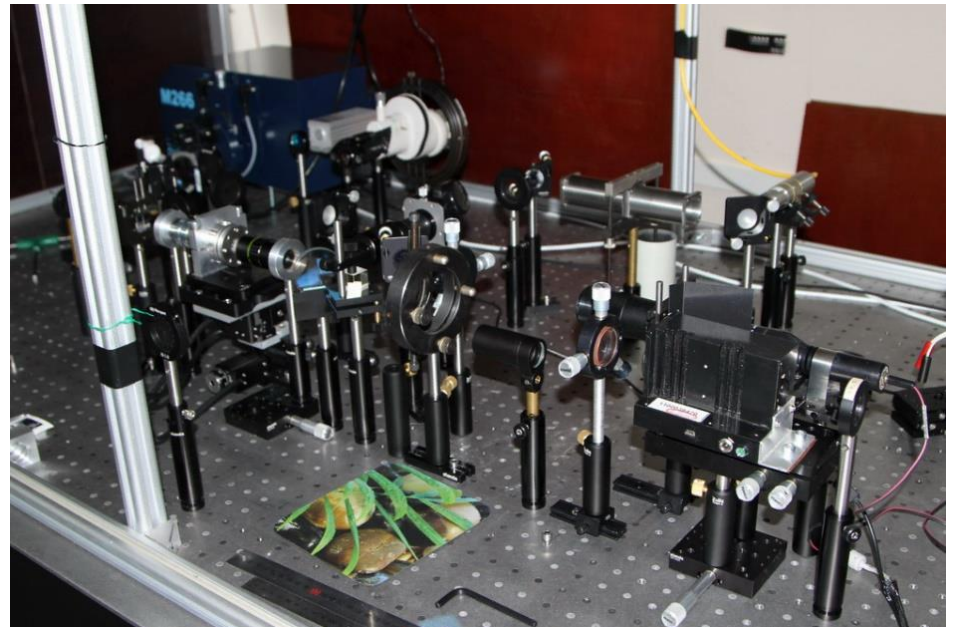


Спектроскопия

•Спектроскопия 03: Основные принципы



Павел В. Зинин

Light: Wavelength and Frequency

Frequency and wavelength of electromagnetic waves

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

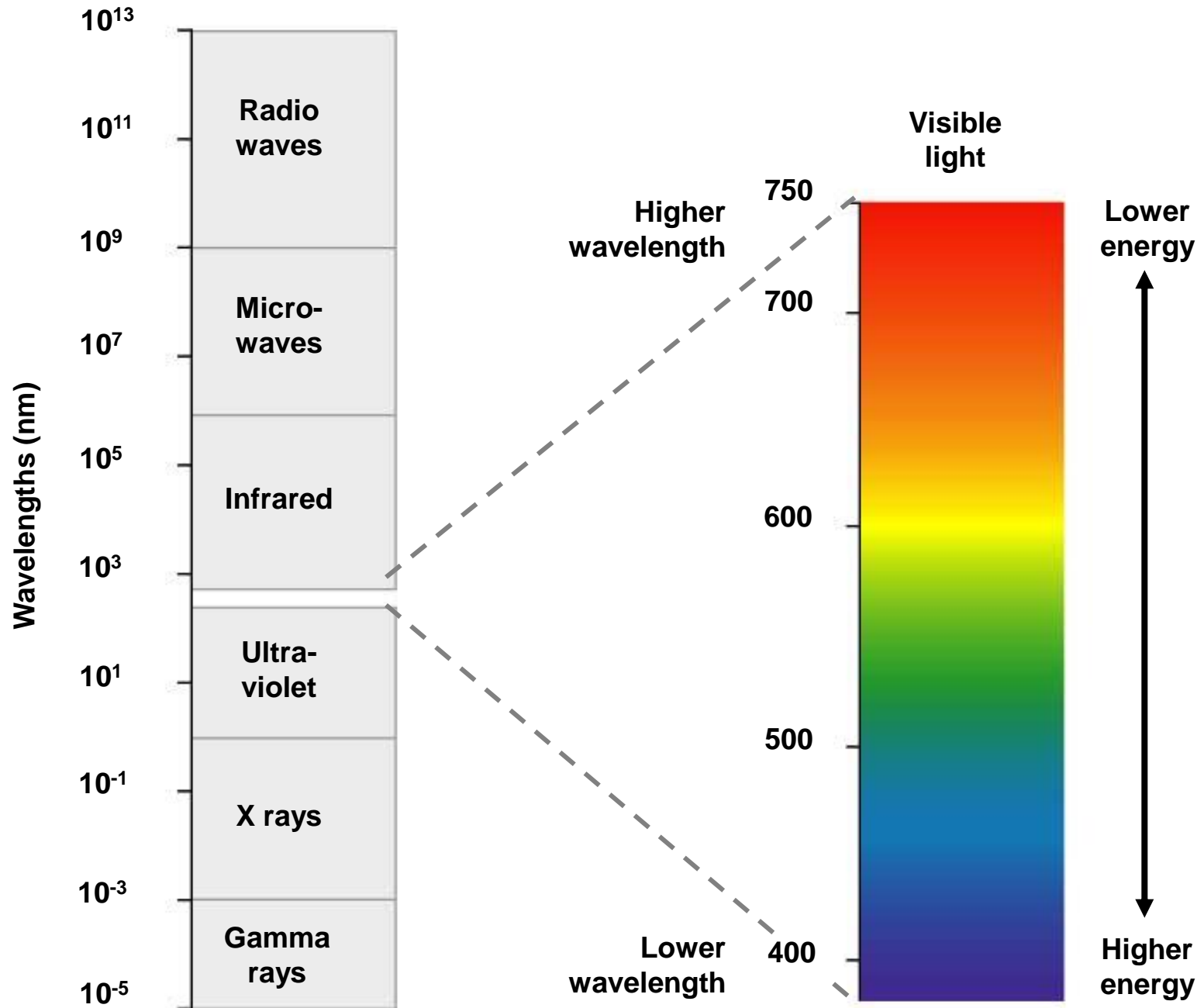
f = frequency of an electromagnetic waves (in Hz)

c = speed of light = 3×10^8 m/s

λ = wavelength of the wave (in meters)

- Examples
 - FM radio, e.g., $f = 96.3 \times 10^6$ Hz (Hawaiian station) $\Rightarrow \lambda = 3.1$ m
 - Visible light, e.g., red 700 nm $\Rightarrow f = 4.3 \times 10^{14}$ Hz

The Visible Light Spectrum



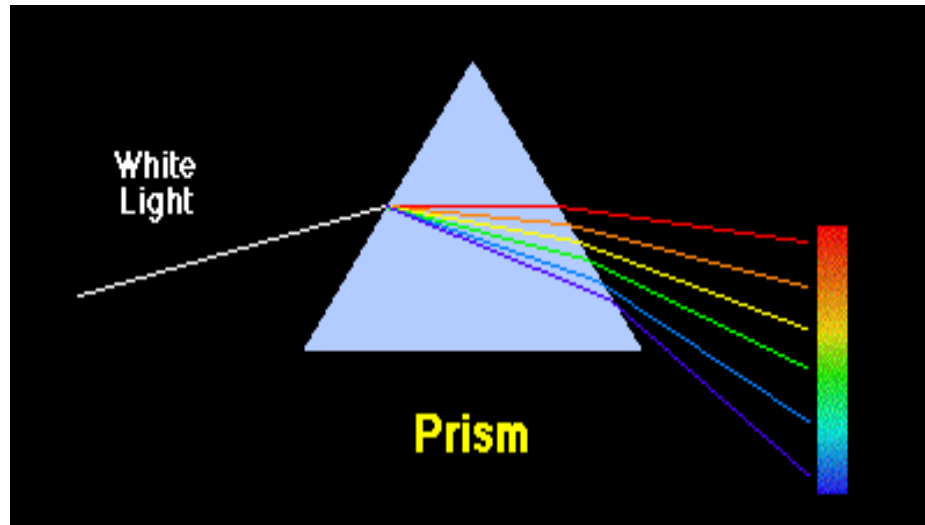
Light Interaction with objects

When a light wave strikes an object, a number of things could happen.

- Absorption: The light wave could be absorbed by the object, in which case its energy is converted to heat.
- Reflection: The light wave could be reflected by the object.
- Refraction. Refraction is the change in direction of a wave due to a change in its speed: direction change of a ray of light passing from one transparent medium to another with different optical density.
- Dispersion: *dispersion* is the phenomenon in which the phase velocity of a wave *depends* on its frequency: separation of light into its constituent wavelengths when entering a transparent medium.
- Diffraction: it is described as the apparent bending of waves around small obstacles and the spreading out of waves past small openings: light rays bend around edges - new wavefronts are generated at sharp edges

Dispersion

In optics, *dispersion* is the phenomenon in which the phase velocity of a wave *depends* on its frequency.



- Electromagnetic waves interact with the charged particles in matter and travel more slowly in transparent media than in a vacuum.
- The change in speed of the light wave causes the wave to refract.
- Since the velocity of an electromagnetic wave in a medium changes with wavelength, the amount of refraction depends on the wavelength.
- This effect is called *dispersion*.

Виды спектроскопии

Спектр (лат. spectrum «видение») в физике — распределение значений физической величины (обычно энергии, частоты или массы). Обычно под спектром подразумевается электромагнитный спектр — распределение интенсивности электромагнитного излучения по частотам или по длинам волн.

