

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Фізико-математичний факультет
Кафедра загальної та теоретичної фізики

ФІЗИКА 2
Розділ ОПТИКА

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторної роботи **3-56**

«ВИВЧЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ТА ЙОГО ВПЛИВУ НА
ПОЛЯРИЗАЦІЮ СВІТЛА У МАГНІТООПТИЧНИХ КРИСТАЛАХ»

напрямок підготовки 0908 – Електроніка
спеціальність 6.050801 – Мікро- та наноелектроніка
 6.050803 - Акустотехніка

*Рекомендовано Вченою радою
фізико-математичного факультету
НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»,
протокол № 4 від 26.05.2017р.*

Київ

2017

Фізика 2/ Розділ Оптика: методичні вказівки до лабораторної роботи 3-5б «Вивчення магнітного поля та його впливу на поляризацію світла у магнітооптичних кристалах» для студентів спеціальності 6.050801 – Мікро- та нанoeлектроніка, 6.050803 - Акустотехніка / Уклад проф.Лінчевський І.В., ст.викл. Панченко М.М. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 14 с.

*Гриф надано вченою радою
інституту/факультету КПІ ім. Ігоря
Сікорського
(протокол №4 від 26.05.2017 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

ФІЗИКА 2

Розділ ОПТИКА

Методичні вказівки до лабораторної роботи 3-5б «Вивчення магнітного поля та його впливу на поляризацію світла у магнітооптичних кристалах»

напрямок підготовки студентів 0908 – Електроніка
спеціальність: 6.050801 – Мікро- та нанoeлектроніка, 6.050803 -
Акустотехніка

Укладачі Лінчевський Ігор Валентинович, д.ф.-м. наук, професор,
Панченко Марія Мирославівна, ст. викладач

Відповідальний
редактор Локтев В.М., завідувач кафедри ЗтаТФ, д.ф.-м.наук, професор

Рецензент Ужва В.І., доцент кафедри ЗФтаФТТ, к.ф.-м.наук, доцент

Лабораторна робота 3-9

ВИВЧЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ТА ЙОГО ВПЛИВУ НА ПОЛЯРИЗАЦІЮ СВІТЛА У МАГНІТООПТИЧНИХ КРИСТАЛАХ

Мета роботи. Експериментальне вивчення особливостей намагнічування магнітооптичних кристалів, дослідження впливу магнітного поля на обертання площини поляризації світла (ефект Фарадея). Перевірка закону Малюса.

Устаткування. Лабораторна установка для намагнічування магнітооптичного кристалу, магнітооптичний кристал ферит ітрієвого гранату.

1. Теоретичні відомості

Частина 1. Вивчення магнітного поля феромагнетика

Характерною властивістю феромагнетиків є складна залежність намагніченості J від напруженості зовнішнього магнітного поля H (Рис.1.)

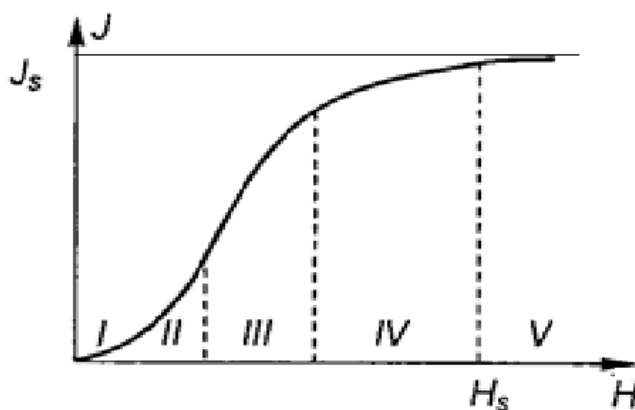


Рис.1 Залежність намагніченості J від напруженості зовнішнього магнітного поля.

