

Казахский национальный университет имени аль-Фараби

УДК 533.9.01

На правах рукописи

ДЖУМАГУЛОВ МУРАТ НУРМАНОВИЧ

**Диагностика, структурные и динамические свойства пылевой плазмы
высокочастотного разряда**

6D060400-Физика

Диссертация на соискание ученой степени
доктора философии (PhD)

Научные консультанты
член-корреспондент НАН РК,
доктор физико-математических
наук, профессор Рамазанов Т.С.
PhD, профессор Буфенди Лаифа

Республика Казахстан
Алматы, 2013
СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ.....	7
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ПО ИЗУЧЕНИЮ СВОЙСТВ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА.....	24
2.1 Экспериментальная установка по изучению структурных, динамических, оптических свойств пылевой плазмы высокочастотного разряда.....	24
2.1.1 Описание экспериментальной установки.....	24
2.1.2 Исследование структурных свойств плазменно–пылевых образований в емкостном высокочастотном разряде.....	27
2.1.3 Осуществление оптической диагностики.....	30
2.2 Экспериментальная установка по изучению свойств пылевой плазмы высокочастотного разряда с помощью много углового рассеяния.....	31
3 ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ, ДИНАМИЧЕСКИХ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА.....	35
3.1 Радиальные функции распределения пылевых частиц в высокочастотном разряде.....	35
3.2 Коэффициент диффузии пылевой плазмы высокочастотного разряда.....	42
3.3 Оптические свойства пылевой плазмы высокочастотного разряда.....	51
3.3.1 Методика определения параметров буферной плазмы по спектрам излучения.....	51
3.3.2 Влияние присутствия пыли на излучение буферной плазмы.....	61
4 ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА С ПОМОЩЬЮ МНОГОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ.....	69
4.1 Теоретические основы метода много углового рассеяния.....	69
4.2 Эксперимент, обработка данных и результаты.....	75
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	95
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	96

Философия докторы ғылым дәрежесіне іздену диссертациясына (PhD)
6D060400-Физика

АҢДАТПА

ДЖУМАГУЛОВ МУРАТ НУРМАНОВИЧ

Жоғары жиілікті сыйымдылықты разрядтағы тозаңды плазманың диагностикасы, құрылымдық және динамикалық қасиеттері

Тақырыптың өзектілігі. Қазіргі кезде тозаңды плазманы зерттеу ғылымның қарқымды дамып келе жатқан саласы болып табылады, сонымен ғалымдардың қызығушылығын арттыруда. Еске ала отырсақ, тозаңды плазма дегеніміз, қарапайым плазма, тек оған микронды өлшемді конденсирленген заттар енгізілген немесе пайда болған, осы өлшемдерге байланысты макробөлшектер (тозаңдар) өте үлкен $10^3 \div 10^5$ дейінгі қарапайым зарядқа ие бола алады. Әдебиеттерде бұл өзге де атаулармен, мысалы конденсирленген дисперстік фазасы бар плазма, аэрозольді плазма түрінде кездестіре аламыз.

Тозаңды плазма қолданбалы міндеттерді шешу кезінде де, сонымен қатар табиғаттың іргелі құбылыстары жайлы, заттардың қасиеттері мен құрылысы жайлы білімдерімізді кеңейтуге көмектеседі. Осылайша дисперсті плазма арқылы макроскопиялық тозаңдар визуалды өзгеше болып келеді, конденсирленген заттардың, мысалы фазалық ауысулар, алмастыру процесстері және т.б. физикалық қасиеттерін зерттеуде бірегей ыңғайлы объект болып табылады.

