

УДК 535.8

МЕТОД РАСЧЁТА НЕСИММЕТРИЧНЫХ ЗЕРКАЛ ДЛЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ ОТРАЖЁННОГО СВЕТА*

Н. Д. Голдина

*Институт лазерной физики СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13/3
E-mail: ngold@laser.nsc.ru*

Круговые диаграммы для комплексного амплитудного коэффициента отражения использованы для разработки многослойного зеркала, в состав которого входит тонкая металлическая плёнка. Предлагаемый метод позволяет рассчитать несимметричное переднее зеркало двухзеркального многолучевого интерферометра отражённого света, создающего интерференционную картину в виде симметричных узких светлых полос.

Ключевые слова: многолучевые интерферометры, зеркала с тонким металлическим слоем, графический метод синтеза.

Введение. Графические методы полезны при конструировании многослойных структур. На ранних этапах графические построения помогали находить приближённые решения вместо применения громоздких формул [1, 2]. Нужно отметить, что и с появлением цифровых компьютеров интерес к графическим методам сохранился благодаря физической наглядности процесса проектирования. Такой подход позволяет находить начальное предварительное решение. Графические компьютерные программы помогают делать любые построения, облегчая решение обратных задач и оптимизацию параметров конструируемой системы. В оптике тонких слоёв дробно-линейные преобразования комплексных переменных представляются в виде адмиттансных диаграмм, а амплитудные коэффициенты отражения — в виде круговых диаграмм. Для диэлектрических слоёв при отсутствии поглощения круговые диаграммы отражения конструируются довольно просто [3].

Однако в литературе представлено не так много примеров расчёта многослойных металл-диэлектрических систем. В наших работах [4, 5] такие системы использовались в интерферометрах отражённого света для создания узких светлых полос, подобных полосам пропускания в интерферометре Фабри — Перо. Многолучевые интерферометры отражённого света со своеобразными фазовыми и временными характеристиками ещё не нашли широкого применения в оптических устройствах [6]. Сложным этапом в этой задаче является конструирование несимметричного (различные коэффициенты отражения с двух сторон) переднего зеркала, от свойств которого зависят контраст, ширина и асимметрия интерференционных полос. Современные методы расчёта с помощью компьютеров позволяют искать более сложные решения этой задачи, чем в [7].

В данной работе демонстрируется применение круговых диаграмм отражения при графическом решении задачи конструирования переднего поглощающего зеркала отражающего интерферометра. Поглощение вводится тонкой металлической плёнкой. Поскольку

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 14-02-00248).

толщина металлической плёнки много меньше длины волны, то при расчётах используется модель проводящей поверхности — вводится комплексный параметр ξ , величина которого может быть измерена экспериментально [6].

Целью предлагаемой работы является формирование заданной зависимости коэффициента отражения интерферометра от фазового набега $R(\varphi)$ с помощью компенсирующих диэлектрических слоёв в переднем зеркале, а именно получение симметричных узких интерференционных полос при идеальном контрасте, как и в [4].

Существует два варианта нанесения диэлектрических слоёв в переднем зеркале: перед поглощающим слоем или после него. Все расчёты выполнены для одной длины волны λ_0 .

Вариант 1. Диэлектрические слои перед металлическим слоем. Первый вариант аналогичен задаче, которая решается при просветлении поверхностей. Однако кроме выполнения условия согласования, при котором коэффициент отражения стремится к нулю, необходимо обеспечить заданную форму интерференционных полос. В общем случае задача может быть решена с помощью двух слоёв, толщина которых не равна $\lambda_0/4$.

