

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Жерибор Максим Олегович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Измерение магнитного поля системы оптического магниевого
стандарта частоты**

Практикум электричества и магнетизма, 2 курс, группа № 18302

Научный руководитель:

к.ф.-м.н., А. Э. Бонерт

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

к.т.н. Астрелин В.Т.

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. Астрелин В.Т.

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск, 2019 г.

Аннотация

Магнитооптическая ловушка (МОЛ) применяется для захвата и охлаждения нейтральных атомов, которые используются в лазерной спектроскопии. В данной работе исследовано распределение магнитного поля в модели магнитной системе МОЛ с использованием датчика Холла. Получены экспериментальные и расчетные зависимости магнитной индукции от координат. Расхождение экспериментальных и расчетных значений зависимостей не превышает 0.4%. Приведены графики зависимости магнитной индукции от координаты.

Ключевые слова: Квадрупольная магнитная ловушка, лазерная спектроскопия, оптический стандарт частоты

Оглавление

1. Введение	4
2. Теоретическая часть	5
2.1 Магнито-оптическая ловушка	5
2.2 Датчик Холла.....	8
3. Экспериментальная часть	10
3.1 Описание эксперимента	10
3.2 Схема эксперимента.....	11
3.3. Результаты эксперимента	13
4. Обсуждение результатов.....	14
5. Заключение	14
6. Список литературы	15

1. Введение

Для проведения любых измерений необходимы стандарты, эталоны, от точности которых зависит точность измерений. Частота и время являются наиболее точно измеряемыми величинами за счёт точности их эталона. В данный момент первичным стандартом частоты является частота стабильного перехода между подуровнями сверхтонкой структуры атома ^{133}Cs , лежащая в микроволновом диапазоне (~ 9.2 ГГц). Этот стандарт частоты получил широкое распространение в таких навигационных системах как GPS и ГЛОНАСС. Именно благодаря стабильности и точности атомного стандарта частоты имеет место высокая точность определения координат при помощи данных систем навигации.

Но относительная погрешность данного стандарта частоты ($\sim 2 \cdot 10^{-6}$) на основе “фонтана” атомов цезия достигла, по всей видимости, своего предела [1]. Дальнейшее повышение точности стандарта частоты связывается с переходом в оптический диапазон. Так же главным преимуществом оптических стандартов является то, что высокая стабильность может быть получена за короткие времена усреднения, то есть можно существенно быстрее производить точные измерения.

Экспериментальные исследования по созданию оптических стандартов частоты на основе холодных атомов ведутся в ведущих метрологических центрах мира. Нейтральный атом магния представляет наибольший интерес для данного исследования ввиду малого сдвига частоты перехода от теплового излучения и простоты структуры электронных оболочек. Для реализации перечисленных преимуществ необходимо обеспечить охлаждение атомов магния до ультранизких температур порядка 1-10 мК.

Захват и охлаждение атомов в магнито-оптической ловушке является первым этапом для получения ультра-холодных атомов магния, необходимых для создания оптического стандарта частоты. Магнито-оптическая ловушка для атомов магния имеет свои особенности. Так, для локализации в ней атомов с

помощью сильного резонансного перехода $^1S_0 - ^1P_1$ требуется большой (100–150 Гс/см) градиент магнитного поля [1].

2. Теоретическая часть

2.1 Магнито-оптическая ловушка

Для изучения атомов магния на часовом переходе необходимо значительно понизить их температуру. Для этого используется магнито-оптическая ловушка (рис. 1). В ней происходит лазерное охлаждение, а после захват атомов с

