

ОПТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ М-ОБРАЗНОЙ И ПЕРЕКРЁСТНОЙ КОНФИГУРАЦИЙ РАМАНОВСКИХ СПЕКТРОМЕТРОВ ЧЕРНИ-ТЁРНЕРА

М.Э. Парфёнов, Д.Н. Артемьев

«Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара

Ключевые слова: рамановский спектроскоп, фотодиоды, моделирование оптических систем

В данной работе рассмотрены две из наиболее распространённых конфигураций рамановских спектрометров, выполненных по схеме Черни-Тёрнера [1], обеспечивающей эффективность и компактность устройств: перекрёстная и м-образная, численное моделирование которых проведено с использованием специализированного программного пакета симуляции оптических систем (с возможностью трассировки лучей).

Целью настоящей работы является численное моделирование двух конфигураций рамановских спектрометров, сравнение их спектральных характеристик, габаритов и потенциала модернизации.

Для реализации поставленной задачи были подобраны элементы оптической схемы и выполнено их соответствующее двум конфигурациям расположение внутри программного пакета.

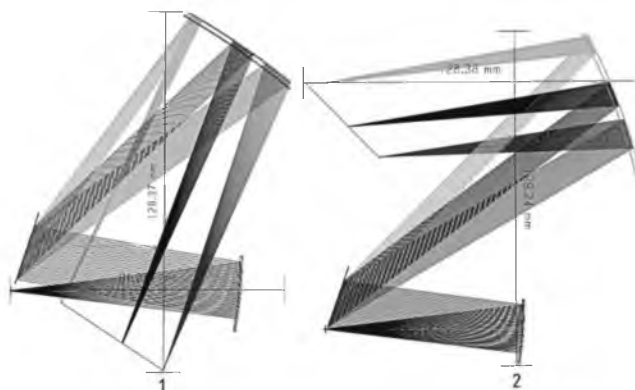
Обе конфигурации выполнены на одинаковых элементах для обеспечения корректного сравнения. В оптических схемах использованы параболические зеркала с серебряным покрытием (фокусное расстояние 76,2 мм) – данное решение позволяет практически полностью избавиться от сферических aberrаций при отличной отражательной способности (>97%) [2]. Дифракционная решётка с 1200 линиями на мм, позволяющая эффективно (80% отражения по первому порядку) распределить диапазон длин волн по всей длине детектора.

В последнее время проявляется повышенный интерес к области длин волн от 750 нм, поэтому рассматриваемый диапазон излучения находился в пределах от 800 до 920 нм. Данная область характеризуется низким значением интенсивности флуоресценции или полным её отсутствием, что делает её привлекательной для приложений, в которых требуется минимальное влияние флуоресцентного фона или для приложений, где отсечь флуоресцентную порцию излучения – крайне затруднительно. Излучение поступает в щель, которая имеет ширину и высоту соответственно 20 мкм и 3 мм. Данная щель является стандартизированной для применений в подобных системах.

Изображение в конечном итоге приходит на фотодиодный детектор, с

характерными размерами пикселей в 4,4 и 0,9 мм (46 пикселей). В отличие от ПЗС-матриц (CCD), фотодиодные линейки обладают более крупными размерами пикселей, что приводит к снижению спектрального разрешения, однако имеют ряд технологических преимуществ: отсутствие необходимости в охлаждении, меньшие требования к юстировке, более высокая скорость отклика. Спектральный же отклик в выбранном диапазоне – в большинстве случаев выше.

Начальное расположение элементов требуется оптимизировать, по возможности минимизируя область пятна излучения на плоскости детектора. Поскольку характерные размеры пикселей детектора достаточно велики в фотодиодных детекторах (для сравнения, у CCD детекторов они могут быть в пределах единиц и десятков микрометров) – размер пятна не будет определяющим спектральное разрешение фактором. Наиболее важно расположить весь диапазон равномерно по всей плоскости детектора. Оптимизация проводилась при помощи функции качества с варьированием углов элементов. Расположение после оптимизации продемонстрировано на рисунке 1.

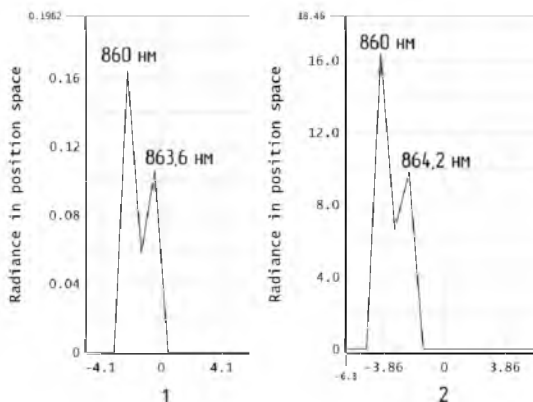


1 – крестообразного типа, 2 – м-образного типа
Рисунок 1 – Оптические схемы Черни-Тёрнера

Размеры пятен на детекторах крестообразной и м-образной конфигураций соответственно достигают 600 и 200 мкм. Разница достаточно большая, но такая конфигурация занимает приблизительно на 51% меньше площади (10920 и 16512 мм² соответственно), т.е. значительно компактнее, а размер пятна всё равно меньше характерного размера пикселя детектора, что не приведёт к сливанию спектральных пиков. После трассировки лучей был произведён анализ спектрального разрешения двух конфигураций (рис. 2).

Спектральное разрешение в м-образной конфигурации составило 3,6 нм, что соответствует рамановскому сдвигу в $\sim 48 \text{ см}^{-1}$, а в крестообразной – 4,2

нм, что соответствует сдвигу в $\sim 57 \text{ см}^{-1}$. Разница спектральных разрешений присутствует, но не является критической и для большинства применений обоих устройств будет достаточно: м-образное устройство обладает лучшим спектральным разрешением, лучшей способностью к модернизации (в силу меньших пятен на плоскости детектора), но габаритно больше, а крестообразная конфигурация компактнее, но обладает меньшим разрешением и это разрешение сложно будет улучшить даже при уплотнении линеек фотодиодов, т.к. пятна в данном случае уже порядка 600 мкм в ширину.



1 – на м-образной конфигурации, 2 – на перекрёстной конфигурации
Рисунок 2 – Фрагмент картины излучения

Таким образом, выбор конфигурации определяется приоритетами: м-образная схема предпочтительна при необходимости более высокого спектрального разрешения, тогда как крестообразная — при ограничениях по габаритам. Обе конфигурации останутся функционально пригодными для большинства практических задач.

Список использованных источников

1. Черни М., Тернер А.Ф. Об астигматизме в зеркальных спектрометрах // Zeitschrift für Physik. — 1930. — Т. 61. — С. 792–797.

2. ThorLabs Web Site [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=903 (дата обращения: 02.03.2025).

Парфёнов Михаил Эдуардович, студент гр. 6231-030401D.,
m.parfyonov@icloud.com

Артемьев Дмитрий Николаевич, к.ф.-м.н., доцент каф. лазерных и биотехнических систем, artemyevdn@ssau.ru