

УДК 681.785.55

Использование призматического телескопирования светового пучка для повышения спектрального разрешения и угловой дисперсии спектрометра

Гулис И.М., Купреев А.Г.

Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Поступила 29.01.2016

Принята к печати 14.03.2016

Повышение угловой дисперсии и «щелевой» разрешающей способности дисперсионных спектрометров на основе дифракционной решетки за счет изменения ее параметров ограничено допустимым порядком дифракции и периодом; решения на основе модифицированных решеток (эшелле, голографических, иммерсионных) приемлемы в ограниченной области параметров и сложны в производстве, поэтому мало пригодны для использования в массовых приборах. В предлагаемом методе уменьшение «щелевого» предела разрешения обеспечивается одномерным расширением светового пучка в плоскости дисперсии посредством прохождения через наклонную призму перед падением на решетку. Увеличение угловой дисперсии обеспечивается сужением диспергированных пучков после решетки при прохождении через вторую наклонную призму. Показано, что «щелевой» предел разрешения в такой системе улучшается (уменьшается) приблизительно в число раз, равное угловому увеличению первой призмы (величина меньше единицы); угловая дисперсия увеличивается в число раз, равное угловому увеличению второй призмы. Проанализировано влияние френелевского отражения от граней призм, которое растет с увеличением их наклона относительно пучка, поэтому целесообразное с точки зрения повышения светопропускания системы увеличение разрешающей способности составляет 1,4–1,6 раза (при использовании просветления может достигать 2 и более раз). От аналогов метод отличается технологичностью реализации, поскольку используются простые оптические элементы – плоская отражательная дифракционная решетка и оптические клинья. Благодаря этому он может применяться для улучшения аналитических характеристик широкого класса дисперсионных спектрометров, в первую очередь малогабаритных.

Ключевые слова: дисперсионный спектрометр, дифракционная решетка, предел разрешения, угловая дисперсия.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-58-66

Адрес для переписки:

Гулис И.М.
Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь
e-mail: gulis@bsu.by

Address for correspondence:

Gulis I.M.
Belarusian State University,
Nezavisimosti Ave., 4, 220030, Minsk, Belarus
e-mail: gulis@bsu.by

Для цитирования:

Гулис И.М., Купреев А.Г.
Использование призматического телескопирования светового пучка для повышения спектрального разрешения и угловой дисперсии спектрометра.
Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 1. – С. 58–66.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-58-66

For citation:

Gulis I.M., Kupreyeu A.G.
[One-dimensional light beam widening using prisms for increase of spectrometer spectral resolution and angular dispersion].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 1, pp. 58–66 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-58-66

Введение

Реальный предел разрешения дисперсионного спектрометра определяется теоретическим пределом разрешения, обусловленным волновой природой света и свойствами диспергирующего элемента, полушириной абберационного кружка рассеяния, шириной изображения входной щели («щелевой» предел разрешения), оптико-электронными характеристиками системы регистрации (в частности, размером пикселя фотодетектора), дефектами изготовления и юстировки оптических элементов. Важной характеристикой оптической системы является геометрический фактор – произведение площади входного отверстия и числовой апертуры системы, от которого зависит световой поток через прибор, а следовательно, возможность регистрации низкоинтенсивных спектральных компонент [1]. Увеличение геометрического фактора за счет повышения числовой апертуры приводит к росту внеосевых аббераций оптической системы, прежде всего комы и астигматизма [2]. Фактором этого роста является не только увеличение апертурного угла, но и вызванный увеличением диаметра оптических элементов рост углов падения световых пучков на объективы, что особенно актуально для малогабаритных светосильных спектрометров с зеркальными объективами, поскольку при возрастании аббераций существенно ухудшается их спектральное разрешение. Для компенсации аббераций в таких системах, как правило, используются дополнительные корректирующие элементы [3, 4] или асферические объективы [5], что усложняет оптическую систему и удорожает ее изготовление, особенно при необходимости коррекции аббераций нескольких типов. Более простым способом увеличения геометрического фактора является расширение входной апертуры (щели), однако при этом увеличивается размер изображения щели на детекторе – растет «щелевой» предел разрешения $\delta\lambda_{slit}$:

