

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Генн Мария Сергеевна

КУРСОВАЯ РАБОТА

Динамика установления магнитного поля магнитно-оптической ловушки

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18302

Научный руководитель:

к.ф.м.н. Бонерт А. Э.

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. Астрелин В.Т.

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск, 2019

Оглавление

Аннотация.....	3
1 Введение.....	3
2 Теоретическая часть	6
2.1 Принцип работы магнитно-оптической ловушки.....	6
2.2 Роль магнитного поля в МОЛ.....	8
2.3 Теоретические расчеты магнитно-оптической ловушки	9
3 Экспериментальная часть.....	11
4 Выводы и заключение	13
5 Список литературы	13

Аннотация

Магнитно-оптическая ловушка применяется для захвата и охлаждения нейтральных атомов, которые используются в лазерной спектроскопии. Освоены принципы работы магнитно-оптической ловушки. В данной работе исследовано распределение магнитного поля в модели магнитной ловушки с использованием датчика Холла. Экспериментально были измерены распределение осевой и радиальной компоненты магнитного поля магнитно-оптической ловушки, а так же постоянная времени загрузки, которая составила 10мксек .

Введение

В настоящее время все большую популярность стал приобретать так называемый «оптический пинцет» (оптическая ловушка). Это приспособление, позволяющее управлять объектами, размеры которых достигают 10нм-10мкм.

В 1987 году впервые стали известны возможности удержания таких микрочастиц с помощью остросфокусированного пучка света., когда вместе со своими коллегами Артур Ашкин проводили опыты с давлением лазерного излучения, а первая ловушка была спроектирована и реализована в 1987 году Стивеном Чу.

Изначально лазерная ловушка применялась для работы с биоматериалом. Она позволяла прикладывать силы к микрообъектам, где механическое воздействие невозможно или губительно. Впервые объектом исследования выступили бактериальные жгутики, изучить которые представлялось возможным с помощью удержания бактерии. Вместе с этим, применение ловушки нашло место не только в биологии, но и в физике, например в спектроскопии газов. Так как из-за влияния столкновений и доплеровского уширения на исследуемую спектральную информацию становится необходима как сверхнизкая температура частиц, так и возможность их удержания в ограниченном пространстве[4], что достигается в магнитно-оптической ловушке.

Основные преимущества заключаются в том, что:

- 1) Во-первых, из-за малой температуры атомов в ловушке достигается почти полное подавление доплеровского уширения, которое позволяет проводить высокоточные измерения со спектральными линиями с ширинами близкими к естественным.
- 2) Во-вторых, возможно изучение процессов с малыми вероятностями, благодаря длительному времени жизни атомов в ловушке.
- 3) В-третьих, учитывая то, что количество атомов и их распределение легко определяется, становится возможным проведение абсолютных измерений.

Сейчас получаемые таким способом холодные атомы находят применение во многих областях современной физики[6]:

- 1) В метрологических экспериментах с их помощью создаются новые стандарты частоты.
- 2) в квантовых технологиях на таких системах реализовывают кубиты и элементы квантового компьютера.
- 3) При помощи атомов в оптических решетках готовятся эксперименты по симуляции эффектов, доступных ранее только в твердом теле – сверхпроводимость, ферромагнетизм, сверхтекучесть и других.

В связи с этим для получения наилучшего результата, изучаются наилучшие параметры этого устройства.

Теоретическая часть

1.1 Принцип работы магнитно-оптической ловушки

Оптическая манипуляция и удержание частиц с помощью лазеров основывается на явлении давления света, когда излучение представляется потоком частиц. Как известно фотон несет в себе импульс $p=h/\lambda$, а при взаимодействии с веществом может происходить обмен импульсами, т.е. свет изменяет направление распространения.

