

07

## Искажение пространственного распределения лазерного луча при отражении от VO<sub>2</sub>-зеркала

© А.И. Сидоров

НИИ лазерной физики НЦ ГОИ им. С.И. Вавилова, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 8 июля 1997 г.

Проведено моделирование процесса переключения управляемых VO<sub>2</sub>-зеркал с  $dR/dT > 0$  и  $< 0$  под действием лазерного луча с гауссовым профилем. Показано, что при отражении от VO<sub>2</sub>-зеркала, во время его переключения, интенсивный лазерный луч претерпевает значительные пространственные искажения.

Изменение коэффициента отражения пленки двуокиси ванадия (VO<sub>2</sub>) при обратимом фазовом переходе полупроводник–металл [1] используется при создании управляемых зеркал как для видимого [1], так и для среднего ИК-диапазонов [2,3]. Как было показано в [3], для  $\lambda = 3\text{--}11\ \mu\text{m}$  могут быть созданы многослойные VO<sub>2</sub>-зеркала как с  $dR/dT > 0$ , так и с  $dR/dT < 0$  и изменением коэффициента отражения от  $R_{\min} = 5\text{--}10\%$  до  $R_{\max} = 95\text{--}98\%$  при изменении температуры пленки VO<sub>2</sub>. При использовании подобных зеркал для управления (в том числе, внутрирезонаторного [2,6]) лазерным излучением интенсивный лазерный луч как источник тепла может являться дополнительным либо основным фактором, приводящим к переключению зеркала [6]. В случае воздействия на VO<sub>2</sub>-зеркало пространственно-неоднородного лазерного луча коэффициент отражения VO<sub>2</sub>-зеркала будет иметь пространственную модуляцию, что, в свою очередь, приведет к искажению пространственного распределения отраженного от VO<sub>2</sub>-зеркала луча. В данной работе проведено моделирование деформации лазерного луча с гауссовым профилем при отражении от VO<sub>2</sub>-зеркал с  $dR/dT > 0$  и  $< 0$  для случая, когда лазерный луч является основным фактором, приводящим к переключению VO<sub>2</sub>-зеркала.

VO<sub>2</sub>-зеркало представляет собой многослойную интерференционную тонкопленочную систему, в состав которой входит пленка VO<sub>2</sub> (толщиной  $h = 0.2\text{--}0.3\ \mu\text{m}$ ), напыленную на толстую подложку. Коэффициент

отражения зеркала при изменении температуры пленки VO<sub>2</sub> может быть аппроксимирован линейными функциями

$$R(T) = \begin{cases} R_{\min}(R_{\max}), & T \leq 60^\circ\text{C}, \\ R_{\min}(R_{\max}) + (-)\alpha[T - 60], & 60 \leq T \leq 70^\circ\text{C}, \\ R_{\max}(R_{\min}), & T \geq 70^\circ\text{C}, \end{cases} \quad (1)$$

где символы в круглых скобках относятся к зеркалам с  $dR/dT < 0$ ,  $\alpha = 0.1 (R_{\max} - R_{\min})$ . Для VO<sub>2</sub>-зеркал с тонкой ( $h \approx 0.1 \mu\text{m}$ ) металлической пленкой, расположенной между интерференционной системой и подложкой [3], справедливо выражение

$$J_{ab}(T) = J_{inc}[1 - R(T)], \quad (2)$$

где  $J_{ab}$  — плотность мощности излучения, поглощенная пленкой VO<sub>2</sub>,  $J_{inc}$  — интенсивность падающего на зеркало излучения. Коэффициент поглощения VO<sub>2</sub> на 3–4 порядка превышает коэффициенты поглощения остальных материалов, входящих в интерференционную систему зеркала. Поэтому тепловыделение при поглощении излучения происходит в основном в пленке VO<sub>2</sub>. Однако при  $t > 1 \mu\text{s}$  благодаря малой толщине интерференционной системы происходит выравнивание температуры по толщине всей системы. Это позволяет рассматривать ее как однородное, в теплофизическом смысле, тело с усредненными теплофизическими параметрами. Для типичных материалов пленок интерференционной системы VO<sub>2</sub>-зеркала, предназначенного для  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ , — ZnSe, ZnS, Ge, BaF<sub>2</sub> — усредненные теплофизические параметры равны  $d = 5.1 \text{ g/cm}^3$ ,  $c = 0.45 \text{ J/gK}$  и  $k = 0.2 \text{ W/cm} \cdot \text{K}$ . Таким образом, тепловая модель зеркала может быть сведена к приближению бесконечной однородной пластины, находящейся в тепловом контакте с полуограниченным однородным телом. В случае высокой интенсивности излучения и малых времен нагрева влиянием теплопроводности вдоль поверхности зеркала можно пренебречь. Тогда тепловой источник, формируемый на VO<sub>2</sub>-зеркале излучением, может быть представлен с помощью точечных источников. Температура на поверхности зеркала для каждого такого источника, согласно [7], равна

$$T(t) = \frac{4J^*\sqrt{t}}{\eta_1(1+K)} \sum_{n=0}^{\infty} M^n \cdot \text{ierfc} \left( \frac{2n+1}{2\sqrt{Fo}} \right), \quad (3)$$

