Письма в ЖЭТФ, том 100, вып. 6, с. 408 – 412 © 2014 г. 25 сентября

Эффективное возбуждение ридберговских состояний ультрахолодных атомов лития-7

Б. Б. Зеленер[+*1)], *С. А. Саакян*[+], *В. А. Саутенков*[+×], *Э. А. Маныкин*[*°], *Б. В. Зеленер*[+], *В. Е. Фортов*[+]

[+]*Объединенный институт высоких температур РАН, 127412 Москва, Россия*

[*]*Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 115409 Москва, Россия*

[°]*Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", 123182 Москва, Россия*

[×]*Физический институт им. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 13 августа 2014 г.

Целью настоящей работы является получение высоковозбужденных оптически охлажденных атомов лития-7 для приготовления сильно взаимодействующей ультрахолодной плазмы и ридберговского вещества. Создана установка, в которой с применением мощного непрерывного ультрафиолетового лазера и магнитооптической ловушки получен новый неразрушающий метод создания и диагностики высоковозбужденных ридберговских состояний атомов. Для диагностики энергии высоковозбужденных состояний непосредственно регистрировалось изменение флюоресценции ультрахолодных атомов лития-7 в магнитооптической ловушке.

DOI: 10.7868/S0370274X14180039

1. Введение. В последнее время большой интерес представляет изучение систем, состоящих из высоковозбужденных ридберговских атомов, в связи с возможностью моделирования процессов в астрофизике, квантовых компьютерах и создания антивещества. Умение контролировать процессы распада и кристаллизации может послужить основой для создания квантовых компьютеров [1]. Эта идея привела к экспериментам по взаимодействию и блокаде одиночных ридберговских атомов [2–4]. Эксперименты с ридберговскими атомами могут стать модельными для прогнозирования поведения рекомбинации в экспериментах по созданию антиводорода [5–7], а также для поиска оптимальных способов захвата большого количества атомов антиводорода в сильных магнитных полях. Отметим, что литий – элемент, наиболее близкий по своим свойствам к водороду.

Настоящая работа является продолжением серии наших теоретических и экспериментальных работ, посвященных получению и изучению коллектива из ультрахолодных ридберговских атомов [8–13]. В настоящее время имеется достаточно большое количество работ по созданию и диагностике высоковозбужденных ридберговских состояний. Эти исследования проводятся как в облаке ультрахолодных атомов, так и в узконаправленных пучках горячих атомов. Одним из способов реализации таких состояний является импульсное многоступенчатое возбуждение и дальнейшая диагностика при помощи вырывания электронов постоянным слабым электрическим полем [14–16]. Недостаток таких методов – малое количество возбужденных атомов, а также разрушение ридберговских состояний после диагностики. В эксперименте [17] для диагностики ридберговских атомов использовались слабое пробное поле на резонансном переходе и сильное управляющее поле на переходах между возбужденными состояниями. Регистрировалась электромагнито-индуцированная прозрачность (EIT) в спектре поглощения пробного поля. В этих экспериментах заселенность ридберговских состояний также была очень мала. На нашей установке мы реализовали метод когерентного возбуждения ридберговских состояний. Возможность его применения в каскадной системе низколежащих уровней $5S{-}5P{-}5D$ была описана в работе [18]. Особенностью метода является направленный процесс возбуждения ридберговских уровней через виртуальный промежуточный переход. Надо отметить, что этот процесс очень эффективен. За малое время при достаточной мощности лазеров большинство атомов в магнитооптической ловушке (МОЛ) принимает участие в непрерывном когерентном двухфотонном процессе.

1) e-mail: bobozel@mail.ru

2. Экспериментальная установка. В наших экспериментах использовались атомы лития-7.Для получения ультрахолодного газа высоковозбужденных (ридберговских) атомов лития, а также ультрахолодной плазмы из атомов лития была создана экспериментальная установка, позволяющая осуществить лазерное охлаждение атомов лития и их надежное удержание в магнитооптической ловушке при ультранизкой температуре [12, 13]. Принципиальная схема проведенного эксперимента представлена на рис. 1.

