

3. *Covington A.E.* Series of unusual microwave absorption, April 30, May 1, 2 and 3, 1974 // *Solar-Geophys. Data.* 1974, V.358. Part.I. P.20-22
4. *Sawyer C.* The solar microwave «negative burst» associated with the dark fan of 21 May 1967 // *R.A.S.C.Jour.* 1976, V.70. No.3. P.127–134
5. *Sawyer C.* Are «negative burst» due to absorption? // *Solar Phys.* 1977, V.51, P.203–215

Г.И.Кушталъ, В.И.Скоморовский*, Г.Н.Домышев*,
В.П.Садохин*, И.А.Опсиков**

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННО-ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ ФИЛЬТР (ИПФ) ТИПА ШОЛЬЦА С УВЕЛИЧЕННЫМ УГЛОВЫМ ПОЛЕМ ЗРЕНИЯ

ВВЕДЕНИЕ

В ИСЗФ накоплен опыт разработки и эксплуатации ИПФ типа Лио [10] с экстремальными характеристиками. Изготовлен сверхузкополосный фильтр на две линии – Ва II 4554Å, Нβ [1] – с полушириной полос 0,08, 0,09Å. Наблюдения [5] с этим фильтром проводились на Большом внезатменном коронографе (БВК) Саянской солнечной обсерватории, затем – на Шведском вакуумном телескопе на Ла Палме, где были получены прекрасные фильтрограммы активных областей [13]. Сейчас фильтр подготавливается к установке на Голландском открытом телескопе. Также разработан и изготовлен ИПФ на линии He I 10830Å и Hα с полосами пропускания 0,46 Å и 0,3 Å [8]. Фильтр установлен на БВК для получения фильтрограмм одновременно со спектральными наблюдениями. ИПФ типа Лио – прекрасные инструменты для достижения высокого пространственного и спектрального разрешения. Для получения узкой полосы пропускания высокого контраста используется большое количество кристаллических элементов разного качества, но несмотря на это, фильтры практически не искажают волновой фронт [8, 9]. Однако с узкополосными ИПФ возникает проблема светового «голода». Увеличение экспозиции приводит к ухудшению качества изображения. Поэтому, с одной стороны, необходимо использовать более чувствительные приемники, а с другой – принимать меры по увеличению количества проходящего через фильтр света: увеличивать угловое

* Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск 664033, а/я 291

поле и уменьшать число поглощающих оптических элементов. ИПФ представляет собой цилиндр с набором кристаллических элементов большой длины и с малым световым диаметром. Это ограничивает возможность использования световых пучков, падающих под большими углами. Целесообразно разделить оптическую стопу фильтра на несколько частей, каждая из которых сделана широкоугольной, и уменьшить число поляризаторов.

Фильтр, который изготавливается для измерений магнитных полей на Солнце в линии FeI 6173 Å [4], состоит из трех блоков, совместно формирующих узкую полосу, регулируемую в пределах контура линии:

- нерегулируемый фильтр Лио с шириной полосы $\sim 2 \text{ \AA}$ с предварительным отрезающим интерференционным фильтром;
- нерегулируемый фильтр Шольца, который дает серию полос пропускания шириной $0,2 \text{ \AA}$, на расстоянии 2 \AA друг от друга;
- регулируемый двухкаскадный фильтр Лио вместе с фильтром Шольца сужает полосу до $0,06 \text{ \AA}$ и позволяет ее сканировать из красного в синее крыло спектральной линии.

Для уменьшения потерь света желательно, чтобы пропускание фильтра при установке полосы в крыло линии не падало по сравнению с установкой в центр линии. Решением проблемы может быть формирование контура пропускания нерегулируемой промежуточной части фильтра не обычной треугольной формы, а с двумя максимумами, разнесенными на величину сканирования полосы. Однокаскадная схема Шольца с уменьшенным числом поляризаторов позволяет сформировать такой контур, поэтому она была выбрана для второго блока фильтра.

