

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»
Факультет фундаментальной физико-химической инженерии

УТВЕРЖДЕН

на заседании Ученого совета

« 14 » июня 2013 г.

протокол № 4

Заместитель декана по учебной работе

_____ / Григорьева Л.Д. /

« 14 » июня 2013 г.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

дисциплины «ЭЛЕКТРОДИНАМИКА СПЛОШНЫХ СРЕД»

Специальность
010701 "Физика"

Квалификация
"Физик"

Форма обучения
очная

УМК соответствует учебному плану
подготовки,
утвержденному ректором Московского
государственного университета им.
М.В.Ломоносова академиком РАН В.А.
Садовничим 23.10.2009

Москва 2013

Название дисциплины: Электродинамика сплошных сред.

1. Цели и задачи освоения дисциплины:

Цели: изучение основных физических явлений электричества и магнетизма в сплошных средах, овладение фундаментальными понятиями и законами курса, а также знакомство с основными понятиями физики конденсированного состояния.

Задачи: сформировать у студентов представление об электродинамике сплошных сред, подготовить студентов к изучению курсов по физике конденсированного состояния.

2. Требования к результатам освоения содержания дисциплины:

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

Знать: основы электродинамики сплошных сред, основные понятия и проблемы современной физики конденсированного состояния.

Уметь: формулировать конкретные задачи на основе законов и закономерностей, освоенных в курсе электродинамики сплошных сред; получать данные, проводить их математическую обработку, обобщать полученные результаты.

Владеть: расчетными методами решения задач, навыками поиска данных в открытых источниках (в том числе, в информационных базах данных) и применять их при решении практических задач.

Приобрести опыт деятельности: в анализе, формулировке и решении конкретных задач, интересующих фундаментальную науку и практику.

3. Содержание и структура дисциплины

3.1. Содержание разделов дисциплины (К – коллоквиум, Т – проверочная самостоятельная работа (тест), РК - рубежная контрольная работа, ДЗ – домашнее задание, РГЗ – расчетно-графическое задание)

№ раздела	Наименование раздела	Содержание раздела	Форма текущего контроля
1	Электромагнитные поля и уравнения Максвелла в материальных средах.	Микроскопические и макроскопические поля. Формы записи уравнений Максвелла для макроскопических электромагнитных полей. Материальные уравнения, виды материальных уравнений.	ДЗ, РК
2	Феноменологическое описание электромагнитных свойств материальной среды.	Поляризация и намагниченность среды, векторы индукции и напряженностей полей. Тензоры диэлектрической и магнитной проницаемости, тензор проводимости. Магнитная гидродинамика. Пространственная и временная дисперсии, поглощение, соотношения симметрии и соотношения Крамерса-Кронига. Обобщенная диэлектрическая проницаемость и обобщенная проводимость. Пондеромоторные силы.	
3	Электромагнитные	Дисперсионное уравнение, различные	

	волны в средах.	постановки задач об электромагнитных волнах, комплексный показатель преломления, закон дисперсии, фазовая и групповая скорость. Анизотропные, негиротропные, гиротропные среды.	
4	Классические модели диэлектриков.	Полярные и неполярные диэлектрики. Теория Лоренц-Лорентца. Нормальные электромагнитные волны, поляритоны. Дебаевская релаксация	
5	Электродинамика металлов	Модель Друде, проводимость, эффект Холла, частотная дисперсия. Статистика Ферми-Дирака и модель Зоммерфельда, понятие о квазиимпульсе, поверхности Ферми. Парамагнитная восприимчивость электронной системы. Скин-эффект, граничное условие Леонтовича. Ленгмюровская экранировка в металлах, ультрафиолетовая прозрачность металлов.	
6	Электродинамика полупроводников	Квазиимпульс и теорема Блоха, понятие о зонной структуре твердых тел. Классификация электродинамических свойств на основе зонной структуры. Зонная структура полупроводников, носители тока в полупроводниках. Электрические свойства полупроводников, экранировка электрического заряда, контакты различных полупроводников. Оптические свойства полупроводников и диэлектриков.	ДЗ, РК
7	Магнитные свойства материальных сред	Основные понятия магнетизма, магнетизм атомов, парамагнетизм свободных электронов, диамагнетизм Ландау. Парамагнетики в переменном поле, магнитный резонанс, электромагнитные волны в магнетиках. Ферромагнетизм и антиферромагнетизм, спиновые волны.	
8	Электродинамика плазмы.	Понятие о плазме, гидродинамическая модель плазмы, диэлектрическая проницаемость плазмы. Нормальные электромагнитные волны в плазме, плазмоны. Экранирование электрического заряда в плазме.	
9	Электродинамика сверхпроводников	Явление сверхпроводимости, эффект Мейснера, уравнения Лондонов. Физическая природа сверхпроводящего состояния, теория Гинзбурга-Ландау, квантование магнитного потока. Высокотемпературные сверхпроводники.	

3.2. Структура дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 68 часов, из них лекции – 32 часа, семинары – 16 часов, самостоятельная работа – 20 часов.