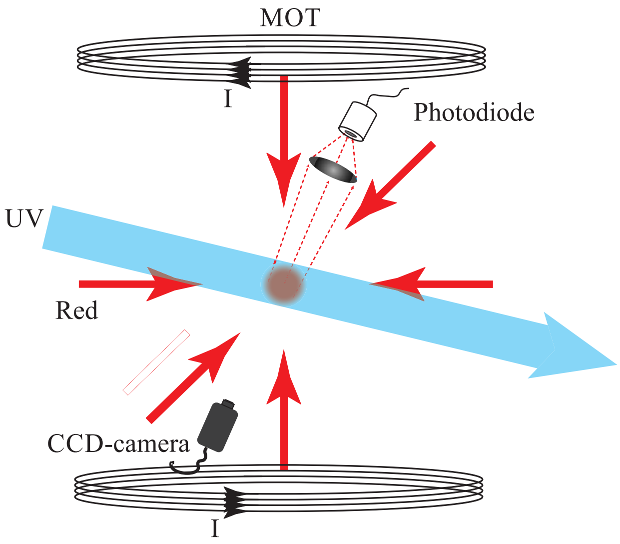

Рис. 1. Принципиальная схема установки по созданию ридберговских атомов из атомов лития-7 в МОЛ

Для получения ридберговских атомов использовался непрерывный ультрафиолетовый (УФ) лазер компании Newport-Spectra Physics, работающий в свободном режиме генерации, с выходной мощностью до 100 мВт на длине волны 350 нм с шириной спектра излучения порядка нескольких МГц. Излучение УФ-лазера направлялось на облако ультрахолодных атомов в ловушке и плавно перестраивалось по частоте. При прохождении частоты УФ-лазера через резонанс с ридберговским переходом наблюдалось уменьшение флюоресценции облака атомов до ее частичного или полного исчезновения в зависимости от мощности УФ-лазера и верхнего уровня перехода. После прохождения резонанса ультрахолодные атомы начинали заново набираться в магнитооптическую ловушку. Для надежной регистрации и определения частоты перехода, кроме регистрации на CCD-камере, мы использовали фотоприемник, на который с помощью линзы собиралась часть флуоресценции. Частота УФ-лазера контролировалась при помощи высокоточного измерителя длины волны компании High Finesse-Angstrom WS-U. В нашем эксперименте измеритель длины волны калибровался по стабилизированному диодному лазеру 780 нм, частота которого стабилизировалась по ячейке с парами рубидия-85 в схеме насыщенной спектрометрии. Схема уровней, соответствующая переходам в ридберговские состояния, приведена на рис. 2.

