

ОПТИЧЕСКИЕ РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПАРАХ РУБИДИЯ, ПОМЕЩЕННЫХ В КЮВЕТУ С АНТИРЕЛАКСАЦИОННЫМ ПОКРЫТИЕМ ПРИ БИХРОМАТИЧЕСКОМ ЛАЗЕРНОМ ОБЛУЧЕНИИ

*С. Н. Атутов, В. А. Сорокин**

*Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук
630090, Новосибирск, Россия*

Поступила в редакцию 2 августа 2021 г.,
после переработки 16 октября 2021 г.
Принята к публикации 23 ноября 2021 г.

В ячейках с парами рубидия изучены особенности возбуждения долго затухающей флуоресценции при различных геометрических конфигурациях пучков бихроматического лазерного излучения. Проведенные эксперименты показывают, что для возникновения долго затухающей флуоресценции обязательно прямое взаимодействие атомов как с пучком накачки, так и с зондирующим пучком, находящимися в резонансе с трехуровневой Λ -схемой, образованной переходами с $5^2P_{1/2}$ на подуровни основного состояния $5^2S_{1/2}$ $F = 3$ и $5^2S_{1/2}$ $F = 2$. Показано, что для возникновения данной особенности флуоресценции не обязательно пространственное совмещение пучка накачки и пробного пучка, что подтверждает представление о связи долго затухающей флуоресценции с возникновением долгоживущего поляризованного состояния атомов рубидия, не разрушающегося при столкновениях со стенками кюветы, покрытыми церезином, около 40 раз.

DOI: 10.31857/S0044451022050030
EDN: DSKHCl

Изучение оптических свойств паров рубидия в последнее время приобрело значительную актуальность из-за перспектив создания прецизионных атомных стандартов времени [1–3], а также других квантовых устройств, использующих долгоживущие поляризованные состояния атомов рубидия [4, 5]. С целью увеличения времени жизни поляризованных состояний, которые могут разрушаться при столкновениях атомов со стенками кюветы, используются различные антирелаксационные покрытия на основе предельных углеводородов: парафин, церезин [6]. В последнее время обнаружены покрытия, еще больше увеличивающие время жизни поляризованных состояний щелочных металлов на основе высокомолекулярных алкенов — углеводородов с одной двойной связью.

При создании компактных атомных часов большое значение имеет энергопотребление. И если в первых работах применялся двойной радиооптиче-

ский резонанс, то в настоящее время все больше применяется бихроматическое лазерное излучение. При определенных условиях бихроматическое лазерное излучение способно создать резонанс когерентного пленения населенности (КПН) [7–9] между подуровнями основного состояния, расщепленными из-за взаимодействия спина ядра с орбитальным моментом и спином электрона. Главное условие резонанса КПН — это совпадение разности частот бихроматического лазерного излучения со сверхтонким расщеплением основного состояния, которое является частотным репером для атомных частот. Обнаруживается резонанс КПН по явлению индуцированной оптической прозрачности, поскольку при КПН возникает невзаимодействующая с бихроматическим лазерным излучением когерентная суперпозиция сверхтонких подуровней основного состояния.

В связи с повышенным интересом к взаимодействию паров щелочных металлов с бихроматическим лазерным излучением представляют интерес и другие аспекты такого взаимодействия без целенаправленного создания КПН. Ранее в работе [10] было обнаружено долгое затухание флуоресценции паров

