



МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ФАКТОРА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОГЛОЩЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ТОНКИМИ ПРОВОЛОКАМИ И ИХ КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

А.О. Натарова, кандидат физико-математических наук, доцент Харьковского университета Воздушных сил имени Ивана Кожедуба

Н.Г. Кокодий, доктор физико-математических наук, профессор Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина



А.О. Натарова



Н.Г. Кокодий

Исследованы методы измерения фактора эффективности поглощения лазерного излучения тонкими металлическими волокнами и их оптических постоянных (комплексного показателя преломления).

The measuring methods of the laser radiation absorption efficiency factor (AEF) by thin metal wires and their optical constants (complex refraction index) are investigated.

Введение

Задача дифракции электромагнитного излучения на цилиндре — одна из самых известных в электродинамике. Внимание, уделяемое этой задаче, объясняется многими ее практическими применениями. Так, путем анализа дифракционной картины можно получить информацию о размере поперечного сечения цилиндра, его форме, показателе преломления. Многочисленные методы измерения этих параметров изложены в различных статьях и систематизированы в монографиях, например, в [1–4]. Эффекты, возникающие при взаимодействии электромагнитного излучения с диэлектрическими или металлическими волокнами, используются для измерения параметров этого излучения. В работе [5] описан метод, использующий давление лазерного излучения на решетку из стеклянных волокон. В работах [6–8] показано, как для измерения мощности лазерного излучения и распределения интенсивности в пучке

использовать нагрев этим излучением решеток из тонких металлических проволок. Давление излучения и поглощенную мощность можно найти только из решения задачи дифракции на цилиндре.

1. Факторы эффективности, ослабления, рассеяния и поглощения

Взаимодействие электромагнитной волны с объектом удобно характеризовать безразмерными факторами: $Q_{\text{sca}} = P_{\text{sca}} / P$ — фактор эффективности рассеяния; $Q_{\text{abs}} = P_{\text{abs}} / P$ — фактор эффективности поглощения (ФЭП); $Q = Q_{\text{sca}} + Q_{\text{abs}}$ — фактор эффективности ослабления. Здесь P — мощность излучения, попавшего на цилиндр; P_{sca} — мощность рассеянного излучения; P_{abs} — мощность поглощенного излучения.

Для E -волны

$$Q^E = \frac{2}{\rho} \sum_{l=-\infty}^{\infty} \text{Re}(b_l); \quad (1)$$

$$Q_{\text{sca}}^E = \frac{2}{\rho} \sum_{l=-\infty}^{\infty} |b_l|^2. \quad (2)$$

ФЭП можно вычислить как разность факторов эффективности ослабления и рассеяния:

$$Q_{\text{abs}}^E = Q^E - Q_{\text{sca}}^E.$$

Для H -волны формулы имеют такой же вид, но вместо коэффициентов b_l в них стоят коэффициенты a_l :

$$Q^H = \frac{2}{\rho} \sum_{l=-\infty}^{\infty} \text{Re}(a_l);$$

$$Q_{\text{sca}}^H = \frac{2}{\rho} \sum_{l=-\infty}^{\infty} |a_l|^2;$$

$$Q_{\text{abs}}^H = Q^H - Q_{\text{sca}}^H.$$

Выражения для коэффициентов b_l и a_l приводятся в литературе о дифракции, например, в [1].

2. Измерение фактора эффективности поглощения электромагнитного излучения металлической проволокой и оптических параметров металла

ФЭП излучения тонкими проволоками необходимо знать при использовании этих проволок в качестве болометров в приборах для измерения энергетических характеристик лазерного излучения. Его можно рассчитать с помощью формул (1), (2). Для этого нужно знать диаметр проволоки, длину волны излучения и комплексный показатель преломления материала, из которого изготовлена проволока. Но показатель преломления металла сильно зависит от состояния поверхности (способа шлифовки или полировки), метода получения образца (химического, электролитического), степени окисления поверхности. Поэтому представляют интерес экспериментальные методы измерения оптических свойств тонких металлических проволок – ФЭП и показателя преломления. В работе [9] описан один из таких методов, который состоит в измерении энергии, поглощенной платиновой проволочной решеткой, на которую падает пучок лазерного излучения. Результаты измерений показали, что значение ФЭП платиновой проволоки диаметром 10 мкм на длине волны 1,06 мкм почти в 2 раза меньше значения, полученного расчетным путем с использованием табличных значений показателя преломления платины. Это свидетельствует о том, что действительное значение показателя преломления платиновой проволоки может сильно отличаться от табличного значения для массивного образца.