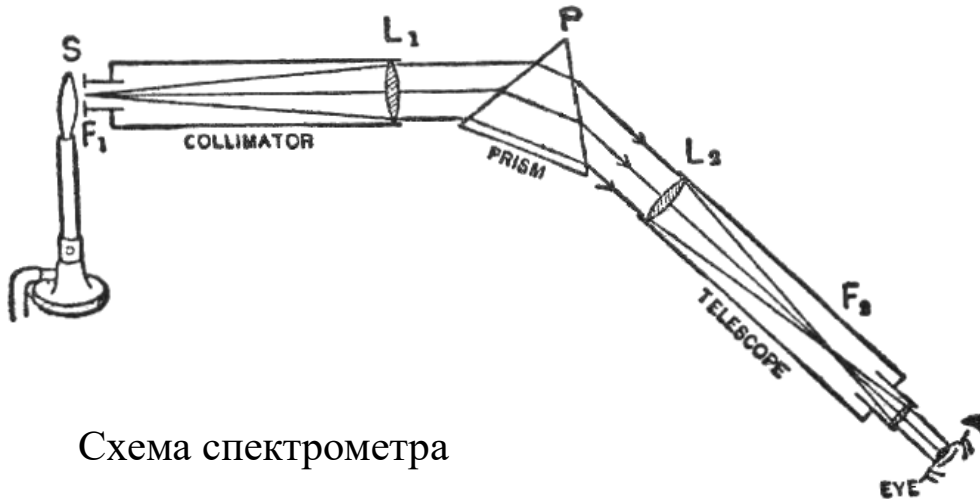
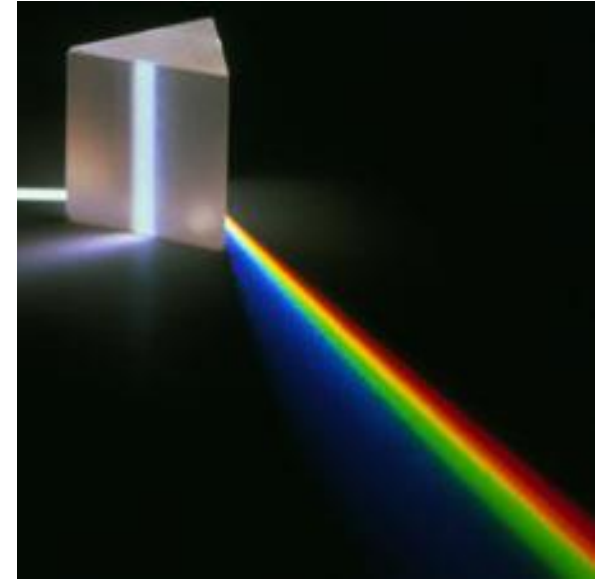


Схема спектрометра

1. **Атомная спектроскопия** изучает энергетические переходы между электронными орбиталями атомов.
2. **Молекулярная спектроскопия** изучает энергетические переходы между электронными, колебательными, вращательными уровнями энергии молекул
- 3.

Открытие спектроскопии

Термин «спектр» (в переводе с латыни spectrum означает изображение в душе) был введен Исааком Ньютоном в 1671—1672 годах для обозначения многоцветной световой полосы, которая была им получена в результате экспериментов по прохождению солнечного луча через стеклянную призму. В 1704 году он опубликовал свой труд «Оптика», в котором изложил результаты опытов с призмой – разложение белого света на отдельные спектральные компоненты.



Рис. 1. Классический опыт И. Ньютона по открытию дисперсии света (1672)

Сэр Исаак Ньютон (1642-1727) экспериментировал с лучом света, который проникал в темную комнату через щель в оконных ставнях. На пути луча света Ньютон поместил стеклянную призму и спроецировал изображение на экран. Он показал, что белый свет состоит из нескольких цветов. Фиолетовый свет преломляется призмой сильнее, а красный слабее. Радугу видели и до него, но он первый правильно описал явление.

СПЕКТРОСКОПИЯ, раздел физики, посвящённый исследованию распределения интенсивности электромагнитного излучения по длинам волн или частотам.

История

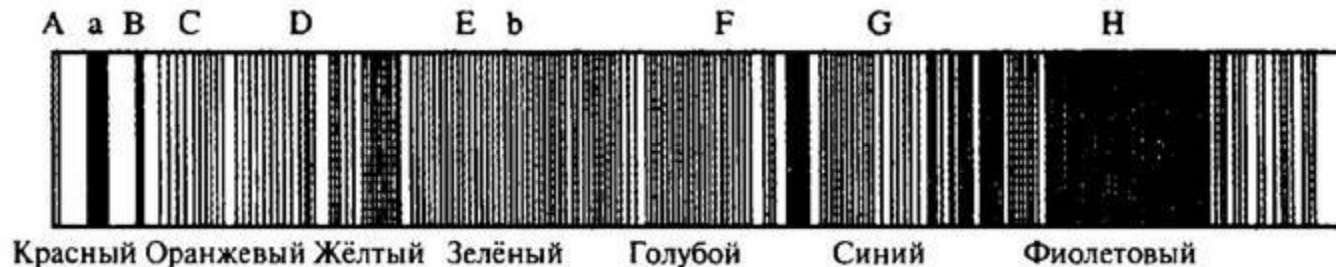
Мы можем сказать, что она возникла в 1802 г. с открытием английским физиком Вильямом Волластоном (1766—1828) присутствия темных линий в спектре солнечного света.

Волластон стал богатым человеком, когда в 1804 г. изобрел процесс получения чистой ковкой платины, пригодной для изготовления сосудов. В 1807 г. Волластон запатентовал особую камеру, в которой призма отражала свет от объекта, который хотели зарисовать, на бумагу и в глаз художника. Тем самым у художника создавалась иллюзия, что изображение уже на бумаге, и он мог просто зарисовать его, обводя контуры. Волластон был другом Томаса Юнга и был приверженцем волновой теории света. В 1802 г. он наблюдал темные линии в спектре Солнца, он не понял их важности и полагал, что они просто естественные контуры цветных линий.

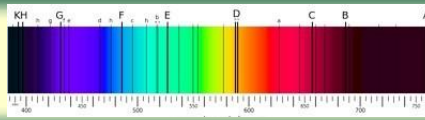
(https://www.e-reading.club/chapter.php/1023415/21/Bertolotti_-_Istoriya_lazera.html).



Вильямом Волластоном

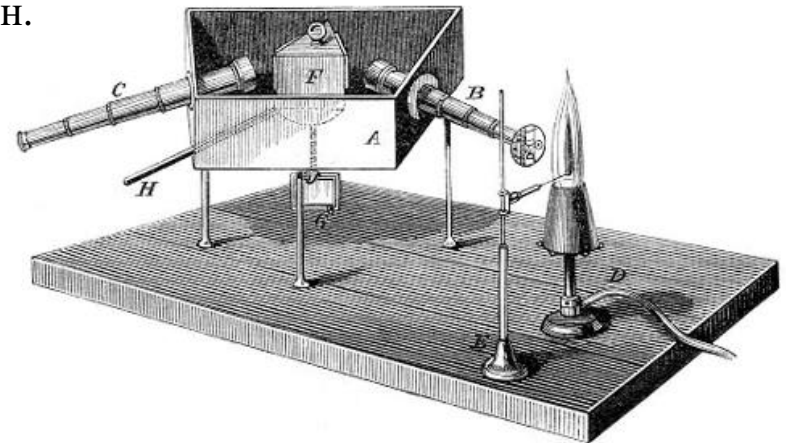


Солнечный спектр с темными линиями Фраунгофера. Некоторые из них снабжены буквами, использованными Фраунгофером.



Йозеф Фраунгофер

Объектом исследований Фраунгофера был солнечный свет. В 1814 г. учёный обнаружил на непрерывном солнечном спектре отчётливые тёмные линии. Такие же линии он увидел и в спектрах Венеры и Сириуса, а также искусственных источников света. Ещё за 12 лет до этого, в 1802 г., эти же линии в солнечном спектре обнаружил английский учёный Уильям Хайд Волластон (Уолластон), изучая солнечный свет с помощью камеры-обскуры. Наиболее интенсивные линии он обозначил латинскими буквами и измерил их длины волн.



Йозеф Фраунгофер считают создателем спектроскопа. Спектроскопическая установка, созданная им, представляла собой щель в ставне, через которую солнечный свет падал на призму. Спектр цветов не проектировался на экран, а попадал в объектив зрительной трубы, установленной за призмой. Таким образом, учёный наблюдал спектр субъективно.

История

Одним из важнейших результатов научной деятельности Роберта Бунзена стала разработка им совместно с Г. Р. Кирхгофом спектрального анализа. В 1859-60 они обнаружили, что излучение жидких или твердых тел, раскаленных добела, или газов, находящихся под большим давлением, разлагается призмой на сплошной спектр и что каждый элемент излучает характерный для него спектр. В 1860 они создали первый спектроскоп, с помощью которого относительно простым способом можно было установить спектр любого элемента. Этот прибор оказался превосходным инструментом для определения очень малых (следовых) количеств различных веществ. Они установили, что желтая линия натрия и D-линия солнечного света имеют одинаковую длину волны, обнаружили совпадение 70 линий солнечного спектра и спектральных линий химических элементов. Использование спектрального анализа позволило значительно увеличить число известных элементов.