* E-mail: vlad_sorokin@ngs.ru

рубидия в сферической ячейке специальной конструкции с резиновым покрытием, не имеющей источника паров рубидия со свободной металлической поверхностью [11]. В работе [10] одно достаточно интенсивное лазерное излучение накачки имело фиксированную частоту, резонансную одному из переходов между сверхтонкими компонентами основного состояния ($5^2S_{1/2}$) и возбужденного состояния ($5^2P_{1/2}$) в парах естественной смеси изотопов ^{85}Rb и ^{87}Rb . Второе интенсивное зондирующее лазерное излучение модулировалось по частоте по треугольному закону. Диапазон частотной модуляции был около 9 ГГц, он перекрывал спектральный интервал, в котором расположены все разрешенные электродипольные переходы между сверхтонкими подуровнями состояний $5^2P_{1/2}$ и $5^2S_{1/2}$. Период частотной модуляции мог регулироваться от 3 до 10 мс. Долгое затухание флуоресценции паров рубидия накладывалось на спектр флуоресценции и стартовало в момент времени, когда излучение накачки и зондирующее излучение были в резонансе с трехуровневой Λ -схемой уровней, с верхним состоянием $5^2P_{1/2}$ и нижними уровнями, образованными из-за сверхтонкого расщепления основного состояния.

В настоящей работе представлены результаты серии экспериментов, аналогичных описанным в работе [10], но выполненных при различных конфигурациях лазерных пучков по отношению к ячейке. Применялась сферическая ячейка диаметром 12 см. Сфера соединена с трубкой диаметром 8 мм и длиной 20 см. Внутренние стенки сферы и трубки были покрыты резином. В конце трубки помещался кусочек рубидия. Для генерации зондирующего излучения и излучения накачки использовалось два полупроводниковых одночастотных DFB-лазера. Частота генерации лазеров в широком диапазоне перестраивалась температурой. Для точной настройки частоты излучения накачки и частотной модуляции зондирующего лазера применялось изменение тока возбуждения.

Частота излучения лазера накачки мощностью около 50 мВт настраивалась в резонанс с переходом $5^2P_{1/2}-5^2S_{1/2}$ ($F = 3$) изотопа ^{85}Rb . Второе интенсивное зондирующее лазерное излучение мощностью около 30 мВт модулировалось по частоте по треугольному закону. Диапазон частотной модуляции был такой же, как в [10], и также перекрывал спектральный интервал, в котором расположены все разрешенные электродипольные переходы между сверхтонкими подуровнями состояний $5^2P_{1/2}$ и $5^2S_{1/2}$ для обоих изотопов рубидия. Период частотной модуляции также мог регулироваться от 3

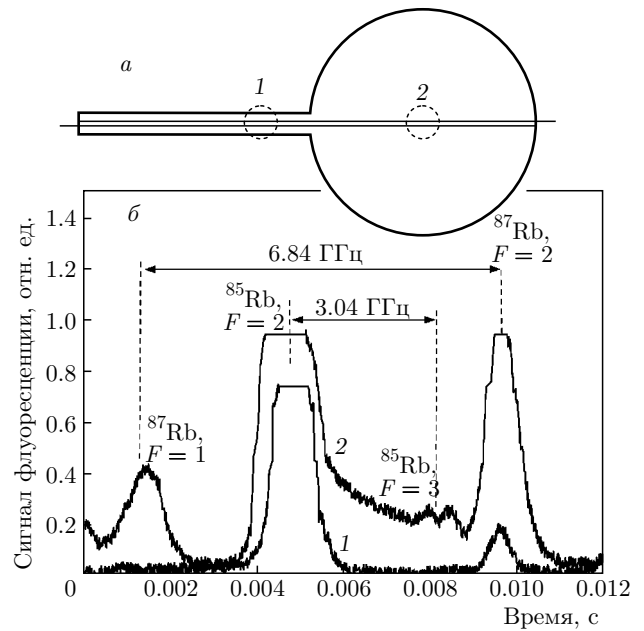


Рис. 1. Схема измерений (а) и сигналы флуоресценции паров рубидия (б) при коллинеарном встречном распространении зондирующего излучения и излучения накачки. График 1 зарегистрирован в капилляре (зона 1), график 2 соответствует центру шара (зона 2)

до 10 мс. При регистрации интенсивности флуоресценции в результате периодического сканирования частоты зондирующего излучения графики развертки во времени сигнала представляли собой спектры флуоресценции паров рубидия. При некоторых геометрических конфигурациях зондирующего излучения и излучения накачки было зарегистрировано долгое затухание флуоресценции паров рубидия, которое накладывалось на спектр флуоресценции и стартовало в момент времени, когда зондирующее излучение было в резонансе с переходом ($5^2S_{1/2}$, $F = 3$ и $5^2S_{1/2}$, $F = 2$), т.е. когда оба излучения были в резонансе с трехуровневой Λ -схемой, образованной переходами с $5^2P_{1/2}$ на подуровни основного состояния $5^2S_{1/2}$, $F = 3$ и $5^2S_{1/2}$, $F = 2$.

