

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Вопиловский Алексей Михайлович

КУРСОВАЯ РАБОТА

Измерения магнитных полей в геликонном источнике плазмы

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №20306

Научный руководитель:

Е. И. Кузьмин
Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

Е. И. Солдаткина
Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин
Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск 2021

Аннотация

В работе проведены измерения радиальных профилей ВЧ магнитной компоненты геликонного разряда методом магнитного зонда. Измерения проведены для разряда с рабочей частотой генератора 13,56 МГц, источником ВЧ мощности 15 кВт, во внешнем магнитном поле ~ 120 Гс. Для компенсации электростатических наводок использован балансный трансформатор. Полученные распределения ВЧ магнитной компоненты были сопоставлены с аналитическим решением для случая однородной радиально ограниченной плазмы.

Оглавление

Введение.....	4
1. Описание экспериментальной установки.....	4
1.2. Геликонный источник плазмы	4
1.1. Магнитный зонд.....	6
2. Теория геликонного разряда.....	10
3. Полученные результаты и их обсуждение	13
4. Заключение	20
5. Литература	21

Введение

В настоящее время в рамках термоядерных исследований большое внимание уделяется разработке линейных установок с низкотемпературной плазмой в качестве метода симуляции воздействия плазмы на первую стенку термоядерных реакторов. Поскольку в материаловедческих исследованиях ключевую роль играет величина ионного потока, важными являются плотность плазмы и длительность импульса. Одним из видов подходящих для исследований установок являются безэлектродные ВЧ (высокочастотные) источники плазмы. В ВЧ источниках возможна генерация разрядов различного типа. Емкостной (E-mode) и индуктивный (H-mode) разряды возникают при низких значениях мощности ($<1\text{кВт}$), для них характерны низкая эффективность ионизации и плотность $\sim 10^{10}\div 10^{11}\text{ см}^{-3}$. При дальнейшем повышении мощности и включении внешнего магнитного поля в плазме становится возможным возникновение волнового геликонного разряда (W-mode) с резким увеличением эффективности ионизации и плотности, при этом ведущую роль в ионизации начинают играть волновые процессы в центре плазмы. Для повышения эффективности источника необходимо исследовать электромагнитную волновую структуру плазмы. Чтобы это сделать необходимо лучше понимать механизмы генерации плазмы и поглощения энергии. Для этих целей необходимо пространственное измерение распределения ВЧ магнитных полей. Измеряя их, можно понять, как различные параметры источника, такие как внешнее магнитное поле, геометрия антенны, напуск газа и др., влияют на характеристики создаваемой плазмы.

1. Описание экспериментальной установки

1.2. Геликонный источник плазмы

Эксперименты по измерению ВЧ полей в плазме производились в источнике, описание которого взято из работы [1], его схема показана на рис. 1. Генерация плазмы происходит в газоразрядной кварцевой трубе 3. Рабочий газ (H_2) в кварцевую камеру подается через импульсный клапан 6. Разряд возникает

в камере при подаче ВЧ напряжения на геликонную антенну, возбуждающую моды $m = 0, \pm 1$ (рис. 2). Разряд инициируется поджигом (вольфрамовая нить накала). Электроны, эмитированные с нити накала, под действием ВЧ поля ионизуют рабочий газ. Длительность генерации плазмы – 1 секунда. Плазма источника находится во внешнем магнитном поле, создаваемом системой катушек 2, 4. Магнитное поле в центре камеры ~ 150 Гс, пробочное отношение около 2. Для исключения контакта плазмы со стенками камеры в установке предусмотрены лимитеры. Источник соединён с вакуумным объёмом 10. Откачка газа производится форвакуумным и турбомолекулярным насосами, начальное давление в камере $\sim 10^{-6}$ Торр. ВЧ напряжение подаётся на антенну с источника мощности через согласующую систему, позволяющую повысить поглощаемую плазмой мощность (около 15 кВт).

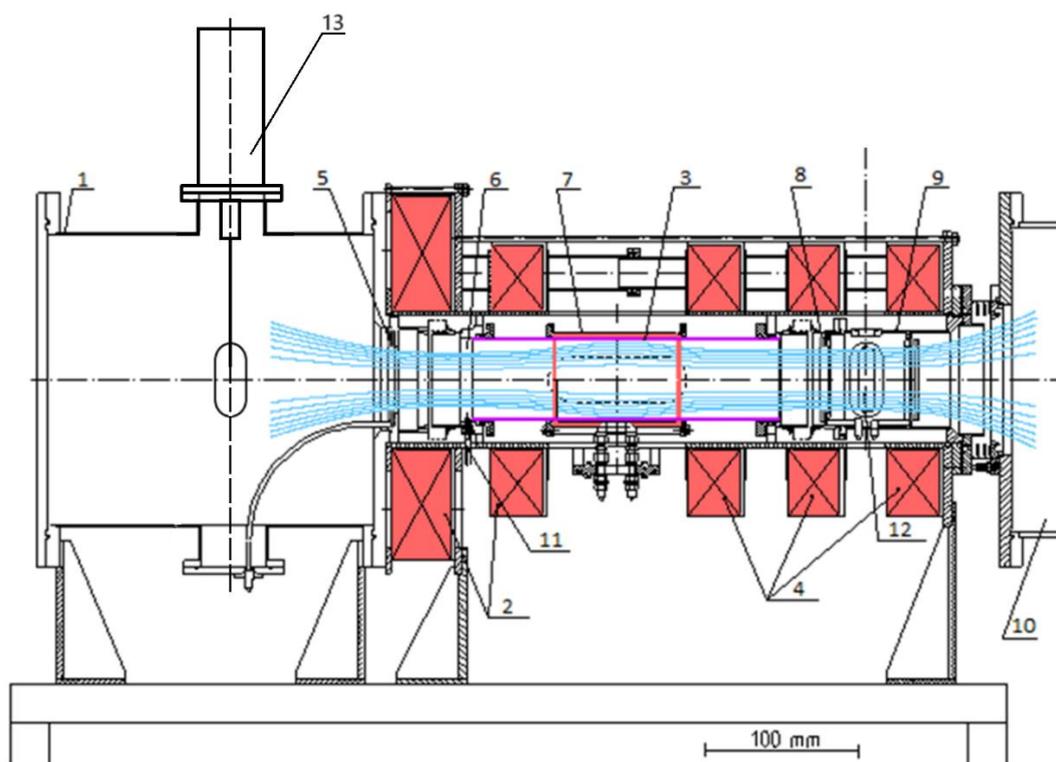


Рис. 1 Схема геликонного источника плазмы. 1 - расширительный объем; 2, 4 - катушки магнитного поля; 3 - кварцевая камера (длина 400 мм, внешний диаметр 108 мм, толщина стенки 2.5 мм); 5, 8 - лимитеры; 6 - импульсный клапан напуска газа; 7 - геликонная антенна; 9 - диагностическая камера; 10 - вакуумный объем стенда; 11 - поджиг; 12 - ввод лэнгмюровского зонда, 13 - магнитный зонд с вертикальной подвижкой.

