

Ә.Б.Тәжен, Қ.Нұрболат, М.Қ.Досболаев.
 ЭТФФЗИ, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы қ. Қазақстан
aigerim_tzh@mail.ru

ИМПУЛЬСТІ ПЛАЗМА АҒЫНЫНА СПЕКТРОСКОПИЯЛЫҚ ДИАГНОСТИКА ЖАСАУ

Аннотация: Бұл жұмыста импульсті плазма ағынына жүргізілген спектроскопиялық талдау нәтижелері көрсетілген. Импульсті плазма ағыны конденсаторлар батареяларында жинақталған энергияның коакциял жүйелі электродтарға берілуі нәтижесінде пайда болады. Спектрлік сызықтарды алып, зерттеу үшін Solar S100 сызықты спектрометрі мен M833 монохроматоры қолданылды. Импульсті плазманың электрондар концентрациясын анықтау мақсатында спектрлік сызықтардың Штарктік ендену әдісі қолданылды. Плазмадағы жоғары концентрациялы иондар мен электрондар алыстан әсерлесу Кулон күшіне ие. Сондықтан зарядталған бөлшектердің, яғни иондармен және электрондармен әсерлесу жағдайын, Штарк енденуін қарастырамыз. Тәжірибелер гелий және сутек газдарымен әртүрлі қысым мен разряд қуаттарында жүргізілді. Спектрограммада сутегінің H_{α} және H_{β} сызықтары да байқалды. Олар камерадағы қалдық су молекулаларынан немесе изолятор құрамынан бөлінуі мүмкін. Электрондардың қозу температурасын анықтауда спектрлік сызықтардың салыстырмалы интенсивтілік әдісі қолданылды. Алынған нәтижелердің, электрондар концентрациясы мен қозу температурасының разряд кернеулігіне тәуелділіктері зерттелді және оларға қысқаша сипаттама берілді. Импульсті плазмалық үдеткіште алынған плазма ағынындағы электрондардың қозу температурасы салыстырмалы интенсивтілік әдісімен анықтау үшін H_{α} және H_{β} спектрлік сызықтары қолданылды. Электродтар жүйесіне қарама-қарсы түсірілген спектрлерде 200-350 нм толқын ұзындығы аралығында мыстың сызықтары көбірек шыққандығы тәжірибеде байқалды. Ол мыс электродтардың плазмамен әсерлесуі кезінде эрозияға ұшырайтындығын көрсетеді.

Түйін сөздер: импульсті плазмалық үдеткіш, импульсті плазма ағыны, спектроскопиялық диагностика жасау.

Кіріспе

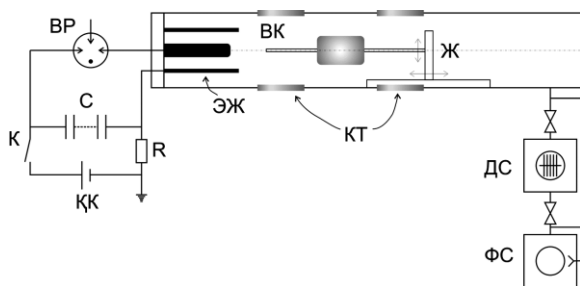
Импульсті плазмалық үдеткіштер жоғары энергиялы плазма ағындарының тиімді көздері болып табылады [1]. Плазмалық үдеткіштердің техникалық қолданылуының маңызы – олардың көмегімен кең диапазондағы жылдамдық пен энергиясы бар бөлшектер ағынын алуға болатындығы. Плазманың қасиеттерін зерттеуде әртүрлі әдіс қолданылады, спектроскопиялық әдіс солардың бірі. Бұл әдістің тиімділігі плазма жүйесімен тікелей жанасусыз зерттеулер жүргізуге мүмкін болуында. Осы әдісті қолдана отырып, плазманың келесі қасиеттерін зерттей аламыз: плазманың спектрлік құрамын, интенсивтілігін және электрондар температурасы мен концентрациясын [2-3]. Біз гелий және сутек газдарымен әртүрлі қысым мен разряд қуаттарында тәжірибелер жүргіздік. Эксперименттерде қолданылған

кең диапазонды Solar S100 спектрометрі 190-1100 нм аралықтағы спектрлік сызықтарды қабылдай алады, спектрлік ажырату қабілеті 1 нм. Бұл спектрометрдің сезгіштігі жоғары, оның көмегімен әр түрлі қуатта және қысымда спектрлік анализдер жасап, ары қарай графикалық бағдарламалар жүйесімен өңдеу үшін компьютерге сақтауға болады. Бұл күрделі зерттеулерді жеңілдетуге және плазмадағы электрондар температурасы мен концентрациясын дәл есептеуге мүмкіндік береді. Плазма интенсивтілігі жоғары болғандықтан, оны біздің спектрометр өлшей алатын облысқа келтіру мақсатында спектрометрмен бірге әр түрлі толқын ұзындықтарын жұтатын жұтқыш әйнектер жиынтығы қолданылды. Тәжірибеде сутегі газымен алынған плазманың спектрлері толықтай зерттеліп, электрондардың қозу температурасы мен концентрациясын есептеп табу үшін салыстырмалы

интенсивтілік және Штарктың ендену әдістері пайдаланылды. Штарктық енденуді анықтау үшін ажырату қабілеті жоғары (0,01 нм) М833 монохроматоры қолданылды.

Эксперименттік қондырғы

Тәжірибе ЭТФҒЗИ лабораториясында жасақталған эксперименттік ИПУ-30 қондырғысында жүргізілді [4-8]. Эксперименттік қондырғының сұлбасы 1 суретте көрсетілген



1 – сурет. Эксперименттік қондырғының сұлбасы

Қондырғы келесі негізгі бөліктерден тұрады: электр өрісінің энергиясын жинауға арналған жоғары кернеулі конденсаторлар батареясы (С), газдық разрядты коммутатор (ВР), коаксиал электродтар жүйесі (ЭЖ), вакуумдық сорғылар (ДС және ФС), коректендіру (ҚК) және басқару (К) жүйесі. Коаксиальды геометриялық электродты жүйе, катод және анод мыстан, вакуумдық камера болаттан жасалған. Сыртқы электродтың диаметрі 108 мм, ішкісі – 50 мм құрайды, сыртқы және ішкі электродтардың ұзындығы сәйкесінше 350 мм және 330 мм. Вакуумдық камераның қапталдарында және екінші басында (электродтарға қарама-қарсы) кварцтан жасалған жеті терезе (КТ) орналасқан, олар плазмаға спектроскопиялық диагностика жасау үшін және плазмаға ағынын фотоға, видеоға түсіру үшін қажет. Импульсті плазма электродтар арасында конденсаторлар батареяларында жинақталған энергияның электродтарға берілуі нәтижесінде пайда болады. Конденсаторларда жинақталған электр өрісінің энергиясын электродтарға беру үшін вакуумдық разрядтағаш (коммутатор) қолданылады. Құрылымы, цилиндрлік изолятормен бөлінген екі негізгі және бір іске қосушы (тұтандырғыш) электродтардан тұрады. Жұмыс істеу

принципі, негізгі электродтар аралығындағы коммутациялаушы разрядтың пайда болуы іске қосушы электрод тудыратын ұшқын разрядтың көмегімен жүзеге асады.

Эксперимент нәтижелері.

Спектрлік сызықтардың Штарктық ендену әдісі негізінде импульсті плазманың электрондар концентрациясын анықтау.

Плазмада немесе тығыз газдарда орналасқан атомдармен иондардың спектрлік сызықтары, сәулелендіргіштердің қоршаған ортамен әсерлесуі арқылы анықталады. Мұндай сызықтардың енденуі көбінесе қысым әсерінен ендену деп аталады, (1) формуламен анықталады. Физикалық тұрғыдан қысымға негізделген енденуді, а) дәл сол сорттағы атомдармен, б) басқа сорттағы атомдар және молекулалармен, в) зарядталған бөлшектермен, яғни иондармен және электрондармен әсерлесуінің негізделуіне байланысты үшке бөліп қарастыруға болады: 1 - резонанстық, 2 - Вандервальстік, 3 – Штарктік (1) [9].

$$\Delta\lambda_L = 0,31 \cdot 10^{-12} \vartheta_r^2 \lambda^2 (n_k)^{-1}. \quad (1)$$

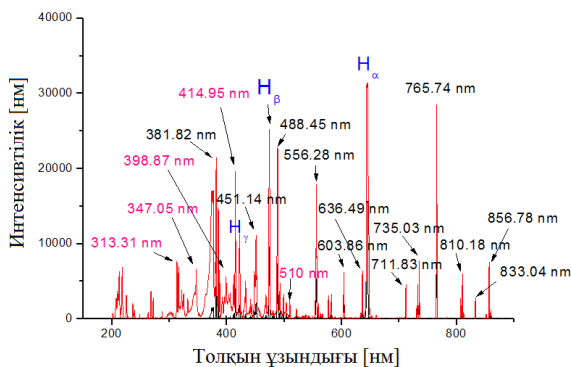
Оны центірден үлкен қашықтықта квазистатикалық теория дұрыс деп есептейді. Келтірілген формуладағы \bar{n}_k -құрған Бальмер сериясының төменгі сызықтары таблицалық шама, \bar{n}_k нің үлкен мәнін есептеу үшін $\bar{n}_k = n(n-1)/2$, (2) жуықтау формуласын қолдануға болады. Мұндағы n - жоғары денгейдегі бас квант саны. ϑ_r арқылы соқтығысатын бөлшектердің салыстырмалы

$$\bar{n}_k = \left[2,54RT \left(\frac{1}{\mu_1} + \frac{1}{\mu_2} \right) \right]^{1/2}, \quad (2)$$

жылдамдығы белгіленген. мұндағы $\mu_{1,2}$ сәйкесінше сәулеленген және ауытқыған бөлшектің атомдық салмағы. Жоғарыдағы (2) формула арқылы есептеу мынаны көрсетеді: егер ығысқан бөлшектер электрондар болса, онда 10000 К температурада H_β балмер сериясы үшін $\Delta\lambda_L^e = 48 \text{ \AA}$, ал егер ұлғаю иондармен соқтығысу арқылы анықталса, онда дәл сол температурада $\Delta\lambda_L^i = 0,05 \text{ \AA}$ ға тең болады, 40000 К температурада сәйкесінше $\Delta\lambda_L^e = 192 \text{ \AA}$, ал $\Delta\lambda_L^i = 0,20 \text{ \AA}$ болады. Осы мәндерді H_β сызығының жартылай енімен, яғни дәл

сондай температурада көрсетілген шамалармен салыстырсақ, көрсетілген температурамен электрондық тығыздық өзгерген барлық аймақтағы электрондармен әсерлесуге негізделген сызықтың негізгі бөлігін сипаттау үшін екпінді теорияны қолдануымыз керек. Керісінше, дәл сондай электрондық тығыздық пен температурадағы маңызды аймақта иондармен әсерлесуге негізделген ұлғаюды квазистатикалық теория арқылы есептеген дұрыс.

Плазмадағы толық тығыздықтың 1% жоғары концентрациялы иондар мен электрондарға алыстан әсерлескіш Кулон күшіне ие. Сондықтан зарядталған бөлшектермен, яғни иондармен және электрондармен әсерлесу жағдайын, Штарк енденуін қарастырамыз [10-11]. Тәжірибеде импульсті плазмалық үдеткішке берілген кернеудің 5 кВ мәнінде сутегі плазмасының келесідей спектрлері алынды, 2 суретті қараңыз.

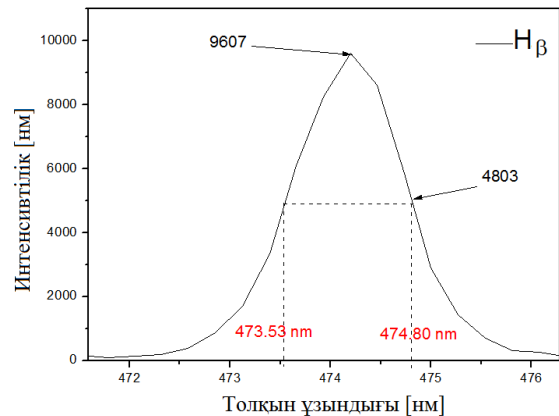


2 – сурет. Плазмалық үдеткіштің бүйір жағынан және электродқа қарама-қарсы беттен түсірілген спектрлер

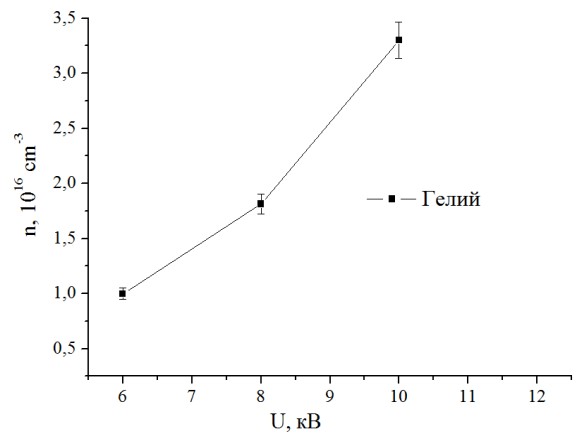
Жоғарыдағы 2 суреттен көріп тұрғанымыздай екі жағдайда бірдей параметрде түсірілген спектрлерді салыстыру барысында кейбір аймақта спектрлердің айырмашылықтары бар екендігін байқалды. Оның негізгі себебі: электродқа қарама-қарсы түсірілген спектрлер бүйірінен түсірілген спектрге қарағанда мыстың спектрінің көбірек шыққандығын байқауға болады. Әсіресе 200-350 нм толқын ұзындығы аралығында.

Бұл жағдайды келесідей түсіндіруге болады: бастапқыда екі электрод арасында разряд пайда болып, олар электромагниттік толқынның әсерінен ығысады. Ал қарама-

қарсы беттен түсірілген спектр разряд пайда болған кездегі спектрді түсіре алады, ал бүйір беттен түсірілген спектр үдеткіш бойымен тараған плазма спектірін тіркейді. Осылайша H_β спектрлік сызығының Штарктік енденуін пайдаланып (сурет 3), плазманың электрондар концентрациясын анықталды. Алынған нәтижелер 4 суретте, көрсетілген.



3 – сурет. H_β спектрінің Штарктік енденуі



4 – сурет. Плазма электрондары концентрациясының разряд кернеуі шамасынан тәуелділігі

Спектрограммада сутегінің H_α және H_β сызықтары да байқалды. Бірақ, H_γ сызығының интенсивтілігі төмен болғандықтан өңдеу мүмкін болмады. Ал H_α сызығы жоғары кернеулерде қанығып кетеді.

Осы спектроскопиялық әдіс арқылы импульсті плазманы зерттеу барысында басқа әдіс анықтай алмайтын плазма құрамын анықтадық, яғни басқа разрядтағыдай тек қолданған газдың спектрі ғана емес, басқада атомдардың спектрлердің бар екенін байқауға болады.

Жоғарыдағы 4 суреттегі графиктен көріп отырғанымыздай, кернеудің артуымен плазма ағынындағы электрондардың концентрациясы да артады. Себебі үдеткіштің ВАС-на сәйкес кернеудің артуымен разрядтың тогы да артады. Яғни коаксиаль электродтар арасына кіретін жұмыс газын иондайтын электрондардың саны артады. Сәйкесінше иондалу процесі де қарқынды жүре бастайды.

Спектрлік сызықтардың салыстырмалы интенсивтілік әдісі негізінде импульстік плазмадағы электрондардың қозу температурасын анықтау.

Анықталып отырған элемент атомдарының q қозған күйінен p төменгі энергетикалық күйіне ауысуы бірлік денелік бұрышта бірлік көлемінде сәулеленетін энергия (3) өрнекпен анықталады [12].

$$J = \frac{1}{4\pi} A_{qp} n_q h\nu_{qp}, \quad (3)$$

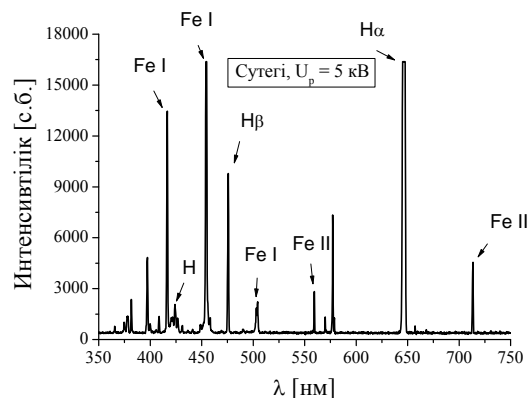
мұндағы A_{qp} - $q \rightarrow p$ ауысу ықтималдығы; n_q - q деңгейінде орналасқан элемент атомдарының жарық көзіндегі концентрациясы; h - Планк тұрақтысы; ν_{qp} - жарық сәулеленуінің жиілігі; E_q және E_p - сәйкес деңгейлердің энергиясы. Осы формулаларды қорыта келе, плазманың концентрациясы мен температурасы толқын ұзындығы λ_1 және λ_2 , ε_1 , ε_2 қозу энергиясы бар және қозған күйлердің статистикалық салмағы мен сәулелік ауысу ықтималдығы $(gA)_1$, мен $(gA)_2$ тең болатын қос атомдық (немесе қос иондық), J_1 , J_2 салыстырмалы интенсивтілік төмендегі (4) формула арқылы қорытылып шығады.

$$T = \frac{5040(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{\lg \frac{(gA)_1 - \lg \frac{\lambda_1}{\lambda_2} - \lg J_1}{(gA)_2 - \lg \frac{\lambda_1}{\lambda_2} - \lg J_2}} \quad (4)$$

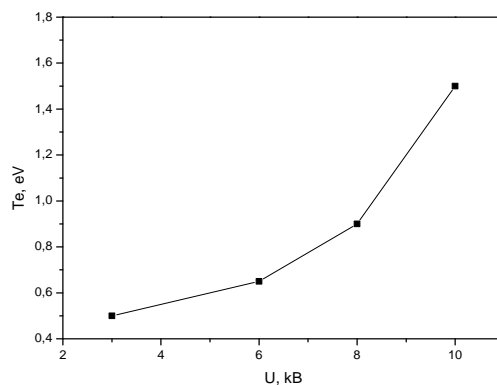
Импульстік плазмалық үдеткіште 5 кВ кернеуде алынған импульстік плазмадағы электрондардың қозу температурасы салыстырмалы интенсивтілік әдісімен анықтау үшін H_α және H_β спектрлік сызықтары қолданылды, 5 суретті қараңыз.

Осылайша H_α және H_β спектрлік сызықтарымен салыстырмалы интенсивтілік әдісімен анықталған электрондардың қозу температурасының разряд кернеуіне тәуелділігі 6 – суретте көрсетілген. Бұл тәуелділіктен байқағанымыздай разряд кернеуі шамасының жоғарылауымен электрондардың қозу температурасы артады,

себебі электрондардың кинетикалық энергиясының артуына байланысты электрондар температурасы да артады.



5 – сурет. Сутегі плазмасының сәулелену спектрі ($U_p=5$ кВ)



6 – сурет. Плазма электрондары температурасының разряд кернеуі шамасынан тәуелділігі

Қорытынды

Жасалған эксперименттік зерттеулер нәтижесінде, плазма спектрлеріне талдау жүргізу барысында, сутектен басқа мыс және темірдің спектрлері де көптеп шыққаны байқалды. Бұның себебі екі электрод мыстан, ал камера қабырғасы темірден тұратындықтан, екі электрод арасында пайда болған доғалы разряд жоғары температура тудырып, мыс электродтың атомдарын қоздырады. Алынған спектрлердің көмегімен электродтарға әртүрлі кернеу берілгендегі электрондардың қозу температурасы мен концентрациясы есептелді. Электрондардың қозу температурасы шамамен $0,3-1,5$ эВ аралығында және концентрациясы $(1-3,2) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ аралығында болатындығы анықталды.

Бұл ғылыми зерттеу жұмысы ҚР БҒМ қолдауындағы IRN AP05134671 гранты көмегімен жүзеге асырылды.

Әдебиеттер тізімі:

1. Климов Н.С., Подковыров В.Л., Житлухин А.М., Архипов Н.И., Сафронов В.М., Барсуков В.А., Позняк И.М., Loarte A., Merola M., Linke J. Воздействие интенсивных импульсных потоков плазмы на защитные материалы внутрикамерных компонентов термоядерного реактора // Ядерная физика и инжиниринг. – 2010. – Т. 1, № 3. – С. 210-219.
2. Skladnik-Sadowska E., Kwiatkowski R., Malinowski K., Sadowski M.J., Kubkowska M., Paduch M., Scholz M. and Zielinska E.. Optical emission spectroscopy of pulsed plasma streams emitted from a modified pf-1000 facility//Вопросы атомной науки и техники. — 2012. — № 6. — P. 246-248.
3. Weiwei W., Feng L., Xue W., Rongqing L.. Study on electron temperature in an ablative pulsed plasma thruster by optical emission spectroscopy// EPL. – 2013. – 101. – P. 55001.
4. Dosbolayev M.K., Utegenov A.U., Tazhen A.B., Ramazanov T.S.. Investigation of dust formation in fusion reactors by pulsed plasma accelerator //Laser and Particle Beams. – 2017. – 35. P. 741-749.
5. Tazhen A.B., Utegenov A.U., Dosbolayev M.K., Ramazanov T.S., Kaikanov M.I., Tikhonov A.V.. Definition of the density of energy of a pulsed plasma flow using a wire calorimeter // J. PEOS. – 2016. – 2(18), P. 40-44.
6. Dosbolayev M.K., Utegenov A.U., Tazhen A.B., Ramazanov T.S., Gabdullin M.T. Dynamic properties of pulse plasma flow and dust formation in the pulsed plasma accelerator // News of the Natnl. Acad.Sci. RK. – 2016. – 6(310), P. 59–66.
7. Dosbolayev M.K., Raiymkhanov Zh., Tazhen A.B., Utegenov A.U., Ramazanov T.S. (2018) Experimental Investigation of the Properties of Plasma-Dust Formations on Pulsed Plasma Accelerator. Book of Abstracts 15th Dusty Plasma Workshop, USA, Baltimore. P.59.
8. Dosbolayev M.K., Raiymkhanov Zh., Tazhen A.B., Utegenov A.U., Ramazanov T.S. (2018) Impulse Plasma Deposition of Carbon Nanoparticles. Book of Abstracts XII-th International Conference "Ion Implantation and Other Applications of Ions and Electrons", Kazimierz Dolny, Poland. P.82.
9. Зайдель А.Н., Островская Г.В., Островский Ю.И. (1976) Техника и практика спектроскопии. Москва, Россия.
10. Park, K.W., Park, H.I., Lee, T.I., Baik, H.K. Diagnostics of plasma on PDP by optical emission spectroscopy (2003). Book of Abstracts 30th International Conference on Plasma Science, Jeju, South Korea. P.223.
11. Tmenova T.A., Veklich A.N., Boretskij V.F., Cressault Y., Valensi F., Lopatko K.G., Aftandilyants Y.G. Optical emission spectroscopy of plasma of underwater electric spark discharges between metal granules // Problems of atomic science and technology. Series: Plasma Physics. – 2017. – 1(23). – P. 132-135.
12. Devia D.M., Rodriguez-Restrepo L.V. and Restrepo-Parra E. Methods Employed in Optical Emission Spectroscopy Analysis. Review. ing. cienc. – 11(21).– 2015. – P. 239–267.

12.10.2018 басылымға қабылданды

Тәжен Ә.Б., Нұрболат Қ., Досболаев М.Қ.

ЭТФҒЗИ, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы қ. Қазақстан
aigerim_tzh@mail.ru

ИМПУЛЬСТІ ПЛАЗМА АҒЫНЫНА СПЕКТРОСКОПИЯЛЫҚ ДИАГНОСТИКА ЖАСАУ

Аннотация. Бұл жұмыста импульсті плазма ағынына жүргізілген спектроскопиялық талдау нәтижелері көрсетілген. Импульсті плазма ағыны конденсаторлар батареяларында жинақталған энергияның коакциял жүйелі электродтарға берілуі нәтижесінде пайда болады. Спектрлік сызықтарды алып, зерттеу үшін Solar S100 сызықты спектрометрі мен M833

монохроматоры қолданылды. Импульсті плазманың электрондар концентрациясын анықтау мақсатында спектрлік сызықтардың Штарктік ендену әдісі қолданылды. Плазмадағы жоғары концентрациялы иондар мен электрондар алыстан әсерлесу Кулон күшіне ие. Сондықтан зарядталған бөлшектердің, яғни иондармен және электрондармен әсерлесу жағдайын, Штарк енденуін қарастырамыз. Тәжірибелер гелий және сутек газдарымен әртүрлі қысым мен заряд қуаттарында жүргізілді. Спектрограммада сутегінің H_{α} және H_{β} сызықтары да байқалды. Олар камерадағы қалдық су молекулаларынан немесе изолятор құрамынан бөлінуі мүмкін. Электрондардың қозу температурасын анықтауда спектрлік сызықтардың салыстырмалы интенсивтілік әдісі қолданылды. Алынған нәтижелердің, электрондар концентрациясы мен қозу температурасының заряд кернеулігіне тәуелділіктері зерттелді және оларға қысқаша сипаттама берілді. Импульсті плазмалық үдеткіште алынған плазма ағынындағы электрондардың қозу температурасы салыстырмалы интенсивтілік әдісімен анықтау үшін H_{α} және H_{β} спектрлік сызықтары қолданылды. Электродтар жүйесіне қарама-қарсы түсірілген спектрлерде 200-350 нм толқын ұзындығы аралығында мыстың сызықтары көбірек шыққандығы тәжірибеде байқалды. Ол мыс электродтардың плазмамен әсерлесуі кезінде эрозияға ұшырайтындығын көрсетеді.

Түйін сөздер: импульсті плазмалық үдеткіш, импульсті плазма ағыны, спектроскопиялық диагностика жасау.

Тәжен Ә.Б., Нұрболат Қ., Досболаев М.Қ.
НИИЭТФ, КазНУ им. аль-Фараби, Алматы. Казахстан

СПЕКТРАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА

Аннотация. В данной работе представлены результаты спектроскопической диагностики импульсного плазменного потока. Импульсный плазменный поток генерируется при подаче к коаксиальным электродам энергию от накопительных конденсаторных батарей. Для получения и изучения спектральных линий нами были использованы спектрометр типа Solar S100 и монохроматор M833. Для определения концентрации электронов в импульсном плазменном потоке применялся метод Штарковского уширения спектральных линий. В плазме, где концентрация электронов и ионов высокая имеется дальнедействующая Кулоновская сила. Вследствие этого применение Штарковского уширения допустимо для взаимодействующих заряженных частиц электронов и ионов. Эксперимент был выполнен при различных мощностях разряда и давлениях газа – гелия, водорода. На полученных спектрограммах было замечено появление линий водорода H_{α} и H_{β} . Выход спектральных линий водорода происходит на остаточных молекулах воды в вакуумной камере или на изоляторе. Метод относительных интенсивностей спектральных линий был применен для определения температуры электронной компоненты плазмы. На основе полученных результатов были исследованы и даны краткие теоретические описания зависимостей концентрации и температуры возбуждения электронов от напряжения разряда. Спектральные линии H_{α} и H_{β} были использованы для определения температуры электронов по методу относительных интенсивностей спектральных линий. Также в экспериментах в спектре, снятого с боковых окон экспериментальной установки, между длинами волны порядка 200-350 нм были замечены появление линий меди. Это показывает, что во время взаимодействия импульсной плазмы с медными электродами происходит эрозия материала.

Ключевые слова: импульсный плазменный ускоритель, импульсный плазменный поток, спектроскопическая диагностика.

Tazhen A.B., Nurbolat K., Dosbolayev M.K.

IETP, al-Farabi KazNU, Almaty, Kazakhstan

SPECTROSCOPIC DIAGNOSTICS OF PULSED PLASMA FLOW

Abstract. This paper presents the results of spectroscopic diagnostics of pulsed plasma flow. A pulsed plasma flow is generated when energy is carried to system of coaxial electrodes from capacitor banks. To obtain and investigate the spectral lines, spectrometer Solar S100 and a monochromator M833 was used. To determine the electron density in a pulsed plasma flow, the Stark broadening method of spectral lines was used. In the plasma, where the density of electrons and ions is high, there is a long-range Coulomb force. As a consequence, the use of Stark broadening is permissible for interacting charged particles of electrons and ions. The experiment was performed at different discharge powers and helium, hydrogen gas pressures. The obtained spectrograms showed the appearance of hydrogen lines $H\alpha$ and $H\beta$. The output of the spectral lines of hydrogen occurs on permanent water molecules in a vacuum chamber or on an insulator. The method of relative intensities of spectral lines was applied to determine the temperature of the electrons of pulsed plasma flow. On the basis of the obtained results, brief theoretical descriptions of the dependences of the density and temperature of the electrons on the discharge voltage were investigated and given in this work. The spectral lines of $H\alpha$ and $H\beta$ were used to determine the temperature of the electrons by the method of relative intensities of the spectral lines. Also in experiments in the spectrum taken from the side windows of the experimental setup, the appearance of copper lines between the wavelengths of the order of 200–350 nm was observed. This shows that during the interaction of pulsed plasma with copper electrodes, the erosion of the material occurs.

Keywords: pulsed plasma accelerator, pulsed plasma flow, spectroscopic diagnostics.