СХЕМЫ ФИЛЬТРОВ ШОЛЬЦА

Главным преимуществом схем Шольца [12] является высокое пропускание из-за отсутствия внутренних поляризаторов. Известны две основные схемы: фильтры «веерного» и «створчатого» типа. В фильтре веерного типа N кристаллических пластинок одинаковой толщины располагаются между параллельными поляризаторами (рис. 1), угол ориентации оптической оси j -й пластинки составляет

$(2j-1)\rho$, где $\rho = \pi/4N$. В фильтре свернутого типа пластинки располагаются между скрещенными поляризаторами; углы пластинок меняются как $(-1)^{j-1}\rho$. Расстояние между главными максимумами пропускания определяется толщиной отдельной пластинки, ширина максимума зависит от числа (общей толщины) пластинок. Недостатком классической конфигурации Шольца является высокий уровень вторичных максимумов. Однако, если ориентировать оптические оси пластинок, например, по функции гауссиана, треугольника [6, 7], можно за счет небольшого расширения полосы существенно снизить уровень вторичных максимумов (аподизированные фильтры Шольца). Кроме того, при дополнительной модуляции значений углов ориентации оптической оси n -ой пластинки функцией $\cos 2n\pi t s$ можно получить полосу с двумя максимумами, расстояние между которыми определяется частотой модуляции s .

Очевидные преимущества фильтра Шольца могут быть реализованы в полной мере с увеличением его поля зрения. Недостаточное угловое поле до настоящего времени было одной из главных причин, ограничивающих применение этого фильтра.

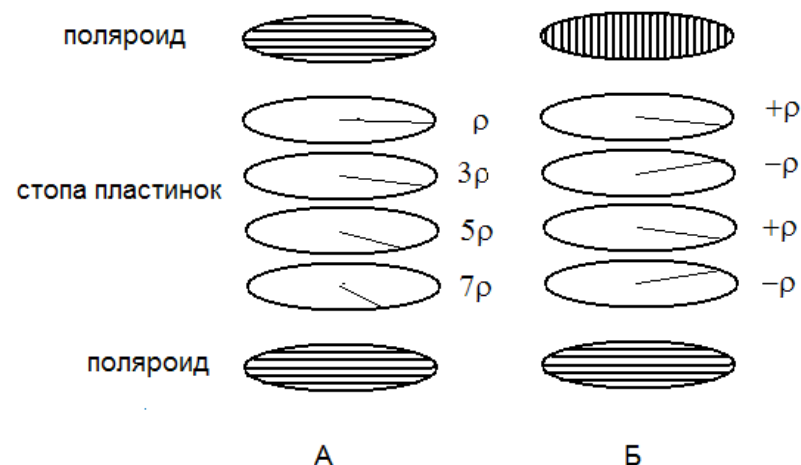


Рис. 1. Фильтр Шольца: А – веерного, Б – створчатого типа

Варианты увеличения углового поля фильтра Шольца теоретически рассматривались в работе [6]. Оптическая стопа фильтра Шольца свернутого типа разделяется на две половины, которые поворачиваются друг относительно друга на 90° , между ними вставляется ротатор из двух полуволновых пластинок, вращающий плоскость поляризации на 90° . (рис. 2, слева).

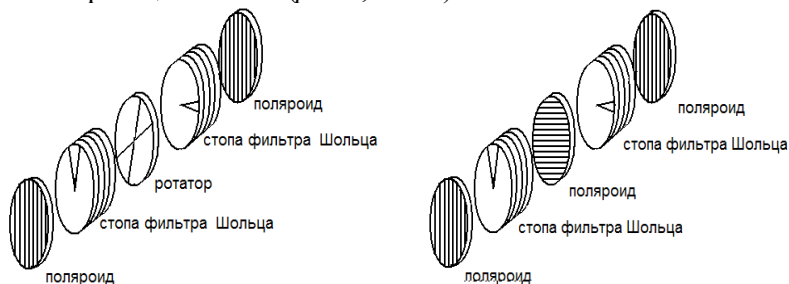


Рис. 2. Фильтры Шольца с увеличенным угловым полем

Угловое поле почти круговое, сдвиг полосы для наклонных пучков на порядок меньше по сравнению с неширокоугольным фильтром, но при этом происходит искажение значительное формы полосы (рис. 3, взят из работы [6]).

