

УДК 520.24

Интерференционно-поляризационные фильтры в КраО и ИСЗФ

Г.И. Кушталъ, В.И. Скоморовский

Институт солнечно-земной физики СО РАН, 664033, Иркутск

Поступила в редакцию 15 октября 2008 г.

Ключевые слова: Солнце, интерференционно-поляризационный фильтр

1 Введение

Предстоящий 100-летний юбилей Крымской астрофизической обсерватории вызвал желание поделиться воспоминанием о том, что сотрудники обсерватории, их работы и сама атмосфера обсерватории способствовали выбору направления наших исследований в области разработки узкополосных фильтров. Приводятся сведения об ИПФ, разработанных в КраО и в ИСЗФ, и решении ряда технологических вопросов, постановка и задел для выполнения которых были сделаны в 1949 г. в работе А.Б. Северного, А.Б. Гильварга “Интерференционно-поляризационный фильтр для исследования Солнца и опыт его применения” (Северный, Гильварг, 1949).

Попасть на практику в КраО было мечтой многих выпускников-астрономов различных университетов. Она отличалась широтой охватываемых проблем, высокой требовательностью руководителей. Первую часть практики студенты знакомились с работой всех отделов обсерватории, выполняли лабораторные задания и расчеты. А затем углублялись в выбранном направлении, получали темы дипломных работ и возможность выполнить их по материалам наблюдений, также непосредственно помогая проведению наблюдений. Бывало, некоторые студенты лежали-спали под дверью павильона звездного телескопа. Удар дверью означал, что телескоп свободен и можно наблюдать.

Атмосфера “научной вседозволенности” и высокой требовательности к работе, скорее всего, задавалась директором обсерватории А.Б. Северным.

Всегда с большой теплотой, уважением В.Е. Степанов, который много лет проработал в КраО, говорил нам, молодым специалистам, приехавшим на работу в Иркутск в СибИЗМИР, о высокой учености и организационной деятельности А.Б. Северного. А иногда и пугал нас, когда мы плохо работали: “Андрей Борисович уже давно выгнал бы вас с работы!!!”. Но к юбилею А.Б. Северного мы постарались – сделали и подарили ему первые ахроматические фазовые пластинки кварц-фтористого магния для проведения измерений магнитных полей одновременно в нескольких линиях.

2 Разработка и создание в КраО ИПФ на линию 6563 Å

Один из авторов этих заметок впервые познакомился с работой А.Б. Северного и А.Б. Гильварга “Интерференционно-поляризационный фильтр для исследования Солнца и опыт его применения” на астрофизической практике в Крымской обсерватории в начале 60-х годов, и кто бы мог

подумать, что исследование, конструирование и изготовление поляризационной оптики и ИПФ будут приоритетными в нашей последующей работе.

В конце 19-го – начале 20-го столетий кристаллический элемент использовался, чтобы выделить одну из двух D-линий натрия (Вуд, 1914). В 1933 Бернар Лио (Лио, 1933) впервые опубликовал принципы фильтра с несколькими кристаллическими пластинками. Ингве Оман в 1938 г. стал первым конструктором фильтров и сделал фотографии протуберанцев в линии H_{α} (Оман, 1938). В 1944 г. вышла обширная статья Лио, касающаяся изготовления и применения ИПФ. Другие статьи (Эванс, 1940; Петтит, 1941) того же периода вносили свой небольшой пай.

В СССР статья А.Б. Северного и А.Б. Гильварга (Северный, Гильварг, 1949) описывала разработку восьмиступенчатого ИПФ с полосой 2 \AA на линию H_{α} . Фильтр был успешно применен для изучения протуберанцев. Этот первый отечественный ИПФ для исследования Солнца и одна из первых фотографий протуберанцев (копии из статьи), полученная с фильтром, показаны на рис. 1 и 2.

Фильтр был сделан в рекордные сроки. Летом 1947 г. был выполнен расчет стопы, за год были изготовлены кварцевые пластины, поляризаторы, термостат, и осенью 1948 г. проведены наблюдения.

