

УДК 535.343.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ СРАВНЕНИЕ МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ СУБ-ДОПЛЕРОВСКОЙ РЕЗОНАНСНОЙ ФЛЮОРЕСЦЕНЦИИ С ПОМОЩЬЮ СВЕРХТОНКОЙ ЯЧЕЙКИ С ДРУГИМИ МЕТОДАМИ

Т.С. ВАРЖАПЕТЯН¹, Н.Р. БАЛАСАНЯН², А.А. НЕРСИСЯН²,
А.Д. САРГСЯН², Д.Г. САРКИСЯН¹

¹Институт физических исследований НАН Армении

²Ереванский государственный университет

(Поступила в редакцию 7 октября 2003 г.)

С помощью одночастотного диодного лазера ($\lambda=780$ нм) экспериментально реализовано суб-доплеровское разрешение спектров резонансной флюоресценции D_2 линии атомарных паров Rb следующими методами: с помощью сверхтонкой ячейки с толщиной столба паров атомов рубидия $L \sim 400$ нм; с помощью реализации видоизмененной схемы насыщения поглощения для получения резонансной флюоресценции; с помощью селективного отражения от границы окна ячейки (YAG) – атомарный пар Rb; с помощью атомного пучка Rb. Приводится анализ спектров резонансной флюоресценции, полученных данными методами при тех же экспериментальных параметрах, с целью выявления преимуществ и недостатков этих методов.

1. Введение

Хорошо известно, что в ячейках обычной длины (1–100 мм), которые содержат пары атомов щелочных металлов, переходы между отдельными атомными уровнями сверхтонкой структуры в спектрах резонансной флюоресценции (РФ) и поглощения спектрально не разрешены из-за доплеровского уширения (ширина спектра отдельного перехода находится в интервале 400–1000 МГц при комнатной температуре, в зависимости от щелочного металла) и если частотное расстояние между атомными уровнями щелочного металла меньше этой величины, то эти переходы “скрыты” под общим доплеровским профилем [1].

В работах [2–4] было продемонстрировано, что используя сверхтонкие ячейки (СТЯ) с толщиной столба паров атомов $L \sim 100$ –500 нм, с помощью диодных лазеров с шириной спектра ~ 20 МГц, реализуется суб-доплеровское разрешение спектра резонансной флюоресценции и поглощения атомарных паров. Физика этого явления подробно описана в [5–9].

В настоящее время существует ряд методов, также позволяющих спек-

трально разрешить переходы между отдельными атомными уровнями сверхтонкой структуры, т.е. реализовать субдоплеровскую спектроскопию РФ. К наиболее используемым методам следует отнести технику Saturation Absorption (насыщение поглощения) [1]; селективное отражение от границы окна ячейки – атомарный пар [10,11]; применение атомного пучка [12]. Субдоплеровскую спектроскопию РФ можно реализовать также, используя технику “охлажденных” атомов, когда скорости атомов могут быть уменьшены до нескольких см/с, однако его реализация технически достаточно сложна [13]. Отметим также метод, который разработан в последние годы – метод когерентного пленения населенности, с помощью которого получают ширины атомных линий, значительно меньшие натуральных ширин (рекордная величина ~50 Гц) [14]. Однако его реализация также технически сложна.

В настоящей работе экспериментально реализована суб-доплеровская спектроскопия резонансной флюоресценции паров атомов Rb на линии D_2 вышеприведенными методами при тех же экспериментальных параметрах (т.е. фиксированная ширина линии лазера, та же группа атомных переходов D_2 линии Rb) с целью выявления их преимуществ и недостатков.

2. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки приведена на рис.1. Часть непрерывного излучения лазерного диода направлялась параллельным пучком перпендикулярно поверхности окна СТЯ для реализации лучшего суб-доплеровского спектрального разрешения [2]. Конструкция СТЯ аналогична приведенной в [2]. Длина L столба паров Rb составляла ~400 нм. Эта величина определялась с помощью метода, приведенного в работе [3]. СТЯ помещалась в печьку, которая имела четыре отверстия: два отверстия – для прохождения лазерного излучения, два других отверстия – для регистрации РФ атомарных паров в направлении, перпендикулярном лазерному пучку. Температура бокового отростка СТЯ, которая определяет плотность N атомов Rb, поддерживалась при 120°C , что соответствует $N \sim 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

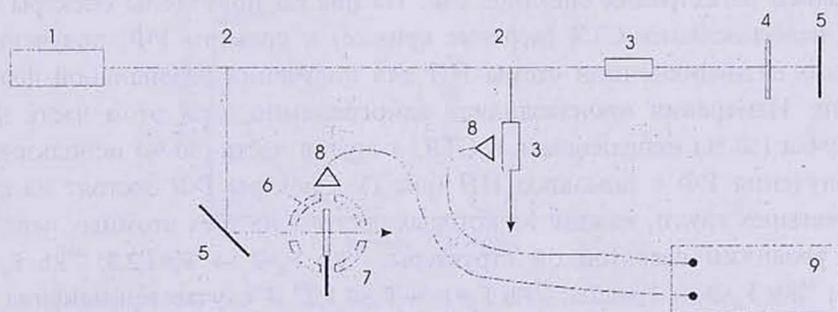


Рис.1. Схема экспериментальной установки. 1 – лазерный диод; 2 – делитель пучка; 3 – ячейка с парами Rb; 4 – фильтр; 5 – зеркало; 6 – сверхтонкая ячейка (СТЯ) с Rb; 7 – печька; 8 – фотоприемники; 9 – осциллограф Tektronix.

Вторая часть излучения лазера направлялась на ячейку с Rb длиной 8 см и с помощью зеркала (отражение от зеркала формирует "пробный пучок") осуществлялась известная схема насыщения поглощения (НП) (рис.1). Для получения резонансной флюоресценции с суб-доплеровским разрешением "пробный пучок" направлялся на вторую ячейку с Rb длиной 8 см (обе ячейки имели комнатную температуру). Сигналы РФ паров регистрировались фотодиодами ФД24К (и усиливались операционными усилителями), подключенными к двухлучевому осциллографу Tektronix TDS 3032В. Для получения спектров РФ частота лазера линейно сканировалась в спектральной области ~7 ГГц вокруг D_2 -линии атомов Rb (780 нм) посредством модуляции тока инжекции. При регистрации спектров РФ применялась пилообразная модуляция с частотой 10 Гц. Мощность лазерного излучения составляла ~5 мВт при диаметре пучка 2 мм. Спектральная ширина излучения лазера составляла 20 МГц. Для увеличения степени линейной поляризации возбуждающего излучения использовалась призма Глана-Томсона.

Для осуществления метода селективного отражения (СО) применялась ячейка с Rb, окна которой были изготовлены из граната (YAG), имеющего клиновидность ~1 градус, для разделения излучений, отраженных от первой границы (воздух – гранатовое окно) и от второй границы (гранат – пары атомов Rb). СО, которое формировалось от второй границы (гранат – пары атомов Rb, линия D_2), направлялось на фотодиод ФД24К и далее подавалось на осциллограф. Излучение лазера направлялось параллельным пучком перпендикулярно поверхности окна (отклонение от нормали менее 1 градуса) для реализации лучшего суб-доплеровского спектрального разрешения [10]. Ячейка с Rb помещалась в печь, где поддерживалась температура ~120°C.