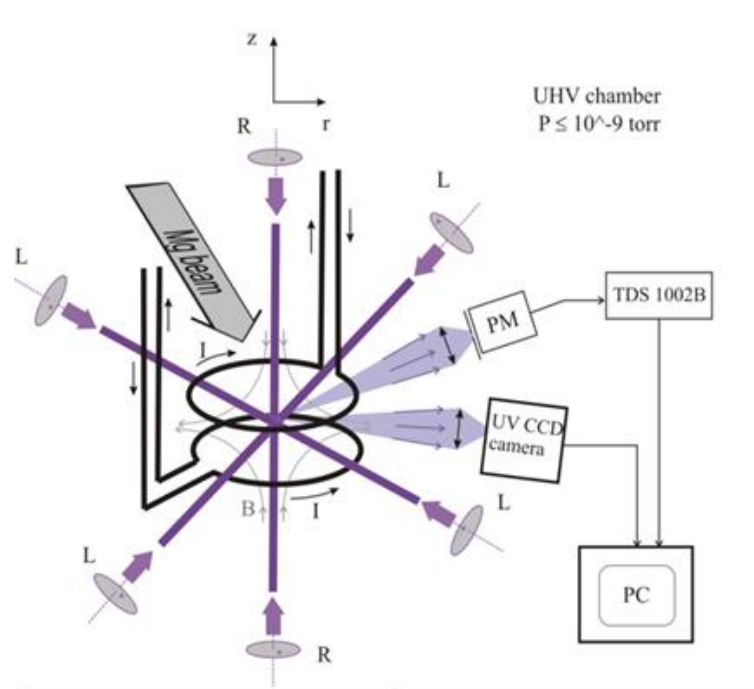


Рис. 1. Схема магнито-оптической ловушки

помощью квадрупольной ловушки. Лазерное охлаждение происходит вследствие силы радиационного спонтанного светового давления в поле бегущей и стоячей волны [2]. Этот метод позволяет охлаждать атомы до температуры, называемой пределом Доплера – $T_D = \hbar\gamma/2k_B$ (где $\hbar$ - постоянная Планка, γ - обратное время жизни возбужденного уровня, k_B - постоянная Больцмана), что для атома магния составляет 1.9×10^{-3} К [3]. С квантовой точки зрения появление силы радиационного давления может описываться следующим образом. После поглощения кванта внешнего поля атомом он переходит в возбужденное состояние, при этом импульс атома изменяется на импульс фотона, который равен $\hbar k$. Обратно в основное состояние атом может вернуться двумя способами:

либо вследствие вынужденного испускания фотона, либо спонтанно излучая фотон в случайном направлении. В первом случае атом изменит свой импульс на $-\hbar k$, так что атом оказывается в основном состоянии с исходным импульсом. Таким образом, можно сделать вывод о том, что только вынужденные переходы при поглощении и испускании фотонов не дают вклада в среднюю силу светового давления. Во втором случае, когда происходит спонтанное излучение фотона в направлении N , результирующий импульс атома, находящегося в основном состоянии, изменяется на величину $\hbar k - \hbar Nk$. Исходя из того, что все направления N при спонтанном излучении равновероятны, среднее значение N равняется нулю. Это означает, что в среднем за цикл, который включает в себя поглощение фотона внешнего поля и последующее спонтанное испускание, атом приобретает импульс порядка $\hbar k$ (эффект отдачи). Выражение для силы имеет вид:

$$F = \frac{\hbar k \gamma S}{(1 + S + (\Delta \pm kv)^2 / \gamma^2)}$$

где k - волновой вектор, γ - обратное время жизни атома в возбужденном состоянии, S - параметр насыщения, Δ - отстройка частоты лазерного излучения от частоты перехода, знак «+» перед kv соответствует встречному движению атома и волны, «-» - однонаправленному движению.

Тепловые атомы движутся со скоростями порядка нескольких сотен м/с. Для охлаждения тепловых атомов используется взаимодействие встречных световых волн с отрицательной отстройкой Δ . В такой ситуации, при движении атомов навстречу одной из волн, соответствующая этой волне отстройка уменьшается за счет эффекта Доплера, а радиационная сила увеличивается. В силу процессов перепоглощения фотонов скорость атома остается конечной (доплеровский предел температуры). Положение охлажденного облака атомов зависит от баланса амплитуд волн, и если амплитуда одной волны возрастет, то облако начнет дрейфовать. В случае экспериментов по спектроскопии такая ситуация недопустима, поэтому необходима локализация охлажденного облака атомов.

Для локализации охлаждаемых атомов используется магнитное поле. Можно рассмотреть требуемую ситуацию в виде 1D – модели (рис. 2).

