

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Сараева Карина Павловна

КУРСОВАЯ РАБОТА

**“Исследование характеристик импульсного индукционного разряда
в азоте”**

Практикум по электричеству и магнетизму, 2 курс, группа №18310

Научный руководитель:

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Исследование характеристик импульсного индукционного разряда в азоте.

Сараева Карина Павловна.

Физический факультет. Практикум по электромагнетизму. 3 семестр.

Группа №18310, 2019.

Научный руководитель:

Чуркин Дмитрий Сергеевич, старший преподаватель на кафедре общей физики, кандидат физических наук.

Аннотация

Целью работы являлось исследование характеристик импульсного индукционного цилиндрического разряда в азоте. Разработана и создана экспериментальная установка, включающая в себя высоковольтную систему возбуждения и индукционный лазерный излучатель, на котором размещался индуктор, состоящий из 50 катушек по 1,5 витка. Предложена математическая модель и выполнен расчет распределения неоднородности магнитного поля, возникающего вследствие особенностей размещения индуктора на разрядной трубке. В экспериментах также оценена неоднородность пространственного распределения энергии лазерного излучения. Продемонстрировано качественное соответствие данных расчета неоднородности магнитного поля и неоднородности распределения энергии генерации по сечению лазерного пучка.

Ключевые слова: импульсный индукционный разряд, импульсное магнитное поле, УФ азотный лазер.

Оглавление

Введение	4
Основная часть	5
1. Теоретическая часть	5
1.1. Общая характеристика азотного разряда	5
1.2. Расчет параметров индуктивно связанной плазмы	6
1.3. Типы разрядов	8
2. Экспериментальная часть	9
2.1. Описание установки	9
2.2. Методика измерений	11
2.3. Результаты эксперимента.....	12
3. Обсуждение результатов	16
Список литературы	17

Введение

Азотный лазер является одним из наиболее распространённых источников мощного короткоимпульсного УФ излучения и имеет много применений в науке, промышленности, медицине и пр. [1,2]. Как правило, активная среда азотного лазера формируется в результате протекания сильноточных продольного или поперечного импульсных электрических разрядов. Недостатком такого метода возбуждения является эрозия металлических электродов, которая приводит к распылению материала электродов внутрь газа. Кроме того, возникают катодные пятна и формируются стримеры, ухудшающие объемную однородность разряда, снижающие энергию генерации, стабильность лазерного излучения по амплитуде и т.д. Альтернативным решением вышеозначенных проблем является использование импульсного индукционного разряда, который формируется в отсутствие каких-либо электродов в активной среде. Такой метод накачки позволяет создавать газовые лазеры с практически неограниченным ресурсом работы, при этом имеющие высокую стабильность генерации, малую расходимость лазерного пучка.

Вместе с тем, импульсный индукционный разряд как метод накачки активной лазерной среды имеет свои особенности и, как следствие, сложности в оценке параметров разряда. Существующие на сегодняшний день методики диагностики индуктивно связанной плазмы (ИСП) разработаны для стационарных режимов и равновесной плазмы, поэтому они не применимы для импульсного режима. Однако, представляется возможным расчет энергетических и пространственных характеристик магнитного поля в реальном соленоиде на основании его конструктивных особенностей и измерений вольтамперных характеристик. Критерием оценки в таком случае может выступать исследование пространственных характеристик лазерного пучка. Поэтому целью данной работы является исследование характеристик импульсного индукционного цилиндрического разряда в азоте на примере конструкции мощного индукционного азотного лазера.

Задачи исследований включают в себя:

- расчет распределения неоднородности магнитного поля, возникающего вследствие особенностей размещения индуктора на разрядной трубке;
- оценка неоднородности пространственного распределения энергии лазерного излучения.

Основная часть

1. Теоретическая часть

1.1. Общая характеристика азотного разряда

Индукционный разряд известен уже более ста лет, и является хорошо изученным. Среди наиболее ранних работ исследования Дж. Дж. Томсона и Н. Теслы. Индукционный разряд можно наблюдать в откачанном баллоне с газом, помещенному внутрь соленоида, по которому течет ток высокой частоты.

Модель формирования импульсного индукционного разряда состоит в следующем. Переменный (как правило, синусоидальный) ток высокой частоты I , протекающий через индуктор порождает переменное магнитное поле, направленное вдоль оси z , согласно закону Максвелла (1), возникает переменное вихревое электрическое поле E , циркулирующее вокруг оси z , силовые линии которого представляют собой концентрические окружности, расположенные соосно виткам индуктора (рис.1).

