

А. О. Пак, Н. Г. Кокодий

ПОГЛОЩЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ТОНКИМИ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ПРОВОЛОКАМИ ПРИ СИЛЬНОМ ИМПУЛЬСНОМ НАГРЕВЕ

*Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина
4, пл. Свободы, Харьков, 61077, Украина
E-mail: anastasiia.pak@gmail.com*

Приведены результаты измерений поглощения излучения болометрами при нагреве их импульсным излучением, когда в течение импульса температура меняется от комнатной до значений в несколько сотен градусов. Определен ход температурной зависимости коэффициента дихроизма и фактора эффективности поглощения излучения $Q_{abs}(T)$, а также абсолютные значения последнего при различных температурах. Ил. 4. Табл. 1. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: лазерное излучение, болометр, фактор эффективности поглощения, коэффициент дихроизма, показатель преломления.

В технике лазерных измерений используются решетчатые приемники из тонких металлических проволок. Они применяются для контроля энергетических характеристик мощных лазеров – технологических и подобных им [1]. Это несколько проволочных решеток, стоящих на пути распространения пучка излучения. Плоскости решеток перпендикулярны лучу лазера. Проволоки каждой решетки расположены под различными углами к вертикали. Лазерное излучение нагревает их, и они изменяют свое электрическое сопротивление, т. е. работают как болометры. Сопротивление болометров измеряется, и по этим данным определяются характеристики лазерного излучения – распределение интенсивности в пучке, диаметр пучка, положение энергетического центра и др.

Мощное лазерное излучение может нагревать болометры на несколько сотен градусов. При этом их теплофизические параметры (теплоемкость, удельное сопротивление и др.) меняются. При обработке сигналов с приемника эти изменения нужно учитывать, для чего необходимо знать вид их зависимости от температуры. Для металлов, используемых как болометры в решетчатых приемниках (никель, платина), данные о теплопроводности, теплоемкости, плотности, удельном сопротивлении имеются в различных справочниках [2–4]. Однако в расчетах используется еще и такой параметр, как фактор эффективности поглощения излучения болометром Q_{abs} . Он также зависит от температуры, так как она влияет на комплексный показатель преломления материала болометра $m = n - ik$ (n – показатель преломления, k – показатель поглощения). Однако данных о его температурной зависимости в литературе очень мало и они относятся к крупным образцам, в то время как болометры – это проволоки диаметром в несколько десятков микрометров. Их оптические свойства могут быть иными.

В работах [5, 6] были проведены исследования такой зависимости в среднем инфракрасном диапазоне. Эксперименты показали, что при увеличении температуры фактор эффективности поглощения платиновой проволоки растет. Это согласуется с теорией Друде, которую можно здесь использовать.

Но в видимой и ближней инфракрасной областях спектра механизм поглощения излучения в металлах иной, поэтому можно ожидать и иной температурной зависимости.

Некоторые результаты исследований поглощения излучения болометрами в видимой части спектра описаны в работе [7]. Оказалось, что здесь фактор эффективности поглощения болометров с ростом температуры уменьшается. Абсолютное значение его не было определено.

В вышеуказанных работах измерения были проведены в условиях стационарного теплового режима болометров.

В настоящей работе приведены результаты измерений поглощения излучения болометрами при нагреве их импульсным излучением, когда в течение импульса температура меняется от комнатной до значений в несколько сотен градусов. Определен ход температурной зависимости $Q_{abs}(T)$ и его абсолютные значения при различных температурах.

Эксперимент. Блок-схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Здесь 1 – неодимовый лазер ГОС-1001, работающий в режиме свободной генерации (длительность импульса излучения 0,8 мкс) на длине волны 1,06 мкм; 2 – плоскопараллельная пластина, расположенная под углом Брюстера к падающему на нее излучению лазера (отраженное линейно поляризованное излучение направляется вертикально вверх); 3 – собирающая линза с фокусным расстоянием 75 мм; 4 – решетка из 16 платиновых болометров диаметром 10 мкм и длиной 24 мм, расположенных на расстоя-

нии 1,5 мм один от другого; 5 – калориметр для измерения энергии, прошедшей через решетку; 6 – многоканальный аналого-цифровой преобразователь; 7 – компьютер; 8 – калориметр для измерения энергии излучения лазера.

