

# Контроль частоты перестраиваемых лазеров с помощью частотно-калиброванного лямбда-метра в эксперименте по приготовлению ридберговских атомов в магнитооптической ловушке

С.А.Саакян, В.А.Саутенков, Е.В.Вильшанская, В.В.Васильев, Б.Б.Зеленер, Б.В.Зеленер

*С помощью предложенной методики исследован дрейф частоты полупроводникового лазера с внешним резонатором, стабилизированного по резонансам пропускания термостабилизированного интерферометра Фабри–Перо. Измеренный частотный дрейф интерферометра составил менее 2 МГц/ч. Для измерения частоты лазера использовался лямбда-метр Angstrom, калиброванный по дополнительному стабилизированному лазеру. Продемонстрировано, что данная система контроля частоты лазеров может быть использована для идентификации ридберговских переходов в ультрахолодных атомах  ${}^7\text{Li}$ .*

**Ключевые слова:** интерферометр Фабри–Перо, перестраиваемый непрерывный лазер, дрейф частоты, магнитооптическая ловушка.

## 1. Введение

Представленная работа проводилась в рамках исследования возможности создания и применения ридберговского вещества [1–3], предсказанного в работах [4–9]. Одним из способов получения ридберговских атомов является метод многоступенчатого лазерного возбуждения с последующим детектированием электронов, вырванных слабым электрическим полем [10–12]. Предпочтительными являются неразрушающие методы диагностики, такие как регистрация электромагнитно-индуцированной прозрачности [13].

Нами разработан метод измерения частоты ридберговского перехода с использованием прямой регистрации флуоресценции облака холодных атомов лития в магнитооптической ловушке (МОЛ), не разрушающий приготовленное ридберговское состояние атомов [3]. Для контроля процесса возбуждения и оптимизации плотности атомов в МОЛ требуется одновременный и непрерывный контроль частоты двух инжекционных лазеров с длиной волны 671 нм и одного источника УФ излуче-

ния ( $\lambda = 350$  нм) на базе непрерывного титан-сапфирового лазера.

Стабилизированные по частоте инжекционные лазеры с внешним резонатором (ИЛВР) нашли широкое применение в задачах лазерного охлаждения и пленения атомов в МОЛ [14]. Зачастую необходимо иметь возможность прецизионной непрерывной отстройки частоты от резонансного перехода. Существует множество способов отстройки излучения лазера от частоты оптического перехода. Одним из самых распространенных, но не очень удобных для наших задач способов, является отстройка частоты при помощи акустооптических модуляторов [14]. Известен также метод отстройки частоты магнитным полем [15].

В настоящей работе рассмотрена методика стабилизации ИЛВР по резонансам пропускания высокостабильного сканирующего интерферометра Фабри–Перо (ИФП), что позволяет перестраивать частоту охлаждающего лазера в широком диапазоне [1, 2]. Непрерывный контроль частоты осуществляется с помощью измерителя лямбда-метра Angstrom WS-U, откалиброванного по частоте инжекционного лазера, стабилизированного на резонансной частоте насыщенного поглощения  ${}^{85}\text{Rb}$ . Это дает возможность перестраивать охлаждающий лазер в широком диапазоне частот и осуществлять непрерывный контроль частоты ИЛВР в режиме стабилизации.

## 2. Калибровка и дрейф измерителя длины волны

Перед началом работы измеритель калибруется при помощи стабильного ИЛВР. На рис.1 представлена схема стабилизации частоты лазера, по излучению которого осуществлялась калибровка измерителя длины волны.

