

07;12

Оптический бистабильный по поляризации элемент на эффекте Фарадея

© В.А. Табарин, С.Д. Демьянцева

Сургутский государственный университет

E-mail: pii@no.surgu.ru

В окончательной редакции 15 июня 2007 г.

Впервые рассматривается оптический поляризационный бистабильный элемент на основе He–Ne-лазера, работающего на длине волны $\lambda = 3.39 \mu\text{m}$, в резонатор которого помещена ячейка Фарадея. Образец в виде параллелепипеда изготовлен из монокристалла железоиттриевого граната. Проведен теоретический анализ элемента с использованием метода матриц Джонса. Установлено, что бистабильность по поляризации может наблюдаться при величине однопроходного фарадеевского вращения в 45° . Эксперименты показали, что в данном устройстве с использованием гибридной схемы при определенных условиях происходит переключение круговой поляризации с σ^+ на σ^- , и наоборот.

PACS: 78.20.Ls.

Оптическая бистабильность — быстро развивающаяся область современных исследований [1]. Внимание к ней обусловлено возможностью ее практического применения к полностью оптическим схемам логики и теми интересными явлениями, которые лежат в ее основе. Различают амплитудную [1] и возникшую существенно позже поляризационную бистабильности [2,3]. Поляризационная оптическая бистабильность впервые описана в работе [2]. Авторы ее предложили несколько перспективных систем по поляризационной бистабильности. Поляризационно-бистабильная система — это своего рода модификация амплитудно-бистабильного устройства, где два состояния выходного сигнала отличаются не его величиной, а только состоянием поляризации. В принципе, в таких устройствах энергия не рассеивается, за исключением неизбежных потерь на поглощение.

В данной статье впервые предложен поляризационный бистабильный элемент с электрической обратной связью на основе He–Ne-лазера

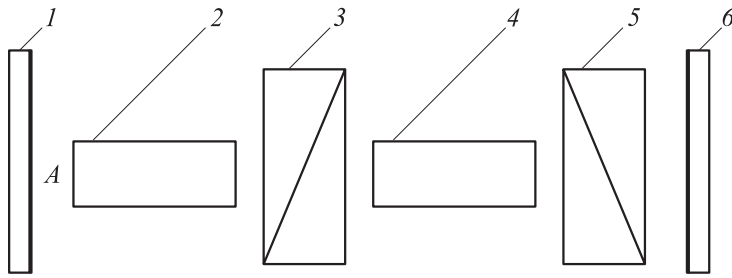


Рис. 1. Оптический резонатор.

на длине волны $\lambda = 3.39 \mu\text{m}$, в резонатор которого помещена ячейка Фарадея, изготовленная из монокристалла железиттриевого граната. Проведен теоретический анализ элемента с использованием метода матриц Джонса. Установлено, что бистабильность по поляризации может наблюдаться при величине однопроходного фарадеевского вращения в 45° . Эксперименты показали, что в данном устройстве происходит переключение круговой поляризации с σ^+ на σ^- , и наоборот.

Анализ проводился для оптического резонатора (рис. 1), состоящего из двух изотропных зеркал $1, 6$, между которыми находятся также изотропная активная среда 2 , фарадеевский вращатель 4 и два частичных поляризатора 3 и 5 , собственные оси которых развернуты на угол δ .

Расчеты проведены в предположении, что внутри резонатора существует лишь низшая мода TEM_{00q} , излучение лазера распространяется вдоль оси Z , а вектор электрического поля \mathbf{E} раскладывается на две перпендикулярные компоненты E_x и E_y . Кроме того, для определенности оси x и y считаются параллельными осям поляризатора 3 , амплитудные коэффициенты пропускания которого соответственно равны 1 и α . В свою очередь амплитудные коэффициенты поляризатора 5 равны β и 1 . Действие анизотропных по поляризации элементов описывается следующими матрицами Джонса:

$$M_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \beta \end{pmatrix}, \quad M_4 = \begin{pmatrix} \cos \theta & \cos \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix},$$

$$M_5 = \begin{pmatrix} \cos^2 \delta + \beta \sin^2 \delta & (1 - \beta) \cos \delta \sin \delta \\ (1 - \beta) \cos \delta \sin \delta & \sin^2 \delta + \beta \cos^2 \delta \end{pmatrix},$$

где θ — угол однопроходного вращения ячейки Фарадея 4. Не нарушая общности рассуждений, предположим, что $0 < \beta < \alpha < 1$. Задача решается в общем виде, когда собственные оси обоих поляризаторов (при реализации их в виде брюстеровских пластин) образуют угол δ . Начиная полный обход резонатора из точки А по направлению стрелки, оператор Джонса M получим в виде

$$M = \begin{pmatrix} \beta^2 \cos^2 \theta - \sin^2 \theta & \frac{1}{2} \alpha (\beta^2 + 1) \cos 2\theta \\ -\frac{1}{2} \alpha (\beta^2 + 1) \cos 2\theta & -\alpha^2 (\beta^2 \sin^2 \theta + \cos^2 \theta) \end{pmatrix}.$$

Найдем M для частного случая $\delta = \pi/2$, т.е. когда частичные поляризаторы 3 и 5 будут идеально рассогласованы. Рассмотрение соответствующей поляризационной задачи для рис. 1 заключается в решении операторного уравнения Джонса:

$$ME = \eta E, \quad (1)$$

где E называется собственным вектором оператора M , а η — его собственными значениями. Из решения уравнения (1) находим собственные значения η_1 и η_2 (уравнение (2)), а также величины, позволяющие определить направление вращения вектора E :

$$\eta_{1,2}^2 - \frac{1}{2} [(1 + \alpha^2)(1 + \beta^2) \cos 2\theta - (1 - \alpha^2)(1 - \beta^2)] \eta_{1,2} + \alpha^2 \beta^2 = 0. \quad (2)$$

Собственные значения оператора M в общем случае имеют комплексный вид, т.е. $\eta_{1,2} = |\eta_{1,2}| \exp i\varphi_{1,2}$. Модули $\eta_{1,2}$ характеризуют потери собственных волн, а величины $\varphi_{1,2}$ — фазовые сдвиги этих волн.