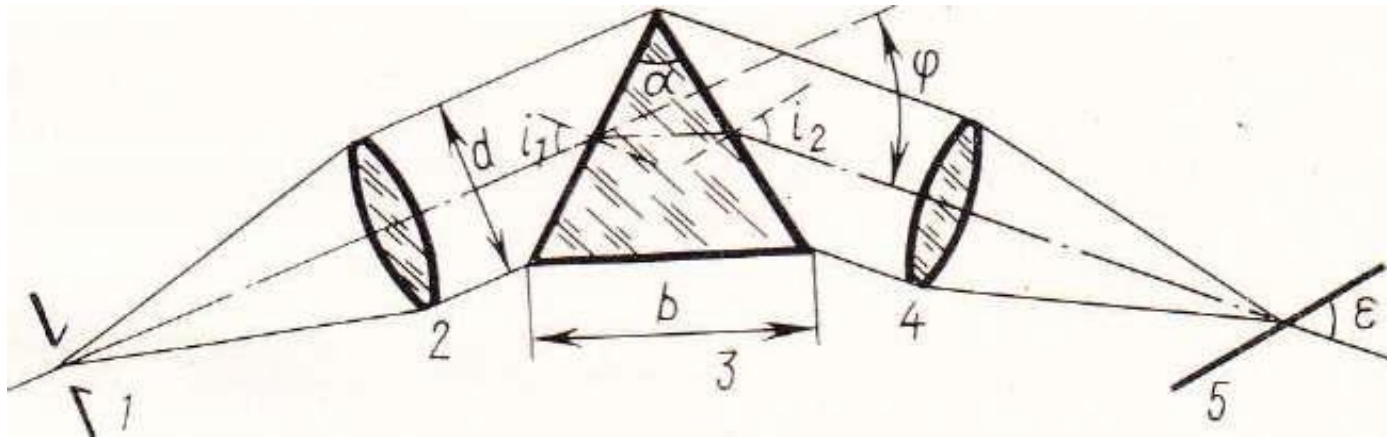


Роберт Вильгельм Бунзен



Кирхгоф

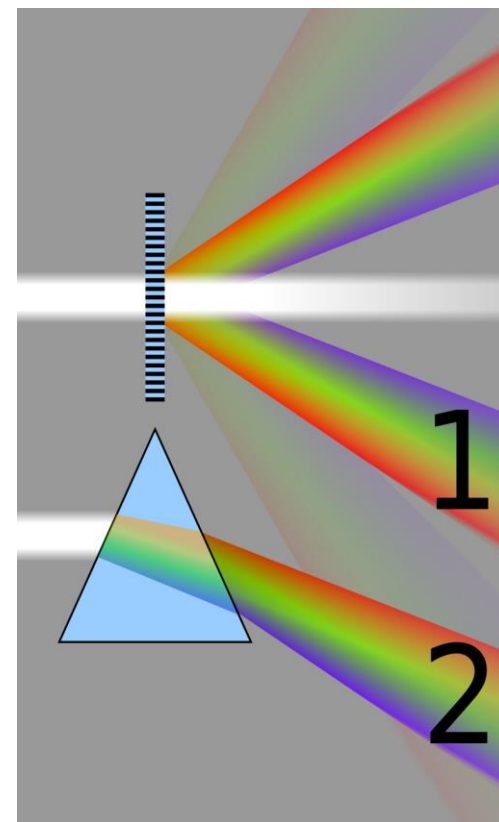
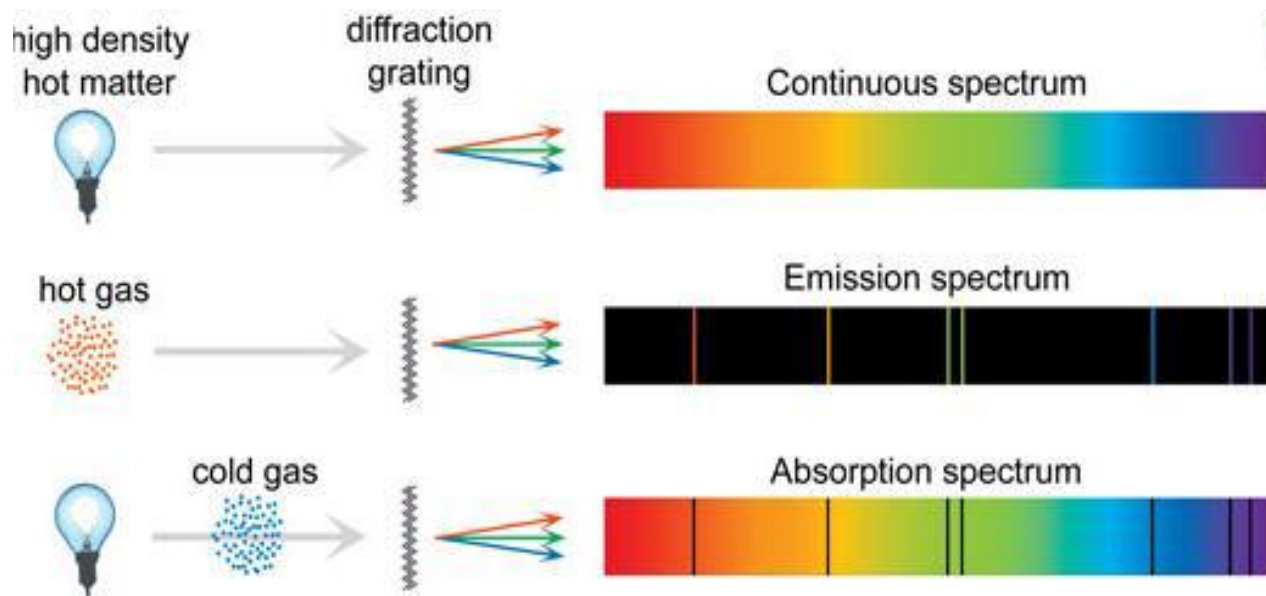
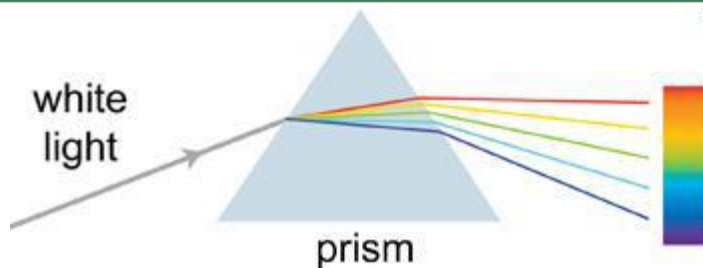
Схема призмного спектрографа



Спектрограф имеет три основные части: коллиматор, состоящий из объектива 2 с фокусным расстоянием f_L и щели 1, установленной в его фокусе, диспергирующую систему 3, состоящую из одной или нескольких преломляющих призм, и фотографическую камеру, состоящую из объектива 4 с фокусным расстоянием f_2 и фотопластинки 5, расположенной в его фокальной плоскости. В настоящее время камера заменяется на ССВ детектор. Показатель преломления материала призмы неодинаков для различных длин волн: $n = n(V)$. Поэтому неоднородный по спектральному составу параллельный пучок лучей, формируемый коллиматором и падающий на призму, разделяется в ней на монохроматические пучки.

Малышев Введение в экспериментальную спектроскопию.

Техника спектроскопии

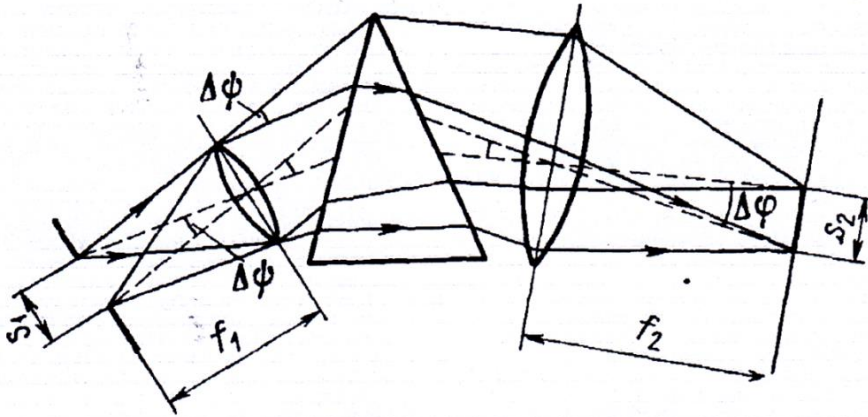


И.А. Попов. Физические методы исследования. Физтех.

Длинные волны (красный) дифрагируют больше, но преломляются меньше, чем более короткие волны (фиолетовые).

Сравнение спектров, полученных из дифракционной решетки методом дифракции (1), и призмы методом рефракции (2) (Wikipedia 2019).

Щель



Оптическое разрешение и пропускная способность спектрометра полностью зависят от параметров щели. Свет попадает внутрь спектрометра через оптическое волокно или линзу, сфокусированную на учетом настройки щели. От щели зависит угол расходимости попадающего внутрь света.

Щели могут иметь разную ширину – от 5мкм до 800мкм и более, высота щели составляет 1 мм (стандартно) – 2мм. Выбор размера входной щели – важный вопрос, так как она настраивается и устанавливается в спектрометре только квалифицированным специалистом.

В основном в спектрометрах применяются щели шириной 10, 25, 50, 100, 200 мкм и т.д. В системах, в которых применяются оптические волокна для подачи светового пучка, размер пакета волокон совпадает с размером входной щели. Обычно это снижает рассеяние света и повышает пропускную способность прибора.

