

УДК 535.417.2 : 535.853.4

М. И. Захаров
(Новосибирск)

**ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОЛУЧЕВОГО
АНИЗОТРОПНОГО ОТРАЖАЮЩЕГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА
С УЧЕТОМ ВНУТРЕННИХ ПОТЕРЬ**

Изложены результаты теоретического исследования аппаратной функции многолучевого отражающего интерферометра с двумя анизотропными фазовыми пластинками. Показано, что, меняя ориентацию оптической оси наружной пластинки, можно оперативно управлять яркостью, контрастом и другими характеристиками интерференционной картины. Получены аналитические выражения для определения оптимальных значений параметров элементов интерферометра, при которых, например, обеспечивается возможность достижения максимальной яркости при заданном контрасте и другие возможности.

1. В ряде работ рассмотрены модификации интерферометра Фабри – Перо, в которых между зеркалами помещен элемент, обладающий фазовой анизотропией, например, ячейка Фарадея [1] или двупреломляющая пластинка [2]. В отраженном свете, поляризованном перпендикулярно падающему, такое устройство формирует узкие полосы на темном фоне [2], т. е. «необращенную» интерференционную картину. Это связано с тем, что луч нулевого порядка, отраженный от переднего зеркала в сторону поляризатора, не участвует в указанном процессе.

Введенная между поляризатором и передним зеркалом дополнительная фазовая пластинка [3] позволяет регулировать степень участия нулевого луча, а также амплитуды и фазы отраженных лучей более высоких порядков и формировать интерференционную картину с нужными характеристиками. Как показано в [4, 5], анизотропный отражающий интерферометр (АОИ) этого типа может использоваться для спектральных и поляризационных измерений, частотной селекции в лазерах, измерения перемещений и т. п.

Известно [6], что роль второго (заднего) зеркала многолучевого интерферометра может играть непрозрачный исследуемый объект, коэффициент отражения поверхности которого заметно отличается от 1. Иногда объектом исследований является помещаемая внутрь интерферометра ячейка Фарадея, обладающая заметным поглощением (см., например, [7]). Известно также, что потери при отражении света от интерферометра могут значительно превышать по величине внутренние потери (вследствие многократности проходов светового луча между зеркалами). Между тем, например, для внутрिलाзерного использования [7] нужны устройства с низкими вносимы-

ми потерями [6]. Однако проблема уменьшения влияния внутренних потерь на величину максимумов отражения АОИ до сих пор не рассматривалась (в отличие от изотропных ОИ [6]).

Приведенные примеры показывают, что расчет АОИ с учетом потерь энергии внутри него является актуальной задачей. Цель настоящей работы – исследование влияния внутренних потерь в АОИ на вид его аппаратной функции и нахождение с учетом этого влияния оптимальных соотношений между параметрами дополнительной фазовой пластинки и переднего зеркала.

2. АОИ изображен на рис. 1. Между поляризатором П и передним зеркалом Z_1 установлена линейная фазовая пластинка 1, а между зеркалами Z_1 и Z_2 – циркулярная фазовая пластинка 2 (Фарадеевский вращатель). Для устранения паразитных отражений и уменьшения вносимых потерь поверхности фазовых пластинок должны быть просветлены. Каждая из пластинок 1 и 2 вносит определенную разность фаз между собственными волнами, поляризации которых соответствуют типу пластинки, т. е. являются линейными или круговыми. Слева на интерферометр в направлении его оси (ось z на рис. 1) падает плоская монохроматическая волна. Считается, что форма волнового фронта сохраняется по всей длине данного устройства.

