

Программа
краткосрочного повышения квалификации преподавателей и научных работников
высшей школы

по направлению

«Наноэлектроника и наномagnetизм, компонентная база и устройства. Физические принципы. Применяемые технологии при разработке и создании»

на базе учебного курса

«Введение в физику когерентных электронных транспортных явлений в наноструктурных системах»

Цель: Изучение основ физики когерентных электронных транспортных явлений в наноструктурных системах

Категория слушателей преподаватели и научные работники высшей школы

Примерный срок обучения 24 часа

Форма обучения с частичным отрывом от работы

Режим занятий 8 часов в день

Целью данного курса является ознакомление с основными особенностями физики когерентного электронного транспорта через различные наноструктурные системы, в частности, через полупроводниковые двухбарьерные наноструктуры и сверхрешетки.

Требования к уровню освоения учебного курса.

Преподаватели должны:

- Знать:
 - физические явления, лежащие в основе когерентного электронного транспорта через наноструктурные системы;
 - принципы работы квантовых устройств на основе наноструктурных систем;
 - методики моделирования статических характеристик наноструктур.
- Иметь навыки:
 - сбора, систематизации и анализа научно-технической и другой профессиональной информации в области наноструктурных систем;
 - включать приобретенные знания о физике наноструктурных систем в уже имеющуюся систему знаний и применять эти знания в самостоятельных методических разработках;
 - переносить полученные знания о физике наноструктурных систем на смежные предметные области и к использованию этих знаний для построения междисциплинарных методических разработок.
- Иметь представление:
 - о типах наноструктурных систем и их основных свойствах;
 - о размерном квантовании энергии и импульса в наноструктурных системах
 - об особенностях транспорта электронов через двухбарьерные резонансно-туннельные наноструктуры и сверхрешетки;
 - о численных методах, применяемых при расчете характеристик наноструктурных систем.

Научные работники должны:

- Знать:

- физические явления, лежащие в основе когерентного электронного транспорта через наноструктурные системы;
- принципы работы квантовых устройств на основе наноструктурных систем;
- методики моделирования статических характеристик наноструктур.
- Иметь навыки:
 - применения фундаментальных законов физики и уравнений теории к расчетам характеристик наноструктурных систем;
 - трактовки данных теоретических и экспериментальных исследований наноструктурных систем.
- Иметь представление:
 - о типах наноструктурных систем и их основных свойствах;
 - о размерном квантовании энергии и импульса в наноструктурных системах
 - об особенностях транспорта электронов через двухбарьерные резонансно-туннельные наноструктуры и сверхрешетки;
 - о численных методах, применяемых при расчете характеристик наноструктурных систем.

Учебный курс «Введение в физику когерентных электронных транспортных явлений в наноструктурных системах» состоит из дистанционной и очной частей.

Дистанционная часть учебного образовательного курса обеспечивает слушателя необходимым объемом знаний по выбранной тематике, включая подготовку слушателя к проведению лабораторного практикума. Задача дистанционной составляющей учебного курса – подготовить слушателя к очному посещению лаборатории в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ».

В дистанционной (теоретической) части учебного курса изложены физические основы когерентных электронных транспортных явлений в наноструктурных системах, описаны виды таких систем и их основные свойства, суть резонансного туннелирования электронов через двумерные полупроводниковые резонансно-туннельные наноструктуры, принцип работы резонансно-туннельного диода, а также даны основы численного моделирования характеристик наноструктурных систем.

Теоретическая часть учебного курса «Введение в физику когерентных электронных транспортных явлений в наноструктурных системах» состоит из пяти лекций:

Лекция 1. Виды наноструктурных систем и их основные свойства.

Виды наноструктурных систем. Нуль-мерные, одномерные и двумерные полупроводниковые системы. Квантовые точки, проволоки, квантовые ямы, сверхрешетки. Основные характеристики наноструктурных систем, их создание и применение.

