

УДК 535.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ СЛАБОПОГЛОЩАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ «ТЕПЛОВОЙ ЛИНЗЫ»

Петропавловский В.М.

*ФБГОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики»,
Самара, e-mail: Petropavlovsky-Vlad@yandex.ru*

Исследовано применение метода «тепловой линзы» для определения показателя поглощения слабопоглощающих сред, вплоть до предельно малых значений показателя поглощения. Поглощение света приводит к нагреву среды. Из-за этого показатель преломления изменяется $\Delta n = (\partial n / \partial T) \cdot \Delta T$. В жидкости образуется осесимметричное распределение показателя преломления вследствие явления теплопроводности и неоднородного нагрева. Практически всегда показатель преломления уменьшается с ростом температуры. Поэтому по краям он будет больше, чем в центре пучка. Такое распределение показателя преломления эквивалентно рассеивающей линзе. Изучены преимущества и недостатки данной методики. Рассмотрено использование экспериментальной установки с одним лазером и механическим модулятором светового пучка. Рассчитаны зависимость распределения температуры в среде от времени для импульсного и непрерывного воздействия, фокусное расстояние возникающей «тепловой линзы», характерный размер гауссового лазерного пучка в дальней зоне при отсутствии и наличии поглощающей среды, мощность излучения после прохождения диафрагмы. Показано, что относительное изменение мощности излучения после диафрагмы в первом приближении прямо пропорционально показателю поглощения среды. Оценен динамический диапазон метода. Предложены решения для увеличения динамического диапазона. По представленной методике определены показатели поглощения некоторых жидкостей. Показано хорошее соответствие с ранее измеренными значениями.

Ключевые слова: лазер, высокочувствительная лазерная спектроскопия, тепловая линза, слабопоглощающие жидкости, рассеяние света

DETERMINATION OF THE ABSORPTION COEFFICIENT OF WEAKLY ABSORBING LIQUID BY «THERMAL LENS»

Petropavlovskiy V.M.

*The Federal State Budget Educational Institution of Higher Education Povolzhskiy State University
of Telecommunications and Informatics, Samara, e-mail: Petropavlovsky-Vlad@yandex.ru*

The application of the «thermal lens» method to determine the absorption index of weakly absorbing media, up to extremely small values of the absorption index, is investigated. Absorption of light leads to heating of the medium. Because of this, the refractive index changes $\Delta n = (\partial n / \partial T) \cdot \Delta T$. In the liquid, an axisymmetric distribution of the refractive index is formed due to the phenomenon of thermal conductivity and inhomogeneous heating. Almost always the refractive index decreases with increasing temperature. So on the edges of the he will more, than in the center of the beam. This distribution of the refractive index is equivalent to the scattering lens. The advantages and disadvantages of this technique are studied. The use of an experimental setup with a single laser and a mechanical modulator of the light beam is considered. The dependence of the temperature distribution in the medium on time for pulse and continuous action, the focal length of the emerging «thermal lens», the characteristic size of the Gaussian laser beam in the far zone in the absence and presence of an absorbing medium, the radiation power after passing the diaphragm are calculated. It is shown that the relative change in the radiation power after the diaphragm in the first approximation is directly proportional to the absorption index of the medium. The dynamic range of the method is estimated. Solutions for increasing the dynamic range are proposed. According to the presented method, the absorption indices of some liquids were determined. Good agreement with the previously measured values is shown.

Keywords: laser, highly sensitive laser spectroscopy, thermal lens, weakly absorbing liquids, light scattering

Явление тепловой самодефокусировки излучения («тепловая линза») впервые было обнаружено и исследовано в лазерных резонаторах. Оно ограничивает предельную мощность оптоволоконных усилителей [1] и влияет на распространение света в оптических волноводных структурах [2, 3]. Мощность излучения внутри резонатора в несколько раз (а иногда и на порядки) превышает выходную мощность лазерного пучка. Поглощение света приводит к нагреву среды. Из-за этого показатель преломления изменяется $\Delta n = (\partial n / \partial T) \cdot \Delta T$.

Цель данной работы: изучить возможность применения метода «тепловой линзы» для определения показателей поглощения слабопоглощающих жидкостей. В жидкости образуется осесимметричное распределение показателя преломления вследствие явления теплопроводности и неоднородного нагрева. Практически всегда показатель преломления уменьшается с ростом температуры ($\partial n / \partial T < 0$). Поэтому по краям он будет больше, чем в центре пучка. Такое распределение показателя преломления эквивалентно рассеивающей линзе. В случае лазерного резонатора данный эф-

факт вреден (увеличивается расходимость пучка, падает стабильность лазера, появляются паразитные моды), и с ним борются, например, используя жидкости для активной среды с меньшей температурной зависимостью.

