

## ВОГНУТЫЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ РЕШЕТКИ НА АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЯХ С ОДНОЙ ПЛОСКОСТЬЮ СИММЕТРИИ

С. А. Стрежнев и А. И. Андреева

В приборах для вакуумного ультрафиолета обычно используются вогнутые отражательные дифракционные решетки. Основное преимущество вогнутых решеток перед плоскими заключается в их способности фокусировать спектр. Приборы с вогнутыми решетками просты по конструкции и являются практически единственным средством для исследования спектров в области короче 200 нм. Однако вогнутым решеткам свойственны большие aberrации, которые ограничивают размеры решеток и возможности их применения. Исследованию aberrаций спектрального изображения посвящено много работ [1-11]. Было установлено, что наличие горизонтальных составляющих комы и сферической aberrации ограничивает оптимальную ширину сферической решетки и приводит к снижению ее разрешающей способности, а вследствие вертикального астигматизма происходит уменьшение реальной светосилы [2-5]. Применение тороидальных и эллипсоидальных решеток взамен вогнутых сферических благодаря компенсации астигматизма существенно увеличивает светосилу спектральных приборов, поскольку в области компенсации астигматизма отраженное решеткой излучение сосредоточивается на меньшей площади [6-10, 12-15]. Оптимальная ширина заштрихованной поверхности тороидальных решеток является такой же, что и сферических [8-10]. По качеству спектральных линий тороидальные решетки практически не отличаются от сферических, так как aberrации типа комы и сферической aberrации тороидальной поверхностью не устраняются. По сравнению со сферическими и тороидальными эллипсоидальная решетка позволяет получить большую оптимальную ширину, а следовательно, и большую теоретическую разрешающую способность из-за частичного устранения поверхностью решетки сферической aberrации. Как показали теоретические исследования [11], безабберационное спектральное изображение в достаточно широкой области спектра может быть получено с вогнутой решеткой, нанесенной на асферической поверхности с одной плоскостью симметрии. Разрешающая способность решеток при этих условиях повышается из-за практически полного устранения aberrаций типа комы и сферической aberrации асферической поверхностью. При этом в области исправленного вертикального астигматизма достигается такой же выигрыш в светосиле, как и с тороидальными и эллипсоидальными решетками.

В настоящей статье сообщается об изготовлении решеток на асферических поверхностях с одной плоскостью симметрии и приводятся результаты исследования их спектральных характеристик.

Общий вид уравнения асферической поверхности с одной плоскостью симметрии записывается в виде степенного ряда следующим образом [11]:

$$x = At^2 + Bm^2 + Cm^3 + Dmm^2 + Em^4 + Em^2M^2 + GM^4 + \dots \quad (1)$$

где  $x$  — координата, отсчитываемая от вершины решетки в направлении перпендикуляра к решетке;  $t$  и  $M$  — координаты точки поверхности решетки соответственно в направлении ширины нарезанной части поверхности и длины штрихов;  $A = 1/2R$ ,  $B = 1/2\rho$ ,  $R$  и  $\rho$  — радиусы кривизны поверхности решетки при ее вершине соответственно в меридиональной и сагиттальной плоскостях. Коэффициенты  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $E$ ,  $F$  и  $G$  уравнения поверхности (1) связаны с формированием спектрального изображения;  $A$  определяет условия фокусировки на цилиндре Роуланда;  $B$  характеризует длину волны стигматического изображения;  $C$ ,  $D$ ,  $E$ ,  $F$  и  $G$  — кому и сферическую aberrацию. Для асферической решетки с одной плоскостью симметрии параметры  $C$ ,  $D$ ,  $E$ ,  $F$  и  $G$  не зависят от  $R$  и  $\rho$ . Это позволяет для заданных радиусов  $R$  и  $\rho$  кривизны решетки при исправленном вертикальном астигматизме рассчитать коэффициенты асферической поверхности (1), которая образует безабберационное изображение при произвольной установке дифракционной решетки.

