ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
Т. 58, № 8/3 ФИЗИКА 2015

УДК 681.785.554

Д.В. ПЕТРОВ, И.И. МАТРОСОВ, Д.О. СЕДИНКИН

МНОГОПРОХОДНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ СИГНАЛОВ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА

Предлагается многопроходная оптическая система для увеличения интенсивности сигналов комбинационного рассеяния (КР) света газовых сред. Представлены результаты экспериментальной апробации данной оптической системы на примере регистрации спектров КР атмосферного воздуха. Получено хорошее согласие экспериментальных данных с теоретическими расчетами. При коэффициенте отражения используемых зеркал $R \approx 98$ % достигнуто увеличение интенсивности сигналов КР в 17 раз, что позволило при мощности лазера $P = 0.5$ Вт зарегистрировать за 100 с в атмосферном воздухе спектры КР углекислого газа, а также изотопа азота $N^{14}N^{15}$. Приведены пути дальнейшего повышения эффективности предложенной многопроходной оптической системы.

Ключевые слова: *спектроскопия, комбинационное рассеяние света, многопроходная оптическая система.*

Известно, что наряду с преимуществами спектроскопии комбинационного рассеяния света (КР) газовых сред при решении фундаментальных и прикладных задач основным ее недостатком является малая интенсивность сигналов КР вследствие низких сечений рассеяния и малых концентраций молекул в анализируемом объеме. Одним из вариантов увеличения интенсивности сигналов КР является увеличение интенсивности возбуждающего лазерного излучения. В самом простом случае, данный подход может быть реализован путем использования лазера с более высокой выходной мощностью, однако это не всегда возможно по конструктивным, либо экономическим соображениям. Альтернативным вариантом является использование многопроходной оптической системы. Однако стоит отметить, что в отличие от абсорбционной спектроскопии, где за счет количества отражений необходимо увеличить длину взаимодействия анализируемой среды и излучения, суть эффективной многопроходной оптической системы для спектроскопии КР заключается в увеличении интенсивности лазерного излучения в малом рассеивающем объеме за счет многократного прохождения лазерного луча через данный объем.

В литературе по спектроскопии КР описано несколько вариантов подобных оптических систем [1, 2] с помощью которых авторам удавалось обеспечить увеличение интенсивности сигналов КР более чем в 10 раз. Однако данные системы также обладают и недостатками, среди которых сложность и нестабильность настройки либо большие габариты. На наш взгляд, наиболее перспективной выглядит многопроходная система [3, 4], состоящая из двух сферических зеркал расположенных концентрически. Число отражений луча, которое можно в ней обеспечить, главным образом определяется размерами зеркал и диаметром лазерного луча. Отметим, что в данной многопроходной системе лазерный луч всегда фокусируется в двух точках, а его движение осуществляется в одной плоскости.

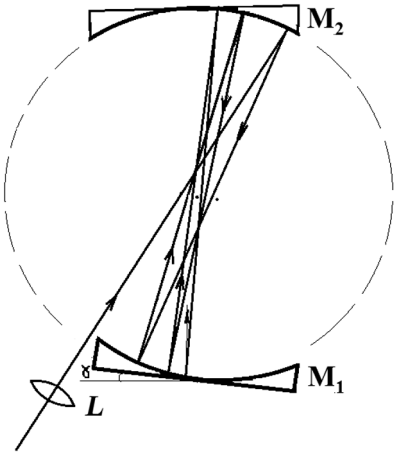


Рис. 1. Многопроходная оптическая система

Анализ рассмотренной оптической системы показал, что ее эффективность может быть значительно увеличена. Для этого нужно одно из зеркал установить таким образом (рис. 1), чтобы оно было наклонено в плоскости движения лазерного луча на угол

$$\gamma = \frac{\arcsin^2(r/4f)}{2\cdot\arcsin(d/4f) - 4\cdot\arcsin(r/4f)},$$

где r – радиус лазерного луча; d – диаметр зеркал; f – фокусное расстояние зеркал [5]. Аналитический расчет, а также компьютерное моделирование данной оптической системы показали, что при тех же параметрах лазерного луча и зеркал общее количество проходов увеличивается в 4 раза. Данное преимущество обеспечивается за счет того, что в известной схеме расстояния между отражениями луча на зеркалах получаются одинаковыми и луч, достигая края одного из зеркал выхо-

дит из системы, а в модифицированной схеме – расстояния между отражениями луча на зеркалах с каждым новым проходом уменьшаются, что уже позволяет увеличить количество проходов. Помимо этого, поворот одного из зеркал непосредственно на угол γ заставляет луч, дойдя до края одного из зеркал, пойти в обратном направлении по диаметру зеркала.

