

A 01.04.21  
A-958

ՀՀ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ  
ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Հախումյան Հրանտ Թորգոմի

ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ և ՄԱԳՆԻՄԱ-ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ԵՐԵՎՈՒՅԹՆԵՐԻ  
ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒՄԸ ՌՈՒԲԻԴԻՈՒՄԻ ՆԱՆՈՄԵՏՐԻԿ ՀԱՍՏՈՒԹՅԱՄԲ  
ԱՏՈՄԱԿԱՆ ԳՈԼՈՐՇԻՆԵՐԻ ՇԵՐՏԵՐՈՒՄ

Ա.04.21-«Լազերային Ֆիզիկա» մասնագիտությամբ Ֆիզիկա-  
մաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի զիտական աստիճանի  
հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

Երևան-2012

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РА  
ЕРЕВАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Ахумян Грант Торгомвич

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ И МАГНИТО-ОПТИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ В СЛОЯХ АТОМАРНЫХ ПАРОВ РУБИДИЯ  
НАНОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЛЩИНЫ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических  
наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика

Ереван – 2012

Ատենախոսության թեման հաստատվել է ՀՀ ԳԱԱ Ֆիզիկական Հետազոտությունների  
Ինստիտուտում

Գիտական ղեկավար՝ Ֆիզ. մաթ. գիտությունների դոկտոր  
Դ. Հ. Սարգսյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ Ֆիզ. մաթ. գիտությունների դոկտոր  
Վ. Բ. Պախալով  
Ֆիզ. մաթ. գիտությունների դոկտոր  
Յու. Պ. Մալաքյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ Ռուս-Հայկական (Սլավոնական) Պետական Համա-  
լսարան

Ատենախոսության պաշտպանությունը կայանալու է 2012 թ. Մայիսի «18»-ին ժ. 14:00  
ՀՀ ԳԱԱ Ֆիզիկական Հետազոտությունների Ինստիտուտում (0203 ք. Աշտարակ-2, ՀՀ  
ԳԱԱ ՖՀԻ) ԲՈՆՀ-ի Ֆիզիկայի-049 մասնագիտական խորհրդում:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵՊՀ գրադարանում:  
Սեղմագիրը առաքված է 2012 թ. Ապրիլի «16»-ին

Մասնագիտական խորհրդի  
գիտական քարտուղար՝

Ֆիզ. մաթ. գիտ. թեկնածու  
Վ. Պ. Քալանթարյան

Тема диссертации утверждена в Институте Физических Исследований НАН РА

Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
Д.Г. Саркисян

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
В.Б. Пахалов  
доктор физико-математических наук  
Ю.П. Малакян

Ведущая организация: Российско-Армянский (Славянский) Государственный Университет

Защита диссертации состоится «18» Мая 2012г. в 14:00 часов в Институте Физических  
Исследований НАН РА (0203, г. Аштарак-2 ИФИ НАН РА) на заседании  
Специализированного совета ВАК Физика-049.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕГУ.

Автореферат разослан «16» Апреля 2012г.

Ученый секретарь специального совета

Канд. физ.-мат. наук  
В.П. Калантарян



2423-2012

## Общая характеристика работы.

### Актуальность темы.

При взаимодействии непрерывного узкополосного лазерного излучения с атомарными парами щелочных металлов, реализуются большое число оптических и магнито-оптических процессов. Некоторые из этих процессов в последние годы нашли широкое применение в лазерных технологиях, метрологии высокого частотного разрешения, в создании высокочувствительных магнетометров, в задачах квантовой коммуникации, записи оптической информации и др. [1-12]. Поэтому, интерес к этим исследованиям продолжает оставаться очень высоким. Начиная с 2001 года, в работе [13] было продемонстрировано, что использование нано-ячейки, разработанной в ИФИ, НАН Армении, с толщиной столба паров атомов  $L < 1$  мкм в поле излучения непрерывных узкополосных плавно-перестраиваемых диодных лазеров со спектральной шириной  $\gamma_L \sim 1$  МГц, возможно формирование субдоплеровских резонансов оптического диапазона со спектральной шириной 15-70 МГц. При этом используются следующие два процесса: 1) в спектрах пропускания нано-ячейки заполненной парами атомов рубидия ( $D_{1,2}$  линии), имеющих толщину столба  $L = \lambda$  ( $\lambda$ -длина волны резонансного излучения равная 794 нм или 780 нм для  $D_1$  и  $D_2$  линий, соответственно), при использовании перестраиваемого лазерного излучения, формируются узкие, селективные по скоростям оптические резонансы (ОРСС), расположенные на атомных переходах со спектральной шириной 15-20 МГц; 2) в спектрах резонансной флуоресценции нано-ячейки заполненной парами рубидия ( $D_1$  и  $D_2$  линий), имеющих толщину столба  $L = \lambda/2$  формируются узкие пики флуоресценции со спектральной шириной 60-70 МГц. Уже предварительные результаты показали, что применение ОРСС и узкополосной флуоресценции позволяют успешно исследовать поведения атомных переходов сверхтонкой структуры атомов рубидия, в частности, исследовать поведения атомных переходов рубидия между зеемановскими подуровнями во внешних магнитных полях.

На основе вышеизложенного можно было ожидать, что применение узких оптических резонансов позволит осуществить дальнейшее исследование атомных переходов Rb в значительно более широком интервале величин магнитного поля (чем это было реализовано к моменту начала диссертационной работы), а также применить полученные результаты для практических приложений. Также важным являлось исследование условий для формирования оптимальных параметров используемых резонансов.

Целью работы являлось экспериментальное и теоретическое изучение поведения индивидуальных атомных переходов сверхтонкой структуры атомов рубидия  $D_1$  и  $D_2$  линий между зеемановскими подуровнями во внешних магнитных полях в широком интервале магнитных полей 5-7000 Гс с применением узкополосного непрерывного лазера, и нано-ячеек, а также, изучение возможности практического применения полученных результатов.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

1. Разработка установки на основе постоянных магнитов, позволяющая формировать сильные магнитные поля с возможностью помещения в нее рубидиевой нано-ячейки с нагревателем и возможностью пропускания и регистрации лазерного излучения.
2. Исследование влияния параметров эксперимента таких как лазерная интенсивность, добавка буферного газа, изменение толщины столба паров в интервале  $\lambda/2-4\lambda$ , плотности паров атомов на величину спектральной ширины резонансной флуоресценции и ОРСС резонансов с целью дальнейшего применения для исследования частотного пове-

дения и интенсивности линий (вероятности переходов) атомных переходов сверхтонкой структуры  $Rb$ ,  $D_1$  и  $D_2$  линий между зеемановскими подуровнями во внешних сильных магнитных полях.

3. Разработана численная программа, позволяющая определять частоту и вероятность для атомных переходов между зеемановскими подуровнями в сильных магнитных полях для  $D_1$  и  $D_2$  линий атомов  $Rb$ .

#### Научная новизна:

1. Используя узкополосную флуоресценцию от нано-ячейки с толщиной  $L = \lambda/2$  и ОПСС резонансы, формируемые при толщине  $L = \lambda$ , впервые экспериментально исследовано частотное поведение и вероятности атомных переходов между нижними и верхними уровнями сверхтонкой структуры  $Rb$ ,  $D_1$  и  $D_2$  линий во внешних магнитных полях в интервале 5-7000 Гс. Исследовано поведение нескольких десятков ранее неизученных атомных переходов и показано, что интенсивности этих линий могут как сильно возрастать, так и сильно уменьшаться (в десятки раз).

