

04:07

Модуляция электромагнитных волн в полых микрокристаллах диоксида ванадия

© А.И. Сидоров, В.Ю. Любимов

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

(Поступило в Редакцию 27 февраля 2007 г.)

Представлены результаты численного моделирования оптических свойств микрокристаллов диоксида ванадия (VO_2) с полым внутренним каналом прямоугольной формы. Показано, что в таких микроструктурах могут распространяться электромагнитные волны в виде волноводных мод, причем фазовый переход полупроводник–металл в VO_2 приводит к существенной модуляции постоянной распространения мод. Приведены результаты расчета постоянных распространения для мод TE , TM и EH в спектральном диапазоне $0.8\text{--}1.3\ \mu\text{m}$.

PACS: 61.46.Hk, 68.70.+w

Введение

Бурное развитие нанотехнологий в последние годы инициировало многочисленные работы в области синтеза и исследования свойств микро- и нанокристаллов полупроводников. Создано большое разнообразие форм таких кристаллов в виде трубок, стержней, лент и более сложных конструкций (например, [1,2]). Многие из таких микро- и наноструктур уже нашли практическое применение в качестве актуаторов [3], нанотранзисторов [4], нанолазеров [5], светодиодов [6], химических и биосенсоров [7,8] и др.

Среди оксидов ванадия наибольший интерес в прикладном качестве имеют микро- и нанокристаллы пентоксида ванадия (V_2O_5), являющегося полупроводником, и диоксида ванадия, обладающего обратимым фазовым переходом полупроводник–металл (ФППМ) [9]. Уникальной особенностью ФППМ в VO_2 является то, что под действием лазерного импульса переход в металлическое состояние может происходить за время $100\text{--}200\ \text{fs}$ [10,11]. Разработан ряд методов синтеза микро- и наностержней из V_2O_5 и VO_2 [12,13], рассмотрены возможности использования таких структур

в качестве полевых транзисторов в наноэлектронных устройствах [14] и в качестве оптических переключателей [15].

В наших экспериментах по синтезу микроструктур из VO_2 помимо кристаллов обычного типа, в виде сплошных микростержней, впервые были получены стержневидные микрокристаллы с прямоугольной внутренней полостью (рис. 1, *a, b*). Синтез кристаллов проводился из газовой фазы в смеси гелия, кислорода и паров хлорида ванадия. Длина полых кристаллов составляет $100\text{--}200\ \mu\text{m}$, поперечное сечение — $(3\text{--}10) \times (10\text{--}20)\ \mu\text{m}$, толщина стенок — $1\text{--}2\ \mu\text{m}$. Количество полых кристаллов на подложке составляет $10\text{--}15\%$ от количества обычных стержневидных. На рис. 1, *c* показана зависимость электрического сопротивления микрокристалла от температуры. Наличие скачкообразного уменьшения сопротивления при $t = 70^\circ\text{C}$ и характерной петли гистерезиса подтверждает, что синтезированные кристаллы представляют собой VO_2 с обратимым ФППМ.

Анализ механизмов роста кристаллов данной формы выходит за рамки данной статьи. Однако уже очевидно,

