

УДК 535.31

Н. Д. Голдина

(Новосибирск)

**МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ
ФАЗОСДВИГАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА**

Многослойные фазосдвигатели, осуществляющие при отражении света дифференциальный фазовый сдвиг на 90° между ортогональными компонентами падающего электрического поля с целью преобразования линейной поляризации в круговую, находят применение в ИК-лазерных системах. Рассматриваются различные типы фазосдвигателей из диэлектрических слоев на металлической основе с учетом влияния поглощения в диэлектрике.

В лазерных системах для получения фазового сдвига $\Delta = \pi/2$ между ортогональными компонентами (ТЕ- и ТМ-волнами) используют различные поляризационные приспособления: а) фазовые пластинки из материала с двойным лучепреломлением, работающие в проходящем свете; б) фазосдвигающие устройства (фазосдвигатели) на основе отражения от металлической поверхности; в) фазосдвигатели, использующие явление полного внутреннего отражения (ПВО); г) фазовые электрооптические элементы. В последние годы фазосдвигатели успешно совершенствуются за счет применения многослойных диэлектрических покрытий [1–6].

В ИК-области материалов для кристаллических фазовых пластинок много (для $\lambda = 10,6$ мкм обычно используется CdS). Для фазосдвигателей с использованием ПВО нужны материалы с малыми объемными потерями. Для средней ИК-области можно, например, применять ZnSe, приготовленный по CVD-технологии, а также KCl и BaF₂. Максимально достижимая разность фаз для одной границы ПВО равна $\Delta_{\max} = 2\arctg((1 - n_{12}^2)/2n_{12})$, где n_{12} – отношение показателей преломления воздух – диэлектрик. Свойства фазосдвигателей с использованием ПВО (классическим примером которого является стеклянная призма Френеля, в которой после двукратного отражения достигается требуемая разность фаз $\Delta = \pi/2$) могут быть улучшены за счет нанесения дополнительных тонких слоев: при этом расширяется диапазон углов падения света, обеспечивается ахроматизация, увеличивается значение Δ_{\max} [2, 3]. На рис. 1 представлены зависимости фазовых сдвигов δ_p (кривая 1), δ_s (кривая 2) и разности $\Delta = \delta_p - \delta_s$ (кривая 3) от угла падения Θ при отражении света на границе кварц ($n = 1,46$) – воздух. При $\Theta > \Theta_{\text{кр}}$ (критический угол для кварца, равный $43,23^\circ$) появляется полное внутреннее отражение, при этом коэффициент отражения $R = 1$, а сдвиг фаз между δ_p и δ_s достигает $\Delta_{\max} = 42,4^\circ$ при $\Theta = 53^\circ$. Призма из ZnSe имеет $\Delta_{\max} = 90^\circ$ при угле падения 33° .

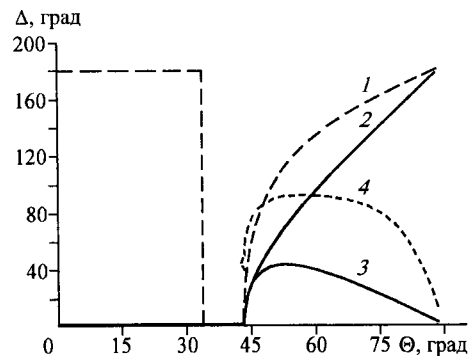


Рис. 1

При нанесении на границу кварц – воздух одного слоя ZnS ($n = 2,3$) толщиной, равной 0,275 толщины четвертьволнового слоя (кривая 4), при $\Theta = 57^\circ$ достигается максимум $\Delta_L = 91,5^\circ$. Аналогичные зависимости можно получить для ИК-материалов, например для одного слоя ZnSe на KCl.

