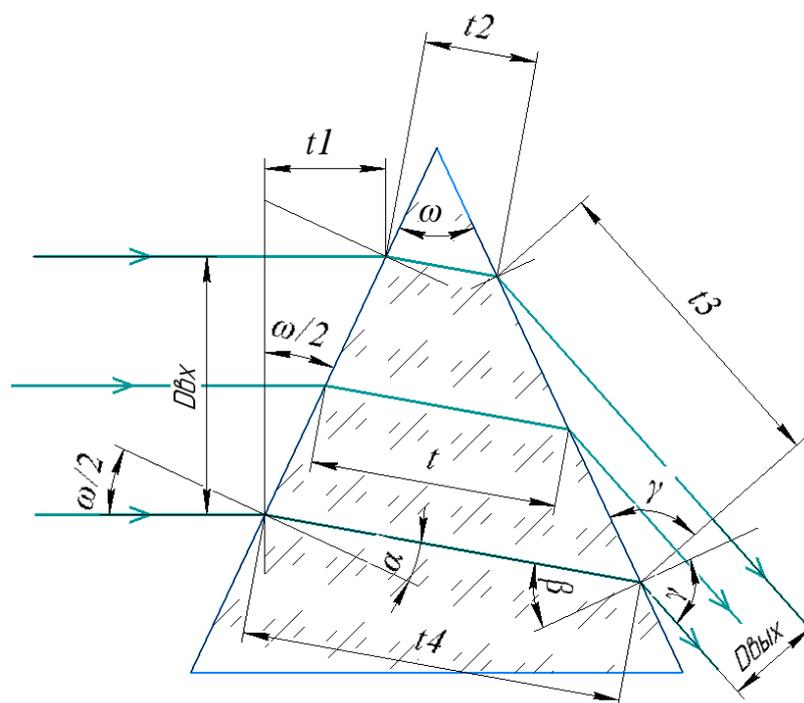


**Д.Е. Кукушкин, Д.А. Сазоненко, А.В. Бахолдин,
В.М. Красавцев
МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ
СИСТЕМ.
ЧАСТЬ ПЕРВАЯ**



Санкт-Петербург
2021

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**Д.Е. Кукушкин, Д.А. Сазоненко, А.В. Бахолдин,
В.М. Красавцев**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ
СИСТЕМ.
ЧАСТЬ ПЕРВАЯ**

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлению подготовки 12.03.02 ОпTOTехника
в качестве Учебно-методического пособия для реализации основных
профессиональных образовательных программ высшего образования
бакалавриата

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург
2021

Кукушкин Д.Е., Сазоненко Д.А., Бахолдин А.В., Красавцев В.М.
Моделирование спектральных систем. Часть первая– СПб: Университет ИТМО,
2021. – 99 с.

Рецензент(ы):

Маргарянц Никита Борисович, кандидат технических наук, доцент (квалификационная категория "ординарный доцент") инженерно-исследовательского факультета, Университета ИТМО.

Учебное пособие предназначено для студентов, изучающих дисциплину «Спектральные и поляризационные оптические системы». Также пособие можно использовать при изучении дисциплин «Методы спектроскопии / Methods of spectroscopy», «Фотоника», «Моделирование формирования оптического изображения / Optical image modeling» и при написании бакалаврских и магистерских работ по специализации «Прикладная оптика».

В учебном пособии рассмотрены основные положения теории расчета спектральных систем, приведены способы моделирования различных диспергирующих элементов и спектральных систем в среде Zemax OpticStudio. Показана эффективность использования программы Zemax OpticStudio при оценке основных характеристик спектральных систем. В качестве иллюстраций приведены принципиальные оптические схемы, конструктивные параметры рассчитанных систем, диаграммы пятен рассеяния и схематичные изображения спектра в плоскости приемника.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2021

© Кукушкин Д.Е., Сазоненко Д.А., Бахолдин А.В., Красавцев В.М., 2021

Содержание

ПРЕДИСЛОВИЕ	4
Лабораторная работа №1 «Изучение свойств дисперсионной призмы, моделирование оптической системы призмного монохроматора».....	8
Лабораторная работа №2 «Изучение свойств плоской дифракционной решетки, моделирование оптической системы монохроматора на основе вогнутой отражательной решетки»	27
Лабораторная работа №3 «Моделирование монохроматора на основе Z-образной вертикально симметричной схемы»	40
Расчет оптической системы монохроматора построенного по симметричной Z-образной схеме.....	47
Расчет оптической системы монохроматора по схеме Черни-Тернера.	57
Лабораторная работа №4 «Изучение свойств плоской отражательной эшелле-решетки, моделирование и расчет автоколлимационной схемы спектрометра».....	65
Лабораторная работа №5 «Моделирование спектрометра по автоколлимационной схеме Литтрова»	72
Лабораторная работа №6 «Изучение свойств, моделирование и расчет одиночной и составной призмы»	84

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время спектральные приборы широко применяются в научных исследованиях и промышленности. Спектральный анализ излучения различных объектов является одним из основных способов изучения их физических характеристик.

Спектральные приборы предназначены для осуществления пространственного разделения электромагнитного излучения на его монохроматические компоненты с последующей регистрацией либо отдельных компонентов, либо широкого их диапазона [1]. Совокупность монохроматических компонентов, подлежащих регистрации, принято называть *спектром*. Понятие спектр определяет распределение энергии излучения по длинам волн в некотором спектральном диапазоне [1, 2].

Существует множество способов разложения электромагнитного излучения в спектр. Приведем основные из них [2]:

– пространственное разложение падающего излучения в спектр с последующей регистрацией выделенных участков. К данной группе относятся спектральные системы, в которых в качестве диспергирующего элемента применяются призмы (системы призм) и дифракционные решетки (классические и голографические).

– приборы, основанные на использовании явлений интерференции и поляризации. К этому типу относятся спектральные системы, построенные на базе интерферометра Фабри-Перо, где в качестве диспергирующего элемента используются интерференционные и поляризационные фильтры.

– получение спектра с использованием в качестве диспергирующих элементов интерференционных и растровых селективных модуляторов. В данную группу входят устройства на базе двухлучевых интерферометров.

– использование интегрально-кодовых преобразований для получения спектральной картины с повышенной информативностью. Спектр в таких системах представлен в форме интеграла по системе ортогональных функций. В качестве функций наиболее часто используются ряд Фурье (Фурье-спекроскопия) и функции Уолша (Адамар-спекроскопия). Данный метод является модификацией классических систем с пространственным разложением, в качестве диспергирующего элемента также используются дифракционные решетки либо призмы.

По назначению спектральных приборов выделяют [3]: осветители, монохроматоры и анализаторы спектра. По способу регистрации спектра приборы разделяются на следующие типы [4, 5]:

спектроскоп – прибор, в котором исследование спектра осуществляется при помощи глаза человека;

спектрограф – прибор, в котором регистрация спектра производится на фотографическую плёнку;

спектрометр – прибор, в котором регистрация спектра производится на фотоэлектрический приемник.

Учебное пособие предназначено для студентов, изучающих дисциплины «Спектральные и поляризационные оптические системы», «Методы спектроскопии / Methods of spectroscopy», «Фотоника», «Моделирование формирования оптического изображения / Optical image modeling», которые являются основой для последующих дисциплин программы магистратуры по образовательной программе «Прикладная оптика» и развития профессиональных компетенций: ПК-С1.1 Способен выполнять проектирование оптических схем оптико-электронных приборов, узлов и блоков различного назначения с учетом технологических требований; ПК-С2.1 Способен разрабатывать и исследовать модели работы оптических устройств, выполнять разработку узлов и приборов с учетом технологических требований. Также пособие можно использовать при написании бакалаврских и магистерских выпускных квалификационных работ.

В данном пособии будут рассмотрены вопросы расчета и моделирования в среде Zemax OpticStudio классических спектральных систем на основе спектральных призм и дифракционных решеток.

Принципиальная схема спектрального прибора представлена на рисунке 1. Излучение от входной щели $S_{вх}$ падает на коллиматорный объектив (КО). При этом КО располагают так, чтобы в его фокальной плоскости находилась входная щель $S_{вх}$. КО преобразует падающий пучок лучей от каждой точки входной щели в параллельные пучки лучей. Далее по ходу лучей, в задней фокальной плоскости КО, располагается диспергирующее устройство D , которое отклоняет лучи на различные углы $\theta(\lambda)$, зависящие от длины волны излучения λ , т.е. преобразует параллельный пучок лучей в группы монохроматических пучков параллельных лучей. Проекционный объектив (камера) (ПО) служит для проецирования лучей на плоскость приемника или выходной щели $S_{вых}$, которая совпадает с фокальной плоскостью ПО.

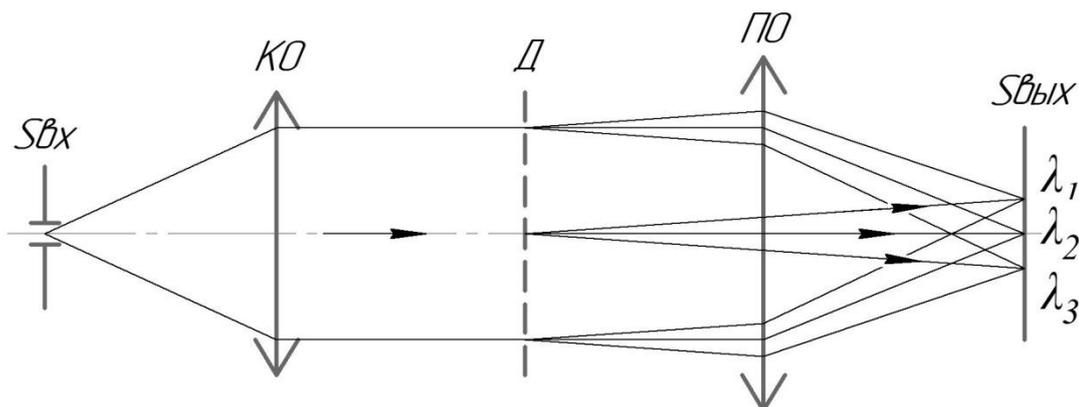


Рисунок 1 – Принципиальная схема спектрального прибора

Основные соотношения при расчете спектрального прибора.

Дисперсия материала – $dn/d\lambda$, где dn – изменение показателя преломления материала при изменении длины волны на величину $d\lambda$.

Угловая дисперсия прибора – $d\beta/d\lambda$ (рад/мм), где $d\beta$ – угол между лучами с длинами волн λ и $\lambda+d\lambda$.

Линейная дисперсия прибора – $dl/d\lambda$ (мм/нм или мм/Å), где dl – расстояние между изображениями спектральных линий с длинами волн λ и $\lambda+d\lambda$.

Угловая и линейная дисперсии связаны соотношением

$$dl/d\lambda = (f/\cos\varphi)(d\beta/d\lambda), \quad (1)$$

где f – фокусное расстояние проекционного объектива, φ – угол между нормалью к фокальной поверхности и главным лучом падающего на нее пучка.

Обратная линейная дисперсия $d\lambda/dl$ (Å/мм, или нм/мм).

Разрешающая сила

$$R = \lambda/\Delta\lambda, \quad (2)$$

где $\Delta\lambda$ – расстояние (в длинах волн) между двумя соседними линиями, которые еще разрешаются, $\Delta\lambda$ также называют пределом разрешения.

Угловой предел разрешения (по Релею)

$$\delta\beta = \lambda/D, \quad (3)$$

где D – ширина параллельного падающего пучка лучей на входной зрачок спектральной системы (с прямоугольным сечением).

$$R_{теор} = \lambda/\delta\lambda = d\Delta_{max}/d\lambda \quad (4)$$

– разрешающая сила численно равна первой производной от максимальной разности хода (Δm_{\max}) интерферирующих лучей пучка по длине волны.

$$R_{\text{теор}} = D(d\beta/d\lambda). \quad (5)$$

Для пучка с круглым сечением

$$R_{\text{теор}} = (D/1,22) (d\beta/d\lambda), \quad (6)$$

Соотношение, связывающее разрешающую силу, линейную дисперсию и светосилу идеального спектрального прибора (A – числовая апертура прибора):

$$R_{\text{теор}} = \lambda/\delta\lambda = A(dl/d\lambda). \quad (7)$$

Реальная разрешающая сила прибора, Δl – линейные искажения в фокальной плоскости прибора (реальный размер изображения):

$$R_{\text{реал}} = (\lambda/\Delta l) dl/d\lambda \quad (8)$$

$$R_{\text{реал}} = (\lambda/A\Delta l) R_{\text{теор}}. \quad (9)$$

Список литературы

1. Пейсахсон И. В. Оптика спектральных приборов: Физика, оптика / И.В. Пейсахсон – М.: Книга по Требованию, 2013. – 312 с
2. Нагибина И.М. Прикладная физическая оптика: Учебник для вузов/ И.М. Нагибина, В.А. Москалев, Н.А. Полушкина, В.Л. Рудин. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Высшая школа, 2002. – 565 с.: ил.
3. Заглубский А. А. Спектральные приборы: Учебное пособие / А.А. Заглубский, Н.М. Цыганенко, А.П. Чернова; Санкт-Петербургский государственный университет, Физический факультет. – СПб., 2007. – 76 с.
4. Скоков И. В. Оптические спектральные приборы: Учеб. Пособие для вузов. / И.В. Скоков. – М.: Машиностроение, 1984. – 240 с., ил.
5. Тарасов, К.И. Спектральные приборы. – Л.: Машиностроение; Издание 2-е, перераб. и доп., 1977. – 368 с.

Лабораторная работа №1 «Изучение свойств дисперсионной призмы, моделирование оптической системы призмённого монохроматора»

Цель лабораторной работы: ознакомиться с конструкцией и основными спектральными свойствами дисперсионной призмы, произвести расчет простого призмённого монохроматора.

Задачи работы

1. Смоделировать равнобедренную призму в двух различных положениях в OpticStudio.
2. Произвести расчет угловой дисперсии и теоретической разрешающей способности призм, построить графики зависимостей угловой дисперсии призмы от угла при вершине призмы (шаг угла 5°).
3. Смоделировать работу дисперсионной призмы в положении минимума отклонения луча в составе монохроматора.
4. Вычислить угловую дисперсию монохроматора, вычислить линейную дисперсию и разрешающую способность оптической системы монохроматора для заданных спектральных диапазонов, построить графики зависимости линейной дисперсии от длины волны.
5. Проверить расчёты с использованием моделей в OpticStudio.

Теоретические сведения

Спектральной призмой называется многогранник, сделанный из прозрачного вещества, обладающего значительной дисперсией показателя преломления $dn/d\lambda$ [1]. В качестве основных характеристик у спектральных призм можно выделить следующие: высокая степень пропускания (прозрачность), высокая дисперсия материала, высокая оптическая однородность и изотропность, отсутствие переналожения порядков спектра (призма дает только один порядок спектра).

При использовании спектральных призм в оптических приборах для сканирования излучения по спектру необходимо осуществлять поворот призмы. В некоторых случаях одиночная треугольная призма не удовлетворяет условиям технологичности и простоты конструкции спектрального прибора, тогда применяют определенные комбинации призм. Необходимость обеспечить сканирование спектра при помощи вращения только одного компонента привела к разработке спектральных призм постоянного отклонения. Как правило, такие системы призм обозначаются по имени своего создателя. Отметим некоторые из них [2]. Призма Аббе (рисунок 1.1 а) состоит из трех склеенных призм – двух прямоугольных призм с преломляющим углом 30° и одной прямоугольной

призмы полного внутреннего отражения (ПВО) с преломляющим углом 90° . Призма отклоняет лучи любой длины волны, проходящие параллельно основанию призмы, на угол 90° . Данная призма устанавливалась в монохроматор УМ-2. Для работы в УФ диапазоне призма ПВО заменялась на зеркальную поверхность, для увеличения пропускания системы. Призма Литтрова (рисунок 1.1 б) является удачной комбинацией призмы и зеркала – на заднюю грань призмы нанесено алюминиевое отражательное покрытие. Сканирование по спектру осуществляется поворотом призмы вокруг оси, параллельной преломляющему ребру. Призма Амичи (рисунок 1.1 в) представляет собой комбинацию из трех склеенных треугольных призм, крайние призмы изготавливаются из стекол сортов крон, центральная из флинтгов. Особенностью призмы является то, что для определенной длины волны угол отклонения лучей равен нулю, что позволяет создавать компактные приборы.

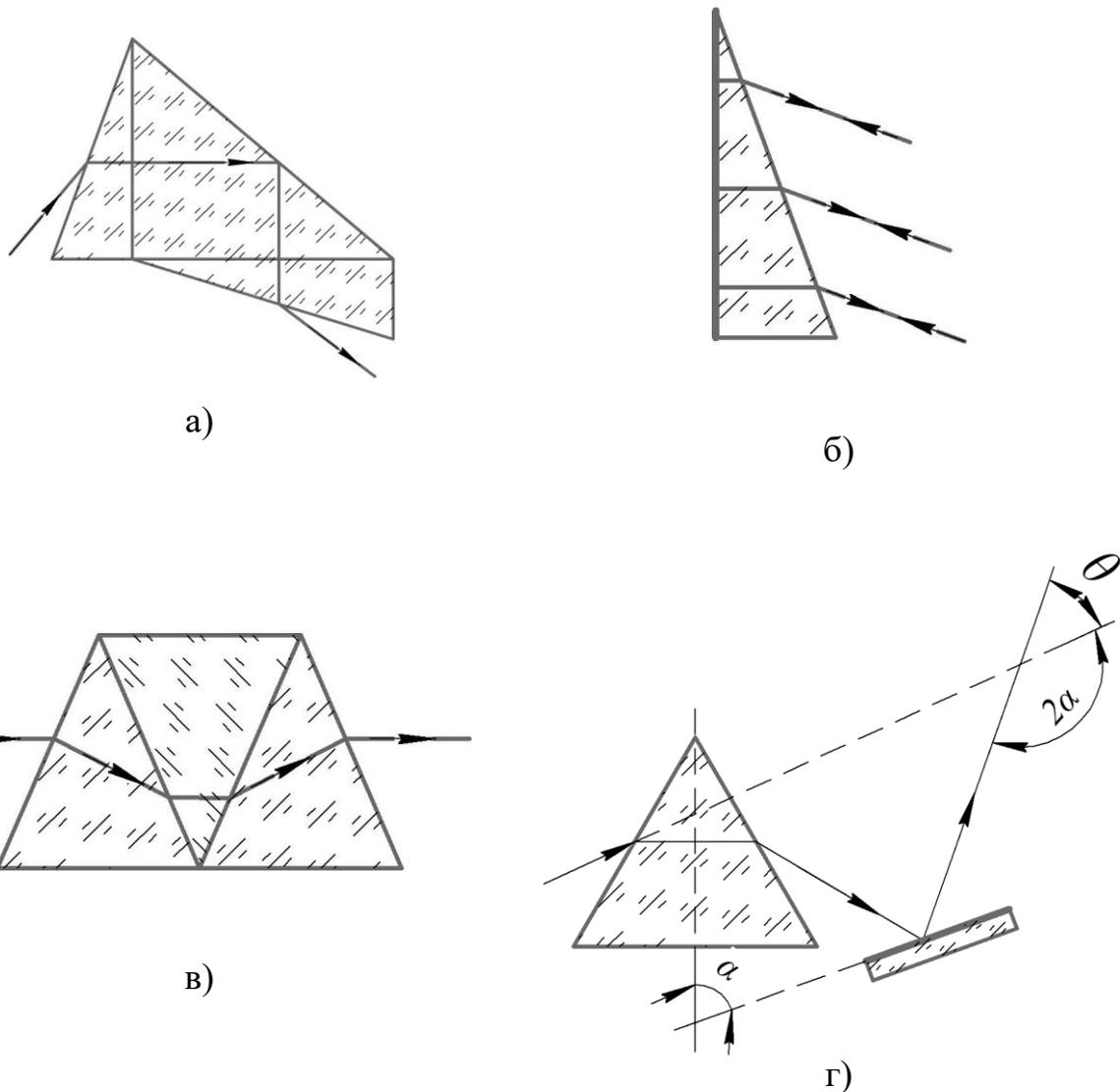


Рисунок 1.1 – Спектральные призмы. а) призма Аббе, б) призма Литтрова, в) призма Амичи, г) установка Фукса-Уодсворта

В установке Фукса-Уодсворта треугольная призма с преломляющим углом 60° размещается совместно с плоским зеркалом. Луч, прошедший в минимуме отклонения и отраженный плоским зеркалом, не изменяет своего направления при сканировании спектра, которое происходит при повороте платформы с призмой и зеркалом. Угол отклонения лучей $\theta = \pi - 2\alpha$ (α – угол между плоскостью отражающей поверхности зеркала и плоскостью, проходящей через середину призмы). Для того чтобы луч, отраженный от плоского зеркала, не смещался вдоль него при повороте платформы, требуется совместить ось вращения столика с вершиной угла α .

Монохроматоры используются для выделения узких спектральных линий из входящего излучения. В 1859 г. немецкий физик Кирхгоф совместно с химиком Робертом Бунзеном, исследуя спектр Солнца и линии излучения паров различных веществ, обнаружили, что каждый химический элемент обладает своим набором спектральных линий. Следовательно, по излучению любого объекта можно узнать о его составе. Это открытие легло в основу современного спектрального анализа. В зависимости от физических процессов, протекающих в веществе, можно выделить три типа спектров: эмиссионные (спектры излучения), абсорбционные (спектры поглощения) и спектры рассеяния [3].

Порядок выполнения работы

1. Одиночная дисперсионная призма в произвольном положении

При моделировании призмы и расчете её спектральных характеристик необходимо рассчитывать ход лучей внутри призмы (рисунок 1.2), для этого воспользуемся законом Снеллиуса:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta. \quad (1.1)$$

Нижняя грань равнобедренной призмы параллельна падающему лучу:

$$n_{\text{возд.}} \sin (\omega/2) = n_{\text{пр.}} \sin \alpha, \quad (1.2)$$

ω – угол при вершине призмы, $\omega/2$ – угол падения на 1 грань, α – угол преломления 1 грани.

$$\beta = \omega - \alpha, \quad (1.3)$$

β – угол падения на вторую грань.

$$n_{\text{пр.}} \sin \beta = n_{\text{возд.}} \sin \gamma, \quad (1.4)$$

γ – угол преломления второй гранью.

Угловая дисперсия призмы [2]:

Таблица 1.1 – Конструктивные параметры призмы (Lens Data)

№	Тип поверхности	Радиус, мм	Толщина по оси, мм	Материал
1	Standard	Infinity	100	
2	Coordinate Break		0	
3	Standard	Infinity	50	ТФ1
4	Coordinate Break		0	
5	Standard	Infinity	50	
6	Coordinate Break		0	
7	Coordinate Break		0	
8	Image	Infinity	0	

Продолжение Таблицы 1.1

№	Децентрировка по оси X, мм	Децентрировка по оси Y, мм	Наклон относительно оси X, °
1	-	-	-
2	0	0	25
3	-	-	-
4	0	0	-50
5	-	-	-
6	0	0	25
7	0	-70	0
8	-	-	-

Видно, что разность углов между лучами двух крайних длин волн составляет $\Delta = 2,83^\circ$. Данная величина зависит от угловой дисперсии призмы.

Рассчитаем угловую дисперсию призмы через данный угол, принимая $\Delta\lambda = 170$ нм:

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{\Delta \cdot \pi}{180 \cdot \Delta \lambda} = 0,00029 \frac{1}{\text{нм}}. \quad (1.9)$$

Проверим рассчитанное значение, используя соотношение (1.5). Зная показатели преломления стекла ТФ1 для заданных длин, волн находим среднее значение $\Delta n = 0,0191428$:

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{t}{D_{\text{вых}}} \frac{dn}{d\lambda} = \frac{47,59 \text{ мм}}{18,5 \text{ мм}} \frac{\Delta n}{\Delta \lambda} = 0,00029 \frac{1}{\text{нм}}.$$

Небольшая разница объясняется округлениями длин отрезков $D_{\text{вых}}$ и t , а также угла Δ .

Найдем теоретическую разрешающую способность призмы, согласно (1.6):

$$R_{\text{теор}} = t \frac{dn}{d\lambda} = 47,59 \cdot \frac{\Delta n}{\Delta \lambda} = 5359.$$

Однако оценивать разрешающую способность отдельной призмы не корректно, так как необходим силовой элемент для построения изображения. Основным критерием оценки спектральных характеристик призмы является угловая дисперсия. Угловая дисперсия зависит от материала призмы и преломляющего угла (угол при вершине). Пропорциональное увеличение всех размеров призмы не изменяет угловую дисперсию (увеличивает теоретическую разрешающую силу) и приводит только к увеличению светосилы системы, что не всегда положительно сказывается на качестве изображения [2].

