

**ПРИБОРЫ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ,
ИЗГОТОВЛЕННЫЕ В ЛАБОРАТОРИЯХ**

УДК 681.785.5

**КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕРНИЗАЦИЯ СПЕКТРОМЕТРА
КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ
JOBIN YVON RAMANOR U1000 ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ
МИКРООБЪЕКТОВ**

© 2025 г. М. Н. Коваленко, Д. В. Кохнюк, Е. А. Чесновская,

К. В. Козадаев

Поступила в редакцию 12.12.2025 г.

После доработки 05.01.2026 г.

Принята к публикации 19.02.2026 г.

Спектрометр RAMANOR U1000, разработанный в 1980-х годах компанией Jobin Yvon, характеризуется высоким спектральным разрешением ($\sim 0.1 \text{ см}^{-1}$) и эффективным подавлением побочного рассеянного света (до 10^{-14} на расстоянии 10 см^{-1} от линии возбуждения) в диапазоне длин волн от 200 до 1100 нм, что обеспечивается применением двойного монохроматора с фокусным расстоянием 1 м и голографическими дифракционными решетками (1800 штр/мм), а также наличием промежуточной камеры фильтрации рассеянного света. В базовой версии спектрометра Jobin Yvon U1000 использовались фотоэлектронные умножители (ФЭУ) в режиме счета фотонов, а источником возбуждения служил газовый лазер (например, аргоновый лазер с длиной волны 488 или 514 нм). Управление осуществлялось вручную или полуавтоматически [1]. Таким образом, наиболее существенными недостатками оригинального прибора являлись устаревшая система регистрации и отсутствие системы автоматизированного прецизионного перемещения образцов. Современные задачи спектроскопического анализа [2] обусловили необходимость обновления прибора в соответствии с развивающимися стандартами оборудования в области исследования комбинационного рассеяния света (КРС) [3].

Аппаратура модернизированного спектрометра КРС размещена на специально разработанном оптическом столе из профилей (рис. 1), обеспечивающем необходимую жесткость, термо- и вибростабильность оптической системы. В модернизированный спектрометр интегрирован тринокулярный оптический микроскоп Nikon Eclipse LV150 [4]. В качестве нового источника установлен твердотельный одномодовый лазер LCS-DTL-317 (длина волны 532 нм, полуширина спектральной линии генерации 10^{-5} нм, мощность до 54 мВт). Лазер работает в непрерывном режиме и оснащен воздушным охлаждением. Диаметр пятна фокусировки лазерного излучения не превышает 1 мкм (рис. 2а). Излучение лазера поступает через светофильтр в телескоп – расширитель пучка и через поляризационный кубик и объектив направляется на образец. Излучение образца собирается этим же объективом, проходит через поляризационный кубик без изменения направления, отражается светоделителем в спектрометр для анализа спектрального состава рассеянного света (рис. 2).

Рис. 1.

Рис. 2.

Полученные данные фиксируются с помощью спроектированной и изготовленной системы регистрации, смонтированной в едином блоке, который питается от сети напряжением 220–230 В. Дополнительно разработаны модули, обеспечивающие управление шаговыми приводами монохроматоров и столика образца, а также параметрами лазера, включая регулировку выходной мощности.

В системе реализованы несколько режимов оптимизации регистрации данных. При регистрации слабых спектров КРС низкоразмерных структур для повышения полезного сигнала используется режим объединения пикселей (биннинг), позволяющий группировать заряды с соседних пикселей до этапа оцифровки, на котором возникает шум. Высокую скорость процесса измерения обеспечивает режим работы с областями интереса: считывание данных происходит только с определенных участков матрицы, на которые проецируется спектр. Компьютеризированный блок регистрации (рис. 3) обеспечивает работу с двумя типами детекторов, которые были спроектированы и изготовлены в лаборатории.

Рис. 3.

Детектор излучения на базе ФЭУ типа R928 (Hamamatsu) предназначен для регистрации в спектральном диапазоне от 185 до 900 нм в режиме счета фотонов.

Детектор установлен в термостатируемый корпус, охлаждаемый при помощи элемента Пельтье, с принудительным водяным охлаждением. Такая конструкция обеспечивает компактность и низкий уровень темнового сигнала (до 5 темновых отсчетов в секунду при охлаждении до -60 °С), что гарантирует высокое качество получаемых данных. Для предварительного усиления и обработки сигналов фотоприемника разработан и изготовлен усилитель-дискриминатор, который позволяет работать на частотах до 400 МГц и регистрировать однофотонные импульсы во временном интервале порядка 10 нс, что, кроме прочего, дает возможность работать с возбуждающим лазером, генерирующим в импульсном режиме.