Для определения показателя поглощения удобнее размещать исследуемое вещество вне резонатора [4]. Схема установки приведена на рисунке. Пучок света, генерируемый лазером 1, проходит через модулятор 2 (необходим, чтобы создаваемая тепловая линза меняла свое фокусное расстояние) и фокусируется собирающей линзой 3 в кювету с исследуемой жидкостью 4. Из-за дефокусировки в жидкости размер пучка в дальней зоне увеличится. Для того, чтобы найти относительное значение интенсивности на оси пучка использованы диафрагма 5 и фотодетектор 6. Вольтметр 7 может измерять переменное или постоянное напряжение и позволил померить относительное изменение светового потока.

Фокусное расстояние тепловой линзы

Показатель преломления среды зависит только от радиальной составляющей и может быть представлен как

$$n(r) = n(0) + r(\partial n / \partial r)_{r=0} + (1/2)r^2(\partial^2 n / \partial r^2)_{r=0} + \dots \quad (1)$$

В данном случае второе слагаемое обращается в ноль. Пренебрегая членами третьего и выше порядков и используя уравнение лучей [3]

$$\frac{d}{dl} \left(n \frac{dr}{dl} \right) = \text{grad} [n(r)]. \quad (2)$$

Получим выражение, связывающее радиус кривизны луча с распределением показателя преломления:

$$\frac{1}{R} = \vec{v} \cdot \text{grad} [\ln(n)]. \quad (3)$$

Если при прохождении через кювету диаметр лазерного пучка меняется незначительно, то (3) принимает вид

$$\frac{1}{R} = \frac{r}{n} \cdot \left(\frac{\partial^2 n}{\partial r^2} \right)_{r=0}. \quad (4)$$

Эффективное фокусное расстояние определяется длиной среды L и радиусом кривизны луча R :

$$\frac{1}{F} = -\frac{n \cdot L}{r \cdot R} = -L \cdot \left(\frac{\partial^2 n}{\partial r^2} \right)_{r=0}. \quad (5)$$

Учитывая зависимость показателя преломления жидкости от температуры среды, получим

$$F = - \left[L \frac{\partial n}{\partial T} \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right)_{r=0} \right]^{-1}. \quad (6)$$

Распределение температуры в среде

Запишем уравнение теплового баланса для изменения температуры ΔT в цилиндрических координатах:

$$\frac{\partial(\Delta T)}{\partial t} = D \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(\Delta T)}{\partial r} + \frac{\partial^2(\Delta T)}{\partial r^2} \right), \quad (7)$$

$D = \frac{k}{c\rho}$, k – коэффициент теплопроводности, c – удельная теплоемкость, ρ – плотность вещества. Значения k , c , ρ , D для некоторых часто используемых жидкостей приведены в табл. 1.

Решение (7) приведено в [6] и имеет вид

$$G(r, r', t) = \frac{Q}{4\pi Dt} \cdot \exp\left(-\frac{r^2 + r'^2}{4Dt}\right) \cdot I_0\left(\frac{rr'}{2Dt}\right), \quad (8)$$

Q – теплота, выделяющаяся на единицу длины. В данном эксперименте мы применяли непрерывный лазер, поэтому для получения конечного результата нужно проинтегрировать (8) по времени.

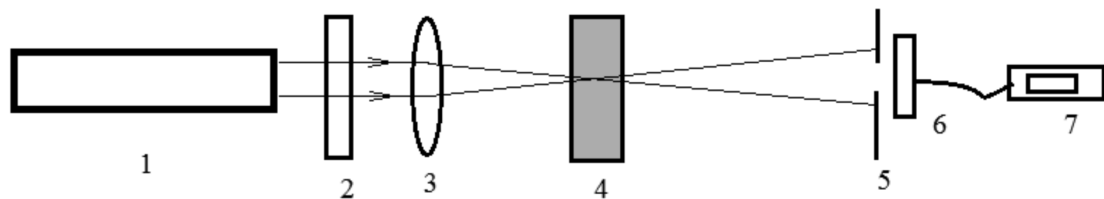


Схема экспериментальной установки: 1 – лазер, 2 – модулятор, 3 – собирающая линза, 4 – кювета с исследуемой жидкостью, 5 – диафрагма, 6 – фотодетектор, 7 – цифровой вольтметр

Таблица 1

Плотность, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности и коэффициент температуропроводности для некоторых жидкостей [5]

