

**Белорусский государственный университет**

**УТВЕРЖДАЮ**

Декан физического факультета БГУ

\_\_\_\_\_ В.М. Анищик

26.06.2009 г.

Регистрационный № УД-2064/баз.

## **НАНОЭЛЕКТРОНИКА**

**Учебная программа для специальности  
1-31 04 01 Физика (по направлениям)  
(1-31 04 01-02 производственная деятельность)**

**СОСТАВИТЕЛЬ:**

**Н.А. Поклонский** — профессор кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Белорусского государственного университета, доктор физико-математических наук, профессор.

**РЕЦЕНЗЕНТЫ:**

**С.В. Гапоненко** — заведующий НИЛ ГНУ "Институт физики НАН Беларуси", доктор физико-математических наук; член-корреспондент НАН Беларуси, профессор.

**А.К. Федотов** — заведующий кафедрой энергофизики Белорусского государственного университета, доктор физико-математических наук, профессор.

**РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:**

Кафедрой физики полупроводников и наноэлектроники физического факультета Белорусского государственного университета

(протокол № 5 от 27 мая 2009 г.);

Ученым Советом физического факультета Белорусского государственного университета

(протокол № 11 от 26 июня 2009 г.);

Ответственный за редакцию: Н.А. Поклонский

Ответственный за выпуск: Н.А. Поклонский

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Программа курса "Нанoeлектроника" разработана для специальности 1-31 04 01 Физика.

Целью курса является обучение студентов основам нанoeлектроники.

В спецкурсе освещаются основы физики электронных процессов в наноструктурах и наноматериалах (характерный масштаб рассматриваемых систем  $10^{-6}$ – $10^{-9}$  м). Анализируются условия получения наноструктур, в том числе на основе методов нанотехнологии, а также их применения. Цель лекций — ознакомить студентов, специализирующихся на кафедре физики полупроводников и нанoeлектроники, с современными представлениями физики наноструктурированных материалов и систем, включая аморфные и поликристаллические материалы, а также кристаллические полупроводники с большим числом дефектов. Рассматриваются вопросы электронной и атомной структуры разупорядоченных конденсированных систем. Разбираются модели концентрационных фазовых переходов металл–изолятор в 3D-, 2D- и 1D-проводниках электричества и тепла.

Материал курса основан на базовых знаниях и представлениях, заложенных в общих курсах по электричеству, оптике, атомной физике, квантовой механике, термодинамике и статистической физике, спецкурсах по зонной теории полупроводников и статистической физике полупроводников. Он является базовым для спецкурсов по технологии производства интегральных микросхем и основам моделирования технологических процессов в микро- и нанoeлектронике.

Программа курса составлена в соответствии с требованиями образовательного стандарта. Общее количество часов – 116; аудиторное количество часов — 50, из них: лекции — 38, контролируемая самостоятельная работа студентов — 12. Форма отчетности — экзамен.

## ПРИМЕРНЫЙ ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН

№ п/п	Название темы	Лекции	Контролируемая самостоятельная работа	Всего
1	2	3	4	5
1.	Микро- и нанoeлектроника	10	2	12
2.	Механизмы переноса заряда в наноструктурах и наноструктурированных материалах	14	4	18
3.	Переноса заряда в структурах с дефектами кристаллической решетки	8	2	10
4.	Наведенные, эмиссионные, инжекционные и туннельные токи	6	4	10
	Итого	38	12	50

## СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

### 1. Микро- и нанoeлектроника

Применение пленок изоляторов, полупроводников и металлов в электронике.

Проблема твердотельной индуктивности. Катоды с отрицательным электронным

сродством.

Конденсированные системы различной размерности: 0D- (атомный кластер), 1D- (нить), 2D- (пленка), 3D- (монокристалл). Моделирование одноэлектронной плотности состояний в квантовой точке и двумерной квантовой яме (слое). Углеродные нанотрубки.

