На правах рукописи УДК 520.24, 535.5

Кушталь Галина Ивановна

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННО-ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ФИЛЬТРЫ (ИПФ) ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЙ СОЛНЦА И СПОСОБЫ ДОСТИЖЕНИЯ ИХ ОПТИМАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Специальность 01.04.01- Приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Иркутск-2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук Скоморовский Валерий Иосифович

Официальные оппоненты:

Паперный Виктор Львович, доктор физико-математических наук, профессор ИГУ

Кулагин Евгений Степанович, кандидат физико-математических наук, ГАО РАН, старший научный сотрудник

Ведущая организация :

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский радиофизический институт» (ФГБНУ НИРФИ)

Защита состоится «15» мая 2013 г. в ____часов на заседании диссертационного совета Д.212.073.09 ПРИ ФБГОУ ВПО «Иркутский государственный технический университет» по адресу 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, корпус «К», конференц-зал. Тел./факс 8(3952)40-50-50,

e-mail: zavmts@istu.edu, aad@istu.edu.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФБГОУ ВПО «Иркутский государственный технический университет и в научной библиотеке ФГБУН Института солнечно-земной физики СО РАН

Автореферат разослан « » апреля 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д.212.073.09 кандидат физико-математических наук

А.Г. Ченский

Общая характеристика работы Актуальность проблемы

Важной задачей физики Солнца является исследование тонкой структуры, магнитных полей и полей скоростей на разных уровнях солнечной атмосферы. Для решения этой задачи необходимо получать монохроматические изображения Солнца в свете спектральных линий, образующихся на разных высотах в атмосфере Солнца. Например, высоты образования известных линий FeI 6173, BaII 4554, Hα 6563, HeI 10830 Å, дающих богатый наблюдательный материал, охватывают большой диапазон от нижней хромосферы до верхней. Необходимы также серии изображений в свете разных участков контура одной и той же спектральной линии для получения карт магнитных полей (по эффекту Зеемана) и скоростей (по эффекту Доплера). При этом ширина полосы фильтра должна быть меньше ширины спектральной линии. Чем уже полоса фильтра, тем тоньше просматриваемый в свете линии слой.

Кроме того, многие солнечные процессы происходят в областях атмосферы с относительно небольшими магнитными полями и скоростями на малых пространственных и временных масштабах, поэтому монохроматические изображения с фильтрами должны быть получены с высоким разрешением – не только спектральным, но также пространственным и временным.

Высокое спектральное разрешение реализуется при узкой и контрастной (с малым паразитным фоном) полосе фильтра. При сужении полосы фильтра важно иметь достаточное количество света, чтобы сигнал не «потерялся» в шумах приемника и была возможность использовать короткие экспозиции для уменьшения влияния атмосферного дрожания. Для этого необходимо увеличить пропускание фильтра, а главное – увеличить допустимое угловое поле приема света фильтра, чтобы его можно было устанавливать на больших светосильных телескопах.

В общем случае при разработке и применении монохроматических фильтров важно найти для решения конкретной задачи оптимальное соотношение всех основных параметров фильтра: учитывая параметры линии и особенности наблюдений в ней, выбрать приоритетные характеристики, которые мы стремимся сделать экстремальными. При этом необходимо учитывать ограничения как со стороны других характеристик фильтра, так и ограничения, возникающие за счет собственных ресурсов и технологий. Как показано в диссертации, именно интерференционно-поляризационные фильтры (ИПФ) способны обеспечить такое оптимальное сочетание, достигая при этом экстремальных характеристик по максимальному количеству позиций: высокое пропускание, увеличенное угловое поле и высокий контраст.

Целью работы является разработка схемных и технологических решений, обеспечивающих достижение экстремальных характеристик ИПФ – высокого пропускания, контраста, увеличенного углового поля, – и создание на их основе новых интерференционно-поляризационных фильтров для солнечных наблюдений:

• регулируемого двухполосного ИПФ типа Лио на линии HeI 10830 и Hα 6563 Å с возможностью одновременной регистрации изображений в видимом и ближнем инфракрасном спектральных диапазонах.

• широкоугольного аподизированного ИПФ типа Шольца и ИПФ-модулятора с температурно-устойчивой и быстро сканируемой полосой пропускания как составных частей фильтрового магнитографа для измерения солнечных магнитных полей в линии FeI 6173 Å.

Научная новизна и практическая ценность

1. Разработаны новые схемные решения и методики расчета характеристик ИПФ, предложены способы оптимизации схем ИПФ и технологического контроля при изготовлении, ориентации и сборке оптических элементов, позволяющие достигать оптимального сочетания характеристик фильтров.

2. Результаты расчетов и предложенные схемные и технологические решения были применены в изготовленном впервые в мировой практике двухполосном регулируемом ИПФ на линии HeI 10830 и H α 6563 Å. Фильтр является уникальным прибором и используется в настоящее время для исследования Солнца на Большом внезатменном коронографе Саянской обсерватории в составе центра коллективного пользования.

3. Разработана схема и изготовлены два блока фильтрового магнитографа для измерений магнитных полей на Солнце в линии FeI 6173 Å.

• Обосновано преимущество использования ИПФ типа Шольца с аподизированной схемой. Впервые практически доказана возможность увеличения углового поля ИПФ Шольца с использованием положительных и отрицательных кристаллов, проведены прецизионные измерения показателей двупреломления искусственных кристаллов, рассчитан и изготовлен аподизированный ИПФ Шольца с увеличенной светосилой и проведены исследования фильтра.

• Впервые предложен, изготовлен и испытан широкоугольный ИПФ-модулятор с температурно-устойчивой и электрооптически-сканируемой полосой пропускания.

Результаты и положения, выносимые на защиту

1. Методы оптимизации характеристик ИПФ, включая:

- схемные решения для повышения контраста, пропускания, углового поля;
- методы контроля и юстировки элементов при изготовлении фильтров.

2. Разработка ИПФ с двумя полосами пропускания на линию Нα в видимом и линию HeI 10830 Å в ближнем ИК-диапазоне: расчет оптической стопы, метод разделения полос, обоснование оптимальности использования фазовых пластинок высокого порядка, метод повышения контраста изображения и результаты испытаний на телескопе.

3. Разработка и лабораторные исследования широкоугольного аподизированного фильтр Шольца на линию FeI 6173 Å:

• обоснование преимущества аподизированной схемы Шольца при работе в составе фильтрового магнитографа,

• методика расчета увеличения углового поля фильтра Шольца на основе использования двупреломляющих кристаллов разных знаков и способы оптимизации параметров фильтра Шольца.

4. Разработка ИПФ-модулятора, способ сканирования и стабилизации полосы пропускания фильтра.

