

УДК 535.343.4

ИССЛЕДОВАНИЕ УЗКОПОЛОСНОГО ОПТИЧЕСКОГО N -РЕЗОНАНСА, ФОРМИРУЮЩЕГОСЯ В ПАРАХ АТОМОВ ИЗОТОПА ^{87}Rb ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Р.К. МИРЗОЯН

Институт физических исследований НАН Армении, Аштарак, Армения

Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne, Université de Bourgogne, France

(Поступила в редакцию 26 июля 2012 г.)

Исследован узкополосный каскадный N -резонанс, который формируется в Λ -системе атомов рубидия. Использовались излучения двух непрерывных узкополосных лазеров, один из которых имел фиксированную частоту, а второй являлся пробным лазером. N -резонанс может иметь суб-натуральную ширину и демонстрирует увеличение поглощения. Исследовано поведение N -резонанса во внешнем магнитном поле при использовании паров атомов ^{87}Rb .

1. Введение

В последние годы активно исследуется новый когерентный процесс, при котором формируется так называемый узкополосный N -резонанс, который демонстрирует увеличенное поглощение [1]. По своим характеристикам N -резонанс похож на "светлый" резонанс, формируемый в результате процесса электромагнитно-индуцированного поглощения в V -системе [2], однако в данном случае используется Λ -система атомов рубидия D_1 линии, а также два лазерных излучения [3-6]. К основным достоинствам процесса следует отнести высокий контраст N -резонанса и его малую спектральную ширину. На рис.1 приведена схема формирования N -резонанса в Λ -системе атомов ^{87}Rb , D_1 линии, в которых нижними уровнями для Λ -системы являются уровни $F_g=1, 2$, а верхним уровнем – два доплеровски уширенных сверхтонких уровня $5P_{1/2}$, $F_e=1, 2$. Частота пробного лазера ν_p сканируется по переходам $F_g=1 \rightarrow F_e=1, 2$, а частота связывающего лазера ν_{cl} фиксирована. В спектре пробного излучения N -резонанс формируется, когда разность частот $\nu_e - \nu_p = \Delta$, где Δ – величина сверхтонкого расщепления нижнего уровня (6068 МГц).

В отмеченных работах [3-6] для формирования N -резонанса необходимым условием являлось наличие буферного газа в ячейке с парами атомов Rb.

Целью настоящей работы было исследование (ранее не изученного) поведения N -резонанса во внешнем магнитном поле при использовании паров атомов изотопа ^{87}Rb . Отмечена также возможность практического применения этих исследований.

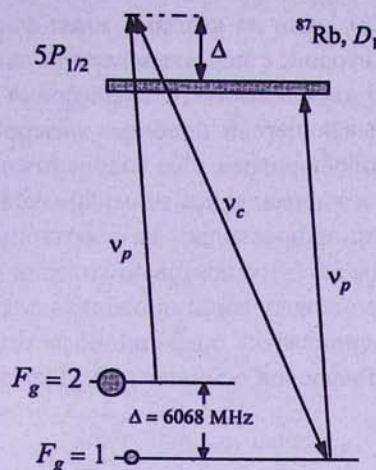


Рис.1. Λ -система атомов ^{87}Rb , D_1 линии, нижние уровни $F_g = 1, 2$, верхние уровни $F_e = 1, 2$; при частоте $\nu_{e1} - \nu_p = \Delta$ в спектре пробного излучения формируется N -резонанс, демонстрирующий увеличение поглощения. Большим кружком показана населенность N_2 уровня $F_g = 2$, малым кружком – населенность N_1 уровня $F_g = 1$.

