

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

ЖОҒАРЫ ЖИІЛІКТІ СЫЙЫМДЫЛЫҚТЫ РАЗРЯДЫНДАҒЫ ТОЗАҢДЫ ПЛАЗМАНЫҢ ОПТИКАЛЫҚ ЖӘНЕ ДИНАМИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Т.С. Рамазанов, Т.Т. Данияров, М.К. Досболаев, Ф.Б. Баимбетов, С.А. Оразбаев, К.Б. Жуманов, А.У. Утегенов, В.В. Ажаронок*, И.И. Филатова*, Л.Е. Кратько*

ЭТФҒЗИ, әл-Фараби ат. Қазақ ұлттық университет, Алматы қ.

**Беларусь ҰҒА-ның физика институты, Минск қ.*

Жұмыста жоғары жиілікті сыйымдылықты разрядтағы комплекстік плазмадағы тозаңды құраушысының динамикалық қасиеттері мен плазманың оптикалық қасиеттері тәжірибелік зерттеу жұмыстарының нәтижелері келтірілген. Тозаңды бөлшектердің жылдамдықтары бойынша таралуын талдау негізінде, қуатты өсіргенде олардың (тозаңды бөлшектердің) температураларының сызықты түрде өсетіндігі, сондай-ақ сызықтық спектрлік талдау негізінде тозаңды плазманың температурасы мен концентрациясы анықталған. Берілген жұмыстың нәтижелері жылдамдықтардың автокорреляциялық функциясы, тасымалдау коэффициенттері және тозаңды плазмаға оптикалық диагностика жүргізуге негіз бола алады.

Кіріспе

Комплексті (тозаңды) плазма деп құрамында электрондар, иондар, нейтрал атомдармен қатар теріс немесе оң зарядталған қатты дененің микронды өлшемдегі макроскопиялық бөлшектері бар объектіні айтады. Бұл сала көптеген жылдар бойы зерттеу объектісі болып келеді. Алайда әртүрлі техникалық қолданылуларға (жану процесі, плазмалық технологиялар, атмосфера физикасы, басқарылатын термоядролық синтез) және алынған нәтижелердің іргелі маңыздылығына байланысты соңғы он жылдықта бұл облыстағы зерттеулер қарқынды дами түсті. Сонымен қатар тозаңды плазма табиғатта кең таралған. Ол алып планеталардың сақиналарын, кометалардың құйрықтарын, планетааралық және жұлдызаралық бұлттарды құрайды. Яғни тозаңды плазманың физикалық қасиеттері жөніндегі мәліметтер жалпы Әлемнің пайда болуы процесі жайлы мағлұмат береді (сыр шертеді). Сонымен көп жағдайда реттелген тозаңды плазмалық құрылымның физикалық қасиеттерін ашық жүйе ретінде білу қажетті. Тозаңды плазмалық құрылымның физикалық қасиеттерін зерттеуде тозаңды макробөлшектердің өзара әсерлесуін сипаттайтын адекватты моделдің жоқтығы және бөлшекаралық күшті әсерлесу салдарынан теориялық физиканың стандарты әдістерінің жарамсыздығын атап өткен жөн.

Соңғы жылдары тозаңды немесе комплексті плазма реттелген тозаңды құрылымдар пайда болатын ашық сызықты диссипативтік жүйе ретінде ғалымдардың назарын аударуда. Айта кетсек, тозаңды плазманың физикалық құрамын зерттеуге қызығушылық біріншіден МГД генератордың электрофизикасын зерттеу, микроэлектроникада плазмалық тозаңдау технологиясында, сонымен бірге жұқа пленка және нанобөлшектер өндірісінде кеңінен қолданылуға байланысты өсті.

