

М. Сламия* , М.Қ. Досболаев 

Ашық түрдегі ұлттық нанотехнологиялық зертхана, Қазақстан, Алматы қ.

*e-mail: s.mauletbek@gmail.com

МЫС НАНОБӨЛШЕКТЕРІНІҢ ЖОҒАРЫ ЖИІЛІКТІ СЫЙЫМДЫЛЫҚТЫ РАЗРЯД ПЛАЗМАСЫНЫҢ ЖАРЫҚ ИНТЕНСИВТІЛІГІНЕ ӘСЕРІ

Жұмыста жоғары жиілікті сыйымдылықты разряд плазмасының жарық беру интенсивтілігіне оның құрамындағы нанобөлшектердің әсер етуі туралы нәтижелер келтірілген. Нанобөлшектер плазмалық ортаға түскен мыс атомдарымен молекулаларының және нанокластерлердің өзара бірігуінен пайда болды, яғни плазма агрегациялық орта ретінде жұмыс істейді. Мыс атомдарымен молекулаларының плазмалық ортаға бағытталған ағынын алу, магнетрондық тозаңдандыру жүйесі арқылы жүзеге асты. Плазманың жарық беру қасиетіне тек оның құрамындағы нанобөлшектердің өлшемдерімен концентрациясы әсер етеді. Сондықтан, магнетронның катоды, мыстың орнына кез-келген материал қолдануға болады. Жоғары жиілікті плазмамен магнетрондық разряд ортақ вакуумдық ортада орналасқан және жұмыс газы ретінде тазалық деңгейі жоғары аргон қолданылды. Плазманың жарық интенсивтілігі оның толқын ұзындықтары 737 және 750 нм-ге сай келетін эмиссиялық спектрлік сызықтары арқылы бақыланды. Осылайша, плазмадағы нанобөлшектердің концентрациясы магнетрондық тозаңдандыру процесінің жүру уақытына тәуелді болатыны және оның уақыт өте қанығатындығы анықталды. Эксперимент нәтижелері көрсеткендей плазманың жарық интенсивтілігі магнетрондық тозаңдандыру процесі 7, 14, 20 және 40 секунд жүрген кезде, сәйкесінше салыстырмалы бірлікте 4451, 5280, 10725 және 13545 ретімен жоғарылайтындығы анықталды. Яғни, қарастырылып отырған уақыт аралығында плазманың жарық интенсивтілігі алғашқы мәнінен 3 есе өсті. Тозаңдандыру процесі 1 минуттан артық болса плазма интенсивтілігі әрі қарай елерліктей жоғарыламайды, яғни қанығып отыр. Бұл плазма көлемінің нанобөлшектермен мейлінше толатындығын көрсетеді. Эксперимент нәтижелері, тұтынатын энергия қуатын өзгертпей, газдық разрядты электр шамдарының жарық интенсивтілігін арттыру үшін қолданысқа ие болуы әбден мүмкін.

Түйін сөздер: жоғары жиілікті сыйымдылықты разряд плазмасы, магнетрондық тозаңдандыру жүйесі, мыс нанобөлшектері.

M. Slamia*, M.K. Dosbolayev

National nanotechnology laboratory of open type, Kazakhstan, Almaty

*e-mail: s.mauletbek@gmail.com

Effect of copper nanoparticles on plasma glow intensity of high frequency capacitive discharge

The paper presents the results of an experimental investigation of the effect of copper nanoparticles on plasma glow intensity of high-frequency capacitive discharge. Nanoparticles are composed of atoms, molecules and nanoclusters of copper, which are agglomerated, involving into the plasma volume. Magnetron sputtering system was used to obtain flux of copper atoms and molecules into the plasma volume. It is known that only the size and density of nanoparticles affects the optical properties of a plasma. In this case, almost any magnetron cathode material can be used as a source of nanoparticles. High-frequency plasma and magnetron discharge are ignited in the same medium with highly pure argon gas. To analyze the plasma glow intensity, the emission spectral lines with wavelengths of 737 and 750 nm were used. Thereby, it was revealed, that the density of nanoparticles in the plasma medium depends on the duration of the magnetron sputtering process and saturates with time. As the experimental results show, the plasma glow intensity with the duration of the magnetron sputtering process for 7, 14, 20 and 40 seconds, accordingly, increases in relative units by 4451, 5280, 10725, 13545. That is, in this case, the plasma glow intensity with nanoparticles is three times higher than in case where nanoparticles are absent. If the sputtering process continues more than one minute, then the plasma glow intensity of does not significantly increase, this evidence the beginning of saturation of nanoparticles density in the plasma volume due to the escape of nanoparticles from the plasma volume. We believe that the

experimental results find application in areas related with problems of increasing the gas-discharge glow intensity for light sources without increasing their input power.

Key words: High-frequency capacitive discharge plasma, magnetron sputtering system, copper nanoparticles.