Наибольший интерес представляло исследование возможности получения безабберационного изображения, даваемого асферической решеткой при установке ее по схеме Сейя—Намиока, поскольку применение даже эллипсоидальной решетки не позволяет исправить кому, а также полностью устранить сферическую aberrацию [9]. Радиусы кривизны  $R$  и  $\rho$  при вершине асферической решетки выбирались 500.1 и 333.3 мм, обеспечивающие получение стигматического изображения в установке Сейя—Намиока при длине волны  $\sim 115.5$  нм с решеткой 1200 штр./мм, работающей в первом порядке спектра. Для этой установки расстояния от щели до вершины и от вершины решетки до ее изображенного пучком составляет  $\sim 70^\circ 45'$ . Углы падения и дифракции  $\alpha$  и  $\beta$  задавались в виде  $\alpha = \theta/2 + k$ ,  $\beta = -(\theta/2 - k)$ , где  $k$  — угол поворота решетки равный  $\sim 4^\circ 54'$  для стигматической длины волны. Коэффициенты уравнения асферической поверхности вычислялись по формулам [11]. Для указанных выше параметров решетки они были равны:  $C = -0.8427 \cdot 10^{-7}$  мм<sup>-2</sup>;  $D = +0.1258 \cdot 10^{-6}$  мм<sup>-2</sup>;  $E = +0.1475 \cdot 10^{-8}$  мм<sup>-3</sup>;  $F = +0.4543 \cdot 10^{-8}$  мм<sup>-3</sup>;  $G = +0.3368 \cdot 10^{-8}$  мм<sup>-3</sup>. Таким образом, уравнение

асферической поверхности с одной плоскостью симметрии, обеспечивающей получение безабберационного изображения при длине волны  $\sim 115.5$  нм в установке Сейя—Намиока, запишется в следующем виде:

$$x = 0.1 \cdot 10^{-2}m^2 + 0.15 \cdot 10^{-2}M^2 - 0.8427 \cdot 10^{-7}m^3 + \\ + 0.1258 \cdot 10^{-6}mM^2 + 0.1457 \cdot 10^{-8}m^4 + 0.4543 \times \\ \times 10^{-8}m^2M^2 + 0.3368 \cdot 10^{-8}M^4. \quad (2)$$

Изготовление асферической поверхности в соответствии с уравнением (2) представляет значительные технологические трудности. Поэтому нами была изготовлена асферическая поверхность с одной плоскостью симметрии, образованная вращением кривой, описываемой уравнением

$$x = 0.1 \cdot 10^{-2}m^2 - 0.8427 \cdot 10^{-7}m^3 + 0.1457 \cdot 10^{-8}m^4, \quad (3)$$