Көптеген заманауи плазмалық технологияларда плазма және материалдардың беткейі әсерлесуінің нәтижесінде плазмаға өңделетін материалдардан макроскопиялық бөлшектер түсетіні (мөлшерлері микронның бірнеше бөлігінен бастап бірнеше жүздеген микронға дейін) анықталды. Осының нәтижесінде күрделі құрамды плазма пайда болады: осындай плазманы конденсирленген дисперсті фазасы бар плазма деп атайды. Бұл плазманың кең таралған атауы - тозаңды плазма (dusty plasma). Қызығушылық тудыратын дерек, анықталған жағдайларда тозаңды плазма реттеулі құрылымды туғызады («плазмалық кристалл», бұлттар, тамшылар). Барлық осы плазмалы-тозаңдық құрылымдар табиғи түрде келеңсіз ластықты туғызады және құрастырушылық материалдардың физика-математикалық қасиеттеріне теріс әсер етеді (микроқаттылық, коррозияға төзгіштік және т.б.).

Маңызды ғылыми және технологиялық мәселелердің бірі басқарылатын термоядролық синтезді іске асыру болып табылады. Токамакта алынатын қабырға аралық тозаңды плазма маңызды орын алуы мүмкін: соңғы тәжірибелік мәліметтерге қарасақ плазмадағы тозаң энергияны ғаламдық ұстап тұруға әсерін тигізуі мүмкін. Плазманы қолданудың жаңалығы оны жоғары технологиялы композиттік материалдарды өндіруде қолданылуы

болып табылады, мысалы плазма ортасында алынған наножабыны бар ірі емес сфералық бөлшектер. Тозанды бөлшектерден қажетті қасиеттері бар біртекті ұнтақтың пайда болуын зерттеу үшін және оны тұрақты өндіру үшін ыңғайлы шарттар мен өндіру уақытын табу керек.

Осылайша, тозанды плазманың қасиеттерін зерттеу, оны диагностикалау ғылыми тұрғыда, сонымен қатар қолданбалы жағынан да өте маңызды міндет болып табылады.

Жұмыстың мақсаты – оптика-спектроскопиялық әдіс арқылы талдау көмегімен, ЖЖ разрядты тозанды плазманың қасиеттерін тәжірибе жүзінде зерттеу, плазма және тозанның өзара әсерлесу эффектілерін табу, көп бұрышты тарату әдісі көмегімен тозанды бөлшектердің пайда болуы және өсуі үрдістерін байқау.

Зерттеу объектісі – жоғары жиілікті разрядты идеалды емес тозанды плазма болып табылады.

Жұмыстың жаңалығы. Диссертациялық жұмыстың жаңалығы және ерекшелігі, алғаш рет:

1. Тозанды плазманың температурасы ұлғайған кезде тозанды компонентаның диффузиясы коэффициентінің мөлшері әрекет етілмеген тозандардың диффузия коэффициентінің мөлшерімен салыстырғанда азаюы мүмкін екені байқалды;

2. Буферлік плазманы сәулелендіру ашықтығының азаюы немесе ұлғаюы, буферлік плазмаға орналастырылған немесе пайда болған тозанды бөлшектердің мөлшерлерінің диапазонына тәуелді екені табылды;

3. Жарықты көп бұрышты таратушы жаңа қондырғыда алғаш рет тәжірибе жүргізілді. Алынған тәжірибелік мәліметтер бұл қондырғының жоғары тиімділігін куәландырады.

4. Жарықты көп бұрышты тарату қондырғысынан алынған жаңа нәтижелер аргон және ацетилен қоспаларындағы жоғары жиілікті разрядтың параметрлері диапазонын береді, бұлар арқылы жүздеген нанометрлі мөлшері бар бөлшектер алынады.

Диссертацияның құрылымы және көлемі. Диссертациялық жұмыс кіріспеден, 4 бөлімнен, қорытындыдан және 83 атаулы пайдаланылған әдебиет тізімінен, 101 негізгі компьютерлік мәтіннен, оның ішінде 62 сурет және 3 кестеден тұрады.

Қорғауда назарға алынатын жағдайлар

1. Тозанды плазманың температурасы ұлғайған сайын тозанды компонентаның диффузиясының коэффициенті өседі, бірақ, тозандардың зарядының ілеспелі өсуі нәтижесінде (жүйедегі байланыстар) тозанды компонентаның диффузиясының коэффициентінің идеалды газ диффузиясының коэффициентіне қатынасы азаяды.

