## АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

УДК 543.424

# СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

#### © П. Е. Котляр, О. И. Потатуркин

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1 E-mail: kotlyarpe@iae.nsk.su, potaturkin@iae.nsk.su

Рассмотрены методы и системы формирования гиперспектральных данных на базе спектрального сканирования и без сканирования изображений. Это обусловлено переходом во многих практических задачах от аэрокосмических к «наземным» методам гиперспектральной съёмки. Представлены варианты реализации спектроразделительных устройств ключевого элемента современных смотрящих гиперспектрометров. Приведены основные параметры и технические характеристики абсорбционных, интерференционных и жидкокристаллических фильтров, показаны их принципиальные возможности. Сечение фильтруемого светового пучка и его угловая апертура в таких устройствах могут быть весьма велики, что делает их пригодными для исследования объектов слабых излучений. Рассмотрены перестраиваемые фильтры без механических перемещений элементов конструкции на базе быстродействующих акустооптических устройств и планарных интерферометров Маха — Цендера с электростатическим управлением. В настоящее время их предельное спектральное разрешение составляет величину менее 1 нм для видимого и ближнего инфракрасного диапазонов.

*Ключевые слова:* светофильтр, интерферометр Фабри — Перо, жидкокристаллический фильтр, акустооптический фильтр, интерферометр Маха — Цендера.

DOI: 10.15372/AUT20240306 EDN: LRXMEA

Введение. Обработка последовательностей гиперспектральных изображений (ГСИ) получила в последнее время широкое распространение при решении многих научных и практических задач, включая дистанционное зондирование Земли, экологический мониторинг, рациональное природопользование, предотвращение природных и техногенных катастроф. Это требует формирования в реальном времени ГСИ, которые представляют собой трёхмерные массивы данных (гиперкубы данных) и включают пространственную (2D) и спектральную (1D) информацию. Причём для каждого пикселя определяется полный спектр отражённого излучения во многих (до 200–300) узких спектральных каналах видимого и ближнего инфракрасного (ИК) диапазонов.

Выделение зондируемого объекта на фоне подстилающих поверхностей основано на различии их спектральных сигнатур в предположении, что спектр отражения каждого материала уникален и, следовательно, может быть использован как средство идентификации. Термин «спектральная сигнатура», который используется до сих пор, предполагает уникальное соответствие между материалом и его спектром отражения. Однако в лабораторных и натурных исследованиях наблюдается значительная изменчивость спектров отражения большинства материалов, за что могут быть ответственны многие механизмы. Например, атмосферные и экологические воздействия, поверхностные загрязнения, изменения в материале, такие как временное выцветание или отбеливание, а также эффекты, при которых отражения от близлежащих объектов в сцене влияют на освещённость материала. Сезонные колебания также вносят значительные изменения в спектральный характер сцены. Экспериментально установлено, что искусственные материалы демонстрируют значительно меньшую спектральную изменчивость, чем природные. Необходимо также отметить, что, наряду с «чистыми» пикселями, когда в фотоприёмник регистрирующей аппаратуры целиком попадает излучение от поверхности только одного типа с эталонной спектральной характеристикой отражения, существуют «смешанные» пиксели. Они возникают тогда, когда фотоприёмник регистрирует излучение от поверхностей нескольких типов с различными эталонными спектральными характеристиками, и они фиксируются как одиночный пиксель ГСИ. Проблема смешанных пикселей не решается простым улучшением пространственного разрешения регистрирующей аппаратуры, так как при этом появляются детали изображений, не регистрировавшиеся ранее, т. е. образуются новые спектральные классы, и, следовательно, возникает необходимость расширения множества эталонных спектров. Смешанные пиксели существенно усложняют процедуру обработки ГСИ, поскольку они, как правило, не согласованы ни с одним из эталонных спектров. При этом их сигнатура может иметь сходство со спектральной сигнатурой другого материала, который в действительности отсутствует в этом элементе зондируемого объекта.

Современная спектральная аппаратура, особенно лабораторная, является прецизионным оборудованием. Однако при формировании ГСИ чаще всего нет необходимости в высоком спектральном разрешении гиперспектрометров (ГС), которое должно соответствовать степени разделимости спектральных характеристик объектов и фонов и быть сбалансированным с пространственным разрешением, соответствующим геометрии зондируемых объектов. В видимой области спектральные характеристики подавляющего большинства природных и техногенных объектов характеризуются монотонностью [1, 2]. Для их детектирования достаточно десятка спектральных полос шириной 10–30 нм. Узкие спектральные линии характерны лишь для газовых примесей в атмосфере кристаллических минералов и т. п.

Существующее множество технологий формирования ГСИ, которые основаны на различных физических принципах, может быть сведено к четырём базовым подходам получения трёхмерного  $(x, y, \lambda)$  набора данных гиперспектрального куба:

- пространственное сканирование изображений;
- спектральное сканирование изображений;
- пространственно-спектральное сканирование изображений;
- без сканирования изображений.

В работе сделан акцент на рассмотрении гиперспектрометров второго и четвёртого типов. Представлены основные варианты смотрящих ГС без сканирования зондируемой сцены непосредственно прибором, отражающие их основные особенности и характеристики, что важно при практическом применении. Отметим, что за скобками остался целый класс ГС, основанный на регистрации в каждый момент времени 2D-изображений в пространственной (x) и спектральной ( $\lambda$ ) координатах с формированием гиперкуба по другой пространственной координате (y) во времени за счёт их непосредственного движения и получивший широкое распространение в первую очередь при решении задач дистанционного зондирования Земли из космоса и околоземного пространства.

Целью настоящего обзора является систематизация и анализ разрозненных публикаций о разработках и промышленном выпуске оптического и оптико-злектронного оборудования, которое может быть использовано в задачах спектроразделения гиперспектральных систем.

Формирование гиперспектральных изображений. Спектральное приборостроение, основанное на различных явлениях спектроразделения (дисперсия, дифракция, интерференция), имеет многовековую историю [3–8]. В обзоре [9] представлены известные в настоящее время подходы разделения входного светового потока на спектральные составляющие. В первую очередь это методы спектральной визуализации, с помощью которых за счёт сканирования по длине волны последовательно измеряют распределение интенсивности светового потока. Они реализуются на поглощающих, или интерференционных, светофильтрах (ИФ).

Абсорбционные светофильтры. Абсорбционные светофильтры — наиболее простые и наиболее доступные устройства для выделения некоторого заданного участка спектра широкополосного оптического излучения. Поглощающие (абсорбционные) светофильтры представляют собой оптическое стекло, окрашенное молекулярными красителями. Абсорбционные фильтры изготавливаются из компонент, полосы селективного поглощения которых, накладываясь, перекрывают достаточно широкий спектральный диапазон, оставляя свободным некоторый заданный участок спектра, который и образует полосу пропускания данного устройства. Абсорбционные светофильтры обычно имеют спектральные ширины полос пропускания в пределах от 30 до 50 нм, поэтому их разрешающая способность невелика.

Для получения цветных стёкол в шихту добавляют различные красители, которые при варке растворяются или равномерно распределяются в виде коллоидных частиц, обусловливая в том и другом случае избирательное поглощение стеклом световых лучей. Выделяют три группы красителей: ионные, молекулярные и коллоидные.

К ионным красителям относятся катионы переходных и редкоземельных металлов — 3D- и 4f-элементы. Данные красители создают, как правило, типичные спектры поглощения в любой среде (прозрачные кристаллы, стекло, растворы).

