

ВОГНУТЫЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ РЕШЕТКИ
С ПЕРЕМЕННЫМ ШАГОМФ. М. Герасимов, Э. А. Яковлев, И. В. Пейсахсон
и В. В. Кошелев

Исследованы свойства вогнутых сферических решеток, у которых расстояние между штрихами изменяется по линейному закону. У таких решеток фокальная кривая для меридиональных лучей смещена с круга Роуланда и может пересекаться с фокальной кривой для сагиттальных лучей или касается ее. Благодаря этому изображение в указанных точках делается полностью стигматическим, а вблизи них астигматизм решетки значительно уменьшен. Описан метод изготовления решеток с переменным шагом. Результаты экспериментального изучения свойств вогнутых решеток, изготовленных с применением данного метода, находятся в согласии с теорией. Показано, что путем изменения шага можно значительно уменьшить астигматизм вогнутых решеток в области длин волн, достаточной для спектрографических исследований.

Основным недостатком вогнутой дифракционной решетки, нарезанной на сферическом зеркале, является астигматизм. При необходимости для уменьшения астигматизма в пучок, падающий на дифракционную решетку или отраженный ею, вводят дополнительные оптические элементы в виде цилиндрических линз, сферических и торических зеркал, специально рассчитываемых для каждого конкретного случая. Однако эти методы имеют ограниченное применение. В ряде теоретических работ [1-4] показано, что для узких участков спектра астигматизм можно скомпенсировать путем применения асферических поверхностей (тороид и эллипсоид), или путем искривления штрихов решетки по определенному закону [5]. Эксперименты в этом направлении проводились в последние годы [6]. В обоих названных методах изменяется сходимость лучей только в сагиттальной плоскости, параллельной штрихам. Фокальная кривая для спектральных линий, круг Роуланда, остается без изменений.

В работах Корню [7], посвященных аномалиям фокальных свойств вогнутой решетки, показано, что положение фокуса для меридиональных лучей также может изменяться в результате изменения шага решетки по линейному закону. Вид фокальной кривой и величина изменения фокуса в этом случае зависят от величины непостоянства шага решетки. Очевидно, что этот принцип может быть использован для компенсации астигматизма вогнутых решеток в определенной спектральной области. Теория вогнутой решетки с переменным расстоянием между штрихами рассмотрена в работе [8]. При этом показано, что стигматическое изображение может быть получено при угле дифракции 45° в автоколлимационной схеме и в схеме нормального падения. В более общем случае, как следует из анализа упомянутых выше работ, полная компенсация астигматизма вогнутой решетки возможна и при других углах дифракции, отличных от 45° .

В настоящей работе описаны опыты по изготовлению таких решеток и результаты исследования их спектральных свойств.

Компенсация астигматизма

Пусть расстояние между штрихами решетки изменяется по линейному закону

$$d(y) = d_0(1 + \gamma y), \quad (1)$$

где d_0 — расстояние между соседними штрихами в центре решетки ($y=0$), а γ — коэффициент пропорциональности. Уравнение фокальной кривой для меридиональных лучей в этом случае будет иметь вид [7]

$$\frac{\cos^2 \varphi}{r} - \frac{\cos \varphi}{R} + \gamma \sin \varphi = - \left(\frac{\cos^2 \psi}{r'} - \frac{\cos \psi}{R} + \gamma \sin \psi \right), \quad (2)$$

где φ — угол падения центрального луча на решетку, ψ — угол дифракции, r и r' — расстояние точки щели и ее изображения от вершины решетки, R — радиус кривизны решетки.

Для определенного положения источника (r и φ постоянны) это уравнение дает фокальную кривую в полярных координатах r' и ψ , которая в общем случае не проходит через точку источника. Имеются два сопряженных семейства кривых, которые сливаются в одну при равенстве нулю левой и правой части уравнения (2). Уравнение этой общей фокальной кривой, единственной для каждой решетки, будет иметь вид

$$\frac{\cos^2 \psi}{r'} - \frac{\cos \psi}{R} + \gamma \sin \psi = 0. \quad (3)$$

Форма фокальной кривой зависит только от R и γ и не зависит от постоянной решетки. Если в одной из точек ее поместить источник, то все спектральные изображения его будут лежать на этой кривой.

