

Белорусский государственный университет



**ПТВЕРЖДАЮ**  
Декан физического факультета БГУ

В.М. Анищик

26.06.09г.

Регистрационный № УД- 2032 /баз.

**ИЗБРАННЫЕ ГЛАВЫ ФИЗИКИ И ТЕХНИКИ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВ**

Учебная программа для специальности  
1-31 04 01 Физика (по направлениям)  
(1-31 04 01-01 научно-исследовательская деятельность)

2009

**СОСТАВИТЕЛИ:**

**В.Б. Оджаев** — заведующий кафедрой физики полупроводников и наноэлектроники Белорусского государственного университета, доктор физико–математических наук, профессор.

**Н.И. Горбачук** — доцент кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Белорусского государственного университета, кандидат физико–математических наук, доцент.

**М.Г. Лукашевич** — доцент кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Белорусского государственного университета, кандидат физико–математических наук, доцент.

**В.С. Просолович** — доцент кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Белорусского государственного университета, кандидат физико–математических наук, доцент.

**РЕЦЕНЗЕНТЫ:**

**С.П. Сернов** — заместитель декана приборостроительного факультета Белорусского национального технического университета, кандидат физико–математических наук, доцент;

**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.И. Горбачук

Ответственный за выпуск: Н.И. Горбачук

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Программа "Избранные главы физики и техники полупроводников" разработана для специальности 1-31 04 01 Физика.

Целью курса является ознакомление студентов с современными достижениями физики и технологии полупроводниковых материалов и приборных структур.

В курсе рассматриваются вопросы физики электропроводящих полимеров. Представлены основы технологии получения электропроводящих полимеров, а также их основные физико-химические свойства, включая механизмы проводимости, контактные явления. Специальные методы синтеза или последующей модификации позволяют варьировать проводимостью полимеров в широком диапазоне от величин, характерных для диэлектриков (ниже  $10^{-10}$  См/см), до значений металлической проводимости (свыше 1 См/см). Такие возможности позволяют все более широко использовать полимеры в электронике, не только в качестве изоляторов, но и для формирования функциональных элементов, таких как резисторы, светодиоды, транзисторы, солнечные элементы, аккумуляторные батареи, мини-дисплеи и т.п. Курс обобщает, систематизирует и развивает имеющиеся представления о физике электропроводящих полимерных материалов необходимо для последующей учебно-научно-производственной деятельности.

Представлены основные сведения о методиках измерения частотных зависимостей импеданса. Рассмотрена электропроводность композиционных материалов на переменном токе и проанализированы факторы, оказывающие на нее основное влияние. Приведены примеры использования импедансной спектроскопии для исследования композитов и других гетерогенных систем, имеющих прикладное значение. Гетерогенные системы, в том числе композиционные материалы, широко используются в различных отраслях промышленности. Уникальные свойства композитов обеспечили их распространение в машиностроении, строительстве, оптике. Импедансная спектроскопия позволяет оперативно получить информацию о структуре композитов и служит одним из элементов комплекса функциональной диагностики при создании композиционных материалов для электроники и электротехники.

Курс дает также углубленное представление о магнетизме конденсированного состояния вещества. На основании этих представлений проводится сравнение электронных процессов транспорта заряда во внешнем магнитном поле в диамагнитных полупроводниках и магнитоупорядоченных средах, обладающих полупроводниковыми и металлическими свойствами. Рассматриваются спин-зависимые процессы рассеяния и туннелирования электронов в магнитоэлектронных приборах на классических диамагнитных полупроводниках, а также структурах с гигантским, колоссальным и туннельным магниторезистивными эффектами.

Рассматриваются физические основы работы полупроводниковых детекторов ионизирующих излучений и фотоэлектрических преобразователей и основные технологии их изготовления. Изучаются физические принципы формирования электрического сигнала в полупроводниковых детекторах ионизирующих излучений и фотоэлектрических преобразователях. Анализируются основные закономерности зависимости эксплуатационных параметров приборов от микроскопических свойств используемых материалов. Рассматриваются основные технологии изготовления и перспективы использования полупроводниковых детекторов ионизирующих излучений и фотоэлектрических преобразователей в научных исследованиях, промышленности и бытовой технике.

Студенты должны знать свойства, методы получения и применение электропроводящих полимеров, физические принципы работы полупроводниковых детекторов ионизирующих излучений и фотоэлектрических преобразователей, основные современные технологии изготовления приборов полупроводниковой электроники, владеть основами теории цепей переменного тока, уметь анализировать и строить эквивалентные схемы замещения композитов, уметь измерять частотные зависимости импеданса, строить

и анализировать годографы комплексных величин (импеданса, адмитанса, комплексной емкости) композиционных материалов, уметь проводить анализ возможностей оптимизации основных эксплуатационных параметров полупроводниковых приборов.

