

ՀՀ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ
ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

ՉԻԼԻՆԳԱՐՅԱՆ ՌՈՒԲԵՆ ՅՈՒՐԻԻ

ՊԼԱՋՄԱՅԻ ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ՃԱՌԱԳԱՅԹՄԱՆ ԿԱՌԱՎԱՐՈՒՄԸ
ԱԿՈՒՍՏԻԿ ԴԱՇՏԵՐՈՎ

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

Ս Ե Ղ Մ Ա Գ Ի Դ

ԵՐԵՎԱՆ – 2014

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РА
ЕРЕВАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Чилингарян Рубен Юрьевич

УПРАВЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ПЛАЗМЫ С
ПОМОЩЬЮ АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

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. Արրահամյան

Պաշտոնական ընդիմախոսներ՝

ֆիզ-մաթ. գիտ. դոկտոր

Ռ. Բ. Կոստանյան

ֆիզ-մաթ. գիտ. թեկնածու

Ա. Ռ. Արամյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ ԱՀԿ «Կուրչատովսկի Ինստիտուտ»

Ատենախոսության պաշտպանությունը տեղի կունենա 2014թ. դեկտեմբերի 19, ժ. 15:00
Երևանի Պետական Համալսարանի 049 ֆիզիկայի մասնագիտական Խորհրդի նիստում
Հասցեն՝ ՀՀ ԳԱԱ ՖԿՊԻ, 375014, ք. Երևան, Հր. Ներսիսյան 25:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ Երևանի Պետական Համալսարանի
գրադարանում:

Մեղմագիրը առաքված է 18 նոյեմբերի 2014թ.

Մասնագիտական խորհրդի

Ֆիզ. – մաթ. գիտ. թեկնածու

գիտ. քարտուղար

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

Р. Б. Костанян

кандидат физ-мат. наук

А. Р. Арамян

Ведущая организация: НИЦ «Курчатовский Институт»

Защита диссертации состоится: 19 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 Ереванского Государственного
Университета.

Автореферат разослан 18 ноября 2014г

Ученый секретарь

кандидат физ-мат. наук

Специализированного Совета

В.П.Калантарян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. С научной и прикладной точек зрения создание новых эффективных методов управления параметрами низкотемпературной плазмы является актуальной проблемой современной физики. Термическая неравновесность, связанная с наличием быстрых электронов, более медленных ионов и нейтральных частиц приводит к неустойчивостям процессов, протекающих в плазме. Исследованию влияния внешних воздействий на неустойчивости в плазме в настоящее время уделяется большое внимание, поскольку управление параметрами плазмы позволит повысить стабильность и надежность работы устройств, использующих плазменные технологии.

Одной из таких неустойчивостей является акустическая неустойчивость, обусловленная взаимодействием акустических волн с низкотемпературной плазмой, в результате чего возникает новое плазменное состояние - акустоплазма. Акустоплазменное состояние по своим параметрам существенно отличается от плазмы без акустического возмущения.

В частности изменяются такие оптические параметры, как интенсивность излучения отдельных линий спектра в видимом диапазоне, интегральное излучение в определенной области спектра, мощность оптического излучения лазеров, модуляция интенсивности спектральных линий при модуляции тока разряда, которые имеют важное значение при создании лазеров, газоразрядных источников света и в плазмохимии.

Одним из экспериментальных способов создания акустических неустойчивостей является модуляция разрядного тока, которая приводит к возникновению в разрядной трубке акустических колебаний и созданию акустоплазменного состояния.

Поскольку теории акустоплазмы на сегодняшний день не существует, то важной задачей является создание математических моделей акустоплазменных процессов.

Обработка базы данных, полученной в процессе эксперимента позволяет построить такие математические модели и сделать определенные заключения о процессах, протекающих в акустоплазменной среде.

Целью настоящей диссертационной работы является: Разработка методов управления оптическими параметрами плазмы с использованием низкочастотной модуляции разрядного тока.

Необходимо:

- Экспериментально исследовать влияние акустических полей, возникающих в плазме при модуляции разрядного тока на оптические характеристики акустоплазмы молекулярных газов и газовых смесей низкого давления (азота, углекислого газа, гелия и рабочей смеси CO_2 -лазера при давлении 2-25 торр).
- Исследовать влияние акустоплазменного режима на оптические параметры CO_2 -лазера в ИК области (10,6 мкм).
- Исследовать влияния акустоплазменного режима на оптические параметры разряда CO_2 -лазера в видимой области (300-800 нм) спектра.
- Идентифицировать спектральные линии в области (350-690 нм).
- На основе экспериментальных данных построить соответствующие математические модели акустоплазменных процессов.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

Впервые:

- В трубке с акустоплазменным разрядом экспериментально получена связь изменения оптических характеристик с модуляцией тока и заряда.
- Экспериментально сравнивается поведение характеристик лазерного излучения CO_2 -лазера в ИК диапазоне и излучения из акустоплазмы рабочей смеси лазера в видимом диапазоне.
- В разрядной трубке идентифицированы линии излучения компонент рабочей смеси и соответствующих чистых газов, в частности, получено, что как в разряде чистого гелия, так и в рабочей смеси лазера заметными являются только линии He_2^* .
- Экспериментально показано, что мощность оптического излучения разряда в видимом диапазоне в акустоплазменном режиме изменяется в течение периода модуляции тока пропорционально приложенным к разряду электрической мощности и напряжению, а не заряду.
- На основе экспериментальных данных построены математические модели зависимости оптических параметров акустоплазмы от параметров разрядного тока и давления.

Практическая значимость:

- Результаты исследования зависимости интенсивности спектральных линий от давления могут быть использованы при разработке новых источников света, лазеров и в плазмохимии.
- Результаты исследования связи модуляции заряда и оптических параметров в акустоплазме стимулируют дальнейшие научные исследования процессов, происходящих в акустоплазме.
- Результаты исследования акустоплазменного режима работы CO_2 -лазера в ИК диапазоне могут быть использованы при разработке методов увеличения мощности лазеров.
- Полученные математические модели исследуемых процессов могут быть использованы при создании новых акустоплазменных приборов и устройств.

Основные положения, выносимые на защиту:

- В акустоплазменном режиме разряда параметры спектров в видимой области (300-800 нм) рабочей смеси CO_2 -лазера и чистых газов сильно отличаются от тех же параметров при питании постоянным током.
- При низкочастотной ($< 0,5$ кГц) модуляции разрядного тока, мощность излучения CO_2 -лазера (10,6 мкм), работающего в акустоплазменном режиме имеет максимальное значение при глубине модуляции $\sim 0,6$.
- В акустоплазменном режиме в течение каждого периода модуляции разрядного тока переменная компонента оптического излучения совпадает по фазе с напряжением на разрядной трубке, а не с изменением заряда.
- В акустоплазменном разряде глубина модуляции и мощность переменной компоненты оптического излучения в видимой области (300-800 нм) возрастают с увеличением давления и достигают насыщения.

