

Модуляция излучения при нарушении полного внутреннего отражения с возбуждением волноводной моды

© А.И. Сидоров

Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова,
199034 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: aisidorov@newmail.ru

(Поступило в Редакцию 10 апреля 2007 г.)

Представлены результаты численного моделирования поперечного коэффициента пропускания многослойной структуры с планарным волноводом при модуляции его показателя преломления и поглощения. Показано, что оптические свойства такой структуры обладают высокой чувствительностью к изменению показателя преломления и поглощения (усиления) волноводного слоя. Проведен анализ влияния оптических и геометрических характеристик структуры на ее оптические свойства. Рассмотрена модуляция коэффициента пропускания и отражения для структуры, содержащей волновод с усиливающей средой.

PACS: 42.25.Gy, 42.79.Gn

Оптические переключатели и модуляторы излучения находят широкое применение в системах передачи и обработки оптической информации и лазерной технике. Во многих случаях, например в волоконно-оптических системах связи *WDM*-типа [1], модуляция должна осуществляться в узком спектральном интервале, соответствующем одному из спектральных каналов передачи информации. Для этих целей используются управляемые интерферометры Фабри-Перо, модуляторы на основе брэгговских и гофрированных волноводов, а также переключатели на основе фотонно-кристаллических волноводов и волноводных интерферометров Маха–Цендера [1–3].

В оптических переключателях на основе нарушения полного внутреннего отражения (НПВО) модуляция излучения, как правило, происходит в широком спектральном интервале. Однако при интерференции затухающей волны либо при возбуждении волноводной моды спектральный и угловой интервалы НПВО резко сужаются и появляется возможность спектрально-селективной модуляции излучения. В работах [4–6] было показано, что в этом случае может быть реализована эффективная модуляция излучения за счет изменения показателя преломления или поглощения диэлектрической среды, в которой затухающая волна возбуждает волноводную моду. Аналогичные эффекты возникают при НПВО в слоистых структурах, содержащих тонкие металлические пленки [7]. В этом случае возможно возбуждение как поверхностных электромагнитных, так и волноводных мод.

В настоящей работе проведен анализ оптических свойств многослойных структур, в которых НПВО сопровождается возбуждением вытекающей волноводной моды и показаны возможности таких структур для эффективного управления оптическими сигналами.

Геометрия 5-слойной структуры с НПВО показана на рис. 1. Слои 1, 3 и 5 имеют высокий показатель преломления n , слои 2 и 4 — низкий. Толщина слоев равна d_i ($i = 1–5$). Данная структура в поперечном

направлении может рассматриваться как многослойный тонкопленочный интерферометр и одновременно — в продольном направлении — как многослойный волновод *W*-типа [8]. Расчет поперечных коэффициентов пропускания и отражения такой структуры проводился стандартными методами (например, [9]), используемыми для расчета многослойных интерференционных систем. Возбуждение волноводной моды в слое 3 с высоким показателем преломления возможно при выполнении условия фазового синхронизма

$$kn_1 \sin \theta = \beta_m, \quad (1)$$

здесь $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число, λ — длина волны излучения, θ — угол падения излучения на границу слоев 1 и 2, β_m — постоянная распространения волноводной моды с индексом m ($m = 0, 1, 2, \dots$). Постоянная распространения может быть определена из характеристического уравнения, для симметричного ($n_1 = n_5, n_2 = n_4$,

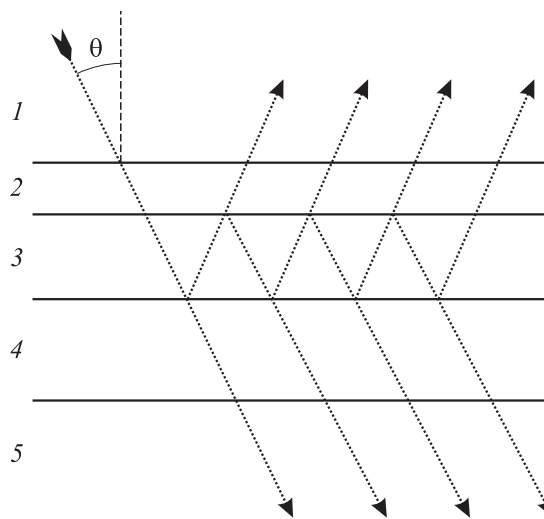


Рис. 1. Геометрия 5-слойной структуры с НПВО.