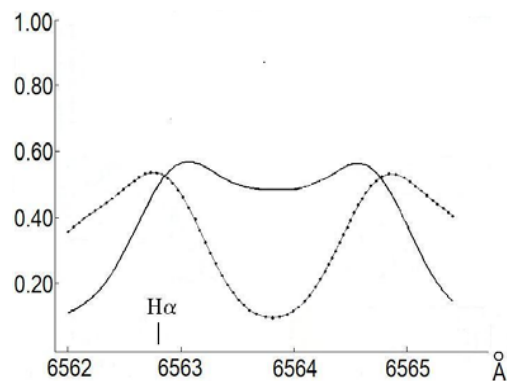


Рис. 3. Профиль полосы пропускания при угле падения 2° для створчатого фильтра (сплошная кривая) и для широкоугольного фильтра (кривая с точками) Нам неизвестно, чтобы такой фильтр был изготовлен на практике

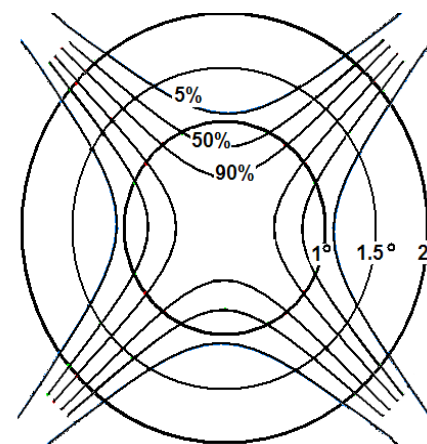


Рис. 4. Относительное пропускание фильтра (в процентах) для любых азимутов и углов падения в пределах до 2°

Широкоугольная схема с двумя фильтрами свернутого типа, развернутыми на 90° , разрабатывалась и в ИСЗФ. Она похожа на схему [6], но вместо ротатора ставится поляризатор (рис. 2, справа). Расчеты показали, что угловое поле фильтра в этом случае не является круговым (рис. 4). Направления одинакового пропускания представляют собой гиперболы. Угловое поле максимально в азимутах $\pm 45^\circ$ относительно среднего положения кристаллографических осей пластинок в фильтре свернутого типа (на рис. 4 это направление совпадает с асимптотами гипербол). Поле минимально в направлении осей пластинок (азимут 0° и 90°), и уже при угле падения 1° пропускание составляет порядка 10%. Так происходит потому, что при наклонном падении полоса пропускания одного фильтра смещается в синюю сторону, а другого – в красную. Для этих азимутов положение максимума общей полосы пропускания двух фильтров с увеличением угла падения не смещается, форма полосы изменяется незначительно, но интенсивность пропущенного света уменьшается. В азимутах $\pm 45^\circ$ для угла падения 2° полоса пропускания смещается не более $0,02 \text{ \AA}$. Несимметричное поле зрения ограничивает применение фильтра в телескопах, если фильтр уста-

навливается в «параллельном» пучке лучей [3]. В этом случае протяженное изображение будет неоднородным по яркости. Яркость выравнивается, если установить фильтр в телецентрическом пучке.

К сожалению, этот двухкаскадный фильтр также не был изготовлен и проверен на практике из-за поломки кристаллов исландского шпата (оптического кальцита) во время их обработки.