При внесенні не намагніченого феромагнетика в зовнішнє магнітне поле H модуль намагніченості змінюється нелінійно. На кривій намагнічування виділяють п'ять ділянок. На ділянці 1 намагніченість зростає за законом $J = \chi H$, - є область оборотного намагнічування, зумовленого

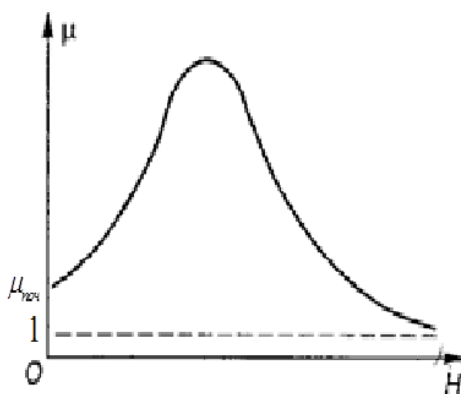
пружним зміщенням меж доменів. На ділянці 2 намагніченість зростає за квадратичним законом. Цій ділянці відповідає оборотне і необоротне зміщення меж. На ділянці 3 відбувається необоротне зміщення меж доменів, намагніченість швидко зростає, на цій ділянці магнітна проникність феромагнетика найбільша. На ділянці 4 відбувається перехід магнітних моментів доменів. На ділянці 5 (так звана область пара процесу) спостерігається слабе зростання намагніченості.

Намагніченість феромагнетика має межу, яка називається намагніченістю насичення.

Аналогічно можна побудувати залежність магнітної індукції $\mathbf{B}$ від напруженості зовнішнього магнітного поля $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{J} = \mu \mu_0 \mathbf{H}$.

Намагніченість та індукція магнітного поля феромагнетика залежать нелінійно від напруженості зовнішнього магнітного поля. Тому відносна магнітна проникність μ та магнітна сприйнятливість χ залежать від H . На рис. 2 зображено залежність відносної магнітної проникності μ від напруженості зовнішнього магнітного поля.

Рис. 2. Залежність відносної магнітної проникності від напруженості



зовнішнього магнітного поля.

Якщо $H=0$, то магнітна проникність має значення так званої початкової проникності μ_{noc} . При збільшенні H проникність зростає і досягає значення максимальної магнітної проникності. При сильних магнітних полях настає

стан насичення і μ прямує до одиниці. Характерною ознакою феромагнетиків є велике значення магнітної проникності - сотні і тисячі одиниць.

Характерним для феромагнетиків є те, що залежність намагніченості $\mathbf{J}$ або індукції $\mathbf{B}$ від зовнішнього магнітного поля $\mathbf{H}$ не однозначна, визначається попереднім станом феромагнету. Це явище називається магнітним гістерезисом. Магнітний гістерезис полягає в необоротності магнітних властивостей феромагнету під впливом тих магнітних процесів, які на нього раніше мали вплив.

Петля гістерезису феромагнету

Дослідимо магнітний гістерезис феромагнітного зразка в періодичному магнітному полі (рис. 3). При відсутності зовнішнього магнітного поля ($H = 0$) індукція $B = 0$. При збільшенні напруженості зовнішнього магнітного поля намагніченість зразка зростає $B(H)$ (лінія OA).

Щоб позбутися залишкової намагніченості, потрібно прикласти зовнішнє магнітне поле протилежного знаку. При напруженості, яка відповідає точці K , відбувається повне розмагнічування феромагнету. Значення напруженості зовнішнього магнітного поля в точці K називається коерцитивною силою феромагнету H_c .

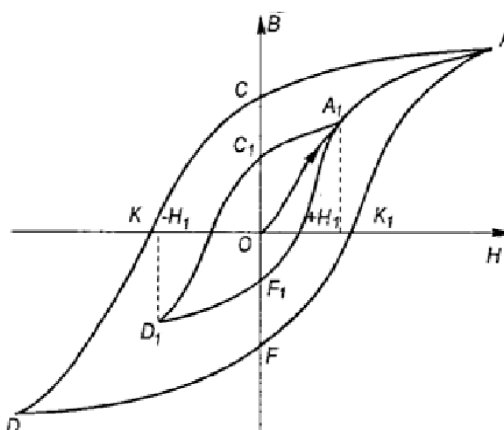


Рис. 3. Магнітний гістерезис.