Как видно, собственные состояния поляризаций рассматриваемого резонатора (назовем их модами) зависят от коэффициентов пропускания частичных поляризаторов, а также от величины θ , которая пропорциональна напряженности магнитного поля. Проследим, как изменяются характеристики собственных состояний поляризации при вариации угла. Полный цикл изменения характеристик осуществляется при вариации θ в пределах от 0 до $\pi/2$. На рис. 2 приведены вычисленные из уравнения (2) наиболее интересные для данной задачи диаграммы собственных состояний поляризации в зависимости от θ .

В отсутствие магнитного поля ($\theta = 0$) собственные поляризации резонатора линейны и ортогональны. Моды имеют одинаковые частоты и разные потери. При наложении на фарадеевский вращатель

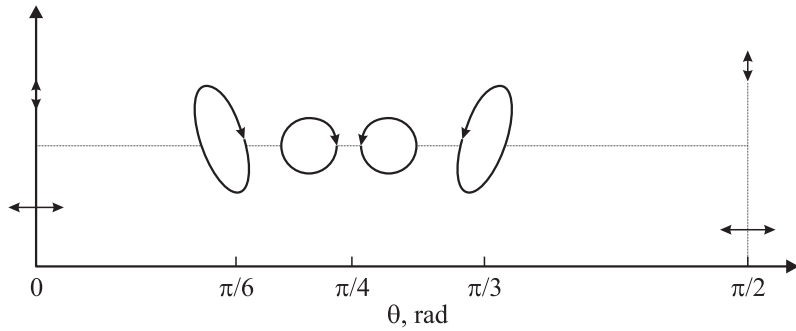


Рис. 2. Изменение модулей собственных значений и собственных состояний поляризации $|\eta_1|, |\eta_2|$ в зависимости от θ при выполнении условия $0 < \beta < \alpha < 1$.

магнитного поля параметр θ возрастает и собственные поляризации резонатора, оставаясь линейными, разворачиваются навстречу друг другу. Когда величина достигает некоторого критического значения, наступает полное вырождение собственных поляризаций и их азимут составляет 45° , а коэффициенты потерь становятся равными величине $\alpha\beta$. При дальнейшем увеличении θ вырожденная мода становится эллиптически поляризованной, и при приближении θ к 45° эллипс превращается в окружность с направлением вращения вправо (σ^+). При $\theta = 45^\circ$ происходит изменение поляризации моды на обратную, т.е. ее состояние становится σ^- (рис. 2). При $\theta \geq 45^\circ$ процессы протекают в обратном направлении, и при $\theta = \pi/2$ вновь возникают две линейно поляризованные ортогональные моды.

Как видно из рис. 2, в качестве рабочей точки для наблюдения бистабильного режима удобно выбрать $\theta = \pi/4$. Слева и справа от этого значения собственные состояния представляют волны, соответственно поляризованные по кругу вправо (σ^+) и по кругу влево (σ^-).

Эксперименты проводились по достаточно известной схеме гибридной бистабильности [1,4]. Часть оптического излучения, прошедшего через ячейку Фарадея, благодаря делительной пластинке ответвляется на второй фотоприемник. Сигнал с нагрузки фотоприемника усиливается в мощном усилителе тока с частотой 1 kHz (частотой модуляции лазерного излучения). Нагрузкой усилителя является намагничивающая система ячейки Фарадея. Таким образом, в гибридной схеме ответв-

ленный оптический сигнал, прошедший через ячейку Фарадея, преобразуется в электрический сигнал, дополнительно намагничивающий элемент Фарадея, что позволяет получить нелинейность и гистерезис для его пропускания. Благодаря этому и возникает поляризационная бистабильность.

Экспериментальные исследования подтвердили результаты расчетов. Действительно, за счет источника постоянного тока, установив однопроходное вращение чуть меньше 45° и соответственно волну σ^+ , а затем увеличивая ток газоразрядной трубки и, следовательно, мощность лазера и, как сказано выше, используя обратную связь для фарадеевской ячейки в гибридной схеме, мы осуществили переключение состояния поляризации с σ^+ на σ^- . Анализ этих состояний производился с помощью четвертьволновой пластинки и кальцитового анализатора. Минимальное изменение интенсивности излучения лазера для переключения состояний было 0.5 mW. Инерционность бистабильного элемента на основе массивного образца из монокристалла феррита (длина 10 mm) ограничивалась частотой 12 kHz, которая в основном определяется параметрами намагничивающей системы. В то же время пороговая частота эффекта Фарадея не менее 1000 mHz. Очевидно, что изготовление такого элемента в интегральном виде позволит значительно улучшить его характеристики.

Список литературы

- [1] Гиббс Х. Оптическая бистабильность. М.: Мир, 1988. 517 с.
- [2] Korpel A., Lohmann A. // Appl. Opt. 1986. V. 25. N 10. P. 1528–1529.
- [3] Ozeki Y., Tang C.L. // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 58. P. 1958–1962.
- [4] Smith P.W., Turner E.N. // IEEE J. Quantum Electron. 1977. V. 13. P. 42–47.