В ИК-лазерах ($\lambda = 10,6$ и $3,39$ мкм) в качестве фазосдвигателей более предпочтительны высокоотражающие металлы с дополнительной стопой диэлектрических пленок. Известно, что высокоотражающие металлы, такие как Ag, Au и Al, при главном угле падения являются четвертьволновыми фазосдвигателями (введем для них краткое общепринятое обозначение QWR – quarterwave retarder). Однако в этом случае существенными недостатками являются почти скользкое падение и очень высокая чувствительность к углу падения, т. е. рабочий угловой диапазон невелик. При добавлении к металлу стопы диэлектрических слоев, кроме повышения коэффициента отражения, можно достичь эффекта QWR при любом заданном угле падения $\Theta \neq 0^\circ$ (обычно задается $\Theta = 45^\circ$) и существенно расширить угловой диапазон при заданной спектральной области с выравниванием коэффициентов отражения для ортогональных компонент R_p и R_s [1, 4–6].

Представляет интерес выяснить перспективы конкретных металл-диэлектрических фазосдвигателей в ИК-области, оценить влияние таких факторов, как поглощение в диэлектрических слоях, на выходные характеристики. Этот круг вопросов является предметом настоящей работы.

В таблице приведены оптические константы n , k и коэффициенты отражения R четырех часто использующихся металлов для $\lambda = 10,6$ мкм согласно [7].

Следует учесть, что значения для свеженапыленных слоев металла могут слегка отличаться от приведенных в таблице, например, коэффициенты отражения слоев Al и Ag равны 98,7 и 99,5 % соответственно [7].

Поскольку в ИК-области все высокоотражающие металлы имеют примерно одинаковые характеристики, выберем для определенности слой серебра и длину волны $\lambda_0 = 10,6$ мкм. С целью получения QWR для угла падения 45° проследим, как дополнительный диэлектрический многослойник, добавляемый к металлу со стороны воздуха, изменяет Δ . Можно ввести диэлектрический многослойник между подложкой и металлом и рассмот-

Металл	n	k	R
Ag	10,8	60,7	98,87
Cu	11,0	60,6	98,8
Al	26	67,3	98,0
Au	11,5	67,5	99,02

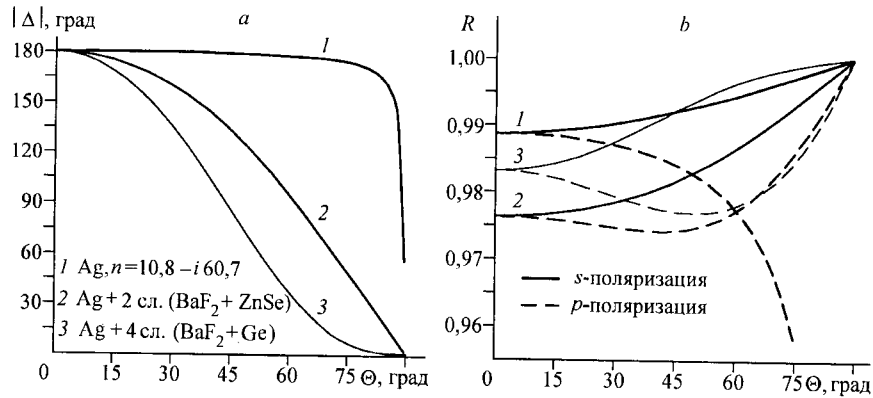


Рис. 2

реть случай, когда показатель преломления среды, из которой падает свет, больше 1, но для ИК-области это не имеет практической перспективы из-за отсутствия соответствующих материалов.

