

06.3;07

## **Фазовая оптическая бистабильность в структурах с поверхностными плазмонами**

© В.Ф. Названов, Д.И. Коваленко

Саратовский государственный университет

Поступило в Редакцию 28 января 1997 г.

В окончательной редакции 25 февраля 1998 г.

Теоретически исследовано явление фазовой оптической бистабильности в структурах с поверхностными плазмонами. Показано, что в оптическом волноводе с нелинейным слоем возможно возникновение не только амплитудной, но и фазовой бистабильности при отражении  $p$ -поляризованного излучения от нелинейного волновода.

Для физики и техники оптических компьютеров нового поколения принципиальное значение представляют методы создания пространственной фазовой бистабильности и мультистабильности. Реализация таких систем позволяет конструировать системы параллельной обработки фазовой информации [1]. Особенно широкие возможности представляют здесь оптические среды с кубической нелинейностью, позволяющие реализовать "гистерезисную" фазовую бистабильность того же типа, что и хорошо известная амплитудная бистабильность [2].

В частности, весьма интересен вид фазовой бистабильности, связанный с отражением излучения от границы раздела линейной среды с кубической оптической нелинейностью. Поскольку в последней диэлектрическая проницаемость зависит от интенсивности падающей волны, изменения в отраженной волне определяются начальной интенсивностью. В результате при некоторых условиях в отраженной волне возможны скачки как в интенсивности, так и в фазе.

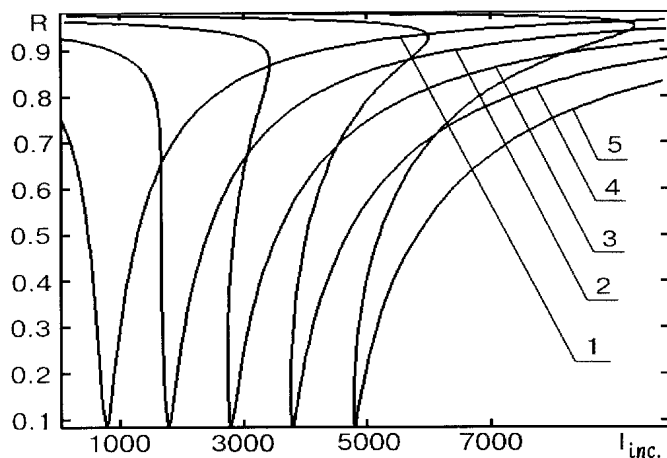
История вопроса изложена в монографиях [3,4]. теоретически бистабильность и гистерезис при отражении электромагнитного излучения от границы нелинейной среды предсказал Силин [5]. Применительно к оптике вопрос о бистабильности при отражении плоской волны от границы среды с керровской нелинейностью ставится затем

в [6,7]; последовательное решение этой проблемы дано в работах [8,9]. Аналогичная задача для оптического волновода с нелинейным слоем в приближении плоских волн рассматривалась также в [10,11] для амплитудной, а в работе [12] — для фазовой бистабильности (для  $s$ -поляризованного излучения). Наконец, в работе [13] теоретически рассмотрена возможность реализации оптической бистабильности в коэффициенте отражения  $p$ -поляризованного излучения от границы с нелинейной керровской средой ( $CS_2$ ) при возбуждении поверхностных плазмонов.

Экспериментально эффект оптической бистабильности при отражении излучения от границы раздела стекло–керровская среда ( $CS_2$ ) наблюдали авторы [14]. Для критической мощности ими получено значение порядка  $8 \cdot 10^9$  W/cm<sup>2</sup>. В работе [15] продемонстрирована оптическая бистабильность на эффекте нарушенного полного внутреннего отражения в нелинейном светофильтре с жидким кристаллом, используемым в качестве нелинейного материала. Оптическая бистабильность при возбуждении поверхностных плазмонов наблюдалась в структурах, содержащих в качестве нелинейной среды либо  $CS_2$  [16], либо жидкий кристалл [17–20].

Целью настоящей работы является теоретическое исследование возможности реализации фазовой оптической бистабильности при отражении  $p$ -поляризованного излучения от волновода, рассмотренного в [13].

