

Jānis Blahins

DISERTĀCIJA

Tehniskās fizikas apakšnozarē

Novel Approaches in Ion Beam Implantation Technologies

Jaunas pieejas jonu kūļa izmantošanas tehnoloģiskajos risinājumos

Anno 2021

Darba mērķis

Attīstīt jaunas efektīvas metodes jonu iegūšanā un manipulēšanās, kas ļauj izstrādāt salīdzinoši neliela izmēra mazcenas modulāru jonu implantācijas tehniku, kas piemērota maziem un vidējiem inovāciju uzņēmumiem, un ļauj augstas tīrības apstākļos lietot mazu un vidēju enerģiju bora jonu implantāciju, ar iespēju viegli adaptēt sistēmu citiem jonu un dažādiem iedarbību veidiem.

Promocijas darbam izvirzītie uzdevumi

Detaļām bagāta apraksta izveide par esošajām metodēm un tehniskajām iespējām realizēt jonu implantācijas procesu, ko pēcāk nedaudz pārformatējot ir iespējams izdot kā grāmatu

Aparāta koncepta prototipa datormodelēšanas darbi

Aparāta koncepta prototipa izgatavošanas un testēšanas darbi

Pienācīga daudzuma zinātnisko publikāciju skaita sarakstīšana un publicēšana

Promocijas darba aizstāvēšana

Darba rezultāti un zinātniskā novitāte

Ar koncepciju, kas atainota šajā promocijas darbā nav zināms neviens instruments pasaulē, kas būtu sērijveidā ražots, izmantodams te atainotās nostādnes. Vienlaikus, tāda instrumenta lietošana, statistiski ticamā rakursā, varētu interesēt līdz 70% šajā industrijas nozarē strādājošos uzņēmumus, tātad tā ir gan nozīmīga ekonomikā, gan inovatīva zinātnē. Arī izstrādātais bora jonu avots ir uz dažādu autoru svaigu publikāciju kombināciju balstīta mērķtiecīga inovācija, kāda šobrīd nekur ražota netiek.

Promocijas darba struktūra ir atspoguļota satura rādītājā. Ar atkāpi saturā noformēti “mazie” apakšvirsraksti.

SATURS

Darba mērķis, uzdevumi, novitāte 3

Saturs 3-4

Tēzes

Ievads un pamatjēdzieni 4-13

Joni un plazma 6

Elektronu afinitāte 10

Implantācija 11

Jonu avoti implantācijai 13

Roflex 13

Gunilla 16

Griba(m) 16

Elektrodi 19

Jonu strāva 19

Elektrodu iekare 21

Dobā Katoda sistēma 21

Jonu avotu klasifikācija 23

Jaunākās tendences 26

Pusvadītāju ražošanas principi 28

Jonu ekstrakcija 33

Tehniskais uzdevums un aprēķini	35
Eksperiments ar borskābi	38
Masas zudums	39
Jonu optika	39
Einzellēcas	39
Elektrodu iekare	40
Lādiņselekcijas kvadrupols	41
Elektrostatiskās optikas datormodelēšana	42
Elektrodi	42
Jonu paātrināšana	43
Kokrofta-Waltona shēma	43
Videroe DC paātrinātājs	44
RF LINAC sistēma	45
Akseleratora jauda	46
Masselekcija	46
Magenētiskā sekotra ierīces	46
Vīna filtrs	48
RF-QMS ierīces	48
Implantēšanas doza un dziļums	51
Aprēķini masselekcijai	52
Iespējas vakuumtraktam	56
Barošanas avotu shemotehnika	58
Par datorsaskarnes interfeisiem	58
Par ICP ģeneratoriem	61
Iespējas parauga terminālim	64
Par ekonomiku	65
Plānotā implantēšanas aparāta pilna blokshēma	66
Detalizācijas līmenis 5 - Par eksperimentālo darbu un rezultātiem	66

Tēzes

- 1) Mazizmēra augstas tīrības jonu implantācijas aparāta konceptparauga izstrādei būtiska ir jonu avota izstrāde, kas izmanto cietvielu bora izejvielu, labāk kristālisko boru vai, pats mazākais, bora lantanaīdu.
- 2) Mazizmēra nodrošināšanai jonu implantācijas aparātam būtiska ir magnētiskā masselekcijas filtra aizstāšana ar kvadrupola masas filtru. Palīgtēze – šī QMS filtra elektronikas apsaistei racionālākais paņēmieni ir DDS ģenerators. Palīgtēze – Visus sistēmas elektronikas blokus visracionālāk sasaistīt ar datoru, izmantojot i2c interfeisu.
- 3) Augstas tīrības nodrošināšanai būtiski ir vakuumtraktā pēc iespējas vairāk detaļu, attiecībā uz šo detaļu virsmas laukumu, aizstāt ar kvarcu kā materiālu šo detaļu izgatavošanai.

Ievads

Pēc Universitātes pabeigšanas nonācu LU-CFI. Tur doktora darbu sāku rakstīt pirmo reizi. Ritēja 1986. Sāka dzimt bērni un disertācija nojuka. Otrreiz disertāciju sāku rakstīt ap 2000., un jau citā vietā un citā tēmā. Sanāca, ka bērni jau lieli un ģimene ir pa šuvēm, kāda tur vairs disertācija. Tā nu šoreiz dzīve ir vairāk sakārtota un pienākusi kārtā trešajai reizei 63 gadu vecumā, un kā tautas gudrība vēsta - trīs lietas esot labas lietas.

Kad jaunībā izvēlējos kur mācīties, es gribēju zināt VISU. Tā nu ienācās, ka vienīgā vieta, kur visu patiešām pa druskai arī mācīja, bija Tehniskās Fizikas katedra Universitātē. Ak vai, vēlāk tā tika likvidēta pati pirmā, iespējams tieši tāpēc. Tā nu notikās, ka mans skata lauks, tāpat mūžā strādāto profesiju skaits ir saraksta mēroga lielums, lūdzu nenobītiēties, ja šajā rakstudarbā tiksiet izvadāts pa ļoti dažādiem un ļoti atšķirīgiem tehnikas slāņiem - var iedrošināt, ka tie visi ir pa spēkam katram Homo, kas tiecas būt Sapienss. Centīšos pieturēties pie shēmas - katru nodaļu sākt ar vienkāršotu izklāstu neaizmirstot pielietojamības aspektus un ietverot pamatjēdzienu skaidrojumu, un tikai tad ar detalizētu izklāstu tiekties dziļumā.

Tā nu sanācis, ka Tehniskajā Fizikā jūtos visstiprāk drošs uz abām kājām, tāpēc aizstāvēšanai vēlams jānotiek Tehniskās Fizikas jomā. **Atruna Nr.1** - Literatūras apskats, ja to dotu kā visa rakstudarba vienumu, sākumā vai beigās, tad būtu ļoti apgrūtināši atcerēties un pat sameklēt, kas uz ko attiecas, nemaz nerunājot par nogurdinošu šķirstīšanu. Tāpēc literatūras analīzes sadaļa dota katras lapaspuses fūtnoutā. Noskatīju šo paņēmieni no zinātnisko publikāciju dižgariem, patiešām ērta un pārskatāma metode, kas, pat ja neatbilst standartprasību kanonam pēc burta, tad noteikti atbilst tam pēc gara. Un vispār, vienu no trim reizēm studējot doktorantūrā, man tika mācīts, ka doktora darbam nav un nedrīkst būt ļoti strikti rāmji saturam un noformējumam, tai skaitā minot gadījumu, kad kāds doktorants nolēmis aizstāvēt darbu dzejā, bet cits zumēdams kā bite (nu tas, protams, bioloģijā un par bitēm). Tik eskstrēms neesmu, un esmu pārliecināts, ka atsauču lietojums, kā to daru te, ir ļoti ērts un racionāls.

Vēl viena svarīga **atruna Nr.2** šajā Disertācijā - attēli. Jebkuru darbu rakstot, rodas dilemma, kā iegūt labus attēlus. Savu sarakstīto rakstu **attēlu izmantošana** jau ir disputabla, jo visdrīzāk, ka publicēšanas procesā visas tiesības uz attēlu pārņem redakcija. Vēl ļaunāk ir ar svešu rakstu attēliem, tos katru būtu jāsaskaņo ar autoriem, drīkst vai nedrīkst aizņemt pat tīri ilustratīviem nolūkiem un neba autors ir tiesīgs atļaut vai aizliegt, bet gan redakcija. Protams varētu attēlus mazliet radoši pārveidot, šo to piezīmēt, šo to noslēpt, vai vienkārši ar brīvu roku parzīmēt. Tas patiešām būtu šizofrēnisks Sīzifa cienīgs darbs, turklāt bez vajadzības. Jo visu Autortiesību pamatu pamats pilnīgi visās zemēs un valstīs bez izņēmuma (un ja ir kāds izņēmums, tas no pieņemšanas brīža ir bijis lai cik arī ne likumīgs, toties prettiesisks) ir Romas Konvencija (1961.). Tajā ir tāds 15.

pants¹. Tā kā tas ir svarīgi, citēšu to burts burtā, ar daudzpunktēm iekavās izlaižot vien pavisam uz jautājumu neattiecošas lietas (boldējums mans).

15.pants (Pieļaujamie izņēmumi)

1. (...) **izņēmumus** Konvencijas noteiktās aizsardzības īstenošanai attiecībā uz:

- a) personīgu izmantošanu,
- b) īsu fragmentu izmantošanu jaunāko ziņu atspoguļošanai,
- c) raidorganizācijas veiktu īslaicīgai izmantošanai paredzētu ierakstu, kas veikts ar pašas līdzekļiem un paredzēts pašas raidījumam,
- d) ierakstiem, **kuru izmantošana paredzēta tikai mācību vai zinātniskiem nolūkiem.**

2. (...). Taču obligātas licences drīkst paredzēt tikai tik tālu, cik tās ir saskaņā ar Konvencijā paredzētajiem noteikumiem.

Tā kā disertācijai ir tikai mācību un zinātnisks mērķis un nav komerciāla mērķa, tad saskaņā ar Konvencijas garu un burtu, šajā gadījumā ar pietāti norādot attēlu autora atsauci, ilustratīvos nolūkos "sveši" attēli izmantoti tiks - domas paskaidrošanai un izpratnes veidošanai, un visas pretenzijas šajā sakarā lūgtu adresēt WIPO (World Intellectual Properties Organisation), 34 Chemin des Colombettes, Geneva-20, Switzerland, kas ir Romas Konvencijas pirmavots.

Daži var argumentēt, ka savas lokālās valsts Normatīvo Aktu kritizēt ir ierindas pilsonim nepienācīgi, uz to var un vajag atbildēt ar citātu² – EU Obligation: All member states are legally bound to uphold the *acquis communautaire*, the body of European law including treaties, secondary legislation, and the jurisprudence of the ECJ. A failure to fulfill a legal obligation can lead to an infringement suit in front of the ECJ, and as of 1993 the failure to obey an ECJ decision can lead to a fine.³ Detalizēti konfliktsituācijas starp EU un Nacionālajiem normatīviem aktiem juridiskās fineses izdiskutē⁴, respektīvi, mātes aktam, tiklīdz uz to dota juriskā atsauce meitas akta ievaddaļā, juridiskais spēks ir augstāks. Lai arī atsauces uz lielāko Pasaulē Peer-Reviewed Enciklopēdiju tradicionāli Latvijā tiek noķengātas, tomēr tās viegli un saprotami lasās, tāpēc te atsauce teiktajam, teikt, vienkāršvalodā⁵, un references uz dziļākām zinātniskām publikācijām šai jomā atrodamas norādītā šķirkļa referenču sarakstā.

Vēl viena šī darba īpatnība, **atrūna Nr.3**. Visas **matemātikas formulas**, cik bija lietderīgi, lietotas Excel sintakses pakļautībā. Tātad, reizināšanas zīme ir *, sqrt nozīmē kvadrātsakni, bet x^{π} nozīmē mainīgā x pacelšanu pakāpē 3.141592653589793238. Tāpat darbību secību jomā $100/2/2$ būs 25 nevis 100, bet $10/2*5$ būs 25 un nevis 1. Tā kā tehnikā tik un tā vairums aprēķinu netiek veikti, kā ieņēmušās rādīt dažas Holivudas filmas, braucot ar kuģi uz dzēšlapas ar zīmuli vai uz milzīgas atlokāmas tāfeles drudzaini rakstot ar krītu, bet gan Ekselī, tad, ja šāds Ekseļa pieraksts lasītājam šķiet grūti uztverams, tā ir tikai liecība, ka šāds lasītājs pats nekad neko daudz praktiski nav rēķinājis un tāpēc ir labs laiks mainīties pašam. Lielā priekšrocība, ka ar Excel sintakses pierakstu kļūst nevajadzīgi smagnējie formulu veidošanas rīki, tādi kā piemēram **Tex**. Cita starpā, ja nu kādam noder, bez nepatīkami neveiklajiem Word līdzekļiem formulu sastādīšanā kā Math Assistant un superrīku Tex, kuru tikai jāmacās visu mūžu, lai varētu sākt lietot, ir virkne diezgan

1 - <http://m.likumi.lv/ta/id/51244-par-romas-konvenciju-par-izpilditaju-fonogrammu-producentu-un-raidorganizaciju-tiesibu-aizsardzibu>

2 - Karen J. Alter. The European Union's Legal System and Domestic Policy: Spillover or Backlash? www.jstor.org/stable/pdf/2601342.pdf

3 - Maastricht Treaty on a European Union

4 - Somssich, Réka. Cohabitation of EU Regulations and National Laws in the Field of Conflict of Laws.

Eltelawjournal_2015_2. Pieejams <https://eltelawjournal.hu/cohabitation-eu-regulations-national-laws-field-conflict-laws/>

5 - https://en.wikipedia.org/wiki/Primacy_of_European_Union_law

ērtu instalējamu rīku formulu sastādīšanai, no kuriem īpaši gribētos izcelt **Wiris** MathType, FxDraw, **Texthelp** EquatIO, **Efofex**, un īpaši izceļams **Mathcha**. Visbeidzamā, bet ne nenozīmīgākā Excel priekšrocība ir pakāpju pieraksts, kas bez lupas tik nepatīkami grūti salasāmus skaitļus, piemēram $1.33 \cdot 10^{-17}$, ļauj pierakstīt gan kā $1.33E-17$, gan retākos specifiskos gadījumos kā $1.33 \cdot 10^{-17}$.

Tā, kad atrunas noformējumam izteiktas, varam doties **pirmā līmeņa detalizācijas** dziļumā, ko pēc tam padziļināsim.

Kāpēc mani ieinteresēja tieši jonu kūļi? Pirmkārt, Jonu Kūlis, jeb kā runāja pirms gadiem 40 Jonu Stars (Ion Beam, Electron Beam v.s. Elektronnij Luč) vispār ir netriviāla un jau palēnām aizmirst sāka tehnoloģija, jo lielākais šīs jomas datormodelēšanas līdzekļu patērētājs - radiolampu konstruktorbiroju tīkls līdz ar tranzistoru izgudrošanu ir stipri pamiris, bet pārējie patērētāji ir nosacīti mazskaitliski. Tāpēc Latviešu valodā par jonu kūļu tehnoloģijām lasāmmateriālu nav daudz, bet aizmirst šīs tehnoloģijas noteikti nevajadzētu. Tāpēc, ja kāds students tālā nākotnē atrastu šai rakstu gabalā iespēju izmantot to kā mācību materiālu, tad autors justos patiesi gandarīts. Studiju laikā jaunībā man ļoti maldīgi šķita, ka pedagogija ir priekšmets, ko man dzīvē vajadzēs vēl mazāk par kompartijas vēsturi. Pasaki tikai Nekad un būs kā man, kopā pasniedzot fiziku, elektroniku un astronomiju vidējās izglītības sistēmā daļlaika darba statusā pagājuši vimaz 20 gadi paralēli zinātniskajai darbībai pamatdarbā. Respektīvi, materiāls tika kārtots tā, lai no tā pie šādas vēlēšanās varētu mācīties, tas ir - ka svarīgas detaļas no lielās kopainas nebūtu izlaistas, jo te un tagad tās nav būtiskas, kā būtu tad, ja fokusētos uz tikai sasniedzamo mērķi, tāpēc ignorējot blakusjautājumus. Tāpēc piedodiet par šķietamo "lēkāšanu" uz blakustēmām. Tās tomēr ir vajadzīgas, lai redzeslauks ietvertu visu spēles laukumu.

Un kā nonācu pie joniem vispār - ar joniem šķidrums laikam kādā mērā ir pazīstami visi skolu beidzēji, bet ar vakuumā lidojošiem joniem lielais pārsteigums ir tas, ka pat Zemes Atmosfēras un tai skaitā Saules krāsa ir atkarīga no joniem, jo īpaši no negatīvajiem joniem. Paldies Zviedru profesoram **Dagam Hanstorpam** par acu atvēršanu jonu jomā. Un jonu un/vai plazmas tehnoloģijas ir ārkārtīgi nozīmīgas visas tehnikas arsenālā kā metodes. Pēc tam radās pieprasījums sadarboties ar Spāņiem, izstrādājot eminentu zinātnieku kolektīvam specializētu jonizētas joda gāzes ultraspožu gaismas references avotu, tad nāca piedāvājums sadarboties ar Zviedriju Gēteborgā, kur virsuzdevums bija mobilas negatīvo jonu pētīšanas ierīces aparātbūve. Ja negatīvo jonu elektronafinitātes mērierīces pasaulē ir vairākas, tad pārvietojamas kā šī, Griba(m), savām rokām savāktā un saskrūvētā - bija un paliek vienīgā un stāv Rīgā, Šķūņu ielā 4. Tā nu nonāca līdz pašā sarakstītam un vinnētam **ERAF Projektam, kura mērķis** ir radīt aparātbūves šedevru jonu implantācijas jomā, kas tāpat būtu gana mobils un miniatūrs (vismaz salīdzinājumā ar automašīnas izmēriem), un vēl arī viegli pārstellējams vidažādākajiem uzdevumiem un vielām. Tā viens darbs veda pie nākamā un pieredze jonu kūļa manipulēšanā radās no uzsistajiem mentālajiem puniem, un šo uzkrāto pieredzi gribas nodot nākamajām paaudzēm.

Šī disertācija top tikko kā pieminētā ERAF Projekta ietvaros, tāpēc jonu kūļa implantācija, specifiski bora jonu kūļa, ir pats svarīgākais uzdevums Projektam, taču pēc funkcijas līdzīgie risinājumi katrā nodaļā ar citām vielām un citā sakarā tiks sniegti kā piemēri, kā šīs lietas dara citos jonu kūļu pielietojumos. Atslēgas vārdi disertācijas nosaukumā Novel Approaches jeb "Jaunas Pieejas" attiecas ne tikai uz ritentiņu pieskrūvēšanu iekārtas rāmim, bet arī uz metodēm, kā manipulēt ar jonu kūli atšķirīgi no meinstrīma ierastajām metodēm, lai panāktu kaut kādā ziņā iekārojamāku tehnisko rezultātu.

Mazliet skaidrojumu: Pirmkārt, kas ir joni un kas ir plazma.

Šķidrums joni ir vielas molekulārie fragmenti, kas peld elektriski uzlādēta pikuča formā attiecīgajā šķidrumā - ūdenī vai citā šķīdinātājā. Ķīmiķi saka tā: *Jons ir jebkāds atoms, molekula vai atomu grupa, kam negatīvais vai pozitīvais lādiņš ir vismaz par vienu elektriskā lādiņa vienību atšķiras no elektriski neitrāla stāvokļa*. Piemēram, sālskābe HCl ūdenī pati no sevis sadalās (saka - disociē) H⁺ un Cl⁻ jonus. Vai etiķskābe HCOOH disociē par H⁺ un COOH⁻. Tomēr ar šādiem joniem te mums nebūs nekāda darīšana. Protams, ja iztēlojamies molekulu kā šķībi-līku "nūjiņu", kuru satur kopā ķīmiskās saites, un saišu biežāk sastopamais veids ir Kuloniskās saites, citiem vārdiem elektrostatisks lauks, tad līdz ar to reālā molekulā vienmēr ir kāds stūrītis, kāds kaktiņš ar neizbalansētu lauku, kas ir pozitīvāks vai negatīvāks kā molekula vidēji. Šādu parādību sauc par **molekulas polarizētību** (stipri polāra molekula, vāji polāra molekula, gandrīz nepolāra molekula utt). Lai arī šādu molekulu daži jonu manipulēšanas rīki var satvert, šādas molekulas nav joni. Par jonu tās kļūst, ja atomu sistēmai kopumā trūkst vai pārpaliek vismaz viens elektrons (vai vairāki). Fizikā saka, ka *jons ir atoms, molekula vai daļiņa ar neizbalansētu lādiņu star kodolu un elektronu čaulu*. Tātad, čaulā ir vai nu par daudz, vai par maz elektronu konkrētajam kodolam.

Gaisā joni (plazmas spīdošā masa spīd taisni pateicoties tiem) gan ir iespējami, taču tipiski ļoti lielas jaudas un/vai enerģijas apstākļos: tai skaitā temperatūras ar kārtu daudzi desmittūkstoši grādi – piemēram, *termojonizācija*, tāpat pie tik lielas jonizējošās radioaktivitātes, kad "aiz šausmām" jau sāk spīdēt Čerenkova starojums, arī radioviļņu ietekmē, kā piemēram **induktīvi saistītas plazmas (ICP)** spolē vai **kapacitatīvi saistītas plazmas (CCP)** kondensatorā, vai vismaz kā klusāka vai skaļāka, aukstāka vai karstāka plazmas izlāde no sprieguma, kas pārsniedz vides caursites spriegumu uz distances vienību, gaisam ar kārtu 3 kV/mm - tā ir *autoelektronu jonizācija*, vienalga vai koronējoša tipa vai dzirksteļizlādes formā. Ar distanci te drīkst saprast tai skaitā arī lauka vājināšanos ar attālumu elektriskajam laukam "pašam par sevi", no tā izrietot piemēram koronas izlādei, kad izlādes smaile ir pietiekami spīca.

Definīcija: plazma ir ļoti dinamiska matērijas forma, kurā augstas enerģijas jonizētas gāzes daļiņas viena otrai noplēš elektronus, un, kad šāds elektrons sāk apdzīvot jauniegūto ārējo čaulu, tad savietojot savu enerģiju ar čaulas konkrētajai orbītai atbilstošo enerģiju, tad abu enerģiju starpība emitējas redzamās gaismas viļņa garumā, vai vismaz ne ļoti tālu no tās (ietverot UV, VUV un IR diapazonus).

Vārdu *plazma* pirmais sāka lietot Irvings Langmuirs, tas pats, kura vārdā nosaukta plazmas diagnosticēšanas zonde, Lengmīra zonde. Izlādei nepieciešamā jauda un spriegums ļoti strauji dīkst ar spiediena samazināšanos. Cita starpā, plazmai ir allaž negatīva elektriskā pretestība, izņemot ļoti liela strāvas blīvuma apstākļus, kad pretestība var būt nulle vai pat nedaudz pozitīva. Piemēram, ja pie atmosfēras spiediena ICP izlāde prasa stipri virs 1 kW, drīzāk 3 kW radiofrekvenču barošanas avotu, un 10-20 kV pie 50-200 A (spriegums pēc aizdegšanās pats nokritīsies uz krītošas avota voltampēru raksturliķnes rēķina), tad jūtami zem 10 Toru spiediena izlāde ir stabila pat pie 10 W vai nedaudz vairāk jaudas pie 27-100 MHz un spriegums daudz nepārsniegs 800V pie 1 A strāvas vai mazākas. CCP gadījumā savukārt ierosme notiek pat ar pāris reižu vājākiem barošanas avotiem, taču plazmas spilgtums kā gaismas avotam, salīdzinot ar ICP, ir desmitiem, ja ne simtiem reižu mazāks. Kontrastā, par ICP gaismas avotiem lielāku spilgtumu dod tikai lāzeri, pat ne augstspiediena gāzizlādes lampas. ICP vienīgais trūkums ir nepieciešamība pēc radiofrekvenču palielas jaudas avota ar krītošu voltampēru raksturliķni, taču šis jautājums ir risināms dažādos veidos, kā būs atainots stipri tālāk.