2. Впервые продемонстрировано, что при определенных величинах магнитных полей, вероятность запрещенных (при нулевом магнитном поле) переходов  $^{87}Rb$ ,  $D_2$  линии,  $F_g=1 \rightarrow F_e=3$  (три перехода при возбуждении излучением с  $\sigma+$  поляризацией),  $F_g=1 \rightarrow F_e=1$  (один переход при возбуждении излучением с  $\pi$  поляризацией);  $^{87}Rb$ ,  $D_1$  линии  $F_g=1 \rightarrow F_e=3$  и  $F_g=1 \rightarrow F_e=1$  (по одному переходу при возбуждении излучением с  $\pi$  поляризацией), сильно возрастает и превосходит вероятность разрешенных атомных переходов.

3. Обнаружен сильный атомный переход  $^{87}Rb$ ,  $D_2$  линии,  $F_g=1$ ,  $m_f = +1 \rightarrow F_e=1$ ,  $m_f = +1$  частота которого демонстрирует уникальное поведение: частота остается практически неизменной в интервале магнитных полей 100-1100 Гс.

4. Разработана численная программа, позволяющая определять частотные положения и вероятности для атомных переходов во внешних магнитных полях в интервале 0-10 000 Гс для  $D_1$  и  $D_2$  линий атомов  $Rb$ ,  $Cs$  и  $Na$ . Теоретические кривые хорошо согласуются с экспериментальными результатами.

5. Впервые показано, что при добавлении буферного газа неона с давлением вплоть до 6 торр в нано-ячейку с толщиной  $L = \lambda$  заполненной  $Rb$ , ОПСС резонансы тем не менее уверенно регистрируются, в то время как добавление газа неона с давлением всего 0.1 торр в ячейках сантиметровой длины приводит к полному исчезновению ОПСС резонансов.

6. Впервые показано, что спектральная ширина резонансной флуоресценции от рубидиевой нано-ячейки с толщиной  $L = \lambda/2$  при всех давлениях буферного газа неона остается значительно уже (в 6-8 раз) по сравнению с резонансной флуоресценцией от обычной рубидиевой ячейки сантиметровой длины с таким же давлением неона.

#### Практическая ценность работы:

1. Реализована простая конструкция магнитометра на основе нано-ячейки заполненной рубидием, позволяющая определять величину как однородного, так и сильно неоднородного магнитного поля: а) с помощью резонансной флуоресценции в интервале 30-2500 Гс; б) с помощью ОПСС резонансов формируемые при толщине нано-ячейки  $L = \lambda$  в интервале 5-7000 Гс.

2. Реализована простая конструкция на основе нано-ячейки, заполненной рубидием, и постоянного магнита, позволяющая реализовать частотный репер на частотах смещенных на 3-5 ГГц относительно исходных атомных частот  $Rb$ ,  $D_1$  и  $D_2$  линий.

3. Собрана небольшая установка на основе постоянных магнитов, позволяющая формировать сильное магнитное поле до 7000 Гс. Исследуемый образец может быть помещен в область цилиндрической формы диаметром 50 мм и толщиной 20 мм, с возможностью облучения образца лазерным излучением. Применение этой установки позволило реализовать Режим Пашена-Бака для сверхтонкой структуры атомов  $Rb$ ,  $D_1$  линии.

4. С помощью разработанной численной программы возможно определять частоты и вероятности для атомных переходов между зеемановскими подуровнями сверхтонкой структуры во внешних магнитных полях в интервале 0-10 000 Гс для  $D_1$  и  $D_2$  линий атомов  $Rb$ ,  $Cs$  и  $Na$ .

5. Используя резонансную флуоресценцию от нано-ячейки с толщиной  $L = \lambda/2$  предложена конструкция манометра, позволяющего измерять давление буферного газа неона в смеси с горячими парами атомов рубидия. Интервал определяемого давления буферного газа составляет 1-400 торр. Измерения возможно осуществлять в режиме онлайн.

#### Основные защищаемые положения:

1. Использование узкополосной резонансной флуоресценции от нано-ячейки с толщинами  $L = \lambda/2$  и  $L = \lambda$  позволяет исследовать частотное поведение и интенсивность линий индивидуального атомного перехода сверхтонкой структуры  $Rb$ ,  $D_1$  и  $D_2$  линий между зеемановскими подуровнями во внешних магнитных полях в интервале 5-7000 Гс. Для большого числа приведенных атомных переходов интенсивности линий в этом интервале возрастают и уменьшаются многократно.

2. При выявленных нами величинах магнитных полей, интенсивности исследованных шести атомных переходов между зеемановскими подуровнями  $Rb$ ,  $D_1$  и  $D_2$  линий, которые запрещены при нулевом магнитном поле, превосходят интенсивности линий разрешенных атомных переходов. Частота сильного перехода  $^{87}Rb$ ,  $D_1$  линии,  $F_g=1$ ,  $m_f = +1 \rightarrow F_e=1$ ,  $m_f = +1$  демонстрирует уникальное поведение – она остается практически неизменной в интервале магнитных полей 100-1100 Гс.

1. Разработанная численная программа позволяет определять частотные положения и вероятности для атомных переходов между зеемановскими подуровнями в магнитных полях в интервале 0-10 000 Гс для  $D_1$  и  $D_2$  линий атомов  $Rb$ ,  $Cs$  и  $Na$ .

2. До величин давления буферного газа неона 6 торр ОПСС резонансы уверенно регистрируются в нано-ячейке заполненной  $Rb$  при толщине  $L = \lambda$ . Спектральная ширина резонансной флуоресценции от рубидиевой нано-ячейки с толщиной  $L = \lambda/2$  при всех давлениях буферного газа остается в 6-8 раз уже по сравнению с резонансной флуоресценцией от рубидиевой ячейки сантиметровой длины с таким же давлением неона.

**Апробация работы.** Полученные результаты докладывались на международных конференциях по лазерной и атомной физике – “European Conference of Physics EGAS-40” (Graz, Austria, 2008), “European Conference of Physics EGAS-41” (Gdansk, Poland, 2009), 16-th International School on Quantum Electronics “Laser physics and application” (Nessebar, Bulgaria, 2010), “European Conference on Atoms Molecules and Photons ECAMP-10” (Salamanca, Spain, 2010), “European Conference of Physics EGAS-43” (Fribourg, Switzerland, 2011), “High Resolution Molecular Spectroscopy HRMS-22” (Dijon, France, 2011), на Рес-

публиканских Конференциях "Laser Physics-2005, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011" (Ashtarak, Armenia, 2005, 2007-2011) и на научных семинарах ИФИ НАН РА и Бургундского университета.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 25 работ (в том числе 15 статей в рецензируемых журналах).

**Структура и объем работы:** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка цитируемой литературы. Содержание диссертации изложено на 149 страницах, включая 81 рисунка и 2 таблицы. Список литературы содержит 125 наименований.

### Краткое содержание работы

В **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, её научная новизна и практическая ценность, представлены основные положения, выносимые на защиту, а также кратко изложено содержание работы по главам.

В **первой главе** приведен обзор существующих спектроскопических методов изучения атомных переходов щелочных металлов на основе обычных ячеек сантиметровой и миллиметровой длины, и их сравнение с усовершенствованным методом на основе nano-ячейки с толщиной  $L = 300 \div 800$  нм. В §1.1 приведено описание и параметры непрерывных диодных лазеров различной конструкции с длинами волн  $\lambda = 780, 794$  и др.; описаны параметры использованной экспериментальной аппаратуры: фарадеевский изолятор, система регистрации слабых оптических излучений и др.