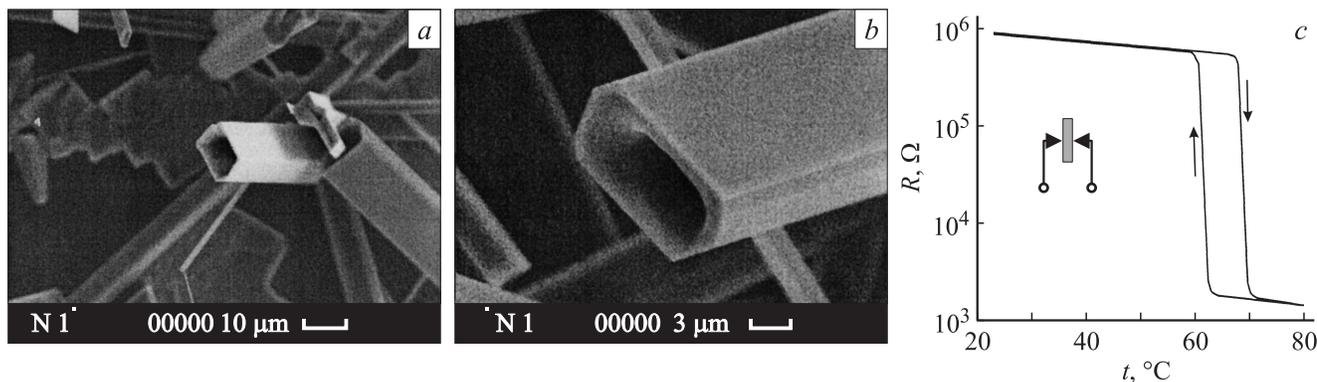


Рис. 1. *a, b* — SEM-изображения полых микрокристаллов VO_2 . Масштаб: $10\ \mu\text{m}$ (*a*) и $3\ \mu\text{m}$ (*b*); *c* — зависимость сопротивления микрокристалла VO_2 от температуры.

что такие кристаллы могут найти практическое применение в качестве оптических микрорезонаторов и волноводных оптических переключателей в устройствах интегральной оптики. Настоящая статья посвящена теоретическому анализу распространения волноводных мод в полости кристаллов VO₂ и исследованию влияния ФППМ на основную характеристику волноводных мод — постоянную распространения.

Теоретическая модель

На рис. 2, *a* показана геометрия волновода, использованного при численном моделировании. Волновод состоит из материала с поглощающими полубесконечными стенками. Данное допущение справедливо, так как в рассматриваемом спектральном диапазоне коэффициент поглощения VO₂ в полупроводниковой и металлической фазах превышает $3 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-1}$, поэтому поле электромагнитной волны практически не проникает за границы стенок волновода при их толщине более $0.2 \mu\text{m}$. Внутренняя полость волновода имеет прямоугольную форму размером $2a \times 2b$ с показателем преломления $n = 1$. Характеристическое уравнение, связывающее геометрические и материальные параметры волновода с постоянной распространения β волноводной моды, для мод TE_N и TM_N , ориентированных вдоль оси x , имеет вид [16]

$$2aq = 2 \arctg(\eta p/q) + N\pi. \quad (1)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$p = \sqrt{\beta^2 - \epsilon k^2}, \quad q = \sqrt{n^2 k^2 - \beta^2},$$

$$\eta = \begin{cases} 1 & \text{для } TE\text{-мод,} \\ n^2/\epsilon & \text{для } TM\text{-мод,} \end{cases}$$

ϵ — комплексная диэлектрическая проницаемость стенок волновода, k — волновое число ($k = 2\pi/\lambda$), λ — длина волны, $N = 0, 1, 2, \dots$

Для гибридных волноводных мод типа EH_{NM} , ориентированных преимущественно вдоль оси x , постоянная распространения может быть определена из системы характеристических уравнений [16]

$$\begin{cases} \text{tg}(2k_x a - N\pi) = \frac{2n^2 \epsilon k_x \gamma_1}{\epsilon^2 k_x^2 - n^2 \gamma_1^2}, \\ \text{tg}(2k_y b - M\pi) = \frac{2k_y \gamma_2}{k_y^2 - \gamma_2^2}, \end{cases} \quad (2)$$

где

$$\gamma_1^2 = (1 - \epsilon/n^2)k^2 - k_x^2,$$

$$\gamma_2^2 = (1 - \epsilon/n^2)k^2 - k_y^2,$$

$$\beta^2 = k^2 - k_x^2 - k_y^2,$$

$$N, M = 0, 1, 2, \dots$$

Численное моделирование проводилось в спектральном интервале $0.8\text{--}1.3 \mu\text{m}$ для волновода, имеющего

