

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Механіко-машинобудівний інститут
Кафедра Лазерної техніки та фізико-технічних технологій

Фізика взаємодії
концентрованих потоків енергії з речовиною - 1

Методичні вказівки до самостійної роботи студентів
до вивчення кредитного модуля
для студентів спеціалізації
«Лазерна техніка та комп'ютеризовані процеси фізико-технічної обробки»
спеціальності 131 Прикладна механіка

*Рекомендовано вченою радою Механіко-машинобудівного інституту НТУУ
«КПІ ім. І.Сікорського»*

Київ
НТУУ «КПІ ім. І.Сікорського»
2017

Фізика взаємодії концентрованих потоків енергії з речовиною - 1:
Методичні вказівки до самостійної роботи студентів до вивчення кредитного модуля для студентів спеціалізації «Лазерна техніка та комп'ютеризовані процеси фізико-технічної обробки» спеціальності 131 Прикладна механіка / Уклад. В.В. Романенко, О.С. Козирєв, – К.: НТУУ «КПІ», 2017. – 13 с.

*Гриф надано вченою радою
ВПІ НТУУ «КПІ»
(протокол №__ від _____ р.)*

*Ухвалено на засіданні кафедри графіки ВПІ НТУУ «КПІ»
(протокол №__ від _____ р.)*

Фізика взаємодії концентрованих потоків енергії з речовиною-1

Методичні вказівки
до самостійної роботи студентів до вивчення кредитного модуля
спеціалізації
«Лазерна техніка та комп'ютеризовані процеси фізико-технічної обробки»
спеціальності 131 Прикладна механіка

Укладачі	Романенко В.В., к.т.н., доц. Козирєв О.С., ст. викл.
Відповідальний редактор	Котляров В.П., д.т.н., проф.
Рецензент	Малафєєв Ю.М. , к.т.н., доц.

Зміст

1. Мета та завдання кредитного модуля.....	2
2. Структура кредитного модуля.....	3
3. Організація навчального процесу.....	4
4. Лекційні заняття.....	7
5. Практичні заняття.....	9
6. Лабораторні заняття.....	10
7. Оцінювання результатів навчання.....	11
8. Контакти із викладачем.....	13
9. Література.....	13

1. Мета та завдання кредитного модуля

Метою кредитного модуля є формування у студентів здатностей:

- Здатність аналізувати параметри лазерного випромінювання та їх вплив на процеси взаємодії з речовиною;
- Здатність розраховувати параметри фокусування лазерного випромінювання;
- Здатність використовувати електричні властивості матеріалу для розрахунку їх впливу на коефіцієнт поглинання;
- Здатність визначати параметри, що характеризують лазерне джерело теплоти;
- Здатність визначати критичну густину потужності за плавленням та випаровуванням;
- Здатність використовувати методи теорії теплопровідності в задачах лазерного нагрівання;
- Здатність проводити розрахунки теплового поля для нерухомого, рухомого та швидко рухомого лазерних джерел теплоти;
- Здатність аналізувати процеси лазерного плавлення;

Основні завдання кредитного модуля.

Згідно з вимогами програми навчальної дисципліни студенти після засвоєння кредитного модуля мають продемонструвати такі результати навчання:

знання :

- Властивості та параметри лазерного випромінювання;
- Перетворення лазерного випромінювання оптичною фокуруючою системою;
- Механізми поглинання лазерного випромінювання провідниками, напівпровідниками та діелектриками;
- Параметри лазерного теплового джерела;
- Постановку теплової задачі при нагріванні лазерним випромінюванням та її типові рішення для нерухомого, рухомого та швидко рухомого лазерних джерел теплоти;
- Особливості плавлення під дією лазерного випромінювання. Фазовий перехід. Задача Стефана;

уміння:

- Розрахувати та виміряти енергетичні, часові та просторові параметри лазерного випромінювання, параметри фокусування лазерного випромінювання та вплив оптичних аберацій;
- Оцінити коефіцієнт поглинання, знати способи його підвищення, кількісно оцінити параметри поглинання лазерного випромінювання металами, напівпровідниками та діелектриками;
- Розрахувати температуру металу при дії на нього лазерного випромінювання в заданій точці та в заданий момент часу, залежно від типу теплової задачі та типу лазерного джерела, оцінити критичну для фазових переходів густину потужності;