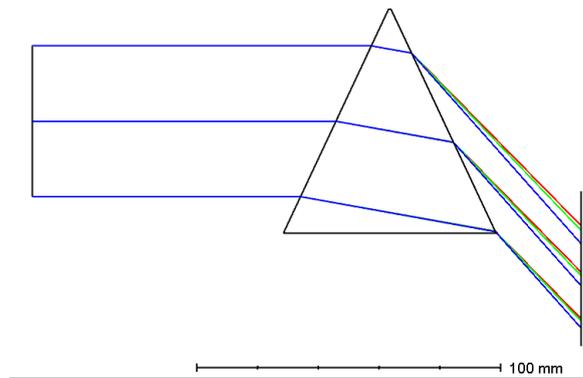


Рисунок 1.4 – Ход лучей в треугольной призме произвольного положения

Type	Surf	Wave	Hx	Hu	Px	Pu	Target	Weight	Value	% Contrib
1 RAED	3	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	14,738	0,000
2 RAID	5	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	35,262	0,000
3 RAED	5	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	73,543	0,000
4 RAID	8	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	48,543	0,000
5 RAED	8	2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	46,496	0,000
6 RAED	8	3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	45,712	0,000
7 DIFF	4	6					0,000	0,000	2,831	0,000

Рисунок 1.5 – Углы падения на грани призмы

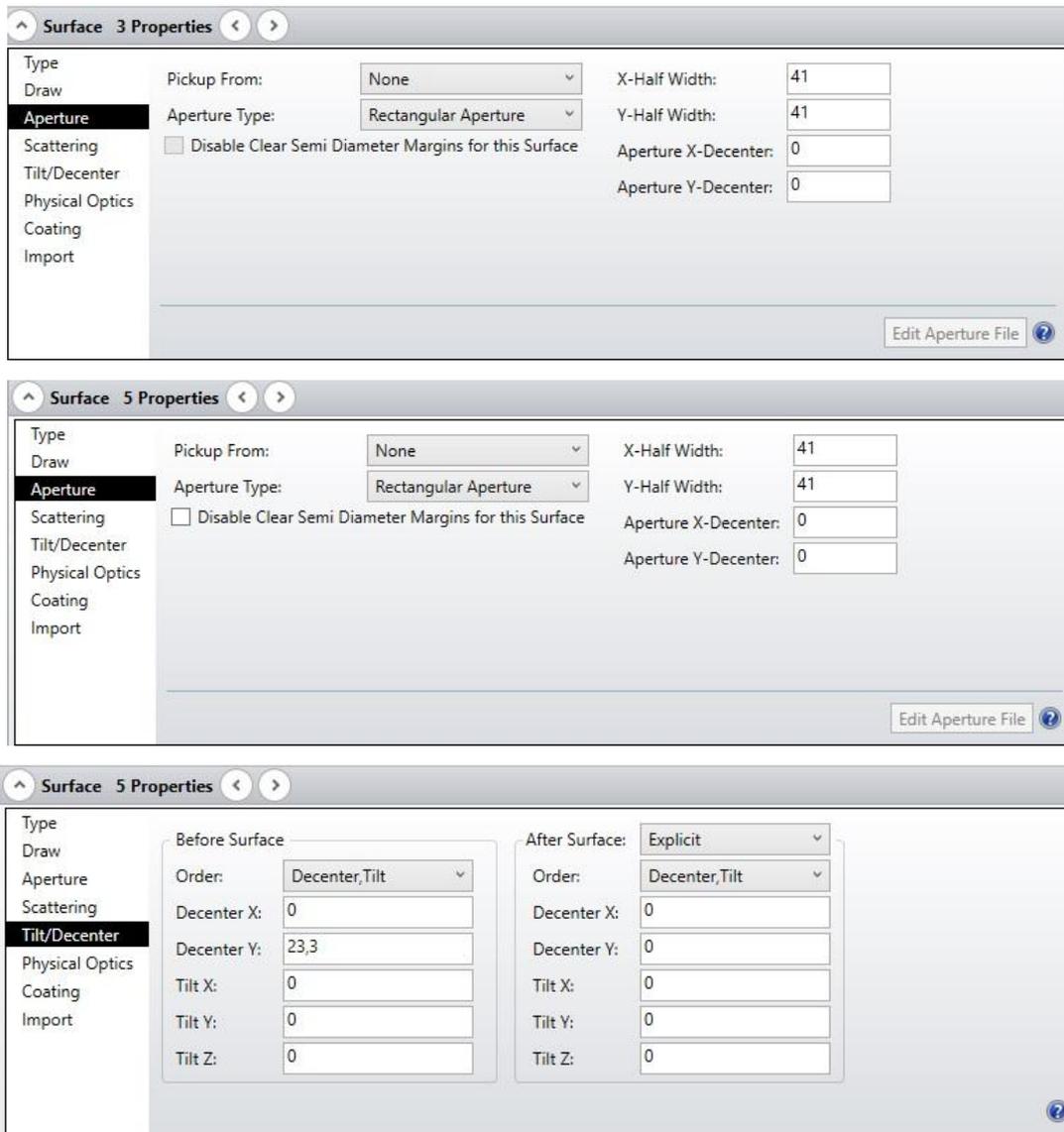


Рисунок 1.3 – Свойства поверхностей, ограничивающих призму в OpticStudio

2. Дисперсионная призма в оптической системе монохроматора

Более распространенное положение призмы в спектральных приборах – расположение в минимуме отклонения луча (рисунок 1.6). Установленная таким образом призма обладает угловым увеличением, равным единице [4]. Также данная установка позволяет оптимальнее использовать поток излучения, падающий на входную грань призмы, следовательно, увеличивать теоретическую разрешающую способность [4]. В таком положении ширина входящего в призму пучка $D_{вх}$ равна ширине выходящего пучка $D_{вых}$. Для данного расположения справедливы следующие соотношения для углов:

$$\beta_1 = \alpha_2 = \frac{\omega}{2}; \quad (1.10.1)$$

$$\frac{\theta + \omega}{2} = \alpha_1 \quad (1.10.2)$$

$$\sin \alpha_1 = n \sin \left(\frac{\omega}{2} \right). \quad (1.10.3)$$

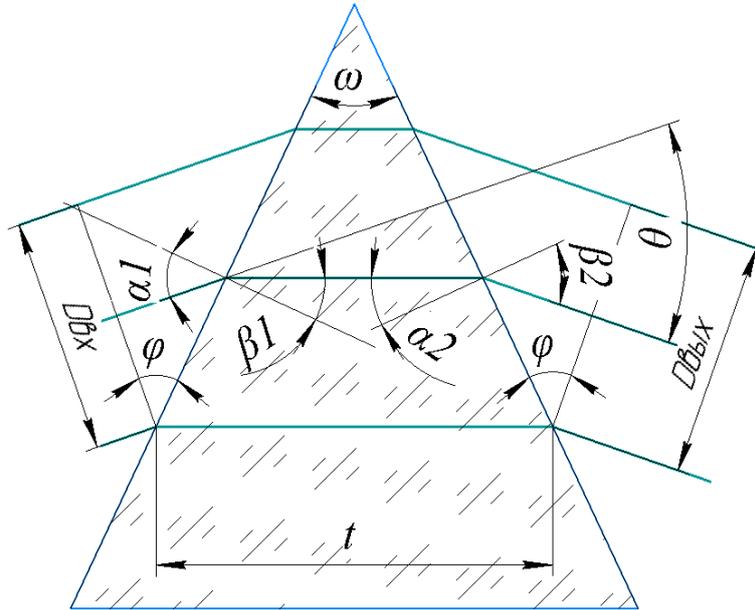


Рисунок 1.6 – Призма, работающая в минимуме отклонения луча

Угловая дисперсия может быть определена как

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{2}{n} t g \alpha_1 \frac{dn}{d\lambda}, \quad (1.11)$$

либо через углы

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{2 \sin \left(\frac{\omega}{2} \right)}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \left(\frac{\omega}{2} \right)}} \frac{dn}{d\lambda}. \quad (1.12)$$

Так как угловая дисперсия зависит только от преломляющего угла ω и материала призмы $\frac{dn}{d\lambda}$, для увеличения угловой дисперсии следует увеличивать преломляющий угол ω , который ограничен соотношением

$$\omega_{max} = 2 \arcsin \frac{1}{n}, \quad (1.13)$$

а материал призмы подбирать с большей дисперсией.

Смоделируем работу простейшего монохроматора на основе равнобедренной треугольной призмы, расположенной в минимуме отклонения луча (рисунок 1.7).

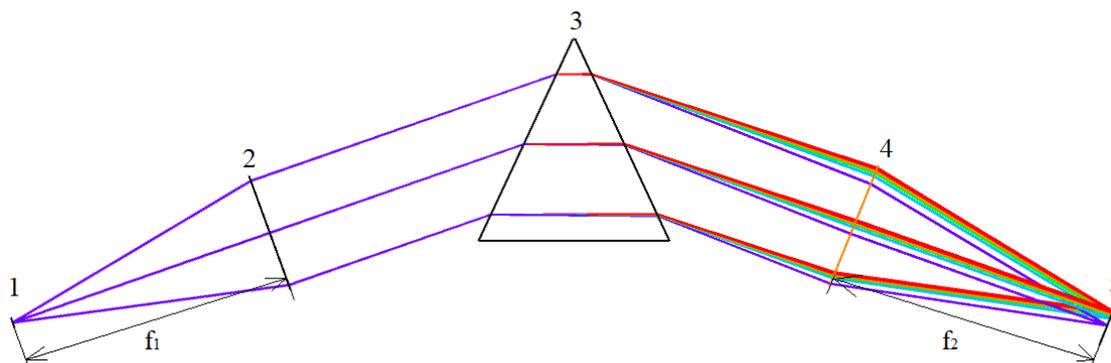


Рисунок 1.7 – Ход лучей в оптической системе монохроматора с призмой

Здесь пучок расходящихся лучей от входной щели 1 ($S_{вх}$) падает на объектив-коллиматор 2, который преобразует его в параллельный. Затем объектив 4 проецирует диспергированные призмой 3 лучи на приемник 5. Перед габаритным расчетом спектрального прибора, для определения минимально допустимого размера входной щели, необходимо проверить два дифракционных ограничения в системе. Первое дифракционное ограничение связано с дифракцией света на диспергирующем элементе и определяет энергетическую эффективность прибора. Для этого вводится понятие нормальной щели [5, 6],

$$S_{н} = \lambda \frac{f_1}{D}, \quad (1.14)$$

где f_1 - фокусное расстояние коллиматора, D - диаметр коллимированного пучка.

$$\text{Так как } A = \frac{D}{2f'}, \text{ то} \quad (1.15)$$

$$S_{н} = \frac{\lambda}{2A}, \quad (1.16.1)$$

где A - входная числовая апертура спектрального узла.

Второе ограничение размера связано с дифракцией света на входной щели и определяется функцией рассеяния линии (ФРЛ), которая описывается следующим соотношением [5]:

$$S_{л} = \frac{1,13\lambda}{A} \quad (1.16.2).$$

Входная щель спектрального узла не может быть меньше размера нормальной щели $S_{н}$. В противном случае происходят большие потери энергии, так как происходит уширение первого максимума ФРЛ входной щели и часть энергии экранируется физическими размерами входной щели.

При выборе высоты входной щели следует учитывать *кривизну изображения спектральных линий*. Искривление изображения входной щели возникает из-за того, что пучки лучей от разных точек по высоте входной щели

падают под разными углами к плоскости главного сечения призмы. Наклонные к главной плоскости сечения призмы пучки лучей отклоняются призмой на больший угол, вследствие чего и возникает искривление, при этом выпуклость изображения щели направлена в сторону больших длин волн [4].

Зададим систему с входной числовой апертурой $A_{вх}=0,2$, фокусным расстоянием коллиматора $f_1 = 100$ мм, тогда $D_{вх}=40$ мм. Рабочий спектральный диапазон 486 – 656 нм. Для моделирования зададим отдельные линии излучения ртути в данном спектральном диапазоне: 486; 491,6; 546,1; 577; 587; 623,2; 656 нм.

Ширина входной щели монохроматора не может быть меньше $S_H = 1,9$ мкм при наибольшей длине волны рабочего спектрального диапазона. В таблице 1.2 представлены конструктивные параметры такой системы.

Угловое поле в системе задается размерам входной щели (Object Height – Rectangular), как показано на рисунке 1.8, при этом видно, что $S_{вх}$ много больше S_H .

Определим угловую дисперсию призмы при расположении в минимуме отклонения луча:

$$\frac{d\beta}{d\lambda} (546 \text{ нм}) = 0,000146 \frac{1}{\text{нм}},$$

$$\text{при } \frac{dn}{d\lambda} = 0,000123 \text{ 1/нм для диапазона 544–548 нм.}$$

Угловая дисперсия призмы меньше, чем в первом положении (рисунок 1.2), так как ширина выходящего из призмы пучка $D_{вых}$ больше.

Таблица 1.2 – Конструктивные параметры призмного монохроматора (Lens Data)

№	Тип поверхности	Радиус, мм	Толщина по оси, мм	Материал
0	Standard	Infinity	100	
1	Coordinate Break		0	
2	Coordinate Break		0	
3	Paraxial ($f'=100$ мм)		100	
4	Coordinate Break		0	
5	Coordinate Break		0	

Продолжение Таблицы 1.2

№	Тип поверхности	Радиус, мм	Толщина по оси, мм	Материал
6	Standard	Infinity	50	<i>LZ_TF1</i>
7	Coordinate Break		0	
8	Standard	Infinity	50	
9	Coordinate Break		20	
10	Paraxial ($f'=100$ мм)		100	
11	Image	Infinity	0	

Продолжение Таблицы 1.2

№	Децентрировка по оси X, мм	Децентрировка по оси Y, мм	Наклон относительно оси X, °
0	-	-	-
1	0	0	20
2	0	0	-20,7
3	-	-	-
4	0	0	20
5	0	0	25
6	-	-	-
7	-	-	-50
8	-	-	-
9	0	0	47
10	-	-	-
11	-	-	-

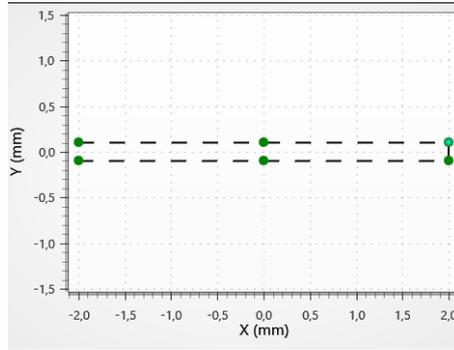


Рисунок 1.8 – Окно редактора Field Data. Размеры входной щели. По оси X задана длина щели, по оси Y – ширина

Теоретическая разрешающая способность призмы для всего рабочего диапазона, согласно (1.6):

$$R_{теор} = t \frac{dn}{d\lambda} = 35,5 \cdot \frac{\Delta n}{\Delta \lambda} = 3997.$$

Оценим реальную разрешающую силу оптической системы монохроматора. Основной характеристикой спектрального прибора является линейная дисперсия:

$$\frac{dl}{d\lambda} = f_2 \frac{d\beta}{d\lambda} \text{ (мм/нм)}. \quad (1.17)$$

Подставляя это выражение в соотношения 1.5, 1.6, для нахождения спектрального разрешения получаем [2]:

$$R_{реал} = \frac{\lambda}{\Delta \lambda} = \frac{\lambda}{\Delta l} \frac{dl}{d\lambda} = \frac{\lambda f_2}{\Delta l} \frac{t}{D_{вых}} \frac{dn}{d\lambda} = \frac{\lambda}{\Delta l} \frac{t}{A_{вых}} \frac{dn}{d\lambda}, \quad (1.18)$$

где f_2 – фокусное расстояние проекционного объектива, $A_{вых}$ – выходная числовая апертура системы, Δl – ширина монохроматического изображения щели. При этом видно, что

$$\frac{t}{D_{вых}} \frac{dn}{d\lambda} = \frac{d\beta}{d\lambda}. \quad (1.18.1)$$

$$R_{реал} = \frac{\lambda f_2}{\Delta l} \frac{d\beta}{d\lambda}. \quad (1.19)$$

Определим реальную разрешающую способность для центральной длины волны при ширине входной щели $S_{вх}=0,2$ мм. Так как в данной системе используются идеальные силовые компоненты, то $\Delta l = S_{вх}$, тогда $R_{реал}(546 \text{ нм}) = 40$. Для увеличения спектрального разрешения оптической системы монохроматора, не принимая во внимание дисперсионный узел, следует уменьшать ширину входной щели и увеличивать фокусное расстояние проекционного объектива 2. На рисунке 1.9 представлено разложенное по спектру изображение входной щели монохроматора. Видно, что из-за

неравномерности дисперсии призмы изображения входной щели для различных длин волн смещены на разное расстояние.

При расчете угловой дисперсии призмы важно понимать, что дисперсия материала $\frac{dn}{d\lambda}$, как правило, неравномерна и при движении в длинноволновую область «скорость» изменения показателя преломления существенно снижается. Так, для одинаковых интервалов длин волн в синей и красной области спектра значение дисперсии может значительно отличаться. При расчете угловой дисперсии призмы следует учитывать свойства материала, из которого она изготовлена. Для получения точных результатов расчета угловой дисперсии призмы следует разбивать рабочий спектральный диапазон на большее количество интервалов, для каждого из которых рассчитывать свое значение $\frac{dn}{d\lambda}$. При проведении предварительных расчетов достаточно разбить рабочий спектральный диапазон на несколько интервалов.

Как правило, в монохроматорах используются вращающиеся диспергирующие элементы (призма или дифракционная решетка) с целью получения монохроматичных изображений входной щели для различных длин волн в плоскости неподвижной выходной щели. В качестве примера такой системы рассмотрим систему монохроматора с треугольной равнобедренной призмой в положении минимума отклонения лучей (рисунок 1.7). Для того чтобы излучение с различными длинами волн приходило в одно и то же место в плоскости выходной щели, необходимо задать поворот призмы при помощи дополнительных поверхностей Coordinate Break в OpticStudio (таблица 1.3). Одновременная работа модели для различных длин волн организовывается при помощи мульти-конфигураций (рисунок 1.10).

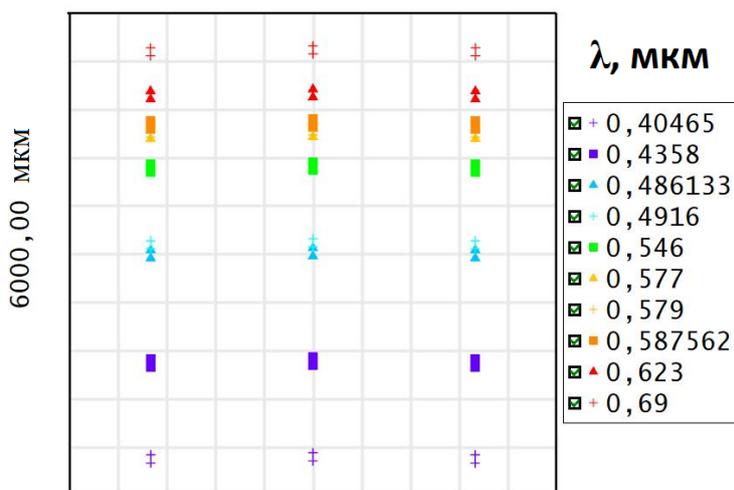


Рисунок 1.9 – Схематичное изображение спектра на приемнике (Full Field Spot Diagram)

Таблица 1.3 – Конструктивные параметры призмного монохроматора с вращающейся призмой (Lens Data) при $\lambda=435$ нм

№	Тип поверхности	Радиус, мм	Толщина по оси, мм	Материал
0	Standard	Infinity	100	
1	Coordinate Break		0	
2	Coordinate Break		0	
3	Paraxial ($f'=100$ мм)		100	
4	Coordinate Break		0	
5	Coordinate Break (Tilt prism)		0	
6	Coordinate Break		0	
7	Standard	Infinity	50	<i>LZ_TF1</i>
8	Coordinate Break		0	
9	Standard	Infinity	50	
10	Coordinate Break (Tilt prism)		0	
11	Coordinate Break		-0,86	
12	Paraxial ($f'=100$ мм)		100	
13	Image	Infinity	0	

В редакторе мульти-кофигураций заданы углы наклона призмы по оси X (вторая строчка) в зависимости от длины волны входящего излучения (404,7; 434,7; 546,1 нм). При наклоне призмы изменяется оптическая длина пути лучей и, как следствие, в последовательном режиме работы OpticStudio смещается проекционный объектив. Для компенсации его смещения необходимо вводить поправочные подвижки вдоль оптической оси (третий параметр в мульти-кофигурации). Ход лучей в системе монохроматора с вращающейся призмой представлен на рисунке 1.11.

Продолжение Таблицы 1.3

№	Децентрировка по оси X, мм	Децентрировка по оси Y, мм	Наклон относительно оси X, °
0	-	-	-
1	0	0	20
2	0	0	-20,7
3	-	-	-
4	0	0	20
5	0	0	1
6	0	0	25
7	-	-	-
8	-	-	-50
9	-	-	-
10	0	0	-1
11	0	-50	47
12	-	-	-
13	-	-	-

	Active : 1/3	Config 1*	Config 2	Config 3
1	WAVE ▾ 1	0,405	0,435	0,546
2	PRAM ▾ 5/3	0,000	1,000	2,900
3	THIC ▾ 11	0,000	-0,860	-2,435

Рисунок 1.10 – Окно редактора мульти-конфигураций

Таким образом, наклоняя призму на небольшие углы относительно плоскости основания, изображение регистрируется в фиксированном положении выходной щели.

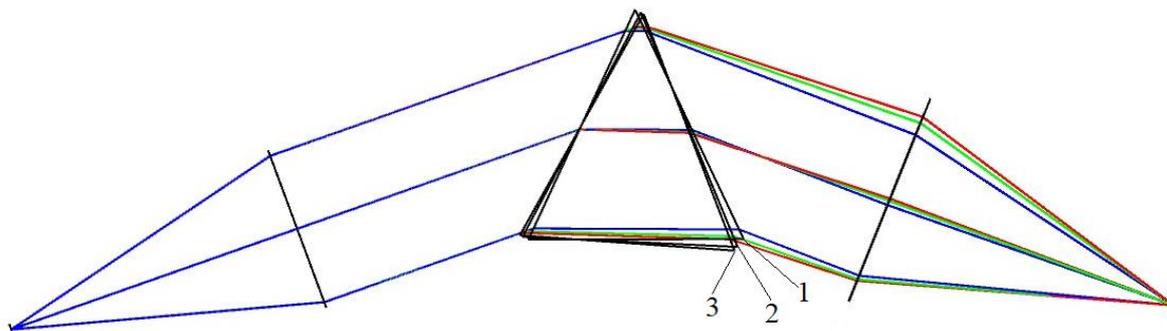


Рисунок 1.11 – Ход лучей в оптической системе монохроматора с вращающейся призмой, представлены одновременно три положения призмы (1 – 3). Цветами обозначены разные длины волн

Таблица 1.4 – Варианты заданий к первой части работы

№ варианта	Марка стекла призмы	Диапазон углов при вершине $\omega, ^\circ$	$D_{\text{вх}}, \text{мм}$
1	ТФ1	20 – 60	35
2	ТФ2	20 – 50	30
3	ТФ3	20 – 50	35
4	ТФ4	20 – 50	30
5	ТФ7	20 – 45	30
6	ТК9	20 – 50	40
7	ТФ10	20 – 50	40
8	СТК12	20 – 50	35
9	ТК2	20 – 60	30
10	К8	20 – 50	50
11	ТК12	15 – 45	40
12	ТФ4	20 – 50	40
13	К8	20 – 60	30
14	ТФ3	20 – 40	45
15	ТК9	15 – 40	30

Спектральные линии излучения ртути: 404,7; 407,8; 434,7; 480; 486; 491,6; 546,1; 577; 587; 623,2; 656; 690,7; 750 нм.

Указания к выполнению Части 1: смоделировать равнобедренную призму, построить графики зависимостей угловой дисперсии призмы от угла при вершине призмы (шаг угла 5°), привести рисунки модели в OpticStudio.

Указания к выполнению Части 2: смоделировать работу дисперсионной призмы в минимуме отклонения луча в составе монохроматора, вычислить угловую дисперсию призмы и разрешающую способность монохроматора для заданных спектральных диапазонов, построить графики зависимости линейной дисперсии от длины волны (длины волн взять из списка линий излучения ртути), спектральный диапазон разбить на следующие $\Delta\lambda$: 404,7 – 434,7; 434,7 – 491,6; 491,6 – 546,1; 546,1 – 579,0; 577 – 623,2; 623,2 – 750 нм.

Таблица 1.5 – Варианты заданий ко второй части работы

№ варианта	Материал призмы	Угол при вершине $\omega,^\circ$	$A_{\text{вх}}$	$f_1 = f_2,$ мм	$S_{\text{вх}},$ мм
1	ТФ1	50	0,15	200	0,1
2	ТФ2	45	0,1	280	0,05
3	ТФ3	50	0,1	250	0,1
4	ТФ4	40	0,12	300	0,1
5	ТФ7	40	0,2	200	0,05
6	ТК9	40	0,2	150	0,1
7	ТФ10	35	0,1	250	0,1
8	СТК12	40	0,17	200	0,05
9	ТК2	50	0,08	350	0,1
10	К8	50	0,2	200	0,08
11	ТК12	40	0,15	250	0,1
12	ТФ4	30	0,1	275	0,05
13	К8	40	0,15	300	0,1
14	ТФ3	45	0,1	150	0,05
15	ТК9	35	0,15	250	0,1

Содержание отчета

1. Эскизы призм с расчетом углов падения и преломления на рабочих гранях
2. Рисунки оптических схем в среде OpticStudio.
3. Результаты расчетов угловой дисперсии и разрешающей способности призм и системы монохроматора. Сравнение расчетов с моделью. Проверка допустимой ширины входной щели.
4. Графики зависимости линейной дисперсии от длины волны в оптической системе монохроматора.
5. Отчет должен быть оформлен согласно ГОСТ Р 2.105-2019 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Общие требования к текстовым документам;

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные характеристики спектрального прибора и прокомментируйте их.
2. Что такое нормальная ширина спектральной щели?
3. Какие факторы ограничивают реальную разрешающую способность спектрального прибора?
4. Чем отличается спектральная призма от обычной призмы?
5. Какие материалы используются для изготовления спектральных призм?
6. От каких параметров спектральной призмы зависит её теоретическая разрешающая способность?
7. Приведите выражение для угловой дисперсии призмы в условиях минимального отклонения и объясните зависимость угловой дисперсии от длины волны.

Список литературы

1. Загубский А. А. Спектральные приборы: Учебное пособие / А.А. Загубский, Н.М., Цыганенко, А.П., Чернова; Санкт-Петербургский государственный университет, Физический факультет. – СПб., 2007. – 76 с.

2. Тарасов К.И. Спектральные приборы. – Л.: Машиностроение; Издание 2-е, перераб. и доп., 1977. – 368 с.
3. Пейсахсон И.В. Оптика спектральных приборов. – Л.: Машиностроение, 1975. – 312 с.
4. Нагибина И.М. Прикладная физическая оптика: Учебник для вузов/ И.М. Нагибина, В.А. Москалев, Н.А. Полушкина, В.Л. Рудин. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Высшая школа, 2002. – 565 с.: ил.
5. Лебедева В.В. Техника оптической спектроскопии. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГУ, 1986. – 352 с.
6. Кирилловский В.К., Точилина Т.В. Оптические измерения. Часть 2. Теория чувствительности оптических измерительных наводок. Роль оптического изображения. Учебное пособие. – 2-е изд., стер. – СПб.: Университет ИТМО, 2017. – 65 с.
7. Беляков Ю.М. Спектральные приборы: учебное пособие / Ю. М. Беляков, Н. К. Павлычева ; под ред. д-ра. техн. наук Н. К. Павлычевой; М-во образования и науки РФ, Федер. агентство по образованию, КГТУ им. А. Н. Туполева; [реценз.: Р. К. Мамедов (СПбГУ ИТМО), С. О. Мирумьянц] .– Казань: [Издательство Казанского государственного технического университета], 2007 .– 202 с. : ил. – Библиогр.: с. 199-201.
8. Толмачев Ю.А. Новые спектральные приборы. Принципы работы: [учебное пособие] / Ю. А. Толмачев; под ред. чл.-кор. АН СССР С. Э. Фриша; ЛГУ им. А. А. Жданова.– Л.: Издательство Ленинградского университета, 1976 .– 125 с. : ил. – Библиогр.: с. 123-124.

Лабораторная работа №2 «Изучение свойств плоской дифракционной решетки, моделирование оптической системы монохроматора на основе вогнутой отражательной решетки»

Цель лабораторной работы: ознакомиться с конструкцией и основными спектральными свойствами плоской и вогнутой дифракционных решеток, произвести расчет простого монохроматора на основе плоской отражательной решетки.

Задачи работы

1. Смоделировать плоскую пропускающую дифракционную решетку в OpticStudio.

2. Произвести расчет угловой дисперсии и теоретической разрешающей способности плоских дифракционных решеток, построить графики зависимостей угловой дисперсии плоской пропускающей решетки от угла наклона решетки (шаг угла 5°).

3. Произвести расчет спектральной системы монохроматора с вогнутой дифракционной решеткой на круге Роуланда, смоделировать работу системы в OpticStudio, проверить расчеты.

Теоретические сведения

Дифракционные решетки – оптические устройства, создающие периодическую модуляцию падающей световой волны по амплитуде или по фазе, или по амплитуде и по фазе одновременно [1]. По способу модуляции падающего излучения дифракционные решетки разделяют на амплитудные и фазовые.

Амплитудная дифракционная решетка представляет собой совокупность множества параллельных штрихов одинакового размера, равноотстоящих друг от друга и разделенных непрозрачными участками [1, 2].

Фазовая дифракционная решетка – непрозрачная отражательная решетка, состоящая из системы штрихов (каналов) определенной формы [1]. Такая решетка вносит периодические изменения фазы в отраженном от нее излучении. Фаза отраженной волны изменяется в связи с тем, что волновой фронт падающей волны достигает поверхности решетки не одновременно по всей длине решетки. Изменения фазы периодичны и повторяются при переходе от одного отражающего уступа к следующему [1].

Первая дифракционная решетка [2], изобретенная Фраунгофером, представляла собой стеклянную подложку, на которую были нанесены непрозрачные штрихи при помощи алмазного резца. Данная дифракционная

решетка работала в проходящем свете. Затем Г. Роуланд усовершенствовал технологию изготовления решеток и разработал теорию отражательных вогнутых решеток. Роберт Вуд видоизменил плоские штрихи в отражательной решетке, тем самым создав ступенчатые отражательные фазовые решетки – эшелетты (фр. *Échelle* – лестница), позволяющие концентрировать максимум дифрагированного света в заданном направлении. Данные решетки, благодаря применению современных технологий контроля при изготовлении, позволяют работать в очень высоких порядках спектра, что обеспечивает большую угловую дисперсию.