Dziļākā vakuumā (1E-3 līdz 1E-6 Torr) izlādes plazma parasti koncentrējas ap vakuumtrauka (piemēram kvarca) sienīnām kā blāvi zilgans knapi saredzams spīdums. Tam atzīstams pielietojums tehnikā ir trauka sienīņu iztīrīšana no piesārņojuma (**plasma etching** - kodināšana). Nu labi, mazliet

arī kā šuvju pārbaudes rīks uz teci, ja spīd "ne tā", tātad šajā vietā nehermētisks. Tāpēc plazmas kontekstā ar *zema spiediena plazmas avotiem* sapratīsim orientējoši 0,1...1...10 Toru spiedienu, kur pie zemākā un augstākā gala jau sākas grūtības ar plazmas aizdedzināšanu. Visbiežāk spiedienu taisa inertā gāze (lai ķīmiski neizreaģētu ar ierosināmo vielu), argons, hēlijs, retāk slāpekļis, neons vai citas gāzes. Šīs nesējgāzes jēga ir iesvārstīt darba vielas (piemēram, metāla) molekulas, kas atrodas pie daudz mazāka spiediena, tipiski **100 reizes** mazāka, kaut arī matemātiskās kārtas robežās ir pieļaujamas novirzes. Statistiski ticamāk, ka iedarbības mehānisma statistiski varbūtīgākā daļa slēpjas elektronos, kas plazmā viegli sasniedz gan 8000 C temperatūru, gan arī vēl lielāku. Šādam "stipri sakaitinātam" elektronam iesitot pa daudz smagāko metāla atomu (vai molekulu), enerģija izrādās pietiekama daļiņas jonizēšanai (piemēram, elektrona izsišanai), tā rodoties pozitīvajam jonam, vai ar mazāku varbūtību papildināšanai, rezultātā rodoties negatīvajam jonam. Ilustratīvi, ICP plazmas ierosināšanai nepieciešams ņemt argonu ar spiedienu, piemēram, 2 Tori un tam pievienot, piemēram, 0,02 Tori bora tvaiku, kas nodrošinās lauvas tiesu no spīdēšanas spilgtuma bora rezonanses līnijai atbilstošajā viļņa garumā. Ja vairumam metālu regulējot temperatūru tā, lai temperatūra atbilst izvēlētajam tvaika parciālspiedienam (vai nu padzesējam vai pasildam, kā nu kuru metālu) - tā ir samērā vienkārši realizējama lieta, tad metāliskā bora gadījumā tā ir gandrīz neatrisināma lieta, jo temperatūra pārsniedz jebkādas saprātīgas materiālu kušanas robežas, ar kārtu 2500 C kušana un 4000 C iztvaikošana.

Izziņai: Tors (Torr) - vakuumtechnikā sevišķi iemīļota ne-SI sistēmas mērvienība, apmēram kā galdniecībā centimetrs, kas lietošanā ir daudz ērtāka par SI sistēmas Paskālu, tāpēc vairākums vakkuma jomas speciālistu aiz kauna par SI sistēmas nelietošanu nodurot acis, bet tomēr krampjaini turās pie Tora lietošanas. To veicina arī Amerikāņu tehnika, kas parasti graduēta Toros. Jāzina, ka 1 Tors =133 Pa jeb 1 Torr ir 1 mm/Hg. Tā kā vakuumsistēmām raksturīgajā precizitātes līmenī svarīga ir mērījuma kārtā nevis pats mērskaitlis, tad var droši noapaļot, ka, piemēram, 1E-6 Torr ir 1E-8 Pa jeb 1E-2 mikroPa.

Izziņai: Bieži lietots termins - augsts vakuums un zems vakuums ir semantiski konfūzējoši termini, jo zems spiediens nozīmē augsts vakuums un augsts spiediens nozīmē zems vakuums. Labāk to vietā lietot terminu dziļš vakuums un sekls vakuums, kam šāda inversa semantika noteikti nepiemīt.

Vēl svarīgs ir **jēdziens par plazmas balansētību**. Piemēram, plazmu radot kaut vai ar ICP metodi un ņemot zemas frekvences ģeneratoru, piemēram 13 MHz pie dažiem Toriem, neapšaubāmi būs vajadzīga lielāka ierosmes jauda, taču pie visai zema spīdošās ampulas spiediena plazma būs gana vēsa, lai ampulu varētu turēt rokās. Piemērs nebalansētai plazmai ir arī dienasgaismas "garā" lampa, kas šķiet nedaudz silta uz tausti, taču neko daudz. Spiedienu palielinot pat nedaudz, temperatūra var sasniegt jau nelielus simtus grādus pie ICP ģeneratora 100W jaudas, taču pietiek tikai frekvenci pacelt līdz 100 MHz un pat kvarcs var palikt aņņsarkans no sakaršanas, un var arī izkust. Tāpēc terminoloģiski izšķir nebalansētu plazmu, kam **elektronu temperatūra** ir būtiski augstāka par **jonu temperatūru**, kā nekā uz tausti pirksti jūt jonisko temperatūru, jo elektroniem ir maza masa. Piemēram, vienlaikus kādā vienā vietā joniskā temperatūra 40°C un elektroniskā temperatūra 20 000 °C. Pretēji ir balansētai plazmai, jo abas temperatūras komponentes ir orientējoši līdzīgas, respektīvi plazma pēc izjūtas ir ļoti karsta. Piemēram, metināšanas loka plazma. Ar ne tik rupjām metodēm šādu plazmu var iegūt, piemēram, no mikroviļņu frekvences ģeneratora stipri zem 1 kW pie pilna atmosfēras spiediena, taču temperatūra ir tik karsta, ka kausē praktiski jebkādu augsttemperatūras materiālu. Ir pavisam divas populāras šādas izlādes iegūšanas shemotehnikas, tās var skatīt tālākā detalizētā izklāstā.

Vēl pieminēšanas vērts ir mācībgrāmatās reti minēts efekts - ja ceļot spiedienu ļoti strauji aug temperatūra, bet abām temperatūras komponentēm puslīdz vienādā tempā, tad ceļot frekvenci, plazma paliek aizvien labāk balansēta un tāpēc karstāka pēc iedarbības pat jaudu nemainot. Cita

starpā, lai pateiktā dēļ nerodas nepareizas ilūzijas: kā reizi ar molekulāro struktūru saskaldīšanu “pirmreizējinātājos” ir taisni otrādi kā priekšā saka loģika – ir tā, ka ICP plazma pamatā sastāv no atomārajiem joniem, kamēr mikroviļņu plazmā dominē molekulārie joni. Te vairāk vietā ir jēdziens **Jonizācijas Cietība**. Iespējams skaidrojums tādai divvainai plazmas uzvedībai, ka cietība nav tas pats kas temperatūra, ir līdzīgs kā nukleārās fizikas jomā, ka, piemēram, kodolreaktora aktīvajā zonā lielāks reakcijas šķērsriezums ir taisni lēnajiem neitroniem. Līdz ar to ātrie izskrien cauri zonai nepaguvuši noreagēt, bet lēnie – vai nu ātrāk vai nu vēlāk, bet sāks multiplicēties. Ar elektronu multiplicēšanos plazmā ir samērā analogisks mehānisms, kā to apraksta monogrāfijas plazmas teorijas jomā, kaut vai ⁶. Piemēram, jonizācija ar kvēldiegu un ar elektrospiningu ir maiga, jonizācija ar mikroviļņiem vai ar elektronu lielgabalu ir vidēji cieta, bet jonizācija ar koronējošu elektrodu un jo īpaši ar ICP plazmu ir ļoti cieta. Cietai metodei arī nāk pamatā atomārie joni, maigai pamatā molekulārie joni. Kaut gan, specifiski bora gadījumam par molekulārajiem joniem runāt nepienākas, jo tāds bora argonīds vēl nav izgudrots un visdrīzāk nekad arī netiks izgudrots un cita veida molekulām vienkārši tur nav no kā rasties – bors ir bors un nekas cits kā bors, nevis piemēram slāpekļa un skābekļa sajaukums, kam iespējams N₂O; NO; NO₂; jons NO₃ utt.

Vēl svarīgi ir saprast, **kas vispār ir plazma**. Netkarīgi vai plazma ir ceturtais vielas agregātstāvoklis, jeb tikai gāzveida agregātstāvokļa specvariācija līdzās tik īpašībās atšķirīgajiem tvaika un tāpat Einšteina-Bozes kondensāta stāvokļiem (jeb stingras konsekvences labā iegālvosim ka tie ir attiecīgi 5~ais un 6~ais agregātstāvoklis??). Plazma sastāv no sekojošiem viens otram ik pa brīdim uzgrūdošajiem objektiem: tas ir 1) pozitīvie joni, 2) negatīvie joni, 3) elektroni (kuru skaits ir starpība starp abiem iepriekšpieminētajiem), un 4) kā studentu anekdote vēsta "neitrālie joni". Anekdotē jāsmejas ir ne tādēļ, ka neitrālās molekulas plazmā ir gana daudz (**jēdziens - jonizācijas pakāpe**, t.i. kāda ir proporcija starp jonizētām un nejonizētām daļiņām), bet tāpēc, ka tās nekādi nevar saukt par joniem, jo neitrālām daļiņām nav lādiņa, tātad tās nav jonizētas. Plazmā nepārtraukti noris jonizācijas process un pretējā virzienā dzenošs rekombinācijas process. Kad kāds aplūkojamais viens jons nodzisis, rekombinācijā atrazdams mieru, tad uz tā vietu ir iespēja kandidēt kādam citam jaunpienācējam jonam, kurš ir tikko kā pārvērtusies bijusī neitrālā molekula. Tātad iespējams panākt apstākļus, kad plazma vairāk dziest nekā aizdegās, un tāpat otrādi, aizdegas vairāk kā dziest. Reālā tehnikā, protams, lielāka nozīme ir kvazistacionāra līdzsvara stāvoklī esošai plazmai, kas vienmērīgi deg. Tāpēc jonu ekstrakcijas procesā, kad formē jonu kūli, noņemt var 1% no jonu skaita samērā droši, bet 10% noņemšana vai vairāk, jau var draudēt ar slāpšanas sākšanos.

Plazmas matemātika

Daļiņu ātruma sadalījuma funkciju plazmā apskata **Maksvela-Bolcmana** sadalījuma funkcija, ko šai gadījumā pieņemts pierakstīt sekojoši $F(\mathbf{v}_x; \mathbf{v}_y; \mathbf{v}_z) = n \cdot \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} \cdot \exp\left(-\frac{m(\mathbf{v}_x + \mathbf{v}_y + \mathbf{v}_z)^2}{2kT}\right)$, kur n ir daļiņu koncentrācija, m ir daļiņas masa. Vidējais ātrums ir $v_{\text{aver}} = \sqrt{8kT/\pi m}$. Daļiņu kinētiskā enerģija ir summa pa visām trim koordinātēm $W = (1/2 \cdot k \cdot T) \cdot 3 \text{ asis} = 3/2 \cdot k \cdot T$. Ja temperatūras izsaka **elektronvoltos**, tad 1 eV = 11 600 Celsiji. Lai kādu daļiņu sakopojumu drīkstētu saukt par plazmu, jāizpildās trim nosacījumiem: 1) Debaija (Debye) garums ir mazāks par plazmas burbuļa izmēru; 2) plazmas daļiņu skaits Debaija sfērā ir vispār liels; 3) plazmas frekvencei jābūt lielākai kā vidusmēra elektron-neitrālai kolīziju frekvencei ⁷. Summāri plazma ir elektro-neitrāla, tas ir $\sum(Q_i \cdot n_i - n_e) = 0$. Tomēr mikroizmēros lādiņā sadalījums ir visnotaļ “pleķains”. **Debaija potenciāls** ir puslīdz ekranēta plazmas pleķa iekšpusē valdošais potenciāls $\phi(\mathbf{r}) = 4\pi(\rho)/\epsilon_0 \cdot \exp(-\sqrt{2} \cdot r/\lambda_D)$, kurā r ir attālums no lādiņa līdz apskatāmajam punktam un locekli $\lambda_D = \sqrt{\epsilon_0 \cdot k \cdot T / n_e \cdot e^2}$ sauc par **Debaija garumu** ⁸, te e ir daļiņas (statistiski ticamāk, ka

6 - Hans R. Griem (1964). Plasma Spectroscopy. McGraw-Hill. Tulkota krievu val.1969, Atomizdat, 452 p.

7 - J. A. Bittencourt, Fundamentals of plasma physics, 3rd edition, Springer Science/Business Media, LLC, 2004.

8 - P. Debye and E. Hückel, Zur Theorie der Elektrolyte. I. Gefrierpunktserniedrigung und verwandte Erscheinungen, Physik Z. 24, 185 (1923).

elektrona) lādiņš. Debaija garums ir līdzīgs lielums ar lādiņa nebalansētības perturbācijas izmēriem. Ja elektriski vadošs objekts, piemēram, elektrods, ir iemērķts plazmā, tad ap to veidosies plazmas loksne, apvalks, kārtiņa jeb plēve ar biezumu viena Debaija garuma izmēros. Tātad, neitrālai plazmai un lielos izmēros, dimensijas apzīmējot ar L , šim $L \gg \lambda_D$, faktiski tas ir pirmais plazmas kritērijs. Ir iespējams aplēst plazmas daļiņu skaitu apgabālā, kas pēc diametra ir Debaija garums, šo lielumu var apsaukt arī par **plazmas parametru** $\Lambda = \frac{4}{3} \pi (\frac{1}{3}) \lambda_D^3 n_e = \frac{4}{3} \pi (\epsilon_0 k T / n_e^{1/3} e^2)^{3/2}$. Piemēram, plazmai ar blīvumu $1E+18 \text{ m}^{-3}$ un temperatūru 1.5 eV var izskaitļot, ka $\Lambda = 3161$. Tā kā šis parametrs var mainīties ļoti plašās robežās, parasti uzdod $\log(\Lambda)$. Piemēram, minētajam plazmas pikucim $\log(\Lambda) = 8.1$. Šo skaitli dažkārt arī dēvē par **Kulona logaritmu**. Tā kā Debaija ekranēšanas efekts rodas no daļiņu kolektīvas uzvedības plazmā, tad nosaukums plazma nozīmē lielu daļiņu skaitu Debaija sfērā, tātad $n_e \lambda_D^3 \gg 1$, kas ir otrais plazmas nosacījums. Apvienojot pirmo un otro nosacījumu, iegūstam $1/n_e^{1/3} \ll \lambda_D \ll L$. Citiem vārdiem, Debaija garumam jābūt daudz lielākam par vidusmēra distanci starp elektroniem un daudz mazākam kā plazmas izmēram. Ja plazmu deformē kāds ārējs lauks, piemēram, plazmu radošais ģenerators, tas tiecas deformēt lādiņa neitralitāti tilpumā, tāpēc rodas elektriskā lauka komponente, uz ko kolektīvā plazmas lādiņu reakcija ir tiekties atjaunot lādiņa neitralitāti. Tomēr starp joniem un elektroniem valda milzīga masas starpība, Tāpēc vērā vispirms jāņem elektroni, kam inerce tiks oscilēt ar leņķisko frekvenci $\omega_{pe} = \sqrt{n_e e^2 / \epsilon_0 m_{elektron}}$, ko sauc par **plazmas dabisko frekvenci**. Plazmas oscilācijas slāpēsies pie elektronu sadursmēm ar neitrālajām daļiņām. Tā kā plazmai piemīt kolektīva uzvedība, tad sadursmju frekvencei jābūt mazākam kā plazmas oscilāciju frekvencei $v_{pe} = \omega_{pe} / 2\pi$. Tas nozīmē, ka trešais plazmas kritērijs ir $v_{pe} > v_{en}$, kur v_{en} ir elektrons uz neitrālu daļiņu sadursmju frekvence. Ja šī sakarība neizpildās, tad apgabala uzvedībā dominē sadursmes, tātad plazma degradējas par neitrālu gāzi, citiem vārdiem nodziest. Faktiski šī izteiksme nosaka plazmas *zemāko iespējamo jonizētības robežu*. Reālā plazmā noris sadursmes starp elektroniem un neitrālām daļiņām un elektroniem un kaut kādas zīmes joniem. Šādu plazmu sauc par **vāji jonizētu**, ja dominē sadursmes ar neitrālām molekulām, un sauc par **stipri jonizētu** plazmu, ja dominē sadursmes lādētām daļiņām ar lādētām daļiņām. Tā kā Kulona spēki iedarbojas salīdzinoši lielos attālumos, tad šāds stipri jonizēts stāvoklis sākas jau tik zemu kā daži procenti jonizētas daļiņas no visām. Sadursmes var būt elastīgas, tātad abu reaģējošo objektu enerģiju summa ir nezūdamīga un process virzīts uz termodinamisku līdzsvaru starp elektroniem un joniem. Taču, ja daļiņu kinētiskā enerģija ir gana liela, tad var sākties nelineāri efekti atomā, kas izpaužas kā **daļēji neelastīga sadursme**, kas nozīmē, ka daļiņa (molekula) tiek jonizēta. Piemēram, udeņraža gadījumam kā vienkāršākajai zināmai atomārai sistēmai, pie $<100 \text{ eV}$ kopējais reakcijas šķērsgrizums σ_{en} elektrona un neitrālas H2 molekulas sadursmē ir ar kārtu $1E-19 \text{ (m}^2)$ ⁹. Izrietoši vidusmēra sadursmju frekvence lādētajai daļiņai $v_{en} = n_n \sigma_{en} v_e$, kas dod 8 MHz pie $T_e = 1.5 \text{ eV}$ elektroniem un $n_n = 1.2E+20 \text{ gab/m}^3$ neitrālo daļiņu blīvuma, kāds ir tipisks jonu avotiem pie puse Paskāla spiediena un 300 K . Te var definēt **vidusmēra brīvo noskrējieni** kā ātrumu reiz fekvenci $\lambda_{mfp} = v_e \sigma_{en} = 1/n_n \sigma_{en}$, ko izskaitļojot dotajam jonu avota piemēram $\lambda_{mfp} = 0.1 \text{ m}$, kas nav vairāk kā parasts normāls plazmas tilpums izlādes elektrodu starpā. Viss notiek savādāk pie **lielākas jonizācijas pakāpes**. Elastīgo sadursmju šķērsgrizums ir daudz lielāks “tālsatiksmes” Kulona spēka dēļ, turklāt iedarbojas Debaija ekranēšanas efekts. Tāpēc trajektorijas noliece par nelielu leņķi ir daudz varbūtiskāka nekā noliece par platu līnī, vai pat pagriešanos atpakaļ virzienā. Tāpēc kumulatīvais efekts no daudzām maza leņķa sadursmēm ir svarīgāks kā nedaudzās liela leņķa sadursmes. Tā kumulatīvā procesā sadursmes šķērsgrizums¹⁰ $\sigma_{ei} = Q_i^2 e^4 \log(\Lambda) / 4\pi \epsilon_0 m_e^2 v^4$. Tāpēc Maksvela-Bolcmaņa sadalījumam elektroniem vidusmēra sadursmju frekvence var tikt izvesta kā $v_{ei} = n_i \sigma_{ei} v_e = \sqrt{2} n_i Q_i^2 e^4 \log(\Lambda) / 12\pi \epsilon_0^2 \sqrt{m_e} (k T_e)^{3/2}$. Šādā vidē norisinās arī elektrons-elektrons un tāpat jons-jons sadursmes. Šiem procesiem

9 - H. Tawara, Y. Itikawa, H. Nishimura, M. Yoshino, Cross sections and related data for electron collisions with hydrogen molecules and molecular ions, J. Phys.Chem. Ref. Data 19, 617 (1990).

10 - R. J. Goldston and P. H. Rutherford, Introduction to plasma physics, IOP Publishing Ltd, London, 1995.

vidusmēra frekvences var rakstīt kā $v_{ei} \approx v_{ei}/n_i/(Q_i^2/n_e)$ un $v_{ii(vid)} = n_i * Q_i^4 * e^4 * \log(\Lambda)/12/\pi()^{(3/2)}/\epsilon_0^2/\sqrt{M}/(k * T_i)^{(3/2)}$, kur $M = m_1 * m_2/(m_1 + m_2)$ ir abu sadursmes daļiņu *reducētā masa*. Tipiskajā ūdeņraža jonu avotā, ko jau apskatījām, $v_{ii} \approx 300$ kHz un $v_{ei} \approx 13$ MHz pie $T = 1.5$ eV un $n_e = n_i = 1E18$ m⁻³. Savukārt visi lādiņi ūdeņraža atomiem ir 1e, tad elektrons-elektrons sadursmēm $v_{ee} < \sim v_{ei}$. Salīdzinot augstāk sarēķināto elektrons-neitrāla daļiņa frekvenci $v_{en} \approx 8$ MHz nākas secināt, ka elektrons-lādēta daļiņair tikpat nozīmīgs plazmas process kā divu neitrālu daļiņu sadursmes plazmā ar 1% jonizācijas pakāpi.

Elektronu plūsma virzienā uz āru no plazmas burbulīša ir lielāks par jonu plūsmu, jo elektronu mobilitāte ir lielāka. Pieņemot, ka plazmas trauka sieniņu potenciāls tiek nosacīti uzturēts pie potenciāla ϕ_w , tad jāuzskata, ka plazmai piemīt pozitīvs potenciāls pret šo sieniņu, lai kompensētu atbilstošo plūsmu pārnesto lādiņu. Līdzsvars formēs negatīvajai lādiņu plūsmai līdzvērtīgu pozitīvo plūsmu, lai burbulītis kopsummā paliktu kvazineitrāls. Tāpēc formējas plazmas plānslānis ar biezumu λ_D uz robežas pie plazma-sieniņa saskares vietas, un lauvas tiesa potenciāla krituma noris šajā biezumā. Lai arī procesu var aprakstīt dažādi, vienkāršākais veids ir **Bohma formula** ar vienu e lādēta jona-elektrona plazmas gadījumam ¹¹ un ¹². Jonu koncentrācija plēvītē nosakāma kā monoenerģētiska jonu plūsma, kas ierodas plēvītē ar ātrumu v_0 un kvazineitrālas situācijas nosacījumu $n_0 = n_i = n_e$ uz robežslāņa iekšmalas pie $\phi_s = 0$ V. Izmantojot *jonu kontinuitātes nosacījumu* $n_0 * v_0 = n_i * v_i$ un enerģijas nezūdamību $m_i * v_i^2/2 - e * \phi = m_i * v_0^2/2$ var rakstīt, ka jonu blīvums ir $n_i = n_0 * \sqrt{1 + 2e * \phi / m_i / v_0^2}$. Tā kā elektroni visticamāk ir termiskā līdzsvarā, tad elektronu blīvumu noteiks Maksvela-Bolcmaņa sadalījums $n_e = n_0 * \exp(-e * \phi / k / T_e)$. Plēves slāņa potenciālu apraksta Puasona diferenciālvienādojums $d^2(\phi) / d(x^2) = -(n_i - n_e) * e / \epsilon_0 = -e * n_0 / \epsilon_0 * [\sqrt{1 + 2e * \phi / m_i / v_0^2} - \exp(-e * \phi / k / T_e)]$. Puasona vienādojumu īsti nav iespējams atrisināt analītiski, tomēr skaitliskas aproksimācijas var iegūt, it īpaši ar datorskaitļošanas tehnoloģijām. Vienādojumā tomēr ir kāda pieminēšanas vērta iezīme – plēves slāņa ekranēšanas funkcionalitāte izpildās tikai tad, ja tilpuma lādiņš nav negatīvs, tātad $n_i \geq n_e$ priekš visiem $\phi \leq 0$. Tas ir nepieciešamais nosacījums, lai $v_0 \geq v_B = \sqrt{k * T_e / m_i}$. Šo sakarību sauc par **Bohma plēves slāņa kritēriju** un $d(v_B)$ par **Bohma ātrumu**. Šis kritērijs iedibina limitu jona ātrumiem, kas ierodas plēvītes šķērsošanas punktā, un tie ir vispārīgi stipri lielāki nekā plazmas jonu vidusmēra termālie ātrumi. Jāsecina, ka jābūt kādam elektriskajam laukam, kas paātrina jonus tajā plazmas slānī, kas ir tieši apakšā plazmas plēvei, un to bieži sauc par priekšplēvi (presheath). Plazmas pamatmasai pret plēves iekšmalu potenciāla starpība ir $\phi_P - \phi_S = k * T_e / 2 / e$. Skaidrojot mazliet vizuālāk, iedomājamies burbulīša centrā potenciālu ϕ_P , kas līdz priekšslānim paliek mazliet negatīvāks ϕ_S un tad plēves slānī strauji pieaug līdz ϕ_w . Procesa līkne no attāluma ir ar izteikti eksponenciālu formu (!).

