозольной струйной печати: производить печать на поверхности со сложным рельефом, малая ширина аэрозольного потока чернил - до 10 микрон, широкий диапазон вязкости чернил. Способы формирования аэрозольного потока микронных капель чернил. Принципы управления диаметром печатающей аэрозольной струи чернил. Взаимодействие аэрозольной струи с подложкой. Основные технические характеристики аэрозольных струйных принтеров, варианты применений

##### 5. Бесконтактные методы печати: прямой лазерный перенос материала (ПЛП)

Инициирование процесса переноса материала сфокусированным лазерным лучом. Вариант обратного лазерного переноса материала. Лазерный перенос нанорельефа. Формирование электронных устройств методом ПЛП. Одноэтапная печать полного транзисторного устройства. Печать методом ПЛП органических светоизлучающих диодов. Прямое лазерное письмо (DLW). Применение DLW для формирования элементов фотонных устройств

#### 6. Наноимпринтная литография. Особенности формирования заданного рисунка с помощью штампа

Два основных типа процесса наноимпринтной литографии, сравнительная характеристика: на основе использования УФ-излучения, термическое или горячее тиснение. Требования к штампам. Процесс обратной наноимпринтной литографии. Рулонная наноимпринтная литография. Толщина и однородность остаточного слоя, точность отпечатка, контроль дефектов. Контролируемое нанесение резиста с использованием струйной печати. Краевые эффекты при работе литографа. Сравнение наноимпринтной литографии с другими видами литографий. Спектр применений наноимпринтной литографии.

#### 7. Материалы печатной электроники - углеродные нанотрубки (УНТ)

Основные свойства и структуры УНТ. Ключевые методы исследования УНТ: просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ), сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), атомно-силовая микроскопия (АСМ), спектроскопия комбинационного рассеяния (рамановская), рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС), термогравиметрический анализ (ТГА). Хиральность УНТ, особенности структуры УНТ металлического и полупроводникового типа. Методы синтеза и очистки УНТ, выделение полупроводниковой фракции. Полевой транзистор на основе полупроводниковых УНТ.

#### 8. Материалы печатной электроники - графен

Графен в ряду аллотропных форм углерода. Электронная структура и физические свойства графена. Методы исследования графена. Методы получения графена: микромеханическое расщепление, эпитаксиальный метод, CVD синтез на Ni, расщепление УНТ. Электрофизические свойства, управление концентрацией носителей заряда. Полевые транзисторы и сенсоры на основе графена, способы создания запрещенной зоны. Универсальность фотопоглощения графена. Области применений графена

#### 9. Неорганические полупроводники в печатной электронике

Типы неорганических полупроводников: монокристаллические наноленты и нанопроволоки Si, GaAs, GaN, InAs и др., металл-оксидные полупроводники InGaZnO, Халькогениды металлов: MoS<sub>2</sub>, MoSe<sub>2</sub> и др. Методы изготовления нанолент и нанопроволок из монокристалла и выращивания нанопроволок и нанопластин. Методы печати нанообъектов с высокой производительностью. Печать транзисторов на гибкой подложке. Полевые транзисторы n- InGaZnO.

#### 10. Полупроводниковые нанокристаллы, свойства и применения

Типы квантоворазмерных структур: квантовые ямы, квантовые нити, квантовые точки. Коллоидные квантовые точки, зависимость энергетического спектра квантовой точки от ее размера. Форма квантовых точек, многокомпонентные квантовые точки. Спектральные квантово-размерные свойства нанокристаллов: спектры поглощения и люминесценции. Флуоресцентный блиннинг квантовых точек. Синтез квантовых точек в форме монодисперстных коллоидных нанокристаллов. Ферстеровский резонансный перенос энергии. Применение коллоидных наноструктур в фотонике, светодиодах, фотоэлементах, лазерах.

#### 11. Оптика металлических наноструктур: наноплазмоника

Зоны локальной концентрации ЭМ поля на плазмонной металлической структуре - «горячие точки». Рассеяние фотонов и спонтанное испускание фотонов. Применения плазмонных наноструктур в фотонике: фильтры, светодиоды, фотодетекторы, сенсоры, фотовольтаика, спектроскопия комбинационного рассеяния. Усиление излучения белого светодиода наночастицами металла. Открытие гигантского комбинационного рассеяния. Плазмонные структуры из наночастиц алюминия для УФ диапазона.

## 12. Прозрачные проводники для оптоэлектронных приборов, основные требования

Виды материалов для прозрачных проводников: широкозонные полупроводники с проводимостью n- или p-типа, прозрачные ультратонкие металлические слои, 2D-материалы (графен и аналоги), длинномерные металлические нанопроволоки и УНТ. Основные характеристики прозрачных проводников: прозрачность и слоевое сопротивление – для разных материалов. Формирование прозрачных электродов методами печати.

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

учебная аудитория, оснащенная мультимедиа проектором и экраном.