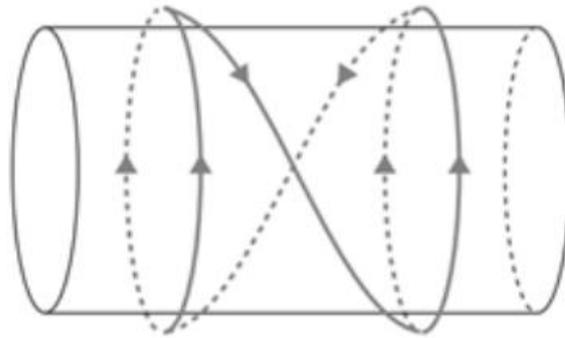


Рис. 2 Геликонная антенна $m = \pm 1$

Магнитный зонд 13 расположен на вертикальной подвижке в расширительном объеме, в области расходящегося магнитного поля (рис. 3) геликонного источника.

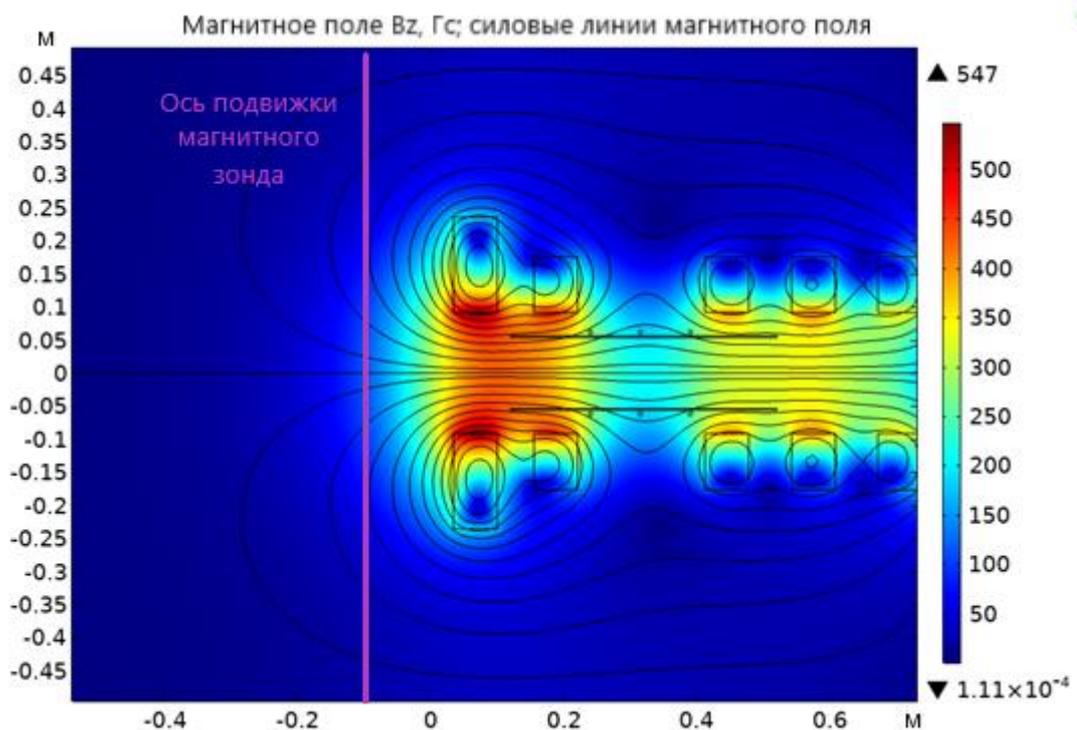


Рис. 3 Внешнее МП

1.1. Магнитный зонд

Магнитный зонд состоит из катушки медного провода, помещённой в плазму. Согласно закону Фарадея, при изменяющемся внешнем магнитном поле в катушке возникает ЭДС индукции

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -NA\frac{dB}{dt}$$

где N – число витков в катушке, A – площадь витка, B – среднее магнитное поле ортогональное плоскости витка. Располагая три катушки по осям декартовой системы координат, можем найти все три компоненты поля (усреднённого в некотором объёме, величина которого определяется геометрией катушек). Считая, что B меняется гармонически, и радиус витка r :

$$B = B_0 \sin \omega t, \quad A = \pi r^2, \quad U = -N\pi r^2 B_0 \omega \cos \omega t$$

Получаем связь между амплитудой магнитного поля (U_0) и напряжением:

$$B_0 = \frac{U_0}{2\pi^2 N r^2 \nu} \quad (1)$$

В работе [2] показана калибровка данного зонда соленоидом с совпадением измерений с теоретической оценкой и результатом моделирования с точностью 5%. Изменяющийся во времени потенциал плазмы ВЧ разряда создаёт электростатические наводки на зонд, искажая измерения тока, обусловленного магнитным полем разряда. В данной работе для уменьшения искажений использовался балансный трансформатор [3] (рис. 4). Средняя точка трансформатора заземляется, чтобы сигнал, создаваемый электростатической наводкой в трансформаторе, взаимокompенсировался. Во вторичной обмотке, число витков которой равно числу витков первичной, возникает ЭДС вызванная только магнитным сигналом (V_b на Рис. 4), поскольку синфазный сигнал наводки взаимовычитается. В средней точке первичной обмотки синфазный сигнал складывается и измеряется через резистор (V_e на Рис. 4).

