



Plazma i plazma fokus

Aleksandra Milošević¹

Kristali, tekućine i plinovi predstavljaju uobičajena agregatna stanja u kojima se javlja materija na Zemlji.

Plin je najneuređenije agregatno stanje koje se javlja u zemaljskim uvjetima. Svaka čestica (atom ili molekula) kreće se neovisno od ostalih jer je srednja kinetička energija po čestici vrlo velika (red veličine od nekoliko desetina do 1 eV ($1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$)). Stoga možemo reći da međumolekulske (Van der Waalsove) sile razmjerno malo utječu na kretanje čestica.

Što se događa ako se plinu dovodi energija, odnosno ako se njegova temperatura i dalje povećava? Tada nastaje novo agregatno stanje, s velikom srednjom energijom po čestici (oko 10 eV) koje se zove *plinska plazma*. Plazma je naziv za stanje jako ili potpuno ioniziranog plina. Prijelaz iz stanja plina u stanje plazme je prijelaz izvjesnog postotka prisutnih atoma iz neioniziranog u ionizirano stanje. Osnovna razlika između neutralnog plina i plinske plazme, je u tome što je u plinskoj plazmi prisutno elektromagnetsko polje. Ono brzo fluktuiru u vremenu i jako se mijenja od točke do točke, tako da svojom Lorentzovom silom utječe na kretanje nabijenih čestica plazme. Za plazmu je karakteristična kolektivna interakcija, prouzrokovana Coulombovim silama dugog dometa.

Termin “plazma” prvi put je upotrijebio Langmuir 1929. g. kako bi opisao stanje plina u pozitivnom stupu plinskog pražnjenja niskog tlaka, stanja za koga je Crookes rekao da se radi o materiji u četvrtom agregatnom stanju, parafrazirajući antičku filozofsku koncepciju o četiri elementa: zemlji (kruta tvar), vodi (tekućina), zraku (plin) i vatri (plazma).

U zemaljskim uvjetima plazma predstavlja rijetku formu postojanja tvari (munja, polarna svjetlost, ionosfera). Plazma se može stvoriti u laboratorijskim uvjetima, putem plinskog pražnjenja, izazvanog protjecanjem struje kroz djelomično ionizirani plin, između dvije elektrode. Osnovni tipovi plinskog pražnjenja su:

- Tinjavo pražnjenje – uspostavlja se na niskom tlaku (nekoliko mbara) pri strujama od nekoliko mA i naponu od oko 100 V. Elektroni se u volumenu proizvode sudarnim procesima i svjetlosnim kvantima.
- Lučno pražnjenje – odvija se pri višim pritiscima. Napon je oko 10 V. Elektroni nastaju termoemisijom s katode, koja je usijana. Plin je u stanju plazme.
- Pražnjenje iskrom – pri visokim naponima pojavljuje se uzak kanal iskre, u čijem se volumenu formiraju nositelji naboja.

Ovako dobivene plazme koriste se za izradu svjetlećih cijevi, plazmenih barijera, koriste se pri jetkanju površina u proizvodnji poluvodiča itd.

U laboratorijima mogu se proizvesti male količine plazme. Visokotemperaturna plazma može se kontrolirati magnetskim poljem. Vremenom ono postaje nestabilno

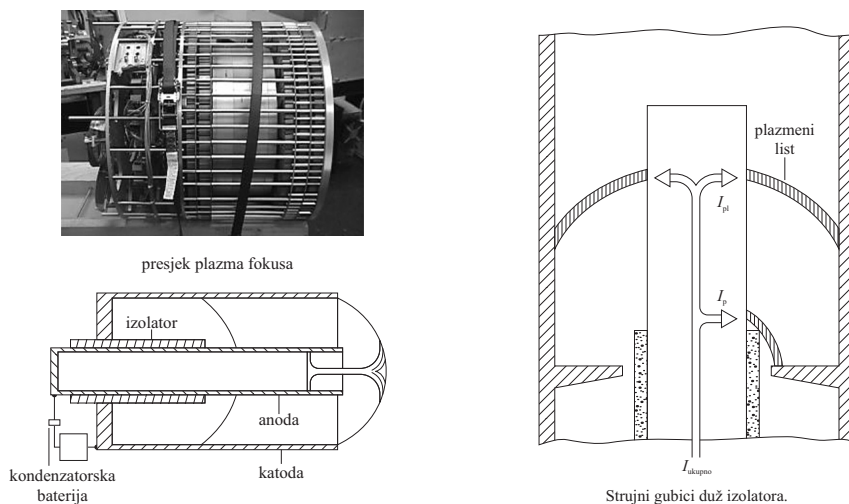
¹ Autorica je dipl. fizičarka u Beogradu; e-pošta: einstein65@beotel.net