В качестве молекулярных красителей рассматривают сульфиды и селениды тяжёлых металлов: Cd, Sb, Bi, Pb, Fe, Ag, Cu и др. В стекле они образуют монокристаллы размерами до 50 нм. Эти кристаллические включения равномерно распределяются в стекломатрице. Формирование микрокристаллической фазы осуществляется с помощью специальной технологической операции «доводки», которая предусматривает термообработку стекла при температурах, близких к температуре стеклования.

В коллоидных красителях окрашивание стекла основано на способности катионов меди, серебра, золота, висмута и других тяжёлых металлов восстанавливаться до атомарного состояния с последующим объединением нейтральных атомов в частицы коллоидных размеров. Природа окрашивания — рассеяние света на коллоидных частицах металлов.

Цвет стекла зависит от разности показателей преломления стекловидной и дисперсной фаз, а также от размеров коллоидных частиц. В общем случае коллоидные частицы в зависимости от размера и разности показателей преломления могут обеспечивать достижение любого спектрального цвета.

Световой поток, прошедший через поглощающий слой, ослабляется в соответствии с законом Бугера

$$I_{\text{прош}} = I_{\text{пад}} \, \mathrm{e}^{-k(\lambda)l},$$

где  $k(\lambda)$  — коэффициент поглощения, l — толщина слоя.

В настоящее время наиболее употребительны стеклянные абсорбционные светофильтры. Известны отечественные наборы цветных стёкол размером 80 × 80 мм и 40 × 40 мм, состоящие из 117 паспортизованных образцов. Стеклянные светофильтры обладают по сравнению с другими рядом преимуществ, к которым в первую очередь следует отнести высокое оптическое качество и устойчивость к световым и тепловым воздействиям.

Ассортимент цветных стёкол [10] почти во всех случаях позволяет решать задачу предварительной монохроматизации или отсечения нежелательной части спектра. Располагая друг за другом несколько таких светофильтров, можно получить довольно узкополосные комбинированные фильтры для всей видимой и ближней ультрафиолетовой части спектра [11]. Абсорбционные фильтры могут быть выполнены как линейный круговой переменный фильтр (CVF) турельного типа [12]. Известны гиперспектрометры, в которых для получения квазимонохроматических изображений на фотоприёмном устройстве (ФПУ) используется набор последовательно сменяемых полосовых фильтров [13–15]. Недостатком этого подхода является необходимость применения большого количества оптических элементов для охвата широкого спектрального диапазона и использование громоздких механических систем.

Интерференционные светофильтры. В отличие от абсорбционных данные светофильтры обладают тем преимуществом, что выделение узкой спектральной полосы пропускания происходит со значительно меньшими потерями света внутри неё. Кроме того, само положение этой полосы может в известных пределах перемещаться по спектру, что позволяет значительно лучше приспосабливать фильтр к конкретным экспериментальным требованиям. В отличие от монохроматоров сечение фильтруемого светового пучка и его угловая апертура могут быть весьма велики, что сближает их с абсорбционными светофильтрами и делает пригодными как для исследования слабых излучений, так и для получения оптических изображений в монохроматическом свете.

Интерференционный фильтр отражает одну и пропускает другую часть спектра падающего излучения благодаря явлению многолучевой интерференции в тонких диэлектрических плёнках. Для получения нужного эффекта на поверхность прозрачной пластины наносят несколько (от 10 до 200) слоёв с чередующимися высоким и низким показателями преломления. Точные значения толщин слоёв определяют положение максимума кривой пропускания, а от их числа зависят ширина зоны пропускания фильтра и степень подавления ненужной части спектра [16]. Такие фильтры могут обеспечивать ширину полосы пропускания или подавления до 0,1–0,15 нм в видимом диапазоне длин волн. По сравнению с абсорбционными фильтрами интерференционные имеют меньшие потери в зоне полезного пропускания и более высокую эффективность в зоне подавления.

Простейший интерференционный светофильтр представляет собой интерферометр Фабри — Перо с очень малым промежутком между зеркалами (от  $\lambda/2$  до нескольких длин волн). Он состоит из тонкого плоскопараллельного диэлектрического слоя с показателем преломления *n*, на обе поверхности которого нанесены отражающие слои. На выходе системы образуется бесконечная последовательность убывающих по амплитуде лучей с равной разностью хода между ними, которые интерферируют между собой. Разность хода двух соседних интерферирующих лучей  $\Delta$  определяется соотношением  $\Delta = 2hn \cos \theta$ , где *h* толщина диэлектрического слоя,  $\theta$  — угол падения света, *n* — показатель преломления диэлектрика. В проходящем свете максимумы интенсивности будут расположены там, где  $\Delta$ составляет целое число длин волн, т. е.  $2hn \cos \theta = m\lambda$  (m = 1, 2, 3, ...). При выполнении этого условия система является прозрачной и может служить фильтром с максимумами пропускания при  $\lambda = \lambda_0$ ,  $\lambda = \lambda_0/2$ ,  $\lambda = \lambda_0/3$  и т. д. соответственно для m = 1, 2, 3.

Из основного уравнения интерферометрии следует, что настройка интерференционного фильтра может осуществляться тремя способами:

— изменением угла падения  $\theta$  входного светового потока;

— изменением толщины *h* диэлектрического слоя;

— изменением показателя преломления *n* диэлектрика.

Свойства интерференционных фильтров в значительной степени зависят от угла падающего света (рис. 1). При отклонении угла падения от нормали максимум пропускания смещается в коротковолновую область при одновременном падении пропускания и расширении полосы [17].

Перестраиваемый интерференционный фильтр VersaChrome. Перестраиваемые в широком диапазоне спектра тонкоплёночные оптические фильтры серии VersaChrome [18],



*Puc. 1.* Зависимость пропускания интерференционных фильтров от угла падения луча света [17]



*Рис. 2.* Спектр пропускания фильтра ТВР01-620/15: *а* — при нескольких больших углах падения, *b* — сдвиг положения центральной длины волны при изменении угла падения по [18]

выпускаемые компанией Semrock (США), характеризуются высоким коэффициентом передачи (0,93) в сочетании с крутыми фронтами на границе полосы пропускания и высоким коэффициентом блокировки излучения вне полосы. Размеры фильтров —  $25,2 \times 35,6 \times 2,0$  мм. В отличие от стандартных тонкоплёночных интерференционных фильтров с фиксированными спектральными характеристиками спектральные характеристики фильтров VersaChrome меняются в зависимости от угла падения излучения в диапазоне от 0 до  $60^{\circ}$ , при этом сдвиг положения центральной длины волны достигает 12 %, а форма спектра не претерпевает никаких заметных изменений (рис. 2). Полуширина полосы пропускания остаётся фиксированной 20 нм. Компания Semrock выпускает ряд фильтров TBP01, полностью перекрывающих спектральный диапазон 370–900 нм и сочетающих в себе спектральные характеристики тонкоплёночного фильтра с гибкостью перестройки длины волны дифракционной решётки.

Центральная длина волны данного перестраиваемого фильтра определяется следующим уравнением:

$$\lambda(\theta) = \lambda(0) \sqrt{1 - \frac{\sin^2(\theta)}{n_{\text{eff}}^2}},$$

![](_page_5_Figure_1.jpeg)

*Рис. 3.* Пропускание интерференционного фильтра Фабри — Перо. Обозначения: *R* — отражательная способность поверхности зеркал, *FSR* — свободный спектральный диапазон, равный расстоянию между центрами соседних полос пропускания [19]

где  $n_{\rm eff}$  — эффективный показатель преломления тонкоплёночного покрытия.

Для спектрального разделения данных пространственные распределения интенсивностей изображений сцены регистрируются с помощью перестраиваемого фильтра на матричном ФПУ с заданными спектральными шагами, при этом полученная последовательность изображений представляется в виде гиперкуба (трёхмерной матрицы).

