

В.М. КОЛЕСНИКОВ, И.С. МАНАК, А.Г. БУЙКЕВИЧ

ПОЛЯРИМЕТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ*

The proposed device for determination of the radiation polarization characteristics of laser diodes is based on the Stokes parameters measurement. In so doing the opportunity to exclude the instrumental error is realized due to the absence of mechanical displacements of the setup elements. The second important advantage of the suggested procedure is an opportunity of determining the polarization characteristics of laser diodes in the pulsed mode.

Среди способов определения поляризационных характеристик лазерного излучения можно выделить четыре основных: сфера Пуанкаре, вектор Стокса, матрицы Джонса и Мюллера. Простотой практической реализации выделяется

* Авторы статьи - сотрудники кафедры квантовой физики и оптоэлектроники.

метод определения вектора Стокса. Главным его преимуществом является то, что четырехпараметрический вектор Стокса, дающий полную информацию о поляризационных характеристиках излучения, физически интерпретируется параметрами, размерность интенсивности излучения которых можно измерить достаточно просто.

При построении устройства для определения поляризационных характеристик исследуемого излучения производится оценка влияния на эти характеристики взаимодействующих с излучением оптических элементов с привлечением матричного формализма Джонса или Мюллера [1].

Если пучок излучения, поступающий в измерительное устройство, характеризуется выражением

$$E(t) = E_x(t)e^{i\phi_x(t)} + E_y(t)e^{i\phi_y(t)},$$

где $E(t)$ - амплитуда электрического поля, ϕ - фаза, то параметры вектора Стокса могут быть получены в виде:

$$S_0 = \langle E_x^2 \rangle + \langle E_y^2 \rangle, S_2 = \langle 2E_x E_y \cos \gamma \rangle,$$

$$S_1 = \langle E_x^2 \rangle - \langle E_y^2 \rangle, S_3 = \langle 2E_x E_y \sin \gamma \rangle.$$

Здесь $\gamma = \phi_x - \phi_y$, а знак $\langle \rangle$ означает усреднение по времени. Интерпретировать параметры вектора Стокса принято следующим образом:

S_0 - полная интенсивность эллиптически поляризованной волны;

S_1 - разность ортогонально поляризованных компонент интенсивностей излучения;

S_2, S_3 - параметры корреляции между ортогонально поляризованными компонентами, причем S_2 - разность интенсивностей ортогональных компонент в линейном базисе, повернутом на $\pm 45^\circ$; S_3 - разность интенсивностей циркулярно-поляризованных компонент с противоположным направлением вращения.

Исходя из такого определения параметров Стокса, проведем шесть независимых измерений интенсивностей входного излучения.

По измерениям интенсивности компоненты излучения горизонтальной поляризации (I_1) и интенсивности вертикально поляризованной доли излучения (I_2) определяются два параметра вектора Стокса: $S_0 = I_1 + I_2$ и $S_1 = I_1 - I_2$. По значениям интенсивности компоненты излучения, плоскость поляризации которой ориентирована под углом $\pm 45^\circ$ ($I_3(45^\circ), I_4(-45^\circ)$), определяется параметр $S_2 = I_3 - I_4$. Для определения циркулярно поляризованных компонент в ход лучей вводится четвертьволновая пластинка с горизонтально ориентированной быстрой осью, и повторяются измерения интенсивности компоненты излучения с плоскостью поляризации, ориентированной под углом $\pm 45^\circ$ ($I_5(45^\circ), I_6(-45^\circ)$). Компонента вектора Стокса S_3 определяется по формуле: $S_3 = I_5 - I_6$.

Несмотря на кажущуюся легкость получения информации для определения параметров Стокса (базовая схема представлена на рис. 1), практическая реализация метода встречает значительные трудности, особенно при необходимости синхронных измерений.