Изображение входной щели

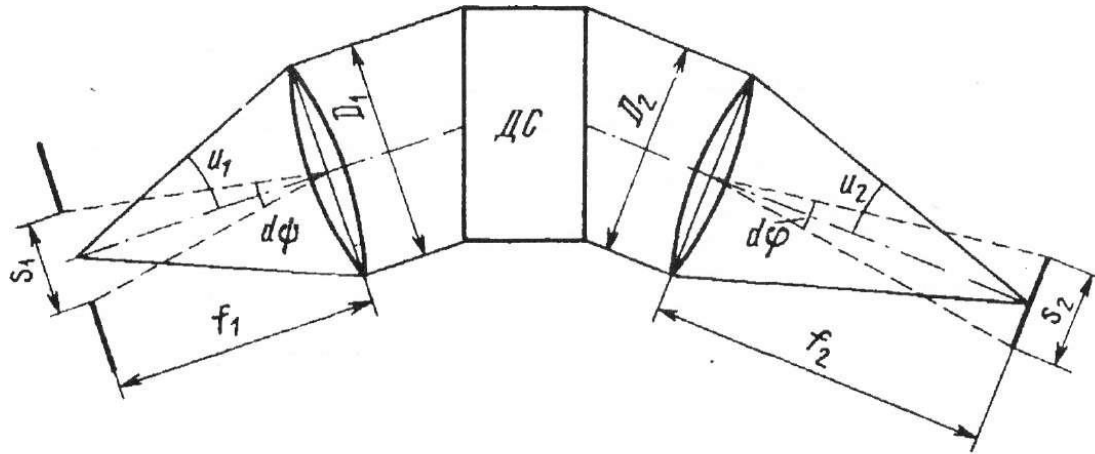


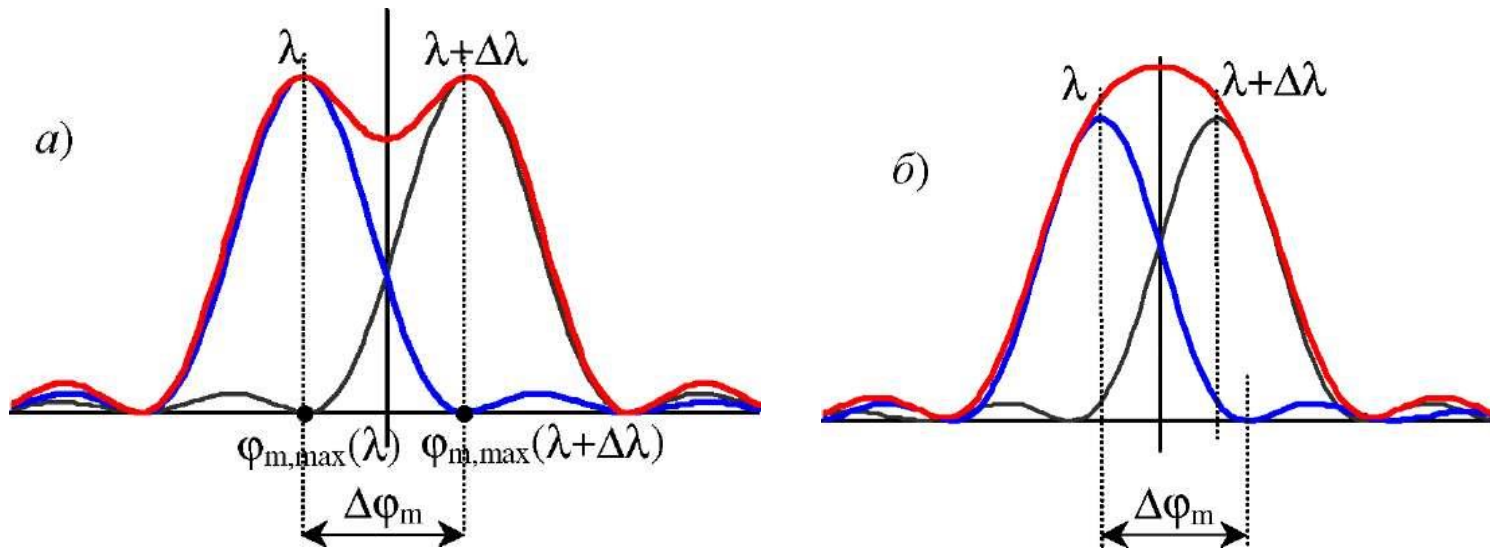
Рис. 1.7. Ход лучей в плоскости дисперсии.

При рассмотрении образования изображения щели в спектральном приборе в случае лучей, лежащих в плоскости дисперсии и в перпендикулярной к ней плоскости. Для показанного на хода лучей имеем

$$\frac{s_2}{s_1} = \frac{f_2}{f_1} \frac{D_2}{D_1}$$

Разрешающая способность призмы

При получении линейчатого спектра с помощью спектроскопа или спектрографа диспергирующая система (призма или дифракционная решетка) образует изображения щели, соответствующие каждой монохроматической спектральной линии. Близкие спектральные линии дают изображения щели с малым угловым расстоянием между ними. Разрешающая сила спектрального прибора определяется как отношение $\lambda/\delta\lambda$, где λ и $(\lambda + \Delta\lambda)$ — длины волн спектральных линий, которые еще можно разрешить.



Зайдель, А.Н., Г.В. Островская, Ю.И. Островский, *Техника и практика спектроскопии*. 1978.
МГУ. Лабораторный практикум по физике. Изучение дифракционной решетки. Москва. 2011

Разрешающая способность призмы

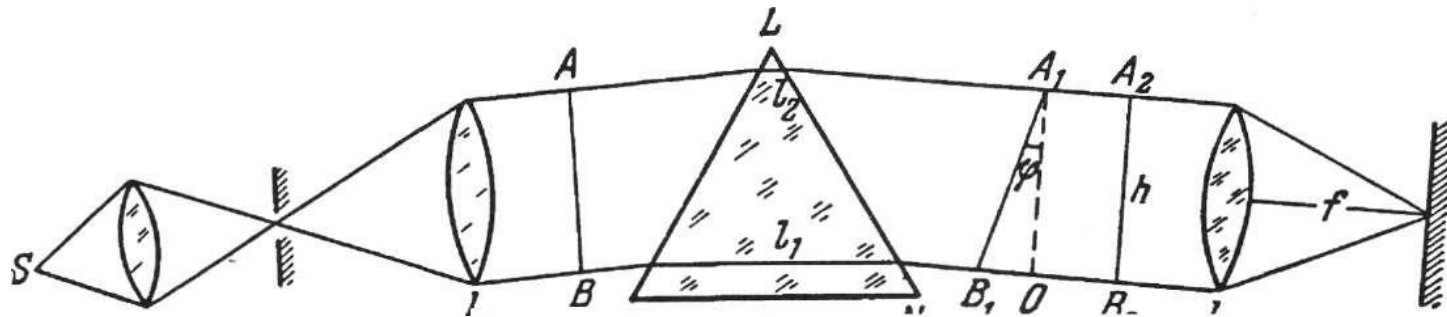


Схема призмного спектрографа

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = (l_1 - l_2) \frac{dn}{d\lambda}$$

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = l_1 \frac{dn}{d\lambda}, \quad \text{if } l_2 = 0$$

Так, для стекла ТФ-5 для синей части спектра $dn/d\lambda = 3200 \text{ см}^{-1}$, и для красной - $dn/d\lambda = 1170 \text{ см}^{-1}$. Приняв это значение, получаем для призмы с базой в 5 см разрешающую способность в красной части ~ 5000 , в синей ~ 15000 .

Пример: Для разрешения двух D - линий натрия, расстояние между которыми 6 \AA , нужна разрешающая сила $R = 6000/6 = 1000$, т. е. для этого достаточна призма из стекла ТФ-5 с основанием $\sim 1 \text{ см}$

Дифракционная решетка

Дифракционная решетка формирует спектр длин волн света и частично влияет на оптическое разрешение спектрометра. Правильный выбор дифракционной решетки является важным фактором для получения требуемых характеристик спектра при решении задач. От решетки зависит оптическое разрешение и эффективность распределения в спектре. Она имеет два параметра: частота штрихов решетки и угол блеска, о которых пойдет речь в данном разделе.

Применяются дифракционные решетки двух типов: нарезные и голографические решетки. Нарезные решетки состоят из большого количества параллельных штрихов, выполненных на поверхности, на которую наносится зеркальное покрытие. Голографические решетки создаются в результате интерференции двух УФ лазерных пучков (параллельных или непараллельных) на светочувствительном слое. Они отличаются стабильными спектральными характеристиками, но имеют более низкую эффективность.

<https://www.czl.ru/tgroups/the-principle-of-the-spectrometer/>

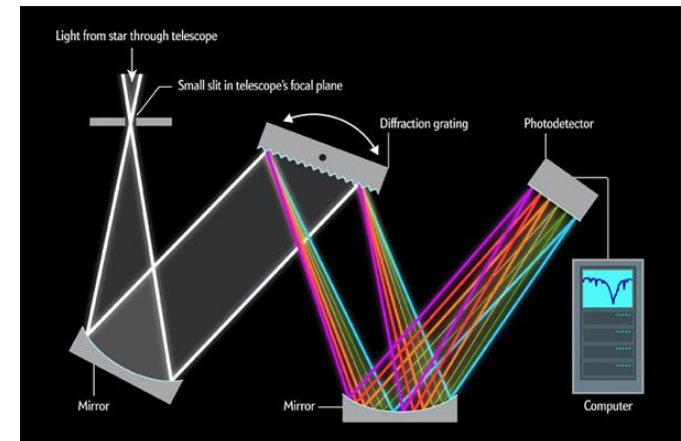
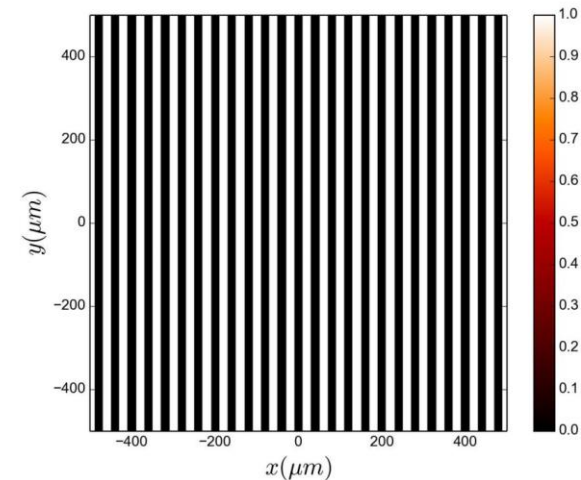


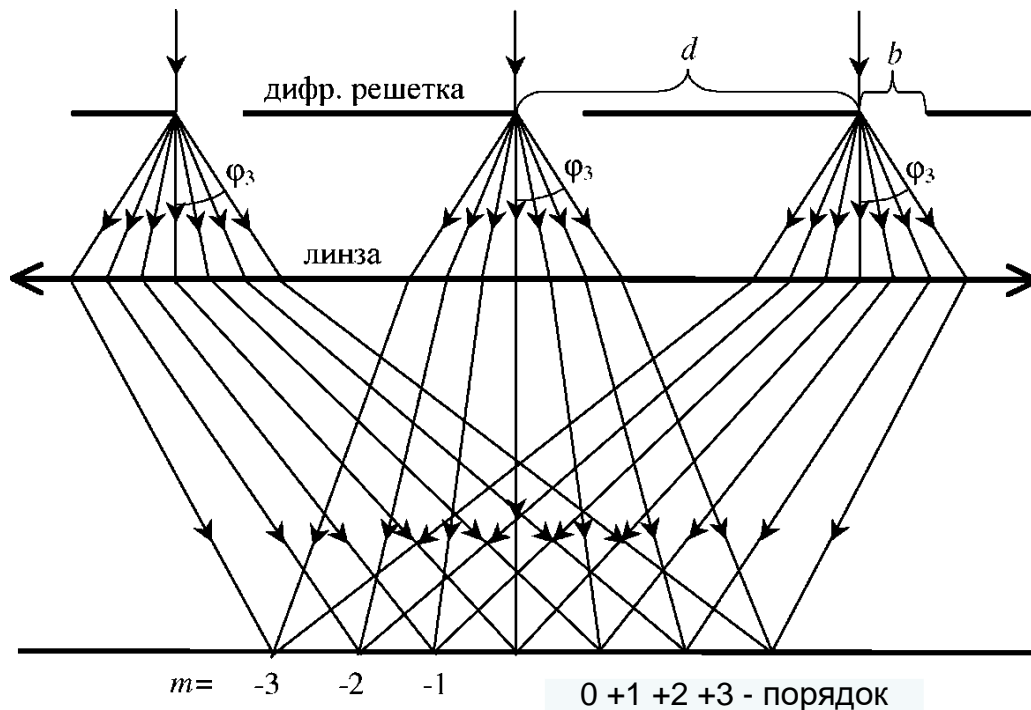
Схема спектрометра с дифракционной решеткой (www.emaze.com).