Апробация работы

Основные результаты, содержащиеся в диссертации, докладывались на Всесоюзной конференции по физике Солнца (Ашхабад, 1990), семинаре рабочей группы «Солнечные инструменты» (Ленинград, 1990), Всероссийской конференции по физике Солнца (Москва, 1995), Международной конференции «Солнечные струи и полярные щеточки» (Гваделупа, Франция, 1998), Всероссийской астрономической конференции (Санкт-Петербург, 2001), конференции стран СНГ и Прибалтики «Активные процессы на Солнце и звездах» (Санкт-Петербург, 2002), Международном симпозиуме по лазерной метрологии (Новосибирск, 2002), Всероссийской конференции памяти В.Е. Степанова «Магнитные поля и трехмерная структура солнечной атмосферы» (Иркутск, 2003), 223-м симпозиуме МАС «Многоволновые исследования солнечной активности» (Санкт-Петербург, 2004), конференции «Солнце: активное и переменное» (КрАО, Научный, 2007), IX Российско-Китайском совещании по космической погоде (Иркутск, 2009), Всероссийской конференции «Солнечно-земная физика» (Иркутск, 2010), IX Международной конференции «Прикладная оптика-2010» (Санкт-Петербург, 2010), симпозиуме SPIE "Astronomical Telescopes + Instrumentation" (Amsterdam, Netherland, 2012), семинарах отдела физики Солнца ИСЗФ.

Личный вклад автора и публикации

Научные результаты, вошедшие в диссертацию, опубликованы в 25 статьях, 2 патентах, включая 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, 3 статьи в Proceedings of SPIE. Автором выполнены расчеты оптических схем новых ИПФ: на линии HeI 10830 Å и Hα, фильтра «Магнит» на линию FeI 6173 Å, исследованы оптико-физические характеристики кристаллов, из которых были изготовлены элементы ИПФ, предложены способы оптимизации характеристик интерференционно-поляризационных фильтров. При непосредственном участии автора изготовлены, настроены и испытаны двухполосный ИПФ на линии HeI 10830 Å, Нα и два блока фильтра «Магнит»: широкоугольный фильтр Шольца и ИПФ-модулятор.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 111 страниц; работа содержит 39 рисунков, 5 таблиц; список литературы включает 72 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении дается общая характеристика работы, обсуждается ее актуальность, приводятся основные результаты и положения, выносимые на защиту.

В первой главе дан обзор основных типов монохроматических фильтров, применяемых или апробированных в солнечных наблюдениях: интерференционных (ИФ) магнитооптических (МОФ), объемных голографических, акустооптических (АОФ), Фабри–Перо (ФП), ИПФ, узкополосного перестраиваемого оптического фильтра (УПФ). Приведено сравнение их параметров.

Параметр Полу-Пропускание Угловое поле Апертура Фильтр ширина линейная ИΦ: более 50мм до 35-40' 30-70 % от нескольмноголучевая интерфеких десятков определяется ренция в тонких ло ~1 Å показателем предиэлектрических ломления разделипленках тельного слоя ФΠ: ло 0.02–0.03 Å 70-75 мм до10-12 ~60 % многолучевая интерфеограничивается ренция при отражении до 150 мм показателем от параллельных зерв ИК преломления кальных поверхностей промежутка ИПФ (Лио): ло 0.08 Å 35-40 мм 5-15 % до 2° интерференция поляризованных лучей в последовательности поляризационных ступеней Интерферометр ~0.1Å 1.75° ~1.35 % ~30 мм Майкельсона (ИМ): (полное продвухлучевая пускание фильтровой интерференция+ ИПФ системы) ~0.06 Å УПФ (фильтр Кулагина): 3.6 8 % монохроматор с вычив вилимой танием дисперсий + ФП области 0.3 Å в ИК 5–15 Å 10-30 мм 5-15° AOΦ: определяется упругооптический эффективностью дифракэффект ции (до ~90 %) ~10° MOΦ: 0.08 20 мм 25-35 % резонансные ячейки на парах щелочных металлов 0.1 Å 0.5° ~10 % Голографические: 25 мм дифракция на решетке, созданной интерференцией лазерных пучков в фоторефрактивной среде

Параметры монохроматических фильтров

Как можно видеть из таблицы, не существует фильтров с полным набором наилучших параметров, поэтому выбор фильтра – это всегда компромисс между приоритетными и менее существенными для конкретной задачи характеристиками. Выбор фильтра в каждом случае определяется спецификой наблюдательных задач, но при этом необходимо учитывать и ограничения по параметрам, имеющиеся у всех фильтров (ограниченное поле зрения, влияние градиентов температуры на полосу, искажение волнового фронта, нестабильность характеристик, время эксплуатации). В тех задачах, где главным является достижение высокого спектрального разрешения, чаще всего отдается предпочтение фильтрам Фабри–Перо как наиболее выигрышным в отношении узкой полосы и высокого пропускания, хотя при этом для изучения тонкой структуры и магнитных полей наблюдатели вынуждены использовать небольшое поле зрения. Во многих случаях удачным выбором становится широко используемое в настоящее время сочетание ФП+ИПФ. Такой «тандем» применяется, например, в магнитографах для видимой и ближней ИК-областей VIM и IRIM обсерватории Big Bear, Итальянском панорамном магнитографе IPM на телескопе THEMIS. В этих приборах ИПФ является предварительным монохроматором, гасящим соседние нерабочие максимумы ФП. В настоящее время в США разрабатывается проект трехступенчатой ИК фильтровой системы для Advanced Technology Solar Telescope (ATST) - нового 4-метрового телескопа, где ИПФ является не только предварительным монохроматором, но может работать и как фильтрограф со средней спектральной полосой 2–3 Å. В некоторых приборах, таких как Telecentric Etalon SOlar Spectrograph (TESOS), Interferometric Bidimensional Spectrometer (IBIS), для гашения нерабочих максимумов и повышения контраста применяются двойные или тройные ФП. В миссии Solar В (Hinode) ИПФ является узкополосным монохроматором с полосой 0.09 А. Приведенные примеры подтверждают, что регулярное применение в солнечных наблюдениях нашли три типа фильтров: ИФ, ФП и ИПФ. ИФ работают в большинстве случаев как предварительные фильтры, а ФП и ИПФ успешно сочетаются и с другими типами фильтров (ИПФ + две ступени Майкельсона в Michelson Doppler Imager (MDI) и в Helioseismic and Magnetic Imager (HMI), монохроматор с вычитанием дисперсий + ФП в УПФ Кулагина).

