

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

УТВЕРЖДЕНО

**Директор физтех-школы
электроники, фотоники и
молекулярной физики**

В.В. Иванов

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Структурные формы углерода
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Физика перспективных технологий: альтернативная энергетика, научное программирование и функциональные материалы Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра физики и химии наноструктур
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

1 (осенний) - Дифференцированный зачет

2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 0 час.

семинары: 60 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

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

Программа обсуждена на заседании кафедры физики и химии наноструктур 29.05.2020

Аннотация

Курс "Структурные формы углерода" предусматривает ознакомление студентов с методами получения углеродных структур и рассмотрение причин формирования различных форм углерода, в частности нанотрубок.

Задачи курса:

- формирование базовых знаний в области физического материаловедения как дисциплины, интегрирующей общезначимую и общетеоретическую подготовку физиков и обеспечивающей технологические основы современных инновационных сфер деятельности;
- изучение способов получения одностенных углеродных нанотрубок;
- приобретение практических умений и навыков в организации экспериментального и теоретического исследования в области получения углеродных нанотрубок в зависимости от применения различных катализаторов.

Основное содержание курса изложено в следующих разделах:

1. Множество структурных форм углерода
2. Однослойные нанотрубки - SWNT
3. Получение углеродных нанотрубок в процессе разложения CO
4. Углеродные специфические частицы
5. Новые перспективные методы роста углеродных материалов
6. Получение нанотрубок различными методами

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- ознакомление студентов с методами получения углеродных структур и рассмотрение причин формирования различных форм углерода, в частности нанотрубок.

Задачи дисциплины

- формирование базовых знаний в области физического материаловедения как дисциплины, интегрирующей общезначимую и общетеоретическую подготовку физиков и обеспечивающей технологические основы современных инновационных сфер деятельности;
- изучение способов получения одностенных углеродных нанотрубок;
- приобретение практических умений и навыков в организации экспериментального и теоретического исследования в области получения углеродных нанотрубок в зависимости от применения различных катализаторов.

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:

место и роль общих вопросов науки в научных исследованиях;
современные проблемы физики, химии, математики;
теоретические модели фундаментальных процессов и явлений в физике и ее приложениях;
принципы симметрии и законы сохранения;
новейшие открытия естествознания;
постановку проблем физико-химического моделирования;
о взаимосвязях и фундаментальном единстве естественных наук;
новые перспективные методы роста углеродных материалов.

уметь:

эффективно использовать на практике теоретические компоненты науки: понятия, суждения, умозаключения, законы;
представить панораму универсальных методов и законов современного естествознания;
работать на современном экспериментальном оборудовании;
абстрагироваться от несущественных влияний при моделировании реальных физических ситуаций;
планировать оптимальное проведение эксперимента.

владеть:

планированием, постановкой и обработкой результатов физического эксперимента;
научной картиной мира;
навыками самостоятельной работы в лаборатории на современном экспериментальном оборудовании;
математическим моделированием физических задач.

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	Множество структурных форм углерода		6		5
2	Однослойные нанотрубки – SWNT		10		4
3	Получение углеродных нанотрубок в процессе разложения СО		10		3
4	Углеродные сферические частицы		4		3
5	Новые перспективные методы роста углеродных материалов		15		15
6	Получение нанотрубок различными методами		15		15
Итого часов			60		45
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

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

Семестр: 1 (Осенний)

1. Множество структурных форм углерода

Гомоядерные связи. sp-гибридизация. Структурные формы углерода за счет включения гептагонов, пентагонов и т.д. Аллотропные формы углерода: алмаз, графит, карбин. Классификация по Хейману с соавторами: первая и вторая группы. «Фазовая» диаграмма углеродных форм. Промежуточные формы углерода из подгруппы А и из подгруппы В. Различные углеродные формы в газовой и твердой фазе. Структуры сложной формы: цепочки из наночастиц, спиральные нанотрубки и нити, закрученные нанотрубки, bamboo-shaped нанотрубки, конусы и конические нанотрубки, геликоидальные и тороидальные структуры. Использование катализаторов. Bead-like структуры.