В качестве осей x и y удобно взять главные направления анизотропии линейного поляризатора-светоделиителя. Пусть вектор \mathbf{E} волны, прошедшей поляризатор, параллелен оси y . Тогда, применив метод Джонса (см., например, [4]), найдем компоненты вектора \mathbf{E}' поля отраженной волны в области между поляризатором и пластинкой 1:

$$\begin{aligned} E'_x &= E_y [(1 - \sin 2\theta \cdot \sin 2\alpha) \rho_+ - (1 + \sin 2\theta \cdot \sin 2\alpha) \rho_-] / (2i), \\ E'_y &= E_y (e^{2i\theta} \sin^2 \alpha + e^{-2i\theta} \cos^2 \alpha) (\rho_+ + \rho_-) / 2. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь ρ_{\pm} – амплитудные коэффициенты отражения системы зеркал Z_1 и Z_2 с пластинкой 2 между ними для волн, являющихся собственными волнами этой пластинки [4, 5]; 2θ – фазовый сдвиг между собственными волнами в пластинке 1; α – угол между оптической осью пластинки 1 и осью y .

Из формулы (1) видно, что АОИ с ячейкой Фарадея между зеркалами формирует «необращенную» интерференционную картину в отраженном свете, поляризованном перпендикулярно падающему, и лишь при наличии пластинки 1, для которой $\sin 2\theta \neq 0$, соотношение амплитуд собственных волн пластинки 2 можно регулировать. Это достигается изменением параметров α и θ (т. е. поворотом пластинки 1 и изменением величины ее анизотропии). Как следствие, появляется дополнительная возможность управления характеристиками интерференционной картины.

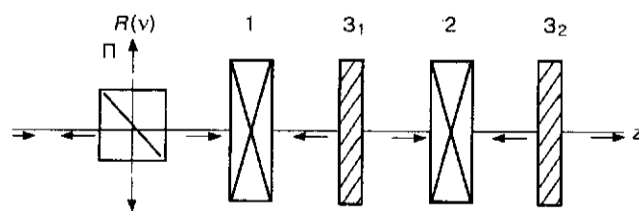


Рис. 1. Схема анизотропного отражающего интерферометра

3. Рассмотрим АОИ, в котором фазовый сдвиг между собственными волнами в обеих пластинках равен $\pi/2$. Коэффициент отражения такого АОИ в боковом направлении (см. рис. 1), который мы и будем называть аппаратной функцией, найдем с помощью (1):

$$R(\delta) \equiv |E'_x/E_y|^2 = [R_0/(1 + R_0 F_1 \cos^2 2\delta)]g(\delta), \quad (2)$$

где

$$g(\delta) = (1 + \sqrt{F_1/F_2} \sin 2\alpha \cdot \sin 2\delta)^2 + (F_1/F_2)(1 + F_2) \sin^2 2\alpha \cdot \cos^2 2\delta.$$

Здесь $\delta = 2\pi\nu l/c$ – изотропный набег фазы за один проход между зеркалами; ν – частота падающей волны; c – скорость света; l – оптическая длина отрезка между зеркалами (без учета анизотропии);

$$R_0 = R_2(1 - R_1)^2/(1 - R_1 R_2)^2; \quad F_{1,2} = 4R_{1,2}/(1 - R_{1,2})^2; \quad (3)$$

$R_{1,2}$ – коэффициенты отражения зеркал, причем в R_2 учтены потери, вносимые пластинкой 2. В дальнейшем будем считать, что зависимостью параметров зеркал и фазовых пластинок от частоты в (2) можно пренебречь внутри интервала, по крайней мере, в несколько раз большего по сравнению с $c/2l$.

С точки зрения практических применений АОИ интерес представляют вид его аппаратной функции и следующие характеристики: область свободной дисперсии, величина главных максимумов функции R_{\max} , их острота, которую определим, следуя [6], как $F = -(1/2R_{\max})(d^2 R(\Delta)/d\Delta^2)_{\Delta=0}$, где $\Delta = 2(\delta - \delta_{\max})$ – фазовая расстройка в окрестности максимума, а также величина дополнительных максимумов и контраст интерференционной картины [6]: $C_k = 1 - (R_{\min}/R_{\max})$. Здесь R_{\min} – величина минимумов.

Аппаратная функция (2) содержит, кроме переменной δ , три независимых параметра: α , R_1 и R_2 . Проследим сначала за влиянием α на вид функции при фиксированных значениях R_1 и R_2 .