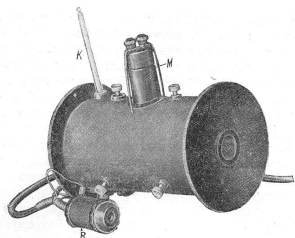


Рис. 1. ИПФ на линию H_{α}

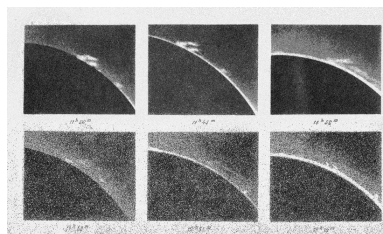


Рис. 2. Фотографии протуберанца 8 октября 1948 г.

Сейчас, после разборки, ремонта большого количества зарубежных и отечественных фильтров, знакомства с теорией ИПФ и с требованиями на изготовление оптических элементов, нам более полно представляются глубина упомянутой работы и заложенные в ней идеи и практические советы для изготовителей фильтров.

Ниже рассмотрены некоторые принципиальные задачи и пройденные в связи с ними этапы работы при изготовлении ИПФ в КраО. Эти задачи, на специфику и тонкости которых указал А.Б. Северный, развивались и решались впоследствии в работах других исследователей, в том числе и в ИСЗФ. В следующем разделе будут кратко описаны ИПФ, изготовленные в ИСЗФ, а главное показано, как важно было выполнять указания Андрея Борисовича, которые мы будем цитировать прямо по статье (Северный, Гильварг, 1949).

1. Расчет оптической стопы ИПФ.

“При расчете следует учитывать дисперсию двойного преломления кристаллов, зависимость ее от температуры, зависимость положения полосы пропускания от угла падения лучей и избытка толщины в кварцевых пластинах”. Все это было учтено на практике в цитируемой работе, и только в середине 50-х годов был опубликован расчет влияния ошибок (допусков) в толщине и ориентации кристаллографической оси в пластинках на полосу пропускания ИПФ (Джиованелли, Джефферис, 1954).

2. Подбор кристаллов.

“При выборе кварца следует избегать всяких включений, пузырей, оптических двойников”. Двойное преломление кристаллов кварца “может колебаться от образца к образцу до 50×10^{-6} ”;

но отдельно взятый образец для ИПФ должен быть оптически однородным по двойному преломлению, чтобы положение полосы пропускания не изменялось по полю фильтра.

3. Прецизионное ориентирование, обработка и контроль кристаллических деталей.

“Окончательная проверка ориентировки с уменьшением ошибки до 2' проводилась с помощью рентгеногонометра, снабженного ионизационной камерой”.

Суммарное отклонение от расчетных (допуск) трех параметров кристаллических пластин – толщины, плоскопараллельности и плоскостности, а также отклонение кристаллографической оси не должны приводить к изменению положения полосы пропускания более, чем 0.01 от ширины полосы. Для кварца это приводит к необходимой точности обработки параметров 0.2 мкм, что и было выполнено даже для самой тонкой пластинки 0.6 мм.

Чрезвычайно трудоемким является не только процесс изготовления, но также и процесс контроля. Андрей Борисович применил для контроля положения полос пропускания кристаллических пластин спектрограф с дифракционной решеткой (разрешение 20000). “Положение необходимого максимума интенсивности относительно линии H_{α} устанавливается с помощью гейслеровской трубки. Ввиду чувствительности интерференционных измерений очень существенно было устранить все возможные источники ошибок, могущие повлиять на результаты измерений, как-то: различие фокусов для интерференционной картины (спектра пропускания кристаллической пластины) и гейслеровской трубки, ошибки, возникающие от виньетирования щели или источника, неравномерное и несимметричное расширение щели и т. п.”.

Даже сейчас оптики и астрономы забывают об этом предупреждении. Например, при измерении и сравнении лучевых скоростей в короне в разных местах на лимбе заполнение камерного зеркала спектрографа происходит по-разному для разных азимутов спектральной щели. Несомненно, это приводит к ошибкам в измерениях.

4. Подбор поляризаторов. “При сборке фильтра существенно соблюдать параллельность направлений колебаний поляроидов и следить за тем, чтобы эти направления достаточно точно биссектировали угол между плоскостями колебаний кварцевых пластин”.