Плазмалық ортаға кірген немесе плазмалық реакторлардың электродтарының және қабырғалық материалдарының өздігінен эрозиялануы нәтижесінде пайда болған тозаңды макробөлшектер электрлік зарядталады. Бұл тозаңды бөлшектердің зарядталуы электрондар мен иондар ағынын жұтуы нәтижесінде жүреді. Ал, осы тозаңды бөлшектер электрондардың үлкен жылдамдығының арқасында оң (шамамен 10^4 бірлік заряд) заряд алады. Тозаңды бөлшектердің зарядының үлкен болу салдарынан әрекеттесетін зарядтардың көбейтіндісіне тура пропорционал, олардың электростатикалық әрекеттесуінің потенциалдық энергиясы үлкен. Сондықтан да тозаңды бөлшектер жүйесінің идеалды болмауы электронды-ионды жүйенің идеалды болмауына қарағанда едәуір оңай түрде жүзеге асады. Бірақ макробөлшектердің концентрациясы электрондар мен иондардың концентрациясынан әлде

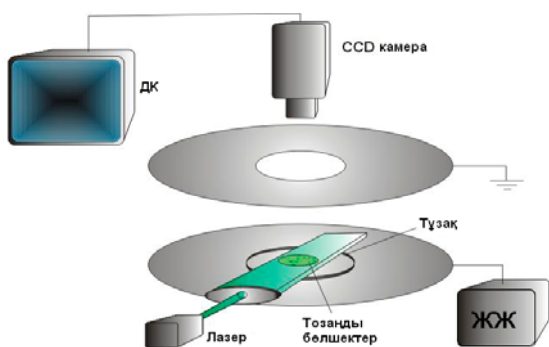
қайда төмен. Соның нәтижесінде лабораториялық жағдайда тозанды бөлшектер жүйесінде реттелген құрылымдар – Кулондық кристалданудың пайда болуына әкеледі.

Тозанды плазманың жалпы қасиеттерін (динамикалық, оптикалық, термодинамикалық т.с.с.), ондағы тозанды бөлшектік құрылымдардың жылдамдығын, температурасын, концентрациясын т.с.с параметрлерін анықтау ең қажетті ғылыми мәселелер болып табылады. Ал, бұл алынған нәтижелер осы тозанды жүйедегі физикалық процесстерді терең түсінуге мүмкіндік береді. Бұл мақалада негізінен тозанды плазманың оптикалық және динамикалық қасиеттері жазылған. Сонымен бірге жоғарғы жиілікті сыйымдылықты разрядқа жалпы мағлұматтар берілген және негізгі параметрлері динамикалық, сонымен бірге оптикалық - спектрлік анализ жасау негізінде анықталған. Бұл әдістің ерекшелігі ешқандай кереғар пікірсіз ақпаратты дәл алуға мүмкіндік береді. Алынған нәтижелер температура мен кинетикалық энергиясын есептеуге, тозанды жүйенің құрамын, ондағы бөлшектер буферлі плазманың спектрлік сипаттамаларына әсерінің қандай екенін көрсетеді.

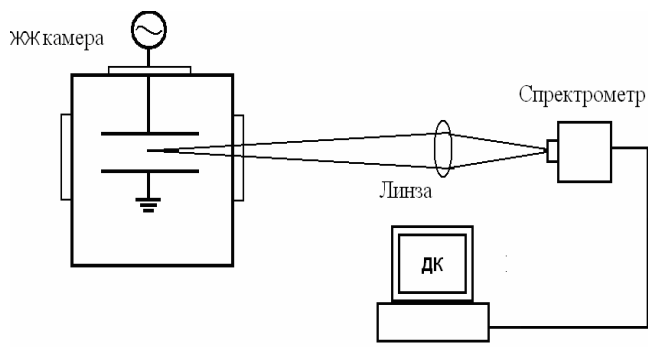
Тәжірибе

Тозанды плазманың қасиеттерін зерттеу үшін жоғарғы жиілікті көлемдік разряд (ЖЖКР) негізіндегі қондырғы және де динамикалық қасиеттерін анықтау үшін SSD камера, оптикалық қасиеттерін зерттеуде SOLAR S100 спектрометрі қолданылды. Жасалған тәжірибелердің принципальды схемалары төменде 1-2 суретте көрсетілген.