Материал курса основан на базовых знаниях и представлениях, заложенных в общих курсах по электричеству, оптике, атомной физике, ядерной физике, квантовой механике, спецкурсах по зонной теории полупроводников и статистической физике полупроводников. Курс является завершающим при подготовке специалистов имеющих квалификацию "Физик. Исследователь" и специализирующихся в области физики полупроводников и диэлектриков.

Программа курса составлена в соответствии с требованиями образовательного стандарта. Общее количество часов – 158; аудиторное количество часов — 76, из них: лекции — 60, контролируемая самостоятельная работа студентов — 16. Форма отчетности — зачет и экзамен.

### ПРИМЕРНЫЙ ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН

№ п/п	Название темы	Лекции	Контролируемая самостоятельная работа	Всего
1	2	3	4	5
1.	Строение, свойства и классификация полимеров	2	2	4
2.	Электропроводность полимеров	6		6
3	Основные виды полупроводниковых и электропроводящих полимеров	4		4
4.	Ионно-имплантированные полимеры.	4	2	6
5.	Применение электропроводящих полимеров	4	2	6
6.	Цепи переменного тока	2	2	4
7.	Эквивалентные схемы замещения и построение годографов комплексных величин	4		4
8.	Импедансная спектроскопия компози- тов	8	2	10
9.	Основы теории магнетизма	2		2
10.	Электронные процессы транспорта в диамагнитных и магнитоупорядочен- ных средах	6		6
11.	Основные приборы магнитоэлектрони- ки.	2	2	4
12.	Требования, предъявляемые к фото- электрическим преобразователям	2	2	4
13.	Микроскопические параметры мате- риала, определяющие величину коэф- фициента полезного действия фото- электрических преобразователей	4		4
14.	Основные процессы сопровождающие, взаимодействие различных типов иони- зирующих излучений с твердым телом	6		6
15.	Методы создания полупроводниковых	4	2	6

	детекторов ионизирующих излучений			
	Итого	60	16	76

## СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

### *Строение, свойства и классификация полимеров.*

Общие понятия. Строение и химические связи полимеров. Особенности физических свойств полимеров. Формы углерода. Графит и цельно-углеродные полимеры. Алмаз и алмазоподобные пленки. Фуллерены и нанотрубки.

### *Электропроводность полимеров.*

Заряды в диэлектрике, диполи и поляризация. Механизмы поляризации. Ориентационная поляризация полярных молекул. Поляризация электронного смещения. Зависимость поляризации от времени и частоты приложенного внешнего поля. Диэлектрические потери. Статическая электризация полимеров. Механизмы возникновения статического электричества. Закономерности возникновения и рассеяния зарядов. Релаксация поверхностного электростатического заряда. Ионная и электронная проводимость. Модели переноса носителей заряда. Контактные явления.

### *Основные виды полупроводниковых и электропроводящих полимеров.*

Наполненные полимеры. Композиционные материалы. Полимеры с системой сопряженных связей. Свойства, методы синтеза и применение полимеров с системой сопряженных связей. Молекулярные комплексы с переносом заряда. Пиролизированные полимеры.

### *Ионно-имплантированные полимеры.*

Взаимодействие ионов с полимерной мишенью. Изменение структуры и состава полимеров после имплантации. Оптические свойства. Парамагнетизм и образование низкоразмерных спиновых систем. Электрофизические свойства имплантированных полимеров.

### *Применение электропроводящих полимеров.*

Основы молекулярной электроники и место электропроводящих полимеров. Электронные полимерные элементы. Температурные и газовые сенсоры. Полимерные батареи. Полимерные элементы интегральной оптики. заключение.

### *Цепи переменного тока.*

Гармонические колебания тока и напряжения. Векторные диаграммы токов и напряжений. Треугольники сопротивлений и проводимостей. Представление импеданса и адмитанса в виде комплексных чисел.

### *Эквивалентные схемы замещения и построение годографов комплексных величин.*

Определение понятия эквивалентная схема замещения. Простейшие RC-цепи и годографы комплексных величин.

### *Импедансная спектроскопия композитов.*

Методы измерений частотных зависимостей импеданса. Мосты переменного тока, куметры, электронные измерители импеданса. Электропроводность композитов на переменном токе. Влияние неоднородности токопроводящего перколяционного кластера на импеданс композитов в окрестности порога протекания.

