

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

П И С Ь М А  
В ЖУРНАЛ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ  
И ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

ОСНОВАН В 1965 ГОДУ  
ВЫХОДИТ 24 РАЗА В ГОД

ТОМ 68, ВЫПУСК 12  
25 ДЕКАБРЯ, 1998

Письма в ЖЭТФ, том 68, вып.12, стр.853 - 857

© 1998г. 25 декабря

**ПРЕЦИЗИОННАЯ ШТАРКОВСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ТОНКОЙ  
СТРУКТУРЫ МИКРОВОЛНОВОГО ПЕРЕХОДА  $37P-37S$  В  
РИДБЕРГОВСКИХ АТОМАХ НАТРИЯ**

И.М.Бетеров, И.И.Рябцев<sup>1)</sup>

Институт физики полупроводников СО РАН  
630090 Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 19 ноября 1998 г.

Представлены результаты экспериментального и теоретического исследований тонкой структуры спектра микроволнового перехода  $37P-37S$  в ридберговских атомах натрия в слабом электрическом поле. Получены новые данные по экспериментальным значениям скалярных и тензорных поляризуемостей уровня  $37P$ . Проведено численное моделирование штарковской диаграммы с учетом влияния антипересечений ридберговских уровней, обнаружено хорошее согласие расчетов и эксперимента.

PACS: 31.20.-d, 32.30.Bv, 32.60.+i

В экспериментах по прецизионной микроволновой спектроскопии ридберговских атомов требуется точное знание атомных констант, определяющих величину и характер штарковских сдвигов и расщепления уровней в слабом электрическом поле. Неустраняемые остаточные электрические поля в экспериментальных установках приводят к уширению и сдвигу резонансов и определяют предельное разрешение в спектроскопических измерениях. Это особенно актуально в области высоких значений главного квантового числа, поскольку поляризуемости ридберговских состояний изменяются как  $n^7$  с ростом номера уровня  $n$ . Существенное повышение точности измерения квантовых дефектов, достигнутое в последние годы [1,2], позволяет провести точный расчет штарковских диаграмм ридберговских уровней с учетом влияния антипересечений и нарушения квадратичного или линейного приближений, поэтому экспериментальная проверка таких расчетов является актуальной задачей для определения области применимости теории.

Целью данной работы ставилось экспериментальное и теоретическое исследование спектра микроволнового перехода  $37P-37S$  в ридберговских атомах Na в слабом

<sup>1)</sup> e-mail: ryabtsev@isp.nsc.ru

постоянном электрическом поле и точное измерение скалярных и тензорных поляризуемостей уровня  $37P$ . Знание поляризуемостей необходимо для учета влияния паразитных электрических полей в последующих экспериментах по прецизионной микроволновой спектроскопии холодных ридберговских атомов и в экспериментах с ридберговским микромазером на переходе  $37P - 37S$ .  $S$ - и  $P$ -состояния  $\text{Na}$  обладают значительными квантовыми дефектами (1.347 и 0.854, соответственно), поэтому для них характерен квадратичный эффект Штарка в слабых полях. Сдвиги частот уровней описываются формулой

$$\Delta\nu = -\frac{1}{2}\left\{\alpha_0 + \alpha_2 \frac{3M^2 - J(J-1)}{J(2J-1)}\right\}E^2, \quad (1)$$

где  $\alpha_0$ ,  $\alpha_2$  – скалярная и тензорная поляризуемости,  $J$  и  $M$  – полный момент данного состояния и его проекция на вектор электрического поля,  $E$  – напряженность поля. Отметим, что  $\alpha_0=0$  для состояний с  $J = 1/2$ , то есть эти уровни не расщепляются.

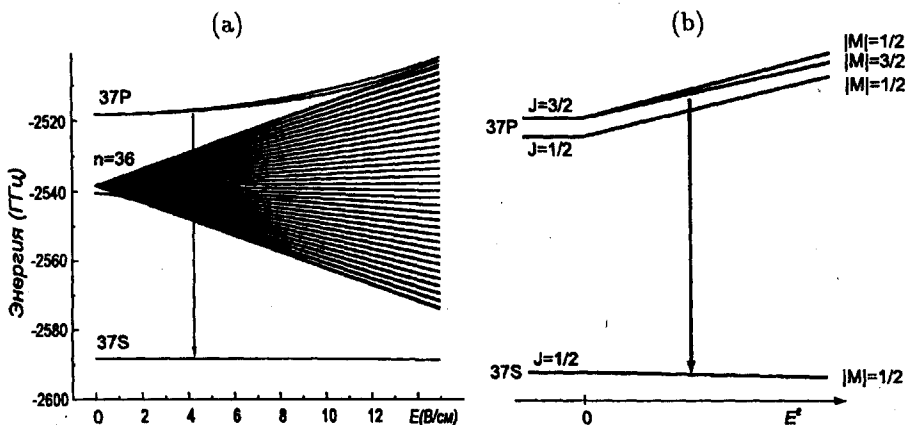


Рис.1. а) Расчетная штарковская диаграмма ридберговских уровней в атомах  $\text{Na}$  для состояний с  $|M| = 1/2$ ; б) схема микроволнового перехода  $37P - 37S$  в электрическом поле

Вследствие квазиклассичности движения внешнего электрона в ридберговских атомах оказывается возможным численный расчет дипольных моментов переходов между ридберговскими состояниями [3] и штарковских диаграмм энергий уровней при любых значениях напряженностей электрического поля. Для этого можно использовать метод диагонализации матрицы энергии взаимодействия атома с полем [4]. Такие расчеты были сделаны нами для уровней в окрестности перехода  $37P - 37S$ . В качестве примера на рис.1а приведена расчетная штарковская диаграмма состояний с  $|M|=1/2$ . Аналогичные диаграммы были построены и для состояний с  $|M| = 3/2$ . Рис.1а позволяет определить, что для уровня  $37P$  переход от квадратичного к линейному эффекту Штарка происходит в поле около 10 В/см. Точность расчетов определяется точностью известных значений квантовых дефектов, тщательно измеренных в [1]. Рассчитанные по рис.1а поляризуемости в поле напряженностью 2.86 В/см приведены в таблице. В соответствии с ними была построена качественная схема перехода  $37P - 37S$  в слабом электрическом поле (рис.1б), позволяющая идентифицировать отдельные компоненты наблюдаемого спектра с учетом тонкой структуры  $P$ -состояний. К особенностям полученных результатов следует отнести

различие значений  $\alpha_0$  для состояний  $37P_{J=1/2}$  и  $37P_{J=3/2}$ , обусловленное влиянием антипересечений и нарушением квадратичного приближения.

**Теоретические и экспериментальные значения скалярных и тензорных поляризуемостей уровня  $37P$  (в МГц/(В/см)<sup>2</sup>), измеренные при напряженности постоянного электрического поля 2.86 В/см.**

| Состояние   | Теория     |            | Эксперимент  |                |
|-------------|------------|------------|--------------|----------------|
|             | $\alpha_0$ | $\alpha_2$ | $\alpha_0$   | $\alpha_2$     |
| $37S_{1/2}$ | 3.7        | 0          | -            | -              |
| $37P_{1/2}$ | -107.2     | 0          | $-107 \pm 5$ | 0              |
| $37P_{3/2}$ | -113.8     | 13.2       | $-113 \pm 5$ | $13.3 \pm 0.4$ |

Эксперименты выполнялись с эффузионным пучком атомов натрия с температурой 500 К в вакуумной камере. Возбуждение ридберговских состояний осуществлялось по трехступенчатой схеме  $3S-3P-4S-37P_{J=1/2,3/2}$  при поперечном освещении пучка излучениями трех синхронизованных импульсных перестраиваемых лазеров с высокой (до 10 кГц) частотой следования импульсов. Диапазон перестройки лазера на последней ступени позволял селективно возбуждать ридберговскую  $P$ -серию натрия с значениями главного квантового числа от 11 до 50, а наибольшей эффективности достигал при  $n = 35 - 37$ . Характерные частоты одно- и многофотонных переходов из этих состояний лежат в области 50–100 ГГц. Далее пучок ридберговских атомов натрия направлялся в область взаимодействия с резонансным микроволновым излучением от генератора на лампе обратной волны, которое вводилось из открытого конца волновода в пространство между двумя медными пластинами, формирующими постоянное электрическое поле. Ширина линии генератора составляла 1 МГц, а расчетная интенсивность насыщения перехода  $37P-37S$  не превышала нескольких пВт/см<sup>2</sup>. При сканировании частоты генератора индуцировались переходы между заданными ридберговскими состояниями в электрическом поле, что приводило к изменению начальных заселенностей уровней. Они контролировались методом селективной полевой ионизации в импульсном электрическом поле. Образовавшиеся в результате ионизации электроны детектировались вакуумным каналным умножителем, а сигнал с его выхода обрабатывался в режиме счета импульсов в крейте КАМАК и ЭВМ. Для уменьшения влияния теплового излучения все элементы системы регистрации и ввода микроволнового излучения охлаждались до температуры жидкого азота. Подробное описание экспериментальной установки приведено в нашей работе [5].

