

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Беклемишев Тимофей Алексеевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

Конструирование и испытание магнитного зонда

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18308

Научный руководитель:

д.ф.-м.н. Шайхисламов И. Ф.

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

Солдаткина Е. И.

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к. т. н. Астрелин В. Т.

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

План

Оглавление

Введение	4
Раздел 1. Основная информация	5
Раздел 2. Теория.....	6
Раздел 3. Калибровка зонда	9
Раздел 4. Экспериментальная часть.....	12
Заключение.....	14
Литература	15

Аннотация

Конструирование и испытание магнитного зонда

Теоретическая часть данной работы состоит в изучении принципа действия и методах конструирования магнитных зондов. Практическая часть состоит в расчете, изготовлении и калибровке магнитного зонда, пригодного для использования в определенных экспериментах и в определенном диапазоне параметров. В ходе работы освоена теория магнитных зондов для плазменных экспериментов. Был проведен расчет параметров зонда, анализ влияния различных параметров на получаемый сигнал, выбрано их оптимальное соотношение, проведена калибровка зонда при помощи поля катушки Гельмгольца. Также были обсуждены области применения подобных зондов.

Введение

Плазма, доступная для исследования, почти всегда пронизана магнитными полями. Эти поля создаются токами в самой плазме или токами во внешних проводниках. Следовательно, для описания плазмы необходимо описать пространственное распределение и изменение во времени магнитных полей. Зная распределение магнитных полей и используя уравнения Максвелла можно рассчитать распределение плотности тока в плазме. Если, кроме того, из других измерений известна электропроводность плазмы σ или напряженность электрического поля E , то эти данные позволяют вычислить мощность и пространственное распределение джоулевых потерь в плазме. Поскольку пространственное разрешение, даваемое всеми контактными методами измерения магнитных полей в плазме, ограничено величиной около 1 мм, то измерения B имеют смысл только в том случае, когда размеры объема, занятого плазмой, составляют по крайней мере несколько сантиметров. Магнитные зонды измеряют магнитное поле в относительно малом объеме (собственном), однако вызывают возмущение плазмы. Теоретическая часть данной работы состоит в изучении принципа действия и методах конструирования магнитных зондов. Практическая часть состоит в расчете, изготовлении и калибровке магнитного зонда, пригодного для использования в определенных экспериментах и в определенном диапазоне параметров.

Раздел 1. Основная информация

Магнитные зонды легко изготовить в лабораторных условиях, и получение на осциллографах сигнала, превосходящего уровень электрических шумов, не представляет затруднений. Кроме того, магнитные зонды легко калибровать. Магнитный зонд представляет собой цилиндрическую катушку малых размеров, которая вводится в плазму. Изменение магнитного потока Φ , проходящего через катушку, вызывает на ее концах появление напряжения

$$U_i = - \frac{d\Phi}{dt}. \quad (1)$$

Если размеры зонда настолько малы, что в пределах площади его поперечного сечения A магнитную индукцию B можно считать однородной, то

$$U_i = -A_{\text{эфф}} \frac{d}{dt} B_{\perp}(P, t), \quad (2)$$

где $B_{\perp}(P, t)$ - проекция B на направление оси катушки в точке расположения зонда P .

В плазме магнитная проницаемость μ с хорошей точностью равна единице, следовательно, напряженность магнитного поля $\mathbf{H}$ [а/м] и величина индукции $\mathbf{B}$ [в·сек/м²] связаны между собой соотношением $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$ ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ в·сек/а·м). Через A обозначена эффективная площадь катушки, которая приблизительно равна произведению площади поперечного сечения зонда на число витков n ; величину A можно рассчитать исходя из геометрии катушки, однако гораздо легче прокалибровать катушку, используя известное магнитное поле. ([1])

Раздел 2. Теория

Чтобы создать эффективный зонд, необходимо выбрать оптимальное соотношение его размеров, так как увеличение количества витков помимо увеличения эффективной площади увеличит и собственную емкость катушки

$$C_p = \frac{D}{2} \left(\frac{\pi}{7} + k \frac{\pi}{14} + \frac{1}{4k^{\frac{3}{4}}} \right), \quad (3)$$

где $k = \frac{L}{D}$, C – емкость катушки в пикофарадах, D – ее диаметр в сантиметрах, L – длина намотки в сантиметрах. ([2] – [5])

И ее индуктивность

$$L_p = n^2 dk \left(\frac{d}{l} \right) \cdot 10^{-9} \text{ гн}, \quad (4)$$

где d – длина катушки, n – количество витков. ([9])