2. Эксперимент

2.1. Конструкция ячейки

В эксперименте использовалась микроячейка толщиной ~ 50 мкм, заполненная парами Rb с добавлением буферного газа неона, имеющего давление 100 Торр. Прямоугольные окна размерами 20×30 мм и толщиной 2 мм были изготовлены из кристаллического сапфира. Ось с перпендикулярна поверхности окна, что существенно уменьшает двулучепреломление проходящего излучения. Поверхности сапфировых окон тщательно отполированы (локальная шероховатость < 5 нм). Для формирования клиновидного зазора (между внутренними поверхностями окон) в нижней и в верхней части между окнами помещались платиновые полоски толщиной 20 и 80 мкм, соответственно. Клиновидный зазор между окнами необходим для выявления минимальной толщины столба паров атомов, при которой исследуемый процесс все еще протекает эффективно. Это важно для дальнейшей миниатюризации ячейки с целью практических применений [7]. Заполнение микроячейки осуществлялось природным рубидием, состоящим из изотопов ^{85}Rb (72%) и ^{87}Rb (28%). Дополнительные детали конструкции микроячеек приведены в [8,9].

2.2. Экспериментальные результаты

Схема экспериментальной установки приведена на рис.2. Использовались излучения двух непрерывных узкополосных (с шириной ~ 1 МГц и с длиной волны $\lambda \approx 795$ нм) диодных лазеров с внешним резонатором (extended

cavity diode laser (ECDL)), один из которых имел фиксированную частоту ν_c (связывающий лазер), а второй, с перестраиваемой частотой, являлся пробным лазером ν_p . С помощью двух дополнительных призм Глана (на рис.2 не показаны) поляризации связывающего и пробного лазеров формировались линейными и взаимно перпендикулярными. Оба излучения диаметром 2 мм совмещались призмой Глана G1 и направлялись на микроячейку с толщиной ~ 50 мкм. Часть пробного излучения направлялась на сверхтонкую ячейку (СТЯ) с толщиной столба $L = \lambda$ паров Rb (4), с помощью которой формировался частотный репер (FR) [10]. Регистрация излучений проводилась фотодиодами ФД-24К (3). Сигналы с фотодиодов усиливались операционным усилителем и далее подавались на четырехлучевой цифровой осциллограф Tektronix TDS2014B (6).

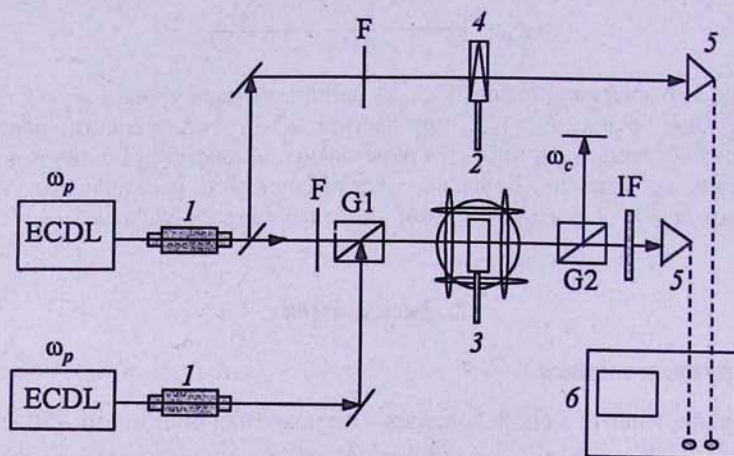


Рис.2. Схема экспериментальной установки (детали в тексте).

Для формирования магнитного поля в нужном направлении использовалась система катушек Гельмгольца (2), внутрь которой помещалась микроячейка. С помощью призмы G2 излучение связывающего лазера отсекалось, и регистрировалось только пробное излучение. Для лучшей селекции частоты пробного излучения дополнительно использовался интерференционный фильтр (IF), который имел следующие параметры: 50% пропускания на длине волны 795 нм, с шириной пика пропускания 10 нм. Температура трубки-отростка микроячейки (которая определяет плотность атомов рубидия в ячейке) составляла 70°C (плотность паров атомов Rb $\approx 5 \times 10^{11}$ ат/см³). Частота пробного лазера ν_p сканируется по переходам $F_g = 1 \rightarrow F_e = 1, 2$, а частота связывающего лазера ν_c фиксирована (рис.1). На рис.3 (верхняя кривая) приведен спектр пропускания пробного излучения ν_p , когда связывающее излучение присутствует. Как видно, контраст N -резонанса (определяемый как отношение амплитуды резонанса к его пиковому поглощению) достигает 15%. Отметим, что контраст N -резонанса значительно меньше в случае применения чистых паров рубидия (объяснение приведено ниже).