Пояснимо процес намагнічування феромагнетиків з точки зору їх доменної структури. При певних умовах внаслідок існування обмінних сил в окремих областях кристалу магнітні моменти електронів можуть бути орієнтовані паралельно один одному. При цьому створюються домени - області спонтанного намагнічування. В розмагніченому феромагнетикі не дуже малих розмірів внаслідок хаотичної орієнтації магнітних моментів доменів сумарна намагніченість дорівнює нулю (рис.4.) (такий стан відповідає мінімуму енергії).

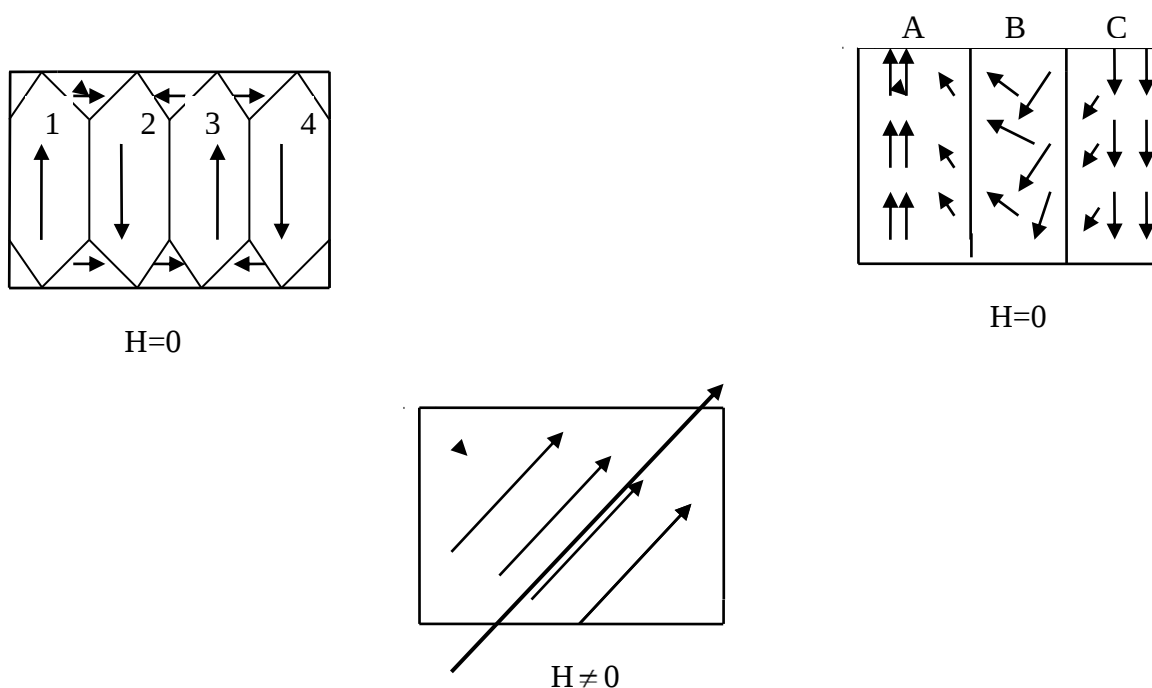


Рис. 4. Процес намагнічування феромагнетиків

При намагнічуванні та перемагнічуванні феромагнетиків в зовнішньому магнітному полі відбуваються такі процеси: спочатку ростуть ті домени, чиї магнітні моменти мають малий кут з зовнішнім полем (домени 1, 3), потім ті домени (2,4), кути яких більші. Цей процес є енергетично вигідним, бо призводить до зменшення енергії феромагнетикі і називається процесом зміщення. У слабких полях він є оборотним. З подальшим збільшенням магнітного поля відбувається орієнтація вектору спонтанної намагніченості у напрямку поля – це так званий процес обертання.

Магнітна проникність феромагнетика μ залежить від напруженості магнітного поля H : $\mu = \frac{B}{\mu_0 H}$ і досягає максимуму тоді, коли напруженість зовнішнього магнітного поля H дорівнює напруженості насичення H_s . В цьому випадку домени максимально зорієнтовані в напрямку поля і досягається магнітне насичення зразка.

Основними характеристиками феромагнетика є: форма петлі гістерезису, залишкова намагніченість та коерцитивна сила. Ці характеристики є різними для різних матеріалів.