Vēl svarīgs lielums ir **plazmas potenciāls**. Ja jonu plūsmu plēves slānī determinē Bohma ātrums, tad plazmas koncentrācija uz slāņa iekšējās robežas ir $\Gamma_i = n_0 * v_B$ un nav liela kļūda uzskatīt, ka šī koncentrācija ir vienāda visā plēves slāņa biezumā. Elektronu plūsmu uz sieniņām nosaka ienākošā plūsma, ko ar Bolcmaņa atkarības palīdzību var pārrakstīt kā $\Gamma_e = 1/4 * n_0 * v_e * \exp(-e * \phi_w / k / T_e)$, kur $v_e = (8 * k * T_e / \pi() / m_e)^{(1/2)}$ ir vidusmēra elektroniskais ātrums. Salīdzinot abas daļiņu plūsmas un lietojot augstāk minēto formulu potenciālu starpībai starp priekšplēvi un plazmas kodola slāni $\phi_P - \phi_S$, iegūst plazmas potenciālu $\phi_P - \phi_w = k * T_e / 2 / e * (1 + \log(m_i / 2 / \pi() / m_e))$. Piemēram, jau analizētā ūdeņraža degļa variantam izskaitļojot pie $T_e = 5.0$ eV iegūstam $\phi_P - \phi_w = 17$ V. Patiešām, kad plazma aizdegusies, tad sprieguma kritums uz tās nav liels, piemēram, metināšanas lokā 21-24 V.

Kāpēc sākām runāt par joniem, bet apspriežam plazmu - tāpēc, ka plazmas svarīgākā iezīme ir būtiski liela jonu koncentrācija spīdošajā zonā. Runājam "joni" - domājam "plazma" un otrādi, kaut mēdz būt arī nespīdoši joni. Ak jā, kas gan pārnes enerģiju starp jonizētām un nejonizētām daļiņām?

11 - Bohm D. (1947). Minimum ionic kinetic theory for a stable sheath in The Characteristics of Electrical Discharges in Magnetic Fields, editors A. Guthrie and R. K. Wakerling, McGraw-Hill, New York, pp. 77-86

12 - Riemann K.U. (1991). The Bohm criterion and sheath formation, J. Phys D. 24, 493

Protams, termiskās sadursmes, tā pašas, kuru kolektīvo iespaidu reiz demonstrēja Roberts Brauns ar Brauna kustību, maldīgi domājams, ka skatās uz maziem dzīviem tārpiņiem (runa bija par sinepju auga sporām), kam kājiņas esot tik smalkas, ka nav mikroskopā saskatāmas. Tikai ilgu laiku vēlāk izrādījās, ka sporām nekādu kājiņu nav, bet parādību izraisa molekulārās statistikas efekts maza triecienu skaita uz mikroizmēra laukumu apstākļos. Un tā kā elektronu šai plazmas maisījumā ir daudz, lielāka varbūtība sadurties pozitīvam jonam ir ar elektronu, kaut arī nevar izslēgt arī dubultu vai pat multiplu negatīvo jonu veidošanos, bet reti un maz. Tāpat elektrons var trāpīt pa neitrālu molekulu un vai nu jonizēt to, vai atlekt bez jonizācijas. Vai pozitīvais jons var trāpīt pa neitrālo molekulu utt utml. Protams, ka jonu kūlī, kur visi joni kustas apmēram vienā virzienā ar apmēram vienādu ātrumu, starpjonu sadursmes notiek reti, tāpēc kūlim spīdēšana nav īpaši raksturīga, kaut gan jonu kūlim atsītoties pret kādu šķērslī, spīdēšana var būt, vai arī nebūt. Gigantiskas enerģijas gadījumā, piemēram CERN galvenajā kontūrā, kam ir tāda pieredze, ja nojūk jonu stūrēšanas precizitāte un superātro daļiņu kūlis trāpa pa kaut ko cietu, ir bijuši gadījumi, kad spīdēšana nav īsti pareiza mēroga epitets, precīzāk būtu bijis teikt - pamatīgs sprādziens ar ievērojamiem postījumiem.

Dažkārt parādās jautājums, kā ir ar jonu tālāku jonizētspēju vai citiem vārdiem radioaktivitāti. Formāli, Rentgenlampas formula izpildēs praktiski jebkādam spriegumam, tātad jonu vai elektronu kūlim bremsējoties, rodas bremsšaltung jeb mīksts Rentgenstarojums. Tikai realitāte ir tāda, ka zem 1 kV tas ir nesamērāmi mazs efekts pēc amplitūdas (intensitātes), ar ko tik ļoti var nerēķināties, ka droši var likt guļamvietā zem matrača. Virs 1 kV efekts ir samērāms, taču ir tik mazs, ka ar to tāpat var nerēķināties, ja vien ievērots elektrodrošības rekomendētais attālums. Sākot ar 10 kV Rengens sāk palikt ievērojami stiprāks, tā ka piemēram kenotroniem (diodes taisngrieža tipa radiolampām) pie šāda sprieguma iesaka likt svina aizsargapvalku, bet melnbaltajam televizoram nesēdēt pie paša ekrāna. Sākot ar 30 kV starojums ir būtisks un potenciāli nāvējošs, piemēram krāsainā TV kineskopa vai datora CRT ekrāna, kam tādēļ lieto dārgu un sarežģītu ekranējošu aizsargslāni un svinstiklu. Kur gan te ievietojas mums interesējošo jonu enerģijas - 0,3 eV kādam iedomātam negatīvajam jonam un 5 eV kādam pozitīvajam jonam salīdzinājumā ar 30 keV! Tāpēc pie normālas enerģijas no joniem nav jābīstas. No radioaktivitātes jābaidās tikai lielo enerģiju gadījumā, kā piemēram, jonu implantācijas mērķa kameras apkaimē vakuumsistēmā (10 keV līdz 100 keV), kur patiešām dažkārt var uzkrāties (vai arī nē) inducēto radionuklīdu niecīgi daudzumi, kam nebūtu jānonāk vidē vai uz un it īpaši iekš ķermeņa, un pie ieslēgta augstsprieguma vienmēr jāpiedomā par bioloģisko aizsargekrānu (bet ne mazāk arī par elektrodrošību). Implantācijas kameras augstsprieguma daļas tīra un uzkopj ievērojot skrupulozas aizsargapgērbas prasības, jo radionuklīdu nonākšanu uz rokām pilnībā izslēgt nevar, kaut arī summārā radioaktivitāte no tā nav milzīga. Tas no kā jābaidās tīrot, ir nejauši nenolaizīt kādu sasmērētu pirkstu, vai neietrīt to parastajā apģērbā. Parasti tomēr šāda problēma rodas implantēšanā ar MeV mēroga enerģijām un vairāk.

Kas ir elektronu afinitāte.

Afinitāte ir definēta kā enerģijas izmaiņa (J/molū vai eV/elektronu) neitrālam atomam gāzveida fāzē, ja tam vai nu noplēš vienu ārējās čaulas elektronu un pārvieta līdz bezgalīgam attālumam, tā izveidojot pozitīvu jonu, vai pietuvina tā ka pielīp ārējai čaulai vienu lieku elektronu. Tas ir termins, kas pamatā tomēr attiecas uz negatīvajiem joniem, pozitīvajiem biežāk to dēvē par atraušanas darbu, kaut gan literatūrā nereti (un tas nav īsti pareizi) abus jēdzienus lieto kā sinonīmus. Negatīvajiem joniem saites enerģija ir maza, ar kārtu 0.1 līdz 1 kJ/mol, bet pozitīvajiem stipri lielāka, piemēram metāliem ar kārtu lieli desmiti kJ/mol. Piemēram, Cēzijs -46 kJ/mol; Litijs -60; jods -295, fluors -328 kJ/mol u.tml. Nemetāliem afinitāte ir pat vēl lielāka kā metāliem. Negatīva zīme ir tāpēc, ka darbs ir jāiegulda, lai elektrons pietiekami pietuvinātos un pieliptinātos pilnībā "nokomplektētā" atomam, kam visas vietas "štatā esošajiem" elektroniem jau ir aizpildītas. Pastāv pirmējā un otrējā afinitāte. Pirmējā nozīmē, cik stipri elektrons turās klāt atomam. Otrējā nozīmē darbu, kāds jāiegulda, lai šādu elektronu pietuvinātu tā, ka tas pielīp.

Šie negatīvie joni neko neietekmē negatīvi, kā bailīgākie varētu iztēloties (tā bija labā ziņa), negatīvs ir tikai pēc zīmes šo jonu lādiņš. Tieši otrādi, daudzos pielietojumos negatīvie joni veselībai (piemēram aerojoni gaisā) ir derīgi saprātīgā koncentrācijā, bet pozitīvie kaitīgi. Kaut arī pārmērīga aizraušānās ar gaisa aerojonizācijas lampām (Čiževska un tml) sevi pierādījusi kā tehnoloģija, kas lietota pār mēru dažkārt nes arī postu. Tomēr astmatīkiem, kam pat niecīga putekļu koncentrācija rada problēmas, šāds aerojonizators būtiski uzlabo gaisa putekļtīrību, jo parasti putekļi mēdz būt pozitīvi lādēti (tribouzlāde savstarpēji berzējoties). Manas kundzes astmas dēļ samērā tīrā uzturētā dzīvoklī, pēc jonizatora uzstādīšanas, ik nedēļā savācās apmēram treknas naža gals supersmalku kvēpu, lai arī dzīvoju ap kilometru tālu no automaģistrālēm. Ja nu tomēr gribas uzstādīt šādu jonizatoru, ir vērts iegādāt gaisa DC lādiņa balansēšanas mērītāju (vaļējs kondensators un ultra-augstomīgs voltmetrs), lai negatīvā lādiņa gaisā nav par daudz. Līdz orientējoši -80 V/m ir ļoti normāla gaisa kvalitāte, bet virs -300 V/m jau ir pamats satraukumam, jo tas stipri atšķiras no gaisā brīvā vidē parastiem parametriem, un, kā vides pārvaldībā pieņemts uzskatīt, pat ja nav pierādījumu kaut kā kaitīgumam, ir pamats satraukties tikai tādēļ vien, ja kāds vides parametrs ir stipri atšķirīgs no paaudžu paaudzēm ierastās šī parametra vērtības.

Ar pirmā skatiena loģiku varētu rasties nepareiza iedomā, ka negatīvs jons nemaz nav iespējams. Pozitīvs jons nozīmē, ka kaut kas ir "aizvīlis" vienu (vai multiplas jonizācijas gadījumā vairākus) elektronus no elektronu čaulas, visticamāk, ka no ārējā slāņa. Šāds "caurums" ir labi paredzams, labi datormodelējams, piemēram, ar *Gaussian* softu, ar ko man bija tas gods krietni paspēlēties pie Saragosas Universitātes superdatora, un saites enerģija ir diezgan ievērojama.

Izziņai: 1 eV enerģija ir vienāda ar ātruma diktētu (kinētisko) enerģiju, ko elektrons pārrēķinā uz savu miera masu iegūst elektrostatiskajā laukā, noejot brīvi izvēlētu distanci ar potenciāla starpību 1 Volts. Tā kā elektrona lādiņš ir $1E-19$ Kuloni, tad 1eV ir $1E-19$ Džouli. Mērvienība ir ērta ar to, ka cik Voltu uzliekam uz elementāra paātrinātāja elektrodiem, tik ir enerģijas skaitliskā vērtība. Te derīgi atcerēties 11.klases fizikas kursa formulas $W=q*E$ un $W=0.5*m*v^2$.

Negatīvais jons izrietoši nozīmē, ka molekulai ir viens elektrons par daudz. Kā gan tas tur turās klāt? Pārējie elektroni ir ļoti tuvu un blīvā mākonī aizsedz klāt-vilinošo atoma kodola pozitīvi lādēto lauku. Elektronu mākonis ir nosacīti tuvu un šādu "lieko" elektronu ļoti stipri grūž prom. Kodols savukārt atrodas "milzīgā" attālumā, kas salīdzinājumā ar tuvu esošajiem elektroniem ir lielāka starpība nekā starpība reizēs Zemes izmēram pret Sauli. Izolēts atoms ir diametrā starp 3 un 300 pm, bet kodols 1-10 fm, tātad $\sim 10\ 000x$ atšķiras izmērā. Saule ar diametru 1.39 miljoni km un Zemes diametrs ~ 1270 km atšķiras $\sim 1\ 000x$. Tomēr patiesība ir tāda, ka šis liekais elektrons mazmazliet "pagrūstās". Cik stipri mākonis grūsta šo elektronu, tikpat liela ir šī elektrona ietekme uz mākonī. Tāpēc mākonī paveras neliela spraudziņa sāniski, pa kuru jaunpienācējs elektrons spēj saredzēt tālo un aicinošo kodola elektrisko lauku un noturēties klāt. Tomēr jāņem vērā, ka tikpat elektroni tiecas ieņemt sākotnējo pozīciju un izspiest "lieko" elektronu. Tāpēc saites enerģija negatīvajiem joniem ir maza, salīdzinājumā ar pozitīvajiem joniem, elektronvolts līdz nedaudzi, desmitdaļa, vai dažos gadījumos pat simtdaļa eV uz gabalu. Enerģiju, kas vajadzīga, lai šādu negatīvā jona elektronu atrautu no jona un nogādātu vietā, kur elektriskie spēki ir nulle, tas ir nosacīti bezgalībā, sauc par negatīvā jona elektronafinitāti (*affinitum = bezgalība*). Alternatīvi var teikt "atraušānās enerģija", ja vien pieņem, ka aizvadīšanas enerģija drošā attālumā ir niecīga daļa no afinitātes. Sliktā ziņa ir tāda, ka procesa sarežģītības dēļ šādu negatīvo jonu matemētiski modelēt ir grūti un rezultāta precizitāti varētu gribēt stipri labāku. Tāpēc afinitāti, kur iespējams, cenšas mērit nevis rēķināt (!). Tomēr, ja Elementu Periodiskās Sistēmas elementārajiem elementiem afinitāte ir eksperimentāli mērīta gandrīz visiem, varbūt izņemot transurāna elementus, tad molekulām, un it īpaši lielmolekulārajām vielām, ja vispār ir pieejami dati, tad visdrīzāk tie ir

orientējoša aprēķina rezultāts. Respektīvi, uz LU-ASI esošā GRIBA(m) instrumenta šādu mērījumu veikšanai noteikti trūkst zinātni taisīt alkstoša personāla skaits, kaut vai studentu darbaspēka, diemžēl šādam darbam finanses pagaidām jau kuro gadu izkarot nav izdevies, tāpēc var paveikt tikai tik, cik iespējams ar neapmaksātu entuziasmu.

Skaidrot, kas ir jonu implantācija, jāsāk ar ieskatu pusvadītāju tehnoloģijās.

Silīcijs. Un Iesākumā Bija Smiltis (silīcija gadījumā, vai germānijam akmeņogļu sadegšanas kvēpi). Tad Smiltis (alias silīcija dioksīdu) tūrīja un tūrīja līdz ieguva tehniski tūru silīciju. Tas vēl nav neko daudz dārgs produkts. Taču ar šādu silīciju (vai germāniju, vai gallija arsenīdu vai jebkādu citu pusvadītāju, piemēram, pēdējās desmitgades modes kliezīnu dimantu ieskaitot) neko elektronikā lietojamu uztaisīt nevar, jo atslēgas vārds ir tūrība. Attūrīt var ar zonu kausēšanu, un tāpat ar daudzkārtēju rekristalizāciju, piemēram, Čohraļska process, Bridžmena-Stokbergera metode, W.G.Pfanna metode, Vernuilla process un ne mazums citas metodes. Pēc attūrīšanas tehnikai visaugstāk pieejamajā tūrībā, jo tūrāks jo labāk, pusvadītājs beidzot ir sagatavots, lai dažus iecirkņus selektīvi "samaitātu" ar donora materiāla mikropiemaisījumiem, citus, kā nu pusvadītāju ierīces topoloģija to prasa, ar akceptora piemaisījumiem (attiecīgi iegūstot p un n tipa vadītspējas apgabalus), un vietām, kur vajag, atstājot tūrību tādu, lai pusvadītājs būtu labs izolators. Šo mikropiemaisījumu ievadīšanas procesu sauc par dopēšanu, piemaisījumu par dopantu, un jāuzsver, ka piemaisījuma daudzums ir ārkārtīgi niecīgs. Ja dopē par stipru, tad nekas prātīgs nesanāk. Dēļ vienkāršības, vēsturiski pirmā dopēšanas metode bija un ir - termiskās difūzijas metode - saspiež dopantu (tai skaitā šķidrā vai gāzveida fāzē) ar kristālu un notur krāsni fiksētu laiku pie fiksētas temperatūras. Šobrīd tā ir vienīgā metode, kas palikusi Rīgas pusvadītāju ražotnē Alfa, citus procesus tie ņem kā ārpalpojumu (kaut gan viena vecmodīga implantācijas iekārta rūpnīcai pieder), vismaz epitaksija noteikti ir ārpalpojums. Taču difūzijas metode dod ne sevišķi precīzu rezultātu un ir grūtības ar fotolitogrāfisku neapstrādājamo iecirkņu izolēšanu uz veifera, kā arī ar ļoti mazu koncentrāciju ievadīšanu, kā arī ar ievadīšanu kontrolējamā dziļumā.

Terminoloģija: izaudzētais kristāls, kas ir pusmetrs līdz daži metri garš stienis ar diametru starp 3 līdz 5 cm senāk un 10 līdz 30 cm jaunākām iekārtām, saucas **Bouls** vai **Ingots**. Šo lielo "desu" sagriež plānās šķēlītēs - agrāk lietoja dimanta pulvera griezējriņas ar iekšējo dimanta griezējšķautni, tas dod daudz mazāku garenvibrāciju diskam neka ārējā griezējšķautne, piemēram stūra griezējslīpmašīnai (fleksim). Tagad vairāk lieto lāzera griezēju, tas dod iespēju nogriezt daudz planāku un akurātāku "desas šķēlīti", šo šķēlīti sauc par **veiferi** (wafer). Vārds semantiski ceļas no vafeļu pannas produkta - vafeles cietās plāksnes uz kuras tālāk konditori smērē saldinātos taukus.

Ja biezums veiferim variējas starp 1 un 0,1 mm, tad uz vienas šādas plāksnītes, kam ar fotolitogrāfiju, principa ziņā līdzīgi kā ražo elektronikas iespiedplates, uznes mikroshēmas, tranzistora vai vienalga kādu zīmējuma aizargslāni un veic attiecīgo dopēšanas operāciju. Lielražošanā maska var būt daudzkārtēji lietojams, galvaniski audzēts niķeļa vai cita metāla slānis, ko noslauka, uzliek, apstrādā un liek nākošajam paraugam. Tad nomaina aizargmasku uz citu nepieciešmo un veic nākošo dopēšanu (vai iedobes kodināšanu, vai uzkalna veidošanu, vai metalizāciju utt utjpr). To dara tik ilgi, kamēr viss mikroshēmas daudzo slāņu "pīrāgs" ir gatavs un atliek punktpiemetināt izvadkājiņas un ieklapēt mikroshēmu korpusā. Parasti karstā presēšana ar epoksīdu premiksu, kas ir smalki samalts nepilnīgi nocietināts (polimerizēts) epoksīds (t.i. bisfenols) ar piemaltu cietinātāju, visbiežāk pulverveida MDMA cietinātāju (metadimetilēnamīns), šo pelēka pulvera veida mikstūru sauc par premiksu, parasti presē 180 C temperatūrā ar orientējoši 10 -20 kg/cm² spiedienu. Līdzīgu tehnoloģiju atradu 1997.g. patentā ¹³, taču apzinos, ka bezgala

13 - Muthiah J., Teti J.J., Schlessman J.M., Ruth W.G., Seelig C.A. (1997). Coating powder of epoxy resin and low temperature curing agent. Patent US6890999B2.

līdzīga metode tika lietota Alfā vismaz ne pirmo gadu jau ap 1985.g. Iegūtais produkts izskatās kā oranžie kT315 korpusi, melnie kT3107 korpusi, pelēkie 155 sērijas korpusi u.tml. Tā rīkojās gan Gulbenes Alfa (Mitrāns), gan Ķengaraga ielas Alfa (Invertors), gan Brīvības gatves tā puse, kur tagad lieveikals Alfa, gan veco cehu puse, kur mūsdienu RD-Alfa strādā vēl joprojām, taču ar katru gadu vājāk. Pirms 50 gadiem tā bija viena no visas Eiropas lieljaudīgākajām mikroshēmu ražotnēm, kas katru dienu veda laukā produkciju ar 2 līdz 3 četrdesmittonnu fūrām, bet tagad viena no mazākajām Eiropā, kam viena pavisam maziņa kravasmašīnīte visu izved reizi 2 nedēļās (abi epitēti nav ilustratīvi, bet gan atmiņā iespriedušies vēsturiski precīzi, kā nekā apmēram 15 gadus biju Alfu kontrolējošā uzraudzības iestāde, un mans pienākums bija katru iekārtu inspicēt 4 reizes gadā).

Otra dopēšanas metode ir **epitaksija**, jeb pēc būtības, vakuumuzputināšana ar visām iespējamām variācijām (kenotrona, triodes, magnetrona, ICP u.d.c.). Tā dod daudz labāku rezultātu kā difūzija, taču īstena dopēšanas "karaliene" ir jonu implantācija. Implantācija dod ne tikai ārkārtīgu ģeometrijas precizitāti, bet arī viegli regulējamu no absolūti mazas ar citām metodēm nesaniezamas mikrokoncentrācijas līdz kādai tik vajag lielai un pat ar regulējamu dopējuma dziļumu (mainot jonu paātrinātāja spriegumu, t.i. jonu ātrumu). Tomēr šī metode līdz šim bijusi tehnoloģiski vissarežģītākā un līdz ar to visdārgākā. Tieši šīs metodes palētināšana un modernizācija, un miniaturizācija ir **ar šo Disertāciju saistītā ERAF Projekta pamattēma**.

Var iedomāties kādu jautājot – bet, ja uzražot vienu nieka diodi vai tranzistoru ir tik vērienīgs darbs, kā tad dabū, ka tas maksā vien dažus centus? Lieta tā, ka vienam ingotam vajadzīgais smilts daudzums maksā, teiksim, 5 centus, tehniskais silīcijs (skaitļi ļoti aptuveni) maksā jau kādus 10 dolārus, attīrītais ingots maksā ap 10 000 USD vai vairāk, bet veiferi no tāda sanāk vairāki simti, līdz ar to tukšs veiferis maksā ar kārtu 10 USD. Ja tranzistora kristāls ir ar izmēru kārtu 10x10 mikroni, kaut vai 50x50 mikroni, bet veiferis 10 cm vai 30 cm, tad tranzistoru daudzums, ko 78 gab vienai ielādei veiferu "cepienā" izgatavo epitaksijas automāts, ir prātam grūti aptverams pat tad, ja ņem vērā brāķa procentu - kā padomijā pusvadītāju industrijā uz 90-99% vai mūsdienās 10-30-50% brāķa. Veiferi par atsevišķiem tranzistoriem vai mikroshēmām sagriež ar lāzera **šreiberi**, taču pēdējā laikā, pārsteidzoši, populārāki kļūst dimanta ripas šreiberi, kas radot mazāku termisko stresu kristālam.

Noteikti ir vērts zināt **HP Germānija kristālu izgatavošanas tehnoloģiju**, jo šobrīd lai arī germāniju tikpat kā vairs nelieto tranzistoru taisīšanai, bet jonizējošā starojuma detektēšanai šis materiāls ir grūti aizstājams, ja nu vien nākotnē ar Dimantu pusvadītāja statusā, par ko ir diezgan labi pamatoti pētījumi. Lai vai kā, Kristālisks Augstas Tīrības Germānijs (HPG) ir vadošais materiāls augsto enerģiju starojumu sensoru izgatavošanai virs MeV enerģijām, gan daļiņu, gan X-staru formā. HPG nozīmē elektriski aktīvu defektu koncentrāciju mazāku par $1E-9\text{ cm}^{-3}$ ¹⁴ un šādu materiālu dopējot ar boru, tā jutība kā jonizējošo daļiņu sensoram pieaug ļoti nozīmīgi¹⁵. Kas īpaši svarīgi ir neitronu u.c. daļiņu sensoru Latvijas ražotājam BSI, kas tos piegādā gan CERN, gan Starptautiskajai AtomAģentūrai, gan dažādu valstu valdībām vides kontroles nolūkos. Cita starpā, vērts iebakstīt ar pirkstu, cik neloģisks ir AtomAģentūras nosaukums, jo tā NEnodarbojas ar Atomfiziku (kas apskata notiekošo elektronu čaulām), bet gan nodarbojas ar Kodolfiziku (kas apskata radioaktivitātes radītos efektus). Mūsu reģionā HPG ražo Berlīnes Kristālaudzēšanas institūts Adlershofā netālu no Kopenickas Max-Born-Straße 2 (*Leibniz-Institut für Kristallzüchtung*). Germānija attīrīšanai klasiska Zonu Kausēšana tehnika labi nestrādā. To tīra

14 - Fourches N., Zielińska M., Charles G.(2019). Book. *High Purity Germanium: From Gamma-Ray Detection to Dark Matter Subterranean Detectors*. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.82864> (17p)

15 - Looker Q. (2014). *Fabrication Process Development for High-Purity Germanium Radiation Detectors with Amorphous Semiconductor Contacts*. PhD dissertation, Berkeley (2014). Available at https://escholarship.org/content/qt1d14c7t8/qt1d14c7t8_noSplash_d8581bc67bbfabef97cb5a90208c0d28.pdf

sekojoši: apstrādājamo germāniju ielādē liela izmēra horizontālā ultratīra grafīta laiviņā, kas atrodas kvarca caurulē, kam apkārt ir indukcijas sildītājs. Svarīga ir aizsarggāzes atmosfēra – ultratīrs ūdeņradis, ko papildus (recirkulatori) attīra uz kontrolēti uzkaršētas pallādija reversās osmozes membrānas, šo gāzi pa kontūru dzenājot ar cirkulācijas sūkni. Ūdeņradis ķīmiski piesaista germānija piesārņojumus un transportē tos uz membrānu. Daudzas reizes atkārtotot kušanas/kristalizācijas ciklus, kā jau Zonu Kausēšanā pieklājas, tiek saražots pats tīrākais germānijs pasaulē, ja var ticēt uzņēmuma pašreklāmai. Kāpēc grafīta laiviņa – jo pie normālas temperatūras germānijs ir izolators un nesilst. To silda silstošais grafīts. Tik tīru grafītu spējot saražot tikai viens ASV uzņēmums un neviens cits. Kāpēc kvarca caurule – lai trakts būtu vakuums-hermētisks, bet RF induktora lauks tam brīvi tiktu cauri.