Узкополосные интерференционные фильтры Фабри — Перо. Простейший интерференционный светофильтр, изобретённый Геффекеном в Германии в 1939 г., представлял собой интерферометр Фабри — Перо с очень малым (от  $\lambda/2$  до нескольких длин волн) промежутком между зеркалами. Свойства таких фильтров определяются интерференцией оптических пучков, многократно отражённых в многослойной системе. Эти относительно малогабаритные устройства позволяют получать информацию не только о спектральных характеристиках объектов исследования, но и об их пространственном распределении, т. е. позволяют получать спектральные изображения.

Интерференционный фильтр представляет собой две стеклянные или кварцевые пластинки, расположенные на некотором расстоянии друг от друга так, что между внутренними поверхностями образуется плоскопараллельный зазор, заполняемый диэлектрической средой (воздух, слюда, жидкий кристалл). На обращённые друг к другу плоскости наносятся отражающие покрытия — зеркала с высоким коэффициентом отражения. В качестве зеркал применяются как металлические слои, так и многослойные диэлектрические покрытия. Интерферометр Фабри — Перо является многолучевым спектральным прибором с двумерной дисперсией и высокой разрешающей способностью. При прохождении широкополосного излучения через интерферометр Фабри — Перо происходит его пространственное разложение в спектр [16].

Пропускание ИФ в случае идентичных зеркальных покрытий представлено на рис. 3 и описывается выражением

$$T_{\rm MC} = \frac{(1 - A/(1 - R))^2}{1 + F \sin^2(\delta/2)},$$

где R — коэффициент отражения, A — потери на зеркалах и в диэлектрике, а  $F = 4R/(1 - R)^2$ .

Важными характеристиками ИФ служат максимальное пропускание

$$T_{max} = (1 - A/(1 - R))^2$$

и ширина полосы пропускания  $\Delta\lambda$  по уровню 1/2  $T_{max}$ . Для оценки ширины  $\Delta\lambda$  можно пользоваться выражением

$$\Delta \lambda = \lambda_q (1 - R) / \pi q \sqrt{F} \, ,$$

где q — целое число. Из приведённых выражений для  $T_{max}$  и  $\Delta\lambda$  следует, что более узкополосные ИФ должны изготавливаться с применением высокоотражающих покрытий  $(R \sim 1)$ , однако при этом они обладают меньшим пропусканием. В настоящее время промышленно изготавливаются ИФ с ширинами полос от единиц до десятков нм с максимальным пропусканием, превышающим 90 %.

Пропускание такого фильтра представляет собой «гребёнку» тесно расположенных по спектру максимумов пропускания (см. рис. 3) в диапазоне, ширина которого определяется прозрачностью пластин и свойствами зеркальных покрытий. Расстояние между максимумами зависит от промежутка между зеркалами (порядок интерференции) и характеризуется величиной FSR (free spectral range — свободный спектральный диапазон), которая зависит от рабочей длины волны  $\lambda$ , размера интерференционной полосы d и от порядка интерференционного максимума n

$$FSR = \frac{\lambda^2}{2nd}.$$

При фиксированном значении *d* высшие порядки интерференции лежат в области более коротких длин волн. Ширина максимума (полосы пропускания) зависит от порядка интерференции и коэффициента отражения зеркал [19]. При этом возникает необходимость в подавлении максимумов пропускания с длинами волн  $\lambda_0/2$ ,  $\lambda_0/3$  и т. д. Обычно это осуществляется либо специальными абсорбционными фильтрами, либо поглощением материала подложки самого фильтра. Оставшийся максимум при достаточно высокой отражательной способности зеркальных слоёв может быть очень узок. Такой блокирующий фильтр из тесно расположенных по спектру максимумов гребёнки выделяет главный максимум пропускания, совпадающий с выбранной спектральной линией. Чем больше свободный интервал, тем легче изготовить фильтр, чтобы блокировать соседние порядки интерференции. Блокирующий фильтр представляет собой одиночный или двойной ИФ низкого, обычно первого или второго, порядка интерференции. Как правило, эти фильтры очень контрастны: их пропускание вне главной полосы менее 0,1 %. Если пластины интерферометра строго параллельны друг другу, и разделяющая их диэлектрическая прослойка имеет оптическую толщину порядка длины волны, то число интерференционных полос, сохраняющихся в видимой области спектра, становится незначительным. Соответствующим подбором толщины прослойки в видимой области спектра может быть оставлена только одна полоса. Тем самым интерферометр превращается в светофильтр, обладающий узкой полосой пропускания.

Резонатор Фабри — Перо может использоваться в качестве сканирующего интерферометра при различной длине резонатора (или угле падения). Это позволяет выделять спектральные линии на разных частотах в пределах одного свободного диапазона. Интерферометры Фабри — Перо с изменяемым воздушным промежутком между зеркалами практически лишены дифракционных ограничений и допускают максимально возможную миниатюризацию устройства с сохранением значения светосилы. Широкий диапазон перестройки спектра с изменением положения полосы пропускания, вплоть до октавы, обеспечивается регулированием воздушного зазора электростатическим или пьезоэлектрическим актюатором [20].

## Таблица 1

| Спектральный прибор                             | Спектральный<br>диапазон<br>перестройки,<br>нм | Светосила<br>(размер<br>апертуры,<br>см <sup>2</sup> ) | Разре-<br>шающая<br>способ-<br>ность | Управляющее<br>напряжение,<br>В | Скорость<br>перестройки<br>спектра, с |
|---|--|--|--------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| Перестраиваемые<br>фильтры<br>Фабри — Перо      | 0,12   | ≈1   | $10^{5} - 10^{6}$                    | Сотни<br>вольт                  | Сотни<br>мкс                          |
| Оптоволоконные фильтры<br>Фабри — Перо          | $\approx 200$                                  | $10^{-4}$  | $10^{2}$                             | Десятки<br>вольт                | Сотни<br>мкс                          |
| Жидкокристаллические<br>фильтры<br>Фабри — Перо | 10-50  | ≈1   | $3 \cdot 10^3$                       | ≼ 15<br>и больше                | Десятки<br>мкс                        |
| Фильтры<br>на основе МЭМС                       | 10-70  | $\approx 10^{-5}$                                      | $3 \cdot 10^2$                       | ≥ 50                            | Десятки мкс —<br>десятки<br>мс        |
| Тонкоплёночные<br>перестраиваемые<br>фильтры    | 30-60  | ≈1   | $3 \cdot 10^3$                       | Десятки<br>вольт                | Несколько<br>мс                       |

Основные параметры перестраиваемых микромеханических спектральных фильтров

В [21] представлены исследования интерференционного фильтра Фабри — Перо, в котором перестройка резонансной частоты осуществляется не механическим, а электрическим способом. Для этого зазор между пластинами классического резонатора заполняется жидким кристаллом (ЖК). Перестройка осуществляется путём изменения показателя преломления жидкого кристалла под действием электрического поля, приложенного к металлическим зеркалам резонатора. При макетировании получен свободный спектральный диапазон 250 нм и диапазон перестройки 150 нм. Для этого оптическая анизотропия жидкого кристалла должна быть больше 0,4, а толщина жидкокристаллического слоя ≈0,6 мкм. При увеличении напряжения полоса пропускания смещается в сторону более длинных волн. В [22] представлены основные параметры перестраиваемых микромеханических спектральных устройств на базе фильтров Фабри — Перо (табл. 1).