3. Результаты и обсуждение

В работе [2] отмечалось, что в СТЯ спектральное разрешение отдельных атомных переходов между уровнями сверхтонкой структуры достигается лучше в случае РФ, чем в спектре поглощения. По этой причине проводилась только регистрация спектров РФ. На рис.2,3 приведены спектры РФ в случае использования СТЯ (верхние кривые) и спектры РФ, полученные с помощью видоизмененной схемы НП для получения резонансной флюоресценции. Измерения производились одновременно, при этом часть лазерного пучка (50 %) направлялась в СТЯ, а другая часть (50 %) использовалась для получения РФ с помощью НП (рис.1). Спектры РФ состоят из следующих четырех групп, каждая из которых состоит из трех атомных переходов между уровнями сверхтонкой структуры: $^{87}\text{Rb } F_g=2 \rightarrow F_c=1,2,3$; $^{85}\text{Rb } F_g=3 \rightarrow F_c=2,3,4$; $^{85}\text{Rb } F_g=2 \rightarrow F_c=1,2,3$; $^{87}\text{Rb } F_g=1 \rightarrow F_c=0,1,2$. В случае применения СТЯ (верхние кривые на рис.2,3) в спектрах РФ проявляются только по три суб-доплеровских пика, которые соответствуют атомным переходам, в то время как в спектрах РФ (нижние кривые), полученных с помощью НП, проявля-

ются 6 пиков, три из которых соответствуют атомным сверхтонким переходам, а другие 3 пика есть так называемые "cross-over" линии, отмеченные на кривых с-о. При этом амплитуды с-о линий существенно превосходят амплитуды пиков, которые соответствуют атомным переходам. Это является существенным недостатком метода (НП), поскольку с-о линии, находясь близко к пикам, которые соответствуют атомным переходам, могут существенно их "сдвинуть" по частоте, а в некоторых случаях (когда частотное расстояние между переходами мало, как это имеет место для $^{85}\text{Rb } F_g=2 \rightarrow F_e=1,2,3$ (рис.2)) пики, которые соответствуют атомным переходам, попадают под крыло с-о линии и не проявляются. Другое преимущество применения СТЯ – соотношение амплитуд РФ для переходов между уровнями сверхтонкой структуры остается линейным (то есть амплитуды соотносятся как вероятности переходов – см. ниже) В случае же использования НП (которое является сильно-нелинейным процессом) соотношение амплитуд переходов сильно зависит от параметров эксперимента и, как правило, не соответствует вероятностям переходов.

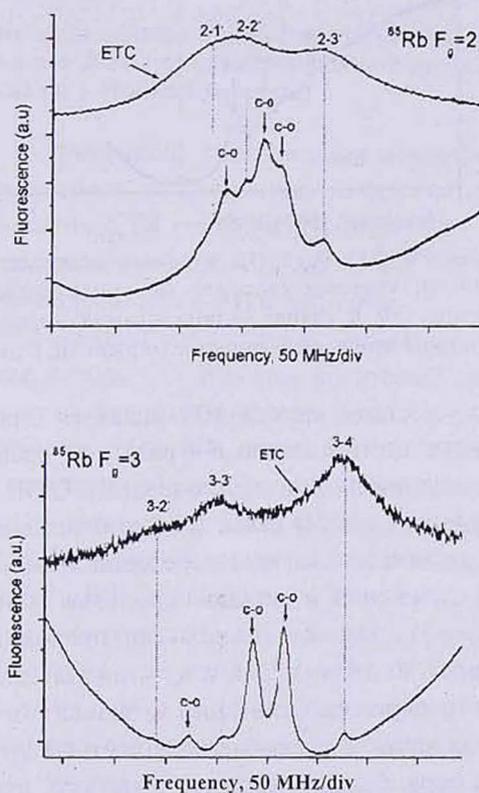


Рис.2. Спектры РФ $^{85}\text{Rb } D_2 F_g=2,3$ в случае использования СТЯ (верхние кривые), которые содержат по три суб-доплеровских пика, и спектры РФ в случае использования видоизмененной схемы насыщения поглощения (нижние кривые), которые содержат по 6 пиков (ETC – extremely thin cell (СТЯ)).

