

ФИЗИЧЕСКАЯ ОПТИКА

УДК 681.7.068

МОДУЛЯЦИЯ ЗАТУХАНИЯ ВОЛНОВОДНЫХ МОД В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ С ПОКРЫТИЕМ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ВАНАДИЯ

© 2013 г. Д. С. Агафонова*, аспирант; В. К. Грунин*, канд. техн. наук;
А. И. Сидоров**, доктор физ.-мат. наук

* Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ”,
Санкт-Петербург

** Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: aisidorov@qip.ru

Представлены результаты экспериментального и теоретического исследований оптических характеристик волокон из силикатных стекол с покрытиями в виде поликристаллической пленки или наночастиц диоксида ванадия в диапазоне длин волн 0,8–1,8 мкм. Показано, что изменение оптических свойств покрытия при изменении температуры приводит к эффективной модуляции затухания оптического сигнала в волокне. Глубина модуляции у волокон с нанокompозитным покрытием в 3–4 раза выше, чем у волокон с пленочным покрытием. Это обусловлено наличием плазмонного резонанса у наночастиц диоксида ванадия в металлической фазе.

Ключевые слова: волокно с покрытием, модуляция излучения, фазовый переход, диоксид ванадия.

Коды OCIS: 060.2290, 060.2370

Поступила в редакцию 24.04.2012

Введение

Диоксид ванадия (VO_2) – материал, обладающий обратимым фазовым переходом (ФП) полупроводник–металл, при котором происходит резкое и обратимое изменение его оптических и электрических свойств. Это является причиной пристального внимания исследователей к данному материалу и его применения в оптике и электронике. Поликристаллические пленки VO_2 нашли применение в электронных устройствах [1], в визуализаторах инфракрасного (ИК) излучения [2], нелинейно-оптических ограничителях излучения [3], в качестве сред для записи голограмм [4], в зеркалах с управляемым коэффициентом отражения [5]. Скорость ФП, вызванного изменением температуры, невелика и определяется тепловой инерционностью. В то же время, фотоиндуцированный ФП в VO_2 может происходить за 100–200 фс [6–8], что открывает

перспективу для создания быстродействующих оптических переключателей на основе этого диоксида.

Многие из оксидов ванадия обладают ФП, однако у большинства из них температура ФП лежит в области криогенных температур [1]. С практической точки зрения наиболее удобным является именно VO_2 с критической температурой 67 °С монокристалла [1]. В ряде работ [9–11] исследованы петли гистерезиса температурных зависимостей показателя преломления и коэффициента поглощения поликристаллических пленок VO_2 и установлена их чувствительность к структуре пленки. Показано, что в поликристаллических пленках диоксида ванадия петли гистерезиса размыты ввиду того, что пленки состоят из набора кристаллитов, обладающих собственной петлей гистерезиса. В последние годы возрастает интерес к композитным средам с наночастицами VO_2 , обусловленный возможностью ва-

рыирования их оптических свойств в широких пределах. Для наночастиц VO_2 в металлической фазе характерен плазмонный резонанс, лежащий в ближнем ИК диапазоне. Это приводит к увеличению изменения пропускания композитной среды при ФП и к более интенсивному нелинейно-оптическому отклику среды [8, 12–15].

Целью данной работы является исследование распространения волноводных мод в оптических волокнах с покрытиями в виде поликристаллической пленки и наночастиц VO_2 и влияния ФП в VO_2 на модуляцию оптического сигнала.

Методика эксперимента

В работе использовались многомодовые волокна без оболочки диаметром 200 мкм из оптических стекол К8 и ТФ5. Пленочные покрытия из VO_2 изготавливались на волокнах из стекла К8. Для этого на волокно наносился слой водного раствора оксалата ванадила $\text{VO}^{+2}(\text{C}_2\text{O}_4)^{-2}$. После высушивания этого слоя проводился отжиг волокна в атмосфере азота при температуре 320 °С в течение получаса. В результате термического разложения оксалата ванадила на волокне формировалась поликристаллическая пленка VO_2 толщиной 5 мкм.

