

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение
высшего профессионального образования
«Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

Взаимодействие оптического излучения с веществом

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ В НЕЛИНЕЙНЫХ СРЕДАХ

Методические указания к лабораторной работе
для студентов направлений «Фотоника и оптоэлектроника» и
«Электроника и микроэлектроника»
(специальность «Электронные приборы и устройства»)

Гейко, Павел Пантелеевич

Моделирование распространения световых пучков в нелинейных средах = Взаимодействие оптического излучения с веществом: методические указания к лабораторной работе для студентов направления «Фотоника и оптоинформатика» и «Электроника и микроэлектроника» (специальность «Электронные приборы и устройства»/ П.П. Гейко; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. - Томск: ТУСУР, 2012. - 11 с.

Цель данной работы - изучить основные закономерности распространения лазерных пучков в оптически неоднородных средах, оказывающих на пучок фокусирующее или расфокусирующее действие. Распределение «элементарных оптических линз» вдоль пути распространения пучка формируется под действием самого пучка вследствие нелинейного изменения показателя (самовоздействие светового пучка).

Пособие предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению «Фотоника и оптоинформатика» и «Электроника и микроэлектроника» (специальность «Электронные приборы и устройства» по дисциплине «Взаимодействие оптического излучения с веществом»).

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

УТВЕРЖДАЮ
Зав. кафедрой ЭП
_____ С.М. Шандаров
«__» _____ 2012 г.

Взаимодействие оптического излучения с веществом

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ В НЕЛИНЕЙНЫХ СРЕДАХ

Методические указания к лабораторной работе
для студентов направлений «Фотоника и оптоэлектроника» и
«Электроника и микроэлектроника»
(специальность «Электронные приборы и устройства»)

Разработчик
профессор каф. ЭП
_____ П.П. Гейко
_____ 2012 г

Содержание

1 Введение	5
2 Теоретическая часть	5
2.1 Самофокусировка пучков	5
2.2 Тепловая самофокусировка	6
2.3 Дефокусировка световых пучков	7
2.5 Контрольные вопросы	8
3 Экспериментальная часть	8
3.1 Проведение вычислительных экспериментов	8
3.2 Задания	9
3.3 Содержание отчета	9
Список литературы	9

1 Введение

Цель этой работы - изучить основные закономерности распространения лазерных пучков в оптически неоднородных средах, оказывающих на пучок фокусирующее или расфокусирующее действие. Распределение «элементарных оптических линз» вдоль пути распространения пучка формируется под действием самого пучка вследствие нелинейного изменения показателя (самовоздействие светового пучка).

2 Теоретическая часть

2.1 Самофокусировка пучков

Используем квазиоптический подход для описания распространения световых пучков в нелинейных средах.

Пусть импульс распространяется в керровской среде. При этом, ясно, что фокусное расстояние той линзы, которую создает впереди себя импульс волны излучения, будет изменяться по мере вхождения пучка в среду и роста в ней интенсивности поля. Так как при этом будет меняться и фокусирующее действие среды, то фронт лазерного импульса, который первым поступает в эту еще не измененную полем среду, практически не испытает ее фокусирующего действия, а вот последующие части импульса будут по мере поступления в среду испытывать на себе такое ее действие.

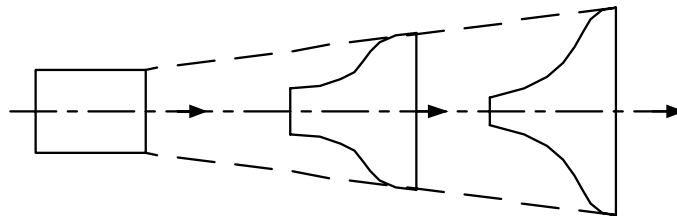


Рисунок 2.1 - Изменение продольного сечения импульса

Поэтому форма продольного сечения импульса будет изменяться по мере движения в среде так, как это показано на рис.2.1, причем расширение передней части импульса происходит из-за дифракции.

Физическая причина этого эффекта заключается в том, что диэлектрическая проницаемость в сильном световом поле зависит от напряженности поля:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_2 |E|^2 = \varepsilon_0 + \varepsilon_2 A_0^2, \quad (2.1)$$

В поле гауссова пучка нелинейная среда приобретает линзовые свойства:

$$\varepsilon_1(r, z) = \frac{\varepsilon_2 E_0^2}{f^2} - \frac{2\varepsilon_2 E_0^2 r^2}{a^2 f^2} + \dots, \quad (2.2)$$

Сравнивая (2) с выражением $\varepsilon_1(r, z) = \varepsilon_0 \phi(z) r^2$ (лабораторная № 3), видим, что

$$\phi_{нл}(z) = -\frac{2\varepsilon_2 E_0^2}{\varepsilon_0 a^2 f^4(z)}$$

и уравнение для ширины пучка приобретает вид:

$$\frac{d^2 f}{dz^2} = -\frac{1}{R_{нл}^2 f^3} + \frac{1}{R_D^2 f^3}, \quad (2.3)$$

Здесь $R_D = ka^2/2$ - характерная длина, связанная с дифракцией пучка, а $R_{нл} = a \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{2\varepsilon_2 E_0^2}}$ - характерная длина, связанная с нелинейностью среды.

В отличие от линейной среды рефракция в нелинейной среде (2.3) приобретает «лавиный» характер: чем больше сжимается пучок, $f \rightarrow 0$, тем большей становится рефракция, $\phi \rightarrow \infty$.

Волноводному распространению, $f \equiv 1$, соответствует условие $R_D = R_{нл}$, выполняющееся при мощности пучка равной

$$P_{кр} = \frac{\lambda_0^2 c n_0}{64\pi^2 \varepsilon_2}. \quad (2.4)$$

Отметим, что критическая мощность не зависит от радиуса пучка. Вклад в изменение диэлектрической проницаемости дают нелинейная электронная поляризуемость среды, электрострикция, ориентация дипольных молекул. Полагая $\varepsilon_2 = 10^{-12}$ СГСЕ, $\lambda_0 = 1$ мкм, находим $P = 50$ кВт. Если мощность пучка больше критической $P > P_{кр}$, то нелинейная рефракция подавляет дифракционное расплывание и происходит самофокусировка с образованием коллапса $f \rightarrow 0$, $A_0 \rightarrow \infty$ на конечном расстоянии $z_\phi = R_{нл} (1 - P_{кр}/P)^{-1/2}$.

2.2 Тепловая самофокусировка

Изменение диэлектрической проницаемости может происходить вследствие нагрева вещества

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{d\varepsilon}{dT} (T - T_0). \quad (2.5)$$

Температура среды устанавливается в соответствии с уравнением теплопроводности

$$Q = \frac{\delta n_0 A_0^2}{8\pi} = -\chi \Delta T, \quad (2.6)$$

где χ - коэффициент теплопроводности, δ - коэффициент поглощения. Пренебрегая диффузией тепла вдоль оси гауссова пучка, $\partial^2 T / \partial z^2 = 0$, можно найти

$$T = T(0, z) - \frac{\delta c n_0 E_0^2 r^2}{16 \pi \chi f^2}. \quad (2.7)$$

Учитывая (2.5), (2.7), нетрудно найти $\phi_{\text{нл}}(z) = -\frac{\delta P(d\varepsilon/dT)}{\pi a^2 \chi f^2(z)}$ и уравнение для ширины пучка

$$\frac{d^2 f}{dz^2} = -\frac{1}{R_{\text{нл},T}^2 f} + \frac{1}{R_{\text{д}}^2 f^3}; \quad R_{\text{нл},T} = a \sqrt{\frac{\pi \chi}{\delta P |d\varepsilon/dT|}}. \quad (2.8)$$

Теперь волноводному распространению светового пучка соответствует критическая мощность

$$P_{\text{кр},T} = \frac{\lambda_0^2 \chi}{\pi \delta a^2 \varepsilon_0 |d\varepsilon/dT|}. \quad (2.9)$$

В типичных случаях (оптически прозрачные стекла и кристаллы) $P_{\text{кр},T} = 0,01 \div 0,1$ Вт.

Из уравнения (2.8) видно, что при тепловой самофокусировке нелинейная рефракция нарастает вблизи фокуса более медленно, чем, например, при стрикционной самофокусировке, - это является следствием рассасывания тепла из-за поперечной термодиффузии. Поле в нелинейном фокусе по этой же причине ограничено дифракцией.

Мощность пучка в реальных средах, строго говоря, уменьшается вследствие поглощения:

$$P = P_0 e^{-\delta z}, \quad E_0 = E_0(0) e^{-\delta z/2}, \quad (2.10)$$

где $\delta = \frac{k \varepsilon_0''}{2 \varepsilon_0'}$ - коэффициент затухания волны, $\varepsilon_0 = \varepsilon_0' + i \varepsilon_0''$. Это приводит

к уменьшению нелинейной рефракции по мере распространения волны

$$\frac{d^2 f}{dz^2} = -\frac{e^{-\delta z}}{R_{\text{нл}}^2 f^N} + \frac{1}{R_{\text{д}}^2 f^3}, \quad (2.11)$$

Сильное поглощение $\delta R_{\text{нл}} > 1$ ограничивает зону эффективной нелинейной рефракции и уменьшает тем самым фокусирующие свойства среды.

2.3 Дефокусировка световых пучков

До сих пор мы рассматривали поведение пучков в фокусирующих средах с $\phi < 0$. Вместе с тем существует большой класс нелинейных механизмов, которые дают $\phi > 0$. В частности, жидкости, газы, и многие кристаллы, расширяясь при нагреве, уменьшают свою диэлектрическую проницаемость, $d\varepsilon/dT < 0$. С таким механизмом изменения оптических свойств среды связана тепловая дефокусировка. При резонансном

воздействии лазерного пучка на двухуровневую среду можно создать условия, когда показатель преломления уменьшается с увеличением интенсивности света. В дефокусирующих средах «сила» нелинейной рефракции изменяет свой знак на обратный:

$$\frac{d^2 f}{dz^2} = \frac{e^{-\delta z}}{R_{НЛ}^2 f^N} + \frac{1}{R_D^2 f^3}. \quad (2.12)$$

Видно, что в таких средах пучок будет расплываться как следствие дифракции, так и благодаря нелинейной рефракции.

2.5 Контрольные вопросы

1. Почему и когда происходит самофокусировка луча?
2. Почему самофокусируется только часть импульса света?
3. Объясните качественно явление самофокусировки.
4. Каков смысл величины $R_{НЛ}$.
5. Какова роль дифракции и поглощения света при самофокусировке?
6. Когда среда будет дефокусировать световой пучок?

3 Экспериментальная часть

3.1 Проведение вычислительных экспериментов

Рассмотренные случаи распространения гауссовых световых пучков в нелинейных средах описываются уравнением для безразмерной ширины пучка следующего типа:

$$\frac{d^2 f}{dX^2} = \frac{Ae^{-BX}}{f^N} + \frac{C}{f^3}, \quad (3.1)$$

с граничными условиями при $X = 0$:

$$f = 1 \text{ и } df/dX = D$$

Здесь $X = z/L$, где L - характерная длина, в качестве которой можно взять $R_{НЛ}$ (тогда $A = \pm 1$, $C = R_{НЛ}^2 / R_D^2$, $B = \delta R_{НЛ}$, $D = R_{НЛ} / R$). Уравнение (3.1) решается методом Рунге-Кутты с постоянным шагом интегрирования (см. лабораторную «Моделирование распространения световых пучков в оптически неоднородных средах»)

Различным вариантам соответствуют следующие величины параметров.

1. Явление нелинейной рефракции в фокусирующей среде $C = 0$, $N = 1$ или 3 , $A = -1$
2. Явление нелинейной рефракции в дефокусирующей среде $C = 0$, $N = -1$ или 3 , $A = -1$ с учетом ($B > 0$) или без учета ($B = 0$) затухания.

3. Самофокусировка пучков на локальной нелинейности $C=1$, $A<0$, $N=3$ с учетом ($B>0$) или без учета ($B=0$) затухания.

4. Дефокусировка пучков на локальной нелинейности $C=1$, $A>0$, $N=3$ при $B>0$ или $B=0$.

5. Тепловая самофокусировка пучков $C=1$, $A<0$, $N=1$ при $B>0$ или $B=0$.

6. Тепловая дефокусировка пучков $C=1$, $A>0$, $N=1$ при $B>0$ или $B=0$.

3.2 Задания

1. Изучение самофокусировки.

Исследовать зависимость координаты фокуса z_ϕ и величины поля в нелинейном фокусе, связанной с минимальной шириной пучка $A_\phi = E_0 / f(z_\phi)$, от начальной мощности пучка (коэффициента A) и расходимости пучка D .

2. Изучение дефокусировки пучков.

2.1 Исследовать темп расплывания пучка, вычисляя расстояние z_ϕ , на котором коллимированный ($D=0$) пучок удваивает свою ширину, в зависимости от начальной мощности пучка (коэффициента A).

2.2 Для сходящегося пучка ($D<0$) получить зависимость фокусного расстояния и минимальную ширину пучка от начальной мощности пучка (коэффициент A).

Исследовать с помощью Matcad несколько вариантов распространения пучков в средах. При этом рекомендуется задавать числовые значения коэффициентов A , B , C и D в интервале от 0 до $2\div 3$ (по модулю). Результаты исследования представить в графическом виде.

3.3 Содержание отчета

3.4.1. При составлении отчета необходимо руководствоваться общими требованиями и правилами оформления отчета о лабораторной работе.

3.4.2. В соответствующих разделах отчета необходимо представить:

- 1) задание;
- 2) таблицы экспериментальных данных;
- 3) результаты расчетов, предусмотренных заданием;
- 4) выводы.

Список литературы

1. Оптика : Учебное пособие для вузов / Г. С. Ландсберг. - М. : Физматлит, 2006. - 848 с.
2. Волновая оптика : Учебное пособие для вузов / Н. И. Калитеевский. - 4-е изд., стереотип. - СПб. : Лань, 2006. - 465 с.

3. Ярив А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. - М.: Мир, 1987. – 616 с.

4. Шен И.Р. Принципы нелинейной оптики. – М.: Наука, 1989. – 557 с.

5. Гейко П.П. Прикладная нелинейная оптика : учебное пособие, Томск, ТУСУР, 2007

Взаимодействие оптического излучения с веществом: учебное пособие / П. П. Гейко. - Томск: ТУСУР, 2007. - 151 с.

Учебное пособие

Гейко Павел Пантелеевич

Моделирование распространения световых пучков
в нелинейных средах

Методические указания к лабораторной работе
по дисциплине «Взаимодействие оптического излучения с веществом»

Усл. печ. л. _____ Препринт
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники
634050, г.Томск, пр.Ленина, 40