2. Однослойные нанотрубки – SWNT

Свойства SWNT. Способ получения SWNT. Arc-метод получения. Области применения SWNT. Механизм зародышеобразования и роста. Методы получения одностойных нанотрубок: электродуговой, лазерный, разложение углеводородов и CO, метод пульсирующего электроразряда. Наличие металлического катализатора. Характеристики arc метода. Принципиальная схема установки метода лазерного облучения. Характеристика метода лазерного облучения. Схема устройства метода разложения углеводорода. Схема устройства пиролиза с катализатором Fe(CO)₅. Приготовление катализатора. Параметры методов CVD. Безкатализаторные методы синтеза SWNT. Катализаторы и активаторы. Виды катализаторов, процентное соотношение, исходное состояние металла-катализатора.

Методы исследования: рамановская спектроскопия, рентгеновская дифракция, электронная дифракция, ИК спектроскопия.

Морфология углеродных осадков и микроструктура SWNT. Роль давления газа в arc- методе, в laser методе, при CVD методе. Оптимальные температуры роста нанотрубок. Схемы методов синтеза SWNT. Зависимости интенсивности излучения лазера и температуры окружающей среды и давления на получение SWNT. Механизмы роста SWNT: рост по механизму ПЖК, рост с катализаторами из редкоземельных элементов, рост при одновременном испарении и соконденсации атомов углерода и металла-катализатора. Механизмы роста при лазерном облучении. Получение длинных трубок и формирование окончательных структур в виде связок и ниток.

3. Получение углеродных нанотрубок в процессе разложения CO

Получение углеродных нанотрубок в процессе разложения CO. Преимущества этого метода. Исследования реакции Будуара. Катализаторы.

Механизм каталитического роста нанотрубок. Катализаторы – металлы. Исследования реакции Будуара методами атмосферного давления, методом высокого давления. Механизм каталитического роста нанотрубок. Превращение CO. Состав и расход газовой смеси. Катализаторы: размер и форма частиц, химический состав. Применяемые катализаторы. Повышение активности катализатора. Соотношение углерод/металл. Предварительные экспериментальные результаты: эксперименты при высоком давлении, эксперименты в кварцевом реакторе. Анализ результатов. Стратегия роста нанотрубок под высоким давлением.

4. Углеродные сферические частицы

Углеродные сферические частицы (Carbon onions, nanocapsules, carbon spheres). Возникновение «онионов». Методы получения онионов. Электронное облучение аморфных нитей, ленточных структур, нанотрубок и наночастиц, алмазных частиц. BN и BCN материалов. Сферические онионы. Нестабильность онионов. Облучение метастабильной формы углерод – алмаз. Закономерности превращения алмаза в графит. Получение nanocapsules. Карбонизация в присутствии катализатора из оксидов с переменной валентностью.

Семестр: 2 (Весенний)

5. Новые перспективные методы роста углеродных материалов

Методы роста с использованием жидких углеродсодержащих прекурсоров: метод на подаче паров жидкого углеводорода и катализатора в потоке несущего газа в реакционную зону трубчатой печи, метод стационарного размещения катализатора, метод синтеза непосредственно в жидком прекурсор. Метод плавающего катализатора: схемы метода spraying, схема метода pumping, раздельная подача паров углеводородов и паров катализатора. Метод со стационарным размещением катализатора и его схема. Синтез в жидкой фазе. Методы роста с использованием твердых углеродсодержащих прекурсоров. Синтез с использованием углеродного порошка. Термообработка сахарозы без катализатора. Термическое разложение камфоры – $C_{10}H_{16}O$: Жидкие углеродсодержащие прекурсоры. Результаты экспериментов с различными прекурсорами в методах floating (spray), floating (nebulized spray), floating, floating (pumping), floating (раздельная подача) стационарное размещение катализатора. Выводы.

6. Получение нанотрубок различными методами

Рост между лазерными следами. Рост из нанопор подложки. Состав и структура подложки. Рост нанотрубок на подложке из пористого кремния. Рост перпендикулярно гладкой поверхности подложки. Рост нанотрубок методом PE-HF-CVD. Рост с использованием теневой маски на пористой поверхности подложки. Рост в потоке газа. Параметры процесса. Схема метода роста в потоке газа. Рост на поверхности кристалла SiC при его сублимации в вакууме (без катализатора). Темплетный метод роста при пиролизе углеводородов в прямых каналах пористых оксидных мембран без катализатора.