Рассматриваемая структура показана на вставке рис. 1. Пусть комплексная сосредоточенная проводимость металлической плёнки равна $\xi = \xi' + i\xi'' = 1,71 + i1,0$ [4]. Тонкая поглощающая плёнка на схеме изображена серым прямоугольником. Со стороны падения света (воздушная среда с показателем преломления $n_0 = 1,0$) на поглощающую плёнку нанесены два диэлектрических слоя (криолит и ZnS) с показателями преломления $n_L = 1,34$ и $n_H = 2,3$. С другой стороны поглощающей плёнки расположены кварцевая подложка (она не показана) и заднее высокоотражающее зеркало интерферометра (прямоугольник чёрного цвета). Будем считать, что для создания интерференционной картины изменяется фазовая толщина интерферометра φ . Коэффициент отражения интерферометра R является периодической функцией с периодом $\varphi = \pi$. Величина $R(\varphi)$ без диэлектрических слоёв показана на рис. 1 сплошной кривой. Максимальный коэффициент отражения интерферометра достигается, если металлическая плёнка находится в узле стоячей волны при $\varphi_{\max} = \pi$ [6]. Отсюда следует, что для создания симметричных полос условие минимума $R(\varphi)$ должно быть выполнено для $\varphi_{\min} = \pi/2$, когда поглощающая плёнка находится в пучности стоячей волны. Амплитудный коэффициент отражения интерферометра в точке φ_{\min} имеет вид [4] $r = (1,0 - \xi)/(1,0 + \xi) = -0,35 - i0,24$.

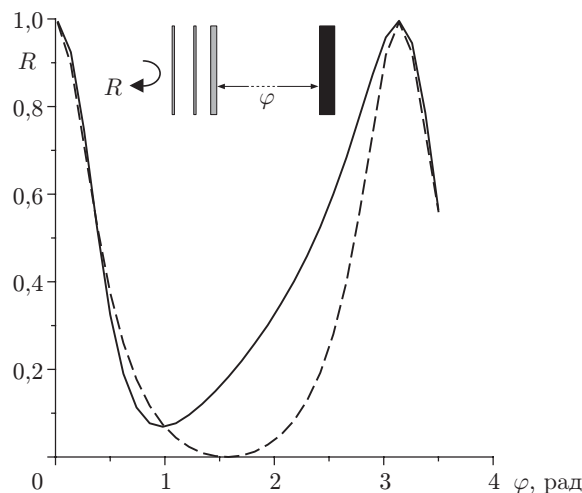


Рис. 1. Зависимость коэффициента отражения интерферометра от набега фазы между зеркалами. На вставке приведена схема отражающего интерферометра (вариант 1)

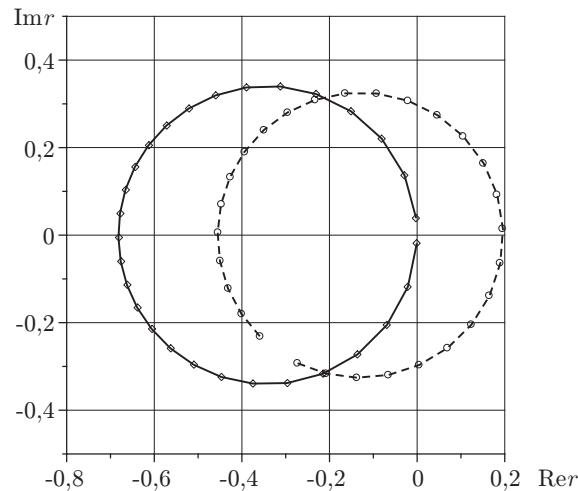


Рис. 2. Графическое представление зависимости амплитудного коэффициента отражения системы от варьируемой толщины двух слоёв: Na_3AlF_6 (штриховой круг) и ZnS (сплошной круг), когда интерферометр настроен на минимум отражения

На рис. 2 представлена круговая диаграмма — изменение амплитудных коэффициентов отражения всей системы при изменении (по часовой стрелке) толщин слоёв δ_L и δ_H для двух материалов — криолита и ZnS (при этом $\varphi = \pi/2$). Можно выполнить построение полной круговой диаграммы, как в [4]. На рисунке изображены только два нужных для решения задачи круга: начальная точка круга для криолита (штриховая кривая) расположена в точке $r = -0,35 - i0,24$, а конечная точка круга для ZnS (сплошная кривая) приближается к началу координат (точке $(0, 0)$). Метками на кругах показаны значения толщин с шагом $\approx 0,071$. По точке пересечения двух кругов можно определить толщины материалов $\delta_L = 0,74$, $\delta_H = 0,29$, которые указаны в долях $\lambda_0/4$. Результаты проектирования показаны на рис. 1 штриховой кривой: зависимость $R(\varphi)$ имеет симметричный вид и $R_{\min} = 0$.

Ширину интерференционных кривых можно регулировать четвертьволновыми многослойниками, добавленными к металлической плёнке с обратной стороны. От коэффициента отражения заднего зеркала зависит только величина R_{\max} .

