

УДК 621.373.826 038.823

## АМПЛИТУДНЫЕ И ФАЗОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНОГО ЗЕРКАЛА

Ю. А. Мамаев, В. А. Маркелов, М. А. Новиков

Проведен расчет амплитудных и фазовых характеристик так называемого металлического магнитного зеркала, используемого в качестве невзаимного элемента в лазерных гироскопах. Основным элементом такого зеркала является намагниченный ферромагнитный слой, при отражении от которого вследствие экваториального магнитооптического эффекта Керра появляется фазовая и амплитудная невзаимности для встречных волн. Увеличение коэффициента отражения достигается путем нанесения поверх ферромагнетика диэлектрических слоев.

В последние годы большое внимание в лазерной гироскопии уделяется созданию нового невзаимного элемента для расщепления частот встречных волн кольцевого лазера — магнитного зеркала [1, 2]. Первые описание конструкции такого зеркала и экспериментальные результаты были приведены в патентах [3-5]. О дальнейших исследованиях по созданию магнитных зеркал с улучшенными свойствами сообщалось в работах [6, 7].

Принцип действия магнитного зеркала, основным элементом которого является намагниченная (как правило, до насыщения) ферромагнитная пленка, связан с экваториальным (поперечным) магнитооптическим эффектом Керра. Вектор намагниченности при этом параллелен поверхности зеркала и перпендикулярен плоскости падения. Отражение линейно-поляризованной в плоскости падения волны от такого зеркала приводит к изменению амплитуды и фазы волны без трансформации поляризации волны, причем это изменение зависит от направления, в котором волна падает на зеркало. Известные металлические ферромагнитные материалы имеют в видимой и близкой инфракрасной области спектра коэффициенты отражения  $\leq 70\%$ . Поэтому для увеличения коэффициента отражения от магнитного зеркала, описанного в [4, 5], использовалось нанесение поверх металлической пленки диэлектрических слоев; ближайший к металлу слой (в дальнейшем будем называть его «компенсирующим») служил для возможности управления амплитудными и фазовыми характеристиками зеркала путем изменения его оптической толщины, а остальные (отражающие диэлектрические слои) по структуре представляли из себя обычное многослойное зеркало.

В настоящей работе проведен расчет коэффициента отражения  $R_0$ , величины амплитудной  $\Delta R$  и фазовой  $\Delta\Phi$  невзаимностей магнитного зеркала как функции фазовой толщины  $\delta$  «компенсирующего» слоя. Рассмотрены зависимости невзаимных эффектов от пропускания отражающих слоев.

Известно [8], что магнитооптические свойства ферромагнетика, в котором вектор намагниченности  $I$  направлен вдоль оси  $z$ , феноменологически можно описывать с помощью тензора диэлектрической проницаемости вида

$$\hat{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \tilde{\varepsilon} & -i\tilde{\varepsilon}\tilde{Q} & 0 \\ i\tilde{\varepsilon}\tilde{Q} & \tilde{\varepsilon} & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{\varepsilon}_0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $\tilde{\varepsilon} = \varepsilon' - i\varepsilon''$  — комплексная диэлектрическая проницаемость ( $\tilde{\varepsilon}$  отличается от  $\varepsilon_0$  наличием членов порядка  $\tilde{Q}^2$ ),  $\tilde{Q} = Qe^{iq}$  — комплексный магнитооптический параметр. Для известных ферромагнитных материалов, как правило, величина  $Q \ll 1$ , поэтому будем учитывать в дальнейшем лишь линейные по  $Q$  члены в коэффициенте отражения.

При учете (1) обычная френелевская формула коэффициента отражения от поверхности намагниченного ферромагнетика для случая, когда линейно-поляризованная  $A_p^\pm$ -волна падает на металл с показателем преломления  $n_2^* = n_2(1 - ik)$  из диэлектрика с показателем преломления  $n_1$ , записывается в виде [8]

$$\tilde{r}^\pm = \frac{n_2^* \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2^*}{n_2^* \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2^*} \mp \frac{i\tilde{Q}n_1^2 |\sin 2\theta_1|}{(n_2^* \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2^*)^2}, \quad (2)$$

где  $\theta_1$  — угол падения,  $\theta_2^*$  — угол преломления (комплексный). При выводе формулы (2) предполагалось, что металлическая пленка обладает достаточной толщиной и прошедшая волна полностью поглощается в ней.

