

СТОКС-ПОЛЯРИМЕТР ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ БРЮСТЕРОВСКИХ ПЛАСТИНОК

© 2016 г. Н. М. Кожевников, доктор физ.-мат. наук

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург
E-mail: nkozhevn@mail.ru

Рассмотрена конструкция компактного импульсного Стокс-поляриметра с линейной последовательностью брюстеровских пластинок в качестве поляризаторов. Описана методика настройки и калибровки поляриметра. Оценена погрешность измерения азимута (около 1°), эллиптичности (почти 10%), степени поляризации (порядка 2%) инфракрасного излучения ($\lambda = 1,06 \text{ мкм}$) длительностью 0,03–1,0 мкс. Приведены результаты измерения поляризационных характеристик импульсного Nd-лазера с автомодуляцией добротности и в режиме свободной генерации.

Ключевые слова: параметры Стокса, импульсная поляриметрия, Nd-лазер, полуконцентрический резонатор, автомодуляция добротности резонатора, свободная генерация лазера.

Коды OCIS: 120.5410, 260.5430, 140.3530.

Поступила в редакцию 30.06.2015.

Введение

Стокс-поляриметрия в настоящее время является наиболее распространенным методом исследования частично поляризованного излучения в астрономии [1, 2], метрологии и связи [3, 4], биологии и медицине [5–7] и многочисленных задачах прикладной оптики [8]. Наиболее сложные экспериментальные проблемы возникают с реализацией этого метода в случае, когда требуется измерить поляризационные характеристики нестационарного неоднородного по сечению частично поляризованного излучения. Фактически речь идет о почти одновременном измерении и обработке четырех независимых величин, для чего исследуемый пучок пространственно разделяют на четыре пучка и измеряют их интенсивности. Основной проблемой в этом случае становится обеспечение высокого пространственного разрешения.

В настоящей статье дается описание принципа действия, конструкции, метода калибровки компактного импульсного Стокс-поляриметра, в котором функции поляризаторов выполняет линейная последовательность брюстеровских пластинок. Для демонстрации работы поляриметра приводятся результаты измеренных с его

помощью поляризационных характеристик излучения импульсного Nd-лазера в режиме автомодуляции добротности и в режиме свободной генерации.

Принцип действия поляриметра

Для теоретического описания частично поляризованного излучения используется матрица когерентности [9, 10]

$$\hat{J} = \begin{pmatrix} J_{xx} & J_{xy} \\ J_{yx} & J_{yy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \langle E_x E_x^* \rangle & \langle E_x E_y^* \rangle \\ \langle E_y E_x^* \rangle & \langle E_y E_y^* \rangle \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где E_x, E_y – комплексные амплитуды напряженности электрического поля в некоторой системе координат, угловые скобки означают усреднение за время наблюдения. Эта комплексная эрмитова матрица ($J_{xy} = J_{yx}^*$) преобразуется как тензор 2-го ранга, а ее компоненты не могут быть непосредственно измерены. Более удобно описывать частично поляризованное излучение в терминах параметров Стокса

$$\begin{aligned} S_0 &= J_{xx} + J_{yy}; \quad S_1 = J_{xx} - J_{yy}; \\ S_2 &= 2\operatorname{Re} J_{xy}; \quad S_3 = -2\operatorname{Im} J_{xy}. \end{aligned} \quad (2)$$

Преимущества параметров Стокса заключаются в том, что они преобразуются как компоненты вектор-столбца \mathbf{S}

$$\mathbf{S} = \hat{\mathbf{M}} \mathbf{S}_0, \quad (3)$$

где $\hat{\mathbf{M}}$ – матрица Мюллера оптической системы, \mathbf{S} и \mathbf{S}_0 – векторы Стокса излучения на выходе и на входе в систему.

