

В.Н. Денисовым при поддержке гранта РФФИ № 98-02-17620. Автор приносит благодарность А.И. Смирнову, Б.З. Малкину и А.Н. Васильеву, сотрудничество с которыми было весьма интересным и плодотворным, а также Р.З. Левитину, Д.И. Хомскому и Б.С. Думешу за обсуждения. Благодарю Ю. Уеду, М. Исобе и Л.И. Леонюк, вырастивших кристаллы. Автор признательна заведующему отделом спектроскопии твердого тела Г.Н. Жижину за постоянную поддержку и внимание к нашим работам.

Список литературы

1. Буздин А И, Булаевский Л Н *УФН* **131** 495 (1980)
2. Hase M, Terasaki I, Uchinokura K *Phys. Rev. Lett.* **70** 3651 (1993)
3. Isobe M, Ueda Y *J. Phys. Soc. Jpn.* **65** 1178 (1996)
4. Popova M N et al. *Phys. Rev. B* **57** 5040 (1998)
5. Попова М Н и др. *ЖЭТФ* **110** 2230 (1996)
6. Попова М Н и др. *Письма в ЖЭТФ* **65** 711 (1997)
7. Smolinski H et al. *Phys. Rev. Lett.* **80** 5164 (1998)
8. Popova M N et al., Cond-mat/9807369; *ЖЭТФ* (в печати)
9. Horsch P, Mack F, Cond-mat/9801316
10. Ohama T, Yasuoka H, Preprint
11. Thalmeier P, Fulde P, Cond-mat/9805230
12. Mostovoy M V, Khomskii D I, Cond-mat/9806215
13. Riera J, Poilblanc D, Cond-mat/9809028
14. Smirnov A I et al., Cond-mat/9808165; *Phys. Rev. B* (in press)

PACS number: 07.65.-b

Новые разработки оптико-спектральных приборов в Институте спектроскопии РАН

О.Н. Компанец

В сообщении, сделанном в 1993 г., речь шла о развитых к тому времени в Институте спектроскопии РАН новых ультрачувствительных методах и приборах оптической спектроскопии и их применениях в высоких технологиях и в экологии. Нельзя не сказать о новых результатах, полученных с помощью этих методов.

Несколько слов о лазерной атомно-флуоресцентной спектрометрии, предложенной и развитой М.А. Большовым, В.Г. Колошниковым, А.В. Зыбиным, С.Н. Рудневым, и об использующих этот принцип спектрометрах ЛАФАС с электротермической атомизацией вещества. При прямом анализе этим методом образцов льда в Антарктике и Северном полушарии для изучения глобальных изменений климата и последствий жизнедеятельности человека были получены новые впечатляющие пределы обнаружения для Cd, Bi и Pb на уровне 3,6–0,2 фг (0,18–0,01 ppt). Совместно с французскими исследователями проведены измерения концентрации Cd в антарктических льдах в зависимости от их возраста и прослежена ее корреляция с изменениями климата планеты на протяжении последних 155 тыс лет. Подобные измерения проведены и для снегов и льдов Северного полушария; показано, что по крайней мере 95 % кадия в слоях в возрасте до 30 лет имеют антропогенное происхождение.

Другой ультрачувствительный метод детектирования элементов — многоступенчатая резонансная фотоионизация атомов — предложенный В.С. Летоховым и развитый затем В.И. Мишиным, Г.И. Бековым и Ю.А. Кудрявцевым, использовался в последние годы более успешно для исследований в области лазерно-ядерной спектроскопии. Замеча-

тельными особенностями этого метода, если ионизация атомов осуществляется в горячей полости или капилляре, являются чрезвычайно высокая химическая селективность, достаточная для подавления изобарического фона, и высокая эффективность ионизации, что было многократно и успешно продемонстрировано на ускорителе с масс-сепаратором ISOLDE в ЦЕРНе.

Схематически селективный по Z источник ионов получается за счет лазерной ионизации в капилляре атомов с короткоживущими ядрами, образующимися в мишенях при бомбардировке последних пучками протонов, и состоит из 1–2 частотных лазеров на парах меди с суммарной выходной мощностью до 55 Вт, 2–3 лазеров на красителях (более 1 Вт) и нелинейного преобразователя частоты (более 100 мВт). Излучение лазеров, настроенных по длине волны на резонансные переходы исследуемых изотопов, проходя через окно магнита масс-сепаратора, фокусируется на расстоянии примерно 20 м на входном отверстии капилляра. Капилляр обычно делается в виде цилиндра из тугоплавкого металла с каналами в стенках для диффузии в него получаемых на мишени продуктов ядерных реакций.