Параметр	Вещество	Дистиллированная вода	Ацетон (ЧДА)	Этиловый спирт	Изопропиловый спирт
плотность вещества ($\cdot 10^3$), кг/м ³		1	0,8	0,8	0,79
удельная теплоемкость кДж/(кг·К)		4,18	2,22	2,41	2,08
коэффициент теплопроводности ($\cdot 10^3$), Вт/(м·К)		588	160	166	154
коэффициент температуропроводности ($\cdot 10^{-3}$), м ² /с		141	90	83	94

Был выбран одномодовый лазер с гауссовым профилем распределения интенсивности по сечению пучка:

$$I = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{w^2}\right), \quad (9)$$

w – радиус пучка, I_0 – интенсивность излучения на оси пучка, $I_0 = P/(\pi \cdot w^2)$, P – мощность излучения.

Из (8) и (9) получим

$$T(r, t) = \int_0^t dt \int_0^\infty dr \cdot \frac{2\pi \cdot r \cdot}{4\pi Dt} \exp\left(-\frac{(r^2 + r'^2)}{4Dt}\right) \cdot I_0 \left(\frac{rr'}{2Dt}\right) \frac{\alpha P}{\pi w^2} \cdot \exp\left(-\frac{r'^2}{w^2}\right) / \rho c_p. \quad (10)$$

В случае если $z \ll b_0 = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$, размер пучка при прохождении жидкости будет меняться слабо, и в первом приближении может быть принят постоянным.

Дважды дифференцируя по r и интегрируя (10) по r' , получаем

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2} \left(\frac{\alpha P}{\pi \cdot k} \cdot \frac{D}{w^2 + 8Dt} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{w^2 + 8Dt}\right) \right) = -\frac{4\alpha PD}{\pi k (w^2 + 8Dt)^2}. \quad (11)$$

Далее проинтегрируем (11) по времени импульса:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \int_0^t -\frac{4\alpha PD}{\pi k (w^2 + 8Dt)^2} dt = -\frac{\alpha P}{2\pi \cdot k \cdot w^2 (1 + t_c / 2t)}, \quad (12)$$

$t_c = \frac{w^2}{4D}$ – характерное время релаксации при тепловыделении.

Используя (6), получаем

$$F(t) = -\frac{2\pi \cdot k \cdot w^2 (1 + t_c / 2t)}{\alpha PL \left(\frac{dn}{dT}\right)}.$$

Если время велико – $F = -\frac{2\pi \cdot k \cdot w^2}{\alpha PL \left(\frac{dn}{dT}\right)} = -\frac{C}{\alpha}$

$$C = \frac{2\pi \cdot k \cdot w^2}{PL \left(\frac{dn}{dT}\right)}. \quad (13)$$

Изменение диаметра пучка в дальней зоне

Рассмотрим пучок с гауссовым распределением интенсивности по сечению. Его размер на экране w (расстояние до экрана $z \gg \frac{\pi w_0^2}{\lambda} = b_0$) вычисляется как

$$w = \frac{\lambda z}{\pi w_0}. \quad (14)$$

При прохождении через диафрагму радиусом a останется мощность:

$$P_1 = \int_0^a I(r) 2\pi r dr = \int_0^a I_0 \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{w^2}\right) 2\pi r dr.$$

Так как

$$P = \int_0^\infty I(r) 2\pi r dr = \int_0^\infty I_0 \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{w^2}\right) 2\pi r dr = \pi I_0 w^2,$$

то

$$P_1 = P \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{a^2}{w^2}\right)\right].$$

Если диафрагма мала, то прошедшая мощность

$$P_1 \approx P \frac{a^2}{w^2}. \quad (15)$$

Линза с фокусным расстоянием F изменяет радиус сферической волны по формуле $\frac{1}{R} = \frac{1}{r} - \frac{1}{F}$.

Используя формализм комплексного параметра пучка q $\left(\frac{1}{q} = \frac{1}{R} - \frac{i\lambda}{\pi w^2}\right)$, получим

$$\frac{1}{\frac{1}{F} - \frac{i\lambda}{\pi w_0^2}} = \frac{i\lambda}{\pi \cdot v_0^2} + x. \quad (16)$$

Здесь x – расстояние до новой перетяжки, v_0 – ее размер. Решив (16), найдем

$$v_0^2 = \frac{w_0^2}{1 + \left(\frac{b_0}{F}\right)^2}, \quad x = \frac{|F|}{1 + \left(\frac{|F|}{b_0}\right)^2}. \quad (17)$$