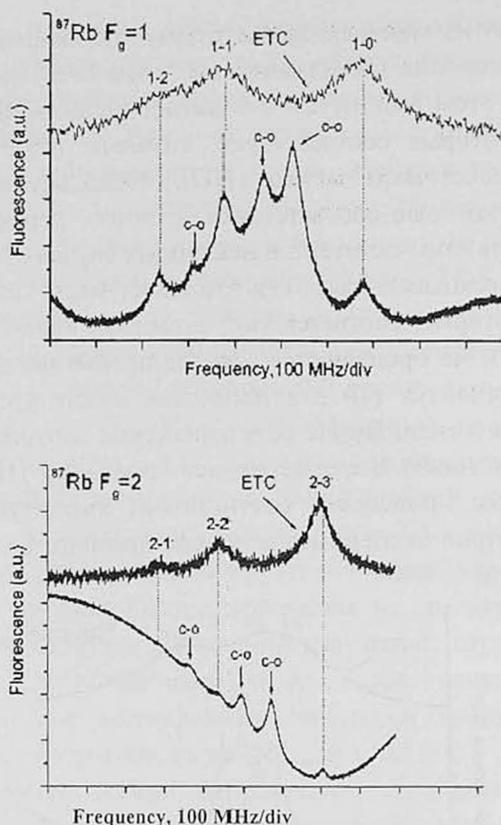


Рис.3. Спектры РФ $^{87}\text{Rb } D_2$, $F_g=1,2$ в случае использования СТЯ (верхние кривые), которые содержат по три суб-доплеровских пика, и спектры РФ в случае использования видоизмененной схемы НП (нижние кривые), которые содержат по 6 пиков.

Важным преимуществом метода НП является значительно меньшая спектральная ширина пиков (примерно в 4 раза), по сравнению с шириной аналогичных пиков, получаемых при использовании СТЯ.

На рис.4 приведены спектры селективного отражения от границы гранатовое окно – пары атомов Rb для всех переходов атомов Rb линии D_2 . Для оценки коэффициента отражения R можно использовать известную формулу Френеля $R = \{(n_w - n_a) / (n_w + n_a)\}^2$, где n_w – показатель преломления окна-граната (YAG), для длины волны 780 нм $n = 1.8245$, а n_a – показатель преломления атомов Rb вблизи атомного перехода (величина n_a зависит от плотности атомов Rb, при этом $n_a > 1$, когда частота лазера меньше частоты атомного перехода, и $n_a < 1$, когда частота лазера больше частоты атомного перехода) [1]. Горизонтальная пунктирная линия показывает величину отражения от границы гранатовое окно – пары атомов Rb вдали от атомных резонансов, т.е. когда $n_a = 1$ и составляет $\approx 8.5\%$, а пиковое значение вблизи атомного перехода составляет 8.6% (поэтому ось ординат в нижней части содержит знак “прерыватель”).