От этих параметров зависит чувствительность зонда при разных частотах. Поскольку с ростом L_p чувствительность зонда в области высоких частот падает, всегда приходится искать компромисс между чувствительностью (большая величина nd^2), пространственным разрешением (малая величина d) и временным разрешением (малая величина n^2d). Поэтому целесообразно выбирать величину d меньшей, чем необходимо; число же витков n целесообразно брать по возможности малым. Чувствительность зонда особо важна при применении интегрирующих схем, так как они снижают величину сигнала. Увеличение же площади сечения, кроме того, увеличит возмущение плазмы. Вдобавок в слишком большом по объему зонде магнитное поле может быть уже неоднородным (в зависимости от условий задачи). ([7])

Согласование зондов

Напряжение U_0 на входе осциллографа не равняется просто величине напряжения U_i , даваемого формулой (1), а зависит от индуктивности L_p , емкости C_p и сопротивления R_p зонда, а также от свойств соединительного кабеля и осциллографа. Во избежание отражений сигнала кабель на входе осциллографа должен быть нагружен на омическое напряжение $R = Z$. В этом случае выходное напряжение зонда «чувствует» омическое сопротивление Z независимо от длины кабеля. ([8]) Резонансная частота катушки в большинстве случаев (в том числе и для рассматриваемой далее задачи, резонансная частота зонда около 30 ГГц) лежит выше любой из представляющих интерес частот сигнала. В таком случае можно представить схему измерений следующим образом

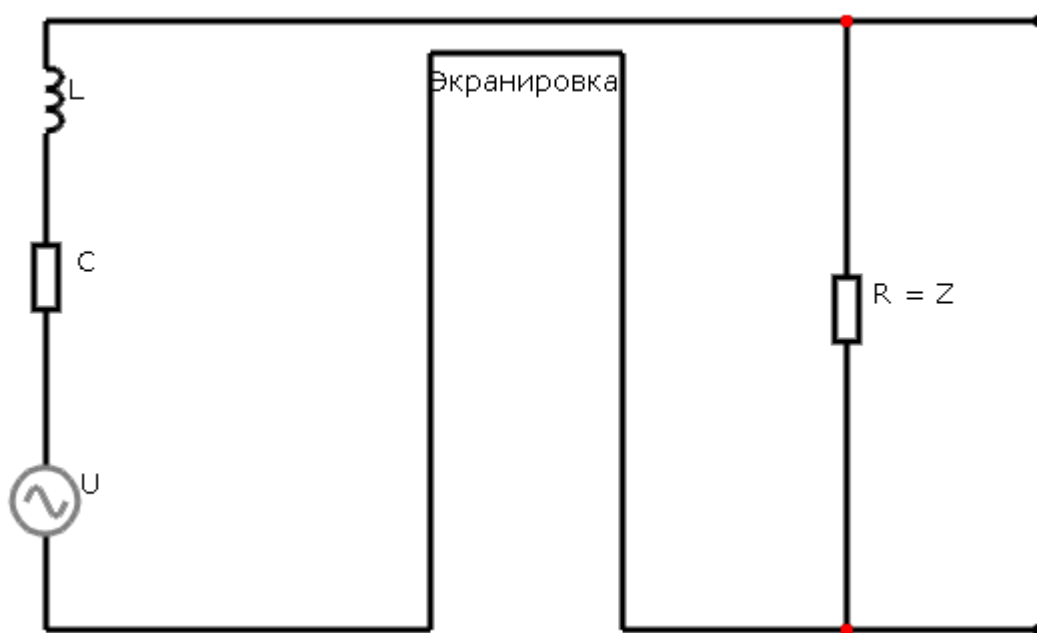


Рис. 1

Если I – сила тока в контуре, то

$$U_i = L_p \frac{dI}{dt} + I(Z + R_p). \quad (5)$$

При $U_s = ZI$ (U_s – сигнал на осциллографе) получаем

$$U_s = \frac{Z}{Z + R_p} U_i \left(1 - \frac{L_p}{Z} \frac{1}{U_i} \frac{dU_s}{dt} \right). \quad (6)$$

