

УЗКОПОЛОСНЫЕ ШИРОКОУГОЛЬНЫЕ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ СТУПЕНИ ОПТИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА (НА ОСНОВЕ ДВУХЛУЧЕВЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ С ПОЛУПРОЗРАЧНЫМИ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ СЛОЯМИ)

© 2010 г. Е. С. Кулагин, канд. физ.-мат. наук

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург

E-mail: kulaginevgeny@bk.ru

Рассмотрена возможность создания узкополосных широкоугольных и перестраиваемых ступеней оптического фильтра на основе двухлучевых интерферометров с металлическими полупрозрачными слоями. Применение разработанной многократной двухлучевой интерференции света на металлических полупрозрачных слоях позволяет упростить схему последовательно расположенных ступеней фильтра. Для стабильности юстировки и возможности перестройки по спектру предлагается склеивать или жестко закреплять основные элементы в один блок с воздушными зазорами в каждой ступени. Зазоры позволяют располагать в них юстировочные элементы и перестраивать ступень в широком спектральном диапазоне. Получены основные формулы двухлучевого интерферометра с широким угловым полем зрения и их вариант для ступени с зазорами. Создан и испытан рабочий макет склеенной первой ступени.

Ключевые слова: узкополосный оптический фильтр, двухлучевой интерферометр с широким полем, полупрозрачный металлический слой.

Коды OCIS: 120.2440, 260.3910

Поступила в редакцию 31.03.2010

Введение

Узкополосные оптические фильтры (спектральное разрешение $R > 10^4$) широко применяются в физике, в частности, для исследований в области физики Солнца. Если полоса пропускания фильтра уже, чем солнечная линия, то становится возможной двумерная (фильтровая) спектроскопия. Несколько фильтрограмм, полученных в различных частях линии, дают информацию о контуре этой линии во всех разрешаемых точках изображения. Для этой же цели потребовалось бы множество щелевых спектрограмм. Двумерная спектроскопия дает возможность получать карты лучевых скоростей и магнитных полей на солнечной поверхности с высоким пространственным и временным разрешением. Все современные солнечные телескопы оснащаются узкополосными фильтрами. В настоящее время узкополосные фильтры реализуются в виде интерференционно-поляризационного фильтра или интерферометра Фабри–Перо. В качестве предварительного монохроматора, сужающего полосу пропускания до нескольких нанометров, обычно используется интерферен-

ционный фильтр. С интерференционно-поляризационным фильтром сложно получить узкую полосу пропускания из-за отсутствия больших и однородных кристаллов. Так же трудно сделать интерференционно-поляризационный фильтр перестраиваемым в широком спектральном диапазоне. Основными недостатками фильтра Фабри–Перо являются сложности с выделением рабочего порядка и малое угловое поле зрения.

В качестве узкополосной ступени оптического фильтра используется двухлучевой интерферометр. Он является аналогом ступени интерференционно-поляризационного фильтра. Но в двухлучевом интерферометре не используются кристаллы. Необходимая разность хода создается в стекле и в воздухе. Поэтому нет ограничения на сужение полосы пропускания. При определенном соотношении разности хода в стекле и в воздухе двухлучевой интерферометр имеет широкое угловое поле зрения.

В работе показана возможность создания узкополосных широкоугольных и перестраиваемых ступеней оптического фильтра на основе двухлучевых интерферометров с полупрозрачными металлическими слоями. Применение

разработанной многократной последовательной двухлучевой интерференции света на полупрозрачных металлических слоях позволяет существенно упростить схему нескольких ступеней фильтра, состоящих из двухлучевых интерферометров.

Для стабильности юстировки и возможности перестройки ступени в широком спектральном диапазоне предлагается склеивать или закреплять основные элементы ступеней в единый жесткий блок с воздушными зазорами в каждой ступени. В этих зазорах располагаются юстировочные и сканирующие элементы, работающие на пропускание света. Наличие зазоров и малая селективность полупрозрачных металлических слоев позволяет перестраивать ступени в широком спектральном диапазоне.

