

МАГНИТТІК ЗОНД КӨМЕГІМЕН ИМПУЛЬСТІ ПЛАЗМАНЫҢ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Плазма параметрлерін жанасусыз зерттеудің көптеген әдістері бар, алайда олардың түгелге дерлігі күрделі плазмалық жүйенің магнит өрісін анықтау үшін жарамсыз. Әрине, қандай да бір әдістер бар, мысалы, зарядталған жылдам бөлшектер шоғын плазмаға енгізу арқылы ол жердегі ішкі магнит өрісі туралы мәліметтер алуға болады, бірақ бұл жерде шоқтың ауытқу шамасына интерпретация жасау практикалық тұрғыдан өте қолайсыз (әсіресе, тез өзгермелі ағын кезінде, ең қарапайым стационар жүйелерді есепке алмағанда). Осы себепті магнит өрісінің күш сызықтарының таралуын өлшеу үшін плазмаға арнайы магниттік зонд енгізіледі. Магнит өрісін зондтық өлшеу әдісі плазмамен тікелей жанасу арқылы жүзеге асады, демек, ол, негізінен, төмен температуралы плазманы зерттеуге қолайлы.

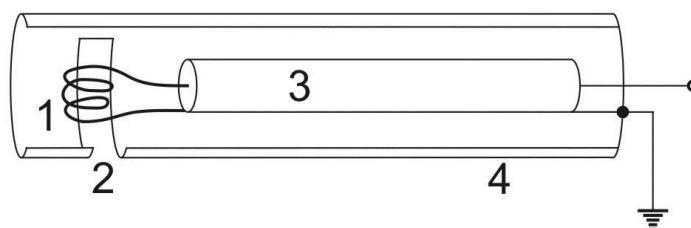
Плазмалық орта әрқашан өзі немесе сыртқы өткізгіштер тудыратын магниттік өріспен астасып жатады. Демек, магниттік өрістің кеңістіктік таралуы және уақыт бойынша өзгерісі туралы мәліметтер болмаса, плазма сипаттамасының толық емес болғаны. Сонымен қатар плазмадағы магнит өрісін зерттеудің негізгі себебінің бірі, плазманың кеңістіктік орны, оны тудырып және ұстап тұратын күштер жүйесіне тәуелді және олар иондалған ортаны көптеген жағдайлардағы практикалық қолданыстар кезінде шешуші рөл атқарады. Плазманы ұстап тұру және магнитті гидродинамикалық орнықтылық плазма мен магниттік өрістің салыстырмалы түрде өзара орналасуына байланысты, демек, импульстер балансының жалпы жағдайдағы белгілі қатынасы кезінде магнит өрісі таралуының көмегімен плазманың кеңістіктік орнын, оның жылулық энергиясының тығыздығын және конфигурациясының тұрақтылығын анықтауға болады. Алайда бұл үшін қарастырылып отырған жүйедегі плазма магнит өрісіне күшті әсер беруі қажет. Әрине, кернеулігі бірнеше мың эрстедке ($1 \text{ Э} = 80 \text{ А/м}$) тең магнит өрісіндегі бірнеше мың электрондар мен иондардың кеңістіктік таралуын зерттеу үшін магниттік зондтың пайдасы жоқ. Бірақ, магниттік өріс толығымен плазма тоғымен байланысты (шарттас) болған кезде (мысалы, өздігінен созылмалы разрядтар, импульсті плазмалық ағын) - магниттік зондты қолдану өте тамаша шешім және өте тамаша нәтижелер береді.

Магниттік зонд конструкциясы - диаметрі 1-2 мм болатын өлшеуіш катушка, егер зерттеліп отырған сигнал жиілігі өте жоғары болмаса, катушкадағы орам саны көбірек болғаны жөн. Разрядқа енгізілетін катушка қиын балқитын диэлектрик материалмен (мысалы, кварц, керамика) оқшауланады, кей жағдайда электрлік шуылға қарсы электростатикалық экранмен қапталады.

Жоғары жиілікті магнит өрісін өлшеу техникалық тұрғыдан едәуір қиын, ол үшін орам саны аз (2-5 орам, 100 МГц) катушкалар қолданылады.

Егер тұрақты магнит өрісіндегі плазмада жоғары жиілікті тербеліс қоздырылатын болса, онда зондтың басы орналасқан кез-келген кеңістік жолағында айнымалы магнит өрісі, сол сияқты айнымалы электр өрісі пайда

болады. Осылайша зондтың орналасу бағдарына және өріс күш сызықтарының кеңістікте таралуына байланысты катушкадан алынатын шамалар сан түрлі болуы мүмкін. Осы себепті өзімізге қажет өрісті қабылдау үшін зондтың катушка орналасқан жеріндегі электростатикалық экранда тілік болады (11-суретте). Сонымен қатар катушка басы мен плазма аралығында электр өрісі, ізінше сыйымдылықты токтар пайда болуы мүмкін, оның алдын алу үшін зонд конструкциясы өте ықшам жасалуы қажет, әдетте оның диаметрі экранды қоса алғанда бірнеше миллиметрден аспайды.



11-сурет. ЖЖ магниттік зондтың конструкциясы: 1-магниттік катушка, 2-экран тілігі, 3-коаксиалды кабель, 4-электростатикалық экран

Сигнал-шуыл қатынасын мейілінше аз ету (жалпы жағдайда олардың қатынасы 0.1 аспағаны жөн) мақсатында катушкадан берілетін сигнал сыртқы экран ішінде орналасқан коаксиал кабель арқылы таралады. Мұндай жағдайда зондтың параметрлері келесідей: катушка диаметрі - 1 мм, орамдар саны - 3-5 орам, коаксиалды желі диаметрі 1.8 мм, экранның сыртқы диаметрі - 2.5 мм.

Магниттік зонд келесі шарттарды қанағаттандыруы керек:

- Импульсті разрядтар тудыратын электрлік шуыл деңгейінен өлшеніп жатқан сигнал жоғары (анық), яғни сезімталдылығы жоғары болуы керек;
- Тез өзгертін өрісті қабылдауға қабілеттілігі, яғни жиілікке сезімталдылығы;
- Зерттеліп отырған ортаға (плазмаға) әсері елеусіздей аз, демек зондтың өлшемі мүмкіндігінше ықшам болуы керек.

Бұл талаптардың бір-біріне қарама-қайшы тұстарыда бар, олай болса жекелеп талдап көрейік.

Зондтың сезімталдылығы келесі түрде анықталады

$$V = nS \frac{dB}{dt}, (29)$$

n – орамдар саны, S – орам ауданы, $\frac{dB}{dt}$ – магнит өрісі өзгерісінің жылдамдығы.

Демек, сезімталдықты көбейту үшін зонд ауданын тұрақты ұстап тұрып (зонд өлшемін үлкейтпеу мақсатында), орам санын көбейтуге болады, бірақ жиіліктің жоғарғы шегі келесідей тұрақты уақытпен анықталады (екінші

талапқа қарама-қайшылық): $\tau = L/R_0$, яғни зонд сезетін тез өзгерістегі өріс тербелісінің периоды. R_0 –зонд жүктемесі, әдетте желінің толқындық кедергісіне тең болады. $L = Fn^2r$ –катушканың (бір қабатты соленоидтың) индуктивтілігі. F –геометриялық коэффициент $\left(l/r = 2 \rightarrow F = 0.029 \right)$.

l –катушканың ұзындығы, r –катушканың радиусы.

Катушканың минимал индуктивтілігі кезінде максимал шығыс сигналын алу келесі шамалардың қатынасымен сипатталады:

$$\frac{nS}{n^2r} \sim \frac{r}{n}. \quad (30)$$

Демек, аз индуктивтілік кезінде катушка диаметрі үлкен болуы керек, ол үшінші талапқа қарама-қайшы.

Электростатикалық экран. Магниттік зондтың тек қана магниттік өріске сезімталдығы жоғары болып, электрлік өрістерді қабылдамауы керек. Бірақ магнит өрісі тез өзгертін плазмалық ортада электрлік өріс те бар. Демек, көп жағдайда жерге жалғанған зонд (катушка) ұшы мен плазма аралығындағы паразиттік конденсаторда (изоляция экран арқылы) бірнеше мыңдаған потенциалдар айырымы пайда болады. Осының салдарынан бұл жердегі паразиттік сигналдар өлшеуіш тізбекке өтіп кетеді, оның алдын-алу үшін электростатикалық экран қолданылады. Олар тор немесе магниттік ағынның өтуіне арналған тілігі бар форма түрінде жасалады.

Сол сияқты электростатикалық экран бүтін болуы мүмкін, ол кездегі цилиндрлік экранға сыртқы магнит өрісінің ену жылдамдығын анықтайтын уақыт тұрақтысы келесіге тең, $\tau = \frac{\mu r \delta \sigma}{2}$. Мұндағы μ –магниттік өтімділік, δ –қабырға қалыңдығы, σ –материалдың меншікті өткізгіштігі. Егер τ зерттеліп отырған ортадағы процесстер уақытынан көп үлкен болса, экраннан өткен сигнал әлсіремейді.

Сонымен қатар электростатикалық паразиттік сигналдарды азайту үшін зонд шығысына R_0 кедергісі төмен резистор жалғанады. Индуктивті кедергі $\frac{L}{R_0}$ басым болмай тұрған кезде, зондтың шығысындағы магнит өрісі тудыратын сигнал амплитудасы R_0 -ден тәуелсіз. Бұл кезде электростатикалық сигнал сыртқы тіркеуші тізбекке өтпей тұрып C_p (катушка-плазма жүйесіндегі) сыйымдылық пен R_0 керергіден тұратын кернеу бөлгіште әлсірейді. Сигнал/шуыл қатынасы бұл кезде $\frac{1}{R_0}$ -ге пропорционал болатыны мәлім, демек, жиілігі $\frac{1}{R_0 C_p}$ -ден аз болатын электростатикалық паразиттік сигналдар күшті әлсіреуге ұшырайды.

Паразиттік сигналдарды болдырмаудың тағы бір әдісі зондта баласты катушка қолдану. Оның екі ұшы дифференциалдық күшейткішке, ал ортаңғы

ұшы жерге жалғанада. Бұл катушканың ұштарында магнит өрісі күшеюге қабілетті екі таңбалы сигнал тудырады, ал бір таңбаға ие паразиттік сигналдар өзара компенсацияланады.

Егер катушка зонд конструкциясының өсіне жоғары дәлдікпен перпендикуляр орналасқан болса, келесі қарапайым әдіспен паразиттік сигналдардың бар-жоғына оңай көз жеткізуге болады. Катушканың қандай да бір орнында плазма осциллограммасы $B(t)$ алынады, сосын зонд 180 градусқа бұрылып осциллограмма қайта алынады, бұл кезде магниттік құраушының таңбасы өзгереді: $B(t)$. Бұл орын ауыстыру электростатикалық сигнал құраушысына өзгеріс әкелмейді, демек паразиттік сигналдар болмаған кезде екі сигнал бір-бірінің айналық кескінін беруі керек.

Зондтың шығыс кедергісі, R_0 . $\frac{L}{R_0}$ қатынасының аз болу шарты катушкада индукцияланған ток ол арқылы өтетін магнит ағынына кедергі жасамауы керек деген талапқа эквивалент. Егер кері жағдайды қарастырсақ, R_0 нөлге ұмтылдырсақ, магнит ағыны катушкаға енбейді. Катушкада циркуляция жасайтын ток сыртқы магнит өрісінің уақыт бойынша туындысына $\left(\frac{dB}{dt}\right)$ емес, өзіне (B) пропорционал болады, демек, сигналды интегралдаудың қажеті жоқ (Роговский белдігі). Алайда өлшемі аз катушкалар қолданылатын эксперименттерде бұл әдіс жарамсыз, себебі $\frac{L}{R}$ шамасы азайып кетеді.

Зонд енгізетін ауытқулар (қателіктер). Магниттік зондтардың қолданылу аймағының шектелуі оның тікелей плазмамен жанасуына байланысты, себебі зонд плазмаға енген кезде, оның локальдық параметрлеріне ауытқулар әкеледі. Төменде осы құбылыстың мүмкін болатын негізгі төрт түрі келтірілген.

1. Плазмаға енген зонд оны суытады (плазма бөлшектерінің зонд бетімен серпімсіз соқтығысымен байланысты).

2. Зонд материалымен плазманың ластануы (зондтың жоғары температуралы плазмады қызып, балқуымен байланысты).

3. Зонд маңайындағы ток таралуының өзгерісі (плазмалық ортада электрлік өткізгіш емес ортаның - диэлектрикпен қоршалған зондтың пайда болуымен байланысты).

4. Плазманың зонд сезгіштігіне әсері (катушкаға енетін магнит өрісінің күш сызықтары оны қоршап тұрған плазма арқылы өтеді, демек, катушка-өріс арасындағы байланыс осы жердегі өтпелі процестерге байланысты).

Магниттік зондты электр тізбегіне жалғау және өлшеу әдісі

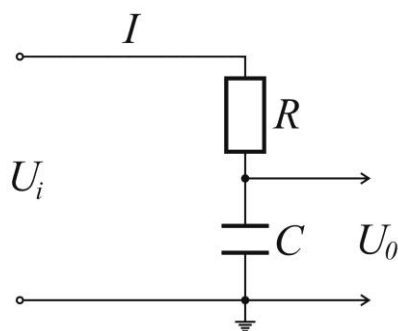
Плазма электродтар аралығындағы газдық разряд кезінде пайда болғанда азимутты магнит өрісін тудырады. Бұл жағдайда магниттік өлшеу «пинчтеу» дәрежесін немесе разрядтың өздік созылуын анықтауға негізделген. Катушка өсін түтікше өсімен параллель немесе перпендикуляр бағытта орналастыруға болады, ол магнит өрісінің қай құраушысын

қабылдаймыз соған байланысты. Зонд плазмалық камераға арнайы вакуумдық нығыздағыштар арқылы енгізіледі және оны плазмалық орта кеңістігінің әртүрлі нүктесіне баруына мүмкіндік жасалған.

Пинч – ток каналын өзі индукциялаған магнит өрісімен сығу.

Катушкада индукцияланған сигнал $\frac{dB}{dt}$ шамасына пропорционал, демек, осциллограф экранында магнит өрісінің уақыт бойынша өзгерісі алынады. Ол үшін RC интегралдаушы тізбек қолдану қажет, 12 суретті қараңыз. Осылайша, плазмалық жүйе симметриялы болса, оның радиусы бойынша магнит өрісінің таралу қисығы алынады, $B(r)$. Кейін бұл қисықтың көмегімен токтың кеңістік бойынша таралуын (Максвелл теңдеулері негізінде), сол сияқты, плазма қисымы мен импульсін (импульстер балансы теңдеуі негізінде) анықтауға болады.

Зонд сигналын интегралдау. Магниттік зонд катушкасының сигналы магнит өрісі жалдамдығының өзгерісіне $\left(\frac{dB}{dt}\right)$ пропорционал болғандықтан, $B(t)$ шамасын тікелей өлшеу үшін зонд пен осциллографтың арасындағы тізбекке арнайы интегралдаушы электр тізбегін жалғау қажет.



12-сурет. Пассивті RC тізбекше

Бұл жағдайда ең қарапайым пассивті RC тізбекше қолданған тамаша нәтижелер береді, олай болса, интегратордың шығысындағы кернеу мынаған тең:

$$V_0 = \frac{Q_0}{C} = \frac{1}{C} \int I dt = \frac{1}{RC} \int (V_i - V_0) dt, (31)$$

мұндағы V_i - тізбектің кірісіндегі кернеу. RC тұрақтысы интегралдау уақытынан көп кезде, V_0 кернеуі V_i шамасына қарағанда аз және RCV_0 шамасы V_i интегралының жуық шамасын береді.

Интегралдау қателігін келесі қарапайым мысал арқылы анықтауға болады. $t = 0$ мезетінен бастап уақыт бойынша өзгермейтін V_i кернеуінің күрт ауытқуын қарастырайық. Бұл жағдайда

$$V_0 = V_i \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) = V_i \left[\frac{t}{RC} - \frac{t^2}{2R^2C^2} + \dots \right]. (32)$$

Оң жақтағы бірінші мүше интегралдың нағыз мәні, ал екінші мүше бірінші ретті қателік, $\frac{t}{RC} = 0.1$ үшін 0.5 %-ды құрайды. Бұл жерден мынадай қорытынды шығады: уақыт тұрақтысы бақыланатын процесстің өту уақытынан кемінде 10 есе көп болуы керек.

Олай болса, катушкадағы кернеу $V_i = nSdB/dt$ тең болғандықтан, интегратор шығысындағы сигнал:

$$V_0 = \frac{nS}{RC} B. (33)$$

Көрініп тұрғандай, V_0 сигналының амплитудасын төмендетпеу мақсатында RC тұрақтысының шамасы үлкен болмауы керек.

Интегралдаушы тізбектің элементтерін таңдауға баса назар аударған жөн. Белгілі болғандай, қуаты аз, жоғары омдық композициондық кедергілер жоғары жиіліктерде өз мәндерін айтарлықтай өзгертеді және де шунттық сыйымдылыққа ие. Құрылысы қарапайым тосқауылдық конденсаторлардың тізбектей қосылған паразиттік индуктивтілігі бар, бұл дәл интегралдауға мүмкіндік бермейді (бұл жерде жекелеген элементтердің электрлік сипаттамалары қарастырылмаған, алайда экспериментатордың бұл мәселеге назар аударғаны жөн).