

И. В. Линчевский

Датчик угла поворота с применением магнитооптического модулятора на биморфном элементе

(Представлено академиком НАН Украины В. М. Локтевым)

Представлен датчик угла поворота на основе магнитооптического модулятора на биморфном элементе в условиях магнитомеханического резонанса. Показано, что за счет пространственного распределения угла поворота плоскости поляризации по сечению светового пучка возможна работа поляриметра на максимуме первой гармоники сигнала. Пороговая чувствительность в определении измеряемого углового параметра составляет $2,6 \cdot 10^{-5}$ рад.

Поляризационные методы широко применяются в медицине, при исследовании поверхности материалов, в аэрокосмическом дистанционном зондировании [1, 2]. При построении поляриметров часто используют преобразователи поляризации с применением магнито-, электро-, акустооптических и других ячеек. [3]. Обычно для измерения угла поворота и его направления фотополяриметр настраивают на минимум пропускания света [4] с последующим синхронным детектированием первой гармоники переменного сигнала. Однако при скрещенном положении оптических элементов сигнал на выходе фотоприемника скрывается в шумах, что приводит к резкому снижению точности измерений при высокой деполяризации и рассеивании в оптическом канале.

Ниже показано, что при построении датчика угла поворота применение магнитооптического модулятора (МОМ) на магнитооптическом кристалле в составе биморфного элемента в режиме магнитомеханических колебаний позволяет работать с максимально высокими уровнями первой гармоники переменной составляющей сигнала, а также увеличивает соотношение сигнал/шум на выходе датчика.

Схема рассматриваемого устройства представлена на рис. 1. Излучение поступает на МОМ, выполненный в виде биморфной пластины размером $a \times b$, состоящей из слоя магнитооптического кристалла и магнитопассивной подложки. МОМ помещен во внешнее постоянное (подмагничивающее) и переменное, заданной частоты, магнитные поля. В резуль-

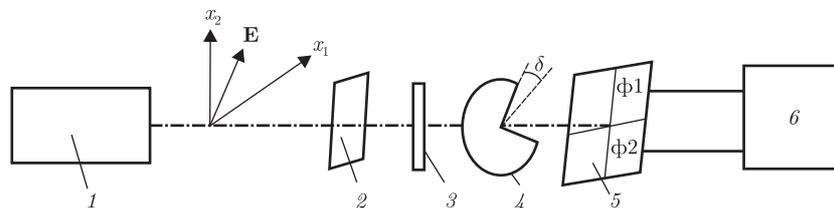


Рис. 1. Схема устройства: 1 — источник излучения; 2 — МОМ на биморфном элементе; 3 — анализатор; 4 — поворотная диафрагма; 5 — матрица фотоприемников; 6 — регистрирующее устройство; \mathbf{E} — вектор электрического поля

© И. В. Линчевский, 2015

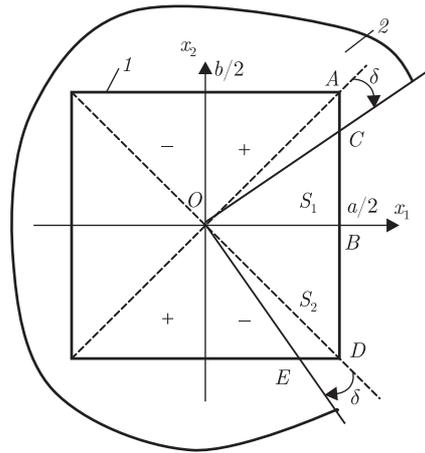


Рис. 2. Пространственное распределение переменной составляющей интенсивности по поперечному сечению пучка света после анализатора: 1 — границы сечения пучка; 2 — поворотная диафрагма

тате магнитоотрикции в биморфной пластине возникают изгибные колебания. Последние вызывают сдвиговые деформации и, как следствие, в магнитооптическом кристалле возникают дополнительные изменения намагниченности вдоль оси Ox_3 . В результате, свет после прохождения МОМ испытывает поворот плоскости поляризации вследствие эффекта Фарадея [5].

Для луча света, прошедшего через анализатор, вектор Стокса равен:

$$(V_{\text{out}}) = [P_a][M](V_{\text{in}}), \quad (1)$$

где $(V_{\text{in}}) = (I_0, I_0, 0, 0)$ — вектор Стокса падающего луча; $[P_a]$, $[M]$ — матрицы Мюллера анализатора и МОМ Фарадея; I_0 — интенсивность электромагнитной волны.