Лекция 2. Когерентный транспорт электронов через двумерные полупроводниковые наноструктурные системы.

Размерное квантование в наноструктурах. Уравнение Шрёдингера. Волновая функция и энергетический спектр электрона в квантовой яме. Двухбарьерные резонансно-туннельные наноструктуры (ДБРТС). Резонансное туннелирование электронов через ДБРТС. Интерференция электронов. Коэффициент прохождения и его зависимость от параметров структуры. Резонансные уровни энергии в ДБРТС и их ширина.

Лекция 3. Резонансно-туннельный диод – квантовый прибор, основанный на когерентном электронном транспорте.

Резонансно-туннельный диод (РТД), его структура. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) РТД. Отрицательная дифференциальная проводимость на ВАХ и причина ее появления. Гистерезис на ВАХ. Токи поляризации (отклик), возникающие в РТД под действием переменного поля. Генерация и усиление электромагнитного поля в РТД.

Лекция 4. Особенности электронного транспорта через полупроводниковые сверхрешетки.

Виды полупроводниковых сверхрешеток, композиционные и легированные сверхрешетки. Двухъямные полупроводниковые наноструктуры (ДНС) – первый шаг на пути от РТД к сверхрешеткам. Резонансное туннелирование электронов через ДНС. Расщепление энергетических уровней за счет межъямной интерференции электронов. Описание основных свойств сверхрешеток на основе модели Кронига-Пенни. Энергетические подзоны в сверхрешетках.

Лекция 5. Основы моделирования статических характеристик наноструктурных систем на основе численных методов.

Нахождение волновой функции электрона из уравнения Шрёдингера в наноструктурных системах численными методами. Метод конечных разностей и другие методы. Расчет коэффициента прохождения электрона через двумерные наноструктуры. Моделирование вольт-амперной характеристики.

Очная часть учебного курса заключается в изучении принципов компьютерного моделирования характеристик двумерных резонансно-туннельных наносистем. В ходе работы слушатель знакомится непосредственно с программой визуализации результатов моделирования и обучается:

- получению изображения спектрограммы электронной плотности внутри наносистемы для различных значений напряжения смещения и параметров наноструктур;
- получению графиков зависимости коэффициента прохождения от энергии налетающих на наносистему электронов для различных значений напряжения смещения и параметров наноструктур;
- получению вольт-амперных характеристик резонансно-туннельных наносистем для различных значений температуры и концентрации легированных электронов.

Методические рекомендации по реализации учебной программы

На дистанционную и очную части учебного курса отводится по 12 часов соответственно. Полное содержание лекций в электронной дистанционной части учебного курса находится на сайте www.nanoobr.ru. Для контроля степени освоения теоретической части учебного курса (лекций) используются **тестовые вопросы** для самопроверки и **контрольные вопросы**.

Тестовые вопросы к курсу

«Введение в физику когерентных электронных транспортных явлений в наноструктурных системах»

Лекция 1. Виды наноструктурных систем и их основные свойства.

1.1. Каков характерный размер квантовой точки?

А) 1 - 10 Å

В) 1 - 10 см

Б) 5 – 50 нм

Г) ни один из вариантов

1.2. Сверхрешетка является

А) одномерной наносистемой

В) нуль-мерной наносистемой

Б) двумерной наносистемой

Г) ни один из вариантов

1.3. Какие объекты относят к одномерным наносистемам?