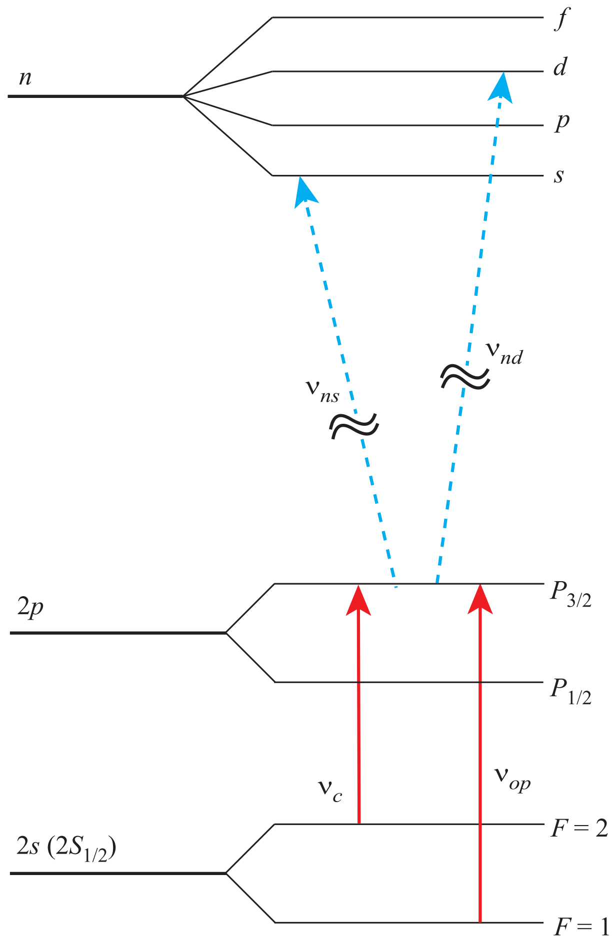

Рис. 2. Схема уровней атомов лития 7

Согласно правилам отбора с $2P$-состояния возможны переходы только в nS- и nD-состояния, причем вероятность перехода на D-уровень выше, чем на уровень S. Отстройка охлаждающего лазера составляла 46 МГц, а отстройка лазера оптической накачки – 20 МГц в красную сторону от резонанса для получения плотности ультрахолодных атомов около $5 \cdot 10^{10}$ см$^{-3}$ [12, 13].

3. Результаты эксперимента. Мы исследовали несколько переходов из низколежащего состояния $2P_{3/2}$ в высоковозбужденные ридберговские состояния S и D. На рис. 3 представлены результаты, полученные для переходов в $41S$- и $41D$-состояния.

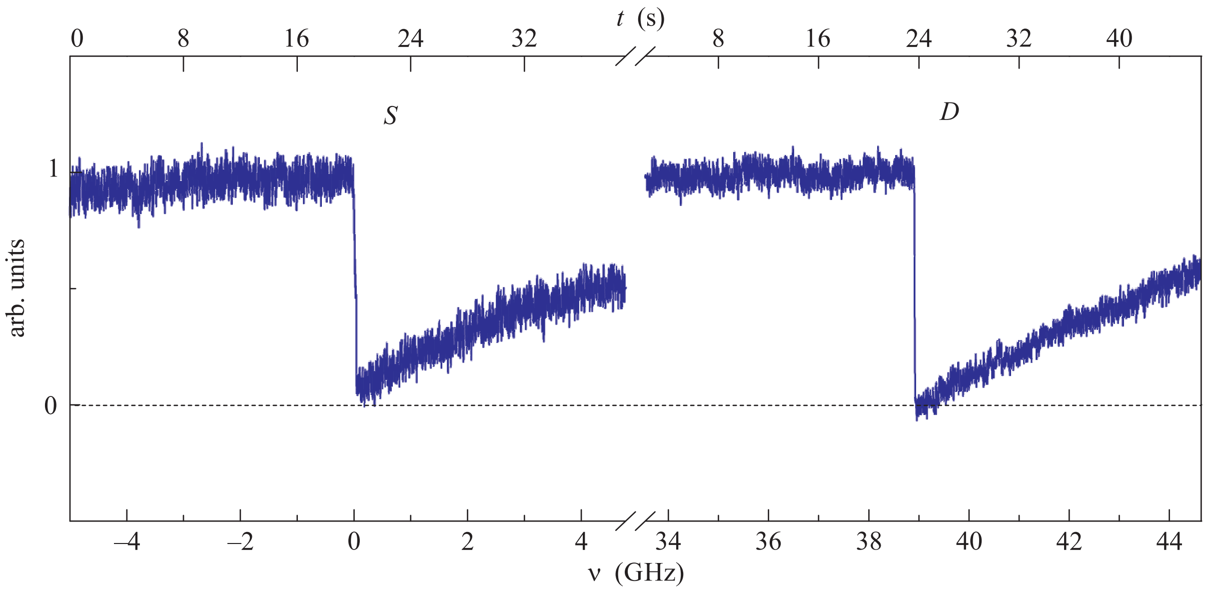

Рис. 3. Изменение флюоресценции облака ультрахолодных атомов для уровня 41 в S- и D-состояниях при интенсивности УФ-излучения на входе в вакуумную камеру $8.5 \cdot 10^{-3}$ Вт/см^2

Нуль по оси ординат соответствует полному отсутствию флюоресценции облака холодных атомов, а единица – максимальному сигналу флюоресценции от облака, когда оно является прозрачным для УФ-лазера. Область сканирования УФ-лазера не позволяет одновременно увидеть переходы в $41S$- и $41D$-состояния. Поэтому на рисунке представлены результаты двух разнесенных по времени измерений. По оси абсцисс снизу представлено относительное расстояние между уровнями в ГГц, а сверху – время в секундах, за которое происходит изменение частоты лазера.