На рис. 2, *a, b* приведены зависимости абсолютного значения Δ и коэффициентов отражения R_p и R_s от угла падения в диапазоне углов $0 \div 90^\circ$. Для чистой поверхности серебра (кривая 1) главный угол падения равен $89,05^\circ$, при этом угле $R_s = 99,98\%$ и R_p имеет минимум, равный $70,2\%$. Разумеется, такой фазосдвигатель с крутым падением Δ и неравенством R_p и R_s не имеет ценности для практики. На этом же рисунке (кривая 2) показано, что добавлением к Ag пары диэлектрических слоев BaF₂ и ZnSe (для $\lambda = 10,6$ мкм $n = 1,392$ и $2,403$ соответственно) можно получить $|\Delta| = 135^\circ$. Слои добавляются со стороны воздуха, и первым на Ag наносится BaF₂. При двукратном отражении такая система работает как QWR. Коэффициенты отражения равны $R_s = 98,12\%$, $R_p = 97,42\%$. Толщины обоих слоев здесь равны $\lambda/8$ или, в других обозначениях, $0,5H$ и $0,5L$, где H и L – толщины $\lambda/4$ слоев. Могут быть рассмотрены и другие варианты толщин слоев. На этом же рисунке приведены результаты для четырехслойной системы из BaF₂ и Ge ($n = 4,003$) на серебре, дающей эффект QWR при однократном отражении. Коэффициенты отражения равны $R_s = 99,15\%$ и $R_p = 97,72\%$. Структура слоев здесь выглядит следующим образом: $A/0,4H0,43L1,0H0,43L/Ag$ (A – воздух). Толщины найдены методом компьютерного поиска.

Следующая возможная композиция – нанесение на Ag диэлектрического $\lambda/4$ -многослойника с двумя подгоночными слоями с целью повышения коэффициента отражения R_s - и R_p -компонент. На рис. 3 представлена 8-слойная структура $A/0,46H0,615L(HL)^3/Ag$. Толщины подгоночных слоев подобраны таким образом, чтобы обеспечить при двукратном отражении действие системы как QWR. Отношение коэффициентов отражения составляет $R_p/R_s = 99,84/99,97\%$ при одном отражении и $99,68/99,94\%$ – при двух. Цифры достаточно высоки и приближаются к максимально возможным. Для этой системы интересно оценить влияние поглощения в диэлектрических слоях на отношение R_p/R_s . При расчетах в слой BaF₂ и ZnSe вводится поглощение, различающееся, согласно [8], на порядок: $k = 10^{-3}$ для BaF₂ и $k = 10^{-4}$ для ZnSe. При введении такого поглощения коэффициент отражения $\lambda_0/4$ -структуры $A/(HL)^3/Ag$ при нормальном падении уменьшается с $99,96\%$ (без учета поглощения) до $99,78\%$, что соответствует значению $R_{\max} = 99,8\%$ в

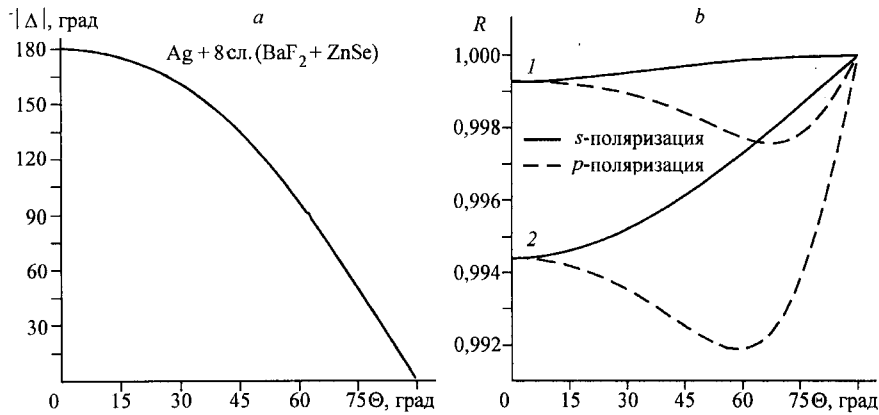


Рис. 3

[8] и в рекламе фирмы "II-VI". Для фазосдвигателей с 8-слойником на Ag влияние поглощения на R_p/R_s видно из рис. 3, *b* (кривые 2): R_p уменьшилось на 0,6 %, R_s – на 0,4 %. Влиянием поглощения на изменение Δ при таком уровне поглощения можно пренебречь, так как изменение не превышает сотых долей градуса. Если поглощение велико, то изменение Δ составляет несколько градусов, а коэффициенты отражения уменьшаются вдвое, как это видно в [5] при $k = 0,01$.