Дифракционная решетка

Дифракционная решетка формирует спектр длин волн света и частично влияет на оптическое разрешение спектрометра. Правильный выбор дифракционной решетки является важным фактором для получения требуемых характеристик спектра при решении задач. От решетки зависит оптическое разрешение и эффективность распределения в спектре. Она имеет два параметра: частота штрихов решетки и угол блеска, о которых пойдет речь в данном разделе. Применяются дифракционные решетки двух типов: нарезные и голографические решетки. Нарезные решетки состоят из большого количества параллельных штрихов, выполненных на поверхности, на которую наносится зеркальное покрытие. Голографические решетки создаются в результате интерференции двух УФ лазерных пучков (параллельных или непараллельных) на светочувствительном слое. Они отличаются стабильными спектральными характеристиками, но имеют более низкую эффективность.

Нарезные решетки – наиболее простые и недорогие материалы в производстве, но они довольно сильно рассеивают свет. Это происходит из-за неточности изготовления штрихов и частоты их нанесения. Поэтому в спектроскопии (например, УФ спектроскопии) детектор работает хуже и оптические характеристики получаются ниже. В подобном случае голографические решетки позволяют снизить эффект рассеяния света и повысить выходные характеристики спектрометра. Другим преимуществом голографической решетки является возможность простого ее создания на криволинейных поверхностях, это позволяет одновременно использовать решетку в качестве рассеивающего и фокусирующего элемента.

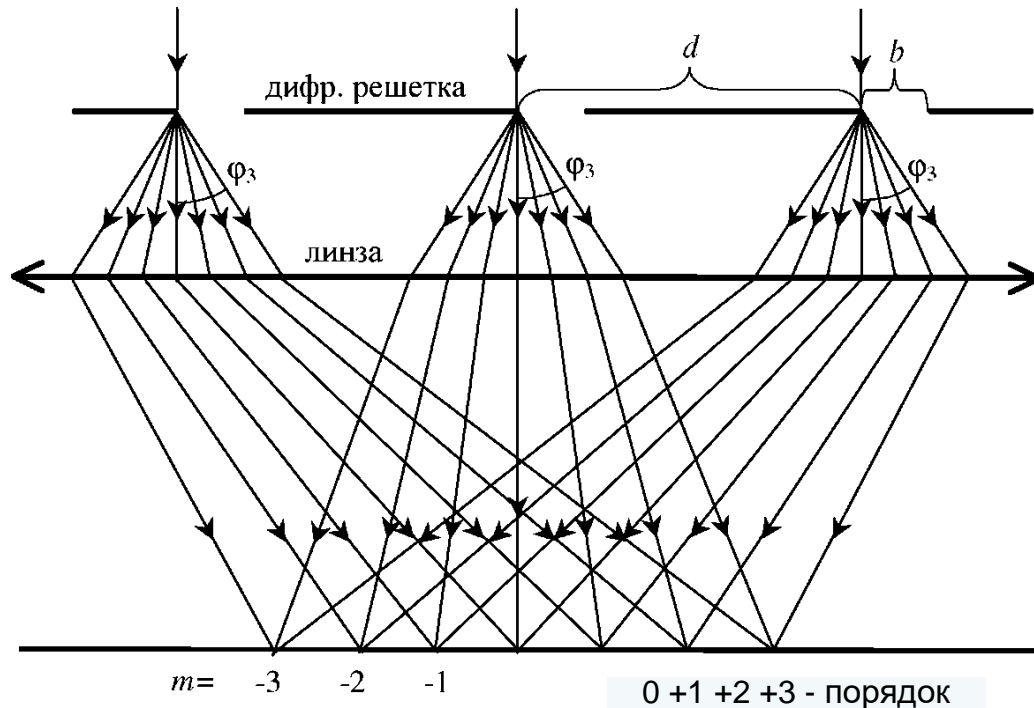
Дифракционная решетка



Формирование дифракционной картины в фокальной плоскости линзы

В плоской решетке прозрачные участки (щели) одной и той же ширины b чередуются с непрозрачными участками, также одинаковыми по ширине. Суммарную ширину прозрачного и непрозрачного участков называют *периодом* (или *постоянной*) *решетки* и обозначают d ($d > b$). Если за дифракционной решеткой поместить собирающую линзу, то в каждой точке фокальной плоскости соберутся лучи, испускаемые вторичными источниками под одним и тем же углом φ к нормали, называемым *углом*. N - общее числа штрихов решетки.

Дифракционная решетка



Формирование дифракционной картины в фокальной плоскости линзы

Расчеты показывают, что интенсивность дифракционной картины, наблюдаемой в фокальной плоскости линзы, в зависимости от угла дифракции задается формулой:

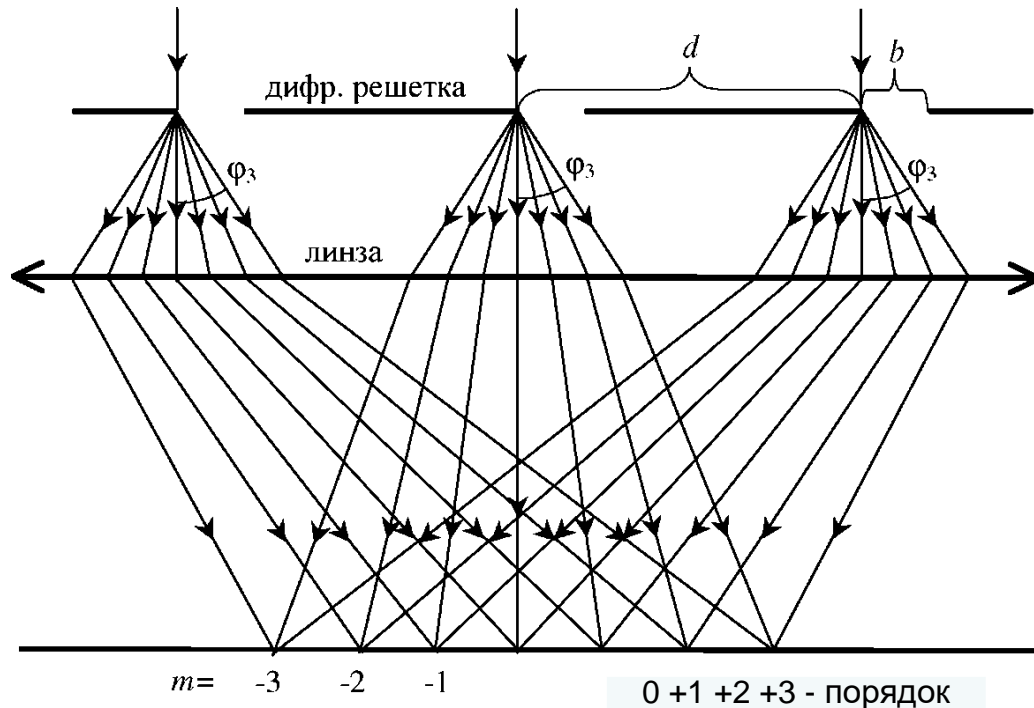
$$I(\varphi) = I_0 \left(\frac{\sin u}{u} \right)^2 \left(\frac{\sin N\delta}{\sin \delta} \right)^2$$

$$u = \pi \frac{b \sin \varphi}{\lambda}$$

$$\delta = \pi \frac{d \sin \varphi}{\lambda}$$

Формулу можно представить как произведение двух сомножителей: (а) *дифракционного* $I(\varphi) = I_0 \left(\frac{\sin u}{u} \right)^2$ описывающего дифракцию на одной щели шириной b , и (б) *интерференционного* $I(\varphi) = \left(\frac{\sin N\delta}{\sin \delta} \right)^2$, описывающего интерференцию N когерентных пучков, идущих от щелей решетки. N - общее числа штрихов решетки.

Дифракционная решетка



Формирование дифракционной картины в фокальной плоскости линзы

Расчеты показывают, что интенсивность дифракционной картины, наблюдаемой в фокальной плоскости линзы, в зависимости от угла дифракции задается формулой:

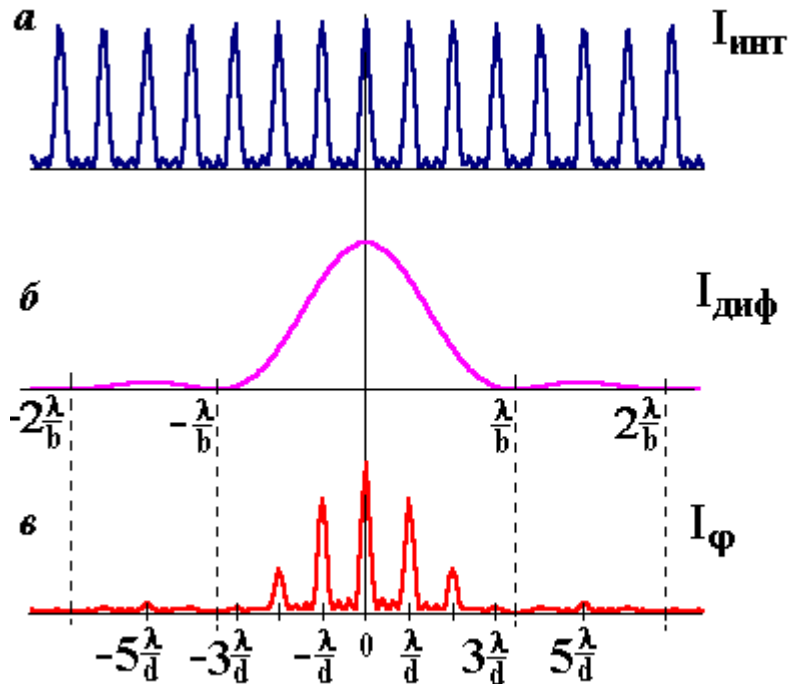
$$I(\varphi) = I_0 \left(\frac{\sin u}{u} \right)^2 \left(\frac{\sin N\delta}{\sin \delta} \right)^2$$

$$u = \pi \frac{b \sin \varphi}{\lambda}$$

$$\delta = \pi \frac{d \sin \varphi}{\lambda}$$

Формулу можно представить как произведение двух сомножителей: (а) *дифракционного* $I(\varphi) = I_0 \left(\frac{\sin u}{u} \right)^2$ описывающего дифракцию на одной щели шириной b , и (б) *интерференционного* $I(\varphi) = \left(\frac{\sin N\delta}{\sin \delta} \right)^2$, описывающего интерференцию N когерентных пучков, идущих от щелей решетки. N - общее числа штрихов решетки.

Дифракционная решетка



Дифракция Фраунгофера на четырех щелях: *а* — интерференционный множитель (3), *б* — дифракционный множитель (2), *в* — общий вид дифракционной картины (1).

Местоположение главных дифракционных максимумов, соответствующих максимальным значениям $I_{\text{инт}}(\varphi)$, определяется из условия:

$$\delta = \pi m,$$

или

$$d \sin \varphi = m\lambda, \quad (1)$$

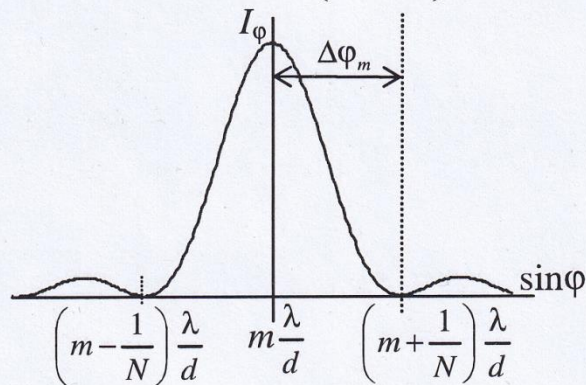
Между главными максимумами находятся $N-2$ дополнительных максимумов существенно меньшей интенсивности

При выполнении условия (1) интерференционный множитель $I_{\text{инт}}(\varphi)$ стремится к N^2 . Современные дифракционные решетки характеризуются большим числом щелей (или штрихов): до тысячи и более штрихов на один миллиметр ширины решетки. Поэтому при освещении решетки монохроматическим светом дифракционная картина представляет собой набор ярких максимумов, местоположения которых удовлетворяют уравнению (1).

Дифракционная решетка

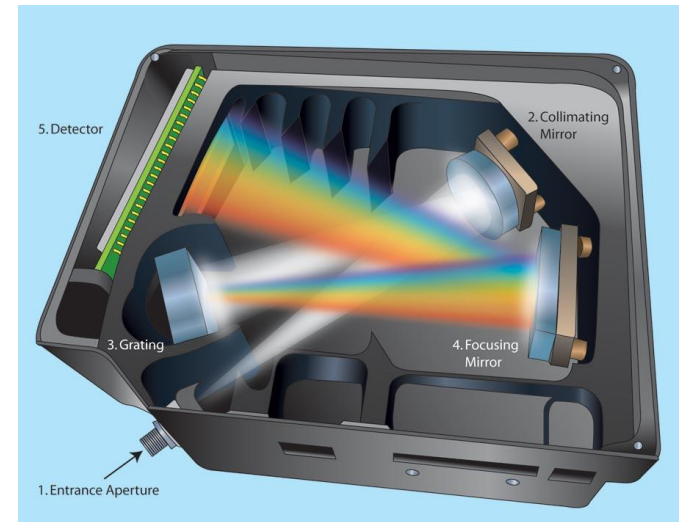
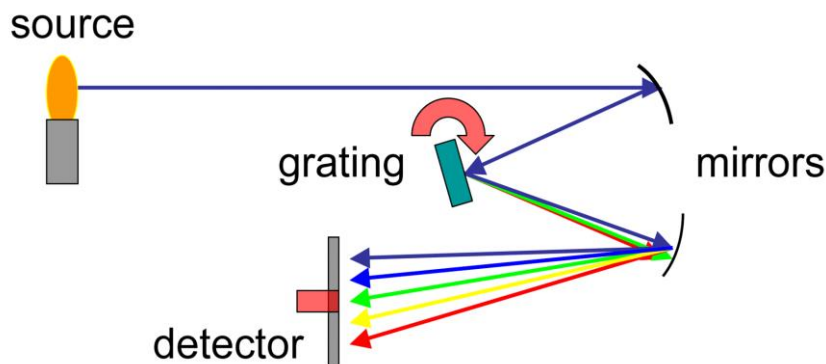
Одной из важных характеристик дифракционной картины является угловая ширина $\Delta\varphi_m$ дифракционного максимума m -го порядка, т.е. угол между направлениями на максимум и на ближайший к нему минимум. Нетрудно заметить, что ближайшие к главному максимуму минимумы определяются из соотношения

$$d \cdot \sin \varphi_{m,\min} = \left(m \pm \frac{1}{N}\right) \lambda.$$



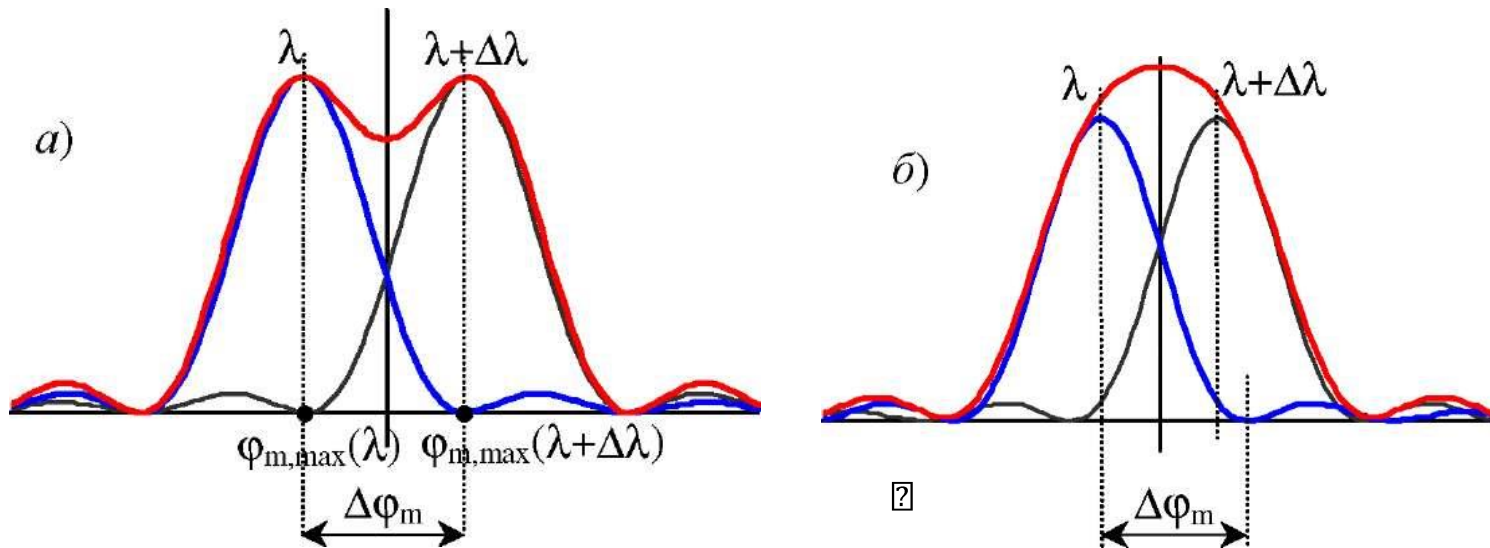
$$\Delta\varphi_m = \frac{\lambda}{Nd \cos\varphi_m} = \frac{\lambda}{L \cos\varphi_m}$$

где $L = Nd$ - ширина дифракционной решетки.



Разрешающая способность дифракционной решетки

При получении линейчатого спектра с помощью спектроскопа или спектрографа диспергирующая система (призма или дифракционная решетка) образует изображения щели, соответствующие каждой монохроматической спектральной линии. Близкие спектральные линии дают изображения щели с малым угловым расстоянием между ними. Разрешающая сила спектрального прибора определяется как отношение $\lambda/\delta\lambda$, где λ и $(\lambda + \Delta\lambda)$ — длины волн спектральных линий, которые еще можно разрешить.



$$R = mN = \frac{L \sin \theta}{\lambda}$$

Высокая разрешающая способность дифракционной решетки создается за счет большого числа штрихов N , так как порядок дифракции m мал (обычно спектральные приборы работают в первом порядке дифракции).

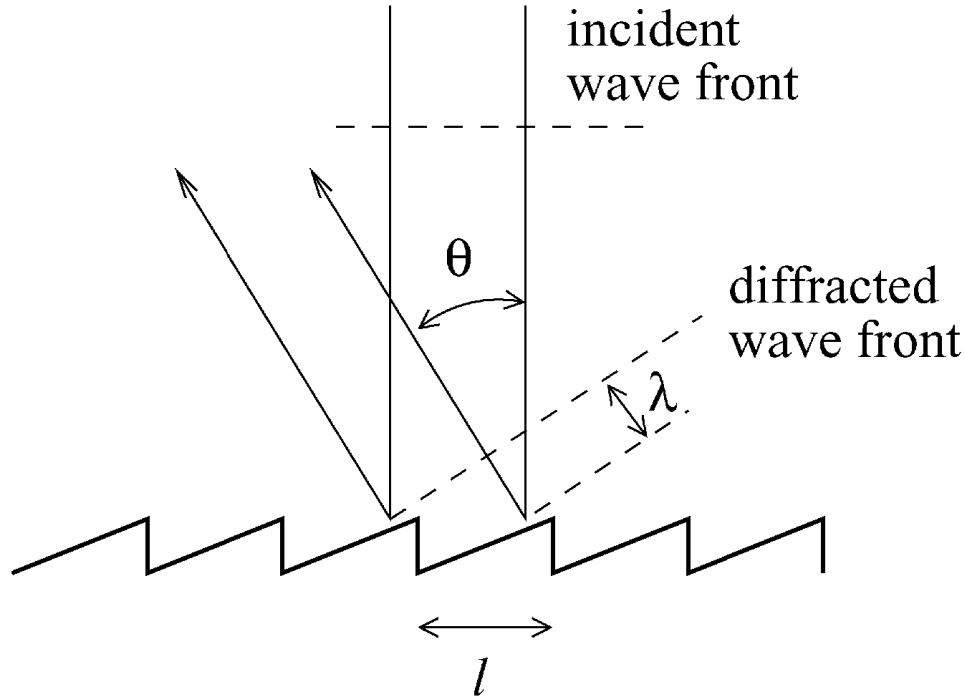
Частота штрихов решетки

Величина дисперсии зависит от количества штрихов, нанесенных в мм поверхности решетки. В основном этот параметр называют плотностью решетки или частотой (периодом). От частоты решетки зависит рабочий диапазон спектрометра и спектральное разрешение. Диапазон длин волн спектрометра обратно пропорционален дисперсии решетки благодаря фиксированной геометрии. Чем шире дисперсия, тем выше разрешение спектрометра. И, наоборот, более низкая частота решетки приводит к падению дисперсии и увеличению диапазона длин волн в ущерб его спектральному разрешению.

Например, спектрометр с частотой решетки 900 штр/мм имеет диапазон измерения длин волн, равный 370 нм, и оптическое разрешение (точность) менее 0,5 нм. Если выбран спектрометр с решеткой 600 штр/мм, его диапазон измерения длин волн составит 700 нм, а оптическое разрешение (точность) менее 1,0 нм. То есть с ростом диапазона волнового измерения снижается оптическая точность спектрометра.

Если требуется измерять широкий диапазон длин волн, т.е. $\lambda_{\max} > 2\lambda_{\min}$, оптические сигналы разных дифракционных порядков могут накладываться друг на друга на пластине детектора. Это становится очевидным, если посмотреть на уравнение для дифракционной решетки. В подобном случае для устранения нежелательного наложения сигналов, то есть для «сортировки по порядку», требуется линейный переменный фильтр (LVF).

Дифракционная решетка



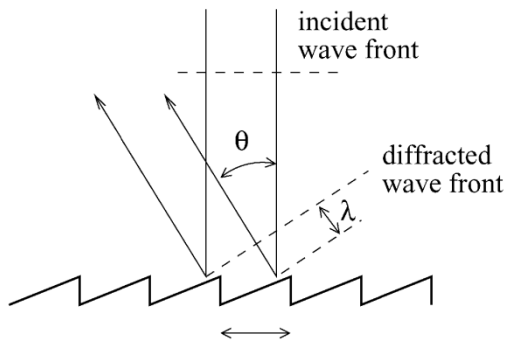
Дифракционная решетка с периодом l . Угол θ дифракции первого порядка появляется, когда задержка между отражениями от соседних канавок равна одной длине волны, λ .

Для простоты рассмотрим нормальное падение света. Условие максимума дифракции отраженного света записывается в виде:

$$\sin\theta = \frac{m\lambda}{l}$$

где l - период решетки, а m -целое число (1,2, ...), называемое дифракционным порядком. Т.к. $\sin\theta < 1$, то $\frac{m\lambda}{l}$. Это означает, что максимальное значение порядка дифракции $m < \frac{l}{\lambda}$.

Дифракционная решетка



В аппроксимации дальнего поля разрешение длины волны определяется двумя факторами: дивергенцией длины волны из-за дифракции, заданной уравнением (2) и дифракционной расходимости из-за ограниченного размера волнового фронта. Угловое разрешение - $\Delta\theta \sim \lambda/(L\cos\theta)$, где L - длина освещенной области (i. e. размер волновой фронт.) Уравнение (2) дает

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = \frac{mL}{l}.$$

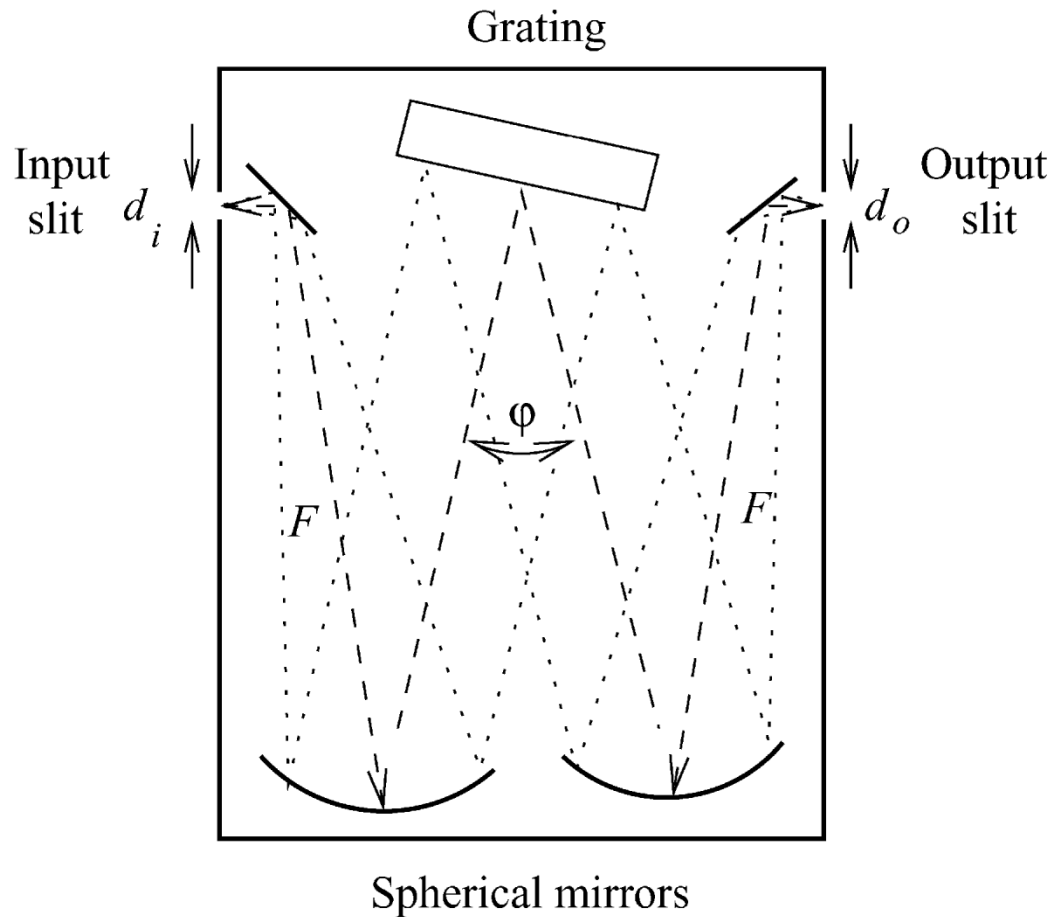
Угол дифракции можно также выразить в терминах числа штрихов решетки g , приходящихся на 1 мм решётки, то период решётки находят по формуле: $l = 1/g$.

Номер штрихов решетки, g , можно найти в спецификации решетки. Оно измеряется в количестве канавок на миллиметр, i. e. mm^{-1} .

$$\sin\theta = m\lambda g \quad (2)$$

Для того, чтобы улучшить разрешение можно увеличить освещенной области L , используя большие решетки, или использовать более высокие порядок дифракции. Типичное число штрихов решетки g , используемое в видимом-ультрафиолетовом диапазоне $g = 1200 \text{ mm}^{-1}$, которое соответствует периоду решетки $l = g^{-1} \sim 0.8 \text{ }\mu$. Такие решетки работают в первом порядок дифракции. Если размер решетки $L = 5 \text{ см}$, то наилучший возможный спектр разрешение решетки при $\lambda = 500 \text{ нм}$ равно $\Delta\lambda = \lambda l/L = 0.008 \text{ нм}$.

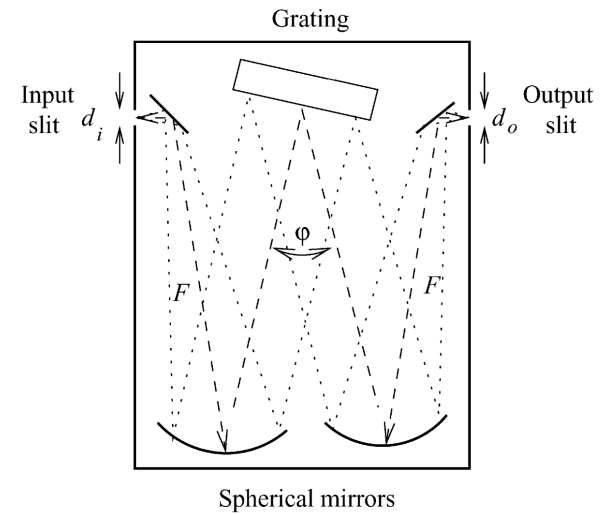
Монохроматор



Оптическая схема монохроматора, d_i и d_o - размеры входных и выходных щелей, соответственно, F - фокусное расстояние зеркал, а φ - угол между падающим и дифрагированным лучами.

Монохроматор

Монохроматор оптический прибор который работает как узкополосный фильтр. Типовая оптическая схема монохроматора представлен на рис. Входящий свет пересекает входную щель размера d_i , а затем луч света собирается сферическим зеркалом с фокусного расстояния F , помещенным на расстоянии F от входа щель. После зеркала формируется плоский волновой фронт, направленный на решетку. Дифрагированный свет собирается вторым зеркалом и фокусируется на выходной щели размера d_o .



$$l(\sin\alpha + \sin(\varphi + \alpha)) = m\lambda$$

где α - угол падения света на решетку и φ - угол между падающим и дифрагированным лучами (этот угол фиксируется геометрией прибора).

$$(\sin\alpha + \sin(\varphi + \alpha)) = m\lambda g$$

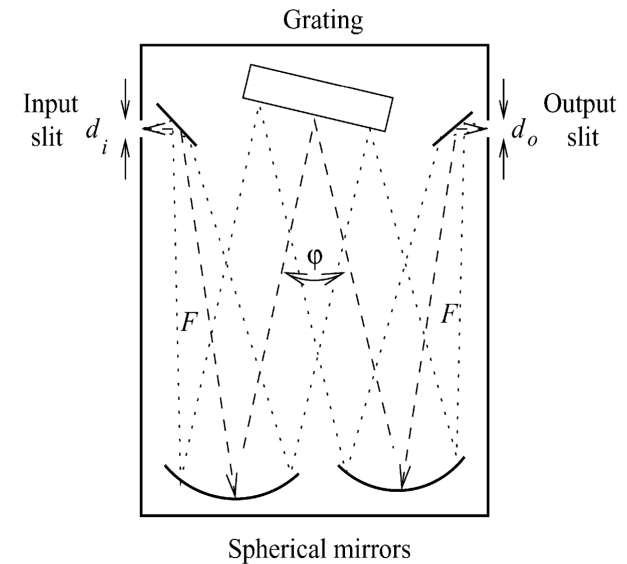
Спектральное разрешение монохроматора вычисляется по формуле:

$$\Delta\lambda = \frac{d_i(1 + \cos\varphi)}{Fmg}$$

Монохроматор

Для достижения лучшего разрешения спектра нужно.