Параллель жазық электродтар жоғарғы жиілікті сыйымдылықты камерада орналасқан. Электродтардың диаметрі 19 см. Олардың арақашықтығы 2 см. Төменгі электродқа жиілігі 13,56 МГц жоғарғы жиілікті кернеу беріледі және жоғарғы электрод жерге жалғанған. Жоғарғы жиілікті генератордан берілетін қуат 1,5 – 20 Вт . Жұмыс газы ретінде аргон газы алынды, қысымы шамамен 0,05 – 2 Торр. Жұмыста тозанды бөлшектер ретінде орташа диаметрі 4 мкм болатын полидисперсті Al_2O_3 ұнтақтары қолданылды.



1 – сурет



2 – сурет

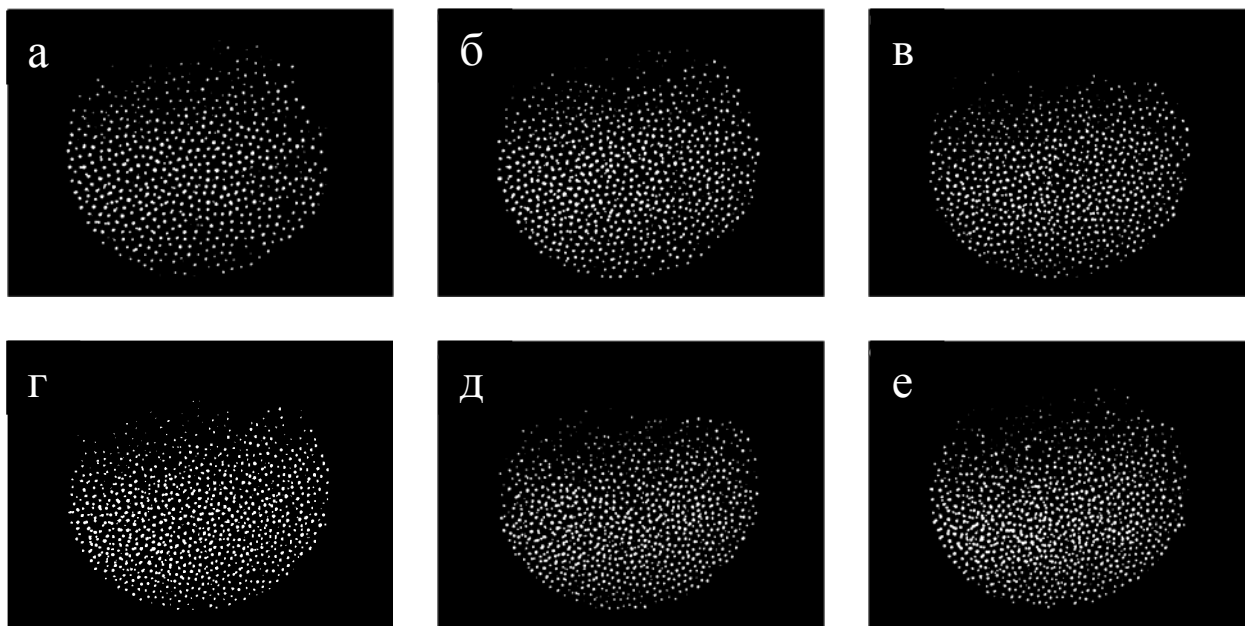
Плазмалы – тозанды бөлшектердің динамикалық қасиеттерін(1- сурет) және оптикалық қасиеттерін (2 - сурет) анықтаудағы ЖЖ қондырғының принципиялды сызбалары

Тозанды құрылымдарды горизонталь жазықтықта бақылау жылдамдығы жоғары сандық бейнекамерамен және бір қабатты жарықтандыру үшін қуаты ~ 250 мВт болатын лазер қолданылады. Ал алынған бейнекадрлер артынан өңдеп, әр түрлі есептеулер жүргізетін арнайы бағдарламалары бар компьютерге жазылады. Ал, оптикалық – спектрлік анализ жасау үшін Solar S100 сызықтық спектрометрі қолданылған. Бұл спектрометрдің сезгіштігі өте жоғары, 190 – 1100 нм аралығын бірден анықтауға мүмкіндік береді, орташа сезгіштігі 1 нм. Спектрометрге арнайы оптолинзалар қондырылған және ол ЖЖ камераның көру

айнасына фокусталған. Осы спектрометрдің көмегімен әр түрлі қуатта және қысымда спектрлік анализдер жасап оны тікелей ары қарай өңдейтін компьютерге сақтауға болады. Сонда арнайы бағдарламалар арқылы өңделеді. Бұл күрделі зерттеулерді жеңілдетуге және дәл есептеуге мүмкіндік береді.

