

УДК 535.343.4

ВЛИЯНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ШИРИНЫ ЛАЗЕРА НА СУБДОПЛЕРОВСКУЮ СТРУКТУРУ РЕЗОНАНСНОЙ ФЛЮОРЕСЦЕНЦИИ АТОМАРНЫХ ПАРОВ В СВЕРХТОНКИХ ЯЧЕЙКАХ

Д.Г. САРКИСЯН¹, А.В. ПАПОЯН¹, Т.С. ВАРЖАПЕТЯН¹,
Т. БЕККЕР², Г. ВАЛЬТЕР^{2,3}

¹Институт физических исследований НАН Армении

²Sektion Physik der Universität München, Garching, Germany

³Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching, Germany

(Поступила в редакцию 5 сентября 2002 г.)

Изготовлена сверхтонкая ячейка с толщиной столба паров атомов рубидия $L \approx 400$ нм. С помощью обычных одночастотных диодных лазеров реализовано субдоплеровское разрешение спектра резонансной флюоресценции D_2 -линии атомарных паров Rb. Это позволило спектрально разрешить переходы между отдельными атомными уровнями сверхтонкой структуры, в то время как в ячейках обычной длины эти переходы спектрально не разрешены из-за доплеровского уширения. Исследовано влияние спектральной ширины лазера в случае 25 МГц и 1 МГц на субдоплеровское разрешение спектра резонансной флюоресценции.

1. Введение

В работах [1,2] было показано, что используя тонкие ячейки с толщиной столба паров атомов $L \sim 10$ мкм, а также применяя специальную технику частотной модуляции (ЧМ) частоты диодного лазера, можно реализовать субдоплеровское разрешение спектра поглощения атомарных паров. Позже, в работе [3] было продемонстрировано, что используя сверхтонкие ячейки (СТЯ) с толщиной столба паров атомов $L \sim 100 - 500$ нм, с помощью обычных диодных лазеров с шириной спектра ~ 25 МГц также можно получить субдоплеровское разрешение спектра резонансной флюоресценции (РФ) и поглощения атомарных паров, причем при этом нет необходимости в ЧМ.

В работе [4] было показано, что при использовании обычных ячеек с толщиной столба паров атомов $L \sim 1 - 100$ мм увеличение интенсивности лазерного излучения накачки выше 1 мВт/см² приводит к умень-

шению интенсивности РФ атомарных паров, что обусловлено эффектом оптической накачки. В случае же применения СТЯ увеличение интенсивности лазерного излучения накачки вплоть до 100 мВт/см² приводит к увеличению интенсивности РФ паров, что важно для многих практических применений. Следует отметить также следующее преимущество: в отличие от известной техники "насыщения поглощения" [5], в случае применения СТЯ соотношение амплитуд РФ атомарных паров для переходов между уровнями сверхтонкой структуры остается линейным (то есть амплитуды соотносятся как вероятности переходов). В случае же использования насыщения поглощения (которое является сильно нелинейным процессом) соотношение амплитуд переходов сильно зависит от параметров эксперимента и совершенно не соответствует вероятностям переходов. Таким образом, применение СТЯ позволяет решать новые задачи в лазерной спектроскопии.

В настоящее время широко используются лазерные диоды, имеющие спектральную ширину лазерной линии около 25 МГц. Менее доступными являются лазерные диоды, имеющие спектральную ширину 1 МГц. Целью настоящей работы было исследование влияния ширины спектра лазерного излучения на субдоплеровскую структуру РФ атомарных паров в СТЯ.

Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки приведена на рис.1. Непрерывное излучение лазерного диода направлялось параллельным пучком перпендикулярно к поверхности окна СТЯ для реализации максимального субдоплеровского спектрального разрешения [1]. Конструкция СТЯ аналогична приведенной в [3], с тем лишь отличием, что окна СТЯ в нашем случае изготовлены из технического сапфира, оптическая ось S которого перпендикулярна поверхности окна, чтобы избежать двулучепреломления. Длина L столба паров Rb составляла ≈ 400 нм. Эта величина определялась с помощью спектрометра "Specord" следующим образом: регистрировался спектр пропускания СТЯ в широкой области частот (рис.2). Внутренние поверхности сапфировых окон, которые образуют зазор ≈ 400 нм, в достаточной степени плоско-параллельны, и учитывая $\sim 7,5$ % отражение от каждой из них, имеем слабо-добротный эталон Фабри-Перо (этим объясняется неглубокая модуляция интенсивности прошедшего излучения). Частотное расстояние (в единицах см⁻¹) между максимумами (или минимумами) эталона Фабри-Перо определяется как $\Delta(\text{см}^{-1}) = 1/(2L)(\text{см})$. Из рис.2 видно, что $\Delta(\text{см}^{-1}) \approx 12500 \text{ см}^{-1}$, следовательно $L \approx 400$ нм.