i razvlači toplu tvar po unutrašnjosti uređaja. Postavlja se problem, kako održati vruću plazmu. Priroda je ovaj problem riješila gravitacijskom silom. U laboratorijskim uvjetima radi se s plinom, čija je masa vrlo mala, pa stabilno stanje treba stvoriti bez pomoći gravitacijske sile. Stoga fizičari pribjegavaju sljedećim pravcima:

- *Model neovisnih čestica*: plazma se promatra kao skup elektrona i pozitivnih iona koji čine plin. Problem je kako kontrolirati pojedine čestice i dovoljno ih zagrijati npr. da bi dosegnule temperaturu fuzije.
- *Model geometrijske strukture stanja plazme* u službi održanja plazme. Plazma se tretira kao magnetohidrodinamički objekt, koji uzima u obzir da u plazmi pored magnetskih djeluju i hidrodinamičke, tzv. Magnusove sile, [1].

U svemiru je plazma dominantno agregatno stanje. Preko 90% cjelokupne materije svemira nalazi se u stanju plazme, dijelom kao stelarna (zvjezdana) plazma, a dijelom u obliku interstelarnog (međuzvjezdanog) plina. Interstelarna plazma se odlikuje malom gustoćom (čestica/cm³) i niskom temperaturom. Stelarna plazma se odlikuje velikom gustoćom koja je posljedica snažnog gravitacijskog polja, visokom temperaturom koja u unutrašnjosti zvijezde dostiže od nekoliko desetina do nekoliko stotina milijuna stupnjeva, [2].

Sredinom prošlog stoljeća, znanstvenici započinju opsežna istraživanja, u cilju dobivanja kontrolirane termonuklearne fuzije u visokotemperaturnoj plazmi. Srž problema je čisto tehničke prirode. Trebalo bi sagraditi takvo fuzijsko postrojenje, koje će omogućiti odvijanje termonuklearnih reakcija (sličnih onima koje se odvijaju u zvijezdama) u kontroliranoj formi, odnosno u laboratorijskim uvjetima.

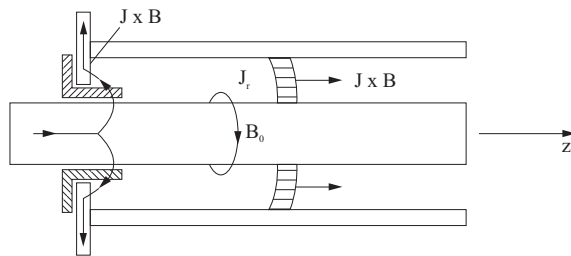


Jedan od prvih konstruiranih fuzijskih postrojenja je *plazma fokus*, koji fizičari nazivaju Mali-Veliki stroj. U njemu se proizvodi plazma gustoće do 10^{26} m^{-3} , temperature 100 milijuna stupnjeva. Plazma fokus je vakumska elektronska cijev, u kojoj su smještene dvije cilindrične koaksijalne elektrode promjera 1–100 cm. One su na jednom kraju spojene s polovima kondenzatorske baterije. Prije početka pražnjenja u cijev se ubrizgavaju male količine vodika ili deuterija, koji predstavljaju radni plin. Početne koncentracije čestica su obično oko 10^{22} m^{-3} . Tlak plina je od 5–10 mbar-a. Kada se preko svijećice iz kondenzatorske baterije (10–300 kV, 1 kJ–1 MJ), dovede napon na elektrode, “skače” iskra. Jako električno polje između elektroda predaje

energiju elektronima koji se oslobađaju i ubrzani jakim električnim poljem, pogađaju druge elektrone u molekulama plina. Predaju im energiju i odvajaju ih od atoma. Ovim procesom za vrlo kratko vrijeme, plin biva ioniziran i pretvoren u plazmu. Elektroni, kao mnogo pokretljiviji dolaze do zida cijevi, i nabijaju ga negativno, tako da plazma postaje pozitivnija. Čestice velikom brzinom padaju na zid cijevi, uslijed čega dolazi do procesa erozije.