$d_2 = d_4$) 5-слойного планарного волновода, с учетом того что $n_2 < n_1$, имеет вид [8]

$$h_1 a = m\pi + \arctg\{\eta_{32}(h_2/h_1) \operatorname{tg}[\arctg(\eta_{21}h_3/h_2) + h_2(b-a)]\}. \quad (2)$$

Здесь

$$h_1 = \sqrt{k^2 \varepsilon_3 - \beta_m^2}, \quad h_2 = \sqrt{\beta_m^2 - k^2 \varepsilon_2},$$

$$h_3 = \sqrt{\beta_m^2 - k^2 \varepsilon_1}, \quad \eta_{ij} = \begin{cases} 1, & TE\text{-моды,} \\ \varepsilon_i/\varepsilon_j, & TM\text{-моды,} \end{cases}$$

$$a = d_3/2, \quad b = (d_3 + 2d_2)/2,$$

ε_i — диэлектрическая проницаемость i -го слоя.

На рис. 2, *a* показаны угловые зависимости коэффициента пропускания для $\lambda = 1.54 \mu\text{m}$ (TM -поляризация) симметричной 5-слойной структуры со следующими параметрами: $n_1 = n_3 = n_5 = 3.38$, $d_3 = 0.4 \mu\text{m}$; $n_2 = n_4 = 3.1$, $d_2 = d_4 = 0.6 \mu\text{m}$.

Из рис. 2, *a* видно, что в угловом интервале полного внутреннего отражения при $\theta = 72.8 \text{ deg}$ на зависимости возникает узкий максимум пропускания. На угловой зависимости коэффициента отражения при этом появляется соответствующий минимум отражения. Из условия фазового синхронизма (1), с учетом выражения (2), следует, что при данном угле падения выполняется условие возбуждения волноводной моды TM_0 . Благодаря малой толщине слоев 2 и 4 затухающие компоненты поля волноводной моды проникают в слои 1 и 5, что обеспечивает вытекание моды. Однако в слое 1 происходит интерференция выходящего из волновода излучения с падающим излучением. Так как эти две волны находятся в противофазе, то выход излучения из структуры возможен только в слой 5. При увеличении толщины слоя 3 до $0.6 \mu\text{m}$ условие возбуждения (1), (2) выполняется уже для двух волноводных мод — TM_0 и TM_1 . Это приводит к появлению двух максимумов пропускания при $\theta = 65.5$ и $\theta = 76.1 \text{ deg}$ (рис. 2, *b*). Первый максимум соответствует моде TM_1 , второй — TM_0 . При толщине слоя 3, превышающей $1 \mu\text{m}$, условия возбуждения мод выполняются только для мод высших порядков с $m > 1$, что является характерной особенностью волноводов W -типа [8]. Угловое и спектральное положение максимумов пропускания зависит от поляризации падающего излучения, что определяется разными условиями возбуждения мод TE и TM . В качестве примера на рис. 2, *c* показаны спектральные зависимости коэффициента пропускания для $d_3 = 9.9 \mu\text{m}$ при $\theta = 72 \text{ deg}$ для случая TE - и TM -поляризации падающего излучения.

Таким образом, в 5-слойной структуре при НПВО с возбуждением волноводной моды могут быть получены узкополосная спектральная, угловая и поляризационная селекции излучения. Количество полос пропускания такой структуры определяется количеством возбуждаемых волноводных мод.