досвід:

- Досвід роботи з твердотільними та газовими лазерними технологічними комплексами;
- Досвід керування енергетичними, просторовими та часовими параметрами лазерного випромінювання;
- Досвід у визначенні поглинальної здатності матеріалів та керуванні нею;
- Досвід у вимірюванні діаметра фокусування лазерного випромінювання та розподілу інтенсивності в ньому;

2. Структура кредитного модуля

Всього		Розподіл навчального часу за видами занять				Семестрова атестація
Кредитів	Годин	Лекційні заняття	Практичні заняття	Лабораторні заняття	СРС	
2,5	108	18	9	18	30	Диф. залік

3. Організація навчального процесу

Календарно-тематичний план засвоєння навчальної дисципліни

Тиждень	Зміст навчальної роботи
1	Лекція 1 Концентровані потоки енергії. Типи лазерів та режими роботи лазерів. Залежність параметрів випромінювання від режиму роботи. Засоби досягнення тих чи інших режимів. Практичне заняття 1 Властивості лазерного випромінювання Лабораторне заняття 1 Основні елементи твердотільних та газових лазерів Лабораторне заняття 2 Керування енергетичними параметрами лазера. ККД лазера Лабораторне заняття 3 Вивчення часових параметрів лазерного випромінювання
3	Лекція 2 Схема фокусування, залежність r_f від параметрів оптичної системи, фокусування одно - та багатомодового випромінювання. Глибина фокусу. Аберації та способи їх зменшення. Складові куту розбіжності. Практичне заняття 2 Фокусування лазерного випромінювання Лабораторне заняття 4 Вимірювання діаметра фокусування лазерного випромінювання та розподілу інтенсивності в ньому
5	Лекція 3 Процес поглинання. Коефіцієнти поглинання та відбивання. Властивості матеріалу, що зумовлюють значення коефіцієнту поглинання. Температурна залежність коефіцієнту поглинання. Лабораторне заняття 5 Вивчення поглинальної здатності матеріалів
7	Лекція 4 Лазерне джерело теплоти, параметри, що його характеризують. Розподіл густини теплового потоку. Закон Бугера.
9	Лекція 5 Класична модель вільних електронів. Частота релаксації. Взаємодія підсистем в металі

Тиждень	Зміст навчальної роботи
11	<p>Лекція 6</p> <p>Механізми теплопровідності в метали. Відмінності напівпровідників від металів. Їх структура. Механізми поглинання в напівпровіднику.</p> <p>Практичне заняття 3</p> <p>Поглинання випромінювання металами. Поглинання випромінювання напівпровідниками</p> <p>Лабораторне заняття 6</p> <p>Взаємодія імпульсного лазерного випромінювання з металевими сплавами. Вимірювання температуропроводності матеріалу.</p> <p>Модульна контрольна робота-1</p>
13	<p>Лекція 7</p> <p>Особливості теплофізичних задач лазерного нагріву. Диференційне рівняння теплопровідності. Крайові умови. Одномірна модель. Просторова модель. Поняття стаціонарної температури. Об'ємне джерело. Тонка пластина.</p> <p>Практичне заняття 4</p> <p>Нагрівання лазерним випромінюванням. Одномірна модель. Просторова модель. Тонка пластина.</p>
15	<p>Лекція 8</p> <p>Критична густина потужності за плавленням. Критична густина потужності за випаровуванням. Оптимальний режим випаровування. Постановка задачі нагрівання рухомим джерелом теплоти. Швидко рухоме джерело теплоти.</p> <p>Практичне заняття 5</p> <p>Нагрівання лазерним випромінюванням. Критична густина потужності. Рухоме лазерне джерело, швидко рухоме лазерне джерело</p>
17	<p>Лекція 9</p> <p>Баланс енергії на кордоні розділу фаз. Умови Стефана. Характерні форми ванни розплаву. Оцінка максимальної глибини плавлення. Глибоке проплавлення. Рівняння Нав'є-Стокса.</p> <p>Практичне заняття 6</p> <p>Плавлення металів під дією лазерного випромінювання</p> <p>Модульна контрольна робота-2</p>
18	<p>Практичне заняття 7 (залікова контрольна робота)</p>

На початку семестру студенти мають за своїм логіном і паролем увійти до електронного кампусу та отримати Методичні вказівки та Конспект лекцій.