Перестраиваемые фильтры без механических перемещений элементов конструкции. К перестраиваемым фильтрам без механических перемещений относятся: фильтры на жидких кристаллах (LCTF), акустооптические фильтры (AOTF) и планарные интерферометры Маха — Цендера с электростатическим управлением.

Жидкокристаллические перестраиваемые фильтры относятся K классу интерференционно-поляризационных и по своим качествам занимают положение. промежуточное между монохроматорами и интерференционными светофильтрами. Подобно последним, они позволяют получать монохроматические световые пучки сравнительно большого сечения (свыше 30 мм в диаметре), причём достижимая с их помощью степень монохроматичности очень высока. Однако, совмещая оптические достоинства тех и других, интерференционно-поляризационные светофильтры оказываются достаточно сложными и дорогостоящими устройствами. В основе таких фильтров — свойство жидких кристаллов вращать плоскость поляризации под действием электрического поля. В планарной холестерической структуре молекулы самоорганизуются в систему

![](_page_8_Figure_1.jpeg)

*Puc. 4.* Холестерический жидкий кристалл. Схематическое представление спиральной структуры [24]

*Рис. 5.* Принципиальная схема трёхступенчатого фильтра Лио по [25], где Р — поляризаторы, LC — ЖК-ячейки

мономолекулярных слоёв, ориентированных параллельно подложкам. Каждая молекула холестерика наряду с плоской конфигурацией имеет боковую метильную CH<sub>3</sub>-группу, расположенную над или под плоскостью. Вследствие такой конфигурации атомов в молекулах направление ориентации длинных осей молекул в каждом слое отклонено примерно на 15' по сравнению с предыдущим слоем [23, 24]. Эти отклонения суммируются по всей толщине вещества, что приводит к образованию спиральной молекулярной структуры, схематически представленной на рис. 4.

При нормальном падении света многослойная текстура холестерика будет селективно отражать свет с длиной волны, примерно равной шагу спирали p. Для большинства используемых холестериков этот размер  $p \sim 400{-}1000$  нм, поэтому длина волны  $\lambda_0$  лежит в видимой области и с ростом температуры или при приложении электрического поля смещается в сторону коротковолновой области спектра.

Элементарная ячейка ЖК-фильтра содержит слой жидкого кристалла, заключённый между плоскопараллельными прозрачными подложками, на внутренние поверхности которых нанесены токопроводящий и ориентирующий слои. На внешних поверхностях подложек размещены плёночные поляризационные фильтры, имеющие относительно друг друга скрещенные оси поляризации. Для получения требуемой спектральной характеристики (узкая полоса пропускания в заданном спектральном диапазоне) из элементарных ЖК-ячеек собирается многокаскадная конструкция, в которой толщина слоя жидкого кристалла в каждом каскаде возрастает в геометрической прогрессии с показателем степени, равным двум (рис. 5).

В основе управляемого электрическим полем двойного лучепреломления в холестерических жидких кристаллах лежат:

— особенность распространения естественного света через систему, состоящую из двух поляризаторов, между которыми помещён одноосный жидкий кристалл;

— способность направления жидкого кристалла к переориентации под действием электрического поля.

При распространении через одноосный жидкий кристалл плоской монохроматической линейно поляризованной световой волны, падающей нормально к его поверхности и перпендикулярно оптической оси ЖК, световой луч разделится на два: обыкновенный с показателем преломления  $n_0$  и необыкновенный с показателем преломления  $n_e$  — оба луча когерентные, но распространяются с различными скоростями. После прохождения слоя ЖК, вследствие различия в скоростях распространения волн, между ними возникает оптическая разность хода, равная  $(n_e - n_0)d$ , где d — толщина слоя ЖК, приводящая к разности фаз

$$\Delta = 2\pi (n_e - n_0) d/\lambda.$$

Поскольку за слоем ЖК расположен второй поляризатор, то он пропустит только компоненты колебаний, поляризованные в одном направлении, которые интерферируют между собой. Зависимость пропускания света T с длиной волны  $\lambda$  от угла поворота плоскости поляризации в ячейке толщиной d можно рассчитать по формуле

$$T = \sin^2 \left[ \frac{\pi d}{\lambda} f(\theta_p, \varphi') \right],$$

где

 $f(\theta_p, \varphi') = \frac{n_0^2 - n_e^2}{n^2} \sim \sin \theta_p \cdot \cos \theta_p \cdot \sin \varphi' + \frac{n_0 n_e}{n^2} (n^2 - \sin^2 \varphi')^1 - (n_0^2 - \sin^2 \varphi')$ 

И

$$n^2 = n_0^2 \cos^2 \theta_p + n_e^2 \sin^2 \theta_p.$$

По сугубо конструктивным соображениям применение поляризационных призм оказывается нежелательным. Поэтому в качестве поляризаторов обычно прибегают к поляроидам, обладающим, как известно, сильным поглощением, которое становится особо значительным, если учесть потребность в большом числе последовательно устанавливаемых поляризаторов. Увеличение числа каскадов, необходимое для сужения полосы пропускания, неизбежно ведёт к уменьшению прозрачности светофильтра. Так, фильтры с полосой пропускания 20–40 Å имеют прозрачность порядка 20–30 %; фильтр с полосой пропускания 2–3 Å (с поляризационными призмами) обладает прозрачностью 10–25 %, а прозрачность фильтра с полосой пропускания 0,6 Å составляет всего 2 %.

В [26-29] проанализированы преимущества и недостатки жидкокристаллических управляемых фильтров, возможности их применения в гиперспектрометрах. В LCTF обеспечиваются высокое качество изображения и возможность осуществить относительно простую интеграцию в оптическую систему. Для получения спектрометра достаточно расположить светофильтр перед обычной телевизионной камерой и посредством установки управляющих напряжений на секциях фильтра последовательно сканировать спектральные каналы. В спектрометрах с LCTF не требуется пространственное сканирование посредством движения летательного аппарата или с помощью механических устройств. Это актуально в наземной гиперспектральной аппаратуре, используемой для идентификации спектральных изображений лиц людей или клеточного анализа в медицинских исследованиях. Спектральное разрешение таких фильтров невелико и составляет около 10 нм для диапазона 400–720 нм. Однако использование новых ЖК-материалов позволяет расширить спектральный диапазон до 2450 нм. К недостаткам LCTF относится сравнительно невысокая скорость переключения спектральных каналов (по сравнению с акустооптическими системами) 10–50 мс, ограниченное число каналов — около 30. Температурный диапазон от -10 до +50 °C. Более высокие температуры могут уменьшить время перехода молекул жидкокристаллического материала для выравнивания и настройки фильтра на определённую длину волны. Более низкие температуры увеличивают вязкость жидкокристаллического материала и время настройки фильтра от одной длины волны к другой.

Фильтры LCTF имеют длительный срок службы (гарантийный — 15 лет). К факторам окружающей среды, которые могут вызвать деградацию фильтров, относят: длительное воздействие высокой температуры и влажности, термический или механический удар и долгосрочное воздействие высокой фотонной энергии (ультрафиолетовое излучение), которое может обесцвечивать некоторые материалы, используемые для изготовления фильтров.

Фирма Thorlabs (США) предлагает жидкокристаллические перестраиваемые фильтры Kurios Thorlabs, которые не используют подвижных частей, что обеспечивает быстрое (порядка нескольких миллисекунд) свободное от вибраций переключение между длинами волн. Благодаря тому, что фильтр неподвижен и не заменяется в процессе измерений, зарегистрированные данные не подвержены проблеме сдвига пикселей. Переключение между длинами волн и регистрация изображений в данной установке полностью автоматизированы. Перестраиваемые фильтры KURIOS-XL1/M с фиксированной полосой пропускания 7, 10, 20 нм, апертурой 35 мм, рабочим диапазоном 430–730 нм и KURIOS-XE2/M с апертурой 20 мм и рабочим диапазоном 650–1100 нм описаны в [30].

