

ՀՀ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ
ՀՀ ԳԱԱ ՖԻԶԻԿԱՅԻ ԿԻՐԱՌԱԿԱՆ ՊՐՈՔԼԵՄՆԵՐԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ

Քրիստինե Գրիգորի Սահակյան

ԱԿՈՒՍՏԱՊԼԱԶՄԱՅՈՒՄ ՈՉ ԿՈՌԵԿՏ ԴՐՎԱԾՔ ՈՒՆԵՑՈՂ
ՀԱԿԱՂԱՐՁ ԽՆԴԻՐՆԵՐԻ ԼՈՒԾՈՒՄԸ

Ա.04.06 - <<Ակուստիկա>> մասնագիտությամբ
ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական
աստիճանի հայցման ատենախոսության

Ս Ե Ղ Մ Ա Գ Ի Ր

ԵՐԵՎԱՆ – 2014

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РА
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНЫХ ПРОБЛЕМ ФИЗИКИ НАН РА

Саакян Кристине Григорьевна

РЕШЕНИЕ НЕКОРРЕКТНО ПОСТАВЛЕННЫХ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ В
АКУСТОПЛАЗМЕ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 01.04.06 – “Акустика”

ЕРЕВАН – 2014

Ատենախոսության թեման հաստատվել է ՀՀ ԳԱԱ Ֆիզիկայի կիրառական պրոբլեմների
ինստիտուտում

Գիտական ղեկավար՝ ֆիզ. մաթ. գիտ. թեկնածու

Ա.Ս. Աբրահամյան

Պաշտոնական ընդիմախոսներ՝

ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր ԽՍՀՄ Պետ. Մրցանակակիր Մ.Ա. Ղազարյան
ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր Գ.Ա. Գալեչյան

Առաջատար կազմակերպություն՝

Ազգային հետազոտական Տոմսկի

ճարտարագիտական համալսարան: Լենինի փողոց, 302, ք. Տոմսկ, Ռուսաստան, 634050:

Ատենախոսության պաշտպանությունը տեղի կունենա 2014թ ղեկտեմբերի 19-ին ժամը՝ 15:00:
Երևանի պետական համալսարանի 049 ֆիզիկայի մասնագիտական խորհրդի նիստում
Հասցեն՝ ՀՀ ԳԱԱ ՖԿՊԻ, 375014, Երևան, Հր. Ներսիսյան 25:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵՊՀ գրադարանում:

Սեղմագիրը առաքված է 2014թ. նոյեմբերի 14-ին:

Մասնագիտական խորհրդի

Գիտ. քարտուղար



Ֆիզ.-մաթ. գիտ. թեկնածու

Վ.Պ. Քալանթարյան

Тема диссертации утверждена в Институте Прикладных Проблем Физики НАН РА
Научный руководитель: кандидат физ-мат. наук А.С. Абрамян

Официальные оппоненты

доктор физ-мат. наук, профессор, лауреат Гос. Премии СССР

М.А. Казарян

доктор физ-мат. наук

Г.А. Галечян

Ведущая организация:

Национальный исследовательский Томский
политехнический университет. Проспект Ленина, дом 30, г. Томск, Россия, 634050.

Защита диссертации состоится 19-го декабря 2014г. в 15:00 часов на заседании
Специализированного Совета 049 по физике Ереванского Государственного Университета
по адресу: ИППФ НАН РА, 375014, г. Ереван, ул. Г. Нерсисяна 25.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕГУ.

Автореферат разослан 14-го ноября.

Ученый секретарь

Специализированного Совета



Кандидат физ.-мат. наук

В.П. Калантарян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Газоразрядные устройства широко используются в науке и технике на современном этапе развития. При работе газоразрядных приборов наблюдаются различные неустойчивости горения разряда, что затрудняет стабильную работу устройств и может привести к нарушению их работы.

При модуляции разрядного тока создается акустическая неустойчивость, которая проявляется через усиление и генерацию акустических колебаний. Эти акустические колебания взаимодействуют с плазмой, в которой течет модулированный ток, в результате плазма переходит в новое – акустоплазменное состояние. Параметры акустоплазмы могут существенно отличаться от параметров плазмы без акустического возмущения.

Акустоплазменная среда содержит много параметров и ее описание простыми математическими уравнениями (даже системой дифференциальных уравнений) затруднено. Поэтому для качественного предсказания поведения акустоплазменной среды целесообразно использовать теорию катастроф.

Как всякая сложная самосогласованная система акустоплазма имеет устойчивые и неустойчивые состояния. Под влиянием внешних воздействий возможен переход из одного устойчивого состояния в другое, которые можно описать, как фазовые переходы системы. Эти фазовые переходы можно исследовать при помощи теории катастроф.

Обработка экспериментально полученной базы данных дает возможность построить математическую модель исследуемого процесса, а затем, в рамках представленной математической модели акустоплазмы при помощи решения прямых и обратных задач определить параметры акустоплазмы. Т.е., часть параметров акустоплазмы мы измеряем экспериментально, а часть – вычисляем при помощи прямых и обратных математических задач, причем, наиболее сложным является решение некорректно поставленных обратных задач.

Целью настоящей диссертационной работы является: Экспериментальные исследования влияния акустических полей, возникающих в плазме при модуляции разрядного тока на параметры акустоплазмы молекулярных газов и газовых смесей низкого давления (рабочей смеси CO₂-лазера при давлении 2- 25 Торр (250-3300Pa)); разработка методов решения прямых и некорректно поставленных обратных задач на основе экспериментально полученной базы данных, получение в результате экспериментов математических моделей акустоплазменных процессов.

Для этого необходимо решение следующих основных задач:

- измерение с высокой точностью и достоверностью количественных характеристик управляющих параметров акустоплазмы
- разработка методов обработки больших баз экспериментально полученных результатов, аппроксимация их теоретическими кривыми и построение по экспериментальным данным соответствующих математических моделей
- разработка методики применения существующих методов и разработка новых методов решения некорректно поставленных обратных задач для построения математических моделей акустоплазменных процессов и определения динамики параметров, которые не были измерены экспериментально
- определение критических точек неустойчивого равновесия и фазовых переходов в акустоплазме, в которых решения обратных задач не существует.
- измерение спектров излучения акустоплазмы в видимой области (400-800нм)

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

Впервые:

- экспериментально показано различие в динамике тока, вытекающего в анод разрядной трубки и тока, вытекающего из катода разрядной трубки в течение периода модуляции
- предложен метод определения изменения параметров акустоплазменного разряда в течение периода модуляции при помощи некорректно поставленных

обратных задач, базирующийся на решении обратных задач в каждый текущий момент времени для экспериментально измеренных параметров, в результате получается матрица уравнений, содержащих текущие значения вычисляемых параметров, т.е., изменение вычисляемого параметра также в каждый текущий момент времени

