

**федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»**



**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по научно-организационной  
деятельности

Ю.С. Ключков

«14» апрель 2022 г.

## **ПРОГРАММА**

**вступительного испытания  
по специальной дисциплине**

**для поступающих на обучение по программам подготовки  
научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре**

**научная специальность**

**2.2.3. Технология и оборудование для производства материалов и  
приборов электронной техники**

Санкт-Петербург

2022

Руководитель ОП

к.т.н, доцент

О. В. Кочнева

Составители:

к.х.н.

И. А. Тюрикова

д.х.н., профессор

С. Е. Александров

к.х.н., доцент

А. В. Семенча

Программа рассмотрена и рекомендована к изданию Научно-техническим советом (протокол № 5 от «21» марта 2022 г.).

## **1. Область применения и нормативные ссылки**

Программа вступительного испытания сформирована на основе федеральных государственных требований по программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре и порядка приема на обучение по образовательным программам высшего образования - программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре.

## **2. Структура вступительного экзамена**

Программа вступительного испытания сформирована на основе федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования по программам специалитета или магистратуры.

Программа содержит перечень тем (вопросов) по специальной дисциплине соответствующей научной специальности 2.6.6 – Нанотехнологии и наноматериалы.

Вступительное испытание по специальной дисциплине состоит из двух блоков:

- теоретический экзамен, проводимый очно в письменной и/или устной форме (максимальный балл – 100);

- портфолио (максимальный балл – 100).

Минимальное количество баллов для теоретического экзамена составляет 50 баллов.

При получении по теоретическому экзамену результата ниже минимального балла, портфолио не рассматривается и не суммируется с результатом теоретического экзамена.

### **2.1. Оценка индивидуальных достижений. Структура портфолио**

Максимальная возможная оценка за индивидуальные достижения (портфолио) составляет 100 баллов.

Для участия в конкурсе оценки индивидуальных достижений (портфолио) абитуриент может представить следующие документы, подтверждающие его достижения:

а. Доклады на международных и российских конференциях, научных семинарах, научных школах и т.д. по направлению будущего диссертационного исследования. Подтверждается представлением программы конференции, диплома (сертификата) участника.

б. Опубликованные или принятые к публикации научные работы (статьи, доклады в сборниках докладов). Подтверждается представлением электронных копий подлинников, ссылкой на открытые источники, справкой из редакции о принятии к публикации с обязательным указанием номера журнала и страниц. Публикации должны относиться к тому же направлению, что и тема будущего диссертационного исследования.

с. Свидетельства о государственной регистрации программ и баз данных, патенты на изобретения, патенты на полезные модели, и проч.

д. Участие в научно-исследовательских проектах, академических грантах. Подтверждается данными проекта (название, номер гранта, фонд), контактными данными руководителя проекта и краткой аннотацией (не более 200 слов), разъясняющей суть работы абитуриента.

**Перечень достижений портфолио, учитываемых при приеме на обучение**

№ п/п	Индивидуальное достижение	Подтверждающий документ	Количество баллов за каждое достижение
1.	<p>Научные публикации (тематика публикации должна соответствовать научной специальности, по которой поступающий участвует в конкурсе):</p> <p>в журналах перечня ВАК;</p> <p>в журналах индексируемых в Scopus и (или) WoS (в том числе входящих в базу данных RSCI) Q1 или Q2;</p> <p>в журналах индексируемых в Scopus и (или) WoS (в том числе входящих в базу данных RSCI) Q3 или Q4.</p>	Копия статьи с выходными данными журнала, DOI, URL	
			10
			25
			15
2.	Гранты, проекты по выполнению научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, тематика которых соответствует направлению подготовки в конкурсе, по которому участвует поступающий, и в которых он являлся:	Копия подписанного соглашения с грантодателем	
	руководителем		10
	исполнителем		5
3.	<p>Наличие документа, удостоверяющего авторство (соавторство) поступающего на достигнутый им научный (научно-методический, научно-технический, научно-творческий) результат интеллектуальной деятельности:</p> <p>– патент на изобретение;</p> <p>– патент на полезную модель;</p> <p>– свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ;</p> <p>– свидетельство о государственной регистрации базы данных;</p> <p>– свидетельство о государственной регистрации топологии интегральных микросхем.</p>	Копия патента или свидетельства	
			10
			7
			5
			5
			5