А) квантовые ямы

В) сверхрешетки

Б) квантовые проволоки

Г) ни один из вариантов

1.4. С ростом размера квантовой точки длина волны, излучаемая ей

А) увеличивается

В) не меняется

Б) уменьшается

Г) сперва уменьшается, а затем увеличивается

1.5. Энергетические уровни в наноструктурных системах возникают благодаря

А) кулоновскому отталкиванию электронов

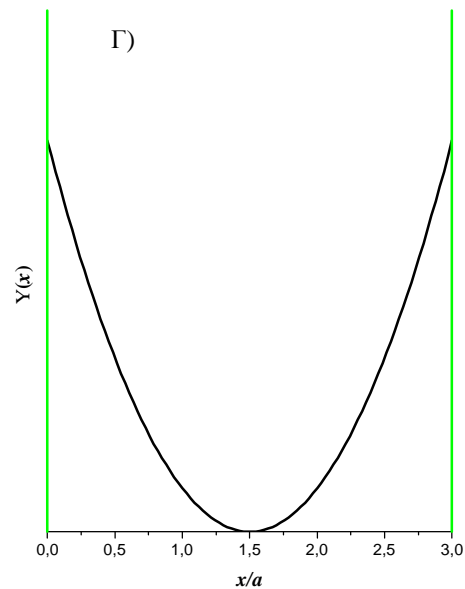
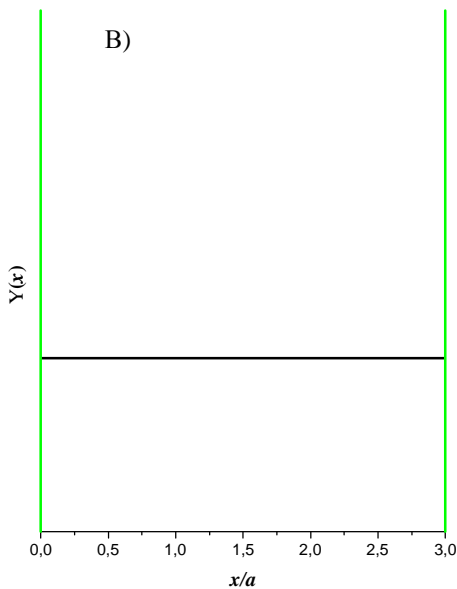
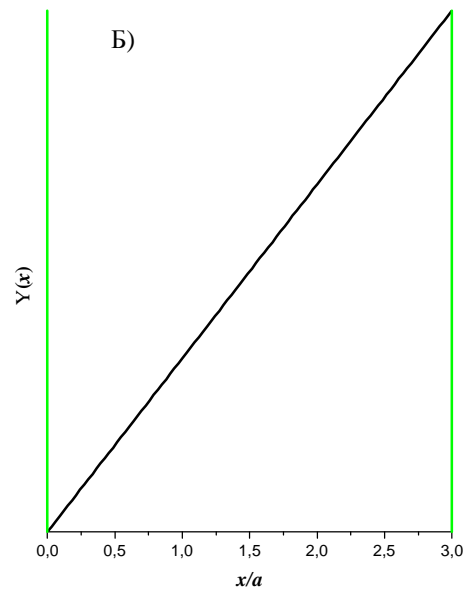
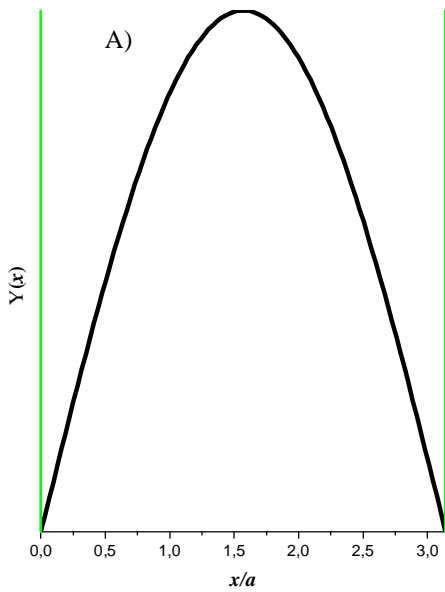
В) ограничению движения электрона в каком-либо измерении

Б) рассеянию электронов на фононах

Г) ни один из вариантов

Лекция 2. Когерентный транспорт электронов через двумерные полупроводниковые наноструктурные системы.