Примеры использования импедансной спектроскопии.

### *Основы теории магнетизма*

Феноменологическое описание магнитных явлений. Магнитное поле и его главные и вспомогательные количественные характеристики: напряженность и индукция магнитного поля, магнитный момент, магнитный заряд, намагниченность и магнитная восприимчивость вещества. Диамагнетизм и парамагнетизм. Формула Ланжевена и закон Кюри. Парамагнитная восприимчивость электронов

проводимости. Ферромагнитное упорядочение. Точка Кюри. Обменный интеграл. Виды обмена. Ферромагнитные домены и их происхождение. Цилиндрические магнитные домены. Кривая намагничивания. Коэрцитивная сила и гистерезис. Энергия анизотропии. Стенки Блоха.

*Электронные процессы транспорта в диамагнитных и магнитоупорядоченных средах*

Основные механизмы переноса носителей заряда в твердых телах: диффузионный, прыжковый, баллистический, режим слабой локализации. Электронные процессы переноса в магнитном поле в немагнитных материалах. Эффекты Холла и магниторезистивный. Особенности электронных процессов переноса заряда в магнитоупорядоченных средах. Магнитные металлы, диэлектрики и полупроводники. Эффекты Кондо и отрицательного магнитосопротивления. Основные представления теории квантовых поправок проводимости слабоупорядоченных кристаллов. Электронные системы с пониженной размерностью. Сверхрешеточные структуры. Магнитные сверхрешетки.

*Основные приборы магнитоэлектроники.*

Магниторезистор, датчик Холла, магнитодиод на основе диамагнитных и магнитоупорядоченных твердых тел и их характеристики.

*Требования, предъявляемые к фотоэлектрическим преобразователям.*

Отражательная и поглощательная способности реальной поверхности. Критерий эффективности селективности поверхности. Физические основы работы полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей. Спектральная характеристика идеального фотоэлектрического преобразователя. Эффективность собирания носителей заряда. Темновая вольт-амперная характеристика фотоэлектрического преобразователя. Фотоэлектрические параметры фотоэлектрических преобразователей: напряжение холостого хода, ток короткого замыкания, коэффициент заполнения вольт-амперной характеристики, коэффициент полезного действия.

*Микроскопические параметры материала, определяющие величину коэффициента полезного действия фотоэлектрических преобразователей.*

Диффузионная длина носителей заряда, ее влияние на эксплуатационные параметры фотоэлектрических преобразователей. Спектральная зависимость фототока. Зависимость величины фототока от глубины залегания p-n-перехода. Влияние дефектов и примесей на эксплуатационные параметры фотоэлектрического преобразователя. Зависимость эксплуатационных параметров от интенсивности падающего излучения. Перспективы использования полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей в солнечной энергетике.

*Основные процессы сопровождающие, взаимодействие различных типов ионизирующих излучений с твердым телом.*

Процессы, характерные для заряженных частиц: ионизация и возбуждение атомов, тормозное излучение, излучение Вавилова-Черенкова, ядерное взаимодействие. Процессы, характерные для взаимодействия  $\gamma$ - и рентгеновских излучений с веществом: фотоэлектрическое взаимодействие, комптоновское рассеяние, образование электрон-позитронных пар, рэлеевское рассеяние, резонансное поглощение.

*Основные характеристики полупроводниковых детекторов ионизирующих излучений.*

Преимущества полупроводниковых детекторов ионизирующих излучений перед другими видами детекторов. Условия обеспечения режима спектрометрии. Требования, предъявляемые к свойствам материала для детекторов ионизирующих излучений. Особенности образования сигнала в полупроводниковых детекторах ионизирующих излучений. Основные параметры полупроводниковых детекторов ионизирующих излучений: коэффициент преобразования, энергия образования пары электрон-дырка, соотношение сигнал-шум, удельное сопротивление

материала, ширина обедненной области. Время нарастания токовых импульсов. Чувствительная область. Чувствительная (рабочая) поверхность. Энергетическое разрешение, шумовая характеристика усилительного тракта, энергетический эквивалент шума, фактор Фано. Чувствительность регистрации. Эффективность регистрации. Радиационный ресурс.

*Методы создания полупроводниковых детекторов ионизирующих излучений.*

Поверхностно-барьерная технология, диффузионно-дрейфовая технология, радиационная технология. Зависимость эксплуатационных параметров полупроводниковых детекторов ионизирующих излучений от величины генерационного и рекомбинационного токов электронно-дырочного перехода. Влияние токов утечки. Взаимосвязь между функциональными возможностями полупроводниковых детекторов ионизирующих излучений и технологией их изготовления.

## ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### *Рекомендуемые формы контроля знаний*

1. Тестовые задания
2. Реферативные работы

### *Рекомендуемые темы тестовых заданий*

1. Равновесные и неравновесные носители заряда.
2. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда.
3. Рекомбинация неравновесных носителей заряда.
4. Фотоэлектрические эффекты.
5. Поглощение света в полупроводниках.

### *Рекомендуемые темы реферативных работ*

1. Структура различных форм углерода.
2. Фуллерены.
3. Нанотрубки.
4. Молекулярные сверхпроводники.
5. Поляроны.
6. Солитоны.
7. Полимерные фотодиоды.
8. Полимерные транзисторы.
9. Парамагнитные свойства ионно-имплантированных полимеров.
10. Прыжковая модель переноса носителей заряда и ее реализация в модифицированных полимерах.
11. Наполненные полимеры и нелинейная оптика.
12. Термолиз при ионной имплантации полимеров.
13. Комплексная диэлектрическая проницаемость гетерогенных систем. Диаграммы Коула-Коула.
14. Измерение частотных зависимостей импеданса: методика и экспериментальное оборудование.
15. Применение метода импедансной спектроскопии для контроля технологии изготовления и качества электропроводящих композитов.
16. Перспективные технологии получения композиционных материалов.
17. Импедансная спектроскопия в электрохимии.

18. Импедансная спектроскопия биологических объектов.
19. Люкс-амперная характеристика фотоэлектрических преобразователей.
20. Температурная зависимость темнового тока, фототока и фото-ЭДС.
21. Оптимальные режимы использования фотоэлектрических преобразователей в условиях низкой освещенности.
22. Координатно-чувствительные детекторы.
23. Детекторы на основе полупроводников с широкой запрещенной зоной.
24. Кремниевые детекторы в калориметрах .

### *Рекомендуемая литература*

#### **Основная**

1. Оджаев, В.Б. Физика электропроводящих полимеров / В.Б. Оджаев, В.Н. Попок, И.И. Азарко.— Мн.: Белгосуниверситет, 2000.— 82 с.
2. Ионная имплантация полимеров / В.Б. Оджаев, И.П. Козлов, В.Н. Попок, Д.В. Свиридов.— Мн.: Белгосуниверситет, 1998. — 197 с.
3. Поклонский Н.А., Горбачук Н.И. Основы импедансной спектроскопии композитов: курс лекций / Н.А. Поклонский, Н.И. Горбачук. —Мн.: БГУ, 2005. — 130 с.
4. Забродский, А.Г. Электронные свойства неупорядоченных систем / Забродский А.Г., С.А. Немов, Ю.И. Равич.— С.-Петербург: Наука, 2000.— 72 с.
5. Касаткин, А.С. Электротехника / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. —М.: Издательский центр “Академия”, 2003.— 544 с.
6. Impedance spectroscopy: emphasizing solid materials and systems / Ed. J.R. Macdonald. —New York: Wiley, 1987. —346 p.
7. Челидзе, Т.Л. Электрическая спектроскопия гетерогенных систем / Т.Л. Челидзе, А.И. Деревянко, О.Д. Куриленко. —Киев, Наукова думка, 1977.— 231 с.
8. Гуль, В.Е., Шенфиль Л.З. Электропроводящие полимерные композиты / В.Е. Гуль, Л.З. Шенфиль.— М.: Химия, 1984. —248 с.
9. Лукашевич, М.Г. Введение в магнитоэлектронику / М.Г. Лукашевич.— Мн.: БГУ, 2004.— 64 с..
10. Вонсовский, С. В. Магнетизм / С. В. Вонсовский.— М.: Нвука, 1971.— 1032 с.
11. Киттель, Ч. Введение в физику твердого тела / Ч. Киттель.— М.: Наука, 1978.— 792 с.
12. Метфессель, З. Магнитные полупроводники / З. Метфессель, Д. Маттис.— М.: Мир, 1972.— 408 с.
14. Уайт, Р. Квантовая теория магнетизма / Р. Уайт.— М.: Мир, 1985.— 304 с.
16. Абрикосов, А.А. Основы теории металлов / А.А. Абрикосов. М.: Наука, 1987.— 520 с.
17. Преобразование солнечной энергии / Под ред. Б.Серафина.— М.: Энергоиздат.1982. — 320 с.
18. Акимов, Ю.К. Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике / Ю.К. Акимов, О.В. Игнатъев, А.И. Калинин, В.Ф. Кушнирук. — М.: Энергоатомиздат, 1989,— 344 с.
19. Рейви, К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии / К. Рейви.— М.: «Мир»,1984,— 472 с.
20. Рывкин, С.М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках / С.М. Рывкин.— М.: Физматгиз, 1968.— 492 с.
21. Резников, Р.С. Промышленные полупроводниковые детекторы / Р.С. Резников, Ю.П. Сельдяков. — М.: Атомиздат, 1980.— 88 с.