В этой работе было показано также, что на длине волны 1,06 мкм величина ФЭП при увеличении температуры уменьшается, в то время как на длине волны 10,6 мкм с ростом температуры ФЭП увеличивается, что было показано в работе [10].

2.1. Эксперимент. Измерение фактора эффективности поглощения

Блок-схема экспериментальной установки показана на рис. 1, где приняты следующие обозначения: 1 – неодимовый лазер ГОС-1001, работающий на длине волны $\lambda = 1,06$ мкм в режиме свободной генерации с длительностью импульса излучения $t_u = 0,8$ мс; 2 – стеклянная пластина, расположенная под углом Брюстера к падающему на нее излучению лазера (отраженное линейно поляризованное излучение направлено вертикально вверх); 3 – собирающая линза с фокусным расстоянием 75 мм; 4 – решетка из платиновой проволоки диаметром 10 мкм с длиной элементов $L = 24$ мм, периодом $\chi = 1,5$ мм, количеством элементов (болометров) $N = 16$; 5 – калориметр для измерения энергии, прошедшей через решетку; 6 – многоканальный аналого-цифровой преобразователь; 7 – компьютер; 8 – поглощающая нагрузка.

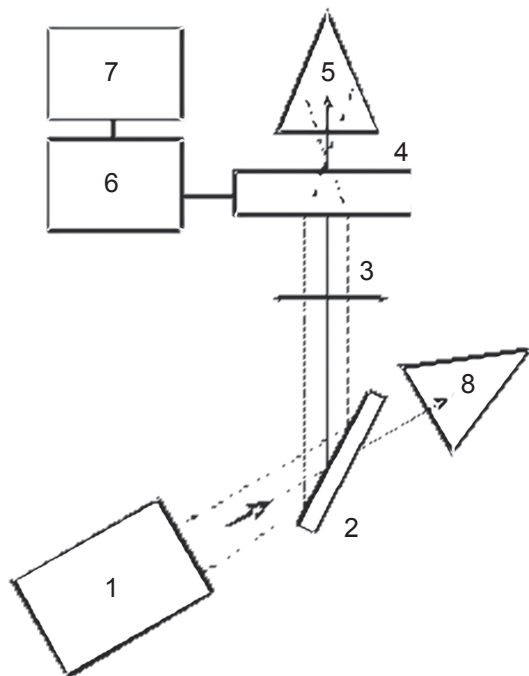


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки

Входное окно приемного элемента (решетки) – квадрат со стороной длиной $L = 24$ мм. Решетка может вращаться вокруг оси оптического луча, при этом сигналы регистрируются с каждого элемента решетки.

Пучок излучения на выходе из лазера имеет диаметр 50 мм, в месте расположения решетки после линзы – 17 мм.

Плоскость поляризации излучения (вектор E) расположен в плоскости падения излучения на пластину (в плоскости чертежа).

После воздействия импульса излучения на болометр его температура и сопротивление быстро увеличиваются до некоторого максимума, а затем уменьшаются до исходного уровня. Максимум сигнала с болометра пропорционален относительному изменению сопротивления $\Delta R_i / R_{i0}$, где ΔR_i – абсолютное максимальное изменение сопротивления i -го болометра, R_{i0} – начальное сопротивление этого болометра.

Средняя плотность энергии в пучке лазерного излучения в месте расположения решетки определяется как

$$W = \frac{E_0}{L^2},$$

где E_0 – энергия в импульсе излучения.