Алынған нәтижелер

ЖЖ разрядта бейнекамера арқылы алынған плазмалы – тозаңды құрылымдары төмендегі 3 – суретте көрсетілген. Бұл тозаңды құрылымдардың барлығы газ қысымы $p = 0,125$ торр кезінде алынған.



3 – сурет. ЖЖ разрядтағы плазмалы – тозаңды құрылымдар, барлығында газ қысымы $p = 0,125$: а) разрядтың қуаты $P = 6,25$; разрядтың қуаты $P = 8,75$; разрядтың қуаты $P = 11,25$; разрядтың қуаты $P = 13,75$; разрядтың қуаты $P = 16,25$; разрядтың қуаты $P = 18,75$

Жағарыдағы суретте көрсетілгендей ЖЖ разряд қуаты артқан сайын тозаңды бөлшектердің арақашықтығы жақындайтынын нақты түрде айта аламыз. Бұны былай түсіндіруге болады: егер разрядтың қуаты жоғарылаған сайын оның бақыланған қабаттағы кинетикалық энергиясы жоғарылайды, сосын тұрақтанып тұрған бөлшектер күшті тербелістің арқасында бақыланған қабатта өзара нығыздала бастайды. Тағы бұл разрядтың қуаты жоғарылаған сайын тозаңды бөлшектер ұсталып тұрған тұзақтың электростатикалық потенциалы өзгеруі мүмкін, бұл да тозаңды құрылымның өзара нығыздалуына әкеліп соғады.

Тозаңды құрылымдардың динамикалық қасиеттерін сипаттау үшін тозаңды бөлшектердің жылдамдықтар бойынша таралуы есептелді:

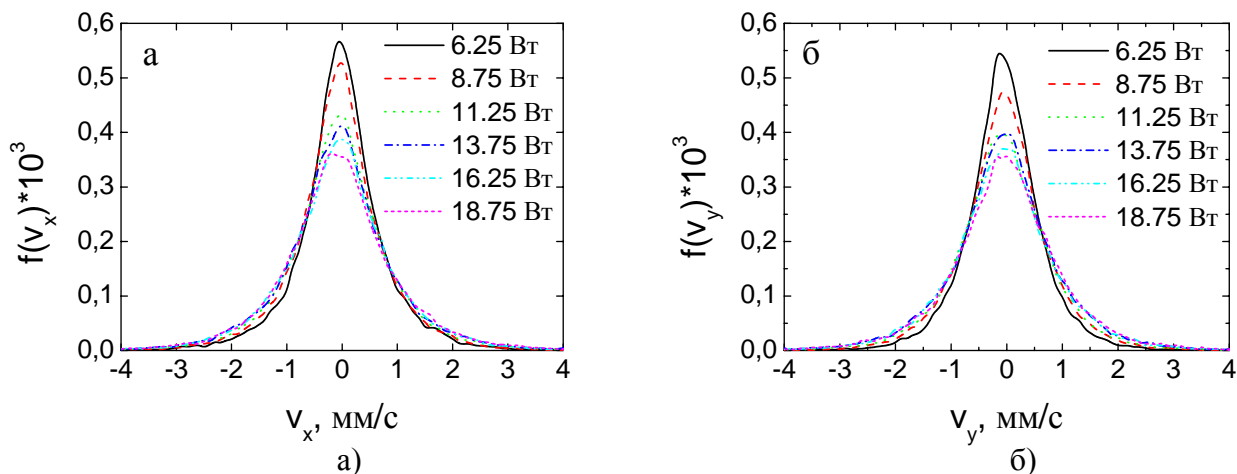
$$v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t},$$