## 6. Перечень рекомендуемой литературы

### Основная литература

1. Applications of Organic and Printed Electronics. A Technology-Enabled Revolution. Editor - Eugenio Cantatore. Springer Boston Heidelberg New York Dordrecht London. -2013, DOI 10.1007/978-1-4614-3160-2, 186 p.
2. Introduction to Nanophotonics. S.V. Gaponenko. Cambridge University Press, 2010, 485 p.
3. Неорганические наноматериалы. Э.Г. Раков. Бином-2013, 477 с.

### Дополнительная литература

1. К.Б. Фрицлер, В.Я. Принц. Методы трёхмерной печати микро- и наноструктур. УФН, 189 (2019), 55–71, DOI:10.3367/UFNr.2017.11.038239
2. Химия новых материалов и нанотехнологии. Б. Фахльман (Перевод под ред. Третьякова Ю.Д., Гудилина Е.А.) "Интеллект"-2011, Долгопрудный, 464 с.
3. Wiklund, J., et al. A Review on Printed Electronics: Fabrication Methods, Inks, Substrates, Applications and Environmental Impacts. J. Manuf. Mater. Process. 2021, 5, 89. <https://doi.org/10.3390/jmmp5030089>
4. Chandrasekaran, S.; Jayakumar, A.; Velu, R. A Comprehensive Review on Printed Electronics: A Technology Drift towards a Sustainable Future. Nanomaterials 2022, 12, 4251. <https://doi.org/10.3390/nano12234251>
5. C. Hanumanth Rao., et al. A Review on Printed Electronics with Digital 3D Printing: Fabrication Techniques, Materials, Challenges and Future Opportunities. Journal of Electronic Materials (2022) 51:2747–2765, <https://doi.org/10.1007/s11664-022-09579-7>

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

1. <http://www.elsevier.com>
2. <http://www.elibrary.ru>
3. <http://www.books.google.ru>

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

на занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

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

Студент, прослушавший курс занятий, должен овладеть общим понятийным аппаратом и научиться применять теоретические знания на практике.

Успешное освоение курса требует:

- 1) посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом; ведение конспектов занятий; активное участие в обсуждении тем;
- 2) важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультацией к преподавателю

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: электроника и квантовые технологии Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра нанометрологии и наноматериалов
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен	
<b>Разработчик:</b>	В.В. Иванов, д-р физ.-мат. наук, профессор

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
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
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Методы печатной электроники» обучающийся должен:

### знать:

- принципы, лежащие в основе работы устройств печатной электроники;
- подходы к разработке чернил для печати принтерами;
- теоретические основы методов аттестации и исследования полупроводниковых материалов для печатной электроники;
- достоинства и недостатки различных полупроводниковых материалов для печатной электроники;
- основные поисковые системы, базы данных и ведущие периодические издания по печатной электронике.

### уметь:

- различать основные виды полупроводниковых материалов для печатной электроники;
- объяснять принципы работы различных устройств печатной электроники, выбирать тип устройства для конкретных задач, - характеризовать и анализировать результаты печати;
- рационально сочетать различные методы аттестации и исследования материалов для печатной электроники;
- оценивать целесообразность применения полупроводниковых и металлических материалов исходя из физико-химических и технических характеристик;
- анализировать научную литературу с целью выбора информации о работе, перспективах и характеристиках различных технологий печати, оценивать перспективы развития новых видов устройств печати, подбирать полупроводниковые и другие необходимые материалы для печати активных элементов электроники.

### владеть:

- основными теориями и концепциями, описывающими принципы работы устройств печатной электроники;
- основными методами характеристики полупроводниковых и других материалов для печати активных элементов электроники;
- навыками моделирования процессов, происходящих в устройствах печатной электроники;
- навыками к интерпретации и обсуждения результатов проведенного исследования, основываясь на современной литературе по технологиям и устройствам печатной электроники.

## 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 по теме предыдущего занятия

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

## Вопросы к экзамену:

1. Свойства наноразмерных объектов, проявляемые в составе чернил (жидких дисперсий).
2. Бесконтактные методы печати: струйная печать.
3. Бесконтактные методы печати: аэрозольная струйная печать.
4. Бесконтактные методы печати: прямой лазерный перенос материала (ПЛП).
5. Наноимпринтная литография. Особенности формирования заданного рисунка с помощью штампа.
6. Материалы печатной электроники - углеродные нанотрубки (УНТ).
7. Материалы печатной электроники - графен.
8. Неорганические полупроводники в печатной электронике.
9. Полупроводниковые нанокристаллы, свойства и применения.
10. Оптика металлических наноструктур: наноплазмоника.
11. Прозрачные проводники для оптоэлектронных приборов, основные требования.

## Примеры экзаменационных билетов.

### Пример 1.

1. Материалы печатной электроники - графен.
2. Бесконтактные методы печати: струйная печать.

### Пример 2.

1. Наноимпринтная литография. Особенности формирования заданного рисунка с помощью штампа.
2. Прозрачные проводники для оптоэлектронных приборов, основные требования.

## 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**

При проведении устного экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Вопрос обучающегося по билету не должен превышать одного часа.