№ п/п	Индивидуальное достижение	Подтверждающий документ	Количество баллов за каждое достижение
4.	<p>Публикация в материалах международных и всероссийских научно-технических конференций, включая публикации в выпусках научных журналов, публикующих статьи по итогам конференций (изданиях типа Conference series и(или) Proceedings), проводимых не ранее чем за 2 года, предшествующих приему.</p> <p>Тематика публикации должна соответствовать научной специальности, по которой поступающий участвует в конкурсе:</p> <p>за конференцию, индексируемую в базе данных Web of Science и (или) Scopus (индексация сборника или журнала с публикацией подтверждается ссылкой или скриншотом из базы данных).</p> <p>за прочие конференции.</p>	Копии материалов конференций (тезисов докладов) с приложением титульных листов, DOI, URL (при наличии)	
			5
			3
5.	Наличие дипломов победителей мероприятий международного и всероссийского значения, подтверждающие успехи в профессиональной подготовке кандидата для поступления в аспирантуру.	Копия диплома	3

Оценка индивидуальных достижений проводится на собеседовании.

## 2.2. Структура и процедура проведения теоретического экзамена

Максимальная возможная оценка за теоретический экзамен составляет 100 баллов. Собеседование состоит из двух частей.

1) Ответ на вопросы в соответствии с научной специальностью будущей научно-исследовательской работы (диссертации).

Абитуриент выбирает билет, содержащий два вопроса из представленных в программе собеседования тем.

Абитуриенту предоставляется 30 минут на подготовку. В ходе ответа комиссия может задавать уточняющие вопросы.

2) Беседа по планируемому направлению исследований. Абитуриенту необходимо раскрыть следующие вопросы: предполагаемая тема научно-исследовательской работы, формулировка проблемы, цели ее исследования, новизна. В ходе ответа комиссия может задавать уточняющие вопросы.

## 2.3. Перечень тем для теоретического экзамена

### Полупроводники и материалы электронной техники

Основы кристаллографии. Симметрия кристаллов и анизотропия их свойств. Атомные и ионные радиусы. Химическая связь. Соотношение ионных радиусов и структура кристаллов. Типы структур кристаллов. Структура и симметрия идеальных и реальных кристаллов; основные типы дефектов кристаллической структуры. Политипизм и полиморфизм. Диэлектрические и магнитные свойства твердых тел, оптические свойства, ферромагнетизм, сегнетоэлектричество, сверхпроводимость.

Электрические свойства металлов, диэлектриков и полупроводников. Зонная теория идеальных и реальных полупроводников. Распределение Ферми-Дирака. Электропроводность металлов, полупроводников и диэлектриков и их физическая природа. Собственные и примесные полупроводники. Доноры, акцепторы, глубокие центры. Диффузия и дрейф носителей, генерация и рекомбинация, электронно-дырочный переход; поверхностные электронные состояния, эффект поля.

Элементарные полупроводники. Физико-химические и оптические свойства. Полупроводниковые соединения  $A^3B^5$ . Физико-химические, электрофизические и оптические свойства. Получение широкозонных материалов – нитриды галлия, алюминия, бора. Применение соединений  $A^3B^5$  в СВЧ-технике, оптоэлектронике, квантовой электронике. Полупроводниковые соединения  $A^2B^6$  и  $A^4B^4$ . Физико-химические, электрофизические и оптические свойства. Области применения кристаллов  $A^2B^6$ : лазеры, оптические модуляторы, акустоэлектронные приборы, ИК-фотоприемники. Аморфные полупроводники. Аморфный кремний и сплавы на его основе. Магнитные материалы. Металлы и сплавы, ферриты, магнитодиэлектрики, магнитные полупроводники., аморфные интерметаллические соединения.

Методы измерения электрических параметров полупроводников (подвижности, удельного сопротивления, концентрации носителей).

Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках. Поглощение и отражение света. Эффект Фарадея. Фотопроводимость. Фотоэффект. Эмиссия света из полупроводников. Межзонная излучательная, безизлучательная и ударная рекомбинация. Катодо-, фото- и электролюминесценция. Излучательная рекомбинация.

Поляризация диэлектриков и ее физическая сущность. Диэлектрические материалы, используемые в микроэлектронике. Неполярные и полярные диэлектрики. Проводимость диэлектриков и ее физическая природа. Диэлектрические потери и их природа.

Углеродные наноматериалы. Стабильные и метастабильные формы углерода. Фуллерены, их строение. Методы получения фуллеренов. Химическая связь в фуллеренах.

Углеродные нанотрубки. Структура трубок. Одностенные и многостенные трубки. Физико-химические основы методов получения нанотрубок: электродуговое испарение графита, лазерная абляция, каталитическое химическое осаждение из газовой фазы, плазмохимическое осаждение.

### Технологические процессы получения полупроводников и материалов электронной техники

Физико-химические основы процессов глубокой очистки веществ. Технологии глубокой очистки газов и жидкостей. Вещества особой степени чистоты.

Теоретические основы кристаллизационных методов очистки и выращивания монокристаллов. Элементарные процессы зародышеобразования и роста кристаллов.

Существующие теории роста на атомно-гладкой и атомно-шероховатой поверхности, теории нормального и послойного роста.

Методы выращивания объемных монокристаллов из жидкой фазы: метод Чохральского, зонная плавка, бестигельная зонная плавка, метод А. Бриджмена-Стокбаргера метод Киропулоса, метод Вернейля, гидротермальный метод. Методы выращивания объемных кристаллов из газовой фазы: кристаллизация из пара, процессы химического осаждения из газовой фазы, метод химических транспортных реакций.

Анализ Р-Т-Х диаграмм состояния систем, содержащих летучий компонент. Технологии выращивания монокристаллов полупроводниковых соединений, содержащих летучий компонент.

Нанокмпознты. Классификация нанокмпозитов (по химической природе матрицы, по химической природе, форме и характеру укладки наполнителей из наночастиц и др.). Методы получения нанокмпозитов *in situ* и *ex situ*.

Нанокмпознтные материалы на основе полимеров. Приготовление нанокмпозитов из нанопорошков. Взаимодействие между наночастицами и матрицей. Примеры нанокмпозитов: глина-полимер, углеродные нанотрубки-полимер и металл-полимер. Керамические материалы и нанокмпозиты. Зависимость свойств керамики от размера зерен. Получение керамики спеканием. Особенности спекания нанопорошков, связанные со снижением температуры фазовых превращений в наносистемах. Прессование с последующим спеканием, горячая экструзия и др. Использование взрывного и магнитно-импульсного прессования.

Получение нанокмпозитов путем заполнения пустот в нанопорошках материалом матрицы. Приготовление нанокмпозитов путем одновременного или многократного последовательного осаждения фаз. Сверхтвердые композиционные нанопокртыя. Магнитные жидкости.

### **Технологии и оборудование, используемые в производстве изделий электронной техники**

Процессы формирования наноструктур на подложках методами нанолитографии, ионными и атомными пучками, зондовыми методами.

Фоторезисты. Типы фоторезистов. Требования к фоторезистам. Разрешающая способность и химическая стойкость. Основные фототехнические характеристики фоторезистов. Позитивные и негативные фоторезисты. Фотохимические реакции в процессе фотолитографии. Материалы, используемые для производства фоторезистов и проведения процессов литографии. Резистивные материалы, используемые в электронной и рентгеновской литографии и их характеристики.

Оптическая литография (фотолитография). Оборудование оптической литографии (генераторы изображений, фотоповторители, установки совмещения и экспонирования и др.). Влияние дифракции и аббераций оптических систем на качество изображения. Методы машинного расчета влияния аббераций. Прецизионные системы координатных перемещений. Алгоритмы и программы расчета оптических систем и систем координатных перемещений. DUV-литография (литография глубокого ультрафиолета). HUV литография. Источники излучения, используемые в современной фотолитографии. Способы увеличения разрешающей способности (внеосевое освещение, коррекция эффекта близости, использование фазосдвигающих масок, двухслойных фоторезистов, двойного экспонирования и др.). Основные операции, осуществляемые при проведении фотолитографий.

