

## ЦВЕТОВАЯ МУЛЬТИСТАБИЛЬНОСТЬ В ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ ФАБРИ-ПЕРО

*И.Н.Агашев, С.М.Карпук, А.С.Рубанов, А.Л.Толстик*

Практически все известные в настоящее время разнообразные схемы реализации бистабильных состояний светового поля в пассивных резонаторных устройствах основаны на анализе величины интенсивности светового пучка, прошедшего через бистабильную систему. В работах [1,2] в качестве рабочего параметра предложено использовать состояние поляризации выходного сигнала, что позволило авторам ввести понятие поляризационной би- и мультистабильности. В настоящей работе рассматривается возможность реализации цветовой мультистабильности, при которой на вход интерферометра подается несколько световых пучков, различающихся по частоте, а устойчивые состояния интерферометра характеризуются различным соотношением интенсивностей спектральных компонент выходного излучения.

Рассмотрим интерферометр Фабри-Перо, содержащий среду с показателем преломления, линейно зависящим от интенсивности (например, керровская или тепловая нелинейности). Для любой из спектральных компонент излучения связь между интенсивностью поля в среде  $I_i$  ( $i = 1-m$ ,  $m$  — число спектральных компонент) и интенсивностью падающего на интерферометр светового потока  $J_{0i}$ , аналогично [3], можно представить в виде

$$I_i = \frac{(1 - \tau_i)J_{0i}(1 - R_i)(1 + R_i\tau_i)}{k_i L_i ((1 - R_i\tau_i)^2 + 4R_i\tau_i \sin^2 \Phi_i)}. \quad (1)$$

В этом выражении  $L_1 = \frac{L}{\cos \alpha_i}$  — толщина нелинейной среды для светового пучка, распространяющегося в интерферометре под углом  $\alpha_i$ ,  $L$  — база резонатора,  $\tau_i = e^{-k_i L_i}$  — пропускание линейно поглощающего слоя толщиной  $L_i$ ,  $R_i$  — коэффициент отражения зеркал интерферометра,  $\Phi_i = \Phi_{0i} + g_i I_s$  — фазовая отстройка интерферометра от резонанса,  $\Phi_{0i}$  — начальная отстройка интерферометра для  $i$ -ой спектральной компоненты,  $I_s = \sum_{i=1}^m I_i$  — суммарная

интенсивность в среде. Коэффициент пропорциональности  $g_i$  — определяется конкретным механизмом нелинейности:

$$g_i = \frac{16\pi^3 L_i \chi^{(3)}}{cn_0^2 \lambda_i}, \quad (2)$$

где  $\chi^{(3)}$  — кубическая нелинейная восприимчивость,  $\lambda_i$  — длина волны  $i$ -й компоненты,  $n_0$  — показатель преломления среды, не связанной с рассматриваемой нелинейностью,  $c$  — скорость света. Например, для тепловой нелинейности в условиях адиабатического нагрева среды

$$g_i = \frac{2\pi k_i L_i t}{\lambda_i C_p} \frac{dn}{dT}, \quad (3)$$

$\frac{dn}{dT}$  — термооптический коэффициент,  $t$  — время,  $C_p$  — теплоемкость единицы объема,  $k_i$  — коэффициент поглощения среды. Интенсивности световых пучков, прошедших через интерферометр,  $J_i$  задаются известным выражением

$$J_i = \frac{J_{0i}(1 - R_i)^2 \tau_i}{(1 - R_i \tau_i)^2 + 4R_i \tau_i \sin^2 \Phi_i}. \quad (4)$$

Численный анализ системы уравнений (1), (4) проведем на примере интерферометра Фабри–Перо с тепловой нелинейностью для трех спектральных компонент с длинами волн  $\lambda_1 = 700.0$ ,  $\lambda_2 = 546.1$ ,  $\lambda_3 = 435.8$  нм ( $R$ ,  $G$ ,  $B$ ), отвечающих стандарту международной колориметрической системы [4]. Зависимости интенсивностей спектральных компонент на выходе  $J_{1,2,3}$  от интенсивности суммарного светового потока на входе  $J_0$  представлены на рис. 1. Расчеты выполнены для равных интенсивностей компонент на входе в интерферометр  $J_{01} = J_{02} = J_{03} = J_0/3$ , равных значений коэффициентов отражения зеркал  $R_i = R = 0.70$ , коэффициентов поглощения  $k_i = k$  и углов распространения световых пучков  $\alpha_i = \alpha$  (оптическая плотность  $kL = 0.36$ ). Интенсивности приведены с нормировочным коэффициентом  $g_1$  (3), отвечающему длине волны  $\lambda_1$ .