Магнитооптические фильтры использовались для гелиосейсмологических наблюдений, а также для измерения магнитных полей в обсерватории Арчетри (возможности применения МОФ ограничены малым числом линий, в которых может работать фильтр). Голографические и акустооптические фильтры из-за недостаточной стабильности характеристик пока не нашли применения в солнечных наблюдениях.

Необходимо отметить ряд преимуществ, которые ИПФ все еще имеют перед ФП, а также перед другими фильтровыми спектральными приборами: малая угловая чувствительность полосы пропускания ИПФ дает увеличение количества света в желаемой полосе пропускания на фактор от 50 до 300 по сравнению с ИМ и ФП. ИПФ не только имеют преимущества в выходном сигнале, но могут быть регулируемыми в пределах свободного спектрального интервала, иметь заданный по спектру профиль пропускания и несколько избранных полос пропускания.

Важным преимуществом ИПФ являются относительно низкие требования к качеству оптических поверхностей и к однородности разности фаз по линейному полю зрения. Например, для кварцевой пластинки плоскостность поверхности $\lambda/10$ дает однородность по двупреломлению $\lambda/2000$, а для ФП точность оптических поверхностей должна быть такой же, как точность разности хода (не хуже чем $\lambda/100$).

Еще одним важным преимуществом ИПФ является устойчивость полосы. После настройки он может работать долго, сохраняя стабильные параметры при любых внешних условиях, включая невесомость, в отличие, например, от интерферометра Майкельсона, разность хода в плечах которого имеет временной дрейф. Заметный дрейф, обнаруженный в НМІ – фильтре на космической обсерватории SDO, – разработчики объясняют изменением толщины слоя клея, на котором крепятся зеркала интерферометра [1*].

Выбор фильтра, как уже говорилось, определяется спецификой поставленных наблюдательных задач, но следует, на наш взгляд, отметить, что в тех задачах, где требуется сочетание пространственного, спектрального и временного разрешения при большом угловом поле зрения, оптимальным является именно использование ИПФ.

Существует два типа ИПФ: фильтры Лио и фильтры Шольца. Данные об ИПФ, приведенные в таблице, относятся к фильтрам Лио, поскольку фильтры Шольца до настоящего времени применялись в наблюдениях весьма ограниченно.



Рис. 1. Схема, канавчатый спектр и профиль пропускания четырех элементов и всего фильтра Лио.

Фильтр Лио (рис. 1) представляет собой набор поляризационных ступеней, состоящих из помещенных между поляризаторами кристаллических двупреломляющих пластинок, каждая последующая из которых вдвое толще предыдущей [2*]. Оптические кристаллографические оси пластинок составляют угол 45° с осями поляризаторов. Спектр пропущенного фильтром света состоит из последовательности максимумов (канавчатый спектр), ширина которых определяется толщиной самой толстой пластинки, а расстояние между ними – толщиной самой тонкой. Ступени ИПФ можно делать регулируемыми и широкоугольными – с увеличенным угловым полем, можно объединять две ступени в одну, уменьшая тем самым число поляризаторов и поднимая пропускание.

В работе Шольца [3*] был предложен новый тип фильтра, содержащего только входной и выходной поляризаторы. Есть две разновидности фильтров Шольца: веерного и свернутого типов. Веерный фильтр с параллельными поляризаторами содержит N одинаковых кристаллических пластинок с увеличивающимися азимутами оптических осей, а в фильтре свернутого типа со скрещенными поляризаторами знаки азимутов чередуются. В предложенной Шольцем классической конфигурации разность азимутов соседних пластинок в обоих случаях постоянна.





В отличие от двухлучевой интерференции фильтров Лио, в фильтрах Шольца формирование полосы пропускания происходит за счет многолучевой интерференции (в каждой последующей двупреломляющей пластинке число входящих лучей удваивается). Полоса пропускания фильтра очень чувствительна к фазовому сдвигу каждой пластинки, который зависит от ее толщины и ориентации оптической кристаллографической оси. Это обусловливает необходимость соблюдения гораздо более строгих, чем в фильтрах Лио, допусков на изготовление и ориентацию пластинок. Кроме того, схема Шольца с постоянной разностью азимутов осей пластинок дает величину паразитных максимумов в несколько раз выше, чем в фильтре Лио с таким же суммарным двупреломлением. В результате фильтры Шольца, несмотря на очевидное преимущество, связанное с высоким пропусканием в главном максимуме, до сих пор не находили широкого практического применения из-за недостаточного контраста и малого углового поля. Однако чувствительность полосы фильтров Шольца к фазовому сдвигу нужно рассматривать не только как недостаток схемы и источник технологических трудностей, но и под другим углом зрения – как источник новых возможностей для получения полосы пропускания с необходимыми параметрами. В диссертационной работе были решены как технологические задачи для соблюдения строгих допусков на изготовление кристаллических элементов фильтров Шольца, так и задачи, связанные с реализацией заданной формы полосы пропускания фильтра Шольца с увеличенным угловым полем. Это кардинально расширило возможности практического применения схемы Шольца для достижения экстремальных характеристик ИПФ.

При выполнении фильтровых наблюдений Солнца всегда желательно иметь возможность получать монохроматические изображения в нескольких спектральных диапазонах, поэтому разработка многоканальных и универсальных фильтров стала заметной тенденцией в дальнейшем развитии ИПФ. Например, универсальный фильтр UBF фирмы Zeiss работает в ряде обсерваторий и как самостоятельный прибор, и как предварительный монохроматор для более узкополосных фильтров, например Фабри–Перо в IPM и интерферометра Майкельсона в MDI. В КНР много внимания уделялось созданию многоканальных ИПФ с использованием спектроделителей [4*].

Однако за расширение спектрального диапазона приходится в итоге платить ухудшением параметров, так как возникает необходимость применять ахроматические фазовые поляризационные элементы. Применение большого числа ахроматических фазовых пластинок, сопровождающееся значительным увеличением длины оптической стопы и числа оптических поверхностей фильтра, неизбежно ограничивает угловое поле и увеличивает рассеяние.

Для достижения экстремальных характеристик ИПФ имеет смысл не гнаться за использованием ИПФ в широком интервале, а выбрать одну или две интересные в отношении наблюдений спектральные линии и «выжать» из каждого параметра фильтра максимум его возможностей. Создание интерференционнополяризационных фильтров в СибИЗМИР (ИСЗФ) шло преимущественно по этому пути.

Для практической реализации экстремальных характеристик необходимо наилучшим образом пройти все этапы создания фильтра, начиная с выбора оптимальной схемы, качественного оптического сырья, соблюдения допусков на изготовление и сборку оптических элементов и заканчивая установкой фильтра на телескопе, параметры которого должны оптимально согласовываться с характеристиками фильтра.