Электронная и ионная литографии. Сущность и сравнительная характеристика электронно-лучевой и ионно-лучевой вариантов литографии. Классификация и принципиальные схемы электронно-лучевых и проекционных установок электронной литографии. Влияние различных факторов на качество изображения: аббераций, рассеяния электронов, эффектов близости и т. д. Конструкции, методы проектирования, расчета и моделирования основных узлов ТО электронной литографии: электронных пушек, систем формирования, переноса и отклонения пучков, систем совмещения, систем перемещения и позиционирования пластин. Современные проблемы и тенденции развития ТО электронной литографии.

Механическая литография. Литография на основе переноса рисунка путем механического впечатывания в термопластичный резист (imprint-литография). Основные проблемы метода и пути их решения.

Использование сканирующей зондовой микроскопии для создания поверхностных упорядоченных наноструктур. Основы процессов окисления, испарения, адсорбции, десорбции, осаждения, и травления, локализованных под зондами туннельного и атомно-силового микроскопов.

Методы получения материалов в виде тонких пленок.

Основы физических методов и технологий получения тонких пленок. Получение металлических пленок вакуум но-термическим осаждением. Уравнение Кнудсена. Испарение сплавов. Методы получения и измерения вакуума. Основные принципы метода получения пленок металлов испарением и конденсацией. Методы катодного, магнетронного, электронно-лучевого, ионно-лучевого осаждения распыления с последующим осаждением. Механизм распыления неорганических материалов.

Физико-химические основы химических методов осаждения тонких пленок. Химическое осаждение из газовой фазы. Кинетические режимы протекания процессов химического осаждения из газовой фазы. Химическое осаждение из газовой фазы при пониженных давлениях. Методы получения наноконпозиционных материалов химическим осаждением из газовой фазы. Осаждение в наноструктурированные матрицы. Плазмохимическое осаждение, в том числе в установках с удаленной плазмой. Эпитаксиальное химическое осаждение из газовой фазы.

Методы молекулярного наслаивания. Сущность и закономерности процессов молекулярного наслаивания. Получение сверхтонких пленок различных материалов и наноструктур методом молекулярного наслаивания. Синтетические возможности метода, способы и примеры осуществления.

Молекулярно-лучевая эпитаксия.

Золь-гель технология. Теоретические основы золь-гель метода. Получение наноматериалов золь-гель методом.

Основы электрохимических методов осаждения пленок.

Методы травления материалов электронной техники. Жидкостное травление и его применение в производстве приборов электронной техники.

Основы процессов низкотемпературного плазмохимического и ион но-плазменного травления. Получение этими методами поверхностных структур с высоким аспектным отношением.

Системы контроля и управления процессами обработки в технологическом оборудовании нанесения и травления материалов.



Физико-химические основы и технологические особенности процессов легирования полупроводников. Диффузионное легирование, особенности применения различных источников диффузانتов. Технология ионной имплантации. Технологии формирования омических контактов к Si, Ge и GaAs.

Методы механической обработки полупроводниковых материалов.

Технологии корпусирования.

Обеспечение и поддержание в чистых помещениях среды с заданными параметрами. Типы "чистых" помещений. Экологические аспекты субмикронной и нанотехнологии. Принципы организации чистых производственных помещений. Создание средств технологической гигиены при производстве материалов и приборов электронной техники. Кластерный принцип организации полупроводникового производства.

#### **Методы исследования и контроля материалов и приборов**

Рентгенофазовый и рентгеноструктурный анализ моно- и поликристаллов.

Методы исследования поверхностной морфологии материалов.

Методы исследования фазового и химического состава материалов

Оптические методы исследования. Инфракрасная спектрометрия. Эллипсометрия. Современная оптическая микроскопия.