Вид работы	Семестр 6	Всего
Общая трудоемкость	68	68
Аудиторная работа:	48	48
Лекции (Л)	32	32
Практические занятия (ПЗ)	16	16
Лабораторные работы (ЛР)	0	0
Самостоятельная работа	20	20
Вид итогового контроля	экзамен	

Разделы дисциплины по семестрам

№ раздела	Наименование раздела	Количество часов				
		Всего	Аудиторная работа			Внеаудиторная работа
			Л	ПЗ	ЛР	
1	Электромагнитные поля и уравнения Максвелла в материальных средах	4	2	2		
2	Феноменологическое описание электромагнитных свойств материальной среды	4	2	2		
3	Электромагнитные волны в средах	6	4	2		
4	Классические модели диэлектриков	6	4	2		
5	Электродинамика металлов	9	6	3		
6	Электродинамика полупроводников	14	6	2		6
7	Магнитные свойства материальных сред	11	4	1		6
8	Электродинамика плазмы	7	2	1		4
9	Электродинамика сверхпроводников	7	2	1		4
	Итого:	68	32	16		20

3.3. Практические занятия (семинары)

№ раздела	№ занятия	Тема	Кол-во часов
1	1	Уравнения Максвелла для макроскопических полей	1
	2	Материальные уравнения	1
2	3	Функции линейного отклика	1
	4	Соотношения симметрии и Крамерса-Кронига	1
3	5	Дисперсионное уравнение и закон дисперсии волн	1
	6	Анизотропные, негиротропные и гиротропные среды	1
4	7	Неполярные диэлектрики, поляритоны	1
	8	Полярные диэлектрики, Дебаевская релаксация	1
5	9	Модель Друде	1
	10	Модель Зоммерфельда	1
	11	Скин-эффект и граничное условие Леонтовича	1
6	12	Зонная структура и классификация материальных сред Зонная структура полупроводников, статистика носителей тока в полупроводниках	1
	13	Электрические свойства полупроводников Оптические свойства полупроводников	1

7	14	Основные понятия магнетизма и магнетизм атомов Парамагнетизм электронов и атомов	1
8	15	Гидродинамическая модель плазмы Поперечные и продольные волны в плазме, плазмоны	1
9	16	Уравнения Лондонов, эффект Мейснера Уравнение Гинзбурга-Ландау	1

3.4. Самостоятельное изучение разделов дисциплин

№ раз-дела	№ во-проса	Вопросы, выносимые на самостоятельное изучение	Кол-во часов
6	1	Экранировка заряда в полупроводниках	2
6	2	Изгиб зон при контакте полупроводников	2
6	3	Полупроводниковые приборы	2
7	4	Квантование Ландау	2
7	5	Типы магнитного упорядочения	4
8	6	Затухание в плазме	4
9	7	Применения сверхпроводников	2
9	8	Высокотемпературные сверхпроводники	2

4. Образовательные технологии

4.1. Интерактивные образовательные технологии, используемые в аудиторных занятиях

Семестр	Вид занятия	Интерактивные образовательные технологии	Кол-во часов
6	Лекции, семинары	мультимедийный проектор, презентация, интерактивная доска	48
Итого			48

5. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации

Задачи к экзамену по дисциплине.

Задача 1.

Определить поле вокруг незаряженного проводящего шара радиуса R , находящегося во внешнем однородном электрическом поле \vec{E}_0 .

Решение. Решение ищем в виде $\varphi = -(\vec{E}_0 \vec{r}) + \varphi_1$, где φ_1 - должна удовлетворять уравнению Лапласа и обращаться в нуль на бесконечности. Этим условиям удовлетворяет функция

$\varphi_1 = -C \vec{E}_0 \nabla \frac{1}{r} = C \frac{(\vec{E}_0 \vec{r})}{r^3}$. Далее из граничного условия на поверхности шара имеем

$$\varphi_s = -(\vec{E}_0 \vec{R}) + C \frac{(\vec{E}_0 \vec{R})}{R^3} \Rightarrow C = R^3 \Rightarrow \varphi(\vec{r}) = -(\vec{E}_0 \vec{r}) \left(1 - \frac{R^3}{r^3} \right)$$

Задача 2.

Определить поле вокруг незаряженного проводящего цилиндра радиуса R , находящегося во внешнем однородном электрическом поле \vec{E}_0 , перпендикулярном оси цилиндра.

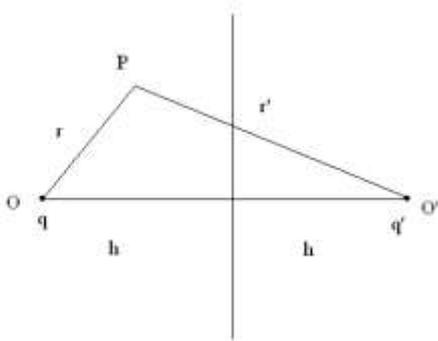
Решение. Решение ищем в виде $\varphi = -(\vec{E}_0 \vec{r}) + \varphi_1$, где φ_1 - должна удовлетворять двумерному уравнению Лапласа и обращаться в нуль на бесконечности. Этим условиям удовлетворяет функция $\varphi_1 = C(\vec{E}_0 \nabla \ln r) = C \frac{(\vec{E}_0 \vec{r})}{r^2}$. Далее из граничного условия на поверхности шара имеем

$$\varphi_s = -(\vec{E}_0 \vec{R}) + C \frac{(\vec{E}_0 \vec{R})}{R^2} \Rightarrow C = R^2 \Rightarrow \varphi(\vec{r}) = -(\vec{E}_0 \vec{r}) \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right)$$

Задача 3.

Определить поле, создаваемое точечным зарядом q находящемся на расстоянии h от плоской границы раздела двух диэлектриков с диэлектрическими проницаемостями $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ в среде 1.

Решение.