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

учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Лозовик Ю.Н., Попов А.М. Успехи физических наук. Т 167, № 7, 751-774, 1997.
2. Иванова В.С. и др. Перспективные материалы, № 1, 5–14, 1998.
3. Раков Э.Г. Успехи химии, 70 (10), 934-973, 2001.

Дополнительная литература

1. Елецкий А.В. Успехи физических наук. Т. 167, № 7, 945–981, 1997.
2. Ивановский А.Л. Успехи химии. Т.68, 119–135, 1999.
3. Елецкий А.В., Смиронов В.М. Успехи физических наук. Т. 165 977–998, 1995.
4. Касановский З.Я. и др. Письма в ЖЭТФ. Т.56, 26–30, 1992.
5. Журналы по физике твердого тела (Физика твердого тела, Кристаллография, ЖТФ, Письма в ЖТФ, Physica Status Solidi b, Physical Review B и др.)

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

Обеспечение самостоятельной работы - базы данных по журналам Physica Status Solidi b, Physical Review, J.Appl.Phys., Science, Chem.Phys.Lett. и т.д.

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

не предусмотрены.

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

Студент, изучающий дисциплину, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения и понятия дисциплины, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

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)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Физика перспективных технологий: альтернативная энергетика, научное программирование и функциональные материалы Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра физики и химии наноструктур
курс:	<u>1</u>
квалификация:	магистр
Семестры, формы промежуточной аттестации:	
1 (осенний) - Дифференцированный зачет	
2 (весенний) - Экзамен	
Разработчик:	В.Д. Бланк, 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 «Структурные формы углерода» обучающийся должен:

знать:

место и роль общих вопросов науки в научных исследованиях;
современные проблемы физики, химии, математики;
теоретические модели фундаментальных процессов и явлений в физике и ее приложениях;
принципы симметрии и законы сохранения;
новейшие открытия естествознания;
постановку проблем физико-химического моделирования;
о взаимосвязях и фундаментальном единстве естественных наук;
новые перспективные методы роста углеродных материалов.

уметь:

эффективно использовать на практике теоретические компоненты науки: понятия, суждения, умозаключения, законы;
представить панораму универсальных методов и законов современного естествознания;
работать на современном экспериментальном оборудовании;
абстрагироваться от несущественных влияний при моделировании реальных физических ситуаций;
планировать оптимальное проведение эксперимента.

владеть:

планированием, постановкой и обработкой результатов физического эксперимента;
научной картиной мира;
навыками самостоятельной работы в лаборатории на современном экспериментальном оборудовании;
математическим моделированием физических задач.

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.

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

Перечень контрольных вопросов для сдачи дифференцированного зачета:

- 1) Гомоядерные связи. sp-гибридизация.
- 2) Структурные формы углерода за счет включения гептагонов, пентагонов и т.д.
- 3) Аллотропные формы углерода: алмаз, графит, карбин.

- 4) Классификация по Хейману с соавторами: первая и вторая группы. «Фазовая» диаграмма углеродных форм.
- 5) Промежуточные формы углерода из подгруппы А и из подгруппы В.
- 6) Различные углеродные формы в газовой и твердой фазе.
- 7) Структуры сложной формы: цепочки из наночастиц, спиральные нанотрубки и нити, закрученные нанотрубки, bamboo-shaped нанотрубки, конусы и конические нанотрубки, геликоидальные и тороидальные структуры.
- 8) Использование катализаторов. Bead-like структуры.
- 9) Углеродные сферические частицы (Carbon onions, nanocapsules, carbon spheres).
- 10) Возникновение «онионов». Методы получения онионов. Сферические онионы.
- 11) Нестабильность онионов.
- 12) Электронное облучение аморфных нитей, ленточных структур, нанотрубок и наночастиц, алмазных частиц. BN и BCN материалов.
- 13) Облучение метастабильной формы углерод – алмаз.
- 14) Закономерности превращения алмаза в графит. Получение nanocapsules.
- 15) Карбонизация в присутствии катализатора из оксидов с переменной валентностью.
- 16) Свойства SWNT. Способ получения SWNT. Arc-метод получения.
- 17) Области применения SWNT.
- 18) Методы получения одностойных нанотрубок: электродуговой, лазерный, разложение углеводородов и CO, метод пульсирующего электроразряда.
- 19) Наличие металлического катализатора. Характеристики arc метода.
- 20) Принципиальная схема установки метода лазерного облучения.
- 21) Характеристика метода лазерного облучения.
- 22) Схема устройства метода разложения углеводорода.
- 23) Схема устройства пиролиза с катализатором Fe(CO)₅
- 24) Приготовление катализатора. Параметры методов CVD. Безкатализаторные методы синтеза SWNT. Катализаторы и активаторы. Виды катализаторов, процентное соотношение, исходное состояние металла-катализатора.