СТЯ помещалась в печку, 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 рубидия, поддерживалась при 120°C , что соответствует $N \approx 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Для предотвращения конденсации паров Rb на окнах температура СТЯ поддерживалась на $\sim 20^{\circ}\text{C}$ выше. Сигнал РФ паров регистрировался фотодиодом ФД24К и усиливался операционным усилителем, подключенным к двухлучевому осциллографу С8-14. Осциллограммы спектральных сигналов подвергались компьютерной обработке. Для получения спектров РФ частота лазера линейно сканировалась в спектральной области $\sim 7 \text{ ГГц}$ вокруг D_2 -линии атомов Rb (780 нм) посредством модуляции тока инжекции. При регистрации спектров РФ применялась пилообразная модуляция с частотой 15 Гц.

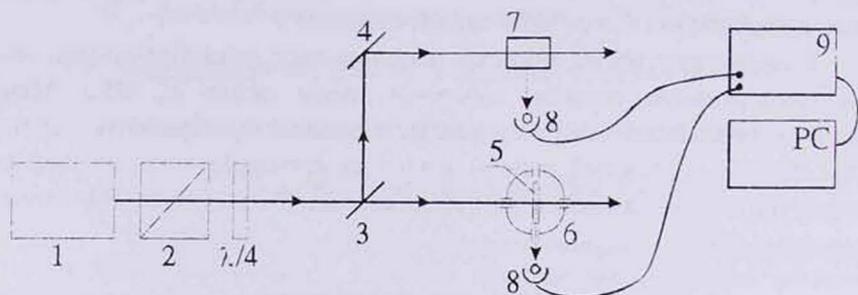


Рис.1. Схема оптической части экспериментальной установки. 1 – лазерный диод; 2 – призма Глана; $\lambda/4$ – просветленная четвертьволновая пластина; 3 – делитель пучка (стеклянная пластина); 4 – 100% зеркало; 5 – сверхтонкая ячейка (СТЯ) с Rb; 6 – печь с четырьмя отверстиями; 7 – ячейка длиной 1 см с парами Rb; 8 – фотоприемники (фотодиоды); 9 – осциллограф; PC – компьютер.

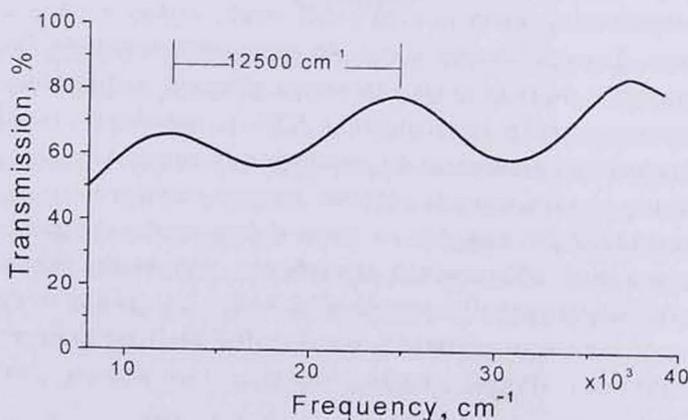


Рис.2. Спектр пропускания СТЯ, полученный на спектрометре "Specord". Толщина зазора L определяется из соотношения $L = 1/(2\Delta) \text{ (см}^{-1}\text{)}$.

Мощность лазерного излучения составляла ~ 3 мВт при диаметре пучка $d = 3$ мм, так что максимальная интенсивность излучения на входе в СТЯ достигала 40 мВт/см². Для измерений в основном использовался лазер со спектральной шириной излучения 25 МГц. Для сравнения спектров РФ использовалось также лазерное излучение примерно той же интенсивности, но со спектральной шириной 1 МГц [6]. Для увеличения степени линейной поляризации возбуждающего излучения, а также для уменьшения влияния обратной связи от отраженного (“паразитного”) излучения на работу диодного лазера использовались призма Глана-Томсона и просветленная четвертьволновая пластинка для длины волны 780 нм.

