

АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

С.М. Чернин, Е.Г. Барская

МНОГОХОДОВЫЕ МАТРИЧНЫЕ СИСТЕМЫ — ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ БОЛЬШОЙ ДЛИНЫ ПУТИ ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Применительно к задачам спектроскопии высокого разрешения разработаны и используются на практике светосильные трех- и четырехобъективные многоходовые матричные системы, обеспечивающие предельно большую длину оптического пути в поглощении. В системах изображения формируются на полевых зеркалах в виде компактных прямоугольных матриц с регулируемым числом строк и столбцов. Количество ходов для зеркал с высокоотражающими покрытиями достигает 500. Отличаясь простотой конструктивных решений, матричные системы обладают высокими оптическими и эксплуатационными характеристиками. Они также могут быть использованы в качестве регулируемых линий задержки оптических сигналов в лазерной технике. По своим возможностям матричные системы представляют многоходовые системы нового поколения.

За последние годы в спектроскопии значительно повысился интерес к зеркальным системам многократного отражения. Такой интерес вызван целым рядом причин. Одна из самых важных — острая проблема сохранения окружающей среды. Создание высокоточных приборов газового анализа связано с многоходовыми системами, являющимися основной частью оптических газоанализаторов, универсальных и чувствительных. Наиболее перспективно для определения микроконцентраций загрязнителей атмосферы использование многоходовых систем на больших трассах в сочетании с перестраиваемыми лазерами.

Для ИК-спектроскопии высокого и сверхвысокого разрешения оптические системы многократного отражения представляют особый интерес. Полученный в многоходовых кюветках длинный оптический путь в поглощении позволяет исследовать газы при низких давлениях. Это тот случай, когда газы хорошо подчиняются закону Бугера-Ламберта. Это тот идеальный случай, когда регистрируемая форма спектральных линий не искажается столкновительными процессами и силами межмолекулярного взаимодействия. При этом появляется возможность достижения предельно высокого разрешения спектров и интерпретации тонкой структуры молекул. В противном случае высокая разрешающая способность прибора, не соответствуя условиям эксперимента, будет использоваться вхолостую.

Однако несмотря на то, что спектральная аппаратура из года в год постоянно совершенствуется, кюветы большой длины пути, в основе которых повторяется многоходовая система Уайта 1942 г. [1], практически остаются без изменений. Многие исследователи-спектроскописты пытались приспособить известную зеркальную систему для решения современных задач. Это не всегда удавалось.

Стремительное развитие лазерной техники за последнее время привело к созданию новой спектроскопии — лазерной спектроскопии высокого разрешения. Для новой спектроскопии кюветы большой длины пути на базе классической системы Уайта [1] оказались устаревшими из-за невозможности осуществления очень большого числа проходов, а также ряда оптических и эксплуатационных недостатков. Назрела необходимость пересмотра и улучшения по важнейшим оптическим параметрам классической многоходовой системы [1], используемой в спектроскопии в качестве универсальной, и создания ряда зеркальных систем для различных задач современной науки.

Авторами был разработан цикл принципиально новых оптических систем многократного отражения, из которых для спектроскопии высокого разрешения наиболее перспективными оказались многоходовые матричные системы (ММС) [2, 3]. Эти системы позволяют при относительной простоте конструкций за счет создания компактной прямоугольной матрицы промежуточных изображений осуществить в малом объеме предельное число проходов света. Они получили распространение в нашей стране и признание за рубежом [4–8]. Возможность применения ММС с источниками большой угловой апертуры делает их незаменимыми при комплектации с лазерными диодными спектрометрами высокого разрешения.

Известные многоходовые зеркальные системы очень большой длины пути, такие как системы Уайта 1976 г. [9] и Ханста [10], обладают целым рядом эксплуатационных недостатков и являются слишком громоздкими. Так, например, в системе Ханста [10] для увеличения числа строк изображений необходимо каждый раз вводить дополнительные объективы и коллективы. А для осуществления 220 проходов эта система должна была уже содержать в общей сложности 20 зеркал. Двухкратное увеличение числа строк, осуществляемое Хорном и Пиментолом [11] с помощью плоского уголкового отражателя в системе Уайта [1], оказалось недостаточным для обеспечения очень большого числа отражений и связано с дополнительными потерями света. Широко распространенные за рубежом варианты многоходовой системы Эррио [12], применяемые в качестве оптической линии задержки в ла-

зерной спектроскопии, предназначены только для источников малой угловой апертуры и имеют очень сложный растр изображений, практически исключая возможность перенастройки во время эксперимента. Также предназначенная в качестве оптической линии задержки система Шульца-Дюбуа [13] хотя и содержит оптимальное количество зеркал, однако не имеет точки выхода, т. к. является замкнутой в виде оптического резонатора. К тому же для разнесений изображений по высоте в зеркальную систему введен преломляющий уголкового отражатель сложной конфигурации с фокусирующей линзой.

