

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Французов Максим Евгеньевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

Изучение влияния железных подставок на поле квадрупольной линзы

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18307

Научный руководитель:

н.с. А. С. Цыганов

Оценка научного руководителя

«__»_____20____ г.

Преподаватель практикума:

А. Г. Харламов

Оценка преподаватель практикума

«__»_____20____ г.

Куратор практикума:

В. Т. Астрелин

Итоговая оценка

«__»_____20____ г.

Изучение влияния железных подставок на поле квадрупольной линзы

Французов Максим Евгеньевич

Физический факультет. Электромагнитный практикум. Курсовая работа.

Группа №18307, 3 семестр, 2019 год.

Научный руководитель:

Цыганов Александр Сергеевич

Аннотация

Целью работы являлось изучение влияния железной подставки квадрупольного магнита на магнитное поле, и найти способ уменьшить это влияние. В ходе экспериментов был задействован квадрупольный магнит, 17 датчиков Холла, железные подставки. Датчики Холла находились в поперечном сечении квадрупольной линзы и могли свободно перемещаться вдоль продольной оси симметрии квадрупольной линзы. Магнитное поле в квадрупольной линзе представляет собой линейную зависимость. Но так как квадрупольная линза расположена на железных подставках, они намагничиваются и вносят свой вклад в магнитное поле, добавляя секступольную компоненту разложения скалярного потенциала. Данный эффект заключался в появлении линейной зависимости от координаты градиента магнитного поля в поперечном сечении квадрупольной линзы. Чтобы скомпенсировать данный эффект, симметрично подставкам были расположены такие же железные бруски, что уменьшило влияние секступольной компоненты разложения.

Ключевые слова: квадрупольная линза, секступольная компонента магнитного поля, ферромагнитная подставка.

Оглавление

Введение.....	4
1 Теоретическая часть.....	5
1.1 Квадрупольный магнит.....	5
1.2 Датчик Холла.....	8
1.3 Механизм намагничивания	10
2 Экспериментальные данные и схема установки	10
3 Заключение	13
Список литературы	13

Введение

Квадрупольные линзы в сегодняшнее время находят применение на ускорителях элементарных частиц. Эти установки служат средством фокусировки пучка частиц. Как известно, поле внутри квадруполья описывается уравнениями Максвелла и полностью определяется граничными условиями. Из курса электродинамики нам известно, что ферромагнетик, помещенный в магнитное поле, намагничивается и создает собственное магнитное поле. Так как магнитный квадруполь стоит на железных подставках, а железо является ферромагнетиком, то поле магнита становится асимметричным, и квадрупольная линза становится менее полезной.

Целью данной работы являлось подтверждение и изучение влияния на поле, и попытка ослабить это влияние.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Построить картину градиента поля с железными подставками, для чего необходимо:
 - 1) Выбрать ток, при котором влияние железа существенно
 - 2) Поместить датчики Холла в квадруполь
 - 3) Собрать данные
2. Исследовать влияние железных подставок
3. Найти способ его ослабить

1 Теоретическая часть

1.1 Квадрупольный магнит

Квадрупольный магнит (Рисунок 1) представляет собой устройство для фокусировки пучков заряженных частиц с помощью магнитного или реже электрического поля квадрупольной конфигурации.



Рисунок 1. Магнитный квадруполь QP11 $G_n=100$ T/m (контракт FAIR HEBT)

Магнитное поле квадруполя (Рисунок 2.) описывается уравнениями Максвелла. Предположим, что надо сфокусировать пучок частиц по одной из координат, то есть частица с отклонением x должна получить толчок к оси пучка, пропорциональный её отклонению: $\Delta x' = P \cdot x = \frac{\int H_y(x,s)ds}{pc}$. Иными

словами, вертикальная компонента магнитного поля линзы должна иметь линейную зависимость от поперечной координаты:

$$H_y(x) = G \cdot x \quad (1)$$

Будем считать, что линза бесконечно длинная, то есть задача двумерна, продольная компонента поля отсутствует. Тогда из уравнений Максвелла в вакууме следует связь между компонентами поля:

$$\text{rot} \vec{H} = 0 \rightarrow \frac{\partial H_x}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

Скалярный потенциал в этом случае имеет вид:

$$\varphi(x, y) = G \cdot xy \quad (3)$$

Нетрудно видеть, что фокусировка частицы по одной из координат ведёт к эквивалентной дефокусировке по второй координате.

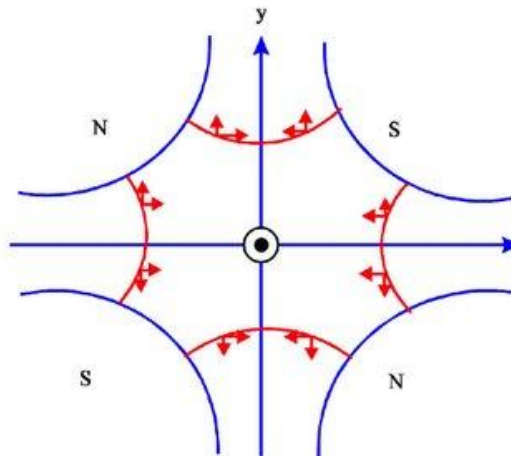


Рисунок 2. Силовые линии магнитного поля

На рисунке 2 можно видеть, что силовые линии в квадруполе описываются гиперболами.

Градиент G поля квадрупольной линзы представляет собой производную

$$G = \frac{\partial H_y}{\partial x} = \text{const}, \text{ а это значит, что градиент поля постоянен по ширине}$$

квадрупольной линзы и поле растет линейно.

На самом деле существует более универсальный способ вывода формул, описывающих поле квадруполь. В силу того, что поле зависит только от поперечной и продольной координаты, можно искать скалярный потенциал в виде:

$$\varphi(r, \theta) = \sum_{m=0}^{\infty} r^m \{A_m \cos m\theta + B_m \sin m\theta\} \quad (4)$$

Магнитное поле при этом выражается через скалярный потенциал формулой:

$$\vec{B} = -\nabla\varphi \quad (5)$$

Для поля квадруполь $m=2$:

$$\varphi(x, y) = A_2(x^2 - y^2) + B_2 2xy \quad (6)$$

$$\vec{B} = B_2(-2y\vec{i} - 2x\vec{j}) \quad (7)$$

$$G = \frac{\partial B_x}{\partial y} = -2B_2 = \text{const} \quad (8)$$

В случае сикступоль, когда $m=3$:

$$\varphi(r, \theta) = A_3 r^3 \cos 3\theta + B_3 r^3 \quad (9)$$

$$\vec{B} = B_3(-3(x^2 - y^2)\vec{j} - 6xy\vec{i}) \quad (10)$$

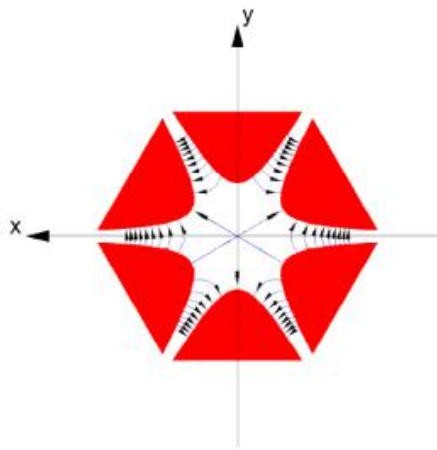


Рисунок 3. Магнитный секступоль в поперечном разрезе

1.2 Датчик Холла

Датчиком Холла называют устройство, с помощью которого измеряют величину магнитного поля используя эффект Холла. Датчик Холла состоит из полупроводниковой прямоугольной пластинки, к которой присоединены четыре электрических вывода. Фотография чувствительного элемента датчика Холла показана на рис.4.

Эффект Холла заключается в следующем. Если вдоль образца пропустить электрический ток I , а перпендикулярно плоскости пластинки создать магнитное поле B , то на боковых плоскостях пластинки возникнет электрическое поле, которое называют полем Холла. На практике, как правило, поле Холла характеризуют разностью потенциалов, которую измеряют между симметричными точками на боковой поверхности образца. Эта разность потенциалов называется Холловской разностью потенциалов U_H или ЭДС Холла ε_H .

В классической теории проводимости эффект Холла объясняется тем, что в магнитном поле на движущиеся электрические заряды действует сила Лоренца, величина и направление которой определяются векторным уравнением:

$$\vec{F} = e[\vec{V}\vec{B}] \quad (11),$$

где $\vec{B}$ - вектор индукции магнитного поля, $\vec{V}$ - вектор скорости движения зарядов, e - заряд носителей тока с учетом знака. В нашем случае $\vec{V}$ перпендикулярно $\vec{B}$ и электрическое поле Холла имеет вид:

$$E_H = VB \quad (12)$$

Поле связано с ЭДС Холла следующим образом:

$$\varepsilon_H = E_H d = VBd \quad (13)$$

Сила тока, который протекает через единицу площади поперечного сечения образца, равна плотности тока:

$$J = enV \quad (14),$$

где n -концентрация носителей тока.

Отсюда сила тока:

$$I = jbd = enVbd \quad (15)$$

Что дает возможность записать:

$$V = I/enbd \quad (16)$$

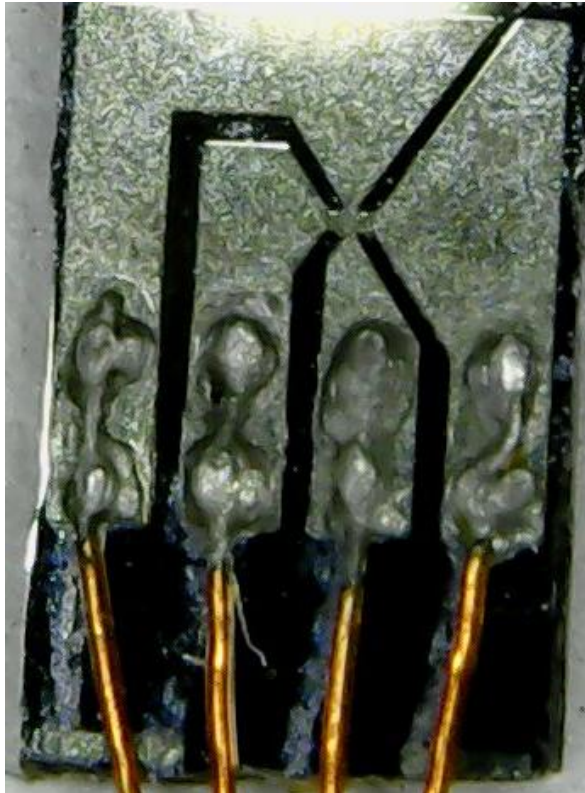


Рисунок 4. Датчик Холла

1.3 Механизм намагничивания

Внесение ферромагнетика в магнитное поле приводит к его намагничиванию, т.е. увеличению средней намагниченности. Зависимость намагниченности $\vec{M}$ от магнитного поля $\vec{H}$ для всех магнитоупорядоченных веществ нелинейная, соответственно магнитная восприимчивость χ не является константой. Если ферромагнетик, находящийся в размагниченном состоянии ($\vec{M} = 0$), поместить в магнитное поле, а затем начать плавно увеличивать поле, то получим начальную кривую намагничивания, примерный вид которой представлен на рис. 5.

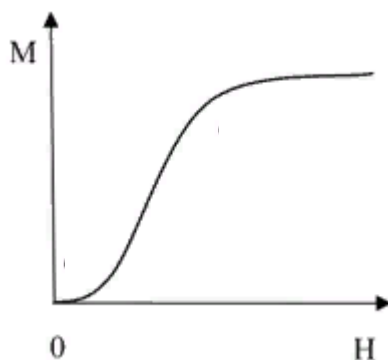


Рисунок 5. Основная кривая намагничивания

Наш квадруполь стоит на железных подставках, а это значит, что влияние на поле квадруполя будут оказывать, скорее всего, именно они, так как железные подставки станут источником вторичного магнитного поля.

2 Экспериментальные данные и схема установки

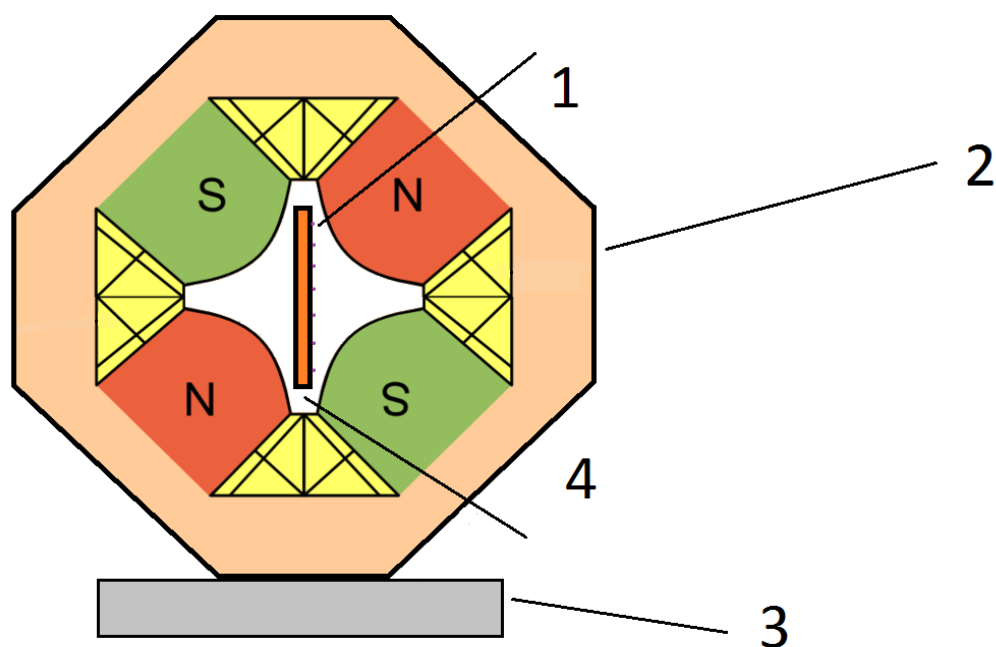
На рисунке 6 показана схема установки, где: 1-датчики Холла, 2-квадрупольная линза, 3-железная подставка, 4-место крепления датчиков.

На основе экспериментальных данных, полученных с помощью датчиков Холла,

был получен график (Рисунок 7) распределения градиента магнитного поля в

Рисунок 6.Схема установки

центре магнита по его высоте. Из графика видно, что присутствие железных подставок делает зависимость градиента поля линейной, а установка дополнительных подставок симметрично нижним выравнивает градиент.



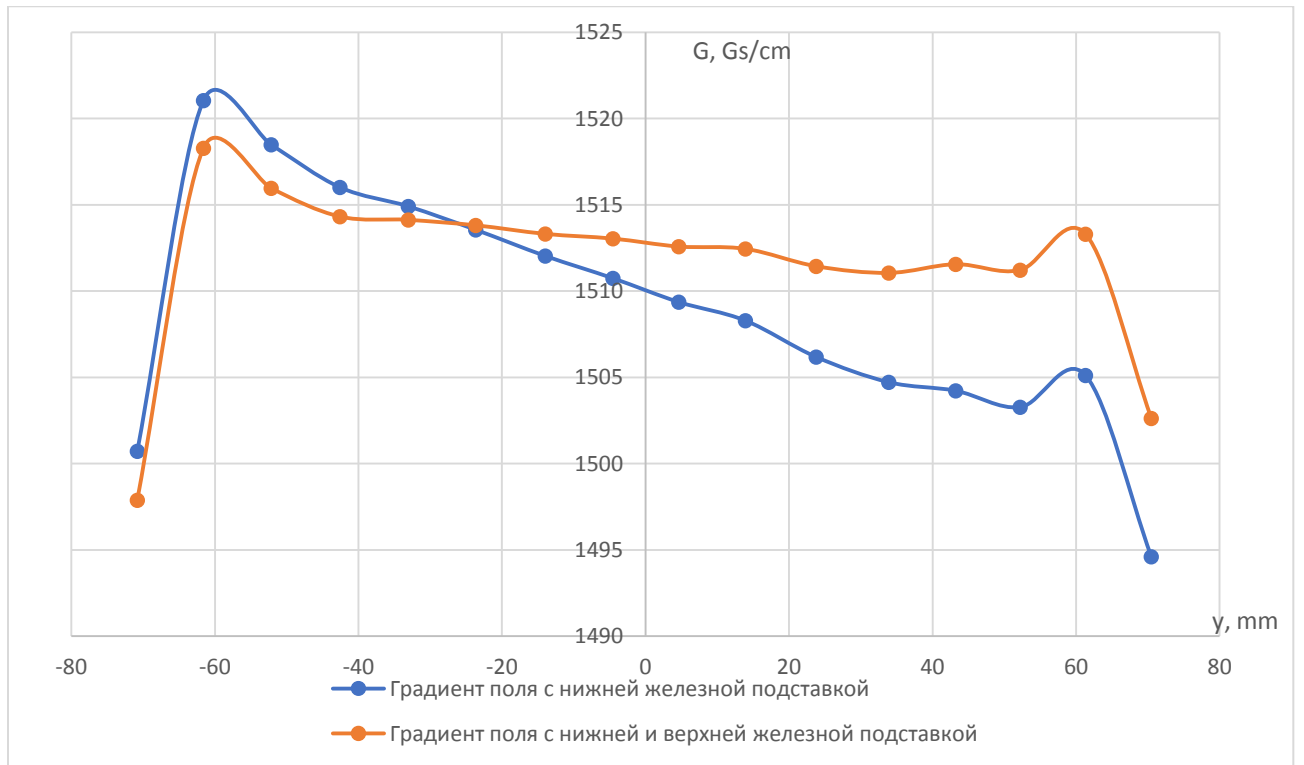


Рисунок 7. Градиент поля

Интерполяция линейной части графика измерений градиента поля с нижней подставкой имеет вид:

$$\frac{\partial B_x}{\partial y} = -0,1518y + 1510,3 \quad (20)$$

Линейная зависимость градиента поля вызвана тем, что железные подставки повлияли на поле таким образом, что в разложении скалярного потенциала (6) добавилась секступольная составляющая:

$$A_3(-3(x^2 - y^2)\vec{i} + 6xy\vec{j}) \quad (17)$$

Напряженность магнитного поля имеет вид:

$$\vec{B} = (-2B_2x + 6A_3xy)\vec{j} + (-2B_2y - 3A_3(x^2 - y^2))\vec{i} \quad (18)$$

Градиент поля соответственно:

$$\frac{\partial B_x}{\partial y} = -2B_2 + 6A_3y \quad (19)$$

3 Заключение

В ходе проделанной работы мы изучили влияния железной подставки квадрупольного магнита на магнитное поле, и нашли способ уменьшить это влияние. Квадрупольная линза располагалась на железных подставках, они намагнитились и внесли свой вклад в магнитное поле, добавив секступольную компоненту разложения. Данный эффект заключался в появлении линейной зависимости от координаты градиента магнитного поля в поперечном сечении квадрупольной линзы. Чтобы скомпенсировать данный эффект, симметрично подставкам были расположены такие же железные бруски, что уменьшило влияние секступольной компоненты разложения.

Список литературы

1. L.N. Hand and W.K.H. Panofsky, Rev. Sci. Instrum. 30, 927 (1959)
2. P. J. Bryant and K. Johnsen, Circular Accelerators and Storage Rings, (Cambridge University Press, UK) 1993, pp. 317 - 319.
3. Белов К. П., Магнитные превращения. М.: ФМ, 1959.
4. Боков В. А., Физика магнетиков. СПб., 2002.