На рис. 1а приведена схема измерения сигнала флуоресценции, в которой ячейка с парами рубидия состоит из шарообразной части диаметром 12 см и относительно тонкой трубки диаметром 8 мм и длиной 20 см. Изнутри ячейка покрыта резином. В дальнем от шара конце трубки помещен кусочек металлического рубидия. Излучение накачки распространяется справа налево со стороны шара. Параллельно излучению накачки и ему навстречу распространяется зондирующее излучение. Фотодатчик для регистрации флуоресценции распола-

гался непосредственно перед стенкой колбы и мог располагаться в разных зонах. В качестве фотодатчика использовался кремниевый фотодиод ФД-24К и схема преобразования тока фотодиода в напряжение, обеспечивающая высокую линейность отклика фотодатчика. Графики сигнала флуоресценции в зависимости от момента времени наблюдения, связанного с частотой зондирующего излучения при частотной модуляции по треугольному закону для двух зон регистрации, представлены на рис. 1б. Фактически на рис. 1б приведены графики флуоресценции для половины периода частотной модуляции зондирующего излучения. Зоне капилляра (зона 1 на рис. 1а) соответствует график 1 на рис. 1б. Для центра шарообразной части (зона 2 на рис. 1а) сигнал флуоресценции представлен графиком 2 на рис. 1б. График 2 заметно отличается от графика 1 тем, что даже на качественном уровне на нем отчетливо видна медленно затухающая компонента сигнала флуоресценции. Старт этой компоненты сигнала, как уже отмечалось выше, начинается в момент, когда оба лазерных излучения резонансны трехуровневой Λ -схеме уровней ^{85}Rb .

Опыт, результаты которого демонстрирует рис. 1, не кажется вполне «чистым», поскольку излучение флуоресценции переотражалось и рассеивалось на стенках кюветы и на церезиновом покрытии и в регистрируемый сигнал могло вносить вклад излучение от различных областей ячейки. Поэтому на следующем этапе исследований опыт был модернизирован с целью уменьшения вклада рассеянного света в сигнал флуоресценции. Схема эксперимента представлена на рис. 2а. Луч лазера накачки (на рис. 2а он выше центра сферической части ячейки) и зондирующий луч (он ниже центра сферической части ячейки) направлены в трубку. При такой геометрии опыта уровень рассеянного света в сферической части ячейки существенно понизился. Хорошо видно, что спектр флуоресценции, снятый в зоне 1 (график 1 на рис. 2б), качественно совпадает с графиком 2 на рис. 1б. Он существенно отличается от спектра флуоресценции, снятого в зоне 2 (график 2 на рис. 2б). При открытом луче накачки спектр флуоресценции в зоне 2 (график 2 на рис. 2б) представляет собой главным образом долговременную особенность со слабым остатком линий поглощения изотопов рубидия. Спектр флуоресценции зоны 2 при закрытом пучке накачки (график 3 на рис. 2б) представляет собой четыре слабых, близких к уровню шума, пика, характерных для спектра поглощения изотопов рубидия, возникших, по-видимому, от действия остаточного