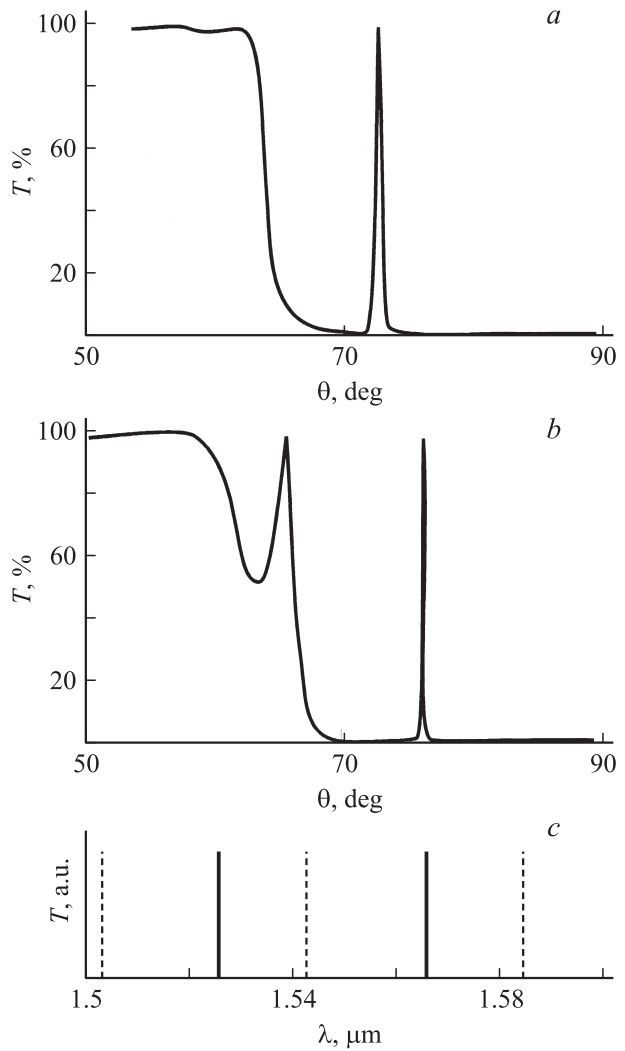


Рис. 2. *a, b* — угловые зависимости коэффициента пропускания 5-слойной структуры для TM -поляризации падающего излучения и $\lambda = 1.54 \mu\text{m}$: *a* — $d_3 = 0.4$, *b* — $0.6 \mu\text{m}$; *c* — спектральные зависимости коэффициента пропускания 5-слойной структуры для $d_3 = 9.9 \mu\text{m}$ и $\theta = 72 \text{ deg}$. TM -поляризация — сплошная линия, TE -поляризация — пунктир.

Анализ показывает, что подобные структуры обладают высокой чувствительностью к изменению показателя преломления волноводного слоя. На рис. 3 показан спектральный сдвиг полосы пропускания при изменении показателя преломления слоя 3 для асимметричной структуры со следующими характеристиками: $n_1 = n_5 = 1.7$; $n_2 = 1$, $d_2 = 0.6 \mu\text{m}$; $n_3 = 3.38$, $d_3 = 0.445 \mu\text{m}$; $n_4 = 1.35$, $d_4 = 1.3 \mu\text{m}$.

Падающее излучение имеет TM -поляризацию и $\theta = 64 \text{ deg}$. В данной структуре при указанных условиях возбуждается одна волноводная мода TM_0 , что приводит к появлению полосы пропускания со спектральной шириной по полувысоте $\Delta\lambda = 0.8 \text{ nm}$. Изменение показателя преломления слоя 3 на $\Delta n = 10^{-3}$ приводит к изменению условий фазового синхронизма и сдвигу полосы пропускания на $\Delta\lambda = 0.5 \text{ nm}$ (рис. 3, *a*). На

