

Исследование D₂-линии атома ⁷Li методом спектроскопии с переносом модуляции для стабилизации частоты лазерного излучения

Л. А. Халуторных^{1,2}, С. А. Саакян¹ и Б. Б. Зеленер¹

¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва 125412, Россия

² Московский физико-технический институт (государственный университет), Институтский пер., 9, Долгопрудный 141701, Россия

E-mail: saakyan@ihed.ras.ru

Статья поступила в редакцию 19 ноября 2024 г.

Аннотация. В работе проведено исследование D₂-линии атома ⁷Li методом спектроскопии с переносом модуляции в кварцевой кювете открытого типа с холодными окнами. Получены контрастные дисперсионные сигналы (сигналы ошибки), которые можно использовать для прецизионной стабилизации частоты лазерного излучения. Впервые исследована зависимость амплитуды сигналов ошибки от температуры газовой ячейки в диапазоне от 405 °С до 465 °С. В исследуемом диапазоне температур зависимость амплитуды сигнала ошибки от температуры газовой ячейки хорошо аппроксимируется линейной функцией с коэффициентом угла наклона (0.37 ± 0.02) В/°С. Полученные результаты хорошо согласуются с теоретической моделью.
<https://doi.org/10.33849/2024407>

1. ВВЕДЕНИЕ

Стабильные по частоте узкополосные источники лазерного излучения широко применяются в современной прецизионной лазерной спектроскопии и метрологии. Для большинства задач требуется источник лазерного излучения, имеющий ширину линии много меньше, чем радиационная ширина исследуемого перехода. Для стабилизации частоты лазеров применяются различные абсолютные частотные реперы, полученные методами нелинейной лазерной спектроскопии в газовых ячейках [1]. Для относительной стабилизации частоты или сужения спектральной ширины линии излучения лазера применяются высокостабильные интерферометры с большой добротностью [2].

Внутридоплеровские резонансы, полученные при помощи спектроскопии насыщенного поглощения, часто используются в качестве абсолютных реперов ввиду общей простоты оптической и электрической схемы [1]. Для получения сигнала ошибки чаще всего модулируется частота лазерного излучения, что ограничивает применение данного метода для ряда задач прецизионной когерентной спектроскопии и метрологии.

Метод спектроскопии с переносом модуляции впервые был предложен в работах [3, 4]. В данном методе за счет когерентного нелинейного процесса четырехволнового смешения модуляция передается от одного лазерного пучка другому через нелинейную резонансную среду. По сравнению с некогерентными схемами спектроскопии эта схема отличается нулевым бездоплеровским фоном, широкой полосой пропускания [5, 6] и малой чувствительностью к флуктуациям интенсивности и поляризации лазерного излучения. Кроме того, результирующий сигнал ошибки формируется в области высоких частот, что позволяет исключить влияние низкочастотных шумов лазера [6]. Ранее данным методом были исследованы переходы между сверхтонкими подуровнями (далее — переходы) D₂-линии рубидия [7], цезия [8] и лития [9]. Существует ряд экспериментальных работ, где продемонстрирована спектроскопия с переносом модуляции для незамкнутых переходов D₁-линии рубидия [10] и калия [11]. Компактная и стабильная

система привязки лазерного излучения к атомному реперу может найти свое применение в современных эталонах вакуума (давления) на основе холодных атомов лития [12]. Также данный метод стабилизации применяется в современных стандартах частоты [8] и гравиметрах на холодных атомах [13].