- решением некорректно поставленных обратных задач получены динамические вольт-ваттная, вольт-кулонная и вольт-фарадная характеристики разряда. Определены области скачков заряда в течение периода модуляции разрядного тока, определены характеристики электроакустического аналога акустоплазменного разряда -колебательного контура
- показано, что в акустоплазменном режиме из-за модуляции емкости разряда может иметь место параметрическое усиление электрических колебаний.
- решением некорректно поставленных обратных задач получена аппаратная функция преобразования энерговклада в разряд (вводимой в разряд электрической мощности) в спектральные компоненты энергетического спектра в видимой области
- аппроксимацией экспериментальных данных уравнениями катастроф получены математические модели акустоплазменных процессов, что позволяет определять критические точки скачков параметров и фазовые переходы, в которых решение обратных задач не существует
- детально рассмотрены и доведены до практического применения методы определения критических точек и точек фазовых переходов в акустоплазменных процессах

Практическая значимость:

- методика измерения разности токов, втекающего в анод разрядной трубки и вытекающего из катода разрядной трубки, позволяет по-новому подойти к рассмотрению многих процессов в нестационарных газовых разрядах рассмотренные методы решения некорректно поставленных обратных задач для больших баз экспериментальных данных с использованием матрицы уравнений,

- содержащих текущие значения экспериментальных данных могут быть использованы в различных областях науки и техники.
- полученные при измерениях динамических вольт-фарадных и вольт-кулонных характеристик результаты могут быть использованы в качестве базовых, как для новых теоретических исследований, так и для прикладных применений нестационарных газовых разрядов
- рассмотренные способы аппроксимации экспериментальных данных уравнениями катастроф и нахождения точек фазовых переходов и катастрофических скачков позволяют определить области аварийных ситуаций в экспериментах и разрабатываемом оборудовании не только в акустоплазме, но и в других областях науки и техники (в частности, с использованием разработанных методов был спроектирован и изготовлен универсальный блок питания для акустоплазменных устройств, работающий как в акустоплазменном режиме, так и на постоянном токе).
- полученный коэффициент преобразования электрической мощности накачки в спектральную плотность мощности оптического излучения (аппаратная функция преобразования энерговклада в разряд в спектральные компоненты) имеет практический интерес в науке и технике при обработке спектрограмм, при создании монохроматических и широкополосных источников света.

Основные положения, выносимые на защиту:

- различие мгновенных значений тока, втекающего в анод и тока, вытекающего из катода разрядной трубки в течение периода модуляции, изменение в результате этого параметров разряда
- метод определения изменения параметров акустоплазменного разряда в течение периода модуляции для больших баз экспериментальных данных, основанный на решении некорректно поставленных обратных задач с использованием матрицы уравнений, содержащих текущие значения экспериментальных данных в каждый момент времени

- получение математических моделей различных акустоплазменных параметров и процессов
- методика определения с помощью теории катастроф критических точек скачков параметров и фазовых переходов в которых решения обратных задач не существует
- получение динамических вольт-ваттных, вольт-кулонных, вольт-фарадных характеристик, определение изменения в течение периода модуляции активного сопротивления и емкости акустоплазменного разряда
- получение аппаратной функции преобразования энерговклада в разряд в спектральные компоненты энергетического спектра в видимой области

Апробация работы

Результаты работы представлялись, докладывались и обсуждались на конференциях:

- Երիտասարդ Գիտնակաների Հանրապետական Գիտաժողով, 11 Դեկտեմբերի **2010**, Վանաձոր, ՀՀ
- Int. Conf. on Electron, Positron, Neutron and X-Ray Scattering Under External Influences 18 – 22 October 2011, Yerevan – Meghri, RA
- Int. Sci. Conf on Modern Issues of Applied Phys., 30 March, 2011, Tbilisi, Geo.
- International Seminar on Plasma Physics, 13-15 February **2011**, Ouargla, Algeria;
- 5-th Intern.Conf. Charged & Neutral Particles Channeling Phenomena, Channeling 2012, 23-28 Sept.2012, Alghero-Italy
- VII Int.Conf.Plasma Phys.and Plasma Technology, PPPT-7, Minsk, Belarus, Sept.17-21, 2012.
- IV Конгресс физиков Беларуси, 24-26 Апреля 2013г., Минск, Беларусь
- X Int. Symp. RREPS-13 Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures & III Int. Conf. Meghri-13, Electron, Positron, Neutron and X-Ray Scattering under Extern. Influences Sept.23-28, 2013, Lake Sevan, Armenia.

Публикации: По теме диссертационной работы опубликовано 15 работ.

Структура и объем диссертации: Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения, изложенных на 160 страницах, включая 70 рис., 5 таб и списка литературы из 109 наименований

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель исследования, научная новизна, практическая значимость и основные защищаемые положения диссертационной работы.

Первая глава является обзорной, в ней приводятся результаты анализа опубликованных работ по слабоионизованной низкотемпературной газоразрядной плазме и обзор работ по теории катастроф.

§1.1 посвящен анализу литературных источников по теоретическим и экспериментальным исследованиям влияния внешних воздействий, особенно акустических волн, на низкотемпературную газоразрядную плазму.

В **§1.2** рассматриваются работы о приложении теории катастроф для исследования скачкообразного поведения плазмы. Отмечается, что все работы имеют качественный характер, однако, для приложений необходимы также и количественные исследования.

В **главе II** описывается общая концепция решения обратных задач, экспериментальная установка, методики измерений и обработки полученных результатов, методики нахождения критических точек и фазовых переходов в акустоплазме.

§2.1 посвящен общей концепции решения некорректно поставленных обратных задач. Обработка экспериментальной базы данных дает возможность построить математическую модель исследуемого процесса, т.е., получить какие-то закономерности, выраженные в виде формул. Отмечается, что в акустоплазме из-за

самосогласованности параметров, наличия скачков и фазовых переходов почти все явления нелинейны, следовательно описываются уравнениями степеней выше первой и имеют несколько корней, т.е. имеют неединственные решения и поэтому обратные задачи являются некорректно поставленными.

Предлагается новый метод решения обратных задач - использовать неквадратную матрицу, каждый из Z_k независимых внешних параметров квантуется на

120 пикселей, получаем матрицу из $120k$ уравнений $Az_{ij}^* = u_{ij}^*$ где $\{i=1 \div 120\}$;

$\{j=1 \div k\}$. Получаем набор мгновенных значений исследуемой функции u_{ij}^* в течение периода модуляции. Затем по мгновенным значениям строим аппроксимацию этой функции, которая и является искомой функцией u .

В случае наличия в исследуемой области особых точек, в которых решение обратных задач невозможно, предложена методика, позволяющая “сшивать” решения в особых точках с помощью теории катастроф.

§ 2.2 посвящен описанию экспериментальной установки и ее элементов (разрядные трубки, блоки питания), описанию измерительного комплекса, методикам обработки результатов измерений в акустоплазме рабочей среды CO_2 - лазера. Используется синусоидально модулированный разрядный ток, содержащий постоянную I_0 и переменную $I \sim$ компоненты (f - частота модуляции, $M=I \sim / I_0$ – глубина модуляции).

Показано, что для точного определения динамических параметров акустоплазменного разряда, связанных с изменением концентрации носителей заряда в течение периода модуляции, необходимо одновременное измерение тока со стороны анода и со стороны катода разрядной трубки.

Схема установки приведена на рис.1.

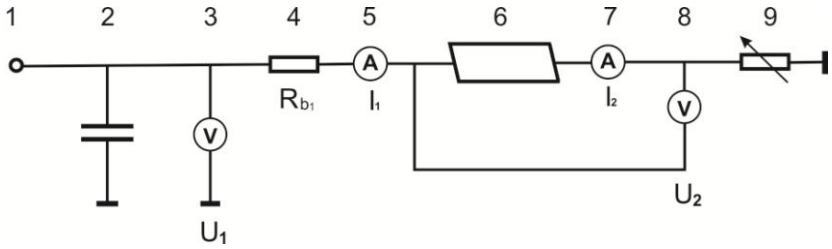


Рис.1. Блок-схема экспериментальной установки.

Постоянное высоковольтное напряжение U_1 поступает от источника (1) на анод разрядной трубки (6), переменное сопротивление (9), управляемое синусоидальным сигналом определяет разрядный ток, содержащий постоянную и переменную компоненты. Миллиамперметр (5) измеряет ток I_{an} (I_1), вытекающий в разрядную трубку со стороны анода, а миллиамперметр (7) измеряет ток, вытекающий из катода I_{cat} (I_2). Мгновенные значения I_{an} и I_{cat} различаются в течение периода модуляции разрядного тока из-за изменения заряда внутри разрядной трубки, но средние значения равны $\langle I_{an} \rangle = \langle I_{cat} \rangle = I_0$, иначе будет происходить накопление заряда в трубке. Киловольтметр (8) измеряет напряжение на концах разрядной трубки U_2 . Высоковольтный конденсатор большой емкости (2) замыкает переменную составляющую, в результате U_1 не меняется в течение всего периода модуляции. Для получения мгновенных значений токов и напряжений сигналы с (5), (7), (8) при помощи специально изготовленных электронных устройств подавались на осциллограф измерительного комплекса.

Поскольку состояние акустоплазмы меняется очень быстро и даже скачками, то в эксперименте требуется одновременно измерять большое количество параметров. Под необходимые измерения был модернизирован разработанный ранее многоканальный измерительный комплекс, позволяющий при помощи многоканальной системы видеонаблюдения и видеозаписи одновременно фиксировать

электрические, оптические, термодинамические, геометрические и прочие параметры в эксперименте.

Все осциллограммы и данные с цифро – аналоговых приборов регистрировались видеокамерами и при помощи многоканальной системы видеонаблюдения все каналы объединялись в один TV кадр. Телевизионные кадры записывались на видеомэгнитофон в стандарте VHS и в память компьютера. На одну видеокассету записывалось от 4 до 8 часов эксперимента. Такая система позволяет однократно провести эксперимент, получить довольно большую базу данных и многократно воспроизводить ход любой части эксперимента по видеозаписи, без повторения реального эксперимента.

Обычно для обработки данных используют стандартные пакеты программ типа WOLFRAM МАТЕМАТИКА, или аналогичные. Мы столкнулись с необходимостью создания специальных программ, поскольку стандартные пакеты типа WOLFRAM МАТЕМАТИКА с увеличением объема базы данных и увеличением количества точек отсчета теряют свои удобства и точность, а отдельные приложения (например Фурье-анализ) вообще не работают, если динамический диапазон величин превышает 2 порядка. Напомним, что для решения обратных задач необходимы большие объемы данных и высокие точности измерения (что требует большого количества точек отсчета). Поэтому под работу с EXCELL были переделаны соответствующие программы из [В.П.Дьяконов. Справочника по расчетам на микрокалькуляторах. М., Наука, 1986]. На их основе были проведены аппроксимации экспериментальных кривых уравнениями катастроф и оценено влияние точности определения коэффициентов аппроксимирующих многочленов на изменение измеряемых величин и расчетных коэффициентов. Например, для зависимости мощности, прикладываемой к трубке от напряжения на трубке среднеквадратичное отклонение (СКО) аппроксимирующей кривой от измеренной составляло $СКО=0,07$. При систематической ошибке измерения напряжения ($\pm 1\%$) $СКО=0,24$, при ошибке ($\pm 2\%$) $СКО \sim 0,5$. Т.е., для получения

корректных результатов требуются измерения с систематической погрешностью менее 1% и случайной погрешностью $\sim 1-3\%$ (усреднение по 120 точкам минимизирует влияние случайной погрешности и выбрано исходя из минимизации погрешностей быстрого Фурье-преобразования для первых 6 гармоник).

В § 2.3 приведены экспериментальные результаты по определению критических точек и фазовых переходов в акустоплазме, в которых решение обратных задач не существует. Детально разработан метод использования теории катастроф для определения характеристик фазовых переходов и скачков параметров с использованием определения фазовых переходов Гинзбурга-Ландау-Розенфельда (для каждой кривой проводится нормировка экспериментальных данных делением их на свои средние значения и превращение их в безразмерные величины, аппроксимация полученных данных уравнением катастроф, затем канонизация параметров аппроксимирующего уравнения катастроф и использование сепаратрис для выяснения существования фазовых переходов). Сепаратрисы – линии, которые разделяют на плоскости области с различными фазовыми состояниями. Если начальная и конечная точки исследуемого процесса пересекают сепаратрису, то, следовательно, существует фазовый переход. В этом случае корни уравнения производной (от уравнения, аппроксимирующего исследуемую характеристику плазмы) дают критические точки.

Ниже на примере динамических вольт-ваттных характеристик показана процедура определения точек фазовых переходов при наличии скачков параметров (динамических- т.е. изменяющихся в течение периода модуляции).

Нормируем экспериментальную кривую динамической вольт-ваттной характеристики в течение периода модуляции $F(x)$, где $F = W(t) / \langle W \rangle$; $x = U(t) / \langle U \rangle$; $W(t)$ - мгновенное (текущее) значение вводимой в разряд электрической мощности (энерговклад в разряд), $U(t)$ - мгновенное значение напряжения на разрядной трубке, $\langle W \rangle$ и $\langle U \rangle$ - средние значения.

Разделим нормированную кривую динамической вольт-ваттной характеристики на

участок, где нормированное напряжение возрастает от минимального до максимального (*up*) и на участок где напряжение уменьшается от максимального до минимального (*down*). Аппроксимируем экспериментальные кривые для каждого участка уравнением катастрофы (в общем случае типа бабочка, но в отдельных случаях могут быть катастрофы более низкого порядка)

$$F_5(x, a, b, c, d) = \frac{1}{6}x^6 + \frac{1}{4}dx^4 + \frac{1}{3}cx^3 + \frac{1}{2}bx^2 + ax \quad (1)$$

На рис.2 изображен начальный участок плоскости возможных значений коэффициентов (*a* и *c*) уравнения (1). Сепаратрисы- темносиняя и фиолетовая линии разделяют эту плоскость на участки с разными фазовыми состояниями. Из рис.2 следует, что при частоте модуляции 0,5 kHz (голубая линия) в течение периода модуляции (переход из *up* в *down*) вольт-ваттная характеристика не испытывает фазового перехода по параметрам *a* и *c*.