Вторая глава посвящена достижению оптимальных параметров ИПФ.

Существенные проблемы, с которыми приходится сталкиваться при разработке ИПФ, – как повысить пропускание, контраст, угловое поле фильтров.

Пропускание можно увеличить за счет повышения прозрачности поляризаторов (замена пленочных поляроидов призмами), уменьшения их количества и увеличения углового поля ступеней. Обычно применяемые пленочные дихроические поляризаторы пропускают не более 80 % поляризованного света, и если в фильтре 10 поляризаторов, результирующее пропускание будет ~5 %. Кроме того, не существует пленочных поляризаторов для широкой области спектра. Для разработанных в ИСЗФ фильтров были рассчитаны и изготовлены призмы кальцит–стекло типа Аббе с более высоким, чем у поляроидных пленок, пропусканием. Двулучепреломляющие призмы кальцит–стекло пропускают оба луча. Основным лучом следует выбирать *о*-луч (для него меньше астигматизм), поэтому половинка призмы изготавливается из стекла с показателем преломления, наиболее близким показателю обыкновенного луча для кальцита (стекло СТК-3 для двухполосного фильтра ВаII 4554 Å, Нβ [5*], и ТФ-21 для двухполосного фильтра HeI 10830 Å, Нα [6]). Но самый прямой и эффективный способ увеличения пропускания – сокращение числа поляризаторов. Схема Эванса с расщепленным элементом [6*] позволяет снизить число поляризаторов в полтора раза по сравнению с классической схемой Лио и широко используется в современных узкополосных ИПФ, в том числе и в разработанных в ИСЗФ [5*, 6].

Следующий шаг в направлении повышения пропускания – использование схемы Шольца совсем без внутренних поляризаторов. Однако эта выигрышная по пропусканию схема из-за низкого контраста, малого углового поля, необходимости соблюдения строгих допусков на изготовление и ориентацию пластинок до настоящего времени не получила широкого распространения и использовалась в лучшем случае как одна из ступеней ИПФ.

Количество проходящего через фильтр света увеличивается не только за счет уменьшения числа поглощающих элементов, но и при увеличении углового поля (угол приема излучения) двупреломляющих элементов фильтра с высоким порядком интерференции. Угловое поле считается допустимым, если смещение полосы по длине волны для наклонных пучков не превышает одной десятой (или пять сотых) от ширины полосы пропускания элемента. В работе Лио [2*] были предложены два типа широкоугольных элементов для увеличения углового поля и получения его круговым. Широкоугольный элемент Лио 1-го типа с полуволновой пластинкой между ортогонально ориентированными половинками кристалла получил широкое распространение и в настоящее время стал необходимым элементом во всех фильтрах Лио с узкой полосой.

В главе 3 диссертации показано и впервые подтверждено практически, что наиболее эффективным способом увеличения углового поля как фильтров Лио, так и фильтров Шольца будет использование широкоугольного элемента Лио 2-го типа, состоящего из положительного и отрицательного кристаллов. Поле такого элемента из кристаллов шпата и парателлурита в 3.3 раза превышает поле шпатового широкоугольного элемента Лио 1-го типа с таким же суммарным двупреломлением.

Контраст – отношение пропускания в главном максимуме к суммарному пропусканию в боковых лепестках.

Для повышения контраста фильтров Лио предложены два способа:

1) использование схемных решений, где толщины основных и дополнительных (не кратных двум) ступеней рассчитываются до изготовления фильтра так, чтобы уменьшить пропускание в побочных максимумах;

2) введение в стопу специальных корригирующих ступеней, параметры которых определяются исходя из реальной величины и спектрального положения вторичных максимумов, найденных уже после изготовления фильтра, так как реальная форма полосы пропускания определяется не только схемными решениями, но допустимыми (и допущенными) ошибками в толщине и ориентации кристаллических пластинок (в 3-й главе диссертации описано применение обоих этих способов для повышения контраста ИПФ на линии HeI 10830 Å, Hα). *Схема Шольца* дает возможность повышения контраста путем применения аподизации – такого распределения углов ориентации оптических осей пластинок, при котором разность азимутов не остается постоянной, как в классическом фильтре Шольца, а подчиняется какому-либо математическому закону, дающему возможность выбрать компромисс между требуемой полушириной полосы и уровнем вторичных максимумов. Предложенный в [7*] способ сформировать полосу пропускания заданной формы, а также уменьшить влияние ошибок в толщине на величину вторичных максимумов явился принципиальным шагом к тому, чтобы схема Шольца не осталась только привлекательным теоретическим построением, а была реализована на практике.

Контраст фильтра снижается (увеличиваются боковые лепестки и общий фон) из-за ошибок в толщине и кристаллографической ориентации пластинок, которые могут возникнуть при изготовлении кристаллических элементов. Автором предложена модификация способа размещения пластинок в стопе для смягчения допусков на толщину пластинок, когда контрастная полоса пропускания может быть сформирована не только для пластинок с разными знаками отклонения от заданной толщины [7*], но и для чаще встречающегося на практике случая, когда отклонения толщин от заданного значения имеют один знак (чаще всего толщина немного больше номинальной, поскольку оптик при обработке боится необратимо ошибиться – сделать толщину пластинки меньше допустимой). За опорное значение в этом случае предлагается принимать не заданное, а среднее из реальных значений толщины. Величина паразитных боковых лепестков уменьшается, но полоса фильтра тогда центрируется на длине волны, отличающейся от заданной. Однако небольшим изменением рабочей температуры положение полосы приводится к нужному значению.

Для достижения наилучшего контраста необходимо также соблюдение строгих допусков на ориентацию оптических кристаллографических осей пластинок как внутри каждой пластинки, так и при взаимной ориентации соседних. Это особенно важно для фильтров Шольца, где точность взаимной ориентации азимутов оптических кристаллографических осей должна быть в пределах 1–3⁻.

Для кристаллических пластинок ИПФ важна правильная ориентации оптической оси – оси Z: она должна лежать в плоскости пластинки перпендикулярно рабочему пучку, а ее азимут – под заданным углом к поляроиду или оси Z соседней пластинки. При этом ориентация кристаллографических осей X и Y может быть произвольной относительно рабочих поверхностей пластинки, которые в общем случае могут быть не привязаны к плоскостям симметрии. Это дает возможность при «раскройке» кристаллов выбрать и использовать возможно больший объем кристаллических заготовок из очень редких природных кристаллов (особенно из исландского шпата). Однако в этом случае теряется возможность применения рентгеновского гониометра для ориентирования кристаллов по отражению рентгеновского луча, так как отражение рассчитывается только для определенных фигур симметрии.