Волокна с покрытием из наночастиц VO_2 изготавливались из стекла ТФ5. Предварительно в приповерхностном слое волокна формировался нанопористый слой путем травления в 6%-ном водном растворе азотной кислоты в течение получаса. Толщина нанопористого слоя составляла 2–3 мкм, средний размер пор – 5–6 нм. Затем поры заполнялись водным раствором оксалата ванадила, проводились сушка и отжиг. В результате в порах формировались наночастицы VO_2 со средним размером менее 5 нм, изолированные друг от друга стенками пор.

Для измерения коэффициента пропускания волокон использовались излучения непрерывных полупроводниковых лазеров с длинами волн 980 нм (KLM-980-5-5) и 1550 нм (Thorlabs S3FC1550). Для контроля мощности излучения лазеров часть пучка излучения отводилась с помощью полупрозрачного зеркала на опорный фотоприемник. В качестве фотоприемников на длине волны 980 нм использовался кремниевый фотодиод ФД-24К, на длине волны 1550 нм – InGaAs-фотодиод PD-1180.

Результаты и обсуждение

Экспериментальные результаты

Результаты оптических измерений показаны на рис. 1, 2. Из рисунков видно, что в интервале температур 55–70 °С происходит снижение коэффициента пропускания волокон, обусловленное повышением коэффициента поглощения VO_2 при его переходе из полупроводниковой в металлическую фазу. Температурный интервал ФП шире по сравнению с аналогичным интервалом в монокристаллах VO_2 из-за разброса размеров кристаллитов VO_2 в пленке и нанокристаллов VO_2 в нанопористом слое. На температурных зависимостях (рис. 1, 2) проявляется гистерезис, который характерен и для ФП в кристаллическом VO_2 . Ширина петли гистерезиса изменяется от 5 до 15 °С.

Сравнение оптических характеристик исследованных волокон и их изменения при ФП

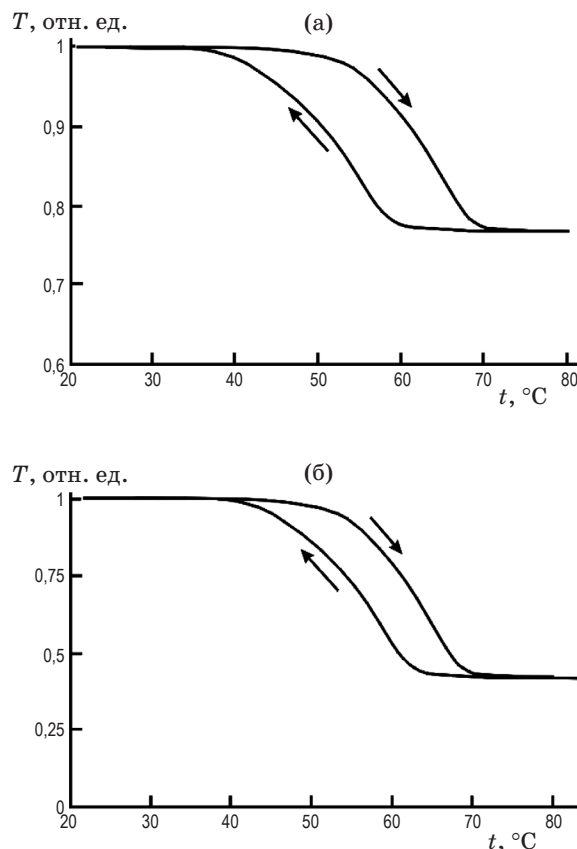


Рис. 1. Температурные зависимости относительного коэффициента пропускания волокон с пленочным покрытием из VO_2 при $\lambda = 980$ нм (а) и $\lambda = 1550$ нм (б). Стрелки указывают нагревную и охлаждающую ветви температурной петли гистерезиса.

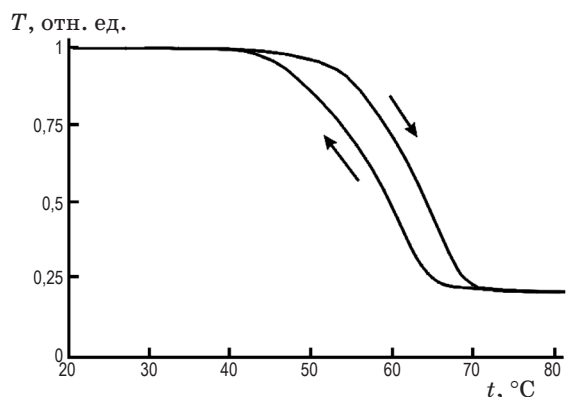


Рис. 2. Температурная зависимость относительного коэффициента пропускания волокна с нанопористым покрытием, содержащим наночастицы VO_2 , при $\lambda = 980$ нм. Стрелки указывают нагревную и охлаждающую ветви температурной петли гистерезиса.

