

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Чупров Илья Вячеславович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Расчет параметров трехкомпонентного магнитного зонда для
плазменных измерений**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19313

Научный руководитель:

д.ф.-м.н. Шайхисламов Илдар
Фаритович

Оценка научного руководителя

« _____ » _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

к.ф.-м.н. Д.С. Чуркин

Оценка преподавателя практикума

« _____ » _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

« _____ » _____ 20__ г.

Новосибирск 2020

Аннотация

Целью данной работы являлось вычисление параметров трехкомпонентного магнитного зонда для дальнейшего его конструирования, экранирования, калибровки и использования в плазменных экспериментах. Зонд должен быть пригоден для применения в экспериментах в определенном диапазоне параметров. Был проведен расчет параметров на основе известных значений в эксперименте по изучению бесстолкновительного сверхальфеновского взаимодействия взаимопроникающих плазменных потоков. После чего сделаны замечания по изготовке зондов и выделено основное преимущество зондов: простота и пассивность. Также была отмечена важность плазменных измерений в изучении космоса и перспективность данного направления.

Содержание

1. Введение	4
2. Теоретическая часть	6
3. Методика эксперимента	14
3.1 Описание экспериментальной установки	14
3.2. Результаты эксперимента	15
4. Обсуждение полученных результатов	16
5. Выводы и заключение	17
6. Благодарности	18
Список литературы	18

1. Введение

На протяжении всей своей истории люди не перестают интересоваться космосом. Труды астрономов внесли существенный вклад в развитие физики. И на сегодняшний день наши возможности и знания значительно расширились. Теперь мы знаем, что космическая среда в основном образована плазмой. Поэтому исследование взаимодействия плазменных потоков является важной задачей при изучении космического пространства.

К примеру, данные, полученные спутниковыми измерениями показали, что Луна, в отличие от Земли, не имеет глобального магнитного поля. Отраженный от поверхности поток представлен в основном нейтральными частицами. Однако в местах локальных намагниченностей коры, которые носят название Лунных Магнитных Аномалий (ЛМА) наблюдаются значительные потоки отраженных протонов, а также снижение интенсивности потока нейтральных частиц. Или лабораторное моделирование различных явлений в космической плазме. Даже в условиях существенного прогресса космических наблюдений и вычислительных моделей эксперименты сохраняют большое значение и дают информацию, недоступную иными средствами.

Кроме того, моделирование космических систем в сочетании с транзитным методом поиска экзопланет дает информацию о наличии атмосферы у экзопланет и ее составе. Еще совсем недавно, в конце 1980-х годов, была открыта первая экзопланета. К 2020 году достоверно подтверждено существование 4379 экзопланет в 3237 планетных системах. И это лишь малая часть того, что мы можем найти и исследовать. Поэтому изучение плазменных процессов в космосе и не только - это одно из важных направлений в современной науке.

В ходе изучения плазмы необходимо учитывать влияние магнитных полей, создаваемых либо токами в самой плазме, либо токами во внешних проводниках. Для измерения магнитных полей в импульсных разрядах используются магнитные зонды, в силу несложности их изготовления и калибровки. Магнитный

зонд из себя представляет пассивный датчик, то есть не требует питания. Это позволяет избежать появления электрических наводок.

Чтобы изготовить зонд прежде необходимо рассчитать ожидаемые параметры. Диаметр и материал проволоки, радиус катушки, количество витков - все это будет влиять на полученные результаты. Определяющими параметрами являются индуктивность, временное разрешение и эффективная площадь катушки. Поэтому важно изначально знать характеристики проектируемого зонда, чтобы проводить точные измерения.

Целью наших дальнейших исследований является изучение процессов происходящих в плазме. Экспериментальная установка “КИ-1” лаборатории энергетики сверхмощных лазеров ИЛФ СО РАН была разработана для изучения разнообразных процессов, протекающих в космической плазме. Исходя из линейных размеров вакуумной камеры и конструктивных элементов на которых зонд вводится в плазму определяется пространственное разрешение. Также надо понимать что мы используем в одном зонде от 3 до 6 катушек одновременно, измеряющие перпендикулярные компоненты.