2.1. Волновая функция электрона внутри бесконечно глубокой квантовой ямы шириной a имеет вид



2.2. Зависимость энергии E_n электрона массой m внутри бесконечно глубокой квантовой ямы ширины a от номера энергетического уровня n имеет вид

А) $E_n = \frac{\hbar^2 p^2}{2ma^2} \frac{1}{n^2}$

В) $E_n = \frac{\hbar^2 p^2}{2ma^2} n^2$

Б) $E_n = \frac{\hbar^2 p^2}{2ma^2} \exp(-n^2)$

Г) ни один из вариантов

2.3. На симметричную двухбарьерную резонансно-туннельную наноструктуру (ДБРТС) с большой высотой барьеров U падает поток электронов с энергией $E < U$ (см. рисунок).

2.6. Если выполняется равенство $E = E_R$ (E - энергия электронов, налетающих на ДБРТС, E_R - энергия резонансного уровня), то плотность электронов в квантовой яме по сравнению с плотностью электронов вне ямы

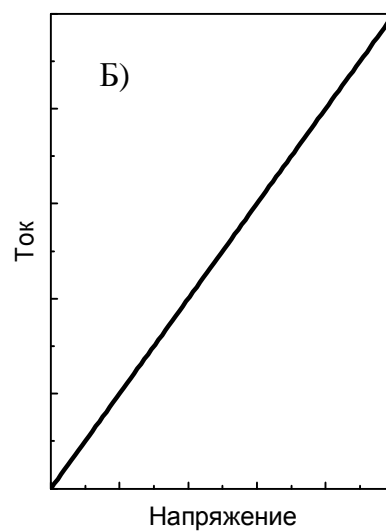
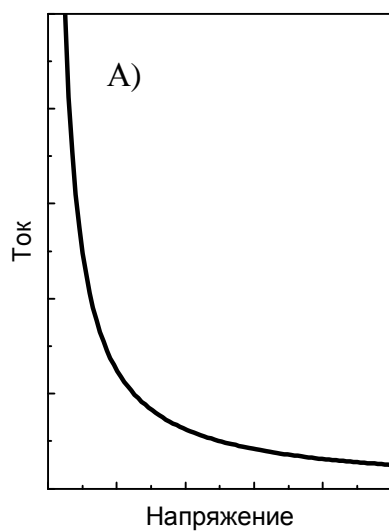
- А) существенно меньше
- Б) существенно больше
- В) примерно такая же

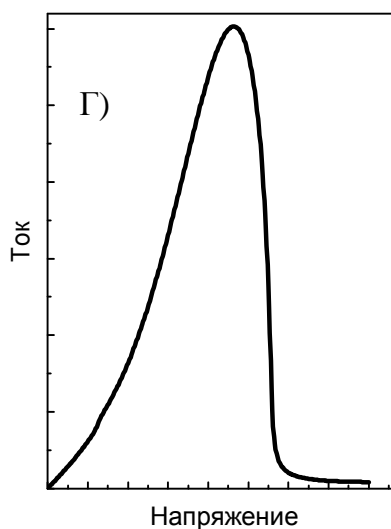
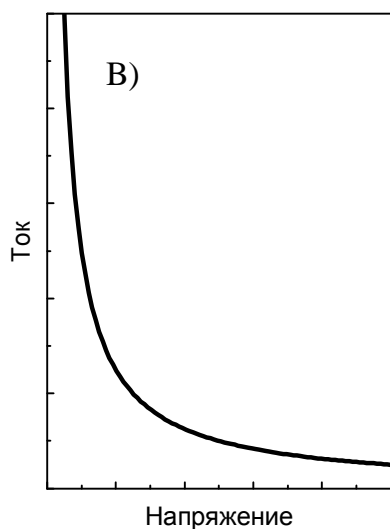
Лекция 3. Резонансно-туннельный диод – квантовый прибор, основанный на когерентном электронном транспорте.