представлено в таблице. Сигнал фотоприемника в отсутствие ФП (при комнатной температуре) характеризует ослабление оптического сигнала в волокне при нахождении VO_2 в полупроводниковой фазе. Из данных таблицы следует, что до наступления ФП у волокон с покрытием из пленки VO_2 увеличение длины волны излучения приводит к снижению оптических потерь. Это связано с уменьшением коэффициента поглощения VO_2 в полупроводниковой фазе при увеличении длины волны [16]. Ослабление оптического сигнала на длине волны 980 нм в волокне, покрытом наночастицами VO_2 , до ФП приблизительно в 2,8 раза меньше, чем в волокне с пленочным покрытием. Причиной этого является меньшая концентрация наночастиц VO_2 в нанопористом слое, чем кристаллитов VO_2 в пленочном покрытии. Поэтому коэффициент поглощения нанокompозитного слоя ниже, чем коэффициент поглощения сплошной пленки VO_2 .

Ослабление оптического сигнала и коэффициент модуляции при ФП в волокне с по-

крытием из поликристаллической пленки VO_2 возрастают при увеличении длины волны излучения. Это вызвано ростом изменения коэффициента поглощения VO_2 при переходе из полупроводниковой в металлическую фазу при увеличении длины волны. Данные таблицы показывают, что волокна, покрытые наночастицами VO_2 , имеют существенно больший коэффициент модуляции, чем волокна с пленочным покрытием.

Таким образом, эксперименты показали, что оптические волокна с покрытием из поликристаллической пленки или наночастиц VO_2 позволяют эффективно модулировать оптические сигналы ближнего ИК диапазона за счет ФП в VO_2 . Волокна с покрытием из наночастиц имеют меньшие оптические потери в отсутствие ФП и больший коэффициент модуляции при ФП по сравнению с волокнами с пленочным покрытием.

Результаты численного моделирования

Целью численного моделирования было выяснение причин более эффективной модуляции волноводных мод в волокнах с покрытием из наночастиц VO_2 . При моделировании использовались спектральные зависимости комплексной диэлектрической проницаемости и коэффициента поглощения VO_2 полупроводниковой и металлической фаз из работы [16].

В исследованных волокнах наночастицы размещались в оболочке волокна, представляющей собой нанопористый слой с каркасом из кварцевого стекла. Для описания оптических свойств такой нанокompозитной среды удобно использовать модель эффективной среды, справедливую для частиц, имеющих размер много меньший длины волны [17]. Если композит образован поглощающими сферическими включениями, не имеющими электромагнитного взаимодействия между собой, то его эффективная диэлектрическая проницаемость ϵ_{eff} может быть определена из формулы М. Гарнета [17]

Сравнительные оптические характеристики волокон и их изменение при ФП

| Тип покрытия волокна | Длина волны, нм | Сигнал фотоприемника до ФП, мВ | Ослабление сигнала после ФП, дБ | Коэффициент модуляции при ФП |
|---------------------------|-----------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| Пленка VO_2 | 980 | 47 | 1 | 1,3 |
| Пленка VO_2 | 1550 | 75 | 3,5 | 2,2 |
| Наночастицы VO_2 | 980 | 130 | 7 | 5 |

$$\frac{\varepsilon_{\text{eff}} - \varepsilon_h}{\varepsilon_{\text{eff}} + 2\varepsilon_h} = f \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_h}{\varepsilon_p + 2\varepsilon_h}, \quad (1)$$

где ε_p , ε_h – диэлектрические проницаемости наночастицы и матрицы соответственно, f – объемный фактор заполнения, определяемый отношением суммарного объема всех наночастиц к общему объему среды. Формула (1) справедлива для небольших значений объемной доли включений [18]; при расчете принято $f = 0,05$.

