

## СВЯЗЬ ОТНОСИТЕЛЬНОГО СДВИГА ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС И ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА ПОЛУПРОЗРАЧНЫМ МЕТАЛЛИЧЕСКИМ СЛОЕМ В ДВУХЛУЧЕВОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ

© 2008 г. Е. С. Кулагин, канд. физ.-мат. наук

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург

E-mail: kulagin@gao.spb.ru

Измерены относительные фазовые сдвиги интерференционных полос равного наклона на двух выходящих изображениях в двухлучевом интерферометре. Наблюдения выполнены в видимой области спектра для двенадцати полупрозрачных слоев из различных металлов. Показано, что различие относительных сдвигов может быть удовлетворительно объяснено, если предположить, что в зависимости от фазы интерференции поглощение полупрозрачного металлического слоя изменяется от нуля до двойного значения. На основе этого предположения получена формула, связывающая поглощение полупрозрачного металлического слоя без интерференции и относительный сдвиг интерференционных полос. Приводится сравнение измеренных значений поглощения полупрозрачных слоев с вычисленными значениями по полученной формуле и наблюдаемым относительным сдвигам. Сравнение измеренных сдвигов с оптическими постоянными металлов показало, что сдвиг полос уменьшается с увеличением показателя преломления металла, из которого изготовлен полупрозрачный слой. Обсуждается практическое применение полученных результатов.

Коды OCIS: 260.3160, 310.6860.

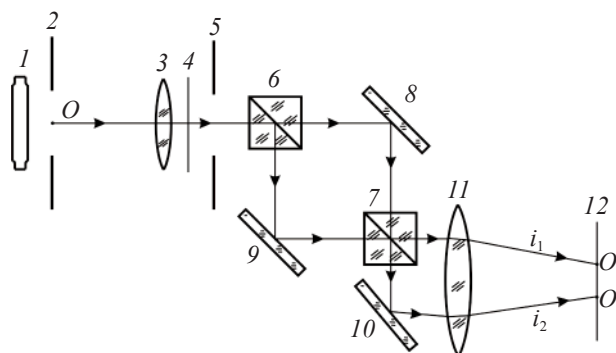
Поступила в редакцию 10.12.2007.

Полупрозрачные светоделительные слои широко используются в оптических интерференционных приборах. Они позволяют получить интерференционные полосы равного наклона, локализованные на изображении источника, ширина которых значительно превышает размер дифракционного изображения точки. Настоящая работа посвящена измерениям относительных фазовых сдвигов интерференционных полос на двух выходящих изображениях в двухлучевом интерферометре при использовании полупрозрачных слоев, выполненных из различных металлов. Показана тесная связь сдвига полос с поглощением полупрозрачного металлического слоя. Из простого предположения получена формула, связывающая сдвиг полос и поглощение слоя. Вычисленные по полученной формуле и наблюдаемому сдвигу значения поглощения полупрозрачных металлических слоев удовлетворительно соответствуют измеренным значениям поглощения.

Сопоставление относительного сдвига полос с оптическими постоянными металла, из которого изготовлен слой, показало, что сдвиг уменьшается с увеличением показателем преломления металла.

На рис. 1 изображена схема двухлучевого интерферометра Маха-Цендера, с которым, в отличие от двухлучевого интерферометра Майкельсона, удобно наблюдать оба выходящих из интерферометра изображения протяженного источника с интерференционными полосами равного наклона.

Когда в качестве светоделителя 7, на котором происходит переналожение когерентных фронтов, используется полупрозрачный диэлектрический



**Рис. 1.** Схема интерферометра Маха-Цендера, с которым проводились измерения относительных сдвигов интерференционных полос. 1 – ртутная лампа, 2 – диафрагма поля зрения с перекрестием, 3 – коллиimator, 4 – место для фильтра, выделяющего необходимую ртутную линию, и поляроида; 5 – апертурная диафрагма интерферометра, 6 – полупрозрачный кубик, создающий когерентные фронты; 7 – кубик с исследуемым полупрозрачным слоем, 8, 9 и 10 – плоские зеркала; 11 – объектив, строящий два выходящих из интерферометра изображения диафрагмы поля зрения в своей фокальной плоскости 12; O – точка перекрестия на диафрагме поля зрения 2, O<sub>1</sub> и O<sub>2</sub> – изображения центра перекрестия в фокальной плоскости 12, i<sub>1</sub> и i<sub>2</sub> – интенсивность света в точках O<sub>1</sub> и O<sub>2</sub> соответственно.