Nākotnes materiāls pusvadītāju industrijā būšot **polikristālais dimants**. To taisa pavisam vienkārši. Mikroviļņu plazmas izlādes kamerā plazmā metāna un 1% līdz 5% ūdeņraža maisījumā (pie pazemināta spiediena 925–950°C un 72–75 Torr) sintezējas polikristāli. Ja plāksnīti ar kristalītiem izcili rūpīgi nopulē līdz spoguļgludumam un audzēšanu turpina, tad nākošais slānis ir kristalogrāfiski sakārtotāks un jau der pusvadītāju ierīču izgatavošanai ¹⁶. Dimanta tranzistoru un diožu priekšrocības ir neiedomājams ātrums, strāvas bīvums, caursites spriegums un pieļaujamais darba temperatūras lielums, droši līdz 1000 °C (no kā izriet lielā pieļaujamā jauda), kā arī liela kodolstarojumu radiācijas noturība. Šādas pusvadītāju ierīces joprojām vēl izstrādā, kaut arī pirmās publikācijas šai jomā jau bija ap tūkstošgades miju, un process jau atrasts astoņdesmitajos gados ¹⁷. Savukārt dimanta neitronu sensori esot spējīgi strādāt pat kodolreaktoru aktīvajā reakciju zonā.

Jonu Avoti implantācijai

Jonu avotu dažādība nav rēķināma simtos. Daudz vairāk. Tāpēc vienīgais, kas ir kopīgs, ir plazmas izlādes tilpums un jonu ekstrakcijas ierīkojums. Tāpēc apskatīsim vismaz dažus nozīmīgākos variantus, ar kuriem esmu nepastarpināti pazīstams un tālāk dosim literatūras pārskatu, ko pasaulē šai jomā State of Art līmenī dara citi, kam sekos konkrēti aprēķinu piemēri mūsu iekārtas projektēšanai un visbeidzot – eksperimentu apraksti un eksperimentu rezultāti ar ierīces sastāvdaļām.

Tagad par vēsturi personiskā skatījumā. Piemēram, viens no maniem pirmajiem soļiem jonu tematikā, iekārta **ROFLEX** tika radīta, lai mērītu atmosfēras joda koncentrāciju ar daudz labāku jutību un īsu mērstara garumu un ātrāku reakcijas laiku nekā ierastā šādam mērķim pasaulē plaši lietotā garā stara DOAS iekārta spēj (DOAS principu labi izskaidro ražotāja mājaslapa ¹⁸). Līdz ar to iespējams noskaidrot, cik nozīmīgs ir jods salīdzinājumā ar citām ozona slāni noārdošajām vielām, piemēram freonu grupas vielām. Jo jodu gaisā dabiski ģenerē jūras un okeāni, kur tas biokoncentrējas no izšķīdusās formas aļģēs, un līdz ar to varētu būt loģiski, ka tur, kur jūrās aļģu ir visvairāk, tur arī "ozona cauruma" problēma ir sajūtama lielākā mērā. Tāda vieta ir Galapagu salas, kur aļģu ir neparasti daudz, bet ozona slānis nemaz un ne druskas nav plāns. Tātad tur ir jēga mērīt joda koncentrāciju atmosfērā, un šim mērķim tika radīts uz kuģa bāzēts ROFLEX instruments, ko vēlāk Spāņu pētnieki lietoja arī tuksnešos un citur atklātā dabā. Instrumenta galvenā sastāvdaļa, ja neskaita spektrometru joda luminiscences sāvīrziēnā novērošanai un cauruli, kam cauri sūc pētāmo gaisu, ir joda ierosmes references gaismas avots. Lai jods luminiscētu, tas jāierosina ar joda

16 - Bilal Ahmad Reshi, Shyam Kumar, Anuradha Misra, Raghava Varma (2019). Multivariable study on growth of diamond on diamond substrates by microwave plasma chemical vapour deposition. IOP Publishing Materials Research Express, Vol 6, No 4.

17 - Matsumoto, S., Sato, Y., Tsutsumi, M. *et al.* Growth of diamond particles from methane-hydrogen gas. *J Mater Sci* 17, 3106–3112 (1982). <https://doi.org/10.1007/BF01203472>

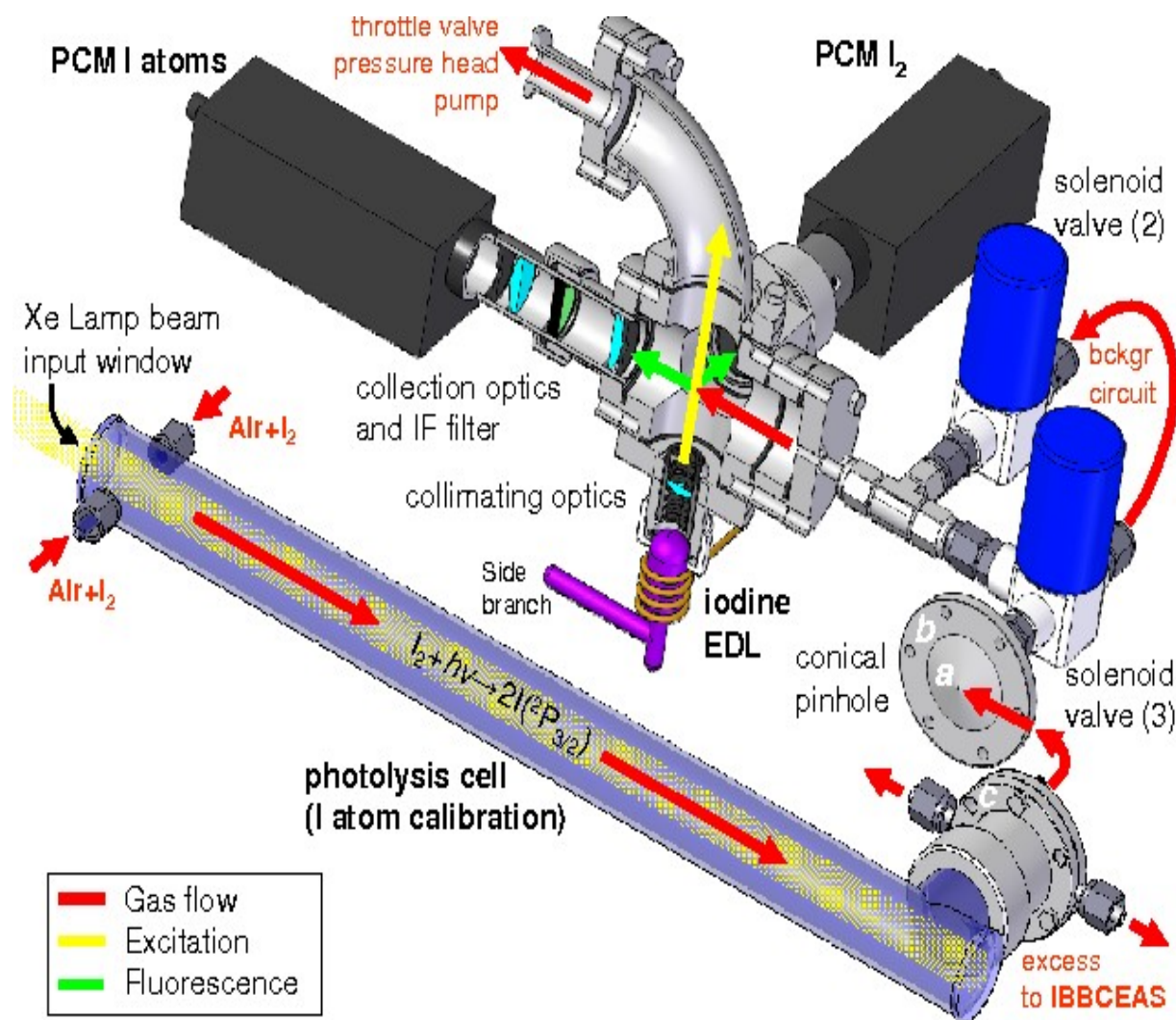
18 - www.opsis.se/en/Products/Monitoring-Methods/UV-DOAS-Technique

rezonanses spektrālo līniju, un ierosinošā stara intensitātei vēlams tuvoties lāzera stara raksturīgajai intensitātei. Turklāt pat niecīga novirze viļņa garumā sabojās visu jutību, tāpēc jāspīd taisni jodam, nevis kādam tā aizstājējam. Joda lāzeri gan vispār eksistē, pat divi - AGIL un COIL sistēmas, taču abi strādā NIR diapazonā pie 1.315 mikroniem viļņa garuma, bet te vajadzīgs starojums dzeltenzaļajā apgabalā, lai fluorescence notiktu dzeltenbrūnajā apgabalā. Tāpēc, atmetot domu par darbu uz lāzera harmonikām, Spāņu izvēle bija - augstas jaudas joda ICP avots.

Mazliet par tehniskām niansēm. Visbiežāk **ICP realizē** burbulīša veida tilpumam, to ievietojot spolē, kam darba strāva ir daudzi Ampēri, bet aizdegšanās spriegums vairāki kilovolti pie frekvences 1-100 MHz. Pirmkārt, jo frekvence augstāka, jo vieglāk plazma aizdegas. Tāpēc 13,56 MHz nav izdevīga frekvence, labāk lietot 27 MHz vai vēl labāk 40,6 MHz un nedaudz augstāku. Tomēr pie šādas frekvences parādās grūtības ar pieejamo elektronikas komponentu eksistenci, piemēram, virs 100 MHz ir pieejami tikai dažī Vati spējīgi tranzistori, kā psrs vertikālā kanāla lauktranzistors КП901 (pārsteidzošā kārtā populārais IRF510 šim mērķim ir pilnīgi nederīgs). Un tā pieņemamu jaudu dabūt var tikai galēji saspringtos režīmos. Pretēji, pie 27 MHz parādās jau 1 kW spējīgi tranzistori kā DE150, DE275, DE375 un līdzīgi, taču tie ir kaprīzi, kaut arī pēdējā laikā ir izdevies tos puslīdz pieradināt. Tajā situācijā vēl nebijām apguvuši IXFH42N60 vai vēl 2x ātrāko tomēr 2x mazāk jaudīgo APT6038. Protams, tranzistori vispār eksistē līdz pat 90 GHz, taču tie ir ekstēmi maza sprieguma tranzistori, turklāt prasa perfekti salāgotas impedances, citādi nodeg uzreiz, un vai nu koronaepidēmija, vai ātrs 5G sistēmu uzplaukums ir padarījis tā, ka šo ātro ierīču pirkumam ražotājrūpnīcā šobrīd ir vairāku gadu rinda (!). Tas pats attiecas arī uz raidierīču gala pakāpju tranzistoriem, kuri turklāt ir neloģiski dārgi un domāti tikai 27 V spriegumam, kas ir par maz. Šīs problēmas šobrīd ir izdevies lielā mērā atrisināt. Otra problēma pārāk augstai frekvencei ir pakāpeniska pāreja uz mikroviļņu izlādes režīmu, kam samazinās atomāro jonu iznākums un palielinās molekulāro jonu iznākums. Droši zināms, ka šāda pāreja pie 80 MHz vēl nesākas, bet pie 470 MHz ir jau notikusi. Precīzāka pārejas frekvences noskaidrošana ir zinātnes izaicinājums, uz ko jauniem cilvēkiem ir iespējams pievērsties (!).

Tomēr jodam tvaika spiediens istabas temperatūrā ir pārāk augsts. Tāpēc izlāde var norist tikai CCP režīmā, kas ir par maz spilgts. Pirms manis ar šo tēmu lieliskas iestrādes bija veicis Dr.Phys Uldis Gross, kas šobrīd strādā Jelgavas Laukaimniecības Universitātes Fizikas katedrā vadošā amatā, un viņa izcilākais pienesums bija noskatīta ideja, ka visā tilpumā parciāls্পiedienu nosaka nevis karstākais punkts, nevis vidusmēra karstuma punkts, bet gan (un pat tai skaitā punktveida) vēsākais punkts. Vienkārši "liekie" atomi tiks termiski "pumpēti" uz aukstāko vietu, kur "piesals". Tāpēc "lampiņai" (šādu terminu ļoti neiesaka lietot, jo korekti ir lietot "**references gaismas starojuma avots**") ietaisa sānisku kātu - atzaru. Šo kātu var saldēt līdz tādai temperatūrai, lai joda parciāls্পiediens būtu gribētās 100 reizes zem argona spiediena spīdošajā ampulā. Man darbs bija uztaisīt korektu un puslīdz uzticamu augstfrekvences barošanas avotu Roflex iekārtai, un kas pats nejaukākais - saldēšanas ierīci aptuveni -40 grādu sasniegšanai apstākļos, kad dzesēšanas ūdens nav pieejams principā, piemēram tuksnesī pie +50 grādu karstuma. Protams, nemaz nav ļoti dārgi Peltjē vairākpakāpju elementi, kas ekstrēmā gadījumā spēj iedot pat 116-123 grādu temperatūras diferenci. Tomēr to ražotājs nosaka, ka jālieto ūdens dzese. Tā nu pieliku pašu labāko vara radiatoru ar spēcīgu ventilatoru un ražotājam izrādījās taisnība, vispirms viens gals atdzisa, bet pēc tam ātri sāka sasilt, līdz sistēmu nācās atslēgt izkuššanas draudu priekšā. Analizējot iemeslu, tika saprasts, ka cēlonis ir nevis radiatora nespēja atvadīt siltuma JAUDU, bet gan jaudas PLŪSMAS BLĪVUMU (W/cm^2). Identiska problēma pastāv spēļu datoriem, kur videokartei caur 1 līdz 2 cm^2 jāspēj nodzesēt tuvu pie kilovata. Tur akceptēts iedarbīgs risinājums ir siltumcaurule (**Heatpipe**). Siltumcaurule ir ar viegli virstoša šķidrums (piemēram, spirta) tvaikiem bagātīgi pildīta caurule, tā lai būtu arī kondensējies šķidrums, un šī caurule savieno dzesējamo detaļu ar daudz lielāka laukuma dzesējamo radiatoru. Nopirkām pašu lielāko, kāds bija spēļu veikalā un Sahāras tuksneša apstākļos

mīnus 45 grādi ieguvās stabili. Tiesa, ceļā vēl gaidīja pārsteigums, ka siltumizolācija, kas ir ļoti labi efektīva pie pozitīvām temperatūrām, izrādās stipri neefektīva pie tuvu kriogēnām temperatūrām. Taču putupolistirols der (it īpaši zilais blīvais) un putupoliētīlens un putuproplilēns arī vismaz ārējai kārtai der, tāpat kā putugumija. Plazmas augstfrekvences barošanas avots tiks aprakstīts tālākās sadaļās. Roflex sakarā augstāko profesionālo uzslavu nācās dzirdēt pēc vairākiem gadiem, kad Spāņi sadomāja paši atkārtot konstrukciju pēc parauga, tāpēc vērsās pie Peltjē elementa ražotāja ar jautājumu, kādu siltumcauruli labāk lietot. Tie bija atbildējuši, ka nav zināma nekāda iedomājama metode kā Peltjē elementu dzesēt ar gaisu. Līdz pat šim publikācija par ROFLEX ir visvairāk citētā publikācija, kam esmu autoru skaitā ¹⁹.



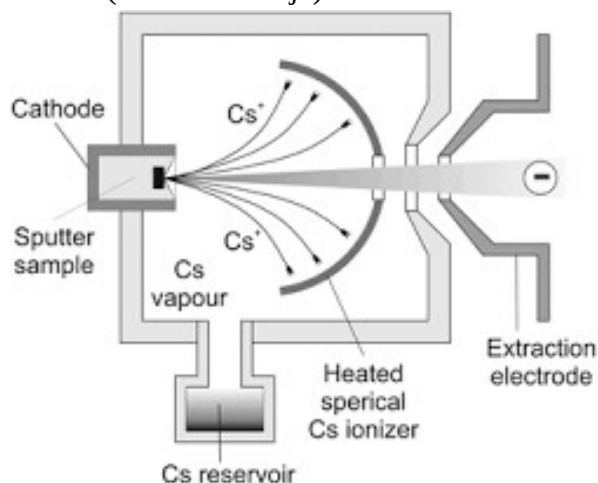
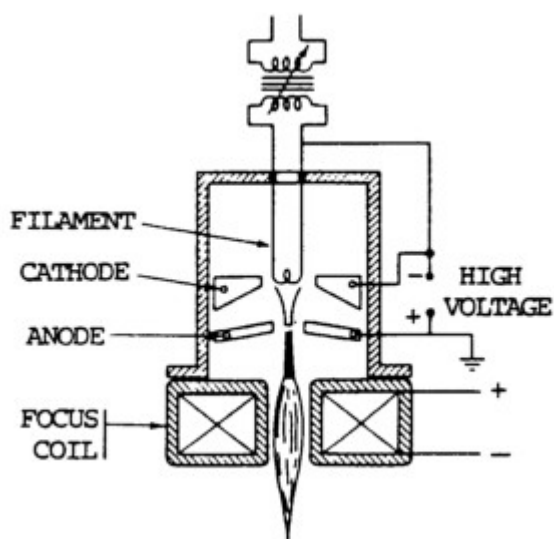
Attēlā Roflex, kurā mans ieguldījums redzams violetā krāsā ap vidu lejasdaļā "iodine EDL", kur attēlā nav iezīmēta Peltjē gaisa dzesēšanas saldēšanas ierīce uz atzara "side branch" gala kopā ar siltumizolāciju un dzesētāju.

Tagad iedomāsimies, ka gribētos **formēt jonu kūli** no šāda plazmas avota. Tad burbulīša galā būtu jāietaisa plāksnīte ar caurumiņu (apertūra), kam pretī ārpusē novietots izteikti konisks elektrods ar

19 - Juan Carlos Gómez Martín, Jānis Blahins, Alfonso Saiz-Lopez and 5 more authors. In situ detection of atomic and molecular iodine using Resonance and Off-Resonance Fluorescence by Lamp Excitation: ROFLEX, published 2010. DOI:10.5194/amt-4-29-2011Corpus ID: 41605007

augspriegumu. No elektroda "piltuves" šaurā gala raugoties, burbulītī esošie joni "redz" spēcīgu vilinošu elektrisko lauku, un daudzi joni vilinājumam padodas un kustas piltuves platā gala virzienā. Piltuves iekšpusē pēc Faradeja Būra principa lauks tos neietekmē. Taču, kad tie izskrējuši cauri "taurei", tos gaida "pārsteigums" - "taures" platais gals atrodas tālu sānos un šaurais gals atrodas tālu aizmugurē un tāpēc spēks, kas vilina atpakaļ ir salīdzinoši vājš. Tāpēc atliek staru safokusēt un lieta darīta. Protams, un tas ir jāakcentē, jonu kūļa eksistēšanai ir nepieciešams vakuums. Ja spiediens nav pat mikroTors, tad sadursmes ar pārpalikušā gaisa molekulām kūli triecienos izārdīs. Taču augstas enerģijas kūlim par ar $1E-8$ Tori var būt nepietiekoši un pavisam drošu rezultātu dod vien $1E-11$ Torr, kas ir jau galēji grūti iegūstams vakuums. Tāpēc vakuumsistēmas un vakuuma kvalitāte ir būtiskas jonu iekārtu sastāvdaļas. Par vakuumiekārtām tālāk būs atsevišķa nodaļa. Parasti tomēr $1E-6$ līdz $1E-7$ Torr vakuums ir gana dziļš.

Savādāk jonu iegūšanu realizē **Gēteborgas Universitātes** negatīvo jonu izpētes aparāts **GUNILLA**. Tajā lieto cēzija ampulu, ko mikro krāsnīnā kontrolēti uzsilda tā, ka tvaiks nāk ārā pa atbilstoši mikrodizīti un trāpa pa ieliektu uzkaršētu metāla ieliektu ikšķa naga izmēra spoguli, kam fokusā atrodas sakarsēts stienītis ar dažu mm lielu caurumiņu galā, kur iepildīts pētāmais materiāls. Tā kā starp spoguļi un stieni ir pielikts augstspriegums, tad cēzija atomi ar vairāku keV enerģiju iesit pa pētāmo elementu un izdauza to no virsmas, kur notiek lādiņa apmaiņas process starp jonu un virsmu, tāpēc jons elektrostātiski tiek vilkts uz ieliektu spoguļi, kam vidū ir caurumiņš, pa ko jons nonāk otrpus spoguļim, kur to satver paātrinātie elektrodi. Visa sistēmas nejaucība ir tā, ka pētāmās vielas ir maz, tāpēc pa dienu tā izlietojas un tā katra darbdiena jāsāk ar stundām garu uzpildi, kas turklāt ir atkarīga no laboranta rokas veiklības. Un mērījums, kura laikā vairākkārt nomainās mērāmais paraugs, var izrādīties sakļūdīts, sliktākajā gadījumā. Tāpēc izdevās realizēt senu Daga Hanstorpa ideju jaunā veidā, ka jonus var ģenerēt impulsveidīgi. Kad lāzera stars, kas tālāk jonus sagatavo analizēšanai, tūlīt tūlīt nāks ārā no impulsu lāzera, tad padodam jonus, bet kamēr lāzers uzpumpējas, tikmēr taupām jonus un to ģenerēšanu apturam, attiecīgi pārslēdzot augstspriegumus. Lielais tehniskais izācinājums ir, pirmkārt, dažas nanosekundes ātrs orientējoši 10 kV spējīgs elektroniskais slēdzis, kas komutēs augstspriegumu, un otrkārt, kā padot lāzera sinhronizācijas impulsu no daudzu desmitu metru attāluma telpā, kur elektrisko traucējumu lauka intensitāte ir daudzos kilovoltos uz metru vai vairāk. Pēdējo problēmu atrisināju ar gaismasvada optiku, šķiedru, kam vienā galā LED raidītājs un otrā galā LED uztvērējs (HFBR23x sērija). Slēdža problēmu izrādījās labi atrisinājusi ražotājfirma, kas saucas **BEHLKE** (HTS-51x sērija). Lai arī elektronika



ļauj savienot tranzistorus garā vertikālā kolonā, kur atslēdzot apakšējo tranzistoru viens pēc otra atveras lāvēnveidā visi pārējie, taču tik sarežģītu augstsprieguma slēdža konceptizstrādi nebija lietderīgi veikt, ja pieejams lēts un gatavs lietošanai elements. Rezultātā tapa raksts par šo metodi

augsta impaktfaktora žurnālā kopā ar kolēģiem no Gēteborgas. Tas ir ²⁰. Rakstā manis izmantotais jonu avota attēls iekopēts pa kreisi. Cits attēls tai pašai konstrukcijai (pa labi) no ²¹ ir iespējams saprotamāks. *Attēlā pa labi*: Gunilla sputter type jonu avots. *Attēlā pa kreisi*: Tipisks kvēldiega tipa jonu avota iekārtojums (*patapināts no globalspec.com*)

Vēl savādāk jonus iegūst aparātā **GRIBA(m)**. Akronīms atšifrējas kā *Gothenburg-Riga Ion Beam Apparatus (mobile)*. Aparāta dažas daļas izsenis tika lietotas fizikas studentu apmācībai Gēteborgas Universitātē un sastāvēja no difūzijas eļļas sūkņiem, jonu avota, paātrinātāja, Vīna masas-ātruma filtra un lidošanas laika (Time of Flight=ToF) analizatora. Aparāts pēc darba dzīves nobeigšanas tika norakstīts un nogādāts Universitātes pagrabā izjaukts. Visu, ka tur atrodas, vietējie drīkst ņemt bez maksas un izmantot zinātnē, kas derīgs. Ja 2 gadu laikā nekas nav izmantots, tad to utilizē pavisam. Būtu ļoti labs paraugs arī Latvijas Universitātei un RTU (un īpaši CFI), kā ekonomiku padarīt patiešām ekonomisku. Tā izdevās iegūt jonu avotu ar Vīna filtru un ToF analizatoru. Viss pārējais tika savākts uz citu instrumentu pārpalieku bāzes, ieskaitot pašu dārgāko - vakuumkolonnas un tāpat elektriskos barošanas avotus un sūkņus, sliedes, vakuumbunduļus, kvadrupolu, cēzija kolonnu, ko pārfrēzējām un pārmetinājām u.d.c. Cita starpā, lai arī nerūsošo tēraudu vispār ir iespējams metināt ar rokas elektrodiem, kam ir par marku augstāks leģējošo metālu saturs (306 metina ar 308; 316 ar 318 utt.), tomēr šāda šuve vienmēr satur mikroporas, un metinātāja kvalifikācijai pār to nav varas. Mazākā mērā, bet tomēr šī vaina piemīt arī MIG metināšanai. Tāpēc vakuumiekārtas metina tikai un vienīgi ar TIG aparatūru un nekā citādi.