В [31] представлен отчёт о производителях на мировом рынке настраиваемых жидкокристаллических фильтров, таких как Kent Optronics Inc., Thorlabs Inc., Meadowlark Optics Inc., Semrock Inc., PerkinElmer Inc., Santec Corporation, Channel Systems Inc., ChemImage Corporation, AA Opto Electronic EXFO Inc., а также ассортимент фильтров видимого — от 400 до 700 нм и ближнего инфракрасного диапазонов — от 780 до 2500 нм.

Фирма Cambridge Research Instrumentation, Inc. (CRi) производит 6-каскадные жидкокристаллические фильтры VariSpecVIS/VISR для спектрального диапазона 400–720 нм с полосой пропускания 7, 10, 20 нм и апертурой 20 и 35 мм, а также VariSpecVIS/NIRR для спектрального диапазона 650–1100 нм с полосой пропускания 7, 10 нм и апертурой 20 мм [32]. Фильтры VariSpec сертифицированы для участия в космических миссиях HACA и получили разрешение на использование в бортовых платформах дистанционного зондирования Земли.

Особенностью гиперспектрометров на жидких кристаллах является то, что они регистрируют излучение в одной плоскости поляризации. Это полезно для таких применений, как обнаружение и анализ антропогенных объектов (машин, техники, строений), поскольку наличие поляризации свидетельствует об их искусственном происхождении, в отличие от растительности, когда отражённое излучение, как правило, не поляризовано. Отметим, что использование этого параметра как дополнительного критерия при обработке спектральных изображений требует, по крайней мере, двух спектрометров с ортогонально ориентированными плоскостями поляризации.

Акустооптические перестраиваемые фильтры представляют собой электрически перестраиваемые фильтры, работающие по принципу объёмной (брэгговской) дифракции светового пучка на неоднородностях показателя преломления. Такие неоднородности возникают при возбуждении в двулучепреломляющих кристаллах ультразвуковой акустической волны. При анизотропной дифракции в одноосных кристаллах существует минимальная частота ультразвука, при которой углы падения и дифракции совпадают, и происходит так называемое коллинеарное акустооптическое взаимодействие. Акустооптическая фильтрация считается наиболее перспективной технологией, основанной на вращении плоскости поляризации. Рабочий спектральный диапазон фильтров от 350 до 4400 нм определяется материалом преобразователя. Ширина полосы пропускания от 0,3 до 12 нм, дифракционная эффективность ≥70 %, пропускание ≥97 %. Акустическая волна в кристалле возбуждается при помощи пьезоэлектрического преобразователя, на который подаётся перестраиваемый сигнал высокой частоты (порядка 10–200 МГп), мощность которого не превышает нескольких ватт. Когда на преобразователь подаётся возбуждающий радиочастотный сигнал определённой частоты, пьезокристаллический преобразователь возбуждающих

ет ультразвуковую волну в двулучепреломляющем кристалле. Показатель преломления кристалла периодически изменяется, что эквивалентно образованию в нём фазовой решётки, константой которой является длина ультразвуковых волн. При увеличении длины волны света эффективность дифракции существенно падает по сравнению с эффективностью дифракции на длине волны 0,63 мкм [33].

Характер акустооптической фильтрации определяется конструктивными параметрами акустооптической ячейки: геометрией акустооптического взаимодействия, т. е. углами ввода света  $\theta_i$  и звука  $\gamma$  по отношению к кристаллографическим осям, длиной взаимодействия ультразвука и света L и оптическими свойствами материала акустооптической призмы.

Связь сдвиговой акустической волны с частотой f, распространяющейся в плоскости (010) под углом  $\alpha$  к оси X с углом дифракции  $\theta_d$ , и необыкновенной оптической волны  $\lambda$  определяется следующим уравнением:

$$f = \frac{V(\alpha)}{\lambda} \left[ \sqrt{n_0^2 - n_d^2 \cos^2 \theta_d} - n_d \sin \theta_d \right],$$

где  $V(\alpha)$  — фазовая скорость ультразвуковой волны, равная

$$V(\alpha) = \sqrt{V_{100}^2 \cos^2 \alpha + V_{001}^2 \sin^2 \alpha},$$

и  $V_{100}$  <br/>и  $V_{001}$  — скорости вдоль осей X и Z соответственно. При этом показатель преломления дифрагированного свет<br/>а $n_d$ равен

$$n_d = \frac{n_0 n_e}{\sqrt{n_0^2 \sin^2\left(\theta_d + \alpha\right) + n_e^2 \cos^2\left(\theta_d + \alpha\right)}}.$$

Анизотропное акустооптическое взаимодействие было впервые экспериментально реализовано на кристаллическом кварце, а затем — в ниобате лития и молибдате кальция [34]. Коллинеарные акустооптические (AO) фильтры на этих материалах обладают простой геометрией, однако выбор материалов, в которых возможно такое взаимодействие, относительно невелик, так как необходимо наличие специфических констант взаимодействия. Наиболее распространёнными материалами для AOTF в настоящее время являются: в УФ-диапазоне — плавленый и кристаллический кварц (SiO<sub>2</sub>); в видимом и ближнем ИК-диапазонах — плавленый и кристаллический кварц (SiO<sub>2</sub>), стёкла (тяжёлые флинты), молибдат свинца (PbMoO<sub>4</sub>), парателлурит ( $\alpha$ -TeO<sub>2</sub>), молибдат кальция (CaMoO<sub>4</sub>), альфа-иодноватая кислота ( $\alpha$ -HIO<sub>3</sub>), ниобат лития (LiNbO<sub>3</sub>), каломель (Hg<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>); в среднем ИК-диапазоне — германий (Ge). Материал пьезопреобразователей — ниобат лития, реже керамика ЦТСЛ [34]. Для расширения спектрального диапазона в некоторых приборах служат акустооптические ячейки с двумя пьезопреобразователями, а для уменьшения потерь света и упрощения оптической схемы применяют системы без поляризаторов.

В качестве материала современных фильтров наиболее часто используется монокристаллическая двуокись теллура (парателлурит, TeO<sub>2</sub>). Данный тетрагональный кристалл группы 422, прозрачный в диапазоне 0,35–5 мкм, отличается высокими AO-характеристиками: рекордно низкой скоростью сдвиговой волны — 617 м/с, что даёт очень высокий коэффициент оптического качества, в 600–800 раз больший, чем, например, у плавленого кварца. Это означает, что для 100 % отклонения или модуляции падающего излучения достаточны мощности возбуждения, измеряемые милливаттами. Низкая скорость распространения ультразвука несколько уменьшает быстродействие акустооптических приборов на основе TeO<sub>2</sub>, однако этот недостаток окупается высокой эффективностью материалов во всех диапазонах, кроме ультрафиолетового. Однако парателлурит

![](_page_12_Figure_1.jpeg)

Рис. 6. Схема двойного АО-монохроматора: 1, 3, 5 — поляризаторы; 2, 4 — АО-ячейки; 6 — контроллер; 7 — ВЧ-генератор; 8 — ВЧ-усилитель по [35]

![](_page_12_Figure_3.jpeg)

*Puc.* 7. Типовые схемы реализации АО-фильтрации: *a* — однопроходная коллимирующая схема (S-coll); *b* — коллимирующая схема с двойной фильтрацией (T-coll); *c* — конфокальная схема (S-conf); *d* — коллимирующая схема с двойной фильтрацией в одной ячейке (D-coll) [36]

не пригоден для получения высокого спектрального разрешения в схемах с коллинеарной геометрией дифракции. Другой важный параметр АО-фильтров — контраст функции пропускания, т. е. отношение пропускания фильтра в максимуме функции к пропусканию вне пределов основного окна: чем выше это отношение, тем больше отношение сигнал/фон и тем точнее получаемая спектральная информация. Увеличение контраста достигается двойной монохроматизацией (см. рис. 5): последовательным пропусканием света через две АО-ячейки или две области одной ячейки [35].