Первый вариант требует точного контроля толщин слоёв.

Вариант 2. Диэлектрические слои внутри интерферометра. Данный вариант состоит в размещении диэлектрических слоёв внутри интерферометра после поглощающей плёнки (вставка на рис. 3). Зависимость $\tilde{R}(\varphi)$ для зеркала, когда на подложку нанесён только металлический слой, показана пунктирной кривой. Если для увеличения резкости интерференционных полос на металлическую плёнку добавить шесть четвертьволновых слоёв, то получается асимметричная кривая (штрихпунктирная на рис. 3). Форму кривых можно изменять компенсирующими диэлектрическими слоями. Для получения заданных характеристик $\tilde{R}(\varphi)$ отражающего интерферометра толщины этих слоёв необходимо оптимизировать.

Расчёты подобных многослойных структур удобно производить графическим методом, используя круговые диаграммы для комплексного коэффициента отражения. Рассматриваемый случай соответствует круговым диаграммам для иммерсных слоёв, когда слой вносится между двумя тонкослойными системами [3]. В данном случае первой системой является тонкая металлическая плёнка на подложке с показателем преломления n_s . Вторая система — диэлектрический многослойник.

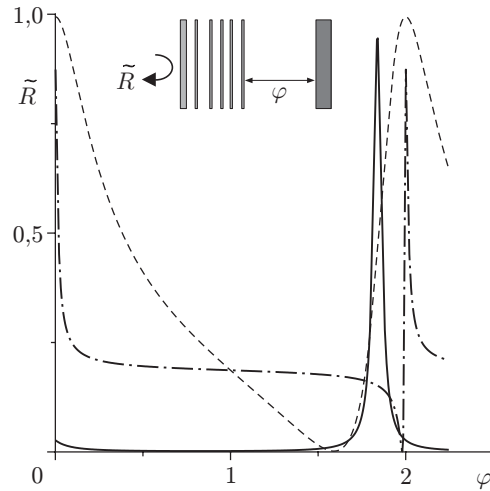


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения интерферометра от набега фазы: переднее зеркало состоит только из металлической плёнки (пунктирная кривая), к плёнке добавлен четвертьволновый многослойник (штрихпунктирная кривая), интерферометр с синтезированным передним зеркалом (сплошная кривая). Значения φ выражены в единицах $\pi/2$. На вставке показана схема отражающего интерферометра, вариант 2

Способ контроля толщин компенсирующих слоёв, который нетрудно осуществить на практике, впервые обнаружен в [4]. Этот способ состоит в нанесении диэлектрических слоёв на металлическую плёнку с одновременным контролем величины коэффициента отражения со стороны подложки R' (схема измерений приведена на вставке рис. 4). Нанесение слоя останавливается в момент достижения экстремума R' .

На рис. 4 представлены зависимости R' от толщины каждого из шести слоёв (толщина $\delta = 1,0$ соответствует толщине четвертьволнового слоя). Здесь $\xi = 1,34 - i1,34$, $n_H/n_L = 2,30/1,35$, значения параметров, как в [5]. Видно, что экстремумы R' достигаются при разных значениях оптической толщины, не равных $\lambda_0/4$: $\delta_{1L} = 1,31$, $\delta_{2H} = 1,25$, $\delta_{3L} = 0,91$, $\delta_{4H} = 1,25$, $\delta_{5L} = 0,91$, $\delta_{6H} = 1,25$.

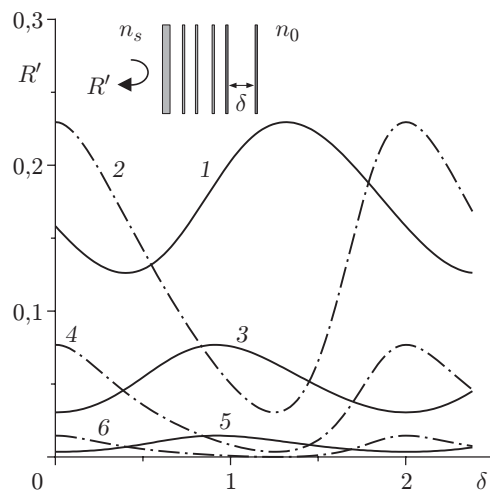


Рис. 4. Зависимости коэффициента отражения переднего зеркала от толщины каждого из шести диэлектрических слоёв при контроле со стороны подложки, на которую нанесена металлическая плёнка с $\xi = 1,34 - i1,34$

