

07

## Минимизация фазовых искажений прошедшего излучения при оптическом переключении пленки диоксида ванадия

© О.П. Михеева, А.И. Сидоров

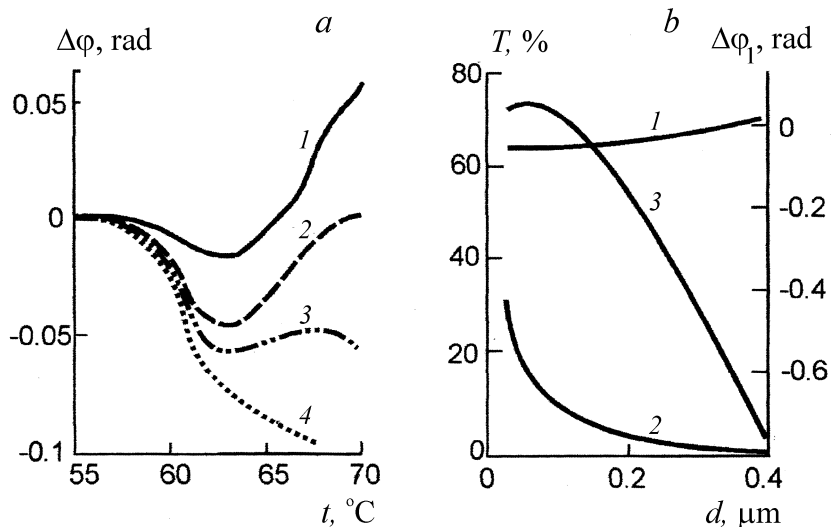
Институт лазерной физики, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 15 августа 2002 г.

Представлены результаты численного моделирования изменения фазы прошедшего излучения с длиной волны  $\lambda = 10.6$  и  $3.4 \mu\text{m}$  при переходе пленки диоксида ванадия  $\text{VO}_2$  из полупроводникового в металлическое состояние. Показано, что существуют оптимальные толщины пленки, при которых изменения фазы стремятся к нулю. Проведена минимизация фазовых искажений излучения для одиночной пленки  $\text{VO}_2$  и многослойного интерферометра с пленкой  $\text{VO}_2$ .

Поликристаллические пленки диоксида ванадия находят применение в качестве оптических переключателей и ограничителей лазерного излучения среднего ИК диапазона [1,2]. Управление интенсивностью прошедшего (или отраженного) излучения основано на сильном изменении диэлектрической проницаемости  $\text{VO}_2$  при обратимом структурном фазовом переходе (ФП) полупроводник–металл [3,4]. Увеличение показателя преломления и поглощения пленки  $\text{VO}_2$  при ФП сопровождается не только уменьшением ее коэффициента пропускания, но и сдвигом фазы прошедшего излучения. В то же время при использовании оптических переключателей и ограничителей в устройствах приема и анализа оптического сигнала часто требуется обеспечить минимальные фазовые искажения излучения, подвергнутого амплитудной обработке. Целью данной работы является изучение влияния ФП в пленке  $\text{VO}_2$  на сдвиг фазы прошедшего излучения с  $\lambda = 10.6$  и  $3.4 \mu\text{m}$  и анализ возможности минимизации этого сдвига с учетом сохранения оптимальных амплитудных характеристик оптического переключателя.

При моделировании использовались оптические константы поликристаллической пленки  $\text{VO}_2$  для  $\lambda = 3.4$  и  $10.6 \mu\text{m}$  из [1,5]. Расчет по формулам Френеля рекуррентным методом проводился как для



**Рис. 1.** *a* — температурная зависимость изменения фазы излучения, прошедшего через пленку  $\text{VO}_2$ .  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ . 1 —  $d = 0.05 \mu\text{m}$ , 2 — 0.13, 3 — 0.16, 4 — 0.2; *b* — зависимость коэффициента пропускания и изменения фазы излучения при ФП от толщины пленки  $\text{VO}_2$ . 1 —  $T$  до ФП, 2 —  $T$  после ФП, 3 —  $\Delta\varphi_1$ .