В [36] показано, что структура с двумя фильтрами (рис. 6) уменьшает ширину спектра в среднем на 37 % и улучшает спектральное разрешение в среднем на 57 % по сравнению с одним фильтром. В [36, 37] даны типовые схемы реализации АО-фильтрации (рис. 7).

Ниже представлены формулы, по которым можно оценить основные параметры в любой конструкции АО-фильтров: коэффициент передачи на резонансной длине волны  $\eta$ , полосу пропускания  $\Delta \lambda$  и угловую апертуру  $\Delta \Omega$ 

$$\eta = \frac{M_2 L^2 P_{ac}}{S\lambda^2}, \qquad \Delta \lambda = \frac{\lambda^2}{bL}, \qquad \Delta \Omega \approx \sqrt{\frac{\lambda L}{a}}.$$

 $P_{ac}$  — мощность акустического потока, <br/> S — площадь входного светового пучка,  $\lambda$  — длина волны света, г<br/>де $M,\ a,\ b$  — параметры материала, L — длина взаимодействия света и звука.

Работы по космическим применениям акустооптических фильтров велись и у нас в стране (в частности, изображающие акустооптические спектрометры применялись на спутниках серии «Океан»), и за рубежом. Однако в литературных источниках сведений о результатах таких разработок мало [38–40]. Спектрометр для космического аппарата «Марс-Экспресс» является первым опытом использования таких устройств в исследованиях других планет. Отечественные достижения в разработке гиперспектральной аппаратуры с оптико-акустическими фильтрами представлены в [41].

![](_page_13_Figure_1.jpeg)

Рис. 8. Электрооптический модулятор по схеме интерферометра Маха — Цендера на дискретных элементах: 1 — делитель светового потока на два пучка света; 2 — соединитель разделённых пучков света; 3 — электрооптические элементы; 4 — электроды; 5 — отражающие элементы; ФП — фотоприёмник;  $I_1$  и  $I_2$  — световые пучки в каналах интерферометра [44]

Компания «Специальные Системы. Фотоника» является поставщиком перестраиваемых АО-фильтров с рабочим спектральным диапазоном 400–1100 нм, частотным — 45–200 МГц. Эти фильтры конструкционно достаточно компактны, их габаритные параметры составляют не более 100 мм в сумме трёх измерений. В качестве материала изготовления используется диоксид теллура (TeO<sub>2</sub>). Кристаллы диоксида теллура имеют высокие показатели преломления и обладают добротностью на несколько порядков выше, чем другие материалы, поэтому являются технологически значимыми для акустооптики [42]. Основные технические характеристики АО-фильтров: фильтры TF2001 диапазон длин волн 400–1000 нм, частота 55–200 МГц, дифракционная эффективность  $\geq$ 40 %, активная апертура 2,5 мм; фильтры SPTF — диапазон длин волн 450–1100 нм, частота 48–180 МГц, дифракционная эффективность  $\geq$ 70 %, пропускание  $\geq$ 97 %; фильтры TF1001 — диапазон длин волн 640–1100 нм, частота 45–110 МГц, дифракционная эффективность  $\geq$ 70 %, активная апертура 2 мм.

Интерференционные фильтры на планарном электрооптическом интерферометре Maxa — Цендера. Устройства спектрального разделения полихроматического оптического сигнала на отдельные спектральные составляющие широко используются в оптоволоконных системах связи и называются демультиплексорами. Современные технологии демультиплексирования обеспечивают разделение до 400 несущих с шагом между ними 0,2–0,8 нм с использованием планарного электрооптического интерферометра Маха — Цендера [43]. На рис. 8 представлена принципиальная схема устройства спектрального разделения, реализованная на дискретных элементах по схеме интерферометра Маха — Цендера. Принципиальным отличием этой схемы является наличие в плечах интерферометра электрооптических элементов, длина оптического пути в которых определяется изменением показателя преломления активной среды за счёт электрического поля (эффекта Поккельса).

Электрооптический эффект практически безынерционен (быстродействие порядка  $10^{-10}-10^{-11}$  с), благодаря чему верхний предел частоты колебаний напряжённости электрического поля в принципе может достигать 100 ГГц. На практике у современных модуляторов ширина полосы по уровню –3 дБ составляет 40–50 ГГц [44, 45]. Большой прогресс в развитии оптоволоконной связи позволил разработчикам элементной базы создать одну из первых фотонных интегральных схем — планарный интерферометр Маха — Цендера на одном кристалле ниобата лития. Интегральный электрооптический модулятор Маха — Цендера изготавливают на поверхности пластины, вырезанной из монокристалла ниобата лития (LiNbO<sub>3</sub>), который представляет собой бесцветный кристалл тригональной (или ромбоэдрической) кристаллографической системы. Его кристаллическая решётка

![](_page_14_Figure_1.jpeg)

*Рис. 9.* Структурная схема интегрального электрооптического модулятора Маха — Цендера [45]

имеет одну ось симметрии третьего порядка (L3).

Электрооптический эффект в ниобате лития состоит в изменении показателя преломления кристалла  $\Delta n_z$  под действием электрического поля

$$\Delta n_{z,\text{LiNbO}_3} \approx n_e - \frac{1}{2} n_e^3 r_{33} E_z.$$

Здесь  $n_e$  — показатель преломления для необыкновенной волны;  $r_{33}$  — основной электрооптический коэффициент (для ниобата лития  $r_{33} \approx 30,8 \text{ mmB}^{-1}$ );  $E_z$  — напряжённость электрического поля, приложенного вдоль оси Z, которая определяется отношением приложенного напряжения  $U_{\text{вх}}$  к толщине диффузионного слоя планарного волновода [45].

В случае, когда световая волна, поляризованная вдоль оси Z, распространяется в направлении, перпендикулярном оси Z, показатель преломления линейно зависит от напряжённости электрического поля. Этот кристалл прозрачен в диапазоне от 0,4 до 5,0 мкм, что делает его идеальным материалом для применения в интегрально-оптических устройствах. Условие интерференции в точке  $Y_2 \ 2\pi \ \Delta n_z L = m\lambda \ (m = 1, 2, 3, ...)$  определяет выделение нужной спектральной линии, где L — длина управляющих электродов (рис. 9).

Оптическое излучение  $P_{\rm Bx}$  подаётся на вход интерферометра Маха — Цендера по оптоволокну типа Panda, сохраняющему поляризацию излучения. В  $Y_1$ -разветвителе излучение разделяется на два равных по мощности (50 ± 2 %) потока и поступает в два плеча интерферометра. Оптическое излучение в волноводах должно быть поляризовано в направлении оси Z кристалла. Вдоль этой же оси направлен вектор напряжённости электрического поля между электродами. При распространении волн вдоль плеч интерферометра между ними возникает разность фаз, величина которой зависит от оптической длины волновода L и его показателя преломления [46]. Такая технология позволила создать интегральные интерферометры с полуволновым напряжением в 3,2 В. Компания Photline Technologies (Франция) [47] производит IMZI — интегрально-оптический интерферометр с разностью оптического пути до 1000 мкм.