Для того чтобы оценить полученные результаты, мы воспользовались базой данных для Li 7, которая доступна на сайте NIST (США). В этой базе данных имеются значения только до 42 уровня Li 7, причем только для перехода из S- в P-состояние. Так как диапазон перестройки частоты нашего непрерывного УФ-лазера не позволяет возбуждать атомы Li 7 с $n < 40$, для сравнения нами были использованы данные [19] для $n = 41$ при переходе из основного S-состояния в ридберговское P-состояние. Наши экспериментальные данные для $n = 41$ и $n = 94$ при переходе из P- в S- и D-состояние приведены в табл 1.

Взяв значение частоты порога ионизации ν_i [14], а также значение частоты охлаждающего лазера ν_C [20], можно рассчитать главное квантовое число с учетом квантового дефекта по следующей формуле (табл. 1):

$$n = \sqrt{\frac{R_{\mathrm{H}}}{\nu_i - \nu_C - \nu_n}}.$$

Для 41-го P-уровня из NIST имеем

$$n = \sqrt{\frac{R_H}{\nu_i - \nu_{41P}}}.$$

Используемые нами величины приведены в табл. 2.

Из табл. 1 видно,что $41S$-уровень выше, а $41D$ – ниже по длине волны, чем $41P$-уровень. Кроме того, $41D$-уровень имеет наименьший квантовый дефект, связанный с отличием атома лития-7 от водорода [22]. На рис. 4 представлены результаты эксперимента по переходу для 94-го уровня в S- и D-состояния для разных мощностей УФ-лазера.

Время гашения облака атомов 94-го уровня существенно больше, чем у 41-го уровня, а уровень гашения значительно меньше. Это говорит о меньшей вероятности перехода на более высокие ридберговские уровни. Относительная погрешность для 94-го уровня на порядок выше, чем для 41-го. Также наблюдается существенная разница между S- и D-уровнем по интенсивности. Посредством увеличения или уменьшения мощности УФ-лазера можно регулировать количество создаваемых ридберговских атомов.

4. Заключение. В результате настоящего исследования создан эффективный детектор состояний ридберговских атомов на основе непрерывного УФ-лазера и магнитооптической ловушки из атомов лития-7. Исследовались 41-е и 94-е состояния S- и

Таблица 1

Данные для высоколежащих ридберговских уровней лития-7*)

Обозначения ν_n	Переход, см$^{-1}$	Переход в принятых символах	Переход, нм	n, расчет по водороду
ν_{41S}	28516.61(1)	$1s^22p_{3/2}(F=2)$–$1s^241s$	350.6728(1)	40.600(2)
ν_{41P} (NIST)	43420.9	$1s^22s$–$1s^241p$		40.7
ν_{41D}	28517.90(1)	$1s^22p_{3/2}(F=2)$–$1s^241d$	350.6569(1)	41.000(2)
ν_{94S}	28570.6(1)	$1s^22p_{3/2}(F=2)$–$1s^241s$	350.010(1)	93.4(3)
ν_{94D}	28570.8(1)	$1s^22p_{3/2}(F=2)$–$1s^241d$	350.008(1)	94.0(3)

*) Обозначение 41.000(2) соответствует 41.000 ± 0.002.

Таблица 2

Точные значения постоянной Ридберга, охлаждающего перехода и порога ионизации в атомах лития-7

Обозначение	Переход, см$^{-1}$	Переход в принятых символах
$R_{\rm H}$	109737, 31568516(84) [21]	Постоянная Ридберга для водорода
ν_C	14903.9730012	$1s^22s_{1/2}(F=2)$–$1s^22p_{3/2}$
ν_i	43487.1594(2)	$1s^22s$–∞

