

## ПРОСТАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ЗЕРКАЛЬНОГО АНАСТИГМАТИЧЕСКОГО СПЕКТРОМЕТРА

А. Г. Купреев

Компактные спектрометры с детекторами оптического сигнала на основе ПЗС-линеек (ПЗС-Прибор Зарядовой Связи) все шире используются в различных аналитических приложениях в биологии, химии, медицине, экологии, криминалистике, и область их применения стремительно расширяется. Более активному внедрению таких приборов в практику должно способствовать нахождение более простых и экономически эффективных конструктивных решений их основных блоков и узлов.

В ходе усовершенствования малогабаритного спектрометра, разрабатываемого на кафедре лазерной физики и спектроскопии БГУ и предназначенного для регистрации спектров поглощения, люминесценции и комбинационного рассеяния, было предложено расширить область его спектральной чувствительности путем установки нового детектора – ПЗС-линейки Toshiba модели TCD1304AP. Эта линейка после небольшой доработки позволяет регистрировать излучение длиной волны от 200 нм. Поскольку стеклянные объективы не пропускают излучение в таком диапазоне длин волн, то возникла необходимость спроектировать схему спектрометра с зеркальной оптикой, пригодного для работы и в УФ-диапазоне. Главной проблемой при создании таких рефлективных спектрометров является уменьшение aberrаций, которые неизбежно появляются вследствие наклонного падения широких световых пучков на сферические зеркала объективов. Решающее значение в схеме приобретают aberrации астигматизм и кома.

Традиционные способы коррекции этих aberrаций либо удорожают конструкцию (например, корректирующие сферические зеркала, кварцевые пластинки сложной конфигурации), либо непригодны для малогабаритного спектрометра в силу чрезмерного усложнения схемы (сферосимметричные схемы Тарасова).

Научным руководителем работы И. М. Гулисом для коррекции астигматизма в зеркальном спектрометре было предложено иное решение, которое, насколько нам известно, не использовалось до настоящего времени при конструировании спектрометрической аппаратуры. Идея этого решения была подсказана известным в технике лазеров на красителях методом исправления астигматизма светового пучка в трехзеркальном резонаторе. Aberrации, появляющиеся вследствие косоугольного падения светового пучка на зеркало резонатора и, независимо от этого, прохождения

непараллельного пучка через брюстеровскую кювету с красителем, могут быть взаимно скомпенсированы подбором расположения короткого колена зеркального резонатора [1; 2].

По аналогии мы предположили, что и в схеме спектрометра варьированием положения размещенной вблизи входной щели кварцевой пластинки можно было бы добиться компенсации вносимыми ею аберрациями астигматизма сферических зеркал объективов.

Для проверки этой идеи было проведено моделирование в программе расчета оптических систем OSLO LT 5.40.

При моделировании задавались реальные характеристики оптических элементов: радиус кривизны зеркал объективов – 200 мм, дифракционная решетка – 1200 штрихов/мм, длина светочувствительного элемента ПЗС-линейки – 28 мм. Расчеты производились для числовой апертуры 0,155 (светосила 1:3,3) и 0,125 (светосила 1:4).

Размеры пикселя ПЗС-линейки Toshiba – 8 мкм (ширина) × 200 мкм (высота). Исходя из этого, был выбран критерий оценки дизайна схемы: размеры пятна в плоскости изображения при точечном источнике не должны превышать 50 мкм (ширина) × 200 мкм (высота). При выполнении этого условия пятно будет хорошо укладываться по высоте линейки, а разрешение в среднем будет не хуже 0,35 нм. Также при ширине входной щели не более 15 мкм (типичная величина при спектрометрических измерениях) общее разрешение спектрометра ухудшится не более, чем на 1,5% по сравнению со спектрометром с идеально узкой щелью.

За базовый вариант оптической схемы была принята схема Эберта-Фасти, поскольку она позволяет частично скорректировать кому, а также дает плоское поле изображения.

Моделирование велось в спектральном диапазоне от 400 до 580 нм. При выбранных нами параметрах оптических элементов область в 180 нм примерно укладывается на длину детектора ПЗС-линейки 28 мм. При оптимизации мы устанавливали плоскость изображения так, чтобы увеличить разрешение (максимально уменьшить ширину пятна). При этом отслеживалась его высота.

Результаты моделирования показали, что помещение в спектрометр наклонной плоскопараллельной стеклянной пластинки действительно корректирует астигматизм зеркал. Оно приводит к резкому уменьшению высоты пятен во всем спектральном диапазоне по сравнению с оптимизированным вариантом без пластинки (см. таблицу).