Основное уравнение дифракционной решетки:

$$b(\sin\alpha + \sin\beta) = k\lambda, \quad (2.1)$$

где b – расстояние между штрихами (ребрами ступеней) решетки (постоянная решетки), α – угол падения – угол между нормалью к плоскости решетки и падающим лучом, β – угол дифракции – угол между дифрагированным лучом и нормалью к плоскости решетки, k – порядок спектра, λ – рабочая длина волны, δ – угол между плоскостью решетки и плоскостью рабочей грани решетки (угол блеска).

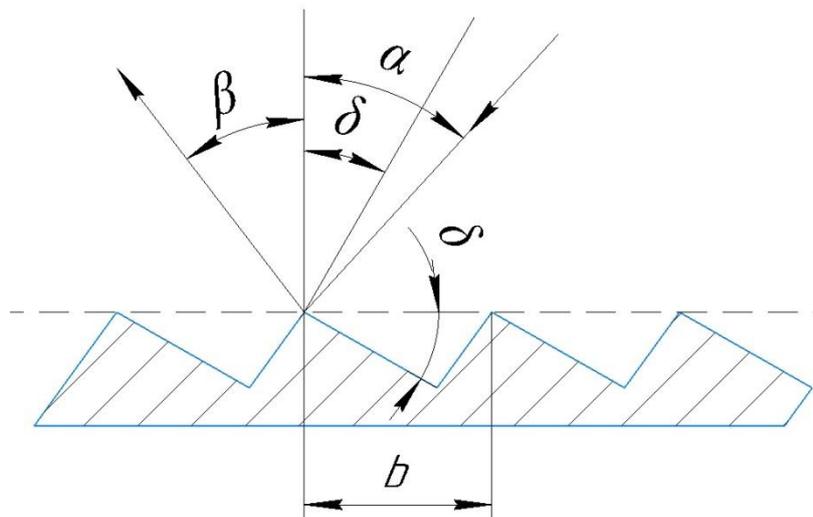


Рисунок 2.1 – Углы падения, дифракции и блеска дифракционной решетки (на примере эшелле-решетки)

Разрешающая сила дифракционной решетки:

$$R_{\text{теор}} = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = N_0 k, \quad (2.2)$$

где N_0 – общее число штрихов решетки. Приведем основные соотношения для расчета спектральных систем с дифракционной решеткой [2,3]. Разрешающая

сила решетки численно равна произведению порядка спектра k на ширину нарезанной части решетки L и на число штрихов на 1 мм N :

$$R_{\text{теор}} = kLN. \quad (2.3)$$

В автоколлимационной установке ($\alpha=\beta$)

$$kN = 2\sin\beta/\lambda; \quad (2.4)$$

Под автоколлимационной установкой (схемой) здесь и далее будут пониматься оптические схемы приборов, в которых углы падения параллельного пучка лучей на диспергирующий элемент и углы отражения от этого элемента равны.

$$R_{\text{теор}} = 2L\sin\beta/\lambda. \quad (2.5)$$

Угловая дисперсия решетки:

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{R_{\text{теор}}}{D_{\text{вых}}}, \quad (2.6.1)$$

$D_{\text{вых}} = N_0 b \cos\beta$, следовательно:

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{kN_0}{N_0 b \cos\beta} = \frac{k}{b \cos\beta} = \frac{\sin\alpha + \sin\beta}{\lambda \cos\beta}. \quad (2.6.2)$$

В автоколлимационной установке ($\alpha=\beta$)

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{2\operatorname{tg}\beta}{\lambda}, \quad \frac{dl}{d\lambda} = \frac{2f'\operatorname{tg}\beta}{\lambda}. \quad (2.7)$$

Угловая дисперсия решетки не зависит от ее параметров и определяется длиной волны и направлением падающих и диспергированных лучей. Дисперсию решетки можно увеличить с помощью двойной дифракции при повторном падении на решетку дифрагированного пучка, отраженного от вспомогательного плоского зеркала.

Реальная разрешающая сила прибора с решеткой (Δl – линейный предел разрешения линий в фокальной плоскости прибора, f' – фокусное расстояние проекционного объектива или выходного коллимационного объектива) [2]:

$$R_{\text{реал.}} = \frac{f'k\lambda}{\Delta l b \cos\beta} = \frac{f(\sin\alpha + \sin\beta)}{\Delta l \cos\beta}. \quad (2.8)$$

В автоколлимационной установке

$$R_{\text{реал.}} = \frac{2f'\operatorname{tg}\beta}{\Delta l}. \quad (2.9)$$

Во многих спектральных приборах, особенно приборах с высоким спектральным разрешением, возникает искривление спектральных линий в

плоскости детектора. Данный эффект возникает из-за разного хода лучей, лежащих в плоскости дисперсии диспергирующего элемента, и лучей, падающих под углом к этой плоскости. Кривизна спектральных линий возникает из-за того, что разность хода интерферирующих лучей, идущих от концов входной щели, меньше разности хода лучей, идущих от середины входной щели. Изображение щели, создаваемое дифрагированными лучами, будет искривлено – изображения концов щели будут сдвинуты в длинноволновую область спектра. Как правило, входная щель спектрального прибора представляет собой прямоугольник, в котором меньшая сторона лежит в плоскости дисперсии. Очевидно, что чем больше будет длинная сторона щели, тем большее искривление спектральных линий будет в плоскости приемника.

Радиус кривизны спектральной линии определяется соотношением ($b=1/N$):

$$R_{\lambda} = \frac{f' d\lambda}{\lambda d\beta} = \frac{f' b \cos\beta}{k\lambda}. \quad (2.10)$$

Порядок выполнения работы

1. Пропускающая плоская дифракционная решетка

Определим основные параметры и смоделируем работу простой плоской пропускающей дифракционной решетки. Пример задания плоской пропускающей дифракционной решетки в OpticStudio приведен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Конструктивные параметры плоской пропускающей дифракционной решетки

№	Тип поверхности	Радиус, мм	Толщина по оси, мм	Материал
0	Standard	Infinity	Infinity	
1	Standard	Infinity	20	
2	Standard	Infinity	2	K8
3	Diffraction Grating (0,5 лин/мкм)	Infinity	20	
4	Image	Infinity	0	

Уравнение плоской дифракционной решетки на стеклянной подложке в случае нормального падения лучей ($\alpha=0$):

$$nb(\sin\beta) = k\lambda, \quad (2.11)$$

$$N = 1/b, \quad (2.12)$$

$$n(\sin\beta) = k\lambda N. \quad (2.13)$$

В OpticStudio N задается в линиях на микрометр.

Для наклонной решетки на стеклянной подложке справедливо уравнение:

$$n_1\sin\alpha + n_2\sin\beta = k\lambda/b, \quad (2.14)$$

$$n_1\sin\alpha + n_2\sin\beta = k\lambda N, \quad (2.15)$$

где n_1 и n_2 - показатели преломления среды в плоскости, в которой находятся углы α и β соответственно.

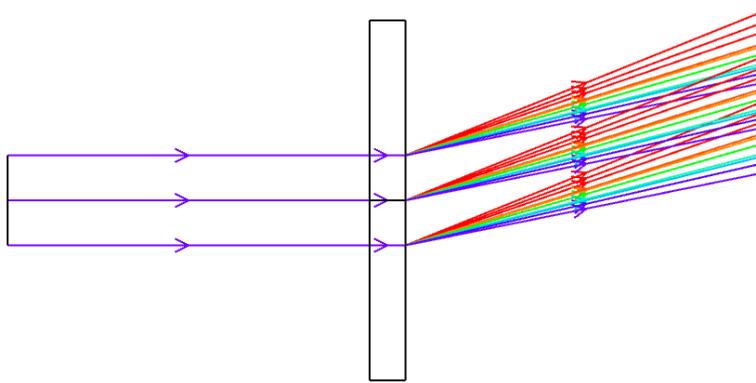


Рисунок 2.2 – Ход лучей в плоской дифракционной пропускающей решетке

Пользуясь выражениями 2.2, 2.3, 2.6, несложно определить угловую дисперсию и разрешающую способность решеток.

Type	Surf	Wave	Hx	Hu	Px	Py	Target	Weight	Value	% Contrib
1 RAID	4	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	6,515	0,000
2 RAED	4	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	21,941	0,000

Рисунок 2.3 – Углы падения и дифракции наклонной решетки для определенной длины волны

Углы падения и дифракции, в случае если решетка расположена на тыльной стороне пластины, можно как рассчитать самостоятельно, так и посмотреть при помощи операндов RAID и RAED в панели оптимизатора.

Плоские пропускающие решетки могут применяться как вспомогательные диспергирующие элементы в сложных спектральных системах с кросс-дисперсией, в системах для определения линейных смещений объектов.

	Surface Type	Coef	Radius	Thickness	Material	Coating	Clear Semi-Dia
0	OBJECT	Standard ▾	Infini...	Infini...			0,000
1	STOP	Standard ▾	Infini...	20,000			2,500
2	Coordinate Break ▾			0,000	-		0,000
3	(aper) Standard ▾		Infini...	2,000	LZ_K8		10,000 U
4	(aper) Diffraction Grating ▾		Infini...	20,000			10,000 U
5	Coordinate Break ▾			0,000	-		0,000
6	IMAGE	Standard ▾	Infini...	-			14,466

Tilt About X	Lines/ μm	Diffract Orde
10,000	0,000	0,000
	0,500	1,000
-10,000 P	0,000	0,000

Рисунок 2.4 – Конструктивные параметры наклонной пропускающей решетки (Lens Data)

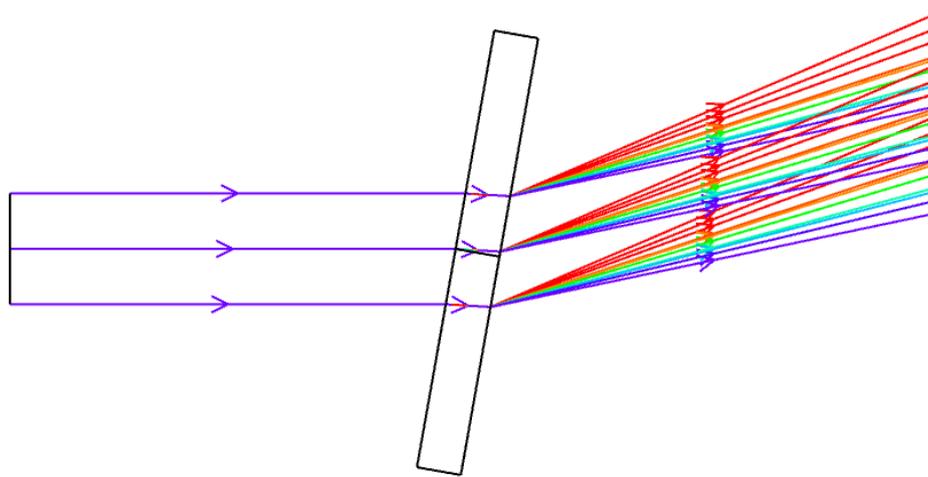


Рисунок 2.5 – Ход лучей в плоской дифракционной пропускающей решетке при наклоне

Таблица 2.2 – Варианты заданий для моделирования плоских пропускающих дифракционных решеток. Длины волн λ : 404,7; 486; 525; 546; 623 нм. Диапазон углов наклона: 5 – 30°

№ варианта	Марка стекла подложки	$D_{\text{вх}}$, мм	N , лин/мм
1	БФ7	10	100

Продолжение Таблицы 2.2

№ варианта	Марка стекла подложки	$D_{\text{вх}}$, мм	N , лин/мм
2	БФ16	15	75
3	БК4	20	600
4	БК6	25	400
5	СТК3	30	300
6	СТК8	35	75
7	СТК12	30	1200
8	Ф1	25	50
9	Ф8	40	150
10	К8	45	2400
11	ТФ1	50	37,5
12	ТФ2	20	400
13	ТФ3	25	3600
14	ЛК3	30	200
15	ОК4	40	400

2. Вогнутая дифракционная решетка на круге Роуланда

Вогнутые дифракционные решетки получили широкое применение благодаря своей способности работать одновременно как диспергирующий и силовой оптический компонент. Рассмотрим самый простой пример использования в оптической системе вогнутой дифракционной решетки на примере круга Роуланда. Если вогнутую решетку и входную щель прибора расположить на окружности радиусом вдвое меньшим радиуса кривизны решетки, то спектр фокусируется на той же окружности, называемой кругом Роуланда [2] (рисунок 2.6).

Из основного уравнения решетки (2.1) получаем основное уравнение вогнутой дифракционной решетки [2]:

$$\cos^2(\alpha/r) - \cos(\alpha/R) + \cos^2(\beta/s) - \cos(\beta/R) = 0, \quad (2.16)$$

где r и s – расстояния от входной щели и её изображения до середины решетки с радиусом кривизны R . Если входная щель системы находится на окружности диаметром R , проходящей также через центр дифракционной решетки, то справедливо выражение:

$$r = R \cos \alpha \quad (2.17).$$

Тогда, подставив это выражение в (2.16), получим:

$$s = R \cos \beta, \quad (2.18)$$

т.е. изображение входной щели находится на окружности, проходящей через центр решетки.

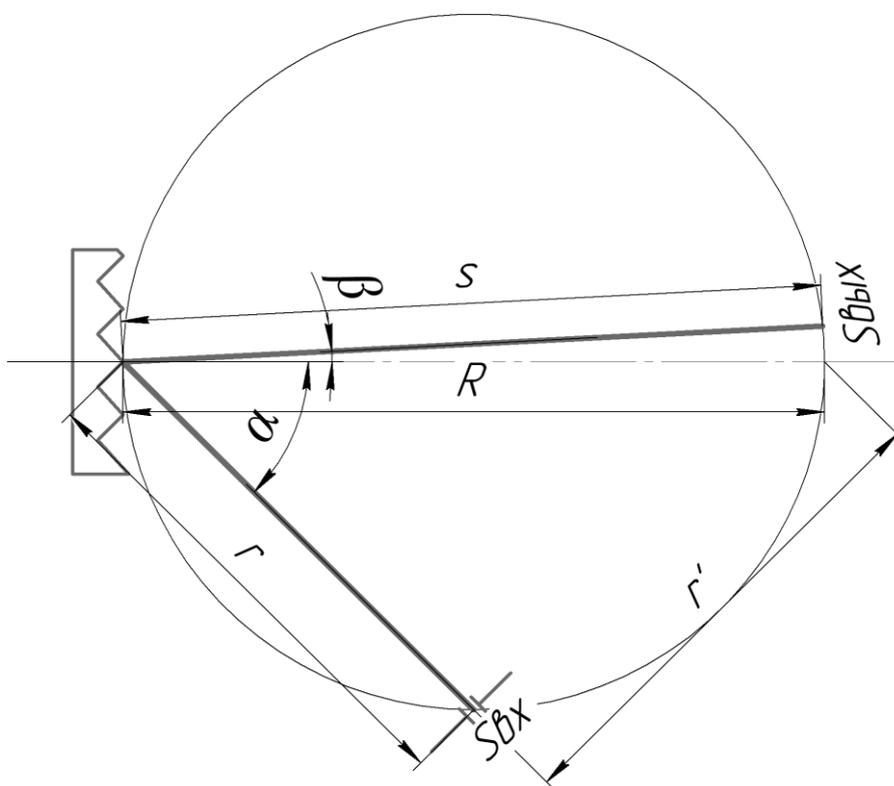


Рисунок 2.6 – Круг Роуланда

В плоскости, перпендикулярной плоскости дисперсии, вогнутая дифракционная решетка работает как обычное вогнутое зеркало и строит изображение с линейным увеличением

$$\Gamma = -s/r. \quad (2.19)$$

Угловая дисперсия вогнутой решетки

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = kN \cos \beta = \frac{kRN}{s}. \quad (2.20)$$

Линейная дисперсия

$$\frac{dl}{d\lambda} = kNR(R/s) \quad (2.21)$$

прямо пропорциональна порядку спектра k , числу штрихов на единицу длины N , радиусу решетки R и отношению R/s ; при заданном разрешении R линейная дисперсия обратно пропорциональна расстоянию s изображения спектральной линии от решетки. При этом дисперсия достигает минимума своего значения вблизи нормали к решетке:

$$\frac{dl}{d\lambda} \min = kNR. \quad (2.22)$$

В этой области она практически не зависит от длины волны падающего излучения, такой спектр принято называть нормальным.

Теоретическая разрешающая сила определяется так же, как и для плоской дифракционной решетки (2.3). Однако ширина L нарезанной части ограничивается искажениями изображения спектральной линии. Данные искажения обуславливаются тем, что лишь средняя часть решетки лежит на круге Роуланда. С учетом критерия Релея (разность хода лучей не должна превышать $\lambda/4$) максимально допустимая ширина L решетки составит

$$L_{max} = 2R^4 \sqrt{\frac{2\lambda}{r\sin^2\alpha + s\sin^2\beta}}. \quad (2.23)$$

Реальная разрешающая сила решетки

$$R_{\text{реал.}} = \frac{R^2(\sin\alpha + \sin\beta)}{s\Delta l} = \frac{R(r' + s')}{s\Delta l}, \quad (2.24.1)$$

где $r' = R\sin\alpha$ и $s' = R\sin\beta$ – расстояния от входной щели и от изображения спектральной линии до точки на круге Роуланда, диаметрально противоположной центру решетки. Для нормального спектра

$$R_{\text{реал.}} = \frac{r'}{\Delta l}. \quad (2.24.2)$$

Главным недостатком вогнутой дифракционной решетки является астигматизм: точка на входной щели изображается отрезком прямой (*астигматическая фокаль*), параллельным штрихам решетки, лежащим на фокальной поверхности решетки [2].

Смоделируем систему монохроматора на круге Роуланда для случая нормального спектра в OpticStudio. Постоянную решетки N выбирают из стандартного ряда (37,5; 50; 75; 100; 150; 200; 300; 400; 600; 830; 900; 1200; 1800; 2400; 3600 лин/мм). Положим, что $R=250$ мм, $\lambda=546$ нм, $k=1$, $N=1200$ лин/мм, $S_{\text{ex}}=0,04$ мм, высота щели 1 мм, $A=0,015$.

Так как при нормальном спектре $\beta=0^\circ$, из (2.1), $\alpha = 40,94^\circ$. Из (2.17, 2.18) $r=188.86$, $s=250$ мм, $\Gamma = -1,32^\times$.

На рисунке 2.7 представлена схема монохроматора на круге Роуланда в OpticStudio, в таблице 2.3 представлены конструктивные параметры для случая нормального спектра.

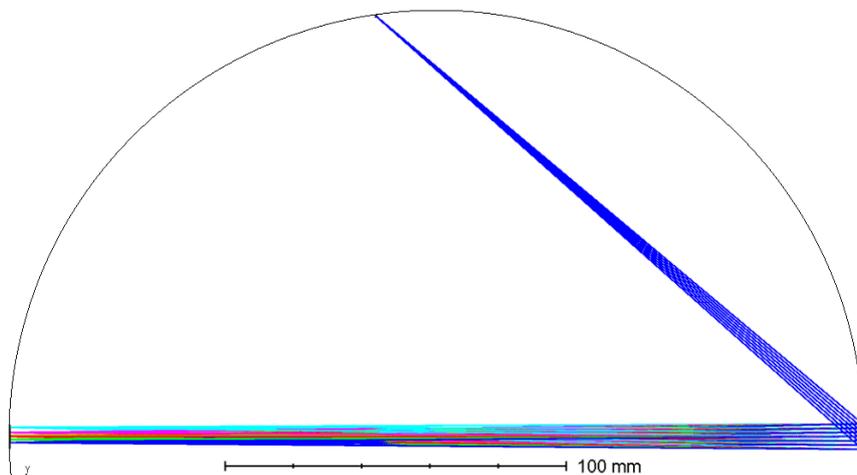


Рисунок 2.7 – Ход лучей в монохроматоре на круге Роуланда

Таблица 2.3 – Конструктивные параметры системы монохроматора на круге Роуланда

№	Тип поверхности	Радиус, мм	Толщина по оси, мм	Материал
0	Standard	Infinity	188,86	
1	Coordinate Break	-	0	
2	Diffraction Grating (1,2 лин/мкм)	-250	-250	Mirror
4	Image	Infinity	0	

№	Децентрировка по оси X, мм	Децентрировка по оси Y, мм	Наклон относительно оси X, °
0	-	-	-
1	0	0	-40,935
2	-	-	-
3	-	-	-

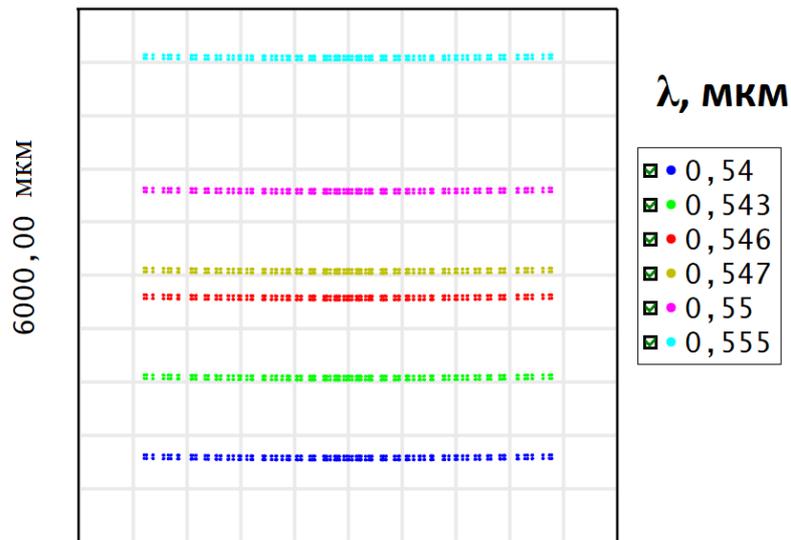


Рисунок 2.8 – Схематичное изображение спектра в фокальной плоскости решетки. Сторона квадрата 6 мм, цвета для длин волн не соответствуют действительным

На рисунке 2.8 хорошо видно, что изображение входной щели прибора представляет собой наложение прямых отрезков от каждой точки входной щели (астигматическая фокаль). Длина астигматической фокали определяется выражением

$$l = \frac{H}{R^2} \left(\frac{s}{r} r'^2 + s'^2 \right), \text{ вблизи нормали } (\beta=0, s=R) \quad (2.25)$$

$$l_0 = \left(\frac{HR}{r} \right) \sin^2 \alpha = \left(\frac{H}{R} \right) \left(\frac{r'^2}{r} \right). \quad (2.26)$$

Параметр H определяет высоту заштрихованной части решетки, его можно узнать, используя FootPrint Diagram в панели Анализ OpticStudio, для данной системы $H=7.8$ мм, тогда согласно (2.26) $l_0 = 4,43$ мм. Реальная разрешающая сила полученной схемы $R_{\text{реал.}}=4419$.

Таблица 2.4 – Варианты заданий для моделирования вогнутой дифракционной решетки на круге Роуланда. Принять за λ_0 центральную длину волны диапазона

№ варианта	$R(\lambda_0)$	Длины волн для расчета λ , нм	$S_{вх}$, мм ($A=0,02$)
1	300	650, 680, 700	0,05
2	350	400, 420, 450	0,08
3	500	546,520, 500	0,04
4	400	587,550, 600	0,07
5	450	450, 480, 500	0,06
6	400	600, 623.8, 640	0,05
7	550	660, 670, 750	0,1
8	350	420, 440, 490	0,07
9	200	525, 550, 560	0,09
10	600	600, 623.8, 640	0,1
11	500	546,520, 500	0,08
12	200	650, 680, 700	0,05
13	250	420, 440, 490	0,12
14	300	600, 623.8, 640	0,06
15	450	450, 480, 500	0,1

Содержание отчета

1. Рисунки оптических схем с плоскими дифракционными решетками в среде OpticStudio.
2. Результаты расчетов угловой дисперсии и теоретической разрешающей способности плоских дифракционных решеток.
3. Графики зависимостей угловой дисперсии плоской пропускающей решетки от угла наклона решетки

4. Расчет спектральной системы монохроматора на основе круга Роуанда, эскизы системы и изображения спектра в OpticStudio, подтверждение расчетов.

5. Отчет должен быть оформлен согласно ГОСТ Р 2.105-2019 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Общие требования к текстовым документам;

Контрольные вопросы

1. Принцип действия дифракционной решетки. Основное уравнение дифракционной решетки.

2. Параметры дифракционной решетки. Как влияет угол наклона плоской пропускающей дифракционной решетки на её угловую дисперсию?

4. Угловая дисперсия дифракционной решетки и её разрешающая способность.

5. Типы дифракционных решеток.

Список литературы

1. Нагибина И.М. Прикладная физическая оптика: Учебник для вузов/ И.М. Нагибина, В.А. Москалев, Н.А. Полушкина, В.Л. Рудин. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Высшая школа, 2002. – 565 с.: ил.

2. Тарасов К.И. Спектральные приборы. – Л.: Машиностроение; Издание 2-е, перераб. и доп., 1977. – 368 с.

3. Пейсахсон И.В. Оптика спектральных приборов. – Л.: Машиностроение, 1975. – 312 с

4. Беляков Ю.М. Спектральные приборы: учебное пособие / Ю. М. Беляков, Н. К. Павлычева ; под ред. д-ра. техн. наук Н. К. Павлычевой; М-во образования и науки РФ, Федер. агентство по образованию, КГТУ им. А. Н. Туполева; [реценз.: Р. К. Мамедов (СПбГУ ИТМО), С. О. Мирумьянц] .– Казань: [Издательство Казанского государственного технического университета], 2007 .– 202 с. : ил. – Библиогр.: с. 199-201.

5. Толмачев Ю.А. Новые спектральные приборы. Принципы работы: [учебное пособие] / Ю. А. Толмачев; под ред. чл.-кор. АН СССР С. Э. Фриша; ЛГУ им. А. А. Жданова.– Л.: Издательство Ленинградского университета, 1976 .– 125 с. : ил. – Библиогр.: с. 123-124.

Лабораторная работа №3 «Моделирование монохроматора на основе Z-образной вертикально симметричной схемы»

Цель лабораторной работы: ознакомиться с конструкцией и основными спектральными свойствами Z-образной вертикально-симметричной схемы монохроматора, произвести расчет простого монохроматора на основе плоской отражательной решетки.

Задачи работы

1. Произвести габаритный расчет зеркальной оптической системы монохроматора.
2. Произвести расчет спектральных систем монохроматоров с плоской отражательной решеткой, смоделировать работу системы в OpticStudio, проверить расчеты.

Теоретические сведения

Для проектирования монохроматоров с малой светосилой (1:40 – 1:20) широко применяются зеркальные Z-образные вертикально-симметричные схемы приборов с плоской дифракционной решеткой [1] (см. рисунок 3.1). В такой схеме входная щель, ее изображение в центре спектральной картины, вершины обоих зеркал и центр дифракционной решетки лежат в одной вертикальной плоскости, параллельной штрихам решетки. Центры входной щели и спектральной картины расположены симметрично относительно горизонтальной плоскости, проходящей через центр решетки. При данном расположении элементов астигматизм коллиматора и камеры складывается, а кома камеры исправляется для угла, соответствующего углу падения для коллиматора. Для других углов камеры она будет недоисправленной или же переисправленной. При установке решетки на расстояние $0,85f'$ от зеркала проекционного объектива (камеры) поле в плоскости дисперсии решетки будет плоским, такая вариация Z-образной схемы получила названия схема Эберта-Фасти [1, 2].

Наиболее часто используется схема Черни-Тернера [3], которая является модификацией схемы Эберта-Фасти и отличается от нее тем, что вместо одного сферического (параболического) зеркала используются два: первое – для коллимации, второе – для фокусировки излучения на выходную щель (рис 3.2).