3.1. Резонансно-туннельный диод (РТД) представляет собой наноструктуру

- А) с одним квантовым барьером
- Б) с двумя квантовыми барьерами
- В) с тремя квантовыми барьерами
- Г) ни один из вариантов

3.2. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) РТД имеет следующий вид:





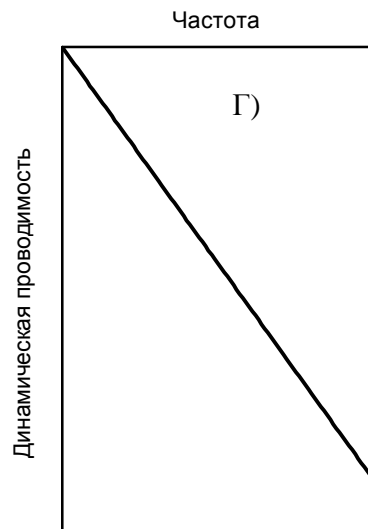
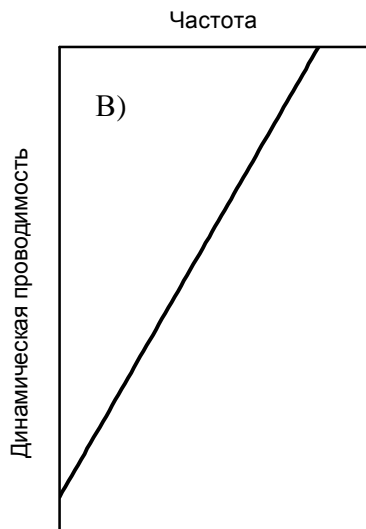
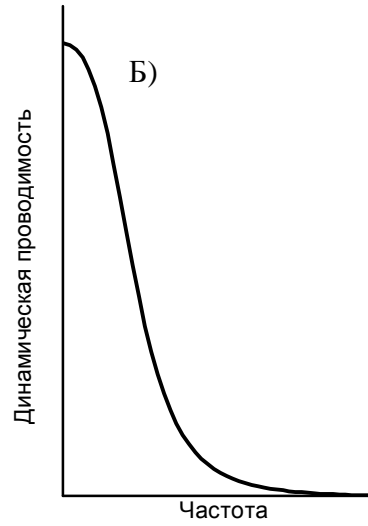
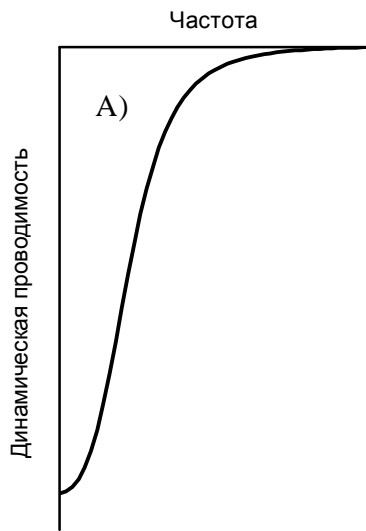
3.3. Что такое область отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП) резонансно-туннельного диода?

- | | |
|--|--|
| А) интервал напряжения на ВАХ, где ток отрицательный | В) интервал напряжения на ВАХ, где ток уменьшается с ростом напряжения |
| Б) интервал напряжения на ВАХ, где ток увеличивается с ростом напряжения | Г) ток равен нулю |

3.4. В области гистерезиса на ВАХ РТД одному значению напряжения соответствует

- | | |
|-----------------------|-------------------------|
| А) одно значение тока | В) три значения тока |
| Б) два значения тока | Г) ни один из вариантов |

3.5. Если напряжение смещения на РТД соответствует области максимальной ОДП, то частотная зависимость динамической проводимости в слабом переменном поле имеет следующий вид:

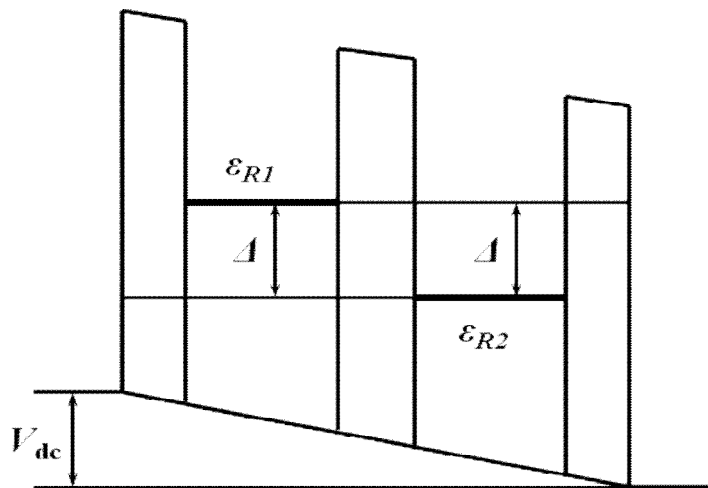


Лекция 4. Особенности электронного транспорта через полупроводниковые сверхрешетки.

4.1. В двухъямной наноструктуре (ДНС) электрон может находиться

- А) только в яме с большей шириной
- Б) только в яме с меньшей шириной
- В) в обеих ямах
- Г) ни один из вариантов

4.2. К ДНС приложено постоянное напряжение V_{dc} (см. рисунок).



С ростом величины V_{dc} расстояние между расщепленными резонансными уровнями энергии Δ

- А) уменьшается
 Б) увеличивается
 В) не зависит от напряжения
 Г) сперва увеличивается, а затем уменьшается

4.3. В бесконечной сверхрешетке энергия электрона может принимать

- А) любые значения
 Б) любые значения внутри разрешенной подзоны
 В) любые значения внутри запрещенной подзоны
 Г) ни один из вариантов

4.4. Как ширина разрешенной энергетической подзоны зависит от ширины квантовой ямы a в бесконечной сверхрешетке?

- А) увеличивается с ростом значения a
 Б) уменьшается с ростом значения a
 В) не зависит от a
 Г) зависимость имеет минимум

4.5. В бесконечной сверхрешетке N разрешенных энергетических подзон. Как ширина запрещенной подзоны зависит от номера этой подзоны n в случае слабой связи между квантовыми ямами?

- А) увеличивается с ростом значения n
 Б) уменьшается с ростом значения n
 В) не зависит от n
 Г) зависимость имеет максимум

Лекция 5. Основы моделирования статических характеристик наноструктурных систем на основе численных методов.

5.1. Слева от точки $x = x_0$ находится слой полупроводника с эффективной массой m_1 , справа – слой полупроводника с эффективной массой m_2 , соответственно. Как выглядит условие сшивки производной волновой функции на границе раздела полупроводниковых слоев?

А) $\left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=x_0-0} = \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=x_0+0}$

В) $\left. \frac{1}{m_1} \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right|_{x=x_0-0} = \left. \frac{1}{m_2} \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right|_{x=x_0+0}$

Б) $\left. \frac{1}{m_1} \frac{dy}{dx} \right|_{x=x_0-0} = \left. \frac{1}{m_2} \frac{dy}{dx} \right|_{x=x_0+0}$

Г) ни один из вариантов

(правильный ответ)

5.2. Пусть интервал, где численно ищется решение уравнения Шрёдингера, разбит на N узлов, расстояние между узлами Δx . Тогда приближенная формула для второй производной волновой функции на i -ом узле d^2y_i/dx^2 имеет следующий вид

А) $\frac{d^2y_i}{dx^2} = \frac{y_{i+1} + y_i + y_{i-1}}{(\Delta x)^2}$

В) $\frac{d^2y_i}{dx^2} = \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{(\Delta x)^2}$ (правильный