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (1)$$

В случае бесконечного соленоида, в силу цилиндрической симметрии системы, можем записать ротор в цилиндрических координатах, тогда имеем:

$$\vec{E} = -\frac{R}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$$

Где R - расстояние от центра соленоида до точки, в которой вычисляется поле.

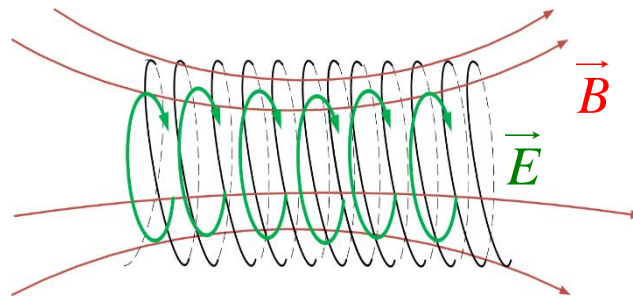


Рис.1 Схема полей в соленоиде

Далее электрическое поле вызывает дрейфовое движение заряженных частиц. Сила Лоренца направлена перпендикулярно вектору E и H , таким образом, вектор скорости дрейфа направлен радиально. Заряженные частицы при возрастании H совершают дрейф наружу от оси индуктора, одновременно с этим совершая круговое движение под действием силы со стороны вихревого электрического поля. Электрический ток в газовых средах возникает преимущественно за счет свободных электронов. Под действием переменной силы, порождаемой ВЧ электромагнитным полем, электроны приходят в колебательное движение, потребляют энергию поля, а затем трансформируют ее в другие виды энергии, в частности, в энергию светового излучения. На поддержание ионизации возникающего при достаточно высоком напряжении разряда затрачивается джоулево тепло кольцевых индукционных токов.

1.2. Расчет параметров индуктивно связанной плазмы

На сегодняшний день существует довольно много теоретических моделей, описывающих поведение индукционного разряда. Для моделирования протекающих электродинамических процессов при низком давлении индукционный разряд наиболее часто рассматривается в качестве вторичной обмотки трансформатора с воздушным сердечником [3,4].

На ВЧ-генератор нагружен трансформатор, первичная обмотка которого состоит из генератора и индуктора, имеющего собственные значения индуктивности L_0 и сопротивления R_0 , индуцированный в плазме ток является короткозамкнутым вторичным витком трансформатора, его индуктивность L_2 и

сопротивление R_2 – эквивалентное активное сопротивление плазмы, моделирующее потери джоулевого тепла. Таким образом, мощность ВЧ-генератора P_{gen} , связана с мощностью, выделяемой в индукторе P_0 и плазме P следующим образом:

$$P_{gen} = P_0 + P \quad (2)$$

$$P_{gen} = \frac{I^2}{2}(R_0 + R_2) \quad (3)$$

Из формул (2,3) видно, что мощность генератора распределяется на нагрев индуктора и энергии, поглощаемой плазмой.

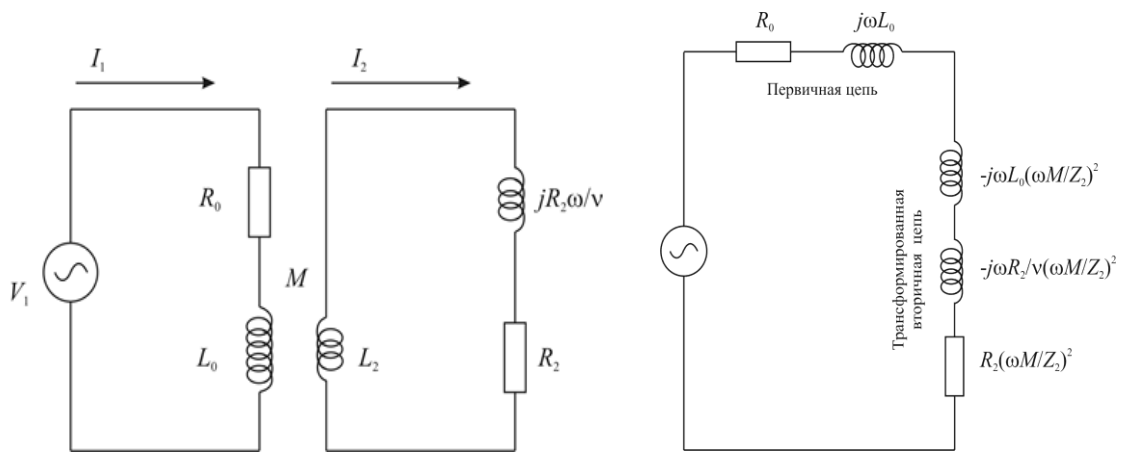


Рис.2 Трансформаторная модель до преобразования(слева) и после(справа)