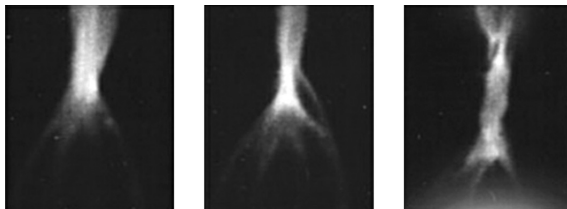
Ukoliko su brzine čestica iz graničnog sloja, iznad graničnih vrijednosti, tada dolazi do kidanja atomskih veza elemenata zida, tako da otuda počinju izlijetati pojedinačni atomi. Efekti ovog raspršenja nastali bombardiranjem brzih čestica elektrona i iona, ovise od mase i energije bombardiranih čestica i od materijala zida. Na mjestima kontakta između elemenata zidova komore i graničnog sloja plazme, zbog različitih masa elektrona i iona, formira se tanak sloj u kome nastaju jaka električna polja, koja ubrzavaju ili usporavaju čestice plazme, ovisno od njihovog naboja. U plinu se uz zidove cijevi formira tanak sloj plazme i time otpočinje protjecanje struje. Struja pražnjenja teče između elektroda formirajući strujni ili plazmeni list. Plazmeni list se u početku kreće radijalno, a potom se aksijalno ubrzava do brzine oko 2 m/s (za vrijeme porasta struje). Paralelne struje istog smjera se privlače i dolazi do radijalnog sažimanja. Prolazak struje je praćen izdvajanjem Joulove topline, a to dovodi do povećanja temperature, a time i do porasta tlaka. Struja teče po aksijalnoj osi, a magnetsko polje je azimutno i raste linearno s udaljavanjem od osi. Na izlazu iz međuelektrodnog prostora, pod djelovanjem azimutnog magnetskog polja plazme, koja se kreće u smjeru aksijalne osi, Lorentz-ova sila usmjerena duž osi elektroda, sažima plazmeni list u radijalnom pravcu.



Pogonska sila u prekidu i osni predio ubrzanja.

Glavne karakteristike plazma fokusa su velike srednje gustoće čestica (10^{26} m^{-3}), visoke temperature elektrona i iona reda do nekoliko keV i turbulentne osobine plazme. Električna energija se pretvara u magnetsku, a tijekom kompresije dio magnetske prelazi u kinetičku, što ima za posljedicu grijanje i ubrzanje snopova čestica plazme. Azimutno magnetsko polje sažima plazmeni stup, što dovodi do porasta gustoće struje. Obzirom da je jačina azimutnog magnetskog polja razmjerna jačini struje, to dovodi do još jačeg sažimanja plazmenog stupa, sve dok ne dođe do okretanja smjera struje i ona počinje

teći u suprotnom smjeru. To je poznato kao Alfenova granica. U završnoj fazi sažimanja formira se plazmeni čvor i on predstavlja zatvorenu konfiguraciju. Nastaje kada se više plazmenih niti unutar plazmenog lista odvoje od elektroda i zatvore same u sebe, obrazujući prsten. Plazmeni čvor je poznat kao vruća točka. Njezina gustoća energije je oko milijardu puta veća od početne, uskladištene u kondenzatorskoj bateriji.

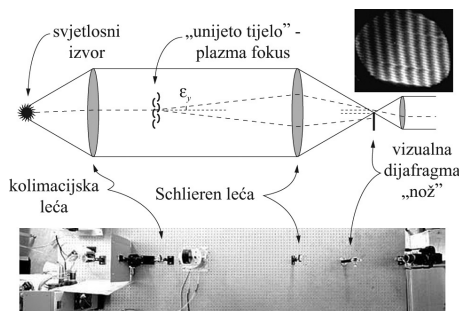


Na izlazu iz međuelektrodnog prostora obrazuje se gusta plazma koja se naziva plazma fokus. Energija vruće točke pretvara se u energiju relativističkih elektronskih i ionskih snopova i emitiraju se X -zrake.

Dinamičke osobine plazma fokusa su u najvećoj mjeri određene strujom plazme i strujom plazmenog lista u kome ta struja teče. Jedan od problema plazma fokusa je taj što struja pražnjenja samo djelomično ulazi u kompresiju. To je posljedica tehničke nesavršenosti geometrijskih dimenzija cijevi, materijala od kojeg su napravljene elektrode i izolatora.