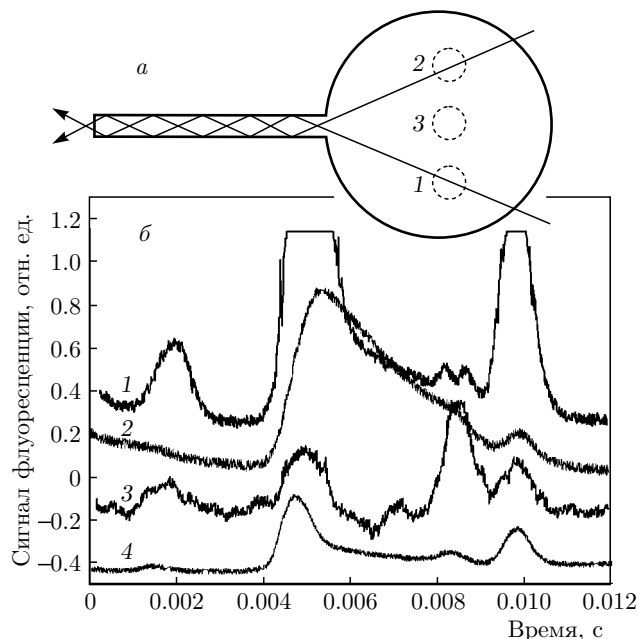


Рис. 2. Схема измерений (а) и сигналы флуоресценции паров рубидия (б) при косом распространении зондирующего излучения (нижний луч) и излучения накачки (верхний луч). График 1 зарегистрирован в зоне 1, график 2 зарегистрирован в зоне 2, график 4 зарегистрирован в зоне 3. График 3 зарегистрирован в зоне 2 при отсутствии излучения накачки. График 4 — это сигнал флуоресценции из зоны 3, находящейся вне зоны действия лазерных полей

рассеянного зондирующего излучения. Этот же механизм возникновения слабых пиков вне зоны действия зондирующего излучения проявляется и на графике 2 на рис. 2б. График 4 на рис. 2б — это сигнал флуоресценции из зоны 3 (рис. 2а), находящейся вне зоны действия лазерных полей. Графики 1–4 на рис. 2б разнесены по вертикали, чтобы лучше были различимы спектрально-временные особенности сигнала флуоресценции изотопов рубидия. Шкала абсцисс на рис. 2б аналогична оси абсцисс на рис. 1б. Вертикальные масштабы графиков 2–4 на рис. 2б растянуты примерно в 10 раз. Также регистрировался сигнал флуоресценции и в зоне капилляра, как на рис. 1а, форма которого соответствовала графику 1 на рис. 1б.

Результаты, показанные на рис. 2, свидетельствуют о том, что при формировании сигнала флуоресценции участвуют не только лазерные поля (см. графики 2–4). Также свой вклад дает и излучение флуоресценции, возникающее в зонах 1 и 2. При этом следует обратить внимание, что в зоне 2 излучение накачки имеет фиксированную длину волны. В зоне 3 излучение от обоих лазеров отсутствует.

При этом рассеянного от стенок света в ячейке не наблюдается, что проверялось сильной отстройкой длин волн лазерных пучков от области резонансного поглощения рубидия. Наблюдение медленно затухающей части флуоресценции в зонах 2 и 3 свидетельствует об образовании поляризованных долгоживущих состояний на подуровнях основного состояния рубидия. Для формирования таких долгоживущих состояний требуются оба лазерных пучка. Об этом свидетельствует график 3, когда отсутствует пучок накачки.

