

## УЗКОПОЛОСНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННО-ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ ФИЛЬТР ДЛЯ ГЕЛИОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

*Н. М. Дричко, С. Б. Иоффе и Э. И. Могилевский*

Описывается электрически управляемый интерференционно-поляризационный фильтр с полосой шириной  $0.12 \text{ \AA}$ , непрерывно смещаемой в пределах  $\pm 0.15 \text{ \AA}$  и настраиваемой на заданную длину волны вне этого интервала. Управление осуществляется посредством фазоизменяющих устройств, использующих продольный эффект Поккельса в кристаллах KDP. Благодаря термооптической компенсации ступеней управляемый блок работает без термостатирования.

Для измерения по эффекту Зеемана магнитных полей на Солнце или в экспериментах по лабораторной замагниченной плазме используются спектрографы с предельно высоким разрешением [1]. Необходимость исследования структуры и динамики сложных магнитных конфигураций требует получения пространственной картины поля. Фотографии объекта в излучении участка контуров спектральных линий («Z-снимки»), позволяющие построить такую картину, могут быть получены с помощью спектрогелиографа [2]. Однако для сканирования даже малой части Солнца требуется не менее  $5\div 7$  мин., что значительно превышает длительность часто наблюдаемых изменений магнитного поля, например во вспышке. Кроме того, из-за свойств спектрогелиографа фотометрические ошибки определение величины магнитных полей по «Z-снимкам» практически невозможно.

Интерференционно-поляризационный фильтр (ИПФ) в отличие от спектрогелиографа удовлетворяет требованиям высокого пространственного разрешения ( $\sim 1''$ ) и может позволить изучать быстрые (менее  $0.5$  мин.) изменения поля во всей активной области. Если для получения «Z-снимков» использовать фотосферные линии, имеющие ширину около  $0.1 \text{ \AA}$ , полоса ИПФ должна быть менее  $0.03 \text{ \AA}$ . При работе с широкими хромосферными линиями ширина полосы ИПФ может быть увеличена до  $0.1\div 0.2 \text{ \AA}$ .

Фотометрические измерения магнитного поля состоят в сравнении интенсивности излучения зеемановских  $\sigma$ -компонент в крыльях спектральной линии. Разность их интенсивностей в данной точке диска пропорциональна величине измеряемого поля. Для получения фильтрограмм в излучении  $\sigma$ -компонент их круговая поляризация преобразуется в линейную с помощью поворотной четвертьволновой пластинки, расположенной перед ИПФ. Измерения следует произвести последовательно в обоих крыльях линии, чтобы увеличить чувствительность и исключить эффект приборной поляризации. Следовательно, для рассматриваемой задачи полоса пропускания ИПФ должна быстро переводиться из одного крыла линии в другое. При этом наряду с «Z-снимками» могут быть получены фильтрограммы (при выведенной пластинке  $\lambda/4$ ), позволяющие определить доплеровские лучевые скорости во всей рассматриваемой области.

Первые опыты с применением ИПФ для исследований магнитных полей на Солнце проводились с фильтрами, имеющими механически смещаемую полосу шириной  $0.15\div 0.25 \text{ \AA}$  [3-5].

УЗКОПОЛОСНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫЙ  
ИНТЕРФЕРЕНЦИОННО-ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ ФИЛЬТР  
ДЛЯ ГЕЛИОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Н. М. Дричко, С. Б. Иоффе и Э. И. Могилевский

Описывается электрически управляемый интерференционно-поляризационный фильтр с полосой шириной  $0.12 \text{ \AA}$ , непрерывно смещаемой в пределах  $\pm 0.15 \text{ \AA}$  и настраиваемой на заданную длину волны вне этого интервала. Управление осуществляется посредством фазоизменяющих устройств, использующих продольный эффект Поггелса в кристаллах KDP. Благодаря термооптической компенсации ступеней управляемый блок работает без термостатирования.