$$v_y = \frac{\Delta y}{\Delta t},$$

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2},$$

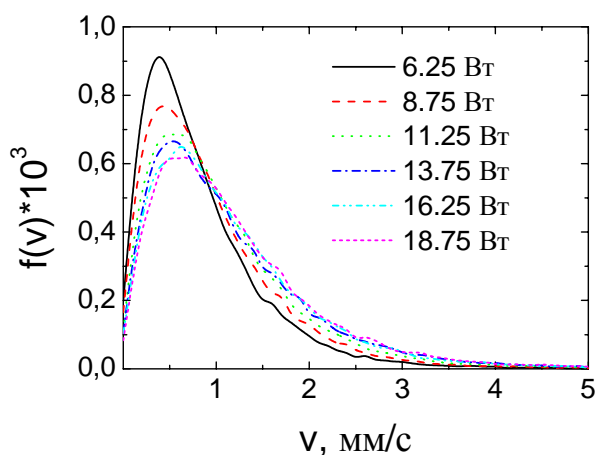
мұндағы v_x , v_y – x және y осі бойынша жылдамдықтың құраушылары; Δt – уақыт аралығы; v – жылдамдықтың абсолют шамасы.

Тозанды бөлшектердің жылдамдықтарының x және y осі бойынша таралуы 4а және 4б суретте, ал абсолют жылдамдықтар бойынша таралуы 5 суретте көрсетілген.



4 – сурет. Тозанды бөлшектердің ЖЖ разряд жылдамдықтар бойынша таралуы функциясы. а) бөлшектердің жылдамдықтарының x осі бойынша таралуы, б) бөлшектердің жылдамдықтарының y осі бойынша таралуы

(3) және (4) суреттерге сараптама жасай отырып бұл тозаңды бөлшектердің жылдамдықтар бойынша таралуы Максвеллдің таралуына сәйкес келетінін аңғарамыз. Разрядтың қуатының өсуі таралу функцияларының өзгеруіне, яғни температура өседі. Бұл жағдайдағы бөлшектердің жылдам қозғалуы газдың температураның өсуіне және бұл жүйедегі кинетикалық энергиялары үлкен бөлшектердің санының өсуіне әкеп соғады.

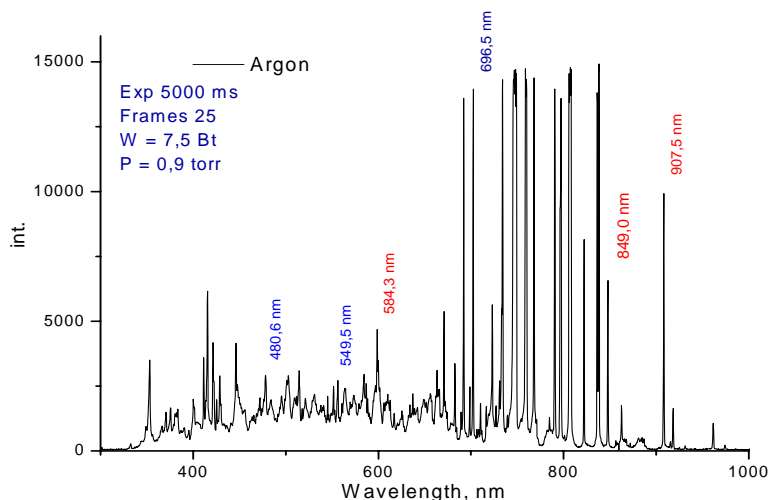


5 – сурет. Тозаңды бөлшектердің абсолют жылдамдықтар бойынша таралуы

Алынаған тозаңды бөлшектердің абсолют жылдамдықтары бойынша таралу функциясынан тозаңды бөлшектердің температурасы есептелді. Тозаңды бөлшектер температурасы $v_e = \sqrt{2k_B T_d / m_d}$ ықтимал жылдамдықпен анықталды. Мұндағы T_d - бөлшектердің температурасы, k_B – Больцман тұрақтысы, m_d – тозаңды бөлшектердің массасы.