Частина 2. Вивчення магнітного обертання площини поляризації світла (ефект Фарадея)

При проходженні світла через прозоре середовище, яке знаходиться в магнітному полі, спостерігається обертання площини поляризації світла – ефект Фарадея. Для ефекту Фарадея кут повороту площини поляризації φ прямо пропорційний шляху l , пройденому світлом в речовині, та напруженості магнітного поля H :

$$\varphi = \rho l H, \quad (1)$$

де ρ – стала, що характеризує речовину і називається сталою Верде.

Магнітне обертання площини поляризації спостерігається для всіх тіл. Але найбільшого значення кут обертання досягає в тонких прозорих плівках феромагнітних металів Fe, Ni, Co.

Для магнітооптичних кристалів кут обертання площини поляризації пропорційний не напруженості магнітного поля, а намагніченості. Знак обертання площини поляризації визначають для спостерігача, котрий дивиться вздовж магнітного поля. Для переважної більшості речовин (вони називаються додатними) обертання відбувається вправо - в ту ж сторону, в яку навиті витки електромагніту. Всі інші речовини вважаються від'ємними.

Напрямок обертання площини поляризації пов'язаний з напрямом магнітного поля і не залежить від напрямку поширення світла.

Важливою властивістю магнітооптичного ефекту Фарадея є порушення принципу оборотності світлового пучка. Дослідження показали, що при зміні напрямку пучка на зворотній ("назад") кут обертання площини поляризації повертається в ту ж сторону, як і на шляху "вперед". Тому при багаторазовому проходженні світла між поляризатором і аналізатором ефект накопичується. При зміні напрямку магнітного поля напрям обертання змінюється на зворотній.

Фарадей показав, що поворот площини поляризації відбувається внаслідок циркулярного (колового) двопроменезаломлення. Лінійно поляризована світлова хвиля розглядається як результат суперпозиції правої та лівої циркулярно поляризованих хвиль. Циркулярна поляризація задається такими функціями: для правого обертання (по годинниковій стрілці) $E_{np} = E_0 e^{-i\omega t}$ та для лівого обертання (проти годинникової стрілки) $E_l = E_0 e^{i\omega t}$.

Показники заломлення неоднакові для правої і лівої циркулярної поляризації. Введемо середнє значення показника заломлення n та його відхилення Δn і запишемо коливання з комплексною амплітудою

$$\begin{aligned} E &= E_{np} + E_l = E_0 e^{-i\omega t} + E_0 e^{i\omega t} = E_0 e^{i\omega[t - \frac{z}{c}(n - \Delta n)]} + E_0 e^{-i\omega[t - \frac{z}{c}(n + \Delta n)]} = \\ &= 2E_0 e^{i\omega\Delta n/c} \times \cos \omega(t - \frac{z}{c}n) \end{aligned} \quad (2)$$

Вираз (2) містить комплексну амплітуду, і відповідає вектору E , спрямованому під кутом φ до осі X . Цей кут і є кутом повороту площини поляризації:

$$\varphi = \frac{\omega\Delta n}{c} \quad (3)$$

Виразимо різницю показників заломлення. З електродинаміки відомо що в магнітному полі магнітні моменти електронів в атомах обертаються з кутовою частотою, яка називається ларморівською частотою прецесії орбіти:

$$\Omega_L = \frac{eB}{2m} \quad (4)$$

Отже, якщо дивитися назустріч циркулярно поляризованому променю, що проходить через середовище, електрони в якому обертаються з ларморівською частотою і напрям обертання вектора E співпадає з напрямом Ω_L , то відносна кутова швидкість буде $\omega - \Omega_L$. Якщо ж обертання мають протилежні напрямки, то відносна кутова швидкість буде $\omega + \Omega_L$.