Jonus šajā aparātā iegūst iztvaicējot adatas izmēra caurumiņā iemērktu augsttemperatūras lupatiņu, ko silda ar kvēldiegu. Temperatūru nosaka kvēles strāvas avots, taču virs volframam raksturīgās 1500°C, ko gan varot līdz 1700°C palielināt ar lantāna kvēldiegu, strādāt ir problemātiski. Šo ierīkojumu ietver bora karbīda izolatora kapsuliņa uzpirksteņa izmēros, kam izejas galā ir nerūsošā metāla disks ar caurumiņu vidū, kas pret kvēldiegu ir ar apmēram 100 V spriegumu. Viss mezgls atrodas apmēram 4 kV virs zemes potenciāla, lai izejas gals būtu drošs uz piekaršanos. Izejā ir paātrinošais elektrods zem zemes sprieguma, kas piešķir joniem izejas enerģiju. Šī iemesla dēļ jonu avotam apkārt ir orgstikla būris drošībai un atsaistīšanas transformators no tīkla. Pētāmo vielu šādā sistēmā var ievietot gan pulvera formā, gan šķidrums formā, bet gāzes formai ietaisīju mikrocaurulītes kanālu, izmantoju ledusskapja kapilāru ar iekšējo $d=0.4$ mm) un ar mikrovītnes krānu padeves pieregulēšanai. Padeves lielumu izsecina pēc vakuumetra rādījumiem. Alternatīva šajā sistēmā ir RF-ICP avots ²², kas tāpat kā kvēldiega avots atrodas vakuuma kanālā, tikai kvēldiega vietā ir rezonanses spolīte, kurā atrodas paraugs. Tad jāizmanto nesējgāzes plūsma (piemēram, argons), taču sistēmai ir trūkums - pētāmā materiāla temperatūra nav regulējama. Šo defektu dažos gadījumos var izmainīt uz regulējamu T, ja uztin atbilstošu sildspirāli un ierīko vakuumievadus.

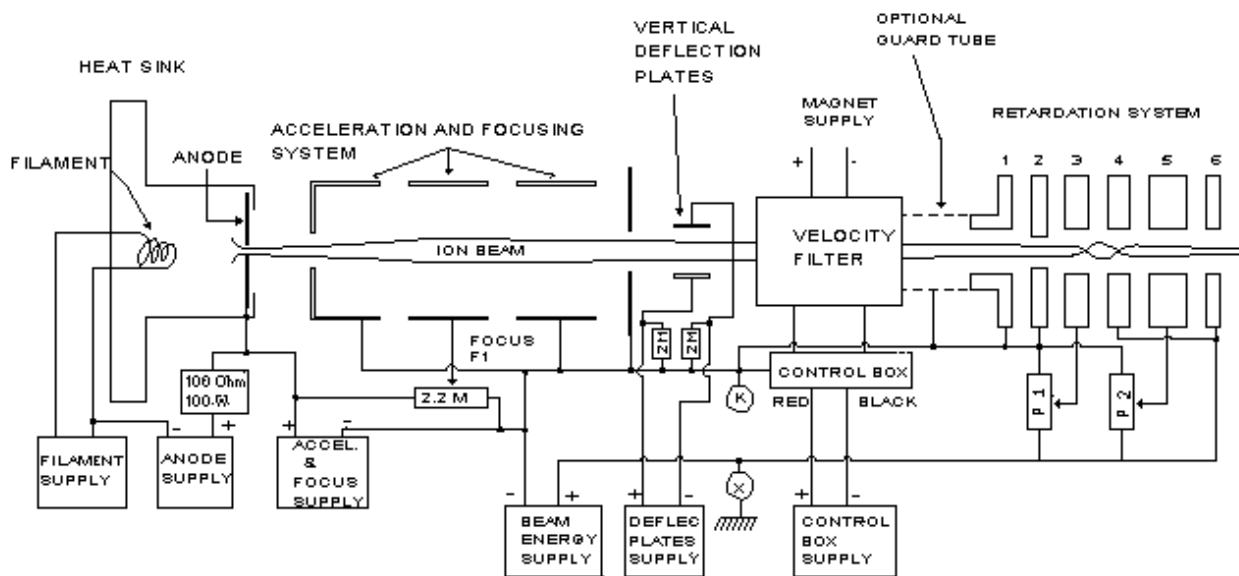
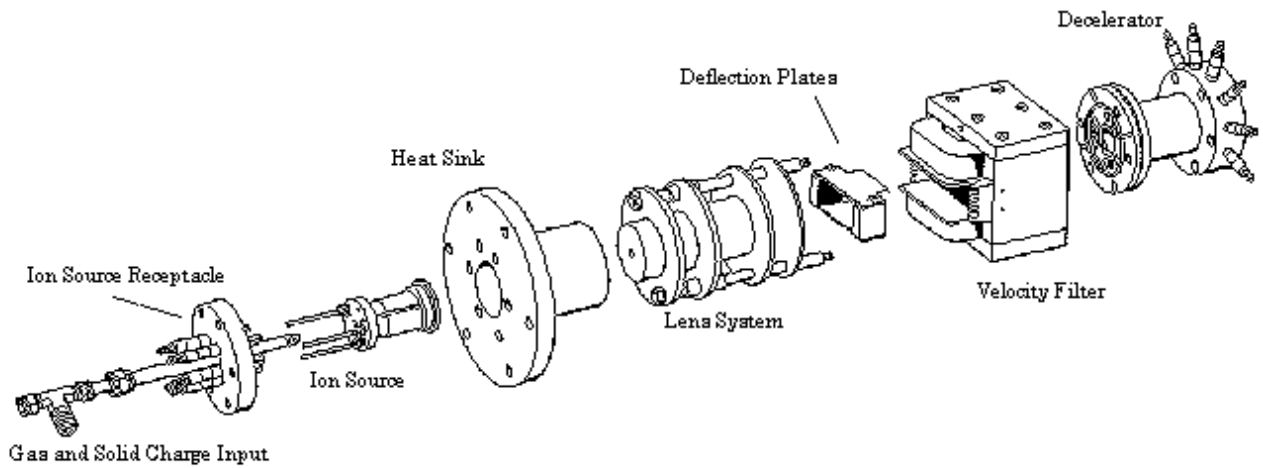
Attēlā zemāk: no firmas Colutron mājaslapas, kas šobrīd ražo calutrons (ievērojiet burta nomaiņu, Calutron ir aparāts un Colutron ir firmas nosaukums) kā izskatās mūsu GRIBA(m) jonu avots

Tagad par pašu galveno, **par rezultātiem**, kvēldiega metode ir ļoti maiga, tā ražo vairāk molekulāros jonus kā atomāros, taču arī nāk abi. RF-ICP metode ir ļoti "cieta" - tā rada pārsvarā tikai atomārus jonus. Pati maigākā jonizācijas metode ir koronējoša elektroda sistēma, ko dēvē par Dobo Katodu (Hollow Cathod = HC), tai nāk arī diezgan tīri molekulāri joni. Par šo problēmu mazliet vēlāk.

20 - Review of Scientific Instruments 91(2):023322, February 2020 with 61 reads: "Operating a cesium sputter source in a pulsed mode" by J. Blahins, T. Leopold, A. Apsitis, U. Berzins, A. Ubelis, J. Rohlén, D. Lu, D. Hanstorp.

21 - B. Schmidt, K. Wetzig "Ion Beam Technology" *Ion Beams in Materials Processing and Analysis* pp 33-116

22 -

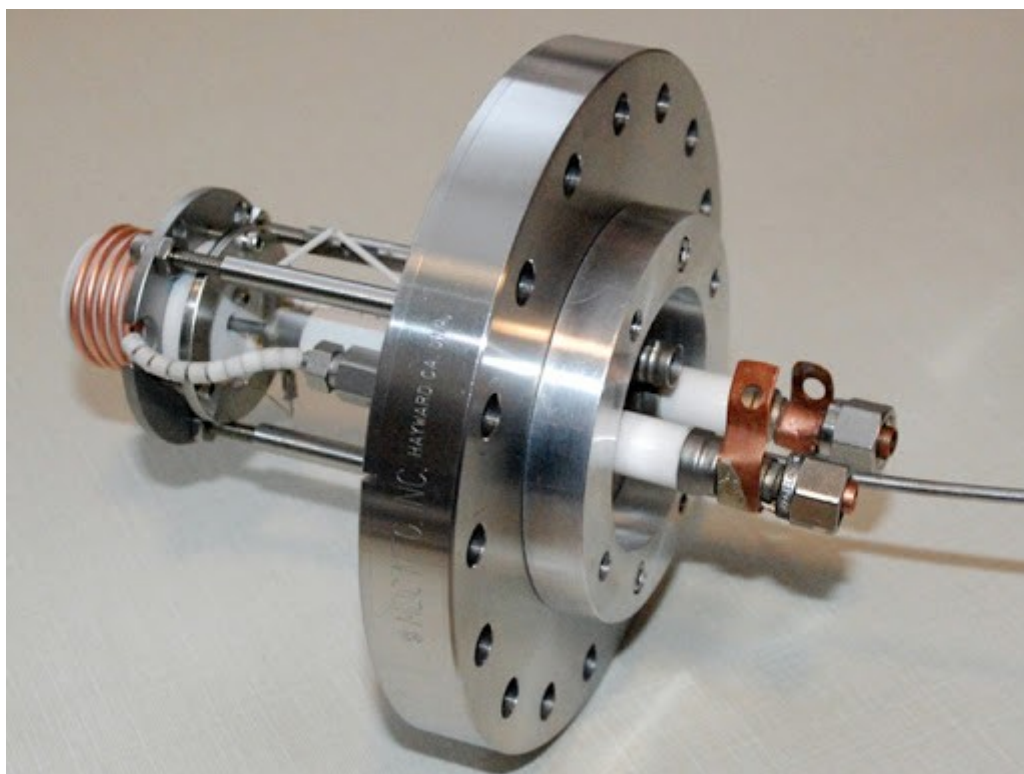


DECELERATOR USE ONLY Normal operation is to ground point X which means that the acceleration and focussing system, deflection plates and velocity filter shims etc. are floating. Do not exceed 1kV acceleration voltage. Guard tube between velocity filter and decelerator must be connected to K (Only used at extended drift distance).

Attēlā, barošanas avotu slēgums pie elektrodiem un polaritātes (tāpat no Colutron mājaslapas)²³.

23 - www.colutron.com/products/

Attēlā, Colutron ražotā jonu avota pārveide par ICP jonu avotu. Attēls no ražotāja mājaslapas ²⁴.



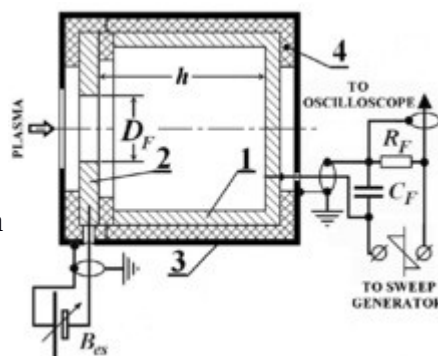
Tagad par **elektrodiem, kas stara ceļā formē kūli**. Tūlīt aiz zemētā paātrinātāja elektroda atrodas vairs nevis plāksnīte ar caurumiņu, bet gan divas plānsienu nerūsošā tērauda caurulītes ar ģeometriskas precīzijas spraugu. Otrais gredzens ir zemēts, pirmais pie apmēram 1/2 no 4 kV BES (*Beam Energy Supply*) sprieguma, tātad 2 kV ar to pašu polaritāti kā jonu avota (kapsulas) izejas atveri. Mainot BES mainām stara, piedodiet, kūļa spilgtumu (t.i. enerģiju), tāpat spilgtumu maina jonu strāva, respektīvi kvēldiega temperatūra. Savukārt pirmā no caurulītēm veic kūļa fokusēšanas/defokusēšanas funkciju. To, vai arī nāks pozitīvie joni vai negatīvie nosaka visu minēto spriegumu polaritāte. Ja pie ampulas izejas apertūras pieslēgts +70V pret kvēldiegu un BES pluss, un arī fokusēšanas 1.elektrods ir +, tad arī nāks pozitīvie joni. Reizē nomainām šīs polaritātes, un arī nāks negatīvie joni. Jāatklāj, ka pozitīvo jonu plazmā ir daudz, bet negatīvo parasti ir maz, tāpēc pārslēdzot avotu negatīvo jonu režīmā, jonu kūļa ekvivalentā strāva samazinās reizes 10 līdz pat 100. Risinājums, ja vajag lielu strāvu ir ģenerēt pozitīvos jonus un laist tos cauri lādiņapmaiņas kolonnu, piemēram, cēzija tvaikos. Taču implantācijai tā nedara, jo tur der arī pozitīvie joni. Tālāk kūļa ceļā stāv divi plakanie kondensatori perpendikulārās plaknēs, kas ļauj staru noliekt uz augšu/apakšu un pa kreisi / pa labi, lai iegūtu ideālu koaksialitāti. Vipār, visu jonu kūļa kolonnu tik un tā nākas centrēt ar lāzera staru, lai daudzos ierīkojumus sabīdītu uz vienas ass. Līka vai ekscentriskā kolonna, kam nesakrīt daudzo apertūru centrālie caurumi, ir darbam galīgi nederīga.

Vērts paskaidrot būtisku niansi, kas ir **jonu strāva**. Strāva vispār, per se, ilgu laiku tika definēta kā "spēks, kas pēc Ampēra likuma darbojas starp diviem paralēliem vadiem, kas atrodas attālumā..." un tā tālāk pēc zināmā teksta". Tas nav nepareizi, tomēr SI sistēmas Komiteja uzskatīja par nepieciešamu pavisam ne sen, **20.05.2019.** pārdefinēt definīciju ²⁵ par "elektronu skaits ar mēroga koeficientu e, kas sekundē izskrien pa vada šķērsriezumu..." un tā tālāk pēc cita zināmā teksta. Ironiska konsekvence šai sakarā sanāca skolā, kurā manis mācītie skolēni 2020.g pavasarī eksāmenā uz šo jautājumu atbildēja pēc jaunās definīcijas, un tiem par to tika neapmierinošs vērtējums, jo

24 - <http://beamimaging.com/product/rfis-100/>

25 - Bureau Internationale des Poids et Mesures. Information for users about the redefinition of the SI. Updated May 20, 2019, pieejams www.bipm.org/utis/common/pdf/SI-statement.pdf

Ministrija bija iecerējusi atbildi pēc vecās definīcijas, tā ka nācās skandalēties. Jonu gadījumā mums nav īsti vada, bet tik un tā ir kanāls, pa ko pārvietojas lai ne gluži elektroni vieni paši, bet tomēr "jāšus" uz kūļa daļiņām vai nu elektronu pārpalikums vai elektronu iztrūkums. Tātad stara (kūļa) intensitāti var uzdot gan kā jonu skaits sekundē, gan kā masas plūsma (masa sekundē), gan kā kūļa ekvivalentā strāva, un šos lielumus var pārrēķināt vienu otrā. Taisni pēdējais lielums ir noderīgākais, jo to var viegli izmērīt ar FC, un tas ir ar koeficientu piesaistīts plazmas burbulīša patērētajai strāvai. Mērīšanu veic ar Faradeja Kapa palīdzību, (Faraday Cup=FC), nē, tas ir nejauks žargons, Faradeja Kausiņa palīdzību. Faradeja Kausiņš ir jebkāds uzpirksteņa izmēra mazoksidējošies metāla krūzītes formas kauss, iekārts labos izolatoros. Lai elektroni pēc atsišanās pret krūzītes dibenu neizlektu laukā, krūzītei ir vāciņš ar tievu caurumiņu, pa ko joni lido iekšā, bet atstarotie strāvas nesēji nebūs ļoti precīzi kolimēti mikronelīdzenumu dēļ, tātad trāpīs šķībi "vāciņa" kaktos, bet ne ieejas caurumā, tātad ārā no kausiņa netiks un visu lādiņu atstās FC. Ja vajadzīga ultimātīva precizitāte, tad virsū var uzstādīt vēl vienu papildus atstarojošo elektrodu, kas saloka trajektoriju tālu no 90 grādiem pret dibenu, taču bieži tāds ir pārmērība. Faradeja Kausu pieslēdz pie sevišķi jutīga strāvas mērītāja, piemēram femtoampermetra vai pikoampermetra, vai ļoti spēcīgu avotu gadījumā, kā jonu raķešdzinējiem - miliampēri vai pat Ampēri. Faradeja Būra koncepts nozīmē, ka viss lādiņš, kas nonāk Būra iekšpusē automātiski, saskaņā ar Faradeja Būra principu, noplūst uz Būra ārpusi, un tur to saņem pieslēgvadiņš. *Attēlā* - Faradeja Kausa stara diagnostikai (attēls patapināts no Wikipedia).



Cita starpā, lai nebūtu pārpratumu, cik labi Faradeja Būris ekranē āreja lauka nokļūšanu uz Būra iekšpusi, tik absolūti netiek kavēta lauka izplatība pretējā virzienā. Ar ko man bija tas gods gandrīz iekrist, sadarbojoties ar radioreleju datu pārraidīšanas firmu, kas apkalpoja mazās elektroģeneratoru ietaises, un pa radiolinku vajadzēja noraidīt virkni iekārtas darba režīmus, lai centralizētais operators tos redz.

Motorģeneratori izrādījās uzstādīti cinkota dzelzs konteinerā, bez spraugām un bez atļaujas izurbt caurumu antenas kabelim. Aiz izmisuma ieslēdzām raidītāju pie vismaz attaisītām durvīm, nu, paskatīties vai vismaz datus lasa. Izrādās, ne tikai lasa, bet arī sekmīgi aizraida līdz galam. Aiztaisījām duvis, signāls mazliet savājinājās, bet tāpat radioraidītājs strādāja sekmīgi. Turklāt nemaz ne daudz nelikās traucēties no tā, ka dzelzs būda bija iezemēta. Secinājums: uz āru no Faradeja Būra signāls izplatās, un RF frekvencēm iezemējuma ķēde ir tik gara (induktīva), ka zemējums signāla ķēdes impedanci sabojā tikpat kā nemaz. Pretējā virzienā, protams, radiosignāls ir teicami ekranēts.

Tagad atkal par smalkākām detaļām. Faradeja Kausam lietojams **mazstrāvas mērītājs**, kam **transimpedances kaskādi** agrāk veidoja uz balansētas kopkatoda shēmas radiolampu pāra pamata, tāds labi tiek galā ar pikoampēru desmitiem, bet ir vairākas pusvadītāju mikroskāmas, kas spēj saniegt pat tik zemas strāvas kā 3 fA. Ja $1A=1,6E+19$ gab/sek plūsma, tad 3 fA jeb $3E-15$ A nozīmē apuveni 5000 elektronus sekundē. Pavelkot garumā laiku, teorētiski var mēģināt vismaz tiekties uz viena vienīga elementārā lādiņa saskaitīšanu (kaut arī tādām mērķim ir arī labāki rīki kā piemēram pielāgots MCP (*Microchannel Plate*) kā ²⁶, vai pa vienam elektronam vai fotonam kā SJUTS "taurīte", korektāk saukta par "*Channeltron*", kas veiksmīgi iebūvēta SWIM, LISA, XSAN MIPA, DIM, YPPi, PRIMA u.c. kosmiskās izpētes satelītsistēmās ²⁷. Piesauktais SJUTS nozīmē "type KBL408" ko ražo *Sjuts Optotechnik*, Göttingen - neparasti interesants un perspektīvs, kaut arī

26 - www.surface-concept.com/products_mcp_detectors_non_imaging.html

27 - Wieser M., Barabash S. (2016). A family for miniature, easily reconfigurable particle sensors for space plasma measurements. <https://doi.org/10.1002/2016JA022799>

trausls, sensoru paveids. Mana pieredze darbā ar to beidzās ļoti slikti, avarējot elektrotīkla atslēguma dēļ eļļas difūzijas vakuumsūkņa forvakuumsūkņim, "taurīte" tika piesārņota ar eļļas tvaikiem, tāpēc sekoja bezgalīgs tās tīrīšanas darbs. Tas ilustrē, cik uzmanīgam ir jābūt.

Minētā strāvas-ultrajutīgā mikroshēma saucas LMP7721, tomēr mana pieredze ar tās lietošanu ir drīzāk negatīva, tā uzvedas izcili kaprīzi un 3 fA ir galēji iespējamais sniegums, kas nebūt ne vienmēr ir garantēts, patiesībā izpildās tikai dažiem eksemplāriem no pilnas čipu kastītes. Daudz uzticamāka ir mikroshēma LTC6268 un LTC6269, kam gan jutība ir vien 60 fA, toties tās ir stabilas un garantēti strādā atbilstoši diviem katra elektronika "ticības apliecinājuma" stūrakmeņ-dokumentiem: a) *Datasheet* un b) *Application Note*. Jāpiezīmē, ka elektronikas jomā zinātniskās publikācijas ir ļoti grūti publicējamas, tāpēc pārsvarā tiek nopludinātas internetā kā žurnāliem nepiesaistītas autoru vairāk vai mazāk privātas iniciatīvas veidsaitu veidošanā. Savukārt abi minētie ir juridiski saistoši dokumenti, ko katram elektronikas komponentu ražotājam ir legāls pienākums izmērīt, precīzi dokumentēt, un uzturēt tīklā.