2. Микронды мөлшерлі тозанды бөлшектер электрондарды жұтқан кезінде буферлі газдың спектрлік сызықтарының сәулелендіру ашықтығы азаюына әкеледі.

3. Химиялық белсенді плазмада жоғары жиілікті разрядты плазманың тозандарының түзілуі, жарықты көп бұрышты тарататын жаңа тәжірибелік

қондырғыны пайдалану кезінде, берілген қасиеттері бар тозаңды бөлшектерді алу және диагностикалау аумағында берілген қондырғының жарқын болашағын көрсетті.

4. Химиялық белсенді плазмада аргон мен ацетиленнің қоспасының нанобөлшектерін синтездеу бойынша жоғары жиілікті разрядты қондырғыда жарықты көп бұрышты тарату әдісі, қысымды арттырған кезде бөлшектердің жылдам пайда болатынын көрсетті.

Жұмыстың ғылыми-тәжірибелік маңызы. Диссертациялық жұмыстан алынған нәтижелер тозаңды плазма физикасының дамуында, және де плазмалы тозаңды пайда болуларды зерттеу бойынша тәжірибелер әдістемесінде де бағалы орын алады. Тозаңды плазманың қасиеттерін зерттеу қазіргі таңда маңызы іргелі болып табылады, себебі, тозаңдардың ірі көлеміне байланысты тозаңды плазма визуалды түрде зерттеуге болатындықтан, жүйелердің қасиеттерін зерттеуде, сондай-ақ газдар, сұйықтықтар, және конденсирленген күйдегі заттарды зерттеуде жақсы модель болып табылады. Осыдан басқа, тозаңды плазманың қасиеттері бойынша алынған нәтижелерді әртүрлі тәжірибелік қосымшаларды іске асыру және жобалауда, мысалы макро және микро және наноэлектроникада пайдалануға болады.

Жұмысты тексеру және жарияланымдар. Диссертациялық жұмыста алынған нәтижелер келесі орындарда баяндалды және талғанды:

- студенттер, магистранттар, аспиранттар және жас ғалымдар Халықаралық конференциясы (2011, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы);

- «плазма Физикасы және плазмалық технологиялар» Халықаралық конференциясы (2009, Минск, Беларусь);

- «физиканың заманауи жетістіктері және іргелі физикалық білім беру» Халықаралық ғылыми конференциясы (2011, 2013, Алматы);

- «тозаңды плазма физикасы бойынша Халықаралық конференциясы» (2010, Гармишпартенкирхен, Германия);

- идеал емес плазма физикасы бойынша Халықаралық семинар (қыркүйек 2012, Росток, Германия);

- плазма физикасы және компьютерлік физика кафедрасының ғылыми семинарлары, КазНУ әл-Фараби атындағы ҚазҰУ;

Сонымен қатар халықаралық ынтымақтастық шегінде келесі профессорлармен сарапталды: Майоров С.А. (Россия), Дьячков Л.Г. (Россия).

Диссертациялық жұмыс материалдары бойынша 12 баспа жұмыстары жарияланды: рецензияланатын ғылыми журналдарда 5 статья, оның ішінде 3 PhD докторы ғылым дәрежесіне іздену диссертациясының негізгі нәтижелерін жариялауға арналған Комитеттің Тізіміндегі журналда және 2 статья жоғары импакт факторы бар алыс шет ел журналында; 7 жұмыс халықаралық конференциялар материалдарында.

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD)
6D060400-Физика

ДЖУМАГУЛОВ МУРАТ НУРМАНОВИЧ

Диагностика, структурные и динамические свойства пылевой плазмы высокочастотного разряда

Актуальность темы. Исследование пылевой плазмы в настоящее время является бурно развивающимся научным направлением, привлекающим внимание ученых. Напомним, что пылевая плазма представляет собой обычную плазму с внедренными или образованными в ней частицами конденсированного вещества микронных размеров, благодаря этим размерам макрочастицы (пылинки) могут приобретать очень большие заряды, до $10^3 \div 10^5$ элементарных зарядов. В литературе она так же встречалась под другими названиями, например, плазма с конденсированной дисперсной фазой, аэрозольная плазма.