Профиль полосы пропускания фильтра Шольца будет меньше изменяться с увеличением угла падения, если каждую пластинку фильтра Шольца сделать широкоугольной, как это предложил Лио для своих фильтров: отдельная пластинка составляется из двух так, что изменение двупреломления в составных частях при наклонном падении компенсируют друг друга [10]. В элементе Лио 1-го типа кристаллическая пластинка, например из кальцита, разрезается на две части одинаковой толщины, которые разворачиваются перпендикулярно своими оптическими осями, и между ними вставляется полуволновая пластинка. Угловое поле элемента – круговое. В элементе 2-го типа простая кристаллическая пластинка заменяется парой пластинок из положительного и отрицательного кристаллов. Для пластинок из парателлурита ($n_e - n_o = 0,15737$ для $\lambda 6173 \text{ \AA}$) и исландского шпата ($n_o - n_e = 0,17711$) при соотношении толщин 2,28 поле получается также круговым [11].

ВЫБОР СХЕМЫ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ ФИЛЬТРА И ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Для широкоугольного фильтра Шольца на линию $\lambda 6173 \text{ \AA}$ была выбрана схема с элементом Лио 2-го типа по следующим причинам.

1. Угловое поле элемента 2 типа из кристаллов кальцита и парателлурита в 3,3 раза больше, чем у элемента 1-го типа из одного кальцита с таким же суммарным порядком интерференции. Это видно из рис. 5, а, б, где приведены расчетные смещения полосы 24-х элементного фильтра Шольца с пластинками 1-го и 2-го типа при углах падения $0,5^\circ$, 1° , 2° и 3° .

2. Полоса пропускания фильтра с полушириной $0,2 \text{ \AA}$ на линию 6173 \AA формируется 24 пластинками с порядком интерференции 2528,5, и если их сделать широкоугольными по 2-му типу, для

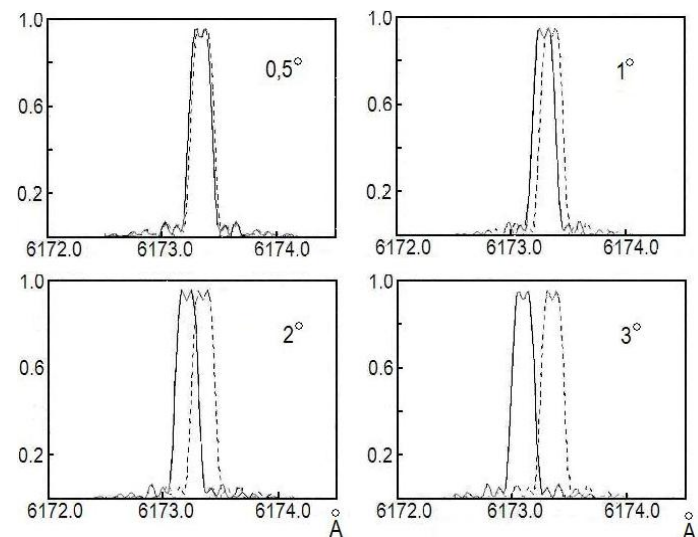


Рис. 5а. Смещение полосы фильтра с 24 элементами Лио1-го типа. Порядок интерференции элемента 2528,5

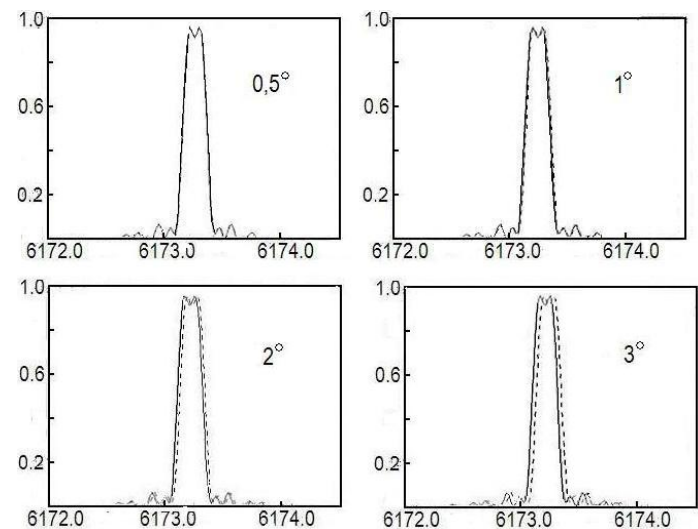


Рис. 5,б. Смещение полосы фильтра с 24 элементами Лио 2-го типа. Порядок интерференции элемента 2528,5