До сих пор многослойная система (8 слоев на Ag) рассматривалась как устройство QWR, функционирующее при угле $\Theta = 45^\circ$. Из рис. 3, *a* видно, что при угле $\Theta = 62^\circ$ достаточно одного отражения, чтобы получить $|\Delta| = 90^\circ$. При этом $R_p/R_s = 99,77/99,99\%$.

Наконец, еще одна многослойная структура на Ag представлена на рис. 4: $A/(0,46H0,775L)^7/Ag$ – периодический многослойник, все толщины слоев которого не равны $\lambda_0/4$. Эта структура является QWR при $\Theta = 45^\circ$ для однократного отражения. На рис. 4, *b* кривые 1 и 2 так же, как на рис. 3, *b*, показывают влияние поглощения на R_p и R_s .

Для CO_2 -лазеров представляет интерес оценить характеристики QWR в некотором спектральном диапазоне. На рис. 5, *a, b* приведены зависимости $|\Delta|$ и R от относительной длины волны для структур, описанных выше: Ag +

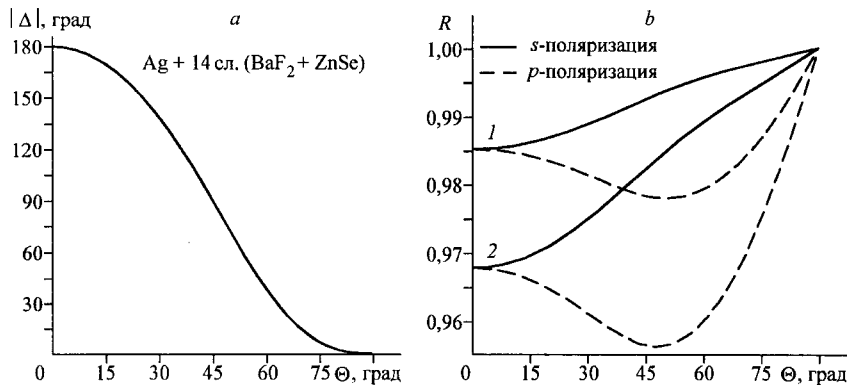


Рис. 4

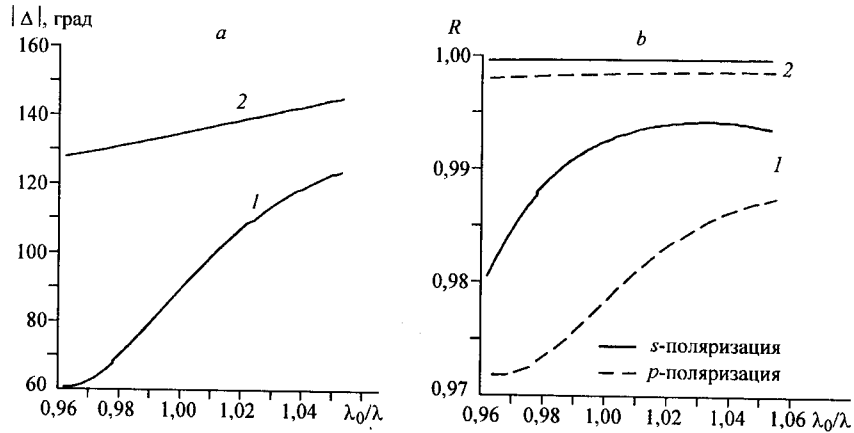


Рис. 5

+ 8 сл. (кривые 1) и Ag + 14 сл. (кривые 2). Вариации Δ в пределах $\Delta = 90 \pm 5^\circ$ происходят при расстройке $\lambda_0/\lambda = 0,996-1,006$ для структуры Ag + 14 сл. и $\Delta = 135 \pm 2,5^\circ$ при $\lambda_0/\lambda = 0,988-1,015$ для структуры Ag + 8 сл. Зависимости коэффициентов отражения при таких расстройках имеют плавный вид.