Двухлучевой интерферометр с широким угловым полем

Важное свойство двухлучевого интерферометра – иметь широкое угловое поле зрения известно давно [1]. Здесь приводится краткое изложение этого вопроса, которое дает возможность получить точную формулу для изменения разности хода в широком угловом поле зрения интерферометра. Полученные формулы потребуются для дальнейшего изложения.

Найдем соотношение между разностью хода в стекле и в воздухе, необходимое для получения широкого углового поля с неизменной, отличной от нуля, разностью хода в двухлучевом интерферометре.

Слой воздуха толщиной t дает следующую известную зависимость оптического хода Δ от угла наклона луча φ относительно нормали к слою. Приводится точная формула и приближенная, с точность до φ^2

$$\Delta = t \cos \varphi \approx t - t \frac{\varphi^2}{2}. \quad (1)$$

Слой стекла такой же толщины с показателем преломления n дает оптический ход

$$\Delta = t(n^2 - \sin^2 \varphi)^{1/2} \approx tn - t \frac{\varphi^2}{2n}. \quad (2)$$

Если в двухлучевом интерферометре исходная разность хода лучей в его плечах равна нулю, то после введения в одно из плеч стеклянной пластинки толщиной t , будем иметь следующую разность хода (с точностью до φ^2), учитывая, что стекло вытеснило равный по толщине слой воздуха. Из (1) и (2) получаем

$$\Delta = (n-1)t + \left(1 - \frac{1}{n}\right)t \frac{\varphi^2}{2}. \quad (3)$$

Заметим, что в (3) разность хода растет с углом φ . Поэтому добавление в это же плечо интерферометра дополнительного слоя воздуха толщиной

$$d = \left(1 - \frac{1}{n}\right)t \quad (4)$$

делает разность хода в двухлучевом интерферометре независимой от угла падения луча с точностью до φ^2 . Будем называть эту разность хода “широкоугольной” и обозначим как $\Delta_{\text{ш}}$. Добавляя в (3) слой воздуха (4), расписанный с точностью до φ^2 по (1), получаем

$$\Delta_{\text{ш}} = \left(n - \frac{1}{n}\right)t. \quad (5)$$

Теперь можно записать точную формулу для широкоугольной разности хода $\Delta_{\text{ш}}$, используя точные формулы (1) и (2) для стекла толщиной t , вытесненного им слоя воздуха, той же толщины, и необходимой для создания широкого углового поля дополнительной воздушной разности хода в том же плече d (4). Получаем

$$\Delta_{\text{ш}} = t(n^2 - \sin^2 \varphi)^{1/2} - t \cos \varphi + t \left(1 - \frac{1}{n}\right) \cos \varphi$$

и окончательно имеем точную формулу

$$\Delta_{\text{ш}} = \left\{ (n^2 - \sin^2 \varphi)^{1/2} - (\cos \varphi)/n \right\} t. \quad (6)$$

Формула (6) переходит в формулу (5) при $\varphi \ll 1$. Точная формула позволяет оценить размер углового поля двухлучевого интерферометра с широкоугольной разностью хода в его плечах при допустимом смещении полосы пропускания.

На рис. 1 в качестве примера приведена зависимость широкоугольной разности хода – $\Delta_{\text{ш}}$ от угла падения лучей – φ на двухлучевой интерферометр, когда, при исходной нулевой разности хода, в одно из его плеч введена пластина из плавленого кварца толщиной 30 мм и в это же плечо добавлен необходимый слой воздуха (около 9,4 мм). Предполагается, что свет проходит через 30 мм пластину один раз или через 15 мм пластину дважды в зависимости от схемы интерферометра. Необходимая для создания широкого углового поля дополнительная разность хода в воздухе вычислена по формуле (4), а сама широкоугольная разность хода по точной формуле (6). Пример приведен для красной линии водорода H_{α} ($\lambda = 656,3$ нм), для которой у