Путем умножения на безразмерный коэффициент K можно перейти к эквивалентной схеме трансформаторной модели (рис.2). Коэффициент K есть отношение импеданса взаимной индуктивности ωM к импедансу плазменного витка:

$$K = \frac{(\omega M)^2}{Z_2} \quad (5)$$

где $M^2 = k^2 L_0 L_2$ Тогда плазменный виток увеличивает активное сопротивление цепи:

$$R_1 = R_0 + \frac{\omega^2 k^2 L_0 L_2 R_2}{Z_2^2} \quad (6)$$

где $Z_2^2 = [\omega L_2 + (\omega/n)R_2]^2 + R_2^2$.

Реактивное сопротивление цепи, наоборот, уменьшается (7), следовательно, уменьшается и магнитный поток во внешней цепи.

$$L_1 = L_0 - \omega k^2 L_0 L_2 \frac{[\omega L_2 + (\omega/n)R_2]}{Z_2^2} \quad (7)$$

Отрицательный знак в формуле (7) означает, что ток во вторичной цепи стремится уменьшить магнитный поток в первичной цепи. Для идеального трансформатора коэффициент связи $k=1$ и $\left(\frac{\omega M}{Z}\right)^2 = n$. В действительности, эти соотношения не выполняются. С учётом соотношений, справедливых для реального индуктора получаем [5]:

$$L_2 = \frac{L_0 r^2}{n^2 r_0^2} \quad (8)$$

Решая систему уравнений (6), (7), (8), определяем ток разряда

$$I_2 = I_1 \omega L_0 (\sqrt{k}/n) [(\omega L_0 / kn^2 + R_2 \omega / n)^2 + R_2^2]^{-1/2}$$

1.3. Типы разрядов:

В различных установках, использующихся для научных и практических применений, наибольшее распространение получили три типа индукционного разряда: цилиндрический, планарный и разряд трансформаторного типа (рис. 3).

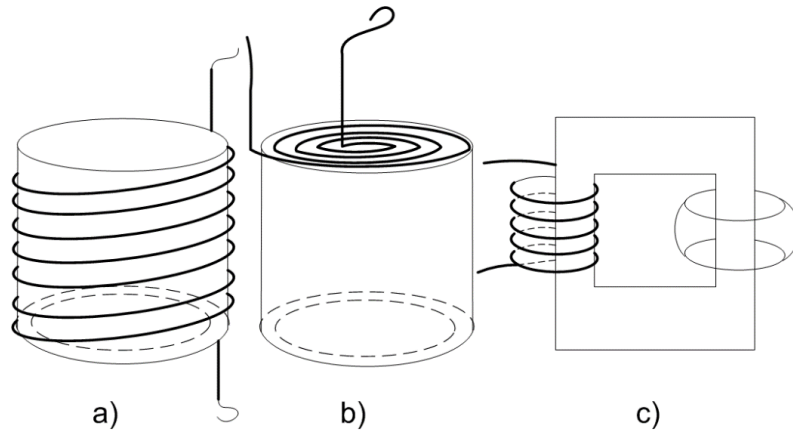


Рис.3. Типы индукционных разрядов: а – цилиндрический, б – планарный, с – трансформаторного типа

Планарный индукционный разряд (рис.3б) образуется в результате пропуска ВЧ-разряда через индуктор спиральной формы. В таком разряде магнитное поле имеет компоненты B_r и B_α , что обеспечивает соответствующее распределение индукционных токов в пространстве. Планарный разряд применяется в

процессах травления, нанесения тонких пленок и др., [6,7]. Однако, в силу специфической геометрии, данный тип разряда не подходит для создания лазеров.

Индукционный разряд трансформаторного типа (рис.3с) представляет собой плазменный виток, охватывающий магнитопровод. Разряды такого типа нашли широкое применение в производстве люминесцентных источников света и создании различных плазматронов, [8,9]. К преимуществам данного разряда можно отнести возможность работы в килогерцовом диапазоне частот (более мягкие требования к источникам питания), эффективную светоотдачу.

Цилиндрический индукционный разряд (рис.3а) на данный момент является наиболее исследованным и распространенным. Для создания разряда применяются ВЧ-генераторы, работающие на различных т.н. коммерческих частотах, кратных 13,56 МГц. Такой тип разряда является наиболее предпочтительным и для создания индукционных лазеров.