ответ)

Б) $\frac{d^2y_i}{dx^2} = \frac{y_{i+1} - y_i + y_{i-1}}{(\Delta x)^2}$

Г) ни один из вариантов

5.3. Пусть область, где численно ищется решение уравнения Шрёдингера, разбита на N на интервалов с постоянной потенциальной энергией U_i (i – номер интервала), причем энергия электрона $E > U_i$. Тогда волновую функцию электрона Y с волновым вектором $k = \sqrt{2m(E - U_i)}/\hbar$ можно представить в следующем виде

А) $y_i = A_i \sin kx_i + B_i \cos kx_i$

В) $y_i = A_i \sin kx_i + B_i \cos kx_i + C_i \ln x_i$

Б) $y_i = A_i e^{kx_i} + B_i e^{-kx_i}$

Г) ни один из вариантов

5.4. На ДБРТС слева налетает стационарный поток электронов (см. рисунок к тесту 2.3). Интервал, где численно ищется решение уравнения Шрёдингера, разбит на N узлов. Где для нахождения коэффициента необходимо вычислить волновую функцию?

А) в первом узле слева от ДБРТС в области I

В) в любом узле справа от ДБРТС в области III

Б) в каком - либо узле внутри квантовой ямы в области II

Г) для нахождения коэффициента вычислять волновую функцию не

требуется

5.5. Каким методом обычно численно решают систему линейных алгебраических уравнений?

А) методом Крамера

В) методом Гаусса

Б) с помощью квадратурных формул Ньютона-

Г) ни один из вариантов

Котеса

Контрольные вопросы для проверки материала в количестве 20 вопросов

1. В чем основные отличия наноструктурных систем от обычных?
2. Какие полупроводниковые материалы используют для приготовления квантовых точек, проволок и ям?
3. Перечислите основные применения наноструктурных систем.
4. Почему в квантовых проволоках не выполняется закон Ома?
5. Сформулируйте уравнение, описывающее квантовые (волновые) свойства электрона в наноструктурах. Какие величины туда входят?
6. Каков механизм квантования движения электрона в квантовой яме?
7. Если энергия налетающих на потенциальный барьер электронов превосходит величину этого барьера, могут ли электроны отражаться от барьера? Поясните ответ.
8. За счет чего образуются резонансные энергетические уровни в двухбарьерной резонансно-туннельной структуре?
9. Чем резонансно-туннельный диод (РТД) отличается от туннельного диода?
10. Почему вольт-амперная характеристика (ВАХ) РТД имеет участок с отрицательной дифференциальной проводимостью?
11. Каковы основные причины гистерезиса на ВАХ РТД?
12. Поясните принцип генерации электромагнитного поля в РТД.
13. За счет чего происходит расщепление резонансных уровней в двухъямных наноструктурах (ДНС)?
14. Приведите выражение для энергий расщепленных резонансных уровней в ДНС.
15. Опишите модель Кронига-Пенни для бесконечной сверхрешетки.
16. Объясните механизм образования разрешенных и запрещенных подзон в сверхрешетке.
17. Выведите условие сшивки производной волновой функции на границе раздела полупроводниковых слоев.
18. Перечислите основные численные методы, используемые для нахождения волновой функции электрона в двумерных наноструктурных системах.
19. Опишите метод прогонки для диагонализации трехдиагональной матрицы.

В конце очной части учебного курса слушатели готовят отчеты по **темам контрольных рефератов**, которые используются для контроля степени усвоения всего учебного курса с применением знаний из дистанционной части курса.

Темы контрольных рефератов по курсу

«Введение в физику когерентных электронных транспортных явлений в наноструктурных системах»

1. Применение наноструктурных систем.
2. Размерное квантование движения электронов в квантовых ямах.
3. Физические принципы работы резонансно-туннельного диода.
4. Энергетический спектр электронов двухъямных наноструктурах.
5. Моделирование вольт-амперной характеристики резонансно-туннельного диода.