Потенциал в среде 1 ищем в виде $\varphi_1 = \frac{q}{\varepsilon_1 r} + \frac{q'}{\varepsilon_1 r'}$ (удовлетворяет уравнению Пуассона в среде 1) $\Delta \varphi_1 = -\frac{4\pi q \delta(\vec{r} - \vec{r}_0)}{\varepsilon_1}$. А потенциал в среде 2 ищем как потенциал фиктивного заряда q'' , помещенного в точку O : $\varphi_2 = \frac{q''}{\varepsilon_2 r}$. На границе должны быть выполнены условия

$$\varphi_1 = \varphi_2, \Rightarrow \varepsilon_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial n} = \varepsilon_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial n} \Rightarrow \frac{q + q'}{\varepsilon_1} = \frac{q''}{\varepsilon_2}, \quad q - q' = q'' \Rightarrow q' = q \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}, \quad q'' = q \frac{2\varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}$$

Задача 4.

При выводе уравнений Максвелла в сплошной среде были введены два вспомогательных вектора \vec{P}, \vec{M} соотношениями:

$$\rho_i = -\text{div} \vec{P}, \quad \vec{j}_i = c \cdot \text{rot} \vec{M} - \frac{\partial \vec{P}}{\partial t}$$

Выяснить физический смысл этих векторов.

Решение. Для выяснения их физического смысла рассмотрим сначала интеграл (компоненту дипольного момента) для электронейтрального тела

$$\int_V x_i \rho d\vec{r} = -\int_V x_i \text{div} \vec{P} d\vec{r} = \int_V (P_i - \text{div}(x_i \vec{P})) d\vec{r} = \int_V P_i d\vec{r} - \int_S x_i \vec{P} d\vec{r} = \int_V P_i d\vec{r}$$

Интеграл по поверхности равен нулю (поверхность можно взять вне тела). Тогда интеграл справа равен компоненте дипольного момента. Следовательно, P_i можно интерпретировать как плотность дипольного момента. Плотность определена неоднозначно (с точностью до выражения, которое при интегрировании по объему обращается в нуль). Сложнее со вторым вектором. Рассмотрим полный магнитный момент (для постоянных (или медленно меняющихся полей))

$$\int_V \frac{1}{2c} [\vec{r}\vec{j}] d\vec{r} = \frac{1}{2} \int_V [\vec{r} \cdot \text{rot} \vec{M}] d\vec{r}$$

Далее используем обобщенную теорему Гаусса (снова поверхность берем вне тела)

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \int_V [\vec{r} \cdot \text{rot} \vec{M}] d\vec{r} &= \frac{1}{2} \int_V [\vec{r} \cdot [\nabla \cdot \vec{M}]] d\vec{r} = \\ &= -\frac{1}{2} \int_S [[d\vec{S} \cdot \text{rot} \vec{M}] \vec{r}] d\vec{r} - \frac{1}{2} \int_V [[\vec{M} \nabla] \vec{r}] d\vec{r} = -\frac{1}{2} \int_V [[\vec{M} \nabla] \vec{r}] d\vec{r} \end{aligned}$$

Далее имеем

$$[[\vec{M} \nabla] \vec{r}] = (\vec{M} \nabla) \vec{r} - \vec{M} \text{div} \vec{r} = \vec{M} - 3\vec{M} = -2\vec{M}$$

В результате вычисляемый интеграл равен $\int_V \frac{1}{2c} [\vec{r}\vec{j}] d\vec{r} = \int_V \vec{M} d\vec{r}$, что означает: вектор \vec{M} можно интерпретировать как плотность магнитного момента.

Задача 5.

Вывести соотношения Крамерса-Кронига для изотропной среды без пространственной дисперсии.

Решение. Исходим из определения “фурье-образа диэлектрической проницаемости”

$$\varepsilon_{\alpha\beta}(\omega) = \int_0^{\infty} \varepsilon_{\alpha\beta}(\tau) \exp(i\omega\tau) d\tau$$

$$\varepsilon(\omega) = 1 + \int_0^{\infty} [\varepsilon(\tau) - \delta(\tau)] \exp(i\omega\tau) d\tau = 1 + 4\pi \int_0^{\infty} \alpha(\tau) \exp(i\omega\tau) d\tau$$

где функция $\alpha(\tau) = \frac{\varepsilon(\tau) - \delta(\tau)}{4\pi}$ описывает поляризуемость среды

$$\vec{P}(t) = \frac{\vec{D}(t) - \vec{E}(t)}{4\pi} = \int_{t>t'} \alpha(t-t') \vec{E}(t') dt'$$

Поляризуемость, по сравнению с диэлектрической проницаемостью, обладает тем преимуществом, что она конечна и непрерывна (это следует из физических соображений) для любых τ . Тогда как $\varepsilon(\tau)$ содержит особый вклад $\delta(\tau)$. Для функции $\alpha(\tau)$ имеем

$$\alpha(\omega) = \int_0^{\infty} \alpha(\tau) \exp(i\omega\tau) d\tau$$

Еще одно важное свойство $\alpha(\tau)$ состоит в том, что $\alpha(\tau) \rightarrow 0$ при $\tau \rightarrow \infty$. Действительно, значение поляризации в данный момент не должно зависеть от того, что происходило бесконечно “давно”, так как время релаксации среды конечно. Выразим перечисленные свойства $\alpha(\tau)$ через свойства фурье-образа $\alpha(\omega)$:

$$\alpha(\omega) = \alpha'(\omega) + i\alpha''(\omega), \quad \alpha'(\omega) = \int_0^{\infty} \alpha(\tau) \cos \omega\tau d\tau, \quad \alpha''(\omega) = \int_0^{\infty} \alpha(\tau) \sin \omega\tau d\tau$$

$$\alpha'(0) = \int_0^{\infty} \alpha(\tau) d\tau < \infty, \quad \alpha''(0) = 0$$

