

УДК 543.423

ОПТИМАЛЬНАЯ СИСТЕМА ОСВЕЩЕНИЯ ВХОДНОЙ ЩЕЛИ МНОГОКАНАЛЬНЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ «ГРАНД» И «ЭКСПРЕСС»

© И. А. Зарубин¹, В. А. Лабусов^{1,2}, Д. Н. Бокк¹*Статья поступила 10 сентября 2014 г.*

Созданы ахроматы и система освещения входной щели на их основе для спектрометров с рабочим диапазоном 190 – 470 нм. Приведена зависимость остаточных хроматических aberrаций ахроматов от длины волны. Показано, что на освещенность входной щели не влияет смещение разряда в пределах ± 3 мм.

Ключевые слова: система освещения входной щели; спектрометр; линза; ахроматический конденсор; Zemax.

Спектрометры — это оптические приборы, строящие монохроматические изображения входной щели, которая является для спектрометров источником излучения, поэтому интенсивность спектральных линий, зарегистрированных фотоприемниками, зависит от яркости входной щели. В свою очередь эта яркость определяется как интенсивностью излучения анализируемой пробы, так и системой освещения входной щели спектрометра. Таким образом, эта система оказывает влияние на пределы определения элементов, а также на воспроизводимость результатов спектрального анализа. Осветительная система должна соответствовать следующим требованиям [1]:

- 1) входная щель освещается определенным участком источника излучения (аналитическим промежутком);
- 2) каждая точка входной щели равномерно освещена всеми точками источника излучения;
- 3) распределение интенсивности вдоль зарегистрированной спектральной линии равномерно;
- 4) светосила спектрометра должна быть использована максимально, т.е. излучение должно заполнить

все его относительное отверстие. Для спектрометров «Гранд» и «Экспресс» [2], построенных по схеме Пашена – Рунге, относительное отверстие — отношение диагонали заштрихованной области дифракционной решетки к расстоянию от нее до входной щели.

Среди существующих систем освещения входной щели одновременно всем требованиям удовлетворяет трехлинзовая система с промежуточным изображением (рис. 1). Первая линза строит промежуточное изображение разряда; в месте формирования изображения устанавливается диафрагма, позволяющая выбрать из аналитического промежутка интересующую область: таким образом выполняется первое требование. Необходимо, чтобы первая линза была ахроматической, т.е. строила изображение для разных длин волн на одинаковом расстоянии от линзы [3]. Кроме того, из-за малого размера аналитического промежутка первая линза должна формировать его изображение на диафрагме с увеличением, при этом размер изображения не должен превышать рабочей поверхности второй линзы.

Распределение освещенности входной щели формируется лучами, прошедшими через диафрагму, и не все лучи от источника, прошедшие через первую линзу, осветят входную щель. Это происходит из-за того, что направление распространения пучка лучей от промежуточного изображения задается не источником,

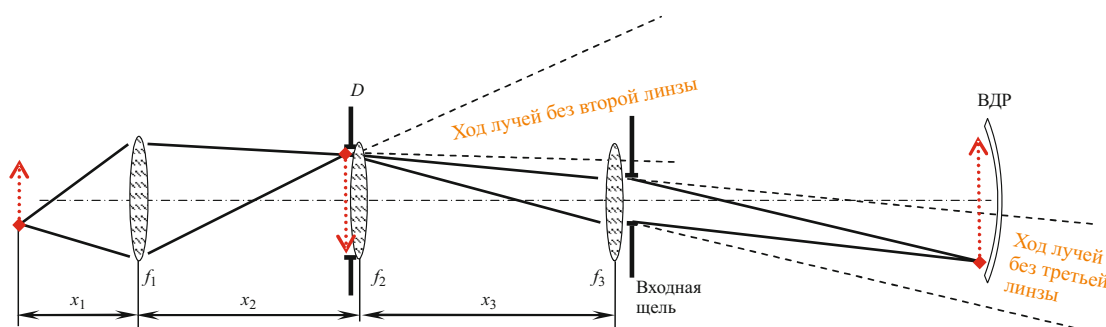


Рис. 1. Трехлинзовая осветительная система с промежуточным изображением

¹ Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, Россия; ООО «ВМК-Оптоэлектроника», г. Новосибирск, Россия.

² Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия; e-mail: zarubin@vmk.ru

а первой линзой. Данная ситуация исправляется второй линзой, которая дает изображение первой на входной щели. Благодаря этому на входной щели получается равномерно освещенный кружок и все лучи от источника, которые пройдут через первую линзу, будут участвовать в создании освещенности на входной щели, при этом изображение первой линзы должно быть не меньше высоты входной щели. Тем самым выполняется второе требование. Вторая линза также должна быть ахроматической.

На дифракционной решетке необходимо построить изображение диафрагмы. Для этого перед входной щелью устанавливается третья (антивиньетирующая) линза. От нее требуется лишь собрать все лучи, прошедшие через входную щель, на дифракционной решетке и нет необходимости в точном фокусировании изображения, поэтому эта линза может быть не ахроматической. Благодаря тому, что излучение от всех точек входной щели попадает на дифракционную решетку, все они будут участвовать в формировании регистрируемых спектральных линий, т.е. выполняется третье условие. Фокусное расстояние третьей линзы выбирается из условия совпадения размеров изображения диафрагмы на дифракционной решетке с размерами решетки. Таким образом, выполняется и четвертое требование.

Доступные ахроматические линзы (ахроматические конденсоры из двух линз, далее для краткости — ахроматы) с фокусными расстояниями 61, 75 и 150 мм, входящие в состав приборов серий ДФС и МФС, не оптимальны при использовании в спектрометре «Гранд». Во-первых, область исправления хроматизма в них не совпадает с рабочим диапазоном спектрометра, во-вторых, данные ахроматы не позволяют выбрать конфигурацию схемы, в которой при приемлемом увеличении, достигаемом с их помощью, было бы заполнено все относительное отверстие спектрометра. Создание осветительной системы, состоящей из ахроматов с исправленным хроматизмом в области 190 – 470 нм и обеспечивающей полное использование относительного отверстия спектрометра, должно привести к повышению интенсивности спектральных линий и, как следствие, к снижению пределов обнаружения элементов.

Целью данной работы является расчет оптимальной системы освещения входной щели для многоканальных спектрометров «Гранд» и «Экспресс», создание необходимых ахроматических конденсоров и испытание системы.

Поскольку относительное отверстие и спектральный диапазон для спектрометров «Гранд» и «Экспресс» примерно одинаковы, осветительная система, рассчитанная для «Гранда», подходит и для «Экспресса». Расстояния в осветительной системе выбирали так, чтобы, во-первых, изображение первой линзы соответствовало высоте входной щели, во-вторых, размер изображения на промежуточной диафрагме поз-

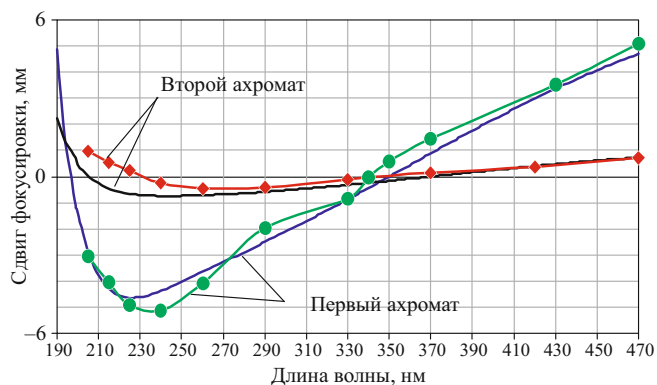


Рис. 2. Фокальный сдвиг в зависимости от длины волны для ахроматов, используемых в осветительной системе спектрометра «Гранд»

волял заполнить относительное отверстие спектрометра. Кроме того, фокусные расстояния линз должны обеспечивать построение двух осветительных систем: № 1 — для универсальных штативов, например «Глобула», и № 2 — для электродуговой установки «Поток». Размер источника в первом случае составляет примерно $2 \times 6 \text{ мм}^2$, во втором — $5 \times 5 \text{ мм}^2$. При расчете учитывали и то, что из-за конструктивной особенности расстояние от второго ахромата до щели должно быть не менее 155 мм.