Обычно оптик визуально ориентирует оптическую ось Z перпендикулярно или параллельно поверхностям пластинки по биению коноскопической картины (изохром) при вращении пластинки на коноскопе. Требуемая точность ориентации осей достигается обработкой поверхностей методом приближений до

получения допустимого биения, и это достаточно долгий процесс. Для быстрого нахождения угла отклонения кристаллографических осей от поверхностей пластины автором предложено измерять на коноскопе разницу углов наклона при наведении на изохромы по обе стороны от нулевого положения. Угол положения оси относительно поверхностей пластины (клин, который надо сошлифовать обработкой) определяется по вычисленным автором номограммам, построенным по формуле для вычисления разности хода обыкновенного и необыкновенного лучей при произвольном падении пучка на поверхность плоскопараллельной кристаллической пластины с произвольной ориентацией кристаллографической оси. Зная разницу углов, можно быстро и с требуемой точностью 1-3' за один–два приема шлифовки скорректировать положение оси относительно поверхности пластинки.

При сборке пластинок в оптическую стопу фильтров Лио взаимная ориентация пластинок и поляризаторов по азимуту оси Z на угол ±45° обеспечивается их внешней огранкой, обычно восьмигранной, с точностью 5–10[′].

Для фильтров Шольца, где требуется точность взаимного ориентирования по азимуту осей соседних кристаллических пластинок 1–3', предложена схема, в которой ориентируемая пластинка устанавливается в гониометрическую головку и помещается в фотометр между скрещенными поляризаторами. С помощью электрооптического кристалла и четвертьволновой пластинки осуществляется качание плоскости поляризации относительно ориентируемой оси. Такая схема дает на выходе гармонически меняющийся сигнал с частотой, равной удвоенной частоте подаваемого на электрооптический кристалл напряжения. При несовпадении оптической оси пластинки с направлением выходного поляризатора в сигнале появляется модуляция с частотой управляющего напряжения. Поворотом гониометрической оптической делительной головки пластинка приводится в «нулевое» исходное положение, при котором в выходном сигнале будет только удвоенная частота. Затем пластинка поворачивается на расчетный угол и в этом положении соединяется со стопой фильтра. Точность ориентации азимутов при таком методе составляет 1'.

Таким образом, экстремальные характеристики интерференционнополяризационных фильтров достигаются наиболее эффективно, если двигаться сразу в нескольких направлениях. С одной стороны, наряду с разработкой схем с увеличенным угловым полем, контрастом, пропусканием необходимо повышать точность обработки и контроля, чтобы выдержать строгие допуски на обработку кристаллических элементов, с другой – находить схемные способы смягчения влияния допусков.

В третьей главе представлены разработки двух специализированных ИПФ с экстремальными характеристиками на линии HeI 10830 Å, Hα и фильтрового магнитографа на линию FeI 6173 Å.

Базовыми элементами ИПФ являются кристаллическая оптическая стопа фильтра, система оптико-механического регулирования положения полосы пропускания фильтра по спектру, термостат с терморегулятором, который должен поддерживать температуру оптической стопы с точностью 0.05–0.1°С. Рабочая температура фильтра определяется условиями его эксплуатации. Как правило, она должна быть в следующих пределах: выше окружающей температуры и выше температуры нагрева оптической стопы в солнечном пучке, но ниже температуры разрушения самых чувствительных элементов – пленочных поляризаторов, если они установлены в оптической стопе.

В ИСЗФ впервые в мировой практике был введен в эксплуатацию двухполосный ИПФ на две важные в прогностическом отношении линии HeI 10830 Å, Hα. Была разработана схема, обеспечивающая работу фильтра в двух далеких спектральных диапазонах. Девять поляризационных ступеней из оптического кальцита объединены в четыре широкоугольных, регулируемых, расщепленных по схеме Эванса, элемента 1–4 и один широкоугольный нерегулируемый элемент 5 (рис. 3).



Рис. 3. Оптическая и кинематическая схемы и внешний вид фильтра HeI 10830 Å, Ha.

Решены задачи, связанные с точной посадкой максимумов спектрального пропускания фильтра одновременно на две линии. Варьируя расчетную толщину «опорной» кристаллической пластинки фильтра и выбранную рабочую температуру его термостата в допустимых пределах, мы добились максимально точного попадания максимумов пропускания ее канавчатого спектра на обе линии: порядок интерференции составляет 576.5 в HeI 10830 Å и 994.493 в На (порядок всего на 0.007 отличается от полуцелого). Эта пластинка послужила базовой (эталонной) для изготовления относительно нее кратных по толщине пластинок фильтра. Толщины нескольких поляризационных ступеней были рассчитаны с отступлением от кратности 2, что позволило повысить контраст. Полуширина полосы пропускания составляет 0.46 Å в 10830 Å и 0.25 Å в На. Такая полуширина является достаточной для получения контрастных изображений в He I 10830 Å, так как она меньше полуширины линии, которая в спокойных областях составляет 0.55 Å, а в активных областях линия значительно шире. С другой стороны, предельная ширина полосы ИПФ ограничивается размерами кристаллов кальцита, пригодных для изготовления элементов фильтра. Необходимо также учитывать, что установка добавочных ступеней для сужения полосы приводит к снижению пропускания.

Смещение полосы пропускания в крылья линий в фильтре производится изменением оптического хода в ступенях высокого порядка интерференции с помощью согласованного поворота полуволновых пластинок в фазовых элементах. Настройка полосы фильтра на соседние спектральные линии, например на линию SiI 10827 Å, осуществляется изменением температуры. Это оказывается возможным, так как поляризационные ступени изготовлены из одного сорта кристаллов – оптического кальцита.

Ступени высоких порядков интерференции были сделаны не только регулируемыми, но и широкоугольными. Это потребовало введения в схему большого числа фазовых пластинок (0.5λ и 0.25λ), работающих одновременно в двух далеко отстоящих длинах волн 10830 и 6563 Å, – так называемых ахроматических пластинок нулевого порядка интерференции, каждая из которых собирается из большого числа простых фазовых пластинок [8*]. Однако вместо сложных ахроматических фазовых пластинок нулевого порядка (0.5 и 0.25) можно использовать более простые в изготовлении кварцевые фазовые полуволновые и четвертьволновые пластинки высокого порядка с порядком интерференции 8.5 и 4.25 в линии гелия 10830 Å и 14.999 и 7.249 в линии водорода 6563 Å. Проведенный автором расчет показал, что неизбежное при этом снижение спектрального диапазона работы пластинок в областях избранных длин волн приводит к увеличению паразитного интегрального пропускания в побочных максимумах в пределах свободного спектрального интервала от 1.13 % до 1.20 % от пропускания в главном максимуме. Такое увеличение пропускания в побочных максимумах – это цена, которую, по мнению автора, стоило заплатить, чтобы не применять сложные в изготовлении ахроматические пластинки и не перегружать оптическую стопу фильтра.