2. Экспериментальная часть

2.1. Описание установки

Для проведения исследований была создана экспериментальная установка, электрическая схема которой показана на рис. 4. Данная установка работает на основе схемы LC-инвертора, выполняющего функции повышения напряжения на индукторе, ускорении процесса передачи напряжения на неуправляемый разрядник SG. U_{ch} - медленно нарастающее, по сравнению с характерными временами работы установки, напряжение, C_1, C_2 - конденсаторы, емкости которых соответственно: $24 * 2,7$ нФ и $18 * 2,7$ нФ, C_3, C_4 - конденсаторы с меньшей емкостью, соответственно: $7 * 1,3$ нФ, $14 * 1,3$ нФ. L_{ch} - зарядный дроссель, индуктивность которого мала на временах зарядки конденсаторов C_1, C_2 , но становится большой на временах работы LC- инвертора. Поскольку подводящие провода не являются идеальными, также как и другие элементы цепи, на схеме общее реактивное сопротивление обозначено L . Также в установке использовался высоковольтный пробник ТРР0850, подключаемый к выходам $U_{c3}, U_{c4}, U_{ш}$, с помощью

которого передавался сигнал на каналы осциллографа Tektronix Ch_1, Ch_2, Ch_3 соответственно. W_1, W_2 , - герметизирующие трубку окна из кристаллов CaF₂, M_1, M_2 зеркала резонатора. Для снятия зависимости тока на соленоиде от вре-

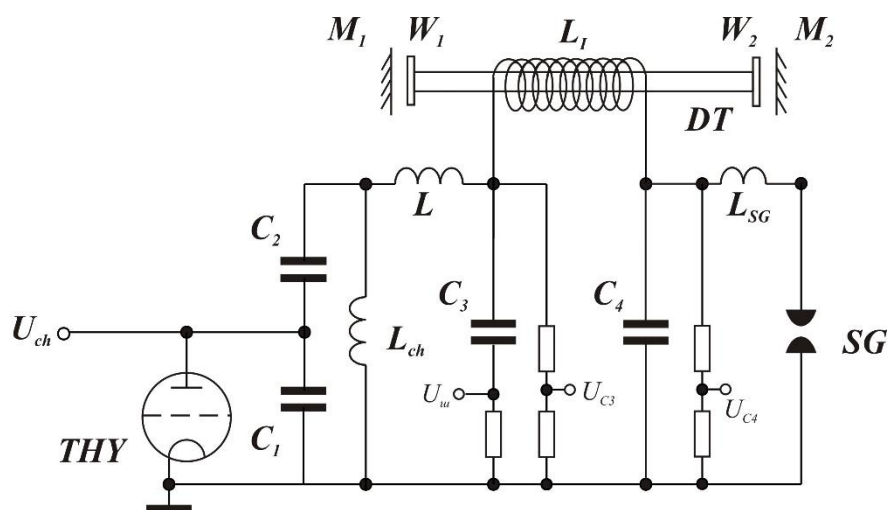


Рис.4 экспериментальная установка. ТНУ – тиратрон, C_1, C_2, C_3, C_4 - конденсаторы, L – индуктивное сопротивление подводящих проводов L_1 -соленоид, в котором возбуждается разряд, SG-разрядник, W_1, W_2 - высоковольтный пробник.

мени в установке используется шунтовое сопротивление, состоящее из сорока параллельно соединенных резисторов сопротивлениями 2 Ом.

Следуя трансформаторной модели, коэффициент связи должен стремиться к единице для максимальной передачи энергии в газовую среду, в то же время магнитный поток, пронизывающий камеру, должен быть максимальным, таким образом, при конструировании установки преследовались цели уменьшения индуктивности соленоида, таким образом, количество витков маленьких индукторов, составляющих соленоид, было уменьшено до 1,5, ограничением послужила необходимость прикрепления отводящих проводов. Поскольку магнитный поток, пропорционален плотности намотки n , она должна быть максимальной, а расстояние между витками минимальным для сокращения утечки магнитного потока. Также, чтобы избежать нежелательного пробоя воздушного пространства между отводящими проводами, была использована бифимерная намотка проводов.

Исходя из вышеизложенных посылов был сконструирован соленоид, состоящий из 50ти индукторов, содержащих полтора витка обмотки проводов ПВ-3,

сечением 4мм^2 , длина соленоида 655 мм, диаметр газоразрядной трубы 50 мм, диаметр обмотки индуктора 54 мм.

Диаметр генерируемого лазерного пучка 40 мм, толщина 2мм, разряд имеет вид полого цилиндра (рис.5).