В §1.2 приведены традиционные спектроскопические методы изучения атомных переходов с помощью спектров поглощения и флуоресценции ячеек обычной сантиметровой длины и их сравнение с методами на основе nano-ячейки. В частности, показано, что флуоресценция, а также пропускание nano-ячейки, соответственно с толщинами  $L = \lambda/2$  и  $L = \lambda$  ( $\lambda$ -длина волны излучения, резонансное  $D_{1,2}$  линиям атомов Rb:  $\lambda = 794, 780$  нм), является удобным спектроскопическим методом изучения переходов между уровнями сверхтонкой структуры атомов Rb. В §1.3 приведен обзор современных методов реализации субдоплеровской спектроскопии для изучения атомных переходов атомов. Приведено сравнение с методами, основанными на применении nano-ячейки с толщинами  $L = \lambda/2$  и  $\lambda$ , и отмечен ряд преимуществ. В частности в §1.3.5 приведен анализ спектроскопического метода, в котором используется спектр пропускания ячейки с парами атомов Rb толщиной  $L \sim 1$  мм, и показаны преимущества методов основанных на применении ячеек с толщинами  $L = \lambda/2$  и  $L = \lambda$ .

В §1.4 приведены конструкции разработанных nano-ячеек с клиновидной толщиной столба паров атомов Rb от 20 нм до  $1 \div 5$  мкм, а также конструкции тонких ячеек с толщиной столба паров атомов от нескольких мкм до нескольких мм. В §1.4.3 приведена конструкция комбинированной, много-областной ячейки, используемой для изучения влияния буферного газа на спектры пропускания и флуоресценции от обычной и nano-ячейки. На Рис.1 приведена схема конструкции комбинированной ячейки, которая состоит

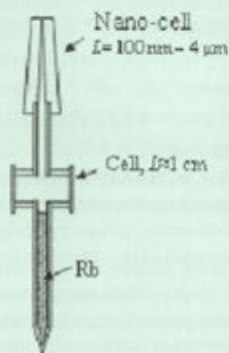


Рис.1. Схема конструкции комбинированной ячейки. Верхняя часть – nano-ячейка, в средней части показана ячейка обычной длины.

из двух сообщающихся ячеек: nano-ячейки (показанной в верхней части) и ячейки обычной длины (показанной в средней части), которые соединены тонкой сапфировой трубкой.

В §1.5 приведена методика определения толщины nano-ячейки с помощью лазерного излучения.

В конце Гл.1 приведены выводы и заключения.

Во **второй главе** исследовано влияние интенсивности лазерного излучения, буферного газа, изменение величины толщины столба паров в интервале от  $\lambda/2$  до  $4\lambda$ , влияние плотности атомных паров на спектральную ширину и пиковую амплитуду

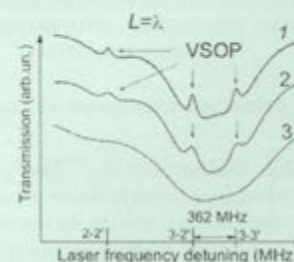


Рис.2.а. Спектр пропускания nano-ячейки  $L = \lambda$ . 1-чистые пары Rb, 2-Rb+6 torr Ne, 3-Rb+20 torr Ne.

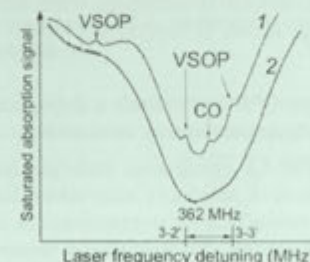


Рис.2.б. Спектры "Насыщение поглощения". 1-ячейка с  $L = 3$  см, чистые пары Rb. 2-ячейка с  $L = 1$  см, Rb+6 torr Ne.

спектров пропускания и флуоресценции НЯ с целью выявления условий необходимых для достижения лучших спектральных характеристик.

В §2.1 проведен анализ влияния буферного газа на спектральные характеристики пропускания и флуоресценции. Разработана теоретическая модель описывающая влияние буферного газа на спектр. Для описания динамического влияния буферного газа использован формализм матрицы плотности на основании уравнения Лиувилля [1]. Впервые показано, что в спектре пропускания nano-ячейки с толщиной  $L = \lambda$  заполненной Rb при наличии буферного газа Ne с давлением до 6 torr, ОПСС резонансы уверенно регистрируются (Рис.2.а), в то время как, при наличии буферного газа с давлением  $> 0.1$  torr, в спектрах получаемых при помощи известной техники «насыщения поглощения», ОПСС резонансы полностью отсутствуют (Рис.2.б). Также, впервые показано, что спектральная ширина флуоресценции от nano-ячейки с толщиной  $L = \lambda/2$  при всех давлениях буферного газа неона остается значительно уже (в 6-8 раз) по сравнению с резонансной флуоресценцией от ячейки сантиметровой длины с таким же давлением неона (Рис.3). Приведено сравнение экспериментальных результатов и теоретических расчетов. В §2.2 приведено влияние интенсивности лазерного излучения

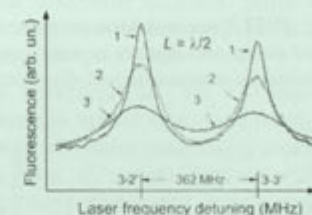


Рис.3 Спектр флуоресценции nano-ячейки  $L = \lambda/2$ . 1-чистые пары Rb, 2-Rb+6 torr Ne, 3-Rb+20 torr Ne.

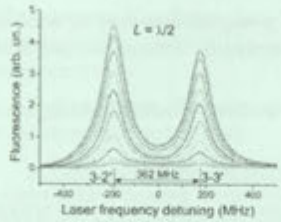


Рис.4.а. Спектры флуоресценции при интенсивности лазерного излучения 4-252 мВт/см<sup>2</sup>.

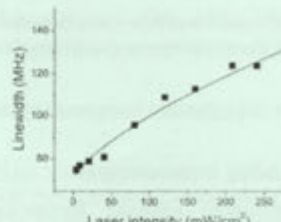


Рис.4.б. Спектральная ширина флуоресценции в зависимости от интенсивности лазерного излучения.

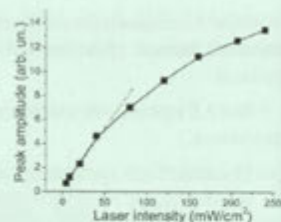


Рис.4.в. Пиковая амплитуда флуоресценции в зависимости от интенсивности лазерного излучения.

на спектры ОРСС резонанса и флуоресценции, а также изменение спектральных характеристик флуоресценции от толщины  $L$ .

На Рис.4.а приведены спектры флуоресценции нано-ячейки для  $D_1$   $^{85}\text{Rb}$   $F_g=3$  от интенсивности лазерного излучения. На Рис.4.б и 4.в приведены спектральная ширина и пиковая амплитуда от интенсивности лазерного излучения. Видно, что до интенсивностей  $\leq 250$  мВт/см<sup>2</sup> флуоресценция имеет субдоплеровскую ширину (доплеровская ширина флуоресценции от сантиметровой ячейки  $\sim 500$  МГц). Заметим, что до интенсивностей  $\leq 50$  мВт/см<sup>2</sup> наблюдается линейный рост пиковой амплитуды флуоресценции (при слабом увеличении его спектральной ширины) (Рис.4.б и 4.в), в то время как для сантиметровой ячейки, эффекты насыщения наблюдаются при нескольких мВт/см<sup>2</sup>. Показано, что при толщине столба паров  $L \leq 4.5$  мкм спектральная ширина флуоресценции  $< 500$  МГц.

На Рис.5.а приведены спектры пропускания (содержащие ОРСС резонансы) от интенсивности лазерного излучения. На Рис.5.б и 5.в приведены спектральная ширина и пиковая амплитуда ОРСС резонанса от интенсивности лазерного излучения. Показано, что до значений  $I < 270$  мВт/см<sup>2</sup> ширина ОРСС резонанса  $< 100$  МГц.

В §2.3 исследовано влияние температуры отростка нано-ячейки (которая определяет плотность атомарных паров) для достижения минимальных спектральных ширин ОРСС резонанса и резонансной флуоресценции. Показано, что оптимальная температура отростка

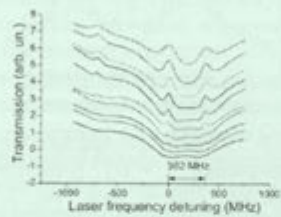


Рис.5.а. Спектры пропускания (содержащие ОРСС резонансы) для значений интенсивности лазерного излучения 4-250 мВт/см<sup>2</sup>.