Отличия в бистабильных зависимостях интенсивностей компонент светового поля обусловлены различными фазовыми изменениями для разных длин волн при одинаковом изменении оптической длины пути. Бистабильные зависимости для двух любых спектральных компонент ( $\lambda_k = \lambda_j + \Delta\lambda$ ) будут существенно отличаться, если пики пропускания интерферометра для обеих компонент смещены на величину, превышающую их полуширину. Величина фазового

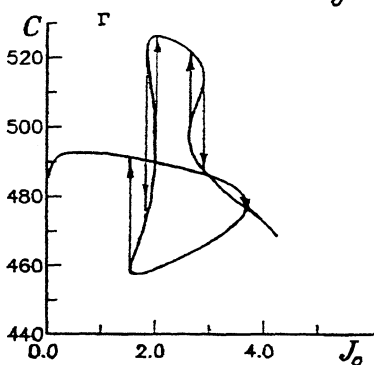
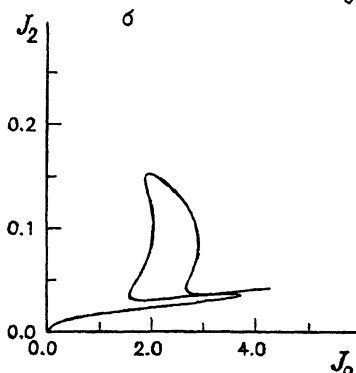
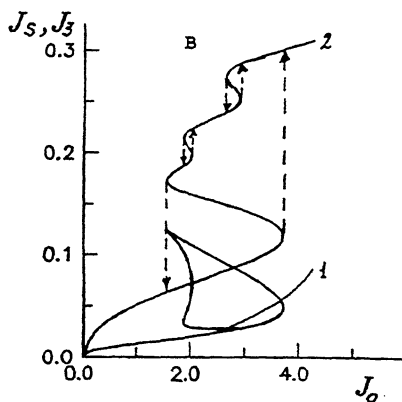
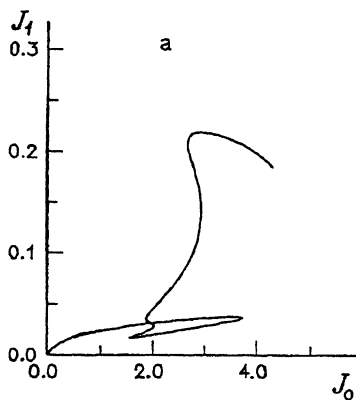


Рис. 1. Зависимости интенсивностей спектральных компонент  $J_1$  (а),  $J_2$  (б),  $J_3$  (в, кривая 1), суммарной интенсивности  $J_s$  (в, кривая 2) и цветового тона  $C$  выходящего излучения (г) от суммарной входной интенсивности  $J_0$ , рассчитанные при начальных фазовых отстройках  $\Phi_{01} = \Phi_{02} = \Phi_{03} = 0$ .

рассогласования

$$\Phi_j - \Phi_k = g_k I_s \frac{\lambda_k - \lambda_j}{\lambda_j}$$

превышает полуширину пика пропускания интерферометра

$$\delta = \arcsin \left[ \frac{(1 - R_i \tau_i)}{2(R_i \tau_i)^{1/2}} \right]$$

при выполнении условия

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda_j} > \frac{\delta}{g_k I_s}. \quad (5)$$

Для рассмотренных выше параметров интерферометра ( $\delta = 0.5$ ) и при работе в пределах одного пика пропускания ( $g_k I_s \leq \pi$ ) условие (5) удовлетворяется для всех трех выбранных спектральных компонент  $R, G, B$  ( $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_j} > 0.16$ ).

Как следует из приведенного анализа, различные состояния интерферометра отличаются соотношением интенсивностей спектральных компонент на выходе системы (рис. 1) и, следовательно, цветом выходящего светового потока. Изменяя интенсивность при одном и том же цвете (отношении интенсивностей спектральных компонент) входного излучения, можно осуществлять перестройку цвета выходящего светового потока. Учет физиологического восприятия цвета [4] позволяет, зная интенсивности спектральных компонент, рассчитать воспринимаемый человеческим глазом цвет выходного излучения (рис. 1,2). Как видно, при постоянном цвете светового пучка на входе (голубом) имеет место изменение цвета выходного излучения в диапазоне от фиолетового до зеленого.