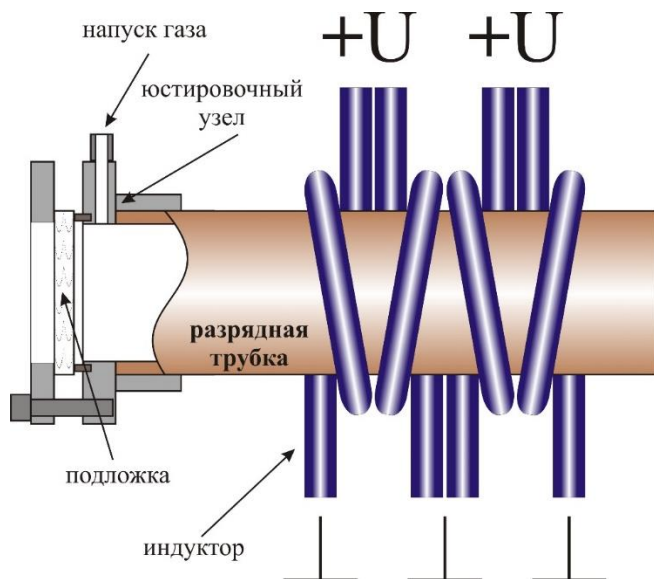


Рис.4 Схема узла

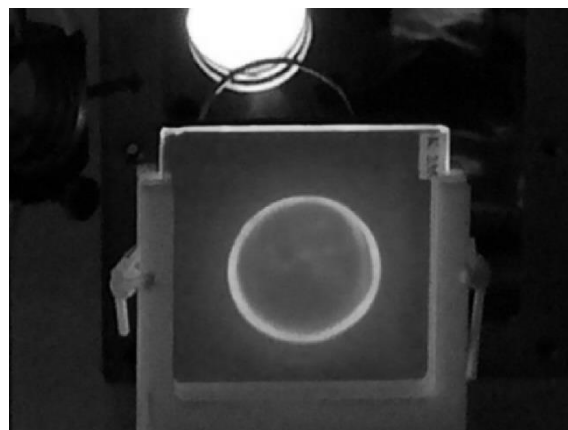


Рис.5 Изображение кольца генерации на экране

Из-за неравномерной плотности намотки в верхней и нижней половинах соленоида (рис.4) магнитное поле внутри газоразрядной камеры будет неоднородным, что влияет на энергетические характеристики установки. Поскольку известно, что неоднородность в распределении напряженности электрического поля по сечению плазмы может привести к пространственной неоднородности функции распределения электронов по энергиям, в результате возрастает неоднородность генерации УФ излучения.[6]

2.2. Методика измерений

Задача эксперимента состоит в том, чтобы, рассчитав неоднородность магнитного поля, качественно оценить распределение энергии лазерного столба в зависимости от полярного угла. Заметим, что плотность силовых линий электромагнитного поля уменьшается при приближении к торцам соленоида (рис.1), учет данных граничных эффектов в работе производиться не будет, поскольку расчёт производиться в центре соленоида.

Была использована следующая математическая модель: представим соленоид в виде целого цилиндра с плотностью намотки n_1 и дополнительного полуцилиндра с плотностью намотки n_2 , $n_1 = n_2 = n$. Разобьем полуцилиндр на малые кольца, с током, протекающим по ним In . Радиус кольца R , соответствует расстоянию от оси индуктора до намотки. Рассчитаем поле, создаваемое полукольцом в точке на оси z , при фиксированных полярных координатах α и r с помощью закона Био-Савара:

$$B = \frac{In}{c} \int \frac{d\vec{l} \times (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} = \frac{In}{c} \int \frac{dl_1}{|\vec{r} - \vec{r}'|^2} = \frac{In}{c} \int_0^\pi \frac{\cos \theta dl}{|\vec{r} - \vec{r}'|^2} = \frac{In}{c} \int_0^\pi \frac{(R + \cos(\alpha + \varphi)) d\varphi}{\sqrt{(r^2 + R^2 + R\cos(\alpha + \varphi))(r^2 + R^2 + R\cos(\alpha + \varphi) + z^2)}}$$

Далее, проинтегрируем dB_z вдоль всего цилиндра длиной $2L$ произведя замену переменной $t = \frac{r}{R}$:

$$B_z = \frac{2In}{c} \int_0^L \int_0^\pi \frac{(1 + t \cos(\alpha + \varphi)) \sin \gamma d\varphi dz}{\sqrt{(t^2 + 1 + t \cos(\alpha + \varphi))(t^2 + 1 + t \cos(\alpha + \varphi) + (z/R)^2)}},$$

$$\text{где } \sin \gamma = \frac{|\vec{r} - \vec{r}'|}{\sqrt{|\vec{r} - \vec{r}'|^2 + z^2}} = \frac{\sqrt{t^2 + 1 + t \cos(\alpha + \varphi)}}{\sqrt{t^2 + 1 + t \cos(\alpha + \varphi) + (z/R)^2}}$$