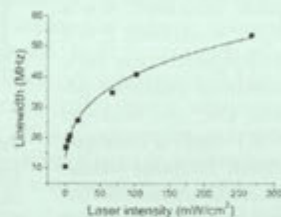


Рис.5.б. Спектральная ширина ОРСС резонанса от интенсивности лазерного излучения.

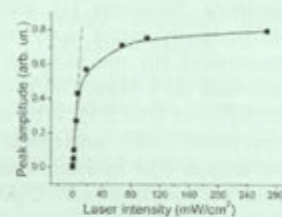


Рис.5.в. Пиковая амплитуда ОРСС резонанса от интенсивности лазерного излучения.

ка  $\leq 130$  °С (плотность атомов  $\text{Rb} \sim 3 \times 10^{13}$  см<sup>-3</sup>). При больших температурах, происходит спектральное уширение как ОРСС резонанса, так и резонансной флуоресценции.

В конце Гл. II приведены выводы и заключения; результаты опубликованы в [1-4,16].

В третьей главе представлено теоретическое рассмотрение взаимодействия щелочных атомных систем с магнитным полем. Рассмотрены основные теоретические аспекты математической модели, описывающей процесс взаимодействия. В том числе объяснены принципы компьютерной модели, используемых математических методов, основные логические принципы, лежащие в основе модели, а также компьютерная программа позволяющая рассчитывать частотные сдвиги и изменение вероятности оптических переходов между зеемановскими подуровнями сверхтонкой структуры  $D$  линий щелочных

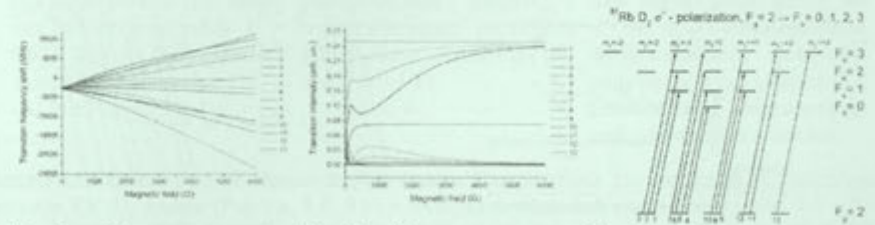


Рис.6.а. Частотные сдвиги в зависимости от величины внешнего магнитного поля.

Рис.6.б. Изменения интенсивности зеемановских переходов в зависимости от величины внешнего магнитного поля.

Рис.6.в. Диаграмма пере- зеемановских переходов  $^{87}\text{Rb}$ ,  $D_2$  линии  $F_g=2 \rightarrow F_e=0, 1, 2, 3$ ,  $\sigma^+$  поляризации возбуждающего лазерного излучения.

металлов.

Представлено детальное рассмотрение особенностей поведения десятков, ранее не изученных переходов между зеемановскими подуровнями сверхтонкой структуры  $D_1$  и  $D_2$   $^{85}\text{Rb}$  и  $^{87}\text{Rb}$  в случае  $\sigma^+$ ,  $\pi$  и  $\sigma^-$  поляризации возбуждающего лазерного излучения.

Впервые исследованы следующие «запрещённые» переходы: а)  $^{87}\text{Rb}$ ,  $D_2$  линия,  $F_g=1 \rightarrow F_e=3$  (три перехода между зеемановскими подуровнями при возбуждении излучением с  $\sigma^+$  поляризацией),  $F_g=1 \rightarrow F_e=1$  (один переход между зеемановскими подуровнями при возбуждении излучением с  $\pi$  поляризацией); б)  $^{87}\text{Rb}$ ,  $D_1$  линии  $F_g=1 \rightarrow F_e=3$  и  $F_g=1 \rightarrow F_e=1$  (по одному переходу между зеемановскими подуровнями при возбуждении излучением с  $\pi$  поляризацией). Показано, что для определённых значений магнитного поля вероятности этих «запрещённых» переходов сильно возрастает и превосходит вероятность разрешённых атомных переходов. Показано, что частота сильного атомного перехода  $^{87}\text{Rb}$ ,  $D_2$  линии,  $F_g=1, m_f=+1 \rightarrow F_e=1, m_f=+1$  демонстрирует уникальное поведение: его частота остается практически неизменной в интервале магнитных полей 100-1100 Гс. Для атомных переходов  $F_g=2 \rightarrow F_e=0, 1, 2, 3$  показанных на Рис.6.в построены кривые зависимости частотных сдвигов (Рис.6.а), и модификация интенсивности (вероятности) переходов (Рис.6.б) в зависимости от величины магнитного поля.

В конце Гл. III приведены выводы и заключения; результаты опубликованы в [5,7,10-13,17,16].

В четвёртой главе, приведены экспериментальные результаты подтверждающие расчёты, приведённые в третьей главе. Используются три различных экспериментальных метода: i) « $\lambda$ -Зеемановская техника» - метод, основанный на применении ОРСС резонанса формируемого в спектре пропускания nano-ячейки с толщиной столба  $L = \lambda$ ; ii) « $\lambda/2$ -Зеемановская техника» - метод, основанный на применении спектра узкополосной флуоресценции nano-ячейки с толщиной столба паров  $L = \lambda/2$ ; iii) « $\lambda$ -Флуоресценция Зеемановская техника» - метод, основанный на применении спектра узкополосной флуоресценции nano-ячейки с толщиной  $L = \lambda$ .

На рис.7 верхняя кривая показывает спектр флуоресценции nano-ячейки с  $L = \lambda/2$  при  $B_1 \approx 2480$  Гс, а нижняя кривая показывает спектр пропускания nano-ячейки с  $L = \lambda$

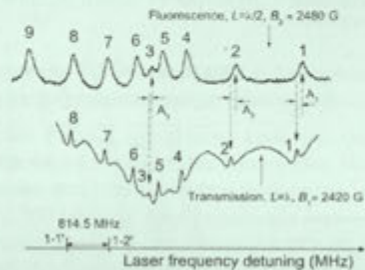


Рис.7. Верхняя кривая – спектр флуоресценции nano-ячейки с толщиной столба  $L = \lambda/2$  при  $B_1 \approx 2480$  Гс; нижняя кривая показывает ОРСС резонансы, которые формируются в спектре пропускания nano-ячейки с  $L = \lambda$  ( $B_1 \approx 2420$  Гс).

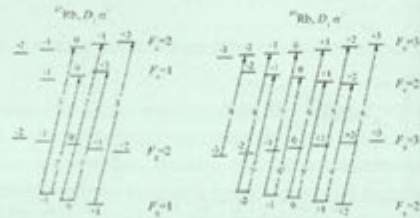


Рис.8. Диаграмма атомных переходов  $^{85}\text{Rb}$  и  $^{87}\text{Rb}$ ,  $D_1$  линии при  $\sigma^+$  поляризации возбуждающего лазерного излучения.