Как и в работе [13], использовалось приближение плоских волн. Для расчетов использовался матричный метод [21]. Для того чтобы применить матричный метод, требуется знать свойства всех слоев, входящих в исследуемую структуру. Свойства нелинейной среды зависят от интенсивности прошедшего излучения через структуру  $\epsilon_t = \epsilon_{t0} + \alpha |E_t|^2$ , где  $\epsilon_{t0}$  — диэлектрическая константа нелинейной среды при нулевой интенсивности излучения;  $\alpha$  — коэффициент нелинейности среды, который связан с коэффициентом Керра  $n_2$  следующим [22] образом:  $n_2 = (1/(2\sqrt{\epsilon_{t0}}))\alpha$ , и где  $E_t$  — амплитуда прошедшего через нелинейную среду излучения. Таким образом, в поставленной задаче требуется решить систему нелинейных уравнений. Решение можно упростить, если считать, что коэффициенты отражения, пропускания и амплитуда падающего излучения являются функциями интенсивности прошедшего излучения. В работе [13] при анализе структуры в конфигурации Кречмана (стекло–металл–нелинейный диэлектрик) авторам удалось



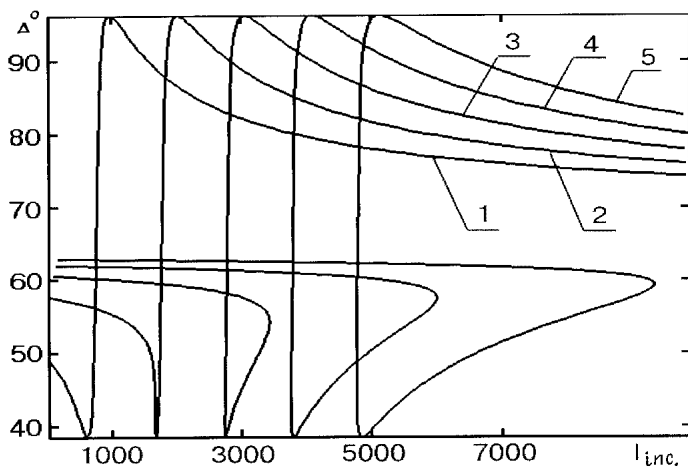
**Рис. 1.** Зависимость энергетического коэффициента отражения от безразмерной интенсивности излучения, падающего на структуру. Кривые построены при различных углах падения: 1 —  $53^{\circ}48'$ , 2 —  $53^{\circ}51'$ , 3 —  $53^{\circ}54'$ , 4 —  $53^{\circ}57'$ , 5 —  $54^{\circ}$ . Минимум отражения достигается при угле  $53^{\circ}45'41.53''$ .

получить данную функцию в аналитическом виде. При таком подходе к решению задачи невозможно получить фазовые характеристики отраженного/прошедшего излучения.

При решении нами был использован метод Ньютона–Рафсона [23]. Этот метод позволял за три-четыре итерации получать точность порядка  $10^{-12}$ .

В расчетах мы использовали следующие параметры структуры (в геометрии Кречмана): стекло ( $\epsilon = 3.6$ ), металл ( $\epsilon = -57.8 + i0.6$ ,  $d = 625 \text{ \AA}$ ), нелинейная среда ( $\epsilon_{r0} = 2.25$ ,  $n_2 = 3 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{W}$ ) при  $\lambda = 10600 \text{ \AA}$ . Результаты расчетов представлены на рис. 1 и 2.

На рис. 1 представлена зависимость энергетического коэффициента отражения от безразмерной интенсивности излучения, падающего на структуру при различных углах. Как и следовало ожидать, кривая 3 на рис. 1 совпадает с кривой из работы [13]. Из рисунка видно, что эффект бистабильности начинает проявлять себя при углах падения больше  $53^{\circ}52'$  (при резонансном угле  $53^{\circ}45'41.53''$ ). При этом с увеличением угла падения увеличивается как амплитуда гистерезиса, так и мощность



**Рис. 2.** Зависимость фазового сдвига между  $p$ - и  $s$ -компонентами отраженного излучения от безразмерной интенсивности излучения, падающего на структуру. Кривые построены при различных углах падения: 1 —  $53^\circ 48'$ , 2 —  $53^\circ 51'$ , 3 —  $53^\circ 54'$ , 4 —  $53^\circ 57'$ , 5 —  $54^\circ$ . Минимум отражения достигается при угле  $53^\circ 45' 41.53''$ .

падающего излучения, необходимая для его возникновения. Так, на кривой 3 (рис. 1) критическая мощность излучения для переключения соответствует величине  $3 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$ , как и в [13].

Важным результатом нашей работы является результат, представленный на рис. 2: зависимость фазового сдвига между  $p$ - и  $s$ -компонентами отраженного излучения от безразмерной интенсивности излучения, падающего на структуру при различных углах. Как ранее нами сообщалось [24], фаза гораздо более чувствительна к изменению свойств структуры, чем амплитуда. Видно, что фазовая бистабильность проявляет себя уже начиная с углов падения, больших  $53^\circ 50'$ .

Таким образом, в данной работе теоретически исследовано явление фазовой оптической бистабильности в структурах с поверхностными плазмонами. Показано, что в оптическом волноводе с нелинейным слоем возможно возникновение не только амплитудной, но и фазовой бистабильности при отражении  $p$ -поляризованного излучения от нелинейного волновода.

