



УДК 535.621.373.826; 536.5

ИЗМЕРЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ЛИНЕЙНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РЕШЕТЧАТЫМИ БОЛОМЕТРИЧЕСКИМИ ПРИЕМНИКАМИ

- Н.Г. Кокодий,** доктор физико-математических наук, профессор Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина (ХНУ)
- С.В. Погорелов,** кандидат физико-математических наук, доцент Национального фармацевтического университета (НФУ), г. Харьков
- А.О. Пак,** младший научный сотрудник ХНУ, г. Харьков
- М.В. Кайдаш,** кандидат физико-математических наук, доцент ХФУ, г. Харьков
- Б.В. Сафронов,** научный сотрудник ХНУ, г. Харьков
- В.П. Балкашин,** научный сотрудник ХНУ, г. Харьков
- И.А. Приз,** научный сотрудник ХНУ, г. Харьков
- И.П. Стороженко,** доктор физико-математических наук, профессор НФУ, г. Харьков



Н.Г. Кокодий



С.В. Погорелов



А.О. Пак



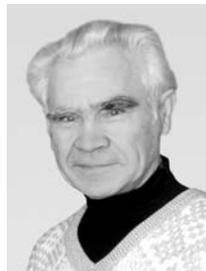
М.В. Кайдаш



Б.В. Сафронов



В.П. Балкашин



И.А. Приз



И.П. Стороженко

Описан метод измерения направления линейной поляризации лазерного излучения с помощью проволочных болометрических решеток. Используется зависимость поглощения электромагнитного излучения в тонких проволоках от направления его поляризации. Дано теоретическое обоснование метода, проведена экспериментальная проверка, оценена погрешность измерений.

There is described the method of direction measurement of linear polarization of laser radiation by means of wire bolometric gratings. There is used the dependence of electromagnetic radiation absorption in thin wires on the direction of its polarization. There is provided the theoretical justification as well as an experimental validation of the method. There has been estimated the inaccuracy of measurements.

Введение

Вид и направление поляризации являются важными характеристиками электромагнитного излучения. От направления линейной поляризации зависят коэффициенты отражения и пропускания излучения при его наклонном падении на границу раздела сред. Измерив параметры эллиптической поляризации света, отраженного от металла, можно определить оптические постоянные последнего. Необходимо знать характер поляризации излучения мощных лазеров, использующихся для резки и сварки металлов, так как от этого зависит поглощение излучения в материале.

Для получения поляризованного излучения и измерения направления поляризации обычно используются поляроидные пленки или пластины и призмы из прозрачных кристаллических матери-

алов [1]. Но эти устройства могут работать только в видимой и ближней инфракрасной области спектра. В средней инфракрасной области, где работают лазеры на углекислом газе, окиси углерода, устройства из кристаллических материалов использовать нельзя, так как они непрозрачны в этой области спектра. Не могут они использоваться и в пучках излучения мощных лазеров, потому что содержат материалы, сильно поглощающие излучение, – пленки поляризаторов, клей, соединяющий части призм, и др.

Одним из возможных методов измерения поляризационных параметров мощного лазерного излучения в видимой и инфракрасной областях спектра в пучках с большими размерами поперечного сечения является использование проволочных болометрических решеток. Приемник излучения представляет собой несколько решеток из тонких металлических проволок (диаметр проволоки – несколько десятков микрометров), расположенных на пути распространения лазерного пучка. Плоскости решеток перпендикулярны волновому вектору. Болометры в одной решетке параллельны друг другу, а в каждой решетке расположены под определенным углом к вертикали.

Излучение нагревает болометры, что приводит к изменению их электрического сопротивления. Измеряя сопротивление каждого болометра, можно найти важные энергетические характеристики излучения – мощность, распределение интенсивности в пучке, его диаметр и др. [2]. Решетчатые болометрические приемники можно использовать и для измерения поляризационных характеристик лазерного излучения.

Теоретические соотношения

Использование болометрических решеток для этой цели основано на том, что поглощение излучения в металлической проволоке зависит от направления поляризации падающего на нее излучения. Поглощение характеризуется фактором эффективности поглощения Q_{abs} . Если диаметр проволоки больше длины волны излучения, то наиболее сильное поглощение будет в случае падения на нее Н-волны (вектор \mathbf{H} параллелен оси проволоки), а наиболее слабое – в случае Е-волны (вектор \mathbf{E} параллелен оси проволоки).