В настоящее время нет пленочных поляризаторов, одинаково хорошо пропускающих и гасящих свет в HeI 10830 Å и Hα, поэтому в качестве поляризаторов были рассчитаны и изготовлены двулучепреломляющие призмы кальцит–стекло с высокой прозрачностью в обеих полосах пропускания. Призмы пропускают обыкновенный луч и отклоняют необыкновенный. Чтобы уменьшить рассеянный свет, возникающий при падении отклоненных лучей на внутренние боковые грани кристаллов, в оптической стопе между кристаллами установлены кольцевые диафрагмы, перехватывающие отклоненные лучи.

Для дополнительного уменьшения рассеянного света (и увеличения контраста) в линии Нα параллельно нескольким призмам в фильтр добавлены пленочные поляризаторы для видимой области спектра. Эти поляризаторы поглощают отклоненные призмами в Нα необыкновенные лучи и совсем немного уменьшают пропускание в главном максимуме Нα в обыкновенном луче. К сожалению (как уже говорилось), пленочные поляризаторы совершенно прозрачны и неэффективны в ИК-области спектра.

Разделение пучка на два спектральных канала 10830 Å и Н α осуществляется после фильтра с помощью спектроделительного кубика с интерференционным покрытием, которое не поляризует свет в проходящем пучке 10830 Å и почти полностью поляризует его в отклоненном пучке 6563 Å. Кубик служит поляризатором последней ступени в этой длине волны. В канале линии гелия эта ступень является модуляционной, для нее после кубика установлен пленочный дихроический ИК-поляроид. Толщина ступени выбрана так, чтобы при повороте этого поляроида на 90° полоса ИПФ пропускала соседние главные максимумы, которые попадают на свободные от солнечных спектральных линий участки континуума ±8.67 Å от центра линии HeI 10830 Å. Изображения в континууме используются для повышения контраста изображения в центре линии гелия: они оптически вычитаются из изображений в линии как фон.

Как иллюстрация работы фильтра, установленного на Большом внезатменном коронографе в Саянской обсерватории, на рис. 4 приведены фильтрограммы активной области Солнца в линии гелия и водорода. Фильтрограммы получены одновременно с регистрацией спектров исследуемой области.



Рис. 4. Изображения, полученные с фильтром Не I 10830 Å, Нα: *а* – активная область № 10656 13 августа 2004 г. в ядре линии НеI 10830 Å; *б* – изображение в НеI 10830 Å на зер-кальной щели спектрографа (вертикальная полоса); *в* – соответствующее изображение в На, 13.06.2005.

При разработке фильтрового магнитографа на магниточувствительную линию FeI 6173 Å (*фильтр «Магнит»*) было важно найти такие решения, которые обеспечили бы требуемую точность измерения магнитных полей, а это означает, что такой фильтр должен обладать оптимальным набором экстремальных характеристик: максимально узкой и стабильной полосой, высоким пропусканием, увеличенным угловым полем – и обеспечивать быстрое спектральное сканирование.

Чтобы сформировать узкую полосу пропускания, обеспечивающую высокое спектральное разрешение, но при этом избежать потерь, связанных с малым отношением диаметра светового поля фильтра к его длине, целесообразно разбить оптическую стопу фильтра на модули, каждый из которых должен быть широкоугольным, и использовать оптику, перестраивающую изображение Солнца между модулями.



Полосы пропускания модулей фильтра

Рис. 5. Блок-схема фильтра «Магнит».

Предложенная схема фильтра «Магнит» (рис. 5) состоит из следующих основных модулей: фильтра Лио предварительной монохроматизации с полушириной полосы 2 Å; фильтра Шольца, формирующего полосы пропускания («вилки») с двумя максимумами, отстоящими на 0.12 Å (расстояние между вилками 2 Å); узкополосного ИПФ-модулятора –двухкаскадного электрооптически регулируемого фильтра Лио с полушириной полосы 0.08 Å. Вверху на рис. 5 показаны расчетные контуры полос пропускания каждого модуля и результирующий контур всего фильтра.

Выбор схемы Шольца для одного из главных модулей фильтра не только обеспечил высокое пропускание, необходимое при узкой полосе, но и позволил за счет аподизации сформировать вилочную полосу пропускания с двумя максимумами, один из которых «смотрит» в синее, а другой – в красное крыло магниточувствительной линии. Максимумы вилки отстоят от центра линии на расстоянии, оптимальном для измерения магнитных полей. Такая вилочная форма полосы имеет преимущества по сравнению с полосой обычной «треугольной» формы (рис. 6 а, б). Во-первых, при сканировании полосы ИПФ-модулятором по пикам вилки, а не по «склонам» треугольника не уменьшается количество света. Второе преимущество, важное для обеспечения точности измерений, состоит в следующем. Небольшие флуктуации температуры термостата фильтра Шольца, обусловленные известной нестабильностью терморегулятора, могут приводить к изменению положения (сползанию) полосы пропускания фильтра Шольца относительно границ сканирования полосы ИПФ-модулятора (которые мы считаем устойчивыми, см. далее). В случае обычной треугольной полосы фильтра Шольца (рис.6, б) это привело бы к ложному сигналу скорости из-за разного пропускания суммарной полосы двух фильтров. При полосе в виде вилки сползание границ сканирования будет проходить по «подобным» склонам вилки и ложный сигнал скорости при сканировании не появится (рис. 6, *a*), хотя и произойдет уменьшение уровня сигнала.



Рис. 6. Влияние температурного смещения полосы фильтра Шольца для контура с двумя максимумами (вилка, a) и контура треугольной формы (δ).

Для этого модуля была решена еще одна важнейшая задача – увеличение углового поля фильтра Шольца. Сравнение различных способов увеличения углового поля фильтра Шольца показало, что наиболее эффективным (хотя и весьма трудоемким!) является способ, при котором каждый элемент фильтра Шольца делается широкоугольным. Наилучший результат достигается при использовании элементов Лио второго типа, когда каждый элемент собран из кристаллов противоположного знака – кальцита и парателлурита. Проведены прецизионные (с точностью 10⁻⁵) измерения показателя двупреломления парателлурита для видимой области спектра. На их основе рассчитаны оптические кристаллические элементы фильтра, полоса пропускания фильтра, зависимость положения полосы от угла падения лучей и влияние отступления от допусков на параметры фильтра.