Излучение полупроводникового лазера поступает в объектив 2, исправляющий астигматизм, характерный

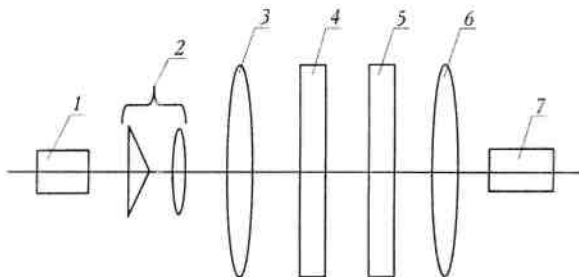


Рис. 1. Функциональная схема устройства для определения поляризационных характеристик лазерного излучения:
1 - полупроводниковый лазер, 2 - объектив-анаморфот, 3 - коллимирующий объектив, 4 - $\lambda/4$ -пластинка, 5-поляририд, 6 — камерный объектив, 7 - фотоприемное устройство

для излучения инжекционных лазеров. Объектив 3 коллимирует входной пучок излучения. В позицию 4 при необходимости вводится $\lambda/4$ -пластинка. В позиции 5 установлен поляризатор с ориентацией плоскости поляризации $\theta_p = 0, \pm 45^\circ, \pm 90^\circ$. В фокальной плоскости камерного объектива находится фотоприемное устройство 7.

После определения параметров Стокса по шести независимым измерениям рассчитывается эллипс поляризации пучка исходного излучения:

$$\frac{2x^2}{S_0 + S_1} - \frac{4S_2xy}{S_0^2 - S_1^2} + \frac{2y^2}{S_0 - S_1} = \frac{S_3^2}{S_0^2 - S_1^2}$$

или

$$\frac{2x^2(S_0 - S_1)}{S_3^2} - \frac{4S_2xy}{S_3^2} + \frac{2y^2(S_0 + S_1)}{S_3^2} = 1.$$

Ориентация осей эллипса дается выражением

$$\frac{S_2}{S_1} = \operatorname{tg} \alpha \cos \gamma,$$

где α - угол наклона большой оси эллипса.

Отношение большой и малой осей равно

$$\frac{S_0 - \sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0 + \sqrt{S_1^2 + S_2^2}}.$$

Степень поляризации P имеет вид

$$P = \frac{(S_1^2 + S_2^2 + S_3^2)^{1/2}}{S_0}.$$

Основной недостаток разработанных к настоящему времени устройств [2-4] на основе метода измерения параметров Стокса - механические перемещения отдельных элементов, что является источником значительных погрешностей. Попытки исключить механические перемещения приводят к систематическим ошибкам либо к нетехнологичности устройства.

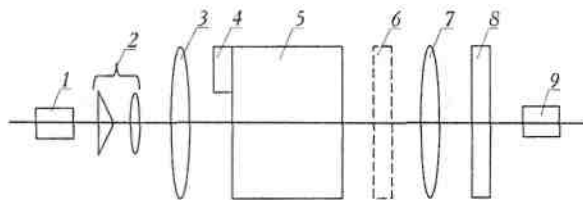


Рис. 2. Функциональная схема установки для измерения параметров вектора Стокса:

1 - полупроводниковый лазер, 2 - объектив-анаморфот, 3 - коллимирующий объектив, 4 - $\lambda/4$ -пластинка, 5 - поляризационное устройство, 6 - поляризатор, 7 - камерный объектив, 8 - оптическая система пространственного разделения измерительных каналов, 9 - фотоприемное устройство

излучения, в коллиматорный объектив 3. Параллельный, расширенный пучок излучения поступает в поляризационное устройство 5, построение которого позволяет выделить зоны в пучке излучения с ориентацией плоскости поляризации $0, \pm 45^\circ, \pm 90^\circ$. На фронтальной грани жестко устанавливается четвертьволновая пластинка 4 с горизонтальной ориентацией быстрой оси. Далее излучение посредством камерного объектива 7 и оптической системы 8, формирующей шесть измерительных каналов, поступает на фотоприемный блок 9, который вырабатывает необходимую информацию для вычисления параметров вектора Стокса и в конечном итоге - для поляризационных характеристик исходного пучка излучения полупроводникового лазера.

С целью устранения указанных недостатков предлагается шестиканальное устройство (рис. 2), позволяющее одновременно определять четыре параметра вектора Стокса [5].

Излучение полупроводникового лазера 1 передается объективом-анаморфотом 2, исправляющим астигматизм в структуре входного пучка

Принцип действия поляризационного устройства иллюстрируется функциональной схемой (рис. 3).