В работах [3–5] обоснованы способы измерения параметров поляризации лазерного излучения тремя болометрическими решетками: описаны алгоритмы обработки сигналов, проведена экспериментальная проверка, оценена погрешность измерений.

В данной работе представлен более простой способ измерений, который можно применять в случае решетчатых приемников, подобных описанным в [2], с любым числом решеток, большим двух. Полученные данные о поляризации затем можно использовать для коррекции алгоритма обработки сигналов и таким образом повысить точность из-

мерений других параметров излучения – распределения интенсивности в пучке, диаметра пучка и др.

При произвольном направлении поляризации падающей волны фактор эффективности поглощения можно определить по следующей формуле:

$$Q_{\text{abs}} = Q_{\text{abs}}^{\text{E}} \cos^2(\varphi - \Theta) + Q_{\text{abs}}^{\text{H}} \sin^2(\varphi - \Theta), \quad (1)$$

где $Q_{\text{abs}}^{\text{E}}$ и $Q_{\text{abs}}^{\text{H}}$ – факторы эффективности поглощения для Е- и Н-волн, соответственно; φ – угол между вектором \mathbf{E} и вертикалью; Θ – угол между осью болометра и вертикалью (рис. 1).

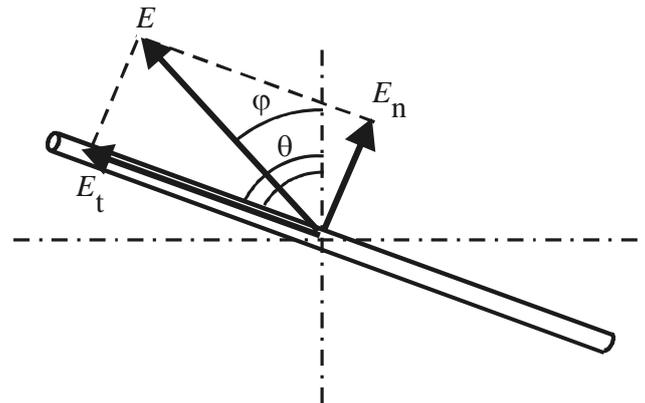


Рис. 1. Геометрия задачи

Введем параметр $K_D = Q_{\text{abs}}^{\text{H}} / Q_{\text{abs}}^{\text{E}}$ – коэффициент дихроизма, который определяет разницу в поглощении болометром Е- и Н-волн. Его значения обычно находятся в интервале 1,5...2 и могут быть рассчитаны по известным формулам из теории дифракции или измерены экспериментально.

Формулу (1) можно преобразовать к виду, более удобному для использования в расчетах:

$$Q_{\text{abs}} = Q_{\text{abs}}^{\text{E}} (1 + (K_D - 1) \sin^2(\varphi - \Theta)). \quad (2)$$

При измерениях используются сигналы с двух решеток – i и j , болометры которых расположены под углами Θ_i и Θ_j к вертикали. Пусть U_i и U_j – сигналы с этих решеток. Поскольку сигналы пропорциональны факторам эффективности поглощения $Q_{i \text{ abs}}$ и $Q_{j \text{ abs}}$, то, используя формулу (2), можно записать следующее соотношение:

$$\frac{1 + (K_D - 1) \sin^2(\varphi - \Theta_i)}{1 + (K_D - 1) \sin^2(\varphi - \Theta_j)} - \frac{U_i}{U_j} = 0. \quad (3)$$

Решив это уравнение относительно угла φ , можно найти направление вектора \mathbf{E} падающего излучения. Однако, вследствие периодичности тригонометрических функций, в интересующем нас интервале углов φ от 0 до 180° уравнение (3) имеет два корня. Для выбора правильного значения угла φ необходимо использовать несколько решеток (три и более) и, соответственно, несколько уравнений (3).

Эксперимент

В установке для экспериментальной проверки метода измерений источником излучения служил

импульсный неодимовый лазер ГОС-1001, работающий в режиме свободной генерации на длине волны 1,06 мкм. Его излучение падало на стеклянную пластину под углом Брюстера, так что отраженное излучение было линейно поляризованным (электрический вектор E расположен вертикально). Приемник излучения содержал четыре решетки из восьми никелевых болометров диаметром 40 мкм в каждой. Болометры самой ближней к лазеру решетки располагались под углом 80° к вертикали. Их направление принималось за начало отсчета, так что направление поляризации излучения должно было быть равным 80° . Следующие решетки располагались под углами 45° , 90° и 135° по отношению к первой.