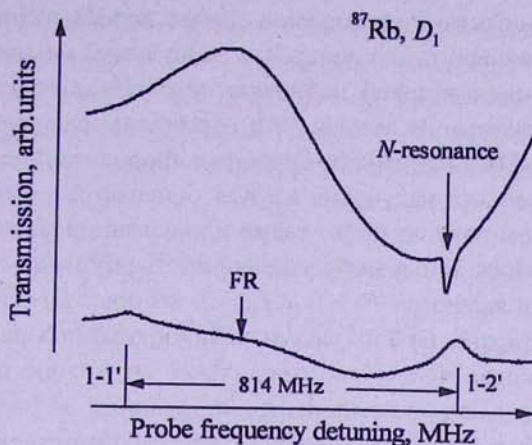


Рис.3. Верхняя кривая – спектр пропускания, содержащий N -резонанс. Контраст 15%, ширина спектра на полувысоте 16 МГц. Мощности связывающего и пробного лазера составляют 27 мВт и 1 мВт, соответственно. Нижняя кривая FR – частотный репер.

Спектральная ширина N -резонанса составляет ≈ 16 МГц. При сильном уменьшении мощности связывающего и пробного лазеров контраст N -резонанса уменьшается до нескольких %, при уменьшении спектральной ширины до ≈ 5 МГц. Нижняя кривая на рис.3 – это частотный репер FR, который формируется с помощью СТЯ с толщиной $L = \lambda$ [10].

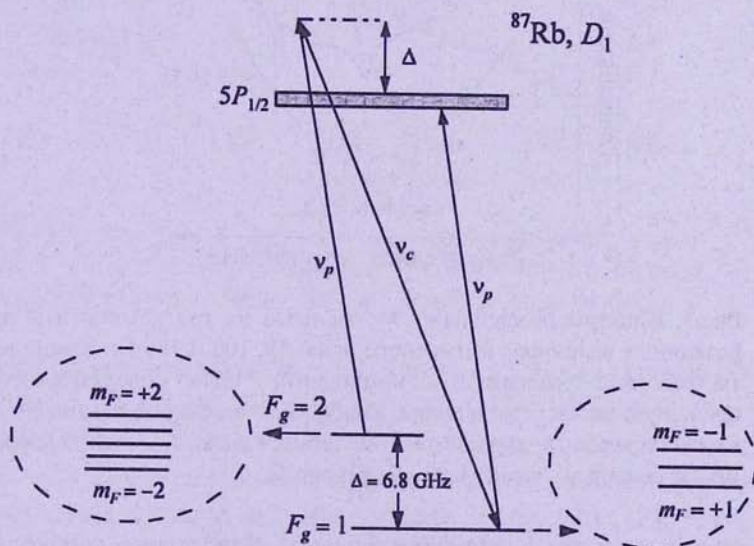


Рис.4. Во внешнем магнитном поле нижние уровни $F_g = 1$ и $F_g = 2$, которые участвуют в формировании N -резонанса, расщепляются, соответственно, на 3 и 5 подуровней. Число подуровней, на которые расщепляется уровень с квантовым числом F , равно $2F+1$.

Высокий контраст N -резонанса в случае использования буферного газа позволяет легко проследить его поведение во внешнем магнитном поле в широком интервале магнитных полей, начиная от нескольких Гс до нескольких сотен Гс. В случае использования атомов ^{87}Rb N -резонанс расщепляется на три или четыре компоненты (в зависимости от взаимной ориентации магнитного поля $\mathbf{B}$ и направления лазерного излучения $\mathbf{k}$). Как отмечается ниже, поведение N -резонанса в магнитном поле помогает также идентифицировать физический механизм его образования. В случае расщепления N -резонанса в магнитном поле нижними уровнями являются $F_g = 1$ и $F_g = 2$, которые во внешнем поле расщепляются, соответственно, на 3 и 5 подуровней, показанных на рис.4.