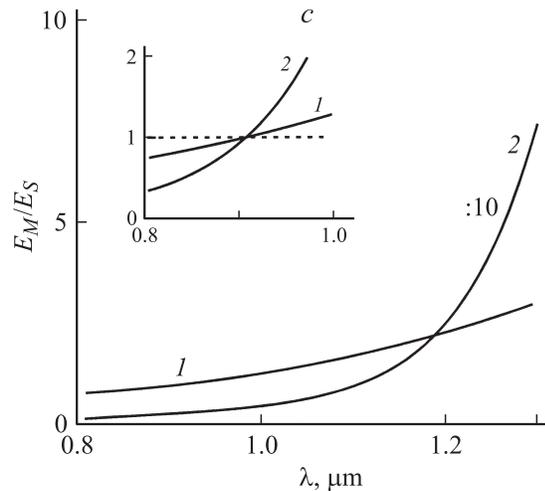
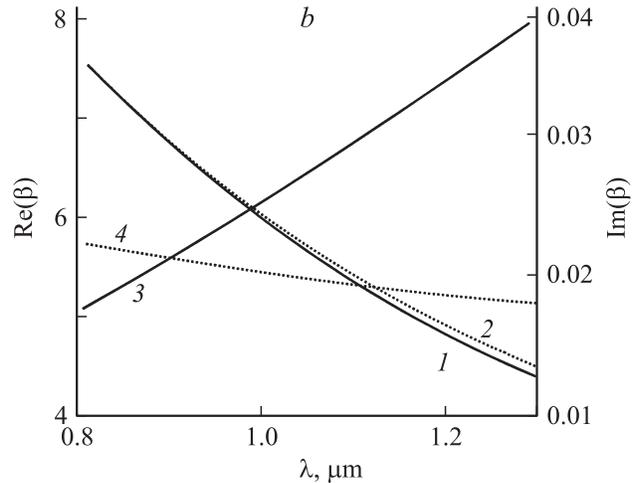
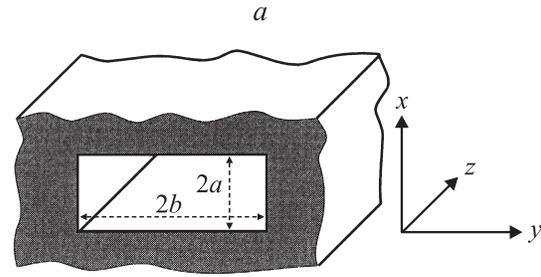


Рис. 2. *a* — геометрия полого волновода, *b* — спектральная зависимость постоянной распространения β моды TE_0 : 1, 2 — $\text{Re}(\beta)$; 3, 4 — $\text{Im}(\beta)$; 1, 3 — до ФППМ; 2, 4 — после ФППМ. *c* — спектральная зависимость коэффициента модуляции $K = E_M/E_S$ для волновода длиной $100 \mu\text{m}$; 1 — TE_0 , 2 — TE_1 . На вставке — начальный участок зависимости.

размеры внутренней полости $2a \times 2b = 3 \times 6 \mu\text{m}$. При расчетах использовались оптические константы VO₂ в полупроводниковой и металлической фазах с учетом их дисперсии [17]. Ниже приведены комплексные показатели преломления ($n^* = n - ik$) VO₂ на границах спектрального диапазона для полупроводниковой (S) и

металлической (M) фаз

$$\lambda = 0.8 \mu\text{m} : n^*(S) = 2.87 - i0.47 \rightarrow n^*(M) = 1.8 - i0.81,$$

$$\lambda = 1.3 \mu\text{m} : n^*(S) = 3.1 - i0.4 \rightarrow n^*(M) = 2 - i3.$$

Изменение объема кристалла VO_2 при ФППМ, составляющее примерно 1%, при численном моделировании не учитывалось.