Описанная модифицированная многопроходная система была апробирована на разработанном КР-спектрометре [6]. Параметры используемых зеркал: d = 50 мм, f = 100 мм, коэффициент отражения на длине волны используемого лазера (532 нм) $R \approx 98$ %, при этом $r \approx 3$ мм, фокусное расстояние линзы F = 210 мм. Оценка эффективности проводилась путем контроля интенсивности Q-ветви спектра КР азота, присутствующего в атмосферном воздухе. Время регистрации одного спектра КР – 100 с.

Экспериментально было установлено, что в силу специфики используемой оптики для сбора рассеянного света (фотообъектив) и ширины входной щели монохроматора (100 мкм) наибольшая эффективность обеспечивается в случае, когда данная многопроходная система установлена так, что входная щель монохроматора находится в плоскости движения лазерного луча, а обе точки фокусировки лазерного луча располагаются на оптической оси системы сбора рассеянного света. При таком расположении, учитывая глубину резкости объектива для сбора рассеянного света, основной вклад в зарегистрированную интенсивность дает только одна точка пересечения лучей, на которую настроен объектив, однако при этом отсутствуют потери собранного рассеянного света из-за ширины входной щели.

На рис. 2 изображена экспериментально полученная зависимость интенсивности сигнала КР Q-ветви азота в зависимости от количества проходов лазерного луча через рассеивающий объем. На этом же графике приведены теоретические оценки интенсивности сигнала КР для разных коэффициентов отражения зеркал (R) исходя из того, что ожидаемая интенсивность сигналов КР (I) определяется соотношением

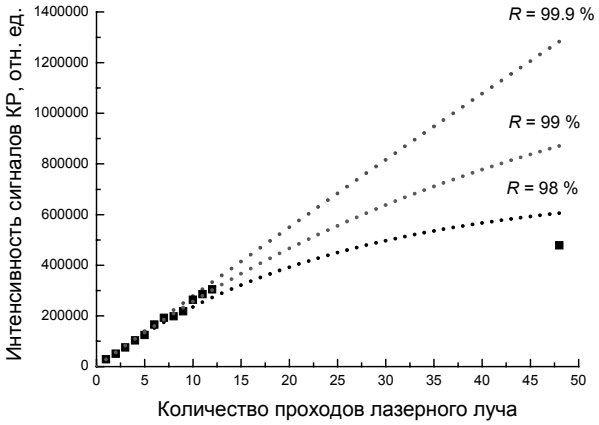


Рис. 2. Зависимость теоретических (точки) и экспериментально зарегистрированной (квадраты) интенсивностей сигналов КР от количества проходов лазерного луча через рассеивающий объем

$$I = I_0 + I_0 R^2 + I_0 R^4 + ... + I_0 R^{(2n-2)} = I_0 \frac{1 - R^{2n}}{1 - R^2},$$

где n – количество проходов лазерного луча через рассеивающий объем; I_0 – интенсивность сигналов КР за 1 проход.

Из полученных зависимостей видно, что зарегистрированная интенсивность сигналов КР достаточно близка к теоретической. Некоторое несоответствие, вероятнее всего, обуславливается нестабильностью мощности лазера, а также возникающими аберрациями.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что использование данной многопроходной оптической системы позволило увеличить интенсивность сигналов КР практически в 17 раз по сравнению с классической однопроходной схемой возбуждения. Это позволило при мощности лазера P = 0.5 Вт зарегистрировать за 100 с в атмосферном воздухе спектры КР углекислого газа, а также изотопа азота $N^{14}N^{15}$ (рис. 3). При этом, как показали теоретические оценки, использование аналогичных зеркал, но с коэффициентом отражения R = 99 %, либо R = 99.9 %, обеспечили бы увеличение интенсивности в 31 раз и 46 раз соответственно. Помимо этого, стоит отметить, что уменьшение диаметра лазерного луча позволит увеличить количество его проходов между зеркалами, что пропорционально увеличит интенсивность сигналов КР.