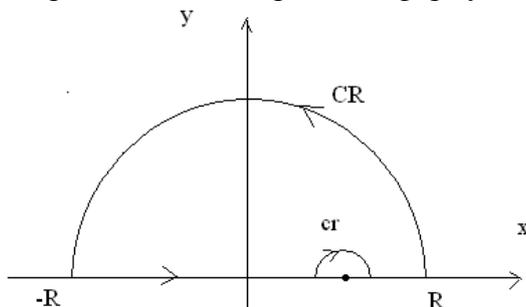
$$\alpha'(\pm\infty) = 0, \quad \alpha''(\pm\infty) = 0$$

Теперь рассмотрим функцию $\alpha(z)$ как функцию комплексной переменной $z = x + iy$. Из свойства причинности следует, что эта функция аналитическая в верхней полуплоскости $y \geq 0$. Представим ее в виде суммы действительной и мнимой частей

$$\alpha(z) = \int_0^{\infty} \alpha(\tau) \exp(iz\tau) d\tau = \int_0^{\infty} \alpha(\tau) \exp(ix\tau) \exp(-y\tau) d\tau = u + iv$$

$$u(x, y) = \int_0^{\infty} \alpha(\tau) \cos(x\tau) \exp(-y\tau) d\tau, \quad v(x, y) = \int_0^{\infty} \alpha(\tau) \sin(x\tau) \exp(-y\tau) d\tau$$

Проверьте условия Коши –Римана (интегрировать можно сходящиеся интегралы, а это следствие причинности). Поэтому и аналитичность есть следствие причинности. Итак, $\alpha(z)$ аналитична, и кроме того $\alpha(z) \rightarrow 0$ при $|z| \rightarrow \infty$. Вычислим интеграл (далее действуем как при выводе интегральной формулы Коши в ТФКП):



$$\oint \frac{\alpha(z)}{z - \omega} dz = \int_{-R}^{\omega-r} \frac{\alpha(x)}{x - \omega} dx + \int_{\omega+r}^R \frac{\alpha(x)}{x - \omega} dx + \int_{CR} \frac{\alpha(z)}{z - \omega} dz + \int_{cr} \frac{\alpha(z)}{z - \omega} dz = 0 \Rightarrow$$

$$0 = v.p. \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\alpha(x)}{x - \omega} dx + \lim_{r \rightarrow 0} \int_{\pi}^0 \frac{\alpha(\omega + re^{i\varphi})}{re^{i\varphi}} re^{i\varphi} i d\varphi \Rightarrow \alpha(\omega) = \frac{1}{i\pi} v.p. \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\alpha(x)}{x - \omega} dx$$

Буквы перед интегралом *v.p.* означают, что этого интеграл в смысле главного значения. Отсюда имеем соотношения Крамерса-Кронига

$$\alpha'(\omega) = \frac{1}{\pi} v.p. \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\alpha''(x)}{x - \omega} dx, \quad \alpha''(\omega) = -\frac{1}{\pi} v.p. \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\alpha'(x)}{x - \omega} dx$$

Проверить выполняются ли они для модели Дебая

$$\varepsilon(\omega) = 1 + \frac{4\pi\alpha_0}{1 - i\omega\tau}$$

Задача 6.

Вывести дисперсионное уравнение из уравнений Максвелла.

Решение. Исходим из уравнений Максвелла

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad \text{div} \vec{B} = 0$$

$$\text{rot} \vec{H} = \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad \text{div} \vec{D} = 0$$

Подстановка гармонической зависимости всех функций дает ($\vec{E}, \vec{H}, \vec{D}, \vec{B} \propto \exp(i\vec{k}\vec{r} - i\omega t)$):

$$(\vec{k}\vec{D}) = 0, \quad [\vec{k}\vec{H}] = -\frac{\omega}{c}\vec{D}, \quad (\vec{k}\vec{B}) = 0, \quad [\vec{k}\vec{E}] = \frac{\omega}{c}\vec{B}$$

$$D_\alpha = \varepsilon_{\alpha\beta}E_\beta, \quad B_\alpha = \mu_{\alpha\beta}H_\beta$$

Это система линейных однородных уравнений относительно амплитуд. Условием существования ненулевого решения является равенство нулю детерминанта этой системы. Часто электромагнитная поляризация задается амплитудой электрического поля E_i . Поэтому в вышеупомянутой системе принято исключать все другие переменные, кроме E_i . После такого исключения (выкладки обязательно проделать самостоятельно) получаем систему уравнений

$$\left(k_\alpha k_\beta - k^2 \delta_{\alpha\beta} + \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_{\alpha\gamma} \mu_{\gamma\beta} \right) E_\beta = 0 \Rightarrow \det \left(k_\alpha k_\beta - k^2 \delta_{\alpha\beta} + \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_{\alpha\gamma} \mu_{\gamma\beta} \right) = 0$$

Привести какой-либо пример использования дисперсионного уравнения.

Задача 7.

