

Laboratoorsed tööd plasma-fookus-seadmega

Eesmärgid:

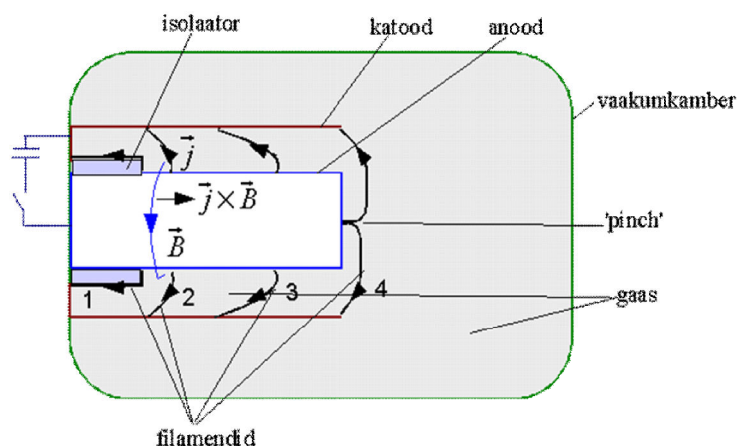
1. Uurida, kuidas sõltub plasmakihi liikumiskiirus plasma-fookus-seadme PF-12 katoodide ja anoodi vahel töögaasi rõhust.
2. Hinnata, milline osa kondensaatorite patarei koguenergiast muudetakse kiirete ionide energiaks; leida kiirete ionide energiavoog etteantud kaugustel anoodist.

Töövahendid:

Põhiliseks uurimisvahendiks on plasma-fookus-seade PF-12 koos juhtimisseadmetega. Diagnostikaks kasutatakse antud uurimustes järgmisi andureid: rõhu-, voolutugevuse, dI/dt ja pingeandurid koos digitaalostilloskoobi LeCroy WaveSurfer 42Xs-ga.

Teoreetiline osa.

Tutvuge plasma-fookus-seadme tööpõhimõttega [1, 2]. Nagu kirjanduses toodud kirjeldusest selgub, siis vooluringi sulgemisel tekitatakse süsteemis kondensaatorid-juhtmed-plasmakambri plasma sumbuva elektriline võnkumine. Süsteemi mahtuvuse moodustavad põhiliselt kondensaatorite mahtuvused, induktiivsus on tingitud osalt kondensaatorite induktiivsusest, osalt ka juhtmete induktiivsusest, elektriline takistus on suuremalt jaolt tingitud juhtmete ja kondensaatorite takistusest. Võrreldes juhtmete takistusega võib plasma takistuse lugeda enamasti praktiliselt nulliks. Siiski, teataval töörežiimil, st juhul, kui tekib nn pitse ehk pintš, suureneb plasma takistus hüppeliselt tänu plasmas tekkinud turbulentsidele ning süsteemi dünaamika kirjeldamisel ei saa jätta seda arvestamata. Pitse tekib hetkel, kui plasmakambris asuvate katoodide ja anoodi algusest liikuma hakanud plasma voolukiht surutakse kokku Lorentzi jõu poolt, kus q on laeng, $\vec{v}$ on laengu liikumise kiirus (antud juhul – laengute liikumise kiirus ühelt elektroodilt teisele ehk anoodi pinnaga risti olevas suunas), $\vec{j} = q\vec{v}$ on voolutihedus ja $\vec{B}$ on magnetiline induksioon (vt joonis 1). Ideaalsel juhul tekib pitse hetkel kui voolutugevus on maksimaalne, sel juhul läheb elektrivoolust suurim osa turbulentsustes osalevate ionide-elektronide kineetilise energia tõstmiseks. Nagu näitavad mõõtmised, antakse ionidele energia umbes 100 keV, st ionide kineetiline energia suureneb 100-1000 korda. Kiiretele ionidele ja elektronidele antava koguvõimsust võib hinnata seosega $W_k = \Delta U \Delta I$, kus ΔU on pingelang vooluahelas pitse hetkel ning ΔI on voolutugevuse muutus vooluahelas pitse hetkel.