Врахуємо, що середовище має дисперсію

$$\Delta n = \frac{dn}{d\omega} \Omega_L \quad (5)$$

і отримаємо вираз для кута повороту площини поляризації

$$\varphi = \frac{e}{2mc} \omega \frac{dn}{d\omega} Bl \quad (6)$$

Якщо досліджуємо речовина є діа- або парамагнетиком, тобто можна вважати, що відносна магнітна проникність $\mu \approx 1$, тоді індукція магнітного поля $B = \mu_0 H$. Відповідно до формули (2) стала Верде описується виразом:

$$\rho = \frac{\mu_0 e}{2mc} \omega \frac{dn}{d\omega} \quad (7)$$

Для магнітооптичних кристалів, які являють собою феромагнетики ($\mu \gg 1$), індукція магнітного поля $B = \mu_0 J$. В такому разі кут повороту площини поляризації для ефекту Фарадея записують у вигляді

$$\varphi = \rho J l. \quad (8)$$

В нашій лабораторній роботі ефект Фарадея застосовується для вивчення залежності намагніченості (індукції магнітного поля) у магнітооптичних кристалах від напруженості зовнішнього магнітного поля.

Опис лабораторної установки

Лабораторна установка зображена на Рис. 5

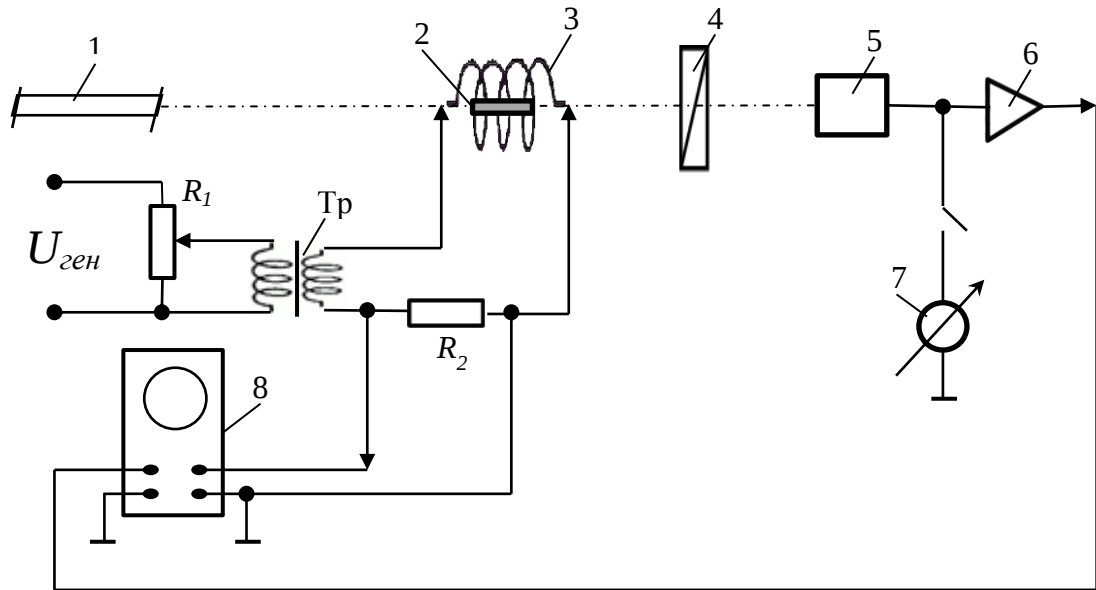


Рис.5 Схема лабораторної установки 1– лазер, 2– магнітооптичний кристал – ітрієвий ферит гранат ($Y_3Fe_5O_{12}$), 3 – котушка, 4 – аналізатор, 5 – фотоприймач, 6 – підсилювач, 7 – мікроамперметр, 8 – осцилограф, Тр – трансформатор.

Частина 1. Вивчення петлі гістерезису магнітооптичних кристалів.

В даній роботі для спостереження петлі гістерезису феромагнетиків використовується електронний осцилограф. При подачі на вертикальні та горизонтальні пластини осцилографа напруги U_y та U_x , які пропорційні відповідно векторам індукції $\mathbf{B}$ та напруженості $\mathbf{H}$ магнітного поля, можна спостерігати на екрані осцилографа петлю гістерезису. На вхід X підсилювача горизонтального відхилення подається з резистора R_2 напруга U_x , пропорційна напруженості магнітного поля H .

На вертикальний вхід Y подається напруга U_y , яка пропорційна індукції магнітного поля B .

Подаючи одночасно напруги U_y та U_x на вертикальні та горизонтальні пластини, отримаємо на екрані осцилографа петлю гістерезису.