$$\delta\lambda_{slit} = \frac{d\lambda}{d\beta} \frac{w}{f} r, \quad (1)$$

где $d\lambda/d\beta$ – обратная угловая дисперсия; w – ширина щели; r – анаморфное увеличение системы; f – фокусное расстояние объектива (будем рассматривать коллиматорный и камерный объективы с одинаковым фокусным расстоянием) [1]. Из (1) следует, что для уменьшения $\delta\lambda_{slit}$ при не-

изменной ширине щели и фокусном расстоянии (т.е. при сохранении геометрического фактора системы) необходимо увеличить дисперсию или уменьшить анаморфное увеличение.

В дальнейшем ограничимся рассмотрением диспергирующих систем на основе дифракционной решетки. Исходя из соотношений для угловой дисперсии [6] и анаморфного увеличения решетки, можно заключить, что уменьшить $\delta\lambda_{slit}$ можно за счет уменьшения периода решетки, увеличения порядка дифракции или угла падения светового пучка. К примеру, в решетках эшелле высокая угловая дисперсия достигается за счет большого угла падения пучка на решетку и дифракции в высоких порядках, однако такие решетки отличаются крайне малой областью свободной дисперсии и существенно сложнее в изготовлении, чем обычные [6]. Другие типы решеток с высокой угловой дисперсией (голографические [7], иммерсионные и гризмы [8, 9]) тоже сложны в производстве, ориентированы на работу в ограниченной области параметров (порядков дифракции, углов падения и дифракции световых пучков). Для массовых малогабаритных спектрометров широкого спектрального диапазона актуальны более универсальные решения на основе плоских отражательных дифракционных решеток. Дисперсия и предел разрешения в случае одиночной решетки тоже ограничены, поскольку уменьшение периода понижает длинноволновую границу ее рабочего спектрального диапазона, увеличение порядка дифракции сокращает область свободной дисперсии [6]. Суммирование дисперсии нескольких дифракционных решеток улучшает диспергирующие характеристики оптической системы, однако при этом возрастают ее сложность, габариты и потери света.

Проведенный анализ возможностей увеличения дисперсии и «щелевого» разрешения спектрометров на основе дифракционной решетки указывает на необходимость разработки метода, использующего обычную плоскую решетку, что позволит применять его в массово изготавливаемых приборах, прежде всего малогабаритных.

Описание и обоснование предлагаемого метода

Для повышения «щелевого» спектрального разрешения и угловой дисперсии в оптической системе спектрометра нами предлагается увели-

чивать сечение светового пучка перед падением на дифракционную решетку и уменьшать его после дифракции посредством прохождения через дополнительные призмы. Призмы размещаются перед дифракционной решеткой и после нее (рисунки 1), наклонены в плоскости дисперсии системы таким образом, что после первой призмы пучок расширяется в направлении дисперсии и падает на дифракционную решетку, диспергированные пучки направляются на вторую призму, после нее пучки сужаются в направлении дисперсии.