М. Сламия*, М.Қ. Досболаев

Национальная нанотехнологическая лаборатория открытого типа, Казахстан, г. Алматы

*e-mail: s.mauletbek@gmail.com

Влияние наночастиц меди на интенсивности свечения плазмы высокочастотного емкостного разряда

В работе приведены результаты экспериментального исследования, влияние наночастиц меди на интенсивности свечения плазмы высокочастотного емкостного разряда. Наночастицы состоят из атомов, молекул и нанокластеров меди, которые агломерировались, попадая в объем плазмы. Для получения потока атомов и молекул меди, направленные на плазму, использовалась магнетронная распылительная система. Известно, что на оптические свойства плазмы влияет только размеры и концентрация наночасти в ее объеме. В таком случае, в качестве источника наночастиц, то есть катода магнетрона можно использовать практически любой материал. Высокочастотная плазма и разряд магнетрона зажигается в одной среде с особо чистым газом аргон. Для анализа интенсивности свечения плазмы были использованы ее эмиссионные спектральные линии с длиной волны 737 и 750 нм. Таким образом, были определены, что, концентрация наночастиц в плазменной среде зависит от длительности процесса магнетронного распыления, и с истечением времени насыщается. Как показывает результаты экспериментов, интенсивность свечения плазмы при длительности процесса магнетронного распыления на 7, 14, 20 и 40 секунд, соответственно растет в относительных величинах на 4451, 5280, 10725 и 13545. То есть, в данном случае интенсивность свечения плазмы с наночастицами три раза больше, чем без наночастиц. Если процесс распыления длится более одной минуты, тогда, интенсивность свечения плазмы заметно не растет, это свидетельствует о наступлении насыщения концентрации наночастиц в объеме плазмы, что связано с уходом наночастиц от объема плазмы. Считаем что, результаты экспериментов находят применение в таких областях, где рассматривается проблемы связанные с увеличением интенсивности свечения газоразрядных источников света, не повышая их входную мощность.

Ключевые слова: плазма высокочастотного емкостного разряда, магнетронная распылительная система, наночастицы меди.

Кіріспе

Иондалған газды плазма деп атаймыз. Демек оның құрамында электрондар, иондар және бейтарап атомдар болады. Газды иондау процесі әртүрлі жолмен жүзеге асады, мысалы лабораторияда көп жағдайда күшті электр өрісі әсерінен. Мұндай плазма – газдық разряд плазмасы деп аталады. Алайда, плазма таза күйде сирек кездеседі, оны алу үшін арнайы шарттар орындалуы қажет. Сонымен, плазманың ластануы оның құрамында тозанды бөлшектердің болуымен байланысты. Мұндай плазма – тозанды плазма немесе плазмалық кристал деп аталады [1-9]. Плазма құрамындағы тозаң бөлшектері әдетте плазма бар ыдыс ішінің жеткілікті таза болмауынан, немесе ыдыс қабырғасының плазмамен әсерлескен кезде эрозияланыуынан пайда болады. Сол сияқты электродты разрядтар үшін катодтық тозандану әсерінен [10-11] және көміртек құрамды газдарды колданған кезде

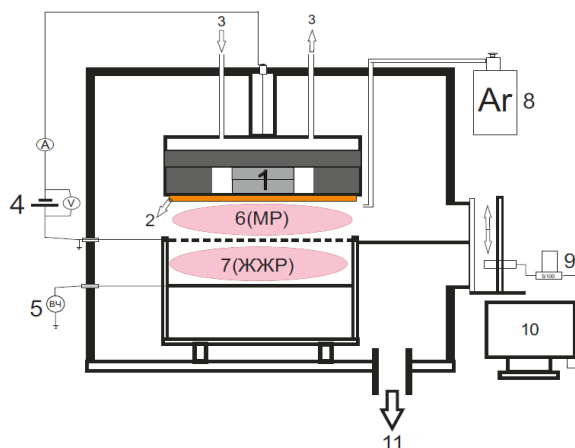
плазма химиялық процестер әсерінен [12-17] де тозанды бөлшектер құрылып плазма құрамына енеді. Ал лабораториялық жағдайдағы зерттеулерде тозанды бөлшектер плазмаға әдейі енгізіледі. Тозанды бөлшектердің өлшемдері әдетте бірнеше нм-ден ондаған мкм-ге дейін жетеді. Осылайша плазма көлеміне енген тозанды бөлшектер нақты шарттар сақталған кезде ол жерде ұзақ ұсталып тұрады және плазма қасиеттеріне елрліктей әсер етеді. Мысалы оның жарық беру қасиетін өзгертеді [18-21]. Міне осы процесс эксперименттік тұрғыда егжей-тегжейлі зерттеліп, қарастырылып отырған жұмыста нәтижелері көрсетілген.

Тәжірибиелік қондырғы

Нанобөлшектердің плазмаға әсерін зерттеу үшін жоғары жиілікті сыйымдылықты разряд (ЖЖСР) және магнетрондық тозандандыру әдісі қолданылды. Тәжірибиелік қондырғының принциптік схемасы 1-суретте көрсетілген.