Порядок виконання роботи

Завдання 1. Визначення основної кривої намагнічування.

1.1. Ознайомитись з описом установки та методом вимірювання.

1.2. Ознайомитися з режимом роботи звукового генератора та осцилографа в режимі вимірювання фігур Ліссажу.

а) встановити частоту вихідного сигналу звукового генератора 2 кГц та значення вихідної напруги $U_{\text{ген}}=0$.

б) відімкнути розгортку променю на осцилографі.

1.3. Ввімкнути лабораторний стенд і прилади. Встановити промінь в центрі екрану осцилографа, потім, регулюючи вихідну напругу на звуковому генераторі і підсилення по осі Y , встановити максимальну петлю гістерезису в межах екрану, що відповідає магнітному насиченню зразка. Далі, зменшуючи напругу, отримати сімейство петель гістерезису – не менше п'яти. Для кожної петлі зняти координати X та Y її вершини та записати в табл. 1, (або скопіювати на кальку з екрану).

1.4. За формулами $H = \alpha b_1 x$ та $B = \beta b_2 y$ знайти напруженість H та індукцію B вершин всіх отриманих петель і записати в таблицю. Значення коефіцієнта відхилення променю по горизонталі α та коефіцієнтів b_1 та b_2 взяти з опису до осцилографа. Значення коефіцієнта відхилення променю по вертикалі β зняти з фронтальної панелі осцилографа.

Завдання 2. Визначення коерцитивної сили.

2.1. На максимальній петлі гістерезису знайти координату X_c , що відповідає коерцитивній силі – H_c

2.2. За формою петель гістерезису визначити групу феромагнетику (м'який чи жорсткий). Оцінити похибку визначення коерцитивної сили.

Таблиця 1.

Величини	До насичення										У режимі насичення
$ +X_i $											
$ -X_i $											
$\langle X_i \rangle$											
H_i											
$ +Y_i $											
$ -Y_i $											
$\langle Y_i \rangle$											
B_i											
μ_i											
$ +X_c $											
$ -X_c $											
$\langle X_c \rangle$											
$ +Y_h $											
$\langle Y_h \rangle$											
H_c											
B_H											

Частина 2. Вивчення ефекту Фарадея.

Завдання 3.

3.1. Вмикаємо лазер.

3.2. Подаємо електричний струм на котушку 2.

3.3. Повертаючи аналізатор досягаємо необхідної форми петлі гістерезису.

3.4. За допомогою реостата R_1 збільшуємо струм через котушку і записуємо покази мікроамперметра.

3.5. Застосовуючи закон Малюса, розраховуємо кут повороту площини поляризації φ за формулою: $\varphi = \arccos \sqrt{\frac{I}{I_0}}$ і записуємо в Таблицю 2.

3.6. Повторюємо пункти 3.4 та 3.5.

Таблиця 2.

I_0									
I									
$\sqrt{\frac{I}{I_0}}$									
φ									

Контрольні запитання

1. За допомогою яких фізичних величин описується магнітне поле в вакуумі?
2. За допомогою яких фізичних величин описується магнітне поле в речовині?
3. Які види магнетиків Ви знаєте?
4. Яка природа діа- и парамагнетизму?
5. Яка природа феромагнетизму?
6. Сформулюйте основні властивості феромагнетиків?
7. Поясніть явище гістерезису.
8. Визначить точку на кривій залежності $B = B(H)$, якій відповідає магнітне насичення зразка.
9. Вкажіть на цій же кривій точку, що відповідає максимальному значенню магнітної проникливості.
10. Як визначається робота по перемагнічуванню феромагнетику?
11. Закон Малюса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калашников С.Г. Электричество. М.: Наука, 1970, с. 255-290.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. М.Наука, 1978. Т.2. С. 146-173.
3. Сивухин Д.В. Курс общей физики. М.: Наука, 1977. Т. 3
С. 304-332.
4. Яворский Б.М., Пинский А.А. Основы физики.: Наука, 1972.,
Т. 2. С. 73-90.
5. Яворский Б.М., Детлаф А.А., Милковская Л.Б. Курс физики