В случае, когда приложено продольное магнитное поле ($\mathbf{B} \parallel \mathbf{k}$), N -резонанс расщепляется на три компоненты, показанные на рис.5. Мощности связывающего и пробного лазеров 27 мВт и 1 мВт, соответственно. В зависимости от величины магнитного поля частотное расстояние между компонентами изменяется. Нетрудно показать, что при полях $B < 200$ Гс частотное расстояние между соседними компонентами составляет ~ 1.4 МГц/Гс [11]. Следовательно, измеряя частотное расстояние между компонентами, можно определить величину приложенного магнитного поля.

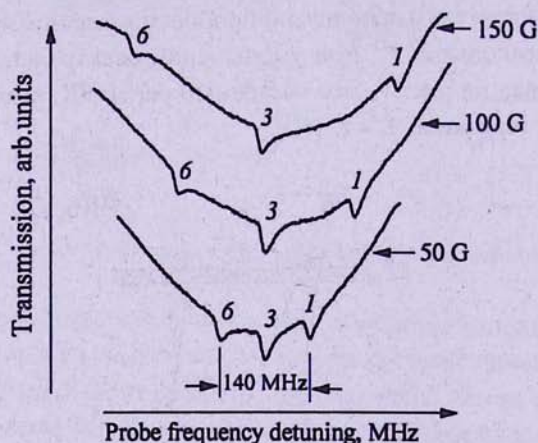


Рис.5. Спектры расщепления N -резонанса на три компоненты при различных величинах магнитного поля: 50, 100 и 150 Гс. Компоненты отмечены номерами 1,3,6; компонента 1 может содержать неразрешенную по частоте дополнительную компоненту 2; компонента 3 может содержать дополнительные компоненты 4,5; компонента 6 может содержать компоненту 7 (см. рис.6).

Как видно из рис.1, для формирования N -резонанса необходимо выполнение условия:

$$|\nu_p - \nu_c| = \frac{E(F_g = 2, m_F) - E(F_g = 1, m_F)}{h}, \quad (1)$$

а число компонент N -резонанса, формирующихся в постоянном магнитном поле, и их частотное поведение зависят от числа и сдвига магнитных подуровней m_F с нижних уровней $F_g = 1, 2$. В случае ^{87}Rb , D_1 линии нелинейный энергетический сдвиг магнитных подуровней m_F (уровни $F_g = 1, 2$ отмечены ниже как $F = 1, 2$) может быть рассчитан по формуле Раби-Брейта, приведенной, например, в работах [12,13]:

$$E(F=2, m_F) = h\nu_{\text{hfs}} \left[-1/8 + 1/2(1 + m_F x + x^2)^{1/2} \right] \quad (m_F \neq -2), \quad (2)$$

$$E(F=2, -2) = h\nu_{\text{hfs}} (3/8 - x/2), \quad (3)$$

$$E(F=1, m_F) = h\nu_{\text{hfs}} \left[-1/8 - 1/2(1 + m_F x + x^2)^{1/2} \right], \quad (4)$$

где $x = 2\mu_B B / h\nu_{\text{hfs}}$, μ_B — магнетон Бора и $\nu_{\text{hfs}} = 6835$ МГц.

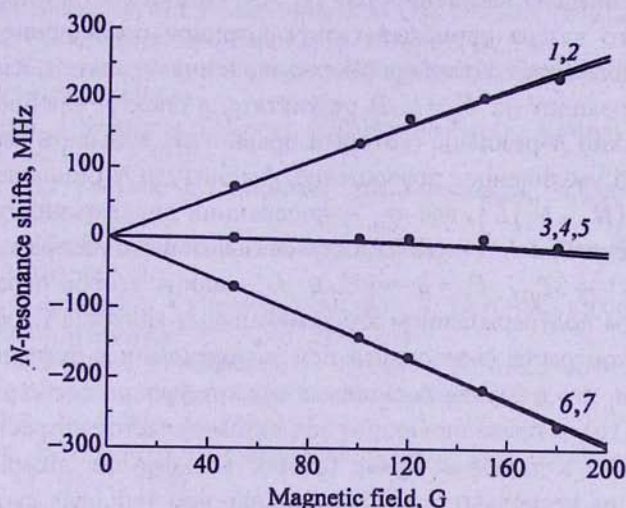


Рис.6. Зависимость частотного сдвига расщепленных компонент N -резонанса в зависимости от величины магнитного поля. Сплошные линии — теория; черные кружки — эксперимент.

