

Управляемые дифракционные оптические элементы с пленкой диоксида ванадия

© О.Б. Данилов, А.И. Сидоров

Научно-исследовательский институт лазерной физики,
199034 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 24 августа 1998 г.)

Проведен анализ принципов построения оптических устройств на основе дифракционных структур с пленкой диоксида ванадия для управления излучением среднего ИК диапазона. Описаны методы практической реализации таких устройств для $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ и приведены их расчетные характеристики. Показано, что контраст в дифракционных оптических элементах может достигать $1 : 10^7$, а время включения под действием интенсивного лазерного излучения — десятков наносекунд.

Введение

Интерес, проявляемый к дифракционным оптическим элементам (ДОО), в последние годы вызван в основном перспективностью их использования в системах обработки оптических сигналов и изображений, в том числе в вычислительной оптике. Помимо традиционного применения ДОО в качестве спектральных селекторов, к настоящему времени разработано значительное количество типов ДОО, позволяющих выполнить многие другие функции: мультиплицирование [1] и формирование [2] пучков, распределение оптических сигналов по каналам обработки [3], формирование волнового фронта [4] и т.д. Оптические характеристики таких устройств могут быть как постоянными, так и управляемыми при использовании в них электрооптических материалов [5,6]. Указанная выше область использования ДОО является причиной того, что большинство исследований и разработок ДОО проведено для видимого и ближнего ИК диапазонов.

В лазерных оптических системах среднего ИК диапазона также существует целый ряд задач обработки и коммутации оптических сигналов. Примерами могут служить задачи разделения слабых и интенсивных сигналов в лазерных локационных системах, распределения сигналов по фотоприемным устройствам, временной и пространственной селекции сигналов. Одной из важнейших задач является защита фотоприемных устройств от разрушения и "ослепления" интенсивным лазерным излучением.

Многослойные интерференционные системы (МИС) с пленкой VO_2 в качестве управляющего элемента достаточно широко используются для модуляции излучения среднего ИК диапазона. Обратимый фазовый переход полупроводник–металл [7] в моно- или поликристаллической пленке VO_2 , происходящий при изменении температуры, сопровождается существенным изменением ее оптических констант. Это позволяет радикально изменять оптические характеристики интерференционной системы, содержащей пленку VO_2 .

МИС с пленкой VO_2 могут быть изготовлены как пропускающего [8], так и отражающего [9] типов. В дан-

ной работе рассмотрены только отражающие интерференционные системы — VO_2 зеркал. Это объясняется двумя причинами. Во-первых, VO_2 зеркал позволяют реализовать более широкие функциональные возможности ДОО. Так, в МИС пропускающего типа может быть получено лишь уменьшение пропускания с ростом температуры ($dA/dT < 0$, A — коэффициент пропускания). В отражающих МИС в зависимости от типа интерференционной системы могут быть реализованы положительная, отрицательная и знакопеременная величина dR/dT [10], а также модуляция фазы отраженного излучения при малом изменении коэффициента отражения R [11]. Во-вторых, зеркальные системы с пленкой VO_2 имеют значительно более высокую лучевую стойкость, чем пропускающие, что позволяет использовать их для управления интенсивным излучением.

В данной работе рассмотрены принципы создания управляемых ДОО с пленкой VO_2 для спектрального диапазона $2.5\text{--}12 \mu\text{m}$. Основное применение подобных ДОО — управление интенсивным импульсным излучением химических, СО и CO_2 лазеров. Поэтому при анализе основное внимание уделялось методам получения максимального контраста при сохранении высокой лучевой стойкости ДОО. Основные результаты приведены для $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ (длина волны излучения CO_2 лазера).

Принципы построения управляемых ДОО с пленкой VO_2

Управляемые ДОО на основе отражающих МИС с пленкой VO_2 представляют собой интерференционную систему, в которой сформирована пространственная структура (рис. 1, *a*) из чередующихся областей с постоянными и зависящими от температуры оптическими параметрами. Областям первого типа соответствуют коэффициент отражения R_1 и фаза отраженного излучения φ_1 , областям второго типа — $R_2(T)$ и $\varphi_2(T)$ соответственно. На рис. 1, *b–d* показаны простейшие ДОО подобного типа: дифракционная решетка с постоянным периодом (*b*), одномерная зонная пластинка Френеля (*c*), позволяющая фокусировать излучение в линию, и

