



**Институт прикладной физики РАН
Школа юного исследователя
(ШЮИ ИПФ РАН)**

Секция: **Физика**

*Составные дифракционные решетки для
сверхмощных лазерных систем*

Автор работы:

Логинова Дария Андреевна

11 класс, ЦОД

Научный руководитель:

Яковлев И.В.

н.с. ИПФ РАН

Нижний Новгород

2012

Содержание

Введение	3
Глава I. Изучение оптических приборов и устройств	6
1.1. Дифракционные решетки как оптический прибор	
1.2. Источники коллимированного оптического излучения	
1.2.1. Автоколлиматор АКТ-15	
1.2.2. Коллимация излучения He-Ne лазера с помощью телескопа	
Глава II. Теоретическая часть	9
2.1. Отражение света дифракционной решеткой при произвольном угле падения волны	
2.2. Исследование методов настройки составных дифракционных решеток	
Глава III. Экспериментальная часть	12
3.1. Настройка составной решетки по вращательным степеням свободы с помощью автоколлиматора	
3.2. Настройка составной решетки с помощью лазера, телескопа и зрительной трубы	
Заключение	15
Глоссарий	16
Литература	17
Приложение	18

Введение

Технический прогресс неразрывно связан с открытиями науки. Передовые технологии оказывают влияние на ход развития человеческого общества. Создание лазера – источника когерентного светового излучения – стало прорывом не только в оптике и квантовой физике, но и практически во всех отраслях науки и техники.

В силу уникальных свойств излучения лазеры нашли применение в фундаментальных и прикладных научных исследованиях, в медицине, в промышленности, в вооружении. С момента своего изобретения лазеры зарекомендовали себя как «готовые решения ещё не известных проблем», поэтому область их применения практически безгранична.

По мере развития прогресса растет и необходимость в создании лазеров с все более уникальными характеристиками, превосходящими по своим значениям предыдущие разработки. Одной из важнейших целей современной лазерной физики является создание лазерных систем, пиковая мощность которых превышает петаватт. Данное значение превосходит суммарную мощность всех электростанций мира более чем в 500 раз.

Такие высокие значения мощности как петаватт оказалось возможным получить с использованием субпикосекундных и фемтосекундных лазерных импульсов, но наращивание мощности сталкивается с серьезной проблемой оптического повреждения самой усиливающей среды. Разрушение материала происходит при прохождении через него излучения с пиковой мощностью, не превышающей даже доли тераватта.

Предложенный в 1985 году метод усиления чирпированных импульсов – СПА (chirped pulse amplification) - позволил разрешить данную проблему. Принцип СПА метода состоит в том, что маломощный фемтосекундный импульс (рис. 1) перед усилением чирпируется - растягивается во времени в диспергирующем элементе по определенному закону. Растяжение импульса уменьшает его мощность в тысячи раз, что позволяет пропускать его через усиливающую среду без ее повреждения световым полем.

После усиления импульс проходит через оптический компрессор с обратным знаком дисперсии, в котором коротковолновые компоненты спектра догоняют длинноволновые, в результате длинный импульс сжимается до первоначальной фемтосекундной длительности, но с гораздо большей энергией и мощностью.

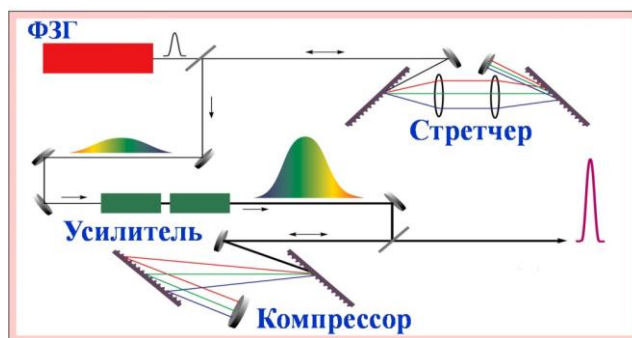


Рис. 1. Принципиальная схема метода усиления чирпированных импульсов

В настоящее время все без исключения сверхмощные лазерные системы для получения рекордных мощностей используют принцип СПА.

Дальнейшее усиление импульса приводит к возникновению еще одной проблемы. В качестве стретчеров и компрессоров световых импульсов обычно используют пару подходящим образом ориентированных дифракционных решеток, которые способны сжимать высокоэнергетические импульсы до нескольких десятков фемтосекунд. Но размеры таких решеток ограничены, поэтому они не могут использоваться для лазерных систем с

пиковой мощностью выше петаватта. Решением данной проблемы является использование составных решеток, которые действуют как одна большая дифракционная решетка.

Актуальность. В последние годы в мире, в том числе и в России в ИПФ РАН и РФЯЦ-ВНИИЭФ, созданы лазерные установки петаваттного уровня мощности, начаты несколько проектов по созданию мультипетаваттных систем. Основным препятствием к дальнейшему наращиванию мощности является оптическая стойкость дифракционных решеток компрессоров лазерного излучения. Для уменьшения оптической нагрузки на решетки приходится увеличивать поперечные размеры пучка лазерного излучения. Соответственно, необходимо увеличивать и размеры оптических элементов, в частности, дифракционных решеток. Современные технологии не позволяют производить голографические решетки размером более полуметра в диаметре. Поэтому в компрессорах сверхмощных лазерных систем перспективно применение составных (или «мозаичных», или «черепичных») решеток. Поскольку дифракционная решетка значительно более сложный оптический элемент по сравнению с зеркалом, то взаимная настройка элементов составных решеток превращается в одну из главных задач настройки компрессора, а, следовательно, и всего лазерного комплекса в целом.

Цель: теоретически и экспериментально исследовать свойства составных дифракционных решеток, методы их настройки. Разработать методику настройки двух независимых дифракционных решеток по угловым степеням свободы.

Задачи:

- 1) ознакомиться с литературой по теме выполняемой работы;
- 2) изучить основные свойства дифракционных решеток;
- 3) освоить устройство и принципы работы автоколлиматора АКТ-15;
- 4) получить практические навыки грамотной работы с оптическими приборами,
- 5) выполнить теоретический расчет траектории отраженного светового луча при произвольном угле падения луча на дифракционную решетку;
- 6) экспериментально исследовать способ настройки решеток с помощью автоколлиматора, а также пучка коллимированного лазерного излучения;
- 7) оценить точность взаимного расположения решеток после выполненной настройки, сформулировать рекомендации по совершенствованию предложенного метода.

Методы исследования: изучение литературных источников; практические занятия с оптическими приборами; теоретические расчеты и компьютерное моделирование; проведение экспериментальных работ.

В настоящей работе рассматривается два метода настройки составной решетки. Первый из них заключается в настройке двух независимых дифракционных решеток с помощью автоколлиматора АКТ-15. Суть метода состоит в наблюдении с помощью автоколлиматора составной дифракционной решетки сначала в нулевом порядке дифракции: в данном положении производится настройка параллельности рабочих поверхностей решеток, входящих в состав черепичной, затем наблюдения в автоколлиматоре ведутся под углом, соответствующим углу Литтрова для первого порядка дифракции решеток: при этом производится настройка параллельность штрихов.

Во втором методе настройки наблюдается траектория отражения от поверхностей дифракционных решеток лазерного пучка. В данном способе автоколлиматор выступает в качестве зрительной трубы. Наблюдения также, как и в первом методе, ведутся в нулевом и в первом порядках дифракции.

Историография. В 2010 году отмечалось 50-летие создания первого лазера. Это был импульсный лазер на кристалле рубина с ионами хрома. Мощность его была невелика, поскольку лазер работал в режиме так называемой свободной генерации света, характеризующейся случайными всплесками интенсивности практически в течение всего времени действия накачки – вспышек импульсных ламп. Вскоре для сокращения

длительности лазерного импульса, а, соответственно, и увеличения его пиковой мощности, были предложены методы модуляции добротности (Q-switching) и синхронизации мод (Mode Locking) (рис. 2). С тех пор повышение пиковой мощности лазерных источников стало одной из основных задач оптики лазеров.

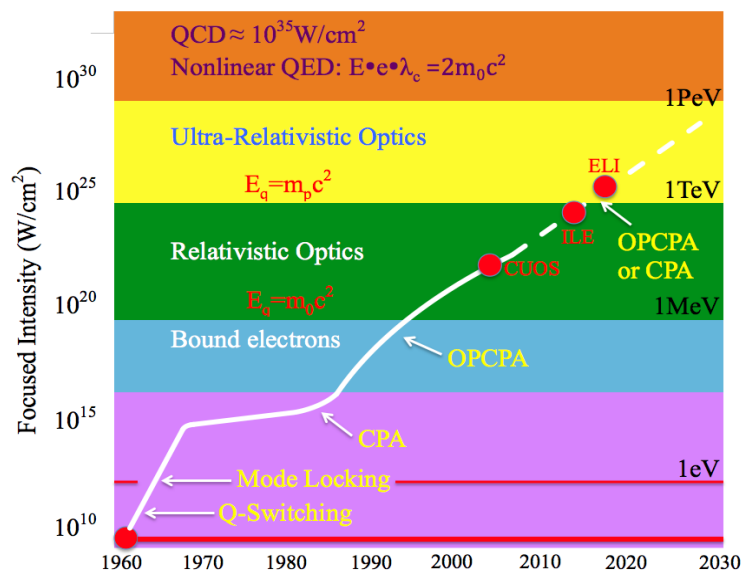


Рис. 2. Хронология роста интенсивности лазерных источников

Возможны два пути увеличения мощности лазера. Поскольку пиковая мощность импульсного источника – это отношение излученной энергии к длительности импульса, то можно наращивать энергию лазерного излучения, а можно сокращать длительность импульса. В настоящее время основные достижения в области создания сверхмощных лазерных систем связаны с применением субпикосекундных и фемтосекундных лазеров.

Как видно из рисунка 2, на котором приведена хронология роста интенсивности лазерных источников, бурный рост в создании лазеров мультитераваттного, субпетаваттного и петаваттного уровня мощности начался в 1985 году. Именно в этом году Жераром Муру и Донной Стрикланд был предложен метод достижения больших значений пиковой мощности лазеров за счет усиления chirпированных импульсов (Chirped Pulse Amplification - CPA).

В мире создано несколько лазерных систем петаваттного уровня мощности: в Японии, Англии, Китае, США, России, Корее. В ряде стран, включая Россию, ведется строительство петаваттных и мультипетаваттных лазерных комплексов. В некоторых из них: в OMEGA-EP (Laboratory for Laser Energetics, Рочестер, США), FIREX-1 (Institute of Laser Engineering, Осака, Япония), POLARIS (Institute of Optics and Quantum Electronics, Йена, Германия) и Pico2000 (Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses - LULI, Палезо, Франция) в компрессоре применены составные дифракционные решетки.

На базе ИПФ РАН планируется создание международного Центра исследований экстремального света (ЦИЭС), где будет построена уникальная установка с гигантской (экзаваттного уровня) пиковой мощностью. Согласно основной цели Проекта ЦИЭС на выходе каждого из 12-ти каналов лазерного комплекса излучение будет иметь следующие параметры: мощность 15 ПВт, длительность импульса 25 фс, длина волны 910 нм, расходимость не более 3 дифракционных пределов. Формирование этих характеристик происходит в компрессоре сверхкоротких импульсов.

Для предохранения решеток от разрушения в мультипетаваттном лазерном комплексе размер лазерного пучка будет увеличен до 400 мм в диаметре, поэтому в компрессоре будут использоваться составные решетки.

Глава I. Изучение оптических приборов и устройств

Настоящая исследовательская работа предполагала в ходе своего выполнения использование некоторых оптических приборов, поэтому одной из поставленных задач являлось ознакомление с устройством и принципом их работы. В этой главе рассматриваются оптические приборы: дифракционная решетка, автоколлиматор АКТ-15, система: He-Ne лазер + телескоп.

1.1. Дифракционные решетки как оптический прибор

Несмотря на то, что дифракционные решетки представляют собой уникальные оптические элементы, которые, безусловно, являются интереснейшим объектом исследования, в настоящей работе они выступают в качестве оптического прибора. Мы будем рассматривать и использовать только отражательные плоские решетки с неизменными формой и размером штриха, изготовленные голографическим методом.

Дифракционные свойства решеток обеспечиваются огромным числом параллельных штрихов одинаковой формы, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга.

Одной из главных характеристик дифракционной решетки является ее период d . Часто также пользуются термином «плотность штрихов» - это количество штрихов на один миллиметр, например $N = 1000$ штр./мм. Очевидно, что d , измеренное в микрометрах, выражается через N следующим образом:

$$d = 1000 / N. \quad (1)$$

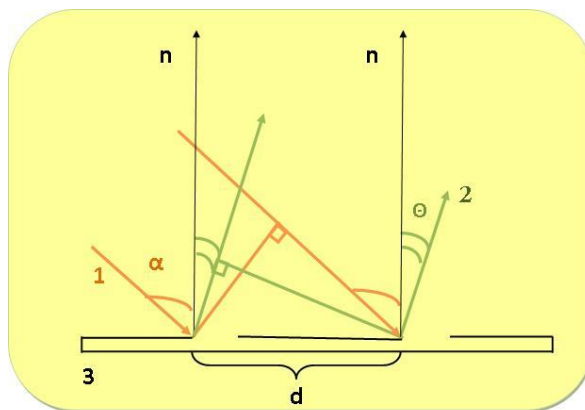


Рис. 3. Схема падения и отражения параллельного пучка света на дифракционную решетку
1 – падающий пучок света, 2 – отраженный пучок света, 3 – дифракционная решетка,
 n – нормаль к рабочей поверхности решетки

Соотношение между углом падения и углом отражения луча, определяющее направление главных дифракционных максимумов того или иного порядка, называется формулой дифракционной решетки (см. Рис. 3):

$$\sin \alpha + \sin \Theta = m \lambda / d, \quad (2)$$

где α – угол падения пучка света на дифракционную решетку, Θ – угол отражения светового пучка, m – порядок дифракции, λ – длина волны падающего излучения, d – период дифракционной решетки.

Изготовление голографических дифракционных решеток основано на интерференции на светочувствительном слое двух пучков излучения одночастотного аргонового лазера (Прил. рис. 1). Для создания плоской дифракционной решетки оба пучка должны иметь плоский волновой фронт и располагаться симметрично относительно нормали к подложке. Запись интерференционной картины и ее последующая обработка очень тонкий процесс. От угла наклона лучей зависит период изготавливаемой решетки.

Голографический способ изготовления дифракционных решеток при сравнении с механическим способом их нарезки не только существенно снижает трудоемкость самого процесса, но также заметно улучшает их оптические характеристики. Преимущество голографического метода еще и в том, что могут быть изготовлены решетки достаточно больших размеров, хотя и здесь существуют некоторые пределы, превысить которые в настоящий момент не представляется возможным, поэтому решением данной проблемы для сверхмощных лазерных систем стало применение составных дифракционных решеток.

1.2. Источники коллимированного оптического излучения

Любая оптическая система должна быть должным образом настроена или отъюстирована. Для юстировки оптических элементов, как правило, применяют оптические методы: некоторое излучение отражается или проходит через настраиваемый элемент, по отклонению лучей от ожидаемого направления судят о качестве настройки. В данном разделе настоящей работы мы рассмотрим наиболее подходящие для настройки дифракционных решеток источники широкоапертурного коллимированного оптического излучения: автоколлиматор и систему лазер + телескоп.

1.2.1. Автоколлиматор АКТ-15

Автоколлиматор – оптический прибор, в первую очередь предназначенный для определения взаимного углового расположения осей и плоскостей изделий в пространстве. Основными составными частями автоколлиматора являются (Прил. рис. П2) окуляр (1), призма (2), труба с объективом (3) и осветитель (4). Труба включает в себя объектив, патрубков, на котором нанесена шкала. Призма имеет внутри закрепленный в оправе кубик, склеенный из двух прямоугольных призм. Осветитель содержит патрон с лампой и автоколлимационную сетку. Окуляр имеет диоптрийную наводку для фокусировки глаза на плоскость наблюдения.

Оптическая схема автоколлиматора с осветительной системой приведена на рисунке П3 Приложения. Пучок лучей от источника света 5 освещает автоколлимационную сетку 4, попадает на призму-куб 3. Затем пучок лучей попадает в объектив 2.

Автоколлимационная сетка 4 расположена в фокальной плоскости объектива 2, поэтому лучи выходят из объектива параллельным пучком. Отразившись от плоскости зеркала 1 и повторно пройдя объектив и призму-куб, лучи строят изображение автоколлимационной сетки в плоскости 6, на которую наводится окуляр 7.

Цена деления автоколлимационной сетки прибора 15".

Из инструкции по применению автоколлиматора АКТ-15: работу с автоколлиматором рекомендуется проводить в затемненном помещении или экранировать объект во избежание попадания прямого или рассеянного света в систему, что вызывает появление бликов.

1.2.2. Коллимация излучения He-Ne лазера с помощью телескопа



Рис. 4. He-Ne лазер и коллимирующий телескоп

В качестве источника излучения для настройки оптических элементов часто используют лазеры непрерывного действия, генерирующие в видимом диапазоне частот. В настоящей работе использовался He-Ne лазер. Это лазер, активной средой которого является смесь гелия и неона. Он имеет рабочую длину волны 632.8 нм, расположенную в красной части видимого спектра. Размер пучка был около одного миллиметра в диаметре, что недостаточно для проведения измерений.

В процессе настройки дифракционных решеток необходимо было исследовать отражение лазерного пучка одновременно от рабочих поверхностей обеих решеток. Исходные поперечные размеры пучка затрудняют наблюдение.

Данная проблема решается путем пропускания пучка через телескоп (рис. 4.), который преобразует параллельный пучок лучей, входящий в систему, также в параллельный пучок лучей на выходе из нее с увеличенной апертурой (диаметром) пучка (рис. 5). Настройка телескопа для коллимации выходного излучения осуществляется путем наблюдения сфокусированного лазерного пучка. Если размеры фокального пятна минимальны, то выходное излучение можно считать коллимированным.

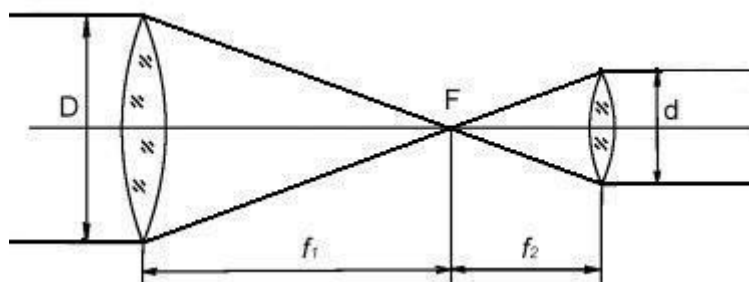


Рис. 5. Принципиальная схема телескопа

d и D – диаметр пучка на входе в телескоп и на выходе из него соответственно

Глава II. Теоретическая часть

2.1. Отражение света дифракционной решеткой при произвольном угле падения волны

Зададим прямоугольную систему координат с осями OX, OY, OZ (рис. 6).

Пусть в плоскости (ХОУ) располагается дифракционная решетка, штрихи которой параллельны оси OY, период решетки равен d.

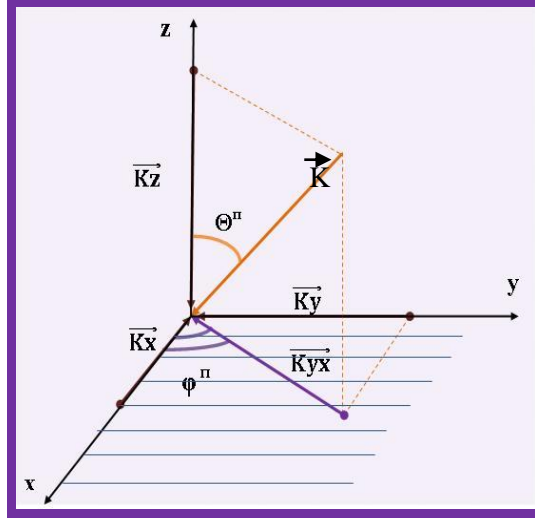


Рис. 6. Схема падения волнового вектора на решетку и система координат

Пусть на дифракционную решетку под произвольным направлением падает плоская световая волна, волновой вектор \mathbf{k} которой направлен так, как показано на рисунке. Длина волнового вектора равна $|\mathbf{k}| = 2\pi/\lambda$, углы Θ^π и φ^π отсчитываются от оси OZ и OX соответственно.

Проекции волнового вектора \mathbf{k} на оси координат выражаются следующим образом:

$$\begin{cases} kx^\pi = -|\mathbf{k}| \cdot \sin \Theta^\pi \cdot \cos \varphi^\pi, \\ ky^\pi = -|\mathbf{k}| \cdot \sin \Theta^\pi \cdot \sin \varphi^\pi, \\ kz^\pi = -|\mathbf{k}| \cdot \cos \Theta^\pi. \end{cases} \quad (3)$$

Соответственно, для отраженного в первый порядок дифракции луча будем иметь:

$$\begin{cases} kx^0 = |\mathbf{k}| \cdot \sin \Theta^0 \cdot \cos \varphi^0, \\ ky^0 = |\mathbf{k}| \cdot \sin \Theta^0 \cdot \sin \varphi^0, \\ kz^0 = |\mathbf{k}| \cdot \cos \Theta^0. \end{cases} \quad (4)$$

Пусть вектор \mathbf{R} – волновой вектор дифракционной решетки, направленный перпендикулярно штрихам решетки и расположенный в одной плоскости с ее рабочей поверхностью. Модуль волнового вектора решетки равен $|\mathbf{R}| = 2\pi/d$.