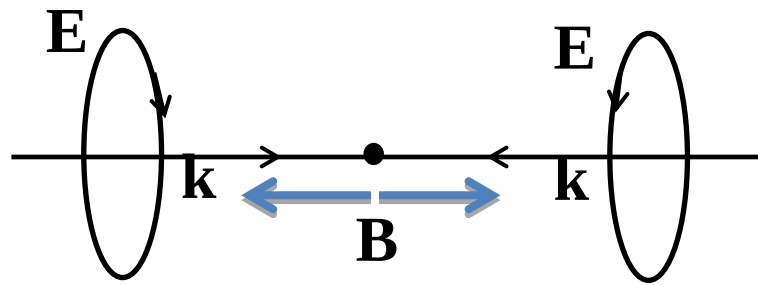


Рис. 2. Схема 1D – модели МОЛ

Выражение для радиационной силы принимает вид:

$$F = \frac{\hbar k \gamma S}{(1 + S + (\Delta - kv - \mu Gx)^2 / \gamma^2)} + \frac{-\hbar k \gamma S}{(1 + S + (\Delta + kv + \mu Gx)^2 / \gamma^2)}$$

где G – градиент магнитного поля, $\mu = \mu_0 g J = 1.4 \times 10^6 \text{ Гц/Гс}$, J – электронный момент, g – фактор Ланде, x –координата.

В данном случае на атомы действуют две встречные силы, зависящие от магнитного поля. Поляризация волны выбирается следующим образом: магнитный момент необходимо направить относительно магнитного поля таким образом, чтобы вклад от встречной волны в суммарную силу был по модулю больше. Следовательно, встречная световая волна будет возвращать атом назад, а магнитное поле не позволит охлажденному облаку начать дрейфовать. Так можно добиться значительного охлаждения атома для последующей локализации.

За создание магнитного поля внутри ловушки отвечает система, называемая квадрупольной ловушкой Пауля. Она представляет собой два соосных кольца с

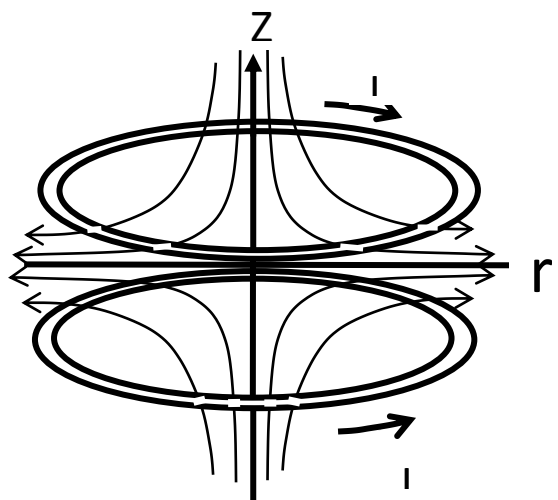


Рис. 3. Схема квадрупольной магнитной ловушки

токами противоположного направления (рис. 3).

Магнитное поле такой ловушки в центре равно нулю и возрастает по отхождению от центра системы, причём по оси градиент индукции магнитного поля растёт в 2 раза быстрее, чем по радиальной составляющей. Также при переходе через центр компоненты меняют знак. Обычно соотношение между радиусом (r_0) колец с током и расстоянием между ними (a) следующее: $a = 1.25r_0$. В этом случае ловушка имеет одинаковые максимальные величины поля на оси z и в плоскости ($r, z=0$), а величины градиента по осям постоянны в широкой области между колец. В системе магнито-оптической ловушки кольца одновитковые - это необходимо для того, чтобы минимизировать индуктивность системы, что позволяет уменьшить время включения/выключения магнитного поля.

Магнитное поле, создаваемое проводником с током, описывается по закону Био-Савара, который записывается таким образом:

$$dB = \frac{I[dl \times r]}{cr^3} \quad (1)$$

где B – вектор магнитной индукции, I – ток, протекающий по проводнику, r – вектор расстояния до точки наблюдения, c – постоянная скорости света [4]. Тогда для двух катушек формула магнитной индукции на оси, с учётом количества витков, будет записана в следующем виде:

$$B = \frac{2\pi r^2 IN}{c} \left(\frac{1}{\left(r^2 + \left(z + \left(\frac{a}{2}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}}\right)} + \frac{1}{\left(r^2 + \left(z - \left(\frac{a}{2}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}}\right)} \right) \quad (2)$$

где N – количество витков одной катушки, r – радиус катушки, z – координата точки на оси, a – расстояние между катушками.

2.2 Датчик Холла

Датчик Холла – прибор, основанный на эффекте Холла и измеряющий напряженность магнитного поля.