Фазовое рассогласование двух любых спектральных компонент  $\Phi_j - \Phi_k$  в общем случае включает две составляющие  $\Phi_{0j} - \Phi_{0k}$  и  $g_k I_s \frac{\Delta\lambda}{\lambda_j}$ , которые могут схожим образом проявляться в зависимостях выходной интенсивности. В рассмотренном выше случае предполагалась одинаковая начальная отстройка интерферометра от резонанса  $\Phi_{0j} = \Phi_{0k}$ . При этом отличия в значениях выходных интенсивностей спектральных компонент связаны с нелинейными фазовыми набегам световых волн. В то же время поведение интенсив-

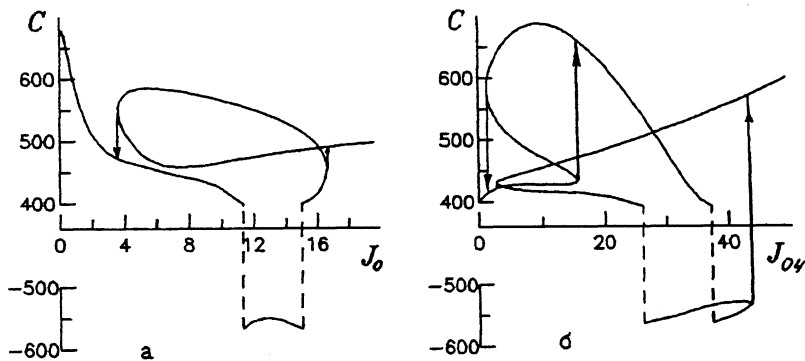


Рис. 2. Зависимости цветового тона  $C$  выходящего излучения.

$a$  — от суммарной входной интенсивности  $J_0$  при  $\Phi_{01} = 0.2, \Phi_{02} = -1.7, \Phi_{03} = -0.2, R_1 = R_2 = R_3 = 0.65$ ;  
 $b$  — от входной интенсивности управляющей компоненты  $J_{04}$  при  $\Phi_{01} = 0.3; \Phi_{02} = -1.0, \Phi_{03} = 0, \Phi_{04} = 0, R_1 = R_2 = R_3 = 0.65, R_4 = 0.8$ .

ностей и цвет на выходе существенно изменяется при различных начальных отстройках интерферометра. Использование других соотношений интенсивностей пучков на входе в интерферометр позволяет управлять диапазоном перестройки цвета. Так, на рис. 2,а представлен случай, когда соотношение интенсивностей на входе соответствует белому цвету ( $J_{01}:J_{02}:J_{03} = 72.1:1.4:1$ ) [4]. При этом изменение цвета на выходе охватывает весь спектральный диапазон от фиолетового до красного ( $400 < \lambda < 700$  нм) и даже пурпурные цвета, которым условно поставлены в соответствие значения  $\lambda < 0$  [5]. Модуль отрицательного значения  $\lambda$  определяет длину волны дополнительного цвета, который нужно добавить к пурпурному, чтобы получить белый цвет.

Представляется полезной также схема, использующая в качестве управляющего дополнительный световой пучок, частота которого лежит в УФ или ИК области спектра. В этом случае можно оптимизировать параметры интерферометра для длины волны управляющей компоненты, а за счет низкого поглощения среды в видимой области спектра существенно увеличить интенсивность излучения на выходе интерферометра. На рис. 2,б представлена зависимость цветового тона излучения на выходе интерферометра от интенсивности управляющего луча ( $\lambda_4 = 1$  мкм).

В расчетах для трех длин волн ( $R, G, B$ ) соотношение интенсивностей на входе интерферометра соответствовало белому цвету и не учитывалось поглощение среды ( $\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = 1$ ), а на частоте управляющей компоненты пропускание среды соответствовало оптимальному значению  $\tau_4 = R_4$ . Изменение интенсивности управляющего светового пучка на входе интерферометра приводит к скоррелированным бистабильным зависимостям интенсивностей для всех световых полей и воспринимаемого человеческим глазом цвета выходного излучения.

### Список литературы

- [1] *Cush R., Kirby C.* // Opt. Comm. 1986. V. 60. P. 399-402.
- [2] *Рубанов В.С.* В сб.: Лазеры и оптическая нелинейность. ИФ АН БССР. 1989. С. 141-145.
- [3] *Miller D.A.* // IEEE J. of Quant. El. 1986. V. QE-17. P. 306-310.
- [4] *Джадд Д., Вышецки Г.* Цвет в науке и технике. М., 1987. 590 с.
- [5] *Шаронов В.В.* Свет и цвет. М., 1961. 313 с.

Белорусский государственный  
университет  
Минск

Поступило в Редакцию  
26 марта 1994 г.