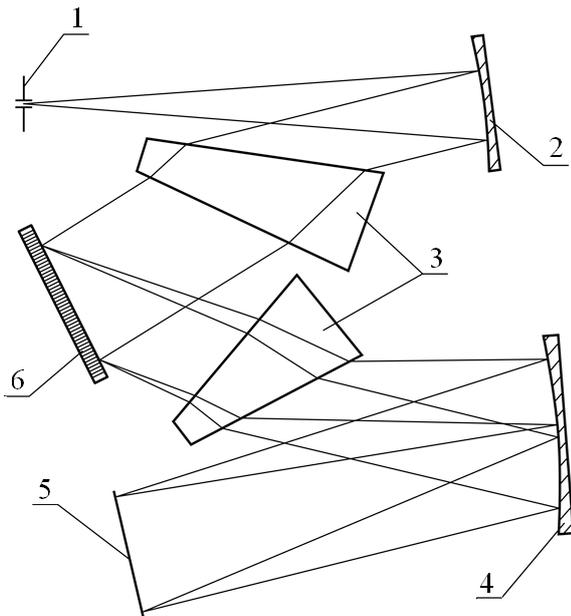


Рисунок 1 – Оптическая система дисперсионного спектрометра с призмным расширением пучка: 1 – входная щель; 2 – коллиматорный объектив; 3 – призмы; 4 – камерный объектив; 5 – детектор; 6 – дифракционная решетка

Figure 1 – Optical system of dispersive spectrometer with prism beam expanding: 1 – entrance slit; 2 – collimating lens; 3 – prisms; 4 – imaging lens; 5 – detector array; 6 – diffraction grating

Увеличение угловой дисперсии предлагалось в трехпризмной системе Малышева [10], в которой центральная призма работает в условиях минимального отклонения, а крайние обеспечивают изменение углового увеличения. Целесообразность широкого использования такой системы ставится под сомнение, поскольку при равенстве длин путей в призмах и ширины выходящего из системы пучка она эквивалентна системе из трех симметричных призм [10]. Однако система на основе дифракционной решетки обладает существенным отличием, так как боль-

шая дисперсия решетки позволяет получать за счет телескопирования большой прирост общей дисперсии системы. В то же время угловая дисперсия призм на 1–2 порядка меньше дисперсии решетки, поэтому их вкладом в общую дисперсию системы можно пренебречь. Использование призм с малым преломляющим углом позволяет сократить размеры системы. Дополнительным преимуществом призмного телескопирования является расширение светового пучка только в направлении дисперсии, благодаря чему вертикальный размер спектрометра не увеличивается. Отметим, что призмные расширители используются в резонаторах перестраиваемых лазеров для уменьшения расходимости светового пучка и сужения полосы пропускания дисперсионного резонатора (первоначально для расширения пучка применялись телескопы, однако из-за сложности юстировки и высокой стоимости их стали заменять призмами).

Для системы, содержащей дифракционную решетку и две призмы, используя [11], можно получить выражение для угловой дисперсии:

$$\left(\frac{d\beta}{d\lambda}\right)_{total} = \gamma_{p2}\gamma_g \left(\frac{d\beta}{d\lambda}\right)_{p1} + \gamma_{p2} \left(\frac{d\beta}{d\lambda}\right)_g + \left(\frac{d\beta}{d\lambda}\right)_{p2}, \quad (2)$$

где $\gamma_g, \gamma_{p1}, \gamma_{p2}$ – угловое увеличение решетки, первой и второй призмы соответственно;

$\left(\frac{d\beta}{d\lambda}\right)_g, \left(\frac{d\beta}{d\lambda}\right)_{p1}, \left(\frac{d\beta}{d\lambda}\right)_{p2}$ – угловые дисперсии.

Таким образом, угловая дисперсия системы зависит от дисперсий составляющих ее элементов и от их угловых увеличений. Например, если призмы одинаковы и установлены под одним углом к падающему пучку (для второй призмы это возможно для одной из длин волн) со сложением дисперсии, то с учетом известной формулы угловой дисперсии призмы выражение (2) можно записать как:

$$\left(\frac{d\beta}{d\lambda}\right)_{total} = \gamma_{p2} \left(\frac{d\beta}{d\lambda}\right)_g + \frac{dn}{d\lambda} \left(\frac{t}{D_{p2}} + \gamma_{p2}\gamma_g \frac{t}{D_{p1}} \right), \quad (3)$$

где $\frac{dn}{d\lambda}$ – дисперсия материала призмы;

t – разность оптических путей крайних лучей в призме; D_{p1}, D_{p2} – ширина сечения пучка на выходе из первой и второй призмы соответственно. Если обозначить ширину сечения пучка после