Многоканальный детектор сигналов КРС на базе прибора с зарядовой связью (ПЗС) линейки S10141-1108s (Hamamatsu) предназначен для регистрации оптического излучения в спектральном диапазоне от 200 до 1100 нм с возможностью длительного накопления сигнала. Многоканальный детектор также укомплектован одноступенчатым охлаждением ПЗС-линейки при помощи элемента Пельтье. Фотоприемник применяется для одновременной регистрации участка спектра шириной 30 нм, он имеет высокое пространственное разрешение (количество пикселей по длине равно 2048, по высоте составляет 250) при их сравнительно небольшом размере 12×12 мкм². Высокая чувствительность обуславливается применением технологии “подсветки” пикселей (back-illuminated [3]), его квантовая эффективность в максимуме достигает 90%.

Для обработки сигналов разработан программно-аппаратный модуль на базе программируемой логической матрицы, реализующий двухканальный режим счета фотонов и двухканальный аналоговый интерфейс к фотоприемникам типа фотодиод. Блок регистрации оснащен встроенным компьютером на базе процессора класса ARM9, обеспечивающим автономность и гибкость управления. Блок регистрации сопряжен со специально разработанным программным обеспечением, позволяющим автоматизировать процедуру измерений. Для передачи данных используется скоростной интерфейс 1000 Мбит/с Ethernet, при этом большой объем внутренней оперативной памяти (до 128 МБ) позволяет эффективно обрабатывать и хранить значительные массивы информации.

На представленном спектре микрокристалла алмаза (рис. 4) отчетливо виден характерный пик, свидетельствующий о высокой чувствительности и спектральном разрешении модернизированного спектрометра. Уровень шума варьируется в пределах от 3 до 13 отн. ед. и составляет менее 1% от интенсивности характерного пика.

Проведенная глубокая модернизация Jobin Yvon U1000 охватывает как аппаратную, так и программную части, что позволило значительно расширить его функциональность. Результаты модернизации демонстрируют способность спектрометра эффективно анализировать микрообъекты, обеспечивая надежные данные для исследования их молекулярной структуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jobin Yvon RAMANOR U1000 manual. Paris: HORIBA Jobin Yvon, 1978.
2. Дидковский Я.И., Коваленко М.Н., Минько А.А., Последович М.Р. // Вестник БГУ. Сер. 1. 2013. № 1. С. 20.
3. Singh D.K., Pradhan M., Materny A. Modern Techniques of Spectroscopy. Singapore: Springer, 2022.
4. Industrial Microscopes LV150/150A/100D. Tokyo: Nikon Corporation, 2006.

Адрес для справок: Республика Беларусь, 220030, Минск, пр. Независимости, 4, Белорусский государственный университет, НИИ спектроскопических систем. E-mail: kovalenkom@bsu.by

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Общий вид модернизированного спектрометра комбинационного рассеяния Jobin Yvon U1000.

Рис. 2. Схема модернизированного прибора Ramanog U1000: **а** – фронтальный вид и изображение лазерного пятна на объект-микрометре, **б** – вид сверху.

Рис. 3. Передняя панель блока регистрации и управления.

Рис. 4. Спектр микрокристалла алмаза, полученный на модернизированном приборе (время накопления сигнала 100 мс).