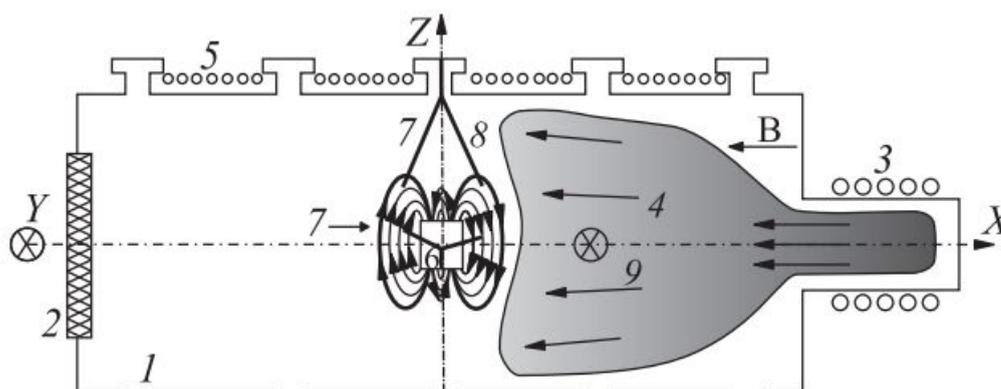


Рис.1. Схема установки “КИ-1”: 1 - вакуумная камера с размерами $5 \times 1,2$ м; 2 - смотровое окно; 3 - тета-пинч; 4 - поток водородной плазмы; 5 - соленоид; 6 - магнитный квадруполь; 7 - сопряженные магнитные и электрические зонды; 8, 9 - коллектора

2. Теоретическая часть

Индуктивность катушек:

Важнейшей характеристикой катушек является их индуктивность.

Индуктивность - способность преобразовывать энергию электрического поля в энергию магнитного поля. Величину индуктивности катушки можно рассчитать по формуле:

$$L = \mu\mu_0 n^2 V, \quad (3)$$

где μ - магнитная проницаемость вещества внутри соленоида,

$\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$ Гн/м - магнитная постоянная, Гн/м; n - число витков на единицу длины; V - объем катушки, м^3 .

Тогда в законе Фарадея $\Psi = N\Phi = LI$, и $U = \frac{NdI}{dt}$.

Магнитные зонды:

Итак, изменение магнитного потока Φ через катушку вызывает появление на ее концах напряжения U по закону Фарадея. В плазме магнитная проницаемость $\mu = 1$, тогда напряженность магнитного поля H и величина индукции связаны между собой соотношением $B = \mu_0 H$.

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

$$U_i = -A_{\text{эфф}} \frac{d}{dt} B_{\perp}(P, t) \quad (4)$$

где $B_{\perp}(P, t)$ - проекция B на направление оси катушки в точке расположения зонда P ; $A_{\text{эфф}}$ - эффективная площадь обмотки.

Для того чтобы измерять быстрые изменения поля, удобно использовать $A_{\text{эфф}}$ в виде $A(\omega)$. Эти зависящие от частоты поправки возникают при неправильном согласовании кабеля и нагрузки, конечной индуктивности катушки.

Чтобы обеспечить высокую чувствительность зондов, $A_{\text{эфф}} = \frac{1}{4} n\pi d^2$ должна быть большой. Для этого, если d ограничен, увеличивают число витков n . При этом возрастает индуктивность зонда L_p

$$L_p = n^2 dk \frac{d}{l} \cdot 10^{-9} \text{ ГН}, \quad (5)$$

где d - диаметр катушки в см; величина $k(d/l)$ приведена на рис.2.

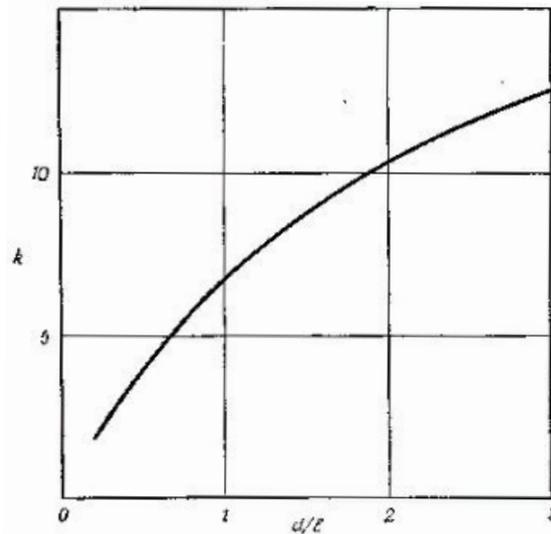


Рис. 2. Множитель k , входящий в формулу (5) как функция d/l .