Алынған нәтиже бойынша разряд қуаты өскенде тозанды бөлшектердің температурасы өсетіндігі анықталды. Тозанды бөлшектердің температурасы 0,05-0,2 эВ аралығында болатындығы анықталды және ол басқа авторлардың алынаған нәтижелерімен сәйкес келеді.

Келесі сезгіштігі өте жоғары, 190 – 1100 нм аралығын бірден анықтауға мүмкіндік беретін (орташа сезгіштігі 1 нм) спектрометрдің көмегімен ЖЖ разрядтың сызықтық оптикалық - спектрлік қасиеттері (электрондардың температурасы мен концентрациясы т.с.с) зерттелді. Төменгі 6 - суретте сызықтық спектрометрдің көмегімен алынған спектрлер көрсетілген:



6 – сурет. ЖЖ разрядта аргон газының қысымы $p = 0,9$ торр, разряд қуаты $P=7,5$ Вт кезіндегі спектрі

жоғарыда алынған спектрлердің көмегімен аргон газының температурасы есептелінді. Ол үшін төмендегі кестедегі спектрлік сызықтар пайдаланылды.

Атом	E, эВ	λ , нм	g_B	A, 10^{-8} c^{-1}
Ar I	13,33	696,5	3	6,8
Ar I	15,33	549,5	9	1,7
Ar II	19,22	480,6	6	100

Осы сызықтар бойынша газ температурасы мен электрондардың концентрациясы анықталды. Ең көп тараған әдістерге бір элементке сәйкес спектр сызықтарының салыстырмалы интенсивтігімен анықтауға негізделген әдістер жатады. Осылай плазма температурасы мына формуламен анықталады:

$$T = \frac{5040 (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{\lg \frac{(gA)_1}{(gA)_2} - \lg \frac{\lambda_1}{\lambda_2} - \lg \frac{J_1}{J_2}}$$

Мұндағы λ_1, λ_2 - толқын ұзындығы, $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ - қозу энергиялары, $(gA)_1, (gA)_2$ - көшу ықтималдығы, J_1, J_2 спектрлер интенсивтілігі.

Келесі осы сызықтар бойынша электрондардың концентрациясы анықталды. Жоғарыдағы

алынған температуралар бойынша электрондардың концентрациясы есептелді. Ол үшін төмендегі формула қолданылды:

$$\lg n_e = -\lg \frac{I_i}{I_a} + \lg \frac{(gAv)_i}{(gAv)_a} - \frac{5040}{T} (V_i + \varepsilon_i - \varepsilon_a) + \frac{3}{2} \lg T + 15,684 .$$

Сонымен ЖЖ разрядта бірнеше газ қысымы мен разряд қуаты бойынша бірнеше газ температурасы мен электрондардың концентрациясы анықталды. Бұл тәжірибе бойынша алынған плазма температурасы 2,5 – 7 эВ аралығында, электрондардың концентрациясы $1,2 \cdot 10^9 - 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ шамасында екені анықталды. Бұл теориялық есептеулерге және басқа авторлардың есептеулеріне сәйкес келеді.

Бұл жоғары жиілікте анықталған тозаңды плазманың динамикалық және оптикалық қасиеттері алдағы уақытта плазмалы тозаңды құрылымдардың басқа да қасиеттерін анықтауға негіз бола алады. Мысалы, бөлшектердің қос корреляциялық функциясы, диффузия коэффициенті, тозаңды бөлшектердің газ спектріне әсері, т.с.с. қасиеттерін табуға болады.