Для измерения по эффекту Зеемана магнитных полей на Солнце или в экспериментах по лабораторной замагниченной плазме используются спектрографы с предельно высоким разрешением [1]. Необходимость исследования структуры и динамики сложных магнитных конфигураций требует получения пространственной картины поля. Фотографии объекта в излучении участка контуров спектральных линий («Z-снимки»), позволяющие построить такую картину, могут быть получены с помощью спектрогелиографа [2]. Однако для сканирования даже малой части Солнца требуется не менее  $5\div 7$  мин., что значительно превышает длительность часто наблюдаемых изменений магнитного поля, например во вспышке. Кроме того, из-за свойственных спектрогелиографу фотометрических ошибок определение величины магнитных полей по «Z-снимкам» практически невозможно.

Интерференционно-поляризационный фильтр (ИПФ) в отличие от спектрогелиографа удовлетворяет требованиям высокого пространственного разрешения ( $\sim 1''$ ) и может позволить изучать быстрые (менее  $0.5$  мин.) изменения поля во всей активной области. Если для получения «Z-снимков» использовать фотосферные линии, имеющие ширину около  $0.1 \text{ \AA}$ , полоса ИПФ должна быть менее  $0.03 \text{ \AA}$ . При работе с широкими хромосферными линиями ширина полосы ИПФ может быть увеличена до  $0.1\div 0.2 \text{ \AA}$ .

Фотометрические измерения магнитного поля состоят в сравнении интенсивности излучения зеемановских  $\sigma$ -компонент в крыльях спектральной линии. Разность их интенсивностей в данной точке диска пропорциональна величине измеряемого поля. Для получения фильтрограмм в излучении  $\sigma$ -компонент их круговая поляризация преобразуется в линейную с помощью поворотной четвертьволновой пластинки, расположенной перед ИПФ. Измерения следует произвести последовательно в обоих крыльях линии, чтобы увеличить чувствительность и исключить эффект приборной поляризации. Следовательно, для рассматриваемой задачи полоса пропускания ИПФ должна быстро переводиться из одного крыла линии в другое. При этом наряду с «Z-снимками» могут быть получены фильтрограммы (при выведенной пластинке  $\lambda/4$ ), позволяющие определить доплеровские лучевые скорости во всей рассматриваемой области.

Первые опыты с применением ИПФ для исследований магнитных полей на Солнце проводились с фильтрами, имеющими механически смещаемую полосу шириной  $0.15\div 0.25 \text{ \AA}$  [3-5].

Ниже изложены результаты первого этапа работ по построению электрически управляемого ИПФ с шириной полосы  $0.12 \text{ \AA}$ , пригодного для проведения вышеуказанных исследований.

Среди известных способов управления положением полосы пропускания ИПФ способ электрического управления занимает особое место. Он обеспечивает скорости передвижения полосы, недоступные другим способам, позволяет автоматизировать измерения, осуществлять дистанционное управление полосой, освободиться от движущихся деталей. В работах [6, 7] предлагаются схемы электрически управляемых ИПФ. Наиболее узкополосная из описанных систем имеет ширину полосы около  $10 \text{ \AA}$ , т. е. на два порядка больше требуемой величины.

Принципиальная оптическая схема построенного ИПФ приведена на рис. 1. Фильтр выполнен в виде двух независимых блоков: управляемого (ИПФ-У) и блока предварительной монохроматизации (ИПФ-ПМ). ИПФ-У выделяет из проходящего потока спектральные полосы шири-

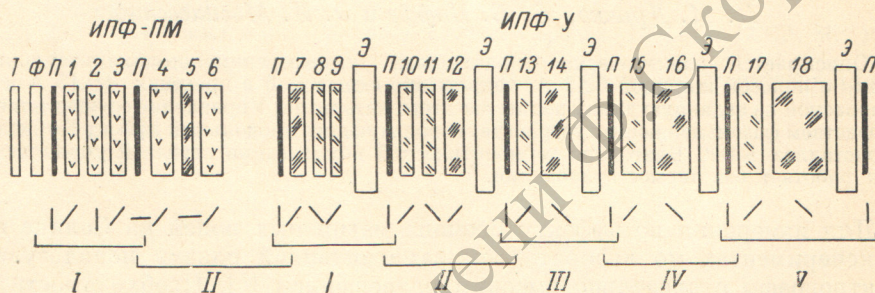


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема.