Для исключения сферической aberrации в качестве коллиматорного и камерного объектива обычно используют параболоидальное зеркало.

Уравнение параболоидальной поверхности вращения имеет вид: $y^2 + z^2 = 2rx$, где r – радиус кривизны в вершине. Параллельный оптической оси (ось x) пучок лучей после отражения от зеркала собирается в его фокусе на

расстоянии $f = r/2$ от вершины O (рис. 3.3). У параболоида отсутствует сферическая aberrация, кривизна поля такая же, как у сферического зеркала, астигматизм отсутствует при $x=f$, а кома 3-го порядка весьма значительна и не зависит от положения апертурной диафрагмы.

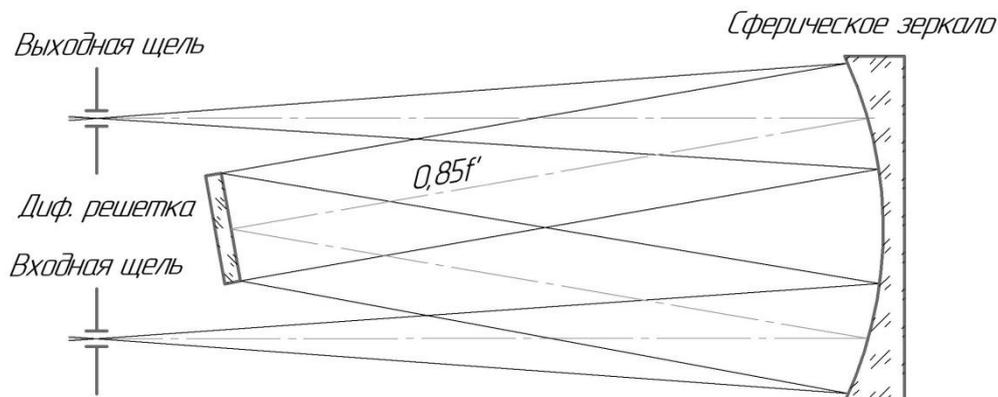


Рисунок 3.1 – Схема Эберта-Фасти

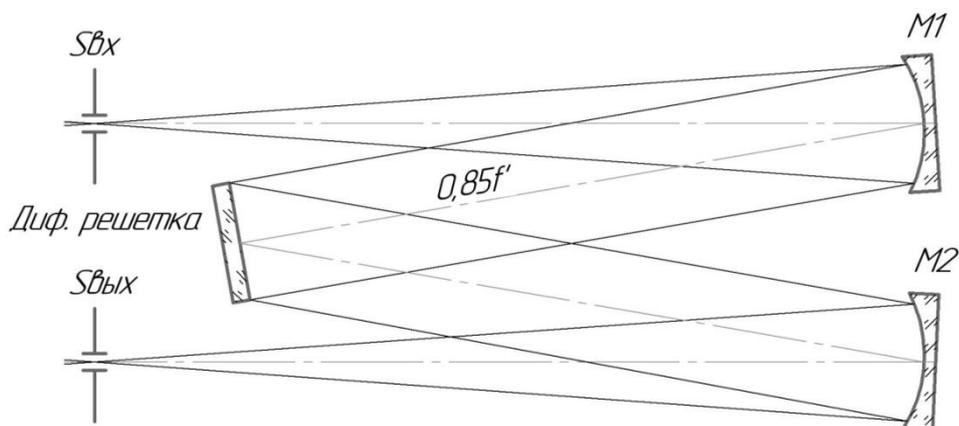


Рисунок 3.2 – Схема Черни-Тернера

Для упрощения изготовления, а также уменьшения габаритов и массы конструкции в качестве коллиматора и камеры часто используют внеосевые параболоидальные зеркала, принадлежащие одной и той же параболоидальной поверхности и расположенные симметрично ее оси.

Применение внеосевого параболического зеркала, т.е. части поверхности параболоида, расположенной по одну сторону от его оси, позволяет строить системы без дополнительных плоских зеркал, необходимых в случае установки осевого параболоида (см. рисунок 3.3).

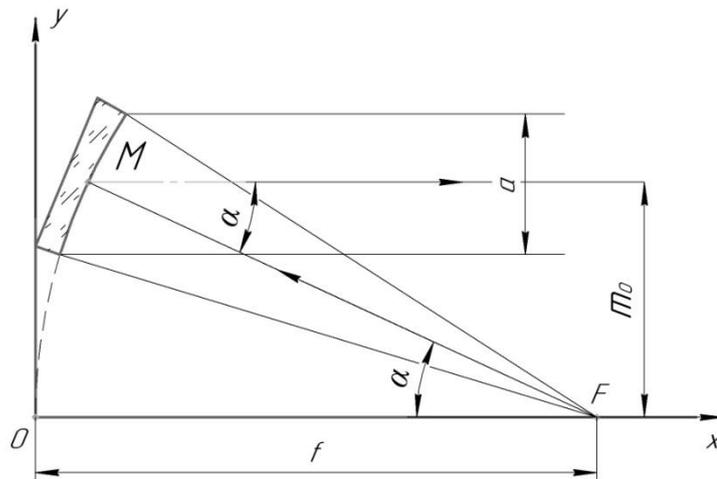


Рисунок 3.3 – Параметры внеосевого параболического зеркала

На рисунке 3.3 OF – ось парабоида, M – середина рабочей части зеркала, F – фокус. Все лучи, вышедшие из F , отразившись от зеркала, идут параллельно его оси. Луч FM образует с осью угол α , называемый внеосевым углом зеркала, расстояние m_0 – смещение оси парабоида.

Существование астигматической разности приводит к тому, что в плоскостях обоих астигматических фокусов образуются астигматические фокалы – взаимоперпендикулярные отрезки прямых, длина которых пропорциональна относительному отверстию пучка в каждой из этих плоскостей:

$$l_{as} = A\omega^2 f, \quad (3.1)$$

где ω – угол падения диспергированных лучей (относительно нормали к поверхности) на зеркало проекционного объектива.

Длина астигматической фокалы приблизительно равна расстоянию от точки пересечения оптической оси зеркала с фокальной плоскостью прибора, деленному на 1,7 фокусного расстояния проекционного объектива [1]. В центре спектрограммы фокаль ориентирована перпендикулярно спектральной линии, но вследствие ее незначительной длины этим обстоятельством можно пренебречь [1].

Порядок выполнения работы

Рассчитаем монохроматор с плоской отражающей решеткой и реальным спектральным разрешением $R=5000$ для центральной длины волны рабочего диапазона. Рабочий спектральный диапазон прибора 400 – 750 нм, центральная длина волны $\lambda_0 = 546$ нм. Пусть входная числовая апертура монохроматора $A=0,025$, ширина входной щели $S_{ex}=0,1$ мм, длина входной щели 10 мм. На приемнике должен регистрироваться спектральный интервал $\Delta\lambda=40$ нм. От

регистрируемого спектрального интервала будет зависеть размер приемной площадки при фиксированном разрешении прибора. Оптическая схема монохроматора будет включать в себя коллимационный и проекционный объективы с равными фокусными расстояниями.

Прежде чем приступить к расчету спектральных характеристик прибора, необходимо выбрать конструкцию и задать зеркальную оптическую систему монохроматора (рисунок 3.4).

Одной из простых схем, в которой компенсируются все aberrации третьего порядка, является схема с внеосевыми параболическими зеркалами и симметричным ходом лучей (рисунок 3.4, 3.5 а, б). Однако в данной схеме не будет исправлена кривизна поля, что может негативно сказаться на регистрации спектра с длинной входной щелью. Из рисунка 3.4 видно, что при данном расположении дифракционной решетки угол падения лучей на решетку α и угол дифракции β будут зависеть от угла наклона дифракционной решетки ϕ и угла γ .

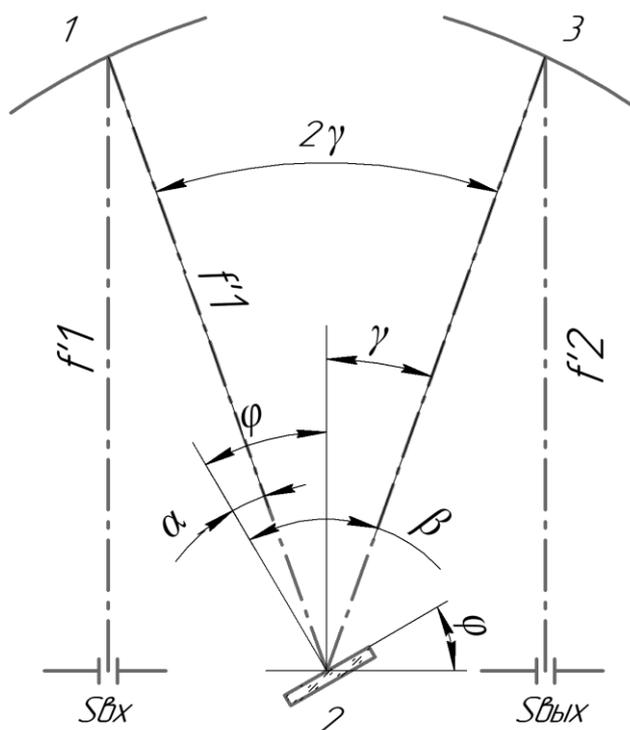


Рисунок 3.4 – Оптическая схема монохроматора: 1 – коллимационный объектив, 2 – дифракционная плоская решетка, 3 – проекционный объектив (камера)

Угол γ определяет пространственное разнесение плоскости приемника ($S_{вых}$) и плоскости входной щели ($S_{вх}$). Чем больше угол γ , тем большие поперечные габариты будут у системы (большее расстояние между входной щелью и приемником). Угол γ определяется фокусным расстоянием

проекционного объектива и допустимыми габаритами системы. От фокусного расстояния проекционного объектива, в свою очередь, зависит спектральное разрешение монохроматора.

Из рисунка 3.4 находим, что угол падения

$$\alpha = \gamma + \varphi, \quad (3.2)$$

обращаем внимание, что согласно рисунку угол γ будет откладываться против часовой стрелки, следовательно, будет отрицательным:

$$(|\alpha| = |\varphi| - |\gamma|),$$

а угол дифракции

$$\beta = -\gamma + \varphi \quad (|\beta| = |\varphi| + |\gamma|), \quad (3.3)$$

из рисунка $\varphi < 0$.

Из основного уравнения решетки (2.1) $(\sin\alpha + \sin\beta) = k\lambda N$ вычислим угол поворота решетки φ :

$$\sin(\gamma + \varphi) + \sin(-\gamma + \varphi) = k\lambda N,$$

преобразовав синусы суммы, получим:

$$\begin{aligned} \sin\gamma\cos\varphi + \cos\gamma\sin\varphi + \sin(-\gamma)\cos\varphi + \cos(-\gamma)\sin\varphi &= k\lambda N, \\ \sin\varphi &= \frac{k\lambda N}{2\cos\gamma}. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Таким образом, выбор фокусного расстояния коллимационного и проекционного объективов в данной схеме влияет на спектральные характеристики прибора в целом и на угол дифракции в частности. Зададим описанные выше системы в OpticStudio, в качестве дифракционной решетки будем использовать плоское зеркало. Смоделируем работу оптической системы с симметричным ходом лучей (рисунок 3.4) в OpticStudio, конструктивные параметры приведены в таблице 3.1. Асферические поверхности в OpticStudio задаются при помощи коэффициента k – *conic constant*, при этом $k=(1+\delta)$, где δ – эксцентриситет кривой второго порядка. Задание внеосевого параболоида реализуется при помощи смещения поверхности параболоида по оси Y , таким образом, что центр параболоида проходит через центр дифракционной решетки, оправа которой является апертурной диафрагмой системы.

Внеосевые части параболоидов в OpticStudio задаются путем децентрировки оси параболоида при помощи поверхностей Coordinate Break.

У симметричной зеркальной системы, представленной на рисунках 3.5 а, б, кривизна поля составляет 0,0105 мм в сагиттальном и меридиональном

сечениях по ширине щели и 0,143 мм в сагиттальном и меридиональном сечениях по длине щели.

Таблица 3.1 – Конструктивные параметры симметричной Z-образной оптической системы монохроматора (Lens Data)

№	Тип поверхности	Радиус, мм	Толщина по оси, мм	Материал
0	Standard	Infinity	700	
1	Coordinate Break	-	0	
2	Standard	-1400	-700	Mirror ($k = -1$)
3	Standard	Infinity	0	Mirror ($k = 0$)
4	Coordinate Break	-	700	
5	Standard	-1400	-700	Mirror ($k = -1$)
6	Coordinate Break	-	-8	
7	Image	Infinity	0	

№	Децентрировка по оси X, мм	Децентрировка по оси Y, мм	Наклон относительно оси X, °
1	0	73,37	0
4	0	0	0
6	0	73,37	0

Качество изображения при этом - дифракционно-ограниченное (рисунок 3.6). Угол γ можно узнать, используя операнд RAID в Merit Function Editor, он будет равен углу падения на плоское зеркало, также при помощи редактора оценочной функции можно определить углы падения на зеркала коллиматора и проекционного объектива (рисунок 3.7).

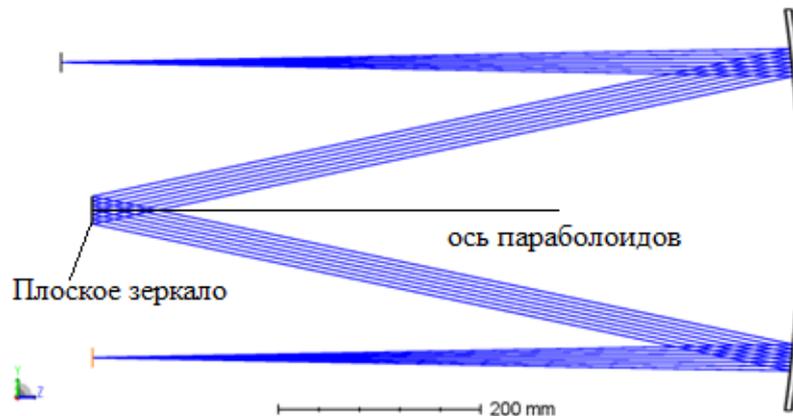


Рисунок 3.5 а – Z-образная оптическая система монохроматора. Угол $\gamma = 12^\circ$, $f' = 700$ мм, поперечный размер системы 300 мм, расстояние между дифракционной решеткой и центром приемника 130 мм, смещение плоскости Гаусса – 31 мм

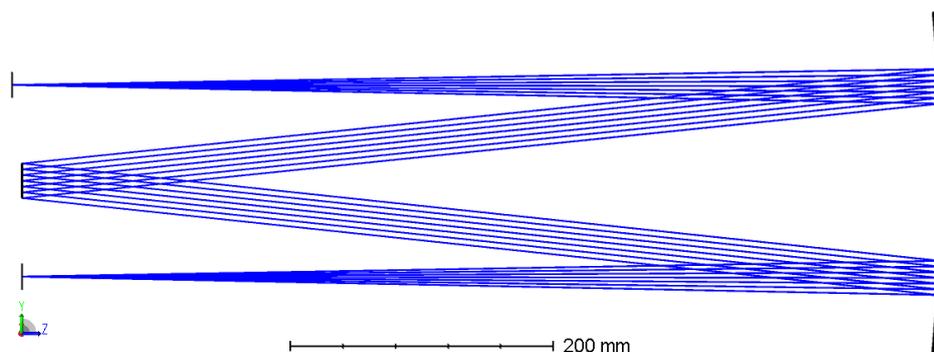


Рисунок 3.5 б – Z-образная оптическая система монохроматора. Угол $\gamma = 6^\circ$, $f' = 700$ мм, поперечный размер системы 182 мм, расстояние между дифракционной решеткой и центром приемника 55 мм, смещение плоскости Гаусса – 8 мм

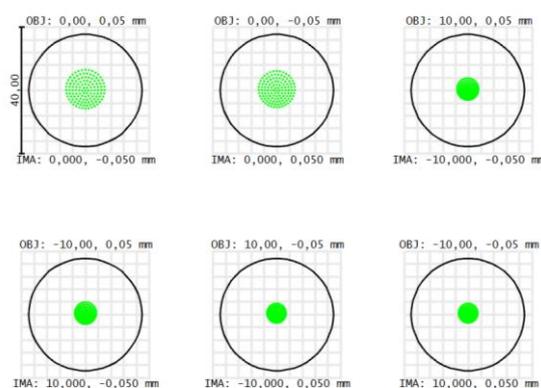


Рисунок 3.6 – Пятна рассеяния для симметричной Z-образной оптической системы монохроматора для $\lambda = 546$ нм и разных точек поля. Диаметр диска Эйри (обозначен окружностью) 35,5 мкм

	Type	Surf	Wave	Hx	Hy	Px	Py		Target	Weight	Value	% Contrib
1	CONF ▾	2										
2	RAID ▾	4	2	0,000	0,000	0,0...	0,000		0,000	0,000	6,000	0,000
3	RAED ▾	4	2	0,000	0,000	0,0...	0,000		0,000	0,000	6,000	0,000
4	RAID ▾	2	2	0,000	0,000	0,0...	0,000		0,000	0,000	3,000	0,000
5	RAID ▾	7	2	0,000	0,000	0,0...	0,000		0,000	0,000	3,000	0,000

Рисунок 3.7 – Окно редактора оценочной функции (Merit Function Editor) в OpticStudio

Особенностью данного типа систем является необходимость перемещения плоскости приемника от гауссовой плоскости (фокальной плоскости парааксиальных лучей) от зеркала проекционного объектива с целью уменьшения диаметра пятна рассеяния. Изменяя фокусное расстояние системы и угол γ , можно варьировать расстояние между компонентами системы, а также согласовывать общие габариты системы с техническим заданием.

Расчет оптической системы монохроматора построенного по симметричной Z-образной схеме

Для определения основных параметров спектральных приборов необходимо определить *линейную дисперсию* $\frac{dl}{d\lambda}$, при которой будет обеспечиваться требуемое спектральное разрешение R . Исходя из определения разрешающей способности [1] (2), минимальное (предельное) приращение спектра будет равно

$$d\lambda = \frac{\lambda}{R}. \quad (3.5)$$

Минимальное линейное приращение на приёмнике будет определяться размером изображения входной щели спектрометра:

$$dl = S_{\text{вх}}' = S_{\text{вх}}\Gamma, \quad (3.6)$$

где $S_{\text{вх}}$ – ширина входной щели спектрометра; Γ – увеличение оптической системы спектрометра. При расчёте неравноплечной схемы спектрометра, величина β выбирается исходя из требуемых параметров входной щели, её изображения и параметров приёмника. При расчёте равноплечной схемы ($f'_{\text{кол.}} = f'_{\text{об.}}$) $\Gamma = -1$.

Исходя из (3.5) и (3.6),

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{S_{\text{вх}}\Gamma R}{\lambda}. \quad (3.7)$$

В случае использования автоколлимационной или равноплечной схемы выражение (3.7) приобретает вид

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{S_{\text{вх}}R}{\lambda}. \quad (3.8)$$

Далее необходимо определить параметры дифракционной решётки. Параметры дифракционной решётки определяются следующими выражениями.

Угловая дисперсия решетки

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{kN}{\cos\beta}, \quad (3.9)$$

в режиме автоколлимации ($\alpha = \beta$), $kN = \frac{2\sin\beta}{\lambda}$, следовательно,

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{2tg\beta}{\lambda}. \quad (3.10)$$

Зная необходимую линейную дисперсию на приёмнике и угловую дисперсию, даваемую решёткой, можно вычислить фокус проекционного объектива, который в равноплечной схеме будет равен фокусу коллиматора.

$$\text{Линейная дисперсия: } \frac{dl}{d\lambda} = \frac{d\beta}{d\lambda} \times f'_{\text{камеры}} = \frac{kN}{\cos\beta} \times f'_{\text{камеры}}, \quad (3.11)$$

$$\text{при автоколлимации } \frac{dl}{d\lambda} = \frac{2tg\beta f'_{\text{камеры}}}{\lambda} \text{ мм/нм.} \quad (3.12)$$

$$\text{Обратная линейная дисперсия: } \frac{d\lambda}{dl} = \frac{\cos\beta}{kN f'_{\text{камеры}}}, \quad (3.13)$$

$$\text{при автоколлимации } \frac{d\lambda}{dl} = \frac{\lambda}{2tg\beta f'_{\text{камеры}}}. \quad (3.14)$$

Для достижения требуемого разрешения ($R=5000$) необходимо, чтобы на один разрешающий элемент приемника dl приходилось $d\lambda = 0,11$ нм. Зная ширину входной щели и предполагаемую оптическую схему прибора ($\Gamma=-1\times$), получаем, что $dl=S_{\text{вх}}$. Зная, что на один разрешающий элемент приемника будет приходиться 0,11 нм, найдем размер приемника для регистрации спектрального интервала $\Delta\lambda = 40$ нм.

$$d\lambda = \frac{\lambda_0}{5000} = 0,11 \text{ нм. } (R = 5000).$$

Количество элементов приемника, необходимых для регистрации изображения:

$$N_{\text{элементов}} = \frac{\Delta\lambda}{d\lambda} = \frac{40}{0,11} = 367. \quad (3.15)$$

Таким образом, минимальный размер приемника

$$L_{\text{пр}} = N_{\text{элементов}} dl = 367 \cdot 0,1 = 36,7 \text{ мм.} \quad (3.20)$$

Линейная дисперсия в плоскости приёмника:

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{0,1 \text{ мм}}{0,1092 \text{ нм}} = 0,916 \text{ мм/нм}.$$

Линейную дисперсию также можно определить из выражения (3.7), принимая $dl = S_{\text{вх}}$:

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{S_{\text{вх}}R}{\lambda_0}. \quad (3.21)$$

После определения требуемой линейной дисперсии монохроматора для достижения требуемого спектрального разрешения необходимо определить: постоянную решетки N , угол падения лучей на решетку α , угол дифракции β , рабочий порядок спектра k и угол поворота дифракционной решетки φ . Для определения данных параметров ограничимся габаритами системы и относительным отверстием объективов, примем фокусное расстояние параболоидов $f'_{\text{камеры}} = f'_{\text{кол}} = 700 \text{ мм}$, тогда светосила системы составит 1:20 (входная числовая апертура $A=0,025$). Нам известна линейная дисперсия в плоскости приемника $\frac{dl}{d\lambda}$, из выражений 3.8 и 3.11 следует, что

$$\cos\beta = \frac{f'_{\text{камеры}}\lambda_0 k N}{RS_{\text{вх}}} \quad (3.22)$$

$$f'_{\text{камеры}} = \frac{S_{\text{вх}}R \cos\beta}{\lambda_0 k N}. \quad (3.23)$$

Постоянную решетки N выбирают из стандартного ряда (37,5; 50; 75; 100; 150; 200; 300; 400; 600; 1200; 1800; 2400; 3600 лин/мм), порядок примем $k=1$.

Таким образом, мы получаем систему уравнений (3.4, 3.22, 3.23) с неизвестными параметрами β , α и φ . Для ее решения хорошо подходит Excel. Решать данную систему уравнений можно, отталкиваясь либо от угла φ (3.4), либо от выбранного фокусного расстояния.

Задавая начальный угол γ и все возможные значения N , вычисляем углы α , β и φ , используя выражения 3.2, 3.3, 3.4. Из полученных значений выбираются значения углов при фокусе объектива, наиболее близком к начальному заданному значению. Угол α можно определять также из основного уравнения решетки (2.1).

В рассматриваемом примере при $N=1200 \text{ лин/мм}$, $k=1$ находим наиболее близкое к выбранному значение фокусного расстояния зеркал, $f'_{\text{камеры}} = 690,3 \text{ мм}$. Так как мы не можем подобрать число N произвольным образом, фокусное расстояние итоговой системы будет немного отличаться от расчетного, при котором выбирался угол разведения γ . Следовательно, необходимо пересчитать все параметры исходя из откорректированного

значения угла $\gamma = 6,08^\circ$. После пересчета получаем $\varphi = 19,24^\circ$, $\alpha = 13,15^\circ$, $\beta = 25,32^\circ$.

Конструктивные параметры полученной системы в OpticStudio приведены в таблице 3.2, ход лучей на рисунке 3.8.

Таблица 3.2 – Конструктивные параметры оптической системы Z-образного монохроматора (Lens Data)

№	Тип поверхности	Радиус, мм	Толщина по оси, мм	Материал
0	Standard	Infinity	690,3	
1	Coordinate Break	-	0	
2	Standard	-1380,6	-690,3	Mirror (k = -1)
3	Coordinate Break	-	0	
4	Diffraction Grating (1,2 лин/мкм)	Infinity	0	Mirror (k = 0)
5	Coordinate Break	-	690,3	
6	Standard	-1380,6	-690,3	Mirror (k = -1)
7	Coordinate Break	-	-8,25	
8	Image	Infinity	0	
№	Децентрировка по оси X, мм	Децентрировка по оси Y, мм	Наклон относительно оси X, °	
1	0	73,31	0	
3	0	0	19,235	
5	0	0	-19,235	
7	0	73,31	0	

В данной системе для улучшения качества изображения необходимо найти плоскость наилучшей установки, поэтому перед приемником добавлено дополнительное расстояние в 8,25 мм. При этом система обладает

дифракционно-ограниченным качеством изображения (рисунок 3.9). Единовременный спектральный диапазон укладывается в 36,7 мм (рисунок 3.10). Углы падения и дифракции в полученной системе представлены на рисунке 3.11: $\alpha = 13,16^\circ$, $\beta = 25,32^\circ$. Значения углов близки к расчетным, что подтверждает корректность системы.

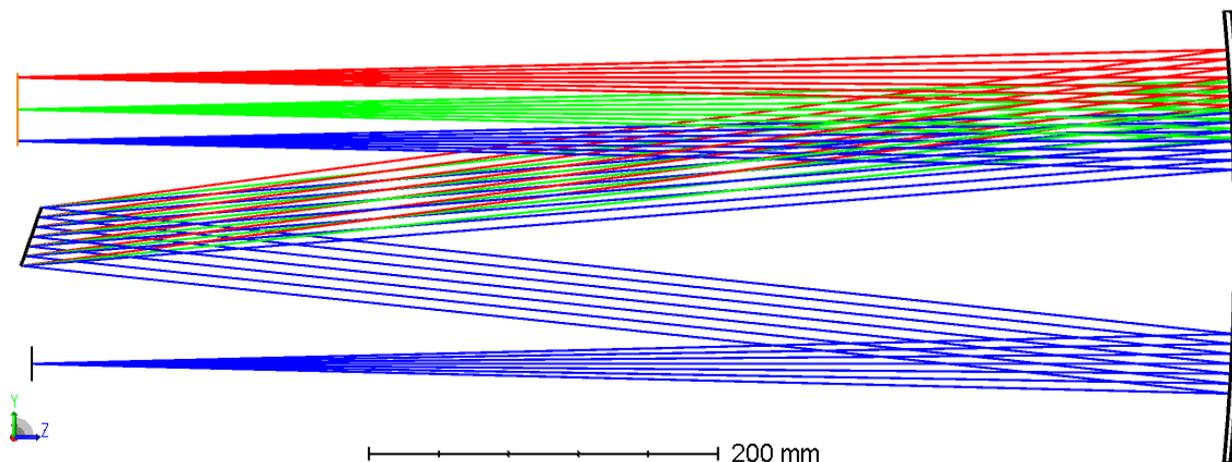


Рисунок 3.8 – Ход лучей в оптической системе Z-образного монохроматора

Для моделирования работы монохроматора для других длин волн используется режим мульти-конфигураций (рисунок 3.12). При помощи выражения (3.4) рассчитываются углы φ поворота решетки при $N=1200$ лин/мм.