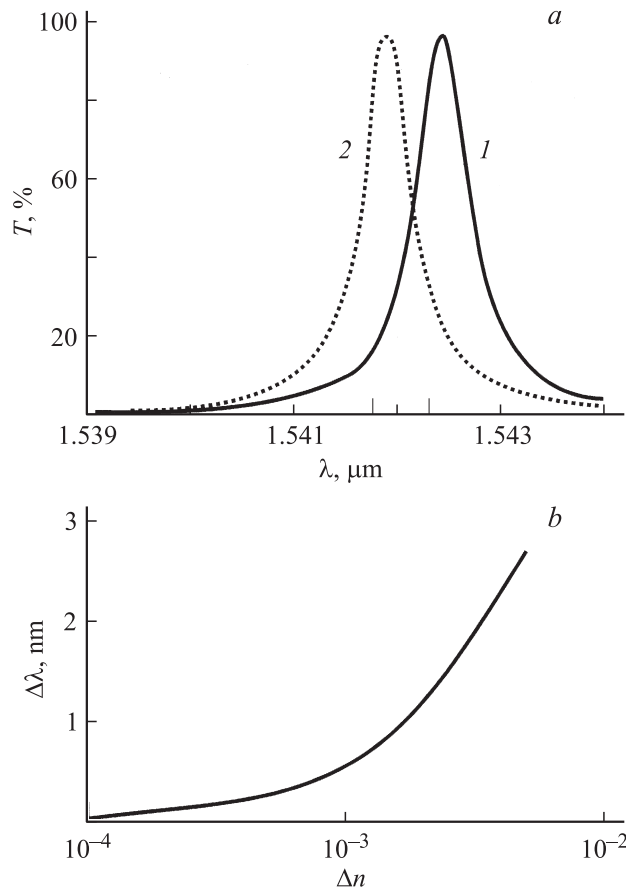


Рис. 3. *a* — спектральные зависимости коэффициента пропускания для 5-слойной структуры: *1* — $\Delta n = 0$, *2* — 10^{-3} ; *b* — зависимость спектрального сдвига полосы пропускания от изменения показателя преломления волноводного слоя 3. *TM*-поляризация, $\theta = 64$ deg.

рис. 3, *b* показана зависимость сдвига полосы пропускания от изменения показателя преломления в слое 3. Для сравнения следует отметить, что в интерферометре Фабри–Перо аналогичный спектральный сдвиг полосы пропускания может быть получен при толщине среды между зеркалами равной $150 \mu\text{m}$, т.е. в 340 раз большей, чем в рассматриваемой структуре.

Таким образом, в описанной 5-слойной структуре при возбуждении волноводной моды происходит эффективная модуляция коэффициента пропускания и отражения при изменении показателя преломления волноводного слоя. Достоинствами такой структуры являются возможность получения одной узкой спектральной полосы пропускания при использовании тонких слоев и высокая чувствительность к изменению показателя преломления волноводного слоя.

Постоянная распространения волноводной моды β зависит от характеристик всех слоев, входящих в состав структуры (см. (2)). Это позволяет оптимизировать оптические свойства структуры не только путем подбора параметров волноводного слоя 3, но и путем подбора параметров остальных слоев. На рис. 4, *a* показано влия-

ние толщины слоя 4 с низким показателем преломления ($n_4 = 1.35$) на спектральную ширину полосы пропускания и коэффициент пропускания в ее максимуме. При увеличении толщины слоя 4 полоса пропускания сужается, что связано с уменьшением возмущающего влияния слоя 5 с высоким показателем преломления на формирование волноводной моды. Зависимость $T(d_4)$ достигает максимума при $d_4 = 1.2 \mu\text{m}$. Появление максимума связано с сочетанием двух факторов. С одной стороны, увеличение d_4 способствует созданию оптимальных условий для формирования волноводной моды, что приводит к увеличению перекачки энергии из слоя 1 в 3, с другой — увеличение d_4 уменьшает электромагнитную связь между слоями 3 и 5, что снижает выход энергии в слой 5.

При наличии поглощения в волноводном слое 3 его показатель преломления становится комплексным ($n_3^* = n_3 - iK_3$), что оказывает влияние на характеристики полосы пропускания. На рис. 4, *b* показана зави-