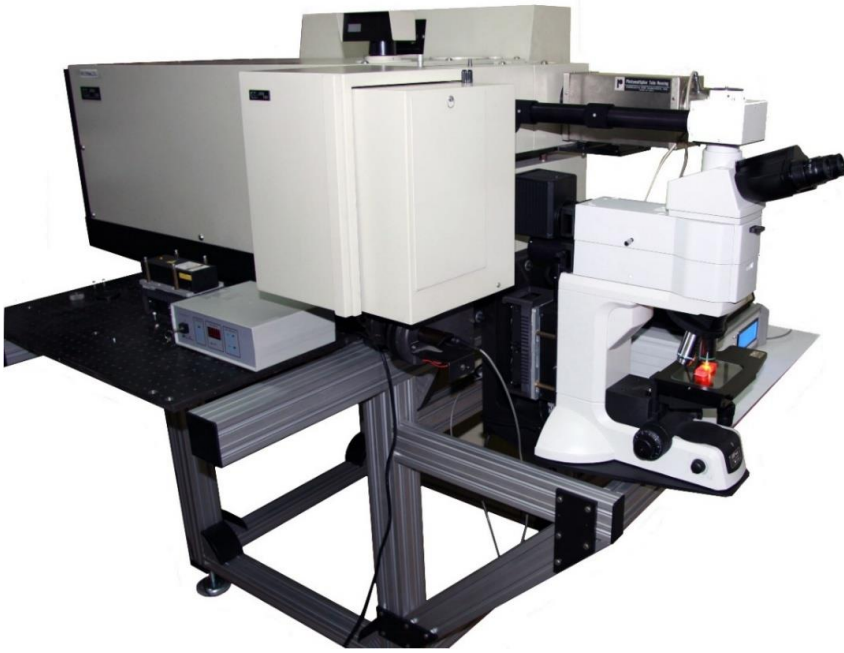
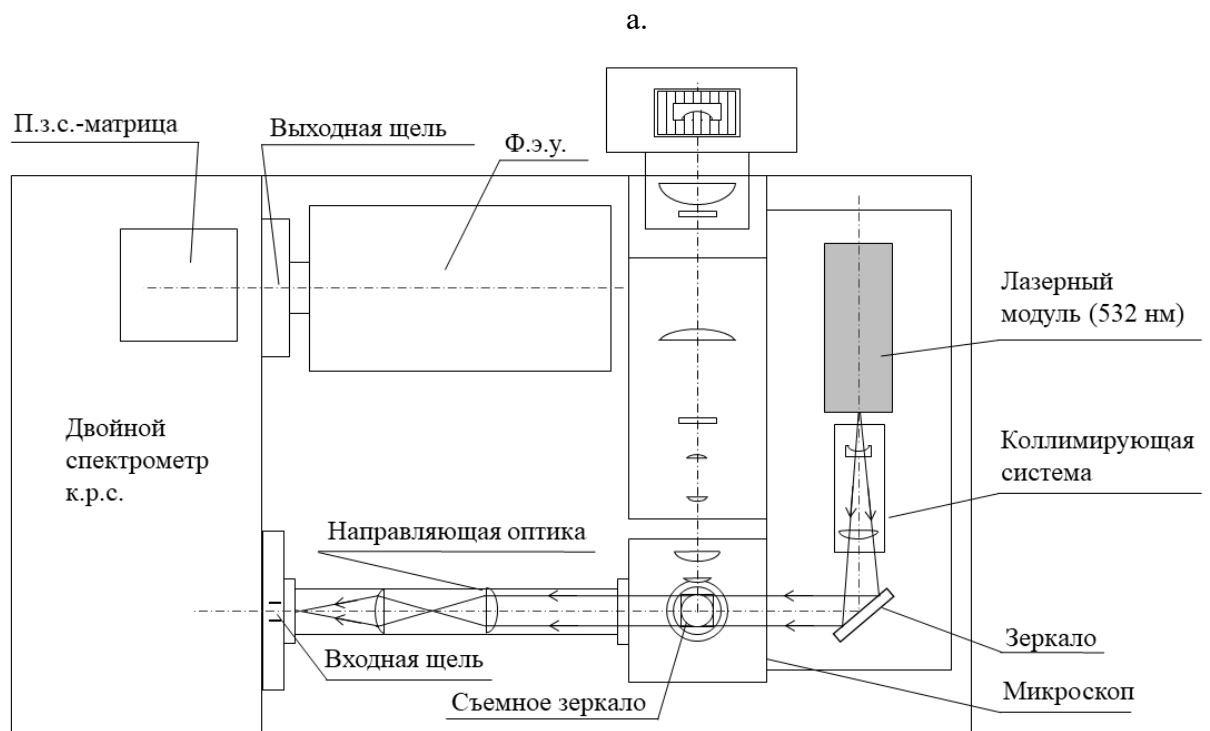
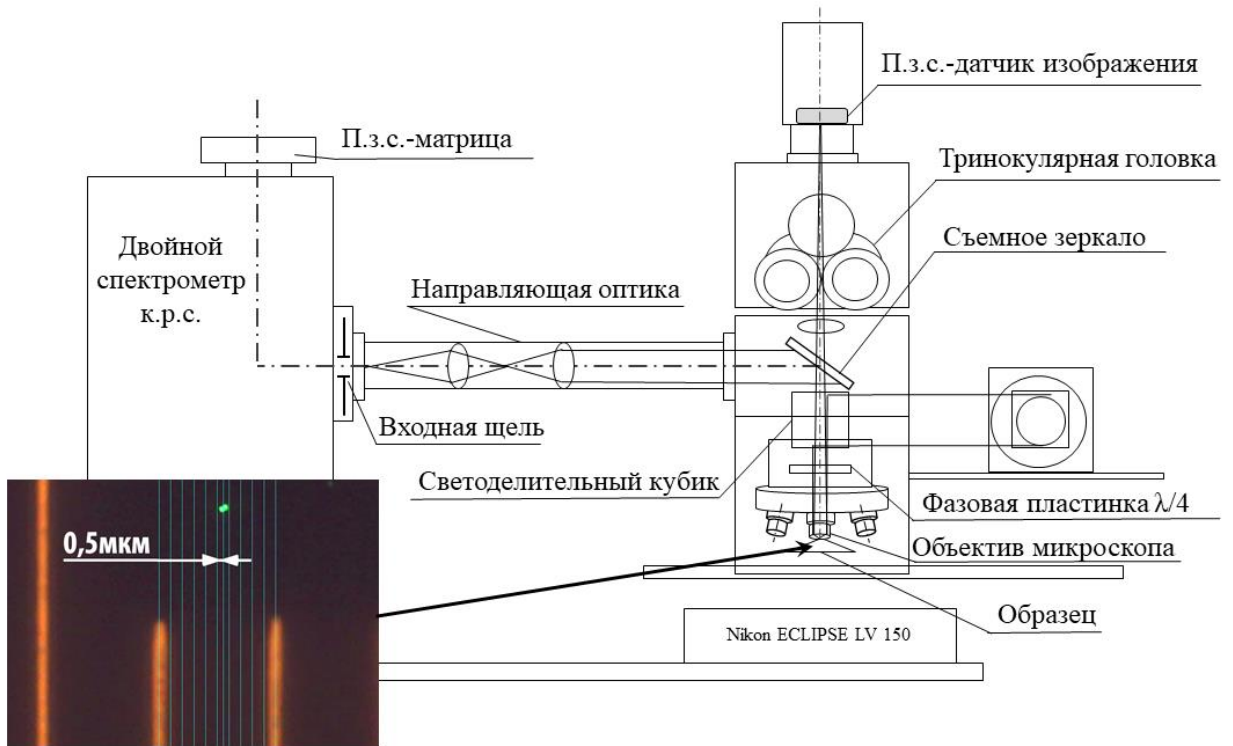