На рис.2 приведены экспериментальные записи спектра перехода  $37P-37S$  в полях напряженностью до 5 В/см. В отсутствие поля спектр состоит из двух компонент  $37S_{1/2}-37P_{1/2}$  и  $37S_{1/2}-37P_{3/2}$ , соответствующих тонкой структуре уровня  $37P$  ( $\Delta\nu = 114$  МГц). Ширина пиков (5 МГц) определялась шириной линии генератора, пролетным и доплеровским уширением (0.5 МГц) и полевым уширением микроволновым полем, вклад от которого был преобладающим. Количественное описание амплитуд пиков затруднено, поскольку они зависят как от дипольных моментов переходов, которые легко могут быть рассчитаны, так и от взаимных ориентаций векторов постоянного электрического поля, микроволнового излучения и лазера третьей ступени, а также флуктуаций спектра генерации этого лазера, возбуждающего одновременно обе компоненты тонкой структуры уровня  $37P$ . В наших экспериментах векторы поляризации микроволнового и лазерного излучений совпадали и

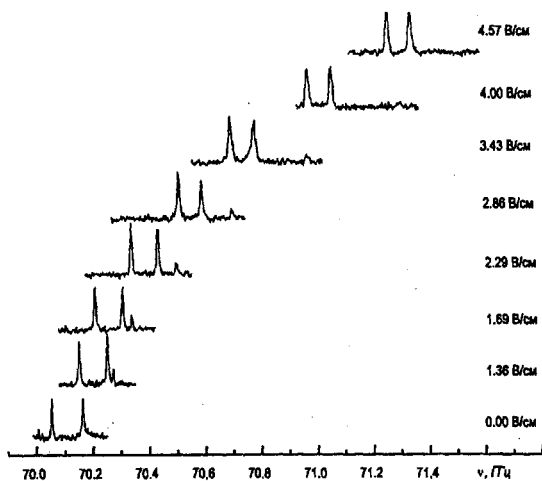


Рис.2. Экспериментальная запись спектра микроволнового перехода  $37P - 37S$  в ридберговских атомах  $\text{Na}$  при различных напряженностях постоянного электрического поля

были перпендикулярны постоянному электрическому полю, поэтому возбуждались преимущественно переходы с  $\Delta M = \pm 1$ .

Включение постоянного электрического поля приводило к сдвигу резонансов и расщеплению компоненты  $37S_{1/2} - 37P_{3/2}$  на две:  $37S_{1/2, |M|=1/2} - 37P_{1/2, |M|=1/2}$  и  $37S_{1/2, |M|=1/2} - 37P_{1/2, |M|=3/2}$ , причем соотношение их амплитуд находилось в хорошем согласии с теорией углового момента ( $1/3$  для  $P-S$ -переходов). При увеличении напряженности поля амплитуда первой из них уменьшалась вплоть до исчезновения с ростом поля. По-видимому, это связано с изменением вероятностей переходов и перемешиванием ридберговских состояний в электрическом поле. Измерение зависимости сдвига каждой из компонент спектра на рис.2 подтвердило близость к квадратичному режиму в полях до  $3 \text{ В/см}$ . При увеличении напряженности поля выше  $5 \text{ В/см}$  возникало заметное (около  $10\%$ ) отклонение от квадратичного закона. Экспериментальные значения скалярных и тензорных поляризуемостей уровня  $37P$ , измеренные в поле  $2.86 \text{ В/см}$ , приведены в таблице. Сравнение с расчетными данными демонстрирует хорошее согласие с экспериментом. Точность измерений определялась в основном пространственной неоднородностью постоянного электрического поля в области взаимодействия. Она приводила к наблюдаемому в поле  $4.86 \text{ В/см}$  уширению резонансов до  $15 \text{ МГц}$ . Неоднородность поля может быть приближенно рассчитана по формуле (1) и составляет менее  $30 \text{ мВ/см}$  ( $0.6\%$ ).

Полученные результаты подтверждают высокую точность численных расчетов штарковских диаграмм ридберговских уровней при использовании метода диагонализации матрицы энергии взаимодействия ридберговского электрона с постоянным электрическим полем. Новые данные по поляризуемостям позволяют уточнить значения критических полей для наблюдавшегося нами эффекта двойного штарковского резонанса на двухфотонном переходе  $37P - 37P$  [5]. Дальнейшее повышение точности планируется осуществить в экспериментах с холодными ридберговскими атомами. К возможным применениям следует отнести абсолютную калибровку напряженности слабого электрического поля в вакууме по измерению штарковских сдвигов частот микроволновых переходов, а также возможность измерения малых значений про-

странственных неоднородностей электрических полей по уширению резонансов, что является актуальной задачей для ряда спектроскопических исследований.

Работа поддержана грантами Российского фонда фундаментальных исследований (#96-02-19041 и #97-02-18551).

- 
1. С.Ф.Дюбко, М.Н.Ефименко, В.А.Ефремов, С.В.Поднос, Квантовая электроника **22**, 946 (1995).
  2. M.Ciocca, C.E.Burkhardt, J.J.Leventhal, and T.Bergeman, Phys. Rev. **A45**, 4720 (1992).
  3. A.R.Edmonds, J.Picart, N.Tran-Minh, and R.Pullen, J. Phys. **B12**, 2781 (1979).
  4. L.Zimmerman, M.G.Littman, M.M.Kash, and D.Kleppner, Phys. Rev. **A20**, 2251 (1979).
  5. И.М.Бетеров, А.О.Выродов, И.И.Рябцев, Н.В.Фатеев, ЖЭТФ **101**, 1154 (1992).