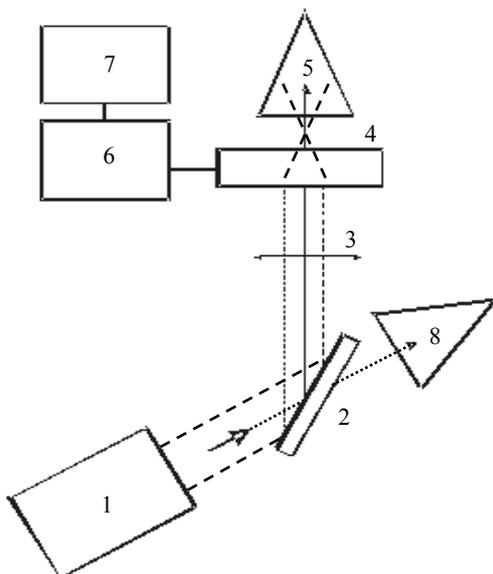


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки

Диаметр пучка излучения на выходе из лазера – 50 мм, после линзы, в месте расположения решетки, – 17 мм. Окружность на рис. 2 показывает диаметр пучка излучения.

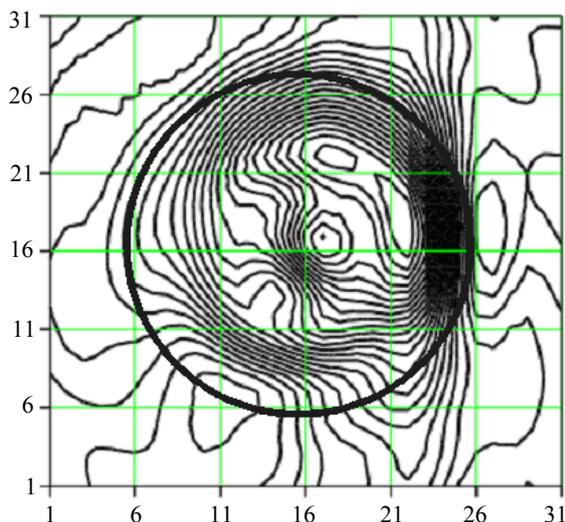


Рис. 2. Распределение интенсивности излучения на решетке

Решетка может поворачиваться вокруг оси оптического пучка. Если ее элементы параллельны направлению поляризации падающего излучения – это случай *E*-поляризации. При *H*-поляризации направление вектора электрического поля перпендикулярно оси болометра.

После воздействия импульса излучения на решетку в компьютере регистрируются сигналы, пропорциональные относительному изменению сопротивления каждого из ее элементов $\Delta R_i / R_{i0}$, где R_i – абсолютное изменение сопротивления *i*-го болометра, R_{i0} – его начальное сопротивление.

Выведем соотношения, позволяющие найти величину фактора эффективности поглощения болометров по данным об изменении их сопротивления и энергии излучения, попавшего на решетку.

Средняя плотность энергии излучения на решетке $W = E / L^2$, где E – энергия в импульсе, $L = 24$ мм – длина стороны решетки.

Средняя величина энергии излучения, попавшей на болометры

$$E_{\text{пад}} = WdLN = \frac{EdN}{L}, \quad (1)$$

где $d = 10$ мкм – диаметр болометра; $N = 16$ – число болометров в решетке.

При попадании импульса излучения на болометр его температура повышается до некоторого максимума, а затем спадает до первоначального значения. Максимум температуры определяется выражением

$$T_{\text{max}} = \frac{Q_{\text{abs}} E_{\text{пад}}}{mc}, \quad (2)$$

где m – масса болометров; c – удельная теплоемкость материала болометров.

Зависимость удельной теплоемкости платины от температуры [2–4] хорошо описывается формулой

$$c(T) = c_0 + c_1 T,$$

где $c_0 = 132$ Дж/(кг·град); $c_1 = 0,038$ Дж/(кг·град); T , °С.

Подставив эту формулу в (2), найдем

$$T_{\text{max}} = \frac{Q_{\text{abs}} E_{\text{пад}}}{m(c_0 + c_1 T_{\text{max}})}. \quad (3)$$

Отсюда получается

$$Q_{\text{abs}} = \frac{m(c_0 + c_1 T_{\text{max}}) T_{\text{max}}}{E_{\text{пад}}}. \quad (4)$$

Считаем, что все болометры имеют одинаковые размеры. Тогда их общая масса

$$m = \rho \frac{\pi d^2}{4} LN, \quad (5)$$

где $\rho = 21\,460$ кг / м³ – плотность платины.

Сопротивление болометров в линейном приближении связано с температурой следующим соотношением:

$$R = R_{\text{нач}} (1 + \alpha_r T_{\text{max}}),$$

где $R_{\text{нач}}$ – начальное сопротивление; $\alpha_r = 0,004$ град⁻¹ – температурный коэффициент

сопротивления платины. Из него следует, что температура T_{\max} связана с сигналом U с болометров таким образом:

$$T_{\max} = \frac{\Delta R}{\alpha_r R_{\text{нач}}} = \frac{U}{\alpha_r}, \quad (6)$$

где ΔR – изменение сопротивления болометров при их нагреве.