В данной работе проведено исследование D₂-линии атома ⁷Li методом спектроскопии с переносом модуляции. Впервые исследована зависимость амплитуды и угла наклона дисперсионных сигналов от концентрации атомов в газовой ячейке. Показано, что увеличение температуры кюветы с холодными окнами не приводит к измеримому изменению ширины дисперсионных сигналов (сигналов ошибки). Полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с теоретическими зависимостями.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Измерение спектра D₂-линии атома ⁷Li осуществлялось с помощью пропускания лазерных пучков через насыщенный пар в кварцевой высокотемпературной кювете открытого типа с холодными окнами. В данной кювете кусок металлического лития находится в трубке из молибденовой фольги длиной 20 см, которая, в свою очередь, запаяна в кварцевую кювету с общей длиной 55 см и диаметром 2.5 см. Рабочая зона кюветы с молибденовой фольгой нагревается до температуры 400–500 °С. Температура кюветы измерялась термопарой К-типа, помещенной в центр рабочей области между нагревателем и газовой ячейкой. Температура достигает максимального значения в центре кюветы и спадает до комнатной температуры на ее окнах. В объем кюветы в качестве буферного газа закачивается аргон до давления 0.01 Торр, что препятствует осаждению металлической пленки лития на окнах и делает всю конструкцию кюветы существенно более долговечной по сравнению с другими вариантами [9].

Для нагрева кюветы была изготовлена печь, состоящая из кварцевой трубки, в которую помещалась кювета, нагревателя из обмотанной вокруг кварцевой трубки нихромовой проволоки и шамотного кирпича с вырезом,

в который вставлялась кювета вместе с нагревателем. Вся печь дополнительно обматывалась фольгой для предотвращения тепловых потерь. Питание к нагревателю подводилось с помощью лабораторного программируемого источника постоянного тока. Для измерения и стабилизации температуры кюветы был собран прибор на базе микроконтроллера ESP8266 с интерфейсом Wi-Fi (модель NodeMCU v3), осуществляющий регулировку напряжения лабораторного источника питания через интерфейс RS-232.

На рисунке 1 представлена схема уровней D_2 -линии атома ${}^7\text{Li}$. В качестве источника лазерного излучения для спектроскопии D_2 -линии атомов лития использовался инжекционный лазер с внешним резонатором и коническим усилителем DLC TA pro компании Tortica с длиной волны 671 нм и максимальной выходной мощностью 500 мВт. При проведении измерений частота лазера сканировалась с частотой 50 Гц в окрестности переходов D_2 -линии атома ${}^7\text{Li}$.

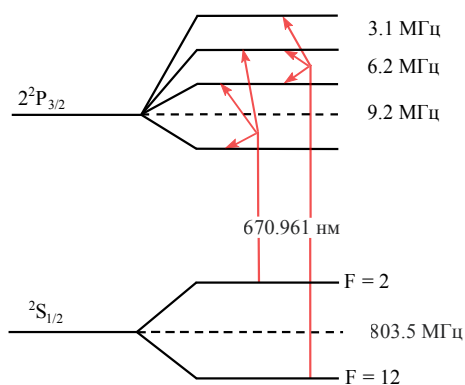


Рисунок 1. Схема энергетических уровней D_2 -линии атома ${}^7\text{Li}$.

На рисунке 2 представлена принципиальная схема экспериментальной установки. Излучение лазера разделяется на два пучка при помощи поляризационного делительного кубика. Пробный пучок, проходящий через кубик и ячейку с парами лития, регистрируется при помощи быстрого фотодетектора. Пучок накачки модулируется по фазе при помощи электрооптического модулятора и распространяется навстречу пробному пучку. Отношение интенсивностей пробного пучка и пучка накачки поддерживалось на уровне 10.

Для фазовой модуляции пучка накачки использовался нерезонансный электрооптический модулятор (модель EO-PM-NR-C1 компании Thorlabs) с полуволновым напряжением $V_\pi \approx 150$ В. Частота модуляции 6 МГц задается синусоидальным генератором сигналов (модель DG4102 компании Rigol) и после усиления для увеличения глубины модуляции подается на электрооптический модулятор. Для усиления модулирующего сигнала использовался самодельный высоковольтный усилитель, изготовленный на основе микросхемы видеусилителя TDA6111q. Сигнал с быстрого фотоприемника после усиления подается на балансный смеситель вместе с опорной частотой модуляции 6 МГц от генератора синусоидальных сигналов (сигнал гетеродина). Выходной сигнал после усиления и фильтрации высокочастотной составляющей фильтром низких частот с частотой среза порядка 30 кГц регистрируется осциллографом или