Девять поляризаторов, содержащиеся в фильтре, производят сильное поглощение, так что фильтр пропускает не более 4 % падающего света. По просьбе Андрея Борисовича на Загорском оптико-механическом заводе (ЗОМЗ) были сделаны квадратные поливиниловые поляризаторы, заклеенные в стекла. Ориентация плоскости пропускания под углом 45° к стороне выполнена с точностью 10–20 угловых минут.

Когда практически заново в 60-х мы начинали в ИСЗФ разрабатывать технологию производства ИПФ, нам показали на ЗОМЗе несколько поляризаторов, оставшихся после изготовления для фильтра А.Б. Северного. Лучших поляризаторов по прозрачности и контрасту, по точности ориентации мы больше никогда не встречали и использовали их как стандарты для подгонки по ним ориентации новых.

5. “Для устранения вредных отражений, возникающих как от поверхностей кварцевых пластин, так и от поверхностей поляроидов, фильтр собирается на иммерсии. Выбор последней имеет важное значение; необходимо избегать органических масел, как правило, разрушающих поляроиды”. Лио, который вынужден был отказаться от поляроидов из-за недостаточной их прозрачности в широком диапазоне спектра и использовать призмы, применил канадский бальзам для их склеивания. Склейка была разрушена иммерсией, попавшей от соседних элементов. Пример подобной же ошибки – состояние многих фильтров В. Халле на линию кальция. В этих фильтрах соседствовали призмы, склеенные бальзамом, и элементы, собранные на иммерсии. Нам пришлось восстанавливать много таких фильтров.

6. “При использовании фильтра в сходящемся пучке обыкновенный и необыкновенный лучи не будут иметь фокус в одной плоскости. Различие составляет 0.04 мм на 1 см кварца. Можно разницу скомпенсировать разворотом кристаллографической оси самой толстой пластины на 90 градусов.

А в фильтрах, выпущенных ЛОМО, оси всех кристаллических пластин ориентированы в одном направлении!

7. “Одновременное использование второго фильтра, пропускающего водородную линию H_{β} , дает возможность быстрого определения температуры возбуждения (с помощью формулы Больцмана) в различных местах протуберанца”.

В пп. 1–7 мы расставили акценты на некоторых важных технологических задачах, обозначенных в работе Северного и Гильварга. В разделе 3 приведены примеры того, как они в дальнейшем нами решались на пути создания фильтров с экстремальными характеристиками.

3 Сверхузкополосный управляемый фильтр на линии H_{β} ВаII 4554 Å

В 70-е годы в ИСЗФ (тогда СиБИЗМИР) был изготовлен, разработан и испытан сверхузкополосный ИПФ на линии ВаII 4554 Å, H_{β} (Александрович и др., 1975). Для получения изображений хорошего качества необходимы короткие экспозиции, поэтому узкая полоса фильтра, дающая мало света, потребовала мобилизации всех средств в борьбе за каждый процент пропускания ИПФ. Сюда входят: выбор кристаллического сырья (п. 2) для изготовления элементов фильтра, соблюдение жестких допусков на параметры изготавливаемых пластин (п. 3) (что требует разработки методов прецизионной обработки и контроля), а также выбор схемных решений, позволяющих при заданной узкой полосе получать максимальное пропускание и контраст (п. 1).

Выбор кристаллов (п. 2).

Опыт показывает, что проблема оптической однородности не может быть успешно решена с помощью ретуши. Двупреломление отдельных образцов кристаллов исландского шпата может колебаться в пределах $5 \cdot 10^{-4}$. Применяя ретушь поверхности, можно сделать кристалл однородным по двупреломлению, но при установке его в стопу в иммерсии (а не в воздухе) неоднородности восстанавливаются и качество изображения ухудшается, хотя спектральные характеристики при этом могут быть хорошими – так случилось с австралийским фильтром с применением ретуши (Брей, Винтер, 1970). Таким образом, в ИПФ действительно нужно применять только оптически однородные кристаллы.

Основными кристаллами, используемыми для элементов ИПФ, являются кварц и оптический кальцит. Оптический синтетический кварц успешно используется в оптическом производстве, но синтетический кальцит не может заменить природный, в первую очередь по размерам. Извлечение из природного кальцита монообласти, пригодной для ИПФ, – сложный процесс, включающий ряд технологических операций контроля и обработки.