Обсуждение результатов

На рис. 2, *b* показаны расчетные спектральные зависимости действительной и мнимой частей постоянной распространения β моды TE_0 для VO_2 -волновода до и после ФППМ. Отметим, что действительная часть постоянной распространения отвечает за фазовую скорость V_p волноводной моды: $V_p = ck/\text{Re}(\beta)$ (c — скорость света в вакууме), а мнимая часть — за затухание моды: $E(x, y, z) = E(x, y) \exp[-\text{Im}(\beta)z]$ (E — амплитуда электрической компоненты поля волноводной моды). Из рисунка видно, что $\text{Re}(\beta)$ при ФППМ увеличивается. Однако изменение $\text{Re}(\beta)$ мало и не превышает 10% при $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$. Изменение мнимой части β носит более сложный характер: при $\lambda < 0.9 \mu\text{m}$ $\text{Im}(\beta)$ при ФППМ увеличивается, а при $\lambda > 0.9 \mu\text{m}$ — уменьшается. Это связано с тем, что VO_2 , находящийся в металлической фазе, является в „оптическом“ смысле металлом ($\text{Re}(\epsilon) < 0$) только для длин волн, превышающих $1 \mu\text{m}$. Поэтому для $\lambda < 1 \mu\text{m}$ переход VO_2 в металлическую фазу приводит только к увеличению поглощения в стенках волновода, но не приводит к качественному изменению характера отражения волны от стенок волновода и характера распространения волноводной моды.

Таким образом, полый волновод из микрокристалла VO_2 , обладающего ФППМ, позволяет осуществлять как фазовую, так и амплитудную модуляцию волноводной TE -моды. В зависимости от длины волны при ФППМ может происходить как уменьшение коэффициента пропускания волновода (при $\lambda < 0.9 \mu\text{m}$), так и его увеличение (при $\lambda > 0.9 \mu\text{m}$). При увеличении длины волны для $\lambda > 0.9 \mu\text{m}$ и индекса моды происходит увеличение коэффициента модуляции $K = E_M/E_S$ (E_M, E_S — амплитуды электромагнитной волны на выходе волновода до и после ФППМ соответственно). Это подтверждают спектральные зависимости E_S/E_M для мод TE_0 и TE_1 волновода длиной $100 \mu\text{m}$, показанные на рис. 2, *c*. При $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ коэффициент модуляции для моды TE_0 равен 2.6, в то время как для моды TE_1 он превышает 70. На длине волны $0.8 \mu\text{m}$ коэффициент модуляции равен 0.7 и 0.25 для мод TE_0 и TE_1 соответственно. Отметим, что вблизи $\lambda = 0.9 \mu\text{m}$ амплитудная модуляция TE -мод при ФППМ, независимо от их индекса, отсутствует.

Качественно иная картина наблюдается для TM -мод. На рис. 3 показаны спектральные зависимости $\text{Re}(\beta)$ и $\text{Im}(\beta)$ для моды TM_0 до и после ФППМ. Фазовый переход в металлическое состояние материала волновода приводит к значительному (на несколько порядков)