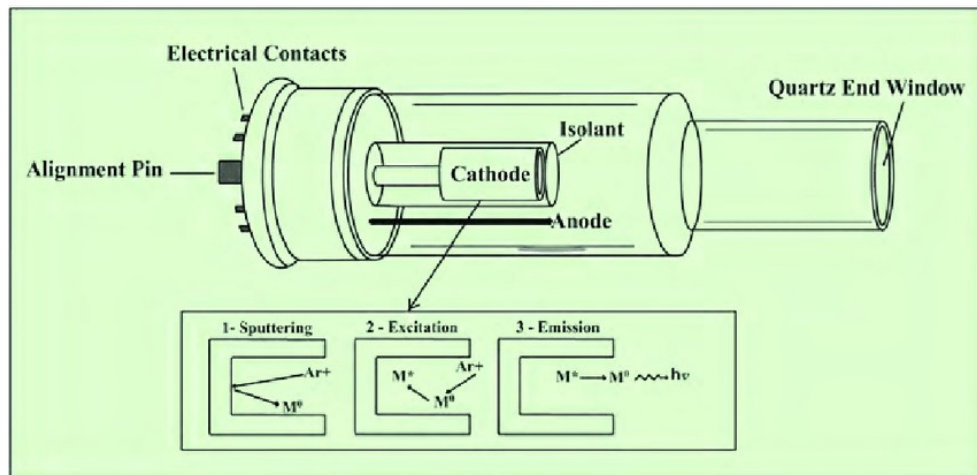
Tipiska kūļa strāva biežāk tomēr ir mikroampēri vai pat desmiti līdz simti, tāpēc galēja jutība nemaz nav vajadzīga, ja vien ne gadījumam, kad taustoties jāmeklē KUR stars ir trāpījis. Kamēr tas trāpa ne pa FC bet garām, tikmēr reakcija ir tūkstošiem-miljoniem reižu mazāka kā trāpot ieejas caurumiņā, tāpēc liela jutība labāk palīdz saprast uz kuru pusi regulēt fokusēšanas un nolieces kloķus. Vēl jāpiemin, ka šādiem super-mazu strāvu mērītājiem rodas neiedomājamas galvassāpes no izolatora materiāliem. Daži pavisam populāri labi izolatori ir vairāk vai mazāk segnetiski, tāpēc paši dod lādiņu. Citi ir triboelektriski aktīvi, tāpēc mazākā kustība vai vibrācija dod lādiņu. Vēl citi ir higroskopiski, un, ūdenim iesūcoties porās vai tai skaitā kondensējoties uz vismas, maina sistēmas kapacitāti un līdz ar to lādiņu. Tādu materiālu, kam nav nevienas no minētajām kaitnieciskajām īpašībām, nav vispār. Vispār, kvarcs ir stipri slikts materiāls, teflons ir slikts bet pieciešams, visas plasmās ir grūti pieciešamas, kaut cik strādā keramikas, taču ar spīdīgu virsmu nevis matētu. Tas ir viens no iemesliem, kāpēc superjutības ampermetra shēmu parasti nelodē uz iespaidplates (tai piemīt visi defekti vienlaicīgi), bet gan lodē "ezītī", kur visi vadi karājas 3-D gaisā. Tā kā ieejas pretestība šādiem aparātiem var sasniegt pat Teraomus, tad aparātu var nogalināt pat nelieli inducētie lādiņi. Lai novērstu šādus draudus, ir saprātīgi ieeju noīsināt ar aizsardzības "izlādētāju". Viena izcila aizsardzības alternatīva ir CG75L, ja vien apmierina noplūde 10 Teraomi, 75 līdz 300 fA un maksimums 1 MHz ja vien nerunājam par DC (līdzstrāvu). Nostrāde pie 75 V, parazitiskā kapacitāte 1.5 pF.

Dobā katoda izlādes sistēma. Tā ļauj iegūt visai tūrus atomāros jonus, taču kas ir daudz būtiskāk, tā ļauj jonizēt vielas, kam ir anomāli zems tvaiku parciāls spiediens. Autoelektronu jonizācija, uz ko tā pamatojas, strādā pat uz tādiem metāliem, kam gazificēšanās temperatūra ir pamatīgi virs 3000 grādiem, piemēram bors ar 3927°K pie 100 000 Pa, 3545°K pie 10 000 Pa, 3141°K pie 1000 Pa, 2822°K pie 100 Pa, 2562°K pie 10 Pa un 2348°K pie 1 Pa.

Pēc dobā katoda sistēmas strādā lielākā daļa neona spuldzītes, piemēram, katrā padomju elektronikas kastē iebūvētajai oranžajai tīkla indikatorspuldzītei MH-0,3. Tas ir cilindrs ar iekšējo virsmu, kas pārklāta ar pētāmā jona vielas pulveri. Ja pulveris neturas klāt, var izmantot jebkādu poru materiālu, lupatiņu, vīkšķi, vai fiksēt to ar atsperītēm. Zināmas trīs fabricētas HV bora references spektra lampas, Perkin-Elmer "electrodeless discharge lamp", no ražošanas noņemtā bij. DDR Hohlkatodenlampen series 0735.007, un krievijas lampa ГС8-000ПС (Volgograd scientific institute for Optical-Physical Measurements), visām strāva ir mikroampēra kārtas lielums.

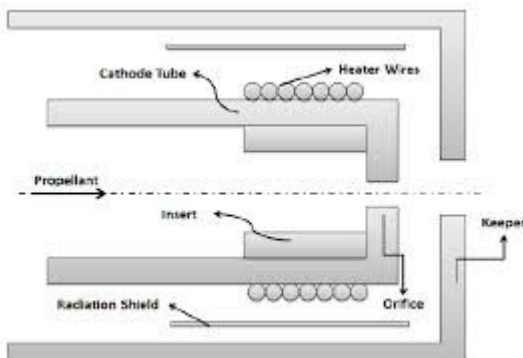
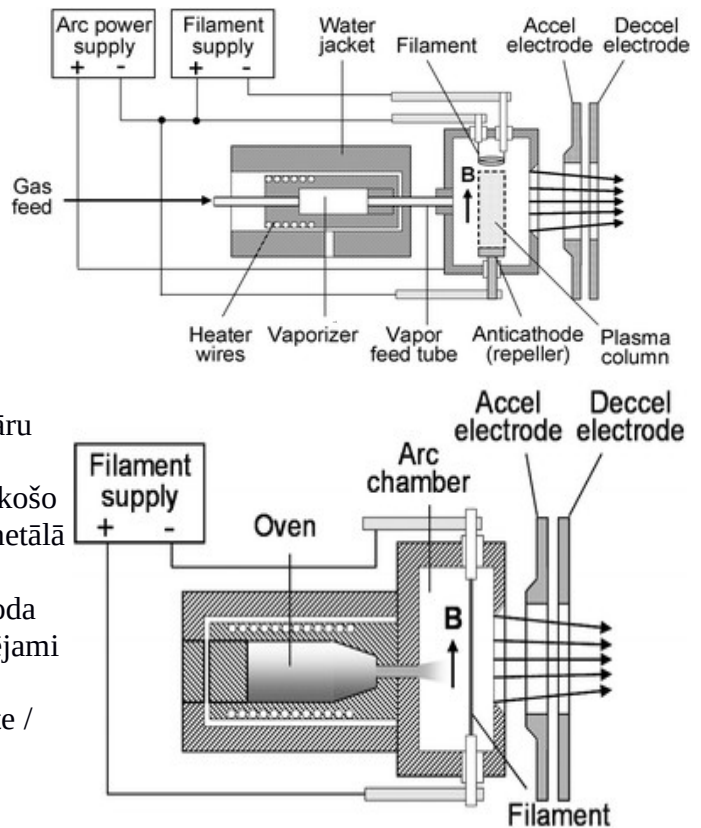
Ja vakuumtrauka sistēma nav noslēgta, bet ir zem dinamiska vakuuma, piemēram raķešdzinējos, tad nesējgāzes plūsmu var novadīt gan pa ārpusi katodam, gan pa iekšpusi, un gadījumiem, kad tiecas

maksimizēt jonu strāvu, iesaka iekšēju nesējgāzes plūsmu. Līdz ar to, kad strāva nav tik svarīga, lieto vienā galā noslēgtu cilindrisku katodu, jo tādā labāk iekšā turās jonus veidojošais pulveris, bet,



kad vajag plazmu, kas izvirzās laukā no starpelektrodu spraugas, tad iesaka iekšēju gāzes plūsmu, respektīvi cilindru bez vāciņa vai ar daļēju vāciņu. Anods var būt gan riņķveidā saliekta stieplīte, gan identisks ar katoda caurulīti izteikti īsāks gredzens, gan vienkārši vienā vai vairākās malās izvietoti aksiāli īsi vadiņi, un pat koncentriska plāksnīte ar centrālu caurumu. Mainot nesējgāzes plūsmas lielumu var ieregulēt cik tālu plazmas zonu iznesīs laukā no spraugas, samērā līdzīgi kā sveces liesma izbīdās ārpus sveces dakts izmēriem. Šāds efekts ir vairāk kā nepieciešams divos gadījumos - jonu raķešdzinējiem un tāpat, ja HC avotu grib kombinēt ar ICP, lai grūti kūstošiem materiāliem kā bors panāktu atomāru bora jonu iegūšanu, kā arī, lai aktivizētu jonu iznākumu no HC, jonizējot HC cilindrīti ienākošo nesējgāzi. Tomēr jābrīdina, ka ICP jebkādā metālā inducē virpuļstrāvas, kas novestu pie lieliem jaudas zudumiem un nenormāli uzkarstētu anoda elektrodu, tāpēc plazmas "aste" jāizbīda iespējami daudz laukā no starpelektrodu zonas.

Attēlā - Dobā Katoda versija pēc Researchgate / Oguz Korkmaz.



Attēlā: Cita konstrukcija pēc turpat Rodrigo Fernando un dos Santos Salazar (kā neona signāllampīņā).

Dobā katoda sistēmas pie pilna atmosfēras spiediena

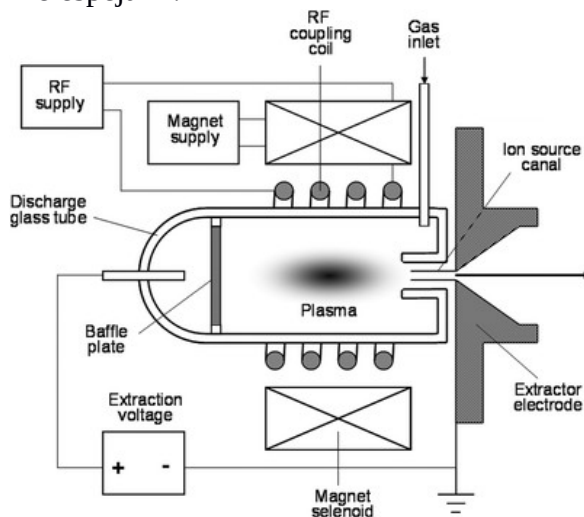
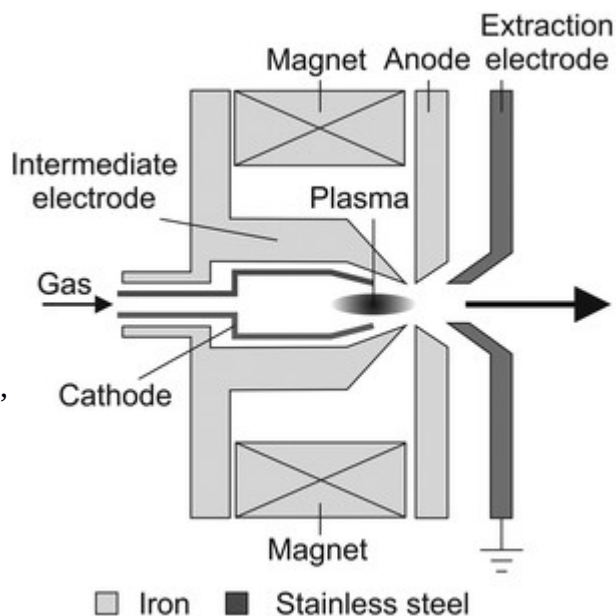
apskata un salīdzina ar ICP sistēmām darbs ²⁸

Tā kā ERAF Projekta apakšuzdevums ir iegūt stabilu, ilgmūžīgu un lētu ekspluatācijā cietvielas bora atomāro jonu avotu, tad literatūras apskatā pavisam īsi pieskarsimies kā bora jonus taisa ar gāzveida avotiem, kas ir fluorīdu gadījumā ir izmeklēti indīga un neērta tehnoloģija, kaut arī visizplatītākais veids bora jonu iegūšanai - un tad pamata vērbu piegriezīsim Dobā Katoda modifikācijām šim mērķim.

Labs pārskata raksts ²⁹ iesaka sekojošu **jonu avotu klasifikāciju**:

1) *Hot cathode ion sources*, kas ietver vairākas konstrukcijas - *Sidenius source/Danfysik* ar Dobā Katoda principu, kam aiz krāsniņas izejā ir nehomogēns kūli koncentrējošs magnētiskais lauks, *Freeman source* - kas pēc krāsniņas, kura ražo tvaikus, izmanto 40-700 V spriegumu starp diviem elektrodiem gāzes jonizēšanai, un *Bernas ion source*, kas lieto divus kvēldieģus, viens iztvaicē vielu un otrs izlādes kamerā veido diodes (kenotona) radiolampu, visi attēli rakstā minētājā secībā.

2) *Cold cathode ion sources* - tai skaitā *Penning ion source* - tas vēsturiski radās kā vakuummētra sensors, bet sastāv no vai nu sildītiem vai aukstiem elektrodiem magnētiskā laukā, kas koncentrē plazmu dobumā, kur plazmu ģenerē Dobā Katoda izlāde. Turklāt magnēts virtuāli pagarina jonu brīvā noskrējiena garumu, tādējādi uzlabojot jonizācijas iznākumu. Plazmu veido gāze, tāpēc cietvielai šādu sistēmu pielietot ir sarežģītāk, bet ne neiespējami.



3) *High frequency ion source* ko biežāk gan apsaukā par RF-ICP vai RF-CFC (atkarībā no strāvas režīma un spiediena, kas ir de facto temperatūra, attiecībām). Ar tā darbību jau iepazīnāties augstāk, taču te ir labs attēls (zemāk). Labs salīdzinājums HC un ICP sniegunam atrodams ³⁰.

ICP avots var labi strādāt starp 10 un 100 MHz, taču ar nolūku izvairīties no radiosakaru un TV kanālu traucēšanas, darba frekvenci izvēlas kā 13,56 vai tā harmoniku 27 un 40,6. Sarežģītāk ir ar lielākām frekvencēm, jo tad viegli pietuvoties FM plašpeldes diapazonam 87,5-108 MHz, un ja atbrauks radiosakaru inspekcija, rezultāts var būt jebkāds. Vēl vairāk, stipri virs 100 MHz izlāde, loģiski, tuvojas mikroviļņu

28 - Greenfield S., Durrani T.M., Tyson J., Watson C.A. (1990). A Comparison of Boosted-Discharge HollowCathode Lamps and an Inductively Coupled Plasma (ICP) as Excitation Sources in ICP Atomic Fluorescence Spectrometry. University of Massachusetts Amherst, Chemistry Department Faculty Publication Series. Pieejams <https://core.ac.uk/download/pdf/191439973.pdf>

29 - Bernd Schmidt, Klaus Wetzig. Ion Beam Technology. Ion Beams in Materials Processing and Analysis pp 33-116

30 - Baránková H., Bardos L. Hollow Cathode and Hybrid Atmospheric Plasma Sources. Angstrom laboratories, Uppsala University. 18th International Symposium on Plasma Chemistry, 2007, Kyoto, Japan. Atrodams <https://plas.ep2.rub.de/ispcdocs/ispc18/ispc18/content/paper00052.pdf>

izlādei, kam ir pilnīgi cits raksturs attiecībā uz molekulu/atomu attiecību nekā ICP. Precīza robeža, pie kādas frekvences viena izlāde pāriet otrā, šķiet, nav zināma.

Manis veiktie RF lauka mērījumi LU-ASI manis radītajiem ICP avotiem rāda, pat nelietojot nekāda veida ekrānus ap spolīti, radiofrekvenču lauks jau dažu cm attālumā nokrītās par kārtu, spriža attālumā par vairākām kārtām, bet metra attālumā ir vājāks par plašpatēriņa radiostaciju raksturīgo lauka intensitāti. Mēraparāti tika lietoti divi vienlaikus: GQ-390 (ražotājs ³¹) no 0 Hz līdz 10 GHz ar iebūvēto frekvenču analizatoru un TQ-195 trīskoordinātu “bumbuļgalvas” aparāts 50-3500 MHz bez frekvences analizatora (ražotājs ³²). Protams, rezultāti bija labi sakrītoši. Respektīvi, ja vien lauka avots nav uzstādīts gluži lidmašīnā (kā plāno NASA ar ROFLEX gen.2), tad no radiotraucējumiem var īpaši nebaidīties, jo spolīte ir ļoti slikta "antena". Galu galā, lai sliktu antenu pārvērstu par labu antenu, vispirms ir krietni jāpastrādā ar impedanču salāgošanu gan kabeļos, gan pašai antenas konstrukcijai ar el.mag.viļņa impedanci vakuūmam (377 Omi). Un radiofrekvenču indukcijas spolīte atrodas samērā tālu no šīs maģiskās vispasaules konstantes $376.730313668(57) \Omega$ (**impedance of free space**), tāpēc izstaro vidē minimāli.

Inducētais E lauks no antenas (vienalga CCP vai ICP) ar attālumu dilst kā $E=E_0 \cdot \exp(-x/\delta_p)$, pamatā plazmas Debaija ekranēšanas efekta dēļ. Cik dziļi starojums ietiecas plazmā rēķina ar $\delta_p \approx c/\omega_{pe} = \sqrt{\epsilon_0/m_e n_e}$, pieņemot, ka sadursmju frekvence ir daudz zemāka nekā ierosmes (t.i. ārējā RF lauka) frekvence, un šo iespīšanās dziļumu sauc par **skinefekta slāni**. Solenoidālā antena (spolīte ar 3 līdz 6 vijumiem) ir sajūgta ar cilindrisko plazmas ārējo sienīņu un var tik uzskatīta par parastu transformatoru ar primāro tinumu-spoli un sekundāro tinumu – plazmas čaulu. Plazmas čaulas elektrisko pretestību var aprēķināt kā rezultātu elektronu sadursmju procesiem kā $R_p = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \sigma / l \cdot \delta_p$, kur $\sigma = e^2 \cdot n_e / m_e \cdot v_e$ ir plazmas vadītspēja, un v_e ir summārā elektronu sadursmju frekvence slānī. Induktivitāte L_p plazmas čaulai ir aprēķināma kā $L_p = \Phi_B / I = \mu_0 \cdot \pi \cdot r^2 / l$. Savukārt antenas induktivitāte solenoidālai spolei ir $L_{ant} = \mu_0 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot N^2 / l$ un abu spoļu mijinduktivitāte ir $L_{mutual} = \mu_0 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot N / l$. Lai sastādītu šāda transformatora modelim vienādojumu, apzīmē ar R spoles vada centra radiusu un r plazmas čaulas vidusmēra biezumā radiusu, bet ar indeksiem rf lielumus primārā tinuma pusē un p sekundārā tinuma pusē (plazmā), tad rodas sekojoša vienādojumu sistēma ³³ $V_{rf} = j \cdot \omega_{rf} \cdot L_{ant} \cdot I_{rf} + j \cdot \omega_{rf} \cdot L_m \cdot I_p$ un $V_p = j \cdot \omega_{rf} \cdot L_m \cdot I_{rf} + j \cdot \omega_{rf} \cdot L_p \cdot I_p$ un $V_p = -I_p \cdot R_p$. Tagad, pieņemot, ka $\omega_{rf} \cdot L_p \gg R_p$ var atļauties pilna divu transformatora tinumu modeļa vietā iedomāties ļoti vienkāršu ekvivalentās spoles un ekvivalentā rezistora virknes slēgumu, kas pieslēgts V_{rf} , kur $R_{eq} = N^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \sigma / l \cdot \delta_p$ un $L_{eq} = \mu_0 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot N^2 / l \cdot (1 - r^2 / R^2)$. Piemēram, tipiska antenas ģeometrija 13.56 MHz RF sistēmai (šī ir frekvence, kurā drīkst “piecūkot” ēteru ar rūpnieciskajām frekvencēm un apraidei tas tikpat kā netraucē) ir $N=5$ vij, $l=50$ mm, $R=50$ mm, $r=45$ mm. Ja tipisks plazmas blīvums ir $1E18$ m⁻³ un elektronu sadursmju frekvence ir 10 MHz, tad $R_{eq}=11 \Omega$ un $L_{eq}=0.94 \mu H$ ($\omega_{rf} \cdot L_{eq}=80 \Omega$). Pašsaprotami, ka rūpnieciskais ģenerators, kas ļoti ticami izražots darbam ar 50 Ω slodzes impedanci, nebūs optimāli salāgots ar šādu slodzi. Tāpēc rūpnieciskajās ierīcēs parasti lieto kabeļa galā **impedances salāgošanas mezglu**, piemēram ³⁴. Izcili ērts datormodelēšanas rīks ar iebūvētiem salāgošanas modeļiem, kam tikai jāievada sākuma un beigu vērtības, ir RF-Sim (bezmaksas programmatūra). Tomēr prasmīgi pielasot barošanas spriegumu un strāvu, ir iespējams panākt diezgan precīzu impedanču salāgošanu spolei ar ģeneratoru **bez nekāda salāgošanas mezgla**, it īpaši, ja vadi ir tik īsi, ka spole ir vienlaicīgi arī rezonanses tanks, kas nosaka ģenerācijas frekvenci. Proti, zudumi RF pārvades līnijā, kas īsāka par lambda desmitdaļu ir nenozīmīgi un ja tā īsāka par lambda četrdesmitdaļu, tad ļoti daudzas kārtas zem pārvadāmās enerģijas. Savukārt ģeneratora izejas pakāpei $R_{out} = V_{cc} / I_c$, kas abi ir iestatāmi parametri, tāpēc panākt to vienlielu ar lampiņas R_{eq}

31 - www.gqelectronicsllc.com/comersus/store/comersus_viewItem.asp?idProduct=5678

32 - www.tenmars.com/m/2001-1682-689905,c19121-1.php?Lang=en

33 - Lieberman M.A. (2003). Principles of plasma discharges. University of California, Berkeley

34 - Staples J., Schenkel T. (2001). High-efficiency matching network for RF-driven ion sources, Proc. of the 19th Particle Accelerator Conference, Chicago, USA, 2001, pp. 2108–2110 (pieejams www.JACoW.org/).

prasti var pamainot barošanas spriegumu. Tādā gadījumā pašierosme ir liela priekšrocība, jo plazmai nedaudz mainās induktīvā slodzes komponente kā funkcija no jaudas, tāpēc plazma allaž pati pieregulēs frekvenci (ne pārāk plašās robežās, caur L_{eq} izmaiņu), lai maksimizētu izstaroto jaudu. Ja lieto ārēju ierosmi, tad rezultāti ar frekvences stabilizēšanu, piemēram ar pjezoelementa (kvarca rezonatora_ palīdzību dod drīzāk maz derīgu rezultātu, tomēr lietojot frekvences pieregulēšanas atpakaļsaiti rezultātiem būtu jābūt labiem, piemēram **ātrgaitas ar PLL** palīdzību (*Phase Locked Loop*)³⁵ un ³⁶ un ³⁷ (pēdējā grāmatā PLL veltīta vesela nodaļa), kur tik augstām frekvencēm var spēt izsekot kāds no 4046 sērijai līdzīgiem bet ātrākiem čipiem (4046 maksimālā frekvence ir 1.4 MHz), piemēram LMX2306, ADF4350, Max2606 un daudzi citi.

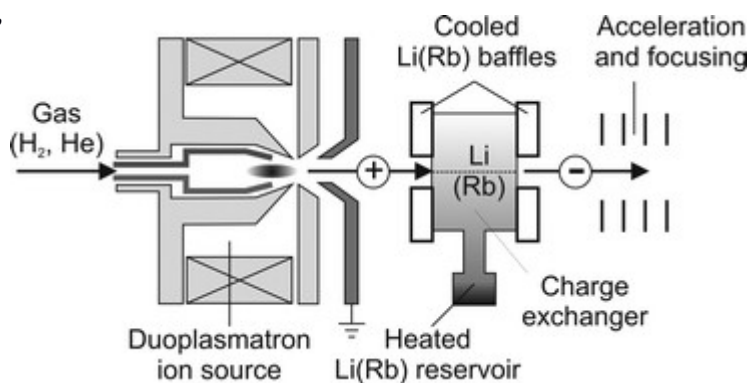
Hollow cathode ion source - ar Dobā Katoda sistēmu jau esam pazīstami. Tomēr par konkrētiem konstrukcijas izpildījuma variantiem nozīmīgi ir iepazīties ar publikāciju³⁸.

Duoplasmatron ion source - ar Duoplazmotronu saistās lielākā daļa no pastāvošajiem bora implantācijas aparātu darbs. Tas ir avots, kas spēj strādāt tikai ar gāzveida darba vielu. Tāpēc pusvadītāju industrija plaši lieto bora fluorīdus ar dažādu ķīmisko vērtību, BF, BF₂, B₂F₃ u.tml. Avota īpatnība ir zemas jonu strāvas pozitīvo jonu režīmā un lielas negatīvo jonu režīmā. Piemēram, He⁺ tas rada ar simtiem mikroampēru un tikai H⁺ dod ap 1 mA, kamēr H⁻ un deitērijs D⁻ pat 150 mA nav galējais limits.

Minētā iemesla dēļ bieži Duoplazmotronu lieto kopā ar lādiņapmaiņas kolonu, parasti cēzija tvaiku, bet rubīdijs arī der³⁹. Tāda ir uzstādīta arī uz GRIBA(m), un to var ekspluatēt, ja ir vēlme pēc lietām kūļa strāvām, vai atstāt neuzsildītu,

ja kūļa strāva apmierina mazliet mazāka.

Lādiņa apmaiņa noris molekulāra trieciena rezultātā, tāpēc vispirms kūļa daļiņa, piemēram He⁻ saduras ar, piemēram H⁻ un rodas H⁻ un He(0). Otrreiz notiekot sadursmei He(0) pārtop par He(+). Tā kā katram jonam izejā vēlamas 2 sadursmes nevis 1 vai 3, tad kanāla garumam un spiedienam ir liela nozīme. Parasti pirksta resnuma kanāls ir apmēram 4 collas garš.