Рис. 1.



6

Рис. 2



Рис. 3.

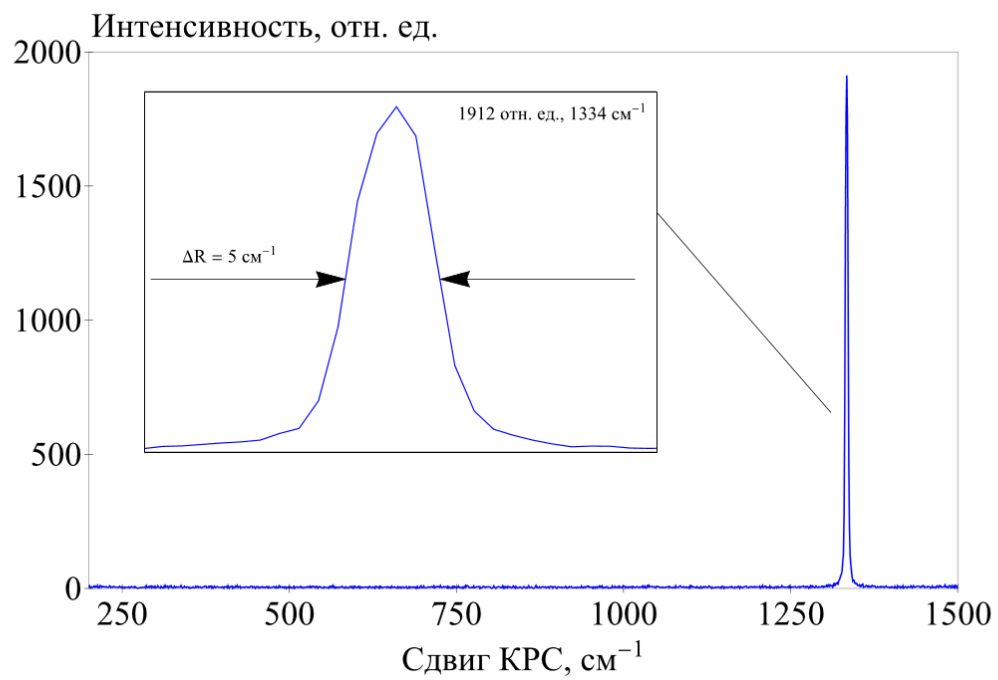


Рис. 4.