

Дифракционные решетки для спектральных приборов

Н. К. Павлычева

Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева —
КАИ, Казань, Россия

Кратко рассмотрены основные оптические характеристики дифракционных спектральных приборов и этапы совершенствования дифракционных решеток. Описаны основные типы дифракционных решеток, используемых в спектральных приборах: классические дифракционные решетки (плоские и вогнутые), голограммные дифракционные решетки, неклассические вогнутые дифракционные решетки с коррекцией аберраций. Дан обзор опубликованных в последние годы работ, посвященных усовершенствованию технологии объемно-фазовых решеток, разработке оригинальных оптических схем на их основе, а также новым типам дифракционных решеток.

Ключевые слова: спектральные приборы, нарезные дифракционные решетки, голограммные дифракционные решетки, вогнутые дифракционные решетки, аберрации, объемно-фазовые дифракционные решетки, гризмы.

Цитирование: Павлычева, Н. К. Дифракционные решетки для спектральных приборов / Н. К. Павлычева // НОЛОEXPO 2021 : XVIII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. — С. 182–195.

Введение

К спектральным приборам относят приборы, в которых тем или иным способом осуществляется разложение излучения на монохроматические составляющие, регистрация этих составляющих и измерение их интенсивности. Наиболее обширный класс таких приборов — дифракционные спектральные приборы, в которых разложение света производится с помощью дифракционных решеток.

Спектральные приборы используют практически во всех областях научной, производственной и хозяйственной деятельности человека. Обширной областью применения спектральных приборов является спектральный анализ. Задачей спектрального анализа является определение химического состава пробы по наличию определенных спектральных линий. Эмиссионный анализ позволяет проводить исследование химического состава вещества по спектру его излучения. Спектры излучения получают при высокой температуре с использованием дугового, искрового или импульсного разряда в воздухе или инертном газе. Абсорбционный анализ позволяет проводить исследование химического состава вещества по спектрам поглощения. Пучок света от источника пропускают через исследуемое вещество, при этом часть энергии будет поглощаться, в результате чего в спектре появятся линии поглощения. При анализе по спектрам комбинационного рассеяния исследуются спектры рассеяния монохроматического света при взаимодействии излучения с молекулами вещества, при котором в спектре наблюдаются, кроме линий, характеризующих падающий свет, дополнитель-

ные линии-спутники, сопровождающие каждую из линий первичного света. По интенсивности этих дополнительных линий можно судить о частотах собственных колебаний молекулы. При флуоресцентном анализе проводятся исследования на длине волны флуоресценции, которая отличается от длины волны возбуждающего света. И это далеко не полный список задач, решаемых с помощью спектральных приборов.

1. Спектральные приборы

По методу регистрации и виду анализа различают: спектрографы, монохроматоры, спектроскопы, стилоскопы, стилометр, спектрометры, полихроматоры, квантометры, спектрофотометры, атомно-эмиссионные спектроанализаторы, атомно-абсорбционные спектрофотометры, спектрофлуориметры. Приборы этих классов делятся на группы по основным техническим характеристикам: по спектральному диапазону, по дисперсии, по светосиле, по характеру оптики. Разнообразие задач, решаемых с помощью спектральных приборов, приводит к разнообразию требований к их оптическим характеристикам. Так, при исследовании спектров комбинационного рассеяния требуются спектральные приборы с большим относительным отверстием, большой дисперсией и низким уровнем рассеянного спектра. Мобильные спектральные приборы должны обладать достаточно высокими характеристиками при небольших габаритах. Ряд задач требуют создания приборных рядов, включающих приборы различной степени сложности.

Особенностью спектральных приборов является наличие в них диспергирующего устройства, которое осуществляет разложение излучения на монохроматические составляющие. Благодаря наличию диспергирующего устройства ось симметрии в спектральном приборе отсутствует, а плоскость симметрии может быть только одна. Объект, как правило, представляет собой узкую щель, и назначение оптической системы состоит в пространственном разделении монохроматических изображений входной щели. Из-за отмеченной особенности спектральные приборы имеют ряд специфических оптических характеристик, к которым относятся угловая дисперсия, линейная дисперсия, обратная линейная дисперсия, меридиональное увеличение, спектральный предел разрешения [1, 2].

По оптической схеме различают монохроматоры — приборы, выделяющие узкий участок спектра, и спектрографы — приборы, выделяющие протяженный участок спектра. В качестве диспергирующего устройства могут быть использованы спектральные призмы или дифракционные решетки. Как отмечается в обзорной работе [3], до середины прошлого столетия роль диспергирующих устройств играли, в основном, призмы и призмные системы, однако в настоящее время призмы применяются в спектральных приборах лишь в качестве вспомогательных диспергирующих элементов. В большинстве случаев в качестве диспергирующего устройства в спектральных приборах используют дифракционные решетки.

