## МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Институт Прикладной Физики РАН

Отчет по проделанной работе

# FM спектроскопия и стабилизация лазерной частоты

Работу выполнили: Царапкин Алексей, студент 4 курса МФТИ (ГУ); Савельева Светлана, инженер СПбГУ.

Нижний Новгород, 2017 г.

## Содержание

1.	Цель работы	3
2.	Задачи работы	3
3.	Вводная часть     3.1. Введение     3.2. Использованное оборудование	4 4 4
4.	Практическая часть   4.1. Установка   4.2. Настройка элементов системы   4.3. Пайка цепи обратной связи	6 6 8 10
5.	Результаты	12
6.	Пути дальнейшего исследования и замечания	14
7.	Выводы	15

## 1. Цель работы

• Создание установки для проведения экспериментов и изучения FM спектроскопии.

## 2. Задачи работы

- 1) Создание лазерной оптической системы с газовой ячейкой <sup>6</sup>*Li* для наблюдения линий поглощения;
- 2) Проведение аппаратной обработки сигнала поглощения для получения его производной;
- 3) Оптимизация параметров установки с целью улучшения сигнала производной.
- 4) Создание цепи обратной связи для стабилизации частоты лазера на частоте атомного перехода изучаемого <sup>6</sup>Li.

### 3. Вводная часть

#### 3.1. Введение

В данной работе изучалась FM спектроскопия, нашедшая широкое использование в современной науке. Благодаря методам, описанным ниже, достаточно просто получить узкие линии поглощения атомов с большим соотношением сигнал-шум, а после соответствующей обработки сигнал можно использовать, например, в цепи обратной связи для запирания частоты лазера в экспериментах по лазерному охлаждению атомов этого же сорта.



#### 3.2. Использованное оборудование

Рис. 1. Часть экспериментальной установки

Для выполнения задач данной работы была создана установка с лазером типа *ECDL* – 6725*R* с настраиваемым высококогерентным излучением мощностью до 29 мВт с центральной длиной волны рабочего диапазона 671 нм (4 на рис. 1) на основе лазерного диода. Точная настройка частоты излучения производится с помощью блока управления, на котором расположены рукоятки регулирования тока на лазерном диоде и положения дифракционной решетки, которая выполняет роль стенки резонатора. Помимо точной, существует возможность грубой настройки ее положения с помощью прецизионных винтов, см. рис 2.



Рис. 2. 1 – корпус оптической головки; 2 – хладопровод лазерного диода; 3 – единый модуль лазерного диода и коллимирующего объектива; 4 – дифракционная решетка, укрепленная на горизонтальном валу; 5 – вертикальный фиксирующий винт М2; 6 – горизонтальный юстировочный винт М3х0,25; 7 – пьезоэлемент; 8 – разъем DHS-15F; 9 – подвижный рычаг.

Эксперимент проводился на атомах <sup>6</sup>Li, образец которого был помещен в стеклянную газовую ячейку (поз. 1 на рис. 1). Нагрев образца для испарения производился за счет нагревательного элемента, обмотанного вокруг ячейки, температура которого регулировалась с помощью ЛАТРа (поз. 2 на рис. 1). Концентрация газа зависит от температуры, и для улучшения сигнала необходимо поддерживать большую температуру. Однако, она не должна превышать температуры плавления стекол ячейки а также разница температуры ячейки и ее концов, которые не нагреваются, не должна быль большой, поскольку существует опасность раскола. Нами была подобрана наибольшая возможная температура — 320 °C.

Использовалось также акустоооптическое устройство сдвига частоты (далее AOM) фирмы *IntraAction* модели *ATM* – 2001A1 с центральной частотой 200 МГц, с помощью которого производилась частотная модуляция лазерного луча (поз. 3 на рис. 1). Сигнал на AOM подавался со специального акустооптического драйвера фирмы *Isomet* модели 620*c* – 200, способого создавать частотномодулированный сигнал с центральной частотой 200 МГц.

В работе также использовались:

- 2 генератора сигналов производной формы для питания драйвера;
- Миксер фирмы *Mini Circuits* модели *ZAD 1 1+* с рабочим диапазоном 0,1-500 МГц;
- Фотодатчик фирмы *ThorLabs* модели *DET36A/M*;
- Усилитель с 0 Ω входым сопротивлением для работы с сигналом фотодатчика фирмы Perry – Amplifier модели 481 – 1X;

 Усилитель с 50 Ω входным сопротивлением фирмы *Mini–Circuits* модели *ZFL–* 500 с рабочим диапазоном 0.05 - 500 МГц. Усиление по мощности 20 dB.

Для схемы обратной связи использовался дополнительный генератор треугольных импульсов. Сама цепь состола из интегратора, сумматора и буфферов на основе операционных усилителей *OP*480*GPZ*.

## 4. Практическая часть

#### 4.1. Установка



Рис. 3. Экспериментальная установка

Схематически установка выглядит следующим образом:



Рис. 4. Схема установки. 1 - лазер; 2 - пластинки  $\lambda/2$ ; 3 - поляризационный куб; 4 - AOM; 5 - телескоп из двух собирающих линз 125 и 250 мм сответственно; 6 - газовая ячейка; 7 - фотодатчик; 8 - аттенюатор с 0.5-1.5 OD.

Работа производилась при токе на лазерном диоде 80 мА, при таком токе мощность выходного излучения составляла приблизительно 24 мВт. Сигнал поглощения получается по схеме насыщения поглощения с двумя противоположно распространяющимися лучами. Луч, излученный лазером, разделяется на пробный и насыщающий с помощью полуволновой пластинки и поляризационного куба в соотношении приблизительно 1:11. Данное соотношение подобрано из расчета, что инстенсивность пробного луча должна быть много меньше интенсивности насящения паров <sup>6</sup>Li, которая составляет 2.5 мBт/см<sup>2</sup>, а интенсивность насыщающего, наоборот, много больше. Полуволновая пластинка за поляризационным кубом восстанавливает исходную вертикальную поляризацию насыщающего луча. Далее, насыщающий луч увеличивается по площади в два раза с помощью телескопа с целью улучшения сигнала спектроскопии, в такой геометрии пробный луч проходит "внутри"насыщающего в газовой ячейке, идущего навстречу ему. После ячейки пробный пучок фокусируется на фотодатчике.



Рис. 5. Схема обработки сигнала. 1 - генератор синусоидального сигнала со смещением; 2 - генератор постоянного сигнала; 3 - драйвер AOMa; 4 - усилитель 0Ω; 5 усилитель 50Ω; 6 - ΦВЧ; 7 - миксер; 8 - ΦНЧ; 9 - осциллограф.

Работа АОМа осуществляется за счет драйвера, на один вход которого подается 4 В, обеспечивающие его питание, на другой вход подается синусоидальный сигнал регулируемой частоты 0.1 - 1 МГц со смещением 3 В и размахом в 2 В. Смещение необходимо для корректной работы драйвера, поскольку по техописанию на него нельзя подавать отрицательное напряжение. Этим постоянным смещением и винтом на его корпусе можно задать центральную частоту выходного сигнала, в нашей работе она была настроена на 200 МГц. Размах синусоиды отвечает за глубину частотной модуляции выходного сигнала, в нашей работе было выбрано 2 В, так как каждая единица Вольт приводит к смещению центральной частоты на 10 МГц а характерное расстояние между двумя линиями  $^{6}Li - 228$  МГц. При таком соотношении частота луча будет изменяться в пределах склона сигнала поглощения каждой линии, приводя к наибольшему сигналу амплитудной модуляции, а значит, производной.

Сигнал с фотодатчика, прошедший двоекратное усиление, вместе с синусоидой от второго генератора поступают на миксер. Сигнал с генератора проходит фильтр

высоких частот, так как подключение миксера напрямую к генератору приводит к возниконвению обратной связи в цепи, из-за которой генератор переставает выдавать напряжение. Опытным путем было установлено, что конденсатор исключает обратную связь, однако неизбежно вносится фазовая задержка, которая негативно влияет на перемножение двух сигналов. Поскольку фазовая частотная характеристика простейшего RC фильтра выских частот есть функция  $arctan(f_{cpeзa}/f)$ , то было решено использовать такой фильтр с минимальной частотой среза (в нашем эксперименте частота среза составляла 100 Гц), при которой фазовые задержки должны быть наименьшими. После миксера установлен простейший RC фильтр нижних частот ( $f_{cpeзa} = 580$  Гц) для отсеивания удвоенной частоты. В конце сигнал поступает на осциллограф.

#### 4.2. Настройка элементов системы

- 1) Настройка лазера. Устройство лазера позволяет производить сканирование частоты лазера в пределах 2 нм относительно центральной частоты с помощью подачи переменного тока на лазерный диод а также подачи переменного напряжения на пьезоэлемент, который определяет положение дифракционной решетки. Однако, настроиться на атомные линии с помощью блока управления в начале эксперимента не удалось, поскольку частота лазера оказалась далеко смещенной. С помощью монохроматора было определено в какую сторону смещена длина волны, и была произведена грубая подстройка положения дифракционной решетки с помощью прецизионного винта, поджимающего пьезоэлемент (см. рис. 2). Настройка лазера также заключается в регулировании положения плоскости дифракционной решетки и температуры в термоконтуре лазерного диода, таким образом, чтобы ток поджига был минимальным - 55-57 мА. Настройка температуры осуществляется за счет переменного резистора на блоке управления лазера. Опытным путем было установлено, что при росте сопротивления, и, соответственно, понижении температуры лазерного диода, ток поджига возрастает для данного типа лазера.
- 2) Настройка дравйвера и AOMa. Для модели драйвера, указанного выше, необходимо подавать на вход MOD постоянные 4 В, на вход Vt - смещенную синусоиду. Из теории известно, что AOM модулирует по частоте луч из первого порядка дифракции, однако мощность этого луча зависит от положения самого AOMa и от мощности сигнала, подаваемого с драйвера. Типичная зависимость мощности модулированного луча от мощности сигнала драйвера имеет вид, как на (6). Для наиболее эффективной работы необходимо установить рабочую точку примерно в том месте, где зависимоть начинает отклоняться от линейной. Нами была выбрана мощность 800 мВт, при такой мощности в первый порядок уходило приблизительно 15 мВт излучения, что составляет 72% от входного лазерного излучения.

Важно настроить частоту драйвера как можно ближе к центральной частоте



Рис. 6. Зависимость эффективности дифракции от входной мощности АОМа

AOMa, это необходимо для его корректной работы. Типичный сигнал производной при неправильной настройке приведен на рис. (7).



Рис. 7. Искажение производной, при неправильной настройке частоты драйвера. Уже при небольшой отстройке (0.5-1 МГц) центральная часть производной смещается относительно нуля.

- 3) В ходе работы, для получения и улучшения сигнала спектроскопии был использован телескоп из двух линз, увеличивающий пучок в два раза, как было описано выше. Интенсивность насыщающего пучка составляла приблизительно 30 мВт/см<sup>2</sup>, что на порядок больше интенсивности насыщения. Также необходимым условием получения сигнала явлется слабость пробного луча его интенсивность затенялась аттенюатором, поставленным перед газовой ячейкой, как на рис. (4).
- 4) Настройка рабочей точки миксера. Миксер обладает такими характеристиками, как потеря и сжатие при преобразовании. Потерей называется отношение входной мощности RF сигнала к выходной мощности одной из боковых частот IF сигнала после перемножения, а поскольку в нашем эксперименте перемножаются сигналы одинаковой частоты, то нас интересует потери относительно левой полосы вблизи нулевой частоты. Сжатием называется отношение входной мощности к полной выходной мощности. Существенным является то, что при постоянном сигнале LO и сигнале небольшой мощности на канале RF это отношение постоянно при увеличении мощности сигнала на RF. Однако, при некотором уровне входного сигнала RF происходит отклонение от этого отношения, а при дальнейшем увеличении отношение уменьшается сильнее, при этом сильно растут потери. Для корректной работы миксера в условиях эксперимента и для лучшего соотношения сигнал-шум, нами были установлены дополнительные аттенюаторы на входе RF, сигнал на который подавался от генератора. Это устанавливает рабочую точку миксера приблизительно в начале отклонения от постоянной величины параметра сжатия.

#### 4.3. Пайка цепи обратной связи

Цепь обратной связи собиралась на печатной плате с использованием операционных усилителей. Электрическая схема представлена на рис. (8). Входной буфер задает входное сопротивление цепи - оно выбрано большим, поскольку ток фотодатчика невелик (порядка 0.5 мА). Интегратор, следующий за буфером, необходим для ускорения отклика цепи обратной связи — даже при малых сигналах производной, цепь обратной связи должна быстро возвращать частоту лазера на частоту перехода. Исходя из этого, были подобраны номиналы резистора  $R_4$  и емкости таким образом, что время иниегрирования составляло 0.1 мс. Следующий элемент - сумматор, на один из входов которого подается проинтегрированный сигнал, на другой - управляющий положением дифракционной решетки треуголный сигнал от дополнительного генератора, с помощью которого можно точно настроиться на частоту атомного перехода лития до включения цепи обратной связи - амплитуда этого сигнала отвечает за область сканирования частоты, смещение сигнала - за центральную частоту. Выходной инвертированный усилитель позволяет подобрать выходное напряжение для подачи его на блок управления лазера - оно должно быть порядка 5 В.

В собранном виде схема имеет вид, как на рис. (9).



Рис. 8. Схема цепи обратной связи.



Рис. 9. Изображение цепи обратной связи.

## 5. Результаты



Рис. 10. Производная сигнала при модулирующей частоте 400 кГц, сигнал спектроскопии - 10 мВ/дел., его производная 50 мВ/дел.