Joonis 1. Plasmakihi levik katoodi ja anoodi vahel erinevatel ajahetkedel (1-3). Lahenduse viimases

staadiumis surutakse plasmakiht kokku tiheda plasma kimbuks (4), milles tekkivad turbulentsused suurendavad plasma takistust.

Nagu näitavad katsed, siis selline plasmakihi liikumine nagu on näidatud joonisel 1, toimub üldjuhul kambris kasutatava gaasi (alg)rõhu kindlas vahemikus. Liiga suure või liiga väikese rõhu korral võib katoodi ja anoodi vaheline läbilöök tekkida mitte mööda isolaatori pinda, vaid anoodi ja katoodi vahelises ruumis tervikuna. Sel juhul plasma kokkusurumist pitseks ei toimu.

Antud töö esimeses osas tuleb uurida pitse toimumise aja muutumist sõltuvalt plasmakambris oleva gaasi rõhu muutusest ning leida etteantud kondensaatorite pinge korral sobivaim gaasi rõhk.

Töö teises osas tuleb hinnata ionidele ja elektronidele pitse toimumisel antavat koguenergiat ning hinnata kiirete ionide voo võimsustihedust 3 ja 10 cm kaugusel anoodist.

I OSA Plasmakihi liikumiskiiruse sõltuvus töögaasi algrõhust.

Töö käik

Tutvuge digitaalostsillograafia LeCroy 42x WaveSurfer seadistamise võimalustega [3]. Ühendage ostsillograafi esimesse kanalisse voolutugevuse I andur ning teise kanalisse dI/dt andur. Seadistage digitaalostsillograaf nii, et mõõtmise algaks, kui esimeses kanalis on pinge tõusnud üle 1,2V ning mõõtmise kestuseks määrake 10 μs (PF-12 korral toimub üks täisvõnge vähem kui 8 μs jooksul). Seadistage esimeses kanalis ühikud järgmiselt 1 ühik = 2 V. Arvestage edaspidi, et voolutugevuse anduri väljundpinge 1 V vastab 23 kA-sele voolutugevusele. Kanalis 2 seadistage 1 ühik = 25 V. Kanalis 2 mõõdetakse dI/dt suvalistes ühikutes, kuid juhul, kui pitse on väike ja seega ka voolutugevuse langus vooluahelas on väike, siis dI/dt -s on hüpe märgatav [1, joonised 16-17]. Seetõttu kasutatakse dI/dt graafikut praktikas pitse toimumise aja paremaks määramiseks. Seadistage digitaalostsillograaf mõõtma ühekordset impulsi (Single).

Tutvuge PF-seadme dokumentatsiooni, tööjuhendiga ning selles toodud ohutuseeskirjadega.

Enne PF-seadme sisse lülitamist ühendage plasmakamber vaakumpumbaga. Lülitage sisse pump ning avage seejärel pumpa ja kambrit ühendav kraan. Umbes 10 minutit pärast pumpamise alustamist lülitage sisse rõhuandur. Antud kambri juures kasutatakse rõhuandurina CERAVAC-91 mõõtepiirkonnaga 0,01-100 Torr, seetõttu mõõtmise alustamisel maksimaalväärtusest kõrgemal väärtusel võib häirida anduri kalibratsiooni. Kui PF-seadet pole mitu päeva kasutatud, on soovitatav pumbata vähemalt 30 minutit, et kambrit eemaldada ka kambriseintesse difundeerunud õhk.

Pärast pumpamise lõpetamist sulgege pumba ja kambri vaheline kraan ning avage gaasiballooni (kas argoon või lämmastik, sõltuvalt juhendaja poolt määratud gaasist) vaheline kraan. Laske kambris gaasi kuni rõhk tõuseb 12 Torr-ni, pärast seda sulgege kraan.

Lülitage sisse PF-seadme juhtarvuti, seejärel PF-seade. 1-2-minutit pärast PF-seadme sisse lülitamist käivitage programm PFD Monitor. Juhul, kui PF-seade töötab normaalselt, peaksid kõik indikaator-tuled kontrollprogrammil PFD Monitor olema rohelised. Kui see nii ei ole, pöörduge juhendaja poole seadme töö täiendavaks kontrolliks.