Пластины, получающиеся после распиловки кристалла кальцита перпендикулярно оптической оси, протравливаются в растворе соляной кислоты, и по форме фигур травления и их ориентации определяется наличие пирамид роста. Пластина просматривается в ультрафиолетовом свете для уточнения границ пирамиды роста. Из размеченных кристаллических пластин вырезаются заготовки для элементов ИПФ. Самый высококачественный шпат-однородный, бесцветный и прозрачный в коротковолновой части спектра дает пирамида роста спайного ромбоэдра $\langle 1011 \rangle$ (Шустов, 1967). Окончательное исследование однородности ведется на интерферометре Тваймана по показателям преломления в o - и e -лучах, а также по двупреломлению. Кристаллы, содержащие большие монообласти спайного ромбоэдра, очень редки. Поэтому заготовки, локально искажающие интерференционные полосы не более чем на $1/10$ ширины полосы, считаются приемлемыми для изготовления ИПФ.

Обработка, контроль (п. 3).

Доводка пластин для ИПФ состоит из двух процессов: оптической обработки (полировки) и контроля параметров, которые традиционно велись отдельно.

Пластины должны выдерживать строгие допуски по толщине и плоскопараллельности (с точностью 0.02 – 0.05 порядка интерференции). При ручной обработке такие допуски с риском “просадить пластинку” с большим трудом можно выдержать для кристаллов исландского шпа-

та. В связи с этим был разработан метод доводки кристаллов, в котором объединены процессы обработки и контроля. Найденные режимы оптической обработки позволили обеспечить требуемую точность доводки и избежать проблем с температурными градиентами. Следующим шагом в развитии процесса явилась автоматизация доводки с использованием комплекса программ для объективного и мгновенного интерферометрического контроля (Ган и др., 2006).

Подбор поляризаторов и иммерсии (4, 5.)

У пленочных поляризаторов низкое пропускание в синей области спектра. Для повышения прозрачности ИПФ на линии ВаII 4554 Å, Н_β применялись двулучепреломляющие призмы кальцит-стекло, пропускающие не отклоненными Е-лучи. Отклоненные и отраженные от боковой поверхности стопы обыкновенные лучи задерживаются системой диафрагм и отсекаются апертурной диафрагмой в плоскости изображения входного зрачка.

Прозрачность ИПФ уменьшается при отражении от большого числа оптических поверхностей, даже в иммерсии. Нам удалось найти иммерсию с показателем преломления 1.587, близким к среднему показателю кристаллов для *o*- и *e*-лучей.

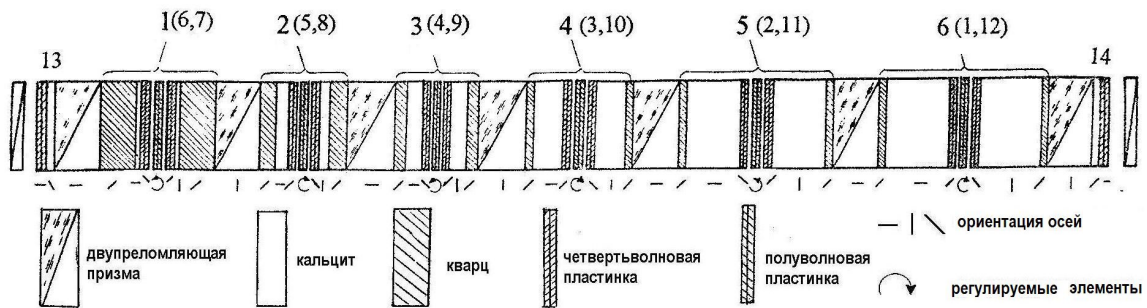


Рис. 3. Схема фильтра на линии ВаII 4554 Å, Н_β

Оптическая схема.

Одним из способов повышения пропускания фильтра является уменьшение числа поляризаторов с использованием расщепленной ступени Эванса (Эванс, 1940). Вариант такой ступени с регулируемым широкоугольным средним элементом был применен в ИПФ на линии ВаII 4554 Å, Н_β (рис. 3). При скрещенных поляризаторах эта схема уменьшает астигматизм (п. 6), вносимый двупреломляющими призмами. ИПФ состоит из 12 поляризационных ступеней со световым диаметром 40 мм, объединенных в шесть расщепленных элементов, и двух корректирующих ступеней. Ширина полосы фильтра определяется толщиной самой толстой кальцитово-й ступени 60 мм. Все последующие кальцитовые ступени, начиная со ступени 32 мм, имеют оптическую толщину, уменьшающуюся вдвое. В кальцитовых ступенях предусмотрена фазовая регулировка положения полос пропускания. Смещение полос пропускания осуществляется вращением полуволновых пластинок между неподвижными четвертьволновыми, а выбор полосы — заменой интерференционного фильтра. Полуширина полосы пропускания на линию бария 0.08 Å и на линию водорода 0.09 Å.

Фильтр был установлен в 1974 г. на Большом внезатменном коронографе Саянской обсерватории. Был выполнен ряд наблюдений и исследований тонкой структуры и волновых процессов в атмосфере Солнца. В 2000 г. по предложению д-ра Руттена были проведены наблюдения на Шведском солнечном вакуумном телескопе, и результаты оказались исключительно высокого качества. Узкая полоса фильтра и высокий контраст в сочетании со спекл-обработкой позволи-

ли получить карты скоростей вещества с очень высоким пространственным разрешением (рис. 4).

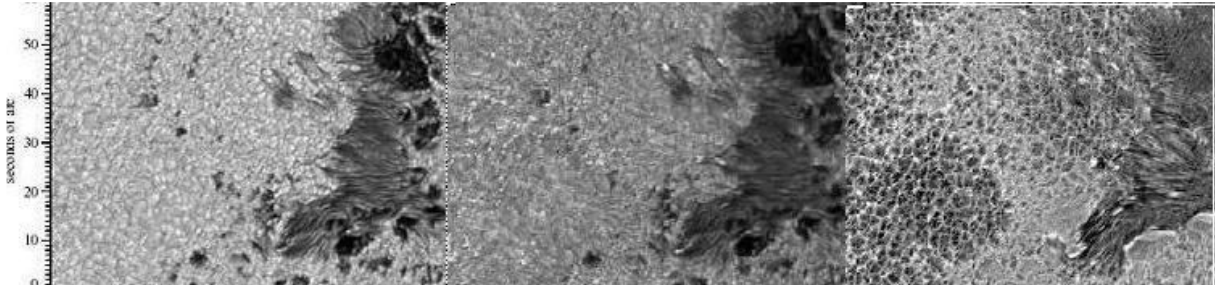


Рис. 4. Снимки в синем, красном крыле линии BaII 4554 Å и доплерограмма. Каждое изображение – это результат совмещения порядка 100 кадров, полученных с выдержкой 0.2 сек.

4 ИПФ на линии He I 10830 Å, H_α

Одновременное получение изображений в двух или нескольких длинах волн всегда представляет интерес с точки зрения изучения структуры и динамики солнечных образований на разных уровнях солнечной атмосферы (п. 7), и с этой целью разрабатываются двухполосные и многоканальные ИПФ. До 90-х годов не было достаточно успешных попыток изготовить ИПФ на линию He I 10830 Å, представляющую собой мощное диагностическое средство для изучения физических условий в солнечной атмосфере и очень интересную для сопоставления с другими линиями. Разработанный и изготовленный в ИСЗФ ИПФ на линии He I 10830 Å и H_α должен был “заполнить эту нишу”.

В отличие от ИПФ на линии BaII 4554 Å, H_β, все двупреломляющие элементы изготовлены из одного материала – оптического кальцита, что позволяет смещать полосу пропускания изменением температуры фильтра (рис. 5) Толщины элементов в ступенях были подобраны с учетом требований максимального контраста и максимально точного одновременного попадания полос пропускания канавчатого спектра на линии He I 10830 Å и H_α. Наблюдения в обеих линиях проводятся одновременно. Полосы пропускания разделяются дихроическим кубиком.