дифракционной решетки D_g , тогда угловое увеличение решетки и второй призмы соответственно:

$$\gamma_g = \frac{D_{p1}}{D_g} \quad \text{и} \quad \gamma_{p2} = \frac{D_g}{D_{p2}},$$

и тогда (3) принимает вид:

$$\left(\frac{d\beta}{d\lambda}\right)_{total} = \gamma_{p2} \left(\frac{d\beta}{d\lambda}\right)_g + 2 \frac{t}{D_{p2}} \frac{dn}{d\lambda}.$$

При использовании тонких призм с малым углом при вершине (оптических клиньев) их дисперсией по сравнению с дисперсией решетки можно пренебречь, поэтому (3) преобразуется в:

$$\left(\frac{d\beta}{d\lambda}\right)_{total} \approx \gamma_{p2} \left(\frac{d\beta}{d\lambda}\right)_g. \quad (4)$$

Таким образом, угловая дисперсия дифракционной решетки в случае призмного расширения пучка повышается в число раз, приближенно равное угловому увеличению (кратности сужения пучка) после второй призмы. Соотношение (4) справедливо и для угловой дисперсии системы с вычитанием дисперсии призм.

Анаморфное увеличение в системе с одинаковыми коллиматорным и камерным объективами равно произведению угловых увеличений призм и решетки:

$$r = \gamma_{p1} \gamma_g \gamma_{p2}.$$

Поэтому щелевой предел разрешения в такой системе с учетом (1) и (4) равен:

$$\delta\lambda_{slit} = \frac{1}{(d\beta/d\lambda)_{total}} \frac{w}{f} r \approx \frac{1}{(d\beta/d\lambda)_g} \times \quad (5)$$

$$\times \frac{w}{f} \gamma_{p1} \gamma_g = \gamma_{p1} \delta\lambda_{slit0}$$

и будет в γ_{p1} раз больше, чем в системе без призмного расширения ($\delta\lambda_{slit0}$) при прочих равных условиях. Следует отметить, что монохроматические aberrации призм существенно проявляются в неколлимированных пучках [1], поэтому в данном случае ими можно пренебречь.

При разработке схемного решения, использующего предложенный метод, необходимо учитывать, что стандартные дифракционные решетки обычно имеют квадратную форму. Для исключения потерь света при недостаточной длине решетки по сравнению с длиной сечения пучка

следует снабдить спектрометр решеткой, расширенной в направлении дисперсии.

Определение области применения метода

При больших углах падения увеличиваются потери света из-за френелевского отражения, поэтому использование призм обосновано в случаях, когда эти потери меньше, чем потери из-за сокращения геометрического фактора при сужении входной щели до ширины, эквивалентной достигнутому с использованием призм пределу разрешения. Обозначив пропускание призм в системе с масштабированием предела разрешения в γ_{p1} раз как T_{p1} и T_{p2} , а световой поток, падающий на входную щель, как I_0 , условие целесообразности использования призм можно записать как:

$$I_0 (1 - T_{p1} T_{p2}) < I_0 (1 - \gamma_{p1}),$$

откуда:

$$T_{p1} T_{p2} > \gamma_{p1}. \quad (6)$$

Поскольку пропускание и угловое увеличение в общем случае сложно зависят от угла падения на призму и угла при ее вершине, для конкретных систем предпочтительна численная оценка этого соотношения. В то же время получить общее представление о ходе зависимости возможно из следующих оценок.

Выражение для углового увеличения тонкой призмы можно вывести на основе формулы:

$$\gamma_p = \frac{D_{in}}{D_{out}}.$$

где D_{in} и D_{out} – диаметр сечения пучка, входящего в призму и выходящего из нее. Обозначив угол падения пучка на грань призмы как α , угол преломления как β , угол при вершине призмы как ω , показатель преломления призмы как n , можно показать, что:

$$\gamma_p \approx \frac{\cos \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \sqrt{\frac{n^2 - (\sin \alpha \pm \sin \omega \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha})^2}{1 - (\sin \alpha \pm \sin \omega \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha})^2}}. \quad (7)$$

В данной формуле угол падения считается положительным, если кратчайший поворот луча до нормали к поверхности осуществляется по часовой стрелке. Знак «+» перед углом при вершине призмы ставится, если поворот от первой

грани призмы (входной) до второй (выходной) осуществляется по часовой стрелке.