Қорытынды

Бұл жұмыста ЖЖ разрядтың плазмалы тозаңда құрылымдардың динамикалық және оптикалық қасиеттері зерттелген. Әр түрлі тозаңды бөлшектер құрылымына сәйкес тозаңды бөлшектердің жылдамдық құраушылары бойынша таралу функциясы мен абсолют жылдамдықтар бойынша таралу функциялары алынды. Осы алынған тәжірибе бойынша ЖЖ разрядтың қуаты өскенде, тозаңды бөлшектердің температурасының өсетіндігі анықталды. Сонымен қатар, ЖЖ разрядтың түрлі жағдайында газ температурасы мен электрондардың концентрациясы анықталды. Бұл алынған нәтижелер алдағы уақытта тозаңды плазманың басқа да динамикалық және оптикалық қасиеттерін анықтауға негіз бола алады.

Әдебиет

1. Thomas H., Morfill G., Demmel V., Goree J., Feuerbacher B., and Mohlmann D., Phys. Rev. Lett. 73, 652 (1994).
2. Chu J.H., and Lin I., Physica A 205, 183 (1994).
3. Цытович В.Н. // УФН. 1997. Т.197. С.57.
4. Фортов В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А., Молотков В.И., Петров О.Ф. // УФН. 2004. Т.174. №5. С.495-543.
5. Thoma M.H., Kretschmer M., Rothermel H., Thomas H.M., and Morfill G.E. // Am. J. Phys. 73, 420 (2005).
6. Quinn R.A., Cui C., Goree J., Piper J.B., Thomas H., and Morfill G.E. // Phys. Rev. E 53, R2049 (1996).
7. Kersten H., Thieme G., Fröhlich M., Bojic D., Tung D.H., Quaas M., Wulff H., and Hippler R. Pure Appl. Chem., Vol. 77, No. 2, pp. 415–428, 2005.
8. Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Jumabekov A.N., and Dosbolayev M.K., // Phys. Plasmas 15, 053704 (2008).
9. Maiorov S.A., Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Jumabekov A.N., and Dosbolayev M.K., // Phys. Plasmas 15, 093701 (2008).
10. Орлов Л.Н., Ажаронок В.В. // Журн. прикл. спектр., 66, 715(1999).
11. Ажаронок В.В., И.И. Филатова, Шиманович В.Д., Орлов Л.Н. // J. Appl. Spectroscopy 69, №5, 658 (2002).
12. Melzer A., Homann A. and Piel A. // Physical Review E, 53, No.3, 2757 (1996).
13. Под редакцией Х. И. Зильберштейна. Спектральных анализ чистых веществ. Издательство «Химия», 1971.

14. Диагностика плазмы / Под ред. С. Ю. Лукьянова. В. 3. М.: Атомиздат, 1973.
15. Касабов Г.А., Елисеев В.В. Спектроскопические таблицы для низкотемпературной плазмы: Справочник. М.: Атомиздат, 1973.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЫ В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ЕМКОСТНОМ РАЗРЯДЕ АРГОНА

**Т.С. Рамазанов, Т.Т. Данияров, М.К. Досболаев, Ф.Б. Баимбетов, С.А. Оразбаев,
К.Б. Жуманов, А.У. Утегенов, В.В. Ажаронок, И.И. Филатова, Л.Е. Кратько**

Представлены результаты исследования динамических и оптических свойств пылевой плазмы в ВЧ – разряде. Проанализирована зависимость распределения скоростей пылевых частиц от мощности разряда и определены температура и плотность электронов буферного газа. Полученные результаты послужат основой для дальнейших исследований транспортных свойств пылевой плазмы.

INVESTIGATION OF DYNAMICAL AND OPTICAL PROPERTIES OF DUSTY PLASMA IN CAPACITIVE RADIO FREQUENCY DISCHARGE OF ARGON

**T.S. Ramazanov, T.T. Daniyarov, M.K. Dosbolayev, F.B. Baimbetov, S.A. Orazbaev,
K.B. Zhumanov, A.U. Utegenov, V.V. Azharonok, I.I. Filatova, L.E. Krat'ko**

In present paper the results of the experimental investigations of dynamical and optical properties of dusty plasma in capacitive radio frequency discharge were presented. The dependence of distribution velocity dust particles versus discharge power was derived. The temperature and electron density of background gas were defined. Results of present work can be used in the further investigations of other dynamical and optical properties of dusty plasma.