Для измерения параметров Стокса используется следующий алгоритм. Рассмотрим четыре идеальных поляризационных фильтра, каждый из которых пропускает половину неполяризованного излучения. Первый и второй фильтры – скрещенные линейные поляризаторы, определяющие систему координат. Третий фильтр – линейный поляризатор с осью пропускания 45° к оси пропускания первого поляризатора. Четвертый фильтр пропускает только правоциркулярно поляризованное излучение. Пусть после прохождения этих фильтров получены значения интенсивностей I_1, I_2, I_3, I_4 . Тогда параметры Стокса определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} S_0 &= I_1 + I_2 = I; \\ S_1 &= I_1 - I_2 = 2I_1 - I; \\ S_2 &= 2I_3 - I; \\ S_3 &= 2I_4 - I. \end{aligned} \quad (4)$$

Принцип действия описываемого далее поляриметра основан на измерении параметров Стокса в соответствии с определением (4). Зная вектор Стокса, легко определить параметры

поляризационного эллипса и степень поляризации

$$\alpha = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{S_2}{S_1};$$

$$\frac{b}{a} = \operatorname{tg} \frac{1}{2} \operatorname{arcsin} \frac{S_3}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}};$$

$$P = \frac{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}{S_0}, \quad (5)$$

где α – азимут, b/a – эллиптичность, P – степень поляризации.

Конструкция поляриметра

Конструктивно поляриметр состоит из трех пар брюстеровских пластинок из стекла К8 толщиной 3 мм с углом клина около 10° (рис. 1, 2). Каждая пара пластинок последовательно закреплена на одной оправке 1 так, что плоскости падения на них ортогональны. Плоскость падения излучения на первую пластинку второй пары составляет 45° с плоскостью падения на первую пластинку первой пары. Перед третьей парой пластинок располагается линейная четвертьволновая фазовая пластинка 3 на стеклянной подложке 2, ось наибольшей скорости которой развернута на 45° относительно плоскости падения на первую пластинку третьей пары.

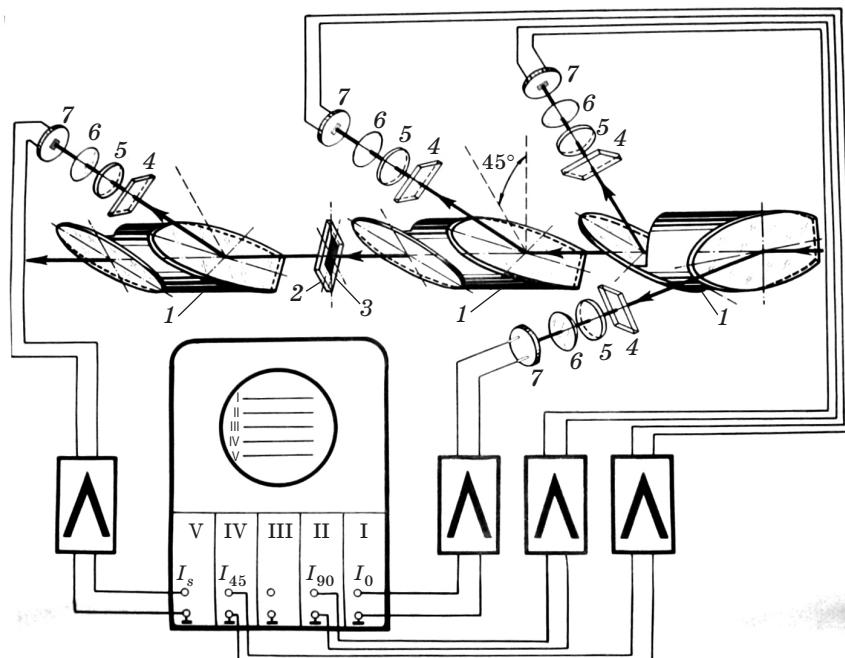


Рис. 1. Оптическая схема Стокс-поляриметра.

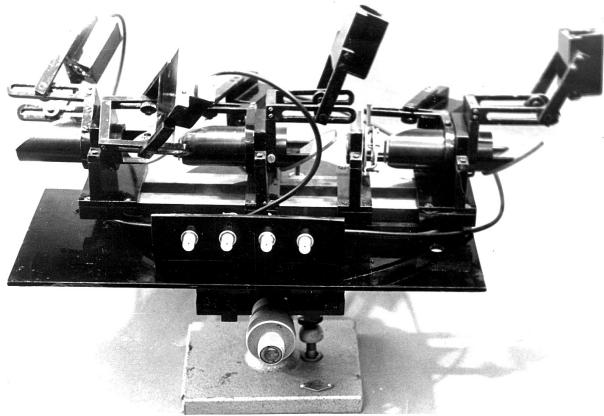


Рис. 2. Внешний вид поляриметра.

Излучение, отраженное от обеих пластинок первой пары, а также от первых пластинок второй и третьей пары, ослабляется изотропными фильтрами 4, проходит через интерференционные фильтры 5 ($\lambda = 1,06 \text{ мкм}$, $\Delta\lambda = 200 \text{ \AA}$) и фокусируется линзами 6 на фотоприемники 7, сигналы с которых усиливаются и регистрируются на экране осциллографа (в нашем случае пятилучевой осциллограф С1-33, усиление – 50, полоса частот – 2 МГц). После прохождения поляриметра исследуемый пучок может быть использован для дальнейшего исследования.

Калибровка поляриметра

Известны разные алгоритмы калибровки Стокс-поляриметров [11]. Калибровку рассматриваемого поляриметра можно, например, провести с помощью полностью линейно поляризованного излучения с азимутом под 45° к горизонтальной оси (ось X), определяемой плоскостью падения на первую пластинку первой пары. Для этого необходимо добиться максимального значения интенсивности I_3 . Такому излучению соответствует вектор Стокса $\{1, 0, 1, 0\}$.

Допустим, что в результате измерения по четырем каналам получены следующие показания фотоприемников: $I_1 = A$, $I_2 = B$, $I_3 = C$, $I_4 = D$. В соответствии с (4) получаем следующие значения калибровочных коэффициентов: $k_1 = 1$, $k_2 = A/B$, $k_3 = 2A/C$, $k_4 = A/D$, на которые следует умножать показания в каналах.

В режиме свободной генерации калибровочного твердотельного лазера на стекле с Nd процедура калибровки осуществлялась по каждому пичку, а затем проводилось усреднение калибровочных коэффициентов. На рис. 3 для примера показаны осциллограммы сигналов,

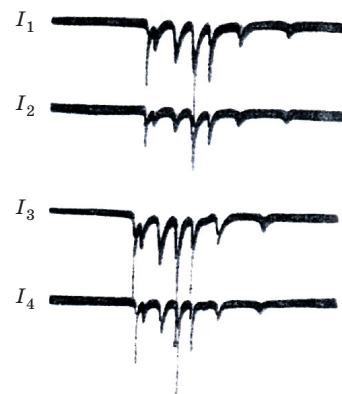


Рис. 3. Калибровочные осциллограммы. Усиление по каналу I_2 (1,0 мВ/см) в 2,5 раза больше, чем по другим каналам (0,4 мВ/см).

соответствующих всем четырем каналам, когда излучение лазера было полностью поляризовано под углом 45° (максимальное значение S_2 параметра Стокса). В результате калибровки были получены следующие значения коэффициентов:

$$k_2 = 0,70 \pm 0,02, k_3 = 1,57 \pm 0,02, k_4 = 1,12 \pm 0,03.$$

Изготовленный нами поляриметр имеет погрешность измерения степени поляризации – около 2%, азимута – 1° , эллиптичности – не более 10%.

Поляризация излучения импульсного Nd-лазера

Возможности и особенности работы импульсного Стокс-поляриметра наглядно демонстрируют результаты исследования поляризационных характеристик твердотельного лазера на стекле с Nd в режиме автомодуляции добротности. Напомним, что режим автомодуляции в таких лазерах с исходной неустойчивой полуконцентрической геометрией резонатора возникает в результате того, что в активном элементе (АЭ) образуется эффективная отрицательная линза, фокусное расстояние которой может оказаться достаточным, чтобы перевести резонатор в устойчивую область. Рассмотренный механизм позволяет получить гигантские импульсы длительностью 30–60 нс.

Резонатор исследуемого лазера был образован сферическим ($R = 0,5 \text{ м}$, коэффициент отражения – 95%) и плоским (коэффициент отражения – 70%) зеркалами, расположенными на расстоянии 500 мм друг от друга. Цилиндрический АЭ из неодимового стекла ПГЛС-4

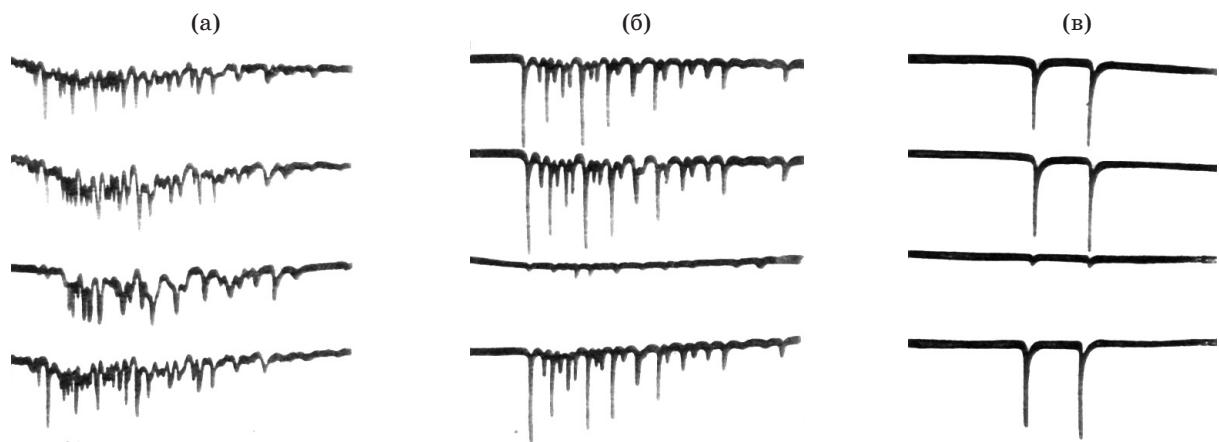


Рис. 4. Осциллограммы сигналов поляриметра, соответствующие разным длинам резонатора: $L = 500$ мм (а), 514 мм (б), 517 мм (в). Смещение оси АЭ соответствует рис. 5а.

(диаметр – 10 мм, длина – 120 мм) накачивалась цилиндрической лампой-вспышкой, ось которой располагалась на расстоянии 15 мм от оси АЭ. Режим автомодуляции добротности осуществлялся подбором расстояния L между зеркалами. Приближение к полуконцентрической конфигурации резонатора (с учетом тепловой линзы в активном элементе) сопровождалось переходом от генерации нескольких (от одного до трех) пичков значительной амплитуды к свободной генерации (хаотические пички) (рис. 4). При этом длительность пичков уменьшалась от 1,0–1,5 мкс (в режиме свободной генерации) до 100 нс (в режиме автомодуляции добротности).

В процессе эксперимента выяснилось, что в режиме автомодуляции при небольших энергиях накачки, менее 150 Дж (превышение над порогом – 2), излучение полностью линейно поляризовано с азимутом, зависящим от коллинеарного смещения оси АЭ относительно оси резонатора (рис. 5). Если АЭ смещался более, чем на 0,2 радиуса, то азимут в пределах точности измерения был ортогонален направлению смещения (рис. 5). При совмещении оси АЭ и оси резонатора (с точностью до 0,1 радиуса) азимут поляризации менялся от пичка к пичку в широких пределах.

При больших энергиях накачки (не менее 150 Дж) излучение в режиме автомодуляции по-прежнему было полностью линейно поляризовано, однако азимут поляризации начинал зависеть от юстировки зеркал и был при этом либо ортогонален направлению смещения оси активного элемента, либо совпадал с этим направлением.

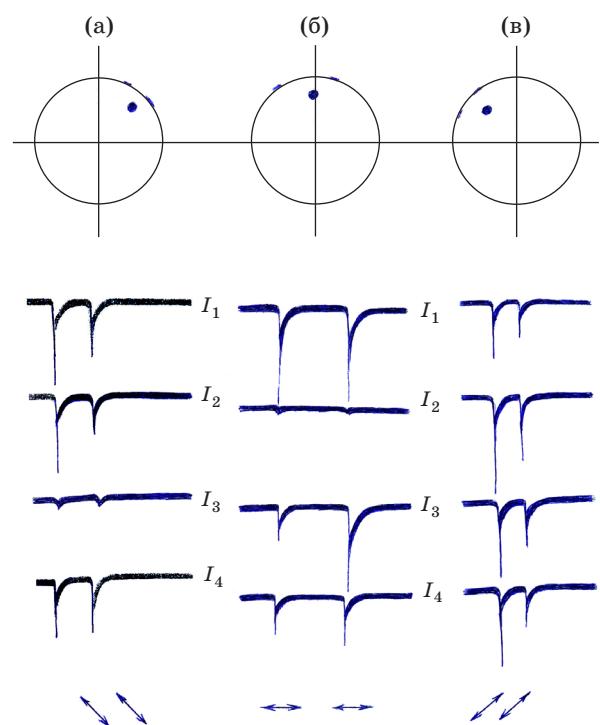


Рис. 5. Осциллограммы, соответствующие разным смещениям оси АЭ относительно оси резонатора (показана точкой).