После ИЛВР незначительная часть излучения при помощи полуволновой пластинки и делительного кубика фокусируется и заводится в оптическое волокно. Оставшаяся часть излучения делится на два пучка: мощный луч оптической накачки и слабый пробный пучок. Резонансы

С.А.Саакян, Б.В.Зеленер. Объединенный институт высоких температур РАН, Россия, 127412 Москва, ул. Ижорская, 13, стр.2; e-mail: saasear@gmail.com

В.А.Саутенков. Объединенный институт высоких температур РАН, Россия, 127412 Москва, ул. Ижорская, 13, стр.2; Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: vsautenkov@gmail.com

Е.В.Вильшанская. Объединенный институт высоких температур РАН, Россия, 127412 Москва, ул. Ижорская, 13, стр.2; Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, 111250 Москва, ул. Красноказарменная, 14

В.В.Васильев. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53

Б.Б.Зеленер. Объединенный институт высоких температур РАН, Россия, 127412 Москва, ул. Ижорская, 13, стр.2; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское шоссе, 31

Поступила в редакцию 5 ноября 2014 г., после доработки – 29 января 2015 г.

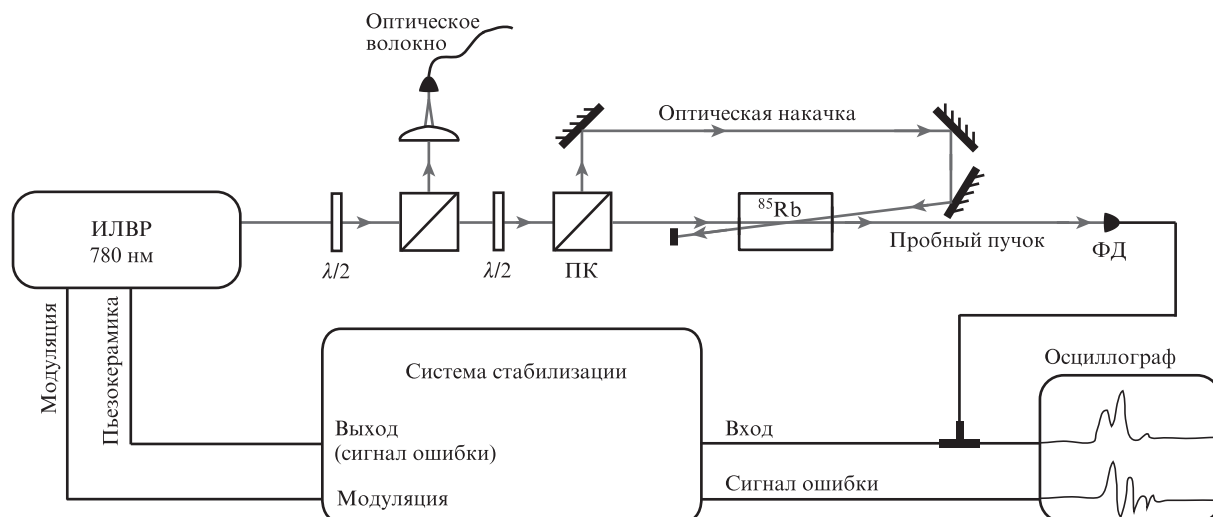


Рис.1. Схема стабилизации калибровочного лазера: ИЛВР – инжекционный лазер с внешним резонатором; ПК – поляризационный кубик; ФД – фотодиод.

насыщенного поглощения формируются в атомной ячейке, а спектр насыщенного поглощения регистрируется фотоприемником.

Для получения сигнала ошибки частота излучения лазера модулировалась с частотой, равной 10 кГц. Система автоматического регулирования работала по нулю производной от контура линии поглощения. Полученный сигнал ошибки после синхронного детектирования, интегрирования и усиления поступал на пьезокерамику для автоматической подстройки частоты лазера к частоте нелинейного резонанса.

На рис.2 представлена осциллограмма насыщенного поглощения паров  $^{85}\text{Rb}$ , стабилизация частоты осуществлялась на частоте перехода  $5S_{1/2} (F = 3) \rightarrow 5P_{3/2} (F' = 4)$ , равной 384.229242 ТГц [16] (переход указан стрелкой).

