

Расчет фокусирующей системы производился на основе ABCD –метода. Для ранее предложенной двухлинзовой системы фокусировки были определены положение и размеры изображения перетяжки лазерного пучка. Излучение накачки может быть сфокусировано в пятно диаметром около 120 мкм. График изменения размера пучка накачки при распространении вдоль оптической оси представлен на рисунке 2.

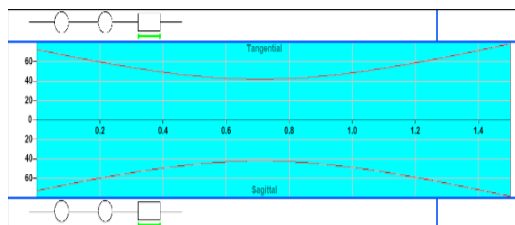


Рисунок 2 – График изменения размера пучка накачки внутри активного элемента

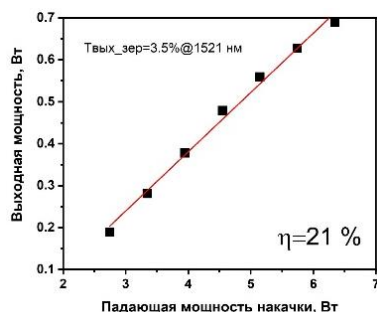


Рисунок 3 – Зависимость выходной мощности лазерной генерации от падающей мощности накачки лазерного диода

В соответствии с разработанной методикой сборки узлов крепления и юстировки оптических деталей была произведена сборка макета лазера. Путем юстировки выходного зеркала резонатора при падающей мощности накачки около 2 Вт получена лазерная генерация в спектральной области 1,5–1,6 мкм. Максимальная выходная мощность в непрерывном режиме генерации была получена при использовании выходного зеркала с пропусканием 3,5 % на длине волны генерации.

В непрерывном режиме генерации было получено лазерное излучение с максимальной выходной мощностью до 700 мВт на длине волны 1521 нм. Порог генерации по падающей мощности накачки составил около 2 Вт. Выходное излучение лазера было неполяризованным. На рисунке 3 приведена зависимость выходной мощности лазерной генерации от падающей мощности накачки лазерного диода.

Профиль распределения интенсивности в поперечном сечении лазерного пучка хорошо аппроксимировался функцией Гаусса, значение параметра распространения лазерного пучка M^2 -фактор не превышало 1,2 (рисунок 4). Таким образом, расходимость генерируемого излучения была близка к дифракционно-ограниченной.

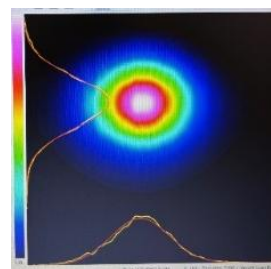


Рисунок 4 – Пространственный профиль пучка генерации

Внешний вид разработанного образовательного лабораторного комплекса для изучения принципов работы и основных элементов современных твердотельных лазеров с диодной накачкой приведен на рисунке 5.

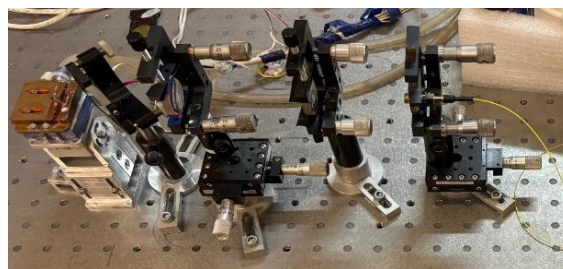


Рисунок 5 – Внешний вид комплекса

УДК 681

КОРРЕКЦИЯ ПАНОРАМНЫХ СПЕКТРОВ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ АНАЛИЗА СОДЕРЖАНИЯ МИКРОПЛАСТИКОВ

Гордейко Р. В.^{1,2}, Шашков С. Н.¹, Маляревич А. М.²

¹ООО «СОЛ инструментс»

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Аннотация. Одной из ключевых задач современной спектроскопии комбинационного рассеяния является получение высококачественных спектров в широком диапазоне волновых чисел при сохранении высокого разрешения. В данной работе описывается проблема возникновения артефактов при «сшивке» отдельных спектральных участков в панорамный спектр и предлагается решение в виде специально разработанного программного алгоритма для автоматической коррекции этих неточностей. Проведена апробация алгоритма на образцах, содержащие микропластики.