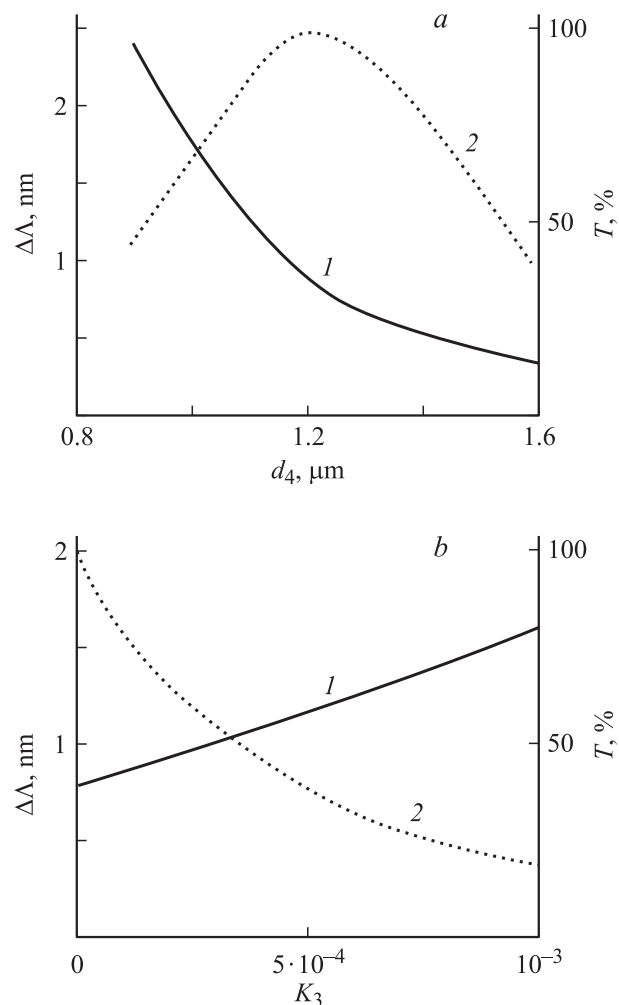


Рис. 4. *a* — влияние толщины слоя 4 в 5-слойной структуре на спектральную ширину и амплитуду полосы пропускания, *b* — влияние коэффициента поглощения в волноводном слое 3 на спектральную ширину и амплитуду полосы пропускания. *TM*-поляризация, $\lambda = 1.54 \mu\text{m}$: *1* — $\Delta\lambda$, *2* — T .

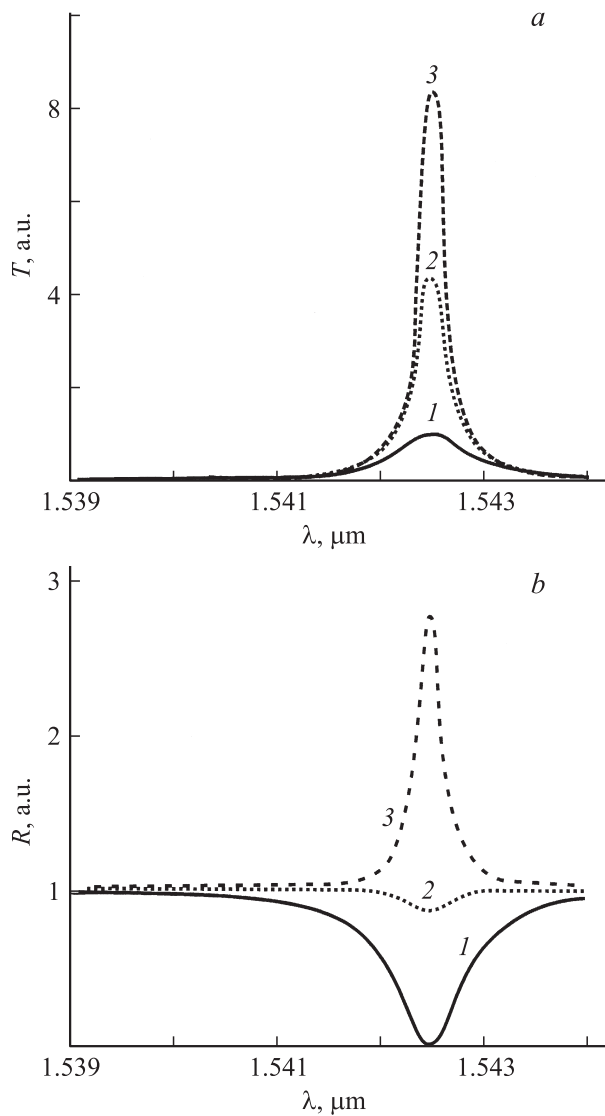


Рис. 5. Влияние коэффициента усиления g в волноводном слое 3 на спектры пропускания (a) и отражения (b) 5-слойной структуры: 1 — $g_3 = 0$, 2 — 4, 3 — 16 cm^{-1} . TM -поляризация, $\theta = 64 \text{ deg}$.