Если $\sin 2\alpha = 0$, т. е. пластинка 1 установлена в «нейтральное положение», то $g(\delta) = 1$ и $R(\delta)$ принимает вид функции Эйри, описывающей «необращенную» интерференционную картину (кривые 1 на рис. 2). Выражение (2) при этом достигает в точках $\cos 2\delta = 0$ своего максимального значения: $R_{\max} = R_0$, а при $\sin 2\delta = 0$ – минимального значения: $R_{\min} = R_0/(1 + R_0 F_1)$. Острота максимумов $F = F_{12} = 4R_1 R_2/(1 - R_1 R_2)^2$. Область свободной дисперсии $\Delta\nu = c/4l$.

За начало отсчета по горизонтальной оси на рис. 2 взято положение одного из указанных минимумов.

Легко видеть, что при $R_2 = 1$, когда не учитываются внутренние потери, имеет место своего рода «вырожденный» случай: изменение параметра α приводит лишь к изменению контраста интерференционной картины и остроты, которые монотонно стремятся к нулю при $|\sin 2\alpha| \rightarrow 1$. Действительно, в этом случае $R_{\max} = R_{\max}^{(0)} = 1$ при любых α , а

$$F = F^{(0)} = F_1 \cos^2 2\alpha, \quad (4)$$

$$C_k = C_k^{(0)} = 1 - R_{\min}^{(0)} = F^{(0)}/(1 + F_1).$$

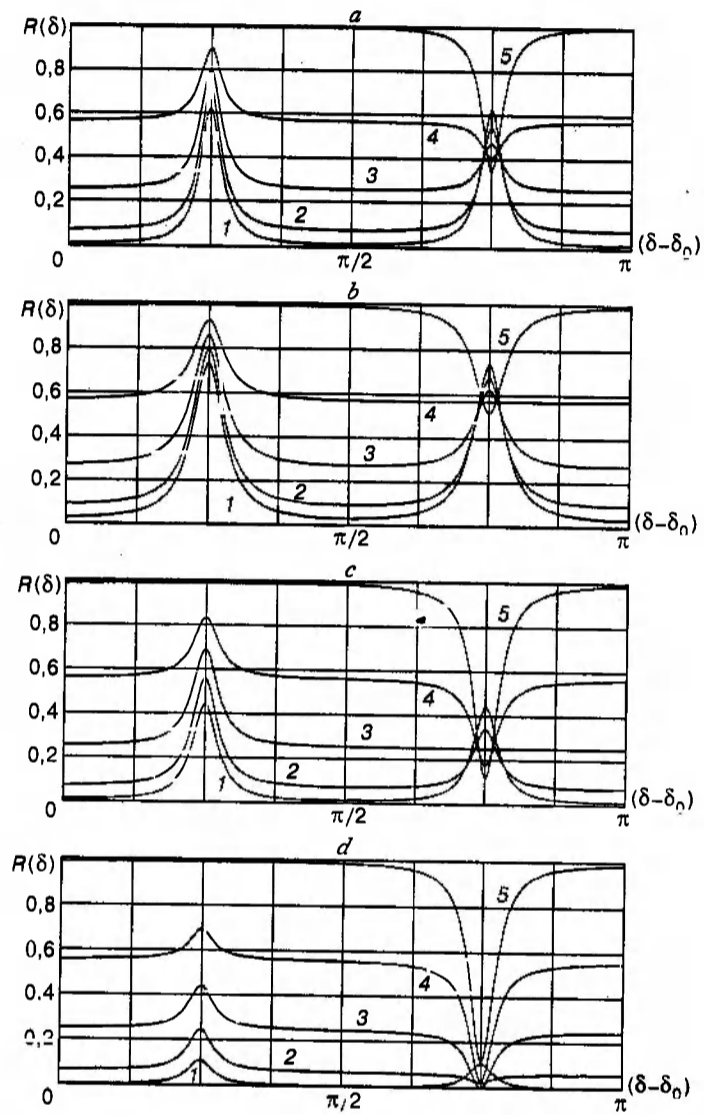


Рис. 2. Аппаратная функция АОИ при различных сочетаниях κ_1 и κ_2 : $(\kappa_1)^{0,5} = 0,8$ (a), $0,7$ (b), $0,8$ (c), $0,895$ (d) и $(R_2)^{0,5} = 0,943$ (a), $0,943$ (b), $0,895$ (c), $0,8$ (d) – и различных значениях α : 1 – 0; 2 – 15; 3 – 22,5; 4 – 30; 5 – 45°