2. Классические дифракционные решетки

Первая дифракционная решетка была изготовлена в 1785 г. американским астрономом Д. Риттенхаузом [4]. Однако первым ученым, проводившим эксперименты по дифракции

света на дифракционных решетках, был Й. Фраунгофер (1821 г.). В 1882 г. дифракционные решетки были усовершенствованы Роуландом, использовавшим для их изготовления делительную машину и создавшим вогнутую дифракционную решетку. Несовершенство делительных машин, служащих для нарезания дифракционных решеток, приводило к появлению ложных спектральных линий, называемых «духами» [5]. В 1960-х и 1970-х годах появились делительные машины, в которых ход винта контролировался с помощью интерферометра, благодаря чему от «духов» удалось избавиться. Важным этапом в развитии диспергирующих элементов явилось создание Р. Вудом отражательных решеток с определенным профилем штриха (профилированных решеток), что позволило концентрировать энергию в заданном порядке спектра. Большую роль в промышленном использовании дифракционных решеток сыграло развитие технологии копирования, позволившее значительно снизить их стоимость.

2.1. Плоские нарезные дифракционные решетки

Плоская дифракционная решетка представляет собой пластинку, на которую нанесен ряд параллельных равноотстоящих штрихов. Различают отражательные и пропускающие или прозрачные дифракционные решетки. Нарезные пропускающие решетки почти не находят применения в современном спектральном приборостроении, в то время как отражательные дифракционные решетки являются основным видом диспергирующих элементов современных спектральных приборов.

Угол φ падения лучей на отражательную дифракционную решетку и углы дифракции φ' связаны соотношением, называемым основным уравнением дифракционной решетки.

$$\sin \varphi + \sin \varphi' = k\lambda N, \quad (1)$$

где k — порядок дифракционного спектра, λ — рабочая длина волны, N — число штрихов, приходящихся на один миллиметр поверхности решетки; обратная числу штрихов величина, обозначаемая обычно e , называется постоянной или шагом дифракционной решетки.

Теоретическая разрешающая способность «по Рэлею» для дифракционной решетки выражается следующим образом.

$$R_0 = km, \quad (2)$$

где m — общее число штрихов дифракционной решетки.

Отношение лучистого потока длины волны λ , направляемого решеткой в главный максимум k -того порядка спектра, к лучистому потоку этой длины волны, падающему на решетку, называют эффективностью решетки $\rho_k(\lambda)$.

2.2. Профилированные решетки

Диспергирующие свойства дифракционной решетки определяются уравнением (1), а эффективность решетки зависит от профиля штрихов, т. е. формы канавок, образуемых резцом на заготовке дифракционной решетки. Часть энергии излучения, дифрагированного решеткой, отражается от нее, как от зеркала в нулевой порядок, другая часть распределяется между спектрами различных порядков. Решетки, изготовленные на современных делительных машинах,



Рис. 1. Профили штрихов дифракционных решеток

имеют, как правило, треугольный (пилообразный) профиль штрихов. Такие решетки называют профилированными дифракционными решетками, решетками «с блеском» или рельефно-фазовыми решетками (рис. 1а). На рис. 1а введены следующие обозначения: N — нормаль к плоскости заготовки, N' — нормаль к зеркальному элементу решетки, e — постоянная дифракционной решетки, b — ширина зеркальной площадки.

Профилированная решетка состоит из одинаковых зеркальных площадок шириной b , плоскости которых параллельны друг другу и образуют угол γ с общей касательной плоскостью всех зеркальных элементов. Максимальное значение эффективности дифракционной решетки принимает, когда направление дифрагированного пучка совпадает с направлением лучей, зеркально отраженных от рабочих площадок решетки. Длина волны $\lambda_{k,0}$, для которой выполняется это условие в спектре k -того порядка, называется длиной волны блеска. Профилированные дифракционные решетки для ИК области называются эшелеттами. Эшелетты характеризуются низкими значениями угла блеска и частоты штрихов, рабочей в эшелетте является широкая грань ступеньки. Решетки, предназначенные для работы в высших порядках, у которых рабочей является узкая грань ступеньки, называют эшелле. Углы γ у эшелле бывают 60° и более. Эшелле обеспечивают дисперсию и разрешающую силу, которые не могут быть достигнуты при работе решетки в низких порядках спектра.

2.3. Ламинарные решетки

Другим возможным профилем решетки является ламинарный профиль (рис. 1б). Ламинарные решетки определяются не только расстоянием между штрихами a и глубиной профиля h , но и отношением a/b [6]. Оптимизируя отношение a/b , можно значительно увеличить дифракционную эффективность. В частности, если высота шага равна $h = \lambda/4$, то нулевой порядок исчезает, когда $a/b = 1$. В результате получается максимальная интенсивность в первом порядке для длины волны блеска $\lambda = 4h$. Кроме того, ламинарная решетка обычно вызывает значительно меньше рассеянного света, чем профилированные решетки. Это делает ламинарные решетки особенно подходящими для длин волн УФ-диапазона и ниже.

2.4. Вогнутые нарезные дифракционные решетки

Вогнутая дифракционная решетка обладает свойствами как диспергирующего, так и фокусирующего элементов, и поэтому может являться единственным оптическим элементом спектрального прибора. Если центр входной щели A находится на расстоянии $d = r \cos \varphi$ от вершины решетки, то для любых φ и φ' точки A и A' лежат на окружности, проходящей через вершину решетки O , с центром на оси X и диаметром, равным радиусу кривизны решетки r — круге Роуланда. На круге Роуланда, кроме дефокусировки, отсутствует меридиональная кома, однако астигматизм достигает значительной величины. Для устранения астигматизма присущего схемам с вогнутыми решетками используют решетки с сферическими поверхностями, имеющими различные радиусы кривизны r_m и r_s в меридиональном и сагиттальном сечениях.

В спектрографах с вогнутыми решетками чаще всего используются схемы с фокусировкой на круге Роуланда. Из этих схем наибольшими возможностями обладает схема Пашена — Рунге, в которой на круге Роуланда размещены щель, решетка и кассета, механически не связанные друг с другом. На основе вогнутых решеток было предложено ряд схем монохроматоров, в большинстве из них при сканировании спектра необходимо осуществлять как поступательное, так и вращательное движения, что делает очень сложной их конструкцию. Наибольшее распространение получила схема Сейя — Намиоки, в которой уменьшение величины остаточной дефокусировки достигается соответствующим выбором конструктивных параметров схемы: $d'_0 = d = r \cos \theta / 2$ ($\theta \approx 70^\circ$). Основным преимуществом схемы Сейя — Намиока является простота конструкции, недостатком является большой астигматизм схемы.

3. Голограммные дифракционные решетки

Резкий скачок в развитии технологии дифракционных решеток произошел в 70-е годы прошлого столетия, когда фирма Jobin Yvon (Франция, в настоящее время входит в группу компаний HORIBA) освоила промышленный выпуск голограммных дифракционных решеток. Идея использования света для изготовления дифракционных решеток была предложена Майкельсоном в 1915 г. Однако изготовление высококачественных дифракционных решеток стало возможным только с тех пор, как появились фоторезистивные покрытия высокого разрешения и лазеры.

Голограммная дифракционная решетка (ГДР) представляет собой зарегистрированную на светочувствительном материале интерференционную картину, образованную двумя когерентными пучками света. Когерентные пучки формируют, разделяя светоделительными зеркалами излучение лазера. Для получения отражательной решетки на её поверхность наносят слой металла. Форма штрихов и расстояние между ними определяются положением источников излучения относительно заготовки и длиной волны излучения λ_0 . Частота штрихов N связана с углами голографирования соотношением

$$\frac{1}{N} = \frac{\lambda_0}{\sin i_1 - \sin i_2}. \quad (3)$$

Для спектроскопистов наибольший интерес представляют следующие характеристики дифракционных решеток: разрешение, частота штрихов, уровень рассеянного света и эффективность. Исследования, проведенные в 70–80-е годы прошлого столетия, показали значительное преимущество голограммных дифракционных решеток перед нарезными [7]. Уровень рассеянного ГДР света на порядок ниже, чем у механически нарезанных решеток. Теоретическое разрешение решетки, используемой в первом порядке, определяется согласно соотношению (2) полным числом штрихов решетки. Размер решеток лимитируется формирующей когерентные пучки оптикой и мощностью лазера. Уже те годы были получены ГДР, имеющие 6000 штр/мм и диаметром до 600 мм, в то время как нарезные решетки с шагом 2400 штр/мм являются и в наше время уникальными, а их стандартные размеры, в основном, ограничены 200×200 мм². Реальное разрешение ГДР близко к дифракционному пределу. Эффективность голограммной дифракционной решетки определяется формой и глубиной штрихов. Как правило, ГДР имеют симметричный профиль штрихов (рис. 2в), поэтому их эффективность несколько ниже, чем у нарезных решеток, но более однородна по спектральному диапазону (амплитудные решетки). Для получения более высокой концентрации энергии в заданном диапазоне необходимо получение штрихов ступенчатого профиля, что достигается либо применением технологии ионного травления, либо использованием записи во встречных пучках. Широкий диапазон профилей штрихов позволяет получить использование нелинейностей характерной кривой фоторезиста и обработка предварительной экспозицией, стоячими волнами и др.: синусоидальный, ламинарный, пилообразный [6].

Благодаря этим преимуществам, голограммные решетки практически вытеснили свои нарезные аналоги.

Современные приборы с плоскими дифракционными решетками, как правило, построены по схемам Черни — Турнера и Эберта — Фасти [3]. В этих схемах в качестве объективов используются вогнутые зеркала, входная щель находится в фокусе коллимирующего зеркала, решетка установлена в параллельном ходе. Основное отличие — схема Черни — Турнера применяется в монохроматорах, схема Эберта — Фасти — в спектрографах, решетка в этой схеме устанавливается на расстоянии от камерного (фокусирующего) зеркала на 0,85 его фокусного расстояния, что обеспечивает плоское поле. В спектральных приборах высокого разрешения применяют решетки-эшелле, для устранения наложения спектров различных порядков, в основном, используют спектральную призму, направление дисперсии которой перпендикулярно дисперсии решетки (схемы со скрещенной дисперсией). Из оптических схем на основе вогнутых отражательных решеток наиболее востребована схема Пашена — Рунге [3].

4. Неклассические вогнутые дифракционные решетки

4.1. Вогнутые голограммные дифракционные решетки с коррекцией аберраций

Наиболее перспективной для разработчиков спектральных приборов оказалась возможность менять фокусирующие свойства вогнутых решеток благодаря соответствующему выбору параметров голографирования. Появились новые, более простые оптические системы:

- монохроматоры, состоящие только из неподвижных входных и выходных щелей и решетки, вращающейся вокруг своей оси (монохроматор с простым вращением);

- спектрометры полихроматорного типа без подвижных частей, с неподвижной решеткой

и плоская диодная решетка или матрица, охватывающая все интересующие длины волн;

- спектрографы с фиксированной входной щелью, фиксированной решеткой и плоской диодной решеткой или матрицей, охватывающие весь рабочий спектральный диапазон (спектрографы с плоским полем).

В соответствии с классификацией, предложенной фирмой Jobin-Yvon, вогнутые голограммные дифракционные решетки (ВГДР) подразделялись на 4 типа [8].

Тип I — ВГДР с эквидистантными прямыми штрихами, по своим аберрационным свойствам не отличающиеся от обычной сферической решетки. Такие решетки получаются, если освещать заготовку решетки двумя параллельными пучками лучей, симметричных относительно нормали к заготовке.

Тип II — ВГДР для работы в установках на круге Роуланда, при их записи оба источника также должны находиться на круге Роуланда. У таких решетках, как и у нарезных, на круге Роуланда отсутствуют дефокусировка и меридиональная кома. При удовлетворении определенного соотношения для длины волны λ полностью исправляется астигматизм [1].

Тип III — если один из источников голографирования находится в центре кривизны, а точки A и A' гармонически сопряжены, т. е. $OA \cdot OA' = r^2$, решетки для 2-х длин волн дают стигматичные изображения входной щели при относительных отверстиях до 1:1. Сагиттальные лучи фокусируются на прямой OA', а меридиональные — на сложной кривой. В точках пересечения фокалей изображение щели стигматично, но быстро ухудшается при удалении от этих точек.

Все остальные варианты голограммных решеток были отнесены к типу IV. Однако достаточно быстро в отдельные типы выделились решетки для работы в монохроматорах с простым вращением и в спектрографах с плоским полем.

Предложено достаточно большое число методов оптимизации параметров ВГДР, работающих в схемах монохроматоров с простым вращением [9]. Оптимизация достигается за счет соответствующего выбора положения входной и выходной щелей и параметров записи решетки. Возможна минимизация дефокусировки, астигматизма и меридиональной комы [10] либо минимизация дефокусировки и исправление астигматизма и меридиональной или са-

гиттальной комы для средней длины волны [11, 12]. Предложены методы расчета ВГДР, улучшающих абберрационные характеристики монохроматоров Сейя — Намиока [13, 14]. Дополнительный коррекционный параметр дает использование асферических подложек. Так использование тороидальной подложки позволило разработать монохроматор с простым вращением для вакуумной ультрафиолетовой области (15–150 нм) с минимизацией дефокусировки, астигматизма и других абберраций в рабочем спектральном диапазоне [15].

Интерес к схемам спектрографов с плоским полем резко вырос в связи с использованием в качестве приемников излучения фотодиодных и ПЗС линеек и матриц. В спектрографах с такими приемниками поверхность изображения должна быть плоской.

По методике фирмы Jobin-Yvon, предложенной для спектрографов с плоским полем, оптимизация схемы достигается путём многократных расчётов на ЭВМ [16], в ходе которых производится подбор параметров голографирования d_1, i_1, d_2, i_2 , а также последовательное изменение угла между падающими и дифрагированными лучами ($\varphi' - \varphi$) и угла наклона плоскости фокусировки спектра. В результате такой оптимизации для трех длин волн минимизируются дефокусировка, астигматизм и меридиональная кома.

Нами предложена методика расчета спектрографа с вогнутой голограммной дифракционной решеткой, имеющей плоскую поверхность фокусировки спектра, перпендикулярную лучу средней длины волны спектрального диапазона, дифрагированному в вершине решетки [17, 18]. В этом случае, схема более компактна, и дисперсия практически не меняется по спектру.

Еще большими коррекционными возможностями обладают ВГДР, при записи которых используются негомоцентрические пучки. Теория таких решеток и варианты их записи даны в работе [18]. При записи решеток в интерферирующие пучки вводятся либо цилиндрические объективы, либо цилиндрические зеркала, либо сферические зеркала с наклонным падением на них пучков, в результате фокусы интерферирующих пучков в меридиональной и сагиттальной плоскостях находятся на разном расстоянии от подложки. Это позволяет исправить, дополнительно к дефокусировке, астигматизму и меридиональной коме, сагиттальную кому и сферическую абберрацию 3-го порядка. Пальмер назвал ВГДР, получаемые интерференцией двух волновых фронтов, отраженных от вогнутых зеркал, решетками 2-го поколения [19]. Предложены решетки 3-го поколения, которые записываются при помощи двух волновых фронтов, получаемых при дифракции на двух ВГДР [20]. У таких решеток по крайней мере в одной точке спектра исправляются астигматизм, меридиональная и сагиттальная кома и сферическая абберрация. В других работах этого автора [21, 22] изложена теория ВГДР, при записи которых в один из интерферирующих пучков вводится зеркало, деформированное, подобно пластинке Шмидта, так, что исправляются абберрации решетки вплоть до 7-го порядка. Оригинальные методы записи ВГДР во встречных пучках предложены в работах [23–24]. При двухступенчатом методе вначале записывается точечными источниками вспомогательная решетка, абберрации которой исправляются для длины волны лазера, которым будет записана

основная решетка. При записи основной решетки вспомогательная решетка служит объективом осветителя. В другом методе используется интерференция пучков от одного источника. Первый пучок отражается от сферического зеркала, проходит через подложку, отражается от 2-го зеркала, отраженный пучок интерферирует с первым пучком. Запись ВГДР встречными пучками позволяет не только улучшить абберационные характеристики, но и получить ступенчатый профиль штриха. Однако применение таких способов записи требует большой точности обработки нерабочей стороны заготовки и высокой однородности ее материала.

Возможность исправления астигматизма ВГДР одновременно с плоской поверхностью фокусировки позволило создать изображающие дифракционные решетки [8]. При использовании в спектральном приборе ПЗС-матрицы с помощью такой решетки можно сфокусировать несколько источников на входной щели и независимо оценить спектр от каждого источника.

Появление ВГДР с коррекцией aberrаций послужило толчком к созданию и совершенствованию неклассических нарезных дифракционных решеток.

4.2. Вогнутые нарезные неклассические дифракционные решетки

Вогнутая нарезная неклассическая дифракционная решетка (ВННДР), в общем случае, имеет криволинейные штрихи и переменное расстояние между ними. Производство таких решеток было освоено в СССР [25] и Японии [26] еще в 80-х годах прошлого столетия. Параметры записи решетки и параметры нарезки связаны между собой определенными соотношениями [27], поэтому, в принципе, для любой голограммной дифракционной решетки можно рассчитать нарезной аналог и наоборот. Поскольку параметры записи голограммной дифракционной решетки и ее нарезного аналога связаны, выбор типа неклассической решетки при разработке методов расчета оптических схем не играет принципиальной роли.

Кроме того, поскольку исключительно низкий уровень рассеянного света не всегда требуется, а хорошая технология копирования делает тип производства менее важным, в настоящее время для ряда задач используются, как голограммные, так и механически нарезанные решетки. Например, получение длинных плоских эшелеттных решеток с блеском, имеющих 60 штрихами на мм, чрезвычайно сложно интерференционным способом, но легко выполняется на делительной машине.

Для изготовления нарезных светосильных и цилиндрических дифракционных решеток предложено новое техническое решение — делительные машины маятникового типа, позволяющие решить задачу получения дифракционной структуры на крутой поверхности с большой стрелкой прогиба при сохранении высокой концентрации энергии в рабочем порядке дифракции и умеренного уровня рассеянного света [28].

В настоящее время дифракционные решетки описанных выше типов промышленно выпускаются как зарубежными (компания Carl Zeiss Microscopy GmbH [6], корпорация HORIBA

Jobin Yvon Ltd. [8], компания Shimadzu Corporation [29]), так и отечественными предприятиями (Компания «ХолоГрэйт» [30], АО «НПО ГИПО» [31]), полностью обеспечивая потребности производителей серийных спектральных приборов.

5. Объемно-фазовые дифракционные решетки

Объемно-фазовая дифракционная решетка представляет собой структуру с периодическим изменением показателя преломления материала. Максимум эффективности дифракции на такой объемной решетке описывается условием Брэгга.

$$k\lambda = en \sin \varphi_{Br}, \quad (4)$$

где n — показатель преломления материала решетки, φ_{Br} — угол падения, измеряемый в среде. Объемно-фазовые решетки получают голографическим способом, регистрируя на фоточувствительном материале интерференционную картину, полученную от двух когерентных источников излучения. Материалы для объемной голографии [32] позволяют записывать структуры с пространственной частотой до 6000 штр/мм. Теоретическое значение максимума дифракционной эффективности достигает 100%. Объемно-фазовые дифракционные решетки обладают высокой угловой и спектральной селективностью, т. е. их дифракционная эффективность сильно зависит от угла падения излучения и его спектрального состава. Это свойство препятствует получению равномерно высокой эффективности в широком спектральном диапазоне, однако в сравнительно узком спектральном диапазоне при умеренно высоком спектральном разрешении с объемно-фазовыми решетками удается достичь высокого пропускания [33]. Узкий одновременно регистрируемый спектральный интервал, пожалуй, является основной причиной того, что в настоящее время этот тип решеток используется, преимущественно, в спектральных приборах, предназначенных для научных исследований. Однако активно ведутся исследования по расширению областей применения объемно-фазовых решеток — предлагаются новые схемные решения, новые материалы для записи и новые методы записи. Так, предложены оригинальные оптические схемы спектрографов на основе каскада пропускающих объемно-фазовых решеток [34] и с мультиплексированным диспергирующим устройством, состоящем из двух объемно-фазовых решеток [35]. Инновационное решение — запись многослойных мультиплексированных объемно-фазовых решеток — позволяет зарегистрировать несколько спектров в одном кадре [36]. Благодаря этому удается увеличить разрешение и одновременно регистрируемый спектральный диапазон, что позволяет астрономам значительно экономить свое рабочее время на телескопе. Ключевым моментом для реализации предложенных многослойных мультиплексированных объемно-фазовых решеток, по мнению авторов, является создание нового фотополимерного материала *Vaуfol Hx film*. Пленка *Vaуfol® HX* — светочувствительная фотополимерная пленка, которая может быть использована для изготовления отражающих и пропускающих объемно-фазовых голограмм [37]. Они выпускаются в промышленных масштабах и состоят как минимум из трехслойного стека: прозрачной пленочной подложки, светочувствительного фотополимера и защитной

пленки. Толщину фотополимерного слоя можно менять для регулировки необходимой угловой и спектральной брэгговской селективности.

Среди новых методов записи следует отметить сверхбыструю лазерную запись (ULI)-быстро развивающийся метод, который использует сфокусированные ультракороткие лазерные импульсы для локального изменения показателя преломления диэлектрических материалов в трехмерном пространстве. В работе [38] описана объемно-фазовая решетка с частоту 333 штр./мм, выполненная методом ULI в стекле из сульфида галлия и лантана (GLS). Полученная решетка имела дифракционную эффективность в первом порядка 71% при длине волны 633 нм, менее 5% интегрального рассеянного света и предназначалась для применения в астрономии (выдержала охлаждение до 20 К.)

6. Гризмы

Гризма — призма, имеющая пропускающую решетку на одной из своих поверхностей [39]. В редких случаях гризма может также иметь две решетки или криволинейные поверхности. Гризмы могут применяться в спектральном диапазоне от 115 нм до 30 мкм. В зависимости от материала призмы решетка либо копируется на поверхность призмы, либо нарезается непосредственно в материале призмы, либо изготавливается голографически (объемно-фазовые или рельефно-фазовые решетки) [40]. Гризмы используются для спектроскопии прямого обзора, например, в астрономии. Преимущество такого расположения заключается в том, что одна и та же камера может использоваться как для визуализации (без гризмы), так и для спектроскопии (с гризмой) без необходимости перемещения [35]. В работе [35] предложены спектрографы с мультиплексированным диспергирующим устройством, включающим две гризмы с объемно-фазовыми решетками, в которых достигнуто одновременное повышение угловой дисперсии, спектрального разрешения и пропускания оптической системы.

7. Скрещенные дифракционные решетки (cross-gratings)

В работе [41] представлена концепция и реализация компактного эшелле-спектрометра — cross-grating echelle spectrometer (CGES). Компактный эшелле-спектрометр CGES охватывает спектральный диапазон от 380 до 700 нм, обеспечивает спектральное разрешение ≈ 2 нм и предназначен для применения в полевых условиях, например, в сельском хозяйстве или геологии. Основным элементом спектрометра является скрещенная решетка, сочетающая основную решетку-эшелле, работающую в порядках дифракции от 5-го до 11-го, и наложенную на нее вспомогательную решетку, диспергирующую излучение в перпендикулярной плоскости. Представлены и обсуждены два альтернативных подхода к изготовлению скрещенной решетки (cross-gratings). Первый подход сочетает в себе литографию Талбота для основной решетки и интерференционную литографию для поперечно-диспергирующей структуры. В качестве второго подхода была применена прямая лазерная запись.

Заключение

Проведенный обзор позволил сделать следующие выводы.

К настоящему времени определились типовые схемы спектральных приборов широкого назначения и типы дифракционных решеток, которые в них используются. Несмотря на широкий круг задач, решаемых с помощью спектральных приборов, и разнообразие выпускаемых приборов, производители дифракционных решеток в полном объеме обеспечивают потребности массового производства.

Разработки последних лет проводятся в части создания новых типов дифракционных решеток, позволяющих реализовать требования к оригинальным спектральным приборам, предназначенным для решения частных исследовательских задач.

Список источников

- [1] **Пейсахсон, И. В.** Оптика спектральных приборов. — Л. : Машиностроение, 1975. — 312 с.
- [2] **Павлычева, Н. К.** Спектральные приборы с неклассическими дифракционными решетками. — Казань : Издательство КГТУ, 2003. — 198 с.
- [3] **Пейсахсон, И. В.** Оптика спектральных приборов на рубеже столетий // Оптический журнал. — 2002. — Том 69. — № 1. — С. 21–35.
- [4] **Багбая, И. Д.** [К истории дифракционной решётки](#) // Успехи физических наук. — 1972. — Том 108. — № 10. — С. 335–337.
- [5] **Тарасов, К. И.** Спектральные приборы. — Л. : Машиностроение, 1977. — 368 с.
- [6] Gratings / URL: www.zeiss.de/gratings.
- [7] **Pieuchard, G.** Properties of ruled and holographic gratings / G. Pieuchard, J. Flamand // Japanese Journal of Applied Physics. — 1975. — Vol. 14. — № 1. — P. 153–157.
- [8] Продукция — HORIBA / URL: www.horiba.com/ru/scientific/products/
- [9] **Пейсахсон, И. В.** Оптимизация параметров оптических систем спектральных приборов // Оптический журнал. — 1995. — № 12. — С. 3–11.
- [10] **Pouey, M.** [Desing of simple rotating stigmatic concave grating monochromators](#) // Applied Optics. — 1974. — Vol. 13. — P. 2739–2740.
- [11] **Пейсахсон, И. В.** Коррекция аберраций в симметричной схеме монохроматора с вогнутой голографической дифракционной решеткой / И. В. Пейсахсон, Н. Ю. Черняк // Оптика и спектроскопия. — 1983. — Том 55. — № 4. — С. 737–741.
- [12] **Пейсахсон, И. В.** Расчет оптимальных параметров монохроматора со сферическими голограммными дифракционными решетками / И. В. Пейсахсон, Л. Е. Левандовская // Оптика и спектроскопия. — 1991. — Том 71 — № 1. — С. 188–193.
- [13] **Noda, H.** [Design of holographic concave gratings for Seya-Namioka monochromators](#) / H. Noda, T. Namioka, M. Seya // Journal of the Optical Society of America. — 1974. — Vol. 64. — № 8. — P. 1043–1048.
- [14] **Singh, M.** Seya–Namioka monochromators theory and design of holographic concave grating / M. Singh, G. Reddy // Optik. — 1986. — Vol. 74. — № 4. — P. 142–153.
- [15] **Lepere, D.** Monochromateur a simple rotation du reseau, a reseau holographique sur support torique par l’ultraviolet lointain // Nouvelle Revue d’Optique. — 1975. — Vol. 6. — P. 173–178.
- [16] **Patent № 2334947 FR.** Spectrographe a champ plan pour un domaine spectral etendu, utilisant un reseau holographique concave / G. Passeran. — Publ. 1977.
- [17] **Павлычева, Н. К.** Расчет спектрографа с плоским полем на основе голографической решетки / Н. К. Павлычева // ОМП. — 1979. — № 7. — С. 15–16.
- [18] **Nazmееv, M.** New generation spectrographs / M. Nazmееv, N. Pavlycheva // Optical Engineering. — 1994. — Vol. 33. — №P. 2777–2782.

- [19] **Palmer, C.** [Theory of second-generation holographic diffraction gratings](#) // Journal of the Optical Society of America A. — 1989. — Vol. 6. — № 8. — P. 1175–1178.
- [20] **Duban, M.** [Third generation holographic Rowland mounting: fourth order theory](#) // Applied Optics. — 1999. — Vol. 38. — № 16. — P. 3443–3449.
- [21] **Duban, M.** [Theory of spherical holographic gratings recorded by use of a multimode deformable mirror](#) // Applied Optics. — 1998. — Vol. 37. — № 31. — P. 7209–7217.
- [22] **Duban, M.** [Recording high-dispersion spherical holographic gratings by use of a multimode deformable mirror](#) // Applied Optics. — 2000. — Vol. 39. — № 1. — P. 16–19.
- [23] **Sokolova, E.** Holographic diffraction gratings for flat-field spectrometers // Journal of Modern Optics. — 2000. — Vol. 47. — № 30. — P. 2377–2389.
- [24] **Соколова, Е. А.** Вогнутые дифракционные решетки, записанные во встречных пучках. // Оптический журнал. — 1999. — Том 66. — № 12. — С. 88–93.
- [25] **Герасимов, Ф. М.** Стигматические вогнутые решетки на сферических поверхностях, изготовленные механическим способом / Ф. М. Герасимов, Э. А. Яковлев // Оптика и спектроскопия. — 1979. — Том 46. — С. 1177–1182.
- [26] **Harada, T.** [Mechanically ruled aberration-corrected concave gratings](#) / T. Harada, T. Kita // Applied Optics. — 1980. — Vol. 19. — № 23. — P. 3787–3792.
- [27] **Бажанов, Ю. В.** Соотношение между параметрами нарезных и голографических вогнутых дифракционных решеток / Ю. В. Бажанов // ОМП. — 1979. — № 10. — С. 1–2.
- [28] **Мельников, А. Н.** Технологии формообразования светосильных дифракционных оптических элементов на основе использования делительной техники маятникового типа / А. Н. Мельников // Фотоника. — 2019. — Том 13. — № 5. — С. 468–475.
- [29] OPTICAL DEVICES : SHIMADZU CORPORATION / URL: www.shimadzu.com/opt
- [30] Голографические защитные решения от компании «ХолоГрэйт» / URL: www.holograte.com
- [31] Швабе — О компании — Организации «Швабе» / URL: <http://shvabe.com/about/company/gosudarstvennyy-institut-prikladnoy-optiki/produktsiya-gipo>
- [32] **Малов, А. Н.** Голографические регистрирующие среды на основе дихромированного желатина: супрамолекулярный дизайн и динамика записи / А. Н. Малов, А. В. Неупокоева. — Иркутск : ИВВА-ИУ (ВИ), 2006. — 345 с.
- [33] Andor HoloSpec / Oxford Instruments / URL: <https://andor.oxinst.com/products/holospec-imagingspectrograph/holospec> (06.10.2018).
- [34] **Muslimov, E. R.** [Design and optimization of a dispersive unit based on cascaded volume phase holographic gratings](#) / E. R. Muslimov, G. G. Valyvin, S. N. Fabrikas, N. K. Pavlycheva // Holography: Advances and Modern Trends V : Proceedings of SPIE. — 2017. — Vol. 10233 — P. 102331L.
- [35] **Zanutta, A.** [Spectral multiplexed VPHG based on photopolymers: the first application on a spectrograph](#) / A. Zanutta, E. Muslimov, G. Valyavin, S. Fabrika, A. Bianco // Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation III : Proceedings of SPIE. — 2018. — Vol. 10706 — P. 1070639.
- [36] **Zanutta, A.** Spectral multiplexing using stacked VPHGs — Part I / A. Zanutta, M. Landoni, M. Riva, A. Bianco // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — arXiv preprint arXiv:1704.08150. — 2017.
- [37] **Bruder, F.-K.** [Expanding the Property Profile of Bayfol HX® Films Towards NIR Recording and Ultra-High Index Modulation](#) / F.-K. Bruder, J. Frank, S. Hansen, A. Lorenz, C. Manecke, R. Meisenheimera, J. Millsb, L. Pitzera, I. Pochorovskia, T. Röllea // Optical Architectures for Displays and Sensing in Augmented, Virtual, and Mixed Reality (AR, VR, MR) II : Proceedings of SPIE. — 2021. — Vol. 11765. — P. 117650J.

- [38] **Lee, D.** [Performance of volume phase gratings manufactured using ultrafast laser inscription](#) / D. Lee, R. R. Thomson, C. R. Cunninghama // Modern Technologies in Space- and Ground-based Telescopes and Instrumentation II. : Proceedings of SPIE. — 2012. — Vol. 8450. — P. 84502X.
- [39] **Patent № 5652681 US.** Grism (Grating-Prism Combination) / C. W. Chen, E. W. Gossett. — Publ. 29.07.1997.
- [40] **Мельников А. Н.** Неклассические дифракционные решетки на выставке Laser World of Photonics 2019 / А. Н. Мельников, Н. Л. Истомина // Фотоника. — Том 13. — № 7. — 2019. — P. 614–618.
- [42] **Thomae D.** [Compact echelle spectrometer employing a cross-grating](#) / D. Thomae, T. Honle, M. Kraus, V. Bagusat, A. Deparnay, R. Bruning, R. Brunner // Applied Optics. — 2018. — Vol. 57. — No 25. — P. 7109–7116.