

используется для восстановления голограммы, а второй элемент несет информацию. Но это не единственный вариант использования ГОЭ.

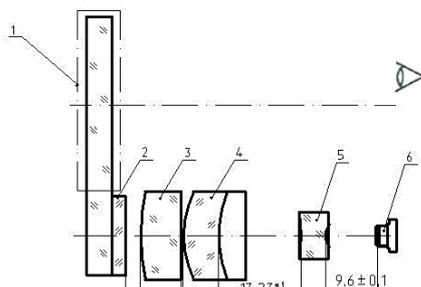


Рисунок 4 – эскиз оптической схемы голографического прицела световодного типа:  
1 – голограмма прицельной марки;  
2 – голографическая дифракционная решетка;  
3–5 – объектив; 6 – лазерный диод

К примеру использование двух голографических дифракционных решеток: одна отражательная, другая пропускающая переносят информацию сформированную на ЖК-матрице

Также использование ГОЭ представляет особый интерес в реализации очков дополненной реальности или AR-очков.

Исходя из вышеизложенного, используя свойства ГОЭ и комбинируя их в различных композициях можно получить различные опико-электронные приборы с техническими характеристиками лучше, чем у аналогов, в которых используется классическая оптика.

#### Литература

1. Могильный В.В. Полимерные фоторегистрирующие материалы и их применение. – Мн. : БГУ, 2003. – 116 с.
2. Андреева О.В. Прикладная голография. Учебное пособие. – СПб: СПбГУИТМО, 2008. – 184 с.
3. Корешев С.Н. Основы голографии и голограммной оптики, Учебное пособие. – СПб: СПбГУИТМО, 2009. – 97 с.
4. Корешев С.Н., Шевцов М.К. Оптические системы голографических коллиматорных прицелов. Оптический журнал. – 2015. – Т. 82. – № 9. – С. 22–28.
5. Корешев С.Н., Шевцов М.К. Голографический прицел световодного типа с синтезированным зрачком. Оптический журнал. – 2018. – Т. 85. – № 3. – С. 38–42.

УДК 681.7.063:681.7.064.43

### РАМАН ФИЛЬТРАЦИЯ В СРЕДСТВАХ ОПТИЧЕСКОЙ БИМЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Гапонюк А.А., Безуглый М.А.

Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского  
Киев, Украина

Данная работа посвящена анализу средств и принципов спектроскопии рассеяния при использовании рамановских фильтров в задачах оптической биомедицинской диагностики, в частности при определении уровня глюкозы.

В работе «Using Raman spectroscopy to characterize biological materials» описан специальный протокол для рамановской микроспектроскопии, который может быть применен к исследованию различных биологических образцов независимо от приборов и программного обеспечения конкретного производителя. Дисперсионные спектрометры комбинационного рассеяния используют специализированные фильтры Рэлея или многоступенчатые монохроматоры, в которых присутствует недостаток пропускной способности при их использовании. Поэтому чаще используется одиночный монохроматор в сочетании с фильтрами Рэлея. Недисперсионные спектрометры часто используют преобразования Фурье на основе интерферометра Майкельсона. Однако, чаще используются голографические режекторные и диэлектрические edge фильтры. Металл-оксидные edge фильтры имеют гораздо больший срок службы, чем режекторные фильтры. Стекланные предметные стекла, которые обычно используются в оптической микроскопии в

качестве субстрата, являются исключительно экономически эффективными и имеют сильную фоновую флуоресценцию на большинстве длин волн, за исключением длины 532 нм. Для минимизации фоновых сигналов используются стекланные предметные стекла с металлическим (алюминиевым или золотым) покрытием, которое эффективно устраняет сигналы стекла. Фторид кальция, кварц или плавленый кварц как субстрат имеют минимальные фоновые помехи. Предметные стекла с фторид бария также используются в качестве рамановских и инфракрасных субстратов, но такие есть частично растворимыми в воде [1].

Работа «Volume Bragg Gratings as Ultra-Narrow and Multiband Optical Filters» демонстрирует последние достижения технологий VBG (от англ. «volume Bragg gratings» – объемные решетки Брэгга), которые используются для разработки уникальных оптических фильтров для спектроскопии комбинационного рассеяния. Высокоэффективные объемные решетки Брэгга записаны в объеме PTR стекла (от англ. «photo-thermorefractive glass» – фото-термо-рефракционное стекло) обеспечивают возможности оптической фильтрации с плотностью до 50 дБ и шириной линии до 1 см<sup>-1</sup>. Показано также мультиплексные