Перед нами была поставлена проблема — создать многоходовую систему с предельно большим числом отражений, обладающую высокой стабильностью и компактным расположением изображений в виде прямоугольной матрицы при ограниченном количестве зеркальных элементов. Прежде всего предстояло решить более конкретную задачу — с помощью новых зеркальных элементов требовалось осуществить перенос изображений на коллективе на разные высоты для построения последующих строк матрицы.

Идею использования вогнутого зеркального элемента для очередной переборки изображений мы заимствовали из ранее разработанной оптической системы многократного отражения Чернина [14], в которой узкий коллектив был установлен рядом с большим вогнутым зеркалом. По аналогии рядом с большим основным коллективом расположили узкий вспомогательный коллектив. Он будет каждый раз направлять лучи с последнего, образуемого в двойной строке, изображения на дополнительный объектив, который еще не участвовал в построении этих изображений. Кроме того, вогнутый зеркальный коллектив в отличие от плоского уголкового отражателя не вызовет потерь света из-за виньетирования при источниках большой угловой апертуры. Далее, надо было найти принципиальное новое сочетание объективов, расположение которых, взаимосвязь и характер их закрепления обеспечивали бы возможность построения очередных строк изображений на полевых зеркалах и стабильность этих изображений. При создании комплекса объективов мы сохранили рациональный элемент их привязки для пары зеркал из системы Барской [15], обеспечивающий устойчивость изображений.

На базе этих двух заранее принятых положений и всего лучшего из классической схемы Уайта [1] мы начали разрабатывать варианты матричной системы. Так возникли трех- и несколько позднее четырехобъективные многоходовые матричные системы, каждая из которых имела самостоятельное значение. В сущности, созданные многоходовые системы представляют комбинации нескольких несогласованных, но взаимно связанных конфокальных сферических резонаторов с определенным положением выходящего излучения.

Матричная 3-объективная система

На рис. 1 схематически представлены пространственное расположение зеркал системы, характер их подвижности и закрепления. Пунктиром обозначено расположение изображений на поверхности коллективов. Цифры на изображениях показывают порядок образования их при настройке системы на 30 проходов.

Против входного и выходного отверстий 1 и 2 на расстоянии радиуса кривизны зеркал расположены спаренные объективы 3 и 4, жестко закрепленные на плате 5 составного подвижного держателя 6. Зеркальные объективы 3, 4 соединены друг с другом под фиксированным углом, значение которого выбирается исходя из того, что расстояние между центрами кривизны этих объективов соответствует половине шага изображений по горизонтали. Плата 5 вместе с объективами 3 и 4 имеет возможность поворота вокруг вертикальной оси 7. Зеркальный коллектив 8 установлен напротив пары объективов 3, 4 в непосредственной близости от входного и выходного отверстий 1, 2. Центр кривизны коллектива 8 расположен в центре симметрии объективов 3–4, поэтому коллектив 8 отражает спаренные объективы 3 и 4 друг на друга. Вспомогательный зеркальный коллектив 9 в виде узкой полосы примыкает к коллективу 8 и располагается ниже входного и выходного отверстий 1, 2. Он ориентирован так, чтобы отражать объектив 3 на дополнительный объектив 10, установленный на держателе 6 вблизи спаренных объективов 3, 4. Подвижный держатель имеет возможность поворота вокруг горизонтальной оси 11 вместе с зеркальными объективами 3, 4, 10. Оси 7 и 11 взаимно перпендикулярны.