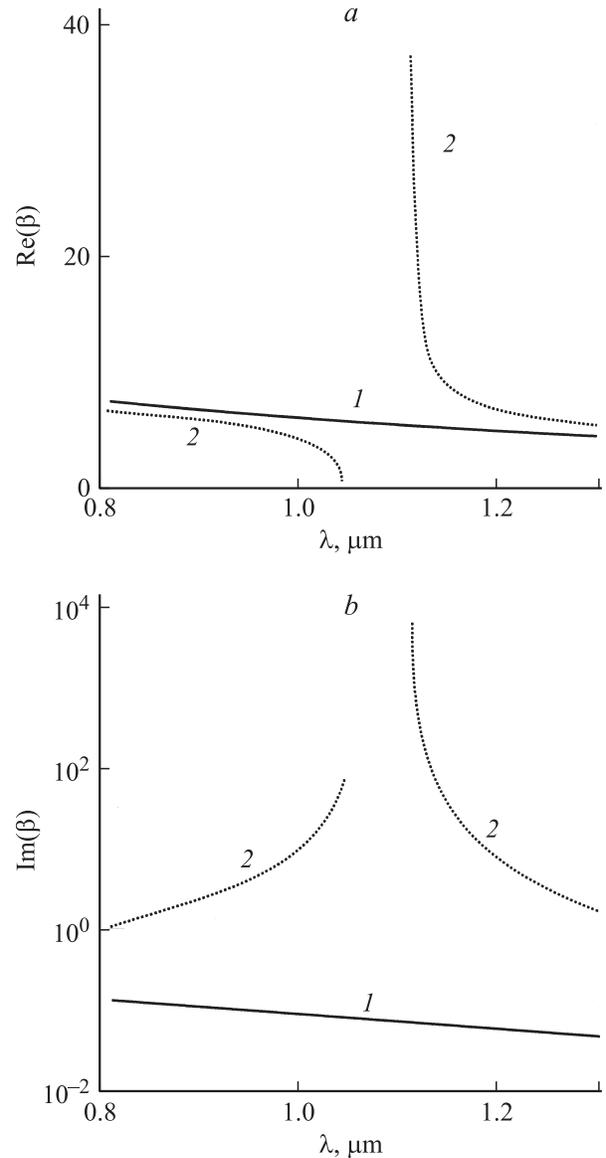


Рис. 3. Спектральная зависимость постоянной распространения β моды TM_0 . *a* — $\text{Re}(\beta)$; *b* — $\text{Im}(\beta)$; 1 — до ФППМ, 2 — после ФППМ.

изменению действительной и мнимой частей постоянной распространения вблизи $\lambda = 1.1 \mu\text{m}$. При этом знак изменения $\text{Re}(\beta)$ зависит от длины волны, а изменение $\text{Im}(\beta)$ происходит в сторону увеличения во всем спектральном интервале. Данный эффект связан с тем, что в полом металлическом волноводе TM_0 -мода, как правило, существует в виде поверхностной электромагнитной волны, сосредоточенной вблизи стенки волновода [16]. Такая трансформация моды существенно влияет как на ее фазовую скорость, так и на затухание. Аналогичные эффекты происходят и для TM -мод с $N \geq 1$. Однако по мере увеличения индекса моды они проявляются все более слабо, так как доля энергии моды, находящейся в виде поверхностной электромагнитной волны, уменьшается с увеличением индекса. Таким образом, полый VO_2 -волновод для TM -мод позволяет получить существенно