### Дополнительная

1. Бах Н.А., Ванников А.В., Гришина А.Д. Электропроводность и парамагнетизм полимерных полупроводников. — М.: Наука, 1971. — 361 с.
2. Дулов А.А., Слинкин А.А. Органические полупроводники. Полимеры с сопряженными связями. — М.: Наука, 1970. — 127 с.
3. Каримов С.Н., Конкин Н.И., Курбаналиев М.К., Мирзоев А.А. Физика полимеров. Электрические свойства. — Душанбе: Тадж. гос. ун-т, 1989. — 120 с.
4. Крикоров В.С., Колмакова Л.А. Электропроводящие полимерные материалы. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 174 с.
5. Electrical and Optical Polymers Systems / Ed. D.L. Wise, G.E. Wnek, D.J. Trantolo et al. — New York: Marcel Dekker, 1998. — 1239 p.
6. Kido J., Kohda M., Okuyama K., Nagai K. Organic Electroluminescent Devices Based on Molecular Doped Polymers // Appl. Phys. Lett. — 1992. — V. 61, No. 7. — P. 761-763.
7. Marletta G., Iacona F. Chemical and Physical property Modifications Induced by Ion Irradiation of Polymers // Materials and Processes for Surface and Interface Engineering. — Dordrecht/Boston/London: Kluwer Acad. Publ., 1995. — P.597-640.
8. Materials Science and Technology: Processing of Polymers (Volume 18) / Ed. H.E.H. Meijer. — Weinheim: Wiley-VCH, 1997.
9. Robertson J.  $\pi$ -Bonded Clusters in Amorphous Carbon Materials // Phil. Mag. B. — 1992. — V.66, No.2. — P.199-209.
10. Sariciftei N. S., Braun D., Zhang C., Srdanov V.I., Heeger A.J., Stucky G., Wudl F. Semiconducting polymer-buckminsterfullerene heterojunctions: Diodes, photodiodes, and photovoltaic cells // Appl. Phys. Lett. — 1993. — V. 62, No. 6. — P. 585-587.
11. Stabb H., Punkka E., Paloheimo J. Electronic and Optic Properties of Conducting Polymer Thin Films // Mater. Sci. and Engn. — 1993. — V.R10. — P.85-140.
12. Wang Y., Mohite S.S., Bridwell L.B. et al Modification of High Temperature and High Performance Polymers by Ion Implantation // J. Mater. Res. — 1993. — V.8, No.2. — P.338-402.
13. Виноградов А.П. Электродинамика композиционных материалов / Под ред. Б.З. Каценеленбаума. — М.: Эдиториал УРСС, 2001. — 208 с.
14. Помогайло А.Д., Розенберг А.С., Уфлянд И.Е. Наночастицы металлов в полимерах. — М.: Химия, 2000. — 672 с.
15. Графов Б.М., Укше Е.А. Электрохимические цепи переменного тока. — М.: Наука, 1973. — 128 с.
16. Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. Электронные свойства легированных полупроводников. — М.: Наука, 1979. — 416 с.
17. Пасынков, В.В. Полупроводниковые приборы / В.В.Пасынков, Л.К. Чиркин. — М.: Высшая школа, 1987. — 479 с.
18. Вавилов, В.С. Действие излучений на полупроводники / В.С.Вавилов, Н.П. Кекелидзе, Л.С.Смирнов. — М.: Наука, 1988. — 276 с.
19. Комаров, Ф.Ф. Дефекты структуры в ионно-имплантированном кремнии / Ф.Ф.Комаров, А.П.Новиков, В.С.Соловьев, С.Ю.Ширяев. — Мн.: Университетское, 1990, — 320 с.
20. Стоунхэм, А.М. Теория дефектов в твердых телах / А.М.Стоунхэм, — М.: Мир, 1978, — 358 с.
21. Бринкевич Д.И. Редкоземельные элементы в монокристаллическом кремнии / Д.И. Бринкевич, С.А. Вабищевич, В.С. Просолович, Ю.Н. Янковский — Новополюк: ПГУ, 2003. — 204 с.
22. Блат, Ф. Физика электронной проводимости в твердых телах / Блатт Ф. — М.: Мир, 1971. — 320 с.