Распространение излучения в волокнах с нанокompозитным покрытием исследовалось путем определения постоянных распространения волноводных ТЕ и ТМ мод в рамках модели планарного трехслойного симметричного оптического волновода [19], поскольку общие закономерности распространения данного типа мод будут справедливы и для симметричной аксиальной структуры. Предполагалось, что непоглощающую сердцевину волновода толщиной $2a$ с показателем преломления n_1 с двух сторон окружают полубесконечные оболочки из композитного материала с комплексной эффективной диэлектрической проницаемостью ε_2 .

Для определения продольных постоянных распространения волноводных мод решалось характеристическое уравнение [19]

$$2aq = 2a \operatorname{arctg} \left(\frac{\delta_{12} p}{q} \right) + N\pi, \quad (2)$$

где N – номер моды ($N = 0, 1, 2, \dots$) и

$$\delta_{12} = \begin{cases} 1 & \text{для ТЕ мод} \\ n_1^2/\varepsilon_2 & \text{для ТМ мод} \end{cases}, \quad (3)$$

$$q^2 = n_1^2 k^2 - \beta^2, \quad p^2 = \beta^2 - \varepsilon_2 k^2.$$

В выражении (3) $\beta = \beta_r + i\beta_i$ – искомая продольная постоянная распространения, которая становится комплексной при учете поглощения в оболочке волновода, k – волновое число ($k = 2\pi/\lambda$).

Для предельного случая $ka \rightarrow \infty$ могут быть получены приближенные решения характеристического уравнения (2) [20]

$$\beta_r = n_1 k \left[1 - \frac{\pi^2}{2n_1^2} \left(\frac{N+1}{2ak} \right)^2 \times \left[1 - \frac{2}{ak} \operatorname{Re} \left(\frac{1}{\delta_{12} \sqrt{n_1^2 - \varepsilon_2}} \right) \right] \right], \quad (4)$$

$$\beta_i = \left(\frac{N+1}{2} \right)^2 \frac{\pi^2}{a^3 k^2 n_1} \operatorname{Im} \left(\frac{1}{\delta_{12} \sqrt{n_1^2 - \varepsilon_2}} \right). \quad (5)$$

Следует отметить, что для покрытия из VO_2 в металлической фазе приближенные выражения (4) и (5) не применимы для мод TM_0 и TM_1 , что в данном случае обусловлено формированием плазмонных поверхностных волн на границе раздела оболочки и сердцевины [19].

При расчете эффективной диэлектрической проницаемости композитного слоя использовались оптические константы VO_2 и эффективный показатель преломления n_g нанопористого стекла. Согласно результатам работы [21] $n_g = n_m V_m + n_f V_f$, где $n_m = 1,53$ [22] и $n_f = 1$ – показатели преломления каркаса и наполнителя свободного пространства соответственно, а V_m и V_f – их относительные объемы. Для нанопористого стекла с кварцевым каркасом и свободным объемом пор 30% $n_g = 1,37$.

На рис. 3 представлены расчетные дисперсионные кривые действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости композита, коэффициента поглощения композита полупроводниковой и металлической фаз, а также относительного изменения коэффициента поглощения.

Расчет показал, что поглощение композита более чем на порядок меньше по сравнению с поглощением пленки VO_2 . Это объясняет снижение затухания оптического сигнала при переходе от волокна с пленочным покрытием к волокну с покрытием из наночастиц. В области 1,1 мкм наблюдается максимум поглощения наночастиц в металлической фазе (кривая б, рис. 3б). Появление максимума обусловлено плазмонным резонансом [23], который возникает в наночастицах VO_2 в металлической фазе [15]. В спектральной области плазмонного резонанса это приводит к значительному увеличению отношения коэффициентов поглощения в металлической и полупроводниковой фазе α_M/α_S композита по сравнению с поликристаллической пленкой. Дальнейший рост α_M/α_S при увеличении длины волны вызван ростом изменения коэффициента поглощения VO_2 при переходе в металлическую фазу. Так у композита отношение α_M/α_S составляет в среднем по спектру 12 (максимум 22), у пленки – в среднем по спектру 5 (максимум 14) в диапазоне длин волн 0,8–1,8 мкм. Данные результаты позволяют объяснить увеличение эффективности модуляции оптического сигнала в волокнах с покрытием из композита с наночастицами VO_2 .

Из выражений (4), (5) были найдены значения продольных постоянных распространения

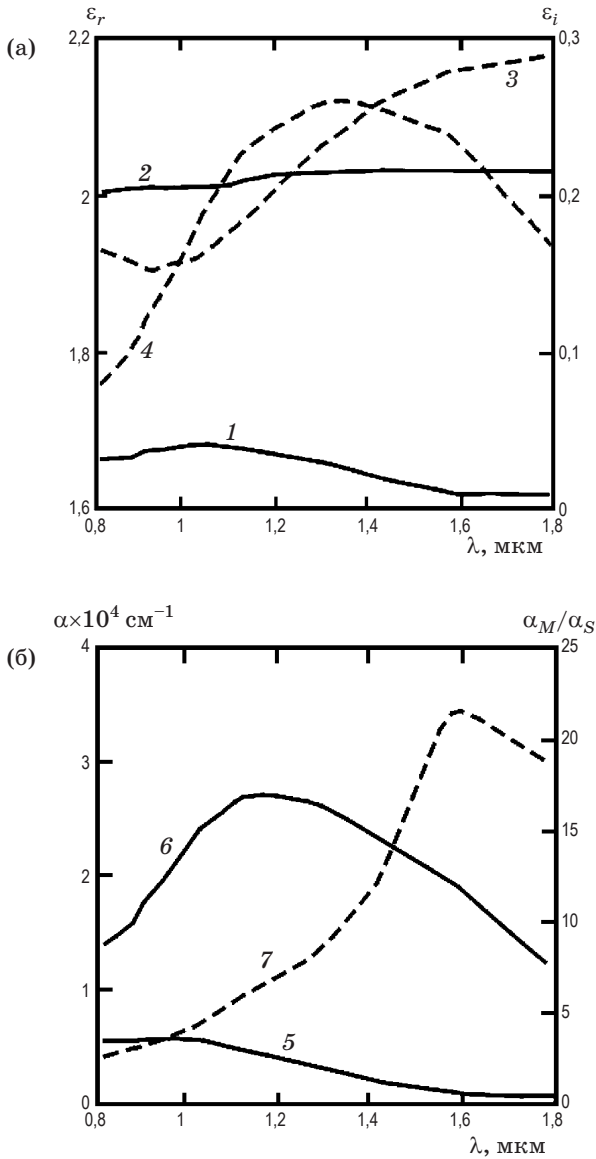


Рис. 3. Спектральные зависимости диэлектрической проницаемости ϵ (а) и коэффициента поглощения α (б) композита с наночастицами VO_2 до и после ФП. 1, 2, 5 – полупроводниковая фаза, 3, 4, 6 – металлическая фаза. 2, 3 – ϵ_r , 1, 4 – ϵ_i . 5, 6 – α , 7 – α_M/α_S .

волноводных ТЕ и ТМ мод при толщине сердцевины волновода $2a = 200$ мкм, $n_1 = 1,74$ (стекло ТФ5), $\epsilon_2 = \epsilon_{\text{eff}}$.

С точки зрения модуляции излучения при ФП представляет интерес мнимая часть постоянной распространения. Расчетные значения $\beta_i(\lambda)$ представлены на рис. 4. С увеличением номера моды происходит увеличение затухания в волноводе. Это обусловлено увеличением глубины проникновения поля электромагнитной волны в оболочку волновода и, соответственно, большим влиянием поглощения в оболочке. По этой же причине при постоян-

ном значении N затухание у ТМ мод выше. При фазовом переходе β_i возрастает более чем на порядок.

Оценим модуляцию оптического сигнала в волноводе при ФП. Мнимая часть продольной постоянной распространения отвечает за затухание моды. Выражение, описывающее амплитуду электрической компоненты поля

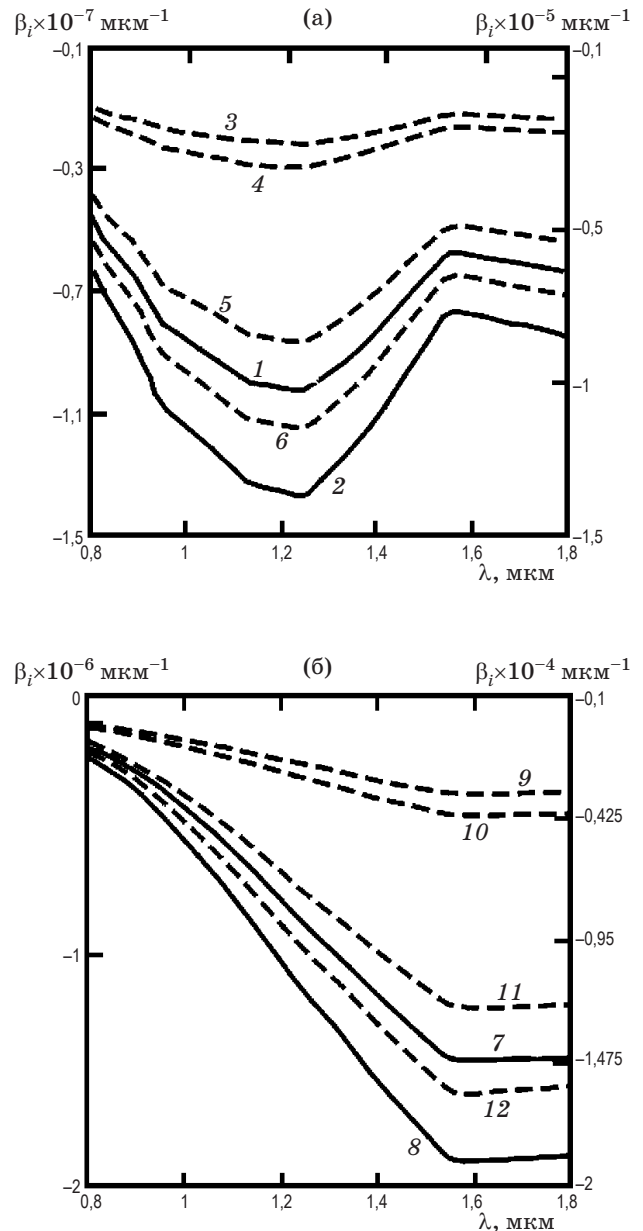


Рис. 4. Спектральные зависимости мнимой части продольной постоянной распространения ТЕ и ТМ мод в волноводе с покрытием из композита с наночастицами VO_2 до (а) и после (б) ФП (сплошные линии относятся к левой оси, штриховые – к правой). 1, 7 – TE_{10} , 2, 8 – TM_{10} , 3, 9 – TE_{50} , 4, 10 – TM_{50} , 5, 11 – TE_{100} , 6, 12 – TM_{100} .

волноводной моды в общем случае $E(x, y, z) = E(x, y)\exp(-|\beta_i|z)$, где z – координата вдоль оси волновода. Следовательно, интенсивность оптического сигнала, распространяющегося вдоль оси z , будет

$$I(x, z) = I(x, 0)\exp(-2|\beta_i|z).$$

Определим коэффициент модуляции излучения как отношение интенсивностей до и после фазового перехода

$$K = \frac{I_S}{I_M} = \exp\left[-2\left(|\beta_i^S| - |\beta_i^M|\right)z\right]. \quad (7)$$

На рис. 5 представлены расчетные значения K в диапазоне длин волн 0,8–1,8 мкм при $z = 20$ мм. Из рисунка следует, что при увеличении номера моды существенно возрастает коэффициент модуляции. Например, у моды TE_{10} $K = 1,06$, у TE_{50} $K = 3,31$, TE_{100} $K = 109$. Коэффициент модуляции растет и с увеличением длины волны. Это определяется дисперсией мнимой части постоянной распространения, вызванной в основном дисперсией оптических констант материала оболочки.

Таким образом, численное моделирование показало, что малое затухание оптического сигнала в волокне с покрытием из наночастиц VO_2 вызвано меньшим эффективным коэффициентом поглощения покрытия по сравнению с поглощением в пленке VO_2 . Увеличение модуляции оптического сигнала при ФП обусловлено наличием плазмонного резонанса у наночастиц VO_2 в металлической фазе.