Вывести выражение для диэлектрической проницаемости в модели неполярного диэлектрика. Найти частоты, соответствующие экстремумам действительной и мнимой части поляризуемости. Выделите и постройте графики действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости (один вид осцилляторов). Найдите комплексный показатель преломления $\tilde{n}(\omega) = \sqrt{\varepsilon(\omega)}$.

Решение. Исходим из уравнения для упругого диполя с затуханием

$$m\ddot{\vec{r}} = e\vec{E} - k\vec{r} - \eta\dot{\vec{r}}$$

Решение этого уравнения для гармонической зависимости от времени имеет вид

$$\vec{r}_\omega(t) = -\frac{e}{m} \cdot \frac{\vec{E}_\omega(t)}{\omega^2 - \omega_0^2 + i\omega\gamma}$$

Отсюда имеем

$$\vec{P}_\omega = Ne\vec{r}_\omega \Rightarrow \vec{D}_\omega = \varepsilon(\omega)\vec{E}_\omega = \vec{E}_\omega + 4\pi\vec{P}_\omega = \left(1 - \frac{4\pi Ne^2/m}{\omega^2 - \omega_0^2 + i\omega\gamma} \right) \vec{E}_\omega \Rightarrow$$

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{4\pi Ne^2/m}{\omega^2 - \omega_0^2 + i\omega\gamma} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - \omega_0^2 + i\omega\gamma}, \quad \omega_p^2 = \frac{4\pi Ne^2}{m}, \quad \omega_0^2 = \frac{k}{m}$$

Последнее выражение можно несколько обобщить, учитывая тот факт, что каждой молекуле можно поставить несколько осцилляторов с своими частотами и затуханиями

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \sum_i \frac{\omega_p^2 f_i}{\omega^2 - \omega_{0i}^2 + i\omega\gamma_i}, \quad f_i = \frac{N_i}{N}$$

Дорешать задачу самостоятельно.

Задача 8.

Ввести в модель Друде-Лоренца магнитное поле

$$m\dot{\vec{v}} + \frac{m}{\tau}\vec{v} = q \left(\vec{E} + \frac{1}{c} [\vec{v}, \vec{B}] \right)$$

Найти стационарное решение (скорость постоянна) для длинного (вдоль оси y) проводника.

На основе этой модели описать эффект Холла.

Задача 9.

Используя результаты задачи 8 дать описание эффекта Холла в модели с двумя типами носителей.

Задача 10.

Исследовать магнетосопротивление в модели Друде-Лоренца с одним и двумя типами носителей.

Задача 11.

Найти законы дисперсии продольных и поперечных электромагнитных волн в диэлектрике с диэлектрической проницаемостью вида

$$\varepsilon(\omega) = 1 + (\varepsilon_0 - 1) \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2}$$

Почему в ионных кристаллах высокочастотная ветвь поляритонов имеет более низкую частоту, чем в неполярных диэлектриках.

Задача 12.

В модели Друде-Лоренца найти комплексный показатель преломления для областей частот

$\omega \ll \gamma$, $\gamma < \omega < \tilde{\omega}_p$, $\omega \gg \tilde{\omega}_p$. Каким физическим эффектам соответствуют эти три предельных случая?

Задача 13.

Рассмотрите гидродинамическую модель плазмы с затуханием

$$mN \left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} \right] = -\nabla p + eN \left(\vec{E} + \frac{1}{c} [\vec{v}, \vec{B}] \right) - mN \frac{\vec{v}}{\tau}$$

Выведете формулы для поперечной и продольной диэлектрической проницаемости

$$\varepsilon_i(k^2, \omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega \left(\omega + \frac{i}{\tau} \right)}, \quad \varepsilon_l(k^2, \omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega \left(\omega + \frac{i}{\tau} \right) - (\partial p / \partial N)_0 (k^2 / m)}$$

Найдите частоты поперечных и продольных волн в такой модели плазмы.

Список вопросов к экзамену.

1. Уравнения Максвелла в среде, материальные уравнения.
2. Материальные уравнения в общем случае (нелокальность, анизотропии).
3. Свойства материальных тензоров (на примере диэлектрической проницаемости).
4. Материальные уравнения в представлении Фурье. Свойства материальных тензоров в представлении Фурье.
5. Соотношения Онзагера. Соотношения Крамерса-Кронига.
6. Что такое пространственная и временная дисперсия?
7. Дисперсионное уравнение и пример использования.
8. Нормальные электромагнитные волны в среде. Пример.
9. Диэлектрическая проницаемость неполярного диэлектрика. Электромагнитные волны в полярном диэлектрике.
10. Диэлектрическая проницаемость полярного диэлектрика. Электромагнитные волны в полярном диэлектрике.
11. Модель Друде-Лоренца (диэлектрическая проницаемость и проводимость).
12. Нормальный скин эффект и аномальный скин-эффекты.
13. Ленгмюровская экранировка и высокочастотная прозрачность металлов.

14. Поверхностный импеданс, граничное условие на поверхности проводника.
15. Уравнения гидродинамической модели плазмы.
16. Диэлектрическая проницаемость плазмы и поперечные и продольные волны в плазме.
17. Экранировка заряда в плазме, дебаевский радиус.
18. Характерные свойства сверхпроводников, уравнения Лондонов.
19. Уравнения Лондонов и объяснение эффекта Мейснера.
20. Сохранение и квантование магнитного потока в сверхпроводниках.
21. Сверхпроводники 1-го, 2-родов, высокотемпературные сверхпроводники.
22. Магнитная восприимчивость парамагнетика, магнитный резонанс.
23. Парамагнетики, электромагнитные волны в парамагнетиках.
24. Ферромагнетики, модель Гейзенберга. Молекулярное поле Вейса.
25. Магнитная восприимчивость ферромагнетика.
26. Электромагнитные волны в ферромагнетиках.
27. Эффект Холла.
28. Нелинейные эффекты, самофокусировка.

