

Санкт-Петербургский государственный университет

**Методические указания к лабораторной работе  
«СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ  
ЯДЕРНЫХ МОМЕНТОВ»**

Давыдов Валентин Геннадьевич

Санкт-Петербург      2019

## Введение

Работа «Спектроскопическое определение ядерных моментов» (в дальнейшем – СТС, сокращение от «сверхтонкая структура») была поставлена во 2-й физической лаборатории много десятилетий назад, когда основной экспериментальной методикой регистрации спектров была химическая фотография, а анализ проявленных фотопластинок (фотоплёнок) осуществлялся при помощи оптико-механических компараторов. Однако прогресс экспериментальной физики не миновал и учебную лабораторию, что проявилось, в частности, в переходе на методику регистрации спектров при помощи цифровых многоканальных кремниевых фотоэлектрических детекторов, как правило, на основе ПЗС-линеек для одномерных спектров или матриц для двумерных массивов данных, в том числе и в работе СТС.

В то время, как физическая природа наблюдаемых процессов (как в излучающих атомах, так и в призменно-интерференционном спектрографе со скрещенной дисперсией), разумеется, осталась прежней (и подробно описанной в методической работе [1]), кардинально изменился методический подход как к процессу регистрации спектров, так и анализа полученных данных.

Настоящие указания имеют целью ознакомить студентов с современными методиками спектроскопического эксперимента и решают две задачи, встречающиеся в лабораторной работе СТС, освещение которых отсутствует в упомянутом тексте [1]: во-первых, задачу цифровой регистрации двумерных спектров при помощи инструмента, предназначенного для несколько иных задач (регистрации и анализа цветных изображений), и во-вторых, задачу извлечения спектроскопической информации из двумерного изображения с использованием доступных программных инструментов. Кроме того, дополнительное приложение содержит инструкции, касающиеся обращения со спектральной лампой и высокочастотным генератором, соблюдение которых позволит повысить стабильность их работы и сохранить ресурс электронных компонентов.

## Исследовательская видеокамера

В работе СТС в качестве фотоприёмника используется USB-видеокамера, снабжённая с завода программным обеспечением, работающим в операционной среде Microsoft Windows. Камера предназначена изготовителем для использования в качестве телевизионного окуляра в микроскопии видимого света, в силу чего имеет известные особенности: близкие к квадрату пропорции поля зрения, использование цветной ПЗС-матрицы с мозаичным светофильтром Байера, определяющим светочувствительность отдельных пикселей лишь в красной, зелёной и синей областях спектра (пиксели составляют три перемежающиеся регулярные решётки, причём зелёных пикселей  $\frac{1}{2}$  от общего числа, а красных и синих – по  $\frac{1}{4}$ ), основной режим работы – вывод видеоизображения в реальном времени, развитые средства анализа изображения от распознавания образов до сохранения данных в форматах, сжатых с потерями (JPEG). В то же время средства контроля темнового тока рудиментарны, а автомат регулировки экспозиционных параметров настроен на качественную информативность изображения (чёткость границ, сочность цветов и т. д.) без привязки к таким количественным параметрам, как динамический диапазон, соотношение сигнала к шуму и т. п.

В разделе «Setup – Video Source Property» имеются регулировки экспозиционных параметров. Можно задать два режима экспозиции, ручной либо автоматический. В автоматическом режиме доступен единственный параметр «Target» – яркость изображения, которой стремится достигнуть автомат. В ручном режиме доступны два параметра: время экспозиции (Time) и усиление (Gain). Видимая на экране яркость изображения пропорциональна произведению этих двух параметров, в то время как количество зарегистрированного света, и, следовательно, объём доступной информации, определяются только экспозицией. Более того, чрезмерное увеличение усиления приводит к потере информации из-за цифрового насыщения, когда максимальное значение яркости хотя бы в одном канале ограничивается разрядностью представления данных. На практике это означает, что в ручном режиме усиление следует выставить минимальным, время экспозиции – удобным с точки зрения экспериментатора (скажем, не более 1 секунды), а количество света увеличивать при помощи оптимального режима работы спектральной лампы (подробнее см. в Приложении) и тщательной фокусировки её изображения на входную щель спектрального прибора. Также следует убедиться в должной фокусировке камерной части спектрографа, визуально контролируя резкость изображения.

После настройки экспозиции в режиме реального времени следует сделать «чистовой» снимок с помощью соответствующей кнопки. Программа покажет его в виде изображения. Если качество изображения неудовлетворительно (например, произошёл сбой экспонаметров в процессе перехода от непрерывной к однократной записи, приведший к насыщению), процедуру настройки следует повторить. Удовлетворительное изображение сохранить в файл (Save as...). Следует иметь в виду, что по умолчанию программа сохраняет файл в формате, сжатом с потерями (хоть и небольшими). При наличии достаточного ресурса памяти имеет смысл

использовать формат без потерь, например, PNG. Экспозицию можно повторить несколько раз, пользуясь тем, что полезное изображение в разных файлах будет занимать одни и те же пиксели.