Пылевая плазма представляет интерес как при решении прикладных задач, так и для расширения наших знаний о фундаментальных явлениях природы, свойствах и строении вещества. Так дисперсная плазма в силу того, что макроскопические пылинки визуально различимы, представляет уникальный в своем удобстве объект для изучения некоторых физических свойств конденсированного вещества, например, фазовых переходов, процессов переноса и др.

Установлено, что во многих современных плазменных технологиях, из-за взаимодействия плазмы с поверхностью материалов в плазму из обрабатываемого материала попадают макроскопические частицы (размерами от доли до нескольких сотен микронов). В результате образуется плазма сложного состава: такую плазму называют плазмой с конденсированной дисперсной фазой. Наиболее общеупотребительное название такой плазмы – пылевая (dusty plasma). Интересным фактом является то, что пылевая плазма образует при определенных условиях упорядоченные структуры («плазменный кристалл», облака, капли). Все эти плазменно-пылевые структуры представляют собой естественно возникающее нежелательное загрязнение и отрицательным образом влияют на физико-механические свойства (микротвердость, коррозионная стойкость и т.п.) конструкционных материалов.

Одной из важных научных и технологических проблем является осуществление управляемого термоядерного синтеза. Образующаяся в Токамаке пристеночная пылевая плазма может сыграть большую роль: последние экспериментальные данные показывают, что наличие пыли в плазме может повлиять на глобальное время удержание энергии.

Новым является применение плазмы в производстве высокотехнологичных композитных материалов, например, небольших сферических частиц с нанопокровками, нанесенными в плазме. Для изучения образования однородного порошка из пылевых частиц с заданными свойствами и стабильного его производства, необходимо найти оптимальные условия и время выработки.

Таким образом, исследование свойств пылевой плазмы, ее диагностика является очень актуальной задачей, как с научной, так и с прикладной стороны.

Цель работы – Экспериментальное исследование свойств пылевой плазмы ВЧ разряда с помощью оптико-спектроскопических методов анализа, выявление эффектов взаимного влияния плазмы и пылинок, изучение процессов образования и роста пылевых частиц с помощью метода многоуглового рассеяния.

Объектом исследования является неидеальная пылевая плазма высокочастотного разряда.

Новизна работы. Новизна и оригинальность диссертационной работы заключаются в том, что в ней впервые:

5. Замечено, что при увеличении температуры пылевой плазмы величина коэффициента диффузии пылевой компоненты может уменьшаться по сравнению с величиной коэффициента диффузии невзаимодействующих пылинок,

6. Обнаружено, что уменьшение или увеличение интенсивности излучения буферной плазмы зависит от диапазона размеров пылевых частичек, помещенных или образованных в буферной плазме.

7. Впервые выполнены эксперименты на новой установке по многоугловому рассеянию света. Полученные экспериментальные данные, свидетельствуют о высокой эффективности данной установки.

8. Полученные на установке по многоугловому рассеянию света новые результаты дают диапазоны параметров высокочастотного разряда в смеси аргона и ацетилена, оптимальные для образования частиц размером в сотни нанометров.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 разделов, заключения и списка использованных источников из 83 наименований, содержит 101 страниц основного компьютерного текста, включая 62 рисунка и 3 таблицы.

Положения, выносимые на защиту

5. С увеличением температуры пылевой плазмы, коэффициент диффузии пылевой компоненты растет, но, вследствие сопутствующего роста заряда пылинок (связи в системе), отношение коэффициента диффузии пылевой компоненты к значению коэффициента диффузии идеального газа уменьшается.

6. Поглощение электронов пылевыми частицами микронных размеров приводит к уменьшению интенсивностей излучения спектральных линий буферного газа.