Рекомендується щотижня засвоювати навчальний матеріал однієї лекції відповідно до календарно-тематичного плану.

З метою перевірки ступені засвоєння навчального матеріалу проводяться модульні контрольні роботи. Кредитний модуль передбачає виконання двох контрольних робіт. Контрольні роботи проводяться у формі письмових відповідей на завдання.

Модульна контрольна робота №1 проводиться за матеріалами розділів 1-6 (див. п. 4. Лекційні заняття). Питання, що виносяться на контрольну:

1. Властивості лазерного випромінювання.
2. Режими роботи лазера.
3. Часові параметри лазерного випромінювання.
4. Енергетичні параметри лазерного випромінювання.
5. Просторові параметри лазерного випромінювання.
6. Фокусування лазерного випромінювання.
7. Оптичні аберації.
8. Характеристики лазерного джерела.
9. Закон Бугера.
10. Коефіцієнт поглинання.
11. Керування процесом поглинання.
12. Оптичні властивості метала.
13. Поглинання лазерного випромінювання металом.
14. Оптичні властивості напівпровідників.
15. Поглинання лазерного випромінювання напівпровідниками та діелектриками.

Модульна контрольна робота №2 проводиться за матеріалами розділів 7-9 (див. п. 4. Лекційні заняття). Питання, що виносяться на контрольну:

1. Постановка задачі нагрівання лазерним випромінюванням.
2. Диференційне рівняння теплопровідності
3. Граничні умови.
4. Одномірна модель нагрівання нерухомим джерелом теплоти.
5. Просторова модель нагрівання нерухомим джерелом теплоти.
6. Критична густина потужності.
7. Нагрівання тонкої пластини.
8. Постановка задачі нагрівання рухомим джерелом теплоти.
9. Швидкорухоме джерело теплоти.
10. Плавлення під дією лазерного випромінювання.
11. Умова Стефана.
12. Глибоке проплавлення.

4. Лекційні заняття

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СРС)
1	<p>Концентровані потоки енергії. Типи лазерів та режими роботи лазерів. Залежність параметрів випромінювання від режиму роботи. Засоби досягнення тих чи інших режимів.</p> <p>Література: основна – [2], с. 5-12; додаткова – [1], с. 18-24.</p> <p>Завдання на СРС: Відмінності лазерного випромінювання від звичайного світла. Причини когерентності та монохроматичності лазерного випромінювання.</p>
2	<p>Схема фокусування, залежність r_f від параметрів оптичної системи, фокусування одно - та багатомодового випромінювання. Глибина фокусу. Аберації та способи їх зменшення. Складові куту розбіжності.</p> <p>Література: основна - [4] с.19-25;</p> <p>Завдання на СРС: Чому $L_n \neq F$? Які властивості лазерного випромінювання дозволяють його „гостре” фокусування?</p>
3	<p>Процес поглинання. Коефіцієнти поглинання та відбивання. Властивості матеріалу, що зумовлюють значення коефіцієнту поглинання. Температурна залежність коефіцієнту поглинання.</p> <p>Література: основна – [2], с. 20-24</p> <p>Завдання на СРС: Яким чином можна збільшити коефіцієнт поглинання? Чому? Залежність між електричними властивостями матеріалу та коефіцієнтом поглинання.</p>
4	<p>Лазерне джерело теплоти, параметри, що його характеризують. Розподіл густини теплового потоку. Закон Бугера.</p>
5	<p>Класична модель вільних електронів. Частота релаксації. Взаємодія підсистем в металі.</p> <p>Література: основна – [4] с. 13-17, [3] с. 36-49</p> <p>Завдання на СРС: Причини та межі використання рівномірного розподілу в теплових задачах. Відмінність закону Бугера для різних типів матеріалів. Причини існування нерівності [2].</p>
6	<p>Механізми теплопровідності в металі. Відмінності напівпровідників від металів. Їх структура. Механізми поглинання в напівпровіднику.</p> <p>Література: основна - [3] с.52-58, [4] с.18-20</p> <p>Завдання на СРС: Змінність оптичних властивостей напівпровідника в залежності від температури.</p>