Тогда при малом ω с учетом $\sin\beta = \sin\alpha / n$:

$$\gamma_p = \frac{n \cos \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \frac{\cos(\beta \pm \omega)}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2(\beta \pm \omega)}}.$$

При учете в (7) угла ω со знаком « \leftarrow » увеличение γ_p носит монотонно убывающий характер, превышая 1 лишь в малой области вблизи $\alpha = 0^\circ$. При дальнейшем росте α $\gamma_p < 1$, т.е. призма расширяет световой пучок, увеличивая щелевое разрешение системы согласно (5) – так работает призма перед решеткой на рисунке 1. К примеру, для призмы из стекла ВК7 ($n \approx 1,52$) с $\omega = 12^\circ$ при $\alpha \approx 60^\circ$ угловое увеличение $\gamma_p \approx 0,68$, что соответствует увеличению разрешающей способности приблизительно в 1,5 раза (пропускание призмы при этом $T_p \approx 0,85$). При еще больших α угловое увеличение может достигать 0,5 и менее (что соответствует увеличению разрешающей способности в 2 и более раз), однако при этом падает пропускание.

При учете в (7) угла ω со знаком « \rightarrow » увеличение $\gamma_p > 1$, т.е. призма сужает световой пучок, увеличивая угловую дисперсию системы согласно (4) – в таком режиме работает призма после решетки на рисунке 1. Зависимость γ_p от α носит монотонно возрастающий характер и стремится к бесконечности (скользящий выход из призмы) при:

$$\sin(\beta + \omega) = \frac{1}{n}.$$

Скользящий угол соответствует полному внутреннему отражению пучка и не имеет в нашем рассмотрении практического смысла. При расчете спектрального прибора целесообразно использовать меньшие углы падения на призму, к примеру, для призмы из стекла ВК7 ($n \approx 1,52$) с $\omega = 12^\circ$ при $\alpha = 40^\circ$ угловое увеличение $\gamma_p \approx 1,7$ и пропускание призмы $T_p \approx 0,82$.

Просветление рабочих граней призмы уменьшает отражение, позволяя увеличить угол падения пучка на призму, а значит – угловое увеличение и разрешение. Существуют и разрабатываются покрытия для обеспечения просветления в широком диапазоне углов падения [12], вопрос об их применимости в данных условиях и о теоретически достигаемых характеристиках системы актуален для дальнейшего исследования.

Из соотношений (4) и (5) следует, что угловое увеличение первой призмы определяет щелевой

предел разрешения системы, угловое увеличение второй призмы – угловую дисперсию системы.

Таким образом, в системе, где первая призма расширяет пучок ($\gamma_{p1} < 1$), а вторая сужает ($\gamma_{p2} > 1$), по сравнению с референтной предел разрешения будет меньше в γ_{p1} раз, а угловая дисперсия выше в γ_{p2} раз. Аналогичные выводы применимы к системам с одной призмой. Для уменьшения щелевого предела разрешения следует использовать систему с обеими призмами либо только с первой (расширяющей пучок перед дифракционной решеткой), если нет необходимости повышать угловую дисперсию.