Для сагиттальных лучей, как и в случае обычной вогнутой решетки, вид фокальной кривой определяется уравнением

$$\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} = \frac{\cos \varphi}{R} + \frac{\cos \psi}{R}. \quad (4)$$

Простейшим решением этого уравнения является прямая, $r = \frac{R}{\cos \varphi}$ и $r' = \frac{R}{\cos \psi}$, касательная к окружности Роуланда.

На рис. 1 показаны фокальные кривые, рассчитанные по формуле (3) при различных величинах коэффициента $R\gamma$, определяющего непостоянство шага решетки. Из этого рисунка видно, что при сравнительно малом изменении шага ($R\gamma=0.377$, кривая 1) фокальная кривая пересекает касательную к окружности Роуланда. В точке пересечения кривых астигматизм полностью отсутствует, а в соседних точках его величина меньше, чем у вогнутой решетки с постоянным расстоянием между штрихами. В частном случае, рассмотренном в работе [8], когда точка полной компенсации астигматизма располагается при угле дифракции 45° , фокальные кривые для меридиональных и сагиттальных лучей касаются друг друга (кривая 2 на рис. 1). При значениях $R\gamma > 0.5$ фокальные кривые пересекаются только в одной точке, расположенной на нормали к решетке, и в этом случае астигматизм не может быть исправлен.

Коэффициент γ , определяющий положение точки пересечения фокальных кривых, может быть вычислен по формуле

$$\gamma = \frac{\sin^2 \varphi \cos \varphi + \sin^2 \psi_0 \cos \psi_0}{R(\sin \varphi + \sin \psi_0)}, \quad (5)$$

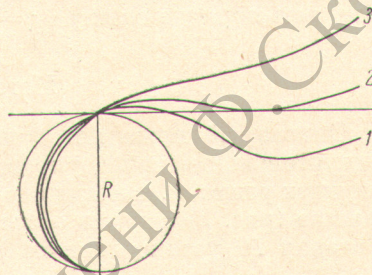


Рис. 1. Фокальные кривые для вогнутой решетки с переменным шагом, рассчитанные по формуле (3) при различных значениях коэффициента $R\gamma$.
1 — $R\gamma=0.377$, 2 — 0.5, 3 — 0.677.

где ψ_0 — угол дифракции длины волны λ_0 , для которой должен быть исправлен астигматизм.

Таким образом, коэффициент γ зависит от угла падения φ , угла дифракции ψ_0 для длины волны λ_0 и от радиуса кривизны решетки. Для данной решетки, как видно из формулы (5), точка полной компенсации астигматизма будет перемещаться по спектру при изменении угла падения. При нормальном падении длина волны λ_0 будет в два раза меньше, чем в установке Иглы. При $\varphi=0$ и $\varphi=\psi_0$ формула (5) принимает вид

$$\gamma = \frac{\sin 2\psi_0}{2R} \quad (6)$$

В частном случае решетки с 600 штр./мм, имеющей радиус кривизны $R=1$ м, при условии полной компенсации астигматизма в области 500 нм в первом порядке спектра $\gamma=1.48 \cdot 10^{-4}$ мм⁻¹.

Метод изменения шага

Описанный ниже метод изменения шага рассчитан на применение в делительной машине, управляемой с помощью системы из двух дифракционных решеток, дающих интерференционные муаровые полосы [9]. В этой машине (рис. 2) одна из отсчетных решеток 11 закреплена неподвижно, а вторая 10 установлена на каретке 6 с заготовкой 7 и перемещается

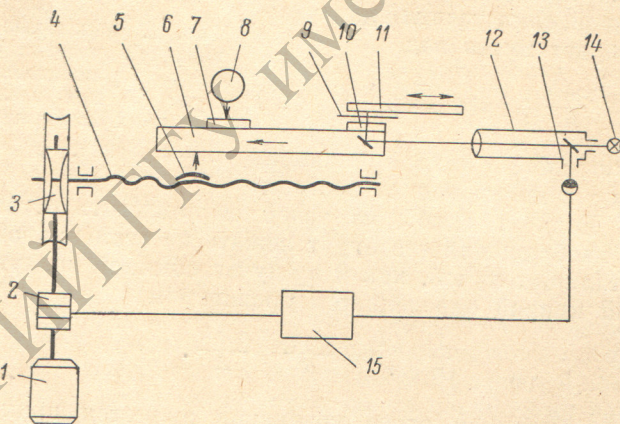


Рис. 2. Схема делительной машины, управляемой с помощью системы из двух дифракционных решеток.