Напряжение, регистрируемое осциллографом, зависит от индуктивности L_p , емкости C_p и сопротивления R_p зонда, а также от свойства соединительного кабеля.

Для того чтобы снизить уровень электрических помех, используют коаксиальные кабели с малым волновым сопротивлением ($Z = 50 - 170$ ом). Во избежание отражений сигнала кабель на входе осциллографа должен быть нагружен на омическое сопротивление $R = Z$. В этом случае выходное напряжение зонда “чувствует” омическое сопротивление Z в независимости от длины кабеля. Резонансная частота катушки в большинстве случаев не представляет интереса.

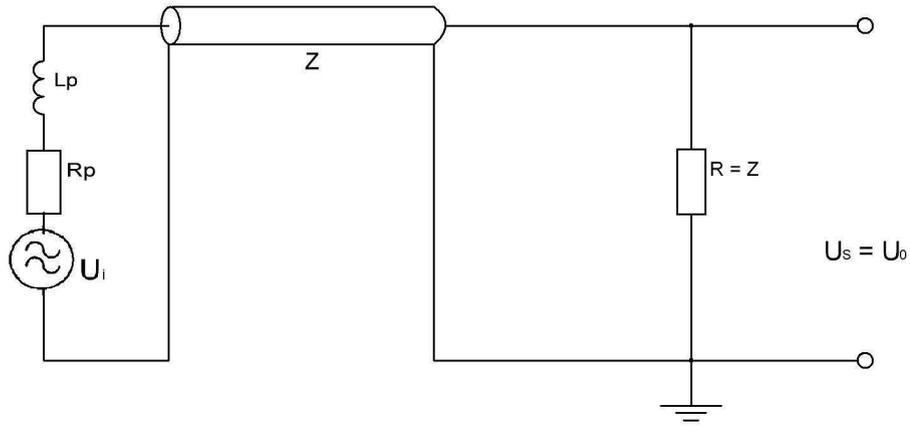


Рис. 3. Упрощенная схема зондовых измерений.

Если I - сила тока в контуре, то

$$U_i = L_p \frac{dI}{dt} + I(Z + R_p), \quad (6)$$

При $U_s = ZI$ - получаемый сигнал

$$U_s = \frac{Z}{Z + R_p} U_i \left(1 - \frac{L_p}{Z} \frac{dU_s}{U_i dt} \right), \quad (7)$$

Для того чтобы получить сигнал U_s , пропорциональный наведенному напряжению U_i , необходимо чтобы

$$\frac{L_p}{Z} \frac{dU_s}{U_i dt} \ll 1, \quad (8)$$

Неравенство 8 требует малых индуктивностей L_p и больших величин Z .

Однако если $U_s = 0$, а $\frac{dU_s}{dS} \neq 0$, то условие (6) не может быть выполнено. Эту трудность можно преодолеть, если учесть, что U_s имеет общую ошибку считывания ΔU_s . Получается, что мы не вносим дополнительной ошибки, если

$$\left| \frac{L_p}{Z + R_p} \frac{dU_s}{dt} \right| < \Delta U_s, \quad (9)$$

Неравенство (9) требует использования кабелей с возможно более высоким волновым сопротивлением, так как при уменьшении L_p снижается чувствительность зонда. Для избежания возникновения резонансного контура используют нагруженные коаксиальные кабели, которые не чувствительны к магнитным наводкам, в силу низкого импеданса. Наибольшая полная чувствительность катушки достигается при $Z = L/2C$.

Для интегрирования сигналов с зонда пользуются пассивными и активными интеграторами. Для начала рассмотрим наиболее надежный и наиболее стабильный пассивный интегратор.