Для демонстрации работоспособности предложенного подхода было проведено численное моделирование в пакете оптического дизайна ZEMAX®. В расчетной оптической системе использована дифракционная решетка 2400 штрихов/мм, материал призм ВК7. Фокусное расстояние сферических объективов 105 мм, рабочий спектральный диапазон 490–510 нм, параметры кружка рассеяния измеряются для пучка с $\lambda = 500$ нм (для него же обеспечивается симметричное прохождение через призмы). Угол падения на дифракционную решетку ($18,0 \pm 0,05$)°, на первую призму 63° , на вторую призму ($36,9 \pm 0,03$)°, угол призм при вершине 12° . Система аналогична приведенной на рисунке 1: призмы установлены с вычитанием дисперсии, дисперсия первой призмы имеет обратный знак дисперсии решетки и второй призмы. При указанных параметрах оценка согласно (4) дает линейную дисперсию в референтной системе 0,56 мм/нм, в системе с двумя призмами 0,82 мм/нм, в системе с одной призмой перед решеткой 0,55 мм/нм, после решетки – 0,83 мм/нм. Оценка щелевого предела разрешения согласно (1) для ширины входной щели 10 мкм дает результат в референтной системе 0,038 нм, в системе с двумя призмами 0,025 нм (улучшение в 1,5 раза), с призмой перед решеткой 0,025 нм, после решетки – 0,038 нм. Коэффициент пропускания двух призм приблизительно равен 0,73, угловое увеличение первой призмы 0,65, поэтому, согласно (6), использование призм целесообразно.

Результаты расчета угловой дисперсии при численном моделировании в случае минимальной абберационной составляющей – достигается благодаря $NA = 0,01$ – отличаются от рассчитанных по (4) не более чем на 4 %. Сравнение величины предела разрешения, полученной при расчете по (5) и численном моделировании системы

с двумя призмами, приведено на рисунке 2. Хорошее соответствие с теоретическими расчетами при $NA = 0,01$ свидетельствует о пренебрежимо малом абберационном вкладе в таких условиях. При $NA = 0,1$ и большой (> 40 мкм) ширине щели экспериментальные результаты практически не отличаются от теоретических (отклонение результатов для референтной системы при ширине щели больше 80 мкм можно объяснить неопределенностью оценки дисперсии из-за искаженной формы кружка рассеяния при высоких абберациях). Отметим, что при малой ширине щели предел разрешения для референтной системы за счет аббераций существенно превышает теоретически рассчитанный. Дополнительный абберационный вклад имеет место и для системы с призмами, однако из рисунка 2 следует, что общее сокращение предела разрешения за счет использования призм при малых щелях оказывается большим (практически двухкратным) в сравнении с таковым для больших щелей (1,5 раза).

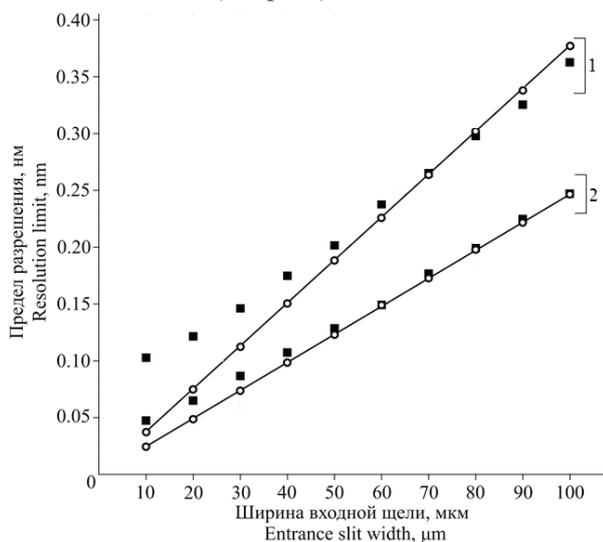


Рисунок 2 – Щелевой предел разрешения спектрометра с призмным расширением пучка при разной числовой апертуре: 1 – референтная система; 2 – система с призмным расширителем пучка. Линии – результаты расчета по (5); круги – результаты численного моделирования при числовой апертуре 0,01, квадраты – при числовой апертуре 0,1

Figure 2 – Slit resolution limit of a spectrometer with prism beam extending at different numerical apertures: 1 – in a reference system; 2 – in a system with prism beam extender. Lines – results of estimation by (5); circles – results of computational simulation at numerical aperture 0,01, squares – results of computational simulation at numerical aperture 0,1

Это объясняется превалирующим вкладом в случае малых щелей абберационной составляющей, которая в системе с призмами снижается вследствие сужения диспергированных пучков после второй призмы и тем самым уменьшения площади их сечения на камерном объективе.