Из формулы (2) нетрудно видеть, что второе слагаемое является невязимным, так как отличается знаком для волн, падающих на зеркало под одинаковым углом, но в противоположных направлениях. Кроме того, знак невязимной части в (2) можно менять путем изменения знака  $\tilde{Q}$ , т. е. изменения направления вектора намагниченности  $I$ .

Коэффициент отражения от ферромагнетика удобно представить в следующем виде:

$$\tilde{r}^\pm = r_0 \left( 1 \pm \frac{1}{2} \Delta r \right) \exp \left( i \left( \varphi_0 \pm \frac{1}{2} \Delta \varphi \right) \right), \quad (3)$$

где величина  $r_0$  есть модуль,  $\varphi_0$  — фаза коэффициента отражения при  $Q = 0$ ,  $\Delta r$  и  $\Delta \varphi$  — соответственно величины амплитудной и фазовой невязимностей намагниченного ферромагнетика ( $|\Delta r| \ll 1$ ,  $|\Delta \varphi| \ll \pi$ ).

Поскольку  $r_0$ ,  $\varphi_0$ ,  $\Delta r$  и  $\Delta \varphi$  достаточно сложным образом зависят от целого ряда параметров, то удобно провести численный расчет этих величин и проанализировать зависимость их от угла падения  $\theta_1$ . Такой расчет был проведен для железной пленки на волне 1,15 мкм при значениях  $n_2 = 2,37$ ,  $k = 1,9$ ,  $Q = 0,077$ ,  $q = 35^\circ$ , взятых из работы [9], и показателе преломления  $n_1 = 1,4$  (фторид магния  $MgF_2$ ).

Результаты расчета представлены на графиках рис. 1а, б, из которых следует, что при угле  $\theta_1 \approx 73^\circ$  (квазибрюстеровский угол) наблюдается падение коэффициента отражения  $r_0$  до минимума ( $r_0^{\min} \approx 0,58$ ) одновременно с ростом величины фазовой невязимности  $\Delta \varphi$  до своего максимального значения ( $\Delta \varphi_{\max} \approx 2^\circ,5$ ). При этом вместе с большой величиной фазовой невязимности получаем, разумеется, сравнительно небольшие коэффициенты отражения (за исключением углов, близких к скользящим).

Перейдем к расчету коэффициента отражения от магнитного зеркала с дополнительным диэлектрическим покрытием, схематически изображенного на рис. 2. Диэлектрическое покрытие состоит из чередую-

щихся диэлектрических слоев с большим  $n_3$  и малым  $n_1$  показателем преломления. Воспользовавшись методикой расчета коэффициентов

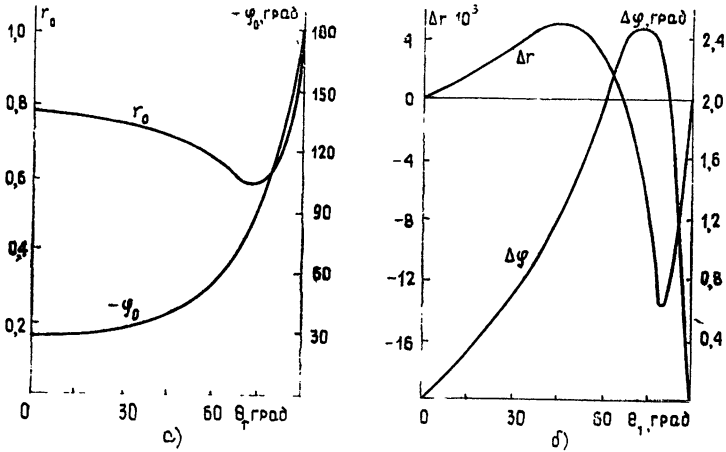


Рис. 1. Зависимость модуля и фазы коэффициента отражения (а) и величин амплитудной и фазовой невязанностей (б) волны от угла падения на железную пленку ( $\lambda = 1,15$  мкм) в случае поперечного эффекта Керра.