1 — электродвигатель, 2 — электромагнитная муфта, 3 — червячная пара, 4 — винт, 5 — гайка, 6 — каретка, 7 — заготовка, 8 — резовая каретка, 9 — экран с системой щелей, 10 — прозрачная решетка отсчетной системы, 11 — отражательная решетка отсчетной системы, 12 — коллиматор, 13 — фотоэлемент, 14 — источник света, 15 — радиотехническое управляющее устройство.

вместе с ней, вызывая тем самым движение интерференционных полос в поле зрения коллиматора 12. Число прошедших полос является мерой перемещения изготавливаемой решетки и отсчитывается с помощью радиотехнического устройства 15, сигналы от которого управляют работой электромагнитной муфты 2, прерывающей после прохождения определенного количества полос движение каретки с заготовкой.

Изменение шага решетки производилось следующим образом. В пространстве между отсчетными решетками помещался непрозрачный экран с рядом одинаковых узких щелей, расположенных на равных расстояниях друг от друга параллельно интерференционным полосам. При этом решетки юстировались таким образом, чтобы между щелями укладывалось

целое число интерференционных полос, а ширина каждой полосы по крайней мере в 4 раза превосходила ширину щели. Таким образом экран вырезал части интерференционных полос находящихся в одинаковых фазах, и благодаря этому достигалась глубокая модуляция фотоэлектрического сигнала при движении полос. В процессе нарезания решетки экран перемещается в направлении движения полос по определенному закону, и, следовательно, по тому же закону изменяется расстояние между наносимыми штрихами.

Принципиально изменение шага можно осуществить путем дополнительного смещения одной из отсчетных решеток. Однако это представляет собой более сложную задачу, поскольку смещение необходимо производить с той же точностью, что и подачу заготовки. В нашем случае требования к точности значительно меньше, так как масштаб перемещения интерференционных полос и, следовательно, экрана может быть сделан сколь угодно большим. На рис. 3 дана схема примененного в наших опытах рычажного механизма для перемещения экрана.

Ось вращения рычага 3 закреплена на каретке 1 и движется вместе с ней. Один из концов рычага при помощи штихмасса 8 и пружины 7 соединен с экраном 6, который перемещается по направляющим в поле зрения отсчетной системы. Ролик 5, закрепленный на том же рычаге, при движении каретки катится по кулачку 4, установленному на станине машины. Силовое замыкание осуществляется пружиной 2, притягивающей второй конец рычага к каретке. Таким образом, движение экрана происходит по закону, задаваемому формой кулачка. Закон перемещения экрана определяет величину отклонения штрихов от их теоретического положения при постоянном шаге решетки, равном d_0 . Для решетки, у которой расстояние между штрихами изменяется по линейному закону в соответствии с уравнением (1), выражение для указанного отклонения будет иметь вид

$$\xi_y = \int_0^y \frac{d(y) - d_0}{d_0} dy = \int_0^y \gamma y dy = \frac{\gamma y^2}{2}, \quad (7)$$

т. е. является уравнением параболы. При этом расстояние между штрихами будет либо равномерно уменьшаться, либо равномерно увеличиваться от начала к концу решетки. Знак изменения шага выбирается так, чтобы область компенсации астигматизма и направление блеска располагались с одной стороны от нормали.

Изготовление решеток и результаты их исследования

Первые опыты проводились с кулачком, выполненным в виде дуги окружности. С его помощью были изготовлены плоские и вогнутые решетки с переменным шагом, имеющим 300 штр./мм. На рис. 4 дана интерферограмма фронта дифрагированной волны в первом порядке у одной из таких решеток. Стрелка кривизны фронта составляет приблизительно 10 полос, что соответствует отклонению штрихов от их теоретического положения на 10 постоянных.

