

ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ ОПТИКА

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННО-ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ФИЛЬТРЫ

Предлагаемый сайт посвящён проблеме разработки и изготовления интерференционно-поляризационных фильтров с заданными оптическими свойствами. В нём изложены принцип действия и методы расчёта различных типов интерференционно-поляризационных фильтров, способы контроля параметров, вопросы технологии изготовления и конструирования ИПФ различного назначения, описаны отечественные и зарубежные образцы.

Интерференционно-поляризационные фильтры (ИПФ) – спектральные приборы высокого пространственного разрешения. Исключительные возможности в отношении сужения полосы пропускания, повышения контраста, увеличения углового и линейного поля зрения и диапазона сканирования по спектру обусловили широкое применение ИПФ. Они успешно используются в оптическом приборостроении, квантовой электронике, спектроскопии, астрономии, геофизике и других областях.

Для эффективного решения на основе ИПФ актуальных задач, выдвигаемых наукой и техникой, научному сотруднику и инженеру необходимо иметь чёткое представление о возможностях современных ИПФ, а разработчик должен уметь создавать совершенные фильтры с заданными характеристиками.

Сайт базируется на теоретическом и экспериментальном материале автора, накопленном в течение многолетних исследований и разработок ИПФ различного назначения, а также на обобщении данных в области оптических интерференционно-поляризационных фильтров, опубликованных в отечественной и иностранной литературе за последние 30 лет.

ИПФ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СОЛНЦА

Информация о физических процессах на Солнце, получаемая из анализа солнечного излучения в оптическом диапазоне, является чрезвычайно ценной. Данные получают посредством применения большого количества различных приборов. Среди них весьма существенную роль стали играть так называемые фильтровые телескопы, в которых с помощью особых управляемых узкополосных фильтров осуществляется строгая спектральная селекция без заметного нарушения пространственной структуры потока. Благодаря этому появилась новая возможность получения изображения Солнца в лучах отдельной спектральной линии и даже в излучениях, относящихся к различным частям спектральной линии.

Фильтровой телескоп даёт изображение разнообразных солнечных объектов, невидимых в обычном телескопе. Из спектрально отличающихся изображений и их сопоставления получают данные, отображающие пространственное количественное распределение плотности, температуры, скоростей, напряжённости магнитного поля и данные, характеризующие физическое состояние различных солнечных образований. Фильтровой телескоп с помощью кинотелевизионной регистрации позволяет наблюдать быстро развивающиеся процессы в динамике. Он является в настоящее время одним из основных приборов, используемых для комплексного исследования и прогнозирования солнечной активности в интересах космонавтики, радиосвязи, метеорологии, гелиобиологии и т.д. Отсюда понятно большое внимание, уделяемое узкополосным фильтрам, которые применяются или могли бы иметь применение в сочетании с телескопами, коронографами и другими инструментами.

Дальнейшее совершенствование характеристик фильтров, таких, как сужение полосы пропускания, повышение контраста, увеличение углового поля зрения и диапазона сканирования по спектру, вызвано необходимостью углубления знаний об излучаемых

объектах. Наибольшее применение находят, и будут находить ИПФ, обеспечивающие высокий контраст изображения при относительно большом поле. Для решения современных задач гелиофизики требуются ИПФ с очень узкой полосой пропускания (0,01 нм и менее), ИПФ – универсальные, дающие возможность быстро перейти на заданную длину волны в широкой области спектра, и с узкой полосой пропускания, спектрально перестраиваемой в небольших пределах. Такие фильтры дают возможность исследовать морфологию солнечной атмосферы на различных высотах, получать карты лучевых скоростей и магнитных полей. Для наблюдения верхней хромосферы и короны сверхузкополосные ИПФ не требуются. Хромосферные наблюдения, например, обеспечиваются ИПФ с шириной полосы 0,05 и 0,025 нм.