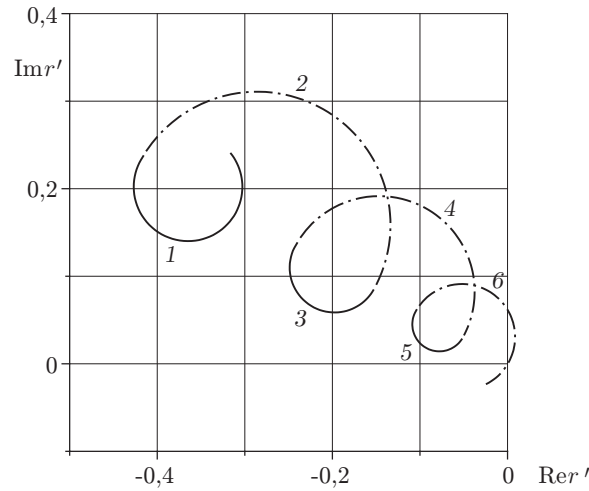


Рис. 5. Круговая диаграмма для амплитудного коэффициента отражения диэлектрического многослойника из шести слоёв, толщина каждого из которых соответствует экстремумам R' на рис. 4

На рис. 5 показаны круговые диаграммы этих слоёв. Начальная точка спирали находится во второй четверти и соответствует значению r' в бегущей волне:

$$r' = (n_s - \xi - n_0)/(n_s + \xi + n_0) = -0,32 + i0,24,$$

где $n_s = 1,46$, $n_0 = 1,0$. Начала и концы кругов для остальных слоёв расположены на одной прямой, наклонённой к горизонтальной оси под углом $\theta = 28,7^\circ$. Здесь $\operatorname{tg} \theta = \operatorname{Im} r' / \operatorname{Re} r'$, где значения r' соответствуют максимальной величине $|r'|$ для первого слоя. Из диаграммы видно, что дальнейшее увеличение количества диэлектрических слоёв приведёт к увеличению R' . Минимальное значение R' переднего зеркала с указанными выше толщинами равно $4 \cdot 10^{-5} \%$.

В интерферометре с таким передним зеркалом интерференционные полосы имеют практически симметричный вид (см. рис. 3, сплошная кривая). Из рисунка видно, что способ контроля толщин диэлектрических слоёв по экстремумам R' позволяет получать

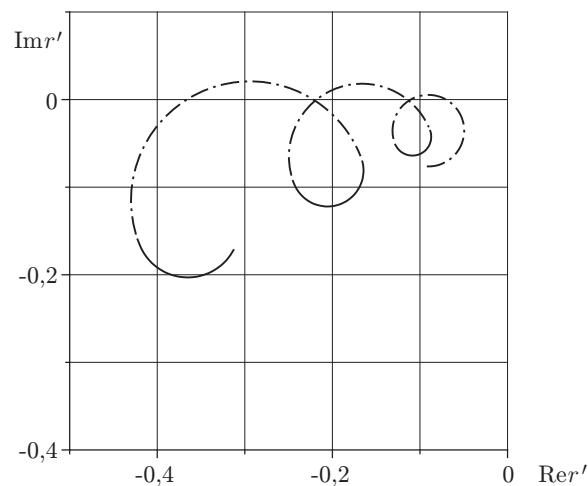


Рис. 6. Круговая диаграмма, как на рис. 5, но $\xi = 1,54 + i1,0$

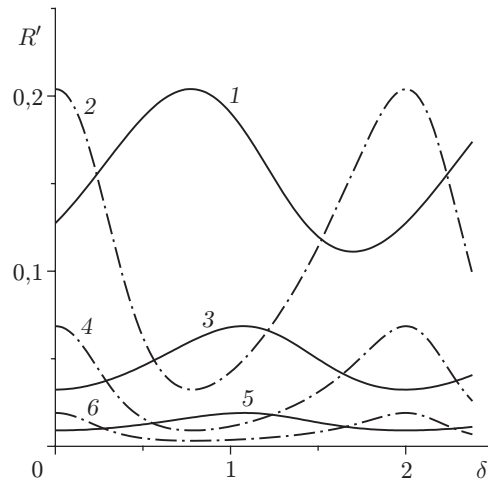


Рис. 7. Зависимости коэффициента отражения от толщины, как на рис. 4, но $\xi = 1,54 + i1,0$

симметричную зависимость коэффициента отражения интерферометра при сканировании расстояния между зеркалами и одновременно достигать эффективного контраста.