**Размеры пятен, полученные при оптимальном дизайне системы при установленной кварцевой плоскопараллельной пластинке и без нее. Относительное отверстие 1:4.**

| Длина волны, нм | Горизонтальный размер пятна в схеме с пластинкой, мкм | Горизонтальный размер пятна в схеме без пластинки, мкм | Вертикальный размер пятна в схеме с пластинкой, мкм | Вертикальный размер пятна в схеме без пластинки, мкм |
|-----------------|---|--|---|--|
| 400             | 50  | 48   | 108   | 352  |
| 410             | 38  | 42   | 110   | 366  |
| 420             | 30  | 38   | 112   | 380  |
| 430             | 22  | 34   | 112   | 398  |
| 440             | 16  | 30   | 110   | 416  |
| 450             | 16  | 28   | 104   | 436  |
| 460             | 16  | 24   | 98  | 458  |
| 470             | 20  | 22   | 90  | 482  |
| 480             | 24  | 22   | 80  | 508  |
| 490             | 28  | 20   | 68  | 536  |
| 500             | 30  | 20   | 56  | 566  |
| 510             | 32  | 18   | 42  | 594  |
| 520             | 32  | 18   | 30  | 634  |
| 530             | 32  | 18   | 28  | 670  |
| 540             | 32  | 16   | 42  | 710  |
| 550             | 32  | 16   | 64  | 750  |
| 560             | 32  | 16   | 92  | 794  |
| 570             | 34  | 16   | 122   | 840  |
| 580             | 38  | 18   | 156   | 892  |

При относительном отверстии 1:3,3 на краях диапазона наблюдается небольшой выход за установленные рамки, однако сам факт прекрасной коррекции неоспорим. Уже при немного меньшем относительном отверстии 1:4 размеры пятен полностью удовлетворяют критерию. Следует отметить, что полученная область резкости изображения (длиной порядка 30 мм при фокусном расстоянии зеркал 100 мм) необычно велика для спектрометров такого типа – нам неизвестны модели с аналогичными характеристиками. Последнее обеспечивает возможность применения фотоприемника большой длины, что выигрышно с точки зрения разрешения и чувствительности.

Наглядно можно представить, что наклон пластинки в одной плоскости приводит к смещению друг относительно друга мнимых изображений входной щели для лучей, лежащих во взаимно перпендикулярных плоскостях. Фактически, получается некое подобие астигматического искажения светового поля уже на входе оптической системы, которое и компенсирует астигматизм сферических зеркал объективов.

После тщательного подбора конфигурации оптической схемы с целью достичь в выбранной спектральной области размеров пятна, удовлетворяющих критерию, было найдено, что кварцевая пластинка толщиной 10 мм, наклоненная под углом около  $55^\circ$ , должна быть установлена на расстоянии 5 мм от входной щели (в различных вариантах схемы возможны небольшие вариации ее расположения).

Проанализируем, не окажутся ли потери света за счет френелевского отражения на поверхностях сильно наклоненной кварцевой или стеклянной пластинки более значительными, чем выигрыш в чувствительности из-за того, что на ПЗС-линейку будет попадать больше света. Оценочные расчеты показали, что при угле наклона кварцевой пластинки  $54,8^\circ$  через нее проходит 99,9 % света с направлением поляризации в плоскости угла наклона пластинки и 76,5 % света с направлением поляризации в перпендикулярной плоскости, то есть всего проходит примерно 88,9 % падающего на пластинку света. Потери из-за френелевского отражения (порядка 10–15 %) гораздо меньше потерь чувствительности вследствие абберационных искажений пятна, так как при этом из-за большой высоты светового пучка на детектор попадает в лучшем случае лишь 60 % света.

С учетом полученных результатов был создан технический эскиз простой схемы спектрометра с рефлексивными объективами и плоскопараллельной кварцевой пластинкой для коррекции астигматизма. В настоящее время ведутся работы по изготовлению оптических элементов и постройке макета прибора.

**Как ожидается, новый способ коррекции астигматизма в спектрометрическом оборудовании позволит значительно улучшить его характеристики при относительно невысоких затратах на изготовление, что положительно скажется на конкурентоспособности таких приборов на рынках аналитического оборудования.**

#### Литература

1. *Hanna D. C.* Astigmatic gaussian beams produced by axially asymmetric laser cavities. // IEEE J. Quantum Electron. 1969. № 10. С. 483–488.
2. *Kogelnik H.W. & al.* Astigmatically compensated cavities for CW dye lasers. // IEEE J. Quantum Electron. 1972. № 3. С. 373–379.

## ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОБУЧЕНИЯ И УМСТВЕННОГО РАЗВИТИЯ УЧАЩИХСЯ

С. Ю. Лапчук

Умственное развитие учащихся, повышение уровня которого является одной из ведущих целей обучения, представляет собой очень сложное