

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и  
радиоэлектроники»



Утверждаю»

Проректор по научной работе БГУИР

А. Н. Осипов

2018 г.

## ПРОГРАММА

вступительного экзамена в аспирантуру по специальности  
05.16.08 - Нанотехнологии и наноматериалы

Минск 2018

Программа составлена на основании типовых учебных планов по специальностям I - 41 01 02 "Микро- и нанoeлектронные технологии и системы", I - 41 01 04 "Нанотехнологии и наноматериалы в электронике".

**СОСТАВИТЕЛИ:**

Борисенко В. Е. – д.ф.-м.н, профессор, зав. кафедрой микро- и нанoeлектроники БГУИР

Мигас Д. Б. – д.ф.-м.н, доцент, профессор кафедры микро- и нанoeлектроники БГУИР

**РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ**

Рассмотрена и рекомендована к утверждению на заседании кафедры микро- и нанoeлектроники (протокол № 10 от 9 апреля 2018 г.)

Заведующий кафедрой МНЭ  В. Е. Борисенко

Одобрена и рекомендована к утверждению методической комиссией факультета радиотехники и электроники (протокол № 7 от 23 апреля 2018 г.)

Председатель  О. В. Славинская

## **1. Цели и задачи программы**

Целью программы является установление объема и уровня профессиональных знаний поступающего в аспирантуру на специальность “Нанотехнологии и наноматериалы в электронике”.

Задачи, обеспечивающие достижение этой цели, включают изучение следующих основных разделов, включенных в программу:

- физика низкоразмерных систем
- физико-химические основы нанотехнологий
- нанотехнологии в электронике
- наноматериалы в электронике.

## **2. Требования к знаниям, умениям и навыкам экзаменуемого**

Экзаменуемый должен знать:

- физические закономерности, определяющие свойства и поведение низкоразмерных систем
- физико-химические основы нанотехнологий
- основные нанотехнологические процессы для электроники
- основные наноматериалы для электроники
- особенности использования нанотехнологий и наноматериалов в производстве изделий электронной техники;

должен уметь:

- определять физические и химические характеристики структур и материалов, используемых при изготовлении изделий электронной техники, и их технологичность
- рассчитывать основные характеристики нанотехнологических процессов и наноматериалов
- проектировать процессы изготовления изделий электронной техники с использованием нанотехнологий и наноматериалов.

## **3. Содержание программы**

Раздел 1. Физика низкоразмерных систем

Тема 1.1. Фундаментальные электронные явления в низкоразмерных структурах: квантовое ограничение (классификация низкоразмерных структур по критерию проявления квантового ограничения в них на квантовые точки, квантовые шнуры и квантовые пленки), баллистический транспорт носителей заряда, туннелирование, спиновые эффекты. Методы моделирования электронных свойств низкоразмерных структур.

Тема 1.2. Энергетический спектр электронов на поверхности твердого тела. Состояния в области пространственного заряда. Концентрация носителей заряда и изгиб зон. Захват и рекомбинации носителей заряда с участием поверхностных электронных состояний.

Тема 1.3. Особенности переноса носителей заряда через низкоразмерные структуры: баллистический транспорт и интерференционные эффекты, квантование проводимости низкоразмерных проводников, квантовый эффект Холла (интегральный и дробный), одноэлектронное и резонансное туннелирование, спин-зависимый транспорт носителей заряда.

Тема 1.4. Оптические свойства низкоразмерных структур. Рекомбинация носителей заряда и люминесценция в низкоразмерных структурах.

## Раздел 2. Физико-химические основы нанотехнологий

Тема 2.1. Термодинамические системы, параметры, процессы. Характеристические термодинамические функции: энтальпия, энтропия, свободная энергия Гельмгольца и Гиббса. Критерии направленности процессов в закрытых и открытых термодинамических системах. Химический потенциал. Фундаментальные уравнения состояния.

Тема 2.2. Кинетика и термодинамика электрохимических процессов. Явления поляризации и деполяризации. Поляризация и перенапряжение при электролизе.

Тема 2.3. Кинетика и термодинамика коррозионных процессов. Фазовые переходы и равновесия. Уравнение Клапейрона–Клаузиуса, закон Нернста–Шилова, правило фаз Гиббса. Р-Т диаграммы состояния однокомпонентных систем. Т-х диаграммы состояния бинарных систем с образованием конгруэнтно- и инконгруэнтно плавящихся соединений, твердых растворов замещения неограниченной и ограниченной растворимости.

Тема 2.4. Саморегулирующиеся процессы. Самоорганизация в объемных материалах. Самоорганизация при эпитаксии. Самосборка.

## Раздел 3. Нанотехнологии в электронике

Тема 3.1. Формирование пленок нанометровой толщины, гетероструктур и наноструктурированных покрытий. Молекулярно-лучевая эпитаксия. Химическое осаждение из газовой фазы. Вакуумные, ионные и ионно-плазменные методы осаждения. Химическое и электрохимическое осаждение в жидких средах.

Тема 3.2. Формирование наноструктур с использованием сканирующих зондов. Физические основы и особенности использования сканирующих туннельных и атомно-силовых зондовых устройств для формирования наноструктур. Атомная инженерия. Локальное окисление полупроводников и металлов. Локальное химическое и электрохимическое осаждение материалов из газовой и жидкой фаз.

Тема 3.3. Нанолитография. Литография с использованием высокоэнергетичных фотонов, остросфокусированных потоков электронов и ионов. Зондовая нанолитография. Нанопечать.

#### Раздел 4. Наноматериалы в электронике

Тема 4.1. Формирование и свойства материалов с естественным наноструктурированием. Углеродсодержащие наноструктуры – фуллерены, углеродные нанотрубки, алмазоподобные структуры и их производные. Графен. Нанопористые сверхпроводники, проводники, полупроводники и диэлектрики.

Тема 4.2. Молекулярные наноструктуры. Органические молекулы. Супермолекулы. Биомолекулы: нуклеиновые кислоты, белки, ферменты, биомолекулярные комплексы. Мицеллы и липосомы.

Тема 4.3. Методы исследования наноструктур и наноматериалов: просвечивающая электронная микроскопия, автоэлектронная и автоионная микроскопия, зондовая микроскопия, дифракционный анализ, спектральный анализ.

#### Литература

1. Борисенко В. Е., Воробьева А. И., Уткина Е. А. Нанoeлектроника: теория и практика. – М.: Бинoм, 2013. – 366 с.
2. Borisenko V. E., Ossicini S. What is What in the Nanoworld. – Weinheim: Wiley-VCH, 2008. – 522 p.
3. Щука А. А. Нанoeлектроника. – М.: Физматкнига, 2007.
4. Davies J. H. The Physics of Low-Dimensional Semiconductors: An Introduction. – Cambridge: Cambridge University Press, 1998. – 422 p.
5. Gaponenko S. V. Introduction to Nanophotonics. – Cambridge: Cambridge University Press, 2010. – 484 p.
6. Стромберг А. Г., Семченко Д. П. Физическая химия / Под ред. А. Г. Стромберга. – М.: Высшая школа, 2009. – 527 с.

7. Неволин В. Зондовые нанотехнологии в электронике. – М.: Техносфера, 2005. – 324 р.
8. Нанотехнологии в электронике / Под ред. Ю.А. Чаплыгина.— М.: Техносфера, 2005. – 448 с.