Фазовые кварцевые пластинки $\lambda/2$ и $\lambda/4$ должны работать в двух длинах волн. Но, например, полуволновая кварцевая пластинка нулевого порядка в He I 10830 Å в H_α имеет порядок 0.85. Поэтому мы выбрали кварцевые пластинки высокого порядка интерференции, кратные $\lambda/2$ и $\lambda/4$ в обеих длинах волн: в He I 10830 Å полуволновая пластинка имеет порядок 8.5, а в H_α – 14.4993, а четвертьволновая – 4.25 и 7.249 соответственно. Для выяснения вопроса о том, насколько использование пластинок высокого порядка повышает пропускание во вторичных максимумах, где кратность $\lambda/2$ и $\lambda/4$ нарушается из-за дисперсии двупреломления, были рассчитаны профили пропускания для случая пластинок нулевого порядка и для пластинок высокого порядка. Проведенный расчет показал, что при использовании пластинок высокого порядка пропускание в побочных максимумах увеличивается на 0.3–0.4 % по сравнению со случаем использования пластинок нулевого порядка. Незначительное увеличение пропускания во вторичных максимумах – это цена, которую стоит заплатить за возможность избежать применения сложных суперхроматических пластинок.

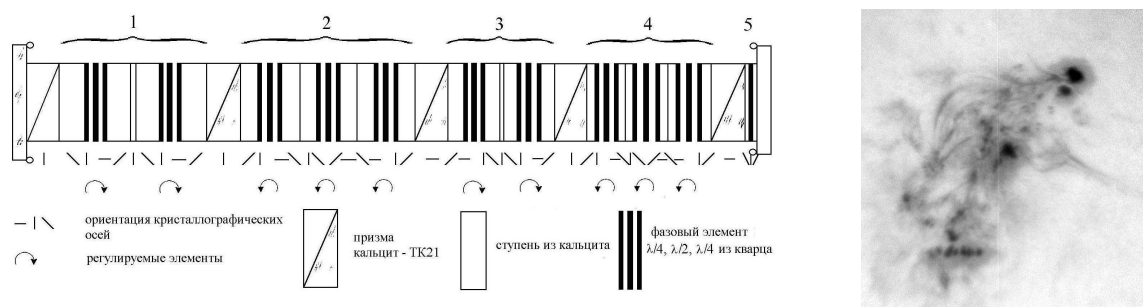


Рис. 5. Оптическая схема ИПФ на линии He I 10830Å и H_α, справа – фильтрограмма в ядре линии He I 10830Å: активная область № 10656, 13 августа 2004 г.

ИПФ и ИФ следует устанавливать в телецентрическом пучке для выравнивания спектрального состава всех точек изображения и уменьшения влияния полос равного наклона ИФ и коноскопической картины ИПФ. Первые наблюдения с фильтром на Большом внеатмосферном коронографе Саянской обсерватории показали наличие несимметричной неравномерности по полю зрения фильтра. Существенное влияние на однородность поля зрения ИПФ оказывают малая апертура и наклонная установка интерференционного фильтра (необходимая для согласования полосы пропускания с ИПФ) в оптической схеме. Замена наклоненных ИФ на фильтры, нормально установленные к пучку, позволила значительно уменьшить неоднородности по полю зрения. Другие причины появления неоднородностей связаны с интерференционными картинами различного происхождения (интерференция в стеклах, коноскопическая картина в кристаллах). Их влияние можно устранить исправлением за плоское поле.

5 И все-таки ИПФ – уникальные инструменты!

К монохроматическим фильтрам, работающим в строящих изображение магнитографах, предъявляются особенно строгие требования по спектральному разрешению, контрасту, оптической однородности – иначе не удастся обеспечить требуемую точность измерения магнитных полей. Действительно, недостаточное пропускание, недостаточно высокое спектральное разрешение, медленное сканирование по спектру с необходимостью механического вращения оптических деталей ограничивают применение ИПФ Лио в фильтровых магнитографах.

А.Б. Северный предвидел тенденцию развития фильтров для многоволновой двумерной спектроскопии протяженных объектов. “Весьма характерным ... является поставленный нами недавно опыт скрещения нашего фильтра с эталоном Фабри: фон около искусственной “луны” при таком скрещении становится почти черным, т. е. рассеянный свет сводится до ничтожной величины.