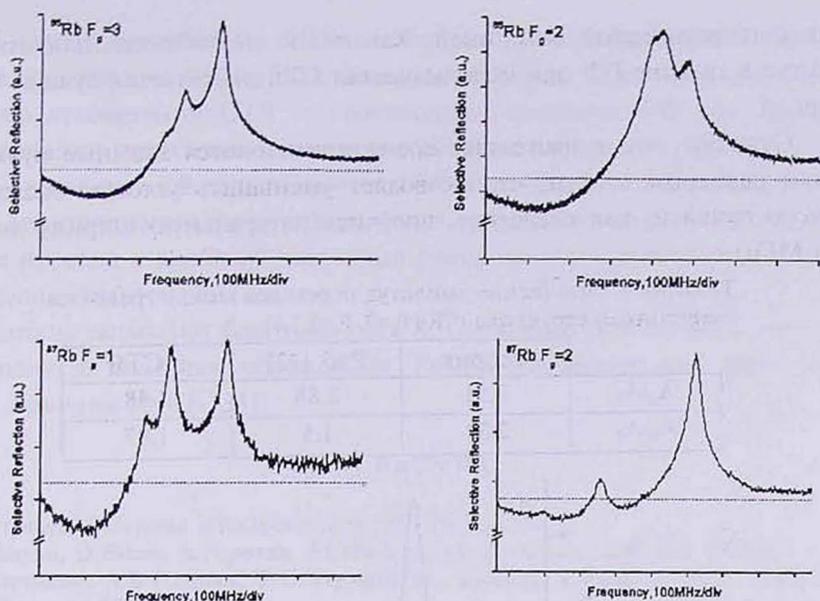


Рис.4. Спектры селективного отражения от границы гранатовое окно – пары атомов Rb для всех 4 групп переходов атомов Rb линии D₂ (каждая группа содержит по 3 атомных перехода).

Как видно из рисунков, спектральная ширина пиков в случае СО примерно в 1,5 раза меньше по сравнению с аналогичными пиками, получаемыми при использовании СТЯ (температура паров Rb в обоих случаях одинаковая). Однако недостатком метода СО являются широкие крылья, которые простираются на несколько сотен МГц (причина заключается в том, что величина n_0 при отходе от резонанса спадает медленно). Кроме того, существенным недостатком метода СО является частотный сдвиг пиков РФ (на 10-15 МГц) относительно частот атомных переходов.

Для сравнения спектров РФ, полученных с помощью атомного пучка Rb длиной ~1м, и спектров РФ, полученных при использовании СТЯ, нами были использованы результаты работы [12], поскольку создание установки для получения атомного пучка Rb является технически сложной задачей. На рис.5 приведены спектр РФ для переходов ⁸⁵Rb, D₂, F_g=3 → F_c=2,3,4, полученный с помощью атомного пучка (рис.5б из работы [12]), и спектр РФ для тех же переходов, полученный при использовании СТЯ (рис.5а). Для определения амплитуды и спектральной ширины отдельного атомного перехода между уровнями сверхтонкой структуры нами проводилось “фитирование” этих кривых (пунктирные линии). Как видно из сравнения кривых на рис.5, при использовании СТЯ достигается лучшее спектральное разрешение. Кроме того, в случае применения СТЯ соотношение амплитуд в спектре РФ для переходов между уровнями сверхтонкой структуры остается линейным (то есть амплитуды соотносятся как вероятности переходов). В таблице 1 приведены отношения амплитуд в спектре РФ, полученные из рис.5, и приведено срав-

нение с теоретической величиной. Как видно из таблицы, для отношения амплитуд в спектре РФ при использовании СТЯ достигается лучшее согласие с теорией.

Отметим, что в настоящее время применяются атомные пучки с линейным размером $L > 3$ м, что позволяет уменьшить угловую расходимость атомного пучка и, как следствие, получить натуральную ширину линии Rb, D_2 (~6 МГц).

Таблица 1. Отношение амплитуд переходов между уровнями сверхтонкой структуры ($^{85}\text{Rb } F_g=3, F_e=2,3,4$).

	Теория	Раб. [12]	в СТЯ
A_2/A_1	3.51	2.88	3.48
A_3/A_2	2.31	1.5	1.87

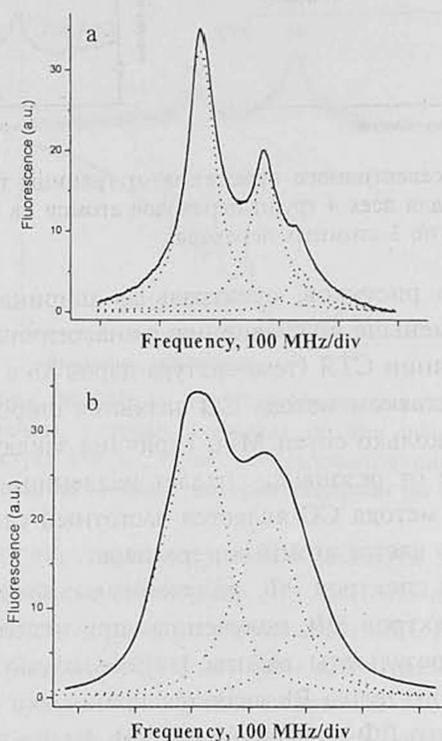


Рис.5. Спектр РФ, полученный при использовании СТЯ (а), и спектр РФ, полученный с помощью атомного пучка Rb длиной ~ 1м (б).

4. Заключение

В настоящей работе экспериментально реализована суб-доплеровская спектроскопия резонансной флуоресценции паров атомов Rb на D_2 линии различными методами при тех же экспериментальных параметрах: фиксированная ширина линии лазера 20 МГц; та же группа атомных переходов D_2 линии Rb. Это позволило выявить преимущества и недостатки этих методов.

В случае применения СТЯ в спектрах РФ проявляются только суб-доплеровские пики, которые соответствуют атомным переходам. Другое преимущество применения СТЯ – соотношение амплитуд РФ для переходов между уровнями сверхтонкой структуры остается линейным. Однако, в зависимости от конкретной задачи, тот или иной приведенный метод суб-доплеровской спектроскопии может быть более предпочтительным. В частности, наиболее простой и удобный частотный репер атомных переходов реализуется с помощью техники НП.

Авторы выражают благодарность А. Саркисяну за изготовление СТЯ и А.В.Папояну за полезные обсуждения. Работа финансирована грантом Республики Армения № 02-1351.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Демтредер. Лазерная спектроскопия. М., Наука, 1985.
2. D.Sarkisyan, D.Bloch, A.Papoyan, M.Ducloy. Opt. Commun., **200**, 201 (2001).
3. Д.Г.Саркисян, А.В.Папоян, Т.С.Варжапетян, Т.Бекер, Г.Вальтер. Изв. НАН Армении, Физика, **37**, 342 (2002).
4. D.Sarkisyan, T.Becker, A.Papoyan, P.Thoumany, H.Walther. Appl. Phys. B, **76**, 625 (2003).
5. S.Briaudeau, D.Bloch, M.Ducloy. Europhys. Lett., **35**, 337 (1996).
6. R.H.Romer, R.H.Dicke. Phys. Rev., **99**, 532 (1955).
8. T.A.Vartanyan, D.L.Lin. Phys. Rev. A, **38**, 5197 (1995).
9. B.Zambon, G.Nienhuis. Opt. Commun., **143**, 308 (1997).
10. N.Papageorgiou, M.Fichet, V.A.Sautenkov, D.Bloch, M.Ducloy. Laser Phys., **4**, 392 (1994).
11. H.Failache, S.Saltiel, M.Fichet, D.Bloch, M.Ducloy. Phys. Rev. Lett., **83**, 5467 (1999).
12. K.L.Andrew, J.R.Beacham. J. Opt. Soc. Am., **61**, 231 (1971).
13. J.Reichel, F.Bardou, M.Ben Dahan, et al. Phys. Rev. Lett., **75**, 4575 (1995).
14. R.Wynands, A.Nagel. Appl. Phys. B, **68**, 1 (1999).

EXPERIMENTAL COMPARISON OF SUB-DOPPLER FLUORESCENCE REGISTRATION METHOD IN EXTREMELY THIN CELL WITH OTHER METHODS

T.S. VARZHAPETYAN, N.R. BALASANYAN, A.A. NERSISYAN,
A.D. SARGSYAN, D.H. SARGSYAN

Sub-Doppler fluorescence spectra of Rb D_2 line are obtained with cw diode laser, employing the following techniques: $L=400$ nm thin layer of Rb atomic vapor in an extremely thin cell; a modified scheme of saturation absorption technique for resonant fluorescence; selective reflection from the interface of cell window (YAG) – Rb atomic vapor; and Rb atomic beam. Spectra recorded by these techniques in the same experimental conditions are presented for revealing advantages and disadvantages of each of them.