

ВЫНУЖДЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ РИДБЕРГОВСКОГО АТОМА НАТРИЯ В МИКРОВОЛНОВОМ РЕЗОНАТОРЕ

И.М.Бетеров, И.И.Рябцев¹⁾

*Институт физики полупроводников Сибирского отделения РАН
630090 Новосибирск, Россия*

Поступила в редакцию 25 января 1999 г.

Представлены результаты эксперимента по наблюдению вынужденного микроволнового перехода $37P - 37S$ в ридберговских атомах натрия под действием 30 тепловых фотонов в СВЧ резонаторе. Измеренное значение скорости перехода $(4 \pm 1.5) \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ совпадает с расчетным.

PACS: 31.20.-d, 32.30.Bv

Тепловое излучение оказывает существенное влияние на времена жизни ридберговских состояний [1], поскольку низкие частоты переходов между ними попадают в область спектра излучения черного тела при любых температурах. Благодаря очень большим дипольным моментам ридберговских атомов, возникает сильная связь с излучением и индуцируются переходы на близлежащие уровни при первоначальном возбуждении одного ридберговского состояния. В результате происходит перераспределение населенностей уровней, а для высоколежащих состояний с значением главного квантового числа $n \geq 20$ и заметное уменьшение времени жизни по сравнению с радиационным. При помещении атомов в резонатор скорости отдельных переходов под действием тепловых фотонов могут существенно возрастать вследствие увеличения спектральной плотности осцилляторов электромагнитного поля в окрестности перехода [2].

Скорость вынужденных переходов между двумя ридберговскими состояниями под действием поля тепловых фотонов в резонаторе с добротностью Q , эффективным объемом V_{eff} и настроенным на частоту перехода ω описывается выражением [2]

$$\Gamma = \Gamma_0 \bar{n} \eta, \quad (1)$$

где $\Gamma_0 = 8\pi^2 d^2 / 3\epsilon_0 \hbar \lambda^3$ – скорость спонтанных переходов (d – матричный элемент дипольного момента, λ – длина волны) в свободном пространстве, $\bar{n} = 1 / [\exp(\hbar\omega/kT) - 1]$ – среднее число тепловых фотонов на одну моду электромагнитного поля на резонансной частоте при температуре резонатора T , $\eta = 3Q\lambda^3 / 4\pi^2 V_{eff}$ – фактор, отражающий изменение плотности осцилляторов (в резонаторе один осциллятор приходится на интервал частот $\Delta\omega_{eff} = \pi\omega/2Q$, а время жизни фотона $\tau = Q/\omega$).

Экспериментально было исследовано влияние теплового излучения с температурой 100 К на скорость микроволнового перехода $37P_{3/2} - 37S_{1/2}$ (частота 70.166 ГГц) в ридберговских атомах натрия (рис.1а). Спектр этого перехода и его поведение в постоянном электрическом поле были подробно изучены в нашей работе [3]. Состояние $37P$ имеет тонкую структуру (114 МГц).

¹⁾ e-mail: ryabtsev@isp.nsc.ru

Схема эксперимента приведена на рис.1б. Атомы натрия в эффиционном пучке с температурой 500 К возбуждались в ридберговские состояния по трехступенчатой схеме $3S - 3P - 4S - 37P_{J=1/2,3/2}$ при встречном продольном освещении пучка излучениями трех синхронизированных импульсных перестраиваемых лазеров с периодом повторения 200 мкс и длительностями импульсов 20 – 100 нс. Ридберговские атомы в состоянии $37P$ возникали с однородной плотностью вдоль всего пучка. Распределение атомов по скоростям соответствовало максвелловскому со средней скоростью 700 м/с. Населенности ридберговских уровней контролировались методом селективной полевой ионизации в импульсном электрическом поле между двумя медными пластинами. Образовавшиеся в результате ионизации электроны детектировались вакуумным канальным умножителем, а сигнал с его выхода обрабатывался в режиме счета импульсов в крейте КАМАК и ЭВМ. Задержка включения электрического поля относительно лазерных импульсов варьировалась от 8 до 160 мкс, что позволяло селективно регистрировать атомы, находившиеся в момент лазерного возбуждения в различных частях пучка, в том числе и в микроволновом резонаторе, находящемся на расстоянии 30 мм от детектора.