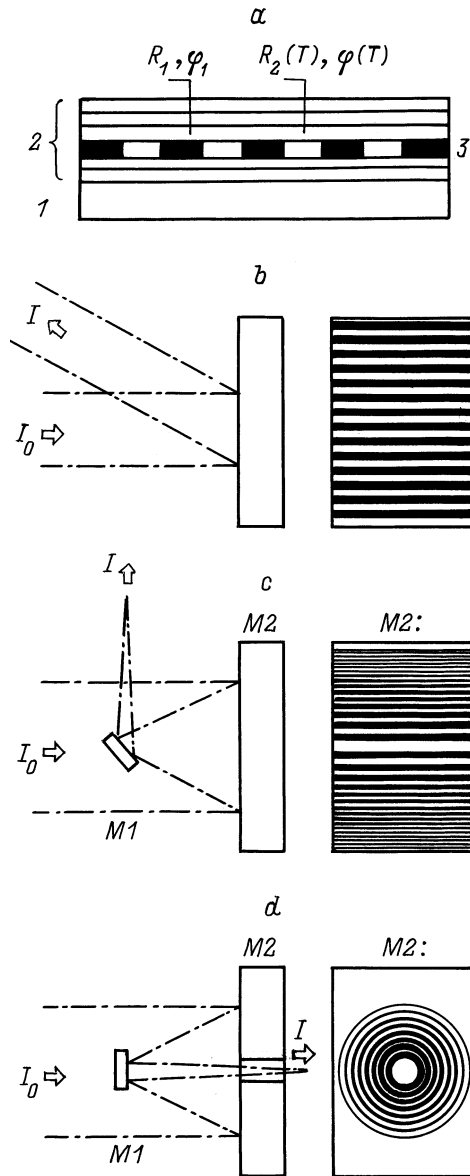


Рис. 1. *a* — структура управляемого ДОЭ с пленкой VO_2 ; 1 — подложка, 2 — МИС, 3 — периодическая структура с пленкой VO_2 ; *b-d* — различные варианты ДОЭ.

зонная пластинка Френеля с концентрическими зонами (*d*), позволяющая фокусировать излучение в "точку". На рисунках показан только первый порядок дифракции. Зеркала *M1* на рис. 1, *c* и *d* служат для пространственного разделения падающего и дифрагированного излучений, при этом центральные зоны Френеля в дифракции не участвуют. Для рассматриваемых конструкций ДОЭ и нормального падения плоской волны интенсивность излучения в дифракционном порядке можно представить в виде

$$I = I_0 K (R_1 + R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos(\varphi_1 - \varphi_2)). \quad (1)$$

Здесь I_0 — интенсивность падающего излучения; K — параметр, зависящий от геометрии дифракционной струк-

туры и порядка дифракции. Из приведенного выражения следует, что наибольший контраст в управляемых ДОЭ может быть получен, когда одно из состояний ДОЭ соответствует зеркалу с равномерными коэффициентами отражения и фазой отраженного излучения: $R_1 = R_2$ и $\varphi_1 = \varphi_2$. В этом случае все падающее излучение отражается зеркально, а интенсивность излучения в дифракционных порядках равна нулю. Наибольший практический интерес представляет ситуация, когда коэффициент отражения R_1 равен максимальному коэффициенту отражения $R_2(T) = R_{2\max}$. Максимальная дифракционная эффективность в дифракционных порядках реализуется при выполнении одного из двух условий — либо $R_1 \gg R_2$, либо $\varphi_1 - \varphi_2 = \pi$ и $R_1 = R_2$.

На рис. 2 показаны расчетные температурные зависимости коэффициентов отражения и фазы