Тонкие металлические плёнки могут иметь реактивную составляющую ξ'' с другим знаком. Для никелевой плёнки с $\xi = 1,54 + i1,0$ (экспериментальные данные взяты из [4]) круговая диаграмма для r' с последовательным нанесением шести слоёв дана на рис. 6. Начало спирали расположено в третьей четверти, так как $r' = -0,31 - i0,17$. Толщины слоёв соответствуют экстремальным значениям R' , показанным на рис. 7. Заметим, что знак ξ'' может быть определён из экспериментальной зависимости $R' = |r'|^2$ при нанесении первого слоя криолита, как видно из рис. 6 и 4. Максимальное значение R' для $\xi'' > 0$ достигается при толщине меньше $\lambda_0/4$, в то время как для $\xi'' < 0$ толщина первого слоя превышает $\lambda_0/4$ (коэффициент отражения R' вначале уменьшается). Угол наклона кругов по отношению к горизонтальной оси на рис. 6 соответствует максимальной величине $|r'|$ для первого слоя и составляет $\theta = 21,4^\circ$. Из диаграммы также видно, что здесь возможно увеличение количества слоёв. Так, для восьми слоёв величина R' уменьшится вдвое по сравнению с шестью слоями и составит 0,15 %. В интерферометре картина получается не совсем симметричной. Для дополнительной симметризации характеристик $\tilde{R}(\varphi)$ интерферометра можно использовать способ нахождения толщин слоёв, останавливая процесс нанесения слоя при $\text{Im}r' = 0$. В данном способе достаточно двух первых слоёв с толщиной не равной $\lambda_0/4$, чтобы построить структуру переднего зеркала из шести слоёв. Но здесь необходимо найти экспериментальный способ точного контроля толщин двух первых слоёв.

Экспериментальная проверка. Хороший результат для интерферометра с симметричными кривыми $\tilde{R}(\varphi)$ получен экспериментально с той же никелевой плёнкой ($\xi = 1,54 + i1,0$), когда в качестве первого слоя взят материал с высоким показателем преломления [4]. На рис. 8 показаны зависимости $\tilde{R}(\varphi)$ для чистого никеля (пунктирная кривая) и никеля с Н-слоем ZnS оптической толщины $\varphi_{\text{H}} = 1,67$ (сплошная кривая). Толщина этого слоя была определена по формуле (8) из [4]:

$$\varphi_{\text{H}} = \arctg \left\{ \frac{n_{\text{H}}}{2\xi''} \left(\left[\left(\frac{n_{\text{H}}}{\kappa n} \right)^2 - 1 \right] \pm \sqrt{\left[\left(\frac{n_{\text{H}}}{\kappa n} \right)^2 - 1 \right]^2 - \left(\frac{2\xi''}{\kappa n} \right)^2} \right) \right\},$$

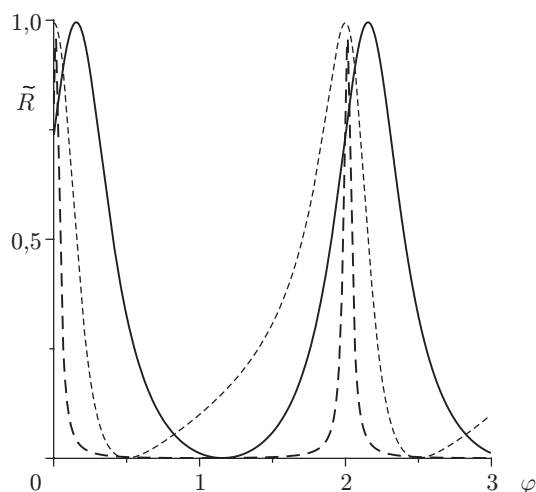


Рис. 8. Зависимости $\tilde{R}(\varphi)$ интерферометра, переднее зеркало которого включает пять диэлектрических слоёв: один компенсирующий Н-слой и четыре четвертьволновых слоя (штриховая кривая); для зеркала с одним компенсирующим Н-слоем (сплошная кривая), для зеркала без диэлектрических слоёв (пунктирная кривая)