Создание систем автоматизации научного эксперимента в астрофизике позволяет существенно повысить эффективность использования инструмента и наблюдательного времени, расширить функциональные возможности аппаратуры, сократить затраты и время на получение окончательных результатов. Все ИПФ, которыми оснащены обсерватории мира, находятся в повседневной работе. С их помощью разрешаются фундаментальные проблемы гелиофизики и ведутся непрерывные наблюдения в системе службы Солнца. Таким образом, несомненно, что необходимы фильтры как с экстремальными характеристиками для решения специальных задач, так и простые ИПФ для повседневных наблюдений.

ИПФ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ХРОМОСФЕРЫ СОЛНЦА

Изучение хромосферы даёт ценную информацию для понимания процессов солнечной активности и строения атмосферы Солнца. Изучение солнечной активности осуществляется через накопление как можно более полного однородного материала наблюдений обо всех изменениях, которые происходят в атмосфере Солнца. Вспышки – одно из наиболее сильных явлений солнечной активности. Энергия, выделяющаяся при вспышке, достигнув Земли, вызывает геомагнитные возмущения, изменения электронной плотности в ионосфере, влияющие на радиосвязь, полярные сияния и т.д. Они могут причинять вред космонавтам, находящимся в длительном полёте. Для изучения состояния солнечной активности и её прогнозирования на обсерваториях ведутся постоянные наблюдения, создана специальная Служба Солнца. Для получения наиболее полной информации наблюдения в ряде случаев ведутся одновременно в микроволновом диапазоне, х-лучах и с помощью ИПФ в излучениях водорода (656,3 нм) и ионизированного кальция (393,3 нм).

Отечественный прибор ИПФ-6 предназначен для целей службы Солнца. Длина волны выделяемого излучения 656,28 нм, ширина полосы пропускания 0,05 нм, спектральное перемещение полосы относительно центра линии водорода $+(-)0,1$ нм. Схема и конструкция прибора обеспечивают возможность работы с тремя значениями ширины полосы пропускания: 0,05; 0,075 и 0,1 нм. Изменение ширины полосы с 0,05 на 0,1 нм осуществляется выключением из схемы входного и выходного поляроидов. При включении только выходного поляроида ширина полосы равна 0,075 нм. ИПФ-6 содержит семь интерференционно-поляризационных ступеней, фильтр предварительной монохроматизации (интерференционный) и теплозащитный (таблица).

Для обеспечения перемещения полосы пропускания по спектру в пределах $+(-) 0,1$ нм в три ступени, содержащие пластины из исландского шпата с небольшой волновой разностью хода, введены элементы управления полосой пропускания в виде четвертьволновой пластины и вращаемой полуволновой пластины. В такой схеме при сдвиге полосы на 0,1 нм интенсивность главного максимума в спектре пропускания падает до 85%, а интенсивность вредного вторичного максимума повышается до 9,5%.

Для принципиального улучшения характеристик прибора (повышение контраста при наблюдении структурных образований на Солнце, как в центре линии излучения, так и в

крыльях) с целью подавления вторичных максимумов, а также для уменьшения интенсивности вредных максимумов, появляющихся при смещении полосы пропускания по спектру, в схему введена специальная корригирующая ступень. Она имеет расстояние между интерференционными минимумами 0,15 нм и подавляет как наиболее интенсивные вторичные максимумы, расположенные на расстоянии $\pm 0,075$ нм от центра полосы пропускания прибора, так и остальные вторичные максимумы. Корригирующая ступень выполнена термооптически компенсированной, спектрально-перестраиваемой, широкоугольной.