Природные и искусственные сверхрешетки.  $\delta$ -Легированные слои в полупроводниках. Моделирование энергетического спектра сверхрешеток.

Баллистический транспорт электронов и дырок в конденсированных системах. Уравнения баланса энергии и импульса. Токи, ограниченные объемным зарядом. Моделирование явлений переноса в наноразмерных структурах.

## 2. Механизмы переноса заряда в наноструктурах и наноструктурированных материалах

Электрическая проводимость и диэлектрическая проницаемость материалов на переменном токе.

Механизмы возникновения  $N$ - и  $S$ -образных ВАХ в полупроводниках и приборных структурах. Отрицательная фотопроводимость и отрицательная фотолюминесценция конденсированных систем.

Динамическая электропроводность поликристаллических полупроводников. Применение поликристаллических, аморфных и стеклообразных материалов в электронике (элементы фазосдвигающих цепей, переключатели, устройства для преобразования информации). Проблема твердотельной индуктивности.

Прыжковая электропроводность по точечным дефектам в ковалентных полупроводниках на переменном токе.

Концентрационный фазовый переход металл–изолятор (диэлектрик) при легировании и компенсации полупроводниковых материалов (переход Мотта).

Диэлектрическая проницаемость на изоляторной и металлической сторонах перехода Мотта.

## 3. Переноса заряда в структурах с дефектами кристаллической решетки

Автолокализованные состояния электронов — поляроны в ионных кристаллах. Изменение атомной конфигурации точечного дефекта решетки при захвате им электрона (дырки).

Статистика электронов и дырок в полупроводниках, содержащих центры с отрицательной энергией корреляции.

Заполнение дислокаций электронами (дырками) в легированном кристалле.

Перенос электронов по дислокациям.

Электроны на поверхности жидкого гелия. «Кристаллизация» электронного газа.

Прыжковый перенос электронов (дырок) по водородоподобным атомам примеси в кристаллах.

Термо-э.д.с. на прыгающих по атомам примеси и собственным дефектам решетки электронах.

Электрические и оптические явления в пленках аморфных изоляторов, полупроводников и металлов.

## 4. Наведенные, эмиссионные, инжекционные и туннельные токи

Наведенные токи: соотношение Рамо–Шокли.

Токи, ограниченные объемным зарядом в вакуумном диоде. Токи термоэлектронной эмиссии. Катоды с отрицательным электронным сродством.

Инжекционные токи. Горячие электроны в наноструктурах. Баллистический транспорт носителей заряда в ограниченных образцах (пленки, вискры).

Эмиссия электронов из 2D-системы в вакуум.

Туннельные явления в проводниках электричества. Непрямые переходы в  $k$ - и  $g$ -пространствах.

Эффект Джозефсона. Эффект Казимира.  
Электронны и дырки (полу)проводника в поле сил инерции.

## ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### *Рекомендуемые формы контроля знаний*

1. Контрольные работы.
2. Реферативные работы.

### *Рекомендуемые темы контрольных работ*

1. Микро- и нанозлектроника.
2. Квантовые размерные эффекты в приборных наноструктурах.

### *Рекомендуемые темы реферативных работ*

1. Квантовая точка — «сверхатом» — наноразмерная область скопления водородоподобных доноров в кристаллической матрице.
2. Квантовая нить (провода).
3. Применение поликристаллических, аморфных и стеклообразных материалов в электронике (элементы фазосдвигающих цепей, переключатели, устройства для преобразования информации).
4. Проблема твердотельной индуктивности.
5. Фазовый переход металл–изолятор (диэлектрик) в полупроводниках.
6. Электронные состояния и диэлектрическая проницаемость на диэлектрической и металлической сторонах перехода.
7. Изменение атомной конфигурации точечного дефекта решетки при захвате им электрона (дырки).
8. Электроны и фононы в сверхрешетках.