С учетом потерь, т. е. при $R_2 < 1$, происходит снятие «вырождения», состоящее в появлении различия между величинами соседних максимумов, если $\sin 2\alpha \neq 0$. Более того, с увеличением $|\sin 2\alpha|$ имеет место уширение и рост одной группы максимумов и уменьшение другой группы (рис. 2, a–c). Указанные изменения сопровождаются подъемом минимумов функции и их смещением в сторону уменьшающихся максимумов. Дальнейшее увеличение $|\sin 2\alpha|$ приводит к появлению провалов на месте исчезнувших максимумов, т. е. к «выворачиванию наизнанку» аппаратной функции, которая при $\sin 2\alpha = \pm 1$ принимает вид: $\bar{R}(\delta) = |\rho_{\pm}|^2$, соответствующий «обращенной» интерференционной картине (кривые 5 на рис. 2).

Таким образом, изменяя параметр α , можно управлять в известных пределах яркостью, контрастом и другими характеристиками интерференционной картины.

4. Рассмотрим характеристики аппаратной функции более подробно. Функция $R(\delta)$ достигает своего главного максимального значения $R_{\max} = R_0(1 + \sqrt{F_1/F_2} |\sin 2\alpha|)^2$ при $\sin 2\delta = 1$, если $\sin 2\alpha > 0$, или при $\sin 2\delta = -1$, если $\sin 2\alpha < 0$. Величину $(1 - R_{\max})$, т. е. потери света при настройке АОИ на максимум отражения, удобно (и естественно) сравнивать с величиной внутренних потерь $(1 - R_2)$. Их отношение, т. е. $K_T = (1 - R_{\max})/(1 - R_2)$, будем называть коэффициентом трансформации (потерь).

В реальном интерферометре достижение предельной яркости, т. е. $R_{\max} = 1$, практически невозможно. Однако влияние внутренних потерь на R_{\max} можно минимизировать, например, подбором коэффициента отражения переднего зеркала $R_1 = (\tan^2 \alpha)/R_2$ при фиксированных значениях α и R_2 таких, что $0 < |\alpha| < \arctg \sqrt{R_2} < 45^\circ$. В этом случае $K_T = (\cos^4 \alpha - (\sin^4 \alpha)/R_2)^2$.

Что касается выбора α , то при заданных значениях R_1 и R_2 влияние внутренних потерь наиболее сильно проявляется, если $\sin 2\alpha = 0$. С увеличением α это влияние уменьшается и главные максимумы монотонно растут. Значение $R_{\max} = R_2$ (или $K_T = 1$) достигается при $\sin^2 2\alpha = R_1 R_2$.

И наконец, коэффициент трансформации принимает минимальное значение, когда $|\alpha| = 45^\circ$. Пределы изменения $K_T: (1 - R_2 R_1^2)/(1 - R_1 R_2)^2 \geq K_T \geq (1 - R_1)/(1 + \sqrt{R_1 R_2})^2$.

При произвольных α , но в приближении малых потерь (т. е. при $1 - R_2 \ll 1$, если $R_1 \leq 0,5$, или при $1 - R_2 \ll (1 - R_1)/R_1$, если $R_1 \geq 0,5$)

$$K_T = K_T^{(0)} = \sqrt{F_1 + 1} - \sqrt{F_1} |\sin 2\alpha|. \quad (5)$$

В том же приближении острота главных максимумов может быть найдена по формуле (4).