Когда атом поглощает фотон, он получает от фотона импульс. Если частота излучения лазера меньше, чем частота оптического резонанса атома {Оптический резонанс это избирательное поглощение инфракрасного, видимого или ультрафиолетового света, когда, поглощая фотон, атом переходит в возбужденное состояние, а при столкновениях с другими атомами возвращается в основное состояние, избыток энергии при этом превращается в кинетическую энергию}. И благодаря эффекту Доплера атомы, движущиеся навстречу лучу, будут поглощать фотоны, а движущиеся в противоположном направлении не будут с ними взаимодействовать. Впоследствии возбужденный атом может излучить поглощенный фотон из-за спонтанной эмиссии[6]. {Спонтанное испускание фотонов одиночным атомом, находящимся в поле когерентного излучения, частота которого равна или близка к частоте одного из атомных переходов, называется явлением резонансной флуоресценции; если возбуждающее излучение не изменяется во времени частоту колебаний, то при слабой его интенсивности атом поглощает фотон на частоте возбуждения и переизлучает его на той же частоте[8,9].}

Поскольку это случайный процесс и атом испускает фотон в произвольном направлении, то происходит замедление движения атома, движущегося навстречу лазерному лучу. Если на атом направлены три взаимно-ортогональные пары лучей лазеров, то есть лучи падают на атом с шести направлений, то действующая на атом результирующая сила будет зависеть от его скорости и действовать в направлении, противоположном этой

скорости. Из-за сходства с силой вязкого трения такую систему пучков называют «оптическая патока». Благодаря этому механизму все атомы, охлаждаемые в области лазерных пучков, будут дрейфовать к центру ловушки и образовывать там облако холодных атомов.

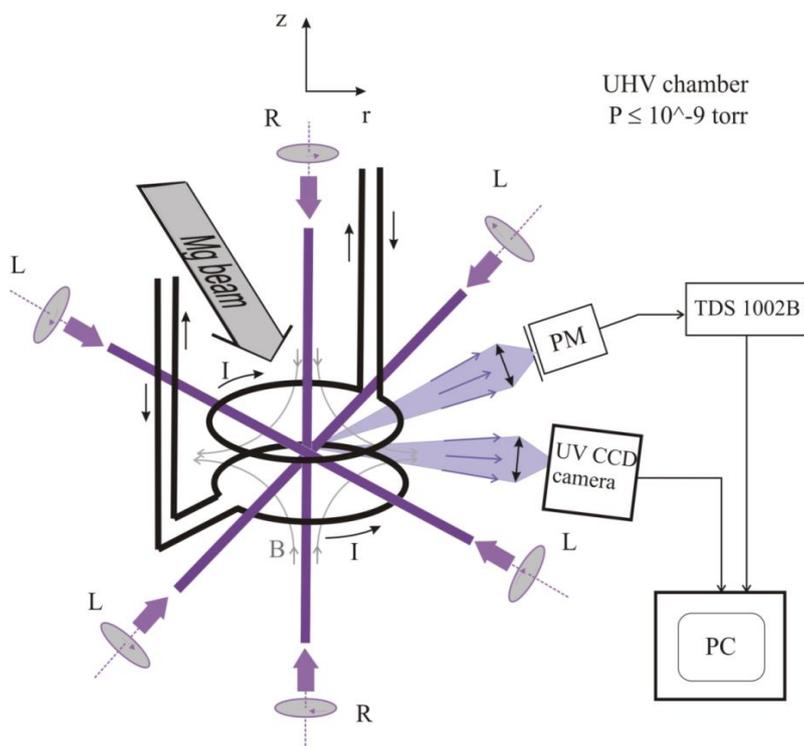


Рис.1. Общая схема магнитно-оптической ловушки.

2.1 Роль магнитного поля в МОЛ

Магнитно-оптическая ловушка представляет собой комбинацию квадрупольной ловушки и трех пар ортогональных оптических полей.

Схема квадрупольной ловушки представлена на рис.2 и представляет собой два соосных кольца с токами, противоположного направления, и расстоянием между центрами, которое равно их среднему радиусу. В такой конфигурации в центре системы имеется зона однородного магнитного поля. Такую систему называют кольцами Гельмгольца и используется для получения постоянного, переменного или импульсного магнитного поля с зоной однородности[5].

Магнитные ловушки используют для захвата атомов в магнитным полем. Потенциальная яма в этом случае образуется за счёт градиентной силы дипольного взаимодействия магнитного момента атома с магнитным полем.

Захват атомов в такой ловушке осуществляется силой радиационного давления лазерного излучения за счёт переходов между магнитными подуровнями основного и возбуждённого состояний атома в магнитном поле. Пространственная неоднородность магнитного поля приводит к зависимости величины этой силы от координаты и скорости атома. В магнитной ловушке с квадрупольным потенциалом сила радиационного давления одновременно смещает атомы к центру ловушки и охлаждает их в окрестности этого центра. Минимально достижимая температура атомов в такой ловушке составляет величину примерно равную доплеровскому пределу охлаждения. В типичных конфигурациях, температура атомов достигает значения от 1 мК до 10 мК.

Теоретические расчеты параметров МОЛ

Суммарный модуль магнитного поля можно получить из закона Био-

Савара Лапласа: $\mathbf{H} = \frac{1}{4\pi} \oint \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3}$. На оси кольца с током ненулевая компонента

только H_z . Интеграл в этом случае запишется в виде: $H_z = \frac{I}{4\pi} \oint \frac{\sin \alpha dl}{(r_0^2 + z^2)}$, где

$\sin(\alpha) = r_0 / (r_0^2 + z^2)^{0.5}$, r_0 - радиус кольца, а пределы интегрирование по dl от нуля до $2\pi r_0$. В итоге на оси кругового витка напряженность магнитного поля

получается: $H_z = I \frac{r_0^2}{2(r_0^2 + z^2)^{3/2}}$. Для $z=0$ получаем: $H_z = \frac{I}{2r}$.

Выражение зависимости величины модуля магнитного поля в ловушки имеет вид: $B=G(r^2 + 4z^2)^{0.5}$, где, r, z - радиальная и осевая координаты, G - величина градиента поля (магнитной индукции). Соотношение между радиусом (r_0) колец с током и расстоянием между ними (a) выбрано следующим: $a=1.25r_0$. В этом случае имеем одинаковые максимальные величины поля на оси z и в плоскости ($r, z=0$), а величина градиента не зависит от координат. Градиент осевой компоненты H_z на оси кругового витка с током

получается дифференцированием по z : $G = \frac{3}{2} \frac{r_0 z I}{(r_0^2 + z^2)^{5/2}}$. Поле будет равно

нулю для двух соосных колец с противоположными токами (квадрупольная ловушка) в центре симметрии, а градиент поля вдоль оси в центре системы

будет равен: $G = \frac{3}{2} \frac{r_0^2 a I}{(r_0^2 + \frac{a^2}{4})^{5/2}}$ (Для $a=1.25r_0$ $G=0.822 I/r_0^2$). Для случая поля в

произвольной точке (r, z) в расчетах используем векторный потенциал ($\mathbf{B}=\text{rot}\mathbf{A}$). В силу симметрии для витка с током отлична от нуля только φ -компонента векторного потенциала:

$$A(r, z) = \frac{\mu N r_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\cos \varphi d\varphi}{(z^2 + r^2 + r_0^2 - 2r r_0 \cos \varphi)^{0.5}}$$

Здесь μ - магнитная проницаемость. Для малых отклонений по радиусу $r/r_0 \ll 1$ в плоскости кольца разложение знаменателя по r/r_0 приводит интеграл к виду

$\int_0^{2\pi} (1 + \frac{r}{r_0} \cos \varphi) d\varphi$. Далее, $\int_0^{2\pi} \cos \varphi d\varphi = 0$, $\int_0^{2\pi} \cos^2 \varphi d\varphi = (\frac{\varphi}{2} + \frac{\sin \varphi}{4}) \Big|_0^{2\pi}$. Первый член

дает π , второй - 0. Окончательно: $A(r,0) = \frac{\mu IN}{4} \frac{r}{r_0}$. В цилиндрической системе

координат компоненты вектора \mathbf{B} определяются через векторный потенциал (осесимметричные токовые витки, векторный потенциал имеет только компоненту A_φ) следующим образом:

$$B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [rA(r,z)] ; B_r = -\frac{\partial}{\partial z} A(r,z). \text{ Подставляя, имеем: } B_z = \frac{\mu_0 IN}{2r_0}.$$

Время включения и выключения магнитного поля. Постоянная времени τ электрической цепи, определяется индуктивностью катушек L и их внутренним омическим сопротивлением R : $\tau=L/R$ [1].

$\frac{LI^2}{2} = E_m$ $E_m = \int_v \frac{B^2}{2\mu_0} dv$. Оценку для E_m квадрупольной ловушки можно сделать

для одномерного случая, считая $dv = \pi r_0^2 dz$, $B = Gz$, $a \approx r_0$. В результате

получаем $E_m \approx \frac{G^2 r_0^5}{24\mu_0} = \frac{B_m^2 r_0^3}{24\mu_0}$, где B_m -величина максимального поля. Для

индуктивности имеем: $L = \frac{2E_m}{I^2} = \frac{2E_m N^2}{(IN)^2}$, где IN -величина ампер-витков одной

катушки, N -число витков одной катушки. Для градиента поля по оси z имеем:

$\frac{dB}{dz} = 0.822\mu_0 \frac{IN}{r_0^2}$. Для энергии поля имеем: $E_m \approx 0.028\mu_0 (IN)^2 r_0$. Для

индуктивности: $L \approx 0.056\mu_0 N^2 r_0$. Однако получается сильно заниженное значение при сравнении с измеряемыми значениями. Лучшее приближение дает формула: $L \approx 2\pi\mu_0 N^2 r_0$. Для омического сопротивления одной катушки

имеем: $R = \rho \frac{2\pi r_0 N}{S_1}$. Где S_1 поперечное сечение провода, ρ -удельное

сопротивление.

3 Экспериментальная часть

На первой стадии настройки ловушки, необходимо совместить лазерные пучки точно в центре магнитного поля, создаваемого катушками. Это реализуется по визуальному положению светящегося под действием лучей облака атомов используемого вещества. Установив оптимальную отстройку, таким образом, совмещая все 6 лучей в центре, можно наблюдать начальную стадию захвата атомов. Опыт на самой магнитно-оптической ловушке проведен не был, но было изучено оборудование изображенное на рис.4. Как упоминалось выше, измерение проводились на квадрупольной ловушке, так как вклад в магнитное поле лазерная система не дает. Используя получившие выше соотношения, приведены расчеты компонент поля в квадрупольной ловушке с параметрами, $a=1.25r_0$, $r_0=1$, $I=1$.

В квадрупольной системе при $a=1.25r$ значения радиальной и осевой компоненты поля, создаваемые одной катушкой в другой, одинаковы, что видно из графиков(представлены ниже рис.2 и рис.3).

Напряженность поля в А/м, $H_r=H_z=0.059IN/r_0$, где r_0 измеряется в метрах.

Тогда осевая компонента силы $F_z = 2\pi_0 V_r IN$. Итого имеем для $IN=1$ ампер-витков: $G_z = 0,82$ Гс/см, $F_z=0.08$ Ньютона, $H_r=H_z=6$ Гс/м.

Индуктивность составила $L \approx 6$ мкГн, тогда время установления поля равно около 10 микросекунд.

Графики получены специальной программой, предназначенной для данной установки, которая управляла движком, к которому был зафиксирован датчик-Холла, мерящий магнитное поле.

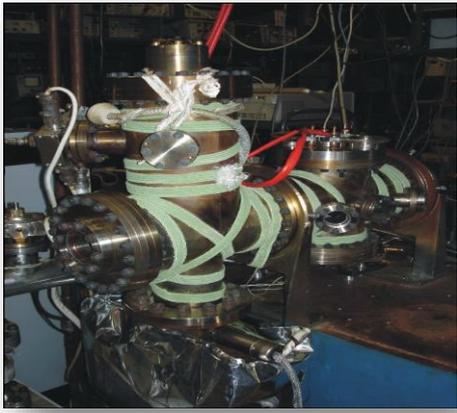


Рис.4. Фотография магнито-оптической ловушки

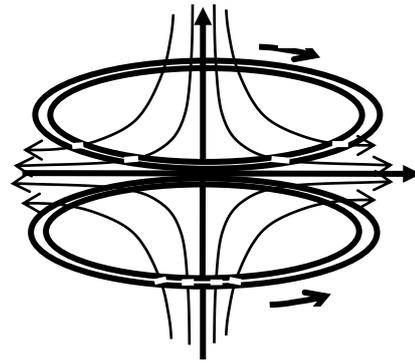


Рис. 1. Схема квадрупольной ловушки

На рисунках представлены экспериментально измеренные компоненты поля. Из них видно, что максимальные значения поля на оси и в центральном сечении совпадают, а в центральной области ловушки величины градиента по оси и градиента по радиусу различаются в два раза.

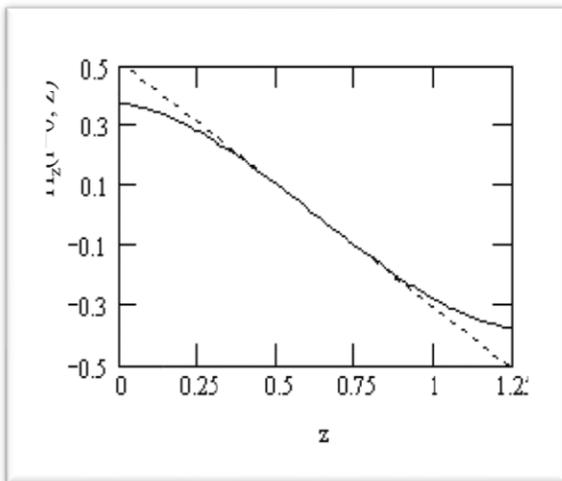


Рис 2. Поле на оси квадрупольной ловушки (сплошная кривая).

Пунктирная прямая $H_z=0.822(a/2 - z)$

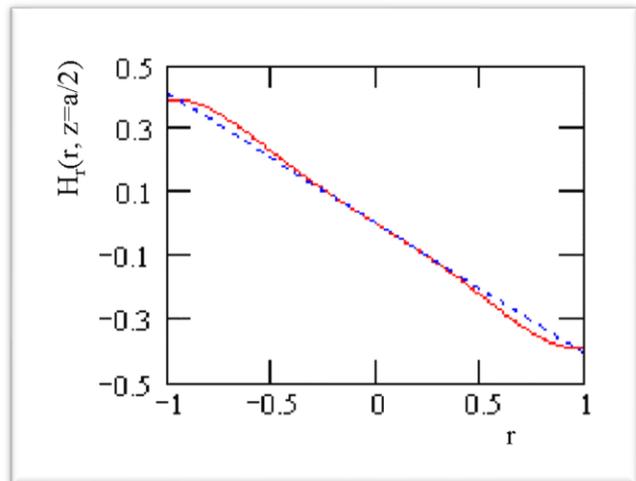


Рис. 3. Зависимость радиальной компоненты поля

в центральном сечении от радиуса (сплошная кривая)

Пунктирная - прямая $H_r=0.411r$

3 Выводы и заключение

В результате проведенной работы были освоены принципы работы магнитно-оптической ловушки, теоретически рассчитаны и экспериментально определены радиальная и осевая зависимость магнитного поля от координат. Экспериментальная кривая с хорошей точностью накладывается на теоретическую. Экспериментально определенная постоянная времени включения магнитного поля составила 10 микросекунд, так же определены величина магнитного поля однородной области и сила взаимодействия колец.

4 Список литературы

1. Бонерт. А.Э, Управление движением атомов магния резонансным излучением //2004.
2. Harold J Metcalf, Peter van der Straten. Laser Cooling and Trapping. // Springer, 1999.
3. Сукачѐв Д. Д, Лазерное охлаждение атомов тулия// 2013.
4. П.Н. Мелентьев, П.А. Борисов, В.И. Балыкин. Лазерное зеэмановское охлаждение атомов в поперечном магнитном поле// 2004.
5. Сыроватка Р.А, Кулоновские структуры микрочастиц в электродинамических ловушках при атмосферном давлении//2018.
6. Снигирев С. А, Спектроскопия 5D уровней рубидия в магнитооптической ловушке//2014.
- 7.Саакян С.А, Экспериментальные исследования свойств газа ультрахолодных высоковозбужденных и частично ионизованных атомов лития-7//2016.
8. Гайнутдинов Р.Х., Калачев А.А., Мутыгулинна А.А., Хамадеев М.А., Салахов М.Х., Взаимодействие атомов с полем лазерного излучения и резонансная флуоресценция//2013
9. Аллен Л., Эберли Дж, Оптический резонанс и двухуровневые атомы//1978.