Attēlā: Duoplazmotrons ar lādiņapmaiņas kolonnu.

Sputter ion source pamatā saprot kā cēzija strūkuli uz spogulīti, identiski kā Gēteborgas aparātā, kas aprakstīts šīs nodaļas iesākumā. Līdzīgs uzstādīts arī Drēzdenes Helmholtza centrā. Taču jonu strāvas avotam nav lielas, tas iemīļots varāk zinātniskiem mērķiem nevis tehnoloģiskiem.

Liquid metal (or metal alloy) ion source (LMIS) - te viss metāls atrodas izkusušas vannas stāvoklī, un no iztecēšanas to paargā ļoti smalka koniska asa adata, kura ar savu spīci gan rada jonizāciju, gan regulē metāla mikropadevi. Adata ir dažus mikronus resns volframs un spriegums ir liels - no 2

35 - šķīrkļis Phase locked loop. https://en.wikipedia.org/wiki/Phase-locked_loop

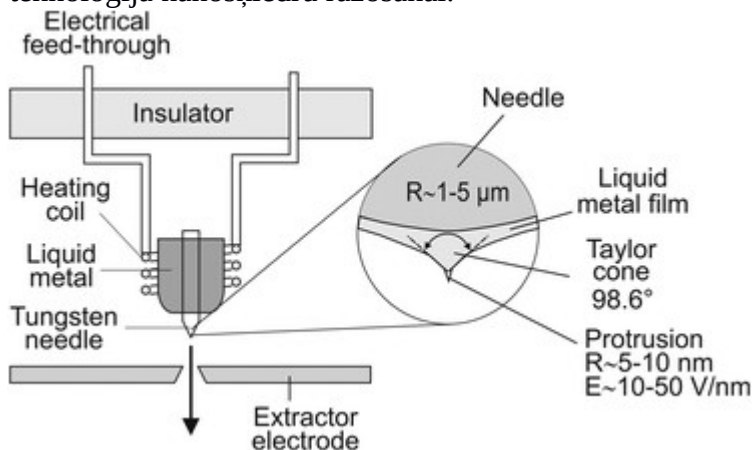
36 - Ulrich Tietze, Christoph Schenk, Eberhard Gamm (2008). *Electronic Circuits: Handbook for Design and Application* 2nd Edition, Springer, 1281 p.

37 - Horowitz P., Hill W. *The Art of Electronics*, third edition. Cambridge University Press, 2015, 1022 p.

38 - Nagual Simmons (8-2018). *Experimental Comparison between Hollow Cathodes with Cermet, Lanthanum Hexaboride, and Barium Oxide Insert Materials*. Available at https://scholarworks.wmich.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4740&context=masters_theses

39 - Philipp G, Scheib U, Hofmann A (1974) He⁻ and Li⁻ ions from a modified charge exchange source. *Nucl Instrum Methods* 115:507-508

līdz 10 kV. Avotam unikāls ir plazmas blīvums, lai arī ļoti mazā apgabalā zem 20 mikroniem, bet jonu strāvas spļgtums ar kārtu $1E+6$ A/cm² uz steradiānu. Arī strāvas blīvums uz 10-20 mikronu laukumu sanāk milzīgs, ap 10 A/cm². Grūti kūstošiem metāliem sistēma neder. Reti tehnikā lietota īpatnība ir adatas noasinājuma leņķis 49.31°, ko sauc par "**Taylor-cone**". Tieši pie šāda leņķa vislabāk veidojas elektrostātiski izvilkta stūdziņa no ~1,5 līdz 3 mikronus resnās uzasinājuma spīpices ar sekojošu šķidrā metāla "pavedienu" - tādu pašu kāds mēdz tikt lietots elektrospininga tehnoloģijā nanošķiedru ražošanai.



Attēlā: šķidrā metāla elektrospininga jonu avots

Izcils recepšu krājums specifiski negatīvo jonu iegūšanai ir daudzos serveros atrodamais "Negative Ion Cook-Book". Tomēr mūs pamatā interesē pozitīvie joni, ja neskaita GRIBA(m), tāpēc tajā izklāstītajām receptēm pielietojums implantācijas mērķim nebūs. Jaunākās metodes attiecībā uz cietvielu jonu avotiem, īpaši boru apskatīsim tālāk.

Literatūras apskats par jonu avotiem

(Virkne jaunāko laiku referenču, ar kurām iedzilināšanās nolūkos vērts iepazīties)

Daudz klasisku risinājumu pusvadītāju ražošanas tehnoloģiju jomā apskatīti ⁴⁰. Aprēķinu tehnoloģija implantācijas dziļuma aprēķināšanai atrodama ⁴¹. Channelinga efekta ievērtēšana implantēšanā skaidrota ⁴² un ⁴³. Par jonu kūļa inducētiem defektiem raksta ⁴⁴. Jonu implantācijas tehnikas apskats, izņemot pašas jaunākās metodes dots ⁴⁵ un ⁴⁶ un ⁴⁷. Par kūļu veidošanu labs materiāls ir ⁴⁸. Par DC paātrinātājiem labi uzrakstīts ⁴⁹, bet par pirmo augstsprieguma ģeneratoru vēsturi lasāms ⁵⁰ un ⁵¹ un ⁵² un ⁵³ un ⁵⁴, toties par modernāku shemotehniku akseleratoru

40 - Doering H, Nishi J (2008) Handbook of semiconductor manufacturing technology, 2nd edn. CRC Press, Boca Raton, FL

41 - Ziegler JF, Biersack JP, Littmark U (1985). The stopping and range of ions in matter. Pergamon, New York, pieejams www.srim.org

42 - Posselt M (1994) Crystal-TRIM and its application to investigations on channeling effects during Ion implantation. Radiat Eff Defects Solids 130-131:87

43 - Möller W, Eckstein W (1984) TRIDYN – a TRIM simulation code including dynamic composition changes. Nucl Instrum Methods Phys Res B 2:814

44 - Posselt M (2001) Atomistic simulation of ion-beam induced defect formation. Mater Res Soc Symp Proc 647:O.2.1.1

45 - Dearnaley G, Freemann JH, Nelson RS, Stephan J (1973) Ion implantation. North Holland, Amsterdam

46 - Townsend P.D., Kelly J.C., Hartley N.E.W. (1976) Ion implantation, sputtering and their applications. Academic, London

47 - Ryssel H, Ruge I (1978) Ionenimplantation. Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig

48 - Wilson R, Brewer GR (1973) Ion beams. Wiley, New York

49 - Helborg R (ed) (2005) Electrostatic accelerators – fundamentals and applications. Springer, Heidelberg

50 - Van de Graaff RJ (1931) Electrostatic high voltage generators. Phys Rev 38:1919A

51 - Van de Graaff RJ (1931) A 1500000 volt electrostatic generator. Phys Rev 38:1919

52 - Herb RG (1974) Pelletron accelerators for very high voltage. Nucl Instrum Methods 122:267

53 - Cockcroft JD, Walton ET (1932-1934) Experiments with high velocity ions. Proc Roy Soc Lond A136:229 (1932), A137:229 (1932), and A144:704 (1934)

54 - Greinacher H (1921) Über eine Methode, Wechselstrom mittels elektrischer Ventile und Kondensatoren in hochgespannten Gleichstrom umzuwandeln. Z Phys 4:195

augstsprieguma barošanas bloku izveidē var atrast⁵⁵. Par vienu no pirmajiem akseleatoriem Dinamitronu lasāms⁵⁶ un⁵⁷ un⁵⁸. Par Tandema akseleatoriem (tos gan nelieto implantācijai nelieto, tomēr tiem ir liela nozīme zinātniskos pētījumos) raksta⁵⁹ un⁶⁰ un Tandetronu⁶¹. Pelletrona sistēmas aplūkotas⁶² un⁶³.

Vairāk uzmanības taisni implantācijas specifikai pievērsts⁶⁴ un⁶⁵. Ievērojami detalizēti par jonu avotu konstrukcijām runā avoti⁶⁶ un⁶⁷. Bernas, Frīmena, Sideniusa un Penninga avotu pirmpublicācijas lasāmas⁶⁸ un⁶⁹ un⁷⁰ un⁷¹ kas modernākā izklāstā atrodams⁷². Divas izziņu grāmatas, viena par RF jonu avotiem un otra par jonu pamatparametriem atrodamas⁷³ un⁷⁴. Par HC tipa avotu ar pastarpinātu sildīšanas sistēmu runāts⁷⁵. Interesi par negatīvo jonu avotiem, it īpaši par duoplazmotronu spēs remdēt⁷⁶ un⁷⁷ un⁷⁸ un⁷⁹. Veselu zinātnieku paaudzi ietekmējušās supergrāmatas Middletona Negatīvo Jonu Pavārgrāmata kopija atrodama⁸⁰. Vērtīgi izlasīt ir plašāku pamācību krājumu jonu iegūšanai⁸¹ un⁸².

-
- 55 - Reinhold G, Truempy K (1969) High voltage dc power supplies for beam injectors. IEEE Trans Nucl Sci 16:117
56 - Cleland MR, Morgenstern MR (1960) Low-cost electrons: three manufacturers offer new accelerators. I. Dynamitron. A high-power electron accelerator. Nucleonics 18:52
57 - Hanley PR, Cleland CF, Mason P (1969) The tandem Dynamitron accelerator. IEEE Trans Nucl Sci 16:90–95
58 - Langsdorf A Jr (1983) Reduction of ripple voltage in a dynamitron. IEEE Trans NS-30:1453–1455
59 - Van de Graaff RJ (1960) Tandem electrostatic accelerators. Nucl Instrum Methods 8:195
60 - Alvarez L (1951) Energy doubling in dc accelerators. Rev Sci Instrum 22:705
61 - Mous DJW et al (1992) The HVEE tandemron line; new development and design considerations. Nucl Instrum Methods B 62:421–424
62 - National Electrostatics Corporation (2002) National Electrostatics Corporation, Middleton, WI. www.pelletron.com/charging.htm
63 - Kiisk M, Erlandsson B, Faarinen M (2002) The charge state distribution of carbon beam measured at the Pelletron accelerator. Nucl Instrum Methods A 481:1–8
64 - Wilson RG, Brewer GR (1973) Ion beams with application in ion implantation. Wiley, New York
65 - Renau A, Smatlak D (1997) A novel ion source for high current ion implantation. In: Ishida E, Banerjee S, Mehta S, Smith TC, Current M, Larson L, Tasch A (eds) Ion implantation technology 96. IEEE, Piscataway, NJ, p 279
66 - Brown IG (1989) The physics and technology of ion sources. Wiley, New York
67 - Wolf B (1995) Handbook of ion sources. CRC, Boca Raton, FL
68 - Chavet I, Bernas R (1967) Experimental study of an ion source for electromagnetic isotope separation with a view to high efficiency operation. Nucl Instrum Methods 51:77
69 - Freeman JH (1963) A new ion source for electromagnetic isotope separators. Nucl Instrum Methods 22:306
70 - Sidenius G (1965) The high temperature hollow cathode ion source. Nucl Instrum Methods 38:19
71 - Penning FM (1937) Ein neues Manometer für niedrige Gasdrucke, insbesondere zwischen 10^{-3} und 10^{-5} mm. Physica 4:71
72 - Wolf BH (1972) Characteristics of a cold cathode type Penning source. IEEE Trans Nucl Sci 19:74
73 - Blanc D, Degeilh A (1961) Les sources d'ions à excitation électrique de haute fréquence. J Phys Radium 22:230
74 - von Ardenne M (1956) Tabellen der Elektronenphysik, Ionenphysik und Übermikro-skopie. Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin
75 - Horsky T (1998) Indirectly heated cathode arc discharge source for ion implantation of semiconductors. Rev Sci Instrum 69:840
76 - Winter H, Wolf BH (1974) Analysis of the duoplasmatron-type discharge as a source of multiply charged heavy ions. Plasma Phys 16:791
77 - Lejeune C (1974) Theoretical and experimental study of the duoplasmatron ion source: part I: model of the duoplasmatron discharge. Nucl Instrum Methods 116:417
78 - Alton GD, Mills GD (1985) Negative ion sources equipped with continuous annular and spherical geometry surface ionizers. IEEE Trans Nucl Sci NS-32:1822
79 - Alton GD, McConnell JW (1988) The emittances and brightnesses of high-intensity negative ion sources. Nucl Instrum Methods A 268:445
80 - Middleton R (1990) A negative-ion cookbook. University of Pennsylvania, Philadelphia, PA, http://www.nd.edu/~nsl/nsl_docs/Making_Beam/SNICS/Negative%20Ion%20Cookbook.pdf
81 - Valyi F (1975) Atoms and ion sources. Wiley, New York
82 - Alton GD (1993) Ion sources for accelerators in materials research. Nucl Instr Methods B 73:221

Par milzīgo enerģiju implantātoriem lasāms⁸³, bet par fokusētām augstas izšķirtspējas jonu kūļu tehnoloģijām ar lēzenu ievadu⁸⁴ un plašāk⁸⁵ un⁸⁶ un⁸⁷ un⁸⁸, kā arī mūsu tautieša Amerikā publikācijā⁸⁹. Tāpat arī⁹⁰ un⁹¹.

Par šķidrā metāla tipa jonu avotiem lasāms⁹² un⁹³ un⁹⁴. Šķidrā metāla avotu darbības pamatā ir mikropilienu uzvedība, kas ūdens piļu gadījumam smalki apskatīta⁹⁵, bet ceļi kā maksimizēt jonu strāvu šādiem avotiem iztirzāti⁹⁶. Vēl par šiem lielstrāvas avotiem pašizglītībai vērts iepazīties ar publikācijām⁹⁷ un⁹⁸ un⁹⁹, kā arī¹⁰⁰. To kūļa ģeometrisku formu pēta¹⁰¹. Vispār par šo tehnoloģiju ir neproporcionāli daudz publikāciju, taču īpašs nozīmīgums, iespējams, piemīt **ogleklīm** kā strauji augošam “modes” materiālam nanošķiedru, nanopulveru, nanopārklājumu u.tml. izgatavošanai, un par oglekļa jonu avotiem stāsta¹⁰².

Sīkāk par iespējām bora jonu avotu uzlabot

Uzlabošanas iespējas bez konteksta ar vēsturisku atskatu par to, kādas ir senākās zināmās metodes, sākt būtu nekorekti. Īsuma labad dosim pavisam nedaudzas atsauces uz fundamentāliem jonu tehnoloģiju vēstures apskatiem, no kā pirmie trīs ir ar krietnu laika distanci no viena un tā paša autora¹⁰³,¹⁰⁴,¹⁰⁵ un otrs, citā rakursā skatīts no cita autora¹⁰⁶. Ir vērts pārlasīt šajos aprakstos dotās

-
- 83 - Friedrich M, Bürger W, Henke D S. Turuc (1996). The Rossendorf 3 MV tandemtron: a new generation of high-energy implanters. Nucl Instrum Methods Phys Res A 382:357–360
 - 84 - Giannuzzi LA, Stevie FA (2005) Introduction to focused Ion beams: instrumentation, theory, techniques and practice. Springer, New York
 - 85 - Mackenzie RAD, Smith GDW (1990) Focused ion beam technology: a bibliography. Nanotechnology 1:163
 - 86 - Orloff J, Utland M, Swanson L (2003) High resolution focused ion beams. Kluwer, New York
 - 87 - Prewett PD, Mair GLR (1991) Focused ion beams from liquid metal ion sources. Wiley, Chichester
 - 88 - Reyntjens S, Puers RJ (2001) A review of focused ion beam applications in microsystem technology. Micromech Microeng 11:287
 - 89 - Melngailis J (1987) Focused ion beam technology and applications. J Vac Sci Technol B5:469
 - 90 - Bischoff L (2008) Application of mass-separated focused ion beams in nanotechnology. Nucl Instrum Methods Phys Res B 266:1846–1851
 - 91 - Melngailis J (2001) Applications of ion microbeam lithography and direct processing. In: Helbert JN (ed) Handbook of VLSI lithography. Noyes, Park Ridge, NJ, pp 791–855
 - 92 - Swanson LW (1994) Use of the liquid metal ion source for focused beam applications. Appl Surf Sci 76/77:80
 - 93 - Bischoff L (2005) Alloy liquid metal ion sources and their application in mass separated focused ion beams. Ultramicroscopy 103:59
 - 94 - Kingham DR, Swanson LW (1984) Shape of a liquid metal ion source. Appl Phys A 34:123
 - 95 - Taylor G (1964) Disintegration of water drops in an electric field. Proc R Soc Lond A 280:383
 - 96 - Krohn VE, Ringo GR (1975) Ion source of high brightness using liquid metal. Appl Phys Lett 27:479
 - 97 - Swanson LW (1983) Liquid metal ion source: mechanism and applications. Nucl Instrum Methods Phys Res 218:347
 - 98 - Swanson LW, Schwind GA, Bell AE, Brody JE (1979) Emission characteristics of gallium and bismuth liquid metal field ion sources. J Vac Sci Technol 16:1864
 - 99 - Bischoff L, Pilz W, Mazarov P, Wieck AD (2010) Comparison of bismuth emitting liquid metal ion sources. Appl Phys A 99:145
 - 100 - Bhaskar ND, Klimcak CM, Fraukolz RP (1990) Liquid metal ion source for cluster ions of metals and alloys. Rev Sci Instrum 61:366
 - 101 - Umemura K (1992) Measurement of energy spread and angular intensity of a cesium liquid metal ion source. Appl Phys A 54:115
 - 102 - Mazarov P, Wieck AD, Bischoff L, Pilz W (2009) Alloy liquid metal ion source for carbon focused ion beams. J Vac Sci Technol B 27:L47
 - 103 - Gibbons J.F.(1968). *Ion implantation in semiconductors—Part I: Range distribution theory and experiments*. Proc. IEEE, vol.56, p. 295, 1968
 - 104 - Gibbons J.F.(1972). *Ion implantation in semiconductors—Part II: Damage production and annealing*. Proc. IEEE, vol.60, p.1062-1096, 1972. ISSN: 0018-9219
 - 105 - Gibbons J.F.(1987). *Historical perspectives on ion implantation*. Nucl. Instrum. Meth. B21, 83-89 (1987)
 - 106 - Fair R.B.(1998). *History of Some Early Developments in Ion-Implantation Technology Leading to Silicon*

atsauces uz oriģinālpacientiem, un turēt domās pusvadītāju mikrotehnoloģiju attīstības līniju, tai skaitā, kā pašā iesākumā pat nesaprata, kas ir dopēšana, bet tomēr pamanīja ka tā uzlabo ierīču īpašības, tad izstrādāja dopšanas teorētisko modeli, tad izgudroja kā strādāt ar vairākiem pusvadītāju slāņā “stāviem” – pagrabstāviem, ko iegūst kodinot, un augšstāviem, ko iegūst uzputinot. Kā daudzas reizes pēc kārtas izgudroja mikroshēmas principu utt, tomēr visas šīs lietas stāv gana tālu no implantācijas tehnoloģijas, tāpēc pilns šīs aizraujošās vēstures apraksts te laikam maz iederēsies, kaut arī ir didaktisks un saistošs. Sistēmiski aprakstoša vēstures interpretācija ar uzsvāru uz aprīkojumu ir lasāma arī Rose & Ryding (2006)¹⁰⁷. Sākotnēji ingota diametrs bija 25 mm, tad ilgi 50 mm, beidzot radās izrāviens uz 100, drīz 200 un nu jau 300 mm. Implantātori kļuva lielāki un lielāki, un sākumā lietoja tikai Philips jonu avotu¹⁰⁸ vai Frīmena avotu¹⁰⁹, līdz (1974) Altons ieteica Penninga avotu¹¹⁰ (karstā un aukstā katoda versiju), tad nāca duoplasmotrons, magnetrons, spatteringa avots, virsmas jonizācijas avots, Kalutrons, HC avots, un RF izlādes šūnas, ieskaitot magnētu lietojumu, lai spiestu plazmu aksiāli laukā no izlādes kameras. Pie intereses par avotu aprēķina matemātiku un inženiertehniskajiem aprēķina jautājumiem, noderīgs avots ir Walther et.al. (1991)¹¹¹.

Sakarā ar ļoti zemu tvaiku parciālspliedienu Bora jonu iegūšana vispār ir tehnisks izaicinājums¹¹². Te seko raritāte - **precīza atsauce uz** šī spiediena mērījumu datiem¹¹³, visur citur tie ietilpst atreferētā formā. Pirmās publikācijas par bora joniem parādās 1960-to sākumā. Daudzas vielas tika pārbaudītas izejmateriāla statusā, bet meklējumi apstājās pie bora trifluorīda gāzes (BF₃) specifiski Sideniusa deglī¹¹⁴, kaut arī drīz tika atrasts, ka bors labi aizdegas arī Frīmena deglī, un tas esot vienkāršāk apkalpojams ekspluatācijā¹¹⁵. Šajos plazmas degļos rodas divas problēmas – pirmkārt, netiešās kvēles katods jonu avotam ātri sakoodē fluora ietekmē; otrs - BF₃ ir izmeklēti toksiska gāze. Vēlāk apguva B₂H₆ un pat dekaborāna B₁₀H₁₄¹¹⁶ lietošanu, bet abas problēmas ar to neko īpaši neatrisinājās.

Bora jonu avotu jomā pēdējās desmitgadēs lielu soli uz priekšu spēra Wiliams et.al. (2008)¹¹⁷ ziņojot, ka izstrādāts **bora katod-lokizlādes** jonu avots, kas izmantojams dažādiem mērķiem. Raksts apskata arī pieredzi ar avota ekspluatāciju. Tad (2019) Bugaev ar 10 komandas biedriem publicē rakstu¹¹⁸, kas detalizēti aplūko līdzīgu kā Irvinam bora jonu avotu pēc tās idejas, ko ierādījis Wiliams. Pirms tam šai Sibīrijas grupai ir ļoti daudzas publikācijas, kas rāda kā avots soli

Transistor Manufacturing. Proc.of the IEEE, Vol. 86, No. 1, 1998

107 - Rose P.H., Ryding G.(2006). *Concepts and designs of ion implantation equipment for semiconductor processing.*

Review of Scientific Instruments **77**, 111101 (2006); <https://doi.org/10.1063/1.2354571>

108 - Pittaway L.(1970). *Ion Gauges*. Patent US3742343A, 1970, registered to Philips corp.

109 - Chivers D.J.(1992). *Freeman ion source: An overview (invited)*. Rev.Sci.Instrum. **63**(4) 1992, pp 2501-2506, <https://doi.org/10.1063/1.1142874>

110 - Alton G.D. (1974). *Ion Sources for Accelerators*. Physics Division, Oak Ridge National Laboratory. Available at www.osti.gov/servlets/purl/4244522-TwJ9HX/

111 - Walther S.R., Pedersen B.O., & McKenna C.M.(1991). *Ion sources for commercial ion implanter applications*. Conference Record of the 1991 IEEE Particle Accelerator Conference. DOI: 10.1109/PAC.1991.164876

112 - Stull D. *American Institute of Physics Handbook, Third Edition*, Gray, D.E., Ed., McGraw Hill, New York, 1972.

113 - Brotherton R.J., Steinberg H. (2016). *Progress in Boron Chemistry: Volume 2*. Kent : Elsevier Science & Technology (at 6th ch., pp 251, tab 5).

114 - Sidenius G.(1965). *The high temperature hollow cathode ion source*. Nuclear Instruments and Methods Vol.38, 1965, p.19-22

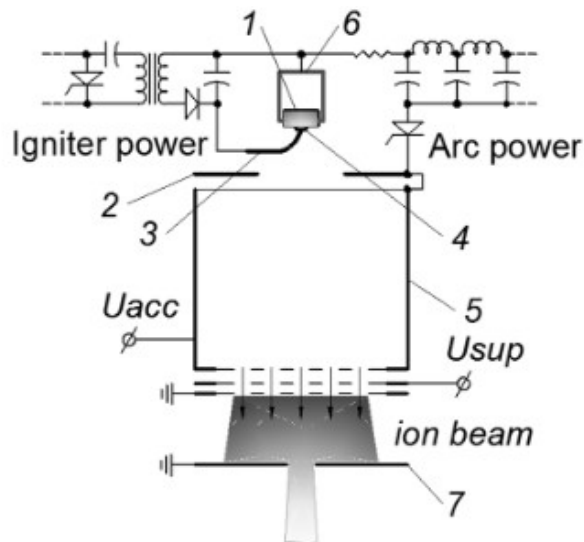
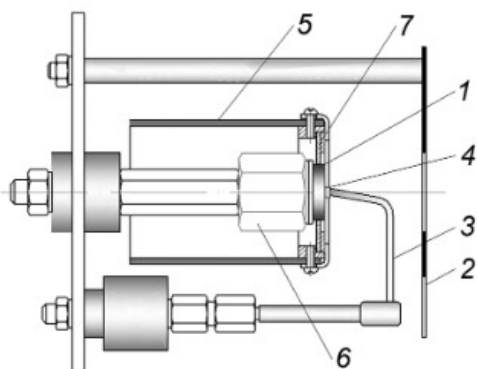
115 - Freeman J. H.(1963). *A new ion source for electromagnetic isotope separators*. Nucl. Instrum. Methods, March 22, 1963, pp 306–316.