Для выяснения роли поляризованных атомов в образовании медленно затухающей части сигнала флуоресценции был поставлен опыт в конфигурации, показанной на рис. 3а. В эксперименте использовались две одинаковые кюветы с одинаковым покрытием, состыкованные, как показано на рис. 3а, через оптический контакт, созданный между стенками обеих кювет с помощью глицерина. Свет флуоресценции мог проходить из одной кюветы в другую. Пробный луч проходил по оси нижней кюветы. Луч накачки пропусклся или около верхней стенки нижней кюветы, или около нижней стенки верхней кюветы. График 1 на рис. 3б отвечает регистрации сигнала флуоресценции из зоны 1 (см. рис. 3а), когда оба луча, пробный и накачки, проходят через одну нижнюю кювету. Форма сигнала весьма похожа на график 2 на рис. 1б и на график 1 на рис. 2б. При этом атомы рубидия имеют возможность взаимодействовать с обоими лазерными пучками. Это взаимодействие может быть как непосредственным из-за пролета атомов через оба лазерных пучка, так и через переизлученный свет. График 3 на рис. 3б отвечает регистрации сигнала флуоресценции из зоны 3 (см. рис. 3а), когда также оба луча, пробный и накачки, проходят через одну нижнюю кювету. Форма сигнала флуоресценции весьма похожа на график 2 на рис. 2б. При этом атомы рубидия также имеют возможность взаимодействовать и напрямую с обоими лазерными пучками, и через переизлученный свет. График 2 на рис. 3б отвечает регистрации сигнала флуоресценции из зоны 2 (см. рис. 3а), когда оба луча, пробный и накачки, проходят через разные кюветы. Форма сигнала флуоресценции весьма похожа на график 1 на рис. 1б при условии слабой оптической накачки. При этом атомы рубидия напрямую не взаимодействуют с обоими лазерными пучками, т. е. атомы, побывавшие в пробном пучке, не имеют возможности попасть в пучок накачки. Однако наличие в сигнале основных пиков флуоресценции свидетельствует о достаточно хорошем прохождении излучения из одной кюветы

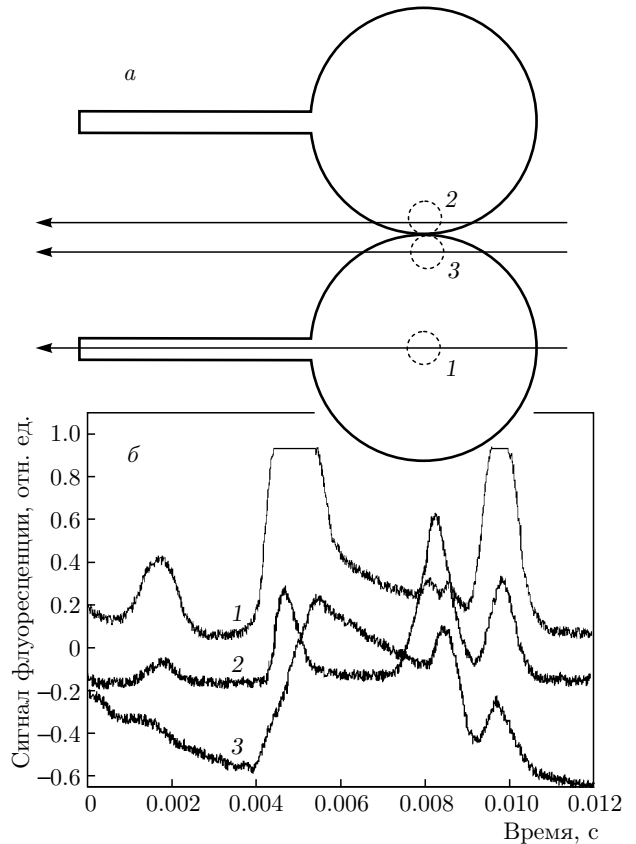


Рис. 3. Схема измерений (а) и сигналы флуоресценции паров рубидия (б) при наличии зондирующего излучения (луч на оси нижней кюветы) и излучения накачки в одной кювете и в разных кюветах (верхние лучи). График 1 зарегистрирован в зоне 1, когда лучи накачки и зондирующий распространяются в одной кювете. График 2 зарегистрирован в зоне 2, когда лучи накачки и зондирующий распространяются в разных кюветах. График 3 зарегистрирован в зоне 3, когда лучи накачки и зондирующий распространяются в одной кювете

в другую. То есть атомы рубидия взаимодействуют с обоими лазерными пучками через переизлученный свет, но долговременной компоненты сигнала флуоресценции при этом не наблюдается.