слой, на двух выходящих изображениях диафрагмы поля 2 в плоскости 12 наблюдаются дополнительные интерференционные полосы. Если некоторая точка источника  $O_1$  лежит на интерференционном максимуме в первом выходящем изображении, то изображение этой же точки  $O_2$  приходится на интерференционный минимум во втором выходящем изображении. Весь световой поток, проходящий через интерферометр при изменении разности хода в плечах интерферометра, не меняется. Так и должно быть по закону сохранения энергии, так как поглощение полупрозрачного диэлектрического слоя меньше 1%. В случае применения для переналожения фронтов полупрозрачных слоев из металлов наблюдаются различные относительные сдвиги полос по фазе на двух выходящих изображениях. Относительный сдвиг зависит от металла, из которого изготовлен полупрозрачный слой. Это известный [1], но малоисследованный факт. При этом в зависимости от фазы интерференции значительно изменяется общий световой поток, проходящий через интерферометр от каждой точки источника при широких полосах.

Формально относительный сдвиг интерференционных полос в двухлучевом интерферометре равен алгебраической сумме четырех фазовых сдвигов, возникающих при прохождении и отражении света от полупрозрачного слоя с двух сторон. Но объяснения отсутствия дополнительной в двух интерференционных картинах только фазовыми сдвигами недостаточно, так как остается неясной причина, обуславливающая переменность всего светового потока, выходящего из интерферометра. В работе [2] это объясняется влиянием фазы интер-

Относительные сдвиги интерференционных полос и поглощение света для полупрозрачных слоев из различных металлов (пояснения в тексте)

Элемент	$S_{\text{зел}}$	$S_{\text{син}}$	$n$	$nk$	$A_{\text{выч}}$	$A_{\text{изм}}$
Алюминий	0,35	0,40	0,50	4,59	31	28
Титан	0,07	0,07	2,10	2,82	49	—
Ванадий	0,07	0,07	2,65	3,33	49	—
Хром	0,03	0,05	—	—	50	52
Никель	0,20	0,20	1,54	3,10	45	49
Медь	0,25	0,25	1,06	2,70	42	41
Ниобий	0,05	0,07	2,13	3,07	50	—
Серебро	0,45	0,45	0,11	2,94	14	3
Индий	0,07	0,07	—	—	49	—
Олово	0,15	0,15	0,78	3,58	47	52
Вольфрам	0,03	0,05	3,33	2,96	50	59
Платина	0,10	0,10	1,76	3,59	49	—

ференции на поглощение света полупрозрачным металлическим слоем.

Используя интерферометр Маха–Цендера (рис. 1), были выполнены измерения относительных сдвигов полос для полупрозрачных слоев, выполненных из двенадцати различных металлов. Полупрозрачный металлический слой наносился на гипотенузную грань прямоугольной призмы, к которой приклеивалась вторая призма, образуя светоделительный кубик. Наблюдения проводились с двумя линиями ртути – зеленой  $\lambda = 546,1$  нм и синей  $\lambda = 435,8$  нм для плоскости поляризации, лежащей в плоскости падения излучения на слой. Измерения сделаны только для одной линейной поляризации из-за того, что невозможно изготовить металлический слой с близкими по интенсивности отраженными и проходящими лучами для обеих линейных поляризаций одновременно. Изготовление же двойного количества полупрозрачных слоев было затруднительно. Но различие в интенсивности интерферирующих лучей в два раза можно во многих случаях считать допустимым, так как нетрудно показать, что при этом в минимуме интерференционной картины наблюдается интенсивность, составляющая только 3% от интенсивности в максимуме.