Одним из минусов балансного трансформатора может быть неполная компенсация электростатического сигнала на вторичной катушке из-за неоднородности потенциала плазмы и разной емкости кабелей, что в случае большой амплитуды ВЧ генератора может накладывать существенные искажения на полезный сигнал. Измерить это искажение, можно с помощью

экрана Фарадея [4], величине наводимого потенциала сопоставляется величина искажения, которую потенциал даёт в ВЧ напряжении (V_b на Рис. 4). На частоте 13,56 МГц отношение вклада наводки к величине синфазного сигнала $\approx 0,2$.

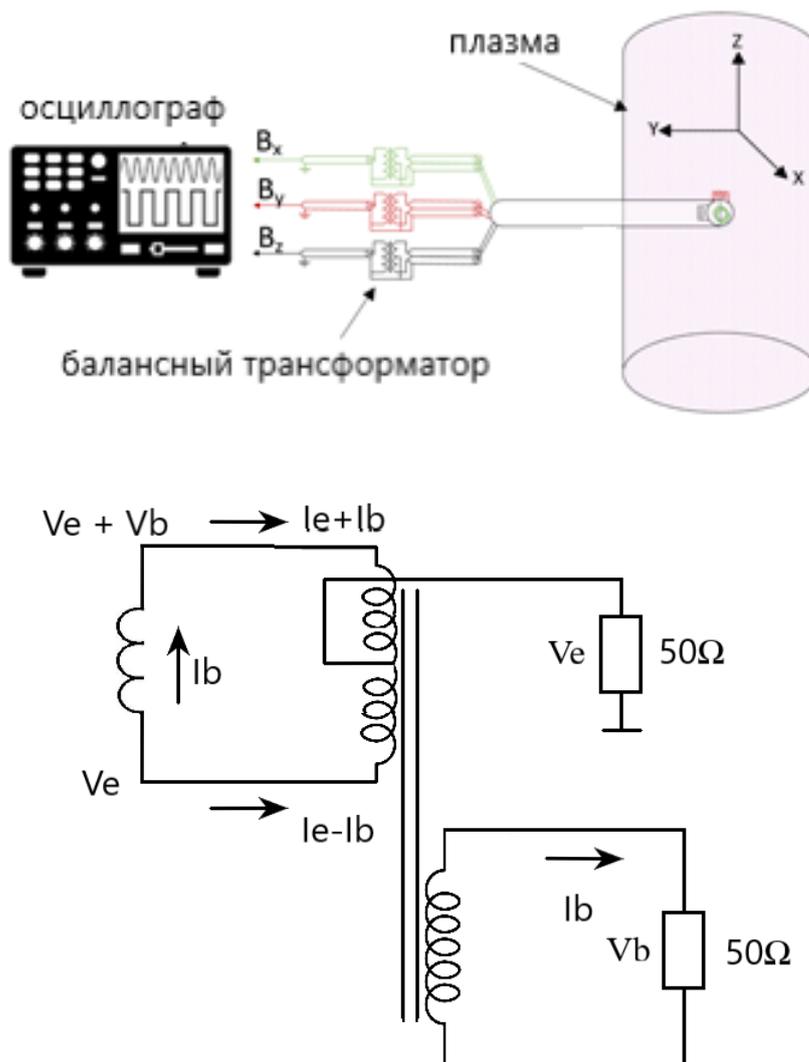


Рис. 4 Схема магнитного зонда и балансного трансформатора (V_b – магнитный сигнал зонда на вторичной обмотке, и V_e – электростатический сигнал (синфазный) на первичной обмотке)

Размер магнитного зонда определяет его пространственное разрешение, но из (1) видно, что уменьшение радиуса уменьшает ЭДС индукции в катушке. Это увеличивает относительный вклад наводок в измеряемое напряжение, следовательно, величина радиуса витков зонда снизу ограничена. Чтобы увеличить амплитуду ЭДС в катушке можно увеличить количество витков, но это повышает индуктивность катушки, слишком большая величина которой

будет искажать измеряемое напряжение. Чтобы этот эффект был пренебрежимо мал, период измеряемого сигнала должен быть больше [5]:

$$\frac{L}{R} = \tau; T > \tau$$

где R – характерное сопротивление контура с катушкой, τ – период наиболее быстрых колебаний, на которые зонд сможет отреагировать. Индуктивность катушки длиной l :

$$L = \frac{\mu_0 N^2 \pi r^2}{l}$$

В данной работе использовался зонд со следующими характеристиками:

$$N = 11, r = 1 \text{ мм}, l = 2,2 \text{ мм}, R \approx 50 \text{ Ом}$$

Период колебаний на частоте 13,56 МГц и τ зонда:

$$T \approx 74 \text{ нс}, \tau \approx 2,2 \text{ нс}$$

Следовательно, выбранные геометрические размеры катушек позволяют детектировать сигнал необходимой частоты.

Напряжение V_b на вход осциллографа поступает через коаксиальный кабель (длина ~ 2 м). На высокой частоте приходится учитывать влияние провода на сигнал. Встречая сопротивление осциллографа на конце линии сигнал отражается, и коэффициент отражения напряжения:

$$P_V = \frac{Z_n - \rho}{Z_n + \rho}$$

где Z_n – это сопротивление осциллографа, ρ – волновое сопротивление линии. При $Z_n \gg \rho \Rightarrow P_V = 1$ и амплитуда сигнала на осциллографе (после сложения набегающей и отражённой волн) удваивается, если же считать, что $\rho \approx 50$ Ом выставив сопротивление $Z_n = \rho \Rightarrow P_V = 0$ получим истинный сигнал. Таким образом, паразитный сигнал минимален при размещении балансного

трансформатора на выходе измеряющего устройства с параллельной нагрузкой 50 Ом.