Таким образом, результаты опытов свидетельствуют о том, что для возникновения долговременной компоненты сигнала флуоресценции необходимым условием является то, что атомы рубидия обязаны побывать и в пробном пучке, и в пучке накачки. Отсутствие пучка накачки в той же кювете, через которую проходит пробный луч, не приводит к возникновению долговременной компоненты сигнала флуоресценции. Удивительной, на наш взгляд, особенностью долгого затухания сигнала флуоресценции является необязательность пространствен-

ного совмещения пучка накачки и пробного пучка. Характерное время затухания сигнала флуоресценции может быть оценено в 10 мс. Время пролета атома рубидия от стенки до стенки при комнатной температуре составляет около 500 мкс. Тогда для формирования долговременной компоненты сигнала флуоресценции атом рубидия должен испытать около 40 столкновений со стенкой без разрушения поляризации основного состояния. В капилляре кюветы (см. рис. 1а, зона 1) время пролета на размере 8 мм составит около 33 мкс, и время затухания сигнала флуоресценции из-за формирования поляризованного состояния может быть оценено в величину менее 1.3 мс. И эта компонента сигнала в капилляре при наших экспериментальных условиях наблюдаться не будет.

Следует отметить, что отсутствие медленной флуоресценции наблюдалось в любом месте тонкой трубки, что позволяет определить число столкновений с антирелаксационным покрытием, которое разрушает поляризованное состояние рубидия и тем самым дает прямую информацию об антирелаксационных свойствах покрытия. По нашему мнению, если трубки сделать в виде конуса или ступенчатого конуса, то, перемещая зону наблюдения сигнала флуоресценции, можно найти диаметр цилиндрической области, где медленная флуоресценция пропадает. Для этой области, зная тепловую скорость атомов, легко определить число столкновений атомов со стенкой без разрушения поляризации и тем самым получить оценку качества антирелаксационного покрытия.

Практическое применение полученных результатов может относиться к проблеме создания сверхточных атомных часов с репером на парах рубидия, помещенных в ячейку с антирелаксационным покрытием. Точность хода таких часов зависит, в том числе, от времени жизни поляризованного состояния атомов. Поэтому измерение допустимого числа столкновений со стенками позволяет не только определять качество антирелаксационного покрытия,

но и давать рекомендации по допустимым размерам ячейки.

Благодарности. Авторы благодарны С. Л. Микерину за интерес к работе, полезные замечания и обсуждения.

Финансирование. Работа выполнена по проекту госзадания ИАиЭ СО РАН АААА-А21 121031700030-4 «Нелинейная фотоника структурированных сред (нелинейные преобразования частот, формирование поляризованных и когерентных состояний атомов)».

ЛИТЕРАТУРА

1. H. G. Robinson and C. E. Johnson, *Appl. Phys. Lett.* **40**, 771 (1982).
2. A. Risley, S. Jarvis, and J. Vanier, *J. Appl. Phys.* **51**, 4571 (1980).
3. C. Rahman and H. G. Robinson, *IEEE J. Quant. Electron.* **23**, 452 (1987).
4. D. Budker and M. V. Romalis, *Nature Phys.* **3**, 227 (2007).
5. S. J. Smullin, I. M. Savukov, G. Vasilakis et al., *Phys. Rev. A* **80**, 033420 (2009).
6. E. B. Alexandrov, M. V. Balabas, D. Budker et al., *Phys. Rev. A* **66**, 042903 (2002).
7. E. Arimondo and G. Orriols, *Lett. Nuovo Cim.* **17**, 333 (1976).
8. G. Orriols, *Nuovo Cim. B* **53**, 1 (1979).
9. Б. Д. Агапьев, М. Б. Горный, Б. Г. Матисов и др., *УФН* **163**, 1 (1993).
10. S. N. Atutov, V. A. Sorokin, S. N. Bagayev et al., *Eur. Phys. J. D* **73**, 240 (2019).
11. S. N. Atutov, F. A. Benimetskiy, A. I. Plekhanov et al., *Eur. Phys. J. D* **71**, 12 (2017).