Относительные сдвиги, обозначаемые далее как  $S$ , измерялись визуально и выражались в долях ширины интерференционной полосы. Для повышения точности измерения сдвига интерферометр юстировался так, что на всем изображении входной диафрагмы поля 2 (рис. 1) располагались всего две или три интерференционные полосы. Точность измерения относительного сдвига оценивается в 0,03 полосы. Измеренные сдвиги для двух ртутных линий и полупрозрачных слоев из различных металлов приведены в таблице.

Как видно из таблицы, относительные сдвиги интерференционных полос для различных металлов разные и мало меняются при переходе от зеленой к синей линии ртути. Для большинства полупрозрачных металлических слоев это изменение незаметно при наблюдениях с указанной выше точностью. Но, как правило, относительный сдвиг полос растет с уменьшением длины волны.

В данной работе не исследовался вопрос о возможном влиянии способа нанесения полупрозрачного металлического слоя на относительный сдвиг полос. Но для определенности скажем, что исследованные слои серебра и алюминия нанесены способом термического испарения в вакууме, титана никеля и хрома – электронно-лучевого испарения, а меди, индия, ниобия, олова, ванадия и вольфрама – магнетронного катодного испарения. Светоде-

лительный кубик с полупрозрачным слоем платины был взят готовым и способ его нанесения нам неизвестен.

Рассмотрим связь относительного сдвига полос с поглощением полупрозрачного металлического слоя. Как уже отмечалось, сильная модуляция всего светового потока, наблюдаемая при малых относительных сдвигах полос, объясняется влиянием фазы интерференции на поглощение света полупрозрачным металлическим слоем [2].

Сделаем предположение, что поглощение любого полупрозрачного металлического слоя в зависимости от фазы интерференции приближается к нулю и к двойному значению поглощения, наблюдаемому в обычных условиях без интерференции света. Это предположение дает возможность вывести формулу, связывающую поглощение полупрозрачного слоя  $A$ , наблюдаемое без интерференции, и относительный сдвиг полос  $S$  в двухлучевом интерферометре.

Рассмотрим рис. 2. На нем изображены графики изменения интенсивности  $i_1$  и  $i_2$  в двух выходящих из интерферометра изображениях для одной и той же точки источника (например, для изображений центра перекрестия  $O_1$  и  $O_2$  (рис. 1)) в зависимости от фазы интерференции  $x$ .

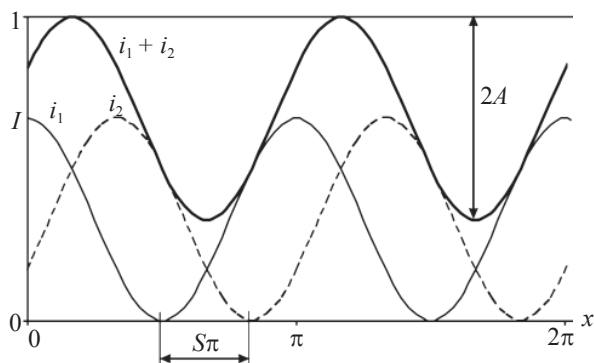
Обозначим через  $I$  весь световой поток, проходящий через интерферометр для некоторой точки источника,

$$I = i_1 + i_2. \quad (1)$$

Для простоты расчета примем сначала максимальную интенсивность каждого из этих лучей за 1. Тогда изменение интенсивности в первом выходящем луче может быть описано как

$$i_1 = \cos^2 x, \quad (2)$$

где  $x$  – фаза интерференции.



**Рис. 2.** Две системы интерференционных полос с относительным фазовым сдвигом и изменение их суммарной интенсивности (пояснения в тексте).