На каждый элемент решеток через дополнительный резистор подавалось напряжение питания. Сигналы снимались с болометров и вводились в компьютер.

Уравнение (3) решалось для всех возможных комбинаций решеток: 1–2, 1–3, 1–4, 2–3, 2–4, 3–4. Значение параметра K_D было найдено из решения задачи дифракции и принималось равным 1,93. Результаты решения уравнений (3) для пар решеток 1–2, 2–3 и 3–4 представлены в виде графиков на рис. 2, где $f_{i,j}(\varphi)$ – левая часть уравнения (3). Корням уравнения соответствуют точки пересечения графиков с осью абсцисс. Каждая кривая дважды пересекает ось абсцисс, но в окрестности угла $\varphi = 80^\circ$ ось абсцисс пересекают все кривые. Это и есть область решения, имеющего физический смысл.

Значения сигналов с решеток, полученных в эксперименте, приведены в табл. 1.

Численное решение уравнения (3) для возможных комбинаций решеток дает результаты, показанные в табл. 2.

Среднее из шести полученных значений и случайная составляющая погрешности при доверительной вероятности $0,95$ равны $\varphi = (79,8 \pm 1,8)^\circ$. Его

Таблица 1

Сигналы с решеток

Номер решетки	Θ , град.	U , отн. ед.
1	0	6,60
2	45	4,42
3	90	3,54
4	135	5,56

Таблица 2

Направление поляризации излучения

Решетки	1–2	1–3	1–4	2–3	2–4	3–4
φ , град.	77,0	81,0	81,1	79,0	79,5	81,3

величина хорошо согласуется с истинным значением угла поляризации излучения.

Погрешность результата измерений

Основными источниками погрешностей при решении уравнения (3) являются погрешность определения коэффициента дихроизма δK и погрешность измерения сигналов с приемника δU .

1. Погрешность δK может быть оценена с помощью формулы

$$\delta K = \frac{\partial \varphi}{\partial K_D} \Delta K_D. \quad (4)$$

Величина ΔK_D определяется в основном погрешностью комплексного показателя преломления никеля. Значение его действительной части, приведенное в различных литературных источниках, лежит в пределах от 2,2 до 2,44, мнимой – от 5 до 6. Вычисленные по этим данным значения K_D лежат в пределах от 2,1 до 2,2. Поэтому можно положить, что $\Delta K_D = 0,05$.

Значения производных $\partial \varphi / \partial K_D$ в окрестности угла $\varphi = 80^\circ$ были найдены численным методом, так как выражение для решения уравнения (3) очень