Расчётные значения толщин кристаллических пластин

Номер ступени	Наименование элемента	Материал	Толщина, мм	Ориентация, град
I	Поляроид	Плѐнка	-	90
	Пластина	Кварц	7,017	45
	Пластина	Кварц	6,999	0
	Пластина	Кварц	7,017	45
II	Поляроид	Плѐнка	-	0
	Пластина	Кварц	0,893	45
	Пластина	Кварц	13,998	0
	Фазовая $\lambda/2$	Кварц	0,036	45
	Пластина	Кварц	13,998	90
	Пластина	Кварц	0,893	45
III	Поляроид	Плѐнка	-	0
	Пластина	Кварц	1,767	45
	Пластина	Кальцит	1,440	90
	Фазовая $\lambda/2$	Кварц	0,036	45
	Пластина	Кальцит	1,440	0
	Пластина	Кварц	1,767	45
IV	Поляроид	Плѐнка	-	0
	Фазовая $\lambda/2$	Кварц	0,036	$0 \dots \pm 22,5$
	Фазовая $\lambda/4$	Кварц	0,018	0
	Пластина	Кальцит	2,880	45
	Фазовая $\lambda/2$	Кварц	0,036	0
	Пластина	Кальцит	2,880	135
V	Поляроид	Плѐнка	-	0
	Фазовая $\lambda/2$	Кварц	0,036	$0 \dots \pm 45$
	Фазовая $\lambda/4$	Кварц	0,018	0
	Пластина	KDP	7,015	45
	Пластина	Кальцит	7,422	135
	Фазовая $\lambda/2$	Кварц	0,036	0
	Пластина	Кальцит	7,422	45
	Пластина	KDP	7,015	135
VI	Поляроид	Плѐнка	-	0
	Фазовая $\lambda/2$	Кварц	0,036	$0 \dots \pm 90$
	Фазовая $\lambda/4$	Кварц	0,018	0
	Пластина	ADP	2,742	45
	Пластина	Кальцит	12,226	135
	Фазовая $\lambda/2$	Кварц	0,036	0
	Пластина	Кальцит	12,226	45
	Пластина	ADP	2,742	135

	Поляроид	Плѐнка	-	0
VII (корректирующая)	Поляроид	Плѐнка	-	90
	Фазовая $\lambda/2$	Кварц	0,036	$0 \dots \pm 60$
	Фазовая $\lambda/4$	Кварц	0,018	0
	Пластина	KDP	9,353	45
	Пластина	Кальцит	9,896	135
	Фазовая $\lambda/2$	Кварц	0,036	0
	Пластина	Кальцит	9,896	45
	Пластина	KDP	9,353	135
	Поляроид	Плѐнка	-	90

В ряде известных ИПФ при спектральном перемещении полосы пропускания вращаются входной и выходной поляризаторы. Это нежелательно, так как свет от исследуемого объекта может быть частично поляризован. В приборе ИПФ-6 входной поляризатор первой ступени и выходной поляризатор последней ступени неподвижны. Спектральное перемещение полос пропускания в заданном диапазоне в управляемых ступенях осуществляется одновременным поворотом четырёх полуволновых пластинок на углы $\pm 22,5$ град, ± 45 град, ± 90 град и ± 60 град (корректирующая ступень). Установка полосы пропускания в диапазоне $\pm 0,1$ нм обеспечивается с точностью 0,002 нм.

Общее количество света, проходящего через ИПФ, определяется его световым диаметром, количеством и качеством используемых поляризаторов и допустимым наклоном лучей (апертурой пучка). Диаметр кристаллической оптики данного прибора составляет 40 мм. Эта величина является предельной из-за трудностей получения больших объёмов исландского шпата требуемого качества. Таким образом, остаются два пути дальнейшего увеличения количества света. Первый – разработка схемы прибора с теми же параметрами, но с меньшим количеством ступеней: уменьшение числа поляризаторов позволяет повысить пропускание. С этой целью в ИПФ-6 три ступени выполнены по схеме двойного действия и эквивалентны шести обычным ступеням Лио. Второй путь – создание широкоугольных ИПФ. В данном приборе шесть ступеней (в том числе и корректирующая) имеют увеличенное угловое поле, т.е. каждый кристаллический элемент состоит из двух пластин одинаковой толщины и помещённой между ними пластинки $\lambda/2$. Величина углового поля при этом составляет 4 град 40 мин вместо 1 град 20 мин при обычной схеме.