### *Рекомендуемая литература*

#### **Основная**

1. Аморфные и поликристаллические полупроводники / под ред. В. Хейванга.— М.: Мир, 1987.— 160 с.
2. Аморфные полупроводники / под ред. М. Бродски.— М.: Мир, 1982.— 419 с.
3. Анатычук, Л.И. Полупроводники в экстремальных температурных условиях / Л.И. Анатычук, Л.П. Булат.— СПб.: Наука, 2001.— 224 с.
4. Андо, Т. Электронные свойства двумерных систем / Т. Андо, А. Фаулер, Ф. Стерн.— М.: Мир, 1985.— 415 с.
5. Барыбин, А.А. Волны в тонкопленочных полупроводниковых структурах с горячими электронами / А.А. Барыбин.— М.: Наука, 1986.— 288 с.
6. Басс, Ф.Г. Высокочастотные свойства полупроводников со сверхрешетками / Ф.Г. Басс, А.А. Булгаков, А.П. Тетервов.— М.: Наука, 1989.— 288 с.
7. Бонч-Бруевич, В.Л. Доменная электрическая неустойчивость в полупроводниках / В.Л. Бонч-Бруевич, И.П. Звягин, А.Г. Миронов.— М.: Наука, 1972.— 414 с.
8. Брандт, Н.Б. Электроны и фононы в металлах / Н.Б. Брандт, С.М. Чудинов.— М.: МГУ, 1990.— 335 с.

9. Бузанева, Е.В. Микроструктуры интегральной электроники / Е.В. Бузанева.— М.: Радио и связь, 1990.— 304 с.
10. Бургуэн, Ж. Точечные дефекты в полупроводниках. Экспериментальные аспекты / Ж. Бургуэн, М. Ланно.— М.: Мир, 1985.— 304 с.
11. Гонда, С. Оптоэлектроника в вопросах и ответах / С. Гонда, Д. Сэко.— Л.: Энергоатомиздат, 1989.— 184 с.
12. Драгунов, В.П. Основы наноэлектроники / В.П. Драгунов, И.Г. Неизвестный, В.А. Гридчин.— Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000.— 332 с.
13. Добровольский, В.Н. Перенос электронов и дырок у поверхности полупроводников / В.Н. Добровольский, В.Г. Литовченко.— Киев.: Наук. думка, 1985.— 192 с.
14. Зенгуил, Э. Физика поверхности / Э. Зенгуил.— М.: Мир, 1990.— 536 с.
15. Квантовый эффект Холла / под ред. Р. Пренджа, С. Гирвина.— М.: Мир, 1989.— 408 с.
16. Кобаяси, Н. Введение в нанотехнологию / Н. Кобаяси.— М.: Бином. Лаборатория знаний, 2005.— 134 с.
17. Меден, А. Физика и применение аморфных полупроводников / А. Меден, М. Шо.— М.: Мир, 1991.— 670 с.
18. Нанотехнологии в электронике / под ред. Ю.А. Чаплыгина.— М.: Техносфера, 2005.— 448 с.
19. Розеншер, Э. Оптоэлектроника / Э. Розеншер, Б. Винтер.— М.: Техносфера, 2004.— 592 с.
20. Тонкие поликристаллические и аморфные пленки. Физика и применение / под ред. Л. Казмерски.— М.: Мир, 1983.— 304 с.
21. Фрайден, Дж. Современные датчики. Справочник / Дж. Фрайден.— М.: Техносфера, 2005.— 592 с.
22. Херман, М. Полупроводниковые сверхрешетки / М. Херман.— М.: Мир, 1989.— 240 с.
23. Шикин, В.Б. Двумерные заряженные системы в гелии / В.Б. Шикин, Ю.П. Монарха.— М.: Наука, 1989.— 156 с.
24. Шмидт, В.В. Введение в физику сверхпроводников / В.В. Шмидт.— МЦНМО, 2000.— 402 с.
25. Щука, А.А. Наноэлектроника / А.А. Щука.— М.: Физматкнига, 2007.— 464 с.
26. Эггинс, Б. Химические и биологические сенсоры / Б. Эггинс.— М.: Техносфера, 2005.— 336 с.