По закону сохранения тангенциальной компоненты волнового вектора в плоскости решетки (ХОУ) должно выполняться следующее условие:

$$\mathbf{k}_{yx}^\pi = \mathbf{k}_{yx}^0 + \mathbf{R}, \quad (5)$$

где \mathbf{k}_{yx}^π и \mathbf{k}_{yx}^0 – вектора – проекции падающего и отраженного волновых векторов в плоскости XOY.

Проецируем последнее выражение на оси OY и OX:

$$\begin{cases} ky^\pi = ky^0, \\ kx^\pi = kx^0 - R. \end{cases} \quad (6)$$

Подставив полученные выше выражения, получим:

$$\begin{cases} -|\mathbf{k}| \cdot \sin \Theta^{\Pi} \cdot \sin \varphi^{\Pi} = |\mathbf{k}| \cdot \sin \Theta^{\circ} \cdot \sin \varphi^{\circ}, \\ -|\mathbf{k}| \cdot \sin \Theta^{\Pi} \cdot \cos \varphi^{\Pi} = |\mathbf{k}| \cdot \sin \Theta^{\circ} \cdot \cos \varphi^{\circ} - 2\pi/d. \end{cases} \quad (7)$$

Или в более привычном виде, разделив левую и правую части на $|\mathbf{k}|$:

$$\begin{cases} -\sin \Theta^{\Pi} \cdot \sin \varphi^{\Pi} = \sin \Theta^{\circ} \cdot \sin \varphi^{\circ}, \\ -\sin \Theta^{\Pi} \cdot \cos \varphi^{\Pi} = \sin \Theta^{\circ} \cdot \cos \varphi^{\circ} - \lambda/d. \end{cases} \quad (8)$$

Анализ первого уравнения полученной системы показывает, что если $\varphi^{\Pi} = 0$, то для любых отличных от нуля Θ^{Π} и Θ° , должно выполняться условие: $\varphi^{\circ} = 0$. При этом второе выражение системы с учетом выбора направления вектора волновой решетки противоположным направлению оси ОХ переходит в известную формулу решетки для первого порядка дифракции:

$$\sin \Theta^{\Pi} + \sin \Theta^{\circ} = \lambda/d. \quad (9)$$

Выразив углы отражения через углы падения, и поделив одно уравнение системы на другое, получим выражение для определения угла отражения φ° :

$$\operatorname{tg} \varphi^{\circ} = (\sin \Theta^{\Pi} \cdot \sin \varphi^{\Pi}) / (\sin \Theta^{\Pi} \cdot \cos \varphi^{\Pi} - \lambda/d). \quad (10)$$

На рисунке Приложения П4 приведены полученные по формуле зависимости угла отражения φ° от угла падения φ^{Π} при некоторых значениях угла Θ^{Π} .

Подставив полученное выражение для φ° в первое из уравнений системы, получаем выражение для второго угла отраженного луча:

$$\sin \Theta^{\circ} = -\sin \Theta^{\Pi} \cdot \sin \varphi^{\Pi} / \sin \varphi^{\circ}. \quad (11)$$

На рисунке Приложения П5 приведены полученные по формуле зависимости угла отражения Θ° от угла падения Θ^{Π} при некоторых значениях угла φ^{Π} .

2.2. Исследование методов настройки составных дифракционных решеток

Составные дифракционные решетки – это совокупность дифракционных решеток (двух или более), настроенных таким образом, что при использовании в оптических приборах, она ведет себя как единичная дифракционная решетка.

Настройка составных решеток требует предельной точности. Дифракционные решетки в составе системы должны располагаться строго в одной плоскости и параллельно друг другу, их штрихи также должны быть ориентированы параллельно друг другу. Незначительные отклонения от заданного положения может привести к увеличению длительности импульса, увеличению расходимости излучения, пространственному и угловому окрасу пучка выходного излучения. При фокусировке такого излучения будет возникать нежелательная интерференция в фокусе, в конце концов – излучение будет вести себя просто, как два независимых пучка.

Рассмотрим случай, когда составная дифракционная решетка состоит из двух плоских решеток, из которых одна неподвижна, а другая способна перемещаться или поворачиваться в некоторых направлениях. Введем прямоугольную систему координат с осями x , y , z , связанную с положением решеток и рассмотрим возможные степени свободы (Прил. рис. П6). Всего у подвижной решетки существует пять степеней свободы [4]: три вращательных и две поступательных. К примеру, у плоского зеркала всего три степени свободы: две вращательных и одна поступательная.

Степень свободы, связанную с поворотом подвижной решетки вокруг оси x будем называть «наклон». Вращение решетки относительно оси y будем называть «поворот». И, наконец, третью вращательную степень свободы, которая отсутствует у плоского зеркала - поворот дифракционной решетки относительно оси z – будем называть «вращение». Она не влияет на параллельное расположение решеток, а лишь изменяет направление штрихов.

Поступательных степеней свободы у дифракционной решетки две: перемещение вдоль оси x - «сдвиг» и перемещение вдоль оси z - «смещение».

Один из способов настройки составных дифракционных решеток, разработанный для лазерной системы POLARIS, описан в работе [5]. Авторы предлагают достаточно сложную модель, которая позволяет достичь параллельного положения решеток относительно друг друга, а также настроить положение штрихов решеток (Прил. рис. 7).

На рисунке Приложения П8 приведены экспериментальные и расчетные распределения лазерного поля в дальней зоне, наблюдаемые при повороте (а), наклоне (b) и смещении одной решетки относительно другой (с).

Глава III. Экспериментальная часть

3.1. Настройка составной решетки по вращательным степеням свободы с помощью автоколлиматора

Цель эксперимента: провести настройку двух дифракционных решеток по трем вращательным степеням свободы с помощью автоколлиматора АКТ-15.

Оборудование: две дифракционные решетки, одна из которых имеет регулировки для вращения относительно трех ортогональных осей; автоколлиматор АКТ-15. Оптические приборы располагаются на оптическом столе.

Порядок проведения эксперимента:

1. Подготовка оборудования
2. Настройка системы «автоколлиматор – неподвижная решетка»
3. Настройка подвижной решетки по двум степеням свободы: наклону и повороту
4. Настройка направления штрихов решетки по степени свободы – «вращение»

Перед началом настройки была проведена установка и закрепление оборудования на оптическом столе.

К оптическому столу жестко прикрепили подставку, на которую установили неподвижную дифракционную решетку. Рядом с неподвижной решеткой установили рамку, в которую закрепили вторую дифракционную решетку. Конструкция рамки с угловыми регулировками позволяет решетке, закрепленной в ней, поворачиваться относительно трех ортогональных осей. В совокупности две решетки образуют составную дифракционную решетку.

В процессе предварительной настройки решетки были расположены таким образом, чтобы зазор между ними был минимальным, однако позволял подвижной решетке осуществлять повороты, не задевая неподвижную решетку (Прил. рис. 9).

Автоколлиматор АКТ-15 на основании с регулировками был установлен на оптическом столе перед составной решеткой (Прил. рис. 10).

Настройка резкости изображения автоколлимационной сетки автоколлиматора АКТ-15 производилась согласно инструкции к прибору при его наведении на одну из решеток нормально к рабочей поверхности (Прил. рис. 11).

Настройка подвижной решетки по двум степеням свободы: наклону и повороту эквивалентна настройке параллельности двух зеркал.

Для настройки параллельности рабочих поверхностей решеток автоколлиматор устанавливался нормально к поверхности, причем таким образом, чтобы выходящий из него пучок света попадал одновременно на обе решетки (Прил. рис. 12). Такое взаимное положение решеток и автоколлиматора соответствует работе в нулевом (зеркальном) порядке дифракции решеток.