П — поляризаторы, Э — электрооптические фазоизменяющие устройства, Т — теплозащитный фильтр, Ф — интерференционный фильтр. Черточками показана взаимная ориентация главных сечений компонентов ИПФ.

ной  $0.12 \text{ \AA}$  в области линии  $H_{\beta}$ , отстоящие друг от друга на  $4 \text{ \AA}$ . Изменение напряжения, подаваемого на фазоизменяющие устройства, позволяет смещать систему полос на период.

Фильтр предварительной монохроматизации имеет полосу пропускания шириной  $4 \text{ \AA}$ , центрированную на линию  $H_{\beta}$ . Соседние нерабочие полосы пропускания удалены на  $64 \text{ \AA}$  и срезаются интерференционным фильтром с шириной полосы  $14 \text{ \AA}$ . Выбор спектральной линии  $H_{\beta}$  для данной задачи определяется важностью исследований распределения магнитных полей в хромосфере, где как раз и зарождаются вспышки. Заменяя фильтры предварительной монохроматизации, можно осуществлять настройку ИПФ на заданные длины волн в широком спектральном интервале и проводить последовательные измерения в нескольких спектральных линиях, которые образуются на разных высотах солнечной атмосферы. Сообщения об узкополосных интерференционных фильтрах [8, 9] позволяют надеяться, что в будущем блок предварительной монохроматизации может быть заменен одним интерференционным фильтром.

Многочисленное точное установление полосы пропускания в заданное спектральное положение требует устранения неконтролируемых смещений полосы, вызываемых колебаниями температуры кристаллических пластин. При ширине полосы  $0.12 \text{ \AA}$  стабилизация температуры и ее измерение должны осуществляться с точностью до  $0.02^\circ \text{ C}$ , что представляет сложную техническую задачу. Отметим, что проводящаяся в течение ряда лет в Австралии постройка узкополосного ИПФ для магнитных измерений [5] пока не реализована, в частности, из-за трудности длительной температурной стабилизации ИПФ, который должен устанавливаться вблизи фокальной плоскости солнечного телескопа. Устранение этой трудности достигнуто в нашем случае использованием термооптической

компенсации ступеней ИПФ, предложенной одним из авторов [10]. Разность хода каждой термооптически компенсированной ступени создается пластинами из кальцита и АDR, имеющими разную зависимость двулучепреломления от длины волны. Пластины ориентированы так, что их волновые разности хода (ВРХ) вычитаются, отношение их толщин равно отношению термооптических коэффициентов [11]. В первых двух ступенях блока ИПФ-У компенсирующая пластина вследствие малой эффективной толщины выполнена в виде двух пластинок, ориентированных на вычитание. ВРХ ступеней в отсутствие напряжений на фазоизменяющих устройствах удовлетворяет условию  $N_i = 2^{i-1} N_1$ , где  $i$  — номер ступени, возрастающий с увеличением ВРХ. Введение термооптической компенсации во все управляемые ступени позволило отказаться от термостатирования блока ИПФ-У.

По данным работы [11], спектральная область действия термооптической компенсации при ширине полосы  $0.12 \text{ \AA}$  составляет около  $230 \text{ нм}$ . Это означает, что в указанном спектральном интервале можно производить настройку полосы ИПФ на заданные длины волн при работе без системы термостатирования. Для расширения области настройки до пределов видимого спектра необходимо термостатирование с точностью до  $\pm 1^\circ \text{ C}$ .

Управление положением полосы пропускания осуществляется посредством электрооптических фазоизменяющих устройств (ЭФУ), введенных во все пять ступеней блока ИПФ-У. Работа ЭФУ основана на использовании продольного эффекта Поккельса в кристаллах KDP. В качестве электродов применены прозрачные токопроводящие пленки двуокиси олова. Напряжение полуволнового смещения ЭФУ в области  $H_p$  составляет  $7.3 \text{ кв}$ .