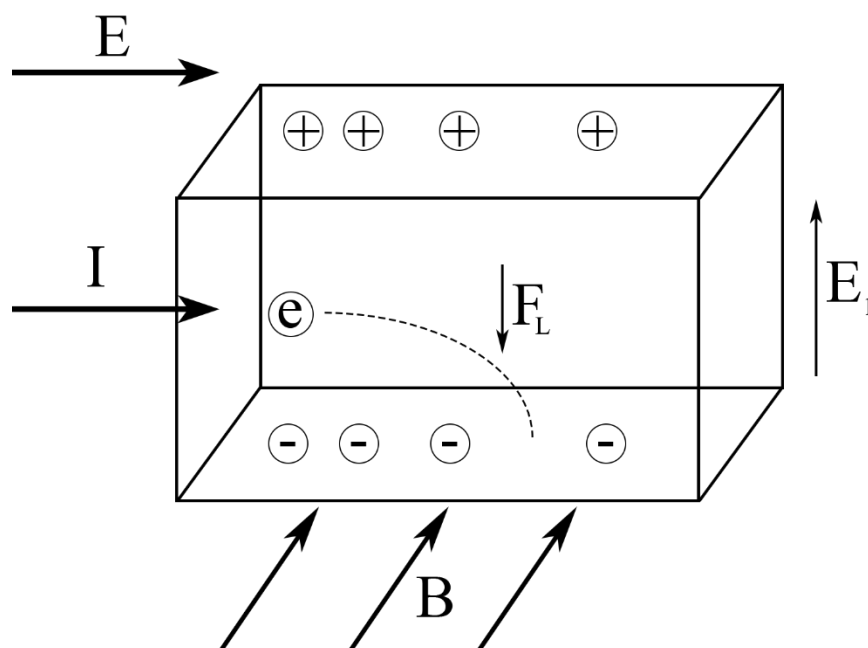


Рис. 4. Схема датчика Холла

Эффект Холла – явление возникновения поперечной разности потенциалов (также называемой холловским напряжением) при помещении проводника с постоянным током в магнитное поле. В простейшем рассмотрении эффект Холла можно описать следующим образом. Пусть имеется проводящий брусок в магнитном поле, через который течёт ток с плотностью j под действием напряженности E . Под действием магнитного поля B носители заряда будут отклоняться к одной из сторон бруска. Таким образом, под действием силы Лоренца на одной из сторон бруска будет накоплен положительный заряд, а на противоположной – отрицательный. Заряд будет накапливаться до тех пор, пока возникающее электрическое поле E_1 не скомпенсирует силу Лоренца:

$$E_1 = \frac{1}{ne} jB \quad (3)$$

Тем самым создастся разность потенциалов между двумя сторонами бруска. Эту разность потенциалов назовём холловским напряжением. На выходе датчика Холла имеем это напряжение, прямо пропорциональное напряженности магнитного поля через него.

В данной работе был использован датчик Холла модели HW-322В. Для последующего перевода полученных значений требовалось найти коэффициент

пропорциональности между холловским напряжением на выходе датчика (в мВ) и напряженностью магнитного поля (в Гс). Для этого использовалась калибровочная катушка, параметры которой нам известны: два кольца по 9 витков, расстояние между кольцами равно 100 мм, радиус колец равен 20 мм. С учётом того, что в калибровочной катушке ток шел в одном направлении по обоим кольцам, по формуле (2) был вычислен максимум поля в нуле по оси. Затем было произведено измерение магнитного поля в нуле с помощью имеющегося датчика Холла. После этого был вычислен искомый коэффициент. Его величина составила 0,00625 Гс/мВ при токе датчика 1 мА.

3. Экспериментальная часть

3.1 Описание эксперимента

Цель эксперимента – измерить распределение в пространстве магнитного поля в модели магнито-оптической ловушки. Поскольку система аксиально симметрична, кольца круглые и расположены соосно, можем сделать вывод о том, что имеются только осевая и радиальная компоненты поля. Поскольку токи и кольца одинаковые, но токи направлены в разные стороны, ожидается ноль в центре по оси. На два кольца подается ток, в систему вносится датчик Холла и производится измерение напряженности магнитного поля.