Электронная растровая и просвечивающая электронная микроскопия. Ионный микроскоп. Туннельная и атомно-силовая микроскопия.

Инструментальные методы анализа материалов: Оже-спектроскопия, рентгенофлуоресцентный анализ, рентгеновский спектральный микроанализ, лазерная и вторично-но иная масс-спектрометрия.

### **2.4.Перечень вопросов для теоретического экзамена**

1. Основные технологии выращивания монокристаллов полупроводниковых материалов.
2. Вещества особой степени чистоты.
3. Методы исследования фазового и химического состава материалов.
4. Современное состояние оптической фотолитографии.
5. Полупроводниковые соединения  $A^{III}B^V$ ,
6. их свойства и области применения.
7. Методы исследования поверхностной морфологии материалов.
8. Основные модели, описывающие рост кристаллов.
9. Электронная литография.
10. Основы процессов диффузионного легирования.
11. Основы кристаллизационных методов очистки веществ.
12. Разрешающая способность оптической фотолитографии.
13. Типы "чистых" помещений. Принципы организации чистых производственных помещений.
14. Основные этапы фотолитографического процесса.
15. Методы измерения электрических параметров полупроводников (подвижности, удельного сопротивления, концентрации носителей).
16. Физические методы получения тонких пленок.
17. Основы процессов молекулярного наслаивания.
18. Диэлектрические материалы, используемые в микроэлектронике.
19. Виды плазмохимического травления.
20. Основы плазмохимических процессов осаждения пленок.

21. УФ литография сверхвысокого разрешения.
22. Методы получения и измерения вакуума.
23. Основы процессов химического осаждения из газовой фазы.
24. Получение газов высокой чистоты.
25. Основные типы фоторезистов, применяемых в производстве микроэлектронных устройств.
26. Жидкостное травление.
27. Механическая обработка полупроводниковых материалов.
28. Основные методы получения эпитаксиальных слоев.
29. Технологии получения поверхностных микроструктур с высоким аспектным отношением.
30. Магнетронное осаждение.
31. Технологии формирования омических контактов к GaAs.

### 2.5. Критерии оценки теоретического экзамена

Оценка знаний поступающего в аспирантуру производится по сто бальной шкале.

**100 баллов** выставляется экзаменационной комиссией за обстоятельный и обоснованный ответ на все вопросы экзаменационного билета и дополнительные вопросы членов экзаменационной комиссии. Поступающий в аспирантуру в процессе ответа на вопросы экзаменационного билета правильно определяет основные понятия, свободно ориентируется в теоретическом и практическом материале по предложенной тематике.

**75 баллов** выставляется поступающему в аспирантуру за правильные и достаточно полные ответы на вопросы экзаменационного билета, которые не содержат грубых ошибок и неточностей в трактовке основных понятий и категорий, но в процессе ответа возникли определенные затруднения при ответе на дополнительные вопросы членов экзаменационной комиссии.

**50 баллов** выставляется поступающему в аспирантуру при недостаточно полном и обоснованном ответе на вопросы экзаменационного билета и при возникновении серьезных затруднений при ответе на дополнительные вопросы членов экзаменационной комиссии.

**0 баллов** выставляется в случае отсутствия необходимых для ответа на вопросы экзаменационного билета теоретических и практических знаний.

На усмотрение комиссии возможно оценивание ответа абитуриента иным, промежуточным, количеством баллов в ситуациях, требующих того.