Подставив в формулу (4) значения энергии $E_{\text{пад}}$ из (1), массы m из (5) и температуры T_{\max} из (6), получим рабочее соотношение для вычисления фактора эффективности поглощения болометров

$$Q_{\text{abs}} = \frac{\pi \rho d L^2 U (\alpha_r c_0 + c_1 U)}{4 \alpha_r^2 E}. \quad (7)$$

В таблице приведены результаты измерений сигналов с приемника U при различных значениях энергии излучения E , прошедшего через решетку.

Сигналы с приемника

E-поляризация		H-поляризация	
E, Дж	U, отн. ед.	E, Дж	U, отн. ед.
4,65	0,160	5,45	0,352
7,20	0,246	7,30	0,456
9,85	0,328	10,6	0,595
13,8	0,440	14,5	0,734
17,0	0,516	19,9	0,987

На рис. 3 показаны графики зависимости факторов эффективности поглощения излучения платиновыми болометрами диаметром 10 мкм от температуры, построенные по данным таблицы. Температура вычислялась по формуле (6), значения Q_{abs}^E и Q_{abs}^H – по формуле (7). Результаты вычислений показаны кружками для H-поляризации и квадратами – для E-поляризации. Через эти точки с помощью метода наименьших квадратов проведены прямые линии.

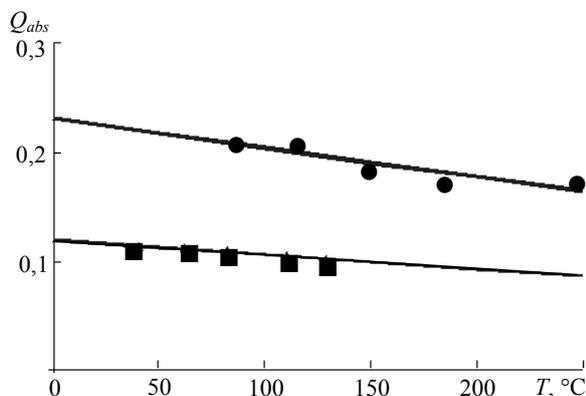


Рис. 3. Зависимость фактора эффективности поглощения от температуры

Их уравнения:

$$Q_{\text{abs}}^E(T) = 0,231 - 2,69 \cdot 10^{-4} T,$$

$$Q_{\text{abs}}^H(T) = 0,119 - 1,33 \cdot 10^{-4} T.$$

Фактор эффективности поглощения уменьшается с увеличением температуры. Этот результат согласуется с результатами работы [7], но угловой коэффициент зависимости здесь меньше, т. е. зависимость более слабая. Это может объясняться следующими причинами:

- В работе [7] источником излучения служила импульсная лампа–вспышка. Цвет ее излучения – белый, т. е. спектр излучения лежит в видимом диапазоне. Длина волны излучения лазера 1,06 мкм. Это уже инфракрасная область спектра – переходная к средней инфракрасной области, где проводились исследования, описанные в работах [5, 6], и где фактор эффективности поглощения растет с ростом температуры. Поэтому фактор эффективности поглощения на длине волны 1,06 мкм уменьшается с ростом температуры, но не так сильно, как в видимой области спектра.

- В работе [7] при проведении измерений температура болометра была постоянной. Она определялась током подогрева, протекающим через него. В нашем эксперименте при воздействии импульса лазера температура болометра меняется, меняется фактор эффективности поглощения и измеряется некоторое его среднее значение. Зависимость его от температуры болометра (средней по всем болометрам в решетке) может быть более слабой.

- Измерялось некоторое среднее значение фактора эффективности поглощения по всей решетке, часть которой греется импульсом излучения сильнее, часть – слабее. Это тоже должно влиять на характер зависимости $Q_{\text{abs}}(T)$.

Значения Q_{abs}^E и Q_{abs}^H , полученные в эксперименте, значительно меньше тех, которые получаются при расчетах по известным формулам для платиновой проволоки диаметром 10 мкм со значением показателя преломления $m = 3,42 - 6,3i$, взятом из данных работы [8]. Расчетные значения $Q_{\text{abs}}^E = 0,161$, $Q_{\text{abs}}^H = 0,324$, в то время как эксперимент дает для $T = 0^\circ\text{C}$ $Q_{\text{abs}}^E = 0,119$, $Q_{\text{abs}}^H = 0,231$.

Различие может быть вызвано как методической погрешностью эксперимента, обусловленной усреднением плотности энергии импульса излучения по площади окна приемника, так и 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.

Расчеты по формулам [8] показывают, что значения Q_{abs}^E и Q_{abs}^H , найденные в эксперименте, получаются при $n = 1,3$ и $k = 5,6$. Это вполне возможные значения для платиновой проволоки. Поэтому вторая причина различия теоретических и экспериментальных значений вполне вероятна.