3.2 Схема эксперимента

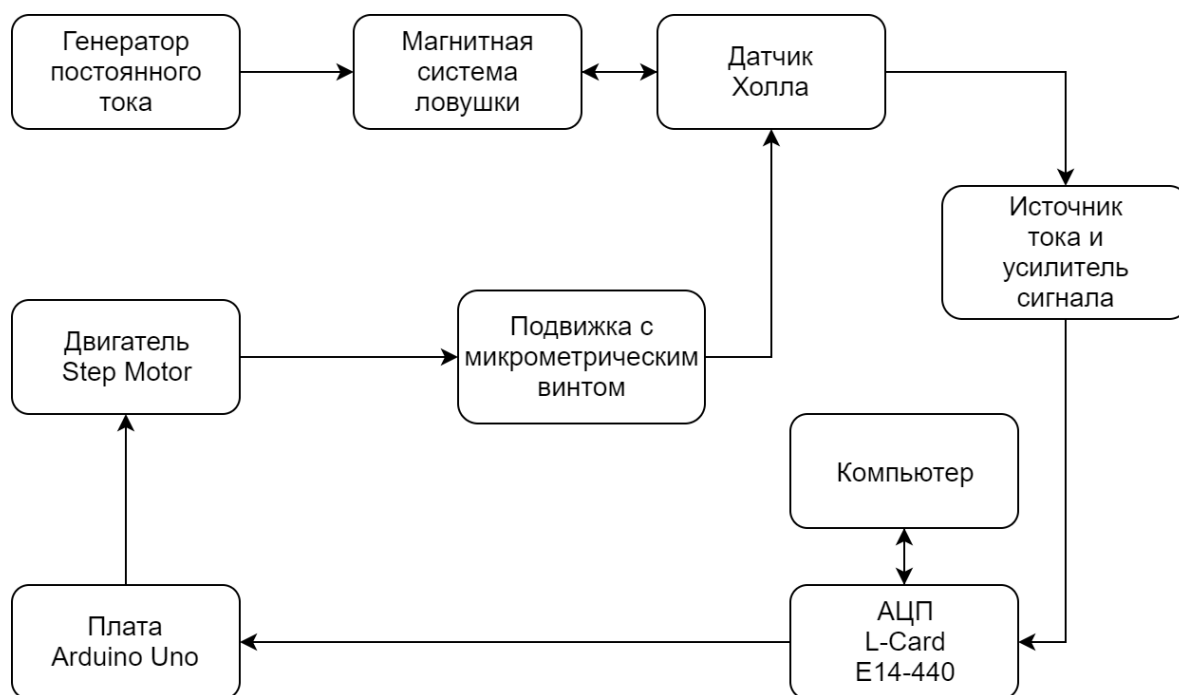


Рис. 5. Схема установки

Для проведения измерений использовалась однокоординатная винтовая подвижка с микрометрическим винтом шага 0.5 мм, на которых крепился датчик Холла HW-322В. Рабочая область датчика была внесена в макет магнитной системы ловушки, состоящий из двух одновитковых медных колец. Учитывая то, что наша экспериментальная система простая, и то, что используемый датчик Холла должен быть способным чувствовать измеряемую величину напряженности магнитного поля, будем использовать ток амплитудой 1А для создания магнитного поля. Перемещение датчика внутри области осуществлялось при помощи шагового двигателя Step Motor, контролируемого платой Arduino Uno с соответствующей прошивкой. С помощью программного обеспечения LabWindows на языке программирования С была написана программа, позволяющая управлять двигателем и регистрировать показания датчика Холла (рис. 6).

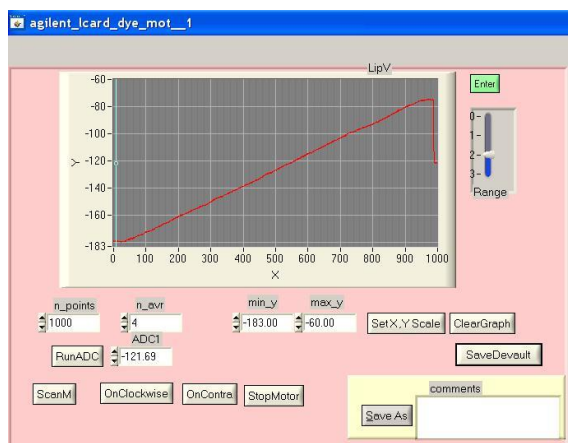


Рис. 6. Интерфейс программы для управления положением датчика Холла
и регистрации его сигнала.