#### Дополнительная

1. Адлер, Д. Приборы на аморфных полупроводниках / Д. Адлер // УФН.— 1978.— Т. 125, № 4.— С. 707—730.
2. Алферов, Ж.И. Двойные гетероструктуры: концепция и применения в физике, электронике и технологии / Ж.И. Алферов // УФН.— 2002.— Т. 172, № 9.— С. 1068—1086.
3. Бинниг, Г. Сканирующая туннельная микроскопия — от рождения к юности / Г. Бинниг, Г. Рорер // УФН.— 1988.— Т. 154, № 2.— С. 261—278.
4. Валиев, К.А. Квантовые компьютеры и квантовые вычисления / К.А. Валиев // УФН.— 2005.— Т. 175, № 1.— С. 3—39; Валиев, К.А. От кванта к квантовым компьютерам / К.А. Валиев // Природа.— 2002.— № 12.— С. 28—36.
5. Гиавер, И. Туннелирование электронов и сверхпроводимость / И. Гиавер // УФН.— 1975.— Т. 116, № 4.— С. 585—595.
6. Грюнберг, П.А. От спиновых волн к гигантскому магнетосопротивлению и далее / П.А. Грюнберг // УФН.— 2008.— Т. 178, № 12.— С. 1349—1358.

7. Гуляев, Ю.В. Акустоэлектроника (исторический обзор) / Ю.В. Гуляев // УФН.— 2005.— Т. 175, № 8.— С. 887—895.
8. Джозефсон, Б. Открытие туннельных сверхпроводящих токов / Б. Джозефсон // УФН.— 1975.— Т. 116, № 4.— С. 597—603.
9. Капаев, В.В. Зависимость от импульса размерности электронных состояний в гетероструктурах / В.В. Капаев, Ю.В. Копаев, И.В. Токатлы // УФН.— 1997.— Т. 167, № 5.— С. 562—566.
10. Килби, Дж.С. Возможное становится реальным: изобретение интегральных схем / Дж.С. Килби // УФН.— 2002.— Т. 172, № 9.— С. 1102—1109.
11. Крёмер, Г. Квазиэлектрическое поле и разрывы зон. Обучение электронов новым фокусам / Г. Крёмер // УФН.— 2002.— Т. 172, № 9.— С. 1087—1101.
12. Лозовик, Ю.Е. Свойства и нанотехнологические применения нанотрубок / Ю.Е. Лозовик, А.М. Попов // УФН.— 2007.— Т. 177 № 7.— С. 786—799.
13. Морозов, С.В. Электронный транспорт в графене / С.В. Морозов, К.С. Новоселов, А.К. Гейм // УФН.— 2008.— Т. 178, № 7.— С. 776—780.
14. Пауль, В. Электромагнитные ловушки для заряженных и нейтральных частиц / В. Пауль // УФН.— 1990.— Т. 160, № 12.— С. 109—127.
15. Ферт, А. Происхождение, развитие и перспективы спинтроники / А. Ферт // УФН.— 2008.— Т. 178, № 12.— С. 1336—1348.
16. Физические ограничения минимальных размеров элементов современной микроэлектроники / Ю.В. Гуляев [и др.] // УФН.— 1984.— Т. 144, № 3, С. 475—495.
17. Цидильковский, И.М. Электроны и дырки в поле сил инерции / И.М. Цидильковский // УФН.— 1975.— Т. 115, № 2.— С. 321—331.
18. Штёрмер, Х. Дробный квантовый эффект Холла / Х. Штёрмер // УФН.— 2000.— Т. 170, № 3.— С. 304—319.
19. Эсаки, Л. Путешествие в страну туннелирования / Л. Эсаки // УФН.— 1975.— Т. 116, № 4.— С. 569—583.