симось спектральной ширины полосы пропускания и коэффициента пропускания в ее максимуме от коэффициента поглощения K_3 в волноводном слое. Увеличение поглощения приводит к небольшому уширению полосы пропускания и существенному уменьшению коэффициента пропускания, что может быть использовано для модуляции излучения.

Практический интерес представляет случай, когда волноводный слой обладает усилением. На рис. 5 показано изменение спектров пропускания и отражения структуры при увеличении коэффициента усиления g в волноводном слое 3. Из рисунка видно, что с ростом усиления происходит уменьшение ширины полосы пропускания и отражения. При $g = 4 \text{ cm}^{-1}$ коэффициент пропускания в максимуме полосы возрастает примерно

в 4 раза, а коэффициент отражения увеличивается от нуля до 95%. При дальнейшем увеличении g коэффициент отражения может значительно превысить 100%. Очевидно, что использование данного эффекта в оптических переключателях позволяет существенно расширить их функциональные возможности.

Расширение функциональных возможностей может быть достигнуто и за счет увеличения количества волноводных слоев в структуре. На рис. 6, a показана 7-слойная структура, содержащая два волноводных слоя с высоким показателем преломления — слои 3 и 5. На рис. 6, b показаны спектры пропускания такой структуры со следующими параметрами: $n_1 = n_3 = n_5 = n_7 = 3.38$, $d_3 = d_5 = 0.4 \mu\text{m}$; $n_2 = n_4 = n_6 = 3.1$, $d_2 = d_6 = 0.6 \mu\text{m}$, $d_4 = 0.8 - 1.3 \mu\text{m}$.

Падающее излучение имеет TM -поляризацию и $\theta = 72.5 \text{ deg}$. При малом расстоянии между волноводами ($d_4 = 0.8 \mu\text{m}$) в них возникают связанные моды. При этом имеет место взаимное влияние волноводов друг на друга, приводящее к возмущению их эффективной диэлектрической проницаемости. В результате происходит изменение константы распространения моды в каждом

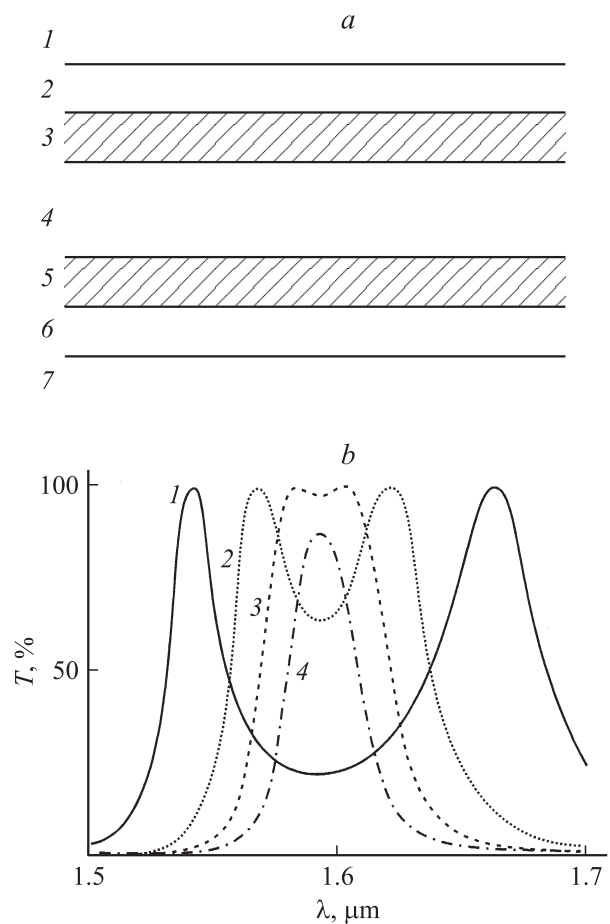


Рис. 6. a — геометрия 7-слойной структуры с двумя волноводными слоями, b — влияние толщины промежуточного слоя 4 на спектр пропускания 7-слойной структуры: 1 — $d_4 = 0.8$, 2 — 1, 3 — 1.15, 4 — $1.3 \mu\text{m}$. TM -поляризация, $\theta = 72.5 \text{ deg}$.