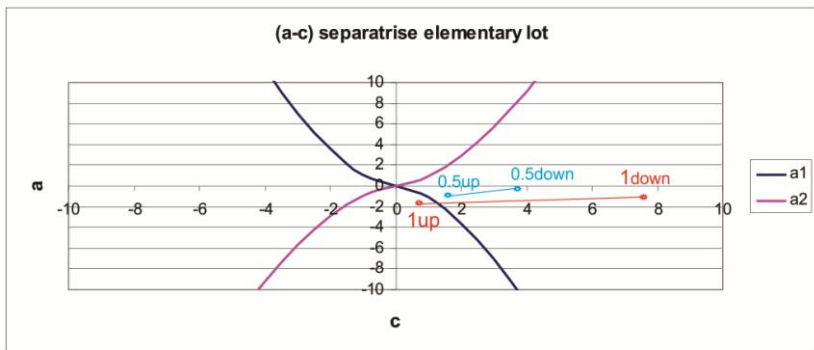


Рис.2. Исследование наличия фазовых переходов для коэффициентов *a* и *c*.

При частоте модуляции 1 kHz (красная линия) – испытывает фазовый переход (1-го рода) в течение периода модуляции. В диссертации аналогично исследуется наличие или отсутствие фазовых переходов для остальных коэффициентов уравнения (1). Для коэффициентов (*a* и *b*) – для обеих частот модуляции есть фазовый переход 1-го рода,

для $(b$ и $c)$ – фазовый переход 2-го рода, для $(b$ и $d)$ и $(c$ и $d)$ - фазовых переходов нет.

Метод может быть использован для определения наличия аварийных ситуаций (катастрофические скачки) в разных областях науки и техники. С использованием аналогичных исследований был изготовлен источник питания акустоплазменных устройств с высокой надежностью работы в критических ситуациях.

Третья глава посвящена решению некорректно поставленных обратных задач на основе экспериментально полученной базы данных, построению модели акустоплазменного разряда, определению оптических и электрических рабочих параметров акустоплазмы.

В §3.1 описан метод «квазиобращения» экспериментальной установки, который позволяет упростить расчеты электрических параметров в течение периода модуляции разрядного тока. Это эквивалентная электрическая схема, в которой “заземлен” ввод высоковольтного напряжения.

Приводится сравнение для активного постоянного сопротивления электрических параметров, обычно применяемых в теоретической электротехнике, для случаев чисто переменного тока и модулированного тока, содержащего постоянную и переменную компоненты.

Оценено увеличение энерговклада в электрическую цепь с постоянным активным сопротивлением при использовании модулированного тока.

Необходимо помнить, что для постоянного активного сопротивления потребляемая мощность пропорциональна квадрату тока, для плазмы – пропорциональна первой степени тока.

В § 3.2 приведены экспериментально полученные динамические вольт-амперные, вольт-ваттные и вольт-кулонные характеристики. С учетом нестационарности разряда и измерения втекающего и вытекающего токов такие характеристики получены впервые. Отличие характеристик в акустоплазменном режиме от характеристик на постоянном токе объясняется изменением заряда внутри

разрядной трубки в течение периода модуляции.

На рис.3 приведено сравнение мгновенных значений энерговклада в течение периода модуляции для случаев, синяя кривая - когда учитывается разность токов, измеренных со стороны анода и катода, и розовая кривая - когда измеряется только ток на аноде и подразумевается, что такой же ток вытекает из катода. Частота модуляции $f=2$ kHz, $M=0,8$.

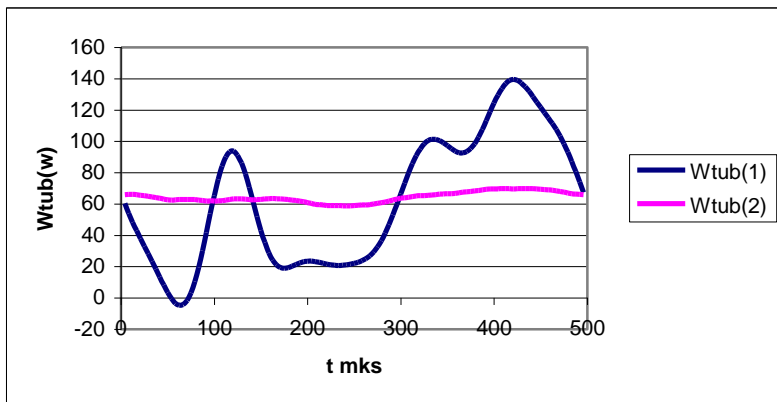


Рис.3. Сравнение текущих значений энерговклада в течение периода модуляции.

Из рис.3 видно, что измерение разрядного тока только с одной стороны (или анода, или катода) может дать большие ошибки при вычислении динамических параметров. Видно также, что в определенные промежутки времени энерговклад может принимать отрицательные значения, т.е., разрядная трубка часть своей запасенной энергии передает обратно в источник питания. В диссертации показано также, что в отдельные моменты времени в акустоплазменном разряде практически вся мощность может перекачиваться из источника в нагрузку, а в другие моменты источник может работать в режиме “холостого хода”. Показана та же возможность скачков энерговклада, в отдельные моменты, при изменении напряжения на трубке на 8% энерговклад в разряд изменяется на 70% от максимального значения. Это может привести к перегрузке и выходу источника питания из строя и должно учитываться при

проектировании и изготовлении источников питания.

На рис.4 приведено изменение мгновенного значения разности токов, измеренных со стороны анода и катода ($I_{an}-I_{cat}$) в течение периода модуляции для частоты модуляции 0,5 kHz.

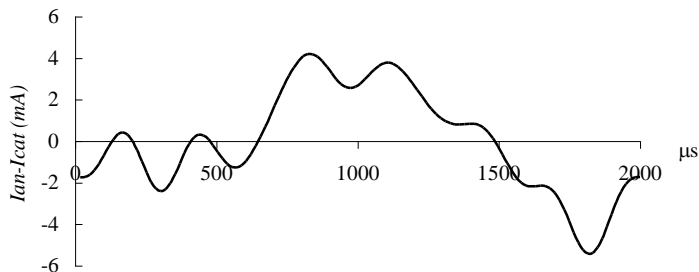


Рис.4. Изменение мгновенного значения разности токов ($I_{an}-I_{cat}$) в течение периода модуляции.

Видим, что кривая разности токов ($I_{an}-I_{cat}$) имеет сложную форму, хотя напряжение на разрядной трубке было близко к синусоидальному (при разложении напряжения в ряд Фурье мощность первой гармоники более, чем в 10 раз превосходила мощность суммы остальных 5 гармоник). Такое поведение можно объяснить изменением заряда и емкости акустоплазмы в разрядной трубке в течение периода модуляции. Изменение текущего значения переменной компоненты заряда $q(\tau)$ за время τ от начала периода модуляции имеет вид

$$q(\tau) = \sum_i^{\tau} (I_{ani} - I_{cati}) \Delta t_i + Const \quad (2)$$

где i - означает измерение в данный момент времени (на интервале $\{0-\tau\}$). Величина константы интегрирования $Const$ выбирается из условия, что $\langle q(\tau) \rangle = 0$. Это дополнительное условие снимает неоднозначность решения.