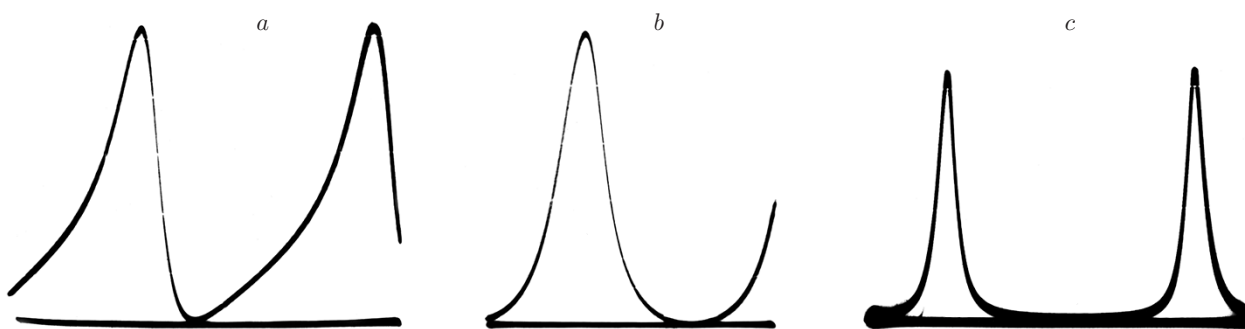


Рис. 9. Экспериментальные осциллограммы $\tilde{R}(\varphi)$ в соответствии с расчётами рис. 8: *a* — для чистого никеля, *b* — для никеля с Н-слоем, *c* — для никеля с пятью слоями HLHLH

где kn — коэффициент трансформации проводимости (для одного слоя $kn = 1,0$). Здесь показатель преломления прослойки интерферометра $n = 1,0$. Если к Н-слою добавить ещё четыре слоя LHLH, то $kn = (n_L/n_H)^4 = (1,35/2,3)^4 = 0,119$. Толщина φ_H для компенсирующего слоя, как следует из формулы, в этом случае несколько изменяется и равна 1,74. Симметричная зависимость $\tilde{R}(\varphi)$ для интерферометра с передним зеркалом со структурой никель с пятью слоями HLHLH приведена на рис. 8 штриховой кривой.

Экспериментальная проверка показала хорошее согласие с расчётами для варианта с одним подгоночным Н-слоем (рис. 9). Требования к точному нанесению толщин слоёв значительно возрастают для многослойной композиции.

Заключение. В данной работе представлен расчёт несимметричного переднего зеркала отражающего интерферометра с использованием круговых диаграмм для комплексного коэффициента отражения. Метод обеспечивает наглядность и помогает находить оптимальные решения. Рассмотрены два варианта размещения диэлектрических слоёв: до и после тонкой металлической плёнки. Полезным для практического применения является второй вариант, позволяющий точно проконтролировать толщину компенсирующих слоёв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бернинг П. Х.** Теория и методы расчета оптических свойств тонких пленок // Физика тонких пленок. М.: Мир, 1967. Т. 1. С. 91–151.
2. **Vaumeister P. W.** Optical Coating Technology. SPIE Press, 2004. 851 p.
3. **Apfel J. H.** Graphics in optical coating design // Appl. Opt. 1972. **11**, N 6. P. 1303–1312.
4. **Голдина Н. Д., Захаров М. И., Троицкий Ю. В.** Синтез характеристик многолучевого отражающего интерферометра // Автометрия. 1975. № 3. С. 105–118.
5. **Каменев Н. Н., Троицкий Ю. В.** Металлодиэлектрические зеркала с односторонним отражением света // Оптика и спектроскопия. 1983. **54**, № 4. С. 725–730.
6. **Троицкий Ю. В.** Многолучевые интерферометры отраженного света. Новосибирск: Наука, 1985. 207 с.
7. **Кард П. Г.** К теории несимметричных отражателей // Оптика и спектроскопия. 1961. **10**, № 3. С. 384–389.

Поступила в редакцию 4 июля 2013 г.