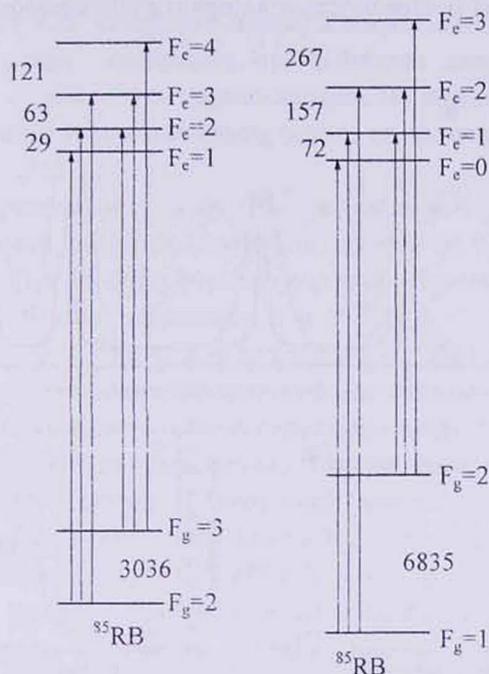


Рис.3. Схема сверхтонкой структуры D_2 -линии атомов рубидия.

На рис.3 приведена схема уровней атомов рубидия и переходов между ними, задействованных в эксперименте. Как видно, линия D_2 состоит из следующих четырех групп переходов: $^{87}\text{Rb } F_g=2 \rightarrow F_c=1,2,3$; $^{85}\text{Rb } F_g=3 \rightarrow F_c=2,3,4$; $^{85}\text{Rb } F_g=2 \rightarrow F_c=1,2,3$; $^{87}\text{Rb } F_g=1 \rightarrow F_c=0,1,2$, где F_g и F_c – сверхтонкие уровни нижнего и верхнего состояний, соответственно.

Результаты и обсуждение

В работе [3] отмечалось, что 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.4а приведены спектры

РФ в случае ячейки с Rb длиной ≈ 1 см при комнатной температуре (пунктирная кривая) и спектр РФ в случае использования СТЯ (сплошная кривая). Измерения производились одновременно, при этом часть лазерного пучка (8 %) направлялась в ячейку длиной ≈ 1 см, а основная часть пучка направлялась в СТЯ (рис.1). Спектр РФ состоит из следующих четырех групп (b,c,d,f), каждая из которых состоит из трех переходов между уровнями сверхтонкой структуры (см. рис.3): $^{87}\text{Rb } F_g=2 \rightarrow F_c=1,2,3$ (b); $^{85}\text{Rb } F_g=3 \rightarrow F_c=2,3,4$ (c); $^{85}\text{Rb } F_g=2 \rightarrow F_c=1,2,3$ (d); $^{87}\text{Rb } F_g=1 \rightarrow F_c=0,1,2$ (f). На рис.4b-f приведены спектры РФ в случае обычной ячейки длиной ≈ 1 см при комнатной температуре (пунктирные кривые) и СТЯ (сплошные кривые) с увеличенным частотным разрешением для каждой отдельной группы (очередность – в порядке возрастания частоты).