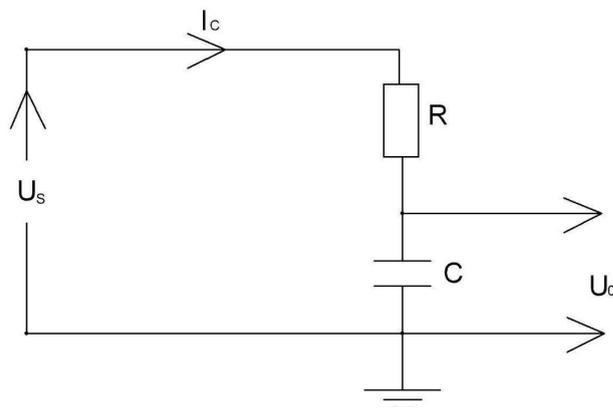


Рис. 4. Простой пассивный RC - интегратор.

Волновое сопротивление кабеля, как правило, весьма мало, и потому условие $R \gg Z$ легко выполнимо. Тогда получаем

$$U_s = I_c R + \frac{1}{C} \int_0^t I_c dt, \quad (10)$$

Интегрируя выражение (10) и подставляя $U_0 = \frac{1}{C} \int_0^t I_c dt$

$$U_0 = \frac{1}{RC} \int_0^t U_s dt - \frac{1}{RC} \int_0^t U_0 dt, \quad (11)$$

Учитывая, что сигнал U_0 с осциллографа считывается с ошибкой ΔU_0 , получаем, что формула

$$U_0 = \frac{1}{RC} \int_0^t U_s dt, \quad (12)$$

справедлива лишь при соблюдении условия

$$\left| \frac{1}{RC} \int_0^t U_s dt \right| < \Delta U_0, \quad (13)$$

Если неравенство (13) не выполнено, то необходимо вносить поправки, пользуясь формулой (11). Обычно время интегрирования $\tau = RC$, равный

приблизительно десятикратному времени наблюдения. При этом выходное напряжение U_0 существенно меньше выходного напряжения U_s , поскольку напряжение на интегрирующей емкости должно быть мало по сравнению с U_s .

Величины R и C определяются не только соотношением $\tau = RC$, но и тем, что сопротивление осциллографа R_0 намного больше, чем R . При этом сопротивление не должно иметь шунтирующей емкости, иначе высокочастотные составляющие имеют искажения. Кроме того, искажения может вызвать слишком большая величина индуктивности выводов конденсатора. Поэтому рекомендуется использовать несколько конденсаторов, включенных параллельно, помещая их перед входным разъемом осциллографа.

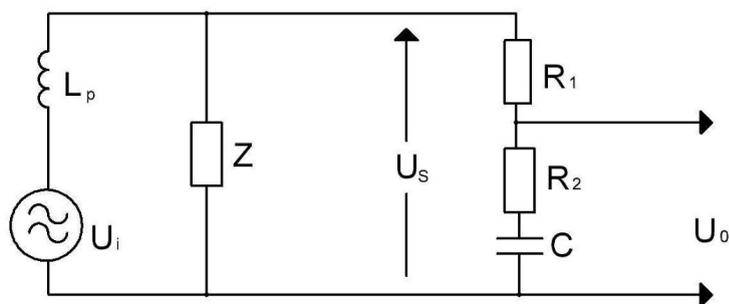


Рис. 5. Схема зонда с компенсирующим пассивным RC - интегратором.

Если неравенство (13) не выполняется, то высокочастотная часть сигнала интегрируется с постоянной по времени $\tau = \frac{L_p}{Z}$. На данной схеме рис. 5. индуктивность компенсируется добавлением к напряжению на интегрирующей емкости дифференцированного сигнала $I_c R_2$. Если $\frac{L_p}{Z}$ много больше длительности интегрируемости сигнала, то магнитное поле не проникает в катушку.

Выходное напряжение пассивных интеграторов иногда настолько мало, что не может быть зарегистрировано с помощью осциллографа. В таком случае пользуются активными интеграторами, использующие усиление с обратной связью. Напряжение обратной связи компенсирует напряжение, возникающее на

интегрирующей емкости C . Тогда сила тока, заряжающего емкость, остается пропорциональной входному напряжению U_s , и условие

$$U_0 = \frac{1}{RC} \int_0^t U_s dt \ll U_s, \quad (14)$$

не является необходимым.