7. Апробация новой экспериментальной установки по много угловому рассеянию света на формирующихся пылевых образованиях в плазме высокочастотного разряда в химически активной плазме показала большие перспективы данной установки в области диагностики и получения пылевых частиц с заданными свойствами.

8. В установке высокочастотного разряда по синтезу наночастиц в химически активной плазме смеси аргона с ацетиленом метод много углового рассеяния света показал, что частицы образуются быстрее при увеличении давления.

Научно-практическая значимость работы. Полученные в диссертационной работе результаты представляют ценность для развития как физики пылевой плазмы, так и методики экспериментов по изучению плазменно-пылевых образований. Исследование свойств пылевой плазмы представляет на данный момент большую фундаментальную значимость, поскольку пылевая плазма ввиду больших размеров пылинок, доступных визуальному наблюдению, представляет собой хорошую модель для исследования свойств систем, причем как газов, жидкостей, так и веществ в конденсированном состоянии. Кроме того, полученные результаты по свойствам пылевой плазмы можно использовать при проектировании и осуществлении различных практических приложений, связанных с наличием пылевой плазмы, таких, например, как микро и наноэлектроника.

Апробация работы и публикации. Результаты, полученные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались:

- на Международной конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых (2011 КазНУ им. аль-Фараби, Алматы);
- на Международных конференциях «Физика плазмы и плазменные технологии» (2009, Минск, Беларусь);
- на Международных научных конференциях «Современные достижения физики и фундаментальное физическое образование» (2011, 2013, Алматы);
- на Международной конференции по физике пылевой плазмы (2010, Гармишпартенкирхен, Германия);
- на Международном семинаре по физике неидеальной плазмы (сентябрь 2012, Росток, Германия);
- на научных семинарах кафедры физики плазмы и компьютерной физики КазНУ им. аль-Фараби;

а также обсуждались с профессорами: Майоровым С.А. (Россия), Дьячковым Л.Г. (Россия) в рамках международного сотрудничества.

По материалам диссертационной работы опубликовано 12 печатных работ: 5 статей в рецензируемых научных журналах, из них 3 в журналах из Перечня Комитета для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора PhD и 2 статьи в журналах дальнего зарубежья с высоким импакт фактором; 7 работ в материалах Международных конференций.

ANNOTATION

of thesis presented for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in the specialty
6D060400-Physics

JUMAGULOV MURAT NURMANOVICH

Diagnostics, structural and dynamic properties of the dusty plasma of radiofrequency discharge

Relevance of the theme. The study of the dusty plasma is now a developing scientific field, attracting the attention of scientists. Recall that the dusty plasma is conventional plasma with inserted or formed therein particles of condensed matter of microns sizes, the size of these particulates (dusts) can acquire very large charges up to $10^3 \div 10^5$ of the elementary charges. In the literature, it is also named as plasma with a condensed dispersed phase, aerosol plasma.

Dusty plasma is of interest both for the solution of the applied problems, and to expand our knowledge of the fundamental phenomena in nature, properties and structure of matter. Due to the fact that the macroscopic dust are visually distinguishable the dispersed plasma is unique comfort object for the study of some physical properties of condensed matter, such as phase transitions, transport processes, etc.

It was found that in many modern plasma technologies, due to the interaction of the plasma with the material surfaces macroscopic particles from the material fall into the plasma (sizes are from micron fractions up to a few hundred microns). As result complex plasma is formed. The most common name of this plasma is dusty plasma. An interesting fact is that the dusty plasma forms under certain conditions the ordered structures ("plasma crystal", clouds, droplets). All of these plasma- dust structures are naturally occurring undesirable contamination and negatively affect on the physical and mechanical properties (microhardness, corrosion resistance, etc.) of the constructional materials.

One of the most important scientific and technological problems is the realization of the controlled thermonuclear fusion. Formed in the wall region of the Tokamak dusty plasma can play a big role: recent experimental data show that the presence of dust in the plasma can affect the global energy confinement time.