Впервые был изготовлен *широкоугольный фильтр Шольца* из 24 составных пластинок шпат+парателлурит, формирующий в области линии 6173 Å двухвершинные полосы пропускания с полушириной 0.2 Å, расположенные на расстоянии 2 Å. Экспериментальное исследование угловой чувствительности фильтра показало, что смещение полос при угле падения 3° не превышает 0.05 от полуширины полосы, что соответствует расчетному значению. Это поле в 3.3 раза больше, чем у известных фильтров Лио.

Следующий модуль «Магнита» – ИПФ-модулятор, сужающий полосу до 0.07 Å, – также сделан широкоугольным с использованием элементов Лио второго типа.

При измерении магнитных полей с помощью фильтрового магнитографа должна быть предусмотрена возможность установки полосы поочередно в синем и красном крыльях линии. Фильтр Шольца формирует полосу пропускания в виде вилки с двумя максимумами, расстояние между которыми (0.12 Å) примерно равно полуширине солнечной спектральной линии. ИПФ-модулятор должен пропустить один максимум «вилки» и погасить другой. Для этого в состав модулятора входит двупреломляющий элемент первого каскада такой толщины, что его канавчатый спектр работает как «затвор»: максимум канавчатого спектра пропускает один максимум вилки фильтра Шольца, а минимум «запирает» второй максимум вилки. Но при совместном действии затвора и фильтра Шольца все же остается вторичный максимум. Этот вторичный максимум гасится кристаллическим элементом («контраст») второго каскада модулятора. ИПФ-модулятор сканирует полосу пропускания фильтра Шольца по крыльям линии. Сканирование выполняется с помощью кристаллов DKDP, управляемых от источника напряжения с прямоугольными импульсами. В схеме измерений магнитных полей на Солнце при каждом положении полосы должна происходить модуляция поляризованного солнечного излучения анализатором поляризации (рис. 5) и регистрация модулированных изображений.

Для обеспечения высокой точности измерений лучевых скоростей необходимо поддерживать положение полосы пропускания фильтра относительно спектральной линии в пределах 0.001 Å. Это означает, что точность термостатирования должна быть в пределах 0.003 °C. С этой целью все блоки фильтра помещаются в термостаты, которые должны поддерживать заданную рабочую температуру фильтра. Существующие электронные термостаты обеспечивают термостатирование в пределах ± 0.05 °C. Поскольку этого недостаточно, стабильность положения полосы контрастного элемента и затвора модулятора фильтра обеспечивается дополнительным автоматическим регулированием их положения относительно лазерной линии 6328 Å.

Один луч лазера (рис. 5) пропускают через полуволновую пластинку и далее с краю поля зрения фильтра через контрастный элемент, другой – через полуволновую пластинку и затвор. Оба элемента пропускают лучи лазера не в главном максимуме на магнитную линии 6173 Å, а в побочных максимумах в области 6328 Å. После поляризационного расщепителя побочные максимумы в *о*- и *е*-лучах имеют дополнительное пропускание.

Главный максимум фильтра настраивают на солнечную линию и затем вращением полуволновых пластинок, установленных в лазерном пучке, выравнивают интенсивности *о-* и *е-*лучей по сигналам фотоприемников. Из-за температурного ухода полос нарушается равенство интенсивностей лазерных пучков. Сигналы рассогласования подаются на двигатели полуволновых пластинок фильтра – контрастного элемента и затвора. Пластинки фильтра поворачиваются до равенства интенсивностей лазерных лучей и тем самым возвращают главный максимум пропускания к исходному положению на измеряемую солнечную линию. Лабораторные испытания ИПФ-модулятора подтвердили, что система управления полосой обеспечивает стабилизацию полосы фильтра с требуемой точностью.

В Заключении диссертации перечислены основные результаты и выводы работы.

В соответствии с поставленными в диссертационной работе задачами разработаны схемные и технологические решения, дающие высокое пропускание, контраст, увеличенное угловое поле.

Наиболее эффективным способом увеличения пропускания является использование схемы Шольца без внутренних поляризаторов, но для практической реализации преимуществ этой схемы Шольца необходимо оптимизировать и другие характеристики фильтра Шольца, т. е. увеличить угловое поле и обеспечить высокий контраст. Эти задачи также были решены в диссертационной работе. Показано, что наиболее эффективным способом увеличения углового поля фильтров Шольца является изготовление всех пластинок фильтра широкоугольными из кристаллов разных знаков с близким двупреломлением.

Для обеспечения высокого контраста фильтров Шольца недостаточно выбрать оптимальную аподизацию – необходимо также изготовить оптические элементы и собрать их в стопу с соблюдением строгих допусков на ориентацию оптических осей пластинок. Для этого разработаны метод ориентирования кристаллических пластин фильтра с помощью коноскопа по далеким узким изохромам и модуляционный метод – по исчезновению второй гармоники в схеме с использованием качания плоскости поляризации. Эти решения были применены в ИПФ, разработанных и изготовленных в ИСЗФ с участием автора.

Впервые в мировой практике был изготовлен ИПФ на две важные диагностические линии HeI 10830 Å, Hα. Решены задачи по обеспечению одновременной работы в двух далеких спектральных диапазонах: рассчитана и изготовлена оптическая стопа с высоким контрастом в двух линиях, использованы фазовые пластинки высокого порядка, работающие одновременно в HeI 10830 Å и Hα, предусмотрена возможность вычитания изображений в континууме для повышения контраста.

Для фильтра «Магнит» впервые изготовлен широкоугольный фильтр Шольца с вилкообразной полосой пропускания для измерения магнитных полей. В состав фильтра «Магнит» входит также ИПФ-модулятор со стабильной электрооптически сканируемой полосой пропускания.

Опыт успешного применения ИПФ и решения возникших при этом проблем показывает, что благодаря «диверсификации» классических схем ИПФ и использованию новых кристаллических материалов и технологий имеются возможности для дальнейшего развития ИПФ и применения их в солнечных наблюдениях.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК, выделены полужирным шрифтом.

1. Кушталь Г.И., Миловидова Н.П., Скоморовский В.И. Ориентирование кристаллических пластин интерференционно-поляризационных фильтров (ИПФ): Препринт СибИЗМИР №11-88.1988. 8 с.

2. Кушталь Г.И. Расчет фильтров Шольца // Исслед. по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. 1990. Вып. 99. С. 188–193.

3. Кушталь Г.И., Скоморовский В.И. Интерференционно-поляризационный фильтр «Магнит» для измерения солнечных магнитных полей. 1. Блок-схема // Исслед. по геомагнетизму, аэрономии и физ. Солнца. 1998. Вып. 108. С. 267–274.