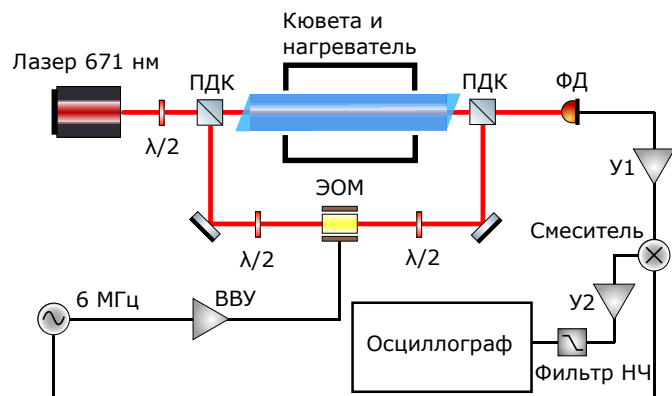


Рисунок 2. Схема экспериментальной установки. Лазерный луч разделяется на пробный пучок и пучок накачки с помощью полуволновой пластинки $\lambda/2$ и поляризационного делительного кубика (ПДК). Пробный пучок сразу проходит через кювету и попадает на фотодиод (ФД). Пучок накачки предварительно модулируется по фазе с частотой 6 МГц электрооптическим модулятором (ЭОМ), а затем проходит через кювету в направлении, противоположном пробному пучку. Модулирующий сигнал усиливается высоковольтным усилителем (ВВУ). Сигнал с фотодиода усиливается в усилителе (У1) и смешивается с модулирующим сигналом на балансном смесителе. Выходной сигнал смесителя усиливается (У2) и после прохождения фильтра низких частот (НЧ) регистрируется осциллографом.

может использоваться для стабилизации частоты лазерного излучения.

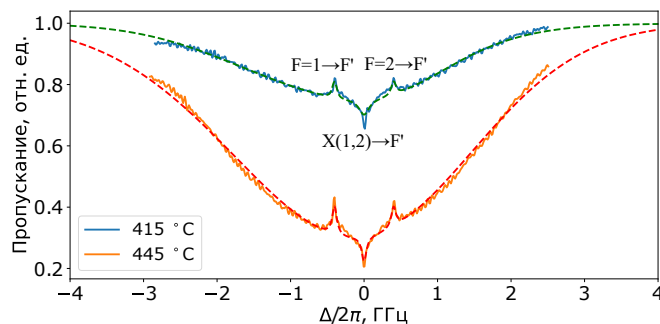


Рисунок 3. Спектры насыщенного поглощения при температурах газовой ячейки 415 °C и 445 °C. Сплошные кривые — экспериментальные данные, пунктирная кривая — результат наилучшей аппроксимации экспериментальных кривых суммой двух гауссовских профилей (доплеровских контуров) и суммой трех профилей Фойгта (внутридоплеровские резонансы насыщенного поглощения). Ноль по оси абсцисс соответствует частоте перекрестного резонанса $X(1,2) \rightarrow F'$.

На рисунке 3 представлены спектры насыщенного поглощения атомов ${}^7\text{Li}$ для двух различных температур газовой ячейки. Данные спектры измерялись с отключенным электрооптическим модулятором. Для получения контрастных внутридоплеровских резонансов была подобрана оптимальная мощность пучка накачки при минимально возможной мощности пробного пучка. С увеличением температуры ячейки концентрация атомов в нагретой части ячейки растет. На рисунке 3 единица по оси ординат соответствует отсутствию

поглощения пробного излучения или отсутствию атомарного газа в кювете (что соответствует комнатной температуре ячейки).