Выходное напряжение интегратора

$$U_0 = \frac{1}{\tau} \int_0^t U_s dt + \frac{\alpha}{\tau} \int_0^t U_0 dt, \quad (15)$$

Сравнивая формулы для пассивного (11) и активного (15) интеграторов, можно заметить, что в активных ошибка интегрирования снижается: если α очень мал, то время интегрирования τ может быть также очень малым

$$\Delta U_0 \ll \left| \frac{\alpha}{\tau} \int_0^t U_0 dt \right|, \quad (16)$$

Во избежание наводок блок интегратора необходимо экранировать.

Зонд, погруженный внутрь плазмы, будет давать наряду с индуктивным емкостный сигнал. Поэтому во избежание как индуктивных, так и емкостных наводок экранирование от электрических полей обязательна для условий достаточно плотной плазмы. Однако при наличии экрана снижается чувствительность зонда в области высоких частот. Это связано с возникновением вихревых токов. Но их влияние мало, если велико поверхностное сопротивление экрана. Величина емкостного сигнала будет равна $U_n = \omega Z C_{pp} U_D$, где U_D - разность потенциалов между магнитным зондом и плазмой, C_{pp} - емкостная связь между зондом и плазмой. При использовании коаксиального кабеля и катушки в экране, величина емкостного сигнала становится незначительной.

Рассмотрим экранирующие свойства однородной трубки радиусом r_0 см, толщиной стенок d см, изготовленной из немагнитного проводящего материала с электропроводностью σ $[\text{ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}]$.

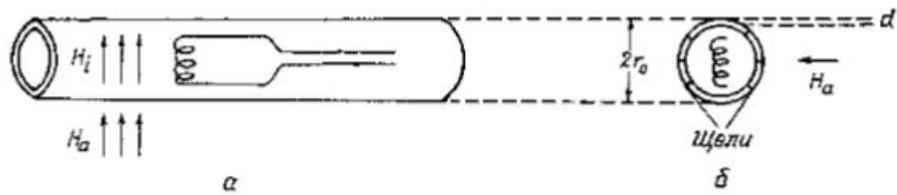


Рис. 6. Схематичное изображение зонда внутри экранирующего цилиндра.

а - вид с боку; б - вид с торца.

В таком случае магнитное поле внутри значительно меньше магнитного поля снаружи $|H_\alpha| \gg |H_i|$. В качестве предельной частоты $\nu_{\text{макс}}$ возьмем частоту, при которой значение добротности $|Q| = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$.

$$\nu_{\text{макс}} = \frac{4}{\pi r_0 \mu_0 d \sigma}, \quad (17)$$

Степень ослабления магнитного поля можно снизить, если проделать одну или несколько щелей параллельно оси трубки. В таком случае поле внутри трубки будет неоднородным. Поэтому всегда следует отдавать предпочтение экранам с высоким поверхностным сопротивлением. Однако сопротивление экрана не должно быть слишком большим, чтобы не препятствовать стеканию наведенных поверхностных зарядов.

Калибровка зондов:

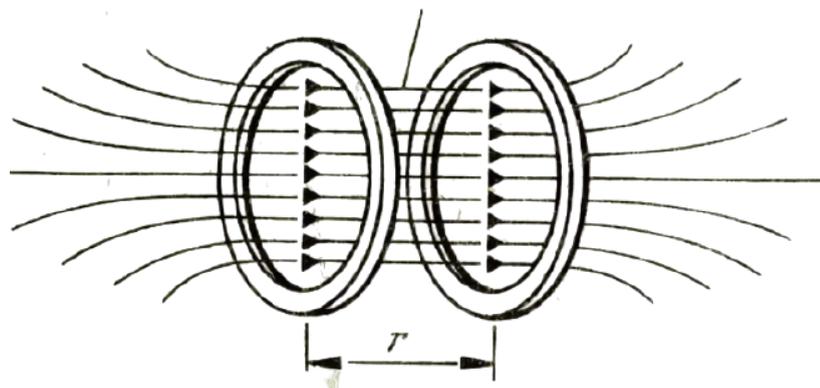


Рис. 7. Катушка Гельмгольца.

Калибровка зондовых схем обычно происходит с помощью помещения зондов в однородное магнитное поле, частота ω и амплитуда B_0 которого уже известны. Тогда по измеренной величине выходного сигнала U_0 можно рассчитать полную чувствительность схемы.