На рис.6 приведено семь кривых, построенных по формулам (1)-(4), которые описывают частотное положение (частотный сдвиг) компонент N -резонанса в магнитном поле; черные кружки — экспериментальные точки. Отметим, что частоты, представленные кривыми 4 и 5, полностью совпадают при всех величинах магнитного поля, поэтому всего может быть шесть различных по частоте компонент N -резонанса. Как видно из рис.6, до полей 200 Гс образуются три компоненты N -резонанса: 1 (может содержать дополнительную компоненту 2), 3 (может содержать дополнительные компоненты 4,5) и компонента 6 (может содержать дополнительную компоненту 7). Эти дополнительные компоненты, возможно, могут быть зарегистрированы, если обеспечить формиро-

вание более узких (с шириной 1–2 МГц) компонент N -резонанса. В формировании компонент N -резонанса с номерами 1, 3 и 6, как это имеет место в случае исследования процесса электромагнитно-индуцированной прозрачности [11], участвуют три Λ -системы со следующими нижними подуровнями сверхтонкой структуры нижнего уровня $5S_{1/2}$ ($F_g = 1, m_F; F_g = 2, m_F$): (1, +1, 2, +1), (1, 0, 2, 0) и (1, -1, 2, -1), соответственно.

Как показывают приведенные результаты по расщеплению N -резонанса в магнитном поле, начальным и конечным являются нижние уровни $F_g = 1, 2$. Следовательно, возможен следующий механизм образования N -резонанса: пробное излучение переводит атомы с уровня $F_g = 1$ на уровень $5P_{1/2}$ с последующим распадом на $F_g = 1$ (так называемый процесс оптической накачки (ОН) [14]). Это приводит к обеднению уровня $F_g = 1$ (его населенность N_1 на рис. 1 условно показана маленьким кружком) и увеличению населенности уровня $F_g = 2$ (его населенность N_2 условно показана большим кружком). В результате, появляется инверсия населенностей $N_2 > N_1$, и при соответствующей частоте связывающего лазера происходит двухфотонное поглощение [15]: атом с уровня $F_g = 2$ поглощает фотон пробного излучения ν_p , затем, излучая фотон с частотой ν_c , переходит на $F_g = 1$. В результате, в спектре пробного излучения формируется узкий N -резонанс (который правильнее называть каскадным), демонстрирующий увеличенное поглощение. Амплитуда N -резонанса пропорциональна $\exp[\sigma_m(N_2 - N_1)L]$, где σ_m — поперечник двухфотонного поглощения (зависит от расстройки Δ , интенсивности связывающего лазера и вероятностей переходов $F_g = 1 \rightarrow 5P_{1/2}$, $F_g = 2 \rightarrow 5P_{1/2}$), L — длина столба паров атомов Rb. Дополнительным подтверждением этого механизма является также факт резкого улучшения контраста N -резонанса при использовании буферного газа. Это объясняется тем, что в случае Λ -системы нижние уровни слабо уширяются буферным газом [16], и превалирующим эффектом является возрастание времени нахождения атома в лазерном пучке (скорость диффузии атома при наличии буферного газа на несколько порядков меньше, чем тепловая скорость атома в чистых парах Rb), и, как следствие, более эффективной ОН, которая прямо пропорциональна времени взаимодействия. Это приводит к возрастанию населенности N_2 и, следовательно, к возрастанию амплитуды N -резонанса.