Френеля от многослойных покрытий [10, 11], для комплексного коэффициента отражения  $\tilde{R}^\pm$  от магнитного зеркала получим следующее выражение:

$$\tilde{R}^\pm = \frac{\rho - r^\pm e^{-i2\delta}}{1 - \rho r^\pm e^{-i2\delta}}, \quad (4)$$

где  $\delta = 2\pi\lambda_0^{-1} n_1 h \cos \theta_1$ ,  $\sin \theta_1 = n_1^{-1} \sin \theta_0$ ,  $h$  — толщина «компенсирующего» слоя,  $\lambda_0$  — длина волны в вакууме,  $\theta_0$  — угол падения на зеркало,  $\rho$  — суммарный коэффициент отражения от резонансных диэлектрических слоев, нанесенных поверх «компенсирующего» (считаем  $\rho$  действительным).

Выражение (4) по аналогии с (3) можно представить в виде

$$\tilde{R}^\pm = R_0 \left( 1 \pm \frac{1}{2} \Delta R \right) \exp \left( i \left( \Phi_0 \pm \frac{1}{2} \Delta \Phi \right) \right), \quad (5)$$

здесь величина  $R_0$  характеризует отражательные свойства магнитного зеркала,  $\Delta R$  и  $\Delta \Phi$  — его амплитудную и фазовую невязанности.

Для магнитного зеркала с железной пленкой на волне 1,15 мкм был проведен численный расчет зависимостей  $R_0$ ,  $\Delta \Phi$  и  $\Delta R$  от фазовой толщины  $\delta$  «компенсирующего» слоя. Результаты расчета, выполненного для трех значений коэффициента отражения  $\rho = 0,7$ ; 0,9 и 0,95 (кривые 1, 2 и 3), в случае, когда «компенсирующий» слой имеет показатель преломления  $n_1 = 1,4$ , представлены на графиках рис. 3а, б, в (угол падения на зеркало выбран  $\theta_0 = 30^\circ$ ).

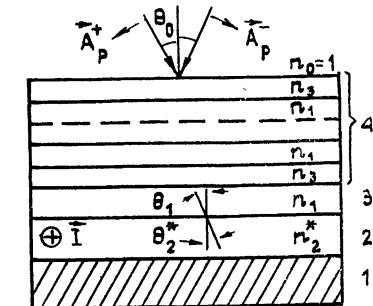


Рис. 2. Схематическое изображение многослойного магнитного зеркала: 1 — подложка, 2 — металлический ферромагнетик, 3 — «компенсирующий» слой, 4 — отражающие слои

Из приведенных графиков следует, что коэффициент отражения  $R_0$  имеет «резонансную» область, в которой происходит значительное уменьшение  $R_0$  и вместе с этим наблюдается резкая зависимость  $\Delta \Phi(\delta)$  и  $\Delta R(\delta)$ .

Суммарный коэффициент отражения  $R_0$  минимален при  $\delta = 165 + 180^\circ m$ , где  $m = 0, 1, 2, \dots$  (это соответствует  $h \approx (0,351 + 0,383 m)\lambda_0$ ), а максимум  $R_0$  имеет место при  $\delta = 75^\circ + 180^\circ m$  (это соответствует  $h \approx (0,16 + 0,383 m)\lambda_0$ ).