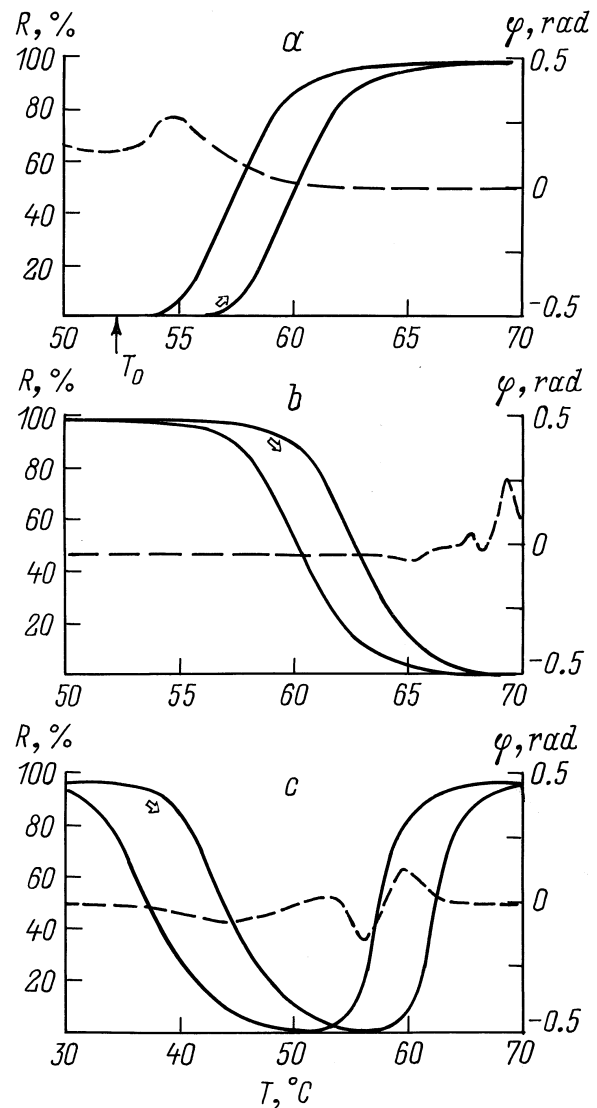


Рис. 2. Температурные зависимости коэффициента отражения и фазы отраженного излучения для VO_2 зеркал. Сплошные кривые — $R(T)$, штриховые — $\varphi(T)$.

отраженного излучения для трех основных типов VO_2 зеркал, представляющих интерес при создании управляемых ДОЭ. Для зависимостей $\varphi(T)$ показаны только ветви температурной петли гистерезиса, соответствующие увеличению температуры. Приведенным зависимостям соответствуют следующие конструкции интерференционных систем: *a* — $\text{Ge}(0.66) - \text{BaF}_2(1.96) - \text{VO}_2(0.3) - \text{ZnS}(0.815) - \text{Al}(0.1)$ — подложка; $dR/dT > 0$, $R_{\min} = 1\%$, $R_{\max} = 97.5\%$; *b* — $\text{Ge}(0.66) - \text{ZnS}(2.435) - \text{VO}_2(0.25) - \text{ZnS}(1.26) - \text{Al}(0.1)$ — подложка; $dR/dT < 0$, $R_{\max} = 98\%$, $R_{\min} = 0.1\%$; *c* — $\text{Ge}(0.66) - \text{ZnS}(0.87) - \text{VO}_2(0.25) - \text{ZnS}(1.26) - \text{VO}_2^*(0.25) - \text{ZnS}(1.26) - \text{Al}(0.1)$ — подложка; знакопеременная dR/dT , $R_{\max}(30^\circ\text{C}) = 98\%$, $R_{\min}(56^\circ\text{C}) = 0.4\%$, $R_{\max}(70^\circ\text{C}) = 94\%$. В скобках указаны толщины пленок в микрометрах. Расчет оптических характеристик данных интерференционных систем проводился по формулам Френеля рекуррентным методом. При расчете использовались температурные зависимости показателей преломления и поглощения стехиометрической пленки VO_2 [11]. Конструкция (*c*) содержит две пленки VO_2 , одна из которых (VO_2^*) имеет фазовый переход, сдвинутый в область меньших температур ($T = 30 - 50^\circ\text{C}$) благодаря введению легирующей добавки [7,12].

Выше было показано, что максимальный контраст достигается при условии $R_1 = R_{2\max}$ и $\varphi_1 = \varphi_2$. Поэтому важным является вопрос, насколько в реальной интерференционной системе можно приблизить величины $\Delta R = R_1 - R_{2\max}$ и $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ к нулю при условии $R_1 = \text{const}$. Одной из возможностей формирования областей с постоянным коэффициентом отражения является введение в МИС тонкой металлической пленки. Однако анализ показывает, что при этом можно минимизировать только один параметр — либо ΔR , либо $\Delta\varphi$. Одновременная минимизация ΔR и $\Delta\varphi$ достигается при введении в МИС как минимум двух дополнительных слоев. В качестве примера рассмотрим конструкцию (*a*), в которой области с постоянным коэффициентом отражения сформированы двумя тонкими металлическими пленками, расположенными по обе стороны пленки VO_2 : $\text{Ge}(0.642) - \text{BaF}_2(1.96) - \text{Ti}(0.0044) - \text{VO}_2(0.3) - \text{Au}(0.015) - \text{ZnS}(0.815) - \text{Al}(0.1)$. В данной конструкции пленка Au обеспечивает высокий коэффициент отражения системы до начала фазового перехода в пленке VO_2 . Пленка Ti служит в основном для выравнивания фазы отраженного излучения для областей с постоянными и переменными оптическими характеристиками после окончания фазового перехода. Дополнительное согласование фаз обеспечивается небольшим уменьшением толщины пленки Ge . Для ДОЭ, в которой использована приведенная выше конструкция, $\Delta R(70^\circ\text{C}) = 4 \cdot 10^{-5}\%$ и $\Delta\varphi(70^\circ\text{C}) = 5.5 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$. Коэффициент отражения R_1 в течение фазового перехода в пленке VO_2 изменяется приблизительно на 1%, что практически не влияет на оптические характеристики ДОЭ. Аналогичный результат может быть получен и для конструкций VO_2 зеркал (*b*) и (*c*).

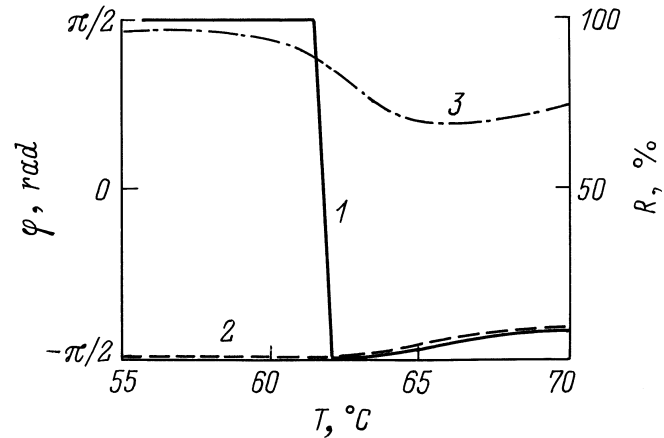


Рис. 3. То же, что на рис. 2, для фазового ДОЭ: 1 — $\varphi(T)$ для областей ДОЭ с φ_2 , 2 — $\varphi(T)$ для областей ДОЭ с φ_1 , 3 — $R(T)$ для областей ДОЭ с R_1 и R_2 .

Из рис. 2 видно, что сильное изменение фазы отраженного излучения происходит вблизи минимума коэффициента отражения. Так как для рассматриваемых конструкций VO_2 зеркал $R_{\min} \ll R_{\max}$, то ДОЭ на их основе по своим свойствам приближаются к чисто амплитудным, а их дифракционная эффективность не превышает нескольких процентов. Дифракционная эффективность может быть повышена до 10% при использовании комбинации ДОЭ с эталоном Фабри–Перо за счет выбора ”резонансного” угла падения излучения на ДОЭ [13,14].

Другой возможностью повышения дифракционной эффективности ДОЭ является использование VO_2 зеркал, обеспечивающих фазовую модуляцию излучения при малом изменении коэффициента отражения [11]. На рис. 3 приведены фазовые и амплитудные характеристики такого VO_2 зеркала, имеющего следующую конструкцию МИС: $\text{BaF}_2(4.522) - \text{VO}_2(0.25) - \text{Al}(0.1)$ — подложка (на рисунке показаны ветви петли температурного гистерезиса, соответствующие увеличению температуры). Данная МИС представляет собой интерферометр Жиро–Турнуа [15], в котором пленка VO_2 играет роль управляющего элемента. Области с R_1 и φ_1 в такой системе могут быть получены путем изменения толщины пленки BaF_2 . Так, при уменьшении толщины пленки BaF_2 до $4.51 \mu\text{m}$ реализуется зависимость $\varphi(T)$, показанная на рис. 3 кривой 2. Зависимость $R(T)$ при этом совпадает с зависимостью $R(T)$ для приведенной выше конструкции с точностью 0.1%. Фазовый ДОЭ, построенный по рассмотренному принципу, имеет следующие характеристики: $\Delta\varphi(55^\circ\text{C}) \approx \pi$, $\Delta\varphi(70^\circ\text{C}) = 0.015 \text{ rad}$.