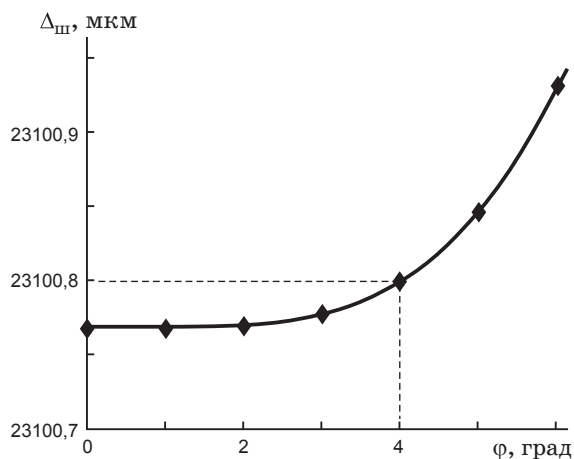


Рис. 1. Изменение разности хода в зависимости от угла падения на двухлучевой интерферометр при широком угловом поле зрения.

кварца $n = 1,45657$. Широкоугольная разность хода близка в этом случае к 23 мм. Если такой интерферометр является последней ступенью узкополосного фильтра, то полуширина полосы пропускания – FWHM равна 0,009 нм в линии H_{α} . Примем за границу поля зрения фильтра такой угол падения, при котором полоса пропускания смещается на 0,1 своей полуширины (это соответствует изменению разности хода на $0,05\lambda$ или 0,03 мкм для данной линии). Даже при таком строгом допуске на смещение полосы получаем из рис. 1 диаметр углового поля 8° .

При использовании двухлучевого интерферометра в качестве ступени фильтра, на изображении источника, при соответствующей юстировке, располагается широкий интерференционный максимум для рабочей длины волны, а в спектре источника наблюдается система двухлучевых интерференционных полос, соответствующая широкоугольной разности хода ступени. В случае использования нескольких последовательно расположенных интерферометров – ступеней, системы полос перенакладываются в спектре источника с перемножением пропусканий. Один из узких максимумов, соответствующий рабочей длине волны, выделяется предварительным монохроматором.

Два оригинальных поляризационных двухлучевых интерферометра Майкельсона используются на космической солнечной обсерватории SOHO, в приборе MDI, для сужения полосы пропускания интерференционно-поляризационного фильтра [2]. Устройство поляризационных интерферометров SOHO MDI подробно описано в [3]. Отметим только предельно жесткую кон-

струкцию этих интерферометров, что является большим достоинством этой схемы. Но эти интерферометры имеют возможность перестраиваться по спектру только в пределах одного порядка.

Многokратная последовательная двухлучевая интерференция света на полупрозрачном металлическом слое

Полупрозрачные слои из металлов с большими показателями преломления (хром, вольфрам и др.) дают практически совпадающие по фазе интерференционные картины на двух выходящих из интерферометра изображениях источника [4]. Это дает возможность осуществления многократной последовательной двухлучевой интерференции света [5]. Выходящие лучи из одного интерферометра – ступени фильтра готовы к последующей интерференции, с необходимой разностью хода в стекле и в воздухе, в следующей ступени, как это показано на рис. 2. Отпадает необходимость в предварительном расщеплении луча, которая есть в любом известном двухлучевом интерферометре, в том числе и в интерферометрах SOHO MDI. Благодаря этому уменьшается число необходимых расщеплений волнового фронта и упрощается оптическая схема нескольких ступеней фильтра. Для практического применения этого вида интерференции решающее значение имеет значительное уменьшение поглощения металлического слоя