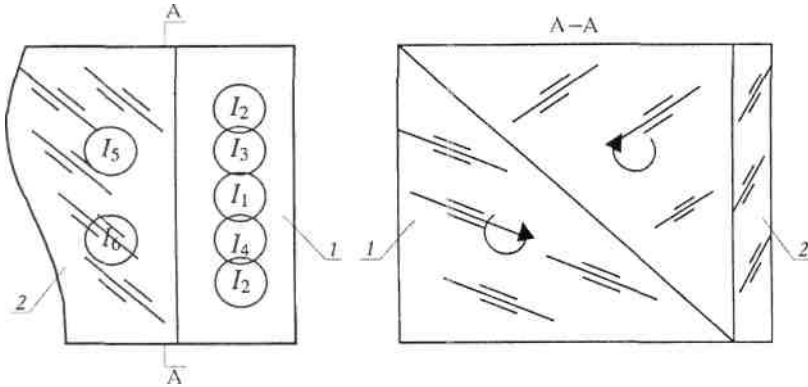


Рис. 3. Функциональная схема поляризационного устройства: / — поляризационный кубик, 2 — четвертьволновая пластинка. $I_1 - I_6$ - апертуры каналов формирования интенсивностей $I_1 - I_6$

Поляризационный кубик склеен из двух прямоугольных призм право- и ле-воповорачивающего кварца. В одной из призм оптическая ось параллельна, а в другой перпендикулярна ребру.

Пусть n'_1 и n'_2 - коэффициенты преломления призм для компоненты луча с вертикальной поляризацией, n''_1 и n''_2 - коэффициенты преломления призм для компоненты луча с горизонтальной поляризацией, а h_1 и h_2 - толщина призм в некоторой фиксированной плоскости (рис. 4). После прохождения луча по пути h_1+h_2 разность фаз между ортогонально поляризованными компонентами становится равной

$$\delta = \delta' - \delta'' = \frac{2\pi}{\lambda} [(n'_1 h_1 + n'_2 h_2) - (n''_1 h_1 + n''_2 h_2)], \quad (1)$$

где δ' и δ'' - фазы компоненты с вертикальной и горизонтальной поляризацией после прохождения кубика соответственно.

Соотношение между толщиной h_1 и h_2 , а следовательно, разность фаз непрерывно меняются, если точка падения света движется перпендикулярно сечению пучка, причем разность фаз δ равна нулю на оптической оси.

Если ось x параллельна ребру кубика, то эллиптическую поляризацию падающего света можно представить как:

$$E_x^{(i)} = a_1 \cos(\omega t + \delta), \quad E_y^{(i)} = a_2 \cos(\omega t + \delta).$$

Поляризация света, прошедшего кубик,

$$E_x^{(r)} = a_1 \cos(\omega t + \delta'), \quad E_y^{(r)} = a_2 \cos(\omega t + \delta''),$$

где a_1 и a_2 - амплитуды соответствующих колебаний.

Для линейной поляризации выходящего света необходимо, чтобы

$$\delta = \delta' - \delta'' = m\pi \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots).$$

Направление колебаний при этом определяется соотношением

$$\frac{E_y^{(r)}}{E_x^{(r)}} = \pm \frac{a_2}{a_1}.$$

Если исследуемый полупроводниковый лазер установлен таким образом, что плоскость поляризации излучения горизонтальна, то анализатор на выходе

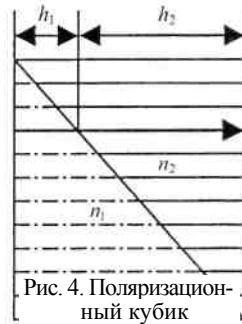


Рис. 4. Поляризационный кубик

системы с вертикальной плоскостью пропускания позволит получить интерференционную картину, причем темные полосы, идущие параллельно ребру, определяют нулевое положение. Такие полосы возникают в точках, для которых правая часть уравнения (1) кратна π . Для эллиптически поляризованного света по смещению темных полос определяются разность фаз $\delta'' - \delta'$ для падающего света и соответственно параметры эллипса по формулам:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{a_2}{a_1};$$

главные полуоси эллипса:

$$a^2 + b^2 = a_1^2 + a_2^2;$$

угол наклона большой оси:

$$\operatorname{tg} 2\psi = (\operatorname{tg} 2\alpha) \cos \delta;$$

вспомогательный угол, задающий форму и ориентацию эллипса колебаний:

$$\sin 2\chi = (\sin 2\alpha) \sin \delta \quad (\operatorname{tg} \chi = \pm b/a).$$