## 2.6. Список рекомендуемой литературы

1. Чистяков Ю. Д., Райнова Ю.П. Физико-химические основы технологии микроэлектроники. М.: Металлургия, 1979.
2. Раскин А.А., Картушина А.А., Баровский Н.В. Технология материалов электронной техники. М.: МИЭТ, 1999.
3. Будагян Б.Г., Шерченков А.А. Материалы твердотельной электроники. М.: МИЭТ, 1999.
4. Броудай И., Мерен Дж. Физические основы микротехнологии. М.: Мир, 1985.
5. Данилин Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. М.: Энергоатомиздат, 1989.
6. Данилин Б.С., Киреев В.Ю. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов. М.: Энергоатомиздат, 1987.
7. Кардона М. Основы физики полупроводников. М.: Физматлит, 2002.
8. Чистые помещения / Под ред. И. Хаякавы. М.: Мир, 1990.
9. Таиров Ю.М., Цветков В.Ф.. Технология полупроводниковых и диэлектрических материалов. М.: Высшая школа, 1983, 270 с.
10. Уфимцев В.Б., Лобанов А.А. Гетерогенные равновесия в технологии полупроводниковых материалов. М.: Металлургия, 1981, 215 с.
11. Михайлов М. Д. Современные проблемы материаловедения. Нанокompозитные материалы: учеб, пособие. СПб.: Изд-во Политехи, ун-та, 2010. 207 с.
12. Балкевич В.Л. Техническая керамика. Учеб, пособие для втузов. М.: Стройиздат. 1984. 256 с.
13. Картер С, Нортон М. Керамические материалы. Свойства, технологии, применения, пер. с англ. Издательский Дом «Интеллект». 2011
14. Баженов С.Л., Берлин А.А., Кульков А.А., Ошмян В.Г. Полимерные композиционные материалы. Прочность и технология. Издательский Дом «Интеллект». 2010. 352 с.
15. Чаплыгин Ю.А. Нанотехнологии в электронике - 3, 1 / Ю.А. Чаплыгин. - М.: Техносфера, 2016. - 480 с.
16. Dielectric Polymer Nanocomposites. Hditor J. Keilh Nelson. Springer Science+Business Media, LLC. 2010. 368 p.

## Приложение

### Сведения об достижениях портфолио кандидата для поступления по программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре СПбПУ

_____ (Ф.И.О. кандидата для поступления в аспирантуру)			
_____ (научная специальность)			
№ п/п	Индивидуальное достижение	Количество баллов за каждое достижение	Рейтинговая оценка показателя, общий балл
1.	Научные публикации (тематика публикации должна соответствовать научной специальности, по которой поступающий участвует в конкурсе): в журналах перечня ВАК;	10	
	в журналах индексируемых в Scopus и (или) WoS (в том числе входящих в базу данных RSCI) Q1 или Q2;	25	
	в журналах индексируемых в Scopus и (или) WoS (в том числе входящих в базу данных RSCI) Q3 или Q4.	15	
2.	Гранты, проекты по выполнению научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, тематика которых соответствует направлению подготовки в конкурсе, по которому участвует поступающий, и в которых он являлся:  руководителем,	10	
	исполнителем.	5	
3.	Наличие документа, удостоверяющего авторство (соавторство) поступающего на достигнутый им научный (научно-методический, научно-технический, научно-творческий) результат интеллектуальной деятельности:  – патент на изобретение;	10	
	– патент на полезную модель;	7	
	– свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ;	5	
	– свидетельство о государственной регистрации базы данных;	5	
	– свидетельство о государственной регистрации топологии интегральных микросхем.	5	
4.	Публикация в материалах международных и всероссийских научно-технических конференций, включая публикации в выпусках научных журналов, публикующих статьи по итогам конференций (изданиях типа Conference series и(или) Proceedings), проводимых не ранее чем за 2 года, предшествующих приему (тематика публикации должна соответствовать научной специальности, по которой поступающий участвует в конкурсе): за конференцию, индексируемую в базе данных Web of Science и (или) Scopus (индексация сборника или журнала с публикацией подтверждается ссылкой или скриншотом из базы данных);	5	
	за прочие конференции.	3	
5.	Наличие дипломов победителей мероприятий международного и всероссийского значения, подтверждающие успехи в профессиональной подготовке кандидата для поступления в аспирантуру	3	
<b>Суммарный рейтинговый балл</b>			

Кандидат в аспирантуру

\_\_\_\_\_

(подпись)

\_\_\_\_\_

(Ф.И.О).

Предполагаемый научный руководитель

\_\_\_\_\_

(подпись)

\_\_\_\_\_

(Ф.И.О).

Руководитель образовательных программ  
по аспирантуре института

\_\_\_\_\_

(подпись)

\_\_\_\_\_

(Ф.И.О).