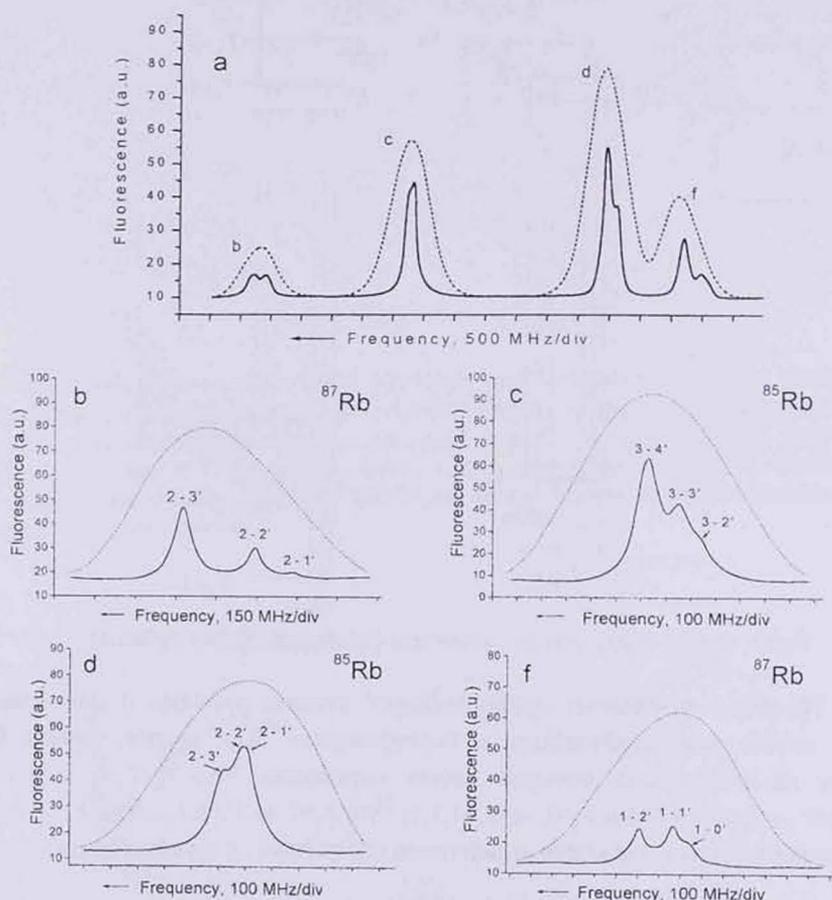


Рис.4. Спектры резонансной флюоресценции в случае обычной ячейки длиной ≈ 1 см (пунктирные кривые) и в случае использования СТЯ (сплошные кривые). Спектральная ширина лазера ≈ 25 МГц. а – спектр резонансной флюоресценции, охватывающий все четыре группы переходов (см. текст); b,c,d,f – участки спектра резонансной флюоресценции с увеличенным частотным разрешением для каждой отдельной группы.

Как известно [5], спектр РФ обычной ячейки доплеровски-уширен (ширина спектра отдельного перехода составляет ~ 500 МГц при комнатной температуре). Как видно из рис.4, использование СТЯ позволяет реализовать субдоплеровское разрешение спектра РФ (сплошная кривая). Физика этого явления подробно описана в [1-3,7-9]. Здесь лишь коротко отметим следующее: атомы со средней тепловой скоростью $v \approx 280$ м/с, летящие в СТЯ вдоль лазерного пучка (именно эти быстрые атомы и обуславливают доплеровское уширение [5]), не успевают поглотить и излучить фотоны, поскольку время пролета между стенками $L/v \sim 1$ нс (после столкновения со стенкой атом оказывается в нижнем состоянии). Поглощение в основном обусловлено медленными атомами, летящими в СТЯ вдоль лазерного пучка, а также всеми атомами, летящими перпендикулярно лазерному пучку (время взаимодействия для этих атомов $d/v \sim 10$ мкс). Эта группа атомов, не имеющая продольной компоненты скорости вдоль лазерного пучка, не вызывает доплеровского уширения [5].

На рис.5 приведены спектры РФ с использованием СТЯ для двух случаев спектральной ширины лазерного излучения: 1 МГц (левая колонка – кривые a-d) и 25 МГц (правая колонка – кривые a'-d'). Буквенные обозначения атомных переходов: a и a': $^{87}\text{Rb } F_g=2 \rightarrow F_e=1,2,3$; b и b': $^{85}\text{Rb } F_g=3 \rightarrow F_e=2,3,4$; c и c': $^{85}\text{Rb } F_g=2 \rightarrow F_e=1,2,3$; d и d': $^{87}\text{Rb } F_g=1 \rightarrow F_e=0,1,2$.