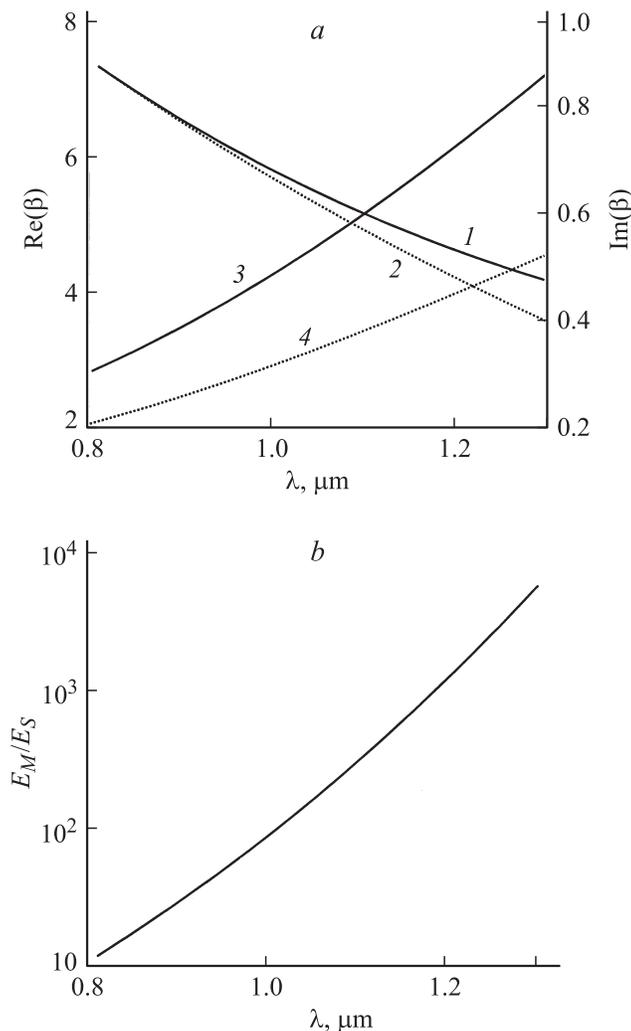


Рис. 4. *a* — спектральная зависимость постоянной распространения β моды EH_{00} : 1, 2 — $Re(\beta)$; 3, 4 — $Im(\beta)$; 1, 3 — до ФППМ; 2, 4 — после ФППМ. *b* — спектральная зависимость коэффициента модуляции для моды EH_{00} в волноводе длиной $50 \mu m$.

большие фазовую и амплитудную модуляции, чем для TE -мод. Наиболее сильно это проявляется в спектральном интервале $1-1.2 \mu m$.

На рис. 4, *a* показаны расчетные спектральные зависимости действительной и мнимой частей постоянной распространения β для гибридной моды EH_{00} . Из рисунка видно, что ФППМ в этом случае приводит к модуляции компонент постоянной распространения во всем рассматриваемом спектральном интервале, причем переход VO_2 -волновода в металлическое состояние сопровождается уменьшением $Re(\beta)$ и $Im(\beta)$. Модуляция β увеличивается с увеличением длины волны. На рис. 4, *b* показана спектральная зависимость коэффициента модуляции волноводной моды EH_{00} при ФППМ для VO_2 -волновода длиной $50 \mu m$. Переход VO_2 -волновода в металлическое состояние приводит к увеличению пропускания в 10 раз для $\lambda = 0.8 \mu m$ и более чем в 10^3 раз — для $\lambda = 1.3 \mu m$.

Следует отметить, что для исходного полупроводникового состояния волновода затухание EH -мод значительно больше, чем затухание TE -мод (ср. рис. 2, *b* и 4, *a*). Таким образом, и в случае гибридных мод обратимый ФППМ в VO_2 -волноводе позволяет получить эффективные фазовую и амплитудную модуляции оптического сигнала, распространяющегося по волноводу.

Результаты расчетов, приведенные выше, показывают, что волновод на основе полого микрокристалла VO_2 в качестве волноводного оптического переключателя может выполнять следующие функции.

1. Амплитудная модуляция. В зависимости от типа моды (для TE -мод — и от длины волны) переход волновода в металлическое состояние может приводить как к увеличению коэффициента пропускания волновода, так и к его уменьшению.

2. Модуляция фазовой скорости волны. Наиболее эффективная фазовая модуляция может быть получена для TM -мод.

3. Управляемая спектральная селекция. Сильная зависимость коэффициента модуляции от длины волны имеет место для всех типов мод. Однако наиболее эффективная спектральная селекция может быть получена для мод TE и TM .

4. Управляемая модовая селекция. Такая функция оптического переключения может быть реализована благодаря тому, что коэффициент модуляции VO_2 -волновода существенно зависит от типа моды.