На рис.5 для двух частот модуляции тока приведена зависимость изменения

переменной компоненты заряда в разрядной трубке с акустоплазмой от мгновенного значения переменной компоненты напряжения на концах разрядной трубки (вольт-кулонная характеристика).

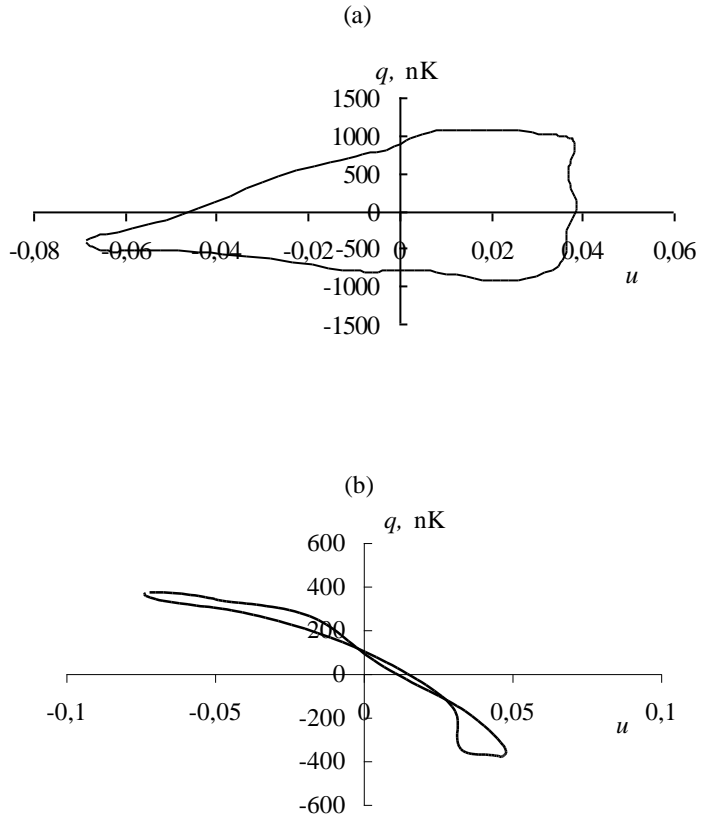


Рис.5. Вольт- кулонные характеристики а) $f=0,5\text{kHz}$, б) $f=1\text{kHz}$

По оси абсцисс отложено нормированное значение переменного напряжения на концах разрядной трубки $u = \{U(t) - \langle U \rangle\} / \langle U \rangle$, $U(t)$ – текущее значение

напряжения, а по оси ординат- текущее значение величины заряда $q(t)$.

Для частот модуляции 0,5kHz (рис.5а) и ниже, на участках возрастания и уменьшения напряжения вольт-кулонная характеристика хорошо аппроксимируется полиномом 5-ой степени, катастрофой типа “ласточкин хвост”. Для частоты 1 kHz и выше (рис.5б)- полиномом (3):

$$q = -56922u^2 - 7710u + 95,677 \quad (3)$$

Известно, что в плазме без акустического возмущения (при питании постоянным током) с увеличением концентрации электронов (увеличением заряда) напряжение на разряде падает. В акустоплазменном режиме при частоте модуляции 1kHz и выше поведение обратное- с увеличением напряжения отрицательный заряд (концентрация электронов) растет. В течение всего периода модуляции акустоплазменное состояние сохраняется. Для рис,5а в течение периода модуляции при росте напряжения растут и заряд и напряжение. В районе максимума напряжения отрицательный заряд скачком уменьшается на 2000 нКл – фазовый переход между двумя разными акустоплазменными состояниями. Когда напряжение уменьшается, но превышает среднее значение, заряд практически не меняется- сохраняется последнее акустоплазменное состояние, когда напряжение уменьшаясь становится меньше среднего происходит фазовый скачок из акустоплазменного состояния в состояние плазмы без акустического возмущения.

В § 3.3 на основе экспериментальных данных при помощи решения некорректно поставленной обратной задачи определено изменение емкости разряда C в течение периода модуляции. Впервые построена модель эквивалентной электрической схемы акустоплазменного разряда, учитывающая изменение в течение периода модуляции активного сопротивления R (4) и емкости C разрядной трубки (5). Индуктивность разрядной трубки имеет малую величину и существенна только на СВЧ, где играет роль инерция электронов.

$$R = \alpha(I_{an})^\beta \quad (4)$$

$$C = -\exp\left\{-\sum_{i=1}^n \frac{1}{(U_i - U_{\min})} \Delta U_i\right\} \left[\sum_{i=1}^n -\frac{\Delta t \times I_i}{(U_i - U_{\min})} (\exp\left\{-\sum_{i=1}^n \frac{1}{(U_i - U_{\min})} \Delta U_i\right\}) \right] \quad (5)$$

$n=120$, i - текущее значение на интервале [1-120], U_i - текущее значение напряжения U_{\min} - минимальное значение напряжения, $I_i = (I_{an} - I_{cat})$ - разностный ток Δt - элементарный отрезок времени квантования $\Delta t = \frac{T}{n}$, T -период модуляции.

В (4) коэффициенты α и β зависят от давления и сорта газа в разряде, в частности, для рабочей смеси CO₂ лазера при давлении $P_0 = 10$ Торр $\alpha = 2204,9$ $\beta = 1,182$ при измерении тока в Амперах и сопротивления в Ом.

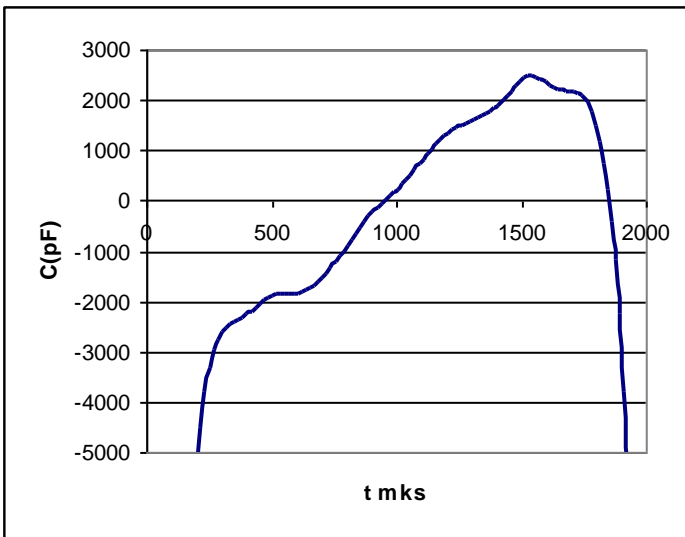


Рис.6. Изменение емкости акустоплазменного разряда в течение одного периода модуляции. $P_0=10$ torr, $I_0=11$ mA, $f=3$ kHz, $M=1$.

На рис.6 приведено изменение емкости акустоплазменного разряда в трубке CO₂ лазера рассчитанное по (5) с использованием экспериментальных значений I и U .