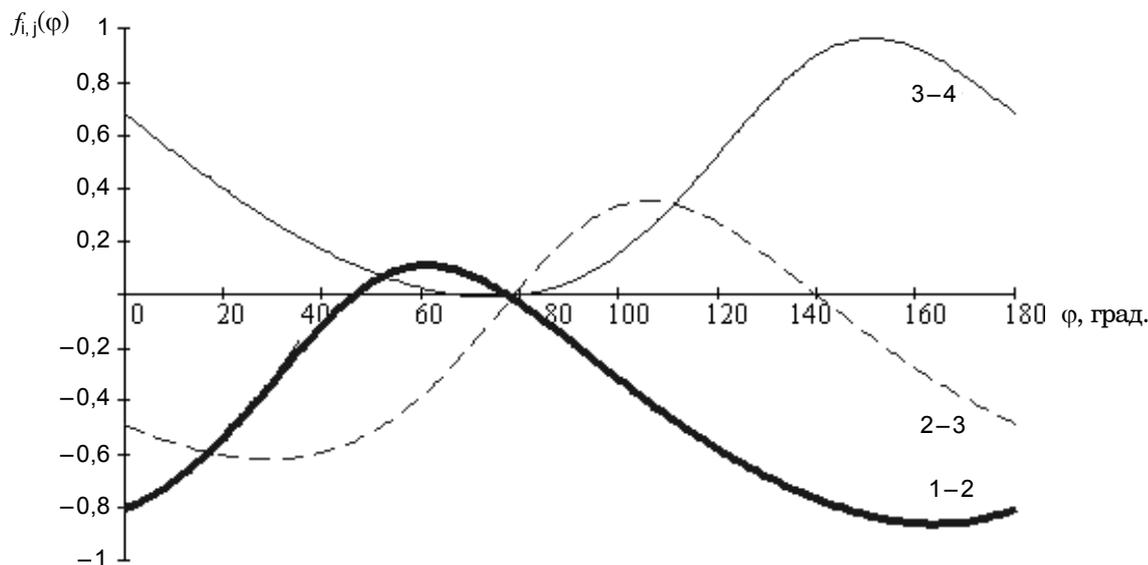


Рис. 2. Графики функции $f_{i,j}(\varphi)$

громоздкое. Их абсолютные значения лежат в интервале 30...90 (для значений угла φ в градусах). Среднее значение производной – 34,9. Поэтому $\delta K = 34,9 \cdot 0,05 \approx 2^\circ$.

2. Процесс измерений происходил так. С “холодного” болометра снимался сигнал U_0 . После вспышки лазера сигнал быстро возрастал до значения U_m , а затем спадал до прежнего значения за время около 1 с. Вычислялись величины

$$U_i = \frac{U_{mi} - U_{oi}}{U_{oi}}, U_j = \frac{U_{mj} - U_{oj}}{U_{oj}}$$

и их отношение $a_{i,j} = U_i/U_j$, используемое в формуле (3).

Погрешность измерения сигналов с приемника определялась в основном шумами аналого-цифрового преобразователя, используемого для ввода данных в компьютер. Для болометра, расположенного вблизи середины входного окна, типичными значениями сигнала были $U_0 = 100$ мВ и $U_m = 223$ мВ. Ширина шумовой дорожки составляла около 6 мВ, так что абсолютная погрешность измерений сигнала с болометра была равна ± 3 мВ.

Погрешность определения величины $a_{i,j}$, найденная по правилам оценки погрешности косвенных измерений, получилась следующей:

$$\Delta a_{i,j} = 0,03.$$

Среднее значение производной, найденное численным методом для значений угла φ в градусах, следующее:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial a_{i,j}} = 111.$$

Таким образом, погрешность, вызванная неточностью измерений сигналов с приемника излучения, равна

$$\Delta U = \frac{\partial \varphi}{\partial a_{i,j}} \Delta a_{i,j} \approx 3^\circ. \quad (5)$$

Суммируя значения погрешностей (4) и (5), получим

$$\Delta \varphi = \sqrt{(\Delta K)^2 + (\Delta U)^2} \approx 3,6^\circ.$$

Выводы

Описанный метод с помощью болометрических решеток позволяет измерить направление линейной поляризации мощного лазерного излучения с большими поперечными размерами пучков. Погрешность метода не превышает $\pm 4^\circ$. Случайная составляющая погрешности в проведенном эксперименте составила около $\pm 2^\circ$.

Список литературы

1. *Снопко В.Н.* Поляризационные характеристики оптического излучения и методы их измерения / В.Н. Снопко. – Минск: Наука і техника, 1992. – 263 с.
2. *Пак А.О.* Решетчатые приборы для измерения характеристик лазерного излучения / А.О. Пак, Н.Г. Кокодий // Вісник Харківського національного університету. – 2011. – № 983, вип. 19. – С. 72–76. – (Сер. Радіофізика та електроніка).
3. *Кузьмичев В.М.* Измерение угла направления линейной поляризации лазерного излучения тонкопроволочными болометрами / В.М. Кузьмичев, Е.В. Кузьмичева // Український метрологічний журнал. – 1998. – № 1. – С. 48–51.
4. *Кузьмичев В.М.* Измерение состояния поляризации лазерного излучения тремя профильными болометрическими решетками / В.М. Кузьмичев, С.В. Погорелов, П. Коонс // Там же. – 2007. – № 3. – С. 38–42.
5. Измерение линейной или эллиптической поляризации лазерного излучения трехрешеточным болометром / В.М. Кузьмичев, С.В. Погорелов, Б.В. Сафронов [и др.] // Радиофізика і радіоастрономія. – 2009. – Т. 14, № 2. – С. 214–221.