

AĞIR İONLAR DƏSTƏSİNİN FOKUSLANDIRILMASI ZAMANI PLAZMA LİNZASINDA FƏZA YÜKÜNÜN FORMALAŞMASI

F.V. HƏSƏNLİ

Mingəçevir Dövlət Universiteti

farida.hasanli@mdu.edu.az

Məqalədə yüksək optik gücə malik plazma lensinin sferik aberasiyası nəzərdən keçirilib. Aberasiyanın əmələ gəlməsinin səbəbləri və aradan qaldırılması yolları müzakirə olunub. Ölçmələr yeni eksperimental vakuüm qurğusunda aparılıb. Optimallaşdırılmış plazma lensi ion-optik tədqiqatlarda və plazma-şüa texnologiyasında istifadə oluna bilər.

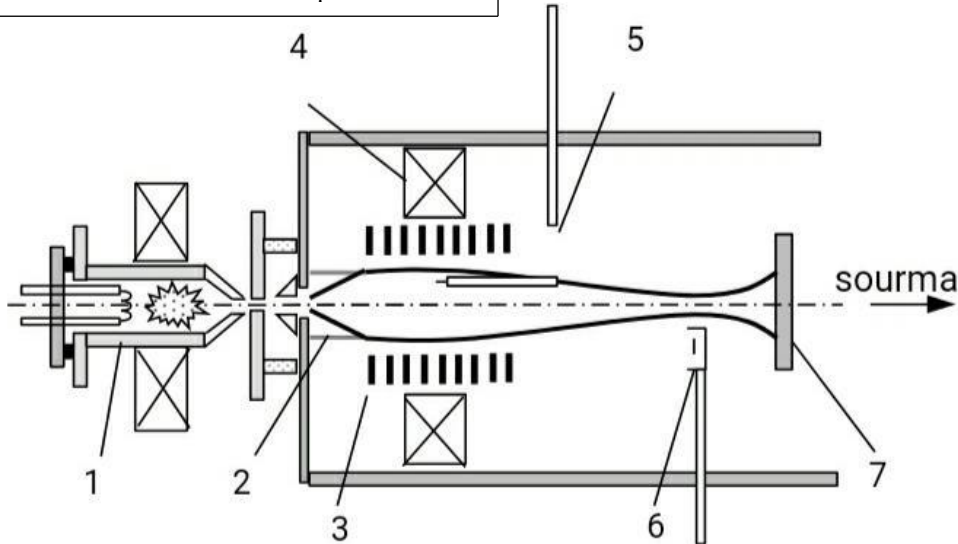
Açar sözlər: ion şüası, plazma optikası, ion-plazma texnologiyası.

İon dəstələrinin cərəyan sıxlığı kifayət qədər yüksək olmalıdır və bu isə ion dəstələrinin fokuslaşdırılması üçün effektiv ion optik sisteminin yaradılmasına zəruriyyət yaradır.[1,3]

Plazma linzaları digər linzalara nisbətən daha yüksək optik qüvvəyə malikdir. Plazma linzalarının alınması üçün elektrostatik linzaları maqnit linzası ilə birləşdirmək lazımdır. Bu zaman maqnit qüvvə xəttlərinin təsiri ilə elektrik sahəsi bütün ion dəstəsi boyunca paylanır. Klassik elektrostatik linzalar (immersion və təklənmiş) toplayıcı və səpici hissələrdən ibarətdir (Siladyi). İon toplayıcı linzalarda ion dəstəsi uzun müddət elektrik sahəsində yerləşir. Hissələrin optik qüvvələri müxtəlif işarəli olduğuna görə (toplayıcı və səpici) linzaların ümumi optik qüvvəsi böyük olmur [10].

İon dəstəsinin yaratdığı fəza yükü potensialın vakuüm paylanmasına güclü təsir edir. Beləliklə, elektrik sahəsinin dəstənin mərkəz hissəsinə təsiri az olduğuna görə intensiv ion dəstələrinin elektrostatik linzalar vasitəsilə lazımi dərəcədə fokuslandırılmaq olmur.