В нашем случае используется катушка Гельмгольца. Модуль индукции магнитного поля катушки Гельмгольца можно получить из закона Био - Савара - Лапласа:

$$B = \frac{1}{c} \int_{\gamma} \frac{[j(r), r_0 - r]}{|r - r_0|^3} dV, \quad (18)$$

$$B = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{\mu_0 n I}{R}, \quad (19)$$

где $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$ Гн/м - магнитная постоянная; ток через катушку I , А; n - количество витков; R - радиус катушки, м.

При калибровке на катушку Гельмгольца подается прямоугольный импульс тока (с длительностью фронта $\tau f \sim 20$ нс, длительностью импульса $\tau f \sim 20$ мкс), который создает на полочке тока магнитное поле известной величины B_0 . Зонд измеряет производную поля $\frac{dB_0}{dt}$. Сигнал математически интегрируется и его данные калибруются.

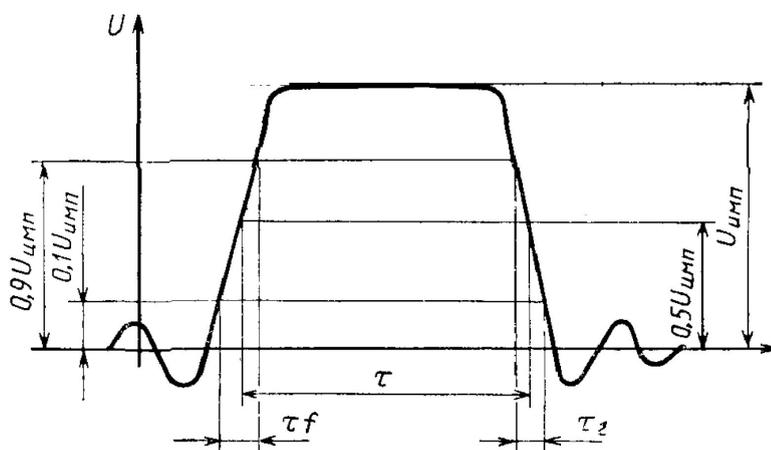


Рис. 8. Прямоугольный импульс. τf - длительность фронта импульса, τ - длительность импульса.

3. Описание эксперимента

Цель лабораторной работы заключается в определении параметров магнитного зонда помещенного в вакуумную камеру размером $5 \times 1,2$ м и измеряющего быстро изменяющееся магнитное поле. В качестве данных, от которых можно отталкиваться, возьмем эксперимент по формированию импульса сжатия, а затем каверны (область сильного магнитного возмущения) при взаимодействии расширяющегося сверхальфвеновского потока лазерной плазмы с замагниченным фоном.

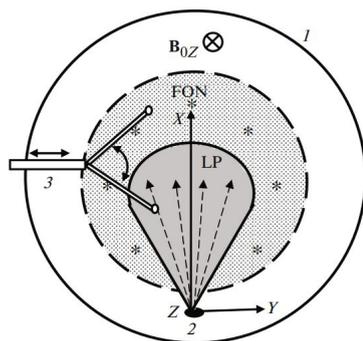


Рис. 9. Схема эксперимента: 1 - вакуумная камера; 2 - мишень; 3 - набор электрических и магнитных зондов.

3.1. Описание установки

Схема зондовых измерений представляет из себя последовательное соединение зонда, коаксиального кабеля с волновым сопротивлением $z = 50$ ом и интегратора, подключенного на вход осциллографа.

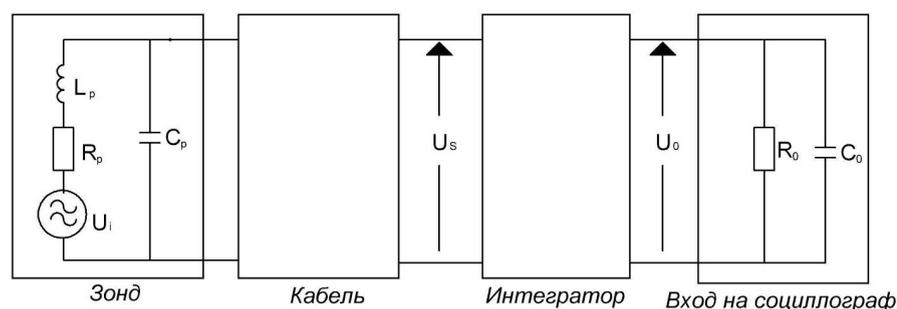


Рис. 10. Схема зондовых измерений.