Изменение концентрации атомарного лития в газовой ячейке осуществляется вариацией температуры активной области. Увеличение температуры ячейки приводит к соответствующему росту доплеровской ширины наблюдаемого контура поглощения. Наилучшая аппроксимация экспериментальных кривых суммой двух гауссовых профилей и трех профилей Фойгта показана на рисунке 3 пунктиром. Два профиля Гаусса соответствуют переходам с двух подуровней основного состояния $F = 1$ и $F = 2$ в состояние $2^2P_{3/2}$ (см. схему энергетических уровней, представленную на рисунке 1). Полная ширина доплеровских контуров на полувысоте, полученная из аппроксимации, составила 3.5(4.0) ГГц для переходов с нижнего подуровня основного состояния с $F = 1$ и 2.4(3.2) ГГц для переходов с верхнего подуровня основного состояния с $F = 2$ при температуре ячейки $T = 415(445)^\circ\text{C}$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В работе были исследованы переходы D_2 -линии атомов ^7Li методом спектроскопии с переносом модуляции при различных температурах газовой ячейки в диапазоне от 405°C до 465°C . На рисунке 4 представлен наблюдаемый после смесителя и фильтра низких частот спектр сигнала для двух различных температур ячейки — 415°C и 445°C . Переходы с двух сверхтонких подуровней основного состояния $2^2S_{1/2}$ на сверхтонкие подуровни возбужденного состояния $2^2P_{3/2}$ обозначены на рисунках 3 и 4 как $F = 1 \rightarrow F'$ и $F = 2 \rightarrow F'$. Наибольшую амплитуду имеет перекрестный резонанс $X(1, 2) \rightarrow F'$, появляющийся в спектре из-за наличия у этих двух переходов общего верхнего уровня. Данный резонанс имеет наибольшую амплитуду и частоту, находящуюся посередине между частотами переходов $F = 1 \rightarrow F'$ и $F = 2 \rightarrow F'$. Оптимизация амплитуды сигнала ошибки осуществлялась подбором оптимальной фазы между сигналами, подаваемыми на электрооптический модулятор и смеситель. Пунктирные кривые на рисунке 3 представляют собой наилучшую аппроксимацию экспериментальных данных теоретической моделью из работы [3] (уравнение (2) в цитируемой статье). Экспериментальные результаты находятся в хорошем согласии с теоретической моделью.

Сигнал, полученный методом спектроскопии с переносом модуляции, имеет вид дисперсионной кривой и используется для стабилизации лазера в цепочке обратной связи в качестве сигнала ошибки. Для использования полученного сигнала ошибки для стабилизации частоты лазерного излучения была исследована зависимость его амплитуды от температуры газовой ячейки. На рисунке 5 представлена зависимость амплитуды сигнала ошибки от температуры газовой ячейки. В данном диапазоне температур зависимость хорошо аппроксимируется прямой с коэффициентом угла наклона $(0.37 \pm 0.02) \text{ В}/^\circ\text{C}$. Стоит отметить, что нагрев и длительная эксплуатация при температурах выше 430°C может привести к поломке газовой ячейки. Суммарное время работы данной ячейки при температуре порядка 420°C в настоящее время составило более 5000 часов.

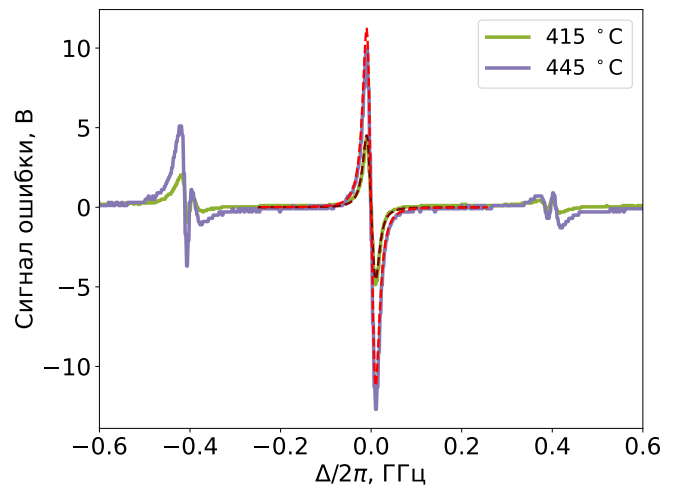


Рисунок 4. Спектры с переносом модуляции, полученные при температурах ячейки 415°C и 445°C . Сплошные кривые — эксперимент, пунктирные кривые — наилучшая аппроксимация теоретической моделью из работы [3]. Ноль по оси абсцисс соответствует частоте перекрестного резонанса $X(1, 2) \rightarrow F'$.

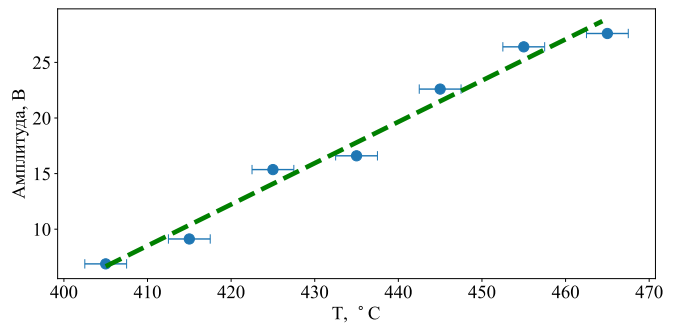


Рисунок 5. Зависимость амплитуды дисперсионных сигналов (сигналов ошибки) от температуры газовой ячейки. Пунктирная кривая — результат наилучшей аппроксимации экспериментальных данных линейной зависимостью.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе работы были получены спектры D_2 -линии атома ^7Li методом спектроскопии с переносом модуляции. Изготовлен простой высокочастотный усилитель для электрооптического модулятора на базе микросхемы видеоусилителя. Установлено, что амплитуда сигнала ошибки линейно возрастает при увеличении температуры в интервале от 405°C до 465°C . Полученные результаты находятся в хорошем согласии с теоретической моделью из работы [3]. В дальнейшем мы планируем впервые исследовать методом спектроскопии с переносом модуляции нециклические переходы D_1 -линии ^7Li .

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание № 075-00270-24-00).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Demtröder W 2008 *Laser Spectroscopy: Vol. 1 Basic Principles* (Berlin: Springer-Verlag)
2. Хабарова К Ю, Слюсарев С Н, Стрелкин С А, Белотелов Г С, Костин А С, Пальчиков В Г и Колачевский Н Н 2012 *Квантовая электроника* **42** 1021–26
3. Shirley J H 1982 *Opt. Lett.* **7** 537–9
4. Camy G, Bordé C J and Ducloy M 1982 *Opt. Commun.* **41** 325–30
5. So C, Spong N L, Möhl C, Jiao Y, Ilieva T and Adams C S 2019 *Opt. Lett.* **44** 5374–7
6. Zhe Li L, Eon Park S, Noh H, Park J and Cho C 2011 *J. Phys. Soc. Jpn.* **80** 074301
7. Noh H, Park S, Li L, Park J and Cho C 2011 *Opt. Express* **19** 23444–52
8. Zi F, Wu X, Zhong W, Parker R H, Yu C, Budker S, Lu X and Müller H 2017 *Appl. Opt.* **56** 2649–52
9. Sun D, Zhou C, Zhou L, Wang J and Zhan M 2016 *Opt. Express* **24** 10649
10. Khan S, Hassan A, Noh H R and Kim J T 2024 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* **322** 109037
11. Innes A D, Majumder P, Noh H and Cornish S L 2024 *J. Phys. B* **57** 075401
12. Makhalov V, Martiyanov K and Turlapov A 2016 *Metrologia* **53** 1287
13. Осипенко Г В, Алейников М С и Суховерская А Г 2023 *Измерительная техника* **1** 4–7