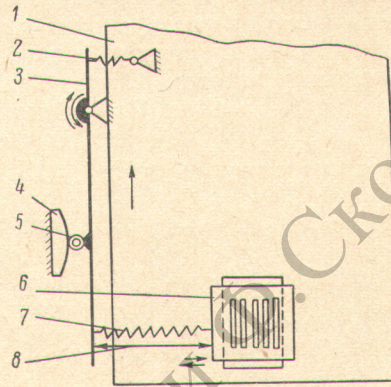


Рис. 3. Схема рычажного механизма для перемещения экрана.

1 — каретка, 2 — пружина, 3 — рычаг, 4 — кулачок, 5 — ролик, 6 — экран, 7 — пружина, 8 — штихмасс.

Эти решетки обеспечивали достаточно хорошее качество изображения в первом порядке спектра. Однако теневым методом были обнаружены ошибки, связанные с отклонением перемещения экрана от квадратичного закона. В дальнейшем точность перемещения экрана была увеличена за счет применения кулачка в виде пакета плоских пружин с регулируемой формой профиля. Как показали непосредственные измерения с помощью измерительного микроскопа, отклонение перемещения экрана от требуемого теорией после окончательной регулировки пружин не превышало ± 0.05 мм. С применением указанного механизма была изготовлена группа вогнутых решеток 300 и 600 штр./мм, размером 60×50 мм с радиусом кривизны $R=1$ м. Все решетки давали спектральные линии такого же

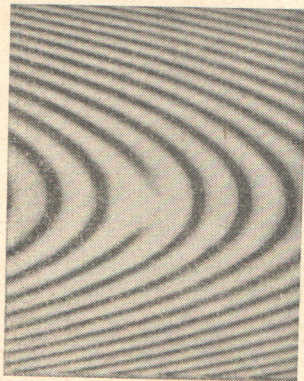


Рис. 4. Интерферограмма фронта дифрагированной волны в первом порядке у плоской решетки 300 штр./мм с переменным шагом.

(кривая 1) этому условию удовлетворяет область длин волн короче 650 нм, а для решетки 600 штр./мм при нормальном падении от 320 до 420 нм и в автоколлимации короче 450 нм. Измеренные в видимой области значения астигматической разности хорошо согласуются с вычисленными.

Решетка 600 штр./мм (кривая 3) обеспечивает полную компенсацию астигматизма при длине волны около 380 нм при нормальном падении. В соответствии со сказанным выше относительно зависимости положения точки компенсации астигматизма от угла падения в автоколлимации у той же решетки полная компенсация астигматизма наблюдается вблизи 760 нм. Кроме того, фокальные кривые для меридиональных и сагиттальных лучей для $\lambda < \lambda_0$ располагаются ближе друг к другу, чем для $\lambda > \lambda_0$. Поэтому область, где астигматизм не превышает заданной величины, в коротковолновой части спектра несколько шире.

Как видно из рис. 5, в установке Иглы можно получить компенсацию астигматизма в более широкой области длин волн вследствие того, что спектр располагается ближе к нормали, и фокальные кривые пересекаются под меньшим углом, чем в установке нормального падения (ср. кривые 2 и 3).

Отметим, что при отрицательных углах падения, когда щель приходится располагать на участке фокальной кривой внутри круга Роуланда (рис. 1), фокус для сагиттальных лучей уже не будет располагаться на прямой, касательной к окружности Роуланда, и точка полной компенсации астигматизма существенно сместится по сравнению с теми, которые изображены на рис. 1. Поэтому решетку с переменным шагом целесообразно применять

качества, как и обычные сферические решетки при тех же условиях. На рис. 5, а даны фотографии ртутного спектра, снятые со ступенчатым ослабителем в установке нормального падения и в установке Иглы, а на рис. 5, б показано расположение участков фокальных кривых, на которых производилось фотографирование спектрограмм, относительно круга Роуланда. Спектры фотографировались на пленку, расположенную по окружности с радиусом 0.5 м.