Но в нашем случае сигнал интегрируется математически, поэтому схема установки будет выглядеть следующим образом:

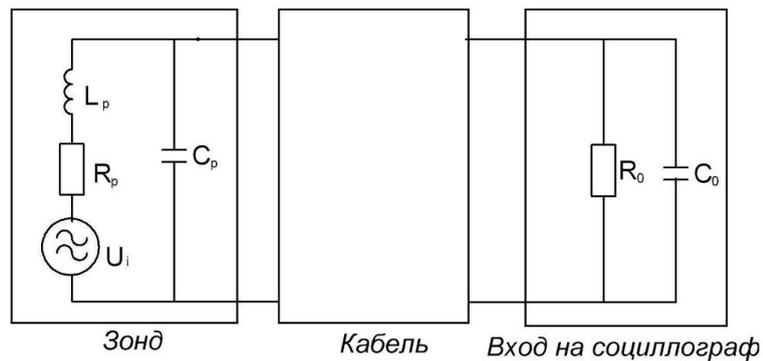


Рис. 11. Схема установки.

В свою очередь схема зонда представима в виде:

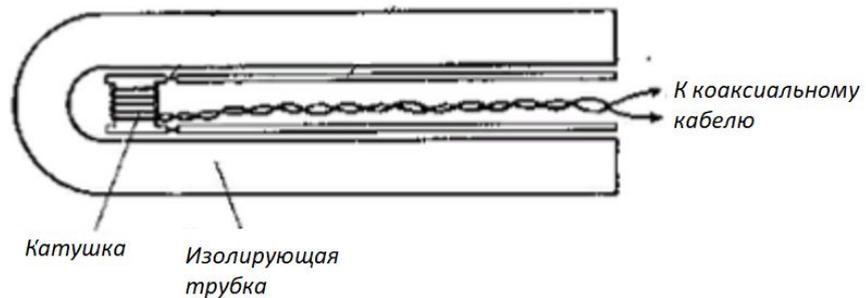


Рис. 12. Схема зонда.

3.2. Результаты измерений

Воспользовавшись законом Фарадея, была найдена площадь такой катушки, чтобы на измерительном устройстве регистрировать сигнал величиной 0,01 Вольт от магнитного поля величиной 200 Гс нарастающего за 100 нс.

$$U = \frac{dB}{dt} S \Rightarrow S = \frac{dt}{dB} U = \frac{100 \text{ нс}}{200 \text{ Гс}} \cdot 0,01 \text{ В} \approx 5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$$

По условию разрешение зонда должно быть $< 0,5$ см, чтобы измерять концентрацию ионного тока в плазме. В нашем случае $S < 5 \cdot 10^{-3}$ м.

Для того, чтобы рассчитать временное разрешение у катушки диаметром 7 мм числом витков 5 изготовленной из медной проволоки диаметром 0,25 мм была найдена индуктивность катушки:

$$L = \mu_0 \mu n^2 V = \mu_0 \mu \left(\frac{N}{l} \right)^2 S l = \left(S = \pi \left(\frac{d_K}{2} \right)^2, l = d_{II} N \right) =$$

$$= \frac{\mu_0 \mu N \pi \left(\frac{d_K}{2} \right)^2}{d_{II}} = \frac{1 \cdot 1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 3,14 \cdot \left(\frac{7}{2} \cdot 10^{-3} \right)^2}{25 \cdot 10^{-5}} \approx 9,66 \cdot 10^{-7} \text{ Гн} = 966 \text{ см}$$

где d_K - диаметр катушки, d_{II} - диаметр проводника.