The use of the dusty plasma in the production of high composite materials is new field of application, for example, small spherical particles with nanocoating deposited in the plasma. In order to study formation of a homogeneous powder of the dust particles with desired properties and stability of its production, it is necessary to find the optimal conditions and time of production.

Thus, the study of dusty plasma properties, their diagnostics are very important tasks, both from the scientific and applied aspects.

The aim of the work is experimental study of dusty plasma of RF discharge by optical spectroscopic methods of analysis, identification of the effects of the mutual influence of plasma and dust particles, the study of the formation and growth of dust particles by the method of multi-angle light scattering.

The object of the study is the non-ideal dusty plasma of RF discharge.

Scientific novelty includes:

1. At the first time it has been noted that at increase in plasmas temperature the diffusion coefficient of the dust component can decrease in comparison with the value of the diffusion coefficient of non-interacting dust particles.

2. It was found that the reduction or increase in the buffer plasma emission intensity depends on the range of the size of the dust particles, placed or formed in the buffer plasma.

3. Experiments on the new installation of the multi-angle light scattering were performed for the first time. The experimental data indicate a high efficiency of the installation.

4. Resulting in a plant for a lot of angular light scattering results provide new ranges for the parameters of high-frequency discharge in a mixture of argon and acetylene optimal for the formation of particles up to hundreds of nanometers.

Structure and volume of the thesis. The thesis consists of an introduction , four chapters , conclusions and a list of sources used in 83 titles, contains 101 pages of basic computer text , including 62 figures and 3 tables.

The main results are including:

1. With rise in dust plasma temperature the diffusion coefficient of the dust component increases, but due to the increase in charge of grains (coupling between particles), the ratio of the diffusion coefficient of dust components to the diffusion coefficient of the ideal gas decreases.

2. The absorption of electrons by the dust particles of micron size leads to a decrease in emission intensities of the spectral lines of the buffer gas.

3. Testing of the new experimental setup for multi- angular light scattering on the dust formations developed in the plasma of the radio frequency discharge in reactive plasma showed great promise of this installation in the diagnosis and getting dust particles with the desired properties.

4. In the setup of radio frequency discharge for synthesis of nanoparticles in the reactive plasma of the mixture of argon and acetylene method of multi- angular light scattering showed that the particles are formed more rapid when pressure increases.

Scientific and practical significance of the work. The results obtained in the thesis are valuable for the development of the dusty plasma physics , and experimental techniques for the study of plasma-dust structures. The study of the dusty plasma is currently most fundamental importance as a dusty plasma due to large dust grains, that are available to visual observation, provides a good model for studying of the properties of systems as gases, liquids and substances in the condensed state. In addition, the results on the plasmas properties can be used in the design and implementation of a variety of practical applications associated with the presence of a dusty plasma, for example, micro-and nanoelectronics.

Approbation of the work and publications. The results obtained in the thesis were presented and discussed:

- at the International conference of students , undergraduates, graduate students and young scientists (2011, Al- Farabi Kazakh National University, Almaty);

- International Conferences on " Plasma Physics and Plasma Technology " (2009, Minsk , Belarus);

- the International Conference "Recent Advances in Fundamental Physics and Physical Education " (2011, 2013, Almaty);

- the International Conference on the Physics of Dusty Plasmas (2010 , Garmishpartenkirchen , Germany);

- International Seminar on Physics of Nonideal Plasma (September 2012 , Rostock, Germany);

- scientific seminars of the Department of the Plasma Physics and Computer Physics of Al- Farabi Kazakh National University; and discussed with professors : S.A. Mayorov (Russia) , L.G. Dyachkov (Russia) in the framework of international cooperation.

According to the materials of the thesis were published in 12 publications: there are 5 articles in peer-reviewed journals, 3 of them in the journals, recommended by Committee of control of education of MES RK, 2 articles in the foreign journals with high impact factor ; 7 works in Proceedings of International Conference.