волноводе и спектральный сдвиг полос пропускания, соответствующих моде, формирующейся в первом волноводе, и моде, формирующейся во втором волноводе (кривая 1 на рис. 6, *b*). Увеличение расстояния между волноводами снижает их взаимное влияние, и при $d_4 = 1.3 \mu\text{m}$ две полосы пропускания сливаются в одну (кривая 4 на рис. 6, *b*). Спектральное положение этой полосы соответствует спектральному положению полосы пропускания 5-слойной структуры с аналогичными параметрами и одним волноводным слоем.

При малом расстоянии между волноводами ($d_4 \leq 1 \mu\text{m}$) изменение показателя преломления в одном из волноводов приводит к одновременному и равному спектральному сдвигу каждой полосы пропускания. Зависимость спектрального сдвига от величины изменения показателя преломления аналогична приведенной на рис. 3, *b*.

Аналогичная картина возникает в 9-слойной структуре, содержащей три планарных волновода. В этом случае в спектре пропускания наблюдаются уже три полосы, причем положение центральной полосы совпадает с положением полосы пропускания структуры, содержащей один волновод. Однако поведение такой структуры при изменении показателей преломления и поглощения (усиления) в одном или всех волноводах имеет уже более сложный и неоднозначный характер и требует отдельного рассмотрения. Некоторые свойства подобных многослойных структур, состоящих из двух и более нелинейных связанных волноводов, описаны в работах [10,11] для случая чисто волноводного распространения электромагнитных волн. Взаимодействие волн в таких структурах приводит к перераспределению энергии между волноводами, зависящему от интенсивности, в частности к формированию дискретных солитонов [10].

Представленные результаты показывают, что в тонкопленочных структурах с НПВО при возбуждении волноводных мод может быть получена эффективная модуляция излучения, проходящего через структуру в поперечном направлении или отражающегося от нее. Основной особенностью и достоинством такой структуры является возможность получения одной узкой спектральной полосы пропускания (отражения) при использовании тонких слоев. При увеличении толщины волноводного слоя может быть реализована спектральная характеристика пропускания в виде последовательности эквидистантных узких полос пропускания. Структура обладает селективными свойствами по отношению к углу падения, поляризации и спектру излучения. Модуляция излучения может осуществляться за счет изменения показателя преломления волноводного слоя либо за счет изменения его коэффициента поглощения (усиления). Структуры с НПВО при возбуждении волноводной моды могут найти применение в качестве спектральных и поляризационных селекторов, а также узкополосных оптических переключателей и модуляторов излучения в интегральной оптике и системах передачи и обработки оптической информации.

Список литературы

- [1] Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи. М.: Техносфера, 2004. 495 с.
- [2] Wada O. // New J. Phys. 2004. Vol. 6. P. 183.
- [3] Tanaka Y., Sugimoto Y., Ikeda N. et al. // Appl. Phys. Lett. 2005. Vol. 86. P. 141 104.
- [4] Кинтеро С.Ф., Гутенко А.Д., Удоев Ю.П. // Опт. и спектр. 1992. Т. 73. С. 795.
- [5] Солер А.Д., Удоев Ю.П. // ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 12. С. 38.
- [6] Сидоров А.И. // Опт. журнал. 2000. Т. 67. № 2. С. 53.
- [7] Awazu K., Rockstuhl C., Fujimaki M. et al. // Opt. Express. 2007. Vol. 15. N 5. P. 2592.
- [8] Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов. М.: Мир, 1984. 512 с.
- [9] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 719 с.
- [10] Lahini Y., Mandelik D., Silberberg Y. // Opt. Express. 2005. Vol. 13. N 6. P. 1762.
- [11] Kuo C.-W., Chen S.-Y., Chen M.-H. et al. // Opt. Express. 2007. Vol. 15. N 5. P. 2499.