Перечисленные требования наилучшим образом выполняются при использовании ахроматов с фокусными расстояниями $f_1 = 83 \text{ мм}$, $f_2 = 110 \text{ мм}$ и линзы с $f_3 = 150 \text{ мм}$ (см. рис. 1). При этом оптимальные расстояния в осветительной системе № 1 составляют $x_1 = 96$, $x_2 = 340$, $x_3 = 166 \text{ мм}$, а в осветительной системе № 2 — $x_1 = 105$, $x_2 = 277$, $x_3 = 186 \text{ мм}$.

Основная сложность расчета ахроматов для осветительной системы спектрометра «Гранд» заключается в том, что его рабочий спектральный диапазон — 190 – 470 нм. В этой области, во-первых, показатели преломления стекол имеют значительную нелинейность, во-вторых, количество стекол, обладающих высоким пропусканием во всем диапазоне спектрометра «Гранд», ограничено. Для ахроматов в качестве кроны (материала с низким показателем преломления) применяется фторид магния, в качестве флинта (материала с высоким показателем преломления) — плавленый кварц. Пара используемых в ахроматах стекол была определена с помощью программы для расчета оптических систем «Zemax» при условии минимальной хроматической аберрации в диапазоне 190 – 470 нм.

Графики, характеризующие остаточный хроматизм для первого и второго ахроматов, полученные расчетным и экспериментальным способами для осветительной системы № 1, показаны на рис. 2.

Видно, что максимальный сдвиг точки фокуса наблюдается у первого ахромата и составляет около 5 мм. Однако это не приводит к значительному увеличению размера изображения из-за расфокусировки. Это видно из рис. 3, б, на котором показаны изображе-