3. Заключение

Приведены результаты исследования поведения N -резонанса, формируемого в Λ -системе паров атомов ^{87}Rb , D_1 линии во внешних магнитных полях в интервале 1–200 Гс, с использованием микроячейки с толщиной столба паров атомов рубидия $L = 50$ мкм. Использовались излучения двух непрерывных узкополосных диодных лазеров с длиной волны $\lambda \approx 794$ нм (с шириной линии ~ 1 МГц). Теоретическое рассмотрение указывает на возможность наличия шести компонент N -резонанса, однако на эксперименте при магнитных полях $B < 200$ Гс регистрируются три компоненты N -резонанса. Применение микроячейки позволяет осуществить измерение сильно-градиентного магнитного поля с мик-

ронным пространственным разрешением. Изложен физический механизм образования N -резонанса. Приведенная теоретическая модель хорошо описывает расщепление N -резонанса на три компоненты во внешнем магнитном поле. Формирование компонент N -резонанса с помощью микроячейки может быть успешно использовано также для изучения $D_{1,2}$ линий атомов Cs, K, Na и др. в сильных магнитных полях. Описанный метод может использоваться в магнитометрии, как альтернатива λ -Зееман техники [17-19].

Автор благодарит А. Саркисяна за изготовление микроячейки, а также Д. Саркисяна, К. Леруа и Е. Пашаян-Леруа за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. A.S.Zibrov, C.Y.Ye, Y.V.Rostovtsev, et al. Phys. Rev. A, 65, 043817 (2002).
2. A.Lezama, S.Barreiro, A.M.Akulshin. Phys. Rev. A, 59, 4732 (1999).
3. I.Novikova, D.F.Phillips, A.S.Zibrov, et al. Opt. Lett., 31, 2353 (2006).
4. I.Novikova, D.F.Phillips, A.S.Zibrov, et al. Opt. Lett., 31, 622 (2006).
5. C.Hancox, M.Hohensee, M.Crescimanno, et al. Opt. Lett., 33, 1536 (2008).
6. I.Ben-Aroya, G.Eisenstein. Opt. Express, 19, 9956 (2011).
7. A.Sargsyan, G.Hakhumyan, A.Papoyan, D.Sarkisyan, A.Atvars, M.Auzinsh. Appl. Phys. Lett., 93, 021119 (2008).
8. G.Hakhumyan, A.Sargsyan, C.Leroy, Y.Pashayan-Leroy, A.Papoyan, D.Sarkisyan. Opt. Express, 18, 14577 (2010).
9. А.Саргсян, М.Г.Бейсон, Д.Саркисян, А.К.Мохapatра, Ч.С.Адамс. Оптика и спектр., 109, 1359 (2010).
10. A.Sargsyan, Y.Pashayan-Leroy, C.Leroy, R.Mirzoyan, A.Papoyan, D.Sarkisyan. Appl. Phys. B, 105, 767 (2011).
11. A.Sargsyan, D.Sarkisyan, A.Papoyan. Phys. Rev. A, 73, 033803 (2006).
12. K.Motomura, M.Mitsunaga. JOSA, 19, 2456 (2002).
13. M.Auzinsh, D.Budker, S.M.Rochester. Optically Polarized Atoms: Understanding Light-Atom Interactions. Oxford, Oxford University Press, 2010.
14. W.Happer. Rev. Mod. Phys, 44, 169 (1972).
15. В.С.Летохов, В.П.Чеботаев. Нелинейная лазерная спектроскопия сверхвысокого разрешения. М., Наука, 1990.
16. R.Wynands, A.Nagel. Appl. Phys. B, 68, 1 (1999).
17. Т.Варжапетян, Г.Ахумян, В.Бабушкин, Д.Саркисян, А.Атварс, М.Аузинш. Изв. НАН Армении, Физика, 42, 338 (2007).
18. Г.Ахумян. Изв. НАН Армении, Физика, 47, 3, 160 (2012).
19. А.Саргсян, Г.Ахумян, Д.Саркисян. Изв. НАН Армении, Физика, 47, 98 (2012)

STUDY OF OPTICAL NARROW-BAND N -RESONANCE FORMED IN THE VAPOR OF ISOTOPE ^{87}Rb ATOMS IN AN EXTERNAL MAGNETIC FIELD

R.K. MIRZOYAN

We investigate the narrow-band cascaded N -resonance, which is formed in the Λ -system of rubidium atoms. Two continuous narrow-band radiation of lasers are used, one of which has a fixed frequency, while the second one is a probe laser. The behavior of N -resonance in an external magnetic field is observed with use of ^{87}Rb atomic vapors.