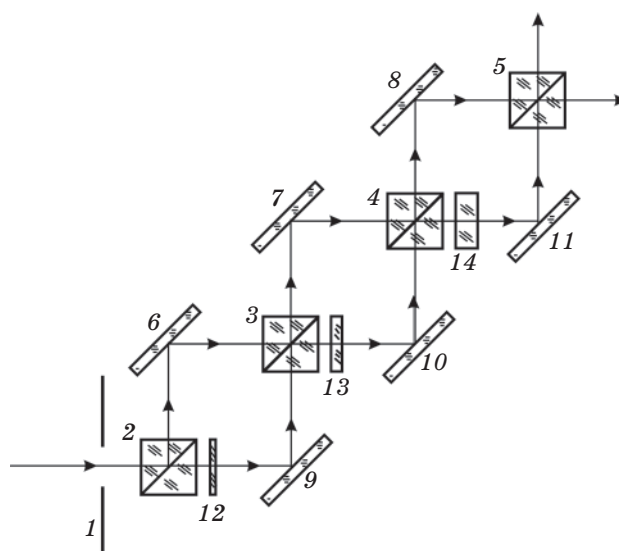


Рис. 2. Схема трех ступеней фильтра на основе многократной последовательной двухлучевой интерференции света на полупрозрачных металлических слоях.

в максимумах интерференционных картин. Так, для полупрозрачного слоя хрома, поглощение уменьшалось от 97% в минимумах интерференционных картин до 5% в максимумах. Использовалась зеленая линия ртути и плоскость поляризации, лежащая в плоскости падения излучения на слой.

На рис. 2 изображена схема трех ступеней фильтра на основе интерферометров с применением многократной последовательной двухлучевой интерференции света.

Здесь: 1 – входное отверстие, освещаемое источником света через коллиматор; 2–5 – светоделительные кубики; 6–11 – плоские зеркала; 12–14 – плоскопараллельные стеклянные пластинки. В каждой ступени выдерживается определенное соотношение между разностью хода в стекле и в воздухе для обеспечения широкого углового поля зрения. Разность хода в стекле создается введением в одно из плеч плоскопараллельной пластины. Для создания необходимой дополнительной разности в воздухе d (4) в каждой ступени можно использовать небольшие отступления углов падения от 45° на плоские зеркала 6–11 при сохранении прямого угла между лучами на полупрозрачных кубиках 2–5.

Схема рабочего макета склеенной первой ступени

Схему на рис. 2 можно назвать “плоской”, поскольку все ее элементы расположены на одной плоскости. Для изготовления рабочего макета первой ступени использована другая схема интерферометра (рис. 3), которая аналогична схеме на рис. 2. Но эта “объемная” схема более удобна для склейки между собой ее основных частей. На рис. 3 показана объемная ступень. По этой схеме изготовлен рабочий макет склеенной первой ступени.

Здесь: 1 – светоделительный элемент с полупрозрачным слоем металла, склеенный из двух высоких треугольных прямоугольных призм. Верхняя половина гипотенузной грани светоделительного элемента 1 покрыта полупрозрачным слоем серебра. Нижняя половина – полупрозрачным слоем хрома. Полупрозрачный слой серебра позволяет получить два когерентных фронта с минимальными потерями на поглощение. Полупрозрачный слой хрома дает возможность осуществлять контрастную интерференцию выходящих из ступени лучей $B1$ и $B2$ в последующей ступени, так как выходящие лучи имеют практически совпадающие фазы интерферен-

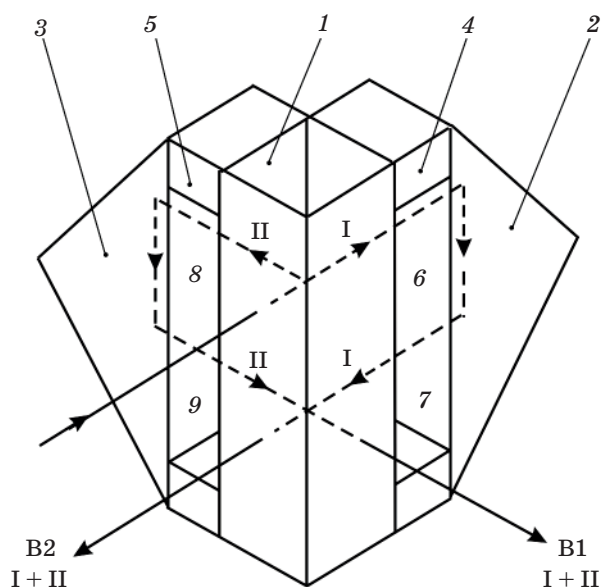


Рис. 3. Оптическая схема рабочего макета первой ступени фильтра.

ции; 2 и 3 – большие треугольные прямоугольные призмы. В каждой из них луч испытывает два раза полное внутреннее отражение, смещаясь вниз; 4 и 5 – две пары плоскопараллельных пластин, с помощью которых создаются необходимые воздушные зазоры при склейке светоделительного элемента и больших призм. Воздушные зазоры необходимы для создания необходимой дополнительной воздушной разности хода d (4) в плечах интерферометра и для размещения в них юстировочных и сканирующих элементов в местах – 6, 7, 8 и 9.

Все оптические детали схемы выполнены из стекла К8. Точность изготовления всех углов $1-2'$. Элементы схемы 1–5 склеены в жесткий каркас. Для склейки использовался оптический клей марки ОВПЭЖ, разработанный в Государственном Оптическом институте.

Свет от источника входит в ступень по стрелке в левой верхней части рис. 3. Луч разделяется на полупрозрачном слое элемента 1 на два луча, I и II. Эти лучи входят, проходя юстировочные элементы 6 и 8, в верхние части больших прямоугольных призм 2 и 3. После двукратного полного внутреннего отражения от гипотенузных граней этих призм, лучи смещаются вниз, проходят юстировочные элементы 7 и 9 и соединяются на полупрозрачном слое хрома. В результате образуются два выходящих из ступени луча $I + II$, обозначенные на рис. 3 как $B1$ и $B2$. Эти лучи могут смещаться вниз двумя другими

большими прямоугольными призмами (такими как призмы 2 и 3 на рис. 3) и готовы к новой интерференции во второй ступени (на рис. 3 вторая ступень не показана).

В воздушные зазоры 6, 7 и 8, 9 (рис. 3) установлены в оправках элементы для создания необходимой разности хода в стекле, юстировки ступени и сканирования по длинам волн. Юстировочные элементы в тексте обозначены теми же цифрами, что и соответствующие места в воздушных зазорах. Точное совмещение изображений достигается поворотами двух одинаковых стеклянных клиньев с малыми преломляющими углами 6. Центр возникающей концентрической интерференционной картины выводится в центр поля зрения наклонами плоскопараллельной пластины 7. Широкое угловое поле зрения для заданной длины волны достигается параллельным перемещением одного из двух одинаковых оптических клиньев 8. Плавное сканирование интерференционной картины – параллельным перемещением другого клина с небольшим углом 9.

Лабораторные испытания рабочего макета (рис. 4) показали устойчивость юстировки во времени, юстировка сохранялась в течение многих часов. Юстировка ступени не нарушалась при умеренных внешних воздействиях на макет (тряска, легкое постукивание и т. п.). Наблюдаемый период изменения пропускания по спектру соответствовал расчетному (рис. 5).

Устойчивость юстировки достигнута за счет того, что основные элементы ступени склеены в жесткий каркас, а все юстировочные элементы работают на пропускание света. Такие же юстировочные элементы 6–9 могут использоваться и в “плоской” ступени фильтра (рис. 2), где возможна механическая фиксация основных элементов ступеней. Здесь юстировочные элементы располагаются в каждой ступени между плоскими зеркалами и светоделительными кубиками (на рис. 2 юстировочные элементы не показаны).

Независимо от типа используемой схемы (плоская или объемная), при первом расщеплении луча в первой ступени необходимо использовать полупрозрачный слой серебра для создания когерентных фронтов с минимальными потерями на поглощение, происходящими без интерференции света. В последующих ступенях должны использоваться полупрозрачные слои хрома (или другого металла), дающие возможность осуществлять многократную последовательную двухлучевую интерференцию света. Здесь потери света также небольшие, но

только в максимумах двух выходящих интерференционных картин. В последней ступени, для увеличения пропускания, необходимо снова использовать полупрозрачный слой серебра, чтобы направить выделенную фильтром рабочую длину волны в одном направлении, а не делить ее на два выходящих луча. Таким образом, в двух ступенях фильтра необходимо использовать два полупрозрачных слоя серебра и один слой хрома в центральной ступени. В трех ступенях – два полупрозрачных слоя серебра и два полупрозрачных слоя хрома в центральной части.

Для автоматического контроля и подстройки юстировки ступеней по совмещению изображений точечного источника может быть использован второй вход в первую ступень. На рис. 2 второй вход в схему направлен снизу вверх, в

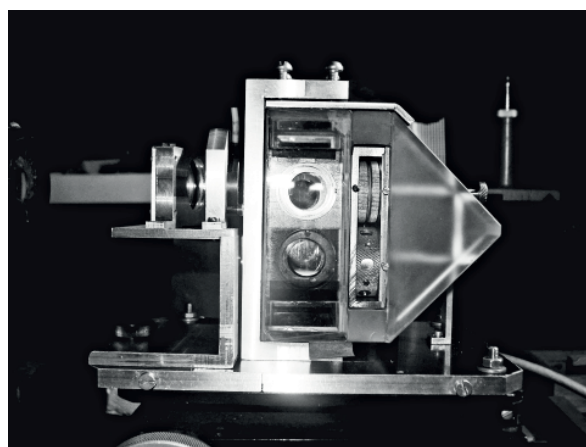


Рис. 4. Вид рабочего макета первой ступени на испытательном стенде.

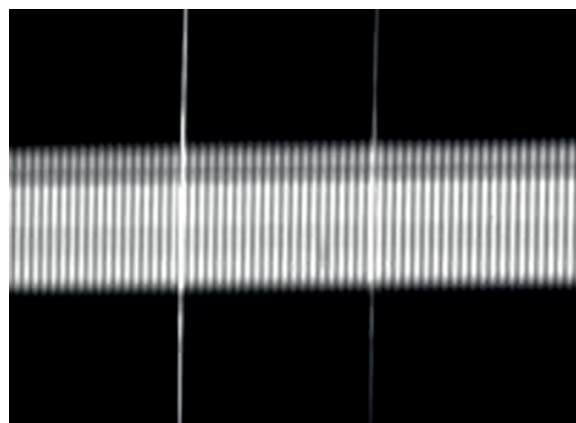


Рис. 5. Периодическое изменение пропускания ступени по спектру. Для масштаба по длинам волн на изображении спектра наложено изображение желтого ртутного дублета 577, 579 нм, полученное при более высокой входной щели спектрографа.

светоделительный кубик 2. На рис. 3 – наверху, справа налево, в верхнюю часть высокого светоделительного элемента 1. На рисунках второй вход не показан. Контрольный луч проходит по тому же оптическому пути, что и рабочий, и может быть использован для автоматического контроля и подстройки юстировки. Для выключения ступеней из контроля, кроме той, в которой происходит подстройка юстировки, достаточно в них закрыть один из двух лучей.

Основные формулы ступени с жесткой фиксацией основных элементов и воздушными зазорами

В ступени с жесткой фиксацией основных элементов исходная разность хода в воздухе d постоянна. Она определяется при склейке (или механической фиксации) элементов ступени в зависимости от того, какую широкоугольную разность хода надо в ней получить. В схеме рабочего макета (рис. 3) исходная разность хода в воздухе создается за счет различия в толщине пластин 4 и 5. Здесь она равна удвоенной величине разности толщин этих пластин, так как лучи проходят воздушные зазоры два раза. Исходная разность хода в воздухе d является основным параметром ступени с жесткой фиксацией основных элементов. Этот параметр определяет остальные параметры ступени. Из (4) получаем необходимую разность хода в стекле, которую надо ввести и вытеснить воздух

$$t = \frac{n}{n-1}d. \quad (7)$$

Введение такой разности хода в стекле делает интерферометр широкоугольным для соответствующей n длины волны λ . Подставляя (7) в (5), находим формулу для широкоугольной разности хода в такой ступени

$$\Delta_{\text{ш}} = (n+1)d. \quad (8)$$

Порядок расчета ступени

Порядок расчета не зависит от того, рассчитывается плоская или объемная схема ступени. Назначение ступени дать периодически изменяющееся пропускание по длинам волн, в широком угловом поле, с необходимым расстройением от максимума до максимума $\Delta\lambda$ в районе заданной длины волны λ . Для этого в ступени должна быть создана, согласно известной формуле, разность хода

$$\Delta = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}. \quad (9)$$

Эта разность хода должна быть широкоугольной $\Delta = \Delta_{\text{ш}}$. По формуле (8) находим основной параметр ступени d с жесткой фиксацией основных элементов и воздушными зазорами

$$d = \frac{\Delta_{\text{ш}}}{n+1}. \quad (10)$$

Зная d , находим по (7) необходимую разность хода в стекле для заданной длины волны λ (этой длине соответствует n_λ).

Перестройка ступени по спектру

Для перестройки ступени по спектру есть возможность изменять разность хода в стекле t параллельным перемещением одного из двух одинаковых оптических клиньев 8 (рис. 3). Найдем величину необходимого изменения разности хода в стекле Δt для перевода широкого углового поля по спектру, с длины волны λ_1 к длине волны λ_2 .

По формуле (7) для длины волны λ_1 имеем $t_1 = [n_1/(n_1-1)]d$, для длины волны λ_2 имеем $t_2 = [n_2/(n_2-1)]d$. Откуда необходимое изменение хода в стекле Δt равно

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{n_1 - n_2}{(n_1 - 1)(n_2 - 1)}d. \quad (11)$$

Пример расчета ступени

Рассчитаем основные параметры ступени, которая должна иметь период изменения пропускания по спектру $\Delta\lambda_1 = 0,02$ нм в районе красной линии водорода H_α ($\lambda = 656,3$ нм). Используемое стекло – плавленый кварц, показатель преломления которого для линии H_α $n_1 = 1,4566$. Если это последняя, наиболее узкополосная ступень, то полуширина полосы пропускания фильтра в целом у линии H_α – $\text{FWHM}_1 = \Delta\lambda_1/2 = 0,01$ нм.

Находим по (9) необходимую широкоугольную разность хода $\Delta_{\text{ш}1} = 21,54$ мм.

По формуле (10) находим постоянный параметр склеенной ступени $d = 8,77$ мм.

Необходимая разность хода в стекле для создания широкого углового поля по формуле (7) равна $t_1 = 27,98$ мм.

Основные параметры для заданной ступени в линии H_α определены.

Предположим теперь, что эта же ступень перестраивается с линии H_α (λ_1) на линию гелия HeI

1083,0 нм (λ_2). Для этой длины волны у плавленого кварца $n_2 = 1,4495$.

Находим широкоугольную разность хода $\Delta_{ш2}$ для λ_2 по формуле (8), учитывая, что d неизменно: $\Delta_{ш2} = 21,48$ мм.

Определяем $\Delta\lambda_2$ – расстояние между максимумами в спектре в районе линии гелия HeI 1083,0 нм (λ_2), используя формулу (9): $\Delta\lambda_2 = 0,055$ нм.

Следовательно, полуширина полосы пропускания фильтра, если рассматриваемая ступень последняя, в линии гелия $\text{FWHM}_2 = \Delta\lambda_2/2 = 0,028$ нм.

Находим необходимую разность хода в стекле для λ_2 по формуле (7) $t_2 = 28,28$ мм.

Таким образом, для перестройки рассматриваемой ступени с линии $\lambda_1 = 656,3$ нм на линию $\lambda_2 = 1083,0$ нм необходимо увеличить слой стекла (вытеснить воздух передвижением одного из двух одинаковых клиньев) в одном плече ступени на $\Delta t = t_2 - t_1 = 0,30$ мм. В других, менее узкополосных ступенях, необходимое изменение разности хода в стекле меньше и пропорционально основному параметру ступени d (11). Аналогично основные параметры рассматриваемой ступени могут быть рассчитаны для любой другой длины волны.

Заключение

В работе показана возможность создания узкополосных широкоугольных и перестраиваемых ступеней оптического фильтра на основе двухлучевых интерферометров с полупрозрачными металлическими слоями. Применение разработанной многократной последовательной двухлучевой интерференции света на таких слоях позволяет упростить схему нескольких ступеней фильтра, уменьшая число необходимых расщеплений луча.

Узкая полоса достигается за счет того, что разность хода в ступени возникает не в кристаллах, а в стекле и в воздухе. Широкое поле зрения ступени обеспечивается свойством двухлучевого интерферометра иметь широкое монохроматическое поле зрения при определенном соотношении разности хода в стекле и в воздухе.

Предложена жесткая фиксация основных оптических элементов ступеней фильтра между собой в единый жесткий блок с воздушными зазорами. Это позволяет обеспечить относительно устойчивую юстировку и дает возможность

осуществлять перестройку ступеней в широком спектральном диапазоне. Этому способствует малая селективность полупрозрачных металлических слоев. Получены основные формулы двухлучевого интерферометра с широким угловым полем зрения и их вариант для ступеней с жесткой фиксацией основных оптических элементов. Дан пример расчета перестраиваемой ступени.

Рассмотрены два варианта расположения нескольких последовательно расположенных двухлучевых интерферометров – ступеней фильтра с воздушными зазорами – плоская и объемная схемы. По объемной схеме изготовлен и испытан рабочий макет первой склеенной ступени фильтра. Лабораторные испытания рабочего макета показали сохранение юстировки в течение многих часов, возможность перестройки ступени в широком спектральном диапазоне и плавного сканирования по длинам волн. Отмечается важность разработки автоматического устройства для сохранения юстировки ступеней в течение неограниченного времени. Для этого удобно использовать второй вход в первую ступень.

Автор выражает благодарность сотрудникам ИСЗФ СО РАН В.М. Григорьеву, В.И. Скомооровскому и П.Г. Папушеву за полезные советы и помощь в работе. Л.М. Парвицкой и М.С. Чубею из ГАО РАН за разработку конструкции рабочего макета ступени и помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hilliard R.L., Shepherd G.G. Wide-Angle Michelson Interferometer for Measuring Doppler Line Widths // JOSA. 1966. V. 56. № 3. P. 362–369.
2. Scherrer P.H., Bogart R.S., Bush R.I., Hoeksema J.T., Kosovichev A.G., Schou J., Rosenberg W., Springer L., Tarbell T.D., Title A., Wolfson C.J., Zayer I. The solar oscillations investigation – Michelson Doppler Imager // Solar Physics. 1995. V. 162. P. 143–154.
3. Title A.M., Ramsey H.E. Improvements in birefringent filters. 6: Analog birefringent elements // Appl. Opt. 1980. V. 19. № 12. P. 2046–2058.
4. Кулагин Е.С. Связь относительного сдвига интерференционных полос и поглощения света полупрозрачным металлическим слоем в двухлучевом интерферометре // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 3. С. 83–88.
5. Кулагин Е.С. Многократная последовательная двухлучевая интерференция света на полупрозрачном металлическом слое // Оптический журнал. 2003. Т. 70. № 6. С. 72–75.