Порядок измерения осевой и радиальной компоненты представлен на рис. 7 и рис. 8 соответственно.

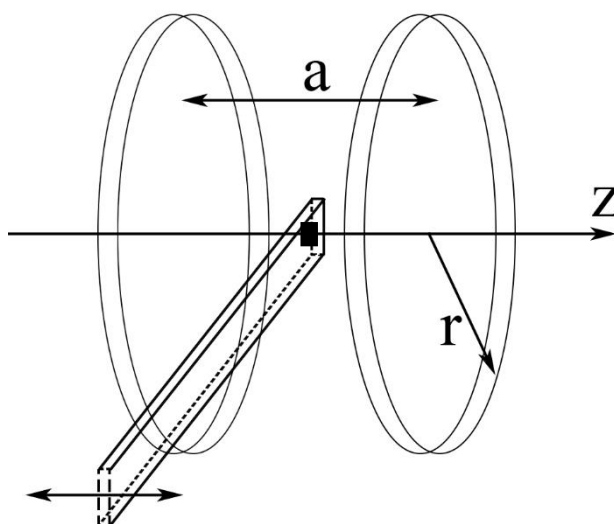


Рис. 7. Измерение осевой компоненты магнитного поля с помощью датчика Холла

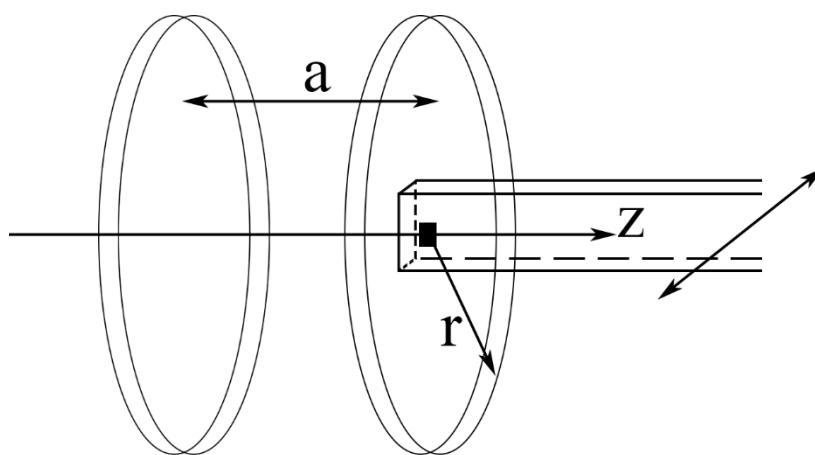


Рис. 8. Измерение радиальной компоненты магнитного поля с помощью датчика Холла

3.3. Результаты эксперимента

В результате измерений были получены следующие данные для осевой (рис. 9) и радиальной (рис. 10) компонент магнитного поля в модели квадрупольной магнитной ловушки Пауля.