Для снижения влияния температуры на спектральное положение полосы пропускания и устранения ошибки спектральной установки полосы пропускания из-за неточности определения истинной температуры кристаллических пластин в приборе ИПФ-6 введена термооптическая компенсация в две ступени из исландского шпата с наибольшей волновой разностью хода и в корректирующую ступень. Компенсация осуществлена с помощью пластин из кристаллов KDP и ADP. Прибор содержит теплозащитный фильтр (пластина KDP z-среза толщиной 10 мм) и фильтр предварительной монохроматизации (интерференционный фильтр с полушириной полосы пропускания 2 нм и пропусканием в максимуме 65%).

Оптическая схема расположена в герметизированной оправе. Необходимость герметизации вызвана тем, что для увеличения интегрального коэффициента пропускания ИПФ используется оптическая иммерсионная жидкость, заполняющая воздушные пустоты между оптическими деталями, а также объём вокруг них. Конструкция ИПФ-6 осложнена тем, что в ней имеется кинематика, с помощью которой осуществляется вращение оптических элементов (полуволновых пластин) внутри герметичной стопы. Вращающиеся оптические элементы и неподвижные разделены промежутками, которые должны быть не менее нескольких микрон, чтобы избежать присасывания оптических поверхностей, и не более 100 мкм, чтобы капиллярные силы были достаточно велики для всасывания иммерсии в промежутки. Наружные поверхности защитных и

герметизирующих стёкол просветлены. В герметизированном блоке предусмотрена технологическая пластина из стекла. Введение её объясняется тем, что константы двулучепреломляющих кристаллов неизвестны с достаточной точностью и, кроме того, могут иметь различные значения для образцов из разных месторождений, вследствие чего окончательные толщины пластин устанавливаются при изготовлении в процессе согласования интерференционно-поляризационных ступеней. Предельное отклонение ориентации элементов от номинала считается 20 мин.

Поддержание заданной рабочей температуры кристаллической оптики 37°C с точностью $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ обеспечивается автоматическим электронным термостабилизатором, выполненным в виде самостоятельного блока, связанного кабелем с обогревателем оптической стопы. Система термостатирования состоит из блока термостабилизатора и платы усилителя, термодатчиков, обогревателей, расположенных внутри оптического блока. Она построена на принципе ступенчатого регулирования: при понижении температуры на $0,05^{\circ}\text{C}$ от выставленной образуется напряжение разбаланса измерительного моста. Усиленное напряжение разбаланса подаётся на управляющий электрод тиристора, в нагрузке которого находится внутренний обогреватель. С целью получения требуемой точности $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ используется система двойных термостатов: герметичная оптическая стопа с термостатом помещена в другой термостат, температура которого поддерживается на уровне $35 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Такая система уменьшает мощность внутреннего обогревателя, что позволяет избежать инерции обогревателя и повысить точность термостатирования. В качестве датчика температуры внутреннего термостата используются микротермосопротивления, включённые в плечо измерительного моста. Датчиком температуры внешнего термостата служит температурное реле с установкой его на 35°C . При достижении этой температуры реле срабатывает и замыкает свой контакт, регулируя ток, протекающий через внешний обогреватель. Для форсировочного нагрева до 35°C введён грубый внутренний обогреватель. Если по какой-либо причине произойдёт отказ системы терморегулирования, то во избежание перегрева предусмотренная автономная аварийная система отключит питающее напряжение при температуре выше 40°C внутри оптического блока. В качестве датчика использовано термореле с установкой температуры 40°C . По сигнальным лампам, вынесенным на лицевую панель, можно судить о работе соответствующих обогревателей. В качестве обогревателей использованы пластины с токопроводящей стеклотканью.