Ключевые слова: комбинационное рассеяние, спектральное разрешение, панорамный спектр, программный алгоритм, микропластики.

CORRECTION OF PANORAMIC RAMAN SPECTRA AND ITS APPLICATION FOR MICROPLASTICS CONTENT ANALYSIS

Gordeyko R. V.^{1,2}, Shashkov S. N.¹, Malyarevich A. M.²

¹Ltd. "SOL instruments"

²Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. One of key challenges in modern Raman spectroscopy is obtaining high-quality spectra over a wide range while maintaining high resolution. The paper describes the problem of artifacts arising when stitching individual spectral regions into a panoramic spectrum and proposes a solution in the form of a specially developed software algorithm for automatic correction of these inaccuracies. The algorithm was tested using samples containing microplastics.

Keywords: raman spectroscopy, spectral resolution, panoramic spectrum, software algorithm, microplastics.

Адрес для переписки: Малеяревич А. М., пр. Независимости, 65, г. Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: malyar@bntu.by

Спектроскопия комбинационного рассеяния (КР) широко используется для идентификации веществ, так как она позволяет анализировать молекулярный состав веществ по их уникальным колебательным спектрам, которые являются своего рода их «визитной карточкой». Сравнивая зарегистрированные КР спектры с библиотекой известных спектров, можно точно определить состав и структуру образца. Спектры КР должны при этом регистрироваться в широком спектральном диапазоне ($100\text{--}4000\text{ см}^{-1}$) и с достаточным спектральным разрешением, позволяющим хорошо детализировать структуру колебательных полос. Для этого используются дифракционные решетки с большой дисперсией, которые в свою очередь имеют высокую разрешающую способность.

Также в современных спектральных приборах используются охлаждаемые высокочувствительные матричные детекторы (ПЗС). Недостатком последних является их ограниченный размер, вследствие чего на детектор помещается довольно ограниченный участок спектра хорошего разрешения. Для получения спектра с приемлемым разрешением в широком спектральном диапазоне ($100\text{--}4000\text{ см}^{-1}$, например), необходимо регистрировать ПЗС детектором отдельные участки спектра с их дальнейшей стыковкой (получение панорамных спектров). Для автоматизации данного процесса применяется специально разработанное программное обеспечение.

При этом получившийся панорамный спектр в местах стыковки, как правило, имеет артефакты в виду, например, непостоянства фоновых сигналов, неточностями в позиционировании решетки при регистрации отдельных спектральных интервалов (рисунок 1). Для получения корректного спектра требуется довольно продвинутое математическое обеспечение, позволяющее заменить перекрывающиеся участки спектра одним согласованным, минимизировать скачки интенсивностей в местах «сшивки» участков спектров и т. п. [1].

Процесс обработки экспериментальных данных состоит из трех ключевых этапов:

1. Идентификация областей перекрытия в спектре. На данном этапе анализируется спектр с целью обнаружения областей перекрывания по оси волновых чисел. Определяются границы этих областей и находятся общие для обоих сегментов диапазоны значений.

2. Приведение участков спектра к единой шкале. В обнаруженных областях перекрытия данные из разных спектральных сегментов могут быть изначально представлены в различающихся сетках волновых чисел. Для обеспечения точного сопоставления интенсивностей выполняется интерполяция данных. Это означает, что значения интенсивности для каждого из объединяемых участков пересчитываются на общую, единую сетку волновых чисел. Данная процедура гарантирует, что каждому значению на новой шкале будет соответствовать пара корректно сравнимых значений интенсивности из обоих спектров.

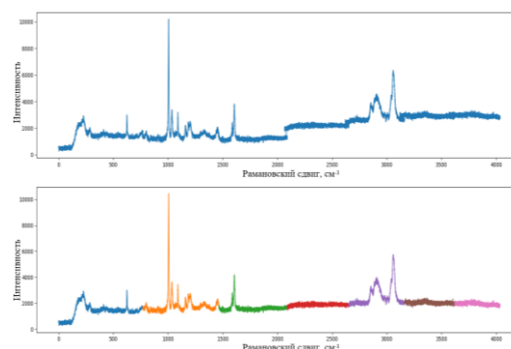


Рисунок 1 – Зарегистрированный (вверху) и обработанный (внизу) панорамный спектр

3. «Сшивание» участков спектра и формирование непрерывной кривой.