6. Учебно-методическое обеспечение дисциплины

7.1. Основная литература:

Памятных Е.А., Туров Е.А.. “Основы электродинамики материальных сред”, Наука, Физматлит, Москва, 2000.

7.2. Дополнительная литература:

S.H. Simon “Lecture Notes for Solid State Physics”, Oxford University, 2012.

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Лекционные занятия проводятся в специально оборудованной аудитории с мультимедийным оборудованием. Расчетный практикум выполняется в специальном помещении, каждый учащийся имеет индивидуальное рабочее место и отдельные задания. Вспомогательный материал в виде презентаций и электронных учебных материалов доступен студентам на сайте факультета.

Discipline name: Electrodynamics of Condensed Matter

1. Purposes of discipline mastering:

Purposes: study of the basic physical phenomena of electricity and magnetism in condensed matter, mastering the fundamental concepts and laws of the course, as well as familiarity with the basic concepts of condensed matter physics.

Tasks: form students an idea of the electrodynamics of condensed matter, to prepare students to study courses in the physics of condensed ground state.

2. A discipline Place in structure OOP VPO

The discipline concerns block V-PD in a preparation direction «Applied mathematics and physics».

Structural element of OOP БИО - БМ (the bachelor of Moscow State University) in a preparation direction «Applied mathematics and physics». The discipline concerns to basic parts of an educational cycle.

3. Requirements to the results of discipline mastering:

(1) Universal (OK):

(a) General scientific:

Possession knowledge of a subject and objects of studying, methods of research, modern concepts, achievements and restrictions of natural sciences: physicists, chemistry, biology, sciences about the earth and the person, ecology; possession of bases of methodology of scientific knowledge of various levels of the organization of a matter, space and time; ability, using interdisciplinary system communications of sciences, independently to allocate and solve the basic world outlook both methodological natural-science and social problems for the purpose of sustainable development planning (OHK-1);

Ability to analyze socially significant processes and evaluate the philosophical and economic problems in the solution of social and professional tasks (OHK-2);

Possession of bases of historical knowledge, understanding the driving forces and laws of the historical process of man's place in the historical process, the political organization of society, understanding of the basic values of the culture, the possession of citizenship(OHK-3);

Possession of methodology of scientific researches in professional area, knowledge of bases of business dialogue (OHK-4);

Readiness to use knowledge as tools for the complete decision of informative and professional problems (OHK-5);

Possession of base sections of mathematics, physics, chemistry, computer science and the programming, necessary for the decision of problems in professional area (OHK-6);

Ability to use in professional work base knowledge in area of mathematics, physics, chemistry, computer science and programming (OHK-7);

Ability to create mathematical models of typical professional problems and to interpret the received mathematical results, possession of knowledge of restrictions and borders of applicability of models (OHK-8);

Possession of knowledge in area of technics, technology and innovation, necessary for practical development of modern technical systems and technologies, for the decision of research and practical problems in professional area (OHK-9);

(b) Instrumental

Possession of norms of Russian literary language and functional styles of speech; ability to show in speech dialogue personal and professional culture, spiritually-moral belief; ability to put and solve communicative problems in all spheres of dialogue to operate processes of an information exchange in various communicative environments (ИК-1);

Foreign language skills in oral and written form for communication in educational, scientific, professional, social and cultural spheres; possession specialty terminology in a foreign language, the ability to prepare publications, presentations, discuss and defend work presented in a foreign language (ИК-2);

Possession of skills of use of software and work in computer networks uses of resources the Internet; possession of the basic methods, ways and means of reception, storage, and information processing (ИК-3);

Ability to use modern computer facilities and the specialized software in research work (ИК-4);

Possession of basic legal concepts, skills, understanding of the legal text, the ability to use legal documents in their professional activities, and the ability to use the legal knowledge to protect their civil rights and interests (ИК-5);

Ability to use the knowledge of economics in the context of their social and professional activities (ИК-6);

Possession of the basic methods of protection of the industrial personnel and the population from possible consequences of failures, accidents, acts of nature (ИК-7);

Possession of means of independent, methodically correct use of methods of physical training and health strengthening, readiness for achievement of due level of physical readiness for maintenance high-grade social and professional work (ИК-8);

Possession of methods of patent search and knowledge in the field of the patent researches, necessary in professional work (ИК-9);

Possession of skills of management of the information for writing of reports, reports, reviews and articles (ИК-10);

Possession of methods of the tool researches necessary for carrying out of experimental works in professional area (ИК-11);

Ability to the analysis of knowledge and their synthesis in professional work sphere (ИК-12);

Ability to the organization and planning of experimental and theoretical researches in professional work and to forming of strategy of research work (ИК-13);

(c) System:

Ability to creativity, generation of innovative ideas, promotion of independent hypotheses (СК-1);

Ability to search, the critical analysis, generalization and ordering of the scientific information, to statement of research objectives and choice of optimum ways and methods of their achievement (СК-2);