Najjednostavnije dijagnostičke metode za određivanje koncentracije elektrona u plazma fokusu su Schlieren metoda i skretanje snopa. Prednosti ovih metoda su relativno jednostavne eksperimentalne postavke, [1].

Schlieren metoda



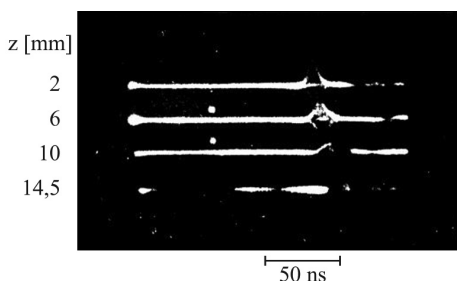
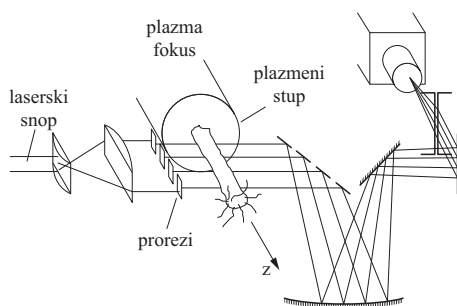
Kolimirani snop, dobiven iz izvora, prostire se kroz neperturbiranu sredinu. Optički sustav fokusira neperturbirani snop. Ako se u fokus optičkog sustava postavi vizualna dijafragma tzv. nož, ona blokira snop. Na zastoru se dobiva zatamnjjenje (mrak). "Unošenjem tijela" – plazma fokus, dolazi do perturbacije sredine, koja dovodi do promjene indeksa loma.

Zrake se počinju "zakrivljavati" i valna fronta je "iskrivljena". Uslijed toga neke zrake ne prolaze kroz fokus optičkog sustava, stoga se na zastoru dobiva sustav interferentnih, svijetlih i tamnih linija. Raspodjela intenziteta povezana je s gustoćom elektrona u

plazmi. Iz slike zatamnjenja i osvjetljenja dobiva se informacija o gustoći elektrona u plazmi, [3].

Skretanje snopa

Metoda skretanja snopa koristi se u eksperimentu plazma fokusa, za mjerenje gustoće za vrijeme faze maksimalne kompresije. U ovoj fazi plazma pokazuje približno cilindričnu simetriju i dostiže gustoću od oko 10^{19} cm^{-3} . Svjetlost koja dolazi iz Xe-lasera, širi se pomoću cilindrične leće u paralelni snop eliptičnog presjeka. Četiri jednostruka snopa su "maskirana" sustavom s četiri blende. Snopovi prolaze kroz plazmeni stup, ispred kraja unutarnje elektrode na osi simetrije. Pravokutne blende su tako odabrane, da snop ozračuje pun promjer plazmenog stupa. Nakon prolaska kroz fokus plazme snopovi skreću uz pomoć sustava ogledala, do proreza na kameri. Prorez je postavljen u fokalnoj ravni paraboličnog ogledala.



Sustav ogledala je postavljen tako da se četiri snopa fokusiraju okomito jedan iznad drugog na prorez. Prorez je orijentiran tako da se fokalne točke snopova kreću duž proreza skrenute za 90° u odnosu na aksijalnu os. Širina proreza odgovara vremenskoj rezoluciji kamere. Kamera slika linije. Točan raspored profila gustoće nije poznat. Pretpostavlja se da je to parabolični profil gustoće. Najveća gustoća je postignuta u blizini elektrode. Metoda skretanja snopa je pogodna za mjerenje vremenske varijacije maksimalnih gustoća elektrona u aksijalnom segmentu gustog plazma fokusa, s relativno grubom prostornom rezolucijom. Nedostatak metode su sustavne pogreške koje se javljaju zbog nesigurnosti profila gustoće, [4].

Literatura

- [1] *A new Method for Electron Density Determination in Plasma Focus III-436*, Bochum, 1993.
- [2] NIGEL HENBEST, *The Exploding Universe*, Marshall Cavendish Limited, 1979.
- [3] Ю. И. Островский, М. М. Бутусов, Г. В. Островская, *Голографическая интерферометрия*, Moskva Nauka 1990.
- [4] H. SCHMIDT, B. RUCKLE, *Beam Deviation Method as a Diagnostics Tool for the Plasma Focus*, *Applied Optics*, Vol. 17, No. 8, 4/1978.