Форма фокальной кривой, рассчитанная по формуле (3), отлична от окружности, но в данном случае эти отклонения при ширине кассеты 120 мм не превышали десятых долей мм, что не вызывало заметного ухудшения изображения качества спектральных линий. О степени исправления астигматизма можно судить по разрешению ступенек ослабителя. Максимальная величина астигматической разности, при которой изображения ступенек еще разделены, составляет около 6 мм. Для решетки 300 штр./мм

в схемах, где щель и спектр расположены по одну сторону от нормали к решетке.

Приведенные результаты показывают, что путем изменения шага можно исправить астигматизм вогнутой решетки в достаточной для прак-

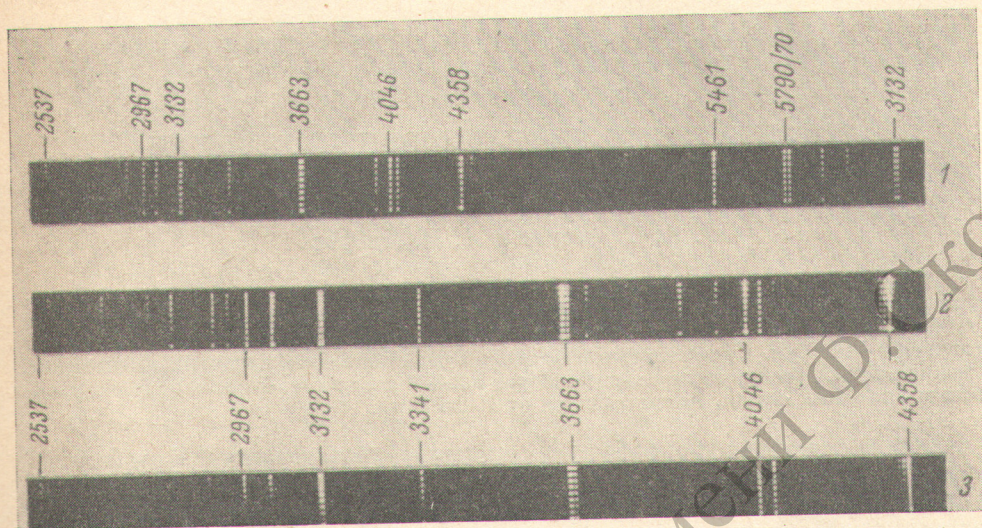


Рис. 5. Фотографии спектров ртути, полученные при помощи вогнутых решеток с переменным шагом (вверху), и расчетные фокальные кривые для этих решеток (б).

Радиус кривизны у всех решеток $R=1$ мм. 1 — решетка 300 штр./мм в установке Иглы, $\lambda_0=480$ нм; 2 — решетка 600 штр./мм в установке Иглы, $\lambda_0=400$ нм; 3 — решетка 600 штр./мм при нормальном падении, $\lambda_0=380$ нм; 4 — окружность Роуланда.

тических щелей области длин волн. Ширина этой области для данного радиуса кривизны зависит от угла дифракции ψ_0 , при котором астигматизм скомпенсирован полностью.

Описанный метод позволяет также изготавливать плоские решетки с переменным шагом, которые могут быть применены для компенсации астигматизма, вносимого изображающей оптикой спектральных приборов.

Литература

- [1] H. Haber. J. Opt. Soc. Am., 40, 153, 1950.
- [2] H. Greiner, E. Schaffer. Optik, 16, 228, 360, 1959.
- [3] T. Namioka. J. Opt. Soc. Am., 51, 13, 1961.
- [4] Ю. П. Щепеткин. Опт. и спектр., 4, 383, 513, 1958.
- [5] M. V. R. K. Murty. J. Opt. Soc. Am., 52, 768, 1962.
- [6] E. Schonheit. Optik, 23, 305, 1965/66.
- [7] A. Cornu, C. R. Acad. Sci., Paris. 80, 645, 1875; 116, 1215, 1421, 1893; 117, 1032, 1893.
- [8] J. Sakaunagi. Sci. Light. 16, 129, 1967.
- [9] Ф. М. Герасимов, В. П. Сергеев, И. А. Тельтевский, В. В. Сергеев, Б. В. Маричев. Опт. и спектр., 19, 270, 1965.

Поступило в Редакцию 14 июля 1969 г.