Апробация работы:

Результаты работы представлялись, докладывались и обсуждались на конференциях:

- Երիտասարդ Գիտնականների 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, Armenia.
- International Seminar on Plasma Physics, 13-15 February 2011, Ouargla, Algeria.
- VII Int. Conf. Plasma Phys. and Plasma Technology, PPPT-7, Sept.17-21, 2012, Minsk, Belarus.
- 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: Содержание работы опубликовано в 9 работах.

Структура и объем диссертации: Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения, изложенных на 129 страницах, включая 52 рисунка, 5 таблиц и списка литературы из 103 наименований.

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

В первой главе приводится обзор существующих опубликованных работ по слабоионизированной низкотемпературной газоразрядной плазме и по акустоплазме.

§1.1 первой главы диссертационной работы посвящен анализу существующих литературных источников по исследованиям влияния внешних воздействий на рабочие параметры низкотемпературной газоразрядной плазмы, в частности - акустических волн.

В параграфе §1.2 изложены результаты исследований оптических эмиссионных характеристик плазмы.

Во II главе описывается специально разработанная нами экспериментальная установка, модернизация спектрографа, методики измерений и обработки полученных результатов.

В §2.1 второй главы описана специально разработанная экспериментальная установка для проведения исследований оптических параметров акустоплазмы (в области 300 – 800 нм) рабочей среды CO_2 -лазера и чистых атомарных (He) и молекулярных (CO_2 , N_2) газов, позволяющая также одновременно измерять токи как со стороны анода, так и со стороны катода разрядной трубки, чтобы точно определить динамические параметры акустоплазменного разряда, связанные с изменением заряда внутри разрядной трубки.

Модернизирован заводской CO_2 -лазер ЛГ-23 и в лаборатории изготовлены специальные разрядные трубки. Схема установки приведена на рис.1.

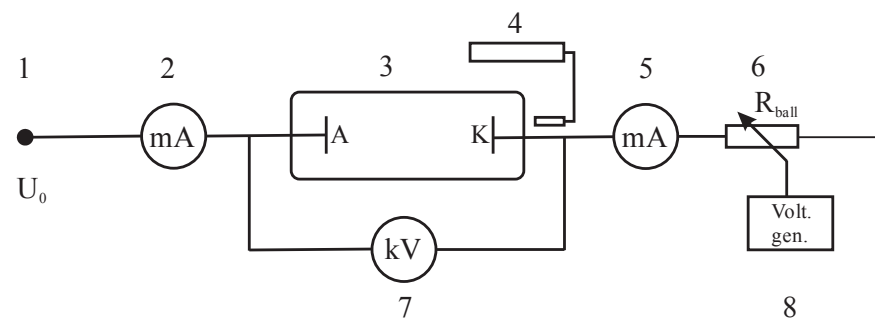


Рис.1. Блок-схема экспериментальной установки.

Постоянное высоковольтное напряжение U_1 подается от источника (1) на анод разрядной трубки (3), переменное сопротивление (6), управляемое синусоидальным сигналом генератора (8) определяло разрядный ток, содержащий постоянную и переменную компоненты. Оптическое излучение в области спектра 300 – 800 нм от разряда по оптическому волокну поступало на спектрометр (4). Миллиамперметр (2) измерял ток I_{an} , втекающий в разрядную трубку со стороны анода, а миллиамперметр (5) измерял ток, вытекающий со стороны катода I_{cat} . Мгновенные значения I_{an} и I_{cat} отличаются в течение периода модуляции разрядного тока из-за изменения заряда внутри разрядной трубки, однако, средние значения $\langle I_{an} \rangle = \langle I_{cat} \rangle = I_0$, в противном случае будет иметь место накопление заряда в трубке. Киловольтметр (7) измерял напряжение на концах разрядной трубки. Для получения мгновенных значений токов и напряжений сигналы с (2), (5), (7) при помощи специально изготовленных электронных устройств подавались на осциллограф измерительного комплекса.

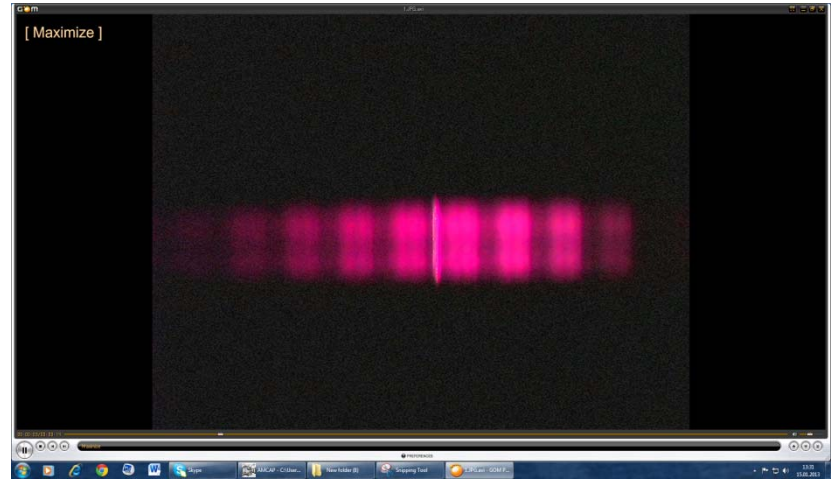
§2.2 посвящен описанию многоканального измерительного комплекса, позволяющего при помощи многоканальной системы видеонаблюдения и записи сигналов с видеокамер и сигналов с Web-камер непосредственно в компьютер и на видеомаягнитофон, что позволяет одновременно фиксировать многие параметры эксперимента. В результате однократного проведения эксперимента получаем большую базу данных и можем многократно воспроизводить ход любой части эксперимента по видеозаписи, без повторения

реального эксперимента. В измерениях в качестве спектрографа (4) использовались компьютерный спектрограф PC2000 фирмы OCEAN OPTICS (для измерения постоянной компоненты спектральных линий) и модернизированный спектрограф ИСП-51. Модернизация заключалась в замене выходного тубуса и в установке в фокальной плоскости приемной оптической матрицы Web-камеры, или видекамеры. Для обработки полученных спектрограмм было разработано специальное программное обеспечение. Для приема переменной компоненты интенсивности линий эмиссионного спектра использовалось CdSe фотосопротивление СФ 3-8 с максимальной чувствительностью в области 600 нм. Приемная апертура фотосопротивления была расположена в фокальной плоскости выходного коллиматора спектрографа ИСП-51 и позволяла одновременно принимать все излучение полосы первой положительной системы (ППС) азота (570 – 690 нм).