7	<p>Особливості теплофізичних задач лазерного нагріву. Диференційне рівняння теплопровідності. Крайові умови. Одномірна модель. Просторова модель. Поняття стаціонарної температури. Об'ємне джерело. Тонка пластина.</p> <p>Література: основна - [4] с. 57-68; додаткова – [2] с. 224-235.</p> <p>Завдання на СРС: як змінюється рівняння теплопровідності для тіл згаданої форми? Чому для металів $W_{pv} = 0$? Межа придатності одномірної моделі. За яких умов досягається стаціонарна температура? Чим тонка пластина відрізняється від напівбескінечного тіла?</p>
8	<p>Критична густина потужності за плавленням. Критична густина потужності за випаровуванням. Оптимальний режим випаровування. Постановка задачі нагрівання рухомим джерелом теплоти. Швидко рухоме джерело теплоти.</p> <p>Література: основна – [4] с. 68-78; додаткова – [2] с. 236-245.</p> <p>Завдання на СРС: На основі якої моделі отримано вираз для критичної густини потужності за плавленням? Вивести вираз для визначення перехідного часу за відомої густини потужності. Знайти залежність критичної густини потужності за випаровуванням від часових характеристик джерела теплоти та теплофізичних характеристик матеріалу. Порівняти розрахунки для рухомого та швидко рухомого джерел теплоти за однакових умов нагріву.</p>
9	<p>Баланс енергії на кордоні розділу фаз. Характерні форми ванни розплаву. Оцінка максимальної глибини плавлення. Глибоке проплавлення. Рівняння Нав'є-Стокса.</p> <p>Література: основна - [2] с. 57-129; додаткова – [2] с. 147-154, [3].</p> <p>Завдання на СРС: Як змінюється динаміка кордону рідкої фази в залежності від знаку балансу в умові Стефана? Від яких параметрів залежить форма ванни розплаву? Від чого залежить максимальна глибина проплавлення? Як формується „кинджальне” проплавлення?</p>

5. Практичні заняття

Основні завдання циклу практичних занять: засвоєння конкретних питань, отримання навичок та умінь у фізичних та інженерних розрахунках.

№ з/п	Назва теми заняття та перелік основних питань (перелік дидактичного забезпечення, посилання на літературу та завдання на СРС)
1	<p>Властивості лазерного випромінювання</p> <p>Довжина хвилі неодимового лазера $\lambda = 1.064 \pm 0.001$ мкм. Знайти показник монохроматичності $\frac{\Delta f}{f}$</p> <p>Інтенсивність випромінювання на відстані гаусівського радіусу складає 10^3 Вт/см². Знайти максимальну інтенсивність.</p>
2	<p>Фокусування лазерного випромінювання</p> <p>Знайдіть значення сферичної аберації лінзи з КСІ ($K=0,235$) фокусною відстанню 100 мм. Лінза розташована на відстані 1 метр від вихідного дзеркала резонатора. Діаметр променя на вихідному дзеркалі 10 мм. Половинний кут розбіжності 5 мрад.</p>
3	<p>Поглинання випромінювання металами. Поглинання випромінювання напівпровідниками</p> <p>Знайдіть частоту електрон-фотонної релаксації, якщо на метал діє імпульс неодимового лазера з такими параметрами: $E = 5$ Дж, $\tau = 1$ мсек, $\Theta = 2$ мрад. Лінза з $F = 50$ мм, Коефіцієнт поглинання = 0.5. Кількість електронів, що поглинають $n' = 10^{22}$ на 1 см³.</p> <p>Ширина забороненої зони германію дорівнює 0,67 Ев. Знайти переважаючий механізм поглинання випромінювання Nd^{3+} та CO_2 лазерів.</p>
4	<p>Нагрівання лазерним випромінюванням. Одномірна модель. Просторова модель. Тонка пластина.</p> <p>Знайдіть час нагрівання міді ($\lambda=3,89$; $a=1,12$; $T_m=1083$) до температури плавлення, якщо імпульс має такі параметри: $E = 5$ Дж, $\tau = 10$ мсек, $\Theta = 2$ мрад. Лінза з $F = 50$ мм</p> <p>Срібна мішень ($\lambda=4,2$; $a=1,71$), що має форму напівбескінечного тіла, нагрівається імпульсом з параметрами: $E = 10$ Дж, $\tau = 4$ мсек, $\Theta = 2$ мрад. Лінза з $F = 100$ мм. Коефіцієнт поглинання $A=0.25$. Знайдіть температуру, до якої нагріється поверхня тіла через 0.2 мсек.</p> <p>Тонка пластина з алюмінію ($\lambda=2,09$; $a=0,87$; $c=0,89$) товщиною 1 мм нагрівається імпульсом з параметрами: $E = 10$ Дж, $\tau = 2$ мсек, $\Theta = 6$ мрад. Лінза з $F = 100$ мм. Коефіцієнт поглинання $A=0.3$. Знайдіть температуру, до якої нагріється поверхня пластини через 0.2 мсек.</p>