Период изменения интенсивности в формуле (2), соответствующий одной интерференционной полосе, равен  $\pi$ . Поэтому относительный фазовый сдвиг двух графиков изменения интенсивности на рис. 2, равный  $S$  в долях полосы, равен  $S\pi$ . Отстающее по фазе изменение интенсивности во втором луче описывается формулой

$$i_2 = \cos^2(x - S\pi). \quad (3)$$

Переходя к двойному значению аргумента и используя формулу для суммы косинусов, получаем для суммарной интенсивности

$$I = 1 + \cos S\pi \cos(2x - S\pi). \quad (4)$$

Отсюда следует, что суммарные максимальная и минимальная интенсивности выходящих лучей

$$\left. \begin{aligned} I_{\max} &= 1 + \cos S\pi, \\ I_{\min} &= 1 - \cos S\pi. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Но здесь необходимо сделать нормировку. Максимальная интенсивность, наблюдаемая при приближении поглощения полупрозрачного металлического слоя к нулю, не должна зависеть от относительного сдвига полос и при любом сдвиге равняться 1, как изображено на рис. 2. Сейчас же в (5) максимальная интенсивность равна 2 при нулевом сдвиге и равна 1 при сдвиге на полполосы. Для того чтобы максимальная интенсивность была равна 1 при любом  $S$ , разделим максимальную и минимальную интенсивности в (5) на максимальную. Тогда

$$\left. \begin{aligned} I_{\max} &\equiv 1, \\ I_{\min} &= \frac{1 - \cos S\pi}{1 + \cos S\pi}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Весь диапазон изменения интенсивности светового потока, выходящего из интерферометра, по нашему предположению равен  $2A$  (рис. 2). Следовательно,

$$2A = 1 - \frac{1 - \cos S\pi}{1 + \cos S\pi}, \quad (7)$$

откуда получаем окончательное выражение, связывающее поглощение полупрозрачного металлического слоя  $A$  и относительный сдвиг  $S$ ,

$$A = \frac{\cos S\pi}{1 + \cos S\pi}. \quad (8)$$

На рис. 3 непрерывной линией приведен график, рассчитанного (по формуле (8)) изменения  $A$  от  $S$ . На этом же графике крестиками нанесены измерен-

ные значения поглощения полупрозрачных слоев, изготовленных из 7 различных металлов. Эти значения поглощения нанесены в соответствии с наблюдаемыми и приведенными в таблице относительными сдвигами для этих металлов.

Измерения поглощения слоев без интерференции света проводились вне интерферометра (рис. 1). Кубик с исследуемым слоем освещался с одной стороны и разделял падающий на него под углом  $45^\circ$  луч на проходящий и отраженный. Так же как и при наблюдении относительных сдвигов полос, использовалась зеленая линия ртути и линейная поляризация, лежащая в плоскости падения на слой. Измерялись интенсивности падающего, проходящего и отраженного лучей. При расчете поглощения слоя учитывались отражения от граней кубика. Для измерений поглощения были отобраны из имеющихся двенадцати семь слоев из различных металлов, дающих наиболее равное светораспределение в указанной плоскости поляризации. Для этих слоев отраженный и проходящий лучи различались по интенсивности не более чем в два раза. Измерения выполнены с помощью ПЗС-камеры ST-6. Точность измерений поглощения полупрозрачных металлических слоев оценивается в 3%. Вычисленные по относительному сдвигу полос и измеренные значения поглощения для 7 полупрозрачных слоев приведены в таблице.

График (рис. 3) показывает удовлетворительное согласие измеренных значений поглощения различных полупрозрачных металлических слоев с расчетной кривой (формула (8)). Это подтверждает сделанное предположение, что поглощение полупрозрачного слоя из любого металла в зависимости от фазы интерференции света приближается к нулю или к двойному своему значению.

Важно отметить, что при интерференции света свойства полупрозрачного металлического слоя не изменяются. При отъюстированном интерферометре для каждой точки полупрозрачного слоя 7 (рис. 1) разность хода интерферирующих лучей от заданной точки источника света одна и та же. Наблюдаемая переменность поглощения является следствием анизотропии поглощения тонкого, по сравнению с длиной световой волны, полупрозрачного металлического слоя и переменности его освещения в зависимости от фазы интерференции света [2].