## Извлечение информации

Обе исследуемые спектральные линии дублета  $6^2P \rightarrow 5^2S$  рубидия находятся в синей области (длина волны около 420 нм), в силу чего регистрируются только синечувствительными пикселями матрицы. Поэтому первым делом следует извлечь из файла синий канал, отбросив красный и зелёный.

Как упоминалось выше, физических синечувствительных пикселей в матрице только  $\frac{1}{4}$  от общего их числа, так что масштабирование (уменьшение) картинки вдвое по каждому из измерений не приведёт к потере информации (если пренебречь ошибками округления). На этом же этапе имеет смысл просуммировать несколько изображений, если таковые были зарегистрированы, в одно итоговое.

Следующий этап обработки связан с выделением интерференционных колец. По теореме Пифагора квадрат волнового вектора в плоскости интерферометра  $k_{\parallel}^2 = k_x^2 + k_y^2$ , поэтому формула (9) из работы [1] справедлива без каких-либо модификаций не только вдоль диаметра колец, но и вдоль любой хорды. В частности, и вдоль любой строки изображения. Тем самым, для анализа достаточно найти строки, полностью накрываемые искривлённым изображением щели. При хорошем качестве изображения (равномерном освещении и симметричном расположении изображения спектральной линии относительно координат кадра) можно сделать это автоматически, просто найдя строку с максимальной суммарной яркостью.

Найденную строку можно выделить и рассмотреть как одномерный набор данных  $f(x)$ , в которых номер отсчёта  $x$  играет роль координаты, а значение  $f$  соответствует интенсивности. В принципе, эти данные уже можно подставлять в вышеупомянутую формулу (9), однако для наглядности можно перенормировать координату по параболе  $x^* = (x - x_0)^2$ . При должном выборе  $x_0$  зависимость частоты от новой координаты становится линейной (хотя бы в пределах одного порядка интерференции) и формула существенно упрощается. Более того, (не)совпадение максимумов двух ветвей параболы позволяет наглядно увидеть и количественно оценить систематическую погрешность, вызванную несовершенством оптической системы (геометрическими искажениями).

Все вышеперечисленные операции удобно проделывать при помощи общедоступного программного обеспечения (перекодирование и переформатирование изображения – `netpbm`, выделение максимально яркой строки – `sqlite`, построение графика и нахождение максимумов – `gnuplot`), хотя не возбраняется пользоваться и другими инструментами, такими как `excel`, `matlab`, `origin`, `magic plot` и т. д., если они более привычны.

## Приложение

В качестве источника света в работе используется безэлектродная спектральная лампа, представляющая собой герметично запаянную сферу из кварцевого стекла, содержащую небольшое количество рубидия (изотопно очищенный  $^{87}\text{Rb}$ ) и буферный инертный газ (аргон) при давлении несколько Торр. Для возбуждения разряда лампа помещается в высокочастотное электромагнитное поле, создаваемое проволочной катушкой, подключённой к автогенератору на радиолампе 6Н23П. Генератор питается стабилизированным напряжением от регулируемого источника питания.

В холодном состоянии весь рубидий сконденсирован на дне сферы, аргон не проводит, поэтому после включения питания и прогрева накала радиолампы генератор работает вхолостую. Для создания начальной ионизации используется ручная катушка Тесла, при этом напряжение питания генератора имеет смысл увеличить до 300 В. Зажёгшийся высокочастотный разряд начинает потреблять мощность, и ток генератора возрастает. Во избежание перегрева и выхода из строя генератора следует уменьшить напряжение питания так, чтобы потребляемая мощность не превышала максимально допустимой (5 Вт для указанной радиолампы, т. е. при напряжении 120–130 В ток не должен превышать 40 мА).

Мощность, выделяющаяся в разряде, разогревает шаровую лампу, рубидий испаряется и начинает излучать характерный «рубиновый» свет (откуда и пошло название элемента). При перегреве лампы концентрация паров рубидия повышается настолько, что меняются электрические характеристики разряда. Возникает тепловая неустойчивость, лампа мерцает с периодом несколько секунд. Перед измерениями следует установить оптимальный режим генератора, при котором лампа светит достаточно ярко, но в то же время устойчиво, и дождаться установления её температуры. В зависимости от температуры в помещении и конкретного экземпляра радиолампы этот режим составляет 80–100% от максимального.

Изображение лампы фокусируется линзой на входную щель спектрографа, при этом разные части щели (и, соответственно, разные части изображения щели в камере) получают свет от разных частей лампы, излучающих с разной яркостью. Поэтому для получения однородного освещения приходится регулировать положение линзы по всем трём координатам. На практике легко удаётся получить разницу освещённостей не более, чем вдвое, на 80% площади щели.

## Литература

[1] СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЯДЕРНЫХ МОМЕНТОВ

[http://lab2.phys.spbu.ru/pdf\\_to/LAB2\\_86.PDF](http://lab2.phys.spbu.ru/pdf_to/LAB2_86.PDF), проверено 22.03.2017.