Заключение

Экспериментальные и расчетные результаты показывают, что изменение оптических свойств покрытия волокна с пленочным или нанопористым покрытием на основе VO_2 при изменении температуры приводит к эффективной модуляции оптического сигнала. Экспериментально показано, что затухание оптического сигнала в волокнах с нанопористым покрытием в 2,8 раза меньше, а глубина модуляции в 3–4 раза выше по сравнению с волокнами, имеющими пленочное покрытие. Основными причинами указанных свойств являются уменьшение эффективного коэффициента поглощения покрытия по сравнению с последним пленки из VO_2 и наличие плазмонного резонанса у наночастиц VO_2 в металлической фазе.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке быстродействующих

* * * * *

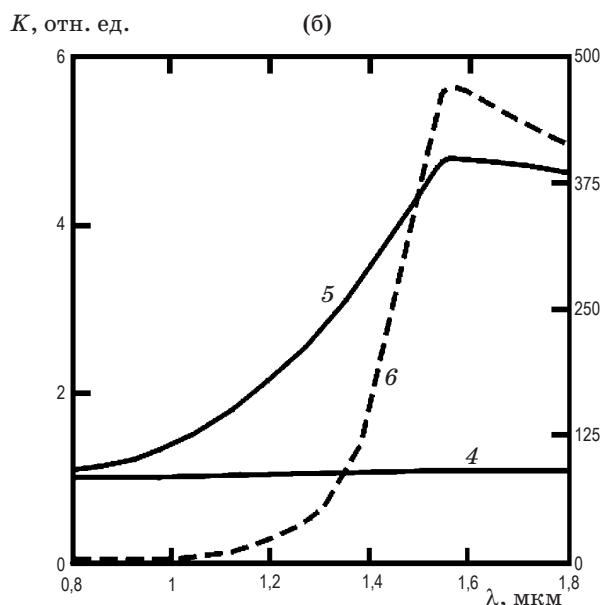
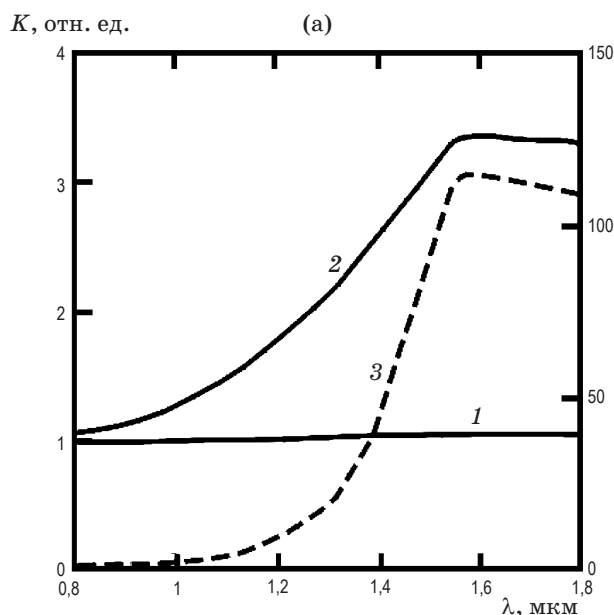


Рис. 5. Спектральные зависимости коэффициента модуляции оптического сигнала при ФП у TE (а) и ТМ (б) мод в волноводе с покрытием из композита с наночастицами VO_2 (сплошные линии относятся к левой оси, штриховые – к правой). 1 – TE_{10} , 2 – TE_{50} , 3 – TE_{100} , 4 – TM_{10} , 5 – TM_{50} , 6 – TM_{100} .

волоконных переключателей, управляемых оптическим сигналом, волоконных аттенуаторов оптического сигнала с температурным управлением, а также волоконно-оптических датчиков аварийного перегрева.