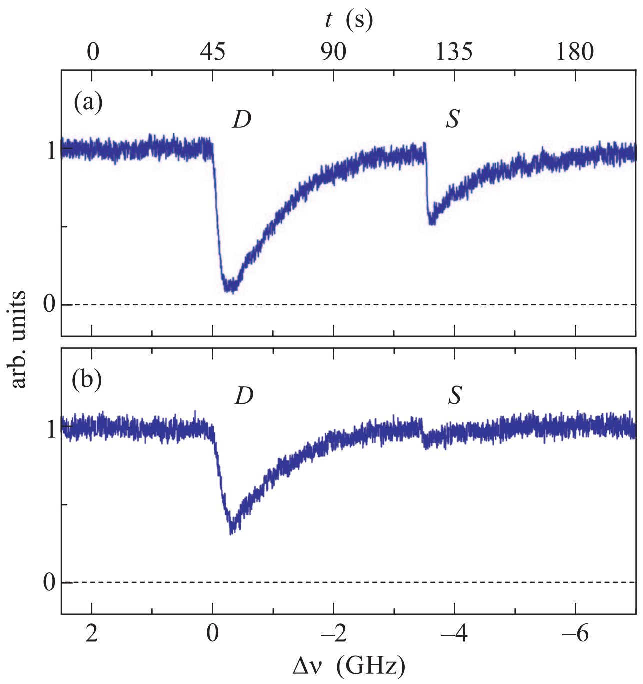

Рис. 4. Изменение флюоресценции облака ультрахолодных атомов для уровня 94 в S- и D-состоянии при интенсивности УФ-излучения на входе в вакуумную камеру $6.1 \cdot 10^{-3}$ Вт/см^2 (a) и $0.8 \cdot 10^{-3}$ Вт/см^2 (b)

D-конфигураций в ультрахолодных атомах лития-7. Получено экспериментальное подтверждение совпадения в пределах погрешности главных квантовых чисел $41D$- и $94D$-конфигурации атомов лития-7 с главными квантовыми числами 41-го и 94-го атома водорода. Определено отличие главных квантовых чисел для атома лития для $41S$- и $94S$-конфигурации с учетом квантового дефекта. Основным преимуществом данной схемы является возможность детектирования ридберговских состояний без разрушения ридберговских атомов. Атомы имеют очень низкую температуру. Поэтому доплеровское уширение отсутствует. Дальнейшие исследования могут существенно повысить точность измерений. Реализованная экспериментальная схема представляет собой надежный логический элемент 0–1. Данный метод также позволяет создавать большое количество ридберговских атомов при помощи эффективного двухступенчатого когерентного процесса с целью формирования сильно неидеальной ультрахолодной плазмы [23] и ридберговского вещества (кристаллизации ридберговских атомов) [24–28].

Авторы приносят благодарность Е.В. Вильшанской, НИУ "МЭИ" и ОИВТ РАН, Н.Б. Буянову (Newport Corporation, США), В.В. Васильеву, В.Л. Величанскому, М.А. Губину, С.А. Зиброву (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), Москва), В.Н. Кулясову (ГОИ им. С.И. Вавилова, С.-Петербург), всем сотрудникам лаборатории ИПФ РАН под руководством А.В. Турлапова (Н.Новгород), И.И. Рябцеву (ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск), А.М. Акульшину и А.И. Сидорову (Centre for Atom Optics and Ultrafast Spectroscopy, Swinburne University of Technology, Мельбурн, Австралия), М.Н. Шнейдеру (Princeton University, Принстон, США) за полезные обсуждения, замечания и помощь. Работа поддержана грантом Российского Научного Фонда # 14-12-01279.