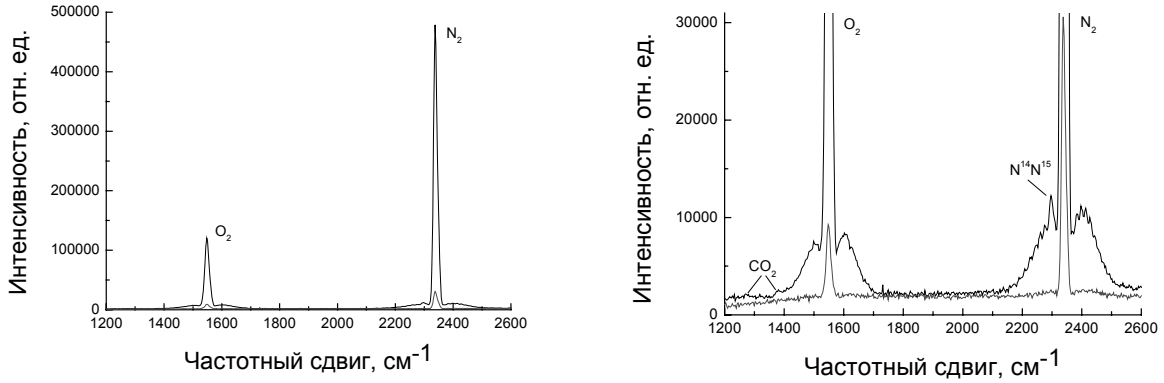


Рис. 3. Спектры КР атмосферного воздуха, представленные в разных масштабах: нижний спектр – однопроходный вариант возбуждения, верхний спектр – многопроходный вариант возбуждения

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hill R.A., Mulac A.J., Hackett C.E. // Appl. Opt. – 1977. – V. 16. – No. 7. – P. 2004–2006.
2. Hartley D.L., Hill R.A. // J. Appl. Phys. – 1972. – V. 43. – No. 8. – P. 4134–4136.
3. Kiefer W., Bernstein H.J., Wieser H., Danyluk M. // J. Mol. Spec. – 1972. – V. 43. – No. 3. – P. 393–400.
4. Li X., Xia Y., Zhan L., Huang J. // Opt. Lett. – 2008. – V. 33. – No. 18. – P. 2143–2145.
5. Булдаков М.А., Матросов И.И., Петров Д.В., Корольков В.А. Многопроходная оптическая система возбуждения спектров КР // Патент РФ № 2469281. Опубл. 10.12.2012. Бюл. № 34.
6. Петров Д.В., Матросов И.И., Тихомиров А.А. // Журн. прикл. спектр. – 2015. – Т. 82. – № 1. – С. 124–128.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск, Россия
E-mail: dpetrov@imces.ru

Поступила в редакцию 27.08.15.

Петров Дмитрий Витальевич, к.т.н., науч. сотр.;
Матросов Иван Иванович, к.т.н., ст. науч. сотр.;
Сединкин Данила Олегович, магистрант.

D.V. PETROV, I.I. MATROSOV, D.O. SEDINKIN

THE OPTICAL MULTI-PASS SYSTEM FOR INCREASING THE RAMAN SIGNAL INENSITY

We propose a multi-pass optical system for increasing intensity of the Raman signals in a gaseous medium. The results of experimental testing of the optical system by the example of recording the Raman spectra of the atmospheric air are presented. Good agreement between experimental data and theoretical calculations is observed. By using mirrors with the reflection coefficient $R \approx 98$ %, the Raman signals intensity increased by 17 times, allowing us to record the Raman spectra of carbon dioxide and nitrogen isotope $N^{14}N^{15}$ for 100 s in the air at laser power $P = 0.5$ W. The methods of development of the proposed multi-pass optical system are considered.

Keywords: *spectroscopy, Raman scattering, multi-pass optical system.*

REFERENCES

1. Hill R.A., Mulac A.J., Hackett C.E. *Appl. Opt*., 1977, vol. 16, no. 7, pp. 2004–2006.
2. Hartley D.L., Hill R.A. *J. Appl. Phys*., 1972, vol. 43, no. 8, pp. 4134–4136.
3. Kiefer W., Bernstein H.J., Wieser H., Danyluk M. *J. Mol. Spec*., 1972, vol. 43, no. 3, pp. 393–400.
4. Li X., Xia Y., Zhan L., Huang J. *Opt. Lett*., 2008, vol. 33, no. 18, pp. 2143–2145.
5. Buldakov M.A., Petrov D.V., Matrosov I.I., Korolkov V.A. *Multi-pass optical system for excitation of Raman spectra* // Patent RF no. 2469281. Published 10.12.2012. Bul. no. 34.
6. Petrov D.V., Matrosov I.I., Tikhomirov A.A. *J. Appl. Spec*., 2015, vol. 82, no. 1, pp. 120–124.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

Petrov Dmitry Vitalyevich, Candidate of Engineering Sciences, Research Officer.
Matrosov Ivan Ivanovich, Candidate of Engineering Sciences, Senior Research Officer.
Sedinkin Danila Olegovich, Undergraduate.