Случайное положение решеток при их монтаже было видно невооруженным глазом: отраженные от двух решеток предметы имели «разлом» (Прил. рис. 13). При этом в автоколлиматоре наблюдалось два несовпадающих изображения автоколлимационной сетки (рис. 7), поскольку плоскости рабочих поверхностей двух решеток не параллельны.

Настройка параллельности рабочих поверхностей решеток осуществлялась регулировкой подвижной решетки по двум угловым степеням свободы: ее наклону и повороту. Процесс настройки заключался в одновременном наблюдении в окуляре автоколлимационных сеток и вращении соответствующих регулировочных винтов подвижной решетки, в результате необходимо было добиться наилучшего совмещения изображений двух автоколлимационных сеток.

Совпадение изображений означало, что параллельность рабочих поверхностей решеток достигнута.

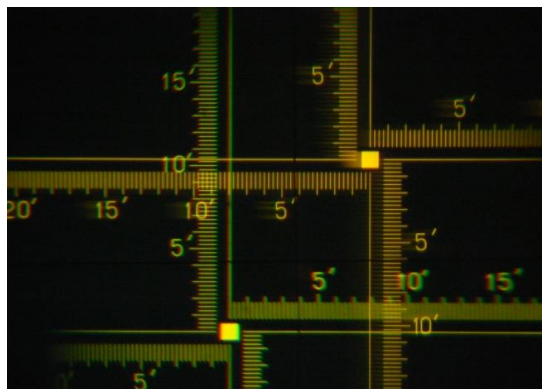


Рис. 7. Изображение автоколлимационной сетки в объективе автоколлиматора при настройке двух зеркал

Для настройки параллельности штрихов решеток необходимо переместить автоколлиматор в новую точку наблюдения, соответствующую углу Литтрова для первого порядка дифракции решеток. В нашем случае - это угол примерно 25 – 30 градусов от нормали к решеткам. Вновь автоколлиматор устанавливался таким образом, чтобы выходящий из него пучок света попадал одновременно на обе решетки.

Свет, испускаемый автоколлиматором, не является монохроматическим. Поэтому в отличие от случая зеркального отражения, в первом порядке дифракции свет автоколлиматора раскладывается в спектр. В результате в окуляре наблюдалось размытое цветное изображение автоколлимационной сетки. Однако можно так повернуть трубу автоколлиматора относительно своей оси, что горизонтальная ось автоколлимационной сетки будет видна в окуляр в виде четкой цветной линии. Причем ее толщина равна толщине линии автоколлимационной сетки (Прил. рис. 14). Такая настройка соответствует случаю, когда горизонтальная ось сетки перпендикулярна штрихам решетки.

Таким образом, мы настроили автоколлимационную сетку на штрихи неподвижной решетки.

Наблюдая одновременно две решетки с направления первого литтровского угла, в автоколлиматоре можно видеть две цветных линии. Одна из них – четкая, она соответствует изображению сетки от неподвижной решетки, вторая линия – размытая, она соответствует изображению сетки от подвижной решетки (Прил. рис. 14). Что важно – она смещена от четкой линии по вертикали, то есть между штрихами решеток есть некоторый угол, который и необходимо настроить.

Настройка осуществляется с помощью регулировочного винта, позволяющего вращать решетку относительно оси, перпендикулярной к рабочей поверхности. Необходимо добиться совмещения спектральных полосок.

После выполнения данной настройки следует проверить параллельность решеток, поскольку в процессе настройки штрихов предыдущие настройки могли сбиться.

Итак, мы выполнили настройку взаимного положения решеток по трем степеням свободы с помощью коллиматора.

3.2. Настройка составной решетки с помощью лазера, телескопа и зрительной трубы

Цель эксперимента: провести настройку дифракционных решеток, образующих составную дифракционную решетку, используя коллимированное излучение He-Ne лазера.

Оборудование: две дифракционные решетки, одна из которых имеет регулировки для вращения относительно трех ортогональных осей; He-Ne лазер; телескоп; плоское зеркало; автоколлиматор АКТ–15. Оптические приборы располагаются на оптическом столе.

Порядок проведения эксперимента:

1. Подготовка оборудования

2. Настройка наклона и поворота подвижной решетки

3. Настройка направления штрихов решетки

Оптическая схема эксперимента видна из рисунка 15 Приложения. Излучение He-Ne лазера направляется в окуляр телескопа. На выходе телескопа пучок лазерного излучения расширяется и имеет размер около пяти сантиметров в диаметре. Настройка телескопа для коллимации выходного излучения осуществляется путем наблюдения широкого пучка на большом расстоянии (10 – 15 м) от телескопа. Для качественных измерений вполне достаточно, чтобы пучок примерно сохранял свой размер. Для количественных измерений необходимо коллимировать выходное излучение так, как это описано в пункте 1.2.2.

Излучение из телескопа направляется на плоское зеркало, с помощью которого перенаправляется на стык дифракционных решеток. Отраженные пучки наблюдаются в фокусе линзы-объектива автоколлиматора АКТ-15.

Как и в предыдущем эксперименте исследования проводятся в нулевом и первом порядках дифракции. Благодаря тому, что свет, испускаемый лазером, монохроматический, разложения лазерного излучения в спектр не происходит, как это было при проведении предыдущего эксперимента. При попадании на решетки из-за наличия между их поверхностями и штрихами угла пучок разбивался на два (Прил. рис. 16). Поэтому в фокусе линзы-объектива автоколлиматора и в первом, и в нулевом порядках наблюдаются два фокальных пятна - изображения пучков. По полученным изображениям делается вывод о наличии угловых отклонений плоскости рабочей поверхности подвижной дифракционной решетки от плоскости неподвижной. Также как и в первом эксперименте, необходимо было добиться совмещения полученных изображений.

Для настройки наклона и поворота подвижной решетки наблюдения велись в нулевом (зеркальном) порядке дифракции. Совмещение фокальных пятен означало, что параллельность рабочих поверхностей решеток настроена.

Однако, приступив к настройке параллельности штрихов, был обнаружен факт, что сфокусированные пятнышки невозможно совместить в принципе (Прил. рис. 17). Убедившись в правильности предыдущих настроек, было замечено, что при повороте штрихов решетки с помощью соответствующих регулировок фокальное пятно от подвижной решетки перемещалось по вертикали, но не совмещалось с другим пятном. По данным наблюдениям был сделан вывод, что причиной данного явления являются не ошибки в настройке угловых степеней свободы подвижной решетки, а разница плотности штрихов используемых решеток. Расчеты показали, что данным методом можно определить разницу штрихов до сотых долей штриха на миллиметр.

Для двух решеток с различной плотностью штрихов для первого порядка дифракции запишем формулы дифракционной решетки:

$$\begin{aligned}\sin \alpha_1 + \sin \Theta_1 &= \lambda / d_1 = \lambda N_1 / 1000 , \\ \sin \alpha_2 + \sin \Theta_2 &= \lambda / d_2 = \lambda N_2 / 1000 ,\end{aligned}\quad (12)$$

Так как угол падения пучка на решетки одинаковый, то вычитая одно уравнение из другого получим:

$$\sin \Theta_2 - \sin \Theta_1 = \lambda (N_2 - N_1) / 1000 , \quad (13)$$

откуда

$$\Delta N = (\sin \Theta_2 - \sin \Theta_1) 1000 / \lambda. \quad (14)$$

После несложных преобразований в предположении малой разницы углов:

$$\Delta N = \Delta \Theta \cos \Theta 1000 / \lambda. \quad (15)$$

Для точности измерений угла $\Delta \Theta$ с помощью автоколлиматора в 3 угловые секунды (толщина линии автоколлимационной сетки), получим, что для длины волны He-Ne лазера

$$\Delta N = 0.02 \text{ штр./мм}$$

Стоит заметить, что данное явление не наблюдалась в первом эксперименте при настройке автоколлиматором из-за широкого спектра излучения, поэтому настройка лазером и автоколлиматором дополняют друг друга.