ультра-узкие полосовые VBG фильтры с сильным отражением на нескольких длинах волн. Спектры комбинационного рассеяния полученные с использованием широкополосных фильтров на основе VBG и одноступенчатых спектрометров показывают способность фильтров обеспечивать одновременный доступ к стоксовым и антистоксовым рамановским модам с частотами до  $5 \text{ см}^{-1}$ . Есть несколько типов решеток Брэгга: передающая решетка, TBG (от англ. «transmitting Bragg grating») когда дифрагированный пучок света пересекает заднюю поверхность; отражающая решетка, RBG (от англ. «reflecting Bragg grating») когда дифрагированный пучок света пересекает переднюю поверхность; в случае чирпированной решетки, CBG (от англ. «chirped Bragg grating») ее период изменяется либо вдоль, либо поперек направления распространения светового пучка. Минимальная ширина линии тонкопленочных фильтров определяется количеством эпитаксиальных слоев, которые могут быть нанесены на подложку без деградации. В отражающих решетках (RBG) это количество может составлять более 10000 в отличие от тонкопленочных фильтров, где количество составляет около 100. Голографические фильтры, созданные из дихроичных желатиновых и других полимерных материалов, в отличие от стеклянных VBG ограничены в использовании, так как практически достижимая толщина полимерных материалов не может превышать 10 мкм. Возможен вариант записи нескольких дифракционных решеток в PTR стекле: VBG могут быть мультиплексированы в одном объеме для различных комбинаций длин волн и углов. Для выявления слабых рамановских мод релеевский сигнал должен быть подавлен минимум на 6 порядков. Режекторные фильтры имеют частоту среза  $200 \text{ см}^{-1}$ , поэтому одновременные измерения антистоксовых и стоксовых мод ограничены этим частотным диапазоном. Edge фильтры позволяют измерять рамановского смещение до  $50\text{-}100 \text{ см}^{-1}$ , но только по одну сторону лазерной линии. Большинство лазерных источников в рамановской спектроскопии, имеют шум сильнее, чем  $-60 \text{ дБ}$ , например, усиленное спонтанное излучение, плазменные линии и т.п., и для обнаружения слабых низкочастотных рамановских мод без спектрального шума лазерная линия должна быть очищена до  $-60 \text{ дБ}$  и ниже. Тонкопленочные полосовые фильтры не удаляют шум ближе, чем на  $100\text{-}200 \text{ см}^{-1}$  к центральной линии волны лазера. VBG с отражающей геометрией, могут удалять спектральный шум до  $-60\text{-}70 \text{ дБ}$ . Типичная дифракционная эффективность BPF составляет около 95%, потеря полезного сигнала - около 5%, стандартные углы отклонения - около 20 градусов. Многополосные BNF фильтры могут иметь любую комбинацию длин волн в диапазоне от 400-2000 нм [2].

Опыты по созданию прототипа оптического глюкометра с эллипсоидальными рефлекторами основанные на рамановской спектроскопии при взаимодействии инфракрасного лазерного излучения с биологическим объектом продемонстрировали возможность создания неинвазивного прибора для контроля уровня сахара в крови. Комбинационное рассеяние, полученное при таком взаимодействии, собирается эллипсоидальными рефлекторами и направляется через edge фильтры (для удаления спектральной линии лазера) на фотоприемники с последующей их обработкой [3, 4].

Авторами работы «Critical-depth Raman spectroscopy enables home-use non-invasive glucose monitoring» продемонстрировано разработку настольного конфокального спектрометра для использования в домашних условиях пациентами с диабетом. Измерения уровня глюкозы осуществляется по методу комбинационного рассеяния на «предельной глубине» в области основания большого пальца (тенар). Для облучения участка кожи используется лазерный диод с длиной волны 830 нм. После взаимодействия с возбуждающим излучением вместе с полезным рамановским сигналом генерируется рассеянный свет Рэлея и флуоресцентный фон, которые подавляются дихроичным зеркалом и длинноволновым фильтром [5].

В исследовании «A Noninvasive Accurate Measurement of Blood Glucose Levels with Raman Spectroscopy of Blood in Microvessels» авторы показали получения спектров комбинационного рассеяния крови фокусируя лазерное излучение на микрососудах в поверхностном слое ногтевой складки для неинвазивного определения глюкозы. Прогноз глюкозы в 12 добровольцев показал такую эффективность, что 100% прогнозируемых концентраций глюкозы попали в область А и В сетки ошибок Кларка. В исследовании была использована портативная система когерентной томографии с лазерным диодом с длиной волны 830 нм. После взаимодействия с лазерным излучением полученный сигнал был отфильтрован двойным фильтром Рэлея. Далее сигнал было демодулировано с помощью усилителя и фильтра нижних частот [6].

Исходя из полученных аналитических данных и принципов, заложенных авторами для идентификации тканей, молекулярных и модифицированных структур [7, 8], планируется адаптация метода фотометрии эллипсоидальными рефлекторами для определения стоксовых и антистоксовых сдвигов различных веществ с помощью рассмотренных средств рамановской фильтрации.