По измерениям интенсивностей в областях формирования $I_1 \div I_6$ находим параметры Стокса. Если исходный пучок света поляризован в горизонтальной плоскости, т. е.

$$E_1 = \begin{bmatrix} A_1 \\ 0 \end{bmatrix},$$

то матрица Джонса для поляризационного блока, плоскость пропускания которого образует угол θ с осью OX , записывается в виде:

$$\begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ \sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix} = M_1.$$

Для прошедшего пучка получим:

$$E_2 = M_1 E_1 = \begin{bmatrix} A_1 \cos^2 \theta \\ A_1 \sin \theta \cos \theta \end{bmatrix}.$$

Интенсивность прошедшего пучка находится умножением слева E_2 на комплексно сопряженный ему транспонированный вектор

$$\begin{aligned} E_2 E_2^* &= \begin{bmatrix} A_1 \cos^2 \theta & A_1 \sin \theta \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \cos^2 \theta \\ A_1 \sin \theta \cos \theta \end{bmatrix} = \\ &= A_1^2 \cos^4 \theta + A_1^2 \sin^2 \theta \cos^2 \theta = A_1^2 \cos^2 \theta (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta) = A_1^2 \cos^2 \theta. \end{aligned}$$

Таким образом, интенсивность I_1 (горизонтальная компонента) определяется в

канале, обозначенном I_1 , матрица Джонса в этой области блока $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$

Интенсивность I_2 определяется в каналах $\textcircled{I_2}$, матрица Джонса $\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$; I_3 - в

канале $\textcircled{I_3}$, матрица Джонса $-\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$; I_4 - в канале $\textcircled{I_4}$, матрица Джонса -

$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$; I_5 - в канале $\textcircled{I_5}$, матрица Джонса $-\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ 1 & -i \end{bmatrix}$;

I_6 - в канале $\textcircled{I_6}$, матрица Джонса $-\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & i \\ -1 & -i \end{bmatrix}$

Фотоприемный блок строится с применением камеры, например КАФ-4200. Апертуры измерительных каналов определяются по тестовым сигналам, т. е. по входному излучению с известными поляризационными характеристиками. Контроль правильности вычисления параметров Стокса производится по анализу интерференционной картины (в позицию 6 вводится (см. рис. 2) анализатор с вертикальной плоскостью пропускания).

При апертуре поляризационного устройства 1 см и приемном устройстве КАФ-4200 погрешность в определении плоскости поляризации не хуже $\pm 0,5\%$.

Достоинством предложенного способа следует считать отсутствие механических перемещений элементов ($\lambda/4$ -пластинки и поляроида), требующих строгой пространственной фиксации. Поскольку информация для вычисления параметров вектора Стокса поступает синхронно, то появляется дополнительная возможность определения поляризационных характеристик лазерных диодов в импульсном режиме.

1. Колесников В.М., Манак И.С., Буйкевич А.Г., Штырев А.К. // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления: Материалы XVI науч.-теорет. конф. с участием зарубежных специалистов «Датчик-2004». Судак, 2004. С. 329.

2. Пат. 142749 А1 ВО, МКУ 7 G01J 4/00. Способ и устройство для определения состояния поляризации / Ho-Jin Jeong, Bong-Wan Lee. Donam Systems Inc.

3. Пат. 5815270 US, МКУ 6G01B 11/00. Встроенный в оптическую линию поляриметр с использованием 1x5 звезды-соединителя / Shing M. Lee, Calif Fremont. Board of Supervisors of Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College.

4. Пат. 1004862 А2 ЕР, МКУ 6 G01B 11/00. Поляриметр / Louis B. Allard, Robert I. McDonald, Carey M. Garrett. JDS Fitel Inc.

5. Kolesnikov V.M., Manak I.S., Lisenkova A.M. et al. // Czujniki optoelektroniczne i elektroniczne: VIII Konferencja naukowa. Wroclaw, 2004. P. 477.

Поступила в редакцию 06.09.04.

Вячеслав Михайлович Колесников - старший преподаватель.

Иван Степанович Манак - кандидат физико-математических наук, доцент.

Александр Георгиевич Буйкевич - аспирант. Научный руководитель - И.С. Манак.