2. Теория геликонного разряда

В зависимости от величины мощности, возможна генерация различных типов ВЧ разряда: емкостной, индуктивный и геликонный. При низкой ВЧ мощности в камере возникает емкостной разряд с плотностью до 10^8 см^{-3} . При этом нагрев электронов происходит за счет разности потенциалов, возникающей между витками антенны. При увеличении тока разряд переходит в индуктивную моду, которая существует при плотностях $10^8 - 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Требуемая ВЧ мощность находится в диапазоне 400 - 600 Вт, а нагрев электронов поддерживается вихревым электрическим полем, создаваемым ВЧ антенной. В замагниченной плазме при ВЧ мощности $\geq 800 \text{ Вт}$ и плотности 10^{12} см^{-3} происходит генерация первой моды геликонной волны [1].

Геликонные волны – это продольные электромагнитные волны с круговой поляризацией, распространяющиеся при наличии внешнего постоянного магнитного поля в диапазоне частот: $\omega_{ci} < \omega < \omega_{ce}$ [3]. Дисперсионное уравнение для случая холодной бесстолкновительной однородной плазмы имеет вид:

$$\frac{kk_z}{k_0^2} = \frac{\omega_{pe}^2}{\omega\omega_{ce}}$$

где $\omega_{pe}^2 = \frac{4\pi ne^2}{m_e}$, $\omega_{ce} = \frac{eB_0}{m_e c}$, $k_0 = \frac{\omega}{c}$. В замагниченной, радиально ограниченной, квази-нейтральной плазме, для однородного профиля общее решение дисперсионного уравнения находится в виде $\mathbf{B} = \mathbf{B}(r) * e^{i(m\theta + k_z z - \omega t)}$. Компоненты МП геликонных волн в цилиндрических координатах (r, θ , z) имеют вид [3]:

$$B_z = AJ_m(k_r r)$$

$$B_r = \frac{iA}{2k_r} [(k + k_z)J_{m-1}(k_r r) + (k - k_z)J_{m+1}(k_r r)]$$

$$B_\theta = -\frac{A}{2k_r} [(k + k_z)J_{m-1}(k_r r) - (k - k_z)J_{m+1}(k_r r)]$$

где A – произвольная константа, m – азимутальная мода волн, k – модуль волнового вектора, k_r и k_z его проекции, ω – фазовая частота генерации, $J_n(x)$ – функции Бесселя 1-го рода. Компоненты k_r и k_z для фиксированной моды и внешнего МП однозначно определяются плотностью плазмы и частотой генерации [3].

$$mk_z J_m(k_r R_0) + k k_z J'_m(k_r R_0) = 0$$

где R_0 – граница области плазмы, n – плотность плазмы, B_0 – внешнее поле. Поля будут рассчитаны по приближительным значениям k_z и k_r (похожие на значения в работах [1] и [3]). Вклад мощности в моды $|m| > 1$ мал, поэтому далее будут рассматриваться лишь моды $|m| \leq 1$. Положительный знак моды соответствует правополяризованной геликонной волне и зависит от направления внешнего магнитного поля, одновременно возможны моды только одного знака. Для значений $k_z = 30 \text{ м}^{-1}$ и $k_r = 60 \text{ м}^{-1}$ [1] на рис. 5 показаны моды $m = 0$, $m = -1$, $m = 1$ и суммы мод $m = 0, 1$; $m = 0, -1$ (для всех мод и в их суммах коэффициент $A = 1$; зависимости приведены в относительных единицах), чёрным отмечены края камеры, радиус которой 5 см. Видно, что такой подход даёт несимметричные профили, но, если вклад ненулевой моды очень мал, профили будут близки к симметричным.

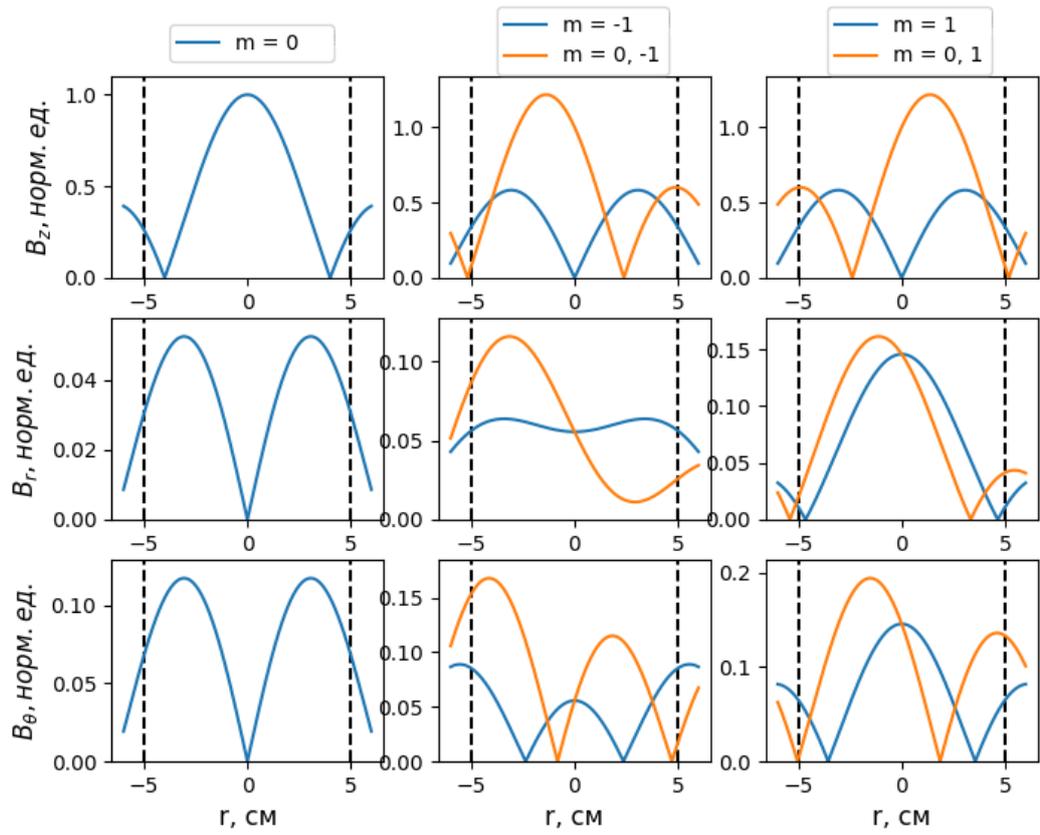


Рис. 5 Моды $m = 0$, $m = -1$, $m = 1$ и суммы мод $m = 0, 1$; $m = 0, -1$ для компонент волнового вектора $k_z = 30 \text{ м}^{-1}$; $k_r = 60 \text{ м}^{-1}$ ($A=1$ для всех мод и их сумм)

3. Полученные результаты и их обсуждение

В случае геликонной антенны возможно возникновение азимутальных мод $m=\pm 1$, в зависимости от направления внешнего магнитного поля. В эксперименте, как правило, реализовывался случай ориентации поля, когда в направлении зонда должна распространяться мода $m=-1$ ($B>0$). При смене направления поля ($B<0$), геликонные волны изменяют поляризацию, и в направлении зонда распространяется $m=1$ мода.