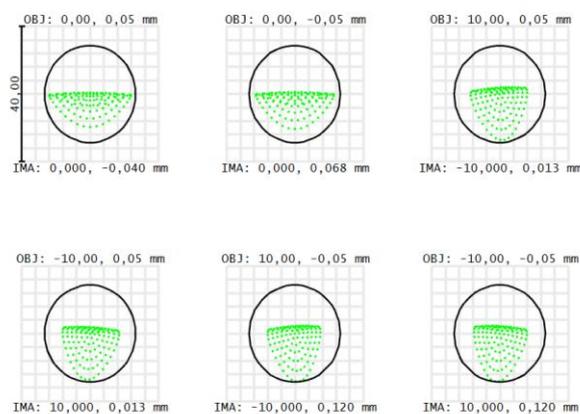


Рисунок 3.9 – Пятна рассеяния для центральной длины волны диапазона в плоскости изображения монохроматора для $\lambda=546$ нм и разных точек поля.

Диаметр диска Эйри (обозначен окружностью) 27,6 мкм

Рассчитанный по данной схеме монохроматор будет обладать остаточной кривизной поля (рисунок 3.13), которая достигает значения 0,012 мм для короткой стороны щели и 0,151 мм для длинной стороны щели в меридиональной плоскости. Данный недостаток присущ Z-образным системам,

в которых дифракционная решетка размещается в фокальной плоскости проекционного объектива [1, 3].

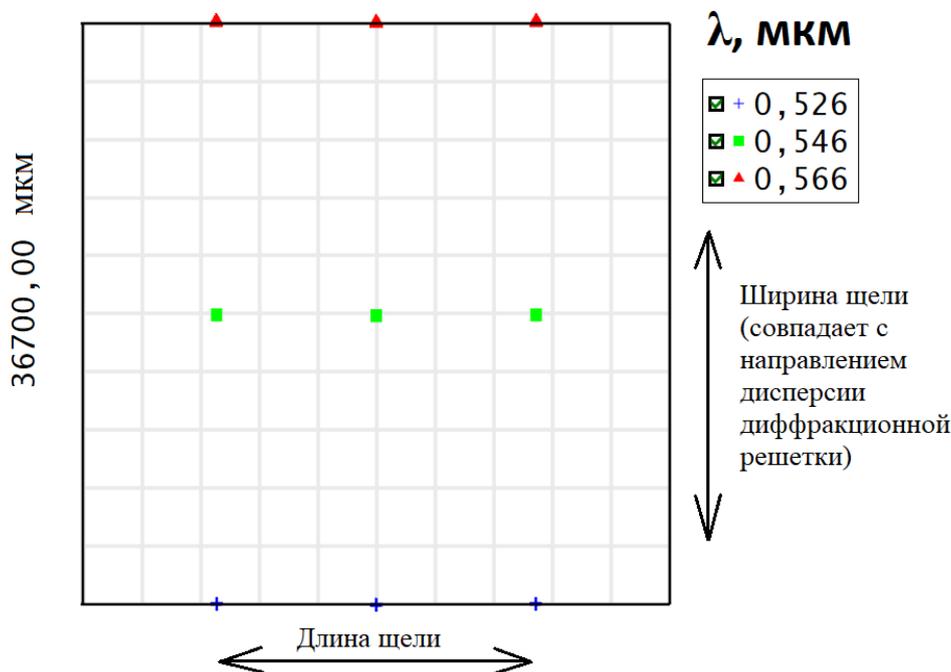


Рисунок 3.10 – Схематичное изображение спектра на приемнике (Full Field Spot Diagram)

Type	Surf	Wave	Hx	Hy	Px	Py	Targe	Weight	Value
1	CONF ▾ 2								
2	RAID ▾ 4	2	0,000	0,000	0,0...	0,000	0,000	0,000	13,156
3	RAED ▾ 4	2	0,000	0,000	0,0...	0,000	0,000	0,000	25,315
4	RAID ▾ 2	2	0,000	0,000	0,0...	0,000	0,000	0,000	3,040
5	RAID ▾ 7	2	0,000	0,000	0,0...	0,000	0,000	0,000	3,040

Рисунок 3.11 – Углы падения и дифракции дифракционной решетки монохроматора

Active : :	Config 1	Config 2*	Config 3
1 WAVE ▾ 1	0,400	0,526	0,710
2 WAVE ▾ 2	0,420	0,546	0,730
3 WAVE ▾ 3	0,440	0,566	0,750
4 PRAM ▾ 3/3	14,680	19,235	26,135

Рисунок 3.12 – Окно редактора мульти-конфигураций

Очевидно, что для других длин волн рабочего диапазона монохроматора теоретическое разрешение будет другим, так как значение линейной дисперсии будет изменяться, рассчитаем его. Из (3.21)

$$R = \frac{\lambda_0}{S_{\text{ВХ}}} \frac{dl}{d\lambda}. \quad (3.24)$$

Для синего края рабочего диапазона 400 – 440 нм ($\lambda_0 = 420$ нм) $R=3721$, для красного края 710 – 750 нм ($\lambda_0 = 730$ нм) $R=7148$.

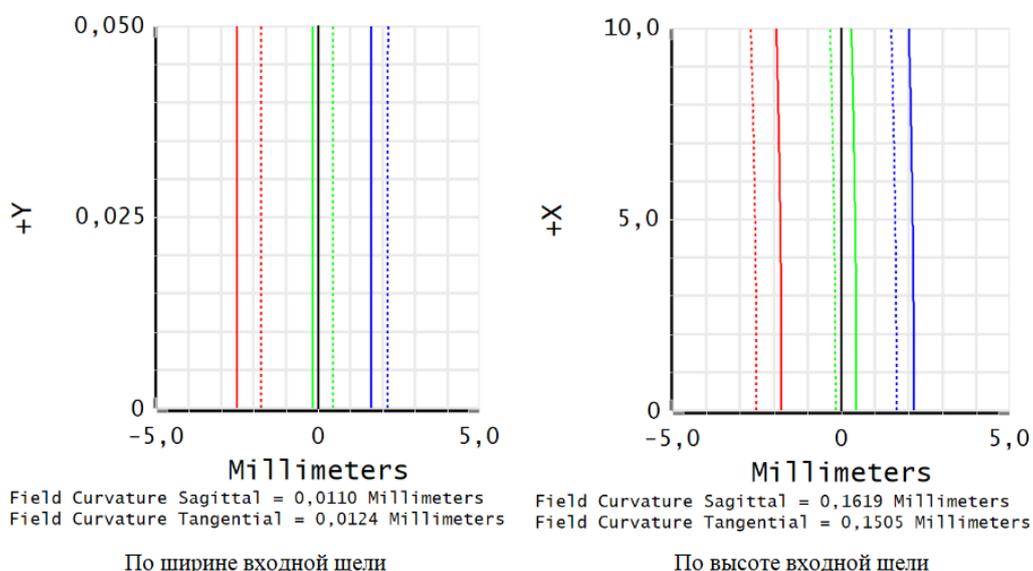


Рисунок 3.13 – Кривизна поля Z-образного монохроматора

Если задать в системе $\Delta\lambda=0,11$ нм, что соответствует расчетному значению $R=5000$ ($\lambda_0 = 546$ нм), получим картину, представленную на рисунке 3.14. Видно, что при соблюдении расчетного значения $dl=0,1$ мм края изображений входной щели будут накладываться друг на друга. Согласно критерию Релея изображения двух точечных объектов считаются разрешенными, если центральный максимум дифракционного изображения от одного источника совпадает с первым минимумом дифракционного изображения другого источника [4]. При этом условии максимум освещенности между двумя источниками составляет 80% максимального значения освещенности, т.е. провал в освещенности между двумя точечными источниками должен быть более 20%.

Рассмотрим работу рассчитанной системы в непоследовательном режиме OpticStudio с целью определения освещенности соседних изображений входной щели. Конструктивные параметры системы в непоследовательном режиме OpticStudio приведены в таблице 3.3. В качестве источника излучения выбран объект Source Two Angle, он позволяет задать размеры излучающей площадки и угол расхождения лучей (апертурный угол). В качестве длин волн источника используются системные длины волн, которые задаются вручную. В качестве приемника выбран объект Detector Rectangle с размерами 20x20 мм, количество пикселей 2000x2000 (1 пиксель = 10 мкм).

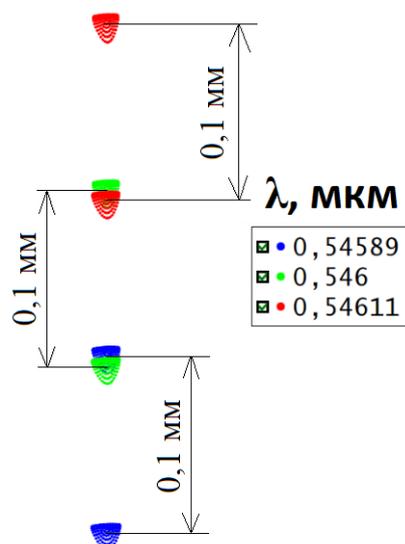


Рисунок 3.14 – Монохроматические изображения входной щели Z-образного монохроматора, при $\Delta\lambda=0,11$ нм

Таблица 3.3 – Конструктивные параметры оптической системы Z-образного монохроматора в непоследовательном режиме

№	Тип объекта (опорный объект)	Позиция по оси Y, мм	Позиция по оси Z, мм	Наклон относительно оси X, °	Радиус, мм	Материал
0	Source Two Angle (0)	0	0	0	–	–
1	Standard Surface (1)	73,31	690,3	0	-1380,6	Mirror (k = -1)
4	Diffraction Grating (2) (1,2 лин/мкм)	0	-690,3	160,765	Infinity	Mirror (k = 0)
6	Standard Surface (1)	73,31	690,3	0	-1380,6	Mirror (k = -1)
7	Detector Rectangle (1)	146,62	-8,25	0	–	–

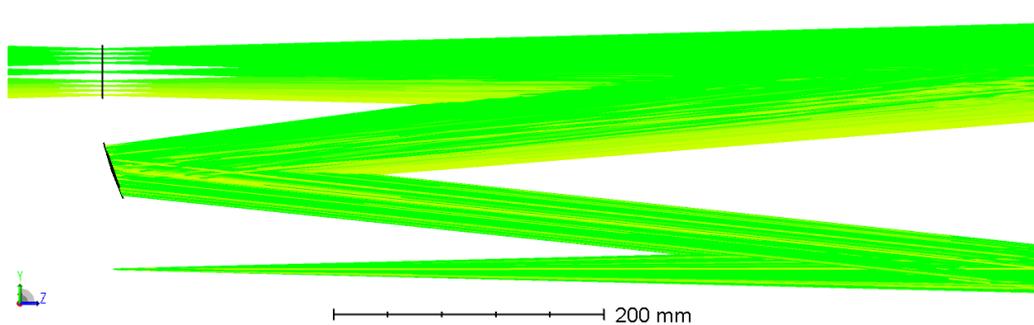


Рисунок 3.15 – Ход лучей в оптической системе Z-образного монохроматора в непоследовательном режиме

На рисунке 3.15 представлен ход лучей в полученной системе монохроматора. Поверхности параболических зеркал в системе ограничены при помощи пользовательских апертур (User Defined Aperture). В качестве наглядного эксперимента пропустим через систему «белый» свет (рисунок 3.16). На приемнике регистрируется только расчетный для данного положения дифракционной решетки спектр (526 – 546 нм).

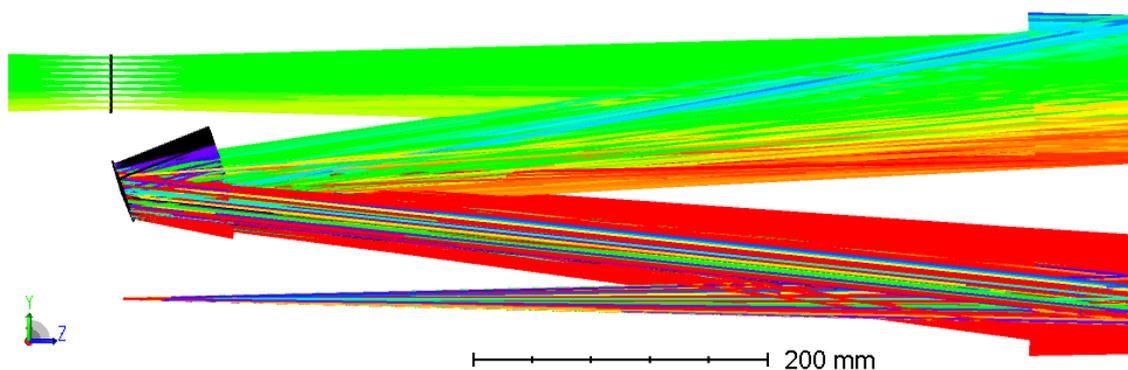


Рисунок 3.16 – Ход лучей в оптической системе Z-образного монохроматора в непоследовательном режиме. Источник излучает «белый» свет

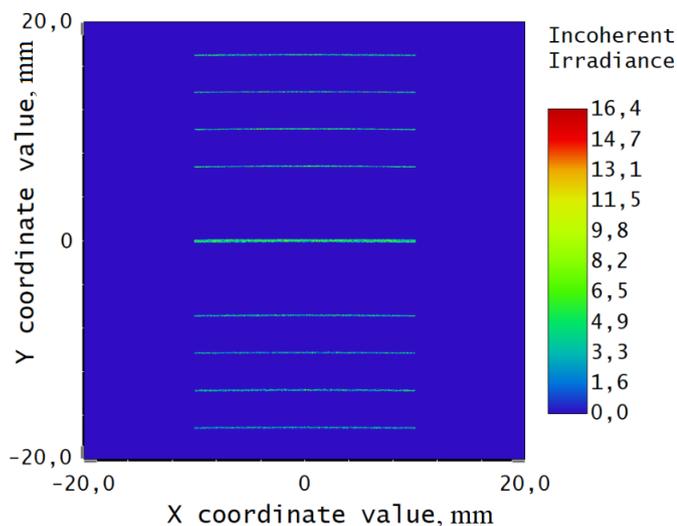
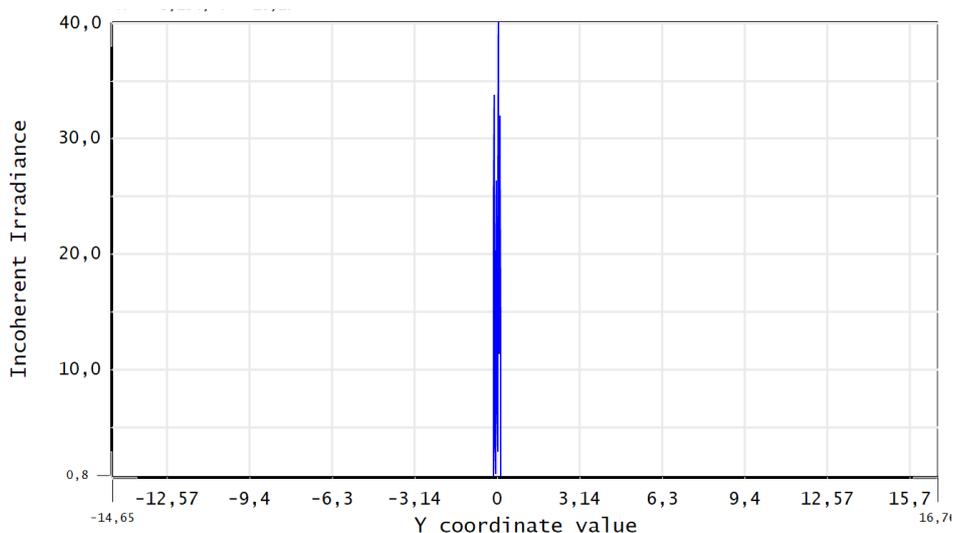


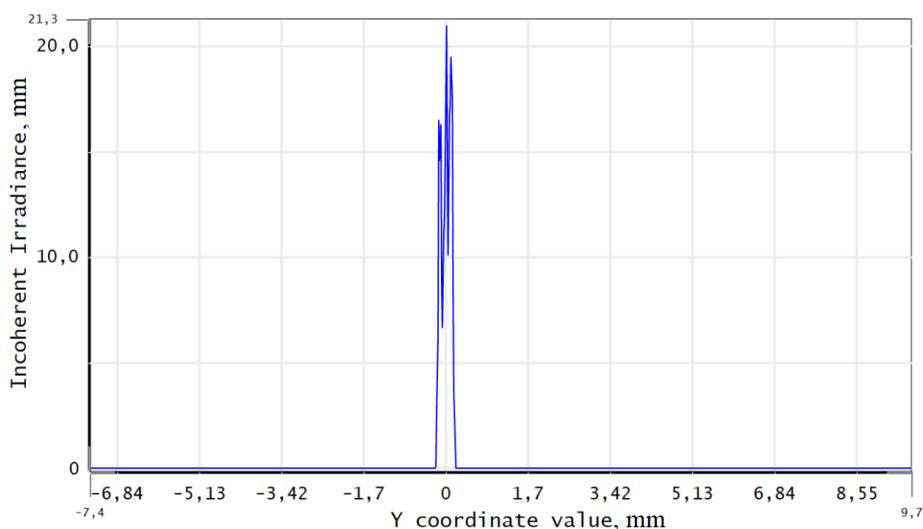
Рисунок 3.17 – Изображение спектра на приемнике

На рисунке 3.17 представлено изображение в плоскости приемника при работе системы с длинами волн 526 – 546 нм. Утолщение в центре связано с заданием близких длин волн в источнике с разностью $\Delta\lambda=0,11$ нм. Отчетливо прослеживается искривление спектральных линий, присущее данной системе.

На рисунке 3.18 а) отчетливо видны только два пика в плоскости изображения монохроматора, что говорит о том, что три близкие длины волны не разрешаются в данной конфигурации системы. С увеличением $\Delta\lambda$ до 0,14 нм ($\lambda_1 = 545,86$ нм, $\lambda_0 = 546$ нм, $\lambda_2 = 546,14$ нм) различаются три пика интенсивностей. Таким образом, реальное разрешение системы будет ниже расчетного и составит $R=\lambda/\Delta\lambda=3900$.



а)



б)

Рисунок 3.18 – Интенсивность изображений входной щели на приемнике для трех близких длин волн при $\lambda_0 = 546$ нм. а) $\Delta\lambda=0,11$ нм, б) $\Delta\lambda=0,14$ нм

Следует отметить, что в данном пособии не учтены шумовые параметры приемника, размер пикселя приемника, бинаризация пикселей и другие особенности ПЗС-приемников. Повысить реальное разрешение системы без изменения конструктивных параметров элементов можно, уменьшив ширину входной щели (при неизменном увеличении оптической системы спектрального прибора увеличится количество монохроматических изображений входной щели на приемнике), границей при уменьшении размеров служит ширина «нормальной» щели.

Расчет оптической системы монохроматора по схеме Черни-Тернера

Рассмотрим вариацию Z-образной схемы Эберта-Фасти – схему Черни-Тернера (рисунок 3.14). Конструктивные параметры приведены в таблице 3.3.

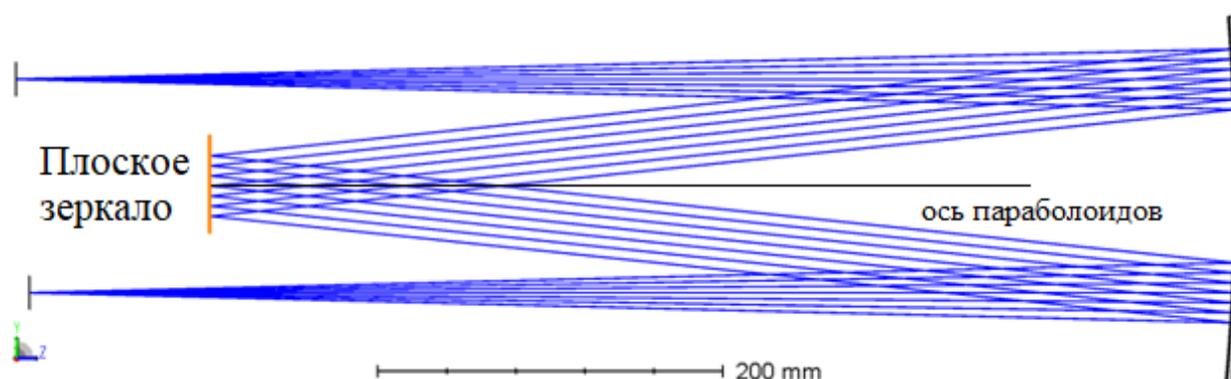


Рисунок 3.14 – оптическая система монохроматора Черни-Тернера. Угол $\gamma = 6^\circ$, $f' = 700$ мм, поперечный размер системы 163 мм расстояние между дифракционной решеткой и центром приемника 42 мм, смещение плоскости Гаусса 8 мм

Таблица 3.3 – Конструктивные параметры оптической системы Черни-Тернера (Lens Data)

№	Тип поверхности	Радиус, мм	Толщина по оси, мм	Материал
0	Standard	Infinity	700	
1	Coordinate Break	-	0	
2	Standard	-1400	-595	Mirror ($k = -1$)
3	Standard	Infinity	0	Mirror ($k = 0$)
4	Coordinate Break	-	595	

Продолжение Таблицы 3.3

№	Тип поверхности	Радиус, мм	Толщина по оси, мм	Материал
5	Coordinate Break	-	0	
6	Standard	-1400	-700	Mirror ($k = -1$)
7	Coordinate Break	-	-8	
8	Image	Infinity	0	

№	Децентрировка по оси X, мм	Децентрировка по оси Y, мм	Наклон относительно оси X, °
1	0	73,37	0
5	0	-22,07	0
7	0	73,37	0

Кривизна поля данной системы для сагиттального сечения составляет 0,0097 мм, для меридионального 0,0081 мм по ширине щели; 0,122 и 0,079 мм для сагиттального и меридионального сечения соответственно по длинной стороне щели. На величину кривизны поля в данных системах влияет размер входной щели. На приемнике будут наблюдаться пятна рассеяния, представленные на рисунке 3.15, видно, что для крайних по высоте щели точек поля пятна вырождаются в линии (астигматические отрезки).

Расчет системы монохроматора Черни-Тернера производится аналогично предыдущей системы согласно формулам 3.2 – 3.23.

Спектральные характеристики данной системы рассчитываются схожим образом, при помощи выражений 3.5 – 3.23. При $N=1200$ лин/мм, $k=1$ и $f'_{\text{камеры}} = 690,3$ мм, получаем $\varphi=19,26^\circ$, $\alpha=13,18^\circ$, $\beta=25,29^\circ$. Конструктивные параметры системы представлены в таблице 3.4, ход лучей представлен на рисунке 3.16. Смещение плоскости Гаусса составляет 8,3 мм. Пятна рассеяния, получаемые вследствие установки дифракционной решетки на расстояние $0,85f$ от проекционного объектива, представлены на рисунке 3.17.

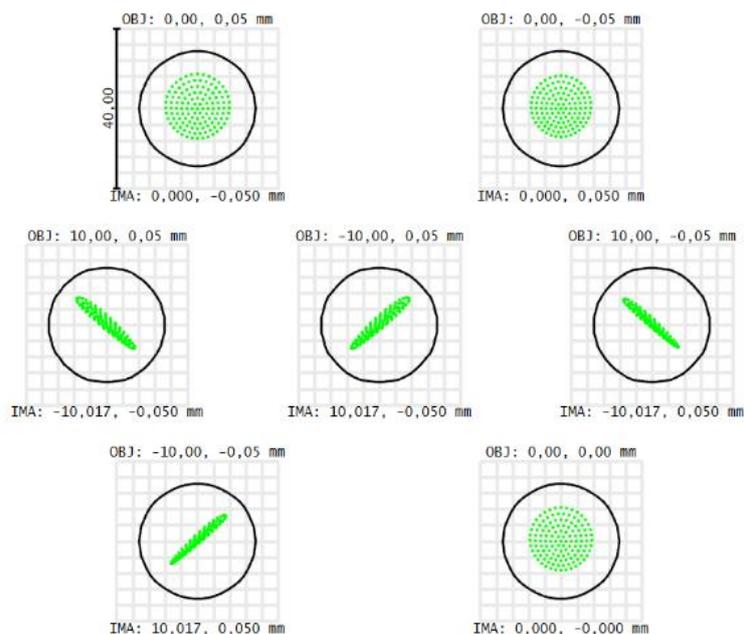


Рисунок 3.15 – Пятна рассеяния для оптической система Черни-Тернера с плоским зеркалом вместо дифракционной решетки для $\lambda=546$ нм и разных точек поля. Диаметр диска Эйри (обозначен окружностью) 28,7 мкм

Единовременный спектральный диапазон укладывается в 36,63 мм (рисунок 3.18). Углы падения и дифракции в полученной системе представлены на рисунке 3.19: $\alpha = 13,18^\circ$, $\beta = 25,29^\circ$. Значения углов близки к расчетным, что подтверждает корректность системы. Рассчитанный по схеме Черни-Тернера монохроматор будет обладать минимальной остаточной кривизной поля (рисунок 3.20), которая достигает значения 0,010 мм в сагиттальной плоскости по ширине входной щели и 0,14 мм в сагиттальной плоскости по высоте входной щели. Однако в меридиональной плоскости по высоте входной щели кривизна поля составляет 0,087 мм.