Заключение

В ходе исследовательской работы все поставленные задачи были успешно выполнены:

- Рассчитаны и изучены зависимости направления отраженного света при произвольном угле падения плоской волны на дифракционную решетку, построены соответствующие графики;
- Экспериментально исследованы методы настройки двух независимых дифракционных решеток по трем угловым степеням свободы:
 - метод настройки с помощью автоколлиматора АКТ-15
 - метод настройки с помощью He-Ne лазера, телескопа и зрительной трубы
- Произведена оценка точности взаимного расположения дифракционных решеток после выполненной настройки.

В дополнение был предложен метод по определению разницы штрихов двух дифракционных решеток.

Глоссарий

Дифракция – отклонение направления световых волн от прямолинейного у края преграды, когда ее размер порядка нескольких длин световых волн.

Коллиматор – устройство для получения параллельных пучков света или частиц.

Разрешение – способность оптического прибора воспроизводить отдельно изображение близко расположенных объектов.

Угол Литтрова – для ненулевого порядка дифракции, угол падения светового луча на дифракционную решетку, при котором падающий луч, отражаясь, идет строго в обратном направлении.

Чирпированный импульс – частотно-модулированный импульс широкополосного излучения, у которого частота изменяется вдоль временного профиля импульса.

Литература

1. *Летохов В.С.* Фемтосекундные лазерные импульсы: перспективы применения // Вестник российской академии наук, 2002, Т. 72, № 9. С. 779 – 785.
2. *Куйбида А.В.* России появится лазерная «царь-пушка» // Известия, 2011, 26 декабря.
3. Физика: Учеб. для 11 кл. / А.Т. Глазунов, О.Ф. Кабардин, А.Н. Малинин и др.; Под ред. А.А. Пинского. – 7-е изд. – М.: Просвещение, 2002.
4. *Bodefeld R., Hornung M., Siebold M., Schnepf M., Hein J., Podleska S., Sauerbrey R.* Alignment of mosaic gratings in a tw/pw- CPA system with a slant grating separation of 5.6 meters // Institute of Optics and Quantum Electronics. Jena. Annual Report 2004.
5. *Hornung M., Bodefeld R., Siebold M., Schnepf M., Hein J., Sauerbrey R., Kaluza M.* Alignment of a tiled-grating compressor in a high-power chirped-pulse amplification laser system // Applied optics, 2007, V.46, № 30. P. 7432.
6. *Крюков П.Г.* Фемтосекундные импульсы. Введение в новую область лазерной физики. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 208 с.

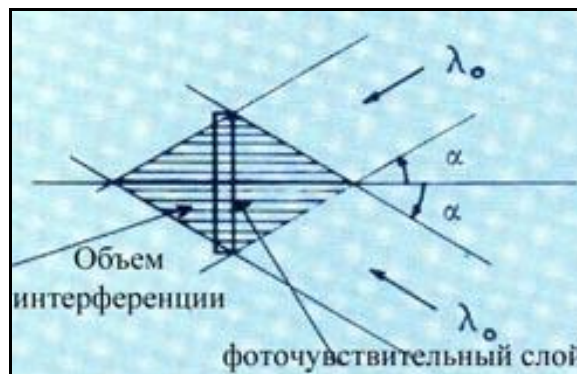


Рис.1. Изготовление голографических дифракционных решеток



Рис. 2. Автоколлиматор АКТ-15

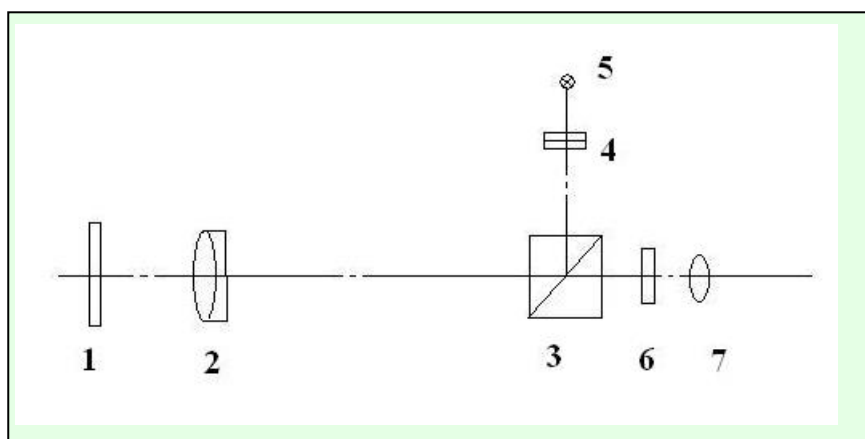


Рис. 3. Оптическая схема автоколлиматора АКТ-15

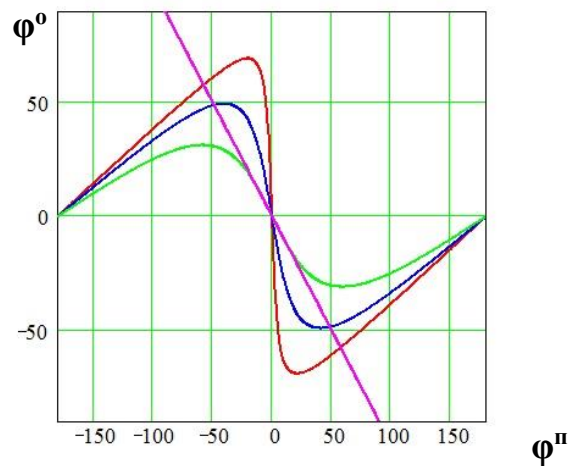


Рис. 4. Зависимости угла отражения φ° от угла падения φ^π при значениях угла $\Theta^\pi = 23, 35$ и 45 градусов

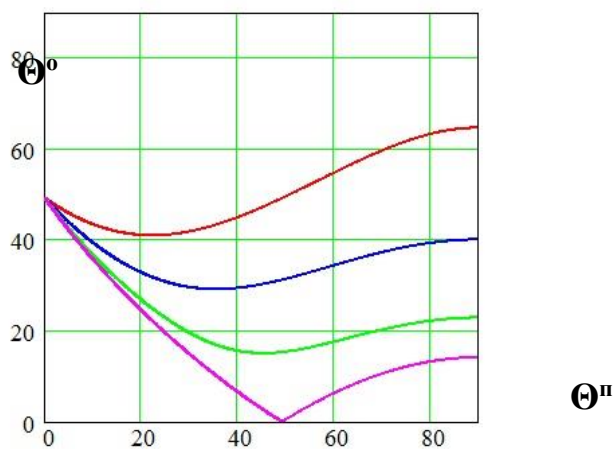


Рис. 5. Зависимости угла отражения Θ° от угла падения Θ^π при значениях угла $\varphi^\pi = 0, 20, 40$ и 60 градусов