Для случая $B>0$ ($B=120$ Гс) профили всех трёх компонент магнитного поля представлены на рис. 6. Распределения B_y и B_z имеют колоколообразный профиль с максимумом на оси и амплитудой 0,8 Гс и 0,6 Гс соответственно. При этом распределение полей для разных компонент соответствует различным модам ($m=-1$ для B_x и B_y и $m=0$ для B_z), вычисленным ранее.

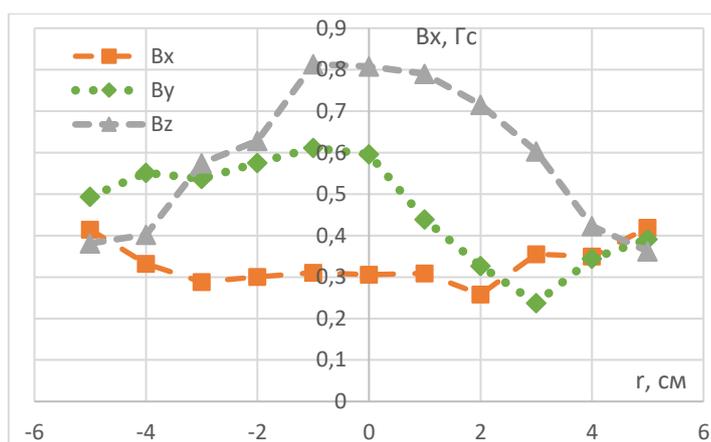


Рис. 6 Радиальные профили компонент МП ($B_{\text{внеш}}=120$ Гс, $P_n = 1,5$ атм)

При смене направления внешнего МП ($B_{\text{внеш}} = -120$ Гс), геликонные волны изменяют поляризацию с $m=-1$ на $m=1$, что влияет на величину полей (рис. 7). Амплитуда B_x и B_z при развороте поля меняется более чем в 5 и в 2 раза соответственно. Данное наблюдение подтверждается теоретическими и экспериментальными работами по измерениям ВЧ полей в однородном поле [7], где показано, что мода $m=-1$ затухает в плазме и имеет меньшую амплитуду. Форма сигнала B_y и B_z не симметрична относительно центральной оси, что может быть связано с ростом емкостного сигнала V_e . Причиной может быть

изменение взаимной емкости проводов при движении подвижки вверх и вниз. Для компоненты B_x при этом можно однозначно утверждать, что форма сигнала соответствует уже моде $m=1$, поскольку для него сигнал симметричный и не искажен чрезмерной емкостной наводкой.

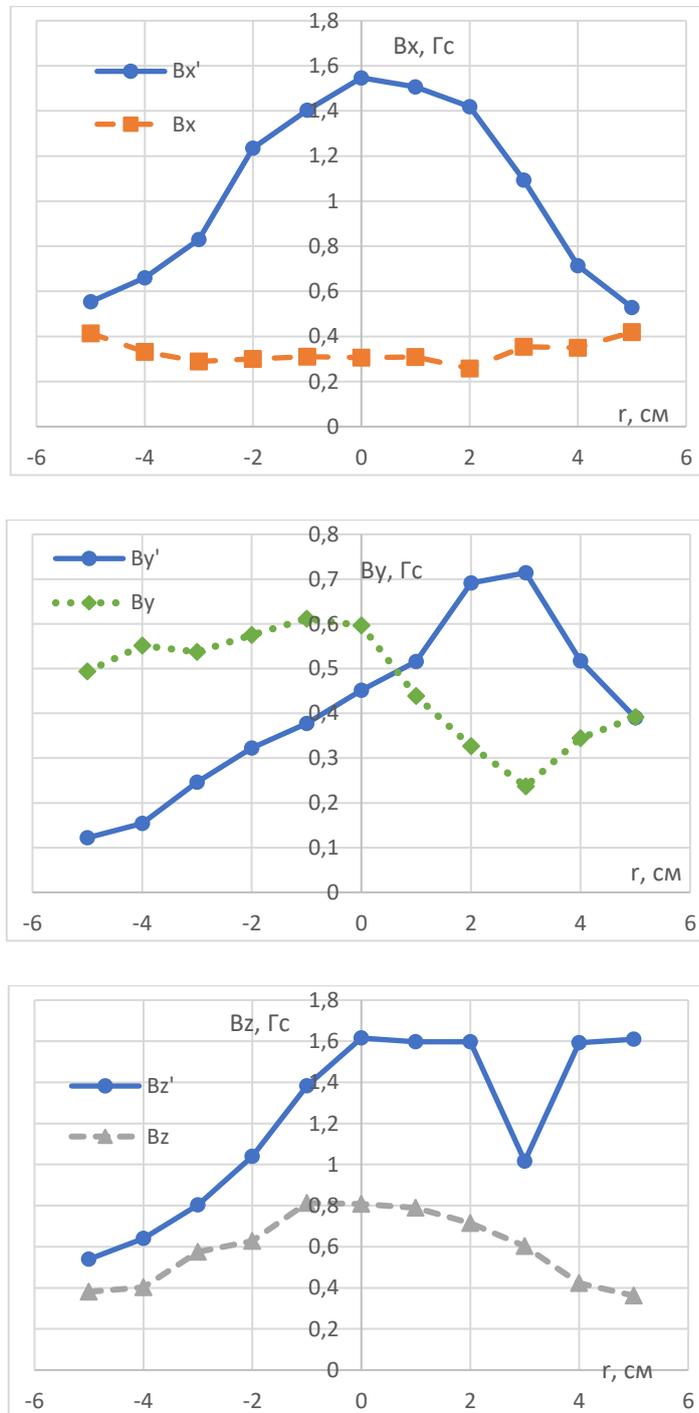


Рис. 7 Радиальные профили компонент МП после разворота внешнего поля (синим) в сравнении с профилями до разворота