Seadme töörežiimi saavutamiseks on soovitatav teha alguses mõned 'lasud' (4-5) madalaima pinge korral (16kV) gaasi rõhuga umbes 12 Torr. Seadistage kondensaatorite pinge PFD Monitorilt. Käivitage PFD Monitorilt kondensaatorite laadimine vajutades nuppu Charge. PFD Monitori indikaatortabloo näitab pinget kondensaatoritel. Tavapärase automaatrežiimi korral sulgeb trigger-süsteem kondensaatorite-juhtmete-plasmakambri vooluahela kui kondensaatorite pinge on saavutanud etteantud pinge väärtuse. Juhul, kui ostsilloskoop on õigesti seadistatud, peaks selle ekraanile ilmuma graafikud analoogiliselt joonistega 16-17 [1].

Korrake katseid 4-5 korda.

NB! Katsete vaheline aeg ei tohi olla vähem kui 3 minutit.

Kui graafikud näitavad pitse ilmutumist, võib alustada eksperimentide sooritamist 1. eesmärgi saavutamiseks. Pumbake kambr tühjaks, laske sisse uus nõ värske töögaas rõhul umbes 14-16 mbar (sõltuvalt etteantud gaasist). Korrake katseid igal rõhul 2 korda rõhkude vahemikus 6-16 mbar. Ostsilloograafia saadud graafikud salvestage ostsillograafi kõvakettale andmete hilisemaks täiendavaks analüüsiks.

Tabel 1. Pitse toimumise aeg sõltuvana gaasi rõhust plasmakambris.

Kondensaatorite pinge U (kV)	Gaasi rõhk p (mbar)	Pitse toimumise aeg t (μs)	Täiendavad märkused (salvestatud failide nimed)
	6		
...	...	...	...
	16		

Koostage andmetabel nii nagu näidatud tabelis 1, pitse toimumise aja saab hinnanguliselt määrata ostsillograafi vahenditega. Pitse toimumise täpsem ajahetk tuleb hiljem määrata täpsemalt salvestatud andmetest kasutades andmetötluseks programmi Origin Pro 8.

Töögaasi on soovitatav vahetada vähemalt 10 'lasu' järel. Pärast katsete sooritamist lülitage välja PFD Monitor, seejärel PF-seade. Ühendage lahti pumpa ja kambrit ühendav voolik ning laske plasmakambrisse gaasi kuni rõhk kambris tõuseb umbes 100 mbar-ni.

Tulemuste esialgne analüüs

Skitseerige sõltuvuse $t = f(p)$ graafik. Millise funktsionaalse sõltuvuse järgi on t ja p teineteisega seotud?

Plasmakihi anoodisihilise kiiruse hinnanguks tuleb arvestada, et anoodi pikkus on 9 cm. Kiiruse hinnanguks võib lihtsustatult eeldada, et plasmakiht liikus anoodi suunas ühtlaselt kiirenevalt, kusjuures algkiirus oli 0. Tuletage neil eeldustel valem plasmakihi lõppkiiruse arvutamiseks.

Leidke valemi ning tabeli 1 3.veeru andmete järgi plasmakihi anoodisuunalise liikumise kiirus erinevatel rõhkudel. Skitseerige sõltuvuse $v=f(p)$ graafik. Millise seosega võiks teie hinnangul tegemist olla? Leida plasma ionide kineetiline energia keV-des.

Töö aruanne ja analüüs.

Töö aruanne peab sisaldama töö eesmärki, sisaldama kasutatud vahendite nimekirja, nende tehnilisi andmeid. Aruandes tuleb ära tuua eksperimendi skeem ning selgitused, kuidas eksperiment on läbi viidud. Töö tulemused tuleb esitada tabelina, milles on toodud peale mõõtetulemuste ka arvutatud andmed (Tabel 2) ning graafiliselt – sõltuvuste $t = f(p)$ graafik ja $v=f(p)$ graafikud. Aruande vormistamisel tuleb arvestada TLÜ laboratoorsete tööde vormistamise reegleid (vt Mehaanika, Soojusõpetuse, Optika või teiste praktikumide juhendeid).