5	Нагрівання лазерним випромінюванням. Критична густина потужності. Знайдіть критичні густини потужності по плавленню для заліза ($\lambda=0,51$; $a=0,15$; $T_m=1535$). Довжина імпульсу 1 мсек. Знайдіть критичні густини потужності по випаровуванню для заліза($\lambda=0,51$; $a=0,15$; $T_b=2900$). Довжина імпульсу 1 мсек.
6	Рухоме лазерне джерело, швидко рухоме лазерне джерело Поверхнею алюмінію ($\lambda=2,09$; $a=0,87$; $c=0,89$; $A=0.3$) рухається промінь з параметрами: $P=250$ Вт, $r_f=0,125$ мм. Розрахувати швидкість, за якої матеріал починає плавитись, за допомогою моделей для рухомого та швидко рухомого джерел теплоти. Результати порівняти, знайти похибку наближення для швидко рухомого джерела.
7	Плавлення металів під дією лазерного випромінювання Знайти максимальну глибину зварювання сталі ($T_m=1535$; $T_b=2900$) джерелом теплоти радіусом 3 мм.

6. Лабораторні заняття

Основні завдання циклу лабораторних занять: засвоєння конкретних питань, отримання специфічного досвіду.

№ з/п	Назва лабораторної роботи	Кількість ауд. годин
1	Основні елементи твердотільних та газових лазерів Ціль роботи: Ознайомитися з принципом дії, складом, конструкцією та блок-схемою лазерів; вивчити конструкцію випромінювачів твердотільного та газового лазерів; ознайомитися з основними елементами лазерних випромінювачів; набути практичних навичок по обслуговуванню елементів випромінювача.	2
2	Керування енергетичними параметрами лазера. ККД лазера Ціль роботи: Вивчити склад та устрій електричної частини ЛТУ; ознайомитися з етапами перетворення енергії в ЛТУ та з методами вимірювання енергетичних параметрів лазерного випромінювання; зняти електричні характеристики ЛТУ в залежності від параметрів накачки; визначити ККД лазера при різних режимах його роботи.	2
3	Вивчення часових параметрів лазерного випромінювання Ціль роботи: Вивчити методи та набути навичок вимірювання часових параметрів лазерного випромінювання; визначити залежність часових параметрів від параметрів електричного ланцюга; визначити особливості постановки та рішення задач нагріву лазерним випромінюванням для визначення діапазонів різних технологічних операцій.	4

4	<p>Вивчення поглинальної здатності матеріалів</p> <p>Ціль роботи: Вивчити загальні закономірності процесу поглинання лазерного випромінювання матеріалами; ознайомитися з методикою визначення відбитого сигналу від поверхні, що опромінюється; визначити значення коефіцієнтів поглинання різними матеріалами та поглинальними покриттями; визначити зміну коефіцієнта відбивання в залежності від кута падіння.</p>	4
5	<p>Вимірювання діаметра фокусування лазерного випромінювання та розподілу інтенсивності в ньому</p> <p>Ціль роботи: Вивчити характеристики лазерного джерела, нормальний та рівномірний розподіл інтенсивності в сфокусованому промені; ознайомитися з методикою виміру розподілення інтенсивності по діаметру променя; виміряти інтенсивність у сфокусованому та розфокусованому променях; підібрати теоретичний закон розподілення та оцінити середню густину потужності у кожному випадку.</p>	4
6	<p>Взаємодія імпульсного лазерного випромінювання з металевими сплавами. Вимірювання температуропроводності матеріалу.</p> <p>Ціль роботи: Ознайомитися з постановкою та рішенням задач теплопровідності для плаского зразка та імпульсного лазерного випромінювання; отримати досвіду роботі з імпульсною лазерною установкою та апаратурою, що реєструє; виміряти температуропровідність різних сплавів за допомогою лазерного імпульсного випромінювання.</p>	2

7. Оцінювання результатів навчання

Рейтинг студента складається з балів, що він отримує за:

1. Виконання 4 практичних робіт.
2. Виконання 7 лабораторних робіт.
3. Виконання двох МКР.

Система рейтингових балів та критерії оцінювання:

1. Практичні роботи

Максимальна кількість балів за всі роботи – 8.

- вірна відповідь/вирішення задачі – 2 бали
- невірна відповідь/відсутність на занятті – 0-1 балів

2. Лабораторні роботи

Максимальна кількість балів за всі роботи – 14.

- повне виконання лабораторної роботи – 2 бали
- неповне виконання лабораторної роботи /відсутність на занятті – 0-1 балів

3. МКР

Максимальна кількість балів за дві МКР – 35+43=78.

- повна відповідь, вільне володіння матеріалом – 25-35/36-43 балів
- задовільна відповідь – 15-24/21-35 балів
- неповна відповідь – 5-14/6-20 балів
- незадовільна відповідь – 0-4/0-5 балів

Штрафні та заохочувальні бали:

- не допуск до виконання лабораторної роботи через незадовільний вхідний контроль: -0.5 бала
- відсутність на ЛР або ПР без поважних причин: -1 бал
- правильна відповідь на вхідному контролі: +1 бал

Сума вагових балів контрольних заходів протягом семестру складає:

$$R_c = 8 + 14 + 35 + 43 = 100$$

Необхідною умовою допуску до заліку є захист всіх лабораторних робіт. Для отримання заліку з кредитного модуля "автоматом" потрібно мати рейтинг не менш ніж 60 балів. Студенти, які наприкінці семестру мають рейтинг менш 60 балів, а також ті, хто хоче підвищити оцінку у системі ECTS, виконують залікову контрольну роботу. Набрані за контрольну роботу бали є остаточною оцінкою. Якщо сума балів за контрольну роботу нижче за кількість балів, що були набрані протягом семестру, остаточною оцінкою є максимальна з цих двох кількість балів. Контрольне завдання цієї роботи складається з 4 питань різних розділів робочої програми.

Кожне питання залікової контрольної роботи оцінюється з 25 балів відповідно до системи оцінювання:

- повна відповідь: 20...25 балів;
- достатньо повна відповідь (незначні неточності): 15...19 балів;
- недостатньо повна відповідь (деякі помилки): 6...14 балів;
- неповна відповідь (грубі помилки): 1...5 балів;
- “незадовільно”, незадовільна або відсутня відповідь – 0 балів.

Система оцінок має вигляд:

$R_D = R_C + R_E$	Оцінка <i>ECTS</i>	Традиційна оцінка
95-100	A	відмінно
85-94	B	добре
75-84	C	
65-74	D	задовільно
60-64	E	
$R_D < 60$	<i>Fx</i>	незадовільно
$R_C < 30$ або не виконані інші умови допуску до заліку	<i>F</i>	не допущений

8. Контакти із викладачем

Спілкування з викладачем проводиться через електронний кампус або електронною поштою:

Романенко Віктор Васильович: romvvv@gmail.com

Козирев Олексій Сергійович: akozyrev@ukr.net

9. Література

Базова

1. Рэди Дж. Действие мощного лазерного излучения. – М.: Мир, 1974
2. Рыкалин Н.Н. и др. Лазерная обработка материалов. – М.: машиностроение, 1975
3. Анисимов С.И. и др. Действие излучения большой мощности на металлы. – М.: Наука, 1970
4. Веденов А.А., Гладуш Г.Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов. – М.: Энергоатомиздат, 1985

Допоміжна

1. Звелто О. Принципы лазеров. – М.: Мир, 1984
2. Делоне Н.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. – М.: Наука, 1989
3. Рубинштейн Л.И. Проблема Стефана. – Рига, Звайгзне, 1967