Система работает следующим образом. Через входное отверстие 1 излучение от высокоапертурного или лазерного источника попадает на зеркальный объектив 3, который создает промежуточное изображение входного отверстия на поверхности зеркального коллектива 8. От поворота платы 5 с объективами 3 и 4 зависит расстояние от входного отверстия до его первого изображения по горизонтали. От наклона всего держателя 6 с объективами 3, 4, 10 зависит величина смещения этого изображения вниз по вертикали. После образования первого изображения излучение отражается от коллектива 8 на объектив 4, который формирует второе изображение рядом с входным отверстием 1 на самом краю коллектива 8. Спаренные зеркальные объективы 3 и 4 поочередно фокусируют с определенным смещением изображения входного отверстия на коллективе до тех пор, пока не будут построены две строки изображений, и последнее не попадет на вспомогательный коллектив 9. Отраженное от него излучение следует к дополнительному зеркальному объективу 10, который возвращает его на коллектив 9 со смещением по высоте. Далее излучение направляется на объектив 3 как бы из нового входного отверстия. Образуется следующая пара строк изображений и т. д. до тех пор, пока последнее изображение не попадет в выходное отверстие 2.

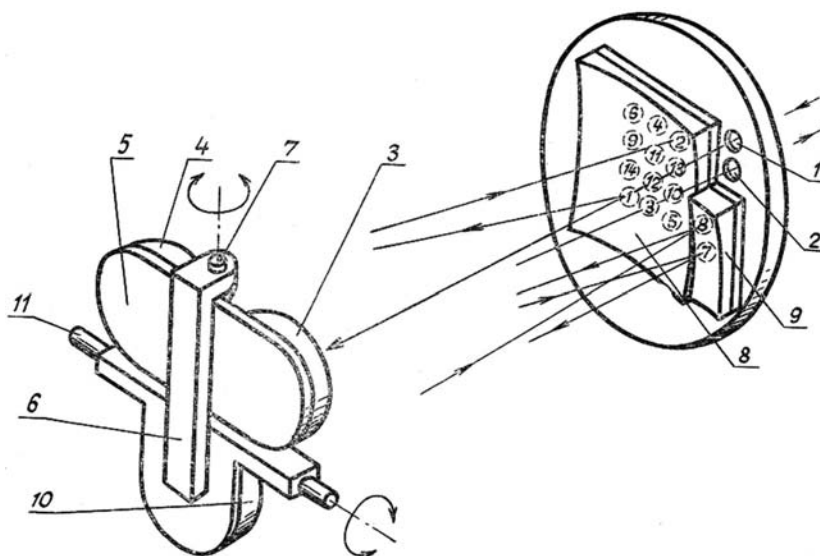


Рис. 1. Многоходовая матричная 3-объективная система

Регулировка числа строк в матрице изображений производится наклоном всего держателя 6 с тремя объективами 3, 4, 10 вокруг горизонтальной оси 11. Количество строк прямо пропорционально углу наклона держателя 6. Изменение числа изображений в каждой строке, т. е. число столбцов в матрице достигается поворотом платы 5 с жестко закрепленными относительно друг друга объективами 3 и 4 вокруг вертикальной оси 7. Количество столбцов прямо пропорционально углу поворота этих зеркал в сторону удаления от отверстий 1, 2.

При совместном повороте спаренных объективов 3, 4 их центры кривизны скользят по поверхности коллектива 8, сохраняя между собой расстояние неизменным. При наклоне держателя 6 они смещаются по высоте. В то же время интервал по вертикали между линией центров кривизны спаренных объективов 3–4 и центром дополнительного объектива 10 сохраняется постоянным. Последнее изображение попадет в выходное отверстие 2 системы не при любом повороте платы 5 и держателя 6, а в положениях, соответствующих фиксированным смещениям первого изображения, кратным указанным межцентровым расстояниям.

Перестраиваемое число ходов в системе образует ряды чисел, отвечающие определенным соотношениям в зависимости от числа строк и столбцов матрицы изображений. Число ходов N может быть получено из соотношения

$$N = 2(mn - 1), \quad (1)$$

где m — число строк, составляющее ряд четных чисел 2, 4, 6, 8 ...; n — число столбцов, составляющее ряд натуральных чисел 1, 2, 5

Матричная 3-объективная система позволяет значительно увеличить длину оптического пути за счет возрастания числа строк без увеличения ширины коллектива. Система обладает стабильностью изображений. В результате компактного расположения изображений в матрице уменьшены aberrации поля зрения. Повышена точность и надежность перестройки числа ходов путем осуществления регулировочных устройств поворота с постоянным угловым шагом во взаимноперпендикулярных плоскостях. Система особенно целесообразна для использования совместно со светосильными лазерными ИК-спектрометрами высокого разрешения при монтаже в трубчатой кювете.