Также можно сравнить МП полученные при сопротивлении осциллографа 50 Ом, и при сопротивлении 1 МОм (рис. 8). Как видно, МП отличаются несущественно, это говорит о том, что волновое сопротивление линии отличается от 50 Ом. Однако важно учитывать способ согласования линии, поскольку на ВЧ частоте при достаточно малой амплитуде полезного сигнала рассогласование длинной линии может приводить к существенным искажениям. В дальнейшем конструкция зонда была переработана, и балансный трансформатор устанавливался на выход осциллографа.

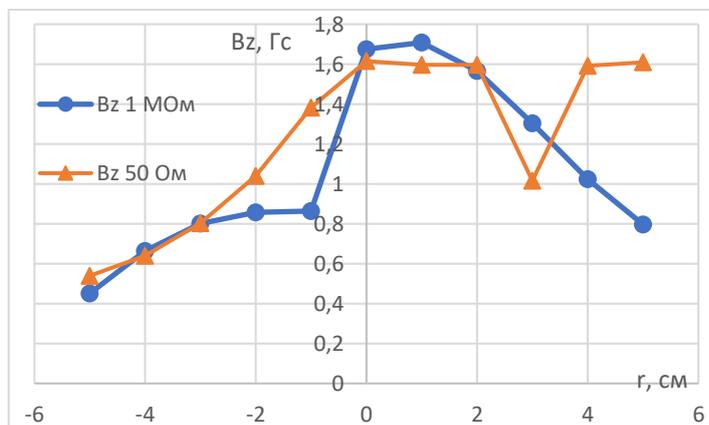
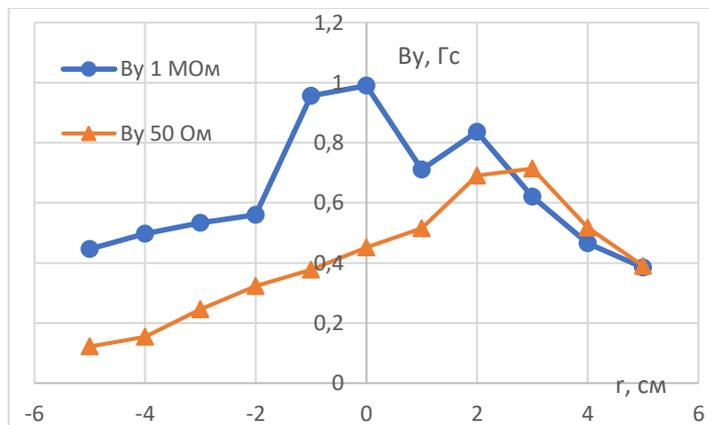
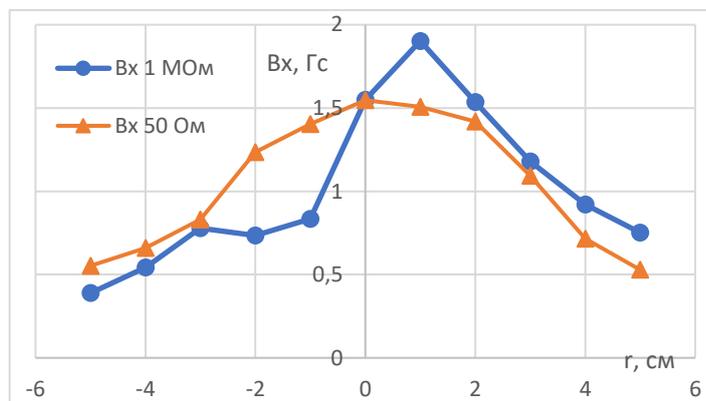


Рис. 8 Сравнение МП при внутреннем сопротивлении осциллографа 50 Ом и 1 МОм.

Также были произведены измерения радиальных профилей при давлении напуска газа 4 атм., что соответствует давлению газа в камере 37 мТорр (давлению напуска 1,5 атм. соответствует давление в камере 21 мТорр) – рис. 9 (сопротивление осциллографа для давления напуска 4 атм. 50 Ом, $V_{внеш.} = 120$ Гс):

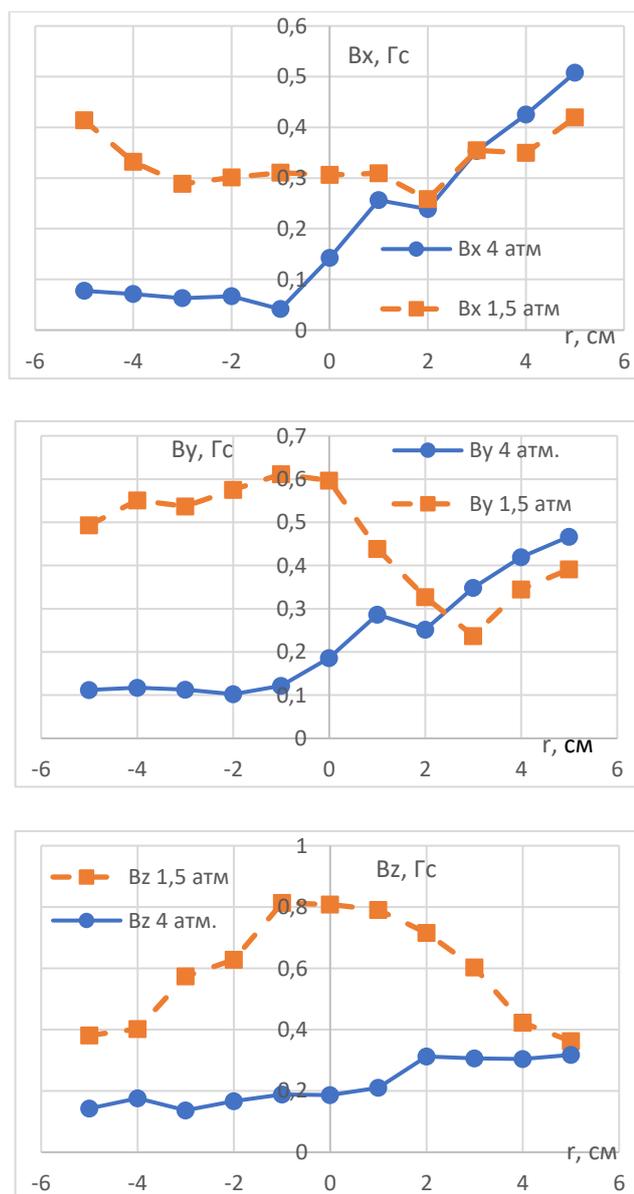


Рис. 9 Сравнение МП при давлениях напуска $P_n=1.5; 4$ атм.