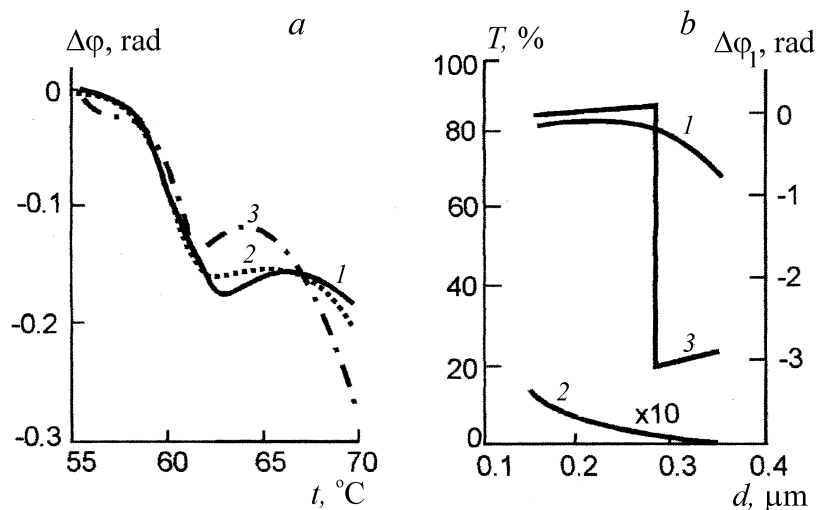
пленки  $\text{VO}_2$  на подложках из германия, так и для многослойного интерферометра с пленкой  $\text{VO}_2$  также на германиевых подложках. Изменение фазы прошедшего излучения при ФП в  $\text{VO}_2$  определялось как  $\Delta\varphi(t) = \delta\varphi(t_0) - \delta\varphi(t)$ , где  $\delta\varphi(t_0)$  и  $\delta\varphi(t)$  — сдвиг фазы прошедшего излучения до ФП и при температуре  $t$  ( $t > t_0$ ) соответственно. На рис. 1, *a* показаны температурные зависимости  $\Delta\varphi$  для различных толщин  $d$  пленки  $\text{VO}_2$  в температурном интервале ФП ( $t_0 < t < t_1$ ,  $t_1$  — интервал фазового перехода) для  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ . Для наглядности здесь и далее начальные точки кривых совмещены, а  $\delta\varphi(t_0)$  приравнено к нулю. При малой толщине пленки ( $d < 0.15 \mu\text{m}$ ) вид кривых  $\Delta\varphi(t)$  определяется ходом температурной зависимости действительной части диэлектрической проницаемости пленки. По мере увеличения толщины пленки все большее влияние на зависимость  $\Delta\varphi(t)$  начинает оказывать мнимая часть диэлектрической проницаемости.

Для оптимизации характеристик оптического переключателя можно задать следующие условия: изменение фазы излучения при ФП не должно превышать  $\pi/5 - \Delta\varphi_1 < 0.63 \text{ rad}$ , а модуляция коэффициента пропускания при ФП ( $K = T(t_0)T(t_1)$ ) должна превышать 50. На рис. 1, *b* показаны зависимость коэффициента пропускания пленки  $\text{VO}_2$  до и после ФП, а также зависимость изменения фазы прошедшего излучения при ФП от толщины пленки. При увеличении толщины пленки происходит рост коэффициента пропускания до ФП, связанный с просветляющим действием пленки  $\text{VO}_2$  в полупроводниковой фазе, по мере приближения ее оптической толщины к величине  $\lambda/4$ . Коэффициент пропускания после ФП с увеличением толщины пленки уменьшается в связи с ростом поглощения. При  $d \approx 0.13 \mu\text{m}$  изменение фазы прошедшего излучения в процессе ФП минимально (рис. 1, *a*), а после ФП  $\Delta\varphi$  стремится к нулю (рис. 1, *b*). Однако коэффициент пропускания пленки такой толщины при ФП изменяется всего в 10 раз, что для большинства практических применений недостаточно. В то же время, как видно из рисунка, поставленные выше условия выполняются в интервале толщины пленки  $0.3 < d < 0.37 \mu\text{m}$ . Для  $d = 0.37 \mu\text{m}$  изменение фазы излучения при ФП  $\Delta\varphi_1 = 0.6 \text{ rad}$ , а изменение коэффициента пропускания  $K = 70$ .

Аналогичная оптимизация, проведенная для  $\lambda = 3.4 \mu\text{m}$ , показала, что оптимальные оптические характеристики для данной длины волны реализуются при толщине пленки, лежащей в интервалах  $0.2 < d < 0.27 \mu\text{m}$  и  $0.29 < d < 0.4 \mu\text{m}$ . Так, для  $d = 0.26 \mu\text{m}$  и для  $d = 0.3 \mu\text{m}$  изменение фазы излучения при ФП равно 0.08 и 0.05 rad, а  $K$  равно 460 и 1100 соответственно. При толщине пленки диоксида ванадия, равной  $0.28 \mu\text{m}$ , ее оптическая толщина равна  $\lambda/4$ , поэтому за счет возникающей интерференции имеет место скачок фазы 3.1 rad.

Кроме того, был проведен расчет влияния угла падения излучения на сдвиг фазы. Расчет показал, что при изменении угла падения пучка на  $5^\circ$  для  $\lambda = 10.6$  и  $3.4 \mu\text{m}$  фазовые искажения не превышают 0.6 rad.