Матричная 4-объективная система

На рис. 2,а,б представлено расположение зеркальных элементов многоходовой матричной системы, а также показано закрепление и характер подвижности объективов. Коллективы и объективы представлены с рабочей стороны зеркал. На рис. 2,а — основной 10 и вспомогательный 11 зеркальные коллективы. Цифры в пунктирных кружках обозначают порядок образования изображений при настройке системы на 90 проходов. На рис. 2,б — вариант расположения зеркальных объективов 3, 4, 5, 6 на круглом держателе 7 для монтажа многоходовой системы в трубчатой кювете. Цифры со штрихом (рис. 2,а,б) указывают центры кривизны соответствующих зеркал. Против входного и выходного отверстий 1 и 2 на расстоянии радиуса кривизны зеркал расположены спаренные объективы 3, 4 и 5, 6, жестко закрепленные на подвижном держателе 7 в едином блоке. Держатель 7 вместе с объективами 3, 4, 5, 6 имеет возможность поворота вокруг вертикальной оси 8 и горизонтальной оси 9. Установленный напротив объективов зеркальный коллектив 10 находится в непосредственной близости от входного и выходного отверстий 1, 2. Центр кривизны коллектива 10 (точка 10') расположен

в центре симметрии пар объективов 3–4 и 5–6. Поэтому коллектив 10 изображает объективы 3 и 4, а также 5 и 6 друг на друга. Вспомогательный зеркальный коллектив 11 в виде узкой полосы примыкает к коллективу 10 и располагается ниже входного и выходного отверстий 1, 2. Он ориентирован так, чтобы отображать объективы 3 и 5, принадлежащие разным парам, друг на друга. Его центр кривизны (т. 11') расположен в центре симметрии объективов 3–5.

Система работает следующим образом. Через входное отверстие 1 излучение от высокоапертурного или лазерного источника попадает на зеркальный объектив 3, который создает промежуточное изображение входного отверстия на поверхности зеркального коллектива 10. От поворота держателя 7 — блока объективов — зависит расстояние от входного отверстия до его первого изображения по горизонтали, от наклона держателя — величина этого смещения вниз по вертикали. После образования первого изображения излучение отражается от коллектива 10 на объектив 4, который формирует второе изображение рядом с входным отверстием 1 на самом краю коллектива 10. Спаренные зеркальные объективы 3 и 4 поочередно фокусируют с определенным смещением изображения входного отверстия до тех пор, пока не будут построены две строки изображений и последнее не попадет на коллектив 11. Отраженное от него излучение направится к объективу 5 следующей пары. Далее поочередно фокусируют зеркальные объективы 5 и 6, образуя две следующие строки изображений, и последнее изображение вновь не попадет на коллектив 11. Опять начнут работать спаренные объективы 3 и 4. И так до тех пор, пока последнее изображение не попадет в выходное отверстие 2 системы.

