



ХҒТАР 29.27.49

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2025-151-2-32-44>

Ғылыми мақала

Зонд теориясы негізінде төменгі температуралы және импульсті плазма ағынындағы иондар мен электрондардың концентрациясын анықтау

А.К. Сейтханова*¹, А.Т. Нурбердиев², Б. Тасуов³

¹Ә. Марғұлан атындағы Павлодар педагогикалық университеті, Павлодар, Қазақстан

^{2,3} М.Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз, Қазақстан

(E-mail: ainur1179@mail.ru)

Аңдатпа. Плазма – заттың төртінші күйі және квазибейтарап орта болғанымен, әдетте плазманы жоғарғы және төменгі температуралы, теңгерілген және теңгерілмеген, идеал және идеал емес деп қарастырамыз. Сәйкесінше, оларды зерттеуде әртүрлі әдістер мен құралдар қолдануымыз қажет. Бірақ біз бұл мақалада жасанды плазманың кей түрлеріне бірдей зерттеу теориясын қолдануға болатындығын көрсетеміз немесе алынған физикалық шамаларды тексеру мақсатында өзге әдісті қолданамыз. Зерттеу жұмыстары нәтижесінде төменгі температуралы плазмадағы (солғын разрядтағы) иондар мен электрондар концентрациясы электр зонды әдісі арқылы анықталды. Зертханада цилиндр типтес электр зондын қолданып, оған вольт-амперлік сипаттама жасауға болады. Бұдан бөлек, Фарадей цилиндрі көмегімен импульсті плазма ағынындағы иондардың энергиясы анықталды. Фарадей цилиндріне келіп түскен зарядтар ішкі электродтың бетіне соқтығысады. Нәтижесінде электр тізбегінде пайда болған тоқты осцилограф көмегімен тіркейміз. Фарадей цилиндрі көмегімен иондардың концентрациясын анықтаудың бірнеше әдістері бар. Бірақ біз төменгі температураны зерттеудегі электр зондқа қатысты теорияны қолданамыз. Мақала аясында осы екі әдіспен алынған плазмалардың құрамын, ондағы электрондардың жылдамдығын және олардың концентрациясын есептеуге арналған теңдеулерді қолдана отырып, плазманың квазибейтарап орта екенін дәлелдейміз.

Осыған дейін плазма параметрлерін анықтауға арналған құрылғы дайындалды. Жұмыс барысында егер зонд пішіні дұрыс дайындалмаған болса, онда балқу, тозандану секілді проблемалар туындайтыны анықталды. Бұл мақалада дайындалған зонд конструкциясының соңғы нұсқасы көрсетіледі.

Мақаланың зертханалық бөлімдері толығымен Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университетінің «физика техникалық факультетінде» жасалды.

Түйін сөздер: Плазма; иондар концентрациясы; квазибейтарап орта; Фарадей цилиндрі; электр зонды.

Жіберілді 29.04.2025. Өзгертілді 02.06.2025. Қабылданды 04.06.2025. Онлайн қол жетімді 25.06.2025.

¹ *хат-хабар үшін автор

Кіріспе

Плазманы зерттеуде әртүрлі қондырғылар мен құралдарды пайдаланудың мәні бар. Оны зерттеуде біршама қиындықтар мен қателіктер туындағандықтан түріне қарай әртүрлі әдістер мен құралдарды пайдалануға бекітеміз. Иондалу нәтижесінде плазма электрон, нейтрон және иондардан құралады да бейтарап орта болып қала береді. Оң және теріс көлемдік зарядтар концентрациясының өзара теңдігі – квазибейтараптық. Егер газдың иондалу деңгейі жартылай немесе толықтай орындалса да ол заттың төртінші агрегаттық күйіне ауысады.

Плазманың температурасы электрондардың, нейтрондардың және иондардың температураларынан тұрады. Төменгі температуралы плазмаларда электронның температурасы иондар мен нейтрондардың температураларынан елеулі көп болады.

Импульсті плазманы зерттеуде Фарадей цилиндрі қолданылады. Әрі қарай оның шамаларын есептеуде өзге әдіспен алынған мәнді салыстыру арқылы қателікті азайтуға болады. Фарадей цилиндріне жалғанған осциллографта пайда болатын сигнал арқылы иондардың жылдамдықтары көмегімен ондағы иондардың концентрациясын анықтау теориясы кеңінен тараған. Осы әдіс арқылы анықталған мәндерді зонд әдісі арқылы да тексеруге болады. Ал зонд теориясында плазманы локальді термодинамикалық теңдік орнаған деп қарастырып, Больцман заңы арқылы иондардың концентрациясын анықтаймыз.

Осы секілді зонд теориясын төменгі температуралы плазманы зерттеуде де қолданамыз. Мұнда біз цилиндр пішіндегі зондтың потенциалын вольтметр арқылы, ал оның бойынан өтетін ток күшін амперметр арқылы өлшеп аламыз.

Зондтық әдіс арқылы зерттеу жүргізуде туындайтын қиындықтар да біршама. Теориялық тұрғыдан соқтығыссыз плазмадағы зонд сипаттамасы жеткілікті және сапалы түрде болжанған. Егер, магнит өрісі немесе соқтығысулар пайда болса көптеген қиындықтар туындайды. Осы себептен туындайтын қателіктерді түзету жұмыстарын енгізіп, зондтық әдіспен жұмыс жасаймыз.

Зертхана барысында зондтың жинақтаушы ауданы өзгеретіні анықталды. Осының нәтижесінде ток күшінің мәні біршама өзгеретіндігі байқалды. Мақаланың бірден-бір өзектілігі ретінде осы мәселенің шешімі қарастырылады. Зондтың жинақтаушы ауданы қуатты разрядтармен жұмыс кезінде тозаңданып, балқу процессіне ұшырайды. Мұның алдын алу үшін арнайы конструкция жасалды.

Алдыңғы мақаламызда [1] жарық ағынының параметрлері арқылы плазма температурасын бағалауға арналған құрылғыны дайындау жайлы бірқатар жұмыстарда өлшеу қателіктері және зерттеу құрылғысын дайындау жайлы ақпараттармен бөлістік. Мұның осы мақаламен бірден-бір байланысы электродтардың қызып, тозаңдануы, тіпті жоғары қуат көзінде балқып кетуі болып табылады. Зонд әдісін қолдану барысында оның конструкциясы және материал түрі оның балқуына, тозаңдануына алып келеді.

Оқу-әдістемелік құралда [2] плазма ағынының электрондар концентрациясын анықтаудың спектрлік әдісі жазылған. Алайда, құрылғылардың сапасына байланысты оптикалық әдістегі жарық интенсивтілігі арқылы плазма температурасын өлшеу

жұмысында көптеген қателіктер орын алады және құрылғы бағасы көп жағдайда қолжетімсіз.

Мақалаға кіріспес бұрын тақырыпқа сәйкес бірнеше ғалымдардың жасаған зерттеулеріне әдеби шолу жұмысы жүргізіліп, зертханалық жұмыс барысында ондағы ескертулер ескерілді.

1 кесте. Зонд теориясы негізінде плазма параметрлерін анықтауға арналған зерттеулерге шолу

№	Зерттеушілер	Жұмыс атауы	Плазма түрі	Қолданылған әдіс	Негізгі нәтижелер	Жарияланған жылы
1	Regodón, Díaz-Cabrera, Fernández Palop, Ballesteros	Low Electron Temperature Plasma Diagnosis: Revisiting Langmuir Electrostatic Probes	Төмен температуралы плазма	Лэнгмюр зонды	Электрон тығыздығы мен температураны анықтау үшін IV сипаттамаларын талдау	2021
2	Hamad, Farok	Ion Source Plasma Parameters Measurement using Langmuir Probe	Аргон плазмасы	Цилиндрлік Лэнгмюр зонды	Электрон тығыздығы, температура, қалқымалы және плазма потенциалдарын өлшеу	2019
3	Peterson, Coumou, Larson, Shannon	Microsecond resolved electron density measurements with a hairpin resonator probe in a pulsed ICP discharge	Импульсті индуктивті байланысқан плазма	Шаш тәрізді резонатор зонды	Микросекундтық уақыттық рұқсатпен электрон тығыздығын өлшеу	2016
4	Поров және т.б.	Langmuir Probe Method for Precise Evaluation of the Negative-Ion Density in Electronegative Gas Discharge Magnetized Plasma	Электронегативті газ разряды	Лэнгмюр зонды	Теріс ион тығыздығын дәл анықтау	2013

5	Gonzalez және т.б.	New procedure to estimate plasma parameters through the q-Weibull distribution by using a Langmuir probe in a cold plasma	Суық плазма	Лэнгмюр зонды, q-Weibull үлестірімі	Плазма параметрлерін анықтаудың жаңа әдісі	2022
6	Xie және т.б.	Ion source plasma parameters measurement based on Langmuir probe with commercial frequency sweep	Ион көзі плазмасы	Лэнгмюр зонды, жиілік сканері	Электрон тығыздығы мен температураны жылдам өлшеу	2010
7	El Shaer және т.б.	Computerized Langmuir Probe Measurements in a Capacitively Coupled RF Discharge	Капацитивті байланысқан RF разряды	Компьютерлендірілген Лэнгмюр зонды	Электрон тығыздығының кеңістіктік таралуын өлшеу	2014
8	Chauhan, Prakash, Singh	Design and Development of Langmuir Probe Sensor for Electron Temperature and Electron Density Measurement of Plasma	Жалпы плазма	Лэнгмюр зонды	Электрон тығыздығы мен температурасын өлшеу үшін сенсорды жобалау	2013

Ескерту: Кестедегі мақалалар тізімі әртүрлі ғылыми журналдардан алынған, сондықтан 1 кестеге сілтеме жасау мүмкін емес.

Әдістеме

Зонд теориясы барысында мынадай шарттарды ескеру қажет:

Квазибейтарап ортада электрондардың жылдамдықтары бойынша таралуы – Максвеллдік болады;

Плазма арасында орналасқан зонд маңында қалыңдығы Дебай радиусының бірнеше мәніне тең көлемдік зарядтар қабаты пайда болады. Сондықтанда, экрандалу нәтижесі кезінде зондтың плазмаға әсерін елемейміз;

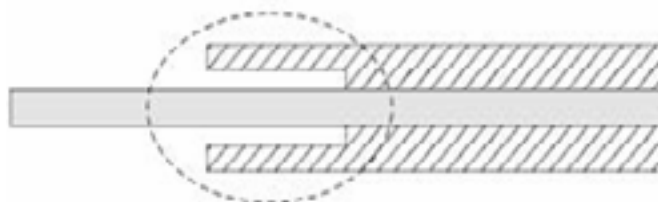
Цилиндрлік зондтың өлшемі көлемдік зарядтар қабатынан елеулі көп болады. Демек, зондтың жинақтаушы бетінің ауданы көлемдік зарядтың сыртқы қабатының ауданына тең және сол бетке келіп түскен зарядтар зонд потенциалынан тәуелді тебіледі немесе жұтылады.

Егер зондтың плазмамен салыстырғандағы потенциалы U зонд маңайындағы әсерге ұшырамаған плазманың потенциалынан U_0 кіші болса, онда электрондар тежеуіш өріске тап болады және көлемдік зарядтар қабатындағы электрондардың концентрацияларының таралуы Больцмандық заңдылықпен анықталады [3]:

$$n_e = n_{e0} e^{\left| \frac{e(U-U_0)}{kT_e} \right|} \quad (1)$$

Мұндағы n_{e0} – плазмадағы электрондардың концентрациясы, k – Больцман тұрақтысы, T_e – электрон температурасы.

Олардан бөлек зондтың жинақтаушы ауданының қуатты разрядтарда балқып, тозаң жинайтыны белгілі болды. Зонд жинайтын ток оның плазмамен шекаралас беткі ауданына тәуелді. Осылайша оқшаулаушы бетінде ток өткізгіш қабат пайда болады. Егер зондтың жұмыс беті осы қабатпен электрлік байланыста болса, тиімді жинақтаушы бет едәуір өзгереді, яғни ауданы ұлғаяды. Мұның алдын алу үшін арнайы конструкциялы (1 суретте үзік сызықтармен қоршалған аудан) зонд жасалды.



1 сурет. Зонд конструкциясы

Төменгі температуралы плазманы зерттеуде зонд теориясын қолдана отырып оның квазибейтараптық шартын дәлелдейміз. Ол үшін зертханада алынған вольт-амперлік сипаттамасын пайдаланып, ары қарай зонд теориясы арқылы мәндерді есептейміз.

Потенциал теріс болғанда электрондар зондқа жете алмайды да, токтың басым бөлігін иондар құрайды. Потенциал жоғарылаған сайын зондқа соғұрлым көп электрондар келеді. Зондтың қорытқы ток шамасы электрондар мен иондар ток күшінен құралады.

$$I = I_i + I_e \quad (2)$$

Молекулалық-кинетикалық теорияға сәйкес зондтағы ток күші келесіге тең [4]:

$$I = \frac{1}{4} S e n_e (\langle v_e \rangle - \langle v_i \rangle) \quad (3)$$

Мұндағы S – жинақтаушы бетінің ауданы, e – электрон заряды, ал $\langle v_e \rangle$, $\langle v_i \rangle$ болса –

электрондар мен иондардың жылулық қозғалысының орташа жылдамдықтары болып табылады. Электрондардың орташа жылдамдығы келесідей [5]:

$$\langle v_e \rangle = \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m}} \quad (4)$$

m – электронның массасы, k – Больцман тұрақтысы. Иондардың массасы электрон массасынан елеулі көп екені белгілі. Сондықтан потенциал нөлге тең болған кездегі зонд арқылы өтетін токтың басым бөлігі электрондық болады [4]:

$$I_{e0} = \frac{1}{4} S e n_e \langle v_e \rangle \quad (5)$$

Қанығу тогы арқылы электрондардың концентрациясын келесідей өрнектейміз:

$$n_e = \frac{4I_{e0}}{S e v_e} \quad (6)$$

Электрондық токтың шамасы үлкен болғандықтан оның қанығу тогына жетуі күрделі, сондықтанда иондық ток шамасын пайдаланамыз. Осы жерден плазманың квазибейтарап орта екенін көре аламыз [6]:

$$n_e = \frac{I_i}{0,52 S e \sqrt{\frac{kT_e}{M}}} \quad (7)$$

Мұндағы M – плазма құраушы газ иондарының массасы, I_i – иондардың қанығу тогы.

Импульсті плазма ағынын зерттеуде Фарадей цилиндрін қолданамыз. Фарадей цилиндрі екі электродтан тұратын өлшеуіш құрал. Ішкі электроды көміртегіден, ал сыртқы электроды мыстан жасалған. Екеуінің арасындағы изоляция фотопластты цилиндрдің көмегімен жүзеге асырылған. Сыртқы электродтың бетіндегі саңылаудың диаметрі 150 мкм шамасында. Зерттелетін бөлшекке қарай цилиндрге оң немесе теріс заряд берілуі тиіс. Электродтардың арасын электрлік оқшаулау үшін фотопласт пайдаланамыз. Плазмада локальді термодинамикалық тепе-теңдік болса, осы жуықтауға сәйкес плазмада бөлшектердің таралуы Больцмандық болады [7]:

$$n_e = n_i = n_0 e^{-\frac{eU(r)}{kT_e}} \quad (8)$$

r – көлемдік заряд қабатының радиусы.

Иондардың жылдамдығын электрондардың температурасының шамасын пайдаланып, Бом критерийінің негізінде табуға болады [6]:

$$v_i = \sqrt{\frac{kT_e}{M_i}} \quad (9)$$

Мұндағы T_e – электрондардың температурасы, ал M_i – иондардың массасы, k – Больцман тұрақтысы.

Зонд маңындағы көлемдік зарядтың шекарасындағы иондар ағынының тығыздығы олардың концентрациялары мен жылдамдықтары арқылы анықталады:

$$j_i = en(r)v(r) \quad (9)$$

Мұндағы $n(r)$ – зонд маңындағы иондар концентрациясы, ал $v(r)$ – олардың зонд маңындағы ағынының жылдамдығы. Электрондардың концентрациясы көлемдік заряд шекарасында зондқа жақындаған сайын төмендей бастайды. Осыған байланысты көлемдік заряд шекарасындағы потенциалдың түрі келесідей болады [5]:

$$U_c \approx \frac{kT_e}{e} \quad (10)$$

Осы потенциалмен иондардың жылдамдығы анықталады [8]:

$$v(r) = \sqrt{\frac{2eU_c}{M_i}} \quad (11)$$

Зондтағы иондық ток өрнегі (9) мен (11) қатынастарын пайдаланып аламыз.

$$I_i = en_0 S_c \sqrt{\frac{2eU_c}{M_i}} \exp\left[-\frac{eU_c}{kT_e}\right] \quad (12)$$

S_c – көлемдік заряд қабатының ауданын (10) ескере отырып, (12) келесідей өрнектейміз:

$$I_i = en_0 S_c \sqrt{\frac{kT_e}{M_i}} \quad (13)$$

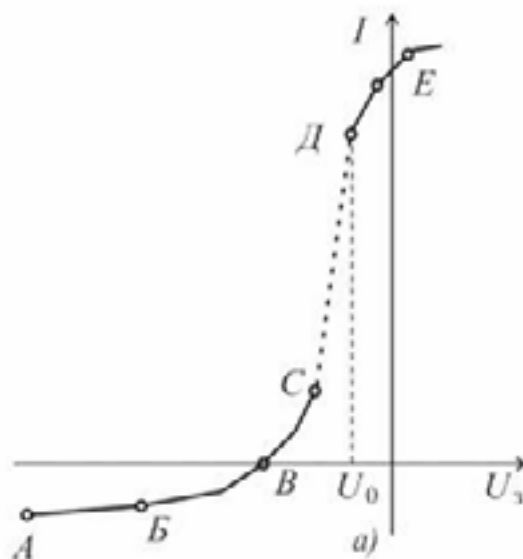
Фарадей цилиндрі зонд секілді жұмыс жасағандықтан цилиндрлік зонд үшін (13) төмендегідей жазылады:

$$I_i \approx 0,4en_0 S_c \sqrt{\frac{2kT_e}{M_i}} \quad (14)$$

Мұндағы M_i – плазма құраушы газ иондарының массасы. Алынған мәнді (7) өрнегіне қойып, бөлшектердің концентрациясын анықтауға болады.

Нәтижелер мен талқылау

Зертханада алынған нәтижелерге сәйкес вольт-амперлік сипаттаманың жалпы түрі тұрғызылды.



2-сурет. Зондтың вольт-амперлік сипаттамасы

Мұндағы A нүктесінде иондар зондтың маңайында көлемдік оң зарядтар қабатын құрайды да, сипаттама қанығуға жақындай түседі. Зондтағы қорытқы ток шамасының абсолют мәні төмендейді де, B нүктесінде 0 -ге тең болады. Бұл нүктедегі потенциал қалқымалы деп аталады. Егер кернеу шамасын азайта беретін болсақ, BC аралығында көлемдік зарядтар қабаты арасынан электрондар тоғы үлкейетінін көреміз. Кернеудің оң мәндерінде электрондар күшті өріс әсерінен зондтың бағытына қарай үдей қозғалады да, ал оң иондар кедергіге ұшырайды. Зондтың маңайында теріс көлемді зарядтар қабаты қалыптасып, DE бөлігінде сипаттама қанығуға жақын болады. Ал D нүктесінде $U_з = U_0$ болған кезде, зондтағы ток бөлшектердің жылулық қозғалысының ағынымен ғана анықталады. Осы жерден (3) өрнек арқылы электрондар үшін орташа жылдамдық анықталды.

Осыған дейін совет ғалымдары плазманың квазибейтараптығын тәжірибелік түрде зерттеп, оның қасиеттерін дәлелдеген. Атап айтқанда, Леонид Арцимович пен оның әріптестері токамак құрылғыларында жүргізген зерттеулерінде плазманың квазибейтараптығын растаған. Бұл зерттеулерде плазмадағы оң және теріс зарядтардың теңгерімі, яғни квазибейтараптық, плазманың тұрақтылығы мен басқарылуы үшін маңызды фактор ретінде қарастырылған. Мысалы, 1971 жылы В.С. Муховатов пен В.Д. Шафранов "Plasma equilibrium in a Tokamak" атты мақаласында токамактағы плазманың тепе-теңдік жағдайын сипаттап, квазибейтараптықтың рөлін талдаған. Бұл мақалада плазманың токамак құрылғысындағы тепе-теңдік жағдайы мен квазибейтараптықтың маңыздылығы қарастырылған [9].

Сонымен қатар, Ю.К. Куриленков және әріптестері 2022 жылы "On the Plasma Quasineutrality under Oscillatory Confinement Based on a Nanosecond Vacuum Discharge" атты мақаласында плазманың квазибейтараптығын зерттеген. Бұл зерттеуде наносекундтық вакуумдық разряд негізінде плазманың квазибейтараптығы талданған [10].

Плазма параметрлерін зондық әдіспен анықтау алғашқыда оңай көрінгенімен процессте туындайтын қиындықтар жеткілікті. Зондтың беткі қабатына электрондардың шығу жұмысы тәуелді. kT_e шамасы бірнеше электронвольттан аспайтын болса, уақыт бойынша шаманың өзгеруі мен зонд бетінің әрбір бөлігі үшін шығу жұмысының айырмасы зонд сипаттамасына әсер етеді. Сондықтан зондты алғаш вакуумға орналастырған сәтте оны газсыздандырып, бірнеше секунд қыздыру қажет.

Иондар зонд бетінен екінші реттік электрондарды шығаратын болса, осы сәтте теріс зарядты зондқа иондар ағыны түсе бастайды. Сондықтан оң ығысу кезінде электрондар зондты тастап кете алмайды да ешқандай рөл атқармай қалады. Екінші реттік эмиссия эффектісін ескеру өте қиын болғандықтан оның алдын алады. Сондықтанда зонд екінші реттік эмиссия коэффициенті аз материалдан болуы қажет және ол төмен кернеуде жұмыс істеуі керек. Бірақ қуатты разрядтарда бұл эффектті алып тастау әрдайым мүмкін емес. Оған қоса мұнда униполяр доға пайда болуы да мүмкін. Бұл сәтте анодты көлемдік зарядтар қабатының шекарасы, ал катод қызметін зонд атқарады.

Кейде әлсіз иондалған плазмада зонд маңайындағы зарядтардың тығыздығы төмендеп кетуі мүмкін. Зонд пен оны оқшаулаған материалдан атомдар қоспасы бөлінеді. Бұл атомдар қозу нәтижесінде өзінен энергия бөледі де электрондық газ өткізгішін азайтып, оны суытады.

Эксперимент процессінде аталған проблемалар туындап, түзету жұмыстары жүргізілді. Нәтижесінде қажетті шамалар өлшеніп, Зонд теориясы төменгі температуралы және импульсті плазмаларының иондарының концентрациясын анықтауда қатар қолданылды.

Қорытынды

Бұл жұмыста плазманың параметрлері зерттелді. Дәлірек айтсақ зонд әдісі арқылы төменгі температуралы және импульсті плазманың иондар мен электрондар концентрациялары анықталды. Есептеулер жүргізу барысында екі жағдайда да зонд теориясы қолданылды.

Жұмыс барысында туындайтын қиындықтар мен проблемалар талқыланып, олардың шешімі нақтыланды. Алдыңғы мақалада [1] жарық ағынының параметрлері көмегімен плазма температурасын бағалауға арналған құрылғыны әзірлеу әдісі көрсетілген. Аталған қиындықтар ол кезде де туындады.

Алынған мәндерді өңдеуде зонд теориясының тиімділігі көрсетілді. Больцман заңы арқылы плазма ағынындағы бөлшектердің орташа жылдамдығы есептеліп, әрі қарай олардың концентрациялары анықталды. Плазманың квазибейтарап орта екендігі дәлелденді.

Жұмыстың бастапқы кезеңінде әдебиеттерге шолу жасалды. Нәтижесінде ұқсас зерттеулер [2] анықталды. Бірақ ол жерде бір теорияны плазманың басқа түрлеріне қолдану әдісі көрсетілмеген.

Плазма ағынының иондар мен электрондар концентрациясын анықтаудың маңызы зор. Ал бір теорияны басқа жағдайда қолдану өз тиімділігін береді. Нәтижесінде зонд теориясының қарапайымдылығы мен өзге әдістерге қарағанда тиімділігі көрсетілді.

Импульсті және төменгі температуралы плазманың параметрлерін анықтауда зонд теориясы қолданылып, осы теорияның негізінде теңдеулер жинақталып, иондардың концентрациясын анықтау үшін формулалар қорытылды.

Авторлардың қосқан үлесі

Сейтханова А.К., Нурбердиев А.Т. – мақаланың тұжырымдамасына үлес қосты;
Нурбердиев А.Т., Тасуов Б. – мақаланың рәсімделуіне үлес қосты.

Әдебиеттер тізімі

1. А.К. Сейтханова, А.Т. Нурбердиев, С. Тамаев, Б. Тасуов, Қ.Ш. Әбидин, *Жарық ағынының параметрлері арқылы плазма температурасын бағалауға арналған құрылғыны әзірлеу*, Торайғыров хабаршысы. Физика, математика және компьютерлік ғылымдар сериясы. №1, 207-217 б. (2025), <https://vestnik-pm.tou.edu.kz/storage/journals/130.pdf>
2. М.Қ. Досболаев, Ә.Б. Тәжен, *Плазманы зерттеу әдістері* (Қазақ университеті, Алматы, 2018).
3. M.A. Lieberman, *Principles of plasma discharges and materials processing*, (New York, Wiley, 1994).
4. K.I. Oyama, C.Z.Cheng, *Langmuir probe, An introduction to space instrumentation*, pp.63-75 (2013). DOI:10.5047/aisi.010
5. E.V. Shun'ko, *Langmuir probe in theory and practice* (BrownWalker Press, Universal Publishers, 2008).
6. A.B. Tazhen, M.K. Dosbolayev, M.I. Pshikov, E.A. Usenov, *Measurement of the velocity of pulsed plasma flow at the pw-7 installation*, Herald of Kazakh-British technical university 21(3), p.273-280(2024). DOI: 10.55452/1998-6688-2024-21-3-273-280
7. M.K. Dosbolayev, Zh.B. Igibayev, T. Ramazanov, *Study of coaxial pulsed plasma thruster with graphite propellant*, Conference: 2024 IEEE International Conference on Plasma. DOI:10.1109/ICOPS58192.2024.10627004
8. A.B. Tazhen, M.K. Dosbolayev, Zh.B. Igibayev, A. Utegenov, *Investigation of the plasma column evolution and dynamics in the PW-7 plasma accelerator*, Physical Sciences and Technology 10(1) (2023). DOI:10.26577/phst.2023.v10.i1.06
9. Y.K. Kurilenkov, V.P. Tarakanov, A.V. Oginov, S.Y. Gus'kov, I.S. Samoylov, *On the Plasma Quasineutrality under Oscillatory Confinement Based on a Nanosecond Vacuum Discharge*, p.567-573 (2022). DOI: 10.1134/S1063780X22200132
10. V.S. Mukhovatov, V.D. Shafranov, *Plasma equilibrium in a Tokamak*, Nucl. Fusion 11 (1971). DOI 10.1088/0029-5515/11/6/005

А.К. Сейтханова*¹, А.Т. Нурбердиев², Б. Тасуов³

¹Павлодарский педагогический университет имени А. Маргулана, Павлодар, Казахстан

^{2,3}Таразский университет имени М.Х. Дулати, Тараз, Казахстан

(E-mail: ainur1179@mail.ru)

Определение концентрации ионов и электронов в низкотемпературном и импульсном потоке плазмы на основе теории зондов

Аннотация. Хотя плазма является четвертым состоянием вещества и квазинейтральной средой, мы обычно рассматриваем плазму как имеющую высокие и низкие температуры, равновесную и неравновесную, идеальную и неидеальную. Соответственно, нам необходимо использовать

различные методы и инструменты для их изучения. Однако в этой статье мы покажем, что ту же самую теорию исследования можно применить к некоторым типам искусственной плазмы, или же мы воспользуемся другим методом проверки полученных физических величин. В результате исследований методом электрического зонда определена концентрация ионов и электронов в низкотемпературной плазме (тлеющий разряд). В лабораторных условиях для снятия вольт-амперных характеристик можно использовать электрический зонд цилиндрического типа. Кроме того, энергия ионов в импульсном потоке плазмы определялась с помощью цилиндра Фарадея. Заряды, попадающие в цилиндр Фарадея, сталкиваются с поверхностью внутреннего электрода. В результате мы регистрируем ток, генерируемый в электрической цепи, с помощью осциллографа. Существует несколько методов определения концентрации ионов с использованием цилиндра Фарадея. Но мы будем использовать теорию, связанную с электрическим зондом при изучении низких температур. В данной статье мы докажем, что плазма является квазинейтральной средой, используя уравнения для расчета состава плазмы.

Ранее было подготовлено устройство для определения параметров плазмы. В ходе работы было выявлено, что при неправильной подготовке формы зонда возникают такие проблемы, как плавление и распыление. В данной статье представлена окончательная версия подготовленной конструкции зонда.

Лабораторные разделы статьи полностью разработаны на физико-техническом факультете Казахского национального университета имени аль-Фараби.

Ключевые слова: плазма; концентрация ионов; квазинейтральная среда; цилиндр Фарадея; электрический зонд.

A.K. Seitkhanova^{*1}, A.T. Nurberdiyev², B. Tassuov³

¹*Pavlodar Pedagogical University named after A. Margulan, Pavlodar, Kazakhstan,*

^{2,3}*M.Kh. Dulati Taraz University, Taraz, Kazakhstan,*

(E-mail: ainur1179@mail.ru)

Determination of the concentration of ions and electrons in a low-temperature and pulsed plasma flow based on the probe theory

Abstract. Although plasma is the fourth state of matter and a quasi-neutral medium, we usually consider plasma as having high and low temperatures, equilibrium and nonequilibrium, ideal and non-ideal. Accordingly, we need to use different methods and tools to study them. However, in this article, we will show that the same research theory can be applied to some types of artificial plasma, or we will use another method to check the obtained physical quantities. As a result of studies using the electric probe method, the concentration of ions and electrons in low-temperature plasma (glow discharge) was determined. In laboratory conditions, a cylindrical electric probe can be used to record the volt-ampere characteristics. In addition, the energy of ions in a pulsed plasma flow was determined using a Faraday cup. The charges entering the Faraday cup collide with the surface of the inner electrode. As a result, we register the current generated in the electric circuit using an oscilloscope. There are several methods for determining the ion concentration using a Faraday cup. But we will use the theory associated with the

electric probe in studying low temperatures. In this paper, we will prove that plasma is a quasi-neutral medium using equations to calculate the composition of plasma.

Previously, a device for determining plasma parameters was prepared. During the work, it was found that if the probe shape was not prepared correctly, problems such as melting and sputtering would occur. This article presents the final version of the prepared probe design.

The laboratory sections of the article were entirely developed at the "Physical and Technical Faculty" of the Al-Farabi Kazakh National University.

Keywords: Plasma; ion concentration; quasi-neutral medium; Faraday cup; electric probe.

References

1. A.K. Seytkhanova, A.T. Nurberdiyev, S. Tamaev, B. Tasuov, K.Sh. Abidin, *Zharik agynyn parametrleri arkyly plazma temperaturasy bagalauga arналған qurylgyny azirleu* [Development of a device for estimating plasma temperature through radiation flux parameters], *Toraygyrov khabarsysy. Fizika, matematika zhane kompyuterlik gylymdar seriyasy* [Toraygyrov Bulletin. Series: Physics, Mathematics and Computer Science] №1, pp. 207–217 (2025). Available at: <https://vestnik-pm.tou.edu.kz/storage/journals/130.pdf>
2. Dosbolaev M.K., Tazhen A.B., *Plazmany zertteu adisteri* [Methods for Plasma Research.] (Kazak universiteti, Almaty, 2018 [Kazakh University, Almaty, 2018])
3. M.A. Lieberman, *Principles of plasma discharges and materials processing*, (New York, Wiley, 1994).
4. K.I. Oyama, C.Z.Cheng, *Langmuir probe, An introduction to space instrumentation*, pp.63-75 (2013). DOI:10.5047/aisi.010
5. E.V. Shun'ko, *Langmuir probe in theory and practice* (BrownWalker Press, Universal Publishers, 2008).
6. A.B. Tazhen, M.K. Dosbolayev, M.I. Pshikov, E.A. Usenov, *Measurement of the velocity of pulsed plasma flow at the pw-7 installation*, *Herald of Kazakh-British technical university* 21(3), p.273-280(2024). DOI: 10.55452/1998-6688-2024-21-3-273-280
7. M.K. Dosbolayev, Zh.B. Igibayev, T. Ramazanov, *Study of coaxial pulsed plasma thruster with graphite propellant*, Conference: 2024 IEEE International Conference on Plasma. DOI:10.1109/ICOPS58192.2024.10627004
8. A.B. Tazhen, M.K. Dosbolayev, Zh.B. Igibayev, A. Utegenov, *Investigation of the plasma column evolution and dynamics in the PW-7 plasma accelerator*, *Physical Sciences and Technology* 10(1) (2023). DOI:10.26577/phst.2023.v10.i1.06
9. Y.K. Kurilenkov, V.P. Tarakanov, A.V. Oginov, S.Y. Gus'kov, I.S. Samoylov, *On the Plasma Quasineutrality under Oscillatory Confinement Based on a Nanosecond Vacuum Discharge*, p.567-573 (2022). DOI: 10.1134/S1063780X22200132
10. V.S. Mukhovatov, V.D. Shafranov, *Plasma equilibrium in a Tokamak*, *Nucl. Fusion* 11 (1971). DOI 10.1088/0029-5515/11/6/005

Авторлар туралы мәлімет:

Сейтханова А.К. – PhD, Ә.Марғұлан атындағы Павлодар педагогикалық университеті, Павлодар, Қазақстан

Нурбердиев А.Т. – магистр, М.Х.Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз, Қазақстан

Досболаев М.К. – доцент, Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан

Тажен А.Б. – Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің Эксперименттік физика және технология ғылыми-зерттеу институтының ғылыми қызметкері, Алматы, Қазақстан

Сейтханова А.К. – PhD, Павлодарский педагогический университет им. А.Маргулана, Павлодар, Казахстан.

Нурбердиев А.Т. – магистр, Таразский университет имени М.Х. Дулати, Тараз, Казахстан

Досболаев М.К. – доцент, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Тажен А.Б. – научный сотрудник Научно-исследовательского института экспериментальной физики и технологий Казахского национального университета имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан.

Seytkhanova A.K. – PhD, Pavlodar Pedagogical University named after A. Margulan, Pavlodar, Kazakhstan

Nurberdiev A.T. – Master, M.H. Dulati Taraz University, Taraz, Kazakhstan

Dosbolaev M.K. – Associate Professor, Kazakh National University named after Al-Farabi, Almaty, Kazakhstan

Tadzhen A.B. – Researcher, Research Institute of Experimental Physics and Technology, Kazakh National University named after Al-Farabi, Almaty, Kazakhstan



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).