где  $\eta = (kcd)^{1/2}$ ,  $k$  — теплопроводность,  $c$  — теплоемкость,  $d$  — удельный вес,  $\vartheta = k/dc$  — температуропроводность,  $K = \eta_2/\eta_1$ , индексы 1 и 2 относятся к пленке и подложке соответственно,  $M = (1 - K)/(1 + K)$ ,  $J^*$  — удельная мощность теплового источника,  $Fo = \vartheta t/h^2$  — критерий Фурье.  $J^*$ , согласно (2), может быть представлена в виде

$$J^*(t, r) = J_0 \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right) \cdot (1 - R(t, r)), \quad (4)$$

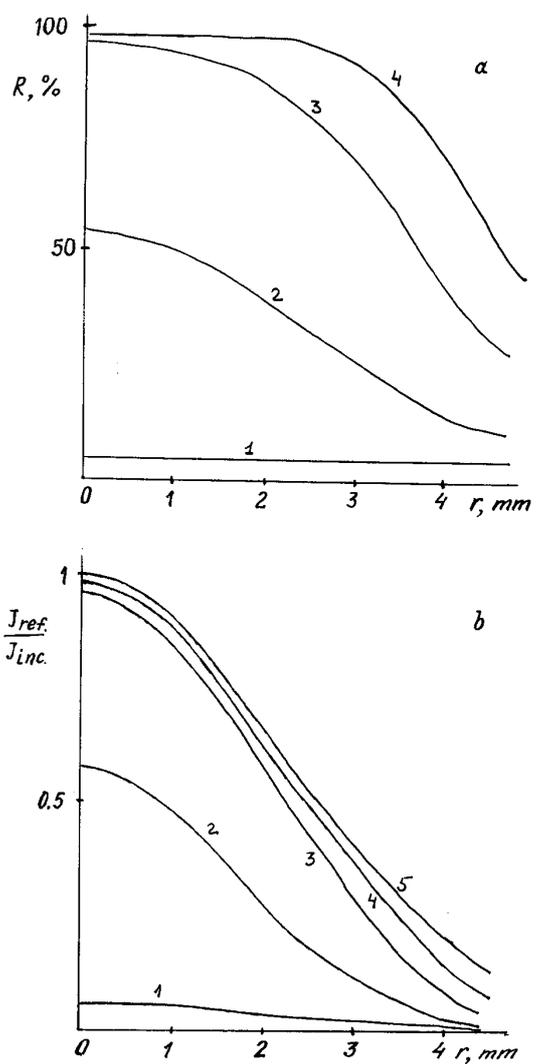
где  $r_0$  — радиус гауссова источника по уровню  $1/e$ ,  $J_0$  — интенсивность излучения в центре гауссова источника. Интенсивность излучения, отраженного от VO<sub>2</sub>-зеркала, равна

$$J_{ref}(t, r) = J_0 \exp[-(r/r_0)^2] R(t, r). \quad (5)$$

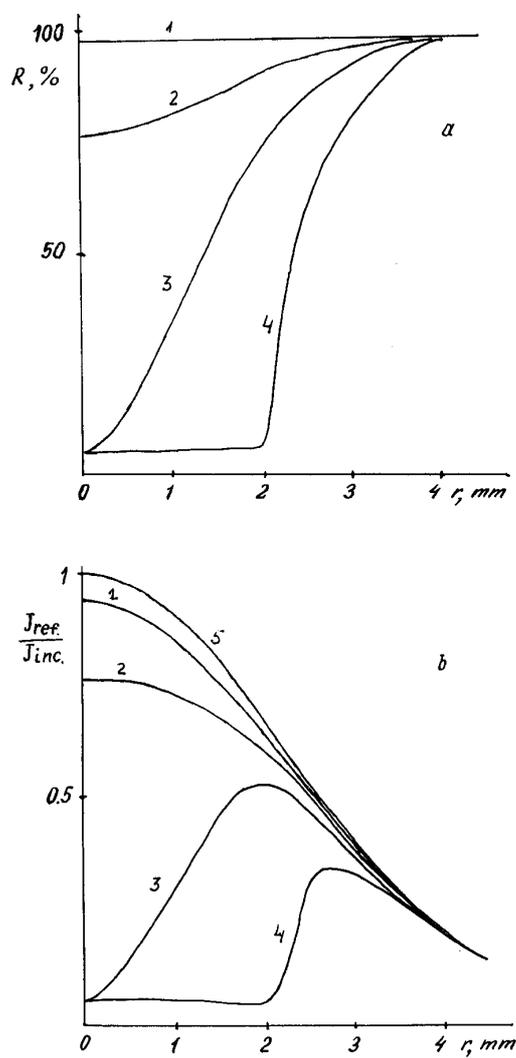
Моделирование проводилось для следующих параметров VO<sub>2</sub>-зеркал и лазерного луча:  $R_{\min} = 5\%$ ,  $R_{\max} = 98\%$ ,  $\alpha = 0.093$ ,  $J_0 = 2 \text{ kW/cm}^2$ ,  $r_0 = 3.2 \text{ mm}$ , материал подложки зеркала — SiO<sub>2</sub>.

На рис. 1 представлена динамика изменения коэффициента отражения VO<sub>2</sub>-зеркала с  $dR/dT > 0$  под действием лазерного луча (а) и изменение профиля отраженного луча (б). При  $t = 0$  зеркало однородно и профиль отраженного луча соответствует исходному. При  $t < 1 \mu\text{s}$  происходит сужение  $J_{ref}(r)$  примерно до 0.7 ширины  $J_{inc}(r)$  (по уровню  $1/e$ ). По мере роста  $R$  в центральной части зеркала, область максимального поглощения излучения зеркалом смещается на крылья распределения, что приводит к уменьшению скорости роста  $R$  в центральной части зеркала и расширению профилей  $R(r)$  и  $J_{ref}(r)$ . При достижении коэффициентом отражения зеркала величины  $R_{\max}$  часть луча, отраженного от области с  $R_{\max}$ , воспроизводит исходный профиль луча, в то время как на крыльях распределения искажение наблюдается до  $t \approx 40 \mu\text{s}$ .

Из рис. 2, а, б видно, что при переключении излучением VO<sub>2</sub>-зеркала с  $dR/dT < 0$  происходит более сильное искажение профиля отраженного луча, по сравнению с описанным выше. По мере уменьшения  $R$  в центральной части зеркала происходит "вырезание" центральной части профиля отраженного луча с сохранением исходного распределения на крыльях. После достижения центральной частью зеркала величины  $R_{\min}$  часть луча, отраженная от этой области зеркала, воспроизводит исходный профиль.



**Рис. 1.** Изменение профиля коэффициента отражения (а) и профиля отраженного луча (b) при переключении  $\text{VO}_2$ -зеркала с  $dR/dt > 0$ . 1 —  $t = 0 \mu\text{s}$ , 2 — 3, 3 — 10, 4 — 20, 5 —  $J_{inc}(r)$ .



**Рис. 2.** Изменение профиля коэффициента отражения (а) и профиля отраженного луча (b) при переключении  $\text{VO}_2$ -зеркала с  $dR/dT < 0$ . 1 —  $t = 0 \mu\text{s}$ , 2 — 10, 3 — 15, 4 — 25, 5 —  $J_{inc}(r)$ .

Из приведенных примеров следует, что при использовании VO<sub>2</sub>-зеркал в качестве переключателей интенсивного лазерного излучения на стадии переключения происходят заметные искажения пространственного распределения отраженного луча. При внутриврезонаторном использовании VO<sub>2</sub>-зеркал описанные эффекты могут приводить к деформации мод резонатора лазера.

## Список литературы

- [1] Бугаев А.А., Захарченя Б.П., Чудновский Ф.А. Фазовый переход металл–полупроводник и его применение. Л.: Наука, 1979. 183 с.
- [2] Chivian J.S., Scott M.W., Case W.E. et al. // IEEE Journ. of Quant. Electr. 1985. V. QE-21. P. 383–390.
- [3] Danilov O.B., Konovalova O.P., Sidorov A.L., Shaganov I.I. // Techn. Digest of VIII Laser Optics Conf. S-Pb. 1995. V. 2. P. 55.
- [4] Коновалов О.П., Сидоров А.И., Шаганов И.И. // Оптический журнал. 1995. № 1. С. 55–58.
- [5] Бугаев А.А., Захарченя Б.П., Шкунов В.В. и др. // Письма в ЖТФ. 1975. Т. 1. С. 593–596.
- [6] Сидоров А.И. // Оптический журнал. 1997. Т. 64. № 1. С. 25–28.
- [7] Григорьев Б.А. Импульсный нагрев излучениями. М.: Наука, 1974. Т. 2. 727 с.