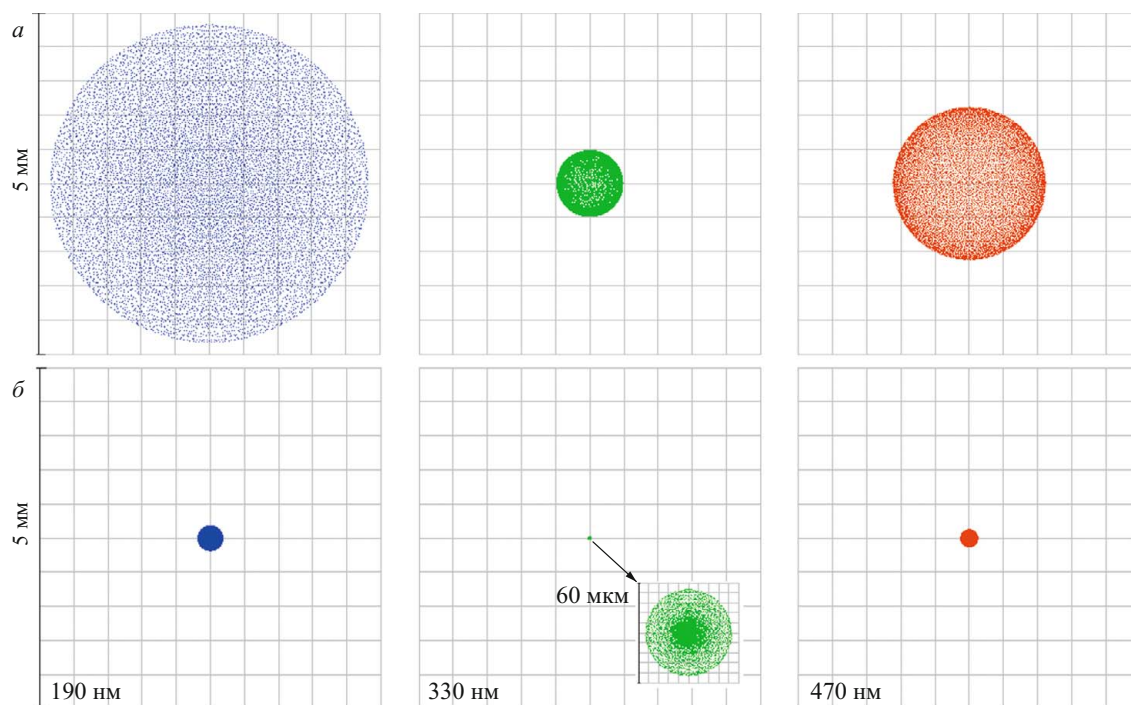


Рис. 3. Изображения точечного источника, построенные одиночной линзой (а) и ахроматом (б)

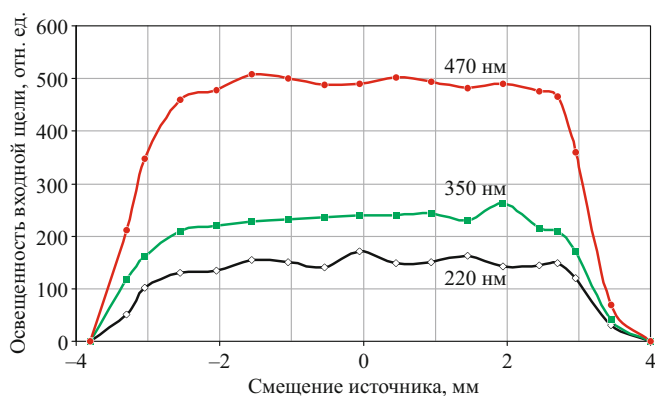


Рис. 4. Освещенность входной щели в зависимости от смещения источника излучения в осветительной системе с двумя ахроматами

ния точечного источника для длин волн 190, 330 и 470 нм, построенные первым ахроматом. Для сравнения на рис. 3, а приведены изображения, построенные одиночной линзой: на краях диапазона увеличение размера изображения точечного источника из-за расфокусировки достигает 5 мм. Это не позволяет регистрировать излучение аналитического промежутка вблизи электродов, так как в этом случае через диафрагму будет проходить излучение самих электродов.

Применение второго ахромата позволяет получить на входной щели и, следовательно, на линейках фотодиодов уровень освещенности, не зависящий от смещения источника одновременно для всех длин волн рабочего диапазона спектрометра. На рис. 4 показано экспериментально полученное распределение освещенности входной щели от источника размером

$1 \times 1 \text{ мм}^2$ в зависимости от его смещения в направлении, перпендикулярном оптической оси, для длин волн 220, 350 и 470 нм. Из рис. 4 видно, что освещенность остается практически постоянной при смещении источника на $\pm 3 \text{ мм}$. Это говорит о том, что при смещении разряда между электродами на $\pm 3 \text{ мм}$ освещенность входной щели будет оставаться постоянной.

Таким образом, рассчитаны системы освещения входной щели и созданы входящие в их состав ахроматические конденсоры для спектрометров «Гранд» и «Экспресс». В зависимости от используемого источника предложены две конфигурации осветительной системы: № 1 — для универсальных штативов типа УШТ-4, «Глобула» и др.; № 2 — для установки «Поток». Измерен остаточный хроматизм конденсоров и показано, что его значение для первого ахромата, равное $\pm 5 \text{ мм}$, не приводит к значительному увеличению размера изображения из-за расфокусировки. На примере системы № 1 показано, что освещенность входной щели не чувствительна к смещению разряда в пределах $\pm 3 \text{ мм}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прокофьев В. К. Фотографические методы количественного спектрального анализа металлов и сплавов. Ч. 1. — М.: Гостехиздат, 1951. С. 156 – 162.
2. Лабусов В. А., Путьмаков А. Н., Зарубин И. А., Гаранин В. Г. Новые многоканальные оптические спектрометры на основе анализаторов МАЭС / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 1. Ч. II. С. 7 – 13.
3. Нагибина И. М., Прокофьев В. К. Спектральные приборы и техника спектроскопии. Изд. 2-е, доп. и перераб. — Л.: «Машиностроение», 1967. — 324 с.