Leida eeldusel, et pitse tekkimise aeg sõltub gaasi rõhust lineaarselt, st $t=ap + b$, kus a ja b on konstandid, parameeter a . Leida Pearsoni regressioonikordaja (statistilise analüüsi läbi viimiseks vt näiteks Soojusõpetuse või Aine struktuuri labortööde juhendeid: <http://www.tlu.ee/~magda/anneliroode>).

Tabel 2. Plasmakihi leviku kiiruse sõltuvus töögaasi rõhust

Gaasi rõhk p (mbar)	Pitse toimumise aeg $t(s)$	Plasmakihi levimise kiirus (m/s)	Ioonide energia (J)	Ioonide energia (keV)

Täiendavalt võib korrata tööd teise töögaasiga ning võrrelda eksperimentide tulemusi. Kuidas sõltub plasmakihi levimise kiirus gaasi molaarmassist?

II OSA

Plasma-fookus-seadme üheks kasutusala on kõrgetemperatuurse plasma ja materjalide vastastikmõju uurimine. Täpsemalt, PF-seadet kasutatakse kõrge energiaga osakeste – kiirete ionide – tekitamiseks, mis koos aeglase plasmaga suunatakse anoodi ees olevale nn märklauale. Plasma ja materjalide vastastikmõju hindamiseks ja analüüsiks on vaja teada märklauda tabava ionide-plasma voo võimsustihedust Q (võimsus pindalaühiku kohta).

Üheks kaudseks, kuid ka ebatäpseks meetodiks on ionide koguenergia hindamine eeldades, et siis, kui pitse ajal plasma takistus tõuseb ning seetõttu plasmale antakse lisaenergia, siis see lisaenergia läheb täielikult kiirete ionide ja elektronide kineetilise energia tõstmiseks.

Eksperimenti läbi viimiseks tuleb katse seadistusel lähtuda üldjoontes I OSA katsevahendite seadistust järgmiste erinevustega. dI/dt anduri asemel ühendage ostsillograafi teise mõõtekanalisse (pesasse) pinge U andur. Seadistage teises kanalis üks ühik võrdseks 20 V-ga. Edasistel mõõtmistel tuleb arvestada, et anduri pinge 1 V vastab mõõdetavale pingele 200V, st 10 V vastab mõõdetavale pingele 2kV ning üks ühik seega 4 kV-le.

Katsed tuleb läbi viia ühel fikseeritud kondensaatoril pingel (16-18 kV) ning antud pingele sobivaimal gaasi rõhul. Sobivaima gaasi rõhu saab I OSA mõõtmistega läbi viidud andmete põhjal.

Seadme töörežiimi saavutamiseks on soovitatav teha alguses mõned 'lasud' (4-5) madalaima pinge korral (16kV) gaasi rõhuga umbes 12 Torr. Seadistage kondensaatorite pinge PFD Monitorilt. Käivitage PFD Monitorilt kondensaatorite laadimine vajutades nuppu Charge. PFD Monitori indikaatoritabloo näitab pinget kondensaatoritel. Tavapärase automaatrežiimi korral sulgeb trigger-süsteem kondensaatorite-juhtmete-plasmakambri vooluahela kui kondensaatorite pinge on saavutanud etteantud pinge väärtuse.

Korrake katseid 4-5 korda.

NB! Katsete vaheline aeg ei tohi olla vähem kui 3 minutit.

Kui graafikud näitavad pitse ilmumist, võib alustada eksperimentide sooritamist 1. eesmärgi saavutamiseks. Pumbake kammer tühjaks, laske sisse uus nõ värske töögaas rõhul umbes 12-14 mbar (milline oli sobivaim töögaasi rõhk?!)

Teostage 'lask'. Ostsillograafi graafikute järgi leidke pingelang ΔU ja voolutugevuse langus ΔI pitse ajal. Võimsuskao saab leida valemiga $N_k = \Delta U \Delta I$. Salvestage ka mõõtetulemused faili, et neid hiljem Origin Pro 8 abil täpsemalt töödelda (hinnata langusid täpsemalt). Korrake katset samade parameetrite korral vähemalt 10 korda. Kui pitse hakkab nõrgenema, on vajalik gaasi ümberpumpamine. Tulemused kandke tabelisse 3.

Tabel 3. Võimsuskao arvutamine.