Введенное в оптическое волокно излучение поступает в многоканальный волоконно-оптический переключатель, позволяющий подавать излучение в лямбда-метр Angstrom WS-U и быстро переключать между собой сигналы до четырех независимых лазеров. Для измерения длины волны излучение коллимируется в параллельный пучок и направляется на твердотельный интерферометр Физо, после которого интерференционная картина с помощью цилиндрической линзы проецируется на ПЗС-линейку (рис.3) и записывается. Полученная интерференционная картина

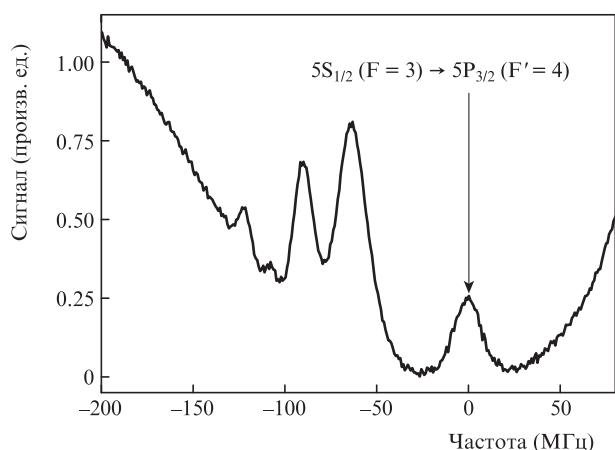


Рис.2. Внутридоплеровские резонансы насыщенного поглощения паров  $^{85}\text{Rb}$ .

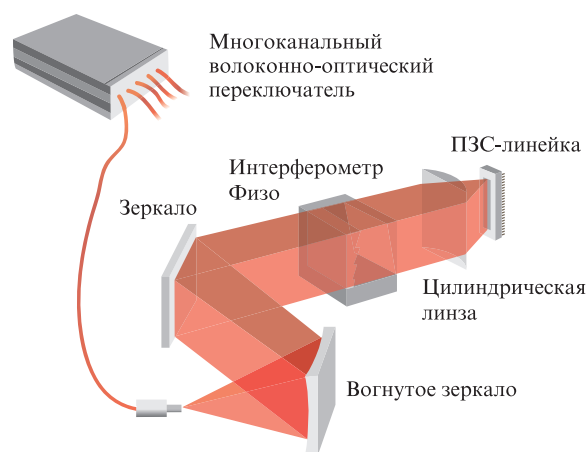


Рис.3. Принципиальная схема измерителя длины волны.

сравнивается с ранее записанной калибровочной. Отсутствие механических движущихся частей в измерителе обеспечивает абсолютную точность измерения частоты до 2 МГц с разрешением 500 кГц.

Тем не менее, незначительные изменения температуры и давления воздуха приводят к дрейфу измеряемой частоты. Для измерения дрейфа излучение стабильного лазера, используемого в начальный момент времени для калибровки, подается в лямбда-метр. Зависимость дрейфа измерителя длины волны от времени показана на рис.4. Так как стабилизированный по резонансам насыщенного поглощения ИЛВР имеет очень высокую относительную стабильность [17], то дрейф измерителя длины волны за 3.5 ч составил примерно 2 МГц.

### 3. Стабилизация ИЛВР по резонансам пропускания термостабилизированного ИФП

Далее рассмотрим систему стабилизации, позволяющую в режиме реального времени отстраивать частоту излучения охлаждающего ИЛВР относительно резонансов пропускания поглощающей ячейки с атомами лития в очень широком диапазоне (более 100 МГц, что заведомо больше необходимых отстроек для работы с МОЛ). При этом система стабилизации должна обеспечивать ста-

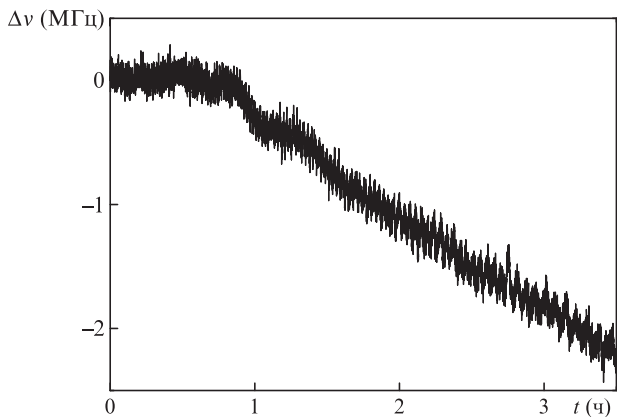


Рис.4. Зависимость дрейфа измерителя Angstrom WS-U от времени.