1. Использовать небольшие входные щели (уменьшение d_i); это обычный метод улучшения разрешения монохроматора, но при размерах щелей, приближающихся к длине волны, дифракция на щели постепенно снижает эффективность монохроматора.
2. Использовать решетку с более высоким числом штрихов (увеличьте g), предел для количество канавок, в видимой части спектра, составляет 1200 мм^{-1} ;
3. Увеличить порядок дифракции работа (увеличение m), тогда может быть перекрывающиеся порядки дифракция. Более того порядок дифракции не могут быть больше $m < \{\lambda g\}^{-1}$, также с $g = 1200 \text{ мм}^{-1}$ порядок дифракции не может быть выше одного в видимой части спектра.
4. Использовать зеркала с большим фокусным расстоянием (увеличение F), это увеличивает физические размеры устройства, т.е. большие монохроматоры имеют лучшее спектральное разрешение.



$$\Delta\lambda = \frac{d_i(1 + \cos\phi)}{Fmg}$$

Детектор

Фотодетекторы можно классифицировать по разным признакам, основным из них является материал, из которого выполнен детектор. В миниатюрном спектрометре находят применение два наиболее распространенных полупроводниковых материала - Si и InGaAs. Важно выбрать правильный материал детектора при подборе спектрометра, так как ширина запрещенной энергетической зоны (E_{gap}) полупроводника определяет верхний предел длины волны (λ_{max}) согласно следующему выражению :

$$\lambda_{max} = \frac{hc}{E_{gap}}$$

В где h – постоянная Планка, c -скорость света. Постоянную Планка и скорость света можно выразить как 1240 эВ·нм или 1,24 эВ·нм для простоты перехода от энергии к длине волны. Например, ширина запрещенной зоны Si равна 1,11 эВ, что соответствует максимальной длине волны 1117,117 нм.

InGaAs, с другой стороны, представляет собой соединение InAs и GaAs, которые имеют ширину запрещенной зоны, равную 0,36 эВ и 1,43 эВ соответственно. Поэтому в зависимости от содержания In и Ga в материале данный показатель может иметь промежуточное значение. Однако, по ряду причин In и Ga нельзя смешивать в произвольном количестве, поэтому значение 1,7 мкм (или 0,73 эВ) является стандартным показателем для детекторов InGaAs. Также можно использовать матрицу InGaAs, которая способна работать с разрешением 2,2 мкм или 2,6 мкм, но подобные детекторы гораздо дороже и более шумные по сравнению с традиционными детекторами на основе InGaAs .

Детектор

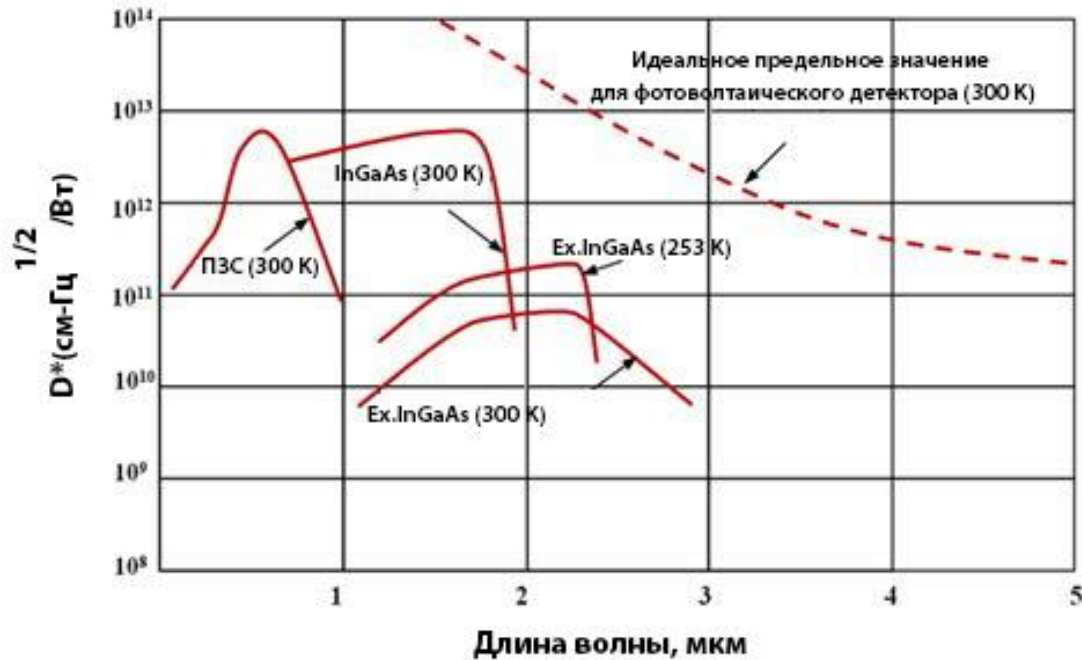
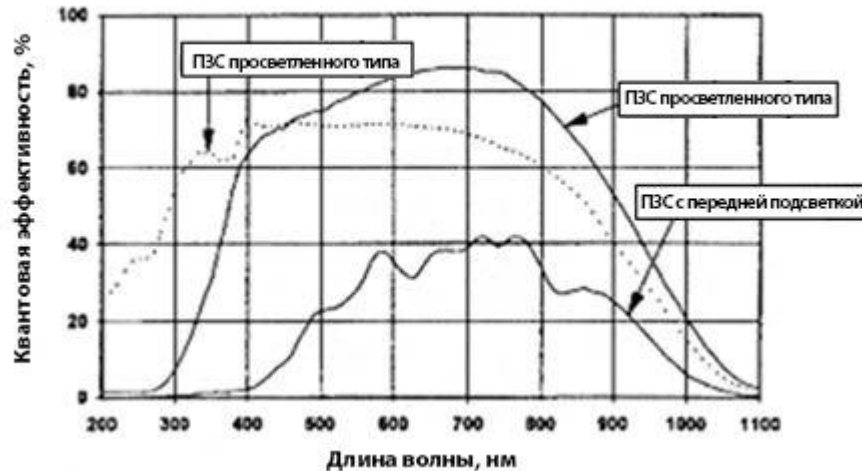


Рис. Аппроксимация функции обнаружения детектора в зависимости от длины волны в стандартных детекторах

Нижний предел работы материала определить сложнее, так как он зависит от особенности поглощения света полупроводниковым материалом и поэтому может варьироваться в широких пределах в зависимости от толщины детектора. Другим общепринятым методом снижения предела включения детектора является флуоресцентное покрытие на окне детектора, которое будет поглощать фотоны высокой энергии и излучать фотоны более низкой энергии, определяемые датчиком. На Рис. показано сравнение функции обнаружения детектора в зависимости от длины волны для матриц на основе Si (ПЗС) и InGaAs.

Спектроскопия

Квантовая эффективность в зависимости от длины волны (при комнатной температуре)



Квантовая эффективность ПЗС детектора и детектора на просветленной ПЗС

В настоящее время детекторы InGaAs существуют только в одном исполнении, а вот многоэлементные детекторы Si имеют три типа конструкции: приборы с зарядной связью (CCD или ПЗС), ПЗС просветленного типа (BT-CCD), фотодиодные матрицы (PDA). Технология ПЗС позволяет создавать детекторы с малыми размерами пикселей (~14 мкм), это устраняет необходимость в прямом считывании сигнала от каждого пикселя. Здесь заряд передается от одного пикселя к другому, что позволяет считывать всю информацию из матрицы с одного пикселя.

BT-CCD является идеальным решением. BT-CCD (ПЗС просветленного типа) получается травлением подложки P-Si ПЗС до толщины примерно 10 мкм. В результате этого значительно сокращается поглощение и увеличивается эффективность детектора. Данный процесс также позволяет подсвечивать детектор с обратной стороны (P-Si), это исключает негативное влияние переднего шлюза детектора. На Рис. представлено сравнение эффективности традиционного ПЗС детектора и детектора BT-CCD с обратной подсветкой.

Литература для чтения

1. N. Tkachenko. *Optical spectroscopy: methods and instrumentations*, Elsevier, Amsterdam, 2006.
2. МГУ. Лабораторный практикум по физике. *Изучение дифракционной решетки*. Задача № 36. Москва. 2011
3. А.Н Зайдель. Г.В. Островская, Ю.И. Островский, *Техника и практика спектроскопии*. 1978.
4. В. И. Малышев. *Введение в экспериментальную спектроскопию*. 1979. М. Наука.
5. Попов Игорь Алексеевич. *Физические методы исследования*. Лекция Московский физико-технический институт (Государственный университет) Кафедра молекулярной физики. 2019.

Работа над проектами

Алексей	Применение МНК для данных, описываемых законом Вина. Показать как пишется программа в Матлабе.
Александр	Рассчитать среднеквадратичное отклонения величины сопротивления, полученного Ван дер Пау методом.
Камиль	Kunz, M., J.Y. Yan, E. Cornell, E.E. Domning, C.E. Yen, et al., Implementation and application of the peak scaling method for temperature measurement in the laser heated diamond anvil cell. <i>Review of Scientific Instruments</i> . 89 (8) p. 11 (2018).
Лев	Применение МНК для данных, описываемых зависимости вида $y = a \exp(b \cdot x)$. (Матлаб)
Александра	Нахождения аналитического выражения ошибки измерения расстояния до сферического зеркала.
Демид	МНК метод для нахождения параметров нелинейной регрессии.
Юля	Применение МНК для данных, описываемых законом Вина. Получение аналитического выражение для среднеквадратичного отклонения величин излучения и температуры, полученных МНК методом.
Антон	Представление статьи: Giese, A.T.C.S. French, The analysis of overlapping spectral absorption bands by derivative spectrophotometry. <i>Applied Spectroscopy</i> . 9 (2) p. 78–96 (1955).