Энергию, попавшую на болометры, можно высчитать по формуле

$$E = WDNL = \frac{E_0 DN}{L}, \quad (3)$$

где D – диаметр болометра; N – их количество в решетке.

Максимальная температура нагрева болометров определяется выражением

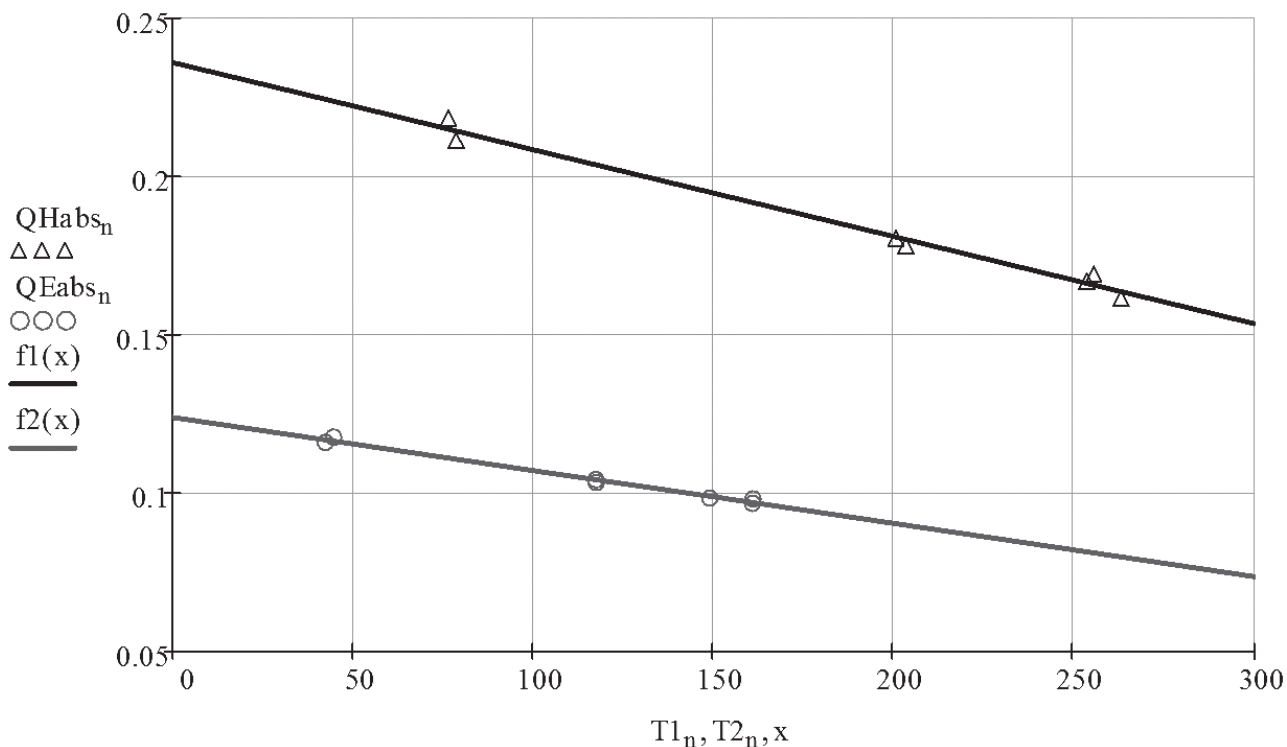


Рис. 2. Зависимость фактора эффективности поглощения от температуры

$$T_{\max} = \frac{Q_{\text{abs}} E}{mc}, \quad (4)$$

где m – масса всех болометров; c – удельная теплоемкость материала, из которого сделаны болометры (платина, $c = 140$ Дж/кг·град).

Масса болометров определяется следующим образом:

$$m = \rho \frac{\pi D^2}{4} L N, \quad (5)$$

где ρ – плотность материала болометров ($\rho = 21460$ кг/м³).