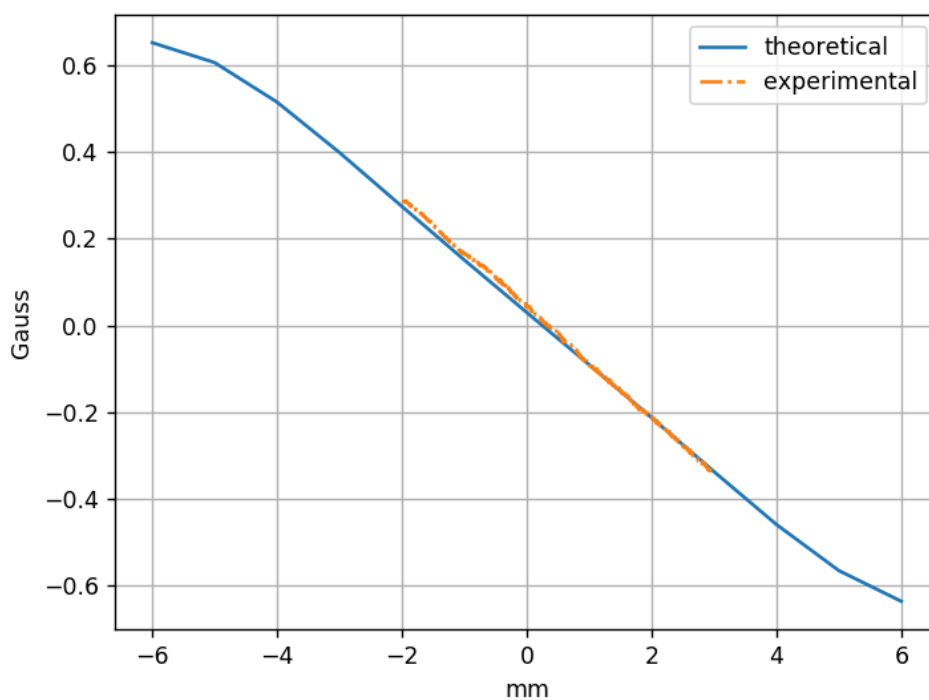


Рис. 9. Сравнение экспериментальных результатов с теоретическими для осевой компоненты магнитного поля

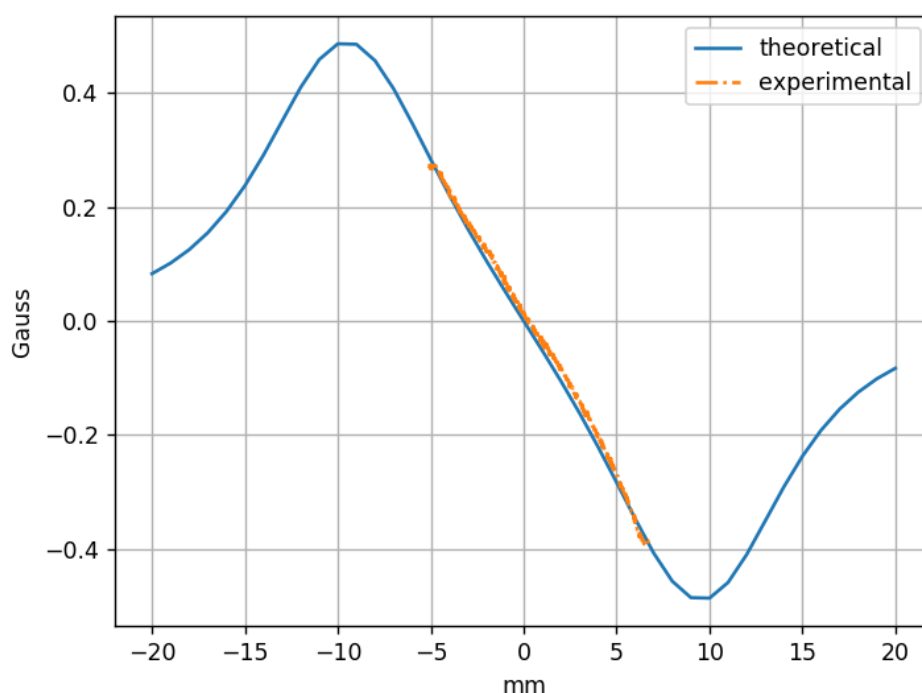


Рис. 10. Сравнение экспериментальных результатов с теоретическими для радиальной компоненты магнитного поля

4. Обсуждение результатов

Можем видеть, что полученные в результате эксперимента результаты совпадают с расчётными графиками с точностью 0.4%. Возможными причинами расхождения теоретических и экспериментальных данных могут являться погрешности при измерениях размеров катушки и хода датчика Холла, а также при расчёте коэффициента Холла.

5. Заключение

В ходе выполнения данной работы была собрана установка для экспериментальной проверки распределений магнитного поля в магнитной системе стандарта частоты на основе холодных атомов магния. В результате были получены данные, совпадающие с теоретическими с точностью 0.4%. Это позволяет использовать установку для проверки модификаций магнитной системы. В частности, использовать её в режиме однонаправленного включения токовых колец, который используется в стандарте частоты при тестировании часового перехода.

6. Список литературы

1. A. N. Goncharov, A. E. Bonert, D. V. Brazhnikov, A. M. Shilov, S. N. Bagayev, "Precision spectroscopy of Mg atoms in a magneto-optical trap", *QUANTUM ELECTRON*, 2014, **44** (6), 521–526
2. В. И. Балыкан, В. С. Летохов. Лазерная оптика нейтральных атомных пучков, Москва, 1990.
3. Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения. 2009.
4. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Учеб. пособие: Для вузов. В 5 т. Т. III. Электричество, 2004, 221