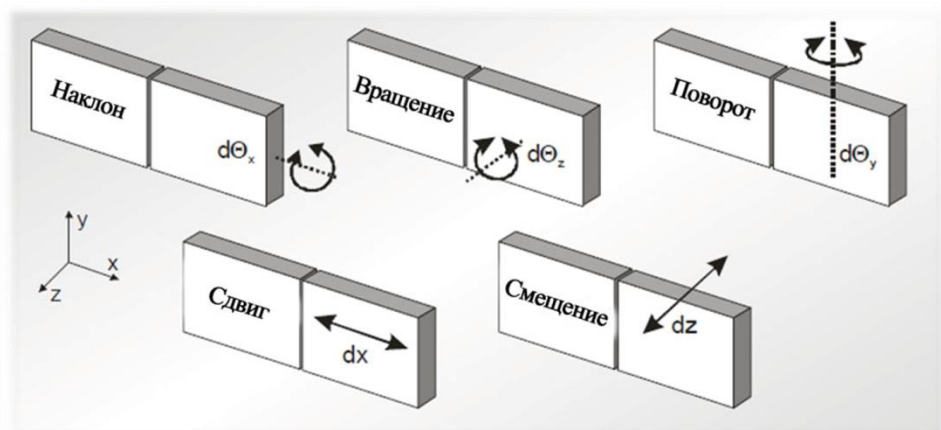


Рис. 6. Вращательные и поступательные степени свободы дифракционной решетки

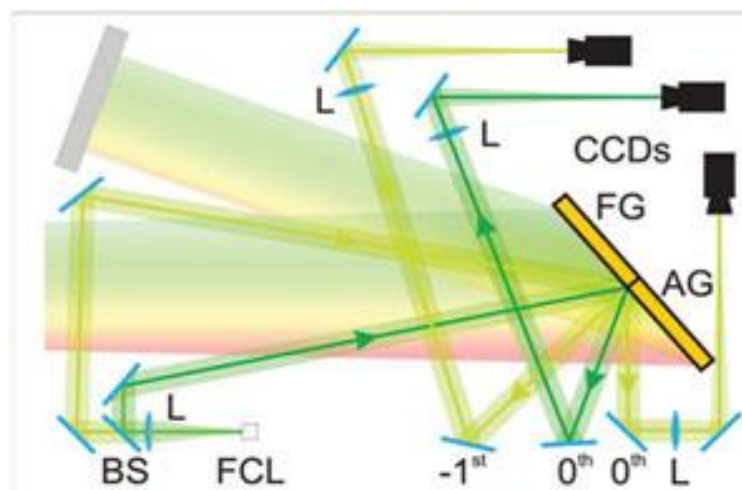


Рис. 7. Схема системы настройки составной решетки лазера POLARIS [5]

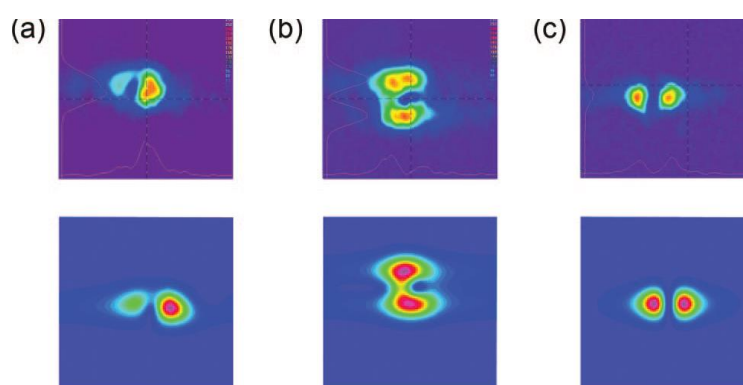


Рис. 8. Экспериментальное (верхний ряд) и расчетное (нижний ряд) распределение лазерного поля в дальней зоне, наблюдаемое при повороте (a), наклоне (b) и смещении одной решетки относительно другой (c).

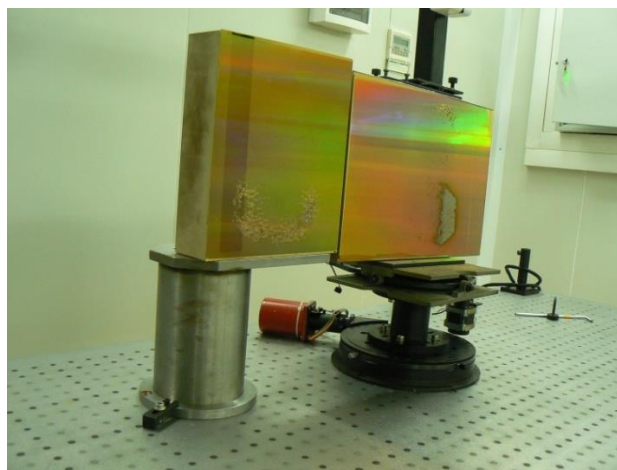


Рис. 9. Неподвижная и подвижная дифракционные решетки, закрепленные на оптическом столе

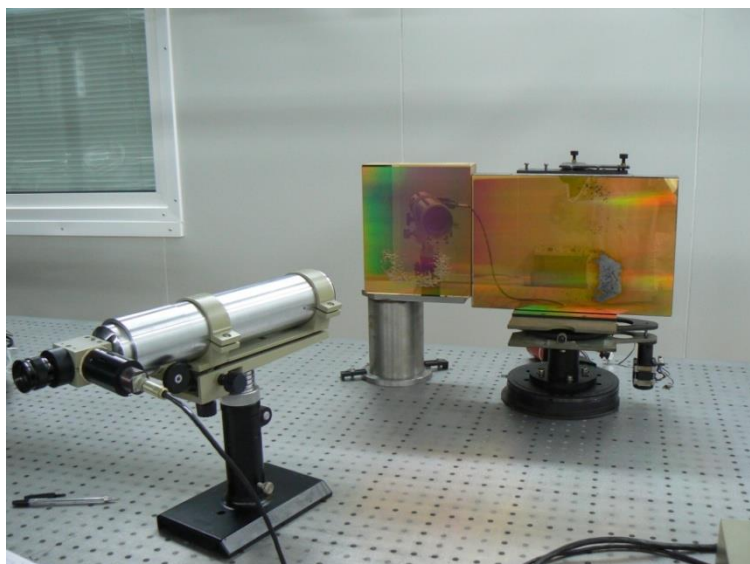


Рис. 10. Эксперимент по настройке дифракционных решеток с помощью автоколлиматора АКТ-15

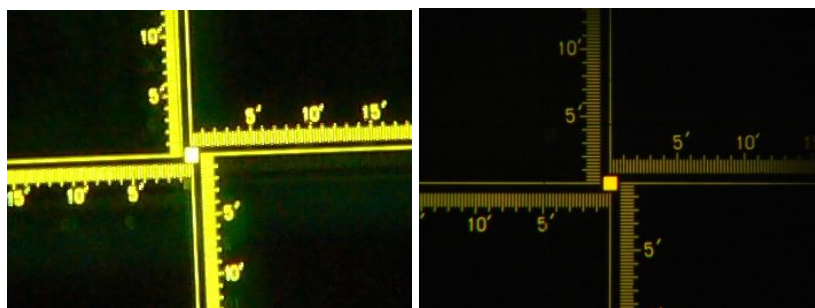


Рис. 11. Настройка резкости изображения автоколлимационной сетки в объективе автоколлиматора