Непрерывное смещение полосы пропускания производится изменением напряжений  $V$ , подаваемых на ЭФУ каждой ступени так, что  $V_i = 2V_{i-1}$ . При  $V_v = V_{\lambda/2}$ , где  $V_{\lambda/2}$  — напряжение полуволнового смещения, ВРХ пятой ступени меняется на  $0.5$  и, следовательно, полоса ИПФ смещается на величину, равную ее ширине. Спектральная область непрерывного смещения полосы ограничивается величиной напряжения, которое может быть подано на ЭФУ пятой ступени. В построенном ИПФ  $V_v \leq 9 \text{ кв}$ , что обеспечивает непрерывный сдвиг в области  $\pm 0.15 \text{ \AA}$  от исходного положения  $\lambda_0$ . Такая величина области сканирования обеспечивает достаточную чувствительность измерений и позволяет избежать помех, которые могут вносить блендирующие линии, особенно в синем крыле контура  $H_p$ .

Для настройки на заданную длину волны  $\lambda_k$  вне интервала  $\lambda_0 \pm 0.15 \text{ \AA}$  к каждому фазоизменяющему устройству нужно подвести напряжение, величина которого определяется соотношением

$$V_i = \frac{\xi - 2n\delta\lambda_i}{\delta\lambda_i} V_{\lambda/2}, \quad (1)$$

где  $\xi = \lambda_0 - \lambda_k$ ,  $\delta\lambda_i = 2^{i-1} \delta\lambda_v$  — ширина полосы пропускания  $i$ -той ступени,  $n$  — целое число, такое, что  $|\xi - 2n\delta\lambda_i| < \delta\lambda_i$ . Знак  $V_i$  совпадает со знаком величины  $\xi - 2n\delta\lambda_i$ . Из (1) следует, что необходимые для настройки значения  $V_i$  независимо от величины  $\xi$  не превосходят напряжения полуволнового смещения.

Блок питания фазоизменяющих устройств обеспечивает как одновременное изменение напряжений на ЭФУ при сохранении условия  $V_i = 2V_{i-1}$ , так и независимое изменение величины и знака напряжений на каждом ЭФУ, необходимое для настройки полосы.

Допустимая область спектрального смещения полосы пропускания всей системы ИПФ при данной ширине полосы ( $\rho$ ) фильтра предварительной монохроматизации определяется интенсивностью вторичных максимумов, возникающих при перемещении полосы. Пропускание блока ИПФ-ПМ вместе с интерференционным фильтром для длины волны  $\lambda$  определяется выражением

$$\tau = \eta F \prod_{i=1}^m \cos^2 \pi \left( N_i + \frac{\lambda_0 - \lambda}{2^{m+1-i} \rho} \right),$$

где  $\eta$  — коэффициент, учитывающий потери света при прохождении ИПФ-ПМ,  $F$  — пропускание интерференционного фильтра,  $N_i$  — ВРХ  $i$ -той ступени для длины волны  $\lambda_0$ ,  $m$  — число эквивалентных ступеней Лيو в блоке ИПФ-ПМ. Блок ИПФ-ПМ состоит из двух ступеней двойного действия, эквивалентных четырем ступеням Лيو, т. е.  $m=4$ .

Номер пластины	Толщина, мм	Материал	Номер пластины	Толщина, мм	Материал
1	3.541	} Кварц	10	1.984	} ADP
2	3.554		11	3.336	
3	3.541		12	5.958	Кальцит
4	7.094		13	2.684	ADP
5	1.397	Кальцит	14	11.903	Кальцит
6	7.094	Кварц	15	5.358	ADP
7	2.981	Кальцит	16	23.798	Кальцит
8	2.687	} ADP	17	10.706	ADP
9	2.022		18	47.580	Кальцит

Наиболее интенсивные вторичные максимумы возникают на длине волны  $\lambda_0 \pm \xi/2$ . Если разрешить увеличение их интенсивности до 10%, допустимая область передвижения полосы составит 1.2 Å.

В таблице приведены толщины кристаллических пластин фильтра. Световое отверстие ИПФ — 28 мм, угловое поле — 40'.

На рис. 2 показаны спектрограммы, полученные на спектрографе башенного телескопа АТБ-3 ИЗМИРАН АН СССР раздельно с блоками ИПФ-У и ИПФ-ПМ.