Рассмотрим кратко возможные способы управления VO_2 -волноводом при использовании его в качестве оптического переключателя. Переключение полого микрокристалла VO_2 в металлическое состояние может осуществляться путем его нагрева до температуры фазового перехода, например, с помощью электрического тока. При этом управляющий сигнал может подаваться либо непосредственно на микрокристалл, либо на пленочный микронагреватель, находящийся в тепловом контакте с микрокристаллом. Наличие гистерезиса позволяет запоминать состояние микрокристалла. Оценка показывает, что при электрическом управлении энергозатраты на переключение полого микрокристалла VO_2 длиной $100 \mu m$ из полупроводникового в металлическое состояние составляет $10-50 nJ$ в зависимости от исходной температуры кристалла. Однако с учетом инерционности тепловых процессов скорость переключения при таком способе управления может составлять лишь единицы—десятки наносекунд. Более высокое быстродействие может быть получено при оптическом управлении микрокристаллом излучением с $h\nu > E_g$ (E_g — ширина запрещенной зоны VO_2 в полупроводниковом состоянии). Для этого может быть использован внешний управляющий оптический сигнал либо оптический сигнал, распространяющийся по тому же волноводу. Длина волны управляющего оптического сигнала может совпадать с длиной волны управляемого сигнала. В этом случае управляющему сигналу должна соответствовать мода, имеющая высокий коэффициент поглощения (например — TM_0). Наконец, переключение VO_2 -волновода

может осуществляться непосредственно управляемым оптическим сигналом. При оптическом управлении время переключения волновода из полупроводникового в металлическое состояние может быть менее 1 ps.

Заключение

Представленные результаты показывают, что обратимый фазовый переход полупроводник–металл в полых микрокристаллах диоксида ванадия может приводить к фазовой и амплитудной модуляции электромагнитных волн, распространяющихся внутри полости. Эффективность модуляции зависит от длины волны и типа волноводной моды. Это позволит управлять не только фазой и амплитудой волны, но также спектральным и модовым составом оптического сигнала. Волноводные оптические переключатели на основе полых микрокристаллов VO_2 -волновода могут найти применение в системах передачи и обработки оптической информации.

Авторы выражают благодарность А.В. Нащекину за получение *SEM*-изображений полых микрокристаллов VO_2 .

Список литературы

- [1] Zhong L.W. // Adv. Mater. 2003. Vol. 15. P. 432.
- [2] He F.-Q., Zhao Y.-P. // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 88. P. 193 113.
- [3] Sampathkumar A., Murray T.W., Ekinici K.L. // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 88. P. 223 104.
- [4] Sun B., Sirringhaus H. // Nano Lett. 2005. Vol. 5. N 1. P. 2408.
- [5] Yang H.Y., Lan S.P., Yu S.F. et al. // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 89. P. 11 103.
- [6] Bao J., Zimmler M.A., Capasso F. // Nano Lett. 2006. Vol. 6. N 8. P. 1719.
- [7] Ponzoni A., Comini E., Sberveglieri G. et al. // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 88. P. 203 101.
- [8] Dorfman A., Kumer N., Hahn J. et al. // Langmuir. 2006. Vol. 22. P. 4890.
- [9] Bruckner W., Opperman H., Reichelt W. et al. Vanadiumoxide. Berlin: Adademie-Verlag, 1983.
- [10] Becker M.F., Buckman A.B., Walser R.M. et al. // J. Appl. Phys. 1996. Vol. 79. P. 2404.
- [11] Cavallieri A., Toth C., Sidors C.W. et al. // Phys. Rev. Lett. 2001. Vol. 87. P. 237 401.
- [12] Park S.J., Ha J.S., Chang Y.J. et al. // Chem. Phys. Lett. 2004. Vol. 390. P. 199.
- [13] Li B., Xu Y., Rong G. et al. // Nanotechnology. 2006. Vol. 17. P. 2560.
- [14] Kim G.T., Muster J., Krstic V. et al. // Appl. Phys. Lett. 2000. Vol. 76. P. 420.
- [15] Rini M., Cavalleri A., Schoenlein R.W. et al. // Opt. Lett. 2005. Vol. 30. N 5. P. 558.
- [16] Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов. М.: Мир, 1984. 512 с.
- [17] Tazawa M., Jin P., Tanemura S. // Appl. Opt. 1998. Vol. 37. N 10. P. 1858.