4. Kushtal G.I., Skomorovsky V.I. The two-bandpass birefringent filter (BF) for the HEL 10830 Å and H α lines // Solar Jets and Coronal Plumes. Proc. International meeting. Guadeloupe, France, 23–26 February 1998. P. 329–332.

5. Домышев Г.Н., Кушталь Г.И., Садохин В.П., Скоморовский В.И. Способ компенсации температурного смещения полосы фильтра: Патент 2118800. Бюл. изобр. 1998. № 25.

6. Кушталь Г.И., Скоморовский В.И. Двухполосный регулируемый интерференционно-поляризационный фильтр (ИПФ) на линии HeI 10830Å и Нα // Оптический журнал. 2000. Т. 67. Вып. 6. С. 99–106.

7. Skomorovsky V.I., Firstova N.M., Kashapova L.K., Kushtal G.I., Boulatov A.V. Investigation of HeI 10830 Å "dark point" at the Sayan Solar Observatory and the Baikal Astrophysical Observatory // Solar Phys. 2001. V. 199. P. 37–45. 8. Kushtal G.I., Skomorovsky V.I. Advance of the geometrical measurements of the birefringent filter's crystal plates and two-dimensional measurements of Doppler velocity in the solar atmosphere // Proc. SPIE. 2002. V. 2002. P. 504–512.

9. Кушталь Г.И., Скоморовский В.И. Создание интерференционнополяризационных фильтров (ИПФ) с экстремальными характеристиками и двумерные измерения доплеровских скоростей в солнечной атмосфере // Труды конференции стран СНГ и Прибалтики «Активные процессы на Солнце и звездах». Санкт-Петербург, 1–6 июля 2002 г. С. 321–324.

10. Chuprakov S.A., Kushtal G.I., Papushev P.G., Skomorovsky V.I., Zagayno-va Yu.S. The investigation of the solar active regions structure using the multiwave observations with Large Solar Coronagraph of Sayan Observatory: The study of spectra and images of the sunspot umbrae in the domain of the line He I 10830 Å // Multi-wavelength investigations of solar activity. IAU Symposium. V. 223 / Eds. A.V. Stepanov, Benevolenskaya E.E., Kosovichev A.G. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004., p.183–186.

11. Домышев Г.Н., Кушталь Г.И., Садохин В.П., Скоморовский В.И. ИПФ не сдаются (модернизация двухполосного фильтра HeI 10830 Å, На // Солнечноземная физика. 2004. Вып. 6. С. 156–160.

12. Ган М.А., Ган Я.М., Кушталь Г.И., Скоморовский В.И., Домышев Г.Н., Садохин В.П. Интерференционно-поляризационные фильтры для наблюдений Солнца.1. Развитие метода доводки кристаллических пластин ИПФ // Солнечноземная физика. 2006. Вып. 9. С. 110–118.

13.Gan M.A., Gan Ya.M., Kushtal G.I., Skomorovsky V.I., Domyshev G.N., Sadokhin V.P. Advancements in the interferometric measurements of the real time finishing of birefringent filter's crystal plates // J. Phys. Conf. Series. 2006. V. 48. P. 916–925.

14. Кушталь Г.И., Скоморовский В.И., Домышев Г.Н., Садохин В.П., Опсиков И.А. Интерференционно-поляризационный фильтр (ИПФ) типа Шольца с увеличенным угловым полем зрения // Солнечная активность и ее влияние на Землю. Владивосток: Дальнаука, 2007. С. 58–68 (Труды УАФО. Т.10. Вып.10).

15. Кушталь Г.И., Скоморовский В.И. Интерференционно-поляризационные фильтры в КрАО и ИСЗФ // Изв. КрАО. 2009. Т. 104, № 6. С. 119–126.

16. Hammerschlag R.H., Skomorovsky V.I., Bettonvil F.C.M., Kushtal G.I., Olshevsky V.L., Rutten R.J, Jägers A.P.L., Sliepen G, Snik F. The Irkutsk barium filter for narrow-band wide-field high-resolution solar images at the Dutch Open Telescope // Proc. SPIE. 2010. V. 7735. P. 773585-773585-11.

17. Скоморовский В.И., Кушталь Г.И., Мамченко М.С., Садохин В.П. Прецизионное ориентирование и сборка пластин фильтра Шольца // Труды IX международной конференции «Прикладная оптика–2010» Санкт-Петербург, 18–22 октября 2010 г. С. 187–191.

18. Скоморовский В.И., Кушталь Г.И., Мамченко М.С., Садохин В.П. Прецизионное ориентирование и сборка пластин фильтра Шольца // Солнечноземная физика. 2010. Вып. 16. С. 32–38. 19. Григорьев В.М., Кушталь Г.И., Скоморовский В.И., Трифонов В.Д. Солнечный телескоп с интерференционно-поляризационным фильтром // Патент RU №120247 U1 МПК G02B23/00 (2006.01). Опубликовано 10.09.2012 г.

20. Skomorovsky V.I., Kushtal G.I., Sadokhin V.P. Wide-field Solc-type birefringent filter // Proc. SPIE. 2012. V. 8446. Id. 84466V–84466V-12.

Цитированная литература

1*. Couvidat S. et al. Wavelength dependence of the Heliosesmic and Magnetic Imager (HMI) Instrument onboard the Solar Dynamics Observatory (SDO) // Solar Phys. 2012. V. 275. P. 285–325.

2*. Lyot B. Le filter monochromatique polarisant et ses applications en physique solaire // Ann. Astrophys. 1944. V. 7. P. 31–79.

3*. Solc I. A new type of birefringent filter // Czech. J. Phys. 1954. V. 4. P. 53-66.

4*. Deng Y., Zhang H. Progress in Space Solar Telescope // Sci. China Ser. G. 2009. V. 52, N. 11. P. 1655–1659.

5*. Александрович С.В., Домышев Г.Н., Коровкин А.И., Скоморовский В.И. Узкополосный интерференционно-поляризационный фильтр с двумя полосами пропускания // Новая техника в астрономии. 1975. Вып. 5. С. 34–39.

6*. Evans J.W. The birefringent filter // J. Opt. Soc. Am. 1949. V. 39. P. 229–242.

7*. Fredga K., Hogbom J.A. A versatile birefringent filter // Solar Phys. 1971. V. 20, N 1. P. 204–227.

8*. Кучеров В.А., Самойлов В.С. Многокомпонентная ахроматическая фазовая пластинка // ОМП. 1987. № 8. С. 41–44.

Отпечатано в издательском отделе ИСЗФ СО РАН Заказ № 139 от 5 апреля 2013 г. Объем 24 с. Тираж 120 экз.