Deyildəndən belə nəticəyə gəlmək olar ki, böyük optik qüvvəyə nail olmaq üçün linza toplayıcı olmalıdır. Bunun üçün əks işarəli fəza yükündən istifadə etmək olar.[6,7,9s] Yəni, müsbət ionlar dəstəsinin fokuslandırılması üçün linzanın daxilində elektronlar vasitəsilə fəza yükü yaradılmalıdır. Həcmində fəza yükü olan linzanın sxemi holoqrafiyanın müəllifi Denis Qabor tərəfindən verilmişdir (şək.1). Linza daxilində bircins olmayan maqnit sahəsi yaratmaqla linza daxilindən keçən silindrik formalı ion dəstələrinə təsir göstərmək olar. Maqnit sahəsində bir-birinin ardınca bir neçə silindrik formalı elektrodlar simmetrik yerləşdirilir və bu elektrodlara potensiallar verilir.[2,4] Mərkəzi elektroda ən yüksək potensial verilir, digər elektrodlara isə azalan gərginliklər verilir və nəhayət kənaradakı son elektrodların potensialı sıfır olur. Beləliklə, linza nəticə etibarilə elektronlar üçün elektromaqnit tələsi rolunu oynayır.



Şəkil 1. Eksperimental qurğunun sxemi: 1-ion mənbəyi-duoplazmatron; 2-kompensator; 3-elektrodlar; 4-sabit maqnit; 5- elektrostatik zond; 6-diafraqma; 7-kollektor.

Plazmada nisbətən yüngül komponent olan elektronlar plazma dinamikasının əsas parametrlərinin formalaşmasını təmin edir. Buna görə plazmada elektron

komponentin hərəkətinin araşdırılması üçün hidrodinamik yaxınlaşmadan istifadə olunmuşdur.

$$m \frac{d\vec{v}_e}{dt} = -e \left(\vec{E} + \frac{1}{c} [\vec{v}_e, \vec{B}] \right) + \vec{F}_{ee} + \vec{F}_{ei}, \quad (1)$$

(1) tənliyində,

$$F = -\frac{e}{c} [v_e, B] \quad (2)$$

həddi aşağı temperaturlu plazmada axan cərəyanın kiçik qiymətlərində elektronları maqnit sahəsində saxlayan qüvvədir.

Burada v_e - elektronun sürəti, E – elektrik sahəsinin intensivliyi, B - maqnit sahələsinin induksiyası, F_{ee} və F_{ei} – hissəciklərin toqquşması nəticəsində yaranan qüvvələdir. Burada hesab olunur ki, hissəciklərin sürətlərinin paylanması klassik Maksvell paylanmasına yaxındır.

$$\vec{F}_{ee} = -\frac{\Delta P_e}{n}, \quad \vec{F}_{ei} = \frac{m(\vec{v}_e - \vec{v}_i)}{\tau_{ei}} = -\frac{ej}{\sigma}, \quad (3)$$

Burada P_e – elektron qazının təzyiqi, $\sigma = ne^2\tau_e/m$ – plazmanın keçiriciliyi, j - cərəyan sıxlığıdır. (1) tənliyini nəzərə alsaq, elektronun hərəkət tənliyi aşağıdakı kimi olar

$$\vec{E} - \frac{j}{\sigma} - \frac{m}{e} \frac{d\vec{v}_e}{dt} - \frac{1}{en} \nabla P_e - \frac{1}{c} [\vec{v}_e, \vec{B}] \quad (4)$$

(4) tənliyindən alınır ki, müəyyən şərtlər daxilində plazma optikasının əsas prinsipi-maqnit sahəsinin qüvvə xətləri ekvipotensiallığı təmin olunmalıdır. [5, 8] Başqa sözlə, elektronlar maqnit sahəsi boyunca yüksək yürüklüyə malik olduğundan, maqnit sahəsi istiqamətində potensiallar fərqi yarada bilməzlər. Maqnit sahəsinin eninə istiqamətində isə elektronların hərəkəti məhdud olduğundan, onlar elektromaqnit sahəsində qapalı dreyf hərəkəti edirlər [1].

Beləliklə maqnit sahəsi intensivliyinin qiyməti elə seçilməlidir ki, linzanın en ölçüsü elektronların Larmor radiusundan xeyli böyük, ionların Larmor radiusundan isə xeyli kiçik olsun:

$$L_e \ll L \ll L_i$$

Yəni, maqnit sahəsi ionlara əhəmiyyətli dərəcədə təsir etmir. (2) ifadəsindən görünür ki, plazmadan keçən kiçik cərəyan hallarında E və B vektorları qarşılıqlı perpendikulyar olduğundan maqnit qüvvə xəttləri ekvipotensial xəttlərdir.

$$\varphi = \varphi(\Psi)$$

Ψ – maqnit selini xarakterizə edən funksiyadır.

Yəni maqnit ekvipotensial səthləri boyunca elektronlar maneəsiz hərəkət edir, ona perpendikulyar

$$\mathbf{n} = n_1(\psi) \exp\left(\frac{e\phi}{kT_e}\right), \quad n_1(\psi) = n_0 \exp\left(-\frac{e\phi^*}{kT_e}\right). \quad (7)$$

Plazma həcmində fəza potensialının ölçülməsi xüsusi emissiya verən elektrodlar vasitəsilə həyata keçirilir. Plazma həcmində gedən proseslər anomal yüksək və yaxud turbulent keçiriciliyə gətirib çıxarmadıqda bu üsuldən istifadə etmək olar. Bu halda elektrodun yaxınlığında potensialın sıçrayışı kT_e/e tərtibində olacaq. Buna görə, plazma həcmindəki potensiallar fərqi kT_e/e -dən çox böyük olarsa, onların xüsusi elektrodlar vasitəsilə fiksə edilməsi daha əlverişli olur.

Elmi ədəbiyyatda Qabor linzasına “plazma linzası” da deyilir. Linzanın mühiti kvazineytral mühitə yaxın olduğu üçün intensiv ion dəstələri üçün belə termin

istiqamətdə isə kəsişən $E \perp B$ sahələrində

$$v_e \approx c \frac{E}{B}$$

sürəti ilə dreyf hərəkəti edirlər.

Baxdığımız hallarda elektronların temperaturu nəzərə alınmırdı, yəni $T_e=0$. Elektronların real temperaturunu nəzərə almaq üçün (1) tənliyini maqnit sahəsi istiqamətində proyeksiyalayaq və $P_e = nkT_e$ elektron təzyiqini nəzərə alaq:

$$\frac{kT_e}{en} \frac{dn}{dt} - e \frac{\partial \phi}{\partial \ell} = 0. \quad (5)$$

(5) ifadəsini maqnit sahəsinin ℓ qüvvə xətləri boyunca inteqrallasaq saxlanma qanunu tapırıq:

$$\phi - \frac{kT_e}{e} \ell n \frac{n}{n_0} = \phi^*(\psi), \quad (6)$$

Burada n_0 – ixtiyari sabit, ψ - maqnit selidir, $\phi^*(\psi)$ – maqnit qüvvə xətti boyunca sabit olan temperatura uyğun potensialdır.

Görünür ki, (6) tənliyi qüvvə xəttləri boyunca Bolsman paylanmasını xarakterizə edir

qəbul olunandır. (1) tənliyindən başqa Puasson tənliyini də nəzərə alsaq, onda plazma linzasına “fəza yüklü linza” da demək olar. Belə linzanın fokus məsafəsi aşağıdakı düsturla ifadə olunur:

$$F = \frac{R U_s}{2 U_l} = \frac{R e U_s}{2 e U_l} = \frac{R W}{2 e U} \quad (8)$$

Burada R - linzanın radiusu, W - ion dəstəsinin enerjisi, e - elektronun yükü, U_s və U_l uyğun olaraq ionları sürətləndirən və linzaya verilən gərginlikdir. Gö-

ründüyü kimi, belə linzanın fokus məsafəsi xüsusi yük-dən asılı deyil, bu isə bütün elektrostatik linzalara aiddir.

Bildiyimiz kimi, plazma linzasında maqnit qüvvə xətləri ekvipotensialdır. Bunun üçün radiusu R olan və ondan I cərəyanı axan maqnit linzasının optik qüvvəsi ilə, U potensialı, lakin cərəyansız halqadan ibarət olan elektrostatik linzanın optik qüvvəsini müqayisə edək. Maqnit linzasının optik qüvvəsi belə təyin olunur

$$\frac{1}{F_B} = \frac{3\pi^2}{16} \frac{e^2}{Mc^2} \frac{I^2}{\epsilon c^2 R'} \quad (9)$$

Burada $\epsilon = Mv^2/2$ -ionların kinetik enerjisidir.

Həmin halqaya U potensialı verilsə, o, elektrostatik linzaya çevrilər və bu elektrostatik linzanın optik qüvvəsi aşağıdakı düsturla təyin olunur.

$$\frac{1}{F_E} = \frac{3e^2}{16\epsilon^2} \frac{\pi U^2}{8R}. \quad (10)$$

Göründüyü kimi, bu linzanın optik qüvvəsi potensialın kvadratından asılı olduğu üçün o, toplayıcı olmamışdır.

Elektrik və maqnit sahələrinin birgə təsiri altında maqnit qüvvə xətlərinin ekvipotensiallığı nəzərə alındıqda aşağı sürətli elektronlar mənbəyi elektrodlarda potensialın qararlaşmış paylanması təmin edir. Əgər kompensator linzanın içərisinə doğru hərəkət edərsə, ion dəstəsi elektrodla çatmaz və elektrodlarda potensial yaranmaz. Öz-özünə qararlaşmış rejimdə fokuslanmanın keyfiyyəti və fokus nöqtəsində ion dəstəsinin sıxlığı adi rejimə nisbətən daha böyük olur. Alınmış plazma linzasının fokus məsafəsi müsbət və ya mənfii olduğundan, linza həm toplayıcı, həm də səpici ola bilər və onun optik qüvvəsi vakuum linzasının optik qüvvəsindən müqayisə olunmayacaq dərəcədə böyük olur:

$$\frac{1}{F_{nl}} = \frac{2eU}{\epsilon R} \theta, \quad \theta \approx 1. \quad (11)$$

Bu düsturlara əsasən enerjiləri 10 keV olan arqon ionlarının eyni şəraitdə fokuslaşması zamanı hər üç linzanın fokus məsafəsini hesablasaq,

$$F_B \sim 10^4 \text{ sm}, F_E \sim 10^3 \text{ sm}, F_{pl} \sim 20 \text{ sm}$$

olar.

Yuxarıdakı düsturların əsasında hesablamalar göstərir ki, eyni fiziki şərtlər daxilində plazma linzasının

optik qüvvəsi elektrostatik linzasının optik qüvvəsindən 2 tərtib və maqnit linzasının optik qüvvəsindən 4 tərtib yüksəkdir.

Plazma linzasının daxilində elektrik sahəsi bütün oblastda fokuslayıcı olduğundan, onun optik qüvvəsi böyükdür. Müxtəlif müəlliflər tərəfindən aparılmış çoxsaylı təcrübələr (11) düsturunun doğruluğunu təsdiq edir.

İkinci ion-elektron emissiyası hadisəsi nəticəsində linzada elektronlar toplanır. Linzanın girişində yerləşdirilmiş və potensialı sıfır olan metal kompensator vasitəsilə elektronların toplanması idarə olunur. Dəstədən səpələnən ionlar kompensatorun daxili divarlarından zərbə nəticəsində elektronları çıxarır və bu elektronlar linzanın elektromaqnit tələsinə düşürlər. Bu zaman qaz ionları kompensatorun divarı ilə toqquşma nəticəsində divardan elektron alır və neytrallaşır. Qeyd etmək lazımdır ki, belə generasiya üsulu metal və yarımkeçirici mənbələrindən alınan ionlar dəstəsi üçün yarırsızdır, ona görə ki, bu ionlar kompensatorun divarlarına çökür və onun quruluşunu dəyişir. Beləliklə, metal və yarımkeçirici mənbələrdən alınan ion dəstəsinin fokuslandırılması üçün lazım olan fəza yüklərinin toplanması termoelektron emissiyasının vasitəsilə həyata keçirilir.

NƏTİCƏ

Plazma linzalarında baş verən proseslərin tədqiqi və onların fokuslanmış ion dəstəsinin dinamikasına təsirinin təcrübi olaraq öyrənilməsi, habelə impuls və stasionar rejimlərdə enerjisi 35 keV, cərəyan şiddəti isə 50 mA olan helium və azot qazı dəstələrinin qısa və uzun linzaların köməyi ilə fokuslanması və məsafəyə transfer edilməsi zamanı ortaya çıxan müxtəlif proseslərin həmin linzaların effektiv işləməsinə təsirinin öyrənilməsidir.

Plazma linzalarının statik, dinamik və rəqsi xarakteristikalarının kompleks öyrənilməsinin nəticələrini aşağıdakı kimi ümumiləşdirmək olar:

1. Linzanın izolyasiya olunmuş elektrodlarının üzərinə ion dəstəsindən kənarında olan hissəsinin düşməsi nəticəsində elektrodlar müsbət potensialla yüklənir və radial elektrik sahəsi yaranır. Bu hadisəyə özü qararlaşmış rejim deyilir. Bu zaman fokuslanma üçün lazım olan cərəyan sıxlığı artır və ion dəstəsi sürətlənir.

2. Sistemdə elektronlar soyuq kompensatorun divarlarından ion-elektron emissiyası nəticəsində qoparaq potensialın vakuum paylanması ilə dəyişir ki, maqnit sahəsinin qüvvə xətləri ekvipotensial olsunlar.

[1] *A.И. Морозов.* Введение в плазмодинамику. Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2006, 576 с.
 [2] *И.С. Гасанов, И.М. Проценко.* Динамика формирования импульсного ионного пучка плазменной линзой. ЖТФ, т. 52, № 9, с 1783-1786, 1982.
 [3] *I.S. Hasanov, V.A. Orudjev, I.I. Gurbanov, E.M. Akbarov.* Space Charge Lenses for Intensive Ion Beams Formation. ACTA Physica Polonica A, vol. 135, No 4, p. 841-844, 2019.

[4] *И.С. Гасанов, А.А. Гончаров, И.М. Проценко.* Плазмооптические системы формирования и фокусировки ионных пучков. Препринт ИФ УН УССР, Киев, 1990, 39 с.
 [5] *A.A. Goncharov.* The electrostatic plasma lens. Review of Scientific Instruments 84, 021101 2013.
 [6] *И.С. Гасанов, М.Д. Габович, И.М. Проценко.* Извлечение ионов из дуоплазматрона через

- канал с радиусом порядка дебаевской длины. Письма в ЖТФ, 1980, т. 6, в. 24
- [7] *И.С. Гасанов, М.Д. Габович, И.М. Проценко.* Плазменные линзы для формирования ионных пучков. Препринт № 8ИФ АН УССР, 1982
- [8] *И.С. Гасанов, И.М. Проценко.* Колебания в плазменной линзе и их влияние на фокусированный ионный пучок. Письма в ЖТФ, 1983, т.9, в.20.
- [9] *И.С. Гасанов, М.Д. Габович, И.М. Проценко.* Об условиях существования больших электрических полей в плазменной линзе, Физика плазмы, т. 9, в. 6, 1983.
- [10] *И.С. Гасанов, И.М. Проценко.* Неустойчивости в плазменной линзе. Препринт №11ИФ АН УССР,1984.