Кратко рассмотрим зависимость относительного сдвига полос от оптических постоянных металла, из которого сделан полупрозрачный слой. Для оптических постоянных металлов, приведенных в таблице, приняты распространенные обозначения  $n$  и  $nk$  [3, 4], а их значения взяты из [5]. Здесь найден наиболее полный список значений оптических

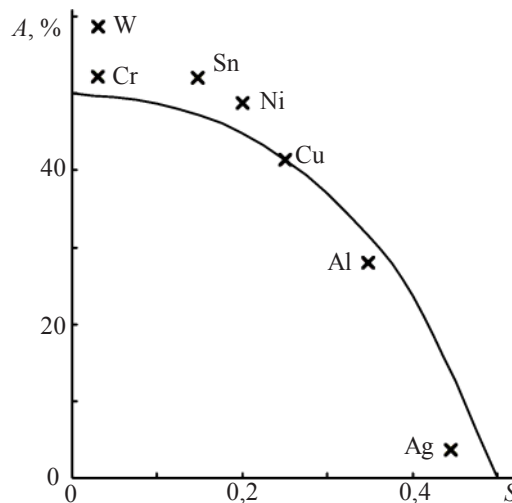
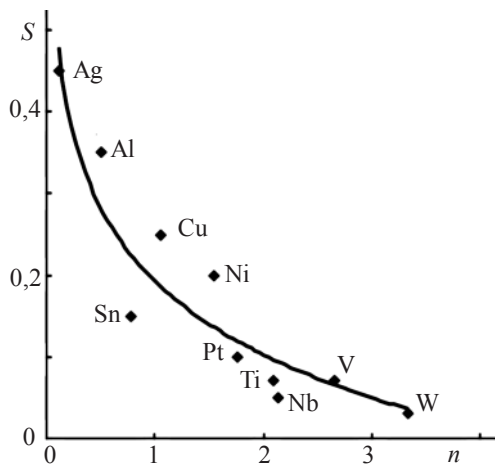


Рис. 3. Расчетная кривая изменения поглощения полупрозрачных слоев из различных металлов в зависимости от относительного фазового сдвига интерференционных полос и измеренные значения поглощения полупрозрачных металлических слоев.

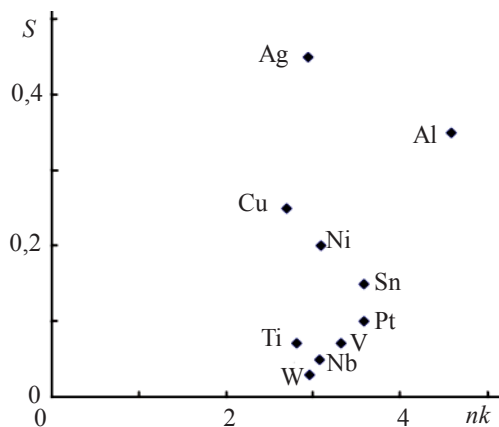
постоянных для металлов, исследованных в данной работе, но в нем нет, к сожалению, данных для хрома и индия. Следует отметить, что в [5] значения оптических постоянных относятся к длине волны  $\lambda = 500$  нм и показатель поглощения металла  $nk$  обозначен просто как  $k$ . В этом легко убедиться, сравнив оптические постоянные, приведенные в [4] и [5] для металлов, у которых показатель преломления  $n$  в несколько раз отличается от 1, например, для серебра и вольфрама.

На рис. 4 и 5 приведены графики зависимости относительного сдвига полос  $S$  от оптических постоянных  $n$  и  $nk$  соответственно. Рядом с каждой точкой, так же как на рис. 3, приведен символ металла, из которого сделан полупрозрачный слой. Для графиков использованы значения измеренных относительных сдвигов для зеленой линии ртути, которая ближе к длине волны, использованной в [5].

Несмотря на низкую относительную точность определения оптических постоянных, которая часто не превышает нескольких процентов, и тот факт, что оптические постоянные измеряются обычно не для полупрозрачного слоя, а для более массивных образцов, наблюдается заметная зависимость относительного сдвига полос от показателя преломления металла (рис. 4). На этом графике по всем полученным точкам проведена плавная кривая. Малым значениям  $n$  соответствует значение  $S$ , близкое к 0,5, как для диэлектрического полупрозрачного слоя. Большим значениям  $n$  соответствуют малые относительные сдвиги полос и, соответственно,



**Рис. 4.** Зависимость относительного сдвига интерференционных полос от показателя преломления металла, из которого изготовлен полупрозрачный слой.