В оптических переключателях, представляющих собой многослойный интерферометр с пленкой  $\text{VO}_2$  в качестве управляющего элемента, может быть реализован значительно более высокий коэффициент модуляции, чем в одиночной пленке  $\text{VO}_2$  (например, [1,6]). На рис. 2, *a* показаны температурные зависимости изменения фазы прошедшего излучения с  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$  для 4-слойного интерферометра, имеющего следующую конструкцию:  $\text{ZnSe}(0.5)\text{-BaF}_2(2.2)\text{-VO}_2(d)\text{-ZnS}(1.0)\text{-}$



**Рис. 2.** *a* — температурная зависимость изменения фазы излучения, прошедшего через интерферометр с пленкой  $\text{VO}_2$   $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ . 1 —  $d = 0.18 \mu\text{m}$ , 2 — 0.2, 3 — 0.27; *b* — зависимость коэффициента пропускания интерферометра и изменения фазы излучения при ФП от толщины пленки  $\text{VO}_2$ . 1 —  $T$  до ФП, 2 —  $T$  после ФП, 3 —  $\Delta\varphi_1$ .

Ge (подложка). Здесь и далее в скобках указана толщина пленок в микрометрах. Из рисунка видно, что при ФП в пленке  $\text{VO}_2$  величина  $\Delta\varphi$  не меняет знак и с увеличением толщины пленки изменение фазы возрастает. При  $d = 0.27 \mu\text{m}$  изменение фазы излучения после ФП примерно равно  $0.28 \text{ rad}$ , т.е. не превышает  $\pi/10$ . Коэффициент пропускания интерферометра при данной толщине пленки в процессе ФП изменяется в 230 раз — от 80 до 0.35% (рис. 2, *b*). Максимум пропускания интерферометра до ФП имеет место при толщине пленки  $\text{VO}_2$ , равной  $0.25 \mu\text{m}$ . Дальнейшее увеличение  $d$  приводит к увеличению коэффициента модуляции за счет уменьшения пропускания интерферометра после ФП, однако при этом уменьшается коэффициент пропускания интерферометра до ФП и увеличивается изменение фазы. Скачок фазы, наблюдаемый при  $d > 0.28 \mu\text{m}$ , связан с тем, что при такой толщине пленки изменение ее оптической толщины при ФП превышает  $\lambda/4$ .

Для длины волны  $3.4\ \mu\text{m}$  моделирование проводилось для интерферометра следующей конструкции:  $\text{Ge}(0.14)\text{--ZnS}(0.25)\text{--VO}_2(d)\text{--ZnSe}(0.17)\text{--Ge}$  (подложка). Расчет показал, что при толщинах пленки  $\text{VO}_2$   $0.15 < d < 0.24\ \mu\text{m}$  и  $0.27 < d < 0.29\ \mu\text{m}$  коэффициент пропускания интерферометра до ФП составляет более 50%. Величина  $\Delta\varphi_1$  для этого интервала толщин пленки не превышает  $0.3\ \text{rad}$ . Коэффициент пропускания интерферометра после ФП составляет от десятых до сотых долей процента, а коэффициент модуляции прошедшего излучения достигает 1500.

Таким образом, оптимизация толщины пленки  $\text{VO}_2$  в оптическом переключателе позволяет обеспечить минимальное изменение фазы прошедшего ИК излучения, не превышающее  $\pi/5$ , а в ряде случаев —  $\pi/10\ \text{rad}$ . При этом сохраняется достаточно высокий коэффициент модуляции излучения при ФП — от 70 до 1500.

Работа проводилась при финансовой поддержке МНТЦ (грант № 1454).

## Список литературы

- [1] *Case F.C.* // *Appl. opt.* 1991. V. 30. N 28. P. 4119–4128.
- [2] *Михеева О.П., Сидоров А.И.* // *Оптический журнал.* 2001. Т. 68. № 4. С. 48–52.
- [3] *Бугаев А.А., Захарченя Б.П., Чудновский Ф.А.* Фазовый переход металл–полупроводник и его применение. Л.: Наука, 1979. 183 с.
- [4] *Bruckner W., Opperman H., Retchel W.* et al. *Vanadiumoxide.* Berlin: Akademie-Verlag, 1982. 252 p.
- [5] *Коновалова О.П., Сидоров А.И., Шаганов И.И.* // *Оптический журнал.* 1998. Т. 65. № 4. С. 20–23.
- [6] *Коновалова О.П., Сидоров А.И., Шаганов И.И.* // *Оптический журнал.* 1999. Т. 66. № 5. С. 13–22.