Тогда итоговая формула принимает вид:

$$B_z = \frac{2In}{c} \int_0^L \int_0^\pi \frac{(1 + t \cos(\alpha + \varphi)) \sin \gamma d\varphi dz}{R^{\frac{3}{2}} \sqrt{t^2 + 1 + t \cos(\alpha + \varphi) + (z/R)^2}} \quad (10)$$

Поле, создаваемое замкнутым цилиндром, отличается только пределами интегрирования:

$$B_z = \frac{2In}{c} \int_0^L \int_0^{2\pi} \frac{(1 + t \cos(\alpha + \varphi)) \sin \gamma d\varphi dz}{R^{\frac{3}{2}} \sqrt{t^2 + 1 + t \cos(\alpha + \varphi) + (z/R)^2}} \quad (11)$$

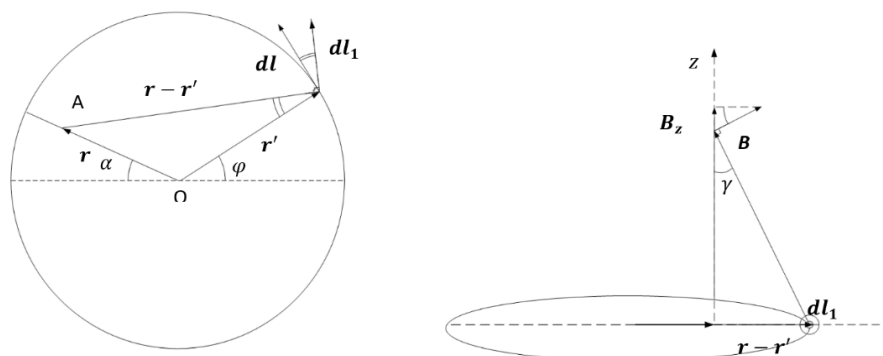


Рис.5 расчет магнитного поля в соленоиде

2.3. Результаты эксперимента

Значения данного интеграла были рассчитаны для α , меняющемся от 0 до 2π с интервалом 0,05, то есть зависимость $B(\alpha)$ снималась для $N=127$ точек, для $38\text{мм} \leq r \leq 41\text{мм}$, меняющегося в пределах существования кольца генерации, то есть при $t_1 = 0,703$, $t_2 = 0,72$, $t_3 = 0,74$, $t_4 = 0,759$, с помощью метода Монте-Карло, при числе n выборочных значений, равном 10^7 . Сравнение с результатом вычисления интеграла компьютерным методом для поля внутри целого цилиндра при постоянном радиусе, и угле, меняющемся от 0 до 2π позволяет утверждать, что вычисления проводятся с точностью до одного знака после запятой. На основании вычислений построен контурный график зависимости результата интегрирования от радиуса (график 1).

$t = \frac{r}{R}$	0,703	0,72	0,74	0,759	σ	\bar{x}
k_1	8,02	8,01	7,99	7,98	0,00287	8,00
k_2	7,04	7,02	6,99	6,97	0,03212	7,01
$\gamma = \frac{k_1}{k_2}$	1,138	1,140	1,143	1,145	0,0029	1,1418

Таблица 1. Результат интегрирования

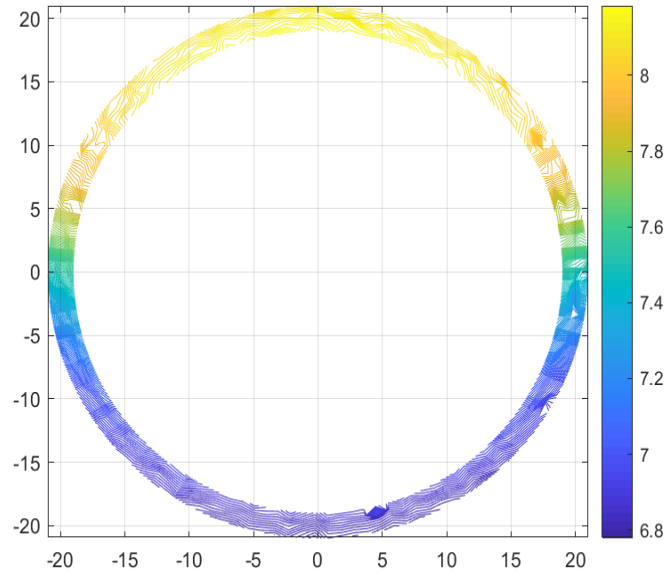


График 1. распределение интенсивности магнитного поля в соленоиде в зависимости от радиуса

Разность зависимостей $U_{c3}(t), U_{c4}(t)$ – это зависимость напряжения на индукторе от времени $U_L(t)$ (см. График 2а). Исходя из графика зависимости напряжения на шунтовом сопротивлении от времени (график 2b) можно рассчитать максимальный ток на соленоиде, с учетом погрешностей, вносимых высоковольтным пробником ТРР0850 и шунтовым сопротивлением.