В работе использовалось приближение плоских волн, применимость которого в случае конечных ширин световых пучков может вызвать ряд проблем (см., например, монографию [3]) для локальной керровской нелинейности, когда пучок разваливается на отдельные нити. Тем не менее многие указанные ранее эксперименты с использованием призмной связи обнаруживали бистабильность в отражении, причем результаты эксперимента находили хорошее согласие с моделью плоских волн [12,15], что может быть объяснено нелокальностью нелинейных процессов [25,26]. Это явление может особенно проявиться для таких нелинейных материалов, как, например, жидкие кристаллы или полупроводники, поскольку в наблюдаемые эффекты включаются такие диффузионные процессы, как перенос тепла или носителей заряда. Эти процессы могут оказаться существенными при исследовании оптической бистабильности в условиях возбуждения поверхностных плазмонов (см., например, в [17–20]).

Авторы искренне благодарны рецензенту за ряд ценных замечаний по работе.

## Список литературы

- [1] *Новые физические принципы оптической обработки информации: Сб. статей* / С.А. Ахманов, Н.Н. Ахмедиев, А.В. Белинский и др. Под ред. С.А. Ахманова и М.А. Воронцова. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. (Пробл. науки и техн. прогресса). С. 83.
- [2] *Гиббс Х.* Оптическая бистабильность. Управление светом с помощью света / Пер. с англ. М.: Мир, 1988.
- [3] *Розанов Н.Н.* Оптическая бистабильность и гистерезис в распределенных нелинейных системах. М.: Наука, Физматлит, 1997.
- [4] *Бойко Б.Б., Петров Н.С.* Отражение света от усиливающих и нелинейных сред. Минск: Наука и техника, 1988.
- [5] *Силин В.П.* // ЖЭТФ. Т. 53. С. 1662.
- [6] *Бойко Б.Б., Джилавдари И.З., Петров Н.С.* // ЖПС. 1975. Т. 23. С. 888.
- [7] *Каплан А.Е.* // Письма в ЖЭТФ. 1976. Т. 24. С. 132; ЖЭТФ 1977. Т. 42. № 5. С. 1710–1726.
- [8] *Колоколов А.А., Суков А.И.* // Изв. вузов. Сер. Радиофизика. 1978. Т. 21. С. 1309.
- [9] *Розанов Н.Н.* // Письма в ЖТФ. 1978. Т. 4. С. 74.
- [10] *Bosacchi B., Narducci L.M.* // Opt. Lett. 1983. V. 8. P. 324–326.

- [11] *Montemayer V.J., Deck R.T.* // J. Opt. Soc. Am. B. 1985. V. 2. P. 1010–1013.
- [12] *Haelterman M.* // Opt. Lett. 1988. V. 13. N 9. P. 791–793.
- [13] *Wysin G.M., Simon H.J., Deck R.T.* // Optical Letters. 1981. V. 6. N 1. P. 30–32.
- [14] *Smith P.W., Herman J.P., Tomlinson W.J., Maloney P.J.* // Appl. Phys. Lett. 1979. V. 35. P. 846.
- [15] *Haelterman M., Waelbroeck C.* // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 56. N 6. P. 512–514.
- [16] *Martinot P., Koster A., Laval S.* // IEEE J. Quant. Electron. 1985. QE-21. P. 1140.
- [17] *Аракелян С.М., Асланян Л.С., Григорян Г.Л. и др.* // Изв. АН СССР. Сер. Физическая. 1985. Т. 49. № 47. С. 795–800.
- [18] *Innes R.A., Sambles J.R.* // Optics Comm. 1987. V. 64. N 3. P. 288–292.
- [19] *Innes R.A., Ashworth S.P., Sambles J.R.* // Phys. Lett. A. 1989. V. 135. N 6,7. P. 357–362.
- [20] *Innes R.A., Sambles J.R.* // J. Phys.: Condens. Matter. 1989. V. 1. P. 6231–6260.
- [21] *Sprokel G.J.* // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1981. V. 68. P. 39–45.
- [22] *Сидоров Н.К.* Введение в волновую нелинейную оптику. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1991. С. 12.
- [23] *Дьяконов В.П.* Справочник по алгоритмам и программам на языке бейсик для персональных ЭВМ. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. 240 с.
- [24] *Названов В.Ф., Коваленко Д.И.* // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 14. С. 60–63.
- [25] *Vitrant G., Arlot P.* // J. Appl. Phys. 1987. V. 61. P. 4744.
- [26] *Vitrant G. et al.* // Opt. Lett. 1989. V. 14. P. 898.