

более 0,1–0,2 нм) при смещении пика усиления относительно продольных мод резонатора.

- Джоулев нагрев: Внутренний кристалл лазера может быть значительно горячее корпуса из-за протекающего тока, что провоцирует термический дрейф даже при стабильной внешней температуре.

- Изменение захвата моды: Стабильность «запирания» длины волны зависит от силы обратной связи VBG, которая может варьироваться при изменении мощности излучения.

Практическая значимость исследования

Полученные экспериментальные зависимости позволили сформулировать жесткие требования к аппаратной части модуля. Для обеспечения требуемых характеристик (ширина линии 0,1 нм и стабильность мощности с отклонением не более 0,37%) необходимо использование:

1. Систем термостабилизации на базе элементов Пельтье с ПИД-регулированием.

2. Прецизионных драйверов тока, работающих в режимах APC (автоматический контроль мощности) или ACC (автоматический контроль тока).

Это позволяет четко определить «острова стабильности» — рабочие диапазоны тока и температуры, в которых лазер сохраняет узкополосный режим (FWHM не более 0,1 нм) и предсказуемые спектральные характеристики, необходимые для высокоточной биомедицинской диагностики.

Список использованных источников

1. Volodin, B. L. Performance enhancement of the high-power laser diodes and arrays by use of the volume Bragg grating™ technology [Text] / B. L. Volodin [et al.] // Proceedings of SPIE. — 2005. — Vol. 5711 : High-Power Diode Laser Technology and Applications III. — P. 185–188.

Мелехов Владислав Андреевич, студ. гр. 6131-120404D каф. ЛБС, vmelehov225@gmail.com
Чернявский Кирилл Дмитриевич, студ. гр. 6363-120305D каф. ЛБС, dmi99099228@mail.ru
Горюшкин Алексей Александрович, ст. гр. 6363-120305D каф. ЛБС
Артемьев Дмитрий Николаевич, к.физ.-мат.н., доцент каф. ЛБС, artemyevdn@ssau.ru

УДК 53.087; 681.784

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ (SiPM) В РАМАНОВСКИХ СИСТЕМАХ С ВРЕМЕННЫМ ПОДАВЛЕНИЕМ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ

М.Э. Парфёнов, Д.Н. Артемьев

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

Ключевые слова: рамановская спектрометрия, кремниевые фотоумножители, флуоресценция.

Рамановская спектроскопия является актуальным методом получения информации о составе веществ и применяется в промышленности, фармацевтике и медицине [1]. Многие образцы при освещении лазером флуоресцируют, что приводит к затруднениям при измерении комбинационного рассеяния.

Флуоресцентное излучение, как правило, обладает значительно большей интенсивностью по сравнению с рамановским сигналом и характеризуется более длительным временем жизни возбужденных состояний. В типичных органических веществах время жизни флуоресценции может составлять единицы и десятки наносекунд, тогда как процесс комбинационного рассеяния происходит практически мгновенно – в течение пикосекунд после взаимодействия фотона с молекулой. В результате даже относительно слабая флуоресценция может полностью маскировать спектр комбинационного рассеяния, особенно при анализе биологических и органических образцов.

Если регистрировать сигнал только в узком временном интервале непосредственно после лазерного импульса, можно существенно ослабить вклад флуоресценции. Данный принцип лежит в основе методов временной селекции (time-gated raman detection systems) и временно-коррелированного счёта фотонов (TCSPC) [2].

В классических системах временной селекции для подавления флуоресценции используются быстродействующие оптические или электронные затворы, которые открываются на короткий интервал времени после лазерного импульса (например ICCD, Kerr). Несмотря на возможность эффективного временного разделения рамановского и флуоресцентного сигналов, такие системы часто характеризуются высокой стоимостью, значительными габаритами и сложностью эксплуатации [3].

Альтернативным подходом является использование методов регистрации одиночных фотонов на основе лавинных фотодиодов, работающих в гейгеровском режиме. В частности, в методе временно-коррелированного счёта фотонов измеряется задержка между лазерным импульсом и моментом регистрации фотона, что позволяет статистически восстановить временное распределение приходящих фотонов и выделить область, соответствующую рамановскому сигналу.

В последние годы в качестве перспективных детекторов для таких систем рассматриваются кремниевые фотоумножители (SiPM), представляющие собой массивы микропиксельных лавинных фотодиодов. Эти устройства обладают рядом преимуществ, включая высокий коэффициент усиления, высокую эффективность регистрации фотонов (photon detection efficiency, PDE), высокое временное разрешение (десятки и сотни пикосекунд), низкое рабочее напряжение, компактность и удобство интеграции в различные оптоэлектронные системы [4].