( $B_1 \approx 2420$  Гс), на котором присутствуют ОРСС резонансы (диаграмма атомных переходов приведена на рис.8). Как видно, преимущество использования резонансной флуоресценции в том, что спектр формируется на горизонтальной прямой, что удобно для измерения амплитуд (интенсивности линий). Преимущество использования ОРСС резонансов (« $\lambda$ -Зеемановская техника») в том, что они имеют меньшую спектральную ширину (это проявляется в том, что переходы с номерами 3 и 5 лучше разрешены на нижней кривой, чем на верхней кривой). Величины  $A_1$ ,  $A_2$  и  $A_3$  показывают смещение резонансов 1, 2 и 3 при увеличении магнитного поля на 20 Гс. При фиксированной интенсивности лазера амплитуда пиков флуоресценции и амплитуда ОРСС резонансов пропорциональна вероятности атомных переходов. Следовательно, изменение амплитуды флуоресценции и ОРСС резонансов при изменении магнитного поля даёт информацию о поведении вероятности атомного перехода в зависимости от величины магнитного поля. Частотное положение пиков флуоресценции и ОРСС резонансов определяет частотное положение атомных переходов. Таким образом, используя вышеотмеченные методы, определены как частотные сдвиги, так и изменение интенсивности индивидуальных переходов между зеемановскими подуровнями сверхтонкой структуры  $D$  линий  $^{85}\text{Rb}$  и  $^{87}\text{Rb}$  в случае  $\sigma^+$ ,  $\pi$  и  $\sigma^-$  поляризации возбуждающего лазерного излучения для интервала значений магнитного поля 5-7000 Гс.

Изучено поведение «запрещённых» (при  $B=0$ ) переходов между зеемановскими подуровнями. Реализована конфигурация измерения, позволяющая измерение слабых

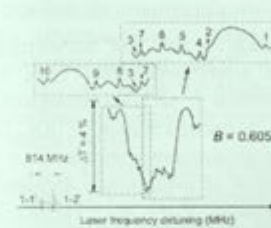


Рис.9.а. Спектр пропускания nano-ячейки для значения магнитного поля  $B = 0.605$  Тс,  $\sigma^+$  поляризации лазерного излучения.

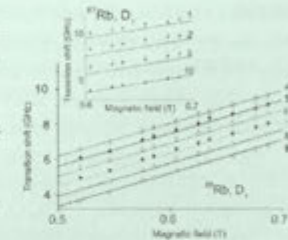


Рис.9.б. Сравнение экспериментальных данных с теоретическими расчетами в интервале магнитных полей 0.5-0.7 Тс.

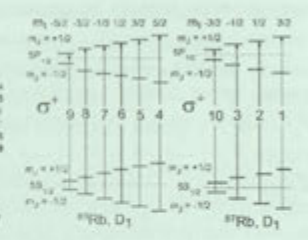


Рис.9.в. Диаграмма атомных переходов атомов  $^{85}\text{Rb}$  и  $^{87}\text{Rb}$  при  $\sigma^+$  поляризации возбуждающего лазерного излучения в случае режима Пашена-Бака для сверхтонкой структуры  $D_1$  линии.

магнитных полей от 5 Гс. Также изучен Режим Пашена-Бака для сверхтонкой структуры атомов Rb,  $D_1$  линии (Рис.9.а, 9.б, 9.в) в интервале значений магнитного поля 0.5 – 0.7 тесла (5000 – 7000 Гс). Показано, что взаимодействие с сильным магнитным полем значительно изменяет квантовые характеристики атомной системы. Интересно отметить, что при  $B < 500$  Гс для Rb,  $D_1$  линии при  $\sigma^-$  поляризации возбуждающего лазерного излучения регистрируется 32 атомных перехода, число которых уменьшается до 10 при полях  $B > 4000$  Гс.

Приведено сравнение экспериментальных данных с теоретическими расчетами во всем интервале исследованных значений магнитного поля.

В конце Гл. IV приведены выводы и заключения; результаты опубликованы в [5-15,17-22].

**В заключении** сформулированы основные научные результаты работы:

1. Разработана установка на основе постоянных магнитов, позволяющая формировать сильное магнитное поле до 7000 Гс с возможностью помещения в нее рубидиевой nano-ячейки с печкой и возможностью пропускания и регистрации лазерного излучения. Применение этой установки позволило реализовать Режим Пашена-Бака на сверхтонкой структуре атомов Rb,  $D_1$  линии.
2. Определены оптимальные параметры эксперимента, такие как: лазерная интенсивность, добавка буферного газа, изменение толщины столба паров в интервале  $L = \lambda/2 - 4\lambda$ , плотности паров атомов при которых регистрируется минимальная спектральная ширина резонансной флуоресценции (60-70 МГц) и ОРСС резонансов 15-20 МГц при использовании nano-ячейки с Rb.
3. Используя узкополосную резонансную флуоресценцию от nano-ячейки с толщиной  $L = \lambda/2$  и ОРСС резонансы формируемые при толщине  $L = \lambda$ , впервые экспериментально исследовано частотное поведение и вероятности атомных переходов сверхтонкой структуры  $^{85}\text{Rb}$ ,  $^{87}\text{Rb}$ ,  $D_1$  и  $D_2$  линий между зеемановскими подуровнями во внешних

магнитных полях в интервале 5-7000 Гс. Исследования проведены для нескольких десятков ранее неизученных атомных переходов. Для целого ряда переходов показано, что интенсивности линий могут как сильно возрастать, так и сильно уменьшаться многократно, вплоть до десятков раз.

4. Впервые продемонстрировано, что при определенных величинах магнитных полей, вероятность запрещенных (при нулевом магнитном поле) переходов  $^{87}\text{Rb}$ ,  $D_2$  линии,  $F_g=1 \rightarrow F_e=3$  (три перехода при возбуждении излучением с  $\sigma+$  поляризацией),  $F_g=1 \rightarrow F_e=1$  (один переход при возбуждении излучением с  $\pi$  поляризацией);  $^{87}\text{Rb}$ ,  $D_1$  линии  $F_g=1 \rightarrow F_e=3$  и  $F_g=1 \rightarrow F_e=1$  (по одному переходу при возбуждении излучением с  $\pi$  поляризацией), сильно возрастает и превосходит вероятность разрешенных атомных переходов. Обнаружен сильный атомный переход  $^{87}\text{Rb}$ ,  $D_1$  линии,  $F_g=1$ ,  $m_F=+1 \rightarrow F_e=1$ ,  $m_F=+1$  частота которого демонстрирует уникальное поведение – частота остается практически неизменной при варьировании магнитного поля в интервале 100-1100 Гс.

5. Разработана численная программа, которая позволяет определять частотные положения и вероятности для атомных переходов между зеемановскими подуровнями во внешних магнитных полях в интервале 1-10 000 Гс для  $D_1$  и  $D_2$  линий атомов Rb, Cs и Na.

6. Реализована простая конструкция магнитометра на основе рубидиевой наноячейки, позволяющая определять величину как однородного, так и сильно неоднородного (при этом обеспечивается локальное субмикронное пространственное разрешение) магнитных полей в интервале 5-7000 Гс. Реализована простая конструкция на основе рубидиевой нано-ячейки и постоянного магнита, позволяющая реализовать частотный репер на частотах смещенных на 3-5 ГГц относительно исходных атомных частот Rb  $D_1$  и  $D_2$  линий.

7. Используя резонансную флуоресценцию от нано-ячейки с толщиной  $L = \lambda/2$ , реализована конструкция манометра, позволяющая измерять давление буферного газа неона в смеси с горячими парами атомов рубидия. Интервал определяемого давления неона составляет 1-400 торр. Измерения возможно осуществлять в режиме онлайн.

#### Цитируемая литература

- ц1. D. Budker, D.F. Kimball, D.P. DeMille, "Atomic Physics: an exploration through problems and solutions" (Oxford University Press, 2004).
- ц2. M. Auzinsh, D. Budker, S.M. Rochester, "Optically polarized atoms: understanding light-atom interactions" (Oxford University Press, 2010).
- ц3. D. Sarkisyan, D. Bloch, A. Papoyan, M. Ducloy, "Sub-Doppler spectroscopy by submicron thin Cs vapour layer", Opt. Comm. 200, 201 (2001).

#### Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. G. Hakhumyan, A. Sargsyan, C. Leroy, Y. Pashayan-Leroy, A. Papoyan, D. Sarkisyan, "Essential features of optical processes in Rb submicron thin cell filled with Neon gas", Opt. Express 18, 14577 (2010).
2. D. Sarkisyan, G. Hakhumyan, A. Sargsyan, R. Mirzoyan, C. Leroy, Y. Pashayan-Leroy, "Laser Spectroscopy with Nanometric Cells Containing Atomic Vapor of Metal: Influence of Buffer Gas", Proc. SPIE 7747, 77470C-1 (2011).
3. D. Sarkisyan, G. Hakhumyan, A. Sargsyan, Y. Pashayan-Leroy, C. Leroy, "Sub-Doppler features of optical processes in the extremely thin Rb cell filled with an additional

buffer gas", Proceedings of conference "Laser Physics - 2009", pp. 5-8, Ashtarak, Armenia (2010).

4. А. Нерсисян, Т. Варжапетян, Н. Баласаян, А. Саркисян, Г. Ахумян, «Измерение спектрального уширения и частотных сдвигов атомных переходов  $D_2$  линии Rb обусловленные буферными газами азотом и неоном», Труды конференции "Лазерная физика - 2005", Аштарак, Армения, Гитутюн, Ереван, сс. 21-24, (2006).
5. C. Leroy, G. Hakhumyan, Y. Pashayan-Leroy, D. Sarkisyan, "Alkali metal atomic transition probability in strong external magnetic field and it's application", Proc. SPIE 7998, 79980S (2010).
6. D. Sarkisyan, G. Hakhumyan, R. Mirzoyan, A. Papoyan, A. Atvars, M. Auzinsh, "Use of nanocell with the thickness  $L = \lambda$  for study atomic transition of Rb  $D_2$  line in magnetic field", Proceedings of conference "Laser Physics - 2007", pp. 87-90, Ashtarak, Armenia (2008).
7. Г. Ахумян, Д. Саркисян, А. Саргсян, А. Атьварс, М. Азуинш, «Исследование атомных линий  $D_1$  Rb в сильных магнитных полях с помощью флуоресценции от ячейки с толщиной  $L = \lambda/2$ », Оптика и спектроскопия, Том 108, No. 5, сс. 727-734 (2010).
8. A. Sargsyan, G. Hakhumyan, A. Papoyan, D. Sarkisyan, A. Atvars, M. Auzinsh, "A novel approach to quantitative spectroscopy of atoms in a magnetic field and applications based on an atomic vapor cell with  $L = \lambda$ ", Appl. Phys. Lett. 93, 021119 (2008).
9. Т. Варжапетян, Г. Ахумян, В. Бабушкин, Д. Саркисян, А. Атьварс, М. Азуинш, «Изучение поведения атомных линий в магнитном поле с помощью наноячейки с толщиной паров  $L = \lambda$ », Известия НАН Армении, Физика, Том 42, No. 6, сс. 338-347 (2007).
10. G. Hakhumyan, C. Leroy, Y. Pashayan-Leroy, D. Sarkisyan, M. Auzinsh, "High-spatial-resolution monitoring of strong magnetic field using Rb vapor nanometric-thin cell", Opt. Comm. 284, 4007 (2011).
11. Г. Ахумян, «Оптический магнитометр с субмикронной разрешающей способностью на основе паров Rb», Известия НАН Армении, Физика, Том 47, No. 3, сс. 160-171 (2012).
12. G. Hakhumyan, A. Sargsyan, C. Leroy, Y. Pashayan-Leroy, D. Sarkisyan, "Study of Rb Atomic Transitions  $D_2$  Line in Strong Magnetic Field Based on Fluorescence Spectra of Sub-Micron Thin Cell", Proc. SPIE 7998, 79980V (2010).
13. Г. Ахумян, «Использование резонансной флуоресценции от ячейки с толщиной в пол-длины волны резонансного излучений для исследования атомных переходов линии  $D_1$  атомов Rb», Труды конференции "Лазерная физика - 2009", Аштарак, Армения, Гитутюн, Ереван, сс. 33-36, (2010).
14. А. Саргсян, Д. Саркисян, Г. Ахумян, «Использование субдуплеровских оптических резонансов для измерения слабых магнитных полей с помощью сверхтонкой ячейки с парами рубидия», Известия НАН Армении, Физика, Том 47, No. 3, сс. 98-110 (2012).
15. A. Sargsyan, G. Hakhumyan, C. Leroy, Y. Pashayan-Leroy, A. Papoyan, D. Sarkisyan, "Hyperfine Paschen-Back regime realized in Rb nanocell", Opt. Lett. 37, 1379 (2012).
16. G. Hakhumyan, D. Sarkisyan, A. Sargsyan, C. Leroy, Y. Pashayan-Leroy, "Peculiarities of resonant absorption and fluorescence in extremely thin cell filled with Rb and buffer gas", Book of abstracts "ECAMP-10", Salamanca, Spain P-352 (2010).
17. A. Papoyan, G. Hakhumyan, A. Atvars, M. Auzinsh and D. Sarkisyan, "Method for quantitative study of atomic transitions in magnetic field based on vapor nanocell with  $L = \lambda$ ", Book of abstract "EGAS - 40", CP-89, p. 111, Graz, Austria (2008).

## Ամփոփագիր

18. A. Papoyan, H. Hakhumyan, A. Sargsyan, D. Sarkisyan, A. Atvars, M. Auzinsh, "Quantitative spectroscopy of atoms in a strong magnetic field based on an atomic vapor cell with  $L = \lambda$ ", Book of abstract "EGAS - 41", CP-189, p. 249, Gda'nsk, Poland (2009).

19. G. Hakhumyan, D. Sarkisyan, C. Leroy, Y. Pashayan-Leroy, M. Auzinsh, "Quantitative spectroscopy of Rb atoms in strong magnetic field based on submicron thin vapour", Book of abstracts "ECAMP-10", P-340, Salamanca, Spain (2010).

20. A. Papoyan, D. Sarkisyan, G. Hakhumyan, C. Leroy, Y. Pashayan-Leroy, "High-spatial-resolution monitoring of strong magnetic field using Rb nano-thin-cell", Book of abstract "EGAS-43", AAP-016, p. 82, Fribourg, Switzerland (2011).

21. G. Hakhumyan, D. Sarkisyan, C. Leroy, Y. Pashayan-Leroy, "Monitoring of Strong Magnetic field Using Rb or Cs Thin Cell", Book of abstracts "HRMS-22", O26, p. 377, Dijon, France (2011).

22. G. Hakhumyan, R. Mirzoyan, C. Leroy, Y. Pashayan-Leroy, D. Sarkisyan, "Study of Forbidden Atomic Transitions on D Line Using Rb Nano-cell Placed in External Magnetic Field", Book of abstracts "Laser Physics - 2011", O11, p. 25, Ashtarak, Armenia (2011).

23. A. Sargsyan, G. Hakhumyan, R. Mirzoyan, C. Leroy, Y. Pashayan-Leroy, D. Sarkisyan, "Atom-wall collisions influence on dark-line atomic resonances in submicron thin vapour cells", Book of abstracts "ECAMP-10", P-339, Salamanca, Spain (2010).

24. G. Hakhumyan, A. Sargsyan, D. Sarkisyan, C. Leroy, Y. Pashayan-Leroy, "Passive Q-Switching and Frequency Stabilization by Dense Molecular Alkaline Vapor for Laser Operating in the Range of 500 - 1100 nm", Book of abstracts "HRMS-22", Q26, p. 431, Dijon, France (2011).

25. D. Sarkisyan, Y. Pashayan-Leroy, C. Leroy, A. Papoyan, G. Hakhumyan, A. Sargsyan, "Selective Addressing of Amplification of Narrow Resonance Formed in Transmission Spectrum of Nano-cell Placed in External Magnetic Field", Book of abstracts "Laser Physics - 2011", O2, p. 16, Ashtarak, Armenia (2011).