Если показатель поглощения мал, то $F \gg \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$. Тогда

$$v_0^2 = w_0^2 \left[1 - \left(\frac{b_0}{F}\right)^2\right] = w_0^2 \left[1 - \left(\frac{\alpha}{C_1}\right)^2\right],$$

$$x = \frac{b_0^2}{|F|} = \frac{b_0 \cdot \alpha}{C_1}, \quad C_1 = C/b_0. \quad (18)$$

Найдем параметры пучка и мощность, прошедшую через диафрагму:

$$w_1 = \frac{\lambda(z+x)}{\pi v_0}. \quad (19)$$

Так как $x \ll z$, то

$$w_1 = \frac{\lambda z \left(1 + \frac{b_0 \cdot \alpha}{z C_1}\right)}{\pi \cdot w_0 \left(1 - \frac{\alpha^2}{2 C_1^2}\right)} \approx w(1 + C_2 \alpha), \quad (20)$$

α – показатель поглощения среды.

$$P_2 = P \left\{1 - \exp\left[-\frac{a^2}{w_1^2}\right]\right\} \approx P \frac{a^2}{w_1^2} = P_1 (1 + C_2 \alpha)^2. \quad (21)$$

В первом приближении:

$$\frac{P_2 - P_1}{P_1} \frac{w_1^2}{w^2} \approx 2 C_2 \alpha. \quad (22)$$

Измерение показателей поглощения

В качестве источника излучения в установке, изображенной на рисунке, был использован полупроводниковый лазер OMEGA LASER PEN RP50 с длиной волны 650 нм и мощностью около 50 мВт. К сожалению, качество его излучения оказалось не очень высоким – не удалось реализовать предельно малый размер перетяжки. Характерный размер составил $w_0 = 100$ – 150 мкм. Поэтому предельная чувствительность установки составила около $0,01$ м⁻¹. На точность измерений оказывало некоторое влияние и определение поглощения калибровочной жидкости. Для калибровки в исследуемую жидкость добавлялся раствор бриллиантовой зелени. По ослаблению пучка определялся показатель поглощения получившегося раствора $\alpha \sim 1$ м⁻¹. Для получения градуировочного раствора добавлялась в нужной пропорции чистая жидкость. По сравнению относительного изменения мощности после диафрагмы для исследуемой и для градуировочного раствора определялся искомый показатель поглощения. Результаты измерений приведены в табл. 2.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о хорошем соответствии результатов опыта и ранее измерений по ранее известным методикам для не очень малых значений показателя поглощения жидкости.

Таблица 2

Сравнение показателей поглощения, измеренных методом тепловой линзы и найденных в литературных источниках (* – оценка по действительной части показателя преломления из дисперсионных соотношений Крамерса – Кронига [5])

Показатель поглощения α (м^{-1}), ($\lambda = 0,65$ мкм)	Дистиллированная вода	Ацетон (ЧДА)	Этиловый спирт	Изопропиловый спирт
Измеренный	0,5	0,4	1,4	0,5
По литературным данным	0,33–0,41	0,35	0,7	0,3*

Заключение

Метод «тепловой линзы» может быть использован для определения показателя поглощения слабопоглощающих жидкостей. Для работы необходима предварительная калибровка установки на образцах с известным показателем поглощения. Главным достоинством метода является очень высокая чувствительность (до 10^{-4} м^{-1}). К недостаткам следует отнести малый динамический диапазон (< 100) при неизменяемой мощности лазера. Также ограничивает использование метода сложность перестройки по длине волны. Для нахождения спектра поглощения следует использовать лазеры на красителях, работающие в сине-зеленом или желто-красном диапазонах (как альтернатива для дискрет-

ных значений – аргон-ионный (криптонный) лазер с селекцией длин волн).

Список литературы

1. Hansen K.R., Broeng J., Alkeskjold T.T., Laegsgaard J. Thermo-optical effects in high-power ytterbium-doped fiber amplifiers. *Opt. Express*. 2011. V. 24. P. 23965–23982. DOI: 10.1364/OE.19.023965.
2. Глушенко А.Г., Глушенко Е.П. Особенности эффекта Доплера в многомодовом волноводе // *Компьютерная оптика*. 2017. Т. 41. № 5. С. 687–693.
3. Головкина М.В. Особенности распространения электромагнитных волн в волноводной структуре со сверхпроводящей пленкой и метаматериалом // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2010. Т. 74. № 12. С. 1739–1743.
4. Петропавловский В.М., Топоркова Л.В. Способ стабилизации мощности излучения лазера // *Инфокоммуникационные технологии*. 2013. № 2. С. 65–68.
5. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А. и др. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
6. Карлсруй Х.С., Егер Д. Операционные методы в прикладной математике. М.: ИЛ, 1948. 293 с.