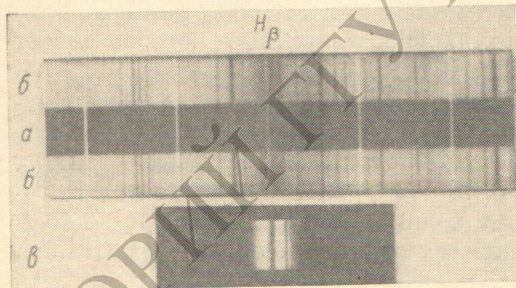


Рис. 2. Спектр Солнца после прохождения через ИПФ-У (а), спектр Солнца с наложенным на него спектром а (б), спектр Солнца после прохождения через ИПФ-ПМ (в). Обратная линейная дисперсия 0.8 Å/мм.

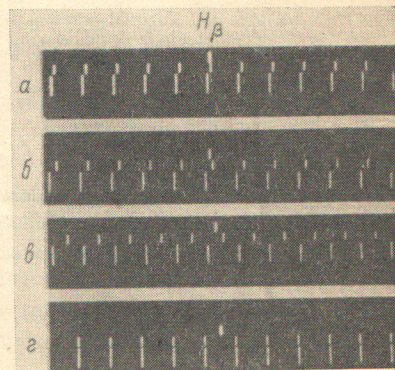


Рис. 3. Сдвиг полосы на  $\pm 0.25$  Å (а),  $\pm 0.5$  Å (б),  $\pm 1$  Å (в) и  $\pm 2$  Å (г). Обратная линейная дисперсия 2 Å/мм.

Из спектрограмм а и б видно, что рабочая полоса пропускания располагается внутри контура линии  $H_\beta$ . Значительно меньшая интенсивность рабочей полосы объясняется низкой остаточной интенсивностью в центре  $H_\beta$ . Измерения, проведенные на нескольких спектрограммах, полученных в разные дни, показали, что полоса пропускания отклоняется от фотометрического центра линии  $H_\beta$  не более чем на 0.04 Å. Ширина полосы составляет 0.12 Å. На расстоянии 0.4 Å от рабочей полосы и далее наблюдаются слабые вторичные максимумы. При получении спектрограмм блок ИПФ-У не термостатировался.

Возможность настройки ИПФ вне интервала  $\pm 0.15$  Å от центра иллюстрируется спектрограммами, приведенными на рис. 3.

Проведенные летом 1969 г. испытания показали, что по своим основным характеристикам фильтр соответствует поставленной задаче. Визуально и фотографически регистрировались в линии  $H_\beta$  протуберанцы, флоккулы

вокруг пятен и т. д. при диаметре изображения Солнца в 170 мм, который дает башенный телескоп в фокусе Ньютона. В дальнейшем предполагается повысить в ИПФ светопропускание и контрастность изображения.

Авторы благодарны Ш. А. Фурману за предоставленный интерференционный фильтр.

#### Литература

- [1] А. Б. Северный. Усп. физ. наук, 88, 3, 1966.
- [2] R. V. Leighton, R. Noyes, G. Simon. *Astrophys. J.*, 135, 474, 1962.
- [3] J. M. Beckers. *Solar Physics*, 3, 258, 1967.
- [4] *Sky and Telescope*, 37, 363, 1969.
- [5] R. Giovanelli. Proc. 11 General Ass. JAU 1961. Acad. Press. London, 204, 1962.
- [6] B. H. Billings. *J. Opt. Soc. Am.*, 37, 738, 1947.
- [7] F. K. von Willissen. *Appl. Optics*, 5, 97, 1966.
- [8] L. Jung. *Appl. Optics*, 6, 297, 1967.
- [9] Ш. А. Фурман. *Оптико-механич. промышл.*, № 9, 50, 1968.
- [10] С. Б. Иоффе. Авт. свид. № 158700. *Бюлл. изобр.* № 22, 1963.
- [11] Н. М. Дричко. *Оптико-механич. промышл.*, № 6, 9, 1969.

Поступило в Редакцию 21 августа 1970 г.