Kondensaatorite algpinge U_{max} (V)	Maksimaalne voolutugevus I_{max} (A)	ΔU (V)	ΔI (A)	N_k (W)

Töö analüüs ja aruanne

Eeldame järgnevalt, et kogu võimsuskadu läheb kiirete ionide ja elektronide energia tõstmiseks. Kuivõrd elektronide mass on võrreldes ionide massiga ligi 2000 korda väiksem, võib lihtsuse mõttes eeldada, et võimsuskadu läheb vaid ionide energia tõstmiseks. Arvestades, et kiirete ionide kimp levib kitsas, umbes 3°-lises kimbus [1, joonis 15] leida võimsusvoo tihedus anoodi otsast 3,5 cm kaugusel, st pitse tekkimise kohast umbes 3 cm kaugusel, ning 10,5 cm kaugusel (ehk 10 cm pitsest).

Neutronite ja gammakiirguse mõõtmised PF-12-1 on näidanud, et pitse kestab umbes 100 ns. Leida seda arvestades pitse jooksul kiiretele ionidele antav koguenergia. Kasutades töö I OSA-s Tabeli 2 andmeid arvutage, kui suur oli pitse jooksul kiirendatud ionide arv. Kandke tulemused tabelisse 4. Leidke, milline osa kondensaatorite koguenergiast on läinud pitsel kiirendatud ionide energiaks.

Tabel 4. Võimsuskadu pitsel, pitse energia ja ionide kimbu võimsusvoog.

Võimsuskadu N_k (W)	Pitse energia E (J)	Võimsusvoog 3,5 cm kaugusel anoodist P_1 (W/m ²)	Võimsusvoog 3,5 cm kaugusel anoodist P_2 (W/m ²)	Pitsel kiirendatud ioonide arv N	Pitse energia ja kondensaatorite koguenergia suhe

Töö aruanne peab sisaldama töö eesmärki, sisaldama kasutatud vahendite nimekirja, nende tehnilisi andmeid. Aruandes tuleb ära tuua eksperimendi skeem ning selgitused, kuidas eksperiment on läbi viidud. Töö tulemused tuleb esitada tabelina, milles on toodud peale mõõtetulemuste ka arvutatud andmed (Tabel 4). Aruande vormistamisel tuleb arvestada TLÜ laboratoorsete tööde vormistamise reegleid (vt Mehaanika, Soojusõpetuse, Optika või teiste praktikumide juhendeid).

Tulemuste analüüsiks tutvuge teiste autorite poolt läbi viidud uuringutega võimsusvoo hinnanguks (näiteks [4, 5]). Kas teie poolt saadud tulemused langevad suurusjärgu poolest kokku analoogiliste seadmete poolt läbi viidud uuringutulemustega?

Kirjandus.

- [1] T. Laas. Sissejuhatus plasmafüüsikasse. Loengukonspekt. 2010. (<http://www.tlu.ee/~tony/oppetoo/plasmafyysika/Plasmaloeng.pdf>)
- [2] L. Soto. (2005) New trends and future perspectives on plasma focus research. *Plasma Phys. Control. Fusion*, **47**, A361.
- [3] WaveSurferi manuaal (http://www.lecroy.com/files/manuals/WSXs-A-GSM-E_RevA.pdf)
- [4] V.N. Pimenov, E.V. Demina, S.A. Maslyaev, L.I. Ivanov, V.A. Gribkov, A.V. Dubrovsky, Ü. Ugaste, T. Laas, M. Scholz, R. Miklaszewski, B. Kolman, A. Tartari (2008) Damage and modification of materials by pulsed ion and plasma streams in Dense Plasma Focus Device. *Nukleonika*, **53** (3), 111-121.
- [5] Barashkova, T.; Laas, T.; Pelõhh, V. (2010). Methods for Estimating the Damage Factor of Materials under the Influence of Plasma. In: *Proceedings of the 7th International Conference of DAAAM Baltic Industrial Engineering: 7th International Conference of DAAAM Baltic Industrial Engineering, Tallinn, Estonia, 22-24.aprill 2010. (Toim.) Küttner, R.* Tallinn: Tallinn University of Technology Press, 2010, 462 - 467.