**Рис. 5.** Значения относительного сдвига интерференционных полос при различных показателях поглощения металла, из которого изготовлен полупрозрачный слой.

сильная модуляция всего светового потока, проходящего через интерферометр от каждой точки источника при широких интерференционных полосах.

Рисунок 5 показывает отсутствие зависимости относительного сдвига полос от показателя поглощения металла. Так, при  $nk = 3$  возможен весь набор относительных сдвигов от 0 до 0,5.

Таким образом, в данной работе показана связь относительного фазового сдвига полос, наблюдаемого в двухлучевом интерферометре со свойствами полупрозрачного металлического слоя, и значением поглощения света этим слоем без интерференции. Обнаружена также зависимость отно-

сительного сдвига полос от показателя преломления металла, из которого изготовлен полупрозрачный слой.

Полупрозрачные металлические слои с различными относительными сдвигами интерференционных полос могут иметь разнообразные практические применения. По мнению автора, наиболее важны крайние случаи. Металлические слои, дающие сдвиг около полуполосы, например, из серебра, обладают малым поглощением. Такие слои удобны и применяются для разделения волнового фронта по амплитуде, для создания двух когерентных фронтов без значительных потерь света. Полупрозрачный металлический слой может дать близкие по интенсивности отраженные и проходящие лучи в широкой области спектра и в широком угловом поле.

Полупрозрачные металлические слои с практически нулевым относительным сдвигом полос дают возможность осуществления многократной последовательной двухлучевой интерференции света [6]. Равенство интенсивностей в соответствующих точках на выходящих из двухлучевого интерферометра изображениях позволяет снова перенакладывать лучи на таком слое с необходимой разностью хода. Становится возможным наложение многих контрастных независимых интерференционных полос на изображение источника и в его спектре. Здесь решающее значение имеет значительное уменьшение поглощения слоя в максимумах интерференционных картин. Так, для исследованного полупрозрачного слоя хрома при наблюдении в плоскости поляризации, лежащей в плоскости падения излучения, поглощение слоя уменьшалось от 97% в минимумах интерференционных картин до 5% в максимумах [6]. В качестве первого применения этого вида интерференции света разрабатывается его использование для создания широкоугольных и узкополосных ступеней оптического фильтра [7].

Выражаю глубокую благодарность сотрудникам института Солнечно-Земной физики СО РАН в Иркутске В.М. Григорьеву, В.И. Скоморовскому и П.Г. Папушеву за внимание и помощь при выполнении этой работы Л.М. Парвицкой из ГАО РАН за конструкторские разработки.

Работа была поддержана из средств, выделяемых на разработку космического проекта “Межпланетная солнечная стереоскопическая обсерватория”.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мерц Л. Интегральные преобразования в оптике: Пер. с англ. / Под ред. Скротского Г.В. М.: Мир, 1969. 64 с.
2. Кулагин Е.С., Меркулов А.В. Влияние фазы интерференции на поглощение света полупрозрачным метал-

- лическим слоем // Опт. и спектр. 1970. Т. 29. В. 3. С. 587–593.
3. *Поль Р.В.* Введение в оптику: Пер. с нем. / Под ред. Толстого Н.А. М.–Л.: ОГИЗ, 1947. 231 с.
4. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики: Пер. с англ. / Под ред. Мотулевича Г.П. М.: Наука, 1970. 681 с.
5. Физический энциклопедический словарь. Гл. ред. Прохоров А.М. М.: Советская энциклопедия, 1983. 409 с.
6. *Кулагин Е.С.* Многократная последовательная двухлучевая интерференция света на полупрозрачном металлическом слое // Оптический журнал. 2003. Т. 70. № 6. С. 72–75.
7. *Кулагин Е.С.* Широкоугольные узкополосные ступени оптического фильтра на основе многократной последовательной двухлучевой интерференции света // Солнечно-земная физика. Изд. СО РАН. 2004. В. 6. С. 151–152.
-