Таблица 3.4 – Конструктивные параметры оптической системы Черни-Тернера (Lens Data)

№	Тип поверхности	Радиус, мм	Толщина по оси, мм	Материал
0	Standard	Infinity	690,3	
1	Coordinate Break	-	0	
2	Standard	-1380,6	-586,755	Mirror ($k = -1$)
3	Coordinate Break	-	0	

Продолжение Таблицы 3.4

№	Тип поверхности	Радиус, мм	Толщина по оси, мм	Материал
4	Diffraction Grating (1,2 лин/мкм)	Infinity	0	Mirror ($k = 0$)
5	Coordinate Break	-	586,755	
6	Coordinate Break	-	0	
7	Standard	-1380,6	-690,3	Mirror ($k = -1$)
8	Coordinate Break	-	-8,3	
9	Image	Infinity	0	

№	Децентрировка по оси X, мм	Децентрировка по оси Y, мм	Наклон относительно оси X, °
1	0	73,37	0
3	0	0	19,26
5	0	0	-19,26
6	0	-22,07	0
8	0	73,37	0

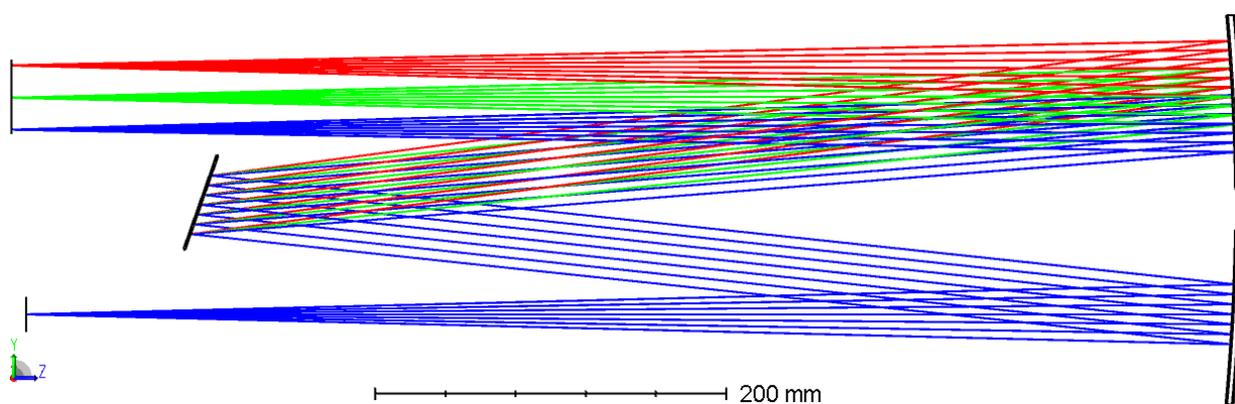


Рисунок 3.16 – Ход лучей в оптической системе монохроматора Черни-Тернера

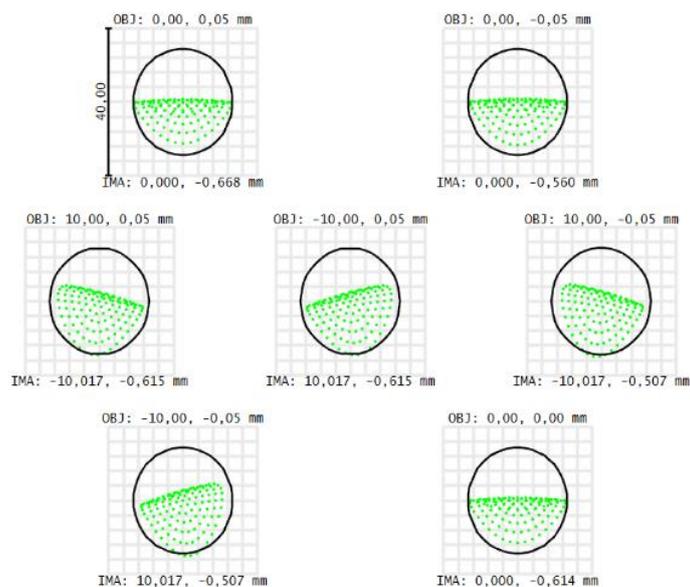


Рисунок 3.17 – Пятна рассеяния для центральной длины волны диапазона в плоскости изображения монохроматора Черни-Тернера для $\lambda=546$ нм и разных точек поля. Диаметр диска Эйри (обозначен окружностью) 28,7 мкм

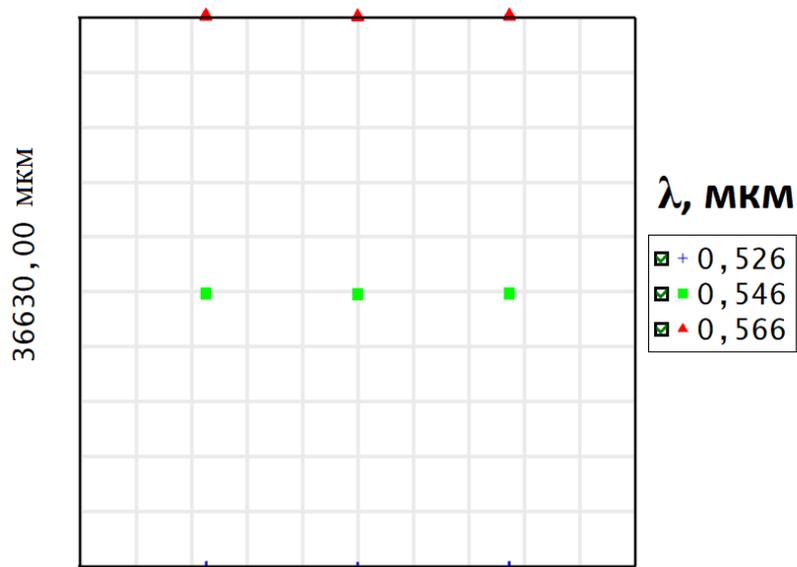


Рисунок 3.18 – Схематичное изображение спектра на приемнике для схемы Черни-Тернера (Full Field Spot Diagram)

Type	Surf	Wave	Hx	H _y	P _x	P _y	Targe	Weight	Value
1	CONF ▾ 2								
2	RAID ▾ 4	2	0,000	0,000	0,0...	0,000	0,000	0,000	13,176
3	RAED ▾ 4	2	0,000	0,000	0,0...	0,000	0,000	0,000	25,294

Рисунок 3.19 – Углы падения и дифракции дифракционной решетки монохроматора по схеме Черни-Тернера

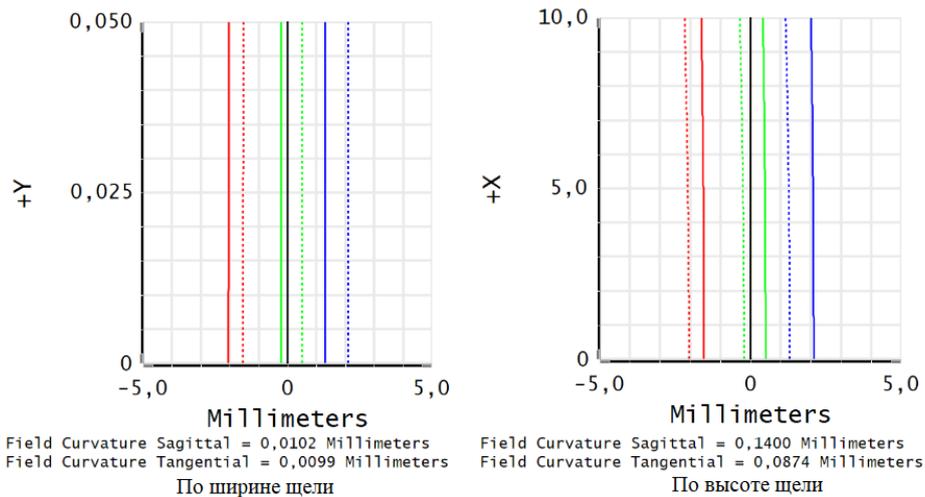


Рисунок 3.20 – Кривизна поля монохроматора Черни-Тернера

Задание: рассчитать и смоделировать работу монохроматоров с симметричной Z-образной схемой и схемой Черни-Тернера.

Таблица 3.5 – Варианты заданий для моделирования монохроматора с плоской дифракционной решеткой. Высота входной щели – 10 мм

№ варианта	$R(\lambda_0)$	Спектральный интервал $\Delta\lambda$, нм	$S_{вх}$, мм ($A=0,02$)	Спектральный диапазон (основная длина волны λ_0), нм
1	5500	50	0,1	400 – 750 (525)
2	3500	70	0,08	450 – 800 (587)
3	6000	40	0,1	500 – 850 (623)
4	4500	60	0,07	350 – 700 (436)
5	5000	55	0,06	400 – 750 (486)
6	6500	40	0,05	400 – 800 (546)
7	8000	30	0,1	380 – 750 (480)
8	4900	25	0,15	750 – 1000 (840)
9	5400	40	0,09	700 – 950 (825)
10	6200	40	0,1	500 – 850 (623)
11	5000	35	0,06	380 – 750 (480)
12	5500	40	0,08	400 – 750 (525)

Продолжение Таблицы 3.5

№ варианта	$R(\lambda_0)$	Спектральный интервал $\Delta\lambda$, нм	$S_{\text{вх}}$, мм ($A=0,02$)	Спектральный диапазон (основная длина волны λ_0), нм
13	8000	25	0,1	500 – 850 (623)
14	4000	55	0,08	400 – 750 (486)
15	4750	40	0,05	400 – 800 (546)

Содержание отчета

1. Рисунки оптических схем Z-образных монохроматоров в среде OpticStudio.
2. Расчет спектральной системы монохроматора построенного по симметричной Z-образной схеме и по схеме Черни-Тернера.
3. Эскизы систем и изображений спектров в OpticStudio, подтверждение расчетов.
4. Расчет конструктивных параметров системы минимум для трех спектральных интервалов в рабочем спектральном диапазоне.
5. Отчет должен быть оформлен согласно ГОСТ Р 2.105-2019 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Общие требования к текстовым документам.

Контрольные вопросы

1. Определение астигматической фокали, причины возникновения.
2. Принцип работы монохроматора Черни-Тернера.
4. Линейная дисперсия монохроматора и его разрешающая способность.
5. Типы дифракционных решеток.

Список литературы

1. Тарасов, К.И. Спектральные приборы. – Л.: Машиностроение; Издание 2-е, перераб. и доп., 1977. – 368 с.
2. Беляков Ю.М. Спектральные приборы: учебное пособие / Ю. М. Беляков, Н. К. Павлычева ; под ред. д-ра. техн. наук Н. К. Павлычевой; М-во образования и науки РФ, Федер. агентство по образованию, КГТУ им. А. Н.

Туполева; [реценз.: Р. К. Мамедов (СПбГУ ИТМО), С. О. Мирумьянц] .– Казань: [Издательство Казанского государственного технического университета], 2007 .– 202 с. : ил. – Библиогр.: с. 199-201.

3. Пейсахсон И.В. Оптика спектральных приборов. – Л.: Машиностроение, 1975.– 312 с.

4. Нагибина И.М. Прикладная физическая оптика: Учебник для вузов/ И.М. Нагибина, В.А. Москалев, Н.А. Полушкина, В.Л. Рудин. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Высшая школа, 2002. – 565 с.: ил.

5. Толмачев Ю.А. Новые спектральные приборы. Принципы работы: [учебное пособие] / Ю. А. Толмачев ; под ред. чл.-кор. АН СССР С. Э. Фриша ; ЛГУ им. А. А. Жданова .– Л.: Издательство Ленинградского университета, 1976 .– 125, с. : ил. – Библиогр.: с. 123-124.

Лабораторная работа №4 «Изучение свойств плоской отражательной эшелле-решетки, моделирование и расчет автоколлимационной схемы спектрометра»

Цель лабораторной работы: ознакомиться с конструкцией и основными спектральными свойствами отражательной эшелле-решетки, произвести расчет автоколлимационной схемы спектрометра.

Задачи работы

1. Произвести расчет спектрометра с отражательной плоской эшелле-решеткой в автоколлимационном режиме
2. Рассчитать конструктивные параметры решетки, угловую и линейную дисперсии. Произвести проверку наложения соседних спектральных порядков.
3. Рассчитать регистрируемый спектральный интервал с условием не наложения соседних спектральных порядков. Предложить пути решения проблемы наложения порядков. Рассчитать энергетическую эффективность эшелле-решетки.

Порядок выполнения работы

Плоская отражательная эшелле-решетка в автоколлимационном режиме работы

Рассчитаем параметры простейшего спектрометра на основе отражательной эшелле-решетки. В качестве оптической схемы воспользуемся автоколлимационной схемой ($\alpha=\beta$). Эшелле-решетка представляет собой отражательную дифракционную решётку с несимметричным треугольным профилем штриха, которая используется при больших углах дифракции и высоких порядках спектра [1]. Наибольшая концентрация падающего на эшелле-решетку излучения в спектре высокого порядка достигается за счёт увеличения угла "скоса" рабочей (более короткой) грани штриха δ - угла "блеска" (рисунок 4.1). Так как эшелле-решетка применяется при больших углах дифракции и, как правило, в автоколлимационной или близкой к ней схеме ($\alpha=\beta=\delta$), она обладает большой угловой дисперсией.

Использование автоколлимационной схемы позволяет получить высокое спектральное разрешение с минимальным количеством элементов, что приводит к уменьшению габаритов системы. Один оптический силовой компонент выполняет роль коллиматора и проекционного объектива. В качестве силового компонента может использоваться вогнутое зеркало параболической формы. Недостатком таких систем является наличие остаточных аберраций, образующихся при разведении плоскости входной щели и изображения в пространстве.

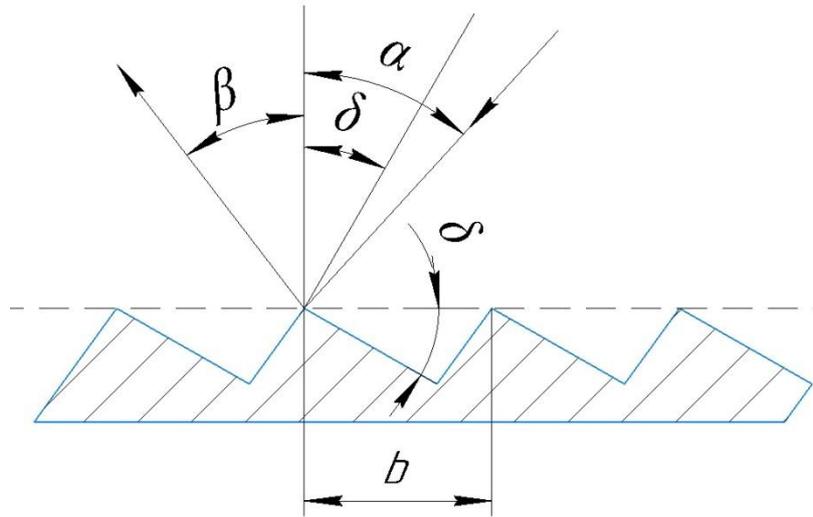


Рисунок 4.1 – Углы падения, дифракции и блеска дифракционной решетки (на примере эшелле-решетки)

Для задания плоской отражательной эшелле-решетки потребуется рассчитать параметры решетки под желаемую (рабочую) длину волны с максимальной концентрацией энергии. Преобразовав основное уравнение решетки для режима автоколлимации, получим [1]:

$$k\lambda_0 N = 2\sin\delta, \quad (4.1)$$

где λ_0 – длина волны с максимальной концентрацией энергии в порядке k , δ – угол блеска решетки.

Пусть входная числовая апертура спектрографа $A=0,015$, $S_{\text{вх}} = 0,05$ мм, $\Delta\lambda=10$ нм, $R=35000$, $\lambda_0 = 546$ нм, длина входной щели 1 мм.

Линейная дисперсия спектрометра:

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{S_{\text{вх}}R}{\lambda} = 3.2 \text{ мм/нм}. \quad (4.2)$$

В режиме автоколлимации

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{2tg\beta f'_{\text{камеры}}}{\lambda}. \quad (4.3)$$

Выберем постоянную решетки $N = 37,5$ лин/мм, рабочий порядок спектра $k=95$, тогда из (4.3) получаем $\beta = 76,55^\circ$, а фокус камеры из (4.2, 4.3) $f'_{\text{камеры}} = \frac{S_{\text{вх}}R}{2tg\beta} = 209,3$ мм. Диаметр коллимированного пучка равен

$$D_{\text{к}} = f'_{\text{кол}} 2 A. \quad (4.4)$$

Зная диаметр коллимированного пучка, можно рассчитать длину эшелле-решетки:

$$L_{\text{реш}} = \tan(\beta) * D_{\text{к}}. \quad (4.5)$$

$$D_{\text{к}} = 6,3 \text{ мм}, L_{\text{реш}} = 26,3 \text{ мм}.$$

Ход лучей в оптической системе спектрометра с эшелле-решеткой в режиме автоколлимации представлен на рисунке 4.2. Данная система не реализуема физически, так как в ней не разведены плоскости входной щели и изображения, разведение этих плоскостей рассмотрим на примере спектрометра по автоколлимационной схеме Литтрова в лабораторной работе №5. В качестве коллимационного и проекционного объективов выступают параксиальные компоненты, размещенные в одной плоскости. Конструктивные параметры системы представлены на рисунке 4.3.

Найдем угловую дисперсию полученной эшелле-решетки:

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{2tg\beta}{\lambda} = 0,015 \frac{1}{\text{нм}},$$

видно, что значение угловой дисперсии решетки существенно выше, чем у рассмотренных ранее компонентов.

Зная ширину нарезанной части решетки $D_{\text{к}}$, найдем теоретическую разрешающую способность решетки:

$$R_{\text{теор}} = kLN = 22444, \quad (4.6)$$

выражение для автоколлимационной схемы [1] дает тот же результат:

$$R_{\text{теор}} = 2L\sin\beta/\lambda=22444. \quad (4.7)$$

$$N_{\text{элементов}} = \frac{\Delta\lambda}{d\lambda}; \quad (4.8)$$

$$L_{\text{пр}} = N_{\text{элементов}} dl. \quad (4.9)$$

Из 4.8 и 4.9 находим ширину приемной площадки $L_{\text{пр}} = 32,05 \text{ мм}$ (рисунок 4.4).

При работе в широком спектральном диапазоне следует производить проверку на наложение исследуемого спектрального диапазона из соседних порядков спектра дифракционной решётки. Условие неналожения длинноволновой области спектрального диапазона предыдущего порядка спектра на коротковолновую область рабочего порядка определяется согласно выражению (4.10). Условие неналожения коротковолновой области спектрального диапазона следующего порядка спектра на длинноволновую область рабочего порядка проверяется согласно (4.11).

$$\frac{k}{k-1} > \frac{\lambda_{\text{max}}}{\lambda_{\text{min}}}; \quad (4.10)$$

$$\frac{k+1}{k} > \frac{\lambda_{max}}{\lambda_{min}}. \quad (4.11)$$

Важным аспектом при моделировании спектральных приборов с эшелле-решетками является энергетический расчет. В общем случае зависимость дифракционной эффективности эшелле-решетки от длины волны λ в дифракционных спектрах различных порядков k [2] имеет следующий вид:

$$\Phi_k(\lambda) = \left[\frac{\sin(u)}{u} \right]^2, \quad (4.12)$$

где $u = \pi(k - \frac{\lambda_1}{\lambda})$, λ_1 – длина волны блеска в $k=1$ порядке спектра.

Для автоколлимационной схемы с эшелле-решеткой $N=37,5$ штр/мм ($\delta=26666,6$) нм) с углом блеска $75,5^\circ$ длина волны блеска в первом порядке (4.1) $\lambda_1 = 51634,54$ нм, длина волны блеска в 98 порядке (4.1) $\lambda = 526,88$ нм. Спектральный диапазон в 98 порядке $\Delta\lambda=4$ нм. Найдем $\Phi_k(\lambda)$ для $\lambda=524,88$ нм, $\lambda = 526,88$ нм, $\lambda=528,88$ нм.

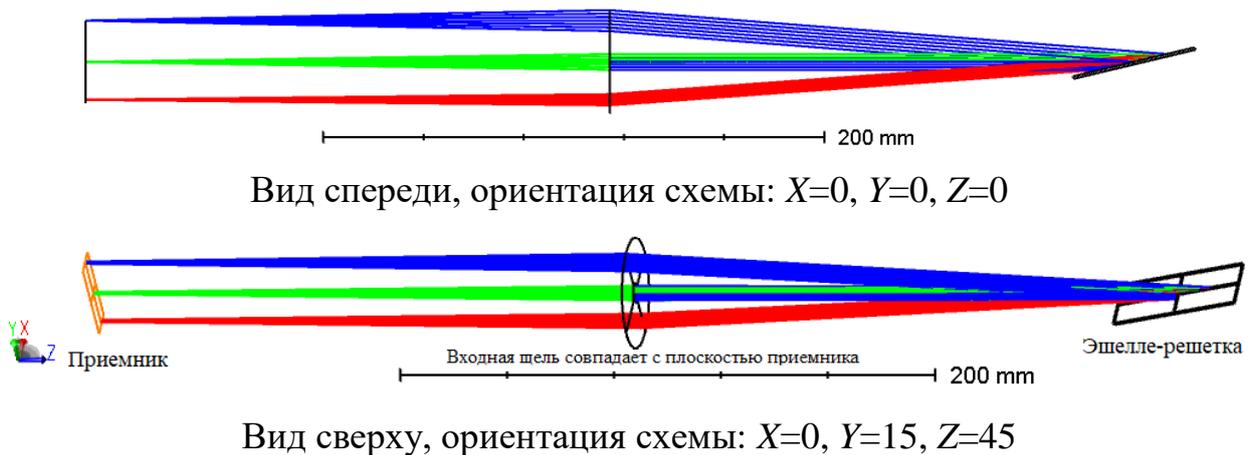


Рисунок 4.2 – Ход лучей в автоколлимационной схеме с отражательной эшелле-решеткой. Плоскость входной щели и изображения совпадают

Получаем:

$$\Phi_{k=90}(\lambda = 526,88) = \left[\frac{\sin(0)}{0} \right]^2 = 1,$$

$$\Phi_{k=90}(\lambda = 524,88) = 0,617,$$

$$\Phi_{k=90}(\lambda = 528,88) = 0,624.$$

Видно, что энергетическая эффективность решетки существенно снижается при отдалении от центральной длины волны порядка.

	Surface Type	Cor	Radius	Thickness	Material	Coating	Clear	Semi-Dia
0	OBJECT	Standard ▾	Infini...	209,310				1,000
1		Paraxial ▾		209,310				4,140
2		Coordinate Break ▾		0,000	-			0,000
3	STOP (≠ Diffraction Grating ▾		Infini...	0,000	MIRROR			25,000 U
4		Coordinate Break ▾		-209,3...	-			0,000
5		Paraxial ▾		-209,3...	M			20,765
6	IMAGE	Standard ▾	Infini...	-				16,590

Lines/ μm	Diffract Orde	Par 3 (unused)
209,310	1	
0,000	0,000	76,547
0,037	-95,000	
0,000	0,000	-76,547 P
209,310	1	

Рисунок 4.3 – Конструктивные параметры наклонной эшелле-решетки (Lens Data)

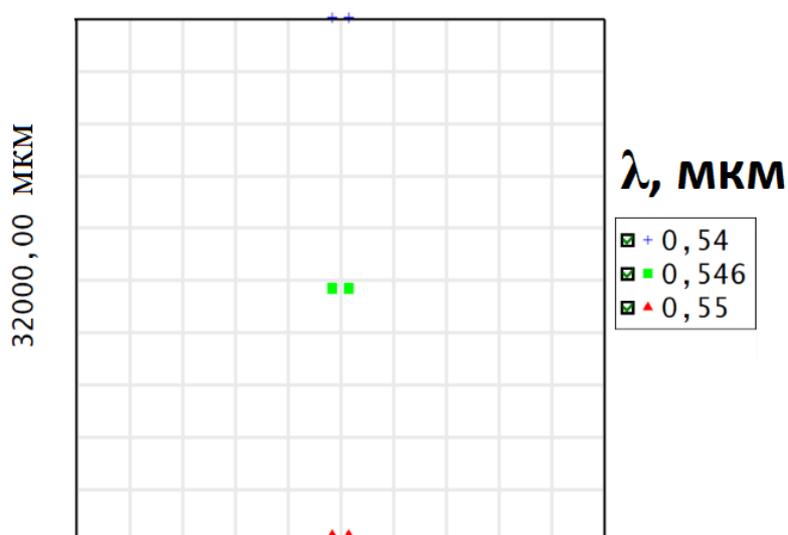


Рисунок 4.4 – Схематичное изображение спектра на приемнике (Full Field Spot Diagram)

Таблица 4.1 – Варианты заданий для моделирования плоских отражательных дифракционных решеток

№ варианта	R	$S_{\text{вх}}$, мм	A	Спектральный диапазон $\Delta\lambda$ (λ_0 – центральная длина волны диапазона), нм
1	40000	0,05	0,015	400 – 406
2	35000	0,06	0,02	450 – 460

Продолжение Таблицы 4.1

№ варианта	R	$S_{\text{вх}}$, мм	A	Спектральный диапазон $\Delta\lambda$ (λ_0 – центральная длина волны диапазона), нм
3	30000	0,1	0,018	520 – 530
4	45000	0,05	0,0125	650 – 654
5	20000	0,1	0,02	700 – 714
6	45000	0,05	0,016	800 – 804
7	55000	0,05	0,015	600 – 610
8	50000	0,05	0,012	750 – 754
9	60000	0,04	0,01	630 - 632
10	65000	0,04	0,01	520 – 530
11	35000	0,01	0,0125	650 – 654
12	25000	0,05	0,02	600 – 610
13	55000	0,1	0,015	450 – 460
14	35000	0,01	0,02	630 - 632
15	50000	0,05	0,02	520 – 530

Содержание отчета

1. Результаты расчетов призмы и эскизы в среде OpticStudio.
2. График зависимости угловой дисперсии призмы от длины волны.
3. Расчет спектрометра с отражательной плоской эшелле-решеткой в автоколлимационном режиме, эскизы системы и изображения спектра в OpticStudio, подтверждение расчетов.
4. Отчет должен быть оформлен согласно ГОСТ Р 2.105-2019 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Общие требования к текстовым документам;

Контрольные вопросы

1. Принцип действия эшелле -решетки. Особенности применения.

2. Энергетика эшелле-решетки, распределение энергии в спектральных порядках.

3. Приведите выражение для угловой дисперсии эшелле-решетки и объясните зависимость угловой дисперсии от угла блеска.

Список литературы

1. Тарасов, К.И. Спектральные приборы. – Л.: Машиностроение; Издание 2-е, перераб. и доп., 1977. – 368 с.

2. Пейсахсон И.В. Оптика спектральных приборов. – Л.: Машиностроение, 1975. – 312 с.

3. Беляков Ю.М. Спектральные приборы: учебное пособие / Ю. М. Беляков, Н. К. Павлычева; под ред. д-ра. техн. наук Н. К. Павлычевой; М-во образования и науки РФ, Федер. агентство по образованию, КГТУ им. А. Н. Туполева; [реценз.: Р. К. Мамедов (СПбГУ ИТМО), С. О. Мирумянц] .– Казань: [Издательство Казанского государственного технического университета], 2007 .– 202 с. : ил. – Библиогр.: с. 199-201.

4. Толмачев Ю.А. Новые спектральные приборы. Принципы работы : [учебное пособие] / Ю. А. Толмачев ; под ред. чл.-кор. АН СССР С. Э. Фриша ; ЛГУ им. А. А. Жданова .– Л.: Издательство Ленинградского университета, 1976 .– 125, с. : ил. – Библиогр.: с. 123-124.

5. Нагибина И.М. Прикладная физическая оптика: Учебник для вузов/ И.М. Нагибина, В.А. Москалев, Н.А. Полушкина, В.Л. Рудин. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Высшая школа, 2002. – 565 с.: ил.

Лабораторная работа №5 «Моделирование спектрометра по автоколлимационной схеме Литтрова»

Цель лабораторной работы: ознакомиться с конструкцией спектрометра по схеме Литтрова, произвести расчёт спектрального прибора.

Задачи работы

1. Моделирование спектрального прибора по автоколлимационной схеме Литтрова.
2. Определение основных характеристик спектрального прибора, параксиальный расчёт оптической части спектрального прибора.
3. Произвести расчёт спектрометра с отражательной плоской эшелле-решеткой в автоколлимационном режиме, рассчитать конструктивные параметры решетки, угловую и линейную дисперсии. Произвести проверку наложения соседних спектральных порядков. Рассчитать дифракционную эффективность эшелле-решетки. Предложить пути решения проблемы наложения порядков.

Теоретические сведения

Основными достоинствами автоколлимационных зеркальных спектральных систем (схема Литтрова) [1-4] являются простая конструкция и минимальное количество оптических элементов. Используется единое вогнутое зеркало в качестве коллиматорного и фокусирующего объективов, в качестве диспергирующего элемента могут выступать автоколлимационная призмная система (рисунок 5.1 а) или плоская отражательная решетка (рисунок 5.1 б). Лучи, падающие на призму или решетку и диспергированные, образуют между собой малый угол, и с определенной точностью можно считать, что положения входной щели и ее изображения совпадают.

Ширины параллельных пучков до и после диспергирующего элемента одинаковы, так что меридиональное увеличение призмы или решетки равно единице, и аберрации оптической системы равны удвоенным аберрациям зеркала для параллельных пучков, а диспергирующее устройство вызывает лишь искривление спектральных линий.

В автоколлимационных монохроматорах с внеосевым параболическим зеркалом точка входной щели, находящаяся на оси параболоида, изображается без аберраций. Но с увеличением высоты щелей качество изображения ухудшается. Недостатком таких схем является трудность изготовления внеосевого параболоида.