Перечень контрольных вопросов для сдачи экзамена:

1. Морфология углеродных осадков и микроструктура SWNT. Роль давления газа в arc- методе, в laser методе, при CVD методе.
2. Схемы методов синтеза SWNT.
3. Зависимости интенсивности излучения лазера и температуры окружающей среды и давления на получение SWNT.
4. Механизмы роста SWNT: рост по механизму ПЖК, рост с катализаторами из редкоземельных элементов, рост при одновременном испарении и соконденсации атомов углерода и металла-катализатора.
5. Механизмы роста при лазерном облучении.
6. Получение длинных трубок и формирование окончательных структур в виде связок и ниток.
7. Методы исследования: рамановская спектроскопия, рентгеновская дифракция, электронная дифракция, ИК спектроскопия.
8. Получение углеродных нанотрубок в процессе разложения CO. Преимущества этого метода.
9. Механизм каталитического роста нанотрубок. Катализаторы – металлы.
10. Исследования реакции Булуара методами атмосферного давления, методом высокого давления.
11. Механизм каталитического роста нанотрубок.
12. Превращение CO. Состав и расход газовой смеси. Катализаторы: размер и форма частиц, химический состав. Применяемые катализаторы. Повышение активности катализатора.
13. Соотношение углерод/металл. Предварительные экспериментальные результаты: эксперименты при высоком давлении, эксперименты в кварцевом реакторе. Анализ результатов.
14. Стратегия роста нанотрубок под высоким давлением
15. Рост между лазерными следами. Рост из нанопор подложки. Состав и структура подложки. Рост нанотрубок на подложке из пористого кремния. Рост перпендикулярно гладкой поверхности подложки.

16. Рост нанотрубок методом PE-HF-CVD. Рост с использованием теневой маски на пористой поверхности подложки. Рост в потоке газа.
17. Параметры процесса. Схема метода роста в потоке газа.
18. Темплетный метод роста при пиролизе углеводородов в прямых каналах пористых оксидных мембран без катализатора.
19. Методы роста с использованием жидких углеродсодержащих прекурсоров: метод на подаче паров жидкого углеводорода и катализатора в потоке несущего газа в реакционную зону трубчатой печи, метод стационарного размещения катализатора, метод синтеза непосредственно в жидком прекурсор.
20. Метод плавающего катализатора: схемы метода spraying, схема метода pumping, отдельная подача паров углеводородов и паров катализатора.
21. Метод со стационарным размещением катализатора и его схема. Синтез в жидкой фазе.
22. Методы роста с использованием твердых углеродсодержащих прекурсоров. Синтез с использованием углеродного порошка.
23. Термообработка сахарозы без катализатора.
24. Термическое разложение камфоры – C₁₀H₁₈O
25. Результаты экспериментов с различными прекурсорами в методах floating (spray), floating (nebulized spray), floating, floating (pumping), floating (отдельная подача) стационарное размещение катализатора

Примеры экзаменационных билетов.

Пример 1.

1. Механизмы роста SWNT: рост по механизму ПЖК, рост с катализаторами из редкоземельных элементов, рост при одновременном испарении и соконденсации атомов углерода и металла-катализатора.
2. Термообработка сахарозы без катализатора.

Пример 2.

1. Механизм каталитического роста нанотрубок.
2. Превращение СО. Состав и расход газовой смеси. Катализаторы: размер и форма частиц, химический состав. Применяемые катализаторы. Повышение активности катализатора.

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 бала - 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 бала - 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 бала - 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 бал - 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 дифференцированного зачета и экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном дифференцированном зачете и экзамене не должен превышать одного астрономического часа.