#### Литература

1. Butler H. J. et al. Using Raman spectroscopy to characterize biological materials //Nature protocols, 2016. – Т. 11. – №. 4. – С. 664.
2. Glebov A. L. et al. Volume Bragg gratings as ultranarrow and multiband optical filters //Micro-Optics 2012. –

International Society for Optics and Photonics, 2012. – Т. 8428. – С. 84280С.

3. Bezuglyi M. et al. The non-invasive optical glucometer prototype with ellipsoidal reflectors //2018 IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). – IEEE, 2018. – С. 1-4.

4. M. Bezuglyi, N. Bezuglaya, Raman spectroscopy principles for in vivo diagnostic by ellipsoidal reflectors // Electrical, Control and Communication Engineering, 2019, Vol. 15, No.1 pp.39-46.

5. Lundsgaard-Nielsen S. M. et al. Critical-depth Raman spectroscopy enables home-use non-invasive glucose

monitoring //PloS one. – 2018. – Т. 13. – №. 5. – С. e0197134.

6. Li N. et al. A Noninvasive Accurate Measurement of Blood Glucose Levels with Raman Spectroscopy of Blood in Microvessels //Molecules. – 2019. – Т. 24. – №. 8. – С. 1500.

7. M.A. Bezuglyi, et al. Angular Photometry of Biological Tissue by Ellipsoidal Reflector Method // Devices and Methods of Measurements. 2019, vol. 10, no. 2, pp. 160–168.

Bezuglyi M.A., Bezuglaya N.V., Helich I.V. Ray tracing in ellipsoidal reflectors for optical biometry of media. Appl Opt., 2017, no. 56 (30), pp. 8520–8526.

УДК 528.8; 629.78

### **АВИАЦИОННЫЙ МОДУЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМКИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ «МУЛЬТИСКАН»**

**Беляев Б.И., Домарацкий А.В., Ивуть П.В., Кучинский П.В., Нестерович Э.И.,  
Хомицевич А.Д., Чумаков А.В.**

*Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем  
имени А.Н. Севченко» БГУ  
Минск, Республика Беларусь*

Выполнение национальной космической программы и развитие Белорусской космической системы дистанционного зондирования Земли являются приоритетными направлениями развития научно-технической деятельности в Республике Беларусь.

В НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ в течении многих лет ведутся разработки аппаратно-программных средств и комплексов для дистанционной диагностики состояния различных сред и объектов [1]. В настоящее время в рамках мероприятия подпрограммы 7 «Исследование и использование космического пространства в мирных целях» Государственной программы «Наукоемкие технологии и техника» на 2016-2020 годы в отделе аэрокосмических исследований разрабатывается модульный комплекс мультиспектральной съемки (МКМС) «Мультискан».

«Мультискан» представляет собой модульный комплекс, предназначенный для решения прикладных задач различных отраслей хозяйств РБ путем совмещения возможности регистрации излучений широкого диапазона электромагнитных волн с малых авиационных средств для анализа оптических параметров объектов с учетом спектральных, поляризационных и пространственных характеристик. Например, для МЧС РБ результаты авиасъемки МКМС можно использовать в технологиях для получения оперативной информации при мониторинге: пожаров или взрывов, паводков и половодий, загрязнения водотоков нефтепродуктами, а также при оценке последствий от ЧС.

Конструктивно МКМС выполнен в виде отдельных оптических модулей, объединенных в

блок датчиков (БД), и соединенных по Bluetooth с блоком электроники (БЭ).

БД включает в свой состав:

– модуль гиперспектрометра (МГ), который обеспечивает получение изображений не менее чем в 128 спектральных каналах в диапазоне 0,4 - 0,9 мкм и включает в свой состав гиперспектрометр собственной разработки, микро персональный компьютер, внешний аккумулятор/портативное зарядное устройство;

– модуль ИК изображений (МИК), обеспечивающий получение тепловых изображений в спектральном диапазоне 8,0 – 14,0 мкм и выполненный на базе тепловизора FLIR Vue Pro;

– модуль цветной цифровой камеры (МК) для видеопривязки ИК и мультиспектральных изображений, который состоит из камеры “Baumer” MXGC40 и входного объектива 56-527 12 мм FL Compact Fixed Focal Length Lens;

– модуль авиационного поляриметра (МП), обеспечивающий получение изображений в поляризованном свете и состоящий из камеры “Baumer” MXGC40, входного объектива 56-529 25 мм FL Compact Fixed Focal Length Lens, электродвигателя привода поляриметра и привода вращения вокруг оптической оси с определенной скоростью поляризационного фильтра Ноуа HD для получения изображений в поляризованном свете;

– модуль навигационный GPS/GLONASS (МН), обладающий функцией дополнительной синхронизации (PPS);

– кронштейн установочный (КУ) для крепления модулей БД при установке МКМС на носителе.