116 - Goldberg R.D.(2002). *Monoatomic Boron Ion Source and Method*. US Patent No US 2003/0216014 A1. Pub.Nov.20,2003. Filed Mar.28,2002 (GB) O2O7398.9

117 - Williams J. M., Klepper C.C., Chivers D.J., Hazelton R.C., Freeman J.H. (2008). *Operation and Applications of the Boron Cathodic rc Ion Source*. AIP Conf. Proc., 1066 , 469–472 (2008). <https://doi.org/10.1063/1.3033664>

118 - Bugaev A.S., Vizir A.V., Gushenets V.I., Nikolaev A.G., Oks E.M., Savkin K.P., Yushkov Yu.G., Tyunkov A.V. *Generation of boron ions for beam and plasma Technologies*. Russian Physics Journal, Vol.62, No.7, Nov 2019

pa solim top un attīstās. To, ka jaunākajās tendences bora jonu avotu jomā ir cietvielu izejmateriāla lietošana apstiprina ¹¹⁹. Un noteiktu interesi izraisa ne-HC sistēma, kas spēj sasniegt pat 75 mA, detalizēti aprakstīta ¹²⁰, kur **bora avots ir LaB₆ tablete** un divi aditīvi barošanas sprieguma avoti impulsu režīmā. Sekojošos divos attēlos ir avota redzamā konstrukcija un otrā principiālā shēma.



Pirmajā zīmējumā (1) ir katoda tablete; (2) ir molibdena anoda disks, ko aitasia volframa sietiņš; (3) ir palaišanas elektrods, ko baro 15-30 kV (atvērtas ķēdes stāvoklī) 50 A (īsslēgtas ķēdes stāvoklī) impulsi 0.02 ms garumā sinhroni ar galvenās barošanas impulsiem; (4) ir keramikas bloks kas satur detaļas kopā; (5) ir sietiņa veidots cilindrs; (6) ir katoda turētājs; (7) ir bora nitrīda gredzens. Centrālais skrūvjveida elektrods barojas no galvenā loka barotāja pret (7) ar 1.2 kV (vaļēja ķēde) stabilas strāvas avotu 150 A (impedance 4 Omi) ar impulsiem 5-10 Hz katrs 0.28 ms garš, tā iegūstot vidējo strāvas vērtību 750 mA.

Principiālajā shēmā (1) ir tablete, (2) ir molibdena anods, (3) ir palaišanas elektrods, (4) ir keramikas bloks, (5) ir anods ar caurumu vidū, (6) ir turētājs, (7) ir izejas apertūra.

Ne parāk plaši, tomēr ir zināms, ka **bors pie 600-800°C strauji zaudē apmēram 6 kārtas no elektriskās pretestības (!)**, tas ir, paliek elektrovadošs. Šādā stāvoklī to viegli iedezināt ar vakuum-loka iztvaikošanu taisni no kristāliskā bora, rāda ¹²¹ un ¹²². Vēl vairāk, šādu saprātīgu temperatūru vispār iespējams panākt arī HC avota gadījumam, kas paver tam iespējas uz lielo kūļa strāvu valstību.

Ja reiz par inovatīvām metodēm vispār, arī **radiofrekvenču magnetrona spatterings** ir lielstrāvas metode, kas der tīra bora izejvielai ¹²³. Galu galā, magnetrons kā tehnoloģija ir labi zināms vakuum-uzputināšanas industrijā, kā izcils uzputināšanas ātruma palielinātājs. Ir pat ziņas par magnetronu,

119 - Current M.I., White N.R. (2007). *Safety Issues in Ion Implantation for Fabrication of Semiconductor Materials and Devices*. Conference: Health Physics Society, Anaheim, CA, January 2007.

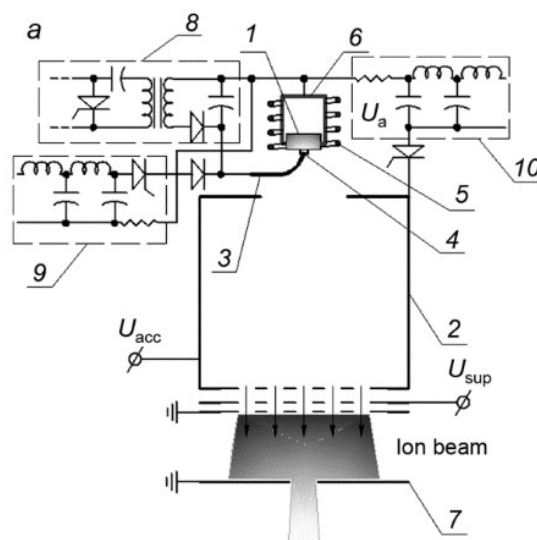
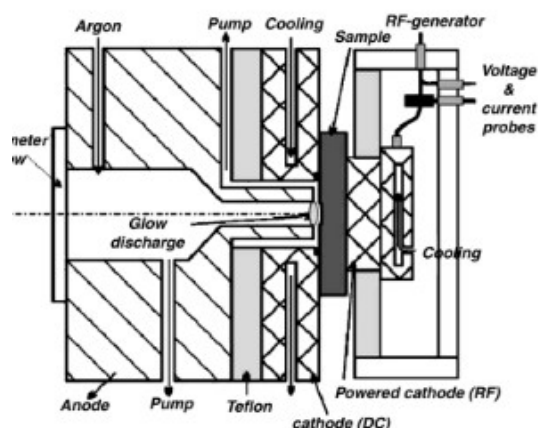
120 - Gushenets V., Bugaev A., Oks E. (2019). *Boron vacuum-arc ion source with LaB₆cathode*. Rev. Sci. Instrum.90, 113309 (2019); doi: 10.1063/1.5127096

121 - Gushenets V.I., Oks E.M., BugaevA.S. (2018). *Generation of boron ions for beam and plasma technologies*. Proc. 28 th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Greifswald (2018), pp. 411–414.

122 - Frolova V.P., GushenetsV.I., et al (13 authors), 2017. *Generation of boron ions for beam and plasma technologies*. IEEE Trans. Plasma Sci., 45, pp.2070–2074 (2017).

123 - Hahn J., Freidrich M., Pintaske R., et al. (1996). *Generation of Boron Ions for Beam and Plasma Technologies*. Diam. Relat. Mater., 5, 1103–1112 (1996)

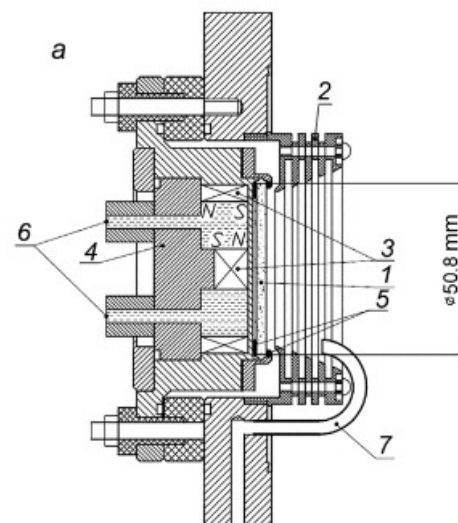
kam mērķis strādā paš-spateringa režīmā ¹²⁴ un ¹²⁵ un ¹²⁶. Ilustrējot magnetrona avotu, nākāmie divi attēli rāda tā vizuālo tēlu un diagrammu.



Strukturāli (1) ir kristāliskā bora mērķis, (2) ir daudzu anodu plāksnītes, (3) ir magnēts, (4) ir magnētiskā serde, (5) ir siltumizolācijas gredzeni, (6) ir ūdens dzesēšanas kanāli, (7) ir nesējgāzes ieeja. *Principiālajā shēmā* (1) ir alumīnija katods ar $d=10$ mm, $h=8$ mm, (2) ir cauruļveida anods ar $d(\text{iekš})=150$ mm, $h=120$ mm, (3) ir palaišanas elektrods, (4) ir keramikas ieliktnis, (5) ir 600 C sildspirāle, (6) ir katoda turētājs, (7) ir izejas apertūra, (8) ir augstsprieguma palaišana 15 kV 40 A 0.02 ms impulsiem, (9) ir ārējs barošanas avots 3 kV 100 A 15 Omi 0.1 ms impulsi, (10) ir galvenā loka barošanas avots 1.4 kV 100 A ar vidējo kūļa strāvu 400 mA (respektīvi, ir īss lielstrāvas impulss, kuram gari starpimpulsa laiki samazina vidējo strāvu 250 reizes).

Ir bijuši mēģinājumi lietot **elektronu lielgabalu** kūļa veidošanai, taču tad jācinās ar virsmas lādiņa neitralizēšanu un tas vispār ir iespējams. Tomēr sistēma sanāk smagnēja ¹²⁷ un ¹²⁸.

Pastāv visnotaļ enciklopēdiska pamācība kā prognozēt HC avota uzvedību maza tvaiku spiediena gadījumā ¹²⁹. Monogrāfisks HC avotu apskats atrodams arī ¹³⁰. Kā sasniegumu HC jonu avotu ar karsējamu katodu stāda priekšā ¹³¹, diemžēl ne attiecībā apr boru. Cita karsējama HC versija ziņota ¹³², kā arī īpašā specversija, ko sauc par rf-GDOES, izskaidrota ¹³³ (attēls pa labi).



124 - Andersson J., Anders A., (2009). *Self-Sputtering Far above the Runaway Threshold: An Extraordinary Metal-Ion Generator*. Phys. Rev. Lett., 102, 045003 (2009)

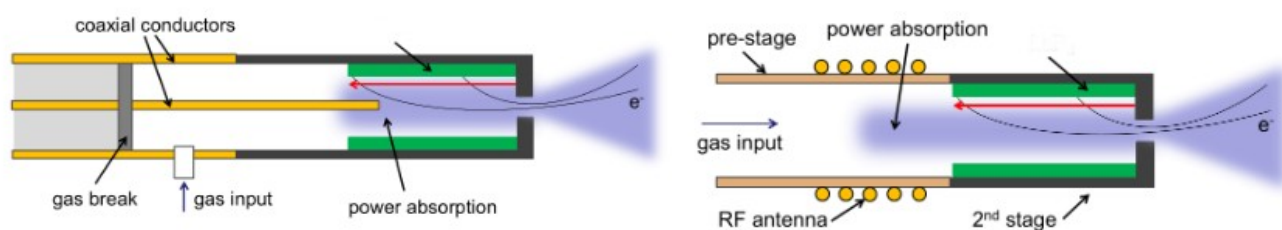
125 - Oks E.M., Anders A. (2010). *Boron ion beam generation utilizing lanthanum hexaboride cathodes: Comparison of vacuum arc and planar magnetron glow*. Rev. Sci. Instrum., 81, 02B306 (2010), 3 pages

126 - Gushenets V. I., Hershcovitch A., Kulevoy T.V., Oks E.M., Savkin K.P., Vizir A.V., Yushkov G.Y. (2010). *Boron ion source based on planar magnetron discharge in self-sputtering mode*. Rev. Sci. Instrum., 81, 02B303 (2010).

127 - Yushkov Y.G., Tyunkov A.V., Oks E.M. Zolotukhin D.B. *Electron beam evaporation of boron at forevacuum pressures for plasma-assisted deposition of boron-containing coatings*. J. Appl. Phys., 120, 233302 (2016).

128- Tyunkov, A. V.; Yushkov, Yu. G.; Zolotukhin, D. B.; Savkin, K. P.; Klimov, A. S. *Generation of metal ions in the beam plasma produced by a forevacuum-pressure electron beam source*. Dec. 2014 Physics of Plasmas Vol 21, Issue 12, DOI:10.1063/1.4904367

Cieši ar šādu eksperimentālo ierīci sasauca **Christensen** ziņojums par HC lietošanu kopā ar ICP (vai alternatīvi CCP, kas ir kapacitatīvi saistītā plazma) kā ieejošās nesējgāzes aktivētāju. ICP lietošana ieejā izlādes aktivizēšanai, protams, netraucē izmantot citu ICP izejā molekulāro jonu sagraušanai par atomārajiem (ja vien tas vajadzīgs). Maģistra darba ¹³⁴ ietvaros (skat nākamos divus attēlus) viņš iesaka **ICP cilindrisko spoli** vai **CCP klājumus** vai pat spoli vai **helikālo spoli** (tas ir, planāru Arhimēda spirāli, un tāda dod iespēju strādāt ar būtiski augstāku frekvenci, jautājums vienīgi vai augstāka frekvence ir vēlama jeb tieši otrādi). Attiecīgi HV var barot ar klasisku DC, bet tā aktīvāk izdalot jonus, ja to **barojot ar DC un HV RF AC superpozīciju** (!!). CCP gadījumam vilinoši ir tas, ka ieplūdes gāzes caurule jau pēc būtības ir koaksiālis, un šāda koaksiālā kabeļa gabals ar nomizotu ekrānpinumu ceturtdaļviļņa garumā pēc savas būtības ir ceturtdaļviļņa radioantena.



Sic! Šis ir īpaši svarīgs moments izprast tāda avota darbību, ja vēlas nodarboties ar HC tipa ierīcēm. Tātad, ieejošās gāzes jonizēšanas gadījumā parādās ievērojams daudzums ar **ātriem** elektroniem, kam elektroniskā temperatūra ir ar kārtu desmittūkstoš grādi plus mīnus pāris reizes, tāpēc šādas nesējgāzes molekulas daudz vieglāk izsit no bora kristāliskā režģa tajā esošos atomus.

Ir zināma arī jonu avota modifikācija, kam jūtamu HC strāvas pieaugumu ¹³⁵ sniedz specifiski 1 līdz 40 GHz 1-2 A/cm² **mikroviļņu RF** izmantošana. It īpaši, ja to lieto ieejošajai nesējgāzei, tad cēlgāzes jonu molekulārā temperatūra ir stipri tuvāka elektroniskajai temperatūrai (balansēta plazma), tāpēc par elektroniem nesalīdzināmi smagākie joni spēj vēl efektīvāk izdauzīt bora atomus no katoda. Pastāv pamatīgas bažas, ka šādā gadījumā samazinās atomāro jonu koncentrācija par labu molekularajiem joniem, taču var likt otru ICP, kas sašķaida jebkādus molekulārus jonus par atomāriem. Domājot par praktisko realizācijas iespēju, 0.5-2.5 kW spēcīgs virtuves mikroviļņu krāsniņas magnetrons strādājot 2.45 GHz standartā ir lēta un pieejama manta, taču prasa liela izmēra viļņvadus WR-430 vai ar jaudas ierobežojumie WR-340 viļņvads, tomēr 12 GHz, kas lieto

- 129 - Gundersen M.A., Schaefer G., Schoenbach K.H. (1990). *Basic Mechanisms Contributing to the Hollow Cathode Effect In Physics and Applications of Pseudosparks*. NATO ASI Series (Series B: Physics), vol 219. Springer, Boston, MA. DOI 10.1007/978-1-4615-3786-1_3 ISBN 978-1-4613-6687-4
- 130 - Royal Aircraft Establishment Report No 76054 (1976). *An investigation of initiation of Hollow Cathode Discharges*. Available at <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a036079.pdf>
- 131 - Turek M., Drozdziel A., Pyszniak K., Maczka D., Slowinski B. (2012). *Production of Doubly Charged Ions Using a Hollow Cathode Ion Source with an Evaporator*. Vol.123(2013)ACTA PHYSICA POLONICA A No. 5 Proceedings of the IX International Conference ION 2012, Kazimierz Dolny, Poland, June 2528, 2012
- 132 - Beck S., Brack K., Gansauge P. Patent (1074). *Method of implantation of boron ions utilizing a boron oxide ion source*. Available at <https://patents.google.com/patent/US3960605A/en>
- 133 - Winchester M.R., Paylinga R. (2004). *Radio-frequency glow discharge spectrometry: A critical review* Spectrochimica Acta Part B 59(2004) 607–666. doi:10.1016/j.sab.2004.02.013
- 134 - Christensen S.M.. (2012). *Modelling and measuring the characteristics of an inductively coupled plasma antenna for micro-propulsion system*. A master thesis, Boise State University. Available at <https://scholarworks.boisestate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1345&context=td>
- 135 - Plasek M.L., Jorns B., Choueiri E.Y., Polk J.E. (2012). *Exploration of RF-Controlled High Current Density Hollow Cathode Concepts*. Princeton University publications. Available at <https://alfven.princeton.edu/publications/plasek-jpc-2012-4083>

daudz parocīgākus izmērus WR-75 vai WR-69, strādā ar klistronu, kam jauda ir vien dažu Vatu robežās. Nedrīkst aizmirst, ka lielas jaudas mikroviļņu sstēmas darbināšana bez **Launchera**, magnētiskā **Cirkulatora** ar sānzarā mikroviļņu diodi un **Waterload** rezistora uz ko mērīt atpakaļatstaroto signālu, un tiešajā traktā **three-knob Tuner**, respektīvi bez orientējoši 3.5 K naudiņām šādu sistēmu uzbūvēt kļūst grūti. Ceturtdaļviļņa antena ieteiktajā viļņvadā strādā ar TEM modu, bet abas spoļveida antenas ar TE vai TM izplatīšanās režīmā. Zaļais slānis attēlos ir bors, bet čaulas eroziju samazina keramisks izolācijas slānis, piemēram alumina (Al₂O₃). Papildus lielāka karstuma efektam, ko rada mikroviļņi, pie augstākas frekvences starp spoli un plazmu veidojas daudz labāks mijinduktivitātes diktēts sasaistes koeficients, tādējādi sistēma labāk “ņem pretī” radioviļņu enerģiju. Lai ilustrētu šī efekta kārtu, kāda gan runa par labu sasaisti, ja pie MHz diapazona frekvencēm viļņa garums ir par divām kārtām lielāks par spoles un plazmas šūnas fiziskajiem izmēriem. Kombinētā ICP+HC ideja dziļāk iztirzāta avotā ¹³⁶. Par mikroviļņu izlādes izmantošanu jonu avotiem stāsta ¹³⁷ un ¹³⁸. Par magnētiskā lauka izmantošanu jonu avotu atdeves palielināšanai raksta ¹³⁹ un ¹⁴⁰.

Īsais ekskurss pa jonu avotu modifikācijām ar to apmēram ir izklāstīts, taču jāapzinās, ka avotā ¹⁴¹ vien ir uzskaitīti klasificējami 56 dažādi jonu avotu veidi, un noteikti saraksts nav visaptverošs. Vienkārši pieminēt VISU nav iespējams.

Jonu ekstrakcija

Jeb citiem vārdiem – kā jonam tikt laukā no plazmas kameras. Taču vēl pavisam mazliet par jonu rašanos un tikai tad par to, kā jonus izvilk, bet plazmas blīvumu nepazaudēt.

Vienkāršākajā gadījumā jonus ievāc no kvēldiega. Termojonizācijas procesu nosaka **Čailda-Lengmīra** (Child–Langmuir) formula saukta arī par **trīs pušu likumu**, kas SI sistēmā rakstāma kā $J [A/m^2] = 4/9 * \epsilon_0 * \sqrt{(2 * n * e / M / m_a)} * V^{(3/2)} / d^2$. Te J ir panāktais jonu kūļa blīvums, ϵ_0 ir vakuuma dielektriskā konstante, e ir elektrona lādiņš, N ir jona kārtība - piemēram Li-, Li-- vai Li---, M un m_a ir jona molmasa (piemēram molekulārajam skābeklim $2 * 16 = 32$) un viena mola svars, saukts arī par U vienību, ja runā par masu kilogramos, jeb **Daltonu**, ja runā par šo elementāro masas vienību skaitu molos, kur $U = 1.66053906660(50) \times 10^{-27}$ kg. Daltona jēdziens populāri, bet tomēr pietiekoši izsmeļoši izskaidrots ¹⁴². Formulā V ir sprieguma leciens ekstrakcijas spraugā (Volts) un d ir spraugas platums. Parasti šo formulu pārvērš lietošanai ērtākā formā apvienojot konstantes - $J (mA/cm^2) = 1,72 * \sqrt{(n/M)} * V(kV)^{(3/2)} / d(mm)^2$. Tomēr jonu radīšana nevar pieaugt bezgalīgi, vienā brīdī iestājas piesātinājums. Šī piesātinājuma radītā limita noskaidrošanai var lietot izteiksmi $J_{critical} = 1,57E-10 * n_i * \sqrt{(z * T_i * M_i)}$, kur n_i ir jonu blīvums plazmā, z ir uzlādes stāvoklis (vienreiz jonizēts vai dubulti), T_i ir jona temperatūra (nejaukt ar plazmas elektronisko temperatūru), un M_i ir konkrētā jona masa.

Dažkārt trīs pušu likumu raksta kā **Richardsona-Dušmana** formulu $J = A_G * T^2 * \exp(-W/k/T)$,

136 - Gibson D. and Waddell E., Child D., Placido F. (2013). *Novel hollow cathode plasma source with self sustaining high density plasma*. Thin Film Centre publications, University of the West of Scotland. OCIS codes: (310.1860); (310.3840); (310.6860)

137 - Sakudo N, Tokiguchi K, Koike H, Kanomata I (1977) Microwave ion source. Rev Sci Instrum 48:762

138 - Hitz D, Girard A, Melin G et al (2002) Results and interpretation of high frequency experiments at 28 GHz in ECR ion sources, future prospects. Rev Sci Instrum 73:509

139 - Brainard JP, O'Hagan JB (1983) Single – ring magnetic cusp ion source. Rev Sci Instrum 54:1497

140 - Hahto SK, Hahto ST, Ji Q et al (2004) Multicusp ion source with external rf antenna for production of protons. Rev Sci Instrum 75:355

141 - Bhattacharyya R. (2009.). Review: *Indigenous Ion Sources for Material Processing*. Defence Science Journal, Vol. 59, No. 4, July 2009, pp. 377-394 2009, DESIDOC

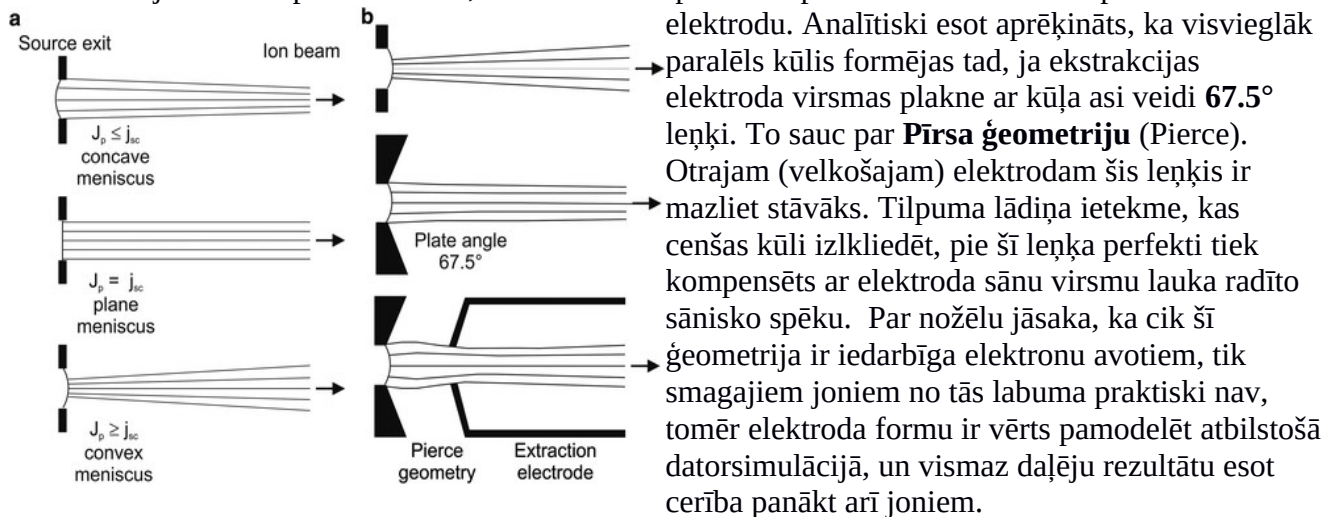
142 - Tēmšķiris Dalton