Метод лазерного ионного источника применен недавно для получения химически селективных пучков ионов Mn для мессбауэровских экспериментов, для получения нейтронодефицитного изотопа Sn-101 и долгоживущих изотопов Ni для изучения их энергетического спектра, получения пучков Ag, Be, Zn, Cd и Cu для применений в задачах материаловедения, астрофизики и ядерной физики. Последним достижением явилось открытие в 1997 г. коллаборацией ISOLDE с участием В.И. Мишина и В.Н. Федосеева и исследование сильно нейтроно-избыточного изотопа серебра Ag-129, одного из ключевых изотопов r -процесса, протекающего в недрах звезд и ответственного за синтез тяжелых элементов во Вселенной.

В 1998 г. Институт закончил разработку полностью автоматизированного лазерного источника ионов, предназначенного для тех же целей лазерно-ядерной спектроскопии. Каждый элемент этого сложного лазерного комплекса — будь то лазеры на красителях с быстрой прецизионной перестройкой длины волны или портативный высокоточный измеритель длины волны, или прецизионный двухкоординатный позиционер светового луча, или спектроанализатор, или система регистрации ионного тока — отработан в процессе многолетнего совершенствования, является законченным прибором и, что немаловажно, произведен в Опытном производстве ИСАН.

Последние 5 лет из-за дефицита бюджетного финансирования основной упор в лабораториях сделан на поддержание уникальных спектрометров в рабочем состоянии и на разработку портативных спектральных приборов.

Часть средств была сконцентрирована для совершенствования переносного экспресс-анализатора металлов и сплавов, разработанного по инициативе С.Л. Мандельштама в группе А.М. Лившица. Сейчас прибор, работающий на принципах эмиссионного спектрального анализа, позволяет определять более 20 химических элементов практически во всех металлических сплавах и сортировать сплавы по маркам. Пределы измерения концентраций элементов от 0,01 до 15 %, точность измерения 8–10 %. Вес прибора — 15 кг, габариты — 500 × 300 × 300 мм. Большим преимуществом анализатора по сравнению с дорогостоящими зарубежными аналогами является независимость результатов измерения от условий окружающей среды и лучшая разрешающая способность. Изготовлено около 20 таких приборов, успешно работающих на многих предприя-

тиях России. Основные элементы анализатора металлических сплавов используются также в других эмиссионных спектрометрах на основе источника ИСП и плазмотрона для проведения количественного анализа сложных соединений с более высокой концентрационной чувствительностью до 10^{-4} %.

В большинстве спектрометров и в спектроанализаторах в качестве детектора оптических сигналов используются разработанные Э.Г. Силькисом и А.В. Пелезневым многоканальные оптические регистраторы спектров (МОРС) на основе линейных фотоприемников с зарядовой связью или набора линеек в виде фотоэлектронных кассет, которые предлагаются также для замены фотопластинок в стандартных эмиссионных спектрометрах типа ДФС и полихроматорах типа МФС. Выпускается более 10 модификаций МОРС: для регистрации протяженных спектров, для длительного накопления слабых сигналов, для работы с импульсными сигналами, с платами в слоте IBM PC и т.д. Поле применений МОРС исключительно широкое. Например, ими комплектуются приборы для клинической диагностики онкологических заболеваний, мобильный лазерный анализатор почв, спектрометр с индуктивно связанной плазмой; более 20 многоканальных регистраторов используются в исследовательских и учебных установках институтов РАН и Минвуза.

Другим направлением приборостроения стало создание серии недорогих фурье-спектрометров широкого применения на область спектра $400-4000\text{ см}^{-1}$.

В.М. Кривцуном и Н.Ю. Болдыревым предложена концепция строительства таких приборов, подразумевающая максимально возможный отказ от прецизионной и дорогой механики и оптики за счет использования электро-механических следящих систем и компьютерных технологий. Оптическая система включает высококачественный светосильный интерферометр Майкельсона с подвижным отражателем; точность определения волновых чисел обеспечивается стабилизированным He-Ne лазером. Источник ИК излучения — глобар, детектором излучения служит пироэлектрический приемник либо быстродействующий приемник на тройных соединениях. Имеется возможность измерения как абсорбционных спектров, так и эмиссионных спектров от внешнего источника.