Магнетрондық тозандану кезіндегі атомдармен молекулалар ағыны ЖЖСР плазмасына еніп, өзара бірігіп, сол жерде нанобөлшектермен нанокластерлер түзеді [22]. ЖЖСР плазмасы өзара параллель орналасқан жазық электродтар аралығында жағылады (7). Электродтар тот баспайтын болаттан дайындалған, диаметрлері 10 см, арақашықтығы 3 см. Төменгі электрод, жиілігі 13,56 МГц генераторға (5) жалғанған.

Эксперименттер жасау кезіндегі негізгі параметрлер: жоғарғы жиілікті қорек көзінің қуаты 15 Вт, магнетронның газдық разрядының ток күші 0,1-0,6А және газ қысымы 0,1-1,2 торр аралығында болды. Жұмыс газы ретінде аргон қолданылды. Газдық разрядтың эмиссиялық спектрлері Solar S100 аспабымен түсірілді және арнайы компьютерлік бағдарламалар көмегімен өңделді.



1 сурет – Эксперименттік қондырғының принциптік схемасы:
 1 – магнетрон, 2 – тозанданатын мыс катод, 3 – суыту жүйесі,
 4 – магнетрондық разрядтың қорек көзі, 5 – жоғары жиілікті сыйымдылықты разрядтың қорек көзі, 6 – магнетронның газдық разряды (МР), 7 – жоғары жиілікті разряд (ЖЖР) плазмасы,
 8 – газ балоны (аргон), 9 – спектрометр, 10 – әмбебап компьютер,
 11 – вакуумдау және газды енгізу бөлігі.

Нәтижелер және талдаулар

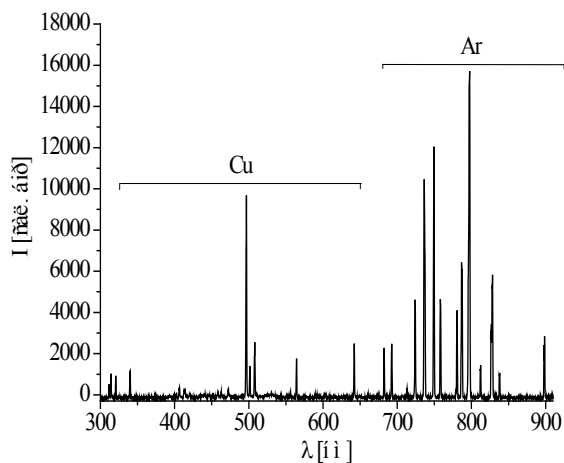
Эксперимент нәтижелері эмиссиялық спектрлік сызықтарды талдауға негізделген. Осы себепті алғашқы зерттеулерде ЖЖСР-пен МР бірге іске қосылып спектрлері түсірілді. МР спектрі 2а суретінде келтірілген. Осы жерден көріп отырғанымыздай жұмыс газы аргондікімен қоса қысқа толқын бөлігіне қарай мыс сызықтары да пайда болған. Демек МР-та мыс атомдарымен молекулаларының бар екенін және олардың қозатындығын байқаймыз. Ал осы кезде ЖЖСР плазмасының спектрін алатын болсақ, 2ә суреті, ол жерде тек аргонның сызықтары ғана шыққан. Бұл, мыс атомдарының ЖЖСР плазмасына ене бере өзара бірігіп нанокластерлермен тозанды нанобөлшекке айналып кететінін көрсетеді. Ал нанобөлшектерді қоздыру үшін ЖЖСР плазмасының энергиясы жеткіліксіз. Сондықтан мыс спектрінің сызықтары байқалмады.

Енді ЖЖСР плазмасының жарық интенсивтілігіне оның көлеміне енген нанобөлшектердің әсерін қарастырайық. Ол үшін аргонның 750 нм-ге сай келетін спектрлік сызығының интенсивтілігін бақылаймыз. ЖЖСР плазмасына мыс нанобөлшектері енген уақыттан бастап аргонның спектрлік сызығының уақыт бойынша өзгерісі 3-суретте көрсетілген.

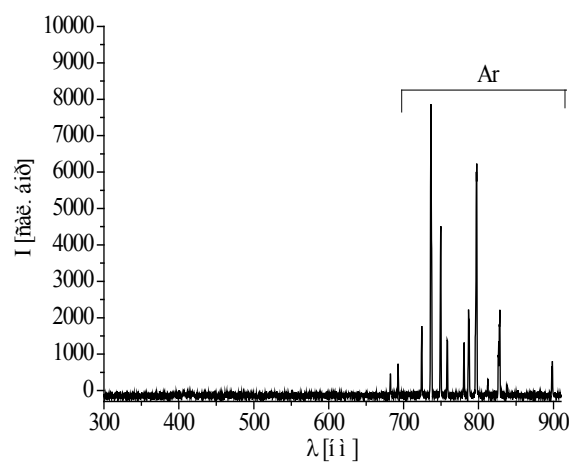
Бірінші, таза ЖЖСР плазмасының толқын ұзындығы 750 нм-ге сай келетін спектрлік сызығы түсірілді, оның интенсивтілігі салыстырмалы бірлікте 4500-ге тең, 2 суреттегі (1) қисық. Кейін магнетрондық тозандандыру іске қосылып 5 секунд уақыттан кейін алдыңғы қарастырған спектр қайта бақыланды және салыстырмалы бірлікте оның интенсивтілігі 8500-ға тең болғанын көреміз, яғни 1,89 есе-ге өсіп тұр, 3 суреттегі (2) қисық. Жоғарыда айтылғандай, ЖЖСР плазмасының жарық интенсивтілігінің өсуіне оның құрамындағы