Определим магнитное поле в моменты максимального тока на индукторе в процессе пробоя в верхней и нижней частях индуктора:

$$\langle B_1 \rangle_{\max} = \frac{\lambda U_{\max} (n_1 + n_2)}{R_{uc}} \frac{\sum_{\alpha=0}^{\pi} \int_{-L}^L \int_0^{\pi} \zeta(\alpha, \varphi, z) d\varphi dz}{N} = 3,12 \cdot 10^{-2} \text{ Гс}$$

$$\langle B_2 \rangle_{\max} = \frac{\lambda U_{\max} n_2}{R_{uc}} \frac{\sum_{\alpha=\pi}^{2\pi} \int_{-L}^L \int_0^{2\pi} \zeta(\alpha, \varphi, z) d\varphi dz}{N} + \frac{\lambda U_{\max} n_1}{R_{uc}} \frac{\sum_{\alpha=\pi-L}^L \int_{-L}^L \int_0^{\pi} \zeta(\alpha, \varphi, z) d\varphi dz}{N} = 2,74 \cdot 10^{-2} \text{ Гс} \quad (12)$$

$$I_{\max} = \frac{\lambda U_{\max}}{R_u},$$

где λ - коэффициент деления.

Относительная погрешность сопротивления, входящего в шунт 2:

$$\left| \frac{\Delta R_i}{R_i} \right| = 0,1$$

$$\left| \frac{\Delta R_{uu}}{R_{uu}} \right| = \frac{1}{40} \left| \frac{\Delta R_i}{R_i} \right| = 0,0025$$

Относительная погрешность измерения амплитуды сигнала высоковольтным пробником составляет:

$$\left| \frac{\Delta U_{\max}}{U_{\max}} \right| = 0,01$$

Погрешность вычисления интеграла можно определить исходя из таблицы 1:

$$\sigma_1 = 0,00287$$

$$\sigma_2 = 0,03212$$

Точность вычисления среднего магнитного поля в соответствующих частях соленоида составила около 1-2%.

Можно также определить отношение среднего магнитного поля в верхней половине соленоида к среднему магнитному полю в нижней половине соленоида:

$$\frac{\langle B_1 \rangle_{\max}}{\langle B_2 \rangle_{\max}} = \frac{2n \sum_{\alpha=0}^{\pi} \int_{-L}^L \int_0^{\pi} \zeta(\alpha, \varphi, z) d\varphi dz}{n \sum_{\alpha=\pi}^{2\pi} \int_{-L}^L \int_0^{2\pi} \zeta(\alpha, \varphi, z) d\varphi dz + n \sum_{\alpha=\pi}^{2\pi} \int_{-L}^L \int_0^{2\pi} \zeta(\alpha, \varphi, z) d\varphi dz} = \frac{k_1}{k_2},$$

Где ζ - подынтегральная функция из формул (10, 11).

Данное отношение высчитано в таблице 1 для разных значений радиуса в области кольца, тогда:

$$\gamma = \frac{\langle B_{1\max} \rangle}{\langle B_{2\max} \rangle} = \frac{k_1}{k_2}$$

$$\bar{\gamma} = 1,1418$$

$$\sigma = 0,0029$$

Построим доверительный интервал по правилу “трех сигм”:

$$1,1389 \leq \frac{\langle B_{1\max} \rangle}{\langle B_{2\max} \rangle} \leq 1,1447 \quad (13)$$

С помощью измерителя энергии PE50BB-DIF-C была измерена световая энергия в верхней половине лазерного пучка $\langle W_1 \rangle_{\max} = 4,16 \pm 0,04 \text{ мДж}$ в момент пробоя, в нижней части энергия составила $\langle W_2 \rangle_{\max} = 3,49 \pm 0,03 \text{ мДж}$, тогда:

$$1,17 \leq \frac{\langle W_1 \rangle_{\max}}{\langle W_2 \rangle_{\max}} \leq 1,21 \quad (14)$$