Ժամանակից նեղ սպեկտրալ զծով ( $\gamma \sim 1$  ՄՀց սպեկտրալ զծի լայնությամբ) կիսահահորդչային լազերների օգտագործումը թույլ է տալիս զարգացնել ավելի ակնական մետաղական գոլորշիների գերնուրբ կառուցվածքի հետազոտություններում օգտագործվող փորձարարական սարքավորումները:

Մի շարք կոներենտ և մագնիսա-օպտիկական պրոցեսներ, որոնք իրականացվում են ատոմական գոլորշիների և լազերային ճառագայթման փոխազդեցությամբ, կիրառվում են լազերային տեխնիկայում, չափագրության, բարձր զգայունությամբ մագնիսաչափերի ստեղծման, քվանտային հաղորդակցության, տվյալների օպտիկական գրանցման և այլ ոլորտներում:

Ռուբիդիումի և ցեզիումի գոլորշիները հետազոտելիս հարմար է օգտագործել վակուումային, զոդած, ապակյա բջիջներ, որոնք կարող են պարունակել ինչպես մաքուր Rb և Cs գոլորշիներ, այնպես էլ այդ մետաղների գոլորշիների խառնուրդ, նաև, անհրաժեշտության դեպքում, այլ զազերի հավելում: Ապակյա բջիջները օգտագործելի են մինչև 100 °C, սակայն սենյակային ջերմաստիճանը բավարար է  $10^{10}$  ատոմ/սմ<sup>3</sup> խտությամբ գոլորշիներ ստանալու և այդ գոլորշիներից բացթողման և ֆլուորեսցենցիայի ազդանշանները գրանցելու համար: Դոպլերյան լայնացումը գրանցվող ազդանշանների բնութագրական հատկանիշներից է: Այն հասնում է 400-600 ՄՀց-ի և գերազանցում է զծի բնական լայնությունը 80-100 անգամ: Այդ իսկ պատճառով անհնարին է գերնուրբ կառուցվածքի մակարդակների միջև անցումներին համապատասխանող ռեզոնանսների մեծամասնության գրանցումը: Ներկա դրությամբ բարձր լուծողականությամբ սպեկտրոսկոպիայում մեծ հետաքրքրություն է ներկայացնում նոր մեթոդների զարգացումը, որոնք թույլ կտան նվազեցնել դոպլերյան լայնացումը և կբարելավեն սպեկտրալ լուծողականությունը, ինչը իր հերթին թույլ կտա հասնել զծի բնական լայնության լուծողականությանը:

1990-ական թվականներին բազում գիտական հոդվածներ են տպագրվել, որոնցում ցույց է տրվել ապակյա բարակ վակուումային, 10-100 միկրոմետր հաստությամբ բջիջների նոր կիրառություններ, որոնք թույլ են տալիս ստանալ ենթադոպլերյան 10-100 ՄՀց լայնությամբ օպտիկական ռեզոնանսներ: Սակայն այդպիսի ռեզոնանսներ ստանալու եղանակները պահանջում են լրացուցիչ տեխնիկական միջոցների կիրառում, ինչպես, օրինակ, լազերային ճառագայթման հաճախային փոփոխություն և ազդանշանների սինքրոն գրանցում:

2001 թվականին ցույց է տրվել, որ տեխնիկական շափուղայից պատրաստված և մինչև 500 °C կիրառելի նանոմետրիկ հաստությամբ բջիջների (նանո-բջիջ) կիրառումը թույլ է տալիս ստանալ ենթադոպլերյան 15-70 ՄՀց լայնությամբ ռեզոնանսներ առանց որևէ լրացուցիչ տեխնիկական միջոցների: Այդ բջիջները թույլ են տալիս միաժամանակ գրանցել երկու տեսակի ազդանշաններ՝ 1) Rb ատոմական գոլորշիներով լի, ռեզոնանսային ճառագայթման ալիքի երկարությանը հավասար հաստությամբ նանո-բջիջ բացթողման սպեկտրում առաջանում են սպեկտրալ նեղ ըստ արագության սելեկտիվ օպտիկական մղման ռեզոնանսներ (ԱՍՕՄ), որոնք տեղակայված են ճշգրիտ ատոմական անցումների վրա և ունեն 15-20 ՄՀց

## SUMMARY

The progress achieved in the fabrication of smoothly tunable narrowband continuous wave (CW) lasers (linewidth  $\gamma_L \sim 1$  MHz), which are resonant with atomic transitions of Rb and Cs, provides increasing of researches in the field of high resolution spectroscopy. Usage of modern diode lasers (DL) allows to develop experimental techniques to investigate the hyperfine structure of alkali metal vapours.

There are several advantages which lead to high interest investigation with alkali metals: i) in optical domain alkali metal vapours have strong dipole momenta of transitions from ground state that cause strong absorption and fluorescence; ii) density of vapour can be easily changed by varying the cell temperature; iii) presence of a single valence electron simplifies the theoretical consideration of the system for various conditions.

A number of different coherent and magneto-optical processes, which can be realized through interaction of atomic vapours with the narrowband lasers, find applications in laser technique, metrology (high precision determination of atomic transition frequencies and development of new standards of time), in development of high sensitive magnetic gauges, in quantum communication, information optical storage and many other fields.

To make experiment with vapours of Rb and Cs it is convenient to use sealed-off glass cell, which may contain pure vapours of these metals or mixture of Rb and Cs vapours either mixtures with other gases. Glass cells are suitable up to temperatures around 100 °C, although at the room temperature the number of atoms of Rb and Cs reaches  $10^{10}$  at./cm<sup>3</sup> which is enough for registration of resonant absorption and fluorescence in field of radiation of narrowband DL. The Doppler-broadening is a peculiar characteristic of absorption and fluorescence processes, which may reach up to 400-600 MHz and it is much broader in comparison with natural width of atomic lines (5-6 MHz). Hence because of strong Doppler-broadening, a major part of transitions between states of the hyperfine structure can not be resolved and it leads to complications in the process of study of atomic states, particularly in presence of external magnetic and electric fields. Presently, it is an important area of investigation in high resolution spectroscopy: development of new methods, which allow a strong reduction of the Doppler-broadening and thus improvement of the spectral resolution of different atomic transitions and achievement of natural linewidth, which is caused by finite lifetime of hyperfine atomic states (in some cases it is possible to reach subnatural spectral width).

In the 90s there were published a large number of theoretical and experimental articles, where was demonstrated new possibilities of usage of thin sealed-off glass cells, which allow to confine atomic vapour column in space with thickness variable from 10 to 100 micrometers. Usage of these cells allows to form optical resonances with sub-Doppler linewidth (from 10 to 100 MHz), although is it necessary to use supplementary techniques as frequency modulation of laser radiation and implementation of technique of synchronous detection.