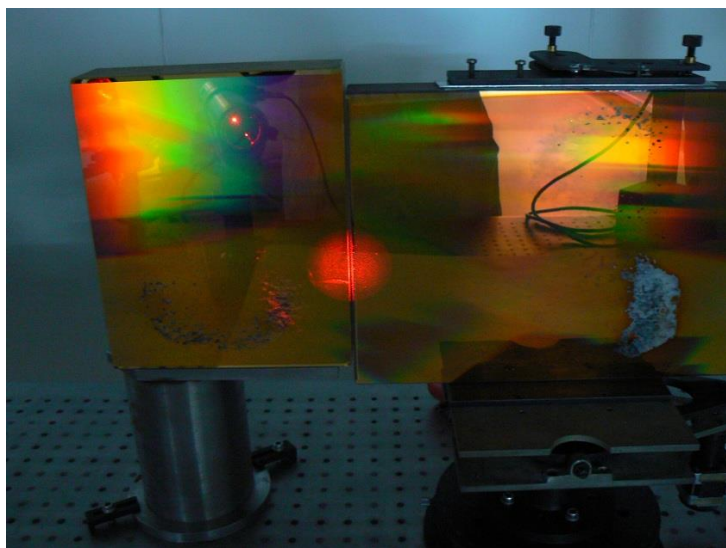


Рис. 12. Положение широкого пучка на двух решетках

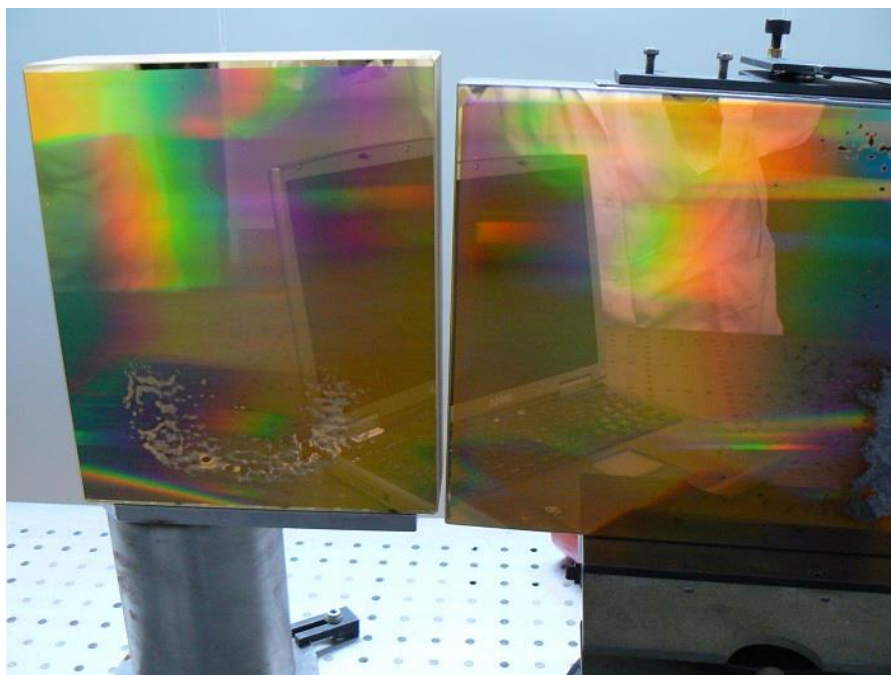


Рис. 13. «Разлом» составной дифракционной решетки

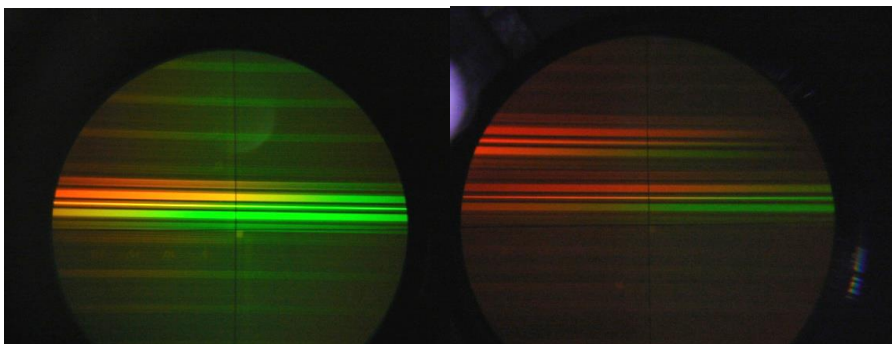


Рис. 14. Изображение автоколлимационной сетки в первом порядке дифракции

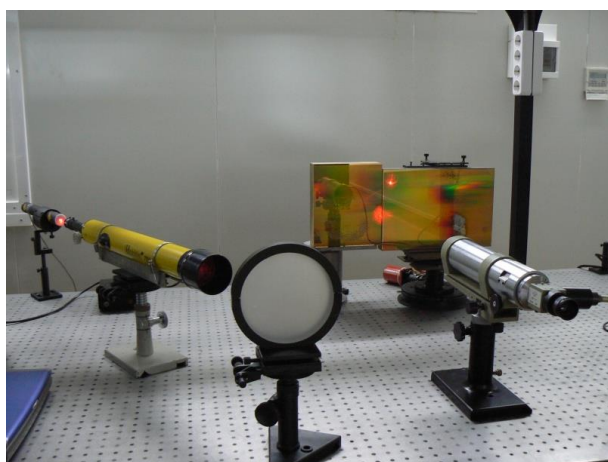


Рис. 15. Эксперимент по настройке дифракционных решеток с помощью коллимированного излучения He-Ne лазера



Рис. 16. Вид отраженного пучка от ненастроенных и настроенных поверхностей дифракционных решеток

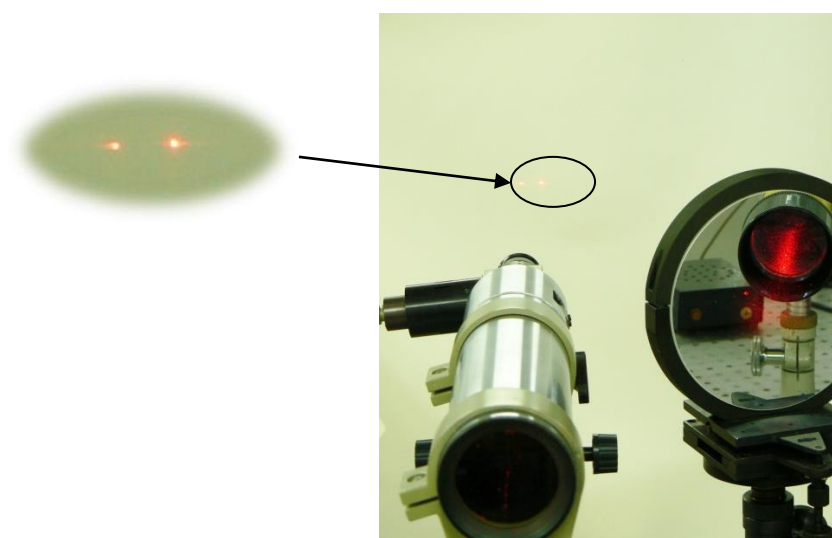


Рис. 17. Изображение отраженного лазерного пучка при настройке дифракционных решеток с помощью коллимированного излучения He-Ne лазера