Аппаратная функция $R(\delta)$ может иметь (кроме главных) дополнительные максимумы

$$R_m = R_0(1 - \sqrt{F_1/F_2} |\sin 2\alpha|)^2 \quad (6)$$

в точках $\sin 2\delta = -1$ (при $\sin 2\alpha > 0$) или $\sin 2\delta = 1$ (при $\sin 2\alpha < 0$). В этом случае положение минимумов R_{\min} функции определяется выражением

$$\sin 2\delta_{\min} = \sin 2\alpha / (\sin^2 2\alpha - R_{\min}) \sqrt{F_1 F_2}. \quad (7)$$

Набор комбинаций параметров F_1 , F_2 и α в (7), при которых существуют дополнительные максимумы, ограничен областью допустимых значений синуса.

При заданных R_1 и R_2 дополнительные максимумы, согласно (6), монотонно уменьшаются с увеличением $|\sin 2\alpha|$ от 0 вплоть до 1, если $R_1 \leq R_2$. Так, при $\sin 2\alpha = 0$ $R_m = R_{\max} = R_0$, а при $\sin^2 2\alpha = R_1 R_2$

$$R_m = R_2(1 - (1 - R_2)[4R_1(1 - R_1)/(1 - R_1 R_2)^2]).$$

Дальнейший рост $|\sin 2\alpha|$ приводит к исчезновению дополнительных максимумов (кривая 4 на рис. 2, *b* и кривая 3 на рис. 2, *c*) в результате их слияния с минимумами, когда $R_m \approx \sin^2 2\alpha_0 = R_2(1 - \sqrt{R_1})^2 / (1 - \sqrt{R_1 R_2})^2$.

Область свободной дисперсии АОИ с аппаратной функцией этого вида равна $c/2l$, т. е. в 2 раза больше, чем при $\sin 2\alpha = 0$.

Величина R_{\min} в области $0 \leq |\alpha| \leq |\alpha_0|$ удовлетворяет уравнению

$$(R(\delta_0) - R_{\min})(R_{\min} - \sin^2 2\alpha) = R_0(\sin^2 2\alpha) / (1 + F_2)F_2,$$

решение которого в приближении малых потерь имеет вид

$$R_{\min} = R_{\min}^{(0)} = (1 + F_1 \sin^2 2\alpha) / (1 + F_1). \quad (8)$$

За пределами указанной области значений α $\sin^2 2\delta_{\min} = 1$, а величина минимумов рассчитывается по формуле (6). Их острота становится равной (по модулю) остроте главных максимумов, когда

$$\sin^2 2\alpha = \sin^2 2\alpha_{\text{кр}} = R_2(1 - R_1) / (1 - R_1 R_2^2).$$

При этом $R(\delta) + R(-\delta) = R_{\max} + R_m = 2R(\delta_0)$. «Обращение» интерференционной картины начинается, когда $|\alpha|$ превышает $|\alpha_{\text{кр}}|$, и завершается при $\sin^2 2\alpha = 1$. Пределы изменения R_m определяются выражением

$$R_0 \geq R_m \geq (\sqrt{R_2} - \sqrt{R_1})^2 / (1 - \sqrt{R_1 R_2})^2.$$

Заметим, что если $R_2 < R_1$, то монотонность изменения минимумов нарушается (рис. 2, *d*) и они достигают нуля при

$$\sin^2 2\alpha = F_2 / F_1 = R_2(1 - R_1)^2 / R_1(1 - R_2)^2.$$

5. Рассмотрим теперь некоторые из возможностей оптимизации характеристик, ограничившись случаем малых потерь.

Пусть, например, требуется получить минимально возможную величину коэффициента K_T , обеспечив заданное значение R_{\min} . Для этого в (5) выразим параметры F_1 и α через характеристики аппаратной функции F и R_{\min} с помощью (4) и (8):

$$K_T = (\sqrt{F} - \sqrt{(F+1)R_{\min} - 1}) / \sqrt{1 - R_{\min}}. \quad (9)$$

Отсюда находим остроту $F = 1/R_{\min}$, при которой $K_T = (K_T)_{\min} = \sqrt{(1 - R_{\min})/R_{\min}}$. Для достижения этого требуется установить оптимальную ориентацию пластинки 1: $\sin^2 2\alpha_{\text{опт}} = R_{\min} - (1 - R_{\min}) / (F_1)_{\text{опт}}$, где $(F_1)_{\text{опт}} = 1 / (R_{\min}(1 - R_{\min})) - 1$ — выражение для нахождения с учетом (3) оптимального коэффициента отражения переднего зеркала.