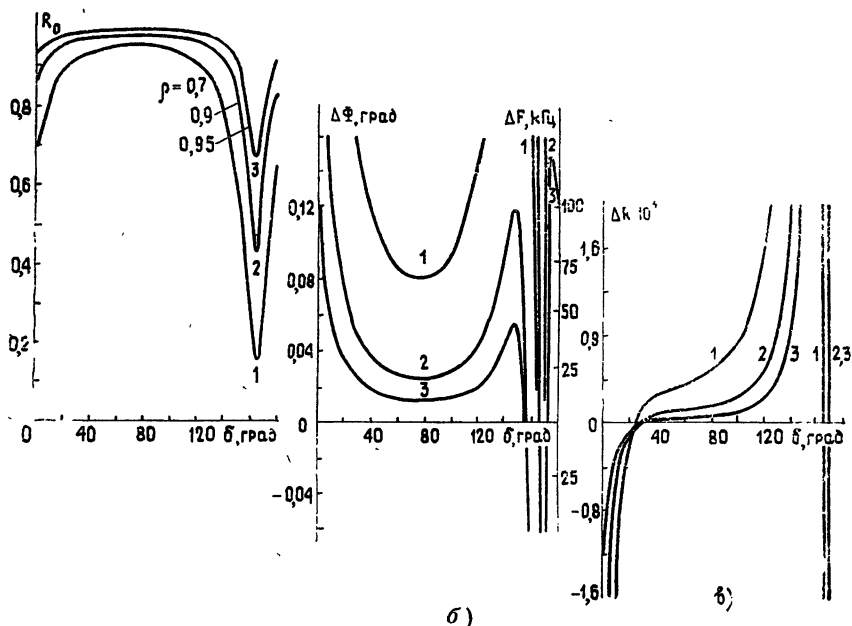


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения (а), величины фазовой (б) и амплитудной (в) невязимостей магнитного зеркала от фазовой толщины «компенсирующего» слоя.

С точки зрения использования магнитного зеркала для создания частотной «подставки» в лазерных гироскопах важно знать величину фазовой невязимости в области достаточно больших коэффициентов отражения. Из графика на рис. 3б, в частности, следует, что при максимальном значении коэффициента отражения величина  $\Delta\Phi$  минимальна в этой области и для  $R_0^{\max} = 0,986$  (при  $\rho = 0,9$ ) равна  $0^\circ,024$ . Величина расщепления частот  $\Delta F$  встречных волн кольцевого лазера связана с величиной фазовой невязимости  $\Delta\Phi$  известным соотношением  $\Delta F = (\Delta\Phi/2\pi)(c/L)$ , где  $c$  — скорость света,  $L$  — периметр резонатора. Поэтому для наглядности на рис. 3б наряду с  $\Delta\Phi$  приводятся значения величины расщепления частот  $\Delta F$  для кольцевого лазера с периметром  $L = 1$  м.

Повысить фазовую невязимность магнитного зеркала можно, как следует из проведенных расчетов, либо за счет уменьшения  $\rho$  (меньшее число отражающих слоев), либо за счет изменения  $\delta$ . Однако оба эти способа приводят, естественно, к уменьшению  $R_0$ .

Изменение оптической толщины «компенсирующего» слоя позволяет также управлять и другой характеристикой магнитного зеркала — величиной амплитудной невязимости  $\Delta R$  (см. рис. 3в). При использовании кольцевого лазера в качестве датчика угловой скорости вращения желательнее, чтобы отсутствовала амплитудная невязимность. Из графиков на рис. 3в получаем, что для рассмотренного выше случая ( $\rho = 0,9$ )  $\Delta R = 0$  при  $\delta = 28^\circ$ , в то время как при  $\delta = 75^\circ$  величина  $\Delta R = 1,2 \cdot 10^{-4}$ . Значение  $\delta$ , соответствующее  $\Delta R = 0$ , может незначительно меняться (на величину  $\sim 3 \div 5^\circ$ ) при изменении  $\rho$  в пределах  $0,95 \div 0,7$ ,  $n_2 = 2,3 \div 3,35$ ,  $k = 1,5 \div 1,9$ , практически не нарушая качественной зависимости  $R_0(\delta)$ ,  $\Delta\Phi(\delta)$  и  $\Delta R(\delta)$ .