Подставив в формулу (4) выражения (3) и (5), получим

$$T_{\max} = \frac{4 Q_{\text{abs}} E_0}{\pi c \rho L^2 D}.$$

Выходной сигнал U болометрического приемника – это относительное изменение общего сопротивления болометров $\Delta R/R_0$. Оно пропорционально повышению температуры T_{\max} :

$$U = \frac{\Delta R}{R_0} = \alpha_r T_{\max} = \frac{4 \alpha_r Q_{\text{abs}} E_0}{\pi c \rho L^2 D}, \quad (6)$$

где α_r – температурный коэффициент сопротивления ($\alpha_r = 0,0039$ град⁻¹).

Из формулы (6) следует, что

$$Q_{\text{abs}} = \frac{\pi c \rho D L^2 U}{4 \alpha_r E_0}. \quad (7)$$

С помощью соотношения (7) можно определить ФЭП болометров решетки.

В таблице приведены результаты измерений сигналов U с приемника при различных значениях энергии излучения E_0 , попавшего на решетку.

<i>E</i> -поляризация		<i>H</i> -поляризация	
E_0 , Дж	U , отн. ед.	E_0 , Дж	U , отн. ед.
4,75	0,169	4,95	0,306
5,05	0,178	5,13	0,314
15,1	0,469	15,25	0,803
15,5	0,470	15,40	0,813
20,5	0,596	20,50	1,022
20,6	0,644	22,20	1,014
22,1	0,643	22,50	1,052

На рис. 2 точками показаны зависимости ФЭП излучения платиновыми болометрами диаметром 10 мкм от температуры, построенные по данным таблицы. Температура вычислена по формуле

$$T = \frac{\Delta R}{\alpha_r R_0}.$$

Через указанные точки с помощью метода наименьших квадратов проведены аппроксимирующие прямые:

$$Q_{\text{abs}}^E(T) = 0,124 - 1,67 \cdot 10^{-4} T;$$

$$Q_{\text{abs}}^H(T) = 0,236 - 2,74 \cdot 10^{-4} T.$$

Еще один параметр, характеризующий взаимодействие поляризованного лазерного излучения с болометрами, – коэффициент дихроизма:

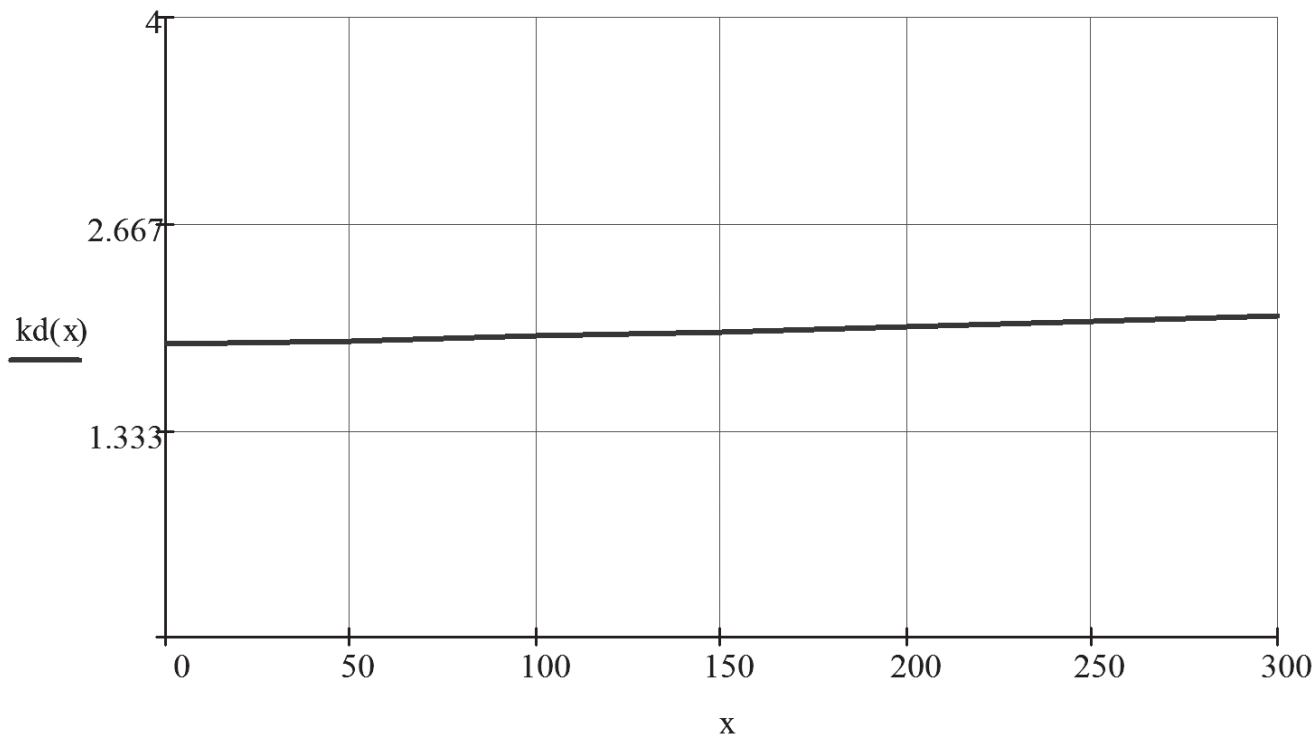


Рис. 3. Зависимость коэффициента дихроизма от температуры

$$k_D = \frac{Q_{abs}^H}{Q_{abs}^E}.$$

На рис. 3 показана его зависимость от температуры. Видно, что коэффициент дихроизма от температуры зависит слабо. Среднее значение коэффициента дихроизма в диапазоне температур от 0 до 300 °С равно 1,97, что согласуется со значением, полученным в работе [9].

Значения Q_{abs}^E и Q_{abs}^H , полученные в эксперименте, меньше тех, которые получаются при расчетах по формулам для платиновой проволоки диаметром 10 мкм со значением показателя преломления $m = 3,42 - 6,31i$, взятым из литературы [11].

Расчетные значения следующие:

$$Q_{abs}^E = 0,161; Q_{abs}^H = 0,324,$$

в то время как экспериментальные для $T = 20$ °С равняются

$$Q_{abs}^E = 0,121; Q_{abs}^H = 0,231.$$

Значения Q_{abs}^E и Q_{abs}^H , полученные в эксперименте, согласуются со значениями этих величин, приведенными в работе [9], которые получены при обработке данных по другой методике. Там при $T = 20$ °С

$$Q_{abs}^E = 0,133, Q_{abs}^H = 0,255.$$

Это согласуется с результатами, приведенными в данной статье, с учетом того, что образцы проволок в этих экспериментах разные.

Различие теоретических и экспериментальных значений может быть вызвано тем, что показатель преломления проволоки, подвергающейся в процессе изготовления термической обработке и протяжке через малое отверстие, может отличаться от показателя преломления массивного куска металла или пленки, полученной напылением на некоторую основу.

2.2. Измерение оптических параметров болометров

Выражения

$$Q_{abs}^E(n, \kappa) = 0,121;$$

$$Q_{abs}^H(n, \kappa) = 0,231$$

представляют собой систему из двух уравнений с двумя неизвестными величинами n и κ (n – вещественная часть комплексного показателя преломления, κ – мнимая). Решив ее, можно найти значения этих величин. Для решения системы использовались средства программы Mathcad. Результаты решения следующие:

$$n = 7,53; \quad \kappa = 11,5.$$

Эти значения отличаются от табличных ($n = 3,42$; $\kappa = 6,31$) практически в два раза.

Выводы

1. Проведены исследования методов измерения ФЭП лазерного излучения тонкими металлическими проволоками и комплексного показателя преломления материала, из которого они изготовлены.