бильность частоты порядка долей естественной ширины  $\gamma = 6$  МГц. Для эффективной работы МОЛ ширина линии генерации лазера в этом случае должна быть много меньше  $\gamma$ , поэтому уширение спектра лазерного излучения из-за модуляции недопустимо, и модулируется опорный резонанс пропускания ИФП.

В МОЛ, описанной в работах [1, 2], излучение охлаждающего лазера стабилизируется по пику пропускания термостабилизированного конфокального сканирующего ИФП с областью свободной дисперсии (ОСД) 1.5 ГГц и спектральной резкостью 300. Интерферометр был разработан и собран в ФИАНе под руководством В.В.Васильева. Излучение задающего лазера мощностью  $\sim 1.5$  мВт попадает на делительные стеклянные пластинки, незначительная часть излучения направляется в ИФП, а другая – фокусируется в оптическое волокно. Часть излучения выполняет роль насыщающего пучка в кювете открытого типа (кювета с холодными концами) с парами лития. Прошедший через кювету и отраженный от зеркала пучок играет роль пробного пучка. Поворот плоскости поляризации при помощи четвертьволновой пластинки позволяет разделить пробный и насыщающий пучки (рис.5).

В кювете, нагретой до температуры около  $400^\circ\text{C}$ , формируются резонансы насыщенного поглощения, относительно которых при помощи осциллографа выставляется резонанс пропускания ИФП (рис.6). Одним из достоинств

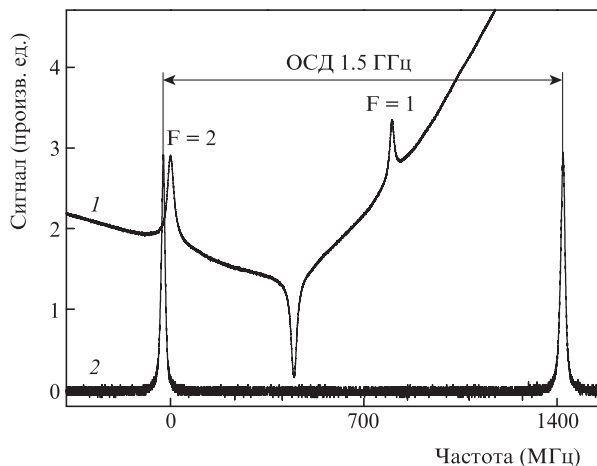


Рис.6. Внутримолекулярные резонансы насыщенного поглощения паров  $^7\text{Li}$  (1) и резонансы пропускания ИФП (2).

данного метода стабилизации является отсутствие необходимости модулировать излучение задающего лазера. Для получения сигнала ошибки осуществлялась модуляция длины ИФП с частотой 10 кГц.

Для контроля частоты отстройки резонанса пропускания ИФП от атомного резонанса в ячейке необходимо отключить режим стабилизации лазера и определить частоту отстройки, используя резонансы пропускания в кювете (рис.7). Однако контроль частоты с использованием измерителя длины волны Angstrom WS-U, откалиброванного по резонансам насыщенного поглощения в ячейке с атомами  $^{85}\text{Rb}$ , более удобен и надежен. Он позволяет получать в реальном времени величину отстройки частоты охлаждающего лазера, не выходя из режима стабилизации.