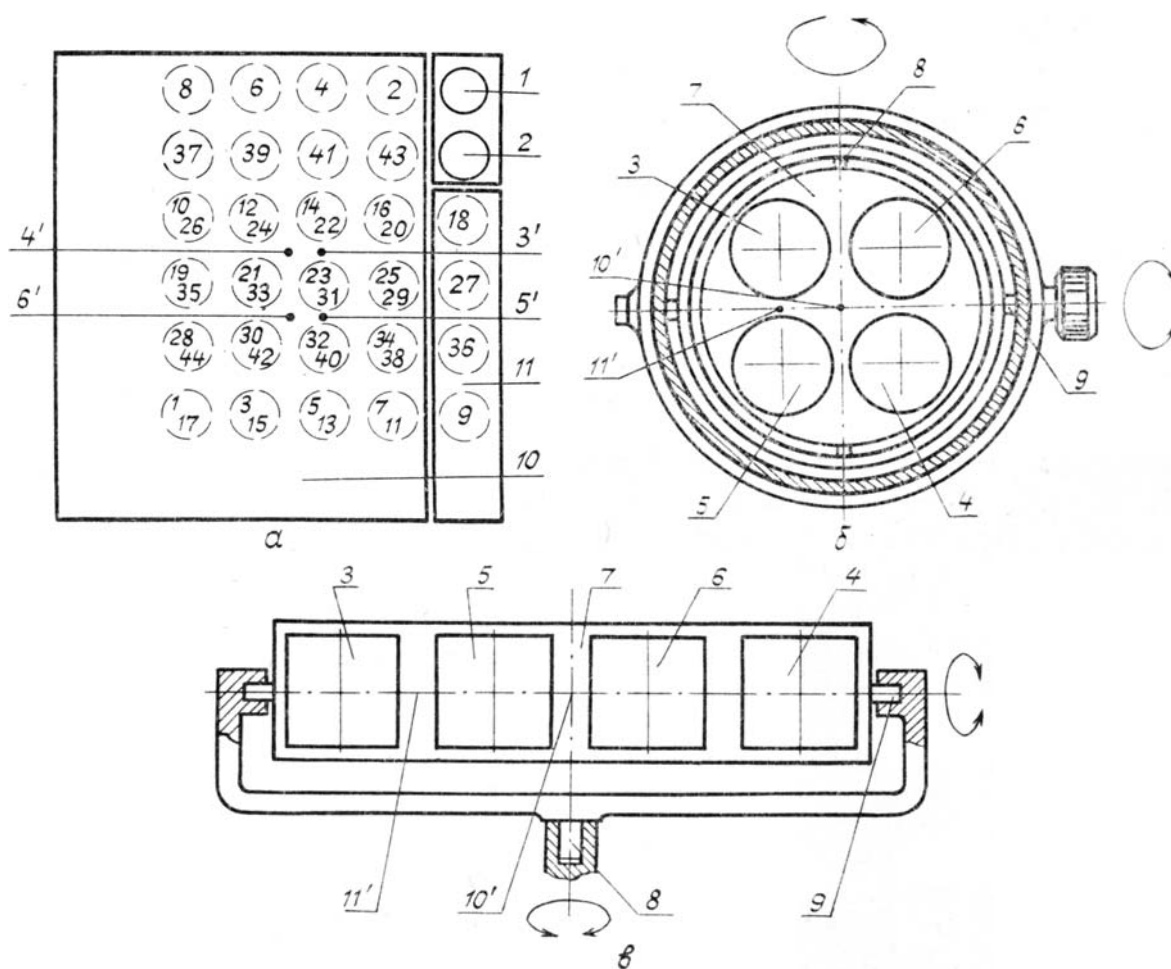


Рис. 2. Многоходовая матричная 4-объективная система: *a* — зеркальные коллективы; *б* — зеркальные объективы на круглом держателе; *в* — вариант компоновки объективов в один ряд

При повороте держателя 7 центры кривизны жестко спаренных объективов 3, 4 и 5, 6 (т. 3', 4' и 5', 6') скользят по поверхности коллектива 10, сохраняя расстояние между собой неизменным. При наклоне держателя 7 эти центры также смещаются по высоте, их взаимное расположение остается постоянным. Регулировку числа строк в матрице производят наклоном всего держателя 7 вокруг горизонтальной оси 9. Количество строк прямо пропорционально углу наклона держателя 7. Изменение числа столбцов в матрице достигается поворотом держателя 7 вокруг вертикальной оси 8. Количество столбцов прямо пропорционально углу поворота держателя в сторону удаления от отверстий 1, 2. Последнее изображение попадает в выходное отверстие 2 не при любом повороте и наклоне держате-

ля 7, а в положениях, соответствующих фиксированным смещениям первого изображения, кратным указанным межцентровым расстояниям.

Поскольку центры кривизны объективов разных пар разнесены по высоте с определенным смещением, в матрице создается двойное наложение изображений, при этом сохраняется принцип суперпозиций.

Число проходов N в многоходовой матричной системе может быть подсчитано из соотношения

$$N = (m - 1)(4n - 2), \quad (2)$$

где m — число строк, составляющих ряд четных чисел 2, 4, 6, 8 ...; n — число столбцов, составляющее ряд натуральных чисел 1, 2, 3, 4