Since 2001, it was demonstrated that using nano-cells which have thickness of column of atomic vapour equal to a few hundreds of nanometers (cells fabricated from technical sapphire (i.e. sapphire grown in artificial way) and suitable up to 500 °C), allows one to obtain resonances with sub-Doppler linewidth equal to 15-70 MHz. Usage of these cells allows to obtain sub-Doppler resonances without any supplementary techniques. At the same time the following two processes are used: 1) In the transmission spectra of a nano-cell filled with vapours of rubidium (or cesium) atoms ( $D_{1,2}$  lines), having the column thickness  $L = \lambda$  ( $\lambda$  is the wavelength of the resonant radiation equal either to 794 or 780 nm for  $D_1$  and  $D_2$  lines, correspondingly), in case of use of tunable laser radiation, narrow velocity selective optical resonances (VSOP) are formed located at the atomic transitions with a spectral width 15-20 MHz; 2) In the fluorescence spectra of a nano-cell filled with the vapours of Rb ( $D_1$  and  $D_2$

սպեկտրալ լայնություն: 2) Rb ատոմական գոյություններով լի, ռեզոնանսային ճառագայթման ալիքի երկարության կեսին հավասար հաստությամբ նանո-բջջի ֆլուորեսցենցիայի սպեկտրում առաջանում են ֆլուորեսցենցիայի նեղ ռեզոնանսներ, որոնք ունեն 60-70 ՄՀց լայնություն: Նախնական արդյունքները ցույց տվեցին, որ ԱՍՕՍ և ֆլուորեսցենցիայի ռեզոնանսների օգտագործումը թույլ է տալիս ուսումնասիրել ռուբիդիումի գերնուրբ կառուցվածքի մակարդակների միջև ատոմական անցումների վարքը, հատկապես ուսումնասիրել ռուբիդիումի Ջեեմանյան ենթամակարդակների միջև ատոմական անցումների վարքը արտաքին մագնիսական դաշտում:

Հիմնվելով վերը նշվածի վրա՝ կարելի է ակնկալել, որ սպեկտրալ նեղ ռեզոնանսների օգտագործումը թույլ է տալիս իրականացնել Rb-ի ատոմական անցումների հետագա ուսումնասիրությունը մագնիսական դաշտի ավելի մեծ արժեքների դեպքում և օգտագործել այդ արդյունքները կիրառական նպատակներով:

Ատենախոսությունում ներկայացված արդյունքներից հատուկ ուշադրության են արժանի հետևյալ կարևոր և նշանակալից արդյունքները

1. Օգտագործելով  $L = \lambda/2$  բջջից ֆլուորեսցենցիան և  $L = \lambda$  բջջից ԱՍՕՍ ռեզոնանսները առաջին անգամ փորձնականորեն ցույց է տրված <sup>85</sup>Rb, <sup>87</sup>Rb,  $D_1$  և  $D_2$  գծերի գերնուրբ կառուցվածքի Ջեեմանյան ենթամակարդակների միջև անցումների հաճախությունների և հավանականությունների փոփոխությունը 5-7000 Գս մագնիսական դաշտի արժեքների տիրույթում: Ուսումնասիրվել է տասնյակ, մինչ այժմ չուսումնասիրված անցումների վարքը և ցույց է տրվել, որ այդ անցումների հավանականությունները կարող են ինչպես աճել, այնպես էլ նվազել տասնյակ անգամ մագնիսական դաշտի աճման հետ:

2. Առաջին անգամ ցույց է տրվել, որ մագնիսական դաշտի որոշ արժեքների դեպքում զրոյական մագնիսական դաշտում «արգելված» անցումների հավանականությունը կարող է աճել և գերազանցել «թույլատրված» անցումների հավանականությունը:

3. Մշակված է թվային ծրագիր, որը թույլ է տալիս հաշվել Rb, Cs ու Na ատոմների  $D_1$  և  $D_2$  գծերի Ջեեմանյան ենթամակարդակների միջև անցումների հաճախային դիրքերը և հավանականությունները արտաքին մագնիսական դաշտի 0-10 000 Գս արժեքների միջակայքում: Տեսական հաշվարկները գտնվում են համաձայնության մեջ փորձարարական արդյունքների հետ:

4. Առաջին անգամ ցույց է տրվել, որ հավելյալին նեոն գազի՝ մինչև 6 տորր ճնշման դեպքում  $L = \lambda$  հաստությամբ նանո-բջջի բացթողման սպեկտրում ԱՍՕՍ ռեզոնանսները հստակորեն զրանցվում են՝ մինչդեռ «կլանման հագեցման» սպեկտրում նույնիսկ 0,1 տորր ճնշման առկայությունը հանգեցնում է ԱՍՕՍ ռեզոնանսների անհետացմանը: Նաև առաջին անգամ ցույց է տրված, որ  $L = \lambda/2$  նանո-բջջից ֆլուորեսցենցիայի սպեկտրալ լայնությունը հավելյալին նեոն գազի ճնշման բոլոր արժեքների համար ունի 6-8 անգամ ավելի փոքր սպեկտրալ լայնություն, քան նույնքան ճնշմամբ հավելյալին նեոն գազ պարունակող սովորական, մի քանի սանտիմետր երկարությամբ բջջի ֆլուորեսցենցիայի ազդանշանը:

lines), with the thickness of the column  $L = \lambda/2$  narrow peaks of fluorescence with a spectral width 60-70 MHz are formed. This narrowing is based on coherent Dike narrowing effect. The preliminary results showed that the application of VSOP and the narrow-band resonance fluorescence (FL) allow us successfully investigate the behaviour of the atomic transitions of the hyperfine structure of Rb (or Cs) atoms, particularly, to investigate the behaviour of the rubidium atomic transitions between Zeeman sublevels in external magnetic fields.

Based on the foregoing, one might expect that the use of narrow optical resonances will allow to realize the further investigation of Rb atomic transitions in a large range of values of the magnetic field, and the results usage to practical applications. It was also important from a scientific point of view to investigate the influence of experimental parameters on the resonances mentioned above, in order to obtain the optimal experimental parameters.

Among the results obtained in the work, we would like to mention number of the most important and notable statements:

1. Using a narrow-band resonant fluorescence from a nano-cell with a thickness of  $L = \lambda/2$ , and VSOP resonances formed at a thickness  $L = \lambda$ , for the first time it was experimentally investigated the behaviour of the frequency and intensity (transition probabilities) of the atomic hyperfine structure transitions between the  $^{85}\text{Rb}$ ,  $^{87}\text{Rb}$ ,  $D_1$  and  $D_2$  lines Zeeman sublevels in external magnetic fields in range 5-7000 G. The behaviour of tens of previously unstudied atomic transitions was analyzed and it is demonstrated that the intensities of these lines can both greatly increase, and decrease (tenfold).

2. For the first time it is demonstrated that, for certain values of the magnetic fields, the probability of the "forbidden" transitions (at zero magnetic field)  $^{87}\text{Rb}$ ,  $D_2$  line,  $F_g=1 \rightarrow F_e=3$  (three transitions between the Zeeman sublevels for a  $\sigma^+$  polarization of exciting radiation),  $F_g=1 \rightarrow F_e=1$  and  $F_g=1 \rightarrow F_e=3$  (one in each group of transitions between the Zeeman sublevels for a  $\pi$  polarization of exciting radiation);  $^{87}\text{Rb}$ ,  $D_1$  line,  $F_g=1 \rightarrow F_e=1$  (one transition between the Zeeman sublevels for a  $\pi$  polarization of exciting radiation), strongly increase and exceed the probability of the allowed atomic transitions. Frequency shift of the strong atomic transition  $^{87}\text{Rb}$ ,  $D_2$  line,  $F_g=1$ ,  $m_f = +1 \rightarrow F_e=1$ ,  $m_f = +1$  shows a particular behaviour: the frequency remains practically unchanged in the range of magnetic fields of 100-1100 G.

3. A numerical program that allows us to calculate the frequency positions and the intensities of the atomic transitions between Zeeman sublevels in external magnetic fields in the range of 0-10 000 G for  $D_1$  and  $D_2$  lines of atoms Rb, Cs and Na is developed. The theoretical curves are in good agreement with experimental results.

4. For the first time it is demonstrated that, in the case of partial pressure of neon buffer gas up to 6 torr into the nano-cell of thickness  $L = \lambda$  filled with Rb, VSOP resonances are recorded confidently, while the addition of 0.1 torr neon buffer gas in the cells of a centimeter thickness leads to the complete disappearance of VSOP resonances formed with the help of the widely used technique of saturated absorption. It is demonstrated for the first time that the spectral width of the resonant fluorescence of the rubidium nano-cell with thickness  $L = \lambda/2$ , for all values of the neon buffer gas pressures is much narrower (6-8 times) compared with the resonant fluorescence of an ordinary centimeter cell containing rubidium with the same pressures of neon.

ԺԿՄ