Для определения спектральной ширины отдельного атомного перехода между уровнями сверхтонкой структуры нами проводилось "фитирование" кривых (пунктирные линии). Полная ширина на полувысоте отдельного перехода в случае спектральной ширины лазерного излучения 1 МГц (кривые a-d) составляла 55–60 МГц, а в случае спектральной ширины 25 МГц (кривые a'-d') ~ 75 МГц. Как видно из сравнения левой и правой частей на рис.5, ухудшение спектрального разрешения при спектральной ширине излучения 25 МГц (правая сторона) отчетливо проявляется для следующих атомных переходов: $^{85}\text{Rb } F_g=3 \rightarrow F_e=2$ (b'); $^{85}\text{Rb } F_g=2 \rightarrow F_e=3$ (c'); $^{87}\text{Rb } F_g=1 \rightarrow F_e=0$ (d').

Следует отметить, что поскольку вероятности атомных переходов в ^{87}Rb меньше, чем в ^{85}Rb , в случае ^{87}Rb приходилось повышать температуру отростка СТЯ (т.е. увеличивать плотность атомов) для получения сигналов РФ, достаточно интенсивных для детектирования. Однако, как известно, это приводит к дополнительному спектральному уширению отдельных атомных переходов между уровнями сверхтонкой структуры вследствие резонансных атомных столкновений [5]. Поэтому спектральная ширина отдельного атомного перехода в случае ^{87}Rb несколько больше, чем для ^{85}Rb .

Таким образом, применение диодных лазеров, имеющих спектральную ширину линии излучения ≈ 1 МГц, способствует улучшению субдоплеровского разрешения спектра РФ. Тем не менее, использование