Модуляторы интенсивности излучения Маха — Цендера изготавливаются компаниями: iXBlue Photonics (Франция), Lumentum Holdings Inc. (США), Optilab (США), Covega (США), EOSpase (США), Thorlabs (США), Oclaro (США), Laser 2000 (Великобритания), JENOPTIK (Германия), SumitomoOsakaCement (Япония), Fujitsu (Япония), OKI Electroniks Components (Япония), LucentTechnologies (Китай), SWT (Китай), ECI (Израиль), НПК «Оптолинк» (Россия) [48]. На рис. 10 представлена фотография электрооптического модулятора компании SWT (Китай) модели СТМ1550.

Компания iXBlue Photonics выпускает амплитудные электрооптические модуляторы IMZI с высокой разностью хода (длиной оптического пути) между двумя плечами [49]. Ряд моделей модуляторов от iXBlue успешно используется в космических аппаратах и радиофотонных системах (РЭБ, АФАР).

![](_page_15_Picture_1.jpeg)

*Рис. 10.* Электрооптический модулятор компании SWT (Китай) модели CTM1550, предназначенный для кабельного телевидения [49]

Применение планарных интерферометров Маха — Цендера для спектрального разделения входного светового потока в гиперспектральных задачах представляется весьма перспективным, так как они успешно апробированы для выполнения демультиплексирования, применяемого в телекоммуникационных технологиях и многих специальных приложениях.

Заключение. В работе рассмотрены методы и системы формирования гиперспектральных изображений на базе спектрального сканирования изображений и без сканирования изображений. Представлены их принципиальные возможности, приведены основные параметры и технические характеристики. Показано, что абсорбционные фильтры могут успешно применяться для получения квазимонохроматических изображений, а также для подавления максимумов пропускания высоких гармоник интерференционных фильтров. При этом последние, по сравнению с абсорбционными, обладают тем преимуществом, что выделение узкой спектральной линии происходит со значительно меньшими потерями света внутри полосы пропускания. Кроме того, само положение этой полосы может в известных пределах перемещаться по диапазону, что позволяет значительно лучше подстраивать параметры фильтров к конкретным требованиям.

Большой интерес представляют интерференционные фильтры Фабри — Перо, которые позволяют выделять узкие спектральные линии на разных частотах в пределах одного свободного диапазона. Такие интерферометры с изменяемым воздушным промежутком между зеркалами практически лишены дифракционных ограничений и допускают максимально возможную миниатюризацию. Широкий диапазон перестройки спектра с изменением положения полосы пропускания, вплоть до октавы, обеспечивается регулированием воздушного зазора по величине электростатическим или пьезоэлектрическим актюатором. Эти относительно малогабаритные устройства позволяют получать информацию не только о спектральных характеристиках объектов исследования, но и об их пространственном распределении, т. е. обеспечивают формирование спектральных изображений. Для спектрального разделения данных такие распределения интенсивностей сцены регистрируются с помощью матричного ФПУ с перестраиваемым фильтром, при этом полученная последовательность изображений представляется в виде гиперкуба (трёхмерной матрицы).

Отдельно рассмотрены перестраиваемые фильтры без механических перемещений элементов конструкции, к которым относятся: фильтры на жидких кристаллах, акустооптические фильтры и планарные интерферометры Маха — Цендера с электростатическим управлением. Они представляют собой перспективный класс устройств, которые могут быть ориентированы на формирование гиперспектральных изображений, обеспечивающих быстрое (порядка нескольких миллисекунд) свободное от вибраций переключение длин волн. Благодаря тому, что фильтр неподвижен, зарегистрированные данные не подвержены проблеме сдвига пикселей.

Особенностью гиперспектрометров с фильтрами на жидких кристаллах является регистрация излучения в одной плоскости поляризации. Это полезно для таких применений, как обнаружение и анализ антропогенных объектов (машин, техники, строений), поскольку наличие поляризации говорит об их искусственном происхождении, в отличие от растительности, где отражённое излучение, как правило, не поляризовано.

В настоящее время главными наблюдаемыми тенденциями при разработке гиперспектральной аппаратуры являются миниатюризация, использование МЭМС оптикоэлектронных схем и оптико-волоконных связей между функциональными блоками и специализация гиперспектральной аппаратуры [50, 51]. Основой микроминиатюризации является промышленное освоение выпуска на базе МЭМС-технологий ключевых элементов ГСС — прецизионных спектроделительных устройств на основе интерферометров Фабри — Перо и Маха — Цендера. В настоящее время их предельное спектральное разрешение составляет величину менее 1 нм для длин волн видимого и ближнего инфракрасного диапазона [51]. При таком высоком разрешении в исходных данных чётко проявляются отдельные спектральные линии различных минералов, природных образований, искусственных материалов и атмосферной среды, а также полосы высокомолекулярных органических и неорганических соединений. Это позволяет специализировать ГС на получение спектральных характеристик объектов и фонов с высоким разрешением и ограничением по числу спектральных полос для решения различных прикладных задач.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по проекту № 124041700103-1 государственного задания ИАиЭ СО РАН на 2024–2026 гг.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Кринов Е. Л. Спектральная отражательная способность природных образований: Монография / Под. ред. К. В. Чибисова. М., Ленинград: Изд-во Акад. наук СССР, 1947. 272 с.
- 2. Погорельский С. Л., Макарецкий Е. А., Понятский В. М. и др. Результаты экспериментального исследования спектров материалов и сложных фонов // Изв. ТулГУ. Сер. Технические науки. 2020. Вып. 11. С. 85–91.
- 3. Von Fraunhofer J. Prismatic and Diffraction Spectra: Memoirs. Georgia: American Book Company, 1899. 67 p.
- 4. Липсон Г. Великие эксперименты в физике. М.: Мир, 1972. 215 с.
- 5. Льоцци М. История физики / Пер. с итал. Э. Л. Бурштейна. М.: Мир, 1970. 464 с.
- 6. Багбая И. Д. К истории дифракционной решётки // УФН. 1972. 108, № 2. С. 335–337.
- 7. Пейсахсон И. В. Оптика спектральных приборов // Оптический журнал. 2002. **69**, № 1. С. 21–35.
- Павлычева Н. К. Дифракционные решётки для спектральных приборов // Тез. докл. XVIII Междунар. конференции по голографии и прикладным оптическим технологиям (HOLOEXPO-2021). М.: Изд-во МГТУ, 2021. С. 182–195.
- Garini Y., Young I. T., McNamara G. Spectral imaging: Principles and applications // Cytometry Pt. A: Int. Soc. Analytical Cytology. 2006. 69A, Iss. 8. P. 735–747.
- ГОСТ 9411-91. Стекло оптическое цветное. Технические условия. Введ. 01.01.93. М.: Изд-во стандартов, 1992. 48 с.
- 11. Поздняков Г. А. Изучение способов фильтрации оптического излучения. Новосибирск: РИЦ НГУ, 2012. 37 с.
- Wyatt C. L. Infrared spectrometer: Liquid helium cooled rocketborne circular-variable filter // Appl. Opt. 1975. 14, Iss. 12. P. 3086–3091.
- 13. Tack N., Lambrechts A., Soussan P., Haspeslagh L. A compact, high-speed, and low-cost hyperspectral imager // Proc. SPIE. 2012. 8266. 82660Q.