Для того чтобы получить сигнал U_s , пропорциональный наведенному напряжению U_i , необходимо выполнение следующего условия:

$$\frac{L_p}{Z} \frac{1}{U_i} \frac{dU_s}{dt} \ll 1. \quad (7)$$

Неравенство (7) требует малых индуктивностей L_p и больших величин Z . Однако если $U_s = 0$, а $dU_s/dt \neq 0$, то условие (7) не может быть выполнено, даже если величина L_p/Z мала. Но эту формальную трудность можно преодолеть, если учесть, что U_s , измеряемое осциллографом, имеет ошибку считывания ΔU_s , т.е.

$$U_s = U_s^0 \pm \Delta U_s. \quad (8)$$

Сравнивая формулы (7) и (5) можно сделать вывод, что, полагая $U_s^0 = U_i Z / (Z + R_p)$, мы не вносим дополнительной ошибки, если

$$-\Delta U_s < \frac{L_p}{Z + R_p} \frac{dU_s}{dt} < \Delta U_s.$$

Такая формулировка проверяется при обработке осциллограмм. ([6])

Раздел 3. Калибровка зонда

В случае когда магнитное поле генерировалось в катушке Гельмгольца посредством пилообразного тока с генератора, сигнал, получаемый с катушки имел вид, представленный на *рис. 2*.

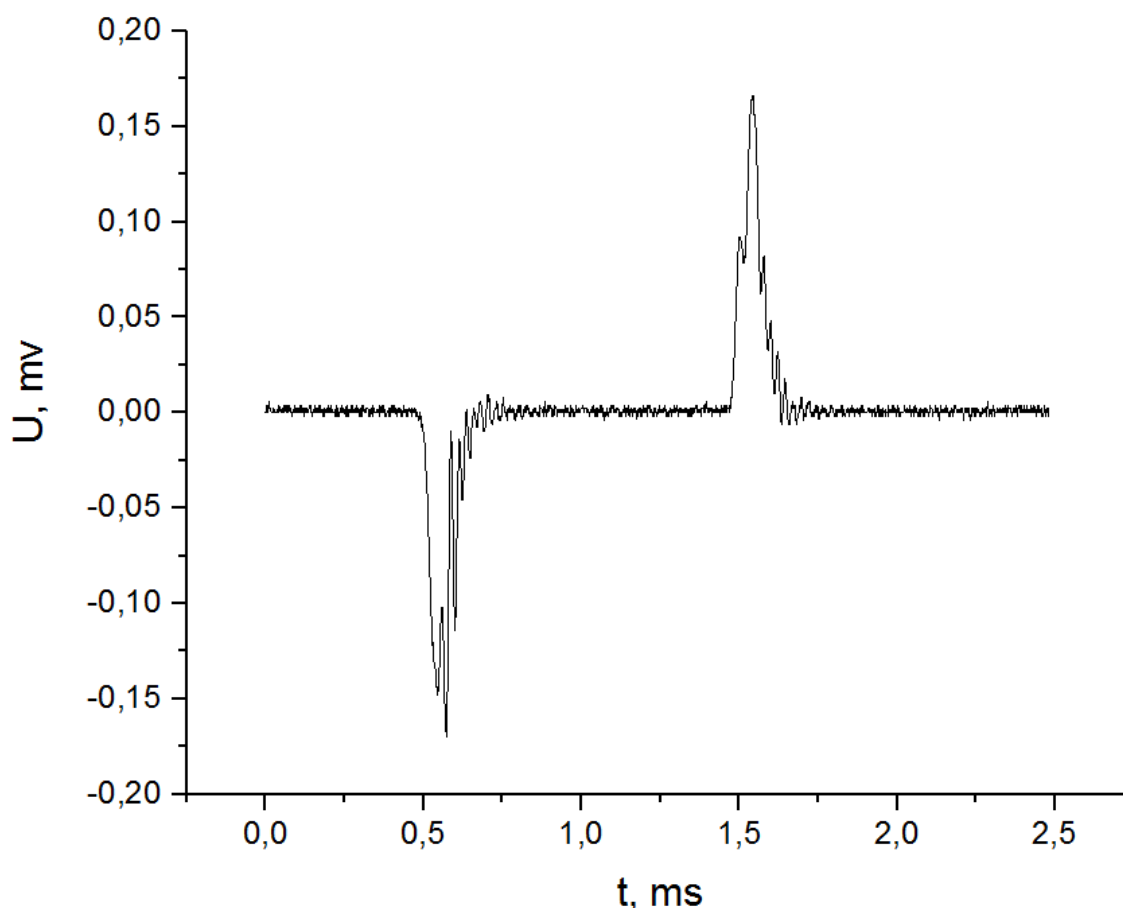


Рис. 2

Для получения из измеряемого напряжения значения магнитного поля B , Гс, сигнал необходимо проинтегрировать. Делается это либо с помощью интегрирующей электрической схемы либо путем обработки сигнала специальной программой на ПК. В данной работе я пользовался вторым способом. Использовалась либо коммерческая программа Origin Pro, либо программа, написанная в лаборатории Exp_v18.

