

ТӨМЕН ТЕМПЕРАТУРАЛЫ ПЛАЗМАНЫ ЭЛЕКТР ЗОНДЫ ӘДІСІМЕН ЗЕРТТЕУ

Плазма деп – зарядталған бөлшектерден, яғни электрондар мен иондардан және бейтарап атомдардан тұратын квазибейтарап жүйені айтамыз. Квазибейтараптық – оң және теріс көлемдік зарядтар концентрациясының өзара теңдігі. Сонымен, «Плазма» термині квазибейтарап ортадағы жартылай (немесе толықтай) иондалған газ деген мағынаны береді.

$$|n_i - n_e| \ll n_0 = \langle n_i \rangle = \langle n_e \rangle, (13)$$

мұндағы n_i, n_e - плазмадағы иондар мен электрондардың (маңайлық) концентрациясы, n_0 – концентрацияның орташа шамасы. Плазма өзінің зарядтарының көмегімен электр өрісін экрандау қасиетіне ие. Экрандау дегеніміз – қандайда бір зарядқа ие дене маңайына оған қарсы таңбалы зарядтар жиналып, оны дебай радиусына тең қашықтықта бейтарап күйге келтіреді:

$$D = (kT/4\pi e^2 n_0)^{1/2}, \quad T = T_e T_i / T_e + T_i. (14)$$

Вакуумдағы жекешеленген зарядтың потенциалы келесіге тең e/r , ал плазмада $\frac{e}{r} e^{-r/D}$ түрге ие болады және көзден қашықтаған сайын заряд өрісі тез әлсірейді. Плазмада, әдетте, заряд тасушылар электрондар мен оң зарядты иондар. Иондардың концентрациясының жалпы бөлшектердің концентрациясының жиынтығына қатынасын иондалу дәрежесі деп атаймыз.

$$\beta = \frac{n_i}{n}, (15)$$

мұндағы $n = \frac{p}{kT}$, p - көлемдегі газ қысымы.

Егер иондалу дәрежесі бірден елерліктей кіші болса $\beta \ll 1$, онда көп реттік (екінші реттік) иондалу ықтималдығы да аз болады, сондықтан оң зарядты көбіне бір зарядты иондар тасымалдайды да, квазибейтараптық шарты бойынша ол n_e электрондардың концентрациясы мен n_i иондардың концентрациясының шамамен өзара теңдігіне алып келеді:

$$n_e \approx n_i. (16)$$

Бұл жағдайда иондалу дәрежесін жоғары дәлділікпен n_e электрондардың концентрациясының n бейтарап атомдардың концентрациясына қатынасы ретінде анықтауға болады.

Егер жылулық қозғалыстың орташа кинетикалық энергиясы атомның иондалу энергиясымен шамалас болса (он мыңдаған кельвиннен жоғары

температурада), онда иондалу, бөлшектердің жылулық қозғалысы кезіндегі соқтығысулар әсерінен болады. Мұндай плазманы жоғары температуралы плазма деп атайды. Күн және басқа да жұлдыздар жоғары температуралы плазмаға жатады. Сол сияқты, басқарылмалы термоядролық синтез қондырғысындағы плазма да осы күйге сай келеді. Ол жердегі плазма температурасы Цельсий шкаласы бойынша 100-150 млн. градус.

Әртүрлі газдық разряд қондырғыларында да плазма алуға болады. Әдетте лабораторияларда аз иондалған плазманы зерттейді. Мұндай плазмада иондалу сыртқы электр өрісінде дрейфтік қозғалатын электрондардың бейтарап атомдармен және молекулалармен серпінді соқтығысуының нәтижесінде жүзеге асады. Бұл кезде бөлінетін джоульдық жылу энергиясы аспаптың қабырғаларына немесе плазманы қоршаған газға беріледі.

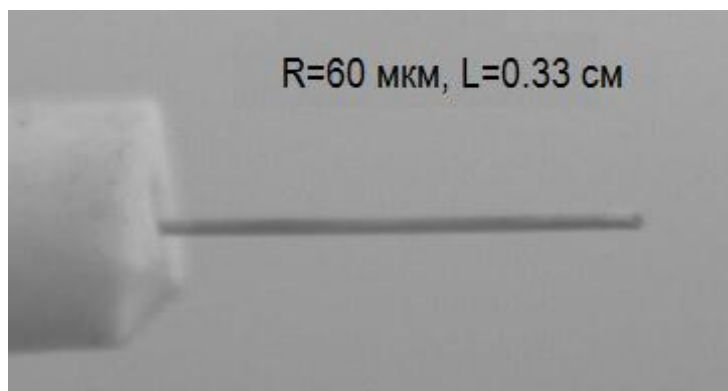
Серпінді соқтығыс кезінде массалары өзара жуық бөлшектер энергияларымен алмасады. Иондар мен бейтарап атомдардың массасы жуық шамамен тең, ал электрондардың массасы олардан анағұрлым кіші болады. Сондықтан жылдамдықтардың Максвелл бойынша таралуы әртүрлі бөлшектерге қарағанда, бір типті бөлшектер ішінде тез орнығады және электрондардың кинетикалық энергиясы иондарға қарағанда өте көп болады. Ал иондардың орташа кинетикалық энергиясы, сәйкесінше, бейтарап атомдардың орташа кинетикалық энергиясынан артық. Электрондардың орташа еркін жүру жолының ұзындығы иондарға қарағанда көп екендігін де ескеру қажет, сондықтан сыртқы электр өрісі үнемі оларды энергиямен камтамасыздандырып отырады.

Осы жағдайлардың әсерінен газдық разрядты плазма температурасы үш түрлі бөлшектердің температураларынан тұрады: электрондардан - T_e , иондардан - T_i және бейтарап бөлшектерден - T_n ;

$$T_e \gg T_i > T_n. (17)$$

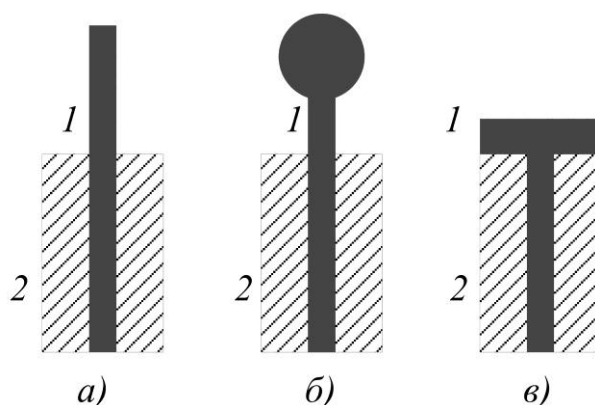
Газдық разряд плазмасы бұл жағдайда тепе-тең емес деп аталады.

Плазма қасиеттерін электрлік зондтың ВАС негізінде зерттеуді алғаш 1923 ж. Ленгмюр ұсынды. Электрлік зонд – плазмаға енгізілген геометриялық өлшемдері өте кіші электрод және Дебайлық экрандалуы нәтижесінде плазмалық ортаға елерліктей өзгерістер әкелмейді, 5 суретті қараңыз.



5-сурет. Дара, цилиндр типтес электр зондының фотосуреті

Электр зондының әртүрлі конструкциялары бар: цилиндрлік, сфералық және жазық (6 сурет).



6-сурет. Электрлік зонд түрлері: а) цилиндрлік, б) сфералық, в) жазық.
1-зонд, 2-оқшаулағыш материал

Әдетте зондты қосымша кернеу көзі арқылы тірек электродтардың біріне жалғайды. Тірек электроды ретінде газдық разрядты түтікшенің анодын немесе катодын алуға болады (Ә қосымшасын қараңыз).

Зондтың потенциалы U_z қорек көзі арқылы беріледі де, вольтметр көмегімен өлшенеді. Зонд арқылы өтетін ток күші I , амперметр арқылы өлшенеді.

Егер зондтың маңайындағы әсерге ұшырамаған плазманың потенциалын U_0 деп алсақ, онда зондтың плазмамен салыстырғандағы потенциалы:

$$U = U_z - U_0. (18)$$

Зондтағы электр тогы иондар мен электрондардан құралады. Егер зонд ортамен салыстырғанда теріс потенциалға ие болса, онда иондық токты байқаймыз, ал электрондық ток зонд потенциалы оң болғанда жүреді. Жалпы зондтың қарапайым теориясы келесіде көрсетілгендей шарттарға негізделген.

1. Плазмадағы электрондардың жылдамдықтары бойынша таралуы - Максвеллдік.

2. Плазмаға енгізілген зонд маңайында қалыңдығы D – ның бірнеше мәніне тең болатын көлемдік зарядтар қабаты пайда болады. Осылайша, экрандалу нәтижесінде зондтың плазмаға әсерін елемейміз.

3. Зонд өлшемі көлемдік зарядтар қабатынан анағұрлым үлкен болады:

$$R \gg D.$$

Демек көлемдік зарядтардың сыртқы қабатының ауданы зондтың жинақтаушы бетінің ауданына тең деп ескеріледі және осы бетке келіп түскен зарядтар зонд потенциалынан тәуелді жұтылады немесе тебіледі.

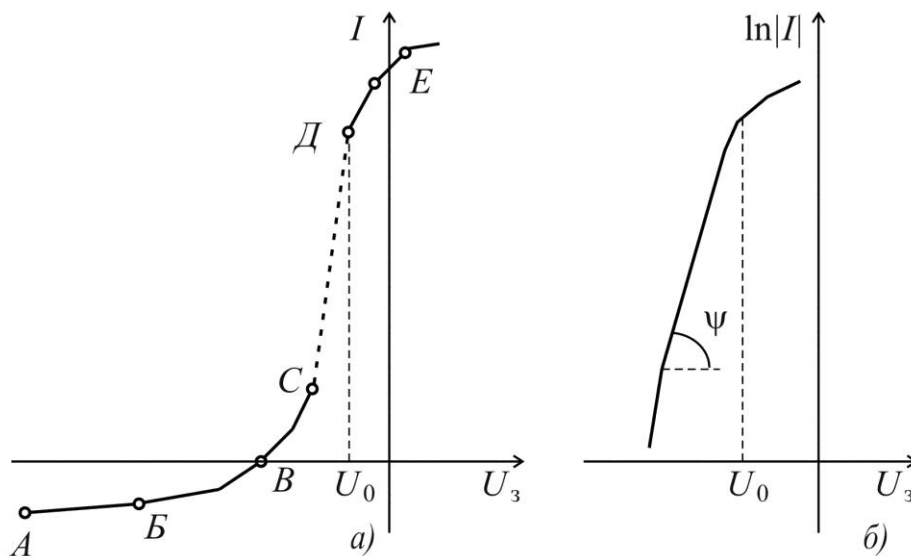
4. Көлемдік зарядтар қабатында электрондар мен иондар ауыр бөлшектермен соқтығыспайды, яғни $\lambda_{e,i} \gg D$ ($\lambda_{e,i}$ – электрондардың және иондардың еркін жүру жолының ұзындығы).

5. Егер $U < U_0$ болса, онда электрондардың тежеуіш өріске тап болғаны және көлемдік зарядтар қабатындағы олардың концентрацияларының таралуы Больцмандық заңдылықпен анықталады:

$$n_e = n_{e0} e^{-\frac{e\Phi}{kT_e}},$$

мұндағы $\Phi = U - U_0$, n_{e0} – плазмадағы электрондардың концентрациясы.

U потенциал теріс болғанда плазмадағы электрондар зондқа жете алмайды да, ондағы токтың басым бөлігін иондар құрайды. Бұл ток онша үлкен емес, себебі газдық разряд плазмасындағы иондардың қозғалғыштығы электрондармен салыстырғанда өте төмен болады.



7-сурет. Зондтың ВАС-сы. а) сипаттаманың жалпы түрі және б) жартылай логарифмдік масштабтағы электрондық бөлігі

Осылайша, иондар зондтың маңайында көлемдік оң зарядтар қабатын құрайды және ВАС (7а-суретке сүйене отырып оқы) қанығуға жақындай түседі (7а суретіндегі A нүктесі). U шамасы жоғарылаған сайын, зондқа айтарлықтай көп электрондар келе бастайды.

Зондтағы қорытқы ток шамасы:

$$I = I_e + I_i, (19)$$

абсолют мәні бойынша төмендейді де, B нүктесінде 0-ге тең болады. Бұл нүктедегі потенциал қалқымалы «плавающий» деп аталады.

Егер U -ды әрі қарай азайта беретін болсақ (бірақ әлі де $U < 0$ аймағында), көлемдік зарядтар қабаты арасынан электрондар тогы үлкейе бастайды. (BC бөлігі).

U –дың оң мәндерінде электрондар күшті өріс әсерінен зондтың бағытына қарай үдей қозғалады да, ал оң иондар кедергіге ұшырайды. Зондтың маңайында теріс көлемдік зарядтар қабаты қалыптасады. Бұл аумақта зондтың ВАС-ы қанығуға жақын болады, DE бөлігі.

D нүктесінде, $U_3 = U_0$ болған кезде, зондтағы ток бөлшектердің жылулық қозғалысының ағынымен ғана анықталады. Молекулалық-кинетикалық теорияға сәйкес, ол келесіге тең (жоғарыдағы шарттар бойынша):

$$I = \frac{1}{4} S e n_e (\langle v_e \rangle - \langle v_i \rangle), (20)$$

мұндағы $\langle v_e \rangle, \langle v_i \rangle$ – электрондар мен иондардың жылулық қозғалысының орташа жылдамдықтары, S – зондтың жинақтаушы бетінің ауданы, e – электрон заряды. Электрондар үшін орташа жылдамдық төмендегідей:

$$\langle v_e \rangle = \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m}}, (21)$$

k – Больцман тұрақтысы, m – электрон массасы.

Алайда электрондардың массасы иондарға қарағанда өте аз $m \ll M$, ($\langle v_e \rangle \gg \langle v_i \rangle$), ал $T_e \gg T_i$, сондықтан $U = 0$ (яғни $U_3 = U_0$) болған кездегі зонд арқылы өтетін токтың басым көпшілігі, электрондық:

$$I_{e0} = \frac{1}{4} S e n_e \langle v_e \rangle. (22)$$

Вольтамперлік сипаттаманың CD бөлігінде электрондардың жылдамдықтарының Максвеллдік таралуы бойынша зондтағы электрондық ток мына формуламен өрнектеледі:

$$I_e = I_{e0} \exp\left(\frac{eU}{kT_e}\right). \quad (23)$$

(23) формуланы логарифмдесек, келесі өрнекті аламыз:

$$\ln I_e = C + \frac{e}{kT_e} U_3, \quad (24)$$

мұндағы $C = \ln I_{e0} - \frac{eU_0}{kT_e}$.

Осылайша жартылай логарифмдік масштабта, $U < 0$ мәндерінде $\ln|I_e|$ -нің U_3 -ден сызықтық тәуелділігі шығады (76 сурет). Сызықтық тәуелділіктің бұрыштық коэффициенті:

$$\psi = \frac{d \ln |I_e|}{dU_3} = \frac{e}{kT_e}. \quad (25)$$

$U > 0$ мәндерінде ВАС қанығуға жақын болады, сондықтан ВАС графигінің қисаюы байқалады. Осылайша, сипаттаманың майысу бұрышының көмегімен электрондардың температурасын анықтауға болады.

$$T_e = \frac{e}{k} \frac{1}{\operatorname{tg} \psi}. \quad (26)$$

мұндағы ψ – графиктің түзу сызықты бөлігінің U өсіне бұрылу бұрышы.

Сипаттамадан қанығу тогын анықтау арқылы электрондардың концентрациясын келесіде көрсетілгендей есептеуге болады:

$$n_e = \frac{4I_{e0}}{Se\bar{v}_e}, \quad (27)$$

Бірақ экспериментте, әдетте электрондық токтың иондық токқа қарағанда бірнеше есе үлкен болуына байланысты электрондардың қанығу тогына жету өте қиын (ВАС-тың E нүктесінен әрі), сондықтан электрондардың концентрациясын анықтау үшін иондардың қанығу тогын пайдалануға тура келеді. Бұл плазманың квазибейтараптық шартын қанағаттандырады.

$$n_e = \frac{I_i}{0,52Se\sqrt{\frac{kT_e}{M}}}. \quad (28)$$

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

Зондтық әдіске эксперименттік тұрғыдан көзқарас және ол жерде туындайтын қиындықтар. Зондтық әдіспен плазма параметрлерін анықтау алғашқыда оңай сияқты көрінеді: небәрі кішкене сым бойымен өткен токты тіркеу арқылы өлшеу жүргізу. Алайда жағдай бұдан өзгеше және қиындау.

Соқтығыссыз плазмадағы зонд сипаттамасы теориялық тұрғыдан жеткілікті, сапалы түрде болжанған. Ал соқтығыстар мен магнит өрісі бар кезде көптеген қиындықтар туындайды, дегенмен кейбір түзетулерді енгізе отырып, зондтық өлшеулерді жүргізуге болады.

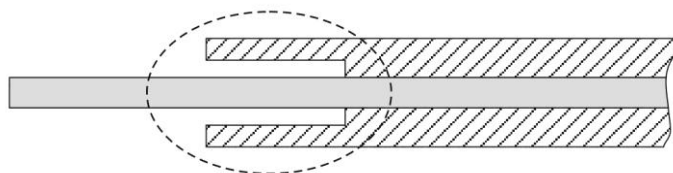
Беттік қабат. Зонд бетінен электрондардың шығу жұмысы оның беттік қабатының құрамына тәуелді. Егер kT_e шамасы бірнеше электронвольттан аспаса, онда зонд бетінің әрбір бөлігі үшін шығу жұмысының айырмасы және оның уақыт бойынша өзгерісі зонд сипаттамасына әсер етеді. Бұл қабаттар металл үлдірдің (Hg немесе Cs) адсорбцияланған газынан құралуы мүмкін немесе қандай-да бір жоғары омыды жалғаулардың шығуы мүмкін. Осы себепті зондты алғаш вакуумға орналастырған соң, оны газсыздандыру қажет. Ол үшін зондты электрондық токты жинаудың қанығу режимінде қызарғанға дейін қыздырып, бірнеше секунд ұстау керек.

Екінші ретті эмиссия және доға. Егер иондар зонд бетінен екінші реттік электрондарды шығаратын болса, онда теріс зарядты зондқа иондар ағыны түсе бастайды. Осылайша оң ығысу нәтижесінде электрондар зондты тастап кете алмайды және ешқандай рөл атқармайды. Екінші реттік эмиссия эффектісін ескеру өте қиын, сондықтан оның алдын алады. Ол үшін зондты дайындаған кезде, екінші реттік эмиссия коэффициенті аз материал таңдалады және төмен кернеуде жұмыс істеу керек. Дегенмен қуатты разрядтарда бұл эффектті алып тастау әрдайым жүзеге аса бермейді. Сонымен қатар бұл жерде «униполяр» доға пайда болуы мүмкін. Бұл кезде катод қызметін зонд, анодты көлемдік зарядтар қабатының шекарасы атқарады. Ал тізбек разрядтық камераның металл қабырғасы арқылы өтетін токпен тұйықталады. Мұндай доға зондты күйдіріп, істен шығаруы мүмкін. Платинада вольфрамға қарағанда, доға пайда болу ықтималдылығы аз.

Плазмаға әсер. Әлсіз иондалған плазмада зонд әсерінен оның маңайындағы зарядтар тығыздығы төмендеп кетуі мүмкін, бұл соқтығыстарды ескеретін теорияда қарастырылады. Алайда толық иондалған плазмада зонд әсері өзгеше. Ең елеулісі - зонд пен оны оқшаулаған материалдан атомдар қоспасының бөлінуі. Бұл атомдар серпімсіз соқтығыс әсерінен қозып, энергия шығарады, осылайша электрондық газды суытып, оның өткізгіштігін азайтады. Мысалы, магниттік өріспен ұсталып тұрған термиялық иондалған цезий плазмасында зонд плазманы өшірудің көзі болуы әбден мүмкін.

Зондты оқшаулаушы экран рөлі. Мұндай экранмен қорытқы ток өтпесе де, оған электрондар мен иондардың жиналуы (кетуі) мүмкін. Соқтығысу болған жағдайда жақын аймақтарда плазма тығыздығы азаяды. Изолятор әсерін ескеру үшін тығыздықты дифференциалдық түрде өлшеуге болады. Ол үшін зондты экрансыз (оқшаусыз) плазма кеңістігінде жылжытып отыру қажет.

Зондтың жинақтаушы ауданының өзгеруі. Зонд жинайтын ток оның плазмамен шекаралас беткі ауданына тәуелді. Қуатты разрядтарда бұл аудан тозаңдану, балқу нәтижесінде өзгеруі мүмкін. Осылайша оқшаулаушы бетінде ток өткізгіш қабат пайда болады. Егер зондтың жұмыс беті осы қабатпен электрлік байланыста болса, тиімді жинақтаушы бет айтарлықтай өзгереді (ауданы ұлғайады). Мұның алдын алу үшін арнайы конструкциялы (8 суреттегі үзік сызықпен қоршалған жер) зондтар жасалады.



8-сурет. Зонд конструкциясы

Электрондардың шағылуы. Егер зонд беті бөлшектер үшін идеал қабылдағыш болмаса және шағылдыру коэффициенті белгілі болса, оны теорияда ескеруге болады. Алайда шағылдыру kT_e шамасын өлшеу нәтижелеріне әсер етпейді. Шын мәнісінде, тепе-тең біркелкі газда зондқа түсетін электрондардың жылдамдықтары бойынша таралуы зондтың барлық кернеуі шамалары үшін бірдей, осы себепті шағылдыру коэффициенті тұрақты.