Учебно-тематический план

№	Название учебного курса и лекций	Всего, час.	в том числе (указать часы)			Форма контроля
			Дистанционные лекции (самостоятельное изучение, дистанционное общение преподавателем, вопросы-ответы через email, форум, чат и др.)	Самостоятельная работа. Подготовка ответов на контрольные вопросы	Очный практикум или другое практическое задание	
	«Введение в физику когерентных электронных транспортных явлений в наноструктурных системах»	24 ч.	10	2	12	1. Тесты для самотестирования 2. Контрольные вопросы (электронная зачётка) 3. Реферат
	Лекция №1. Виды наноструктурных систем и их основные свойства.		2	0.25		
	Лекция №2 Когерентный транспорт электронов через двумерные полупроводниковые наноструктурные системы.		2	0.5		
	Лекция №3 Резонансно-туннельный диод – квантовый прибор, основанный на когерентном электронном транспорте		2	0.5		
	Лекция №4		2	0.5		

Особенности электронного транспорта через полупроводниковые сверхрешетки.					
Лекция №5 Основы моделирования статических характеристик наноструктурных систем на основе численных методов.		2	0.25		
Итоговый контроль		1. Тесты для само тестирования	2. Контрольные вопросы (электронная зачётка)	3. Реферат	

Список литературы (основной и дополнительной), а также других видов учебно-методологических материалов и пособий, необходимых для изучения (конспектов лекций, видеолекций, лазерных дисков и др.).

Список литературы и др. дополнительных источников информации в кол-ве – 12.

1. <http://issp.ras.ru/>. Информационный бюллетень ПерсТ (Перспективные технологии).
2. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. *Теоретическая физика. Т.3: Квантовая механика. Нерелятивистская теория.* - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Физматлит., 1963.
3. В.М. Галицкий, Б.М. Карнаков, В.И. Коган. *Задачи по квантовой механике.* - М.: Наука, 1981.
4. L. Esaki, R. Tsu. *Tunneling in a finite superlattice.* Applied Physics Letters, volume 22, No 11, page 562 (1973).
5. В.Ф. Елесин. *К теории когерентного резонансного туннелирования взаимодействующих электронов.* Журнал экспериментальной и теоретической физики, том 116, выпуск 2, страница 704 (1999).
6. В.Ф. Елесин. *К теории генерации резонансно-туннельного диода.* Журнал экспериментальной и теоретической физики, том 119, выпуск 4, страница 816 (2001).
7. В.Ф. Елесин, И.Ю. Катеев, А.И. Подливаев. *Нелинейная теория когерентной генерации резонансно-туннельного диода в широком интервале частот.* Физика и техника полупроводников, том 34, выпуск 11, страница 1373 (2000).
8. В.М. Галицкий, В.Ф. Елесин. *Резонансное взаимодействие электромагнитных полей с полупроводниками,* - М.: Энергоатомиздат, 1986.
9. В.Ф. Елесин. *Высокочастотный отклик двухъямных наноструктур.* Журнал экспериментальной и теоретической физики, том 127, выпуск 1, страница 131 (2005).
10. В.Ф. Елесин, И.Ю. Катеев, А.И. Подливаев, *Высокочастотный нелинейный отклик двухъямных наноструктур.* Физика и техника полупроводников, том 39, выпуск 9, страница 1106 (2005).

11. Л.А Опенев, А.И. Подливаев, Н.Е. Львов. *Задачи по физике наноструктур для научно-исследовательской работы студентов*. Учебно-методическое пособие М.: МИФИ, 2007.
12. А.А. Самарский. *Теория разностных схем*. – М.: Наука, 1977.

Полное содержание лекций в электронной дистанционной части учебного курса на сайте www.nanoobr.ru