- 14. Geelen B., Tack N., Lambrechts A. A snapshot multispectral imager with integrated tiled filters and optical duplication // Proc. SPIE. 2013. 8613. 861314.
- Пат. 2716454 РФ. Гиперспектрометр с повышенной спектральной разрешающей способностью /А. В. Гурылева, А. М. Хорохоров, А. Ф. Ширанков, В. В. Введенский. Опубл. 11.03.2020; Бюл. № 8.
- Розенберг Г. В. Многолучевая интерферометрия и интерференционные светофильтры // УФН. 1952. 47, № 2. С. 173–257.
- 17. Nguyen V. B., Губанова Л. А., Bui D. B. Особенности спектральных характеристик узкополосных светофильтров при наклонном падении пучка излучения // Письма в ЖТФ. 2019. 45, вып. 9. С. 10–12.
- Прабхат П., Андерсен Н., Эрдоган Т. Спектральная визуализация с использованием широко перестраиваемых тонкоплёночных фильтров VersaChrome // Фотоника. 2017. Вып. 7. С. 46–51. DOI: 10.22184/1993-7296.2017.67.7.46.51.
- Белокрылов М. Е., Оглезнев А. А., Константинов Ю. А. Исследование параметров перестраиваемого фильтра Фабри-Перо в условиях частотного сканирования в широком температурном диапазоне // Фотон-Экспресс. 2019. Спецвып. 6. С. 332–333. DOI: 10.24411/2308-6920-2019-16173.
- Скоморовский В. И., Кушталь Г. И., Лоптева Л. С. и др. Коммерческие узкополосные солнечные фильтры Фабри-Перо, методы и приборы для их исследований // Солнечно-земная физика. 2015. 1, № 3. С. 72–90.
- 21. Вальчак А., Новиновски-Крушельницки Э., Ярошевич Л. Р., Марциняк П. Фильтр Фабри-Перо с перестраиваемым пропусканием // Автометрия. 2003. **39**, № 5. С. 69–76.
- 22. Никулин Д. М. Разработка и исследование перестраиваемых микромеханических интерференционных оптоэлектронных приборов для спектрального анализа: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2012. 24 с.
- Каманина Н. В. Электрооптические системы на основе жидких кристаллов и фуллеренов — перспективные материалы наноэлектроники. Свойства и области применения. СП-б: Ун-т ИТМО, 2008. 137 с.
- 24. Коншина Е. А. Оптика жидкокристаллических сред. СП-б: Ун-т ИТМО, 2012. 99 с.
- 25. Казак А. А., Толстик А. Л., Мельникова Е. А. Поляризационный фильтр Лио на основе управляемых жидкокристаллических элементов // Квантовая электроника. Матер. IX Междунар. науч.-техн. конф. Минск: Изд-во БГУ, 2013. С. 55.
- 26. Спектрометры на базе жидкокристаллических перестраиваемых фильтров. URL: https://studexpo.net/1269348/fizika/spektrometry\_baze\_zhidko\_kristallicheskih\_perestraivaemyh\_filtrov?ysclid=lv21q8bht5597826979 (дата обращения: 16.04.2024).
- 27. Агаев Ф. Г., Исмаилов К. Х., Алиева Г. В. и др. Исследование чувствительности гиперспектральных солнечных фотометров со встроенными жидкокристаллическими фильтрами // Изв. ЮЗГУ. Сер. Техника и технологии. 2016. № 1. С. 49–54.
- Miller P. J. Use of Tunable Liquid Crystal Filters to Link Radiometric and Photometric Standards // Metrologia. 1991. 28, N 3. P. 145–149.
- Хегд Г. Использование жидкокристаллического дисплея в качестве спектрального селектора в спектрометрах видимого диапазона // Журнал технической физики. 2010. 80, вып. 10. С. 83–88.
- Жидкокристаллические перестраиваемые фильтры Thorlabs с регулировкой полосы пропускания для видимого диапазона. URL: https://azimp.ru/news/tech/51604/ (дата обращения: 16.04.2024).
- 31. Liquid Crystal Tunable Filters Market-Global Industry Analysis and Forecast 2023–2029. URL: https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-liquid-crystal-tunable-filters-market/34736 (дата обращения: 16.04.2024).

- 32. VariSpec Liquid Crystal Tunable Filters. URL: https://www.photonics.com/Products/ VariSpec\_Liquid\_Crystal\_Tunable\_Filters/pr27133 (дата обращения: 16.04.2024).
- Pang Y., Zhang K., Lang L. Review of acousto-optic spectral systems and applications // Sec. Opt. Photon. 2022. 10. DOI: 10.3389/fphy.2022.1102996.
- Chang I. C. Noncollinear acousto-optic filter with large angular aperture // Appl. Phys. Lett. 1974. 25, Iss. 7. P. 370–372.
- Колесников А. И. Современные материалы для акустооптических устройств на объёмных волнах // Вестн. ТвГУ. Сер. Физика. 2011. Вып. 15. С. 67–85.
- 36. Мазур М. М., Пожар В. Э. Спектрометры на акустооптических фильтрах // Измерительная техника. 2015. № 9. С. 29–33.
- Shi L., Zhang C., Wang H., Yuan J. Hyperspectral Microimaging System Based on Double-Filtering Technology of Acousto-Optic Tunable Filter and Its Image Analysis // Laser & Optoelectron. Progress. 2019. 55, Iss. 3. DOI: 10.3788/LOP55.032303.
- 38. Мартынов Г. Н. Пространственно-спектральные функции пропускания акустооптических фильтров в задачах гиперспектральной съёмки: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2022. 102 с.
- Glenar D. A., Hillman J. J., Saif B., Bergstralh J. Acousto-optic imaging spectropolarimetry for remote sensing // Appl. Opt. 1994. 33, Iss. 31. P. 7412–7424.
- Gupta N., Fell Jr N. F. A compact collinear AOTF Raman spectrometer // Talanta. 1997.
  45, Iss. 2. P. 279–284.
- 41. Пожар В. Э. Методы акустооптической спектрометрии: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 2005. 23 с.
- 42. Перестраиваемые акустооптические фильтры. URL: https://sphotonics.ru/catalog/aotf/ (дата обращения: 16.04.2024).
- Слепов Н. Оптические мультиплексоры и демультиплексоры систем WDM // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2004. Вып. 8. С. 42–47.
- 44. Афанасьев В. М. Электрооптический модулятор по схеме интерферометра Маха Цендера // Прикладная фотоника. 2016. **3**, № 4. С. 341–369.
- Петров В. М., Агрузов П. М., Лебедев В. В. и др. Широкополосные интегральнооптические модуляторы: Достижения и перспективы развития // УФН. 2021. 191, № 7. С. 760–780.
- 46. Вольхин И. Л., Ажеганов А. С. Исследование интегрального электрооптического модулятора на основе интерферометра Маха — Цендера. Практикум. Пермь: Пермский гос. нац. исслед. ун-т., 2020. 23 с.
- 47. Интегральная оптика и модуляторы для специальных применений. URL: http://www.sphotonics.ru (дата обращения: 16.04.2024).
- 48. Афанасьев В. М., Пономарев Р. С. Электрооптические амплитудные модуляторы Маха — Цендера на основе ниобата лития, их модификации и форматы модуляции // Прикладная фотоника. 2017. 4, № 4. С. 337–359.
- 49. Shiweitong Science & Technology (SWT) Corp. A professional Optical Components manufacturer in China. URL: http://www.swt-oc.com (дата обращения: 16.04.2024).
- 50. XIMEA xiQ series Technical Manual. URL: https://www.manualslib.com/manual/1215119/ Ximea-Xiq-Series.html (дата обращения: 16.04.2024).
- Yang Z., Albrow-Owen T., Cai W., Hasan T. Miniaturization of optical spectrometers // Science. 2021. 371, N 6528. DOI: 10.1126/science.abe0722.

Поступила в редакцию 09.02.2024 После доработки 20.02.2024 Принята к публикации 17.04.2024