нанобөлшектердің әсері бар екенін байқаймыз. Магнетрондық тозаңдандыру іске қосылып 5 секундтан кейін өшірілді және осы уақыт сәтінен кейін 240 секундтағы бақылау, спектрлік сызықтың жарық интенсивтілігінің сәл төмендегенін көрсетеді, 3 суреттегі (3)

қисық. Бұл плазмалық ортадағы нанобөлшектер концентрациясының азайып, және өзара бірігуі нәтижесінде өлшемдерінің өсуімен байланысты болу керек [23-30]. Осы процесті салыстырмалы түрде ұзақ уақыт зерттеу келесі нәтижелерді берді, 4 суретті қараңыз.

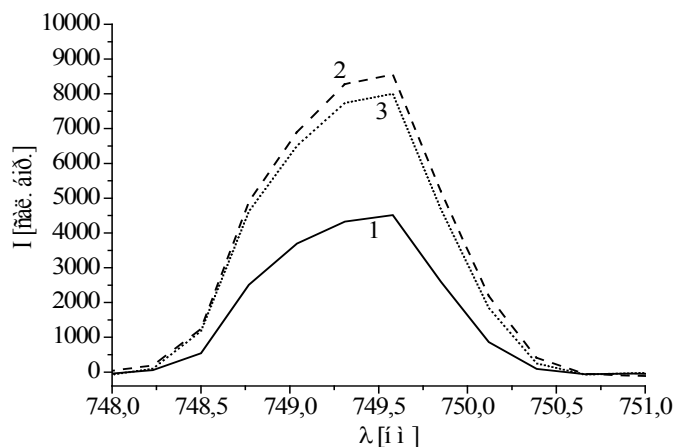


а) МР спектрі



ә) ЖЖСР плазмасының спектрі

2 сурет – Аргон газында жанған разряд спектрлері ($p=0,3$ торр; $P=15$ Вт; $I=0,1A$).



3 сурет – ЖЖСР плазмасының спектрлері: (1) ЖЖСР плазманың нанобөлшектер жоқ кездегі спектрі, (2) бөлшектер енгізілгеннен кейінгі (магнетрон қосылғаннан кейінгі) 5-ші секундтағы спектрі, (3) бөлшектер енгізілгеннен кейінгі (магнетрон қосылғаннан кейінгі) 240-шы секундтағы спектрі, ($p=0,3$ торр; $P=15$ Вт; $I=0,1A$).

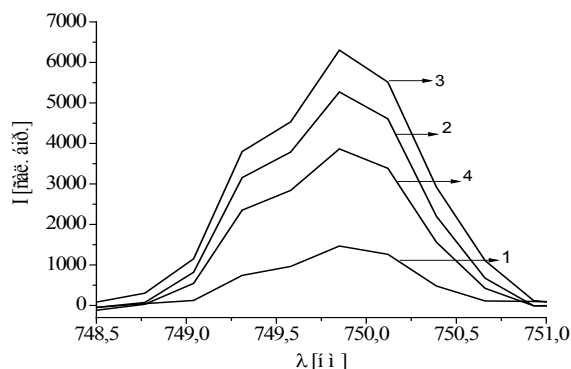
Бұл жерде де бірінші кезекте таза ЖЖСР плазмасының толқын ұзындығы 750 нм-ге сай келетін спектрлік сызығы түсірілді, оның интенсивтілігі салыстырмалы бірлікте 1500-ге тең болды, 4 суреттегі (1) қисық. 20 секундтан кейін

5500-ге (4 суреттегі (2) қисық), ал 15 минуттан кейін 6500-ге тең болды (4 суреттегі (3) қисық). Осылайша алғашқы аз уақыт ішінде спектрлік сызық интенсивтілігі тез өсті, 3,67 есе. Ал одан кейінгі 15 минутта өсу қарқыны уақытпен салыстырғанда

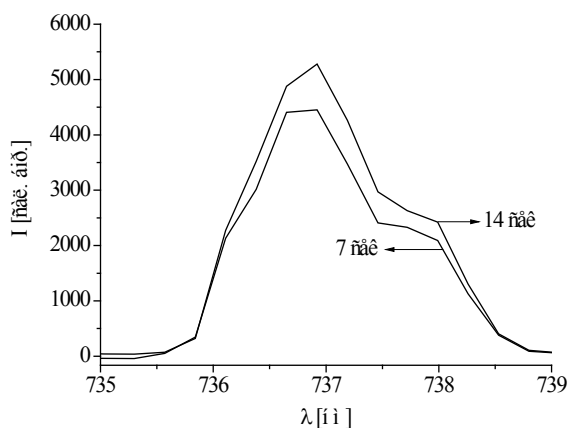
баяу, небәрі 0,66 есе. Демек нанобөлшектердің концентрациясының өсуі бойынша қанығу орын алды, яғни ЖЖСР плазмасына кірген және ол жерден шыққан бөлшектер саны теңескен болу керек. Енді, (3) қисық алынған уақыт сәтінен бастап МР өшіріп, 15 минуттан кейін спектрлік сызыққа бақылау жүргізетін болсақ, оның жарық интенсивтілігінің шамамен 1,6 есе төмендегенін байқаймыз. Бірақ, (1) қисық алынғандағы алғашқы уақыт сәтімен салыстырғанда спектрлік сызықтың жарық интенсивтілігінің 2,67 еседей жоғары. Магнетрондық тозаңдандыру процесі тоқтағанда үздіксіз келіп отыратын нанобөлшектер ағыны тоқтайды, ал плазмадағы нанобөлшектердің біраз

бөлігі плазма көлемінен вакуумдық ортаға шығып кетеді, бірақ толықтай емес. Өйткені спектрлік сызықтың жарық интенсивтілігі алғашқы қалпына оралмайды.

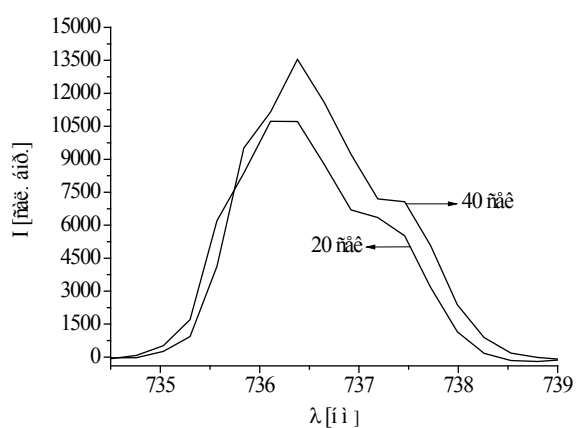
Нанобөлшектер көзі болатын магнетрондық тозаңдандыру процесін қандайда бір уақыт аралығында жүргізіп қажет болатын нанобөлшектер концентрациясына, ізінше қажет болатын плазманың жарықырау интенсивтілігіне қол жеткізуге болады. Оған 5 суреттегі графиктер дәлел. Яғни, тозаңдандыру процесі 7 және 14 секунд (5а) суреті) сол сияқты 20 және 40 секунд (5ә) суреті) жүрді. Және осыған сай плазманың жарық интенсивтілігі алынады.



4 сурет – ЖЖСР плазмасының спектрлері: (1) ЖЖСР плазманың нанобөлшектер жоқ кездегі спектрі, (2) бөлшектер енгізілгеннен кейінгі (магнетрон қосылғаннан кейінгі) 20-шы секундтағы спектрі, (3) 15 минуттан кейін. Ал (4) бөлшектер көзі болатын магнетрондық тозаңдандыру өшірілгеннен кейін 15-ші минутағы спектрі, ($p=0,43$ торр; $P=15$ Вт; $I=0,3A$).



а) $p=0,43$ торр; $I=0,3A$; $P=15$ Вт

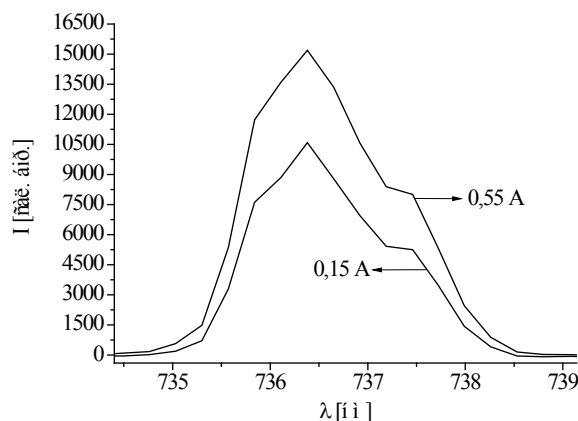


ә) $p=0,5$ торр; $I=0,35A$; $P=15$ Вт

5 сурет – ЖЖСР плазмасының толқын ұзындығы 737 нм-ге сай келетін спектрлік сызығының жарық интенсивтілігінің магнетрондық тозаңдандыру процесінің жүру уақытынан тәуелділігі.

Сонымен қатар ЖЖСР плазмасындағы нанобөлшектердің концентрациясы магнетрондық разрядтың ток күшіне де тәуелді болады. Бұл дегеніміз тозаңдану процесінің бірдей уақытында әртүрлі ток күшін ор-

ната отырып ЖЖСР плазмасындағы нанобөлшектердің концентрациясын, ізінше плазма жарықтылығының интенсивтілігін басқара аламыз. Бұл нәтижелер графикалық түрде б суретте көрсетілген.



6 сурет – ЖЖСР плазмасының толқын ұзындығы 737 нм-ге сай келетін спектрлік сызығының жарық интенсивтілігінің магнетрон разрядының ток күшінен тәуелділігі. ($p=0,18$ торр; $P=15$ Вт).

Алғыс

Ғылыми зерттеу жұмысы ҚР БҒМ қолдауындағы IRN AP05134391 гранты аясында жүзеге асырылды.

Қорытынды

Жоғары жиілікті сыйымдылықты разряд плазмасының жарық интенсивтілігіне оның құрамындағы нанобөлшектердің әсері зерттелді, және ол, нанобөлшектердің өлшемдерімен концентрациясына тәуелді болатыны анықталды. Оның себебі, электрон-атомдық қоздыру

процестері бөлшектер маңайында жиі жүзеге асатындығынан болуы мүмкін. Эксперимент нәтижелері көрсеткендей плазманың жарық интенсивтілігі алғашқы, нанобөлшектер жоқ кездегімен салыстырғанда көп дегенде 3 есе өсетіндігін көрсетті. Тоzaңдандыру процесі 1 минуттан артық болса плазма интенсивтілігі әрі қарай елерліктей жоғарыламайды, яғни плазма көлеміндегі нанобөлшектер концентрациясы қанығу мәніне жетеді. Эксперимент нәтижелері, тұтынатын энергия қуатын өзгертпей, газдық разрядты электр шамдарының жарық интенсивтілігін арттыру үшін қолданысқа ие болуы әбден мүмкін.

Әдебиеттер

- 1 Chu J.H. and Lin I. Coulomb lattice in a weakly ionized colloidal plasma //Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 1994. – Vol. 205. – Iss.1. – P.183-1907.
- 2 Thomas H., Morfill G., Demmel V., Goree J., Feuerbacher B., and Mohlmann D. Plasma Crystal: Coulomb Crystallization in a Dusty Plasma //Phys. Rev. Lett. – 1994. – Vol. 73. – No 5. – P. 652-655.
- 3 Hayashi Y. and Tachibana K. Observation of Coulomb-crystal formation from carbon particles grown in a methane plasma //Japan. J. Appl. Phys. – 1994. – Vol. 33. – Part 1. – P. 804-806.
- 4 Fortov V.E., Nefedov A.P., Petrov O.F., Samarian A.A., and Chernyshev A.V. Particle Ordered Structures in a Strongly Coupled Classical Thermal Plasma //Phys. Rev. E. – 1996. – Vol. 54. – Number 3. –P. R2236-R2238.
- 5 Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Jumabekov A.N., Dosbolayev M.K. Structural properties of dusty plasma in direct current and radio frequency gas discharges //Physics of Plasmas. – 2008. – Vol. 15. – P. 053704.

- 6 Tsytoich V.N. Perspectives of experimental and theoretical studies of self-organized dust structures in complex plasmas under microgravity conditions //Physics – Uspekhi. – 2015. – Vol. 58(2). – P. 150-166.
- 7 Robert L. Merlino and John A. Goree. Dusty Plasmas in the Laboratory, Industry, and Space //Phys. Today. – 2004. – Vol. 57(7). – P. 32.
- 8 Kil-Byoung Chai. Dynamics of nonspherical, fractallike water-ice particles in a plasma environment //Scientific Reports. – 2018. – Vol. 8. – P. 15405.
- 9 Polyakov D.N., Shumova V.V., and Vasilyak L.M. Positive Column of Glow Discharge with Dust Particles //Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2013. – Vol. 49. – No. 2. – P. 114-124.
- 10 Langmuir I., Foud C.G. and Dittmer A.F. A new type of electric discharge: the streamer discharge //Science New York. – 1924. – Vol. 60. – P. 392-394.
- 11 Досболаев М.Қ., Әбдірахманов А.Р. Влияние катодного распыления на свойств плазмы газового разряда постоянного тока //ПЭОС. – 2019. – Вып. 21. – Т. 2. – С. 61-67.
- 12 Bouchoule A. and L. Boufendi. Particulate formation and dusty plasma behaviour in argon-silane RF discharge //Plasma sources Sci. Technol. – 1993. – Vol. 2. – P. 204-213.
- 13 Fabio Palumbo, Chiara Lo Porto, Francesco Fracassi, and Pietro Favia. Recent Advancements in the Use of Aerosol-Assisted Atmospheric Pressure Plasma Deposition //Coatings. – 2020. – Vol 10(440). – P. 1-25.
- 14 Stancampiano A., Galligani T., Gherardi M., Machala Z., Maguire P., Colombo V., Pouvesle J.M., Robert E. Plasma and aerosols: Challenges, opportunities and perspectives //Appl. Sci. – 2019. – Vol. 9. – P. 3861.
- 15 Bhattarai C., Samburova V., Sengupta D., Iaukea-Lum M., Watts A.C., Moosmüller H., Khlystov A.Y. Physical and chemical characterization of aerosol in fresh and aged emissions from open combustion of biomass fuels //Aerosol Sci. Technol. – 2018. Vol. 52. –P. 1266–1282.
- 16 Weltmann K.D., Kolb J.F., Holub M., Uhrlandt D., Šimek M., Ostrikov K., Hamaguchi S., Cvelbar U., Černák M., Locke B. et al. The future for plasma science and technology //Plasma Process. Polym. – 2019. – Vol. 16. – P. 1800118.
- 17 Trizio I., Garzia Trulli M., Lo Porto C., Pignatelli D., Camporeale G., Palumbo F., Sardella E., Gristina R., Favia P. Plasma Processes for Life Sciences. In Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering //Elsevier Inc.: Waltham, MA, USA, 2018. – 1–24 p.
- 18 Austin Woodard, Kamran Shojaei, Carla Berrospe-Rodriguez, Giorgio Nava, and Lorenzo Mangolini. Electron emission from particles strongly affects the electron energy distribution in dusty plasmas //J. Vac. Sci. Technol. –2020. – Vol. A38. – P. 023005.
- 19 Mikikiana M., Couedelb L., Cavarroce M., Tessier Y., and Boufendi L. Dusty plasmas: synthesis, structure and dynamics of a dust cloud in a plasma //Eur. Phys. J. Appl. Phys. – 2010. – Vol. 49. – P. 13106.
- 20 Olivier Levasseur, Reetesh Kumar Gangwar, Jacopo Profili, Nicolas Naudé, Nicolas Gherardi, Luc Stafford. Influence of substrate outgassing on the plasma properties during wood treatment in He dielectric barrier discharges at atmospheric pressure // Plasma Process Polym. – 2016. –Vol. 9999. –P. 201600172.
- 21 Bilik N., Anthony R., Merritt B.A., Aydil E.S., and Kortshagen U.R. Langmuir probe measurements of electron energy probability functions in dusty plasmas //J. Phys. D: Appl. Phys. – 2015. – Vol. 48. – P. 105204 (9pp).
- 22 Сламия М., Досболаев М.Қ., Рамазанов Т.С., Шаленов Е.О., Примбаев А.Ш., Бимурзаев Н.Р. Магнетрондық разряд плазмасының параметрлерінен тозаңдатылған нанобөлшектермен нанолүдір қасиеттерінің тәуелділігін зерттеу //Вестник КБТУ. – 2020. – Том 17. – Выпуск 4.
- 23 Boufendi L., Hermann J., Bouchoule A., Dubreuil B., Stoffels E. et al. Study of initial dust formation in an ArSiH4 discharge by laser induced particle explosive evaporation //J. Appl. Phys. – 1994. – Vol. 76. – N1. – P. 148-153.
- 24 Garofano V., Bérard R., Boivin S., Joblin C., Makasheva K., and Stafford L. Multi-scale investigation in the frequency domain of Ar/HMDSO dusty plasma with pulsed injection of HMDSO //Plasma Sources Science and Technology. –2019. – Vol. 28. – No 5. – P. 1-37.
- 25 Peter Firth and Zachary C. Holman. Aerosol Impaction-Driven Assembly System for the Production of Uniform Nanoparticle Thin Films with Independently Tunable Thickness and Porosity //ACS Appl. Nano Mater. –2018. – Vol. 1(8). – P. 4351-4357.
- 26 Sinha M., Izadi A., Anthony R., and Roccabianca S. A novel approach to finding mechanical properties of nanocrystal layers // Nanoscale. –2019. – Vol. 11. – P. 7520.
- 27 Stephen Exarhos, Alejandro Alvarez-Barragan, Ece Aytan, Alexander A. Balandin, and Lorenzo Mangolini. Plasmonic Core–Shell Zirconium Nitride–Silicon Oxynitride Nanoparticles //ACS Energy Lett. – 2018. – Vol. 3(10). – P.2349-2356.
- 28 Alejandro Alvarez Barragan, Niranjana V. Ilawe, Lanlan Zhong, Bryan M. Wong, and Lorenzo Mangolini. A Non-Thermal Plasma Route to Plasmonic TiN Nanoparticles //J. Phys. Chem. C. – 2017. –Vol. 121(4). – P. 2316–2322.
- 29 Lopez T., Mangolini L. In situ monitoring of hydrogen desorption from silicon nanoparticles dispersed in a nonthermal plasma //J Vac Sci Technol B Nanotechnol Microelectron Mater Process Meas Phenom. – 2016. –Vol. 34(4). –P. 41206.
- 30 Barragan A.A., Hanukovich S., Bozhilov K., Yamijala S.S.R.K.C., Wong B. M., Christopher P., and Mangolini L. Photochemistry of Plasmonic Titanium Nitride Nanocrystals //J. Phys. Chem. – 2019. – Vol. C123. –P. 21796.

References

- 1 J.H. Chu and I. Lin, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 205 (1), 183-1907 (1994).
- 2 H. Thomas, G. Morfill, V. Demmel, J. Goree, B. Feuerbacher, and D. Mohlmann, Phys. Rev. Lett, 73 (5), 652-655 (1994).
- 3 Y. Hayashi and K. Tachibana, Japan. J. Appl. Phys., 33 (1), 804-806 (1994).

- 4 V. E. Fortov, A. P. Nefedov, O. F. Petrov, A. A. Samarian, and A. V. Chernyshev, *Phys. Rev. E*, 54 (3), R2236-R2238 (1996).
- 5 T.S. Ramazanov, K.N. Dzhumagulova, A.N. Jumabekov, M.K. Dosbolayev, *Physics of Plasmas*, 15, 053704 (2008).
- 6 V.N. Tsyтович, *Physics –Uspekhi*, 58(2), 150-166 (2015).
- 7 L. Robert Merlino, and A. John Goree, *Phys. Today*, 57(7), 32 (2004).
- 8 C. Kil-Byoung, *Scientific Reports*, 8, 15405 (2018).
- 9 D.N. Polyakov, V.V. Shumova, and L.M. Vasilyak, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 49(2), 114-124 (2013).
- 10 I. Langmuir, C.G. Found and A.F. Dittmer, *Science New York*, 60, 392-394 (1924).
- 11 M.K. Dosbolayev, A.P. Эбдірахманов, *PEOS*, 21 (2), 61-67 (2019). (in Russ).
- 12 A. Bouchoule and L. Boufendi, *Plasma sources Sci. Technol.*, 2, 204-213 (1993).
- 13 Fabio Palumbo, Chiara Lo Porto, Francesco Fracassi, and Pietro Favia, *Coatings*, 10(440), 1-25 (2020).
- 14 A. Stancampiano, T. Galligani, M. Gherardi, Z. Machala, P. Maguire, V. Colombo, J.M. Pouvesle, E. Robert, *Appl. Sci.*, 9, 3861 (2019).
- 15 C. Bhattarai, V. Samburova, D. Sengupta, M. Iaukea-Lum, A.C. Watts, H. Moosmüller, A.Y. Khlystov, *Aerosol Sci. Technol.*, 52, 1266–1282 (2018).
- 16 K.D. Weltmann, J.F. Kolb, M. Holub, D. Uhrlandt, M. Šimek, K. Ostrikov, S. Hamaguchi, U. Cvelbar, M. Černák, B. Locke et al., *Plasma Process. Polym.*, 16, 1800118 (2019).
- 17 I. Trizio, M. Garzia Trulli, C. Lo Porto, D. Pignatelli, G. Camporeale, F. Palumbo, E. Sardella, R. Gristina, P. Favia, Elsevier Inc.: Waltham, MA, USA, (2019) , 1–24 p.
- 18 Austin Woodard, Kamran Shojaei, Carla Berrospe-Rodriguez, Giorgio Nava, and Lorenzo Mangolini, *J. Vac. Sci. Technol.*, A38, 023005 (2020).
- 19 M. Mikikiana, L. Couedelb, M. Cavarroc, Y. Tessier, and L. Boufendi, *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 49, 13106 (2010).
- 20 Olivier Levasseur, Reetesh Kumar Gangwar, Jacopo Profili, Nicolas Naudé, Nicolas Gherardi, Luc Stafford, *Plasma Process Polym.*, 9999, 201600172 (2016).
- 21 N. Bilik, R. Anthony, B.A. Merritt, E.S. Aydil, and U.R. Kortshagen, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 48, 105204 (9pp) (2015).
- 22 M. Slamiya, M.K. Dosbolayev, T.S. Ramazanov, E.O. Shalenov, A.Sh. Primbayev, N.R. Bimurzayev, *Herald of the KBTU*, 17 (4), (2020). (in Kaz).
- 23 L. Boufendi, J. Hermann, A. Bouchoule, B. Dubreuil, E. Stoffels et al., *J. Appl. Phys.*, 76 (1), 148-153 (1994).
- 24 V. Garofano, R. Bérard, S. Boivin, C. Joblin, K. Makasheva, and L. Stafford, *Plasma Sources Science and Technology*, 28, 1-37 (2019).
- 25 Peter Firth and Zachary C. Holman, *ACS Appl. Nano Mater.*, 1(8), 4351-4357 (2018).
- 26 M. Sinha, A. Izadi, R. Anthony, and S. Roccabianca, *Nanoscale*, 11, 7520 (2019).
- 27 Stephen Exarhos, Alejandro Alvarez-Barragan, Ece Aytan, Alexander A. Balandin, and Lorenzo Mangolini, *ACS Energy Lett.*, 3(10), 2349-2356 (2018).
- 28 Barragan Alejandro Alvarez , Niranjana V. Ilawe, Lanlan Zhong, Bryan M. Wong, and Lorenzo Mangolini, *J. Phys. Chem. C*, 121(4), 2316–2322 (2017).
- 29 T. Lopez, L. Mangolini, *J Vac Sci Technol B Nanotechnol Microelectron Mater Process Meas Phenom*, 34(4), 41206 (2016).
- 30 A.A. Barragan, S. Hanukovich, K. Bozhilov, S.S.R.K.C. Yamijala, B.M. Wong, P. Christopher, and L. Mangolini, *J. Phys. Chem.*, C123, 21796 (2019).