Ability to independent training and working out of new methods of research, to change of a scientific and research-and-production profile of activity; to innovative scientifically-educational activity (СК-3);

Ability to put knowledge into practice (СК-4);

Ability to working out of projects and their management, ability to leadership (СК-5);

Ability to the initiative and business, ability to work independently (СК-6);

(2) Professional (PC):

Possession of skills and methodological culture of application of the received fundamental knowledge in area of mathematics, physics, chemistry and biology for performance of scientific researches (PC 1);

Ability to work with the modern software, devices and installations to apply experimental and theoretical methods of researches and to process the received experimental data for performance of a concrete research and engineering problem (PC 2);

Ability to apply the theory and methods of mathematics, physics and computer science for construction of qualitative and quantitative models (PC 3);

Ability to work with the scientific literature, readiness to compare known experimental and theoretical results with the received original

By experimental and theoretical results and to do substantiated conclusions (PC 4);

Readiness to discuss in the scientific environment the received experimental and theoretical results and to do conclusions; ability to state the received scientific results in the oral form (presentations and reports at conferences) and the written form (articles, reviews, messages) (PC 5). Possession of skills of planning and control of performance of the established plans in professional work sphere (PC 6); Ability to active search of the new information, ability to work with various sources of the information; readiness to analyze and solve engineering problems with use of the interdisciplinary approach (PC 7); Readiness for creation of competitive production on the basis of the received fundamental knowledge (PC 9); Ability to participate in working out of breadboard models of products and their modules and to apply instrumentation to definition of technical characteristics of breadboard models (PC 10); Ability to combine research and engineering-industrial activity for working out of the high technologies providing creation of substances, materials and complex artificial systems with the set properties (PC 11); Readiness for search of technical and technological innovations, susceptibility for innovations (PC 12); Readiness for carrying out of experimental works on check and development of technical and technological innovations (PC 13); Readiness for working out of programs of carrying out of research and engineering-industrial works on all chain of an innovative cycle (PC 14); Readiness for commercialization of scientific workings out (PC 15). Readiness for communications and work as a part of collective of executors in scientifically - research and engineering-industrial spheres (PC 16); Possession of skills of management of research and engineering-industrial activity for creation of a healthy, safe and productive working environment, maintenance of conformity of products of professional work to the quality standards (PC 17); Possession of the basic methods of a management: statements and distributions of problems, delegation and control, feedback and an estimation of execution, training on a workplace, individual and group decision-making (PC 18); Readiness to show in practice aspiration and ability to realize the potential (knowledge, abilities, experience, personal qualities) the expert of new generation for the economy based on knowledge, for successful productive activity in professional and social spheres (PC 19);

As a result of discipline familiarization a student must:

To Know: foundations of condensed matter electrodynamics, basic notions of condensed matter, basic problems of condensed matter physics.

To be able: formulate specific tasks based on the laws and laws developed in the course; receive solutions, carry out their mathematical treatment.

To own: settlement methods of the decision of problems, skills of search of the data in open sources (including, in information database) and to apply them for solution of practical problems.

To gain activity experience: in the analysis, the formulation and the decision of the specific targets, interesting fundamental science and practice.

4. The content and structure of the discipline

4.1. The maintenance of sections of discipline (C- a colloquium, T – testing work, FCW – frontier control work, HW - homework, SGT - the settlement-graphic task)

Section #	Section name	Section content	Contol form
1	Electromagnetic fields and Maxwell's	Microscopic and macroscopic field. Forms of the Maxwell equations for the macroscopic	HW,T

	equations in material medium	electromagnetic fields. Material equations in different forms.	
2	Phenomenological description of the electromagnetic properties of material medium.	Tensors of dielectric and magnetic permittivity, the conductivity tensor. Spatial and temporal dispersion, symmetry relations and the Kramers-Kronig relations. Generalized permittivity and generalized conductivity.	HW,T
3	Electromagnetic waves in material mediums.	Dispersion equation, different kind of problems about electromagnetic waves, the complex refractive index, dispersion law, the phase and group velocity. Anisotropic, non gyrotropic, and gyrotropic mediums.	HW,T
4	Classical models of dielectrics	Polar and nonpolar dielectrics. Lorenz-Lorentz theory. Normal electromagnetic waves, polaritons, and the Debye relaxation	HW,T
5	Electrodynamics of metals	Drude's model, conductivity, Hall effect, and frequency dispersion. The Fermi-Dirac statistics and Sommerfeld's model, the concept of quasi-impulse, the Fermi surface. Paramagnetic susceptibility of the electronic system. Skin effect, the Leontovich boundary condition. The Lengmuir screening in metals, ultraviolet transparency of metals.	HW,T
6	Electrodynamics of semiconductors	Quasi-impulse and Bloch's theorem, the notion of a band structure of solids. Classification of electrodynamic properties based on a band structure. The band structure of semiconductors, current carriers in semiconductors. Electrical properties of semiconductors, screening of electric charge, contacts various semiconductors. Optical properties of semiconductors and dielectrics.	HW,T
7	Magnetic properties of material mediums	Basic concepts of magnetism, atomic magnetism, paramagnetism of free electrons, Landau diamagnetism. Paramagnetic in an alternating field, magnetic resonance, electromagnetic waves in magnetic materials. Ferromagnetism, antiferromagnetism, spin waves.	HW,T
8	Electrodynamics of plasma	The concept of the plasma, hydrodynamic model of plasma. permittivity of the plasma. Normal electromagnetic waves in plasma, plasmons. Screening of an electrical charge in the plasma.	HW,T
9	Electrodynamics of superconductors	The phenomenon of superconductivity, Meissner's effect, the Londons equation. The physical nature of the superconducting state, Ginzburg-Landau theory, magnetic flux quantization. High-temperature superconductors.	HW,T

4.2. Discipline structure

The general labour input of discipline makes 4 test units (144 hours), of them 1 – lectures (36 hours), 1,5 – seminars (54 hours), 1,5 – independent work (54 часа), and 2 test units (72 hours) laboratory works, 0,86 – independent work for laboratory (31 hours).