#### 4. Дрейф термостабилизированного ИФП

Перестраиваемый конфокальный интерферометр является распространенным оптическим инструментом для определения спектрального состава лазерного излучения. Частотное вырождение пространственных мод интерферометра существенно упрощает его согласование с лазерным пучком, а наличие подвижного зеркала, укрепленного, как правило, на пьезоэлементе, позволяет перестраи-

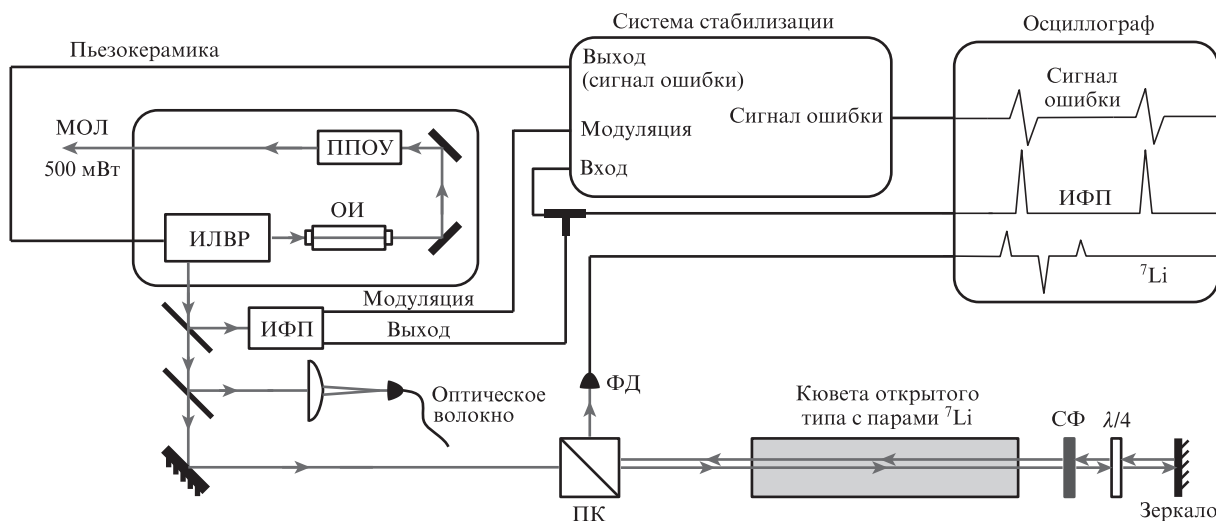


Рис.5. Схема стабилизации ИЛВР по резонансам пропускания термостабилизированного ИФП: ОИ – оптический изолятор; ППОУ – полупроводниковый оптический усилитель; СФ – светофильтр;  $\lambda/4$  – четвертьволновая пластинка.

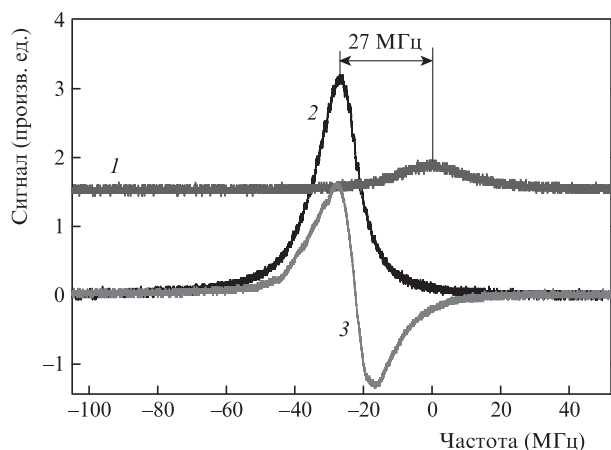


Рис.7. D<sub>2</sub>-линия <sup>7</sup>Li, переход с F = 2 (1); резонанс пропускания ИФП (2) и сигнал ошибки (3).