Заключение

Предложен метод повышения угловой дисперсии и «щелевой» разрешающей способности дисперсионного спектрометра на основе использования призмы для одномерного расширения светового пучка в плоскости перед дифракционной решеткой и сужения дифрагированных пучков после нее. Собственная дисперсия призм при этом не вносит существенного вклада в указанные характеристики системы, поэтому для телескопирования могут использоваться тонкие призмы (оптические клинья), так что увеличение габаритов прибора из-за этого незначительно. В то же время система с уменьшением предела разрешения в M раз эквивалентна аналогичной по светосиле системе с в M раз большим фокусным расстоянием, а значит с приблизительно в M^3 раз большим объемом и массой.

От имеющихся аналогов метод отличается простотой и технологичностью реализации благодаря использованию простых оптических элементов – плоской отражательной дифракционной решетки и оптических клиньев. Благодаря этому он может применяться для улучшения аналитических характеристик дисперсионных спектрометров массового производства, в первую очередь в малогабаритных светосильных приборах.

Список использованных источников

1. *Schroeder, D.J.* Astronomical optics / D.J. Schroeder. – 2nd edition. – San Diego : Academic Press, 1999. – 478 p.
2. *Welford, W.T.* Aberrations of optical systems / W.T. Welford. – Bristol : Adam Hilger, 1991. – 284 p.
3. *Lee, K.S.* Broadband astigmatism-corrected Czerny–Turner spectrometer / K.S. Lee, K.P. Thompson, J.P. Rolland // Opt. Express. – 2010. – Vol. 18, no. 22. – P. 23378–23384.
4. *Mitchell, T.A.* Variable aberration correction using axially translating phase plates / T.A. Mitchell, J.M. Sasian // Proc. SPIE. – 1999. – Vol. 3705. – P. 209–220.
5. New family of reflective spectrometers / A. Romoli [et al.] // Opt. Eng. – 2011. – Vol. 50, no. 1. – P. 013001-1–013001-8.

6. *Loewen, E.G.* Diffraction gratings and applications / E.G. Loewen, E. Popov. – New York : Marcel Dekker, 1997. – 601 p.

7. Volume-phase holographic gratings and their potential for astronomical applications / S.C. Barden [et al.] // Proc. SPIE. – 1998. – Vol. 3355. – P. 866–876.

8. *Marciante, J.R.* High-efficiency, high-dispersion diffraction gratings based on total internal reflection / J.R. Marciante, D.H. Raguin // Optics Letters. – 2004. – Vol. 29, no. 6. – P. 542–544.

9. Development of high-dispersion grisms and immersion gratings for spectrographs of the Subaru Telescope / N. Ebizuka [et al.] // Proc. SPIE. – 1998. – Vol. 3355. – P. 409–416.

10. *Тарасов, К.И.* Спектральные приборы / К.И. Тарасов. – 2-е изд. – Л. : Машиностроение, 1977. – 368 с.

11. *Duarte, F.J.* Tunable Laser Optics / F.J. Duarte. – 2nd edition. – Boca Raton : CRC Press, 2015. – 354 p.

12. Anti-reflective coatings: A critical, in-depth review / H.K. Raut [et al.] // Energy and Environmental Science. – 2011. – Vol. 4, no. 10. – P. 3779–3804.

One-dimensional light beam widening using prisms for increase of spectrometer spectral resolution and angular dispersion

Gulis I.M., Kupreyeu A.G.