2. Исследована зависимость ФЭП платиновой проволоки излучения от температуры. На длине волны 1,06 мкм при увеличении температуры ФЭП уменьшается, в то время как на длине волны 10,6 мкм он увеличивается. По-видимому, это связано с различными механизмами поглощения излучения в металле в этих спектральных диапазонах.

3. Измеренный ФЭП платиновой проволоки в 1,2–1,4 раза меньше, чем рассчитанный по формулам теории дифракции при табличных значениях коэффициентов преломления и поглощения металла. Возможное объяснение этому – изменение структуры поверхностного слоя в проволоке, вызванное деформацией кристаллической структуры материала при ее изготовлении (термической обработке и протяжке через малое отверстие).

4. Обоснован метод измерения оптических постоянных материала металлических проволок, основанный на зависимости ФЭП от этих параметров.

Список литературы

1. *Лазарев Л.П.* Контроль геометрических и оптических параметров волокна / Л.П. Лазарев, С.Д. Мировицкая. – М.: Радио и связь, 1988. – 280 с.
2. *Mishchenko M.I.* Scattering, absorption and emission of light by small particles / M.I. Mishchenko, L.D. Travis, A.A. Lacis. – N.Y.: Goddard Institute for Space Studies, 2004. – 488 p.
3. Методы светорассеяния в анализе дисперсионных биологических сред / В.Н. Лопатин, А.В. Приезжев, А.Д. Апонасенко [и др.]. – М.: Физматлит, 2004. – 384 с.
4. *Xu R.* Particles characterization light scattering methods / R. Xu. – N.Y., Boston, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers, 2005. – 410 p.
5. Средства измерения энергетических характеристик мощного лазерного излучения / Н.Г. Кокодий, В.Н. Тимошенко, В.Ф. Ефимов [и др.] // Квантовая электроника: сб. – 1990. – № 36.
6. *Катрич А.Б.* Боллометрический анализатор параметров лазерного излучения / А.Б. Катрич, А.В. Худошин // Приборы и техника эксперимента. – 1988. – № 2. – С. 227.
7. *Pak A.O.* Grid receiver for measuring of laser radiation characteristics / A.O. Pak, N.G. Kokody // International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling: the 11-th Int. conf., 4–8 September 2011. – Kharkov, 2011. – P. 1–3.
8. *Кокодий Н.Г.* Измерение распределения интенсивности в пучках теплового излучения / Н.Г. Кокодий, Д.Н. Кокодий // Теплофизика высоких температур. – 2007. – Т. 45, № 2. – С. 289–295.
9. Измерение фактора эффективности поглощения тонкопроволочного болометра / В.М. Кузьмичев, И.А. Приз, Б.В. Сафронов [и др.] // Измерительная техника. – 2007. – № 7. – С. 28–30.
10. *Перепечай М.П.* Исследование взаимодействия интенсивного инфракрасного излучения с металлическими цилиндрами с целью создания проходных измерителей мощности лазерных пучков: дис. ... канд. физ.-мат. наук / М.П. Перепечай. – Харьков, 1979. – 182 с.
11. Direct imaging of photonic nanojet / P. Ferrand, J. Wenger, A. Devilez [et al.] // Optics Express. – 2008. – Vol. 16, No. 10. – P. 6930–6940.

УДК 535.241.42

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ СВІТЛОДІОДІВ У МЕТРОЛОГІЧНОМУ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ СВІТЛОВИХ ВИМІРЮВАНЬ

О.Д. Купко, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник ННЦ "Інститут метрології", м. Харків
В.В. Терещенко, аспірант Харківського національного університету радіоелектроніки



О.Д. Купко



В.В. Терещенко

Проаналізовано існуючі засоби відтворення та передачі сили світла. Запропоновано метод відтворення сили світла із використанням світлодіода. Досліджено похибки, пов'язані зі спектральними характеристиками джерел оптичного випромінювання, та виділено переваги і недоліки використання як еталонного джерела випромінювання білого та зеленого світлодіодів.

Existing equipment for realization and transmission of luminous intensity is analysed. The method for realization the luminous intensity with the use of light-emitting diode