Все полученные здесь результаты расчета диэлектрических многослойников для создания QWR на Ag могут быть применены в отношении других высокоотражающих подложек. Это могут быть другие металлы, или в качестве подложки может быть использован диэлектрический многослойник с R , близким к 1. Кроме того, допустимо применение этих расчетных структур и в другом спектральном диапазоне, например для $\lambda_0 = 3,39$ мкм, так как изменения оптических констант серебра ($n = 1,6$, $k = 2$ [7]), как показали оценки, не влияют заметным образом на характеристики Δ , R_p и R_s .

Необходимо отметить многообразие вариантов выбора возможных тонкопленочных структур на металле при решении конкретно поставленной задачи. В зависимости от жесткости пределов выбранных параметров (угловой и спектральный диапазоны, величина отношения R_p/R_s , коэффициенты отражения и потерь, количество отражений) может быть выбран тот или иной вариант фазосдвигающего. Диэлектрическим многослойником, нанесенным на металлическую поверхность, можно регулировать эти параметры в заданных пределах. Например, как видно из рис. 2 и 3, фазовый сдвиг $|\Delta| = 90^\circ$ достигается в результате двух отражений как от структуры Ag + 2 сл., так и от Ag + 8 сл., но во втором случае коэффициенты отражений имеют уровень 99–100 %, а в первом – 97–98 %. При сравнении рис. 3 и 4 для композиций Ag + 8 сл. и Ag + 14 сл. уровень коэффициентов отражений одинаков (с учетом двух отражений от структуры Ag + 8 сл.), но общая толщина диэлектрических слоев первой структуры меньше на 20 % и в 2 раза меньше влияние поглощения. Задание большого числа предельных параметров требует большого количества слоев, точного нанесения расчетных толщин слоев, тонкопленочных материалов с малыми потерями и соответствующей технологии нанесения слоев. Остается возможность и для расчетов диэлектрических структур на металле с целью получения других величин Δ , например полуволновых фазосдвигающих с $\Delta = \pi$.

Фазосдвигатели в отраженном свете находят широкое применение в тех же лазерных схемах, что и фазовые кристаллические пластинки в проходя-

щем свете. Помимо этого, существуют области, где нужны только отражающие устройства. Это внутренние отражатели резонаторов химических лазеров, отражатели мощного излучения CO_2 -лазеров при резке материалов для достижения заданного профиля реза, лазерные гетеродинные системы для измерения скоростей, вибраций, малых перемещений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Southwell W. H.** Multilayer coatings producing 90° phase change // Appl. Opt. 1979. **18**, N 12. P. 1875.
2. **Apfel J. H.** Phase retardance of periodic multilayer mirrors // Appl. Opt. 1982. **21**, N 4. P. 733.
3. **Spiller E.** Totally reflecting thin film phase retarders // Appl. Opt. 1984. **23**, N 20. P. 3544.
4. **Гришина Н. В.** Синтез зеркал с постоянной разностью фаз при наклонном падении света // Оптика и спектроскопия. 1990. 69, № 2. С. 441.
5. **Cojocaru E., Julea T., Nichitiu F.** Absorbing multilayer coatings producing a 90° phase shift // Appl. Opt. 1990. **29**, N 28. P. 3984.
6. **Howlader M. M. K., Azzam R. M. A.** Periodic and quasiperiodic nonquarterwave multilayer coatings for 90-deg reflection phase retardance at 45-deg angle of incidence // Opt. Eng. 1995. **34**, N 3. P. 869.
7. **American Institute of Physics Handbook.** N. Y., 1972. P. 6.
8. **Котликов Е. Н., Шифрин Б. Ф.** Минимизация поглощения в зеркалах на основе пленок фторидов и селенида цинка // Оптика и спектроскопия. 1993. **74**, № 3. С. 621.

*Институт лазерной физики СО РАН,
E-mail: ngold@laser.nsc.ru*

*Поступило в редакцию
12 сентября 1999 г.*