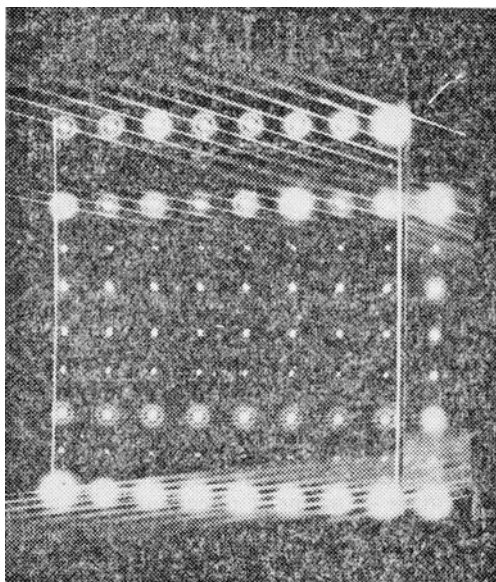


Рис. 3. Фотография матрицы изображений на коллективах после 306 проходов излучения He—Ne-лазера

Двойное наложение изображений осуществляется в матрице при значениях $m \geq 4$ и $n \geq 2$.

Кроме всех лучших качеств, присущих 3-объективной системе, 4-объективная обладает еще и следующими преимуществами. В системе повышена точность и надежность перестройки числа ходов за счет упрощения механизма регулирования. Несмотря на предельно большое число проходов, 4-объективная система обладает исключительно высокой устойчивостью изображений. При внешних воздействиях на систему (толчки, удары, вибрация) осуществляется полная самокомпенсация положений четных изображений, поэтому ошибка в положении изображений не накапливается. Причем все четные и нечетные изображения матрицы соответственно точно повторяют положение входного отверстия и его первого изображения при любом числе ходов. При тех же размерах коллективов практически вдвое увеличивается длина оптического пути. В 4-объективной матричной системе осуществлена равномерная энергетическая нагрузка на все объективы, что важно для ряда прикладных задач. А компактное расположение изображений в матрице и их двойное наложение создают дополнительный эффект системы — значительное уменьшение aberrаций поля зрения. Для лазерных источников малой угловой расходимости систему практически можно считать безабберационной.

На рис. 3 представлена фотография матрицы изображений на коллективах, наглядно подтверждающая отсутствие искажений после 306 ходов излучения He-Ne-лазера. Некоторое раздвоение точек связано со сдвигом накладываемых изображений. Последние изображения в виде одинарных точек матрицы (вторая строка сверху) сохраняют размер и форму первоначальных очертаний сечения лазерного пучка на входе в систему. Лишь выходная точка, падающая на скошенную грань вспомогательного коллектива, несколько нарушает четкую геометрию матрицы.

Многоходовые кюветы на базе 3-объективной матричной системы, вписанной в цилиндрический корпус, обладают большим относительным отверстием, чем аналогичные кюветы с матричной 4-объективной системой равных размеров. Поскольку действительные размеры зрачка системы в большей степени влияют на aberrации широкого пучка, то для 3-объективной системы нами выполнен теоретический анализ aberrаций [16]. В указанной работе, кроме того, обнаружены совпадающие условия для фокусировки изображения на выходной щели и компенсации астигматизма. Проведенные исследования [16] позволили дать ряд практических рекомендаций при конструировании и эксплуатации ММС.

Многоходовые матричные трех- и четырехобъективные системы позволяют осуществить компоновку объективов в один ряд. Это особенно удобно в случаях, не связанных с монтажом системы в герметичной трубчатой кювете. Например, в установках на открытых трассах. На рис. 2, в показано

однорядное расположение объективов 4-объективной матричной системы.