Такое поведение поляризационных характеристик можно объяснить возникновением бифокальной положительной линзы из-за градиента температуры в цилиндрическом активном элементе. Это приводит к появлению наведенного двулучепреломления с осями, соответствующими ортам цилиндрической системы координат, и фазового набега, пропорционального квадрату расстояния от оси элемента. Фокусное расстояние наведенной линзы для излучения с тангенциальным компонентом поляризации

больше фокусного расстояния для излучения с радиальным компонентом.

Если ось резонатора смешена относительно оси активного элемента, то поляризация собственных типов колебаний близка к линейной, однородной по сечению с азимутом, совпадающим с радиальным или тангенциальным направлением в точке пересечения осью резонатора поперечного сечения активного элемента.

Заключение

Рассмотрена простая конструкция поляриметра для измерения параметров Стокса импульсного излучения. В основе поляриметра лежит прохождение излучения через линейную последовательность брюстеровских пластинок, которые служат поляризаторами. Это позволяет сохранить аксиальную геометрию и достаточную мощность пучка, чтобы использовать его

для других измерений. Не претендуя на рекордные значения точности измерений, поляриметр характеризуется компактностью, простотой калибровки и удобством в работе, позволяя получать результаты с высоким разрешением по времени (10^{-5} с и менее).

Для демонстрации работы поляриметра в статье приведены результаты экспериментального исследования твердотельного лазера на стекле с Nd ($\lambda = 1,06$ мкм) с полуконцентрическим резонатором. Показано, что в режиме автомодуляции добротности лазер излучает короткие (10^{-7} – 10^{-8} с) полностью линейно поляризованные импульсы с азимутом, перпендикулярным направлению смещения оси АЭ относительно оси резонатора. В режиме свободной генерации форма и степень поляризации отдельных пичков хаотично меняются в широких пределах, так что в целом излучение лазера становится неполяризованным.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Redfern R.M., Collins P.P. An ultra-high-speed Stokes polarimeter for astronomy // High Time Resolution Astrophysics / Astrophysics and Space Science Library. 2008. V. 351. P. 205–228.
2. Cronin T.W., Warrant E.T., Greiner B. Celestial polarization patterns during twilight // Appl. Opt. 2006. V. 45. P. 5582–5589.
3. Carion J., Le Jeune B., Lotrain J., Guern Y. Polarization effects of seawater and underwater targets // Appl. Opt. 1990. V. 29. P. 1689–1695.
4. Martinez F.J., Marcues A., Gallego S., Franzes J. Retardance and flicker modeling and characterization of electroorganic linear retarders by averaged Stokes parameters // Opt. Lett. 2014. V. 39. P. 1011–1014.
5. Sankaran V., Wals J.T.Jr., Mailland D.J. Comparative study of polarized light propagation through biological tissues // J. Biomed. Opt. 2002. V. 7. P. 300–306.
6. Boulwert F., Boulbry B., Le Brun G., Le Juen B., Rivet S., Carion J. Analysis of the depolarizing properties of irradiated pig skin // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2005. V. 7. P. 21–28.
7. Ionita I., Toma O. Biological applications of ultrashort pulsed laser polarimetry // Romanian Reports in Physics. 2010. V. 62(3). P. 628–633.
8. Salas-Alcantara K.M., Espinosa-Luna R., Torres-Gomez I., Barmenkov Y.O. Determination of the Muller matrix of UV-inscribed long-period fiber grating // Applied Optics. 2014. V. 53(2). P. 269–277.
9. Ищенко Е.Ф., Соколов А.Л. Поляризационная оптика: учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во МЭИ, 2005. 336 с.
10. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 856 с.
11. Boulbry B., Ramella-Roman J.C., Gerner T.A. Improved method for calibrating a Stokes polarimeter // Appl. Opt. 2007. V. 46. № 35. P. 8533–8541.