вать резонансную частоту интерферометра, последовательно прописывая все генерируемые моды лазера. Однако для стабилизации частоты лазера, несмотря на очевидность подобного применения, перестраиваемые интерферометры практически не используются из-за значительного дрейфа их собственных частот [18]. Дрейф, связанный с изменением оптической базы интерферометра, обусловлен, во-первых, температурными коэффициентами расширения пьезоэлемента и корпуса, на которых установлены зеркала, во-вторых, зависимостью оптической плотности среды между зеркалами от внешнего атмосферного давления и, в-третьих, постоянством подаваемого на пьезоэлемент напряжения.

В Лаборатории стандартов частоты ФИАН была сделана попытка минимизировать в конструкции разработанного в институте перестраиваемого конфокального интерферометра отрицательное влияние перепадов внешней температуры и давления на частоту его оптического резонанса.

Интерферометр представляет собой ситалловый моноблок, на торцы которого методом оптического контакта установлены зеркала. Одно из зеркал выполнено на подложке, допускающей ее деформацию с внешней стороны на 1–2 мкм. Деформация осуществлялась пьезоэлементом, закрепленным в кольце из инвара таким образом, чтобы компенсировать относительное удлинение, вызванное изменением температуры. Для обеспечения выполнения условия конфокальности ситалловый корпус был изготовлен с погрешностью по длине менее 10 мкм. Моноблок помещался в герметичную дюралюминиевую камеру с оптическими окнами, температура камеры поддерживалась постоянной с помощью элемента Пельтье, на который она устанавливалась. Таким образом, вся конструкция ИФП представляла собой «матрешку» (рис.8).

Излучение лазера, стабилизированного по резонансам пропускания ИФП, по оптоволокну поступало в измеритель длины волны, что позволяло измерять дрейф резонансных частот ИФП (рис.9). Следует отметить, что наблюдения дрейфа самого измерителя длины волны и дрейфа ИФП осуществлялись одновременно. Из рис.2 и 9 видно, что с учетом дрейфа самого измерителя длины волны дрейф ИФП составляет менее 2 МГц/ч.

Проведенные в настоящей работе измерения дрейфа собственной частоты интерферометра показали, что дальнейшего его снижения можно ожидать при утолщении стенок герметичной камеры и использовании в блоке



Рис.8. Конструкция и внешний вид ИФП.

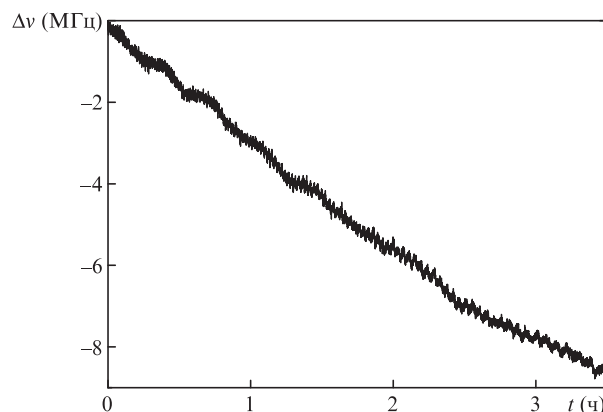


Рис.9. Зависимость дрейфа частоты ИФП от времени.

управления электронных компонентов повышенной термостабильности.

## 5. Измерение частоты ридберговских переходов

Для получения высоковозбужденных ридберговских атомов использовалась МОЛ [1–3]. Ридберговские атомы возбуждались излучением непрерывного перестраиваемого УФ лазера ( $\lambda = 350$  нм), частота которого контролировалась измерителем длины волны. Непосредственно регистрировалось изменение флуоресценции облака холодных атомов при «прохождении» УФ лазером частоты ридберговского перехода. Флуоресценция облака на длине волны 671 нм регистрировалась фотоприемником, на который фокусировалась часть излучения, и ПЗС-камерой. На рис.10 показаны сигналы флуоресценции, полученные ПЗС-камерой при прохождении частот переходов  $2P_{3/2} - 95S$  и  $95D$ .

В начальный момент времени облако атомов для УФ излучения является прозрачным. При прохождении частоты ридберговского перехода наблюдается ослабление (вплоть до полного исчезновения) флуоресценции облака холодных атомов <sup>7</sup>Li. На левой части рисунка видно изменение размеров и яркости облака, а на правой части

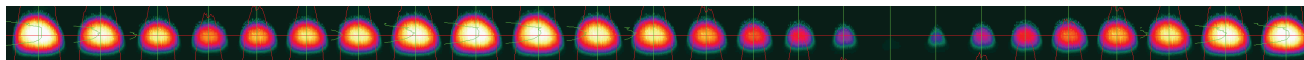
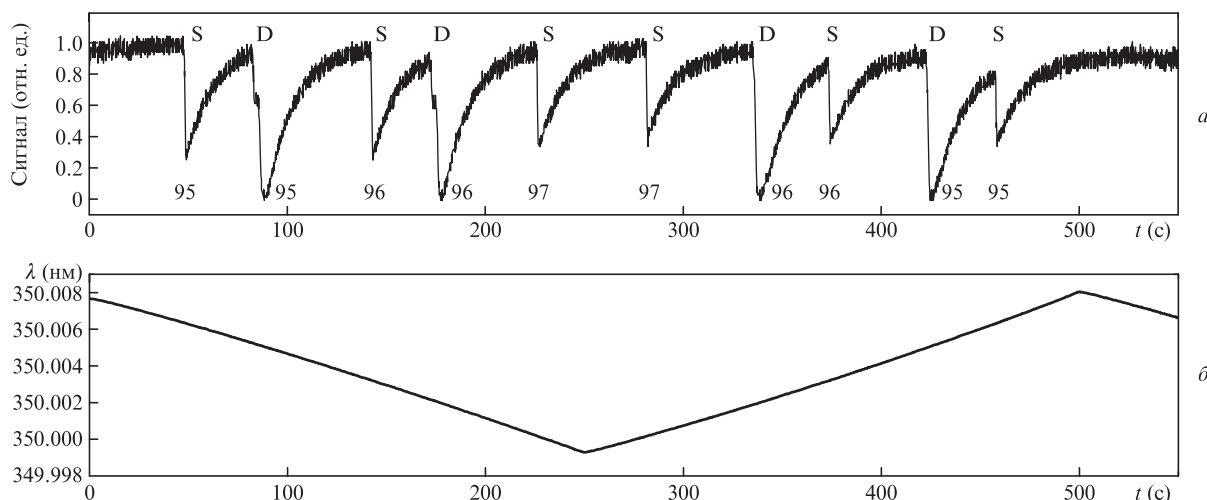
Рис.10. Регистрация изменения флуоресценции ПЗС-камерой при прохождении УФ лазером частот ридберговских переходов  $2P_{3/2}$ -95S и 95D.

Рис.11. Регистрация изменения сигнала флуоресценции фотоприемником (а) и зависимость длины волны УФ лазера от времени (б).

облако полностью пропадает, так как вероятность перехода на уровень 95D выше, чем на уровень 95S. Полное отсутствие флуоресценции соответствует переходу атомов из состояния  $2P_{3/2}$  в состояние 95D. Роль первой ступени возбуждения играет охлаждающий лазер, формирующий МОЛ, который возбуждает атомы из основного состояния  $2S_{1/2}$  в состояние  $2P_{3/2}$ . Более подробно методика идентификации уровней изложена в работе [3].

На рис.11,а показано изменение во времени флуоресценции облака, зарегистрированное фотоприемником. Нулевой сигнал соответствует полному отсутствию флуоресценции, а единица – ее максимуму. В область сканирования частоты УФ лазера попали частоты переходов 95S, 95D, 96S, 96D и 97S. На рис.11,б приведена зависимость частоты УФ лазера от времени, которая непосредственно регистрировалась измерителем длины волны.

## 6. Заключение

Описана методика измерения и контроля частоты инжекционных лазеров при помощи откалиброванного по резонансам насыщенного поглощения  $^{85}\text{Rb}$  измерителя длины волны Angstrom WS-U. Приведено описание методики стабилизации ИЛВР для последующей калибровки измерителя длины волны. Измерен дрейф измерителя длины волны, который составил  $\sim 0.6$  МГц/ч, и с его учетом дрейф нашего термостабилизированного ИФП оказался менее 2 МГц/ч. Продемонстрирована возможность регистрации частоты перехода высоковозбужденных ридберговских переходов по изменению сигнала флуоресценции облака холодных атомов в МОЛ. Данная методика контроля частоты представляется очень удобной для дальнейшего изучения природы двухступенчатого процесса возбуждения облака ультрахолодных атомов  $^7\text{Li}$  в МОЛ.

Авторы благодарны Н.Б.Буянову (Newport Corporation, США), В.Л.Величанскому, М.А.Губину и С.А.Зиброву (ФИАН), В.Н.Кулясову (ГОИ им. С.И.Вавилова), всем сотрудникам лаборатории ИПФ РАН (Нижний Нов-

город), руководимой А.В.Турлаповым, И.И.Рябцеву (ИФП им. А.В.Ржанова СО РАН, Новосибирск) за полезные обсуждения, замечания и помощь.

Работа поддержана грантами Президента РФ (№ МК-4092.2014.2, НШ-6614.2014.2), РФФИ (№ 14-02-00828), Программой фундаментальных исследований Президиума РАН «Исследование вещества в экстремальных состояниях».

1. Зеленер Б.Б., Саакян С.А., Саутенков В.А. и др. *Письма в ЖЭТФ*, **98**, 762 (2013).
2. Зеленер Б.Б., Саакян С.А., Саутенков В.А. и др. *ЖЭТФ*, **146**, 909 (2014).
3. Зеленер Б.Б., Саакян С.А., Саутенков В.А. и др. *Письма в ЖЭТФ*, **100**, 408 (2014).
4. Манькин Э.А., Ожован М.И., Полуэктов П.П. *ДАН СССР*, **260**, 1096 (1981).
5. Манькин Э.А., Ожован М.И., Полуэктов П.П. *ЖЭТФ*, **84**, 442 (1983).
6. Манькин Э.А., Ожован М.И., Полуэктов П.П. *ЖЭТФ*, **102**, 804 (1992).
7. Зеленер Б.Б., Зеленер Б.В., Манькин Э.А. *Письма в ЖЭТФ*, **9**, 696 (2010).
8. Зеленер Б.Б., Зеленер Б.В., Манькин Э.А. *Письма в ЖЭТФ*, **94**, 565 (2011).
9. Зеленер Б.Б., Зеленер Б.В., Манькин Э.А. *Письма в ЖЭТФ*, **96**, 29 (2012).
10. Bushaw B.A., Nörtershäuser W., Drake G.W.F. *Phys. Rev. A*, **75**, 052503 (2007).
11. Ye S., Zhang X., Killian T.C., Dunning F.B. *Phys. Rev. A*, **88**, 043430 (2013).
12. Gallagher T.F. *Rydberg Atoms* (Cambridge: Cambridge University Press, 1994).
13. Mohapatra A.K., Jackson T.R., Adams C.S. *Phys. Rev. Lett.*, **98**, 113003 (2007).
14. Schunemann U., Engler H., Zielonkowski M., Weidemüller M., Grimm R. *Opt. Commun.*, **158**, 263 (1998).
15. Corwin K.L., Lu Z.-T., Hand C.F., Epstein R.J., Wieman C.E. *Appl. Opt.*, **37**, 15 (1998).
16. Steck D.A. *Rubidium 85 D Line Data* (available online at <http://steck.us/alkalidata>, revision 2.1.6, 20 September 2013).
17. Vassiliev V.V., Zibrov S.A., Velichansky V.L. *Rev. Sci. Instrum.*, **77**, 013102 (2006).
18. Зибров А.С., Акульшин А.М., Величанский В.Л., Малахова В.И., Никитин В.В., Саутенков В.А., Тюриков Д.А., Юркин Е.К. *Квантовая электроника*, **9** (4), 804 (1982).