Повышение коэффициента отражения нанесенных поверх «компенсирующего» диэлектрических слоев, как отмечалось выше, приводит одновременно с ростом  $R_0$  к уменьшению амплитудной и фазовой невязимности, что наглядно проиллюстрировано на графиках рис. 4, построенных для точки  $\delta = 75^\circ$ . Зависимости  $\Delta R$  и  $\Delta\Phi$  от  $1 - \rho$  в выбранном масштабе практически описываются одной кривой. При значениях  $1 - \rho \ll 1$  эти зависимости линейны  $\Delta R, \Delta\Phi \propto 1 - \rho$ ; отклонение от линейной зависимости наблюдается для  $\rho \leq 0,85$ .

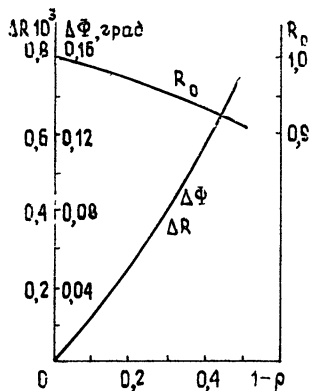


Рис. 4. Зависимость коэффициента отражения, амплитудной и фазовой невязимностей магнитного зеркала от пропускающего отражающих слоев

Следует заметить, что рассмотрение другого варианта магнитного зеркала с большим показателем преломления  $n_1$  (например, для  $ZnS$   $n_1 = 2,3$ ) при заданной величине  $R_0$  практически не дало выигрыша в  $\Delta\Phi$  по сравнению с первым случаем.

Таким образом, проведенные расчеты позволяют оптимизировать параметры магнитного зеркала по величине коэффициента отражения, фазовой и амплитудной невязимностей, причем подбирать такие значения фазовой толщины  $\delta$ , для которых амплитудная невязимность обращается в нуль при отличной от нуля фазовой.

Авторы выражают благодарность И. А. Андроновой и А. А. Туркину за полезное обсуждение результатов работы, а И. Л. Берштейну за ряд ценных замечаний по содержанию статьи.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Klass J. P. — Aviat. Week and Space Technol., 1977, 107, p. 44.
2. Greenstein H. — Laser Focus., 1978, 14, p. 60.
3. McClure R. E. — U. S. Patent № 3927946, Dec. 23, 1975.
4. McClure R. E. — Patent Specification № 1464882, Feb. 16, 1977.
5. Масек W. M. — Patent Specification № 1406730, Sept. 17, 1975.
6. McClure R. E., Vaher E. An improved ring laser bias element. — In: Proc. IEEE Nat. Aerospace and Electron. Conf., NAECON-78, Dayton, 1978. New York, N. Y., 1978, p. 544.
7. Dorschner T. A., Smith I. W., Statz H. A manganese bismuth magnetic mirror for the Raytheon laser gyroscope. — In: Proc. IEEE Nat. Aerospace and Electron. Conf., NAECON-78, Dayton, 1978, New York, N. Y., 1978, p. 569.
8. Соколов А. В. Оптические свойства металлов. — М.: Физматгиз, 1961
9. Афанасьева Л. А., Кириллова М. М. — ФММ, 1967, 23, с. 472.
10. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. — М.: Наука, 1973.
11. Крылова Т. Н. Интерференционные покрытия. — Л.: Машиностроение, 1973.

Институт прикладной физики  
АН СССР

Поступила в редакцию  
2 октября 1980 г.

#### AMPLITUDE AND PHASE CHARACTERISTICS OF A MAGNETIC MIRROR

*Yu. A. Mamaev, V. A. Markelov, M. A. Novikov*

The amplitude and phase characteristics of a so-called magnetic mirror used as a nonreciprocal element in laser gyroscopes have been calculated. The basic element of such a mirror is a magnetized ferromagnetic layer responsible for the appearance of phase and amplitude nonreciprocities for opposite waves due to the equatorial magneto-optical Kerr effect. An increase in the reflection coefficient is obtained by superimposing of dielectric layers on a ferromagnetic.