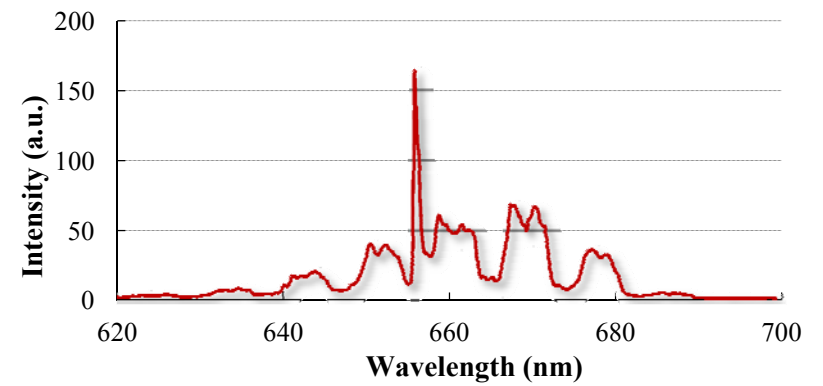
На рис.2а показана полученная Web-камерой спектрограмма полосы ППС азотной акустоплазмы, на дисплее компьютера, а на рис.2б - спектр данной полосы после компьютерной обработки на основе специально разработанной программы.

§2.3 посвящен методикам обработки полученных результатов. Для получения динамических характеристик основное внимание уделено обработке осциллограмм тока, вытекающего в анод, тока, вытекающего из катода разрядной трубки, напряжения на разрядном промежутке, напряжений, соответствующих оптической интенсивности. Разработана методика оцифровки осциллограмм с повышенной точностью. Созданы новые компьютерные программы для обработки спектрограмм, полученных при помощи Web-камер.

Для компьютерного спектрографа OCEAN OPTICS PC2000 было выбрано время интегрирования спектральной информации $t = 1\text{ с}$, поэтому численно энергия свечения i -той спектральной линии $\epsilon_i = t\Delta\nu_i\mathfrak{I}_i$ равна оптической мощности где $\Delta\nu_i$ - ширина спектральной линии на полувысоте, \mathfrak{I}_i - интенсивность линии, обычно интенсивность измеряют в относительных единицах - *a.u.*, поэтому и энергия свечения и оптическая мощность также измерены в относительных единицах. В конце §3.2 приводится коэффициент пересчета относительных единиц в оптическую мощность в *Bm*, который имеет место в данных экспериментах ($1\text{ a.u.} = 6,2 \times 10^{-5}\text{ Вт}$).



a)



b)

Рис.2. а) спектрограмма, полученная с помощью стандартной Web-камеры со снятым объективом; б) спектр, полученный из этой спектрограммы по разработанной программе.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию оптических параметров невозмущенной плазмы и акустоплазмы, возникающей при использовании низкочастотной модуляции разрядного тока. Исследовались характеристики акустоплазмы гелия и молекулярных газов и газовых смесей низкого давления (азота, углекислого газа и рабочей смеси CO_2 -лазера при давлении 2 - 25 торр).

§3.1 посвящен управлению выходной мощностью CO_2 -лазера в ИК диапазоне (10,6 мкм) с помощью акустических полей.

Исследовались рабочие параметры CO_2 -лазера в акустоплазменном режиме - в зависимости от мощности лазерного излучения, состава рабочей смеси, давления, величины постоянной компоненты разрядного тока, частоты и глубины его модуляции.

Получен 3-мерный график зависимости нормированного КПД преобразования подводимой к разрядной трубке электрической мощности в мощность лазерного излучения от частоты и глубины модуляции разрядного тока (рис.3). Нормированный КПД - есть отношение КПД в акустоплазменном режиме к КПД при питании разряда постоянным током.

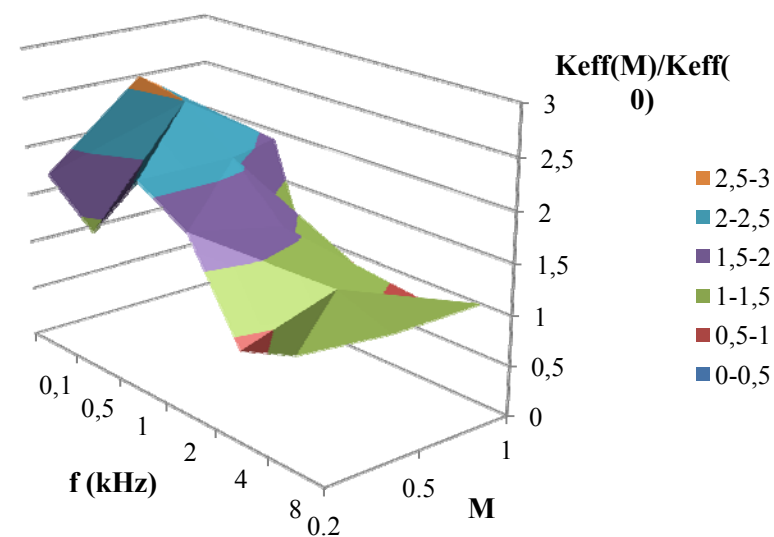


Рис.3. 3D график зависимости нормированного КПД преобразования электрической мощности, приложенной к разряду в мощность лазерного излучения от частоты f и глубины M модуляции разрядного тока. Постоянная компонента разрядного тока $I_0 = 10$ мА, давление $P_0 = 10$ торр, рабочая смесь $CO_2:N_2:He = 1:1:8$.

Из рис.3 видно, что максимальный выигрыш (в 2,5 раза) получается при переходе в акустоплазменный режим и оптимальной глубине модуляции $M = 0,5-0,7$.

При частоте модуляции тока разряда > 2 кГц акустоплазменный режим не дает выигрыша в КПД для лазерной мощности.

Измерена глубина модуляции (отношение амплитуды переменной компоненты к величине постоянной компоненты) мощности лазерного излучения, обусловленная модуляцией разрядного тока. Экспериментально получено, что глубина модуляции мощности лазерного излучения зависит от частоты модуляции разрядного тока. При частотах модуляции тока > 1 кГц модуляции мощности лазерного излучения нет, а при частотах модуляции тока $< 0,5$ кГц глубина модуляции мощности лазерного излучения нелинейно зависит от глубины модуляции разрядного тока и имеет пороговый характер.

Для частоты модуляции $f = 100$ Гц, $I_0 = 10$ мА, $P_0 = 10$ торр экспериментальная зависимость глубины модуляции мощности лазерного излучения M_W от глубины модуляции разрядного тока M_I хорошо аппроксимируется параболическим (квадратичным) полиномом

$$M_W = -2,28 + 6,51M_I - 3,95 M_I^2 \quad (1)$$

При глубине модуляции тока менее 0,3 и более 1,2 глубина модуляции мощности лазерного излучения становится $< 0,1$ а при значениях глубины модуляции тока от 0,4 до 0,8 из-за возникновения акустоплазменного состояния происходит увеличение глубины модуляции лазерного излучения до значения 0,6.

Таким образом, глубина модуляции лазерного излучения связана, в первую очередь с созданием акустоплазмы, а не просто с модуляцией тока.

В § 3.2 приведены экспериментальные результаты по управлению в видимом диапазоне излучением акустоплазмы рабочей смеси CO_2 -лазера ($CO_2:N_2:He=1:1:8$) и чистых газов - компонентов рабочей смеси (N_2, CO_2, He).

В дальнейшем, в данном параграфе излагаются результаты по среднему за период модуляции значению оптической мощности в спектральных областях полос азота ППС и ВПС (350-430 нм) - вторая положительная система.

Рассматривались спектр излучения работающего лазера, полученный из прикатодной области положительного столба, т.е., излучение ортогонально разрядному каналу (когда пленением излучения можно пренебречь) и спектр излучения, полученный с анодного торца разрядной трубки, вдоль разряда (с пленением резонансного излучения).

На рис.4 представлена зависимость оптической мощности (энергии свечения) от частоты модуляции разрядного тока (синяя линия – в полосе ВПС азота, красная линия – в полосе ППС) для свечения из прикатодной области положительного столба плазмы лазера, работающего в акустоплазменном режиме.

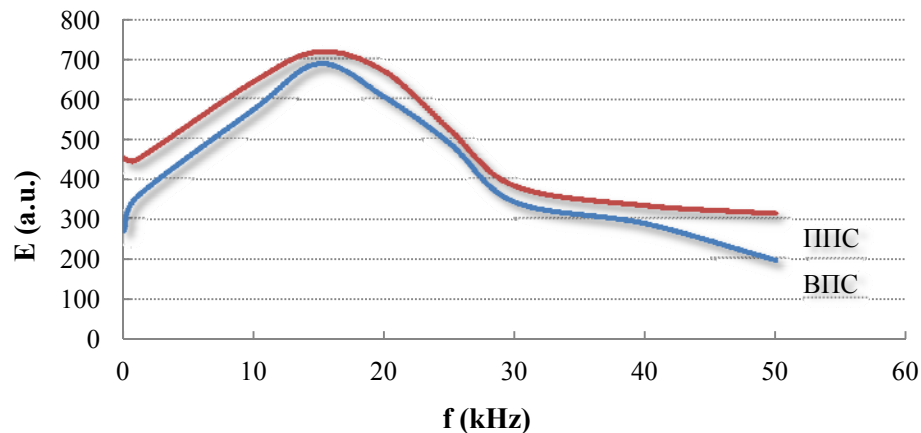


Рис.4. Зависимость энергии свечения в акустоплазменном режиме в спектральных полосах ВПС (350-430 нм) – синяя линия и ППС (570-690 нм) – красная линия, от частоты модуляции разрядного тока.

Из этого рисунка видно, что и для энергии полосы ППС и для энергии полосы ВПС поведение одинаково, за исключением низкочастотной и высокочастотной областей.

$f < 0,5$ кГц соответствует области ниже первой продольной акустической моды, а область частот $f > 40$ кГц соответствует появлению неосевых акустических мод.

На частотах ниже первой продольной моды и выше первой неосевой расщепление метастабильного уровня $A^3\Sigma_u^+$ превышает накачку уровня $B^3\Pi_g$ за счет излучения полосы ВПС и заселения прямым электронным ударом. В области выше первой продольной моды и ниже первой внеосевой, там, где в резонаторе, образованном разрядной

трубкой распространяется плоская волна, расселение метастабильного уровня $A^3\Sigma_u^+$ приблизительно равно накачке уровня $B^3\Pi_g$ за счет излучения полосы ВПС и заселения прямым электронным ударом из основного состояния.

Увеличение энергии свечения в области частот модуляции около 15 кГц говорит о повышении эффективности заселения уровней $C^3\Pi_u$ и $D^3\Sigma_u^+$ (четвертая положительная система), что связано, вероятно, с переходами с более высоколежащих уровней. Если бы это были столкновения, то вероятность заселения более низколежащего уровня $A^3\Sigma_u^+$ была бы больше, чем вероятность заселения более высоколежащих уровней $C^3\Pi_u$ и $D^3\Sigma_u^+$.

Возбуждение метастабильного уровня $N_2(X^1\Sigma_g^+, v=1)$, который передает свою энергию верхнему лазерному уровню молекулы CO_2 напрямую связано с состоянием уровня $N_2(A^3\Sigma_u^+, v)$.

Надо отметить, что вышеописанные результаты получены на модернизированной заводской трубке лазера ЛГ-23, а последующие эксперименты - выполнены на специально разработанных и изготовленных в лаборатории разрядных трубках, с учетом "соотношения подобия разрядов", чтобы разряд в них был подобен разряду в заводской лазерной трубке, но диаметр разрядного канала изготовленных трубок был в 2 раза меньше. В этом случае неосевые моды имели частоты около 100 кГц, что намного выше используемых в эксперименте частот модуляции.

В дальнейшем излагаются результаты исследования спектров рабочей смеси и каждой из компонент рабочей смеси по-отдельности.

Выполнена идентификация эмиссионных спектральных линий в полосе ВПС азота (350-430 нм) и в полосе ППС азота (570-690 нм). Интенсивность спектральных линий для чистых CO_2 и He значительно меньше, чем для чистого N_2 . Для всех газов в акустоплазменном режиме интенсивность спектральных линий больше, чем при питании постоянным током. В акустоплазменном режиме коэффициент преобразования электрической мощности (W), приложенной к разряду в мощность (ϵ) оптического излучения ϵ/W увеличивается с уменьшением давления газа в разряде, например, для чистого азота при давлении $P_0 = 2$ торр коэффициент преобразования в полосе ППС азота увеличивается более чем в 3 раза, а в полосе ВПС – около 3 раз, а интенсивность отдельных линий

возрастает от двух до трех раз в полосе ВПС и менее 2 раз, в полосе ППС. Т.е., более слабые и более длинноволновые спектральные линии в акустоплазменном режиме усиливаются сильнее.

Для акустоплазменного режима коэффициент преобразования в спектральной полосе ВПС азота в 20 раз больше, чем для гелия и в 2,8 раза больше, чем для CO_2 . В рабочей смеси CO_2 -лазера коэффициент преобразования немного меньше, чем для чистого азота, что можно объяснить столкновениями с атомами гелия.

Почти все спектральные линии в разряде чистого гелия соответствуют молекулярному гелию (He_2). В чистом CO_2 часть спектральных линий проявлена очень слабо, часть хорошо заметна и увеличивается приблизительно в 2 раза в акустоплазменном режиме, по сравнению с питанием постоянным током, т.е. имеет место селективное усиление линий.

Средняя мощность излучения в акустоплазменном режиме (при одном и том же среднем токе) растет с увеличением глубины модуляции разрядного тока. При возрастании глубины модуляции от 0 до максимального значения 1,2 средняя мощность излучения возрастает в 5 раз для полосы ВПС чистого азота и в 2,4 раза для ППС.

На рис.5 приведена зависимость коэффициента преобразования электрической мощности в оптическую от давления для рабочей смеси CO_2 -лазера, $I_0 = 12$ мА, $f = 30$ кГц, $M = 1$. Синяя линия – соответствует коэффициенту преобразования в полосе ВПС при питании разряда постоянным током, оранжевая – в полосе ППС при питании постоянным током, голубая – в полосе ВПС в акустоплазменном режиме, красная – в полосе ППС в акустоплазменном режиме, черные линии – соответствуют аппроксимации экспериментальных результатов уравнением

$$\frac{\varepsilon}{W} = \alpha P_0^{-\beta} \quad (2)$$

При питании постоянным током $\alpha = 250$, $\beta = 0,877$; а для акустоплазменного режима $\alpha = 555$, $\beta = 0,789$, т.е., зависимость коэффициента преобразования от давления газа хорошо аппроксимируется степенной зависимостью ($R^2 = 0,987$ для акустоплазменного режима и $R^2 = 0,938$ при питании постоянным током).

В прикатодной области положительного столба разряда рабочей смеси CO_2 -лазера в спектральной области 350-430 нм присутствуют линии полосы ВПС (вторая положительная система) азота. Отсутствие характерных линий полосы ПОС (первая отрицательная система) свидетельствует о том, что в прикатодной области положительного столба концентрация

молекулярных ионов азота (N_2^+) мала.

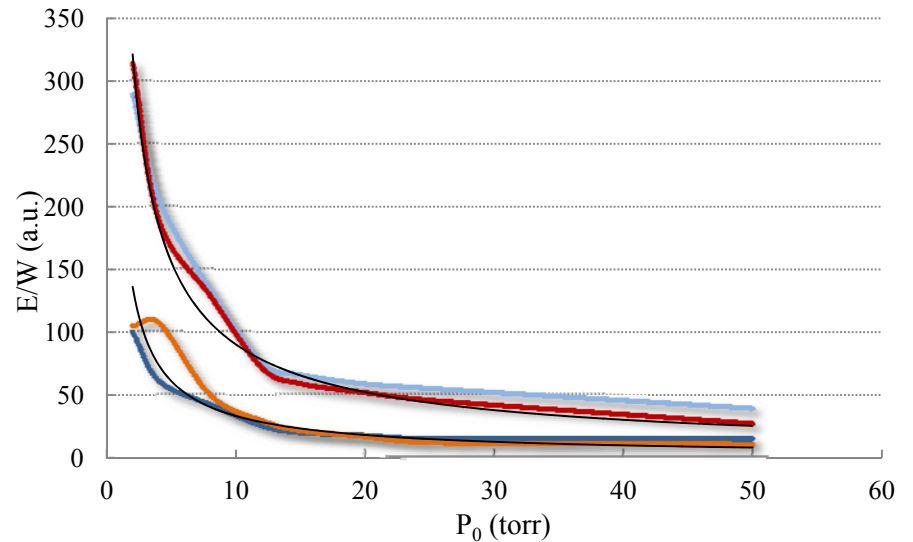


Рис.5. Зависимость коэффициента преобразования от давления для рабочей смеси CO_2 -лазера.

В диссертации экспериментально показано, что при переходе в акустоплазменный режим возможна селекция интенсивности отдельных спектральных линий, т.е., одни линии могут усиливаться а другие проявляться слабо, в зависимости от режима модуляции.

Многие спектральные линии становятся четко различимыми только в смеси, особенно в присутствие гелия. Для определения вклада каждой из компонент смеси были рассмотрены разностные спектры.

Для этого из спектра рабочей смеси $CO_2:N_2:He=1:1:8$ вычитался спектр чистого азота. Давления чистого азота и смеси брались одинаковыми. Если сравнивать рабочую смесь при давлении $P_0 = 10$ торр, когда парциальное давление N_2 будет $P_{0N_2} = 1$ торр с давлением чистого азота, равному парциальному, то интенсивность спектральных линий будет больше, чем в смеси. Хотя небольшая ошибка из-за увеличения концентрации чистого азота все же будет присутствовать. Но поскольку мы хотим исследовать общую картину изменения

разностного спектра при переходе в акустоплазменный режим, то можно не проводить точных количественных калибровок концентраций и давлений.

В диссертации приведены разностные спектры, которые показывают, что в полосе ВПС практически всегда и в режиме постоянного тока и в акустоплазменном режиме в смеси спектральные линии сильнее (несмотря на то, что концентрация частиц азота в смеси в 10 раз меньше, чем в чистом азоте). Для полосы ППС спектр сильно изрезан, вероятно, большую роль играет вращательный спектр. При переходе в акустоплазменный режим разностный спектр практически не меняется, т.е., все спектральные изменения в смеси определяет азот. В районе 598 нм в акустоплазменном разностном спектре хорошо различима линия *CO*, в районе 668 нм хорошо различима линия *He*. Что еще раз подтверждает возможность селекции отдельных спектральных линий.

В § 3.3 третьей главы изложены результаты по исследованию управления динамическими характеристиками излучения плазмы в видимом диапазоне акустическими полями, т.е., изменениям в течение периода модуляции разрядного тока. Проводится также сравнение с динамикой изменения мощности лазерного излучения *CO*₂-лазера.

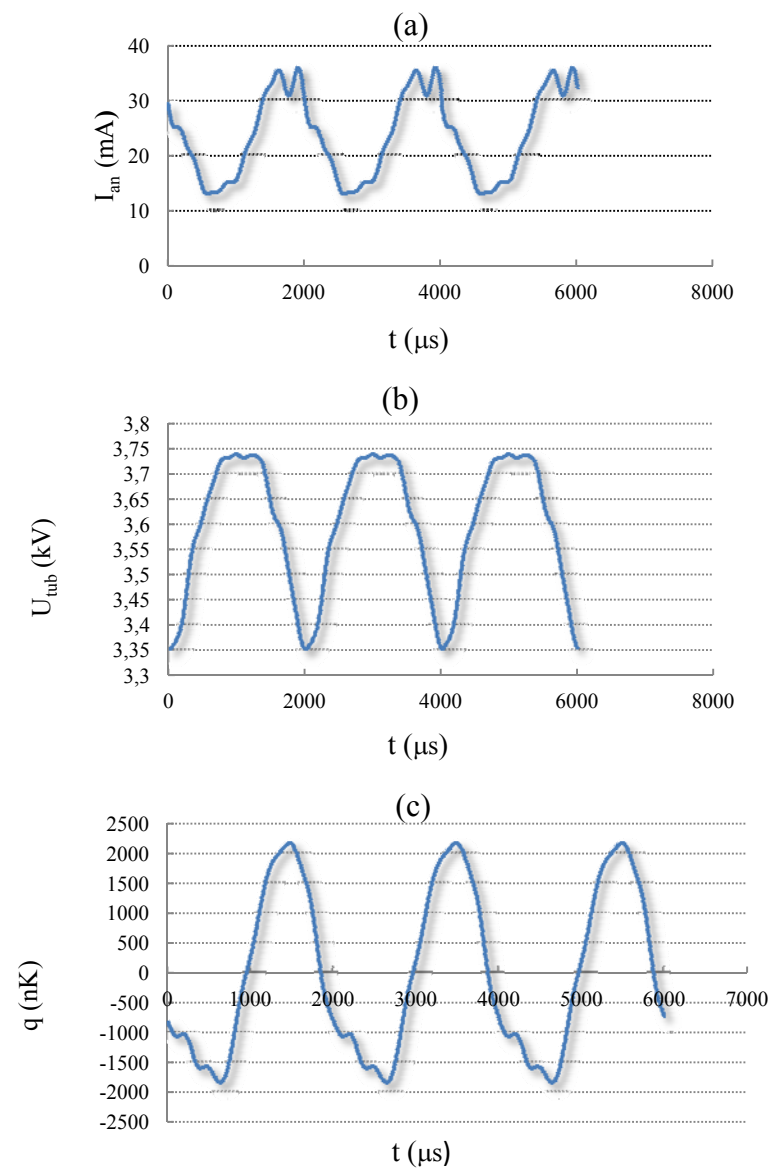
Постоянная составляющая спектральной мощности измерялась при помощи компьютерного спектрографа OCEAN OPTICS PC2000, а переменная составляющая при помощи модернизированного спектрографа ИСП-51 в выходной фокальной плоскости которого находилось фотосопротивление СФ 3-8.

Показано, что для точного определения динамических параметров акустоплазменного разряда необходимо одновременное измерение токов со стороны анода и со стороны катода разрядной трубки. Экспериментально получено изменение во времени в течение периода модуляции мгновенных значений: тока, измеренного со стороны анода, тока, измеренного со стороны катода, напряжения на разрядной трубке, мощности вкладываемой в разряд, переменной компоненты заряда, постоянной и переменной компонент интенсивности света.

Экспериментально получено, что в акустоплазме в течение периода модуляции текущее значение заряда, т.е., концентрация электронов в разрядной трубке, постоянно меняется и зависит от частоты модуляции разрядного тока.

Экспериментально показано, что в акустоплазме на низкой частоте модуляции изменение интенсивности света сильнее зависит от напряжения приложенного к трубке (т.е., от энергии электронов), чем от концентрации электронов.

На рис.6 приведено изменение во времени, в течение трех периодов модуляции (для лучшего визуального восприятия) разных характеристик разряда



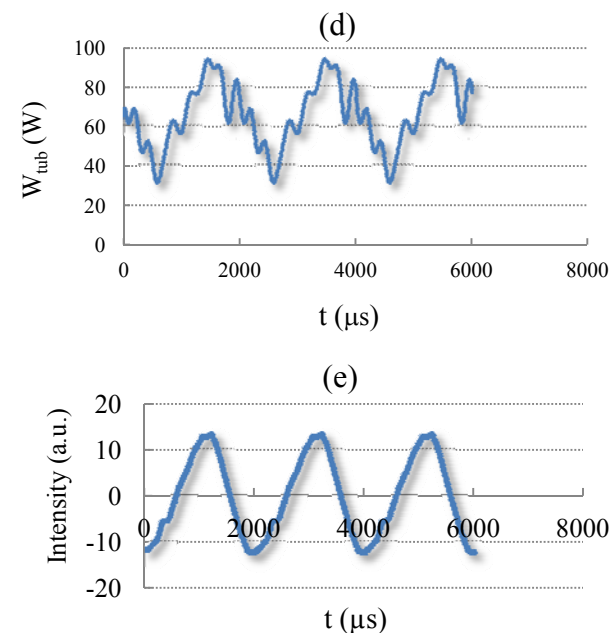


Рис.6. Изменения во времени, в течение трех периодов модуляции, мгновенных значений: а) ток, измеренный со стороны анода; б) напряжение на трубке; с) изменение заряда в трубке; д) электрическая мощность приложенная к трубке; е) интенсивность оптического излучения в видимом диапазоне.

Из рис.6 (a,b,c,e) следует, что в акустоплазме даже при низкой частоте модуляции изменение интенсивности света в первую очередь зависит от напряжения, приложенного к трубке (т.е., от энергии электронов), а не от заряда. Необходимо отметить, что в плазме при питании постоянным током с возрастанием концентрации электронов напряжение на концах разрядной трубки падает.

Из рис.6 (b,c) следует, что пока напряжение находится вблизи максимального значения, концентрация электронов резко падает и кривая заряда переходит из отрицательной в положительную полуплоскость, когда напряжение уменьшается от максимального до минимального, а затем увеличивается от минимального до максимального концентрация электронов возрастает. На участке возрастания напряжения наблюдаются осцилляции заряда (концентрации электронов).

При питании постоянным током в плазме с увеличением напряжения концентрация электронов падает, т.е., существует обратная зависимость.

Надо отметить, что изменение заряда – это изменение концентрации электронов в плазме, т.е., в акустоплазменном режиме концентрация электронов в плазме постоянно меняется и в положительном столбе не всегда компенсируется зарядом ионов. Положительная фаза изменения заряда соответствует ситуации, когда концентрация электронов меньше равновесной (при разряде на постоянном токе).

Экспериментально получено, что глубина модуляции мощности оптического излучения M увеличивается с увеличением давления P и достигает насыщения (глубина модуляции $M = 1$) при давлении 20 торр. При увеличении давления из-за увеличения числа столкновений время жизни возбужденных атомов сокращается и вклад модуляции возрастает. Зависимость хорошо аппроксимируется полиномом 6-ой степени.

$$M = -6 \times 10^{-8} P^6 + 6 \times 10^{-6} P^5 - 2 \times 10^{-4} P^4 + 0.0044 P^3 - 0.0339 P^2 + 0.137 P - 0.0704 \quad (3)$$

Мощность переменной компоненты оптического излучения возрастает с увеличением давления и имеет насыщение при давлении 15 торр. Это можно объяснить тем, что с повышением давления роль акустоплазменных явлений возрастает. Зависимость хорошо аппроксимируется логарифмической характеристикой. W_{opt} – измеряется в мВт, P – в торрах.

$$W_{opt} = 18.18 \ln(P) + 29.39 \quad (4)$$

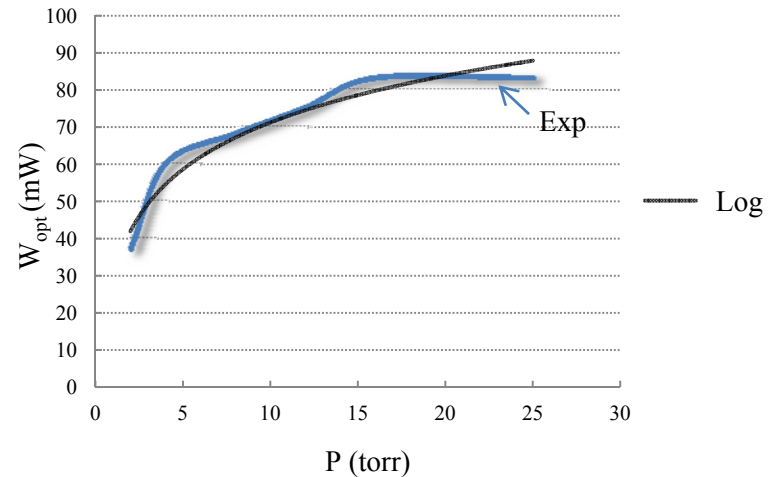


Рис.7. Зависимость переменной компоненты оптической мощности излучения полосы ППС азота от давления.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Выполнена идентификация спектральных линий (350-690 нм). Для чистых газов и рабочей смеси CO_2 -лазера интенсивность спектральных линий в акустоплазменном режиме больше, чем при питании постоянным током и коэффициент преобразования электрической мощности, приложенной к разряду в мощность оптического излучения в спектральной полосе (350-430 нм) для азота и лазерной смеси в акустоплазменном режиме в 20 раз больше, чем для гелия и в 2,8 раза больше, чем для CO_2 . В разряде чистого гелия и рабочей смеси эмиссионные спектральные линии соответствуют молекулярному гелию (He_2^*).
2. В прикатодной области положительного столба разряда рабочей смеси CO_2 -лазера в спектральной области 350-430 нм присутствуют линии полосы ВПС (вторая положительная система) азота. Отсутствие характерных линий полосы ПОС (первая отрицательная система) свидетельствует о том, что в прикатодной области положительного столба концентрация молекулярных ионов азота (N_2^+) мала.
3. Интенсивность эмиссионных линий полосы ВПС азота в прикатодной области положительного столба зависит от частоты модуляции разрядного тока и достигает максимального значения при $f = 15$ кГц. В области частот, где в разрядной трубке распространяется плоская волна, заселение метастабильного уровня и его опустошение происходят с одинаковой скоростью, а в областях частот модуляции разрядного тока ниже и выше той, где распространяется плоская акустическая волна, опустошение метастабильного уровня превышает его заселение.
4. Экспериментально показано, что в акустоплазме на низкой частоте модуляции изменение интенсивности света (переменная компонента) в основном зависит от напряжения приложенного к трубке, и модуляции мощности оптического излучения увеличивается с увеличением давления, достигая максимального значения ($M = 1$) при давлении 15-20 торр.
Зависимость глубины модуляции от давления хорошо аппроксимируется полиномом

6-ой степени. Мощность переменной компоненты оптического излучения возрастает с увеличением давления и хорошо аппроксимируется логарифмической характеристикой.

5. Экспериментально получена зависимость средней мощности лазерного излучения CO₂-лазера в акустоплазменном режиме от давления и состава рабочей смеси, частоты и глубины модуляции, величины постоянного тока.
6. Экспериментально получена зависимость средней мощности лазерного излучения CO₂-лазера в акустоплазменном режиме: от давления, состава рабочей смеси, частоты, величины постоянного тока и глубины модуляции. При частоте модуляции тока > 1 кГц, модуляцией мощности лазерного излучения можно пренебречь. При частотах порядка нескольких сот Гц, глубина модуляции мощности лазерного излучения нелинейно зависит от глубины модуляции тока разряда и имеет пороговый характер. При глубине модуляции разрядного тока $M_1 < 0,4$, модуляция лазерной мощности $M_W < 0,1$, а при глубине модуляции разрядного тока $M_1 = 0,8$ глубина модуляции лазерной мощности $M_W = 0,6$.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих работах:

1. А.С. Абрамян, К.Г. Саакян, Р.Ю. Чилингарян. Изменение заряда в акустоплазме в течение периода модуляции разрядного тока. Известия НАН Армении, Физика, 2014, т.49, №5, с.353-359.
2. 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, Proceedings, pp.65-70.
3. A.S. Abrahamyan, K.V. Hakobyan, S.V. Kagramanyan, E.R. Kakosyan, K.G. Sahakyan, R. Yu. Chilingaryan, S.A. Chilingaryan. Amplitude-Frequency Characteristics of Nitrogen Acoustoplasma in the Visible Spectral Range, International Conference on Electron, Positron, Neutron and X-Ray Scattering Under External Influences 18 – 22 October 2011, Yerevan – Meghri, Armenia Book of Abstracts, Proceedings, p. 49.
4. A.S. Abrahamyan, K.G. Sahakyan, R.Yu. Chilingaryan. Variation of Charge in Acoustoplasma During the Period of Discharge Current Modulation, International Conference on Electron, Positron, Neutron and X-Ray Scattering Under External Influences 18 – 22 October 2011, Yerevan – Meghri, Armenia, Book of Abstracts, p. 53.
5. Ա.Ս.Աբրահամյան, Կ.Վ.Հակոբյան, Ս.Ս.Միքայելյան, Զ.Գ.Սահակյան, Ռ.Յ.Չիլինգարյան, Տ.Ժ.Բեժանյան. Վիրտուալ Լաբորատորիայի Չափման Կոմպլեքս,

Երիտասարդ Գիտնականների Հանրապետական Գիտաժողով, 11 Դեկտեմբերի 2010, Վանաձոր, ՀՀ, 2011, Գիտաժողովի Նյութեր, էջ 3-8.

6. 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.

7. A.S. Abrahamyan, Q.G. Sahakyan, R.Yu. Chilingaryan. Changing the emission spectrum of the acoustoplasma discharge at change of parameters of the discharge in a CO₂ – laser. 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, Abstract, p.111.

8. R.Yu. Chilingaryan. Influence of parameters of the acoustoplasma mode on the optical emission spectrum of the mixture of gas discharge CO₂ laser. Armenian Journal of Physics, 2014, vol.7, issue 2, pp.93-101.

9. A.S. Abrahamyan, R.Yu. Chilingaryan. Measurement of variable component of optical radiation of acoustoplasma at low-frequency discharge current modulation. Armenian Journal of Physics, 2014, vol.7, issue 3, pp.147-154.

ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Ռուբեն Յուրիի Չիլինգարյան

ՊԼԱԶՄԱՅԻ ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ՃԱՌԱԳԱՅԹՄԱՆ ԿԱՌԱՎԱՐՈՒՄԸ

ԱԿՈՒՍՏԻԿ ԴԱՇՏԵՐՈՎ

Ցածր ջերմաստիճանային պլազմայի պարամետրների կառավարման նոր և արդյունավետ մեթոդների ստեղծումը գիտական և կիրառական տեսանկյունից ժամանակակից ֆիզիկայի կարևոր խնդիրներից է: Ջերմային անհավասարակշռությունը՝ պայմանավորված արագ էլեկտրոնների, ավելի դանդաղ իոնների և չեզոք մասնիկների առկայությամբ, հանգեցնում է պլազմայում ընթացող պրոցեսների անկայունություններին: Ներկայումս մեծ ուշադրություն է հատկացվում պլազմայի անկայունությունների վրա արտաքին գործոնների ազդեցության հետազոտմանը, քանի որ պլազմայի պարամետրների կառավարումը հնարավորություն կտա մեծացնելու պլազմային տեխնոլոգիաների կիրառման վրա հիմնված սարքերի կայունությունն ու հուսալիությունը: Նման անկայունություններից մեկն է ակուստիկ անկայունությունը, որը պայմանավորված է ցածր ջերմաստիճանային պլազմայի հետ ակուստիկ դաշտերի փոխազդեցությամբ, որի հետևանքով առաջանում է պլազմայի նոր վիճակ՝ ակուստապլազմա: Ակուստապլազման իր պարամետրներով զգալիորեն տարբերվում է առանց ակուստիկ գոգոման պլազմայից:

Ակուստիկ անկայունություններ ստեղծելու մեթոդներից մեկը պարպման հոսանքի մոդուլացումն է, որը հանգեցնում է պարպման խողովակում ակուստիկ տատանումների առաջացմանը և ակուստապլազմայի ստեղծմանը:

Առանց ակուստիկ գոգոման պլազմայի և ակուստապլազմայի մեծ թվով պարամետրներ զգալիորեն տարբեր են: Մասնավորապես՝ փոփոխվում են այնպիսի օպտիկական պարամետրները, ինչպիսիք են տեսանելի տիրույթում սպեկտրի առանձին գծերի ճառագայթման ինտենսիվությունը, լազերների ճառագայթման հզորությունը և այլն, որոնք կարևոր նշանակություն ունեն լազերների, լուսի գազապարպումային աղբյուրների ստեղծման համար և պլազմաքիմիայում:

Քանի որ ակուստապլազմայի տեսությունը դեռևս մշակված չէ, ապա կարևոր խնդիր է հետազոտվող ակուստապլազմային պրոցեսների մաթեմատիկական մոդելների ստեղծումը:

Փորձի ընթացքում ստացված տվյալների շտեմարանի մշակումը հնարավորություն է տալիս կառուցելու նման մաթեմատիկական մոդելներ և որոշակի հետևություններ անելու ակուստապլազմային միջավայրում տեղի ունեցող պրոցեսների մասին:

1. Կատարված է սպեկտրալ գծերի (350-690 նմ) նույնականացում: Մաքուր գազերի և CO₂ լազերի աշխատանքային խառնուրդի համար սպեկտրալ գծերի ինտենսիվությունը ակուստապլազմային ռեժիմում ավելի մեծ է, քան միայն հաստատուն հոսանքով սնուցման դեպքում:
2. CO₂ լազերի աշխատանքային խառնուրդի պարպման դրական սյան կաթոդի մոտ 350-430 նմ սպեկտրալ միջակայքում առկա են ազոտի երկրորդ դրական համակարգի (ԵՂՀ) շերտի գծեր, մինչդեռ ազոտի առաջին բացասական համակարգի (ԱԲՀ) սպեկտրը կարելի է անտեսել:
3. Դրական սյան կաթոդի մոտ ազոտի ԵՂՀ շերտի էմիսիոն գծերի ինտենսիվությունը կախված է պարպման հոսանքի մոդուլացման հաճախականությունից և առավելագույն արժեքը ընդունում է $f = 15$ կՀց-ի դեպքում:
4. Ակուստապլազմային ռեժիմում ճառագայթման հզորությունը աճում է պարպման հոսանքի մոդուլացման խորության աճման համընթաց (միջին հոսանքի միևնույն արժեքի դեպքում):
5. Փորձով ստացված է, որ ակուստապլազմայում, նույնիսկ ցածր հաճախականությամբ մոդուլացման դեպքում, լույսի ինտենսիվության փոփոխությունը ավելի մեծ չափով է կախված լարումից, այսինքն՝ էլեկտոնների էներգիայից, քան դրանց կոնցենտրացիայից:
6. Փորձով ստացված է ակուստապլազմային ռեժիմում CO₂ լազերի ճառագայթման հզորության կախումը աշխատանքային խառնուրդի ճնշումից և բաղադրությունից, մոդուլացման հաճախականությունից և խորությունից ու հաստատուն հոսանքի մեծությունից: Չափվել է CO₂ լազերի ճառագայթման հզորության մոդուլացման խորությունը՝ պայմանավորված պարպման հոսանքից և հոսանքի մոդուլացման հաճախականությունից:

SUMMARY

Ruben Yuri Chilingaryan

CONTROL OF THE PLASMA OPTICAL EMISSION BY MEANS OF ACOUSTIC FIELDS

The creation of new and effective methods of controlling the parameters of low-temperature plasma is an actual problem of modern physics. Thermal non-equilibrium associated with the presence of fast electrons, the slower ions and neutral particles leads to instability of the processes occurring in the plasma. Currently a lot of attention is devoting to the study of the effect of external influences on the instability in the plasma, as the control of the plasma parameters will increase the stability and reliability of the devices using plasma technology.

One of these instabilities is acoustic instability caused by the interaction of acoustic waves with low-temperature plasma and as a result, the plasma passes into a new state - acoustoplasma. Acoustoplasma state in many ways differs from the plasma without acoustic disturbance.

One of the ways to create acoustic instabilities is the modulation of the discharge current, which leads to an appearance of acoustic vibrations in the discharge tube and to a creation of acoustoplasma state.

Many plasma parameters differ significantly in plasma without acoustic disturbance and acoustoplasma. Particularly, optical characteristics, such as, emission intensity of individual lines in the visible range of the spectrum, the integral radiation in certain spectral region, the optical power of lasers, the modulation of the intensity of the spectral line at the modulation of the discharge current are change, which are important in the development of lasers, gas discharge light sources, and plasma chemistry.

As the theory of acoustoplasma does not yet exist, construction of mathematical models of the acoustoplasma processes became an important task.

Database processing, obtained during the experiment allows us to construct mathematical models and draw some conclusions about the processes occurring in acoustoplasma environment.

1. Identification of the spectral lines (350-690 nm) is made. For pure gases, and the CO₂-laser mixture intensity of the spectral lines in acoustoplasma mode is higher than in the case of discharge at DC. Moreover, in acoustoplasma mode conversion factor of electrical power applied to the discharge into the optical power in a certain spectral band for nitrogen and a laser mixture is 20 times greater than that for helium and 2.8 times greater than that for CO₂. In the discharge of pure helium and laser mixture, emission spectral lines correspond to the molecular helium (He_2^*).