В соответствии с (1) нетрудно определить интенсивность светового потока, прошедшего через систему

$$I = \frac{I_0}{2}(1 + \cos 2(\phi + \gamma)), \quad (2)$$

где $\phi = \theta\{\alpha \sin \alpha x_1 [A_n \sqrt{\alpha^2 + \lambda^2} \sin(x_2 \sqrt{\alpha^2 + \lambda^2}) + B_n \sqrt{\alpha^2 - \lambda^2} \sin(x_2 \sqrt{\alpha^2 - \lambda^2})] + \beta \sin \beta x_2 [C_m \sqrt{\beta^2 + \lambda^2} \sin(x_1 \sqrt{\beta^2 + \lambda^2}) + D_m \sqrt{\beta^2 - \lambda^2} \sin(x_1 \sqrt{\beta^2 - \lambda^2})]\}$ — угол поворота плоскости поляризации МОМ [5], $\alpha = \pi/a$, $\beta = \pi/b$; γ — азимут анализатора; A_n , B_n , C_m , D_m — частотно зависимые константы; θ — удельный угол поворота плоскости поляризации; λ — волновое число.

При значении азимута $\gamma = \pi/4$ и с учетом, что $\phi \ll 1$, для переменной составляющей интенсивности получим $I^* = (I_0/2) \sin(2\phi) \approx I_0 \phi(x_1, x_2)$.

Переменная составляющая $I^*(x_1, x_2)$ характеризуется функцией распределения в плоскости $x_1 0 x_2$, для которой характерно противофазное изменение интенсивности по отдельным участкам поперечного сечения пучка света. Для устройства измеряемым параметром является угол поворота δ диафрагмы. В зависимости от угла δ изменяется соотношение между открытыми площадями секторов S_1 и S_2 (рис. 2). Знаки “+” и “-” отображают участки сечения светового пучка, где колебания интенсивности имеют значения начальной фазы, отличающиеся на π .

В начальном положении диафрагмы ($\delta = 0$) площади $S_1 = S_2$, что соответствует равенству площадей $S_{OAB} = S_{OBD}$. Излучение, прошедшее через сектора S_1 и S_2 ; попадает на соответствующие фотоприемники ф1 и ф2 (см. рис. 1). Выходные токи последних определяются средними значениями мощности оптического излучения по площадям секторов S_1 и S_2 соответственно. Средние значения переменной составляющей мощности оптического излучения $\langle P_i^* \rangle$ найдем из выражения $\langle P_i^* \rangle = (P_0/ab) \iint_{S_i} \phi(x_1, x_2) dx_1 dx_2$, $i = 1, 2$, где P_0 — оптическая мощность на входе МОМ. Очевидно, что при условии $\delta = 0$ переменные составляющие выходных токов фотоприемников будут равны по амплитуде и противоположны по фазе. Поэтому, при сложении токов фотоприемников ф1 и ф2 в регистрирующем устройстве результирующий ток $i = 0$. При изменении азимута диафрагмы на угол δ суммарный ток фотоприемников составит:

$$i(\delta) = \pm \left(\frac{2s_\lambda P_0}{ab} \right) \iint_{S_{OAC}} \phi(x_1, x_2) dx_1 dx_2,$$

где s_λ — абсолютная чувствительность фотоприемника; знак “+” относится к правому повороту диафрагмы ($\delta > 0$); знак “-” — к левому повороту ($\delta < 0$).

Таким образом, по амплитуде переменной составляющей тока i на выходе регистрирующего устройства можно судить о величине угла поворота диафрагмы. По начальной фазе тока i относительно, например, начальной фазы тока первого фотоприемника определяем направление поворота.

Шумовая составляющая тока на выходе фотоприемника определяется в основном постоянной составляющей тока i_0 фотоприемника за счет постоянной засветки (первое слагаемое в выражении (2)) и может быть найдена с помощью известного соотношения: $i_{ш} = \sqrt{2ei_0 \Delta f}$, где e — заряд электрона; Δf — ширина полосы пропускания. Отношение сигнал/шум на выходе фотоприемника ф1 составит $\frac{S}{N} = \frac{1}{ab} \sqrt{\frac{8s_\lambda P_0}{e \Delta f}} \iint_{S_{OAC}} \phi(x_1, x_2) dx_1 dx_2$.

При отношении $S/N = 1$ минимально регистрируемая величина угла

$$\delta_{\min} = \frac{1}{\frac{d(\langle P_i^* \rangle / P_0)}{d\delta}} \sqrt{\frac{e \Delta f}{8s_\lambda P_0}}. \quad (3)$$

В качестве практического примера рассмотрим датчик угла поворота в котором МОМ с поперечными размерами $a \times b = 10 \times 10$ мм² выполнен из висмутиттриевого граната ($Y_{3-x}Vi_xFe_5O_{12}$) на галлий гадолиниевом основании ($Gd_3Ga_5O_{12}$). Толщины слоев биморфного элемента 100 и 300 мкм соответственно. Резонансная частота для основной моды 17,08 кГц. Методика расчета характеристик такого модулятора изложена в работе [5]. Мощность источника поляризованного излучения и чувствительность фотоприемника составляют 1 мВт и 0,5 А/Вт соответственно.