Physical department

Work kind	Semester 3	All
The general labour input	6,86 (247)	6,86 (247)
Lecture-hall work:	2,5 (90)	2,5 (90)
Lectures	1 (36)	1 (36)
Seminars	1,5 (54)	1,5 (54)
Laboratory work	2 (72)	2 (72)
Independent work	2,36 (85)	2,36 (85)
Kind of final check	Offset, examination	6

Sections of discipline with respect to semesters (physical section)

№ section	The section Name	Quantity of hours				
		Total	Lecture-hall work			Out of lecture-hall work
			L	S	LW	
1	Electromagnetic fields and Maxwell's equations into mediums		2	4		9
2	Phenomenological description of the electromagnetic properties of material medium.		2	4		2
3	Electromagnetic waves in medums.		4	4		8
4	Classical models of dielectrics		4	4		6
5	Electrodynamics of metals		6	8		14
6	Electrodynamics of semiconductors		6	10		16
7	Magnetic properties of mediums		8	12		16
8	Electrodynamics of plasma		2	4		6
9	Electrodynamics of superconductors		2	4		8
	total:		36	54		85

4.3. Лабораторные работы

Section #	LW#	Laboratory work name	Hours
1	1		
	2		
2	3		
	4		
3	5		
	6		
4	7		
	8		

5	9		
6	10		

4.4. Seminars

Section #	Seminar #	Seminar topic	Hours
1	1	Maxwell's equations for macroscopic fields	2
	2	Material equations	2
2	3	Linear response functions	2
	4	The Kramers-Kronig relations	2
3	5	Dispersion equations dispersion law	2
	6	Anisotropic, non-girotropic, and girotropic mediums	2
4	7	Nonpolar dielectrics, polaritons	2
	8	Polar dielectrics, Debye's relaxation	2
5	9	Drude's model	2
	10	Sommerfeld's model	2
	11	The skin effect, the boundary conditions of Leontovich	2
	12	Lengmuir's screening, ultraviolet transparency of metals	2
6	13	Quasi-impulse and Bloch's theorem	2
	14	Band structure and classification of material mediums	2
	15	Band structure of semiconductors, statics of current carriers in semiconductors	2
	16	Electrical properties of semiconductors	2
	17	Optical properties of semiconductors	2
7	18	Basic notions of magnetism, atomic magnetism	2
	19	Paramagnetism of electrons and atoms	2
	20	Landau's diamagnetism	2
	21	Paramagnetics in alternating field, magnetic resonance, electromagnetic waves	2
	22	Ferro and antiferromagnetism	2
	23	Waves in magneto polarized mediums, spin waves	2
8	24	Hydrodynamic model of plasma.	2
	25	Transverse and longitudinal waves in plasma, plasmons	2
9	26	The Londons equations, Meissner's effect	2
	27	Ginzburg-Landau theory	2

4.5. Курсовая работа (возможные темы)

4.6. Independent studying of discipline sections

Section #	Question #	Question name	Hours
6	1	Screening of charge in semiconductors	4
6	2	Bend of zone at the interface of different semiconductors	4
6	3	Semiconductors devices	6
7	4	Landau quantization	4
7	5	Types of magnetic ordering	6
8	6	Attenuation in plasma	4
9	7	Applications of superconductors	4

10	8	High temperature superconductors	4
----	---	----------------------------------	---

5. Educational technologies

5.1. The Interactive educational technologies used in lecture-hall lessons

Term	Kind of lesson	Interactive educational technologies	Hours
		Multimedia projector, presentation, interactive board	90
		laboratory benches "Electrodynamics"	72
Total			162

6. Estimated means for current control of progress and intermediate certification

Problems for frontier control works

Questions for preparation for examination

7. Educational- methodical maintenance of discipline

7.1. Basic literature:

Pamyatnyh E.A., and Turov E.A. "Electrodynamics of material mediums", Nauka, Fizmatlit, Moscow, 2000.

7.2. Additional literature:

S.H. Simon "Lecture Notes for Solid State Physics", Oxford University, 2012. 7.3. Periodical journals

7.4. Online Resources [http://www-](http://www-thphys.physics.ox.ac.uk/people/SteveSimon/condmat2012/LectureNotes2012.pdf)

[thphys.physics.ox.ac.uk/people/SteveSimon/condmat2012/LectureNotes2012.pdf](http://www-thphys.physics.ox.ac.uk/people/SteveSimon/condmat2012/LectureNotes2012.pdf)

7.5. Guidelines for laboratory work

7.6. Methodical instructions for practical exercises are located on site -

7.7. Methodological guidelines for coursework and work independently located on site -

7.8. Software of modern information and communication technologies

Discipline Material support

Lectures are held in specially equipped classrooms with multimedia equipment. Settlement workshop performed in a special room, each student has an individual workplace and individual tasks. Supporting material in the form of presentations and training materials available to students online faculty.