Прибор легко стыкуется с различными устройствами и приставками. Спектрометр отличаются высокие для малогабаритных приборов разрешение (от 8 до $0,25\text{ см}^{-1}$) и отношение "сигнал — шум" (до 3000 за 1 скан при разрешении 4 см^{-1}). Размеры прибора — $460 \times 380 \times 200\text{ мм}$, вес — 18 кг. Первой демонстрацией работы ИК фурье-спектрометра явилось его использование для анализа воздуха (на содержание CO) и пищевых продуктов (муки). Прибор по классу и основным параметрам не уступает известным зарубежным аналогам, но в несколько раз дешевле их даже при мелкосерийном производстве.

Еще одна сильная, с традициями, приборостроительная группа (А.М. Пындык, В.Н. Крашенинников, Н.И. Улицкий, В.П. Виноградов) взяла курс на создание малогабаритных спектральных приборов видимого и ближнего УФ и ИК диапазонов, легко адаптируемых под конкретную спектральную задачу, и одновременно на разработку универсального лабораторного спектрометра высокого разрешения для регистрации эмиссионных спектров, спектров КР и люминесценции.

Первое направление реализовано тремя базовыми моделями MS75, MS150, MS300 с фокусными расстояниями 75, 150 и 300 мм соответственно. Спектрометры построены по

вертикальной симметричной схеме Эберта, преимуществом которой является низкий уровень рассеянного света и компактность. Значения обратной дисперсии лежат в диапазоне $20-1,7\text{ нм мм}^{-1}$, аппаратная функция любого из спектрометров не хуже 30 мкм .

Спектрометр MS300 с ПЗС-линейкой (3600 элементов) использовался для регистрации спектров люминесценции 3,4-бензпирена в растворе n-октана при температуре жидкого азота. С помощью спектрометра MS150 с многоканальной системой регистрации на базе усилителя изображения и суперкремникона получены спектры люминесценции для определения концентрации уранила (UO_2^{2+}) в воде. Для регистрации спектров КРС оба спектрометра используются в комбинации с голографическими фильтрами или двойным монохроматором с вычитанием дисперсии. Благодаря компактности, малому весу и низкому энергопотреблению приборы могут применяться в полевых условиях.

Второе направление представлено универсальным лабораторным спектрометром MS600. Его характеристики: фокусное расстояние 600 и 1000 мм; обратная дисперсия $0,45-2,5\text{ нм мм}^{-1}$; относительное отверстие 1/5. Для регистрации спектров КРС и люминесценции сильно рассеивающих образцов спектрометр используется в сочетании с двойным монохроматором с вычитанием дисперсии. Пропускание формируемого таким образом тройного монохроматора 5–7 %, зато уровень рассеянного света не более 10^{-10} .

Новое для Института направление открыла разработка компактного дихрометра для экспрессного высокочувствительного определения биологически активных веществ (БАВ) в биологических жидкостях. Принципиальная новизна нового прибора состоит в использовании высокочувствительных биодатчиков на основе жидкокристаллических дисперсий нуклеиновых кислот (ДНК) или их комплексов, многократно повышающих хиральность при взаимодействии с биоструктурами и биомолекулами, и измерении генерируемой ими аномальной активности на разных длинах волн с использованием модуляционной техники.

Применение таких биодатчиков, разработанных в ИМБ РАН Ю.М. Евдокимовым, а также ряд предложенных в ИСАНе в группе Е.Л. Михайлова оптико-конструкторских решений позволили при сохранении чувствительности существенно упростить оптический прибор и сделать его в несколько раз более компактным, быстродействующим и дешевым по сравнению с известными зарубежными дихрографами. В последней версии с использованием зарубежной элементной базы прибор имеет размеры $500 \times 340 \times 170\text{ мм}$, вес 10 кг и управление от компьютера. При использовании дихрометра для определения в крови человека сверхнизких содержаний современных противоопухолевых препаратов (митоксантина и др.) достигнут предел обнаружения $2 \times 10^{-8}\text{ М}$ (М — молекулярная масса). Тем самым созданы предпосылки для успешной реализации новой современной аналитической тест-системы для целей биохимии, медицины и экологии.

Разработка научных приборов — дело дорогостоящее и не всегда благодарное, хотя новые результаты, особенно в принципиальном плане, можно получать, по-видимому, лишь на новой экспериментальной базе, а не на коммерческих приборах, поэтому Институт спектроскопии РАН старается поддерживать, как бы ни было трудно, сложившиеся традиции научного приборостроения и боеспособность Опытного производства.