По горизонтальной оси отложено время в μs , по вертикальной оси - емкость в pF .

Из рис.6 видно, что в течение периода модуляции (на низких частотах) емкость разряда меняется на величину порядка $\pm 2000 \text{ pF}$.

Модель эквивалентной электрической схемы разрядной трубки с акустоплазмой описывается параллельным колебательным контуром.

Изменение нелинейной емкости разряда имеет сильную вторую гармонику и поэтому в акустоплазменном режиме возможно параметрическое усиление мощности электрических колебаний на первой гармонике частоты модуляции разрядного тока. Это объясняет, почему ширина резонансных процессов в акустоплазме, при определенных условиях, может быть намного больше, чем узкие резонансы в акустических резонаторах.

В § 3.4 методом решения некорректно поставленных обратных задач получена аппаратная функция, показывающая зависимость спектрального распределения плотности энергии в видимой области спектра, в полосе (620 – 680 нм) от энерговклада (электрической мощности), вводимой в разряд. Необходимо отметить, что аппаратная функция описывает средние величины и не дает информации о мгновенном значении световых характеристик.

Из рис.7а видно, что акустоплазменный режим наиболее выгодно применять в области низких давлений (ниже 10торр). При повышении давления аппаратная функция акустоплазменного режима не дает выигрыша, по сравнению с плазмой при питании постоянным током. Казалось бы это противоречит общему представлению, что с увеличением давления яркость разряда возрастает. На самом деле, с увеличением давления растет напряжение на разряде и вкладываемая в разряд мощность, что и приводит к увеличению свечения. Известное из экспериментов небольшое уменьшение свечения разряда при увеличении давления в области 10 Торр также хорошо прослеживается на рис.7а. Видно также, что в акустоплазменном режиме в области

10-25торг свечение возрастает (т.е., при том же энергвокладе повышается свечение). Если мы сохраняем модулирующий ток неизменным, то с ростом давления растет напряжение на разряде и значит кроме коэффициента преобразования будет увеличиваться и энергвоклад, в итоге, свечение будет возрастать еще быстрее. После давления 25-30торг дальнейшее увеличение свечения может быть получено только при увеличении энергвоклада.

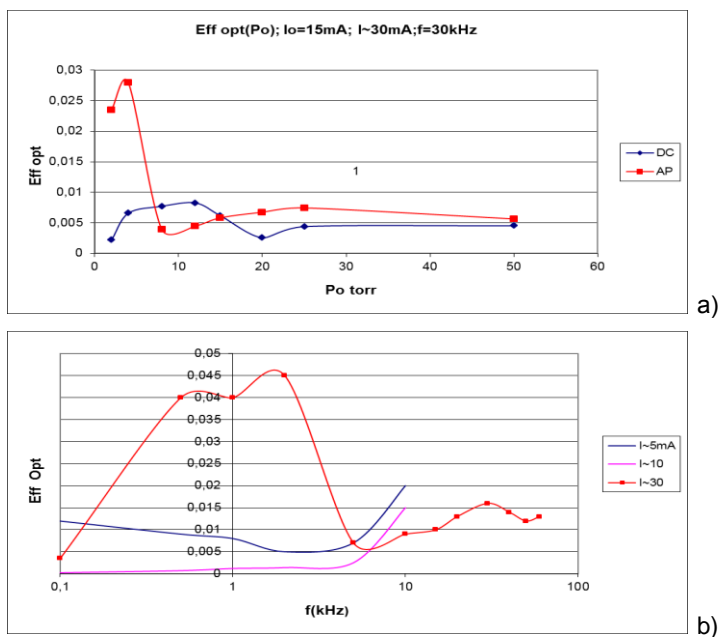


Рис.7. Аппаратная функция зависимости спектрального распределения плотности энергии в видимой области спектра от энергвоклада в разряд, а) зависимость от давления, б) зависимость от частоты модуляции.

Из рис.7б следует, что наиболее оптимальная частота модуляции 1kHz. Видно также, что свечение сильно зависит от величины переменной компоненты разрядного тока, при малой глубине модуляции в акустоплазменном режиме свечение может быть меньше, чем при питании постоянным током.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы:

- в акустоплазме из-за самосогласованности параметров, наличия скачков и фазовых переходов почти все явления нелинейны, следовательно описываются уравнениями степеней выше первой и имеют несколько корней, т.е., имеют неединственные решения. Поэтому почти все обратные задачи являются некорректно поставленными

- для точного определения динамических параметров акустоплазменного разряда, связанных с изменением в течение периода модуляции разрядного тока концентрации носителей заряда, необходимо одновременное измерение токов со стороны анода и со стороны катода разрядной трубки, изготовлена соответствующая экспериментальная установка. Изготовлены необходимые разрядные трубки. Модернизирован разработанный ранее многоканальный измерительный комплекс

- предложен и доведен до практического применения метод определения критических точек и фазовых переходов в акустоплазменных процессах, метод может быть использован в других областях науки и техники. Использовано специально разработанное программное обеспечение.

- разработан предлагается метод определения изменения параметров акустоплазменного разряда в течение периода модуляции при помощи некорректно поставленных обратных задач, базирующийся на решении обратных задач в каждый текущий момент времени для экспериментально измеренных параметров, в результате получается изменение вычисляемого параметра также в каждый текущий момент времени. При решении предлагается использовать неквадратную матрицу, каждый из k независимых внешних параметров квантуется на 120 пикселей, получаем $120k$

уравнений $Az_{ij}^* = u_{ij}^*$ где $\{i=1-120\}$; $\{j=1-k\}$. Получаем набор мгновенных значений

исследуемой функции U_{ij}^* в течение периода модуляции. Затем по мгновенным значениям строим аппроксимацию этой функции, которая и является искомой функцией U

- методом решения некорректно поставленных обратных задач получены: аппаратная функция, показывающая зависимость спектрального распределения плотности энергии в видимой области спектра от энерговклада (электрической мощности, вводимой в разряд); изменение в течение периода модуляции заряда в акустоплазменном разряде; изменение емкости разряда
- впервые получены динамические вольт-амперные, вольт-ваттные, вольт-кулонные и вольт-фарадные характеристики при учете разности токов со стороны анода и катода разрядной трубки, определено изменение емкости и активного сопротивления в течение периода модуляции и построена модель акустоплазменного разряда (параллельный колебательный контур с изменяющейся нелинейной емкостью). Существенная величина второй гармоники в изменении емкости позволяет осуществить в акустоплазме режим параметрического усиления электрических колебаний. Различие вольт-кулонных и вольт-фарадных характеристик для разных частот модуляции обусловлено зависимостью от частоты и глубины модуляции изменения заряда (концентрации электронов). В отличие от разряда на постоянном токе в акустоплазменном режиме квазинейтральность акустоплазмы нарушается в каждый момент времени, но в среднем, за период модуляции квазинейтральность сохраняется.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих работах:

1. А.С.Абрамян, К.В.Акопян, К.Г.Саакян. Взаимное влияние модулей в газоразрядной трубке, Изв.НАН РА, Физика, 2011, т.46, N4, с.262-266
2. А.С.Абрамян, А.С.Микаелян, К.Г.Саакян, Б.В.Хачатрян. Использование теории катастроф для обработки экспериментальных результатов измерений в низкотемпературной плазме. Изв.НАН РА, Физика, 2011, т.46, N4, с.267-272
3. А.С.Абрамян, К.Г.Саакян, Р.Ю.Чилингарян. Изменение заряда в акустоплазме в течение периода модуляции разрядного тока. Изв.НАН РА, Физика, 2014, т.49, N5, с.353-359
4. A.S.Abrahamyan, S.A.Chilingaryan, R.Yu.Chilingaryan, K.V.Hakobyan, A.S.Mikayelyan, K.G.Sahakyan. Infrared Radiation in CO₂:N₂:He Acoustoplasma, Int.Seminar on Plasma Physics, 13-15 Feb. 2011, Ouargla, Algeria, Proc. Pp.65-70.
5. А.Г.Мкртчян, А.С.Абрамян, К.В.Акопян, К.Г.Саакян. Многоканальный лабораторный измерительный комплекс. Int.Sci. Conf. on "Modern Issues of Applied Physics", 30 March, 2011, Tbilisi, Geo., Abstract digest, pp.76-77.
6. A.S.Abrahamyan, S.A.Chilingaryan, K.G.Sahakyan. Inverse Problems in Acoustoplasma by Phase Transitions, Int.Seminar on Plasma Physics, 13-15 Feb.2011, Ouargla, Algeria, Proc.,pp.71-74.
7. A.S. Abrahamyan, S.A. Chilingaryan, K.G. Sahakyan, Accounting RCL Parameters of Acoustoplasma Discharge, International Conference on Electron, Positron, Neutron and X-Ray Scattering Under External Influences 18 – 22 October 2011, Yerevan – Meghri, Armenia Book of Abstracts, p. 52.
8. K.G. Sahakyan. Accounting of the Energyinvest in Acoustoplasma, International Conference on Electron, Positron, Neutron and X-Ray Scattering Under External Influences 18 – 22 October 2011, Yerevan – Meghri, Armenia Book of Abstracts, pp. 50-51.
9. Ա.Ս.Աբրահամյան, Կ.Վ.Հակոբյան, Ս.Ս.Միքայելյան, Բ.Վ.Սահակյան, Ռ.Յ.Չիլինգարյան, Տ.Ճ.Բեժանյան, Վիրտուալ Լաբորատորիայի Չափման Կոմպլեքս, Երիտասարդ Գիտնականների Հանրապետական Գիտաժողով, 11 Դեկտեմբերի 2010, Վանաձոր, ՀՀ, (2011) էջ 3-8.
10. A.R.Mkrtchyan, A.S.Abrahamyan, S.A.Chilingaryan, Q.G.Sahakyan. Noncorrect Inverse Problems in N₂ and CO₂:N₂:He Acoustoplasma. 5-th Intern.Conf. Charged & Neutral Particles Channeling Phenomena, Channeling 2012, 23-28 Sept.2012, Alghero-Italy,

Abstracts, p.170.

11. A.S.Abrahamyan, R.Yu.Chilingaryan, Q.G.Sahakyan. Catastrophe theory and phase transitions study in acoustoplasma. VII Int.Conf.Plasma Phys.and Plasma Technology, PPPT-7, Minsk, Belarus, Sept.17-21, 2012, Proc. V.1, pp.197-199.
12. A.S.Abrahamyan, A.H.Mkrtchyan, Q.G.Sahakyan. Study of modulation of discharge current in acoustoplasma. VII Int.Conf.Plasma Phys.and Plasma Technology, PPPT-7, Minsk, Belarus, Sept.17-21, 2012, Proc. V.1, pp.244-247.
13. А.С.Абрамян, К.Г.Саакян. Вольт-кулонная характеристика в акустоплазме и модуляция диэлектрической проницаемости. IV Конгресс физиков Беларуси, 24-26 Апреля 2013г., Минск, Беларусь, Труды, с.313,314.
14. A.R.Mkrtchyan, A.H.Mkrtchyan, V.P.Krivobokov, A.S.Abrahamyan, Q.G.Sahakyan, A.H.Aslyan. Selective amplification of separate spectral emission lines in the low-pressure acoustoplasma discharge. X Int. Symp. RREPS-13 Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures & III Int. Conf. Meghri-13, Electron, Positron, Neutron and X-Ray Scattering under Extern. Influences Sept.23-28, 2013, Lake Sevan, Armenia, Abstracts, p.108.
15. A.R. Mkrtchyan, A.S. Abrahamyan, Q.G. Sahakyan. Determination of the parameters of the acoustoplasma discharge using a method for solving inverse problems. X Int. Symp. RREPS-13 Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures & III Int. Conf. Meghri-13, Electron, Positron, Neutron and X-Ray Scattering under Extern. Influences Sept.23-28, 2013, Lake Sevan, Armenia, Abstracts, p.112.

ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Քրիստինե Գրիգորի Սահակյան

Ակուստապլազմայում ոչ կոռեկտ դրվածք ունեցող հակադարձ խնդիրների լուծումը

Գազապարպումային սարքերով աշխատելիս դիտվում են տարբեր անկայունություններ, ինչը դժվարեցնում է սարքերի կայուն աշխատանքը և կարող է հանգեցնել դրանց աշխատանքի խաթարմանը: Պարպման հոսանքի մոդուլյացիայի հետևանքով առաջանում են ակուստիկ անկայունություններ, որոնք դրսևորվում է ակուստիկ տատանումների գեներացիայով, արդյունքում պլազման անցնում է նոր՝ ակուստապլազմային վիճակի: Ակուստապլազմայի պարամետրերը կարող են էականորեն տարբերվել առանց ակուստիկ ազդեցության պլազմայի պարամետրերից: Ակուստապլազման ունի մեծ թվով պարամետրեր և դրա նկարագրությունը մաթեմատիկական հավասարումներով (անգամ դիֆֆերենցիալ հավասարումների համակարգով) բավական բարդ է, այդ իսկ պատճառով կիրառվում է աղետների տեսությունը, որը կրճատում է պարամետրերի թիվը:

Փորձնական արդյունքների մշակումը հնարավորություն է տալիս կառուցել հետազոտվող երևույթի մաթեմատիկական մոդելը, այդուհետև, առաջարկված մաթեմատիկական մոդելի շրջանակներում՝ ուղիղ և հակադարձ խնդիրների լուծման օգնությամբ, որոշել ակուստապլազմայի պարամետրերը: Այսինքն՝ ակուստապլազմայի պարամետրերի մի մասը ստանում ենք փորձնականորեն, իսկ մյուս մասը՝ ուղիղ և հակադարձ մաթեմատիկական խնդիրների օգնությամբ, ընդ որում, ավելի դժվար է ոչ կոռեկտ դրվածք ունեցող հակադարձ խնդիրների լուծումը:

- Ակուստապլազմայում պարամետրերի ինքնահամաձայության պատճառով, թռիչքների և փուլային անցումների առկայության հետևանքով գրեթե բոլոր երևույթները ոչ գծային են, լուծումը միակը չէ և համարվում է ոչ կոռեկտ: Գրեթե բոլոր հակադարձ խնդիրները ոչ կոռեկտ դրվածք ունեն:
- Առաջին անգամ ցույց է տրված, որ ակուստապլազմային պարպման դինամիկ պարամետրերի ճշգրիտ որոշման համար անհրաժեշտ է միաժամանակ չափել հոսանքները պարպման խողովակի անոռի և կաթոռի կողմից:
- Մշակվել և պատրաստվել է փորձնական սարքավորում, որը թույլ է տալիս միաժամանակ չափել հոսանքների և լարման խողովակի ակնթարթային և միջին արժեքները կաթոռի և անոռի կողմից, պատրաստվել են նաև անհրաժեշտ պարպման խողովակներ: Նախկին բազմականալային չափման համալիրը ձևափոխվել է անհրաժեշտ չափումների համար:
- «Հակափոխակերպումը» թույլ է տալիս պարզեցնել հաշվարկները:

- Առաջարկվել է փորձնական արդյունքների մոտարկումը աղետների տեսությամբ: Փորձնական արդյունքները նորմավորվում են ըստ միջինների՝ դառնալով անչափ: Կառուցվում է մոտարկվող աղետի հավասարումը, այդ հավասարումը բերվում է կանոնիկ տեսքի: Փուլային անցումների կետերի որոշումը հասցվել է կիրառման մակարդակի: Օգտագործվել է հատուկ մշակված ծրագրային փաթեթ: Որոշվել է մոտարկման բազմանդամների զգայունությունը չափվող և հաշվարկվող մեծությունների համար:
- Առաջարկվում է հակադարձ խնդիրների լուծման եղանակ՝ օգտագործելով ժամանակի յուրաքանչյուր պահին փորձնականորեն ստացված պարամետրերը: Արդյունքում ստացվում է հաշվարկվող պարամետրի արժեքները նույնպես ժամանակի յուրաքանչյուր պահի համար:
- Լուծման համար կիրառվում է ոչ քառակուսային մատրից, z_k -ից յուրաքանչյուրը անկախ արտաքին պարամետրերից քվանտացվում է 120 պիկսելով՝ ստանալով 120k հավասարումներ: Ստանում ենք դիտարկվող u^* ֆունկցիայի ակնթարթային արժեքների հավաքածու մոդուլյացիայի պարբերության ընթացքում: Այդուհետև ըստ ակնթարթային արժեքների կառուցում ենք այդ ֆունկցիայի մոտարկումը, որը և հանդիսանում է փնտրվող u ֆունկցիան:
- Դիտարկվող տիրույթում կրիտիկական կետերի առկայության դպքում, որտեղ հակադարձ խնդիրների լուծումը հնարավոր չէ, առաջարկված է եղանակ, որը թույլ է տալիս լուծումներ այդ աղետների տեսության օգնությամբ:
- Առաջին անգամ ստացվել են վոլտ-ամպեր, վոլտ-վատտ, վոլտ-կուլոն և վոլտ-ֆարադ բնութագրերը՝ հաշվի առնելով հոսանքների տարբերությունը անոդի և կաթոդի կողմից: Որոշվել է ունակության և դիմադրության փոփոխությունը պարպման ընթացքում: Փորձնական արդյունքներից ստացվել է ակուստապլազմային պարպման մոդելը (զուգահեռ տատանողական շղթա):
- Ոչ կոռեկտ դրվածք ունեցող հակադարձ խնդիրների լուծման եղանակով ստացվել է «սարքավորման ֆունկցիան» (օպերատորը), որը ցույց է տալիս տեսանելի տիրույթում էներգիայի խտության սպեկտրյալ բաշխման կախումը էլեկտրական էներգիայի ներդրումից:

Summary

Qristine Grigor SAHAKYAN

The solution of incorrectly posed inverse problems in acoustoplasma

While working with the gas discharge devices various instabilities of the discharge burning are observed, which makes it difficult the stable operation of devices and may impair their operation. While modulating the discharge current an acoustic instability is produced, which manifests through the generation of acoustic vibrations, as a result the plasma moves into a new acoustoplasma state. Acoustoplasma parameters may significantly differ from the plasma parameters without acoustic disturbance. Acoustoplasma environment contains many parameters and its description isn't complicated by simple mathematical equations (even by the system of differential equations). Thus it is advisable to use the catastrophe theory which reduces the number of parameters.

The processing of the experimentally obtained database gives you the opportunity to construct a mathematical model of the investigated process and then, under the presented mathematical model of the acoustoplasma determine its parameters by solving direct and inverse problems. That is, we experimentally measure some of the parameters of the acoustoplasma and we compute some part using direct and inverse mathematical problems and besides the most difficult is the solution of the incorrectly posed inverse problems.

- Because of the self-consistency of parameters, jumps and phase transitions, almost all the phenomenon are nonlinear in the acoustoplasma, therefore they have non-unique solutions and are incorrect and almost all inverse problems are posed incorrectly.
- For the first time it is shown that for the accurate determination of dynamic parameters of the acoustoplasma discharge is necessary a simultaneous measurement of the current from anode and cathode sides of the discharge tube.
- It is manufactured an experimental setup which enables the simultaneous measurement of instantaneous and average values of the current and voltage discharge tubes from anode side and cathode side. The necessary discharge tubes are also manufactured. Previously developed multi-channel measuring complex is modernized under the required measurements.
- "Quasi reversibility" method of the experimental setup allows simplifying the calculations.

It is proposed a method for the approximation of experimental data of catastrophe equations. The experimental data is normalized by its average values, and is transformed into dimensionless quantities. The approximating equation of catastrophes is constructed and then

brought to the canonical form. The methods for the determination of the phase transitions are brought to the practical application. Specially developed software is used. The sensitivity to modification of the measured values and calculated coefficients of the approximating polynomials is determined.

- It is proposed a method for solution of inverse problems using experimentally obtained parameters in each time point. As a result the estimations of calculated parameters for each time point are obtained.

- It is proposed to use non-square matrix for the solution and each of the independent external z_k parameters is quantized by 120 pixels and we obtain 120k equations $Az_{ij}^* = u_{ij}^*$ where $\{i=1-120\}; \{j=1-k\}$. We obtain a set of instantaneous consequence of investigated u_{ij}^* function during the period of modulation. Then by the instantaneous consequence we construct an approximation of this function which is the required u function.

- In case of the presence of singular points in investigated areas where the solution of inverse problems is impossible is proposed a method that allows seaming solutions at singular points using catastrophe theory.

- For the first time the characteristics of volt-ampere, volt-watt, volt-pendant and volt-farad were obtained taking into account the current variations from anode and cathode side. The variation in capacitance of the acoustoplasma discharge was defined during the period of modulation. The equivalent model of the electric circuit of discharge tube with acoustoplasma (parallel tuned circuit) was constructed.

- The complex impedance and capacitance have a pronounced resonance frequency. It was received a «hardware function» showing the dependence of the spectral distribution of energy density in the visible spectrum of the energy contribution (electric power) injected into the discharge by the method of solution of incorrectly posed inverse problems.