Для 4 атм. распределение ВЧ полей наиболее несимметрично, что может быть связано с увеличением амплитуды колебаний потенциала плазмы с

повышением давления нейтрального газа в камере. Об этом свидетельствуют высокие амплитуды электростатической наводки.

Сравним данные с теоретическими: поскольку зонд двигался по одной из осей измерения (Oy)

$$B_r \equiv B_x; B_\theta \equiv B_y; B_z \equiv B_z$$

Отмечая, что на рис. 7 магнитные моля B_x после разворота сильно увеличиваются, предположим, что это соответствует сумме мод $m = 0, 1$; тогда подбирая k_z и k_r (в эксперименте они будут меняться поскольку меняется плотность плазмы [6]) и устанавливая коэффициент $A = 0.9$ для суммы мод $m = 0, -1$; для $m = 0, 1$; $A = 1.7$, получаем соответствующие графики на рис. 10. Важно отметить, что из-за геометрических размеров зонд измеряет усреднённое в некотором объёме поле, что не было учтено при построении теоретических полей. МП суммы положительной и нулевой мод и измеренных при изменённом направлении внешнего поля схожи по форме, сумма отрицательной и нулевой мод отличается от экспериментальных МП при первоначальном направлении внешнего поля наличием максимумов у B_z и B_θ . Воспользуемся этим предположением, и сравним МП при давлении напуска 4 атм. с суммой положительных мод – соответствующие графики на рис. 10 (коэффициент $A = 0,3$ и изменены k_z и k_r) демонстрируют некую корреляцию между оценкой и экспериментом.

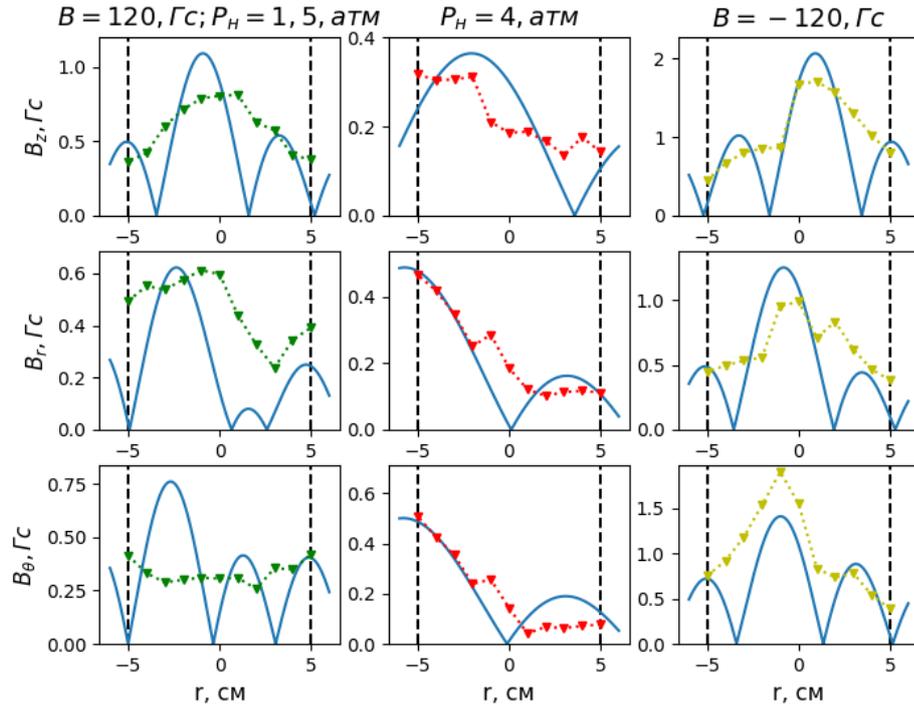


Рис. 10 сравнение МП при разных направлениях внешнего поля ($B = 120, 120, -120$ Гс соответственно) и давлениях напуска ($P_n = 1,5; 4; 1,5$ атм. соответственно) с теоретическими (Для начальных давления напуска и направления внешнего поля показана сумма мод $m = 0, -1$; $A = 0,9$; $k_z = 80 \text{ м}^{-1}$ $k_r = 90 \text{ м}^{-1}$. Для давления напуска 4 атм. сумма мод $m = 0, -1$; $A = 0,3$; $k_z = 130 \text{ м}^{-1}$ $k_r = 40 \text{ м}^{-1}$. Для обратного направления поля сумма мод $m = 0, 1$; $A = 1,7$; $k_z = 70 \text{ м}^{-1}$ $k_r = 90 \text{ м}^{-1}$).

Как указано выше, исключение длинной линии между измерителем и балансным трансформатором может понизить искажение сигнала. Также была увеличена длительность разряда плазмы (с 0.5 с до 1 с), чтобы исключить влияние переходных процессов на измеряемые величины. Измеренные профили для $m=1$ моды показаны на рис. 11. Наблюдается наличие множества локальных экстремумов, зеркально симметричных относительно центральной оси. Данный результат схож с результатами измерений в сходящемся магнитном поле, продемонстрированный в работе [8], в которой измерялось продольное магнитное поле, различие заключается в величине амплитуды, что может быть связано с большим коэффициентом расхождения поля в данной работе. В источнике [8] такое распределение было названо «мелкомасштабной волновой структурой».