Belarusian State University,
Nezavisimosti Ave., 4, 220030, Minsk, Belarus

Received 29.01.2016

Accepted for publication 14.03.2016

Abstract. The increase of angular dispersion and slit resolution limit of grating spectrometers by means of variation of grating parameters is limited by its period and allowable order of diffraction. The special solutions (echelle, holographic, immersion gratings) are acceptable in a limited parameter range and are technologically complex in fabrication, thus hardly applicable to instruments of mass production. We propose to decrease slit resolution limit by one-dimensional beam widening in dispersion plane by means of passing it through oblique prism before incidence onto diffraction grating. The increase of angular dispersion can be achieved by narrowing of dispersed beams after grating while passing through other oblique prism. We prove that slit resolution limit in such a system changes approximately as multiplied by angular magnification of the first prism (that is less than 1 times). Also angular dispersion changed approximately as multiplied by angular magnification of the second prism. The Fresnel reflection from the faces of prisms is analyzed. Accounting for that factor gives the increase of resolution about 1,4–1,6 times without loss of light (and can be 2 and more times while using anti-reflective coating). The proposed method is different from the similar ones first of all by its simplicity because it uses simple optical elements – plane reflective grating and thin prisms. It can be applied to amend the analytical characteristics of dispersive spectrometers, first of all the small-sized ones.

Keywords: dispersive spectrometer, grating, resolution limit, angular dispersion.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-58-66

Адрес для переписки:

Гулис И.М.
Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь
e-mail: gulis@bsu.by

Address for correspondence:

Gulis I.M.
Belarusian State University,
Nezavisimosti Ave., 4, 220030, Minsk, Belarus
e-mail: gulis@bsu.by

Для цитирования:

Гулис И.М., Купреев А.Г.
Использование призмённого телескопирования светового пучка для повышения спектрального разрешения и угловой дисперсии спектрометра.
Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 1. – С. 58–66.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-58-66

For citation:

Gulis I.M., Kupreyeu A.G.
[One-dimensional light beam widening using prisms for increase of spectrometer spectral resolution and angular dispersion].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 1, pp. 58–66 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-58-66

References

1. Schroeder D.J. *Astronomical optics*, 2nd edition. San Diego, Academic Press, 1999, 478 p.
2. Welford W.T. *Aberrations of optical systems*. Bristol, Adam Hilger, 1991, 284 p.
3. Lee K.S., Thompson K.P., Rolland J.P. Broadband astigmatism-corrected Czerny–Turner spectrometer. *Opt. Express*, 2010, vol. 18, no. 22, pp. 23378–23384.
4. Mitchell T.A., Sasian J.M. Variable aberration correction using axially translating phase plates. *Proc. SPIE*, 1999, vol. 3705, pp. 209–220.
5. Romoli A., Simonetti F., Gambicorti L., Marchi A. New family of reflective spectrometers. *Opt. Eng.*, 2011, vol. 50, no. 1, pp. 013001-1–013001-8.
6. Loewen E.G., Popov E. *Diffraction gratings and applications*. New York, Marcel Dekker, 1997, 601 p.
7. Barden S.C., Arns J.A., Colburn W.S. Volume-phase holographic gratings and their potential for astronomical applications. *Proc. SPIE*, 1998, vol. 3355, pp. 866–876.
8. Marciante J.R., Raguin D.H. High-efficiency, high-dispersion diffraction gratings based on total internal reflection. *Opt. Letters*, 2004, vol. 29, no. 6, pp. 542–544.
9. Ebizuka N., Iye M., Sasaki T., Wakaki M. Development of high-dispersion grisms and immersion gratings for spectrographs of the Subaru Telescope. *Proc. SPIE*, 1998, vol. 3355, pp. 409–416.
10. Tarasov K.I. *Spectralnye pribory* [Spectral instruments], 2nd edition. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1977, 368 p.
11. Duarte F.J. *Tunable Laser Optics*, 2nd edition. Boca Raton, CRC Press, 2015, 354 p.
12. Raut H.K., Ganesh V.A., Nair A.S., Ramakrishna S. Anti-reflective coatings: A critical, in-depth review. *Energy and Environmental Science*, 2011, vol. 4, no. 10, pp. 3779–3804.