Значения Q_{abs}^E и Q_{abs}^H , полученные в эксперименте, согласуются со значениями этих величин, которые были приведены в работе [9] при обработке данных, полученных в таком же эксперименте, но по другой методике. Там при $T = 0\text{ }^\circ\text{C}$ $Q_{abs}^E = 0,133$, $Q_{abs}^H = 0,255$.

Различие в значениях этих величин и величин в нашем эксперименте не превышает 12 %.

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

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

На рис. 4 показана его зависимость от температуры: видно, что она очень слабая. Во всем диапазоне температур значение коэффициента дихроизма приблизительно равно 1,92; оно совпадает со значением, полученным в работе [9].

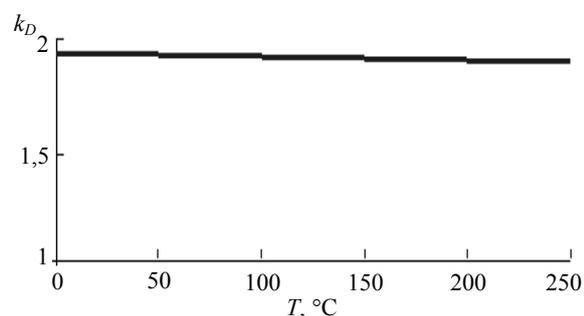


Рис. 4. Зависимость коэффициента дихроизма от температуры

Выводы. Фактор эффективности поглощения излучения металлическим болометром в видимой и ближней инфракрасной областях спектра уменьшается при нагреве болометра.

Экспериментальные данные о значении фактора эффективности поглощения отличаются от полученных расчетным путем. Это может быть вызвано тем, что показатель преломления металлической проволоки может отличаться от показателя преломления массивного образца металла.

Значение коэффициента дихроизма почти не зависит от температуры болометра.

1. Кокодий Н. Г. Алгоритмы обработки сигнала с решетчатого приемника для измерения характеристик лазерного излучения / Н. Г. Кокодий, А. О. Пак // Вісн. Харків. нац. ун-ту ім. В. Н. Каразіна. Сер. Радіофізика та електроніка. – 2009. – № 853. – С. 35–41.

2. Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. И. К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
 3. Зиновьев В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах / В. Е. Зиновьев. – М.: Metallurgia, 1989. – 384 с.
 4. Техника высоких температур / под ред. И. Э. Кэмпбелла; пер. с англ. под ред. В. П. Елютина. – М.: Изд-во иностр. лит., 1959. – 596 с.
 5. 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. нац. ун-т им. В. Н. Каразина. – Х., 1979. – 182 с.
 6. Кузьмичев В. М. Преобразование платиновым тонкопроволочным болометром энергии импульса лазера / В. М. Кузьмичев, С. В. Погорелов // Укр. метрологічний журн. – 2003. – № 2. – С. 42–47.
 7. Кокодий Н. Г. Исследование температурных зависимостей параметров болометрического приемника лазерного излучения / Н. Г. Кокодий, А. О. Пак // Укр. метрологічний журн. – 2010. – № 3. – С. 40–44.
 8. Хюлст Г. ван де. Рассеяние света малыми частицами / Г. Ван де Хюлст; пер. с англ. под ред. В. В. Соболева. – М.: Изд-во иностр. лит., 1961. – 536 с.
 9. Измерение фактора эффективности поглощения тонкопроволочных болометров / В. М. Кузьмичев, И. А. Приз, Б. В. Сафронов и др. // Измерительная техника. – 2007. – № 7. – С. 28–30.

А. О. Пак, Н. Г. Кокодий

ABSORPTION OF OPTICAL RADIATION BY THIN METAL WIRES WITH A POWERFUL PULSE HEATING

The results of measurements of the radiation absorption by bolometers that are heated by pulsed radiation are presented. During the pulse the temperature changes from room up to values of several hundred degrees. The temperature dependence on the dichroism coefficient, the absorption efficiency factor $Q_{abs}(T)$ and its absolute value at different temperatures are determined.

Key words: laser radiation, bolometer, factor of efficiency of absorption, the dichroism coefficient, refractive index.

А. О. Пак, М. Г. Кокодій

ПОГЛИНАННЯ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ТОНКИМИ МЕТАЛЕВИМИ ДРОТАМИ ПРИ СИЛЬНОМУ ІМПУЛЬСНОМУ НАГРІВАННІ

Наведено результати вимірювань поглинання випромінювання болометрами при нагріванні їх імпульсним випромінюванням, коли протягом імпульсу температура змінюється від кімнатної до значень в кілька сотень градусів. Визначено хід температурної залежності коефіцієнта дихроїзму та фактора ефективності поглинання випромінювання $Q_{abs}(T)$, а також абсолютні значення останнього при різних температурах.

Ключові слова: лазерне випромінювання, болометр, фактор ефективності поглинання, коефіцієнт дихроїзму, показник заломлення.

Рукопись поступила 13.07.11 г.