

го отображения информации, на одном из которых основано, например, зрение, требуют количества приемников, равного или превышающего необходимое количество разрешаемых элементов. Физической основой для такого отличия является, на наш взгляд, то, что представленный принцип может реализовываться только на некогерентных сигналах, не имеющих периода повторения, автокорреляционные функции которых имеют один максимум. В то время как известные принципы могут реализовываться и с периодическими сигналами, автокорреляционные функции которых имеют периодический характер.

Следует также отметить наиболее вероятные, на наш взгляд, области использования представленного принципа. Это прежде всего акусто- и радиотермометрия, а также применения, требующие определения местоположения таких возмущений, как очаги землетрясений, сигналы акустической эмиссии, предшествующей разрушению конструкций, грозовые разряды и т.д.

Список литературы

- [1] *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М., 1970. (Born M., Wolf E. Principles of Optics. Pergamon press, 1964).
- [2] *Карслоу Г., Егер Д.* Теплопроводность твердых тел. М., 1964. (Carslaw H.S., Jaeger J.C. Conduction of Heat in Solids. Oxford at the Clarendon Press.)
- [3] *Corn B.F., Hassell B.C., Keltonic F.J.* // J. Acoust. Soc. Am. 1965. Vol. 37. P. 523.

02;07;12

Журнал технической физики, т. 66, в. 5, 1996

ИЗМЕРЕНИЕ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА ЛИТИЯ МЕТОДОМ ВНУТРИРЕЗОНАТОРНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

© Р.А.Ахмеджанов, Ю.В.Ростовцев, И.Н.Полушкин

Институт прикладной физики РАН,
603600, Нижний Новгород, Россия
(Поступило в Редакцию 9 ноября 1994 г.)

Введение

Исследование изотопного состава осуществляется обычно методами эмиссионной спектроскопии [1,2]. При этом приходится удовлетворять противоречивым требованиям. С одной стороны, для обеспечения точности измерений необходимо использовать регистрирующую аппаратуру с достаточно высоким спектральным разрешением (поскольку контуры линий изотопов обычно перекрываются), что сопряжено с неизбежной потерей света, а значит, с использованием проб с высоким содержанием исследуемого вещества. С другой стороны, необходимо следить за отсутствием самопоглощения, по крайней мере для переходов с большим значением силы осциллятора.

Не случаен поэтому интерес к более чувствительным лазерным методам спектроскопии. В работе [3], например, предложено использовать лазерную накачку и оптогальваническое детектирование. Однако

при этом приходится сканировать спектр, обеспечивая жесткий контроль за параметрами лазера и пробы.

В настоящей работе рассматривается возможность использования метода внутриврезонаторной лазерной спектроскопии [4] для определения изотопного состава на примере естественной смеси изотопов Li^6 и Li^7 .

Экспериментальная установка

Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. В работе использовались стеклянные отпаянные газоразрядные трубки 1 с оптически прозрачными окнами, расположенными под углом Брюстера. Трубки наполнялись инертным газом (обычно гелием или неоном) при давлении 1 Тор. В специальном стеклянном отростке помещалась нагреваемая нихромовой спиралью или токами ВЧ металлическая капсула 2 с галогенидами лития (LiI , LiCl или LiF). В таком же отростке помещался цилиндрический анод 3. В качестве катода 4 нами использовалось нагреваемое переменным током вольфрамовое кольцо, выполненное из ленты толщиной 0.05 мм. Блок питания разрядной трубки обеспечивал импульсный разряд длительностью 0.1–5 мс с крутым задним фронтом (~ 1 мкс) и силой тока до 400 А. Нагревание ампулы 2 приводит к распылению галогенидов лития и их абсорбции на конструктивных элементах разрядной трубки, в том числе и на катоде 4. В импульсном разряде вследствие катодного распыления литийсодержащие молекулы попадают в объем трубки и диссоциируют. После окончания разряда атомы лития рекомбинируют (или диффундируют на стенки) за время порядка 1 мс. Выбирая задержку импульса лазера относительно конца импульса тока, можно обеспечить оптимальную концентрацию атомов лития для проведения изотопного анализа.

Разрядная трубка помещалась внутри резонатора перестраиваемого импульсного лазера. Раствор смеси красителей родамина 6Ж, оксазина 17 и 18 в этаноле прокачивался через ячейку 5. С целью устранения паразитной селекции мод подложки зеркал резонатора 6 (коэффициент отражения 0.9–0.95) и все оптические окна имели клиновидную

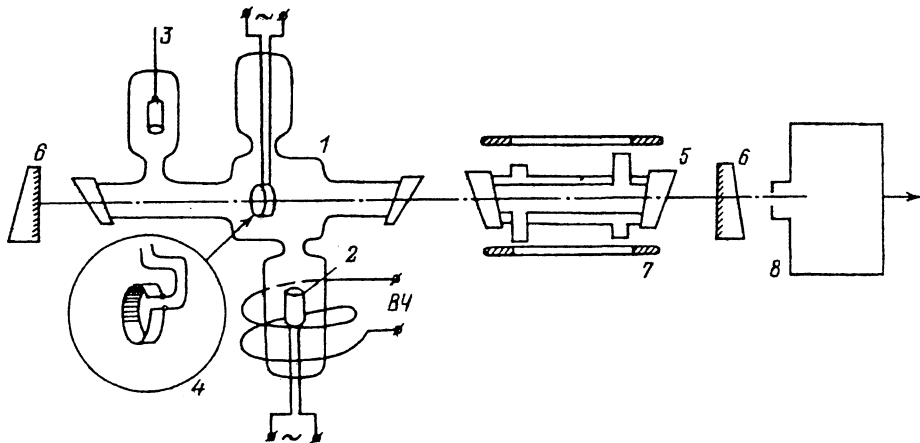


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки.

форму с углом 6–8 град. Накачка активной среды осуществлялась двумя импульсными лампами 7, обеспечивающими импульсы генерации в области 670 нм шириной 8 нм и энергией ~ 1 мДж (параметр насыщения линии поглощения лития меньше 0.1). Спектр генерации анализировался с помощью автоколлимационного спектрографа 8 с фокусным расстоянием 1600 мм, разрешающей способностью $3 \cdot 10^5$ и обратной линейной дисперсией 0.1 нм/мм.

Регистрация спектра излучения лазера проводилась помощью многоканальной системы с использованием в качестве приемника излучения стандартной телевизионной камеры ПТУ-51.

Процедура обработки данных и экспериментальные результаты

Особенности энергетической схемы термов изотопов лития таковы, что обусловленное спин-орбитальным взаимодействием тонкое расщепление уровня 2P составляет 0.34 см и практически совпадает с изотопическим сдвигом *D*-линий изотопов Li^6 и Li^7 [5]. Поэтому спектр поглощения смеси изотопов состоит из трех компонент, отстоящих на 0.34 см друг от друга: синяя компонента соответствует D_2^7 , центральная компонента определяется совместным поглощением на переходах D_1^7 и D_2^6 и красная — D_1^6 . Отношение коэффициентов поглощения в центре линий D_2^7 и D_1^6 составляет величину 22.9.

На рис. 2 приведен характерный образец ВРЛС-граммы, на котором отмечены положения центров линий D_2^7 , D_1^7 , D_2^6 , D_1^6 . В фокальной плоскости спектрографа установлены два непрозрачных экрана шириной 0.3 мм, края которых на рисунке соответствуют точкам А и В, С и D; промежутки между этими точками определяют “линию нуля”, относительно которой отсчитывается интенсивность лазерного излучения $I(\nu)$. Точки *E, F, G, H, M* выбираются вне (или в далеких крыльях) линий поглощения. Плавная кривая, проходящая через эти точки, определяет интенсивность лазерного излучения $I_0(\nu)$ в отсутствие селективных потерь. Кривизна этой линии определяется изменением локальной чувствительности отдельных участков сигнальной пластины видикона. Процедура обработки результатов начинается с фильтрации (сглаживания) ряда. Далее производится нормировка значений $I(\nu)$, так что величина $I(\nu)/I_0(\nu)$ отличается от единицы только в областях спектра, где имеются селективные потери. Пример получаемых после такой обработки экспериментальных данных приведен на рис. 3. В условиях наших экспериментов реализуется ситуация, достаточно характерная для спектроскопии разреженных газов: не играют заметной роли механизмы столкновительного и других видов уширений, приводящих к дисперсионному контуру. Поэтому контур линии поглощения можно считать доплеровским (фойгтовский параметр $\alpha < 0.01$), соответствующим температуре 300–400 К, так что

$$k_\nu = k_0 \exp(-4 \ln 2 (\nu - \nu_0)^2 / \Delta \nu_D^2). \quad (1)$$

Измерения эквивалентной ширины *A*, аналогичной полному поглощению или эквивалентной ширине в традиционной спектроскопии поглощения [6]

$$A = \int_0^\infty (1 - I_\nu/I_0) d\nu \quad (2)$$

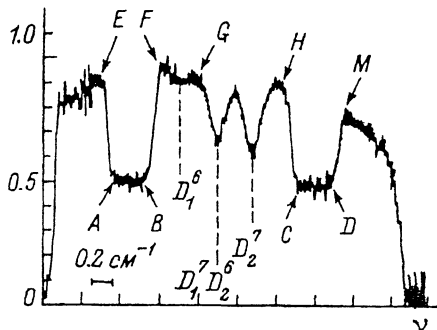


Рис. 2. ВРЛС-грамма D -линий естественной смеси изотопов лития.

Точки A и B, C и D определяют линию "нуля". Точки $E \dots H$ — линию интенсивности генерации в отсутствие селективных потерь.

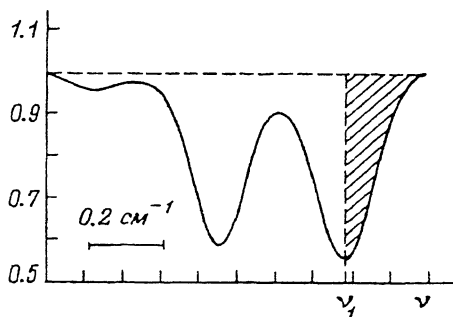


Рис. 3. ВРЛС-грамма после фильтрации и нормировки.

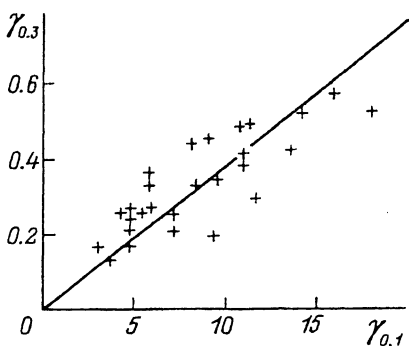


Рис. 4. Результаты измерений эффективного коэффициента поглощения в центре линий $D_2^7(\gamma_{01})$ и $D_1^6(\gamma_{03})$.

позволяют определить $S = A/\Delta\nu_D$ как для синей компоненты D_2^7 (далее мы присвоим ей индекс 1), так и красной D_1^6 (индекс 3), а затем, используя зависимость величины полного поглощения A для доплеровского контура от эффективного коэффициента поглощения γ , найти γ_{01} и γ_{03} . В случае доплеровского контура коэффициент поглощения в центре линии определяется соотношением [7]

$$k^0 = \gamma^0/l_{ef} = 2\sqrt{\pi \ln 2} c^2 N f / m_c c \Delta\nu_D. \quad (3)$$

Принимая во внимание $f_{D2}/f_{D1} = 0.5$ и $\Delta\nu_D(Li^7)/\Delta\nu_D(Li^6) = 0.926$, получаем

$$\gamma_{03} = 0.463(N^6/N^7)\gamma_{01}, \quad (4)$$

так что изотопный состав N^6/N^7 может быть определен по коэффициенту линейной регрессии γ_{03} на γ_{01} . Анализ ВРЛС-грамм, подобных приведенной на рис. 3, заставляет обратить внимание на ряд особенностей, которые могут привести к значительным ошибкам при определении величин γ_{03} и γ_{01} .

1. Красное крыло линии D_2^7 перекрывается с центральной компонентой наблюдаемого спектра. Поэтому величину A_1 удобно определять как удвоенное значение интеграла (2) в области $\nu > \nu_1$, равного площади фигуры, заштрихованной на рис. 3.

2. Погрешность определения A_3 может быть велика из-за перекрытия синего крыла этой линии с центральной компонентой. Однако можно использовать тот факт, что в наших экспериментах аппаратная ширина значительно превышает доплеровскую, так что все линии на ВРЛС-грамме имеют форму инструментального контура и $A_i \sim (1 - I_{\nu_i}/I_0)$ (ν_i — частота центра i -й линии)

$$A_3 = A_1 \frac{1 - I_{\nu_3}/I_0}{1 - I_{\nu_1}/I_0}. \quad (5)$$

Использование стандартных программ по статистической обработке экспериментальных результатов [8] позволяет определить коэффициент линейной регрессии и его погрешность при определенной доверительной вероятности. Априорный выбор необходимой точности определяет число измерений в серии (объем выборки). На рис. 4 приведены результаты серии из 27 измерений. Эти данные хорошо группируются вблизи линии регрессии с коэффициентом корреляции 0.988. По величине коэффициента регрессии можно согласно (4) определить изотопный состав естественного лития $N^6/N^7 = 0.080 \pm 0.002$, $p = 0.9$. Этот результат находится в полном согласии со справочными данными [5] 0.0813.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о возможности успешного применения внутривибраторной лазерной спектроскопии для измерения изотопного состава. Отметим некоторые особенности ВРЛС, определяющих преимущества ее по сравнению с другими методами: 1) внутривибраторная лазерная спектроскопия измеряет спектры поглощения, поэтому нет необходимости контролировать влияние эффекта самопоглощения; 2) информацию о спектре несет интенсивное лазерное излучение, что позволяет применять спектральную аппаратуру со сверхвысоким разрешением; 3) чувствительность ВРЛ спектрометра достаточно просто регулируется изменением длительности импульса генерации, что избавляет от необходимости трудоемкого выбора рабочей концентрации исследуемого вещества в пробе.

Список литературы

- [1] *Бабушкин А.А., Бажулин Н.А., Королев Ф.А.* и др. Методы спектрального анализа. М., 1962. 161 с.
- [2] *Егорова Л.В., Карташева М.А., Лещева И.Е., Сидоренко М.Е.* // ЖПС. 1986. Т. 54. № 1. С. 17-21.
- [3] *Langlois E., Gagne J.-M.* // J. Opt. Soc. Am. B. 1994. Vol. 11. N 4. P. 552-557.
- [4] *Саркисов О.М., Свириденков Э.А., Сучков А.Ф.* // Хим. физ. 1982. Т. 1. Вып. 9. С. 1155-1170.
- [5] *Радциг А.А., Смирнов Б.М.* Параметры атомов и атомных ионов. М.: Энергоатомиздат, 1986. 344 с.
- [6] *Быков Ю.В., Гитлин М.С., Новиков М.А. и др.* // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 7. С. 1310-1314.
- [7] *Фриш С.Э.* Оптические спектры атомов. М.; Л.: ГИФМЛ, 1968. 640 с.
- [8] Сборник научных программ на фортране. Статистика. М.: Статистика, 1974. 315 с.