На рис. 3 представлена расчетная зависимость нормированного среднего значения переменной составляющей мощности оптического излучения на входе фотоприемника ф1 от угла поворота диафрагмы.

При соотношении сигнал/шум, равном единице, и при полосе пропускания усилителя $\Delta f = 1$ кГц в соответствии с выражением (3) минимально регистрируемые углы поворота $\delta_{\min} = 2,6 \cdot 10^{-5} \Big|_{\delta=0}$.

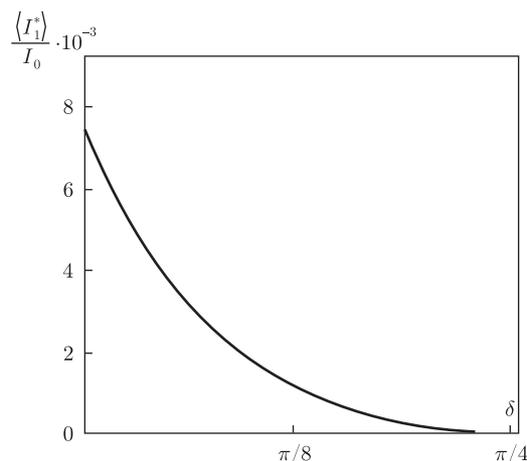


Рис. 3. Расчетная зависимость $\frac{\langle P^* \rangle}{P_0}(\delta)$

Выбор азимута анализатора вблизи его оптимального значения $\gamma = \pi/4$ позволяет обеспечить максимально возможное значение сигнал/шум на выходах фотоприемников. Отметим, что азимут анализатора может иметь угол рассогласования Δ относительно оптимального значения. Тогда переменная составляющая на выходе анализатора $I^*(x_1, x_2) \approx I_0 \cos(2\Delta)\phi(x_1, x_2)$.

Таким образом, рассогласование азимута анализатора от оптимального на угол $\Delta = 10^\circ$ приводит к уменьшению амплитуды переменной составляющей до 6%, что практически не влияет на соотношение сигнал/шум в отличие от поляриметра, описанного в работе [4].

1. *Иванов А. П.* Поляризация света и ее использование в различных задачах оптики рассеивающих сред // Оптика и спектроскопия. – 2009. – **107**. – С. 183–195.
2. *Скрипец А. В., Тронько В. Д., Асанов М. М.* Передача азимута на расстоянии с применением магнитооптического модулятора // Электроніка та системи управління. – 2011. – № 1. – С. 5–8.
3. *Ванюрихин А. И., Кузнецов Ю. А., Майстренко В. Ф., Тронько В. Д.* Регистрация угла плоскости колебания линейно поляризованного инфракрасного излучения // Оптико-мех. пром-сть. – 1970. – Вып. 8. – С. 30–33.
4. *Дерюгин И. А., Кузнецов Ю. А., Тронько В. Д.* Фотоэлектрический поляриметр инфракрасного диапазона // Оптика и спектроскопия. – 1970. – **38**, 2. – С. 415–418.
5. *Лінчевський І. В., Петріщев О. М.* Модулятор світла на магнітооптичному кристалі в складі біморфної структури у режимі магнітомеханічних коливань // Укр. фіз. журн. – 2014. – **59**, № 10. – С. 972–979.

НТУ України “Київський політехнічний інститут”

Поступило в редакцію 01.10.2014

І. В. Лінчевський

Датчик кута повороту із застосуванням магнітооптичного модулятора на біморфному елементі

Представлено датчик кута повороту на основі магнітооптичного модулятора на біморфному елементі в умовах магнітомеханічного резонансу. Показано, що за рахунок просторового розподілу кута повороту площини поляризації по перетину світлового пучка при роботі поляриметра на максимумі першої гармоніки сигналу порогова чутливість у визначенні кутового параметра становить $2,6 \cdot 10^{-5}$ рад.

I. V. Linchevskiy

A rotation angle sensor using the magneto-optic modulator on a bimorphic element

A rotation angle sensor based on the magneto-optic modulator on a bimorphic element under the magnetomechanical resonance is presented. It is shown that, due to the spatial distribution of the angle of rotation of the polarization plane over the cross section of a light beam, the threshold sensitivity in determining the angular parameter is $2.6 \cdot 10^{-5}$ rad if the polarimeter works at the maximum of the first harmonic of the signal.