вокруг оси, перпендикулярной оси X, с радиусом  $\rho = 333.3$  мм. Указанная поверхность является симметричной относительно меридиональной плоскости и асимметричной по отношению к сагиттальной. Асферичность в меридиональной плоскости на краях поверхности решетки шириной 110 мм составляла  $\sim +18.4$  и  $\sim -9.7$  мкм. Формование асферической поверхности производилось от точно изготовленной тороидальной поверхности [13] путем асферизации ее линейным инструментом переменной ширины. Ширина инструмента была пропорциональна расчетной величине съема стекла в каждой зоне обработки. Таким образом, были изготовлены заготовки размером  $110 \times 70 \times 15$  мм. На этих заготовках были нарезаны асферические решетки, имеющие 1200 штр./мм с размером заштрихованной поверхности до  $95 \times 60$  мм. Указанные размеры заготовок и заштрихованной поверхности решеток ограничивались технологическими возможностями изготовления как заготовок, так и вогнутых дифракционных решеток большой апертуры [14]. Решетки изготовлялись на делительной машине с применением метода управления по интерференционным муаровым полосам [17] и магнестрикционного метода [18], которые обеспечивали высокое качество деления. При этих условиях качество спектров, даваемых дифракционной решеткой, определялось главным образом точностью изготовления асферической поверхности зеркала, на котором нарезана решетка. Как следует из теории, абберации решетки зависят только от углов падения и дифракции. Указанная выше асферическая поверхность (3) позволяла получать безабберационное изображение для решетки 1200 штр./мм в установке Сейя—Намиока при длине волны  $\sim 115.5$  нм в первом порядке в вакуумной области и в этой же установке для решетки 300 штр./мм при длине  $\sim 462$  нм в первом порядке в видимой области спектра. В соответствии с этим оценка качества изображения, образуемого решетками, нарезанными на асферической поверхности, проводилась визуально в установке Сейя—Намиока в видимой области спектра по монохроматическим линиям кадмия 508.6, 480, 467.8 нм путем исследования формы спектральных линий и ее окрестностей на краю квазистигматической области для решеток 1200 штр./мм и в стигматической области для решетки 300 штр./мм, изготовленной нами на асферической заготовке с теми же параметрами, что и заготовка, на которой нарезались решетки 1200 штр./мм. Исследование показало, что в стигматической области, включающей I и II порядки спектра решетки 300 штр./мм, при высоте входной щели до 25 мм асферическая решетка дает совершенные спектральные линии из-за практически полного устранения аббераций типа комы и сферической абберации асферической поверхностью решетки.

Следует отметить, что асферические решетки с одной плоскостью симметрии имеют безабберационное изображение только в той установке, на которую они рассчитаны. Это подтверждается исследованием асферических решеток в других схемах установок. Так, при исследовании указанных выше решеток в схеме Иглы оказалось, что асферические решетки также образуют резкие спектральные линии. Однако с обеих сторон линий наблюдается сильный несимметричный относительно ядра линии фон, вызываемый асимметричностью заготовки при малых углах падения и дифракции, сильно отличающихся от углов падения и дифракции, соответствующих безабберационному спектральному изображению. Поэтому асферические решетки могут быть достаточно эффективно использованы в установках и областях спектра, для которых произведено исправление аббераций.

Как отмечается в работе [19], теоретическое разрешение в приборах с вогнутыми решетками может быть получено при условии, когда абберационное уширение изображения не превышает нормальной ширины щели. Для каждой длины волны можно рассчитать размер оптимальной ширины решетки ( $M \rightarrow 0$ ), при которой она обладает максимально возможной разрешающей способностью. Для асферической решетки оптимальная ширина более чем в 3.5 раза превышает оптимальную ширину сферической. Расчет показал, что асферические решетки 1200 штр./мм, изготовленные нами, позволяют получить теоретическое разрешение в вакуумной области спектра при длине  $\lambda = 115.5$  нм порядка  $\sim 0.025 \text{ \AA}$ . Поскольку даже при полном исправлении аббераций разрешающая способность решетки не может быть использована полностью вследствие конечной ширины щели и определенной величины разрешения регистрирующего приемника, то полное абберационное уширение ограничивается допустимой шириной спектрального изображения щели [11]. Расчет показал, что в стигматической области указанные выше асферические решетки 1200 штр./мм при ширине щели 10 мкм и раз-

решении приемника 40 лин./мм позволяют получить разрешение  $\sim 0.22 \text{ \AA}$ , при ширине щели 20 мкм и разрешении приемника 20 лин./мм —  $0.44 \text{ \AA}$  соответственно при апертурах решеток  $40 \times 30$  и  $60 \times 50$  мм.

Результаты исследований показывают, что возможно изготовление асферических решеток с одной плоскостью симметрии, применение которых в спектральных приборах позволит получить практически безабберационное изображение в достаточно широкой области спектра и тем самым увеличить как светосилу, так и разрешающую способность приборов. В зависимости от спектральной области и схемы прибора для получения безабберационного изображения необходимо выбирать асферическую поверхность в каждом конкретном случае.

Авторы выражают благодарность Ф. М. Герасимову за обсуждение результатов работы и помощь в подготовке рукописи статьи.

### Литература

- [1] H. A. Rowland. Phil. Mag., 8, 469, 1882; 16, 197, 1883.
- [2] F. Zernike. Pieter Zeeman. pp. 323—336, Martinus Nijhoff, Hague, Netherlands, 1935.
- [3] I. E. Mack, I. R. Stehn, B. Edlen. J. Opt. Soc. Am., 22, 245, 1932.
- [4] H. G. Beutler. J. Opt. Soc. Am., 35, 311, 1945.
- [5] T. Namioka. J. Opt. Soc. Am., 49, 446, 460, 951, 1959.
- [6] H. Greiner, E. Schaffer. Optik, 16, 288, 350, 1959.
- [7] И. В. Пейсахон, И. Н. Тарнакин. Ж. прикл. спектр., 1, 289, 1964; 2, 218, 1965.
- [8] H. Haber. J. Opt. Soc. Am., 40, 153, 1950.
- [9] T. Namioka. J. Opt. Soc. Am., 51, 4, 13, 1961.
- [10] T. Namioka. J. Quant. Spectr. Rad. Trans., 2, 697, 1962.
- [11] Ю. П. Щепеткин. Опт. и спектр., 4, 383, 513, 1958.
- [12] E. Schönheit. Optik, 23, 305, 1966.
- [13] А. З. Хабиров. Бюлл. изобр., 21, 154, 1968.
- [14] С. А. Стрежнев, А. И. Андреева. Опт. и спектр., 4, 796, 1970.
- [15] С. А. Стрежнев, А. И. Андреева, А. З. Хабиров. Опт. и спектр., 23, 369, 1972.
- [16] С. А. Стрежнев, Н. М. Балясников, Ю. А. Шуба. Опт.-механич. промышл., 4, 76, 1971.
- [17] Ф. М. Герасимов, В. П. Сергеев, И. А. Тельтевский, В. В. Сергеев, Б. В. Маричев. Опт. и спектр., 19, 270, 1965.
- [18] В. В. Кунджиги, С. А. Стрежнев, Н. А. Фетисова. Опт.-механич. промышл., 6, 43, 1970.
- [19] И. В. Пейсахон. Оптика спектральных приборов. Изд. «Машиностроение», Л., 1970.

Поступило в Редакцию 17 марта 1973 г.

УДК 539.184.01

## ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДЕЙТОНА И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ИЗОТОПИЧЕСКИЙ СДВИГ УРОВНЕЙ ВОДОРОДА И ДЕЙТЕРИЯ

Л. Н. Лабзовский

Поляризация ядер и ее влияние на атомные спектры рассматривались в работах [1, 2], а в последнее время — для мезоатомов — в [3–5]. Мы произвели точный расчет этого эффекта в аналитическом виде для атома дейтерия, используя модель ямы нулевого радиуса для дейтона. Оказывается, что эффект поляризации в этом случае значительно превосходит обычный эффект объема, что объясняется высокой поляризуемостью дейтона.

Рассмотрим гамильтониан атома дейтерия без учета спиновых членов

$$H = -\frac{1}{2M} \Delta_{x_1} - \frac{1}{2M} \Delta_{x_2} - \frac{1}{2} \Delta_{x_3} - \frac{1}{|x_1 - x_3|} + U(|x_1 - x_2|), \quad (1)$$

где координаты  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$  относятся соответственно к протону, нейтрону и электрону,  $U$  — потенциал взаимодействия протона с нейтроном,  $M$  — масса протона и нейтрона. В выражении (1) использованы атомные единицы. Вводя координаты Якоби  $X = [M(x_1 + x_2) + mx_3]/(2M + m)$ ,  $x = x_1 - x_2$ ,  $r = x_3 - (x_1 + x_2)/2$  и отделяя движение центра тяжести, приходим к уравнению