Во многих разработках современных магнитографов ИПФ соединяются с эталоном Фабри-Перо (таблица 1).

В настоящее время в ИСЗФ ведется разработка и изготовление ИПФ на магниточувствительную линию Fe I 6173 Å, который должен работать в составе фильтрового магнитографа. Выбранная для фильтра схема в значительной степени свободна от недостатков, ограничивающих применение ИПФ Лио в фильтровых магнитографах.

Фильтр на линию Fe I 6173 Å состоит из следующих основных блоков: фильтра Лио предварительной монохроматизации, фильтра Шольца, формирующего полосу с двумя максимумами, модулятора – регулируемого фильтра Лио, который при совместном действии с фильтром Шольца сужает полосу до 0.07 Å и позволяет выполнять электрооптическим модулятором сканирование полосы пропускания из красного в синее крыло линии.

Таблица 1.

| Инструмент | Диапазон, Å | ИФ | ИПФ | Ф-П |
|--|---------------------------|-----------|-------------|---|
| IRIM-VIM BIG BEAR, США | ИК 6301, 6302.5 | 42Å 3Å | 2.5 Å | 0.1 Å сканирование 12 Å |
| TESOS, VTT DEL TEIDE, TENERIFE, Германия | 4500–7500 | | | Ф-П+Ф-П+Ф-П 0.02Å |
| IPM IBIS, THEMIS, Франция–Италия | 5800–8600 | ИФ | UBF | Ф-П Ф-П+Ф-П, Полоса 0.02–0.03Å |
| MDI SOHO, консорциум | 6767.8 | | ИПФ | 2 ступени Майкельсона Полоса 94 mÅ, шаг 8 mÅ, скан 397 mÅ |
| IVM MEES Гавайи | | | | Полоса 0.07, сканирование 3.6 Å |
| NBFI SOT, SOLAR B, Япония | 6300 10 линий | ИФ | ИПФ 90mÅ | |
| NITFS ATST, США | C I 10683 – Fe I 15723 | ИФ | ИПФ 2–3Å | 0.1 Å, сканирование 1.0–1.7мкм |

Выбор способа увеличения углового поля был одной из ключевых проблем при разработке фильтра. Еще в 1965 г. Беккерс и Данн теоретически рассматривали возможные пути решения этой проблемы и пришли к выводу, что наиболее эффективным, по-видимому, будет “тяжелый труд по изготовлению каждого элемента фильтра Шольца широкоугольным, как это делается в фильтрах Лио” (Беккерс, Данн, 1965). Мы решились взвалить на себя этот тяжелый труд, и в результате впервые был изготовлен фильтр Шольца с увеличенным полем зрения, где каждый элемент собирается по схеме Лио второго типа из кристаллов противоположного знака (шпат + парателлури́т). Такая схема дает возможность при минимальном увеличении числа пластинок получить максимальный выигрыш в угловом поле – в пропускании и разрешающей способности. ИПФ не сдаются!

Литература

- Александрович С.В. и др. // Новая техника в астрономии. 1975. Т. 5. С. 34.
 Беккерс (Beckers J.M, Dunn R.B.) // Air Force Camb. Res. Lab. Instr. Papers. 1965. V. 75. P. 1.
 Брей (Bray R.S., Winter J.G.) // Solar Phys. 1970. V. 15. P. 309.
 Вуд (Wood R.W.) // Physik Zetschrift. 1914. V. 15. P. 313.
 Ган М.А. и др. // Солнечно-земная физика. Т. 9. С. 110.
 Жиованелли (Giovanelli R.G., Jefferies J.T.) // Austr. J. Physics. 1945. V. 7. P. 254.
 Лио (Lyot B.) // Comptes Rendus Acad. Sci. 1933. V. 197. P. 1593.
 Оман (Ohman Y.) // Nature. 1938. V. 141. P. 157.
 Петтит (Petit E.) // Publ. Astron. Soc. Pacific. 1941. V. 53. P. 17.
 Северный А.Б., Гильварг А.Б. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1949. Т. 4. С. 3.
 Шустов А.В. // ОМП. 1967. Т. 3. С. 44.
 Эванс (Evans J.W.) // Publ. Astron. Soc. Pacific. 1940. V. 52. P. 309.