Однако применение SiPM в задачах регистрации слабых оптических

сигналов связано с рядом особенностей. Одной из основных проблем является сравнительно высокий уровень темновых отсчётов [5], возникающих вследствие тепловой генерации носителей заряда в полупроводнике, что в целом и затрудняет их применения в методах TGD (time-gated detection). Темновые события распределены случайным образом во времени и могут маскировать полезный сигнал.

Тем не менее использование временной корреляции с лазерным импульсом позволяет существенно уменьшить их влияние (TCSPC метод). Если регистрация фотонов осуществляется только в узком временном интервале t после возбуждающего импульса, частота регистрации случайных темновых событий $DCR_{counting}$ значительно снижается и может быть вычислена по формуле 1 [6]:

$$DCR_{counting} = t \times f \times DCR_{SiPM}, \#(1),$$

где DCR_{SiPM} – количество темновых отсчётов фотоумножителя на единицу времени, f – частота импульсов лазера. Зависимость линейная и при уменьшении времени возникает уменьшение количества темновых отсчётов.

Следует отметить, что эффективность временной селекции во многом определяется характеристиками используемого фотодетектора, включая временное разрешение, вероятность регистрации фотона и уровень шумов. Для задач регистрации слабых сигналов критически важны высокая эффективность регистрации фотонов и возможность работы в режиме счёта отдельных фотонов.

Применение SiPM структур пока развивается сравнительно медленно и несмотря на значительный прогресс в развитии данной технологии, влияние SiPM в области биофотоники на сегодняшний день остаётся ограниченным. Развитие технологии быстро приближается к стадии технологической зрелости, что делает их всё более перспективными для коммерческих применений [7].

Таким образом, применение коротких лазерных импульсов и SiPM структур в сочетании с временно-коррелированными методами регистрации открывает возможность эффективного подавления флуоресцентного фона при измерении рамановских спектров. Разработка компактных и чувствительных систем на основе современных лавинных фотодетекторов представляет собой перспективное направление развития рамановской спектроскопии, особенно для задач анализа слабых сигналов и портативных измерительных комплексов.

Список использованных источников

- 1.Orlando, Andrea, et al. "A comprehensive review on Raman spectroscopy applications." *Chemosensors* 9.9 (2021): 262.
- 2.Wei, D., Chen, S., & Liu, Q. (2015). Review of Fluorescence Suppression Techniques in Raman Spectroscopy. *Applied Spectroscopy Reviews*, 50(5), 387–406.
- 3.Chiuri A, Angelini F. Fast Gating for Raman Spectroscopy. *Sensors*. 2021.
- 4.Zhao, Tianqi & Peng, Yu & Miao, Quanlong & Li, Baicheng & Liang, Kun &

Yang, Ru & Han, Dejun. (2017). One-dimensional single-photon position-sensitive silicon photomultiplier and its application in Raman spectroscopy. Optics Express. 25. 22820-22828.

5. Eva Vilella and Angel Diéguez, "Dynamic range extension of SiPM detectors with the time-gated operation," Opt. Express 22, 12007-12012 (2014).

6. Zhang C, Zhang L, Yang R, Liang K, Han D. Time-correlated Raman and fluorescence spectroscopy based on a silicon photomultiplier and time-correlated single photon counting technique. Appl Spectrosc. 2013.

7. Caccia, Massimo & Nardo, L. & Santoro, R. & Schaffhauser, D. (2018). Silicon Photomultipliers and SPAD imagers in biophotonics 926.

Артемьев Дмитрий Николаевич, к.физ.-мат.н., доцент каф. ЛБС, artemyevdn@ssau.ru
Парфёнов Михаил Эдуардович, аспирант кафедры ЛБС, m.parfyonov@icloud.com

УДК 004.04

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ АВТОФЛУОРЕСЦЕНЦИИ СКЛЕРЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ МЕТАБОЛИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ

М.А. Шангареев, В.Н. Гришанов

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

Конечные продукты гликирования (КПГ) повсеместно распространены в организме человека, и их накопление является естественным следствием старения. Однако при патологических состояниях, сопровождающихся гипергликемией или окислительным стрессом, этот процесс ускоряется. Это делает КПГ ключевыми участниками развития сахарного диабета, сердечно-сосудистых патологий, нейродегенеративных изменений и хронической болезни почек [1].

В работе [2], авторы экспериментально подтвердили возможность использования склеры как источника информации о системном накоплении КПГ в организме.

Целью работы является разработка программного обеспечения для автоматизированной обработки изображений склеры флуоресцентных и полученных в белом свете для расчёта по ним значений диагностических параметров, по которым и судят об избытке КПГ в организме.

Ранее разработанная программа для обработки диагностических изображений и статистического анализа [3], реализованная в среде Mathcad, требует ручного указания оператором координат и размеров информативной области изображения. Данный фактор вносит субъективную погрешность, снижает воспроизводимость результатов и делает методику трудно формализуемой для практического клинического применения.

В связи с этим, целью настоящего этапа работы является создание