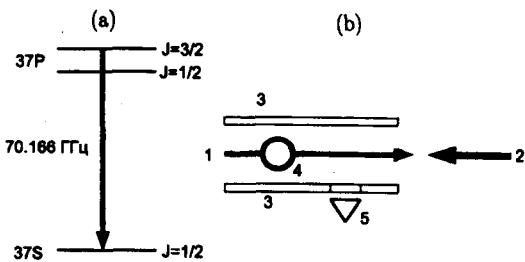


Рис.1. а) Микроволновый переход $37P - 37S$ в ридберговских атомах натрия; б) схема эксперимента: 1 – пучок Na, 2 – лазерное излучение, 3 – медные пластины, 4 – микроволновый резонатор, 5 – канальный умножитель

Использовался перестраиваемый медный цилиндрический резонатор диаметром 9.6 мм на моде H_{115} с $Q \approx 7000$ и $V_{eff} \approx 0.5 \text{ см}^3$, причем атомный пучок пропускался через центр резонатора перпендикулярно цилиндрической грани. Электрическая компонента поля в резонаторе имеет максимум в этой точке и практически не изменяется вдоль пучка. Мода H_{115} двукратно вырождена по поляризации излучения. Вырождение снималось слабой эллиптичностью сечения резонатора. Все элементы системы регистрации и резонатор охлаждались жидким азотом до температуры 100 К, что соответствует $\bar{n} \approx 30$ в одной резонаторной моде. По известным параметрам резонатора можно определить, что $\eta \approx 80$, то есть при настроенном резонаторе скорости спонтанных и вынужденных переходов должны возрастать в 80 раз.

Дипольный момент перехода $37P_{3/2} - 37S_{1/2}$ может быть рассчитан в квазиклассическом приближении [4] и составляет $d = 680ea_0$ для переходов с $\Delta M_J = 0$ при линейной поляризации микроволнового излучения. Отсюда расчетное значение $\Gamma_0 = 12 \text{ с}^{-1}$, и полная скорость перехода в свободном пространстве при температуре 100 К равна $\Gamma' = \Gamma_0 + \Gamma = 370 \text{ с}^{-1}$. Вероятность перехода за характерное время задержки $t \approx 100 \text{ мкс}$ составит $W_1 = \Gamma' t = 0.04$ при расстроенным резонаторе. Следовательно, в этом случае влиянием тепловых фотонов на скорость перехода можно пренебречь. При настроенном резонаторе $\Gamma' = 3 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$, и за среднее время пролета атомов через резонатор (15 мкс) вероятность перехода $W_2 \approx 0.4$ оказывается большой, поэтому рост населенности состояния $37S_{1/2}$ обусловлен, в основном, атомами, пролетевшими через

резонатор. До влета и после вылета из резонатора атомы с тепловыми фотонами взаимодействуют слабо.

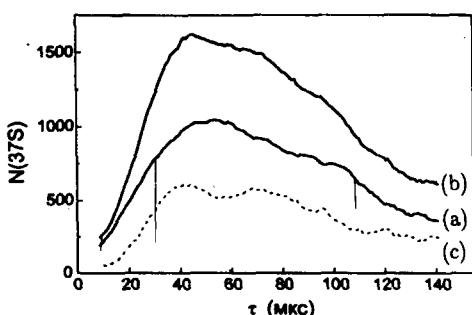


Рис.2. Зависимость числа атомов в состоянии $37S$ от времени задержки после лазерного импульса: а) при расстроенном резонаторе, б) при настройке резонатора на частоту атомного перехода, в) разность кривых а и б, соответствующая изменению сигнала только за счет взаимодействия с тепловыми фотонами

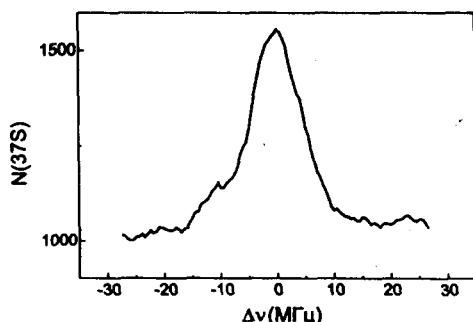


Рис.3. Зависимость числа атомов в состоянии $37S$ от расстройки частоты резонатора при времени задержки 50 мкс