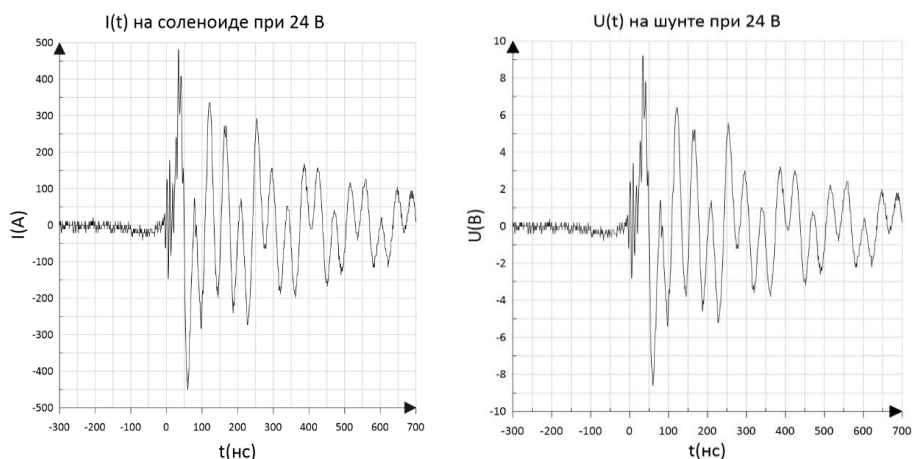


График2 ВАХ соленоида

3. Обсуждение результатов.

В ходе эксперимента было рассчитано значение магнитного поля в области существования разряда с точностью до 2% (12).

Поскольку энергия электронов в пучке пропорциональная градиенту напряженности электрического поля в области существования разряда, а вихревое электрическое поле неразрывно связано с магнитным полем, то:

$$\frac{\langle W_1 \rangle_{\max}}{\langle W_2 \rangle_{\max}} = \frac{\langle B_1 \rangle_{\max}}{\langle B_2 \rangle_{\max}},$$

что соответствует расчетным значениям в пределах допустимых погрешностей (13,14).

Таким образом, в ходе эксперимента удалось найти математическую модель, согласующуюся с геометрическими характеристиками установки, дающей качественное обоснование неоднородности распределения энергии в лазерном пучке.

Однако, данная модель не учитывает того, что намотка в соленоиде наклонена под углом к его оси. Также, возникают сложно контролируемые погрешности, связанные с исследованием нестационарной плазмы.

Следующим этапом исследований будет снятие более точной зависимости энергии светового потока в зависимости от полярного угла при разделении кольца генерации на сегменты.

Список литературы

1. Генин Д.Е., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. и др. Влияние добавок SF₆ и NF₃ на режимы УФ и ИК генерации в азоте // Квантовая электроника. 2011. Т 41. № 4. С. 360-365.
2. J. W. Lee, Y.T. Lim, I.K. Baek, S.Y. Yoo, G.S. Cho, M.H. Jeoin, J.Y. Leem, S.J. Pearton, Comparison of planar inductively coupled plasma etching of GaAs in BCl₃, BCl₃/Ar, and BCl₃/Ne, Appl. Sur. Sci., Vol. 233, Iss. 1-4, pp. 402-410.
3. Каралькина Е.А. “Индуктивный низкочастотный индукционный разряд низкого давления и возможности оптимизации источников плазмы на его основе”. Статья/Москва, МГУ 2008г., 22с.
4. Piejak R.B., Godyak V.A. and B.M.Alexandrovich “A simple analysis of an inductive RF discharge”. Статья/Великобритания, 1992 г., 8с.
5. Чуркин Д.С. “Индукционный разряд”
6. Попов О.П. “Исследование и разработка индукционных люминесцентных источников света на частотах 100 - 15 000Гц”. Диссертация/Москва, 2011г., 409с.
7. J. W. Lee, Y.T. Lim, I.K. Baek, S.Y. Yoo, G.S. Cho, M.H. Jeoin, J.Y. Leem, S.J. Pearton, Comparison of planar inductively coupled plasma etching of GaAs in BCl₃, BCl₃/Ar, and BCl₃/Ne, Appl. Sur. Sci., Vol. 233, Iss. 1-4, pp. 402-410.

8. K.H. Ng, W.S. Liew, Roslan Mohd. Nor and C.S. Wong, A planar-coil inductively coupled plasma system for thin film deposition, JURNAL FIZIK MALAYSIA Vol. 23, No. 1 – 4, 2002, pp. 51-53.
9. И.М.Уланов, Создание и исследование плазмотронов трансформаторного типа, Применение токов высокой частоты в электротехнологии: XI все-союз. науч.-техн. конф., Ленинград, 25-27 сент. 1991 г.: тез. докл. В 2 ч. Ч.2. - Л., 1991, сс. 27-28.