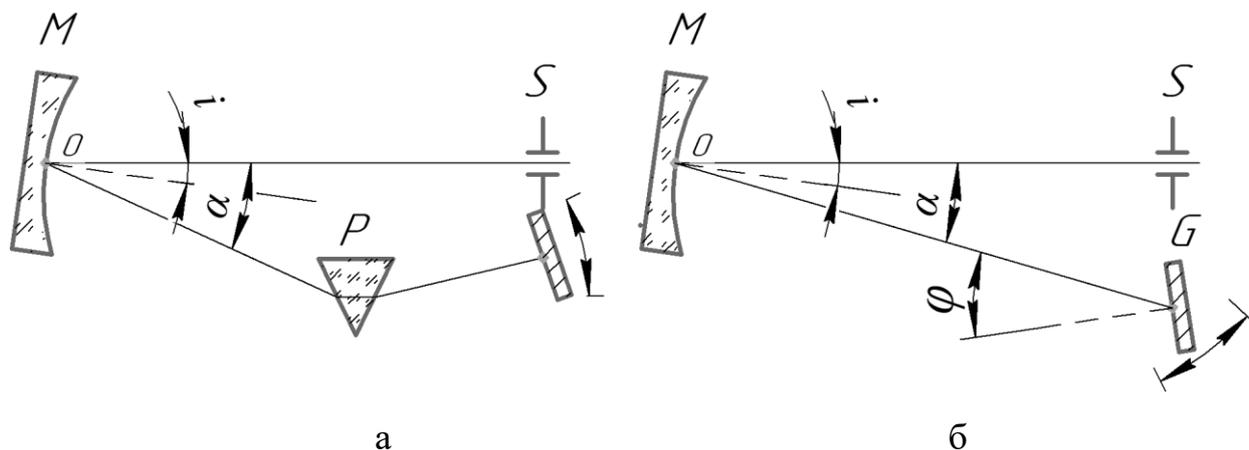


Рисунок 5.1 – Автоколлимационные зеркальные монохроматоры: а – с призмой, б – с плоской решеткой. S - плоскость входной щели и изображения, M – вогнутое зеркало, P - призма, G – дифракционная решетка, i – угол падения на зеркало, α – угол отражения, φ – угол дифракции

В автоколлимационных монохроматорах с дифракционной решеткой дисперсионная и абберационная кривизны линий взаимно компенсируются, если решетку расположить так, как показано на рисунке 5.1 б [1].

Все количественные соотношения, применяемые при расчете автоколлимационных схем, выведены при условии идеальной автоколлимации, когда входная щель и ее изображение совпадают. Однако данные соотношения достаточно точны и для спектральных систем, в которых щели находятся рядом на небольшом расстоянии друг от друга, как показано на рисунке 5.2 [4].

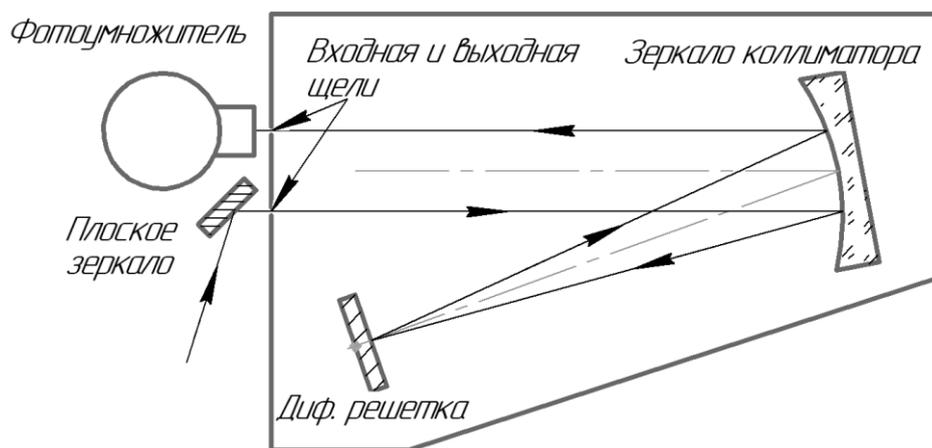


Рисунок 5.2 – Монохроматор по схеме Литтрова [4]

Порядок выполнения работы

Положим, что спектрометр работает с телескопом, относительное отверстие которого 1:25. Тогда числовая апертура спектрографа – $A=0,02$. Требуется достичь спектрального разрешения $R=150\ 000$ на длине волны

$\lambda_0=525$ нм. При этом прибор должен работать в спектральном диапазоне 390 – 760 нм, сканируя рабочий диапазон, путем вращения в малом диапазоне углов эшелле-решетки. Единоновременный регистрируемый диапазон $\Delta\lambda=4$ нм (зависит от размера приемной площадки). Ширина входной щели спектрографа $S_{\text{вх}}=50$ мкм, высота $h=20$ мм. Эшелле-решётка должна быть рассчитана так, чтобы минимальная спектральная ширина порядка в коротковолновой области диапазона была более 2 нм, линейная длина порядка на приёмнике в длинноволновой области диапазона требовала для сканирования минимальное значение отклонения эшелле-решётки от её угла блеска, количество используемых спектральных порядков было минимально возможным.

Найдем минимальное приращение спектра [5]:

$$d\lambda = \frac{\lambda}{R}. \quad (5.1)$$

при $R=150\ 000$:

$$d\lambda = \frac{\lambda_0}{150000} = 3,5 \times 10^{-3} \text{ нм.}$$

Для достижения требуемого разрешения необходимо, чтобы на один разрешающий элемент приемника dl приходилось $d\lambda = 3,5 \times 10^{-3}$ нм. Зная единовременный рабочий спектральный диапазон 4 нм, можно найти количество разрешающих элементов:

$$N_{\text{элементов}} = \frac{\Delta\lambda}{d\lambda} = 1143. \quad (5.2)$$

Один разрешающий элемент dl соответствует ширине входной щели, так как спектральный узел работает с увеличением $\Gamma=1^\times$. Соответственно, для рабочего спектрального диапазона $dl = S_{\text{вх}} = 50$ мкм.

Линейная дисперсия в плоскости приёмника [5]:

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{0,050 \text{ мм}}{0,0035 \text{ нм}} = 14,29 \text{ мм/нм.} \quad (5.3)$$

Для единовременной регистрации 4 нм потребуется приемная площадка размером не менее

$$L_{\text{пр}} = N_{\text{элементов}} dl = 57,16 \text{ мм} \quad (5.4)$$

в направлении дисперсии спектрального узла.

Обратная линейная дисперсия при этом составляет [5]

$$\frac{d\lambda}{dl} = 0,7 \text{ \AA/мм.} \quad (5.5)$$

Как правило, для решения таких задач лучше всего подходит эшелле-решетка с углом блеска β выше 70° . Возьмем стандартную для приборов подобного класса эшелле-решетку R4 с углом блеска $75,5^\circ$ и постоянной $N=37,5$ штр/мм. Определив необходимый угол блеска решётки (β), можно определить частоту штрихов решётки исходя из требуемого рабочего порядка спектра, используя выражение [5]:

$$k\lambda_0 N = 2\sin\beta, \quad \text{тогда} \quad (5.6)$$

$$k = \frac{2\sin\beta}{\lambda_0 N}. \quad (5.7)$$

Согласно (5.6) $k(\lambda_0 = 525) = 98,35$, целое значение порядка достигается наклоном решетки. При $k(\lambda_0 = 525) = 98$, $\beta = 74,73^\circ$. Аналогично рассчитываются порядки для крайних длин волн рабочего спектрального диапазона, $k(\lambda_0 = 390) = 132,09$, $k(\lambda_0 = 760) = 67,78$. После расчетов углов наклона решетки для целочисленных значений k корректируем угол наклона решетки β . Расчет постоянной решетки N для средней длины волны обуславливается минимизацией дифракционных потерь на краях исследуемого диапазона, а также повышает эффективность работы устройства (см. выражение 4.12 в лабораторной работе №4).

Найдем фокусное расстояние проекционного объектива (камеры) [5]:

$$f'_{\text{камеры}} = \frac{dl}{d\lambda} \times \frac{\lambda}{2tg\beta} = 970,107 \text{ мм}. \quad (5.8)$$

$$f'_{\text{камеры}} = f'_{\text{кол}}. \quad (5.9)$$

Таким образом, диаметр коллимированного пучка равен

$$D_{\text{к}} = 2f'_{\text{кол}}A = 38,8 \text{ мм}. \quad (5.10)$$

Зная диаметр коллимированного пучка, можно рассчитать длину эшелле-решетки:

$$L_{\text{реш}} = \tan(\varphi) * D_{\text{к}} = 150,05 \text{ мм}. \quad (5.11)$$

Итоговые конструктивные параметры системы приведены в таблицах 5.1, 5.2, 5.3.

На рисунке 5.3 представлена принципиальная схема спектрального узла. В автоколлимационном режиме входная и выходная числовые апертуры равны, следовательно, размеры предмета и изображения также равны.

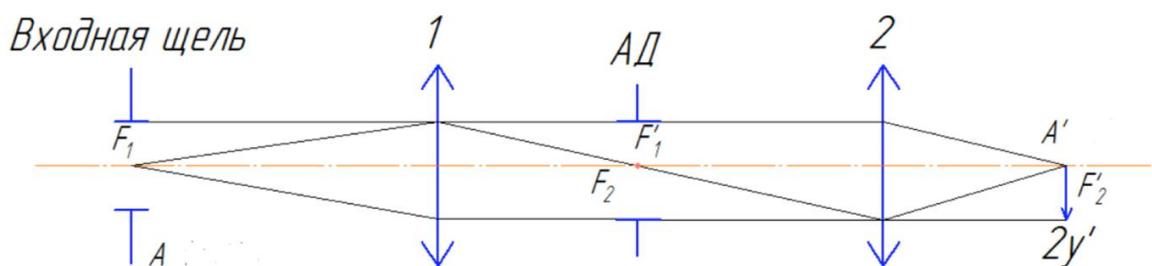


Рисунок 5.3 – Принципиальная схема спектрального узла. 1 – коллиматор, 2 – объектив

В качестве коллиматора и камеры будем использовать параболическое зеркало, ниже представлены параметры системы в OpticStudio.

На рисунке 5.4 показан ход лучей спектрального узла в режиме автоколлимации. Входная щель и плоскость изображения находятся в одной плоскости с эшелле-решеткой. В данной оптической схеме входная щель спектрального узла, эшелле-решетка и приемник находятся в одном месте. Эшелле-решетка работает в режиме автоколлимации. Следующим этапом будет разведение в пространстве всех компонентов спектрального узла.

Разнесение входной щели и приемной площадки можно выполнить либо симметрично относительно эшелле-решетки, смещая входную щель относительно коллиматора (параболическое зеркало), либо несимметрично (щель и приемник по одну сторону эшелле-решетки), наклоняя эшелле-решетку.

Световые диаметры элементов указаны для сканируемого спектрального диапазона 390 – 760 нм. Диаметр параболического зеркала составляет 150 мм, относительное отверстие $1:k=1:13,5$. Рабочий диапазон порядков $k = 68-132$, сканирование по длине волны осуществляется небольшими наклонами эшелле-решетки $\Delta\varphi \approx 3^\circ$ от центрального положения $\varphi = 75,5^\circ$.

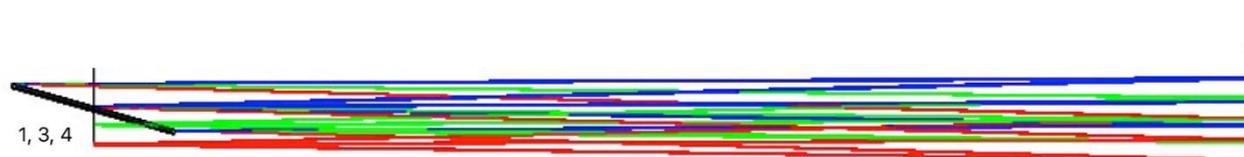


Рисунок 5.4 – Оптическая схема спектрального узла в режиме автоколлимации. 1 – входная щель, 2 – коллиматор, 3 – эшелле-решетка, 4 – плоскость изображения

Таблица 5.1 – Конструктивные параметры схемы спектрального узла

Элемент	Радиус кривизны, мм	Осевое расстояние, мм	Световой диаметр, мм	Материал	$-e^2$
Источник	∞	970,1	20	Воздух	
Коллиматор	-1940,2	-970,1	60	Зеркало	-1
Дифр. реш.	∞	970,1	150	Зеркало	
Объектив	-1940,2	-970,1	150	Зеркало	-1
Приёмник	∞		60x60		

Таблица 5.2 – Конструктивные параметры спектрометра для диапазона 390 – 760 нм

Ширина щели l , мкм	Высота щели L , мм	Фокусное расстояние коллиматора f' , мм	Диаметр кол. пучка D_K , мм	Угол блеска решетки δ , °	Частота решетки N , лин/мм	Габариты решетки длина x ширина, мм
50	20	970,11	38,8	75,5	37,5	152x40

	Comment	X (mm)	Y (mm)	Weight
1		0,025	0,000	1,000
2		-0,025	0,000	1,000
3		0,000	0,000	1,000
4		0,025	10,000	1,000
5		-0,025	10,000	1,000
6		0,025	-10,000	1,000
7		-0,025	-10,000	1,000

Рисунок 5.5 – Окно редактирования поля, задание размера входной щели

Рабочие спектральные порядки решетки с различным углом наклона решетки задаются при помощи мульти-конфигураций (рисунок 5.6). Таким образом, получена оптическая схема, близкая к режиму автоколлимации

(рисунок 5.7). В качестве коллиматора и проекционной камеры используется вогнутое параболическое зеркало 2.

Таблица 5.3 – Конструктивные параметры спектрометра (Lens Data)

№	Тип поверхности	Радиус, мм	Толщина по оси, мм	Материал
0	Standard	Infinity	970,107	
1	Coordinate Break	-	0	
2	Standard	-1940,214	0	Mirror ($k = -1$)
3	Coordinate Break	-	-970,107	
4	Standard	Infinity	0	-
5	Coordinate Break	-	0	
6	Coordinate Break	-	0	
7	Diffraction Grating (0,0375 лин/мкм)	Infinity	0	Mirror ($k = 0$)
8	Coordinate Break	-	0	
9	Coordinate Break	-	0	
10	Coordinate Break	-	970,107	
11	Coordinate Break	-	0	
12	Standard	-1940,214	0	Mirror ($k = -1$)
13	Coordinate Break	-	0	
14	Coordinate Break	-	-970,107	
15	Coordinate Break	-	0	
16	Image	Infinity	0	

Продолжение Таблицы 5.3

№	Децентрировка по оси X, мм	Децентрировка по оси Y, мм	Наклон относительно оси Y, °	Наклон относительно оси Z, °
1	0	20	0	0
3	0	20	0	0
5	0	0	74,728	0
6	0	0	0	-87,8
8	0	0	0	87,8
9	0	0	-74,728	0
1 1	0	-20	0	0
1 3	0	-20	0	
1 5	0	-40	0	0

Ось параболоида смещена на равные расстояния от центров входной щели 1 спектрографа и эшелле-решетки 3 и проходит между ними. Свет от входной щели 1 коллимируется в соотношении $F/26.6$ внеосевым коллиматором 2 и падает на дифракционную эшелле-решетку 3. Апертурная диафрагма расположена на эшелле-решетке. Дифракционная решетка наклонена в двух плоскостях относительно оптической оси и работает в режиме близком к автоколлимации. Один из наклонов соответствует углу блеска, второй наклон под небольшим углом к оптической оси в плоскости рисунка позволяет разнести в пространстве входную щель и плоскость изображения. После отражения от эшелле-решетки и коллиматора диспергированный свет фокусируется в фокальной плоскости коллиматора, в этом месте размещается приемник 4.

Active :	Config 1	Config 2	Config 3*
1 PRAM ▾ 7/2	-98,000	-132,000	-68,000
2 PRAM ▾ 5/4	74,728	74,900	75,700
3 WAVE ▾ 1	0,523	0,388	0,758
4 WAVE ▾ 2	0,525	0,390	0,760
5 WAVE ▾ 3	0,527	0,391	0,762

Рисунок 5.6 – Окно редактирования конфигураций оптической системы

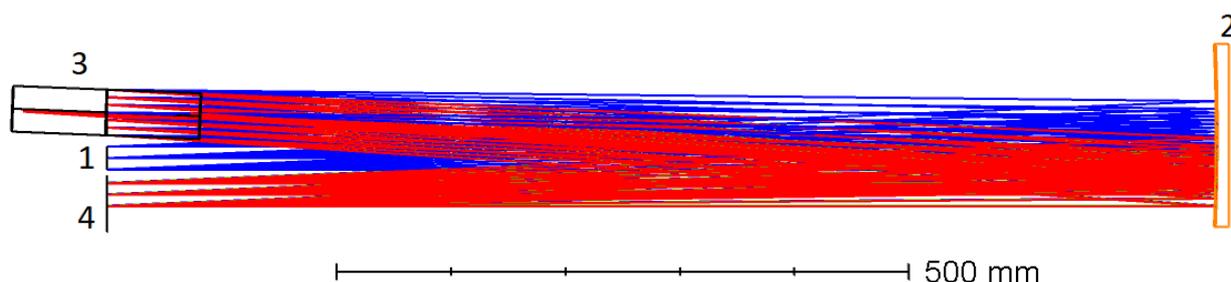


Рисунок 5.7 – Оптическая схема спектрографа по схеме Литрова в режиме автоколлимации с разнесением входной щели и плоскостью изображения. 1 – входная щель, 2 – коллиматор, 3 – эшелле-решетка, 4 – плоскость изображения

Изображения спектра и пятна рассеяния для центральной длины волны спектрального диапазона представлены на рисунках 5.8, 5.9. Остаточная кома характерна для этой системы из-за наклона эшелле-решетки. Хвост комы совпадает с длинной стороной щели и практически не оказывает влияние на спектральное разрешение. От наклона эшелле-решетки зависит расстояние между входной щелью и изображением. Изменяя эти параметры, можно достичь достаточного разведения и приемлемого качества изображения.

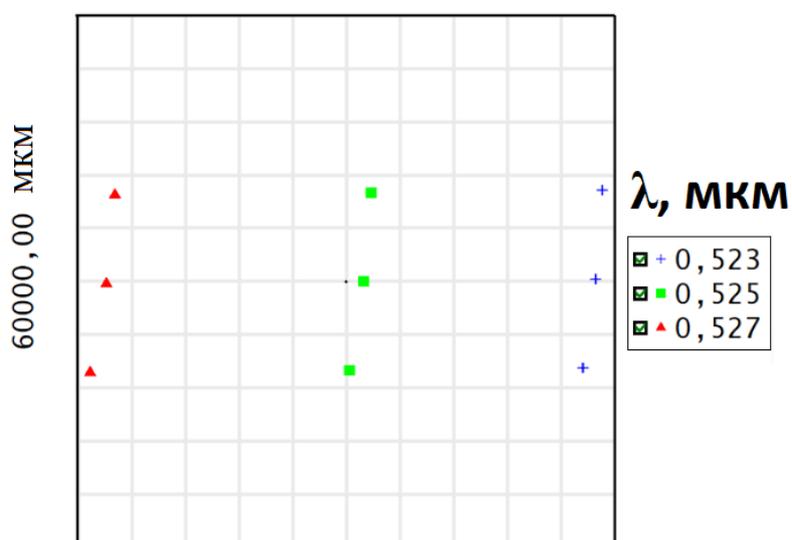


Рисунок 5.8 – Схематичное изображение спектра на приемнике (Full Field Spot Diagram)

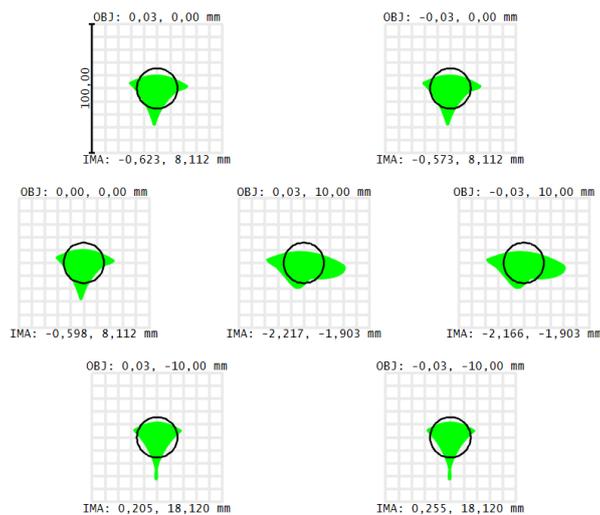


Рисунок 5.9 – Пятна рассеяния для центральной длины волны рабочего спектрального диапазона для $\lambda=525$ нм и разных точек поля. Диаметр диска Эйри (обозначен окружностью) 31,2 мкм

Таблица 5.4 – Варианты заданий для моделирования спектрометра по автоколлимационной схеме Литтрова

№ варианта	$R_{\text{теор}}$	Числовая апертура в пространстве предметов A	Спектральный диапазон $\Delta\lambda$, нм	Единовременный регистрируемый диапазон $\Delta\lambda$, нм	Размер входной щели	
					l , мм	h , мм
1	180000	0,02	750 – 950	2	45	25
2	200000	0,018	400 – 650	4	40	20
3	170000	0,021	400 – 750	2	50	30
4	120000	0,025	1100 – 1500	4	60	20
5	160000	0,015	500 – 800	2	50	40
6	190000	0,02	800 – 1100	4	56	20
7	100000	0,02	1500 – 2000	6	70	30
8	70000	0,03	400 – 650	4	35	20
9	210000	0,022	390 – 760	2	40	40
10	180000	0,02	800 – 1100	4	50	20

Продолжение Таблицы 5.4

№ варианта	$R_{\text{теор}}$	Числовая апертура в пространстве предметов A	Спектральный диапазон $\Delta\lambda$, нм	Единовременный регистрируемый диапазон $\Delta\lambda$, нм	Размер входной щели	
					l , мкм	h , мм
11	90000	0,02	1600 – 2100	6	70	30
12	140000	0,018	500 – 800	2	50	40
13	220000	0,015	400 – 650	4	40	20
14	100000	0,022	800 – 1100	5	70	30
15	150000	0,02	390 – 760	4	40	40

Содержание отчета

1. Расчет спектрографа по схеме Литтрова, эскизы системы и изображения спектра в OpticStudio, подтверждение расчетов.

2. Результаты расчета угловой дисперсии эшелле-решетки и линейной дисперсии спектрографа для центральной и крайних длин волн рабочего диапазона.

3. Отчет должен быть оформлен согласно ГОСТ Р 2.105-2019 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Общие требования к текстовым документам;

Контрольные вопросы

1. Особенности схемы спектрографа Литтрова. Области применения.
2. Причина искривления спектральных линий.
3. Способы устранения наложения порядков.

Список литературы

1. Пейсахсон И.В. Оптика спектральных приборов. – Л.: Машиностроение, 1975. – 312 с.
2. Малышев В.И. Введение в экспериментальную спектроскопию. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. 479 с.

3. Прикладная физическая оптика: Учеб. Пособие/ В.А. Москалев, И.М. Нагибина, Н.А. Полушкина, В.Л. Рудин; Под общ. ред. В.А. Москалева. – СПб.: Политехника. 528 с.: ил.
4. Lindon J.C. The Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry, 2nd edition. – Academic Press is an imprint of Elsevier. – 2010. – 3246 p.
5. Тарасов, К.И. Спектральные приборы. – Л.: Машиностроение; Издание 2-е, перераб. и доп., 1977. – 368 с.
6. Толмачев Ю.А. Новые спектральные приборы. Принципы работы : [учебное пособие] / Ю. А. Толмачев ; под ред. чл.-кор. АН СССР С. Э. Фриша ; ЛГУ им. А. А. Жданова – Л. : Издательство Ленинградского университета, 1976 .– 125, с. : ил. – Библиогр.: с. 123-124.
7. Нагибина И.М. Прикладная физическая оптика: Учебник для вузов/ И.М. Нагибина, В.А. Москалев, Н.А. Полушкина, В.Л. Рудин. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Высшая школа, 2002. – 565 с.: ил.
8. Спектральные приборы: Учебное пособие / А.А. Заглубский, Н.М. Цыганенко, А.П. Чернова; Санкт-Петербургский государственный университет, Физический факультет. – СПб., 2007. – 76 с.

Лабораторная работа №6 «Изучение свойств, моделирование и расчет одиночной и составной призмы»

Цель лабораторной работы: ознакомиться с конструкцией и основными спектральными свойствами призмы, произвести расчет угловой дисперсии одиночной и составной призм.

Задачи работы

1. Смоделировать работу одиночной и составной призм в OpticStudio.
2. Рассчитать углы падения на грани призмы и углы дифракции в призме.
3. Рассчитать угловую дисперсию одиночной призмы для приведенных длин волн.
4. Рассчитать и смоделировать оптическую схему спектрометра с составной призмой.

Теоретические сведения

В современной практике проектирования спектральных приборов все чаще применяются сборки из призмы и плоской дифракционной решетки, такую комбинацию назвали «призма» (*grating and prism – grism*) (рисунок 6.1). Как правило, на одной из граней призмы при помощи голографии наносится изображение решетки, либо, если решетку нужно нанести на выходную грань призмы, применяют оттиск нарезанной механическим способом решетки на грань призмы, предварительно покрытую специальным составом. Такое сочетание призмы и дифракционной решетки позволяет рассчитывать требуемое значение дисперсии с возможностью выбора направления диспергированного пучка лучей после призмы.

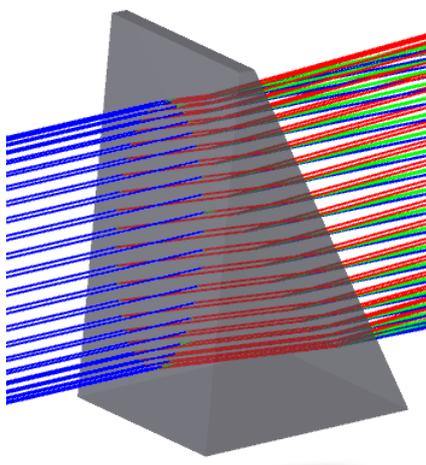


Рисунок 6.1 – Модель одиночной призмы в OpticStudio

Гризмы широко применяются в современных астрономических спектрометрах как в схемах с кросс-дисперсией, так и в качестве единственного диспергирующего элемента для достижения высокого спектрального разрешения [1 – 4].

Порядок выполнения работы

Моделирование одиночной призмы

Соотношения для расчета призмы. За основу возьмем равнобедренную призму, основание которой параллельно падающему пучку лучей (рисунок 6.2).

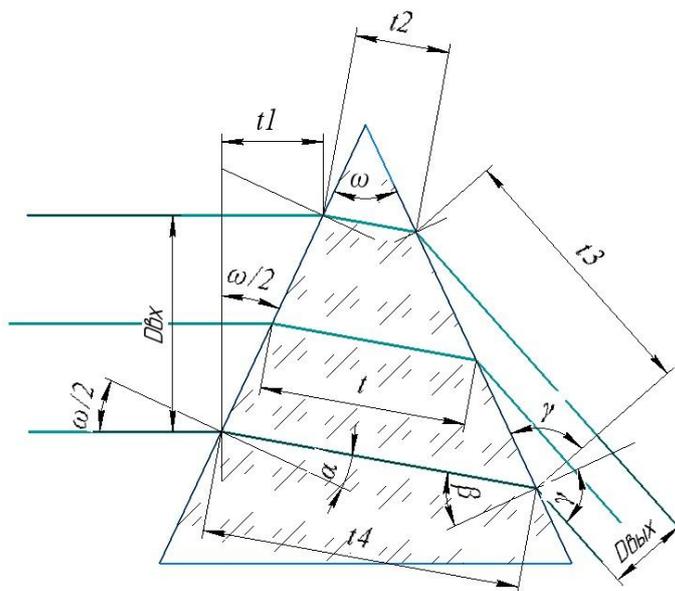


Рисунок 6.2 – Прохождение пучка параллельных лучей через треугольную призму

Как известно,

$$n_{\text{возд.}} \sin(\omega/2) = n_{\text{пр.}} \sin \alpha, \quad (6.1)$$

где ω – угол при вершине призмы, α – угол преломления лучей входной гранью призмы.

Угол падения на выходную (вторую) грань призмы β найдем из соотношения

$$\beta = \omega - \alpha, \quad (6.2)$$

β – угол падения на вторую грань.