фильтра требуется всего 48 пластинок. При использовании элементов 1-го типа потребуется, как минимум, 72 пластинки (с одиночной $\lambda/2$) или 96 пластинок (с $\lambda/2$, сделанной на вычитание из двух). Кроме того, полуволновые пластинки без ахроматизации работают только в очень узком диапазоне длин волн. Чтобы ахроматизировать пластинки, их нужно делать многоэлементными, что крайне «перегрузит» оптическую стопу. А элементы 2-го типа работают в более широкой области спектра.

3. При выборе схемы широкоугольных элементов необходимо принимать во внимание наличие заготовок природных кристаллов, в частности, кристаллов оптического кальцита. Для фильтра с пластинками 1-го типа необходимо 238мм(!) кальцита, а с пластинками 2-го типа – 72 мм кальцита и 164 мм искусственного кристалла парателлурида.

В соответствии с выбранной схемой был изготовлен фильтр Шольца (рис. 6) с увеличенным угловым полем. Оптическая стопа фильтра содержит 24 пары пластинок, составленные из положительного кристалла парателлурида толщиной 6,8186 мм и отрицательного кристалла исландского шпата толщиной 3,0085 мм. Все кристаллические пластинки находятся в иммерсии ($n_d=1,587$). Световой диаметр оптической стопы - 42 мм. Углы ориентации приведены в таблице.

Таблица

№ пластинок	Азимут оптической оси	№ пластинок	Азимут оптической оси	№ пластинок	Азимут оптической оси	№ пластинок	Азимут оптической оси
1	-1,8101	7	0,0819	13	5,8997	19	1,5371
2	1,8660	8	-1,2425	14	-5,8973	20	-0,5691
3	-1,8682	9	2,4804	15	2,4888	21	-0,1429
4	1,6818	10	-3,6525	16	-4,8242	22	0,6626
5	-1,3854	11	4,7212	17	3,8761	23	-1,0064
6	0,8178	12	-5,4906	18	-2,7619	24	1,2429

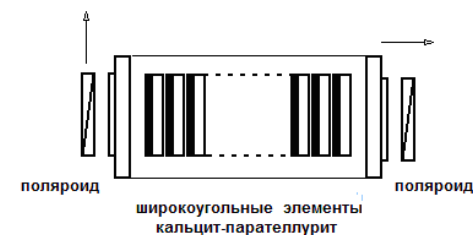


Рис. 6. Конструкция и оптическая схема широкоугольного фильтра Шольца

После сборки и настройки оптическая стопа была испытана на спектрографе с ПЗС-линейкой. Профили полос пропускания (в относительных единицах) и их смещение для внеосевого падения показаны на рис. 7. В области линии 6173 Å фильтр формирует полосы пропускания полушириной 0,2 Å, отстоящие по длине волны через 2 Å. Смещение полос при угле падения 3° не более, чем 0,05 от полуширины полосы. Это соответствует расчетному смещению (рис. 5, б).