1. R. P. Feynman, Int. J. Theor. Phys. **21**(6), 467 (1982).
2. M. Viteau, M. G. Bason, J. Radogostowicz, N. Malossi, D. Ciampini, O. Morsch, and E. Arimondo, Phys. Rev. Lett. **107**(6), 060402 (2011).
3. E. Urban, T. A. Johnson, T. Henage, L. Isenhower, D. D. Yavuz, T. G. Walker, and M. Saffman, Nature Phys. **5**(2), 110 (2009).
4. D.B. Tretyakov, V.M. Entin, E.A. Yakshina, I.I. Beterov, Ch. Andreeva, and I.I. Ryabtsev, arXiv preprint arXiv 1404.0438 (2014).
5. M. Amoretti et al. (ATHENA Collab.), Phys. Lett. B **23**, 578 (2004).
6. G. Gabrielse et al. (ATRAP Collab.), Phys. Rev. Lett. **89**, 233401 (2002).
7. G. B. Andresen et al. (ALPHA Collab.), Nature Phys. **7**, 558 (2011).
8. А. А. Бобров, С. Я. Бронин, Б. Б. Зеленер, Б. В. Зеленер, Э. А. Маныкин, Д. Р. Хихлуха, ЖЭТФ **139**, 605 (2011).
9. С. Я. Бронин, Б. Б. Зеленер, Б. В. Зеленер, Э. А. Маныкин , Д. Р. Хихлуха, ЖЭТФ **139**, 822 (2011).
10. Б. Б. Зеленер, Б. В. Зеленер, Э. А. Маныкин, Письма в ЖЭТФ **94**, 565 (2011).
11. А. А. Бобров, С. Я. Бронин, Б. Б. Зеленер, Э. А. Маныкин , Д. Р. Хихлуха, ЖЭТФ **144**, 185 (2013).
12. Б.Б. Зеленер, С.А. Саакян, В.А. Саутенков, А.М. Акульшин, Э.А. Маныкин, Б.В. Зеленер, В.Е.Фортов, Письма в ЖЭТФ **98**, 762 (2013).
13. Б.Б. Зеленер, С.А. Саакян, В.А. Саутенков, Э. А. Маныкин, Б. В. Зеленер , В. Е. Фортов, ЖЭТФ **146**(11), (2014).
14. B. A. Bushaw, W. Nörtershäuser, G. W. F. Drake, and H.-J. Kluge, Phys. Rev. A **75**, 052503 (2007).
15. S. Ye, X. Zhang, T. C. Killian, F. B. Dunning, M. Hiller, S. Yoshida, S. Nagele, and J. Burgdorfer, Phys. Rev. A **88**, 043430 (2013).
16. T. F. Gallagher, *Rydberg Atoms*, Cambridge University Press, Cambridge (1994).
17. A. K. Mohapatra, T. R. Jackson, and C. S. Adams, Phys. Rev. Lett. **98**, 113003 (2007).
18. A. S. Zibrov, M. D. Lukin, L. Hollberg, and M. O. Scully, Phys. Rev. A **65**,051801 (2002).
19. A. Kramida, Yu. Ralchenko, J. Reader, http://physics.nist.gov/asd (2013).
20. C. J. Sansonetti, C. E. Simien, J. D. Gillaspy, J. N. Tan, S. M. Brewer, R. C. Brown, S. Wu, and J. V. Porto, Phys. Rev. Lett. **107**(2),023001 (2011).
21. C. Schwob, L. Jozefowski, B. de Beauvoir, L. Hilico, F. Nez, L. Julien, F. Biraben, O. Acef, J.-J. Zondy, and A. Clairon, Phys. Rev. Lett. **82**(25), 4960 (1999).
22. И. И. Собельман, *Введение в теорию атомных спектров*, Наука, М. (1977).
23. T. C. Killian, M. J. Lim, S. Kulin, R. Dumke, S. D. Bergeson, and S. L. Rolston, Phys. Rev. Lett. **86**, 3759 (2001).
24. Э. А. Маныкин, М. И. Ожован, П. П. Полуэктов, ДАН СССР **260**, 1096 (1981).
25. Э. А. Маныкин, М. И. Ожован, П. П. Полуэктов, ЖЭТФ **102**, 804 (1992).
26. T. Pohl, E. Demler, and M. D. Lukin, Phys. Rev. Lett. **104**,043002 (2010).
27. T. Pohl, C. S. Adams, and H. R. Sadephpour, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **44**, 180201 (2011).
28. P. Schauß, M. Cheneau, M. Endres, T. Fukuhara, T. Fukuhara, S. Hild, A. Omran, Th. Pohl, Ch. Gross, S. Kuhr , and I.l Bloch, Nature **491**, 87 (2012).