Финальный этап заключается в непосредственном объединении данных. В области перекрытия вычисляется результирующее значение интенсивности для каждого волнового числа. За пределами зон перекрытия используются данные из соответствующего уникального сегмента без изменений.

В результате формируется новая, цельная спектральная кривая, характеризующаяся плавными переходами и пригодная для последующего анализа (количественного или качественного) как единый объект.

С целью проверки применимости алгоритма коррекции спектров и его последующего использования для идентификации веществ по спектральным базам, проведена регистрация и корректировка спектров микропластиков, обнаруженных в рыбных консервах (рисунок 2).



Рисунок 2 – Оптическое изображение микропластиков в одной из рыбных консерв (отмечены кружками)

Пример одного из спектров приведен на рисунке 3. Экспериментальный спектр, обработан-

ный алгоритмом, идентифицируется как соответствующий полистиролу. В исследуемой пробе обнаруживаются дополнительно также микроскопические фрагменты полиэтилена, нейлона и полиамида.

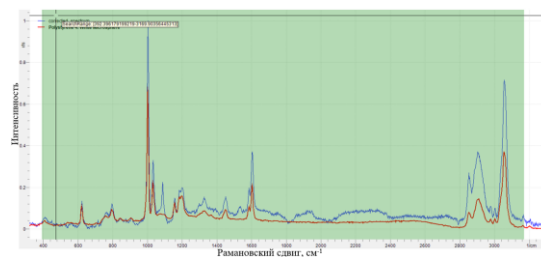


Рисунок 3 – Идентификация спектра исследуемого вещества (полистирол)

Таким образом, разработанный нами программный алгоритм позволяет производить быструю обработку панорамных спектров, устранять неточности (ошибки) и в последующем идентифицировать микропластики, например, в продуктах питания.

Литература

1. Stackoverflow: [сайт]. – URL: <https://stackoverflow.com/lfnfj,hfotybz>: 12.08.2025).

УДК 776.1:621.3.049.771

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА КОМПЕНСАЦИИ ДИФРАКЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В ФОТОЛИТОГРАФИИ

Грудько Е. Н.¹, Савицкая Е. А.¹, Есман Д. Ю.^{1,2}, Рум В. Т.³, Федорцев Р. В.^{1,2}

¹УО «Национальный детский технопарк»

²Белорусский национальный технический университет

³ОАО «Планар»

Минск, Беларусь

Аннотация. В работе представлен анализ и экспериментальное исследование метода компенсации дифракционных эффектов в проекционной фотолитографии путем введения прозрачной жидкости между фотошаблоном и кремниевой пластиной. Метод основан на использовании жидкости с высоким показателем преломления, что приводит к увеличению числовой апертуры проекционной системы и снижению критического размера структуры без изменения длины волны экспонирования. Дополнительно жидкость уменьшает амплитуду стоячих волн в фоторезисте, устраняя интерференционные картины и повышая однородность получаемого рисунка. Полученные данные подтверждают эффективность иммерсионной фотолитографии как метода компенсации дифракционных эффектов и демонстрируют ее перспективность для дальнейшего уменьшения размеров элементов.

Ключевые слова: фотолитография, фоторезист, дифракционные эффекты, интерференционные картины, подложка.

STUDY OF THE METHOD OF COMPENSATION OF DIFFRACTION EFFECTS IN PHOTOLITHOGRAPHY

Grudko E. N.¹, Savitskaya E. A.¹, Yesman D. Y.^{1,2}, Rum V. T.³, Fiodartsau R. V.^{1,2}

¹Educational Institution "National Children's Technopark"

²Belarusian National Technical University

³JSC «Planar»

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The paper presents an analysis and experimental study of a method for compensating diffraction effects in projection photolithography by introducing a transparent liquid between a photo template and a silicon wafer. The method is based on the use of a liquid with a high refractive index, which leads to an increase in the numerical aperture of the projection system and a decrease in the critical size of the structure without changing the exposure wavelength. Additionally, the liquid reduces the amplitude of standing waves in the photoresist, eliminating interference patterns and increasing the uniformity of the resulting pattern. The data obtained confirm the effectiveness