В конфигурации установки, описанной выше, сигнал производной имеет вид, как на рисунке (10). Соотношение сигнал-шум велико, сигнал не имеет смещения по горизонтали. В данном отчете на рис. (10) и (11) приведены изображения двух производных при частотах 400 кГц и 380 кГц.



Рис. 11. Производная сигнала при модулирующей частоте 380 кГц, сигнал спектроскопии - 10 мВ/дел., его производная 50 мВ/дел

Следующий рисунок объясняет необходимость второго усилителя. В его отсутствии, в схеме электрической цепи производная имеет вид, как на рис. (12). На нем видно, что соотношение сигнал-шум намного хуже, чем в схеме с двумя усилителями, также сам сигнал намного слабее. Возможно использование усилителя с достаточно большим коэффициентом усиления с рабочим диапазоном начиная с 0.1 МГц, что несколько упростит схему, однако, в нашем распоряжении подходящего усилителя не было.



Рис. 12. Производная сигнала при модулирующей частоте 380 кГц с одним усилителем в электрической цепи, сигнал производной 1 мВ/дел

Полученный сигнал производной можно использовать в цепи обратной связи. Настроившись на частоту атомного перехода лития с помощью генератора треугольного сигнала - желтая линия на рис. (13), и при выключенном сканировании по частоте, проинтегрированный сигнал производной производит запирание. Для проверки запирания с генератора подавался миандр с небольшой амплитудой, что приводит к мгновенной отсройке частоты, однако на рис. (13) видно, что сигнал обратной связи возвращает частоту на нулевой уровень.



Рис. 13. Стабилизация частоты при мгновенном срыве (желтая линия сверху) и сигнал обратной связи (зеленая линия снизу)

#### 6. Пути дальнейшего исследования и замечания

Как уже было сказано, полученный сигнал производной при 380 кГц является приемлимым для дальнейшего его использования, например, в цепи обратной связи установки по лазерному охлаждению. Однако существуют пути его улучшения (рост величины сигнала и отношения сигнал-шум).

Поскольку мы использовали фильтр верхних частот в электрической цепи (поз. 6 рис. 4), который неизбежно вносит фазовые задержки в сигнал от генератора, зависящие от частоты модуляции, то сама производная может сильно искажаться. Было замечено что при частоте 100 кГц она инвертируется, при частоте >500 кГц сигнал стаовится очень слабым. Напомним, что проведенные эксперименты показали, что наличие конденсатора в цепи необходимо для исключения обратной связи. В этих условиях существует несколько способов исключить его влияние на сигнал. Первый способ — использование двух синхронизированных генераторов. Такой способ исключает подачу постоянного сигнала на миксер, из-за которого возникает обратная связь, но необходимого для работы драйвера. Однако у двух из трех генераторов, имеющихся в нашем распоряжении, отсутствовали порты синхронизации, а с помощью режима Gated/Cycled генераторов добиться двух синусоид с абсолютно одинаковой частотой не представляется возможным, поскольку частота одного генератора, даже очень хорошо подогнанная под частоту другого начинает плыть через какое-то время.

Нами был проведен эксперимент, с двумя генераторами, выдающими почти одинаковые синусоиды, однако искажения не пропали, что свидетельствует о том, что задержки в фазе вносят другие элементы, например, усилители или фотодатчик. Второй способ — используя фазовращатель на месте ФВЧ, управлять фазой сигнала, подаваемого на миксер. Был собран простейший мостовой фазовращатель из двух конденсаторов и двух подстроечных сопротивлений. Однако, его использование не принесло желаемого результата - на частотах, которых производная искажена, сигнал не был улучшен. У данного типа фазовращателя есть недостаток - он может уменьшать амплитуду сигнала, а фирменных кондесаторов в нашем распоряжении не было, поэтому данный способ нуждается в дальнейшем исследовании. Цепь обратной связи также представляет интерес в подробном изучении. Из рис. (13) можно рассчитать реальную постоянную времени - порядка 2 мс. Важно поддерживать эту постоянную как можно меньшей, для быстрого отклика на срыв частоты лазера, однако если сделать ее слишком маленькой, система может перейти в режим автогенерации.

## 7. Выводы

- 1) Была собрана и настроена лазерная оптическая система с газовой ячейкой <sup>6</sup>Li для наблюдения линий поглощения в условиях насыщения;
- 2) Произведена сборка электрической цепи для обработки сигнала поглощения и получена его производная;
- 3) Были исследованы отдельные элементы системы и оптимизированы их рабочие параметры для улучшения сигнала производной.
- 4) Была создана цепь обратной связи и стабилизирована частота лазера на атомном переходе  ${}^{6}Li$  на основе интегратора и сумматора.