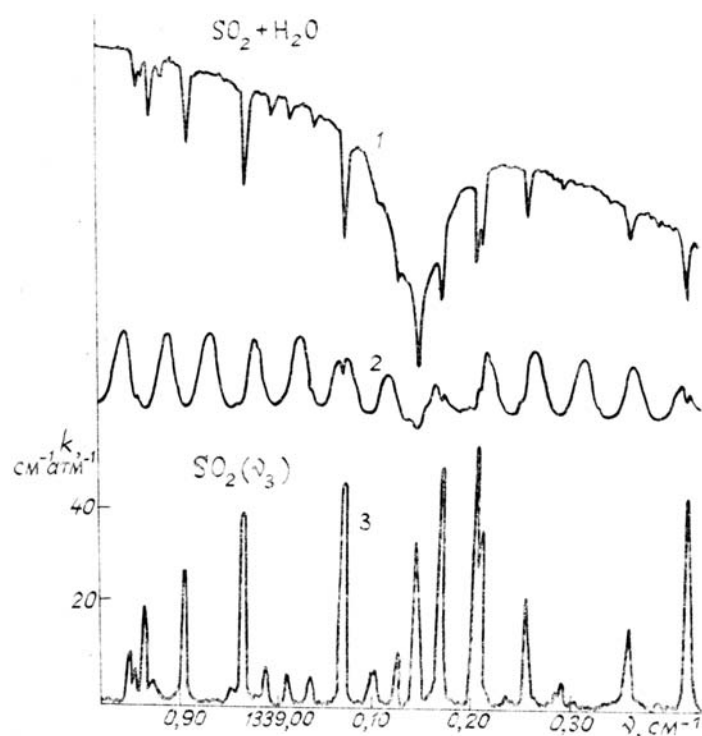


Рис. 4. Спектры, полученные на диодном лазерном спектрометре, снабженном многоходовой матричной кюветой: 1 — узкие пики поглощения принадлежат колебательно-вращательной линии полосы $\text{SO}_2(\nu_3)$, широкая линия — поглощение атмосферной воды вне кюветы, вблизи вершины широкой линии обозначена узкая линия поглощения водяного пара; 2 — калибровочный спектр эталона Фабри—Перо (область свободной дисперсии — $0,0397 \text{ см}^{-1}$); 3 — спектр коэффициента поглощения $\text{SO}_2(\nu_3)$

ММС включены в тему плана стран — членов СЭВ «Приборы и методы оптико-спектроскопических измерений». На рис. 4 представлены спектры, полученные в ИОФ АН СССР на диодном лазерном спектрометре, снабженном многоходовой матричной кюветой (ИХФ АН СССР). Давление атмосферного воздуха — 30 Торр. Концентрация серного ангидрида — 30 ppm. Длина оптического пути — 81 м (90 ходов).

- White J. U. // J. Opt. Soc. Amer. 1942. V. 32. № 5. P. 285—288.
- A. c. 1082162 (СССР) МКИ G 02 B 17/06. /Чернин С.М., Барская Е.Г. Оpubл. в Б. И. 1985, № 33.
- A. c. 1091101 СССР, МКИ G 02 B 17/06. /Чернин С.М., Барская Е.Г. Оpubл. в Б. И. 1984. № 17.
- Пат. ГДР, DD № 245796. /Cernin S.M., Barskaja E.G., 1987.
- Пат. ГДР, DD № 243627, /Cernin S.M., Barskaja E.G., 1987.
- Пат. Франции, FR № 2555738, /Chernin S.M., Barskaya E.G., 1986.
- Пат. США, US № 4626078. /Chernin S. M., Barskaya E. G., 1986.
- Пат. Англии, GB № 2161290. /Chernin S.M., Barskaya E.G., 1987.
- White J. U. // J. Opt. Soc. Amer. 1976. V. 66. № 5. P. 411—416.
- Hanst P. L. Advances in Environmental Science and Technology. 1971. V. 11. Willey, New York. P. 91.
- Horn D., Pimentel G. C. // Appl. Opt. 1971. V. 10. № 8. P. 1892—1898.
- Herriott D. R., Schulte H. J. // Appl. Opt. 1965. V. 4. № 8. P. 883—889.
- Schulz-DuBois E. O. // Appl. Opt. 1973. V. 12. № 7. P. 1391—1393.
- A. c. 798678 СССР, МКИ G 02 B 17/06. /Чернин С.М. Оpubл. в Б. И. 1981. № 3.
- A. c. 206857 СССР, МКИ G 01 j. /Барская Е.Г. Оpubл. в Б. И. 1967. № 1.
- Чернин С.М., Михайлов С.Б., Барская Е.Г., Пейсахсон И.В. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 4. С. 102—108.

Институт химической физики АН СССР им. Н.Н. Семенова,
Москва

Поступила в редакцию
11 июля 1989 г.

S. M. Chernin, E. G. Barskaya. Multipass Matrix Systems as the Most Promising Systems of Long Pass for High Resolution Spectroscopy Applications.

High-transmission three- and four-objective multipass matrix systems are described in the paper for high resolution spectroscopy applications, which provide extremely long optical paths for absorption. In these systems the images are formed on the field mirrors in the form of compact matrices with the adjustable number of lines and columns. The number of passes can achieve 500 with the high reflectance mirrors. Such matrix systems have very high optical quality and performance characteristics, being at the same time very simple in construction. These systems can also be used as delay lines for optical signals in laser technology. The matrix systems are new generation of the multipass systems.