Пусть теперь нужно получить максимальный контраст, обеспечив при этом заданную величину K_T . Аналогично предыдущему находим сначала $F = (1 + K_T^2) / K_T^2$, затем $(1 - R_{\min})_{\max} = 1 / (1 + K_T^2)$ и т. д.

Анализ формулы (9) показывает, что в частном случае, когда $F \gg \gg (1 - R_{\min})R_{\min}$, она совпадает с выражением, полученным в [6] для изотропного ОИ с передним зеркалом специальной конструкции: $1 - R_{\max} \approx \approx \sqrt{(1 - \sqrt{R_{\min}})(1 + \sqrt{R_{\min}})}\sqrt{F(1 - R_2)}$.

6. В данной работе рассмотрено влияние внутренних потерь в АОИ на вид его аппаратной функции. Исследован характер этого влияния при различных сочетаниях параметров переднего зеркала и дополнительной фазовой пластинки. Показано, что яркостью, контрастом и другими характеристиками интерференционной картины можно управлять в широких пределах, причем при $R_{\max} < 1$ появляются новые качества, отсутствующие при $R_{\max} = 1$, например, становится возможным постепенное «обращение» интерференционной картины. (Заметим, что аналогичный анализ свойств изотропного ОИ показал, что «нет такого профиля полос, который может быть получен при $R_{\max} < 1$ и не может – при $R_{\max} = 1$ » [6].)

Выведены формулы для расчета значений коэффициента отражения переднего зеркала и ориентации оптической оси дополнительной пластинки, оптимальных, в частности, с точки зрения минимизации потерь яркости при одновременном достижении нужного контраста.

Полученные результаты показывают, что АОИ с дополнительной пластинкой может найти применение в качестве как внутриврезонаторного устройства (например, для магнитооптического управления излучением, измерения потерь в образцах и т. д.), так и самостоятельного измерительного устройства [8].

В заключение отметим, что расчет АОИ, в котором обе фазовые пластинки являются линейными, приводит к аналогичным результатам при условии, что взаимная ориентация их оптических осей является вполне определенной [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Донцов Ю. П., Завенягин Ю. А., Князев Л. Н. Поляризационный интерферометр Фабри–Перо сверхвысокой контрастности // Оптика и спектроскопия. 1982. 53, вып. 5. С. 926.
2. Bolger B. A multiple-beam interferometer with transmission-like fringes in reflection // Opt. Commun. 1971. 4, N 4. P. 313.
3. А. с. 945641 СССР. Многолучевой интерферометр для спектральных и поляризационных измерений / М. И. Захаров. Опубл. 23.07.82, Бюл. № 27.
4. Захаров М. И. Аппаратные функции и селективные свойства многолучевых отражающих интерферометров с анизотропными элементами // Автометрия. 1987. № 5. С. 56.
5. Захаров М. И. Расчет и оптимизация характеристик многолучевых анизотропных отражающих интерферометров // Оптика и спектроскопия. 1988. 64, № 1. С. 186.
6. Троицкий Ю. В. Многолучевые интерферометры отраженного света. Новосибирск: Наука, 1985.
7. Демьянцева С. Д., Табарин В. А. Измерение малого фарадеевского вращения в образцах с потерями в ближней ИК-области // Метрология. 1986. № 5. С. 26.
8. А. с. 1505270 СССР. Многолучевой интерферометр для спектральных и поляризационных измерений / М. И. Захаров. Опубл. 07.09.89, Бюл. № 39.

Поступила в редакцию 23 декабря 1998 г.