Работа выполнена при поддержке гранта для аспирантов, докторантов и молодых ученых “КЭОП-43”.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бугаев А.А., Захарченя Б.П., Чудновский Ф.А. Фазовый переход полупроводник–металл и его применение. Л.: Наука, 1979. 183 с.
2. Григорьев М.И., Олейник А.С., Смоляков В.Ф. Термохромные индикаторы на основе материала ФТИРОС // Электронная промышленность. 1982. В. 5–6. С. 108–111.
3. Данилов О.Б., Михеева О.П., Сидоров А.И., Климов В.А., Тульский С.А., Шадрин Е.Б., Ячнев И.Л. Оптическое ограничение излучения среднего ИК диапазона в пленках диоксида ванадия // ЖТФ. 2003. Т. 73. № 1. С. 79–85.
4. Бугаев А.А., Захарченя Б.П. Окисная пленка ванадия как регистрирующая среда для голографии // Квант. электрон. 1979. Т. 6. № 7. С. 1459–1465.
5. Коновалова О.П., Сидоров А.И., Шаганов И.И. Интерференционные системы управляемых зеркал на основе VO_2 для спектрального диапазона 0,6–10,6 мкм // Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 5. С. 13–21.
6. Becker M.F., Buckman A.B., Walser R.M., Lepine T., Georges P., Brun A. Femto-second laser excitation of the semiconductor-metal phase transition in VO_2 // J. Appl. Phys. 1996. V. 79. № 5. P. 2404–2408.
7. Cavalleri A., Toth C., Siders C.W., Squier J.A. Femtosecond structural dynamics in VO_2 during ultrafast solid-solid phase transition // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 87. № 23. P. 237401–237405.
8. Rini M., Cavalleri A., Schoenlen R.W., Lopez R., Feldman L.C., Haglud R.F., Boatner L.A., Haynes T.E. Photoinduced phase transition in VO_2 nanocrystals: ultrafast control of surface-plasmon resonance // Opt. Lett. 2005. V. 30. № 5. P. 558–560.
9. Алиев Р.А., Климов В.А. Влияние условий синтеза на фазовый переход металл–полупроводник в тонких пленках диоксида ванадия // ФТТ. 2004. Т. 46. № 3. С. 515–519.
10. Алиев Р.А., Андреев В.Н., Капралова В.М., Климов В.А., Соболев А.И., Шадрин Е.Б. Влияние размера зерен на фазовый переход металл–полупроводник в тонких поликристаллических пленках диоксида ванадия // ФТТ. 2006. Т. 48. № 5. С. 874–879.
11. Шадрин Е.Б., Ильинский А.В., Сидоров А.И., Ханин С.Д. Размерные эффекты при фазовых переходах в окисно-ванадиевых нанокompозитах // ФТТ. 2010. Т. 52. № 11. С. 2269–2276.
12. Lopez R., Haynes T.E., Boatner L.A., Feldman L.C., Haglud R.F. Temperature-controlled surface plasmon resonance in VO_2 nanorods // Opt. Lett. 2002. V. 27. № 15. P. 1327–1329.
13. Виноградова О.П., Обыкновенная И.Е., Сидоров А.И., Климов В.А., Шадрин Е.Б., Ханин С.Д., Хрущева Т.А. Синтез и свойства нанокристаллов диоксида ванадия в силикатных пористых стеклах // ФТТ. 2008. Т. 50. № 4. С. 734–740.
14. Остробаблина А.А., Сидоров А.И. Нелинейно-оптические свойства толстых композитных сред с наночастицами диоксида ванадия. I. Самодефокусировка излучения видимого и ближнего ИК диапазона // Оптический журнал. 2005. Т. 72. № 7. С. 36–41.
15. Сидоров А.И., Виноградова О.П., Хрущева Т.А., Обыкновенная И.Е., Ермолаева Г.И., Шилов В.Б. Оптические свойства наночастиц диоксида ванадия в нанопористых стеклах // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 1. С. 43–48.
16. Tazawa M., Jin P., Tanemura S. Optical constants of $\text{V}_{1-x}\text{W}_x\text{O}_2$ films // Appl. Opt. 1998. V. 37. № 10. P. 1858–1861.
17. Виноградов А.П. Электродинамика композитных материалов. М.: Эдиториал УРСС, 2001. 208 с.
18. Spanier J.E., Herman I.P. Use of hybrid phenomenological and statistical effective medium theories of dielectric functions to model the infrared reflectance of porous SiC films // Phys. Rev. B. 2000. V. 61. № 15. P. 10437–10449.
19. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов. М.: Мир, 1984. 512 с.
20. Katinov I.P., Mammel W.L., Weber H.P. Metal-clad optical waveguides: analytical and experimental study // Appl. Opt. 1974. V. 13. № 2. P. 396–405.
21. Андреева О.В., Обыкновенная И.Е. Нанопористые матрицы НПС-7 и НПС-17 – возможности использования в оптическом эксперименте // Наносистемы: физика, химия, математика. 2010. Т. 1. № 1. С. 37–53.
22. Кикоин И.К. Таблицы физических величин. Справочник. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
23. Климов В.В. Нанолазмоника. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 480 с.