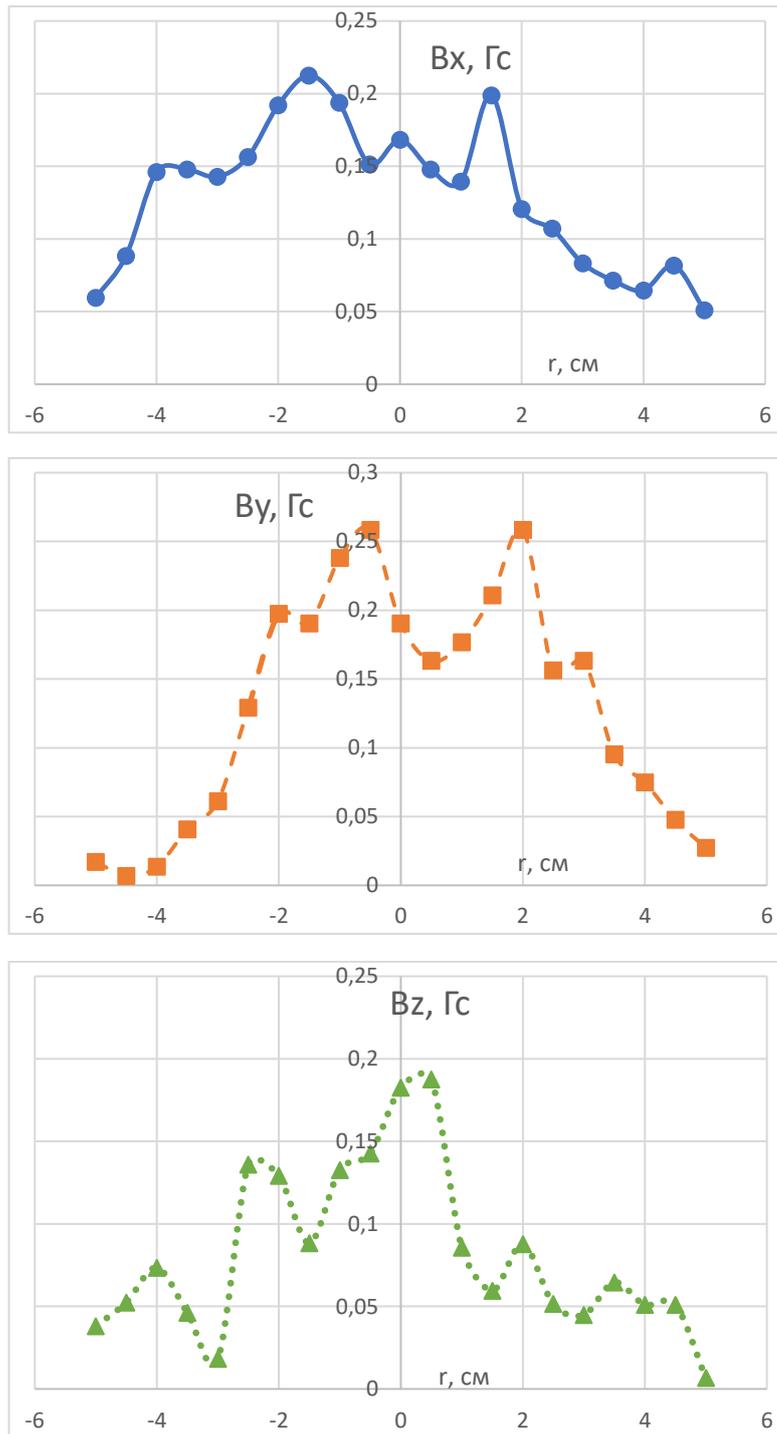


Рис. 10. Радиальные профили компонент МП для отрицательного поля ($B_{внеш} = -120$ Гс, $P = 21$ мТорр) после изменения схемы измерения.

4. Заключение

В работе были проведены измерения радиальных профилей компонент ВЧ МП геликонного разряда в расширительном объёме, в расходящемся внешнем магнитном поле при различных направлениях внешнего магнитного поля и давлении газа в камере при мощности 15 кВт. В ходе экспериментов наблюдается ряд особенностей распределения ВЧ компонент разряда:

- Во многих случаях профили полей имеют несимметричное распределение. Причина может быть в увеличении паразитной наводки на полезном сигнале. В эксперименте была переработана схема расположения балансного трансформатора для уменьшения наводок. Калибровка показывает, что доля емкостной наводки на вторичной обмотке велика (20%), поэтому в будущем предполагается экранировать от нее витую пару между трансформатором и катушкой зонда. Вторая причина может заключаться в том, что в источнике одновременно распространяются различные азимутальные волновые моды. Наконец, в-третьих, в камере может при некоторых параметрах реализовываться смешанный случай стоячих и бегущих волн, что вносит искажения в измерения.
- При увеличении длительности разряда в случае $m=1$ моды наблюдается мелкомасштабная волновая структура, распространяющаяся в неоднородном поле и описанная киевской группой исследователей в работе [8].

5. Литература

1. Исследование параметров геликонного источника плазмы. Е. И. Кузьмин, 2016
2. Разработка магнитного зонда для измерения высокочастотных полей геликонных волн в плазме. М. А. Прокопьев, 2020
3. Helicon Wave Propagation in Low Diverging Magnetic Fields. Т. А. Lafleur, 2011.
4. Magnetic fluctuation probe design and capacitive pickup rejection. С. М. Franck, О. Grulke, and Т. Klinger, 2002
5. Диагностика плазмы. Под ред. Р. Хаддлстоуна и С. Леонарда, перевод с английского под ред. С. Ю. Лукьянова, 1967.
6. Разработка зонда и измерение плотности и температуры плазмы в геликонном источнике. О. П. Морозов, 2021
7. Arnush D., Chen F.F. // Phys. Plasmas. 1998. V. 5. P.1239.
8. «Wave phenomena, hot electrons, and enhanced plasma production in a helicon discharge in a converging magnetic field» V. F. Virko, K. P. Shamrai, Yu. V. Virko, and G. S. Kirichenko// Phys. Plasmas 11, 3888 (2004); doi: 10.1063/1.1764830