Тогда с помощью закона Фарадея рассчитано dt - временное разрешение:

$$\left\{ \begin{array}{l} dt = \frac{dB}{U} SN = \frac{dB}{RI} SN \\ L = \frac{NBS}{I} \Rightarrow B = \frac{LI}{NS} \Rightarrow dt = \frac{L}{R} = \left(R = \frac{\rho_M l_{II}}{S_{II}} = \frac{\rho_M \cdot \left(2\pi \left(\frac{d_K}{2} \right) \right) \cdot N}{\pi \left(\frac{d_{II}}{2} \right)^2} \right) \end{array} \right.$$

Считая удельное сопротивление меди при 20°C равным $\rho_M = 0,017 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$:

$$dt = \frac{9,66 \cdot 10^{-7} \cdot 3,14 \cdot \left(\frac{25}{2} \cdot 10^{-5} \right)^2}{0,017 \cdot 10^{-6} \cdot \left(2 \cdot 3,14 \cdot \left(\frac{7}{2} \cdot 10^{-3} \right) \right) \cdot 5} \approx 2,54 \cdot 10^{-8} \text{ с}$$

4. Обсуждение полученных результатов

Таким образом, для простого зонда диаметром 7 мм, изготовленного из медной проволоки диаметром 0,25 мм, и с числом витков 5 была найдена индуктивность и рассчитано необходимое временное разрешение. Полученные линейные размеры подходят под размеры камеры и соответствуют требованиям эксперимента.

Исходя из эксперимента общая длительность лазерной плазмы $\ll 10$ мкс, тогда полученное временное разрешение катушки позволяет измерить изменения магнитного поля.

Стоит отметить, что в ходе изготовления зонда важно располагать витки максимально плотно, чтобы избежать возникновения паразитных индуктивных токов. Кроме того, необходимо, чтобы материал, из которого изготавливается зонд, в нашем случае - это медная проволока, был покрыт изолирующим лаком во избежание возникновения токов короткого замыкания.

5. Выводы и заключение

В ходе изучения плазмы магнитные зонды - незаменимая вещь. Основным их преимуществом, как было сказано, является легкость изготовления в лабораторных условиях и отсутствие электрических наводок. Почти все измерения распределения магнитных полей в импульсных разрядах были проделаны с помощью магнитных зондов. Целью дальнейших исследований предполагается изготовление, экранирование и калибровка зондов. А именно:

Первым делом, после того, как рассчитали параметры катушки, необходимо изготовить магнитный зонд. В нашем случае магнитный зонд изготовлен из медной проволоки диаметром 0,5 мм, число витков 5, диаметр зонда 7 мм.

Затем нужно соединить зонд с кабелем. В нашем случае магнитный зонд соединяется с коаксиальным кабелем (волновое сопротивление $z = 50$ ом) путем пайки.

Для защиты катушки от механических повреждений рекомендуется поместить катушку в экран или изолирующую трубку рис. 12.

Для защиты магнитного зонда от прямого воздействия электрических полей проводят экранирование.

Теперь нужно откалибровать зонд в известном магнитном поле, например в постоянном поле, создаваемом катушкой Гельмгольца.

После изготовления зонда можно применять для экспериментального исследования плазменных явлений.

6. Благодарность

Выражаю благодарность научному руководителю Шайхисламову Илдару Фаритовичу за предоставленную лабораторную работу, помощь в теоретических вопросах и ее курирование, а также лаборанту Алексею Чибранову за помощь в ознакомлении с измерением магнитных полей в плазме и за помощь в изготовлении магнитного зонда.

Список литературы

1. Золкин А. С. Что надо знать при написании курсовой работы (Методические рекомендации для студентов)//Сиб. физ. журн. 1995. № 4. С. 65 – 71.
2. В. Лохте-Хольтгрёвен. Методы исследования плазмы. Спектроскопия, лазеры, зонды. Перевод с англ. под ред. С. Ю. Лукьянова. С. 422 - 436
3. И. Ф. Шайхисламов, Ю. П. Захаров, В. Г. Посух, А. В. Мелехов, Э. Л. Бояринцев, А. Г. Пономаренко, В. А. Терехин. “Исследование бесстолкновительного сверхальфеновского взаимодействия взаимопроникающих плазменных потоков”//ФИЗИКА ПЛАЗМЫ, 2015, том 41, № 5, с. 434–442.
4. М. С. Руменских, А. А. Чибранов, М. А. Ефимов, А. Г. Березуцкий, В. Г. Посух, Ю. П. Захаров, Э. Л. Бояринцев, И. Б. Мирошниченко, И. Ф. Шайхисламов. “Лабораторное моделирование взаимодействия Солнечного ветрас Лунными магнитными аномалиями”//Письма в ЖЭТФ, том 111, вып. 6, с. 335 – 342.