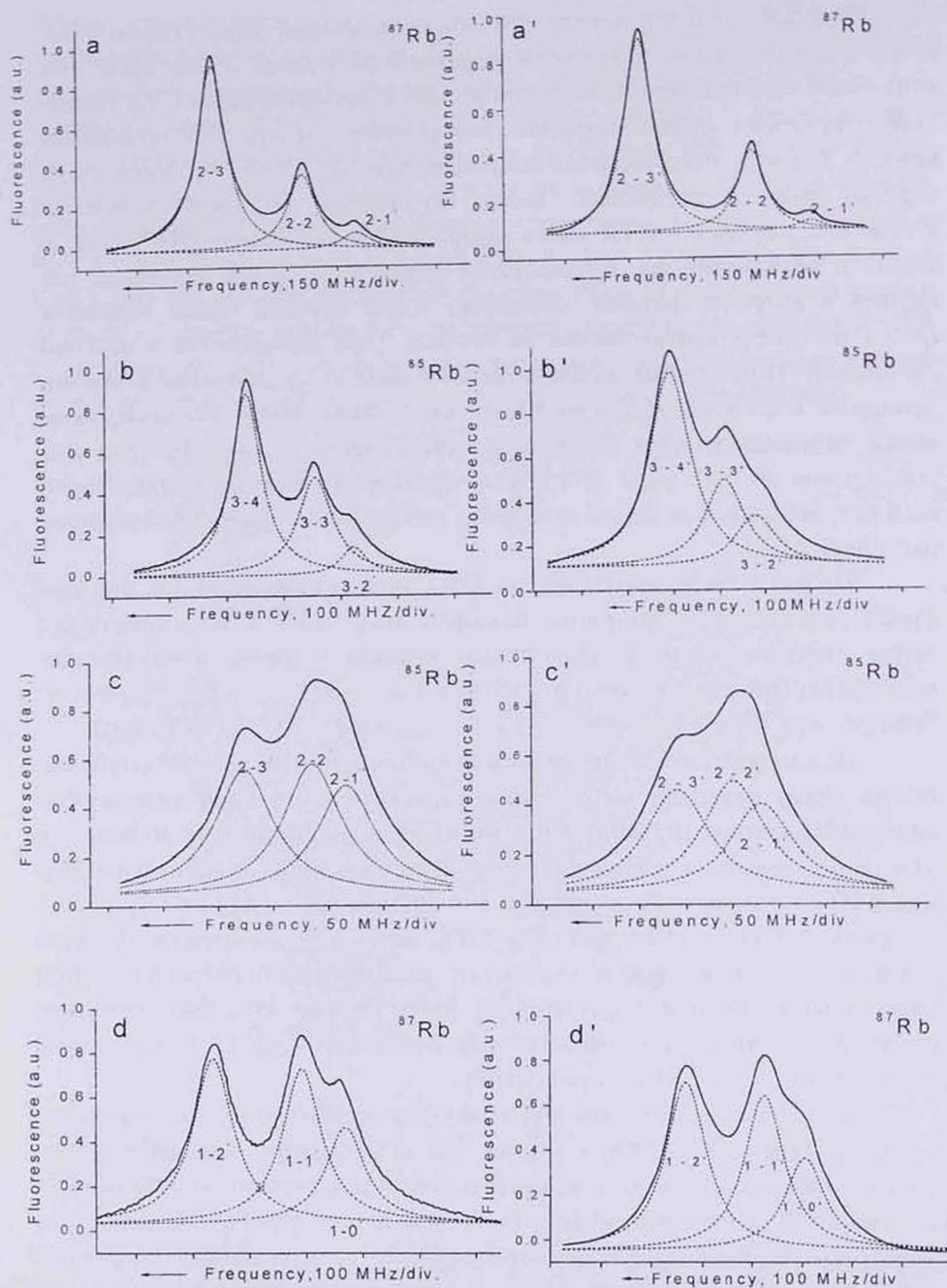


Рис.5. Спектры резонансной флюоресценции в случае использования СТЯ для двух значений спектральной ширины лазерного излучения: 1 МГц (левая колонка – кривые a-d) и ~25 МГц (правая колонка кривые – a'-d').

более доступных лазерных диодов со спектральной шириной ≈ 25 МГц, также позволяющих спектрально разрешать отдельные атомные переходы

ды в СТЯ, является целесообразным для ряда практических задач, таких как исследование влияния внешнего магнитного поля на отдельные атомные переходы между уровнями сверхтонкой структуры.

Заключение

В работе показано, что использование доступных и простых в эксплуатации лазерных диодов, имеющих спектральную ширину ≈ 25 МГц, и применение сверхтонких ячеек с толщиной столба паров атомов $L \approx 400$ нм позволяет реализовать субдоплеровское разрешение спектра РФ D_2 -линии атомов Rb (длина волны 780 нм). Это дает возможность детектировать атомные переходы между отдельными уровнями сверхтонкой структуры, что представляет практический интерес (в частности, для изучения влияния внешних магнитных и электрических полей на отдельные сверхтонкие переходы). Также продемонстрировано, что использование лазерных диодов, имеющих спектральную ширину лазерной линии 1 МГц, улучшает спектральное разрешение атомных переходов между уровнями сверхтонкой структуры.

Авторы выражают глубокую благодарность А.С.Саркисяну за большой вклад в разработку и изготовление СТЯ.

ЛИТЕРАТУРА

1. S.Briaudeau, D.Bloch, M.Ducloy. *Europhysics Letters*, **35**, 337 (1996).
2. S.Briaudeau, D.Bloch, M.Ducloy. *Phys. Rev. A*, **59**, 3723 (1999).
3. D.Sarkisyan, D.Bloch, A.Papoyan, M.Ducloy. *Opt. Commun.*, **200**, 201 (2001).
4. D.Sarkisyan, Yu.Malakyan, A.Papoyan, J.Bison, A.Weis. *CLEO 2000, Nice, France, Advance Program QWD8*, p.79 (2000).
5. В.Демтредер. *Лазерная спектроскопия*. М., Наука, 1985.
6. D.Sarkisyan, T.Becker, A.Papoyan, P.Thoumany, H.Walther, to be published in *Appl. Phys. B*.
7. 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).

INFLUENCE OF THE LASER SPECTRAL LINEWIDTH ON THE SUB-DOPPLER STRUCTURE OF RESONANT FLUORESCENCE OF ATOMIC VAPORS IN EXTREMELY THIN CELLS

D.H. SARKISYAN, A.V. PAPOYAN, T.S. VARZHAPETYAN, T. BECKER, H. WALTHER

An extremely thin cell containing $L \approx 400$ nm column of Rb atomic vapor is developed. Sub-Doppler resonant fluorescence spectra of the Rb atomic vapor on the D_2 line under excitation by a conventional single-frequency diode laser are recorded. This sub-Doppler resolution allows one to detect separately atomic hyperfine transitions, whereas in a cell of usual cm-range length they are not resolved due to Doppler-broadening. The influence of the laser spectral width in the case of 25 MHz and 1 MHz on the sub-Doppler resolution of fluorescence spectra is studied.