Следует отметить, что расчетные времена жизни состояний $37P$ и $37S$ в свободном пространстве, с учетом влияния теплового излучения [1] и переходов на все остальные уровни, составляют 150 и 50 мкс, соответственно, что необходимо учитывать при измерении населенностей с задержкой после лазерного импульса. Кроме того, заметное влияние на скорости переходов могут оказывать столкновения ридберговских атомов с молекулами остаточных газов в вакуумной камере. Анализ показывает, что в нашем эксперименте именно столкновениями обусловлено появление сигнала от атомов в состоянии $37S$ с ростом задержки ионизирующего импульса при расстроенном резонаторе (рис.2а), поскольку, как мы уже видели, вероятности переходов под действием тепловых фотонов малы в этом случае. При малых задержках наблюдается линейный рост сигнала, а при больших задержках сигнал уменьшается, благодаря распаду начального состояния $37P$. Вертикальная шкала графика соответствует среднему числу ридберговских атомов в состоянии $37S$, зарегистрированных за 1000 лазерных импульсов в режиме счета, с учетом прозрачности сетки канально-го умножителя и нелинейности сигнала. Численное моделирование зависимости на рис.2а позволило определить абсолютную скорость перехода $37P - 37S$ под действием столкновений. Она составила $(1.5 \pm 0.3) \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$.

Настройка резонатора на частоту перехода приводила к существенному росту сигнала при временах задержки больше 30 мкс (рис.2б). Это время соответствует времени пролета до детектора атомов, которые в момент лазерного возбуждения находились в резонаторе. Таким образом, наблюдаемое по сравнению с рис.2а изменение сигнала определяется атомами, пролетевшими через резонатор с тепловыми фотонами и испытавшими вынужденный переход из состояния $37P$ в состояние $37S$. На рис.2в приведена разность кривых а и б, представляющая изменение сигнала только за счет взаимодействия с тепловыми фотонами в резонаторе. Эта зависимость также была численно промоделирована с учетом распределения атомов по скоростям в пучке и времен жизни состояний S и P , что позволило извлечь экс-

perimentальное значение абсолютной скорости перехода под действием тепловых фотонов $(4 \pm 1.5) \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$, близкое к расчетной.

При фиксированной задержке 50 мкс была сделана запись спектра перехода. Частота настройки резонатора плавно перестраивалась в окрестности частоты перехода и измерялся сигнал от атомов в состоянии $37S_{1/2}$ (рис. 3). Ширина резонанса определялась, в основном, добротностью резонатора (10 МГц), поскольку естественная ширина перехода (4 кГц) и доплеровская (200 кГц) были малы. Наблюдаемое изменение амплитуды сигнала в области резонанса характеризует увеличение скорости вынужденных переходов под действием тепловых фотонов по сравнению со скоростью переходов вследствие столкновений, при этом необходимо учесть радиационный спад атомов в состоянии $37S$ после вылета из резонатора. Фактически, имеющаяся экспериментальная схема представляет собой реализацию высокочувствительного узкополосного детектора теплового и микроволнового излучений с чувствительностью на уровне нескольких фотонов.

В заключение необходимо отметить следующее. В данном эксперименте состояния $37P_{3/2}$ и $37S_{1/2}$ представляют собой двухуровневую систему, полностью инвертированную в начальный момент времени. Переход вниз сопровождается испусканием фотона в резонаторную моду. Если число первоначально возбужденных атомов внутри резонатора достаточно велико, могут возникнуть коллективные явления типа сверхизлучения Дике и мазерной генерации СВЧ излучения на частоте атомного перехода [5]. Предварительные оценки показывают, что при имеющихся параметрах эксперимента для наблюдения этого эффекта требуется около 100 инвертированных атомов в резонаторе. В то же время, в наших экспериментах оно не превышало 10, и влиянием сверхизлучения можно пренебречь. В настоящее время планируется наблюдение данного эффекта при повышении концентрации ридберговских атомов. Также определенный интерес представляет наблюдение беспороговой генерации и усиления без инверсии в ридберговском микромазере с когерентной начинкой по схеме, предложенной в [6], и исследование влияния тепловых фотонов на его свойства.

Авторы выражают благодарность студенту НГТУ Д.Б.Третьякову за помощь в проведении экспериментов и обработке результатов. Работа поддержана грантами Российского фонда фундаментальных исследований (гранты # 96-02-19041 и # 97-02-18551).

-
1. Т.Ф.Галлагер, в кн: *Ридберговские состояния атомов и молекул*, М.: Мир, 1985, с.194. (*Rydberg states of atoms and molecules*, Eds. R.F.Stebbins and F.B.Dunning, Cambridge University Press, 1983).
 2. E.M.Purcell, Phys. Rev. **69**, 681 (1946).
 3. И.М.Бетеров, И.И.Рябцев, Письма в ЖЭТФ **68**, 853 (1998).
 4. A.R.Edmonds, J.Picart, N.Tran-Minh, and R.Pullen, J. Phys. **B12**, 2781 (1979).
 5. L.Moi, P.Goy, M.Gross et al., Phys. Rev. **A27**, 2043 (1983).
 6. N.Lu, Phys. Lett. **A143**, 457 (1990).