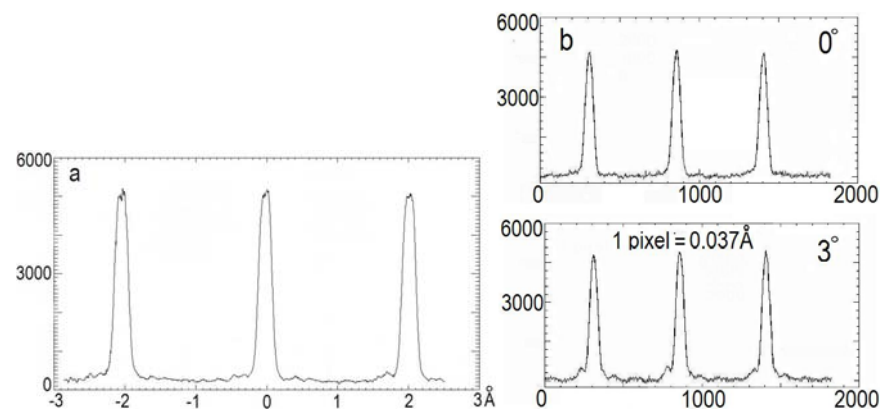


Рис. 7. Полосы пропускания широкоугольного фильтра Шольца (а) и их смещение для углов падения 0° и 3° (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Фильтры Шольца обладают рядом несомненных преимуществ перед фильтрами Лио. Это объясняет нашу первую попытку, как отмечено в [6], «выполнить тяжелый труд изготовления каждого отдельного элемента Шольца широкоугольным, как это обычно делается в фильтрах Лио». Дело усложняется тем что, допуски на ориентацию кристаллографических осей пластинок при их обработке и сборке намного меньше для пластинок фильтра Шольца, чем фильтра Лио. Например, точность ориентации оси относительно поверхности пластинок и азимута разворота пластинок (таблица) должна быть в пределах 1'. По-видимому, несоблюдение заданных допусков в изготовленном фильтре привело к тому, что форма экспериментальной кривой не полностью совпала с расчетной (недостаточно проработана «вилка» на *рис. 5,а*. Для строгого соблюдения допусков при изготовлении фильтров Шольца в ИСЗФ совершенствуются методы обработки и контроля [2].

Кристаллы исландский шпат (отрицательный) и парателлуриит (положительный) имеют близкие значения показателя двойного преломления. Это дает значительный выигрыш в угловом поле фильтра. Но парателлуриит имеет очень высокий показатель преломления $n_e=2,45$. Необходимо наносить просветляющие пленки на большое количество поверхностей, даже находящихся в иммерсии, что увеличивает рассеянный свет. В спектре пропускания фильтра имеется непрерывный фон, вызванный также рассеянием света в кристаллах и иммерсии.

Появление новых высококачественных синтетических двупреломляющих кристаллов может расширить возможности фильтров Шольца.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. 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 // Солнечно-земная физика .2006. Вып.9, в печати.

3. Клевцов Ю.А. Особенности работы интерференционно-поляризационного фильтра в оптической схеме телескопа // Исслед. по геомагнетизму, аэронамии и физике Солнца. 1984. Вып. 69. С.183-189.

4. Кушталь Г.И., Скоморовский В.И. Интерференционно-поляризационный фильтр «Магнит» для измерения солнечных магнитных полей. I. Блок-схема // Исслед. по геомагнетизму, аэронамии и физике Солнца. 1998. Вып.108. С.259-268.

5. Скоморовский В.И., Меркуленко В.Е., Поляков В.И. Предварительные результаты исследования хромосферы с помощью ИПФ в линиях Ba 4554 H β // Солнечные данные.1976. №5. С.73-79.

6. Beckers J.M., Dunn R. B. A ray-tracing program for birefringent filters //Air Force Cambridge Research Laboratories, Instrumentation Papers. 1965. No 75. P.1-42.

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

8. Kushtal G.I., Skomorovsky V.I. The two passband tunable birefringent filter for HeI 10830A and H α lines //Optical journal. 2000.V. 67, N 6, P.99-107.

9. Kushtal G.I., Skomorovsky V.I. Advance of the geometrical measurements of birefringent filter's crystal plates and two dimensional measurements of Doppler velocity in solar atmosphere //Proceedings of SPIE. 2002. V.4900. P.504-512.

10. L \acute{y} ot, B. Le filtre monochromatique polarisant et ses applications en physique solaire// Ann. d'Astrophysique. 1944. V. 7. P.31-79.

11. Skomorovsky V.I Advance of design and technology of birefringent filters //Proceedings of SPIE. 1994. V 2265. P. 413-421.

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

13. Sutterlin P., Rutten R.J. and. Skomorovsky V.I. Ba II 4554 \AA speckle imaging as solar Doppler diagnostic//Astronomy & Astrophysics. 2001. V. 378. P. 251-256.