Принимая во внимание, что на выходной грани призмы мы разместили дифракционную решетку, получаем:

$$n_{\text{пр.}} \sin \beta + n_{\text{возд.}} \sin \gamma = k \lambda N, \quad (6.3)$$

γ – угол выхода луча после после призмы.

Если призма не отклоняет луч, то

$$\sin(\omega/2) = \sin\gamma. \quad (6.4)$$

Очевидно, что угол падения лучей на решетку зависит от длины волны, следовательно, угловая дисперсия для разных длин волн будет разной.

Смоделируем призму с $D_{\text{вх}} = 20$ мм, для угла преломления призмы 30° : $\gamma = 15^\circ$ (рисунок 6.3). Принимая $k=1$, найдем постоянную решетки, чтобы призма не отклоняла пучок лучей при $\lambda_0 = 588$ нм:

$$N = \frac{n_{\text{пр.}} \sin\beta - n_{\text{возд.}} \sin\gamma}{\lambda k}. \quad (6.5)$$

В данном случае $N \approx 0,563$.

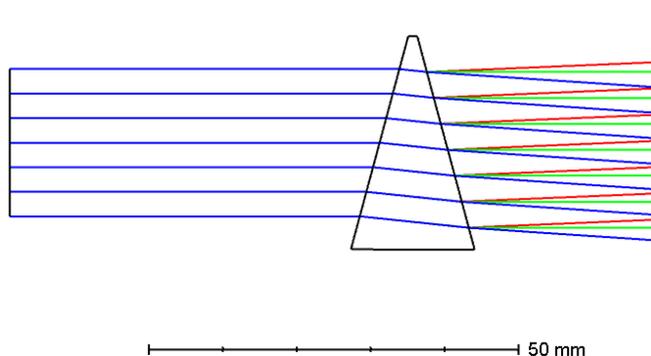


Рисунок 6.3 – Ход лучей в одиночной призме

Ход лучей в одиночной призме представлен на рисунке 6.3, конструктивные параметры – на рисунке 6.4.

	Surface Type	Comment	Radius	Thickness	Material	Coating	Semi-Diameter
0	OBJECT	Standard ▾	Infini...	Infini...			0,000
1		Standard ▾	Infini...	50,000			10,000
2		Coordinate Break ▾		0,000	-		0,000
3	STOP (aper)	Standard ▾	Infini...	10,000	LZ_TF1		15,000 U
4		Coordinate Break ▾		0,000	-		0,000
5	(aper and til Diffraction Grating ▾		Infini...	30,000			15,000 U
6		Coordinate Break ▾		0,000	-		0,000
7	IMAGE	Standard ▾	Infini...	-			21,028

Decenter X	Decenter Y	Tilt About X
0,000	0,000	15,000
0,000	0,000	-30,000 P
0,563	1,000	
0,000	0,000	15,000 P

Рисунок 6.4 – Конструктивные параметры призмы (Lens Data)

Type	Op#1	Op#2						Target	Weight	Value	% Contrib
1 RAID	3		2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	15,000	0,000
2 RAED	3		2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	9,038	0,000
3 RAID	5		2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	20,962	0,000
4 RAED	5		2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	15,001	0,000
5 DIFF	6	8						0,000	0,000	6,277	0,000
6 RAED	5		1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	18,830	0,000
7 RAED	5		2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	15,001	0,000
8 RAED	5		3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	12,553	0,000

Рисунок 6.5 – Углы падения и дифракции призмы

Угол преломления входной гранью призмы, согласно (6.1), $\alpha=9,04^\circ$, угол падения на вторую грань, согласно (6.2), $\beta=20,96^\circ$. Найдем значение угловой дисперсии, используя соотношение [5]:

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{kN}{\cos\gamma} = 0,00058 \frac{1}{\text{нм}}, \quad (6.6)$$

здесь угол γ фактически является углом дифракции решетки. Сравним полученное значение с данными об углах дифракции лучей крайних длин волн рабочего спектрального диапазона, из OpticStudio. Разность между лучами двух крайних длин волн составляет $\Delta=6,28^\circ$. Рассчитаем угловую дисперсию призмы через данный угол, принимая $\Delta\lambda = 170 \text{ нм}$ (486 – 656 нм):

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{\Delta \cdot \pi}{180 \cdot \Delta\lambda} = 0,00064 \frac{1}{\text{нм}}. \quad (6.7)$$

Разница между рассчитанными значениями объясняется дисперсией материала призмы, с увеличением спектрального диапазона фактическое значение угловой дисперсии призмы для крайних длин волн всегда будет большим из-за разного показателя преломления. Значение угловой дисперсии, рассчитанное согласно формуле 6.6, справедливо только для центральной длины волны.

Моделирование составной призмы

Смоделируем и рассчитаем ход лучей в призме, состоящей из двух призм, между которыми расположена дифракционная решетка (рисунок 6.6).

Рассчитаем ход лучей через данную призму, с условием равенства углов падения и углов выхода лучей для заданной длины волны. Для этого рассмотрим призму, состоящую из двух призм с углом при вершине $\omega_1 = \omega_2 = 15^\circ$ (см. рисунок 6.2), изготовленных из стекла ТФ1, расчет произведем для длины волны $\lambda_d = 587,56 \text{ нм}$. Из выражений 6.1 и 6.2 следует:

$$\gamma = \frac{\omega}{2} - \arcsin\left(\frac{\sin(\omega/2)}{n_{\text{пр}}}\right), \quad (6.8)$$

где γ – угол падения лучей на дифракционную решетку, ω – полный угол при вершине составной призмы ($\omega = 2\omega_1$).

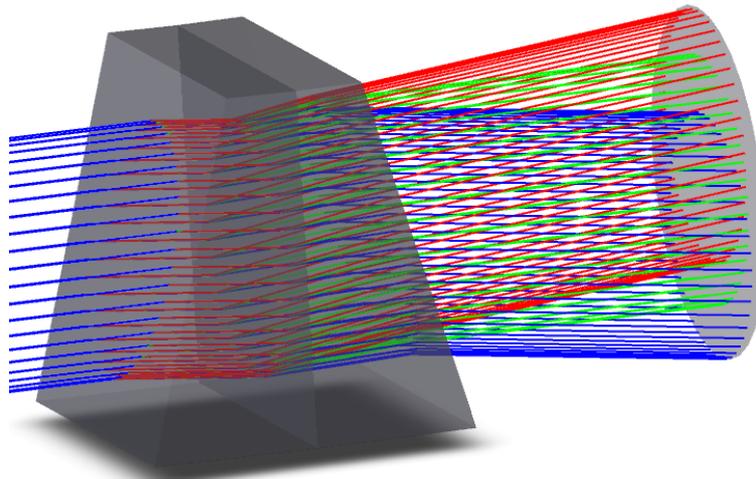


Рисунок 6.6 – Модель составной призмы в OpticStudio

Тогда постоянная дифракционной решетки, при условии неотклонения лучей для заданной длины волны:

$$N = \frac{n_{\text{пр1}} \cdot \sin\gamma + n_{\text{пр2}} \cdot \sin\gamma}{\lambda k} \quad (6.9)$$

В случае если призма состоит из призм, изготовленных из одинакового материала,

$$N = \frac{2n_{\text{пр}} \cdot \sin\gamma}{\lambda k} \quad (6.10)$$

Для длины волны λ_d , $\gamma = 5,96^\circ$, $N=0,5826 \approx 0,583$ лин/мкм. Ход лучей в составной призме представлен на рисунке 6.7, конструктивные параметры – на рисунке 6.8.

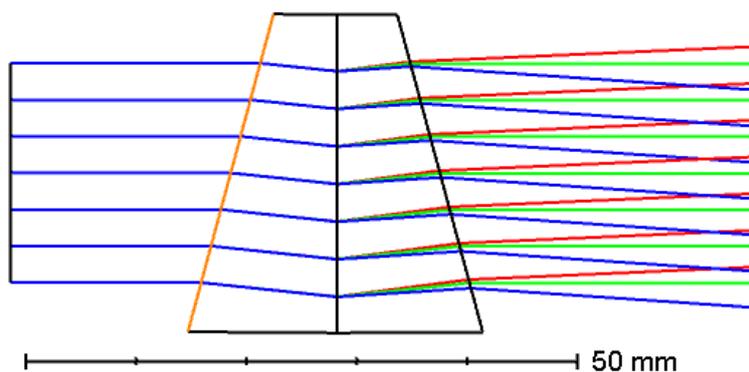


Рисунок 6.7 – Ход лучей в составной призме

	Surface	Type	Comment	Radius	Thickness	Material	Coating	Clear	Semi-Dia
0	OBJECT	Standard ▾		Infini...	Infini...				0,000
1		Standard ▾		Infini...	20,000				10,000
2		Coordinate Break ▾			0,000	-			0,000
3	STOP (aper)	Standard ▾		Infini...	10,000	LZ_TF1			15,000 U
4		Coordinate Break ▾			0,000	-			0,000
5	(aper)	Diffraction Grating ▾		Infini...	10,000	LZ_TF1			15,000 U
6		Coordinate Break ▾			0,000	-			0,000
7	(aper and til	Standard ▾		Infini...	30,000				15,000 U
8		Coordinate Break ▾			0,000	-			0,000
9	IMAGE (tilt/d	Standard ▾		Infini...	-				12,040

Decenter X	Decenter Y	Tilt About X
0,000	0,000	15,000
0,000	0,000	-15,000 P
0,583 v	1,000	
0,000	0,000	-15,000 P
0,000	0,000	15,000 P

Рисунок 6.8 – Конструктивные параметры составной гримзы (Lens Data)

Найдем значение угловой дисперсии, используя соотношение (6.6) $\frac{d\beta}{d\lambda} = 0,000586$. Сравним полученное значение с данными об углах дифракции лучей крайних длин волн рабочего спектрального диапазона (486 – 656 нм), из OpticStudio. Разность между лучами двух крайних длин волн составляет $\Delta = 6,44^\circ$ (рисунок 6.9). Рассчитаем угловую дисперсию призмы через данный угол, принимая $\Delta\lambda = 170$ нм (486 – 656 нм), согласно 6.7:

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{\Delta \cdot \pi}{180 \cdot \Delta\lambda} = 0,00066 \frac{1}{\text{нм}}$$

Различие в значениях угловой дисперсии вызвано дополнительной дисперсией материала второй половиной гримзы, расположенной после дифракционной решетки.

Type	Surf	Wave	Hx	Hy	Px	Py	Target	Weight	Value
1 RAID ▾	3	2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	15,000
2 RAED ▾	3	2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	9,038
3 RAID ▾	7	2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	9,038
4 RAID ▾	5	2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	5,962
5 RAED ▾	5	2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	5,962
6 RAED ▾	7	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	18,918
7 RAED ▾	7	2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	15,000
8 RAED ▾	7	3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	12,475
9 DIFF ▾	6	8					0,000	0,000	6,443

Рисунок 6.9 – Углы падения и дифракции составной гримзы

Широкое применение гримз обуславливается возможностью достижения высокого спектрального разрешения в линзовых системах небольшой

светосилы (1:8 – 1:40). Данные системы, как правило, компактны, не имеют излома оптической оси и позволяют реализовать несколько режимов работы, путем введения в ход лучей различных диспергирующих элементов. Рассмотрим особенности таких систем на примере спектрометра с умеренным разрешением. В качестве диспергирующего элемента будем использовать составную призму с дифракционной решеткой, расположенной между двумя половинами призмы (рисунок 6.6). Положим, что спектрометр работает с телескопом, выходная числовая апертура которого $Am' = 0,05$ (1:10), ширина входной щели (w) составляет 0,08 мм, высота (h) – 1 мм. В качестве приемника используется ПЗС-матрица с размером пиксела 13,5 мкм и размерностью – 4000 x 2000 элементов. Ширина монохроматического изображения входной щели должна занимать на приемнике 3 пиксела. Разрешение спектрометра должно составлять $R=4000$ для $\lambda_0=525$ нм, рабочий спектральный диапазон 450 – 580 нм. Диаметр коллимированного пучка для установки призмы составляет $D_k = 50$ мм.

Определим увеличение оптической системы спектрометра:

$$\Gamma = \frac{dl}{S_{\text{вх}}} = 0,50625^*, \quad (6.11)$$

где dl – минимальное линейное приращение на приёмнике, которое составляет 3 пиксела.

Фокусное расстояние коллиматора:

$$f'_{\text{кол}} = (D_k/2)(1/A'_T) = 500 \text{ мм}. \quad (6.12)$$

Фокусное расстояние проекционного объектива:

$$f'_{\text{п.об}} = \Gamma f'_{\text{кол}} = 253,125 \text{ мм}. \quad (6.13)$$

Линейная дисперсия спектрометра при заданном разрешении ($R=4000$):

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{S_{\text{вх}}\Gamma R}{\lambda_0} = 0,3086 \text{ мм/нм}. \quad (6.14)$$

Зная линейную дисперсию и фокусное расстояние проекционного объектива, найдем угловую дисперсию призмы:

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{dl}{d\lambda} / f'_{\text{п.об}} \text{ (1/нм.)} \quad (6.15)$$

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = 0,00122 \text{ 1/нм}.$$

Так как нам известен рабочий спектральный диапазон прибора, легко определить полный угол θ между лучами для крайних длин волн диапазона после выхода из призмы:

$$\theta = \frac{d\beta}{d\lambda} \Delta\lambda \left(\frac{180}{\pi}\right), \quad (6.16)$$

где $\Delta\lambda = 130$ нм, тогда $\theta = 9,08^\circ$.

При определении постоянной решетки N следует учитывать ход лучей в системе спектрометра. При условии неотклонения лучей для заданной длины волны N , как нам известно, определяется согласно выражению (6.10). Однако постоянная решетки также должна удовлетворять условию требуемой угловой дисперсии:

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{kN}{\cos\beta} = \frac{n(\sin\alpha + \sin\beta)}{\lambda \cos\beta}, \quad (6.17)$$

тогда

$$N = n(\sin\alpha + \sin\beta)/k\lambda. \quad (6.18)$$

Угол падения лучей на дифракционную решетку α :

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\sin\left(\frac{\omega}{2}\right)}{n}\right), \quad (6.19)$$

где n – показатель преломления стекла, из которого изготовлена составная призма, ω – угол при вершине призмы. Тогда, описав ход лучей через составную призму, совместно с удовлетворением требования к угловой дисперсии получим систему уравнений:

$$2n_{\lambda_0} \sin\left(\frac{\omega}{2} - \arcsin\left(\frac{\sin\left(\frac{\omega}{2}\right)}{n_{\lambda_0}}\right)\right) = k\lambda_0 N, \quad (6.20)$$

$$n_{\lambda_{кр}} \sin\left(\frac{\omega}{2} - \arcsin\left(\frac{-n_{\lambda_{кр}} \sin\left(\frac{\omega}{2} - \arcsin\left(\frac{\sin\left(\frac{\omega}{2}\right)}{n_{\lambda_{кр}}}\right)\right) + k\lambda_{кр} N}{n_{\lambda_{кр}}}\right)\right) = \sin\left(\frac{\omega}{2} - \frac{\theta}{2}\right). \quad (6.21)$$

Пусть призма изготовлена из стекла ТК12, тогда для λ_0 $n_{\lambda_0} = 1,572327$, для крайней длины волны диапазона $\lambda_{кр} = 580$ нм, $n_{\lambda_{кр}} = 1,56924$, $k=1$. Решив данную систему уравнений, находим N и ω , при которых достигается требуемое разрешение и лучи, выходящие из призмы, для центральной длины волны не отклоняются. Решать данную систему уравнений удобнее при помощи MathCad либо Matlab. В результате получаем $N=1231$ лин/мм, $\omega=61,94^\circ$. На рисунке 6.10 представлен ход лучей в системе спектрометра с составной призмой.

В качестве коллимационного и проекционного объективов используются тонкие компоненты (Paraxial) с рассчитанными фокусами. Конструктивные параметры системы приведены в таблице 6.1.

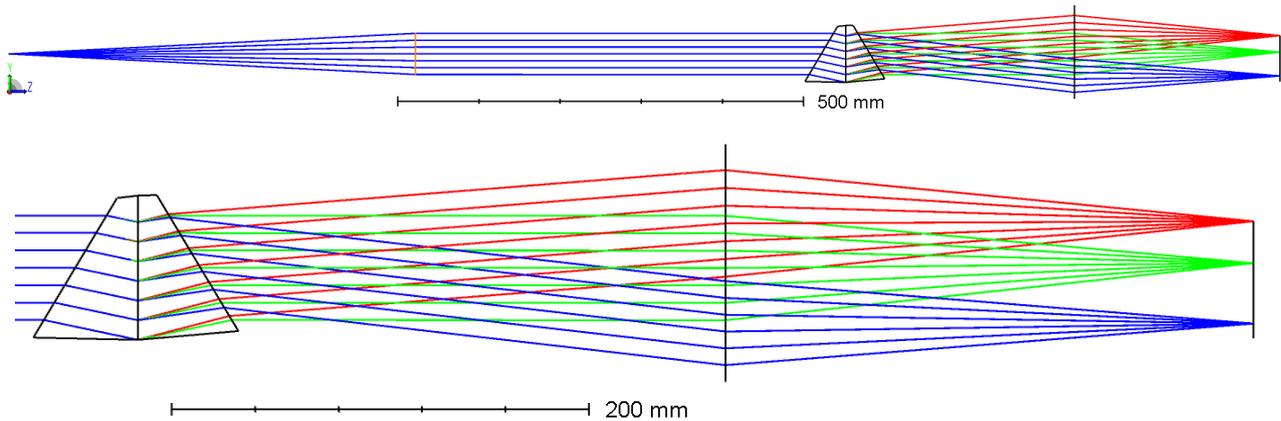


Рисунок 6.10 – Ход лучей в системе спектрометра с составной призмой

Таблица 6.1 – Конструктивные параметры спектрометра с составной призмой

№	Тип поверхности	Радиус, мм	Толщина по оси, мм	Материал
1	Paraxial ($f'=500$ мм)	Infinity	500	
2	Coordinate Break		0	
3	Standard	Infinity	0	TK12
4	Coordinate Break		30	
5	Diffraction Grating (1,231 лин/мкм)	Infinity	30	TK12
6	Coordinate Break		0	
7	Standard	Infinity	0	
8	Coordinate Break		253,125	
9	Paraxial ($f'=253,125$ мм)		253,125	
10	Image	Infinity	0	

Продолжение Таблицы 6.1

№	Децентрировка по оси X	Децентрировка по оси Y	Наклон относительно оси X, °
1	-	-	-
2	0	0	30,968
3	-	-	-
4	0	0	-30,968
5	-	-	-
6	0	0	-30,968
7	-	-	-
8	-	-	30,968

На рисунке 6.11 представлены различные углы в системе. Видно, что углы падения на первую поверхность призмы и выхода с последней поверхности призмы (1 и 2 строчки) практически равны (небольшое отличие связано с округлением числа штрихов дифракционной решетки), условие неотклонения лучей для центральной длины волны соблюдается. Половину угла θ , соответствующего заданной угловой дисперсии при разрешении $R=4000$, находим при помощи оператора в третьей строчке.

Type	Surf	Wave	Hx	Hу	Px	Pу	Target	Weight	Value	% Contrib
1 RAID ▾ 3		2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	30,968	0,000
2 RAED ▾ 7		2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	30,989	0,000
3 RAID ▾ 9		3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	4,520	0,000
4 RAED ▾ 7		1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	37,506	0,000
5 RAED ▾ 7		2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	30,989	0,000
6 RAED ▾ 7		3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	26,448	0,000
7 DIFF ▾ 4		6					0,000	0,000	11,059	0,000

Рисунок 6.11 – Углы падения и дифракции спектрометра с составной призмой

Оценим угловую дисперсию полученной системы через углы выхода лучей для различных длин волн (см. рисунок 6.11 строчки 5 – 7). Согласно (6.7):

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{11,059 \cdot \pi}{180 \cdot \Delta\lambda} = 0,001485 \frac{1}{\text{нм}}$$

Значение угловой дисперсии превышает расчетное, так как при расчете параметров N и ω не учитывалась неравномерность дисперсии стекла.

Пересчитаем значение линейной дисперсии в плоскости приемника:

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{d\beta}{d\lambda} f'_{п.об} = 0,376 \text{ мм/нм.}$$

Для единовременной регистрации 130 нм потребуется приемная площадка размером не менее 48,88 мм в направлении дисперсии спектрального узла (рисунок 6.12).

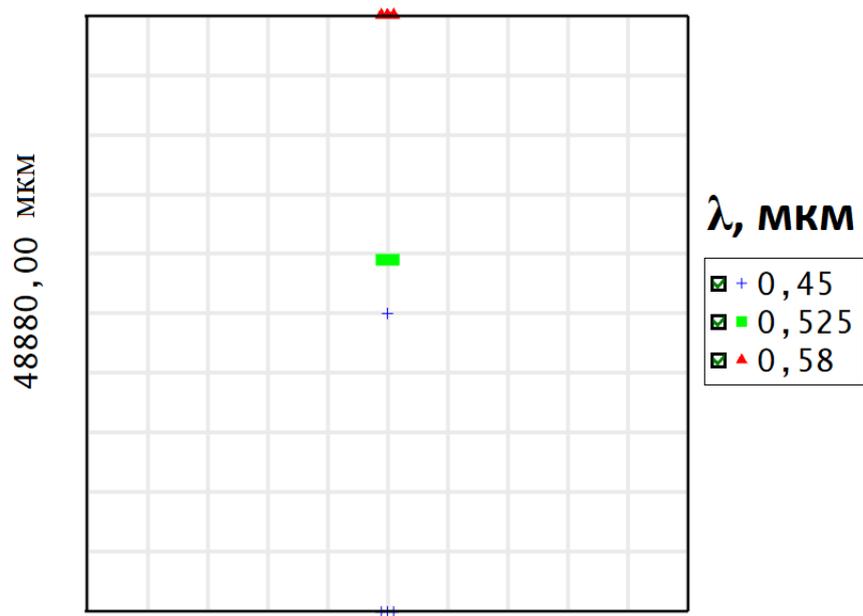


Рисунок 6.12 - Схематическое изображение спектра на приемнике (Full Field Spot Diagram)

Разрешение полученной системы спектрометра с составной призмой составит (из 6.14):

$$R = \frac{dl}{d\lambda} \frac{\lambda_0}{S_{вх}\Gamma} = 4874.$$

Следует учитывать, что реальное спектральное разрешение системы будет зависеть от aberrаций, вносимых объективами коллиматора и камеры. Как правило, реальное спектральное разрешение всегда меньше расчетного. В полученной системе относительное отверстие проекционного объектива составляет 1:2,7, что будет существенно усложнять коррекцию aberrаций.

Таблица 6.2 – Варианты заданий для моделирования одиночной призмы. Длины волн для расчета угловой дисперсии: 404,7; 407,8; 434,7; 480; 486; 491,6; 546,1; 577; 587; 623,2; 656; 690,7; 750 нм.

№ варианта	Марка стекла призмы	Диапазон углов при вершине ω , градусы (шаг 5 °)	$D_{\text{вх}}$, мм
1	ТФ1	20 – 60	40
2	ТФ2	20 – 60	30
3	ТФ3	20 – 50	35
4	ТФ4	20 – 50	30
5	ТФ7	20 – 50	30
6	ТК9	20 – 50	40
7	ТФ10	20 – 50	40
8	СТК12	20 – 50	35
9	ТК2	20 – 60	30
10	К8	20 – 50	50
11	ТК12	15 – 45	40
12	ТФ4	20 – 50	40
13	К8	20 – 60	30
14	ТФ3	20 – 40	45
15	ТК9	15 – 40	30

Таблица 6.3 – Варианты заданий для моделирования спектрометра с составной призмой

№ варианта	$R_{\text{теор}}$	Числовая апертура в пространстве предметов A'_T	Спектральный диапазон $\Delta\lambda$, нм. λ_0 – середина диапазона	Размер входной щели		D_k , мм	Размер пиксела (dl на приемнике), мкм
				w , мкм	h , мм		
1	1000	0,05	350 - 650	50	2	50	13,5 (2 пиксела)
2	3000	0,04	580 - 750	80	2	45	13,5 (3 пиксела)
3	3500	0,05	400 - 750	50	1	50	15 (3 пиксела)
4	4000	0,03	350 - 450	60	1,5	50	13,5 (3 пиксела)
5	4500	0,06	600 - 750	70	2	40	13,5 (3 пиксела)
6	5000	0,05	580 - 750	60	2	40	9 (4 пиксела)
7	5500	0,04	350 - 450	70	1	40	13,5 (3 пиксела)
8	4200	0,045	450 - 580	60	2	50	10 (3 пиксела)
9	3700	0,05	350 - 480	80	1	50	10 (2 пиксела)
10	200	0,05	400 - 750	70	3	50	13,5 (3 пиксела)
11	1500	0,04	750 - 870	60	2	35	9 (4 пиксела)
12	2000	0,05	500 - 650	80	2	40	13,5 (3 пиксела)
13	2700	0,04	420 - 560	60	1	50	10 (4 пиксела)
14	5000	0,05	480 - 630	60	2	40	9 (4 пиксела)
15	500	0,05	400 - 650	80	1,5	45	13,5 (3 пиксела)

Содержание отчета

1. Эскизы гризм с расчетом углов падения и преломления на рабочих гранях.
2. Рисунки оптических схем в среде OpticStudio.
3. Результаты расчетов угловой дисперсии и гризм. Сравнение расчетов с моделью.
4. Графики зависимости линейной дисперсии от длины волны для одиночной и составной гризм.
5. Результаты расчетов оптической системы спектрометра с составной гризмой.
5. Отчет должен быть оформлен согласно ГОСТ Р 2.105-2019 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Общие требования к текстовым документам.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные свойства гризмы.
2. Какие факторы ограничивают угловую дисперсию гризмы?
4. Чем отличается спектральная призма от гризмы?
5. Способы изготовления гризм.
7. Приведите выражение для угловой дисперсии гризмы в условиях отсутствия отклонения лучей для заданной длины волны и объясните зависимость угловой дисперсии от длины волны.

Список литературы

1. Greene T. P. Slitless spectroscopy with the James Webb Space Telescope Near-Infrared Camera (JWST NIRCам) / T. P. Greene et al. // Space Telescopes and Instrumentation. Optical, Infrared, and Millimeter Wave. – 2016. – Vol. 9904. — P. 99040E.
2. Strassmeier G. PEPSI: The high-resolution echelle spectrograph and polarimeter for the Large Binocular Telescope / G. Strassmeier, K Ilyin, I. Järvinen et. al. // Astronomische Nachrichten – 2015 – Vol.336 – Ussue 4 – P. 324-361.
3. Valyavin G. G. High-resolution fiber-fed echelle spectrograph for the 6-m telescope. I. Optical scheme, arrangement, and control system / G.G. Valyavin, V.D. Bychkov, M.V. Yushkin et. al. // Astrophysical Bulletin – 2014 – Vol. 69 – P. 224-239.

4. Nakau H. Development of Nayoro Optical Camera and Spectrograph for 1.6-m Pirka telescope of Hokkaido University / H. Nakau, M. Watanabe, K. Sorai et. al. // Proc. of SPIE – 2014 – Vol. 9147 – P.91473P-1.

5. Тарасов, К.И. Спектральные приборы. – Л.: Машиностроение; Издание 2-е, перераб. и доп., 1977. – 368 с.

6. Пейсахсон И.В. Оптика спектральных приборов. – Л.: Машиностроение, 1975.- 312 с.

Кукушкин Дмитрий Евгеньевич
Сазоненко Дмитрий Андреевич
Бахолдин Алексей Валентинович
Красавцев Валерий Михайлович

Моделирование спектральных систем.
Часть первая
Учебно-методическое пособие

В авторской редакции
Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО
Зав. РИО Н.Ф. Гусарова
Подписано к печати
Заказ №
Тираж
Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, литер А