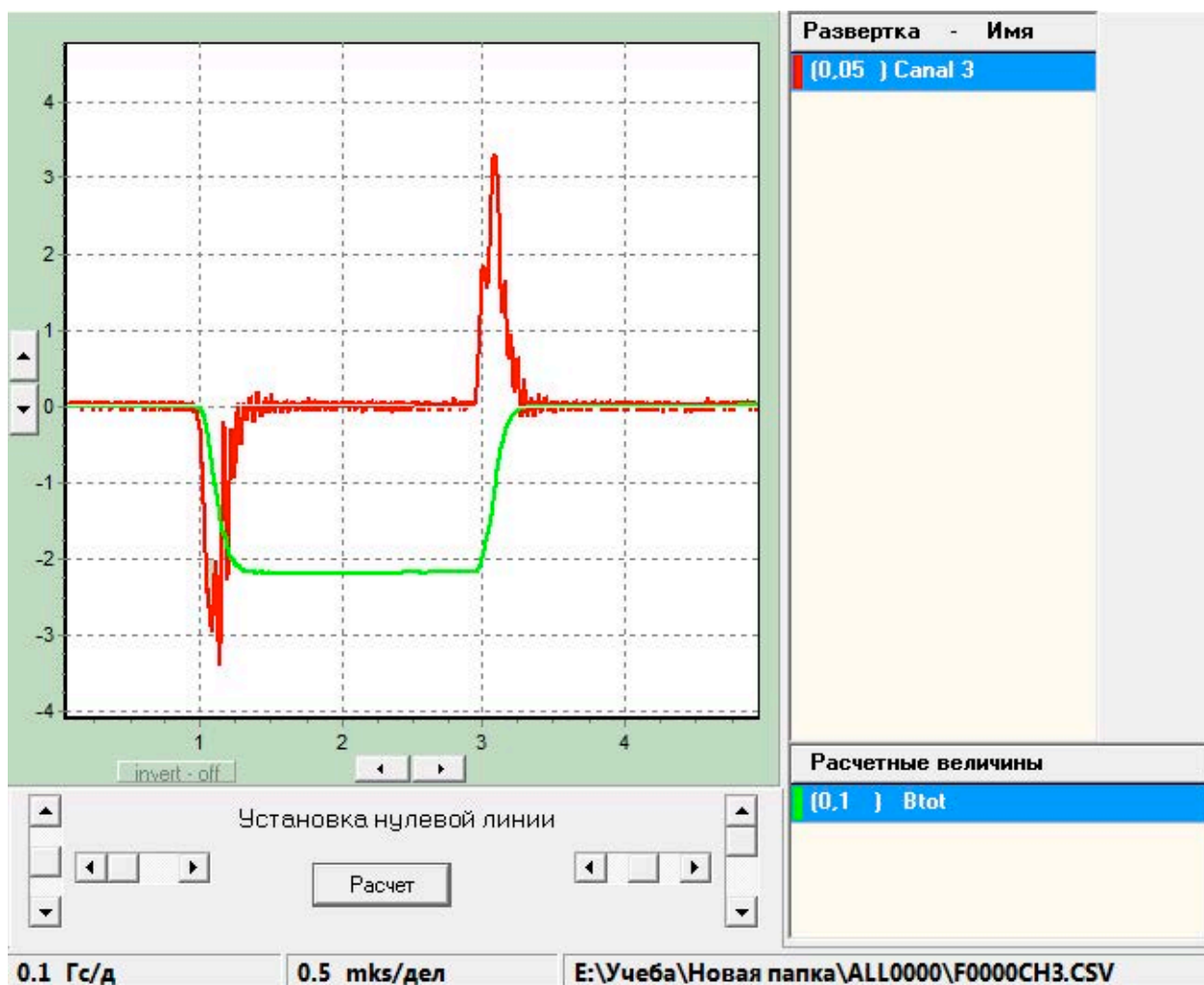


Рис. 3

Пример сигнала, обработанного программой Exp_v18 показан на рис. 3. На участке постоянного значения графика интеграла можно определить значение поля. После обработки данных и усреднения было получено значение поля 0.21 Гс, что соответствует полю В внутри катушки Гельмгольца, применяемой для калибровки зонда.