Управление ДОЭ может осуществляться электронным лучом [16], тонкопленочным нагревателем [17], расположенным между МИС и подложкой, либо интенсивным лазерным излучением. Наибольший практический интерес представляют два последних метода управления, так как в отличие от электронно-лучевого метода они позволяют осуществлять нагрев достаточно большой площади поверхности ДОЭ. Экспериментальные и расчетные

результаты [18] показывают, что при управлении VO₂ зеркалом тонкопленочным нагревателем минимальное время включения зеркала ограничивается электрической прочностью МИС и составляет 1–5 μs. Минимальное время включения VO₂ зеркал излучением [18] ограничивается лучевой стойкостью зеркал. Для VO₂ зеркал с $dR/dT > 0$ порог разрушения составляет 2–5 MW/cm² для импульса излучения короче 1 μs. При интенсивности излучения ~ 1 MW/cm² время включения VO₂ зеркал составляет 10–100 ns в зависимости от типа VO₂ зеркала, толщины МИС и материала подложки.

Время выключения VO₂ зеркал определяется скоростью отвода тепла из МИС в подложку за счет теплопроводности и для металлических подложек может составлять 10–50 μs. Так как включение и выключение ДОЭ на основе VO₂ зеркал происходит за счет теплового механизма, то их применение для управления интенсивным излучением ограничивается импульсным и импульсно-периодическим режимами.

Статические характеристики ДОЭ с пленкой VO₂

Анализ модуляционных характеристик амплитудных ДОЭ проводился для $\Delta R = 10^{-3}\%$ и $\Delta\varphi = 5 \cdot 10^{-4}$ rad. На рис. 4 показаны температурные зависимости интенсивности излучения I в дифракционном порядке, нор-

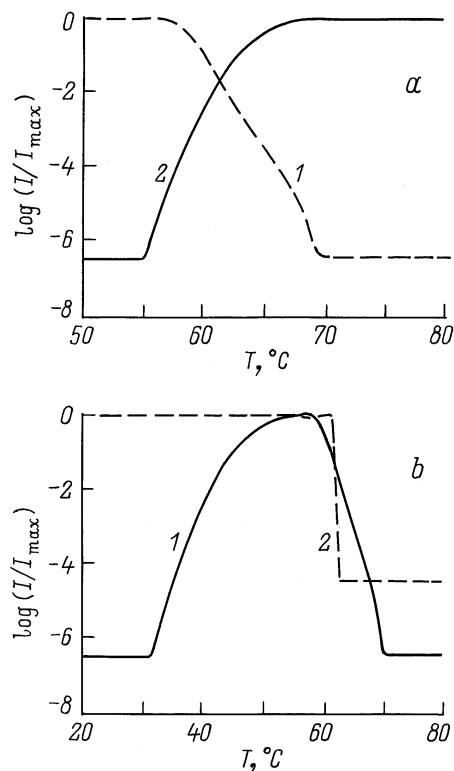


Рис. 4. Статические характеристики ДОЭ на основе VO₂ зеркал. *a*: 1 — МИС с $dR/dT > 0$, 2 — $dR/dT < 0$; *b*: 1 — знакопеременная dR/dT , 2 — $d\varphi/dT < 0$.

мированной на I_{\max} — максимальную интенсивность излучения в данном дифракционном порядке. Видно, что в ДОЭ на основе VO₂ зеркала с $dR/dT > 0$ (температурная зависимость коэффициента отражения данного зеркала на рис. 2, *a*) с увеличением температуры происходит уменьшение интенсивности излучения в дифракционных порядках (рис. 4, *a*, кривая 1) и при достижении минимальных величин ΔR и $\Delta\varphi$ становится равной $4 \cdot 10^{-7} I_{\max}$.

В ДОЭ на основе VO₂ зеркала с $dR/dT < 0$ (рис. 2, *b*) с увеличением температуры по мере уменьшения R_2 происходит рост интенсивности излучения в дифракционных порядках (рис. 4, *a*, кривая 2). В случае использования в ДОЭ интерференционной системы со знакопеременной величиной dR/dT (рис. 2, *c*) интенсивность излучения в дифракционных порядках достигает максимума в интервале температур 50–55°C, после чего происходит уменьшение интенсивности до начального уровня (рис. 4, *b*, кривая 1). Для ДОЭ на основе фазового VO₂ зеркала (рис. 3) увеличение температуры до 70°C приводит к уменьшению интенсивности излучения в дифракционных порядках до $\sim 5 \cdot 10^{-5} I_{\max}$ (рис. 4, *b*, кривая 2).

Таким образом, в управляемых ДОЭ на основе VO₂ зеркал могут быть реализованы функции включения, выключения излучения в дифракционных порядках и комбинация этих двух функций в одном ДОЭ. Для амплитудных ДОЭ величина dI/dT имеет противоположный знак по сравнению с dR/dT VO₂ зеркала. Для рассмотренного фазового ДОЭ знак dI/dT совпадает со знаком $d\varphi/dT$ и dR/dT фазового VO₂ зеркала.

Динамические характеристики ДОЭ с пленкой VO₂

Динамика включения ДОЭ под действием импульсного источника тепла определяется его мощностью и типом, теплофизическими параметрами ДОЭ и начальной температурой пленки VO₂ (T_0 на рис. 2, *a*). Наибольший практический интерес представляет переключение ДОЭ под действием интенсивного импульсного излучения, так как при этом может быть обеспечено минимальное время включения.

Рассматриваемые в данной работе VO₂ зеркала имеют нулевое пропускание (благодаря металлической пленке с высоким отражением, входящей в состав МИС). Поэтому удельная мощность тепловыделения в МИС при нагреве излучением может быть представлена в виде

$$P = I_0(1 - R). \quad (2)$$

ДОЭ на основе VO₂ зеркал содержит области, коэффициент отражения которых зависит от температуры. Это приводит к тому, что при нагреве ДОЭ излучением в температурном интервале фазового перехода в пленке VO₂ удельная мощность тепловыделения в данных областях также имеет температурную зависимость — $P(T) = f(R(T))$.

Динамику включения ДОЭ под действием импульса излучения можно рассматривать на основе приближения тепловой модели тонкой пластины (МИС), находящейся в идеальном тепловом контакте с полуограниченным телом (подложка). Для времени нагрева $t < 500$ ns и периода дифракционной структуры, характерной для среднего ИК-диапазона, растеканием тепла вдоль поверхности ДОЭ за счет теплопроводности можно пренебречь. Тогда изменение температуры МИС в точке $z \leq h$ (h — толщина МИС) при нагреве импульсом излучения за время Δt может быть представлено в виде [19]

$$\Delta T(z) = \frac{1}{\sqrt{\pi}\eta_1} \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} M^{n+1} \int_0^{\Delta t} \frac{P(T)}{\sqrt{\Delta t - \tau}} \times \exp \left[-\frac{(2nh + h - z)^2}{4a_1(\Delta t - \tau)} \right] d\tau + \sum_{n=0}^{\infty} M^n \times \int_0^{\Delta t} \frac{P(T)}{\sqrt{\Delta t - \tau}} \exp \left[-\frac{(2nh + h + z)^2}{4a_1(\Delta t - \tau)} \right] d\tau \right\},$$

$$M = \frac{1 - K}{1 + K}, \quad K = \frac{\eta_1}{\eta_2}. \quad (3)$$

Здесь индексы 1 и 2 относятся к пластине и полуограниченному телу соответственно, $\eta = \sqrt{cdk}$, c — теплоемкость, d — удельный вес, k — теплопроводность, a — температуропроводность. Моделирование динамики включения ДОЭ проводилось для следующих условий: $dR/dT > 0$, подложка ДОЭ — Ge, импульс излучения прямоугольной формы с равномерным распределением интенсивности и $I_0 = 1 \text{ MW/cm}^2$, $T_0 = 55^\circ\text{C}$. При расчетах использовались усредненные по толщине теплофизические параметры МИС.

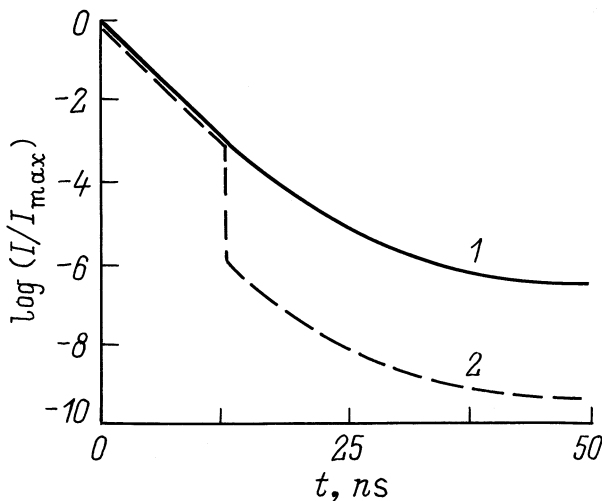


Рис. 5. Динамические характеристики ДОЭ на основе VO₂ зеркала. $dR/dT < 0$, $I_0 = 1 \text{ MW/cm}^2$ (1) и на основе зонной пластинки Френеля и $dR/dT < 0$ (в качестве зеркала M1) (2).

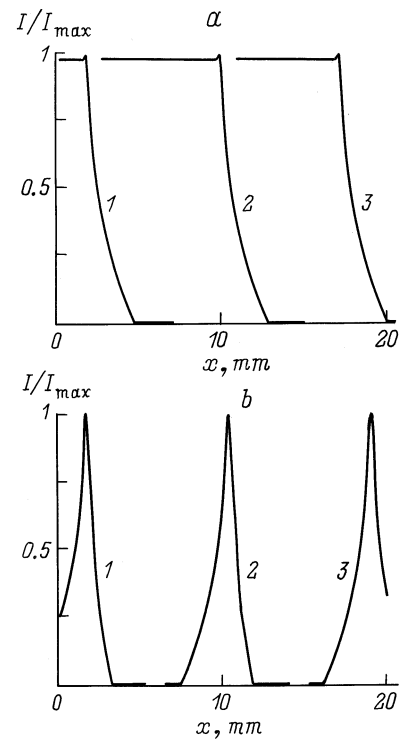


Рис. 6. Пространственное распределение излучения в дифракционном порядке для одномерных ДОЭ. *a* — МИС с $dR/dT < 0$ при $t = 260$ (1), 500 (2), 730 ns (3); *b* — МИС со знакопеременной dR/dT при $t = 50$ (1), 100 (2), 150 ns (3).

Временная зависимость интенсивности излучения в дифракционном порядке ДОЭ при управлении импульсом излучения показана на рис. 5 (кривая 1). Видно, что уменьшение интенсивности до уровня $10^{-5}I_{\text{max}}$ происходит приблизительно за 25 ns, после чего происходит снижение скорости изменения интенсивности. Это связано с тем, что ДОЭ к данному моменту времени уже находится в состоянии, соответствующем зеркалу с высоким коэффициентом отражения, вследствие чего уменьшается доля энергии излучения, поглощенная зеркалом и идущая на его нагрев. Полностью процесс включения завершается при $t = 50$ ns. Уменьшение температуры T_0 приводит к появлению задержки включения ДОЭ. Так, при $T_0 = 45^\circ\text{C}$ процесс включения ДОЭ начинается через 15 ns после начала воздействия импульса излучения.

Для ДОЭ на основе зонной пластинки Френеля (рис. 1, *d*) может быть получено дополнительное повышение контраста за счет использования в качестве зеркала M1 VO₂ зеркала с $dR/dT < 0$. Это иллюстрирует кривая 2 на рис. 5 для случая, когда зеркало M1 расположено в плоскости, соответствующей сужению пучка после отражения от зонной пластинки в $\sqrt{2}$ раз. Включение зеркала M1 при $t = 11$ ns происходит лавинообразно за счет увеличения скорости включения при уменьшении его коэффициента отражения. Минимальная интенсивность излучения, достигаемая на выходе данной

оптической системы, составляет $\sim 5 \cdot 10^{-10} I_{\max}$. Очевидно, что при использовании в качестве зеркала М1 ДОЭ на основе VO₂ зеркала с $dR/dT > 0$ может быть получена еще большая величина контраста.

Представляет интерес рассмотрение динамики включения ДОЭ с одномерной периодической структурой (рис. 1, *b* и *c*) для случая, когда в пленке VO₂ задан начальный градиент температуры вдоль штрихов, т.е. $dT_0/dx \neq 0$ (ось x параллельна штрихам структуры). Это приводит к тому, что области ДОЭ с меньшей температурой T_0 включаются позже областей, имеющих более высокую температуру. На рис. 6, *a* приведены пространственные распределения интенсивности излучения в дифракционном порядке ДОЭ на основе VO₂ зеркала с $dR/dT < 0$ для следующих условий: $dT_0/dx = -5 \text{ K/cm}$, $T_0(x = 0) = 55^\circ\text{C}$, $I_0 = 0.1 \text{ MW/cm}^2$, подложка ДОЭ — медь. В начальный момент времени в дифракционном порядке имеет место равномерное распределение интенсивности с $I_0 = 5 \cdot 10^{-7} I_{\max}$. С ростом t вблизи $x = 0$ возникает область с интенсивностью I_{\max} , которая далее расширяется в сторону $x > 0$. Таким образом, в данных условиях может быть реализована функция — ”открывающаяся заслонка”. Скорость перемещения волны включения для рассмотренных условий составляет $\sim 30 \text{ mm}/\mu\text{s}$.

На рис. 6, *b* показано изменение интенсивности в дифракционном порядке ДОЭ на основе VO₂ зеркала со знакопеременной величиной dR/dT . Моделирование проводилось для тех же условий, что и в предыдущем случае, но $I_0 = 1.5 \text{ MW/cm}^2$. Из рисунка видно, что в данном случае в дифракционном порядке реализуется узкая область с высокой интенсивностью, которая со временем смещается в сторону больших x . Сжатие пространственного распределения интенсивности вблизи максимума связано с высокой скоростью изменения коэффициента отражения при его значениях, близких к R_{\min} . Рассмотренному случаю соответствует реализация функции ”движущаяся щель”. Скорость движения ”щели” составляет $\sim 160 \text{ mm}/\mu\text{s}$.

Заключение

Представленные результаты показывают, что при использовании в дифракционных оптических элементах управляемых отражающих интерференционных систем с пленкой VO₂ могут быть реализованы переключающие оптические устройства для среднего ИК диапазона, обладающие высоким контрастом, быстродействием и широкими функциональными возможностями. Основное применение таких устройств — управление интенсивными лазерными пучками в импульсных и импульсно-периодических лазерных оптических системах: разделение слабых и интенсивных сигналов, временная селекция, пространственная развертка излучения, а также защита фотоприемных устройств от воздействия интенсивного излучения.

Список литературы

- [1] *Mendlovic D., Zalevsky Z., Shabtay G. et al. // Appl. Opt. 1996. Vol. 35. N 35. P. 6875–6880.*
- [2] *Dresel T., Beyerlein M., Schwinder J. // Appl. Opt. 1996. Vol. 35. N 35. P. 6865–6874.*
- [3] *Brenner K.-H., Sauer F. // Appl. Opt. 1988. Vol. 27. N 20. P. 4251–4254.*
- [4] *Piestun R., Shamir J. // Opt. Lett. 1994. Vol. 19. N 11. P. 771–773.*
- [5] *Tatebayashi T., Yamamoto T., Sato H. // Appl. Opt. 1992. Vol. 31. N 15. P. 2770–2775.*
- [6] *Song Q.W., Wang X.-M., Bussjager R. // Appl. Opt. 1996. Vol. 35. N 35. P. 7031–7036.*
- [7] *Бугаев А.А., Захарченя Б.П., Чудновский Ф.А. Фазовый переход металл–полупроводник и его применение. Л.: Наука, 1979. 183 с.*
- [8] *Jerominek H., Picard F., Vincent D. // Opt. Eng. 1993. Vol. 32. N 9. P. 2092–2097.*
- [9] *Welch A.B., Burzlauff B., Cunningham W. // Proc. SPIE. 1981. Vol. 300. P. 153–162.*
- [10] *Коновалова О.П., Сидоров А.И., Шаганов И.И. Оптический журнал. 1998. Т. 65. № 4. С. 20–23.*
- [11] *Коновалова О.П., Сидоров А.И., Шаганов И.И. Оптический журнал. 1998. Т. 65. № 4. С. 24–27.*
- [12] *Tazawa M., Jin P., Tanemura S. // Appl. Opt. 1998. Vol. 37. N 10. P. 1858–1861.*
- [13] *Collins S.A., Caulfield H.J. // J. Opt. Soc. Am. A. 1989. Vol. 6. N 9. P. 1568–1577.*
- [14] *Krawczak J., Dean R., Torok E.J. et al. // Opt. Lett. 1990. Vol. 15. N 22. P. 1264–1266.*
- [15] *Gires F., Tournois P. // C. R. Acad. Sci. 1964. Vol. 258. P. 6112–6115.*
- [16] *Chivian J.S., Scott M.W., Case W.E. et al. // IEEE J. of Quant. Electron. 1985. Vol. QE-21. N 4. P. 383–388.*
- [17] *Данилов О.Б., Коновалова О.П., Сидоров А.И. и др. // Приборы и техника эксперимента. 1995. № 4. С. 121–124.*
- [18] *Danilov O.B., Danilov V.V., Sidorov A.I. et al. // Conf. Photonics West. California, January 1998.*
- [19] *Григорьев Б.А. Импульсный нагрев излучениями. М.: Наука, 1974. Т. 2. 727 с.*