$$B = \frac{\mu_0 I R^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}}$$

Здесь μ_0 – магнитная постоянная = $1.257 \cdot 10^{-6}$ Тл·м/А, I – ток идущий через катушку, R – радиус катушки в м, x – расстояние между кольцами. С учетом всех параметров катушки используемой в эксперименте получим упрощенную формулу

$$B = 0.19 \cdot I,$$

что при $I = 1.1$ А (величина тока, использовавшаяся при проведении эксперимента) дает значение поля 0.209 Гс, что совпадает со значением представленным на *рис 3*. После обработки данных по 10-ти измерениям программой Origin получено значение поля 0.215 Гс.

В данном эксперименте проверялась зависимость сигнала на осциллографе от эффективной площади катушки и проводилась калибровка зонда. Зависимость подтвердилась, значения совпали с теоретическими с достаточно высокой точностью.

Раздел 4. Экспериментальная часть

Была поставлена следующая задача: определить оптимальные параметры зонда, пригодного для измерения магнитного поля Земли методом вытеснения магнитного поля плазмой. Метод заключается в следующем: в вакуумной камере, ориентированной вдоль горизонтальной компоненты магнитного поля Земли создается магнитное поле, равное горизонтальной компоненте, но обратное по направлению, таким образом остается только вертикальная компонента поля Земли. После чего в камере создается плазма, которая вытесняет остаточное магнитное поле. Вытеснение происходит за счет скин-эффекта, так как при достаточно высокой проводимости плазмы внешнее магнитное поле, при движении плазмы в нем, создает в ней токи, достаточные для того, чтобы компенсировать это поле. То есть на границе плазмы $\frac{dB}{dt} \rightarrow 0$. В этом случае плазму можно рассматривать как проводящую среду, движущуюся в переменном магнитном поле. При давлении плазмы равном давлению магнитного поля плазма сможет расшириться в область зонда и при этом вытеснит из этой области магнитное поле. Таким образом, измеряя изменение магнитного поля в области заполняемой плазмой можно найти искомую компоненту магнитного поля Земли.

Поле земли имеет величину порядка 10^{-5} Тл, характерное время вытеснения поля из области занимаемой зондом определяется фронтом потока и составляет порядка 10^{-6} сек, необходимый уровень сигнала для надежного измерения с десятикратным запасом составляет для используемой системы регистрации 100 мВ. Применяя формулу (1) получим эффективную площадь 20 см^2 . Затем исходя из условий задачи выберем количество витков и диаметр катушки. Оптимальным в данном случае будет сделать зонд диаметром 2 см состоящим из 7 витков, так как большее количество уже может влиять на получаемый сигнал из-за увеличения индуктивности и емкости катушки.

Помимо измерения магнитного поля земли такие зонды можно использовать и для исследования плазмы, в частности для определения параметров разреженной плазмы, при которых она способна вытеснять слабые магнитные поля из занимаемой области величиной порядка 10^{-4} Тл. Также зонд с такими параметрами можно использовать в плазменных экспериментах для измерения малых изменений магнитного поля, так как порядок минимально возможных величин этих изменений совпадает с порядком величины магнитного поля Земли.

Заключение

В ходе работы освоена теория магнитных зондов для плазменных экспериментов. Был проведен расчет параметров зонда, анализ влияния различных параметров на получаемый сигнал, выбрано их оптимальное соотношение, проведена калибровка зонда при помощи поля катушки Гельмгольца. Также были обсуждены области применения подобных зондов.

Литература

1. Методы исследования плазмы. Спектроскопия, лазеры, зонды. Под редакцией В. Лохте-Хольтгревена. Издательство «Мир» 1971 М.
2. <http://gorchilin.com/articles/energy/capacity>
3. A. J. Palermo. Distributed Capacity of Single-Layer Coils.
4. G. Grandi. Stray Capacitances of Single-Layer Solenoid Air-Core Inductors - Grandi, Kazimierczuk, Massarini and Reggiani. 1999
5. David W Knight. The self-resonance and self-capacitance of solenoid coils.
6. В. А. Волгов. Детали контуров радиоаппаратуры, расчет и конструкция. 1954
7. В. Беттихер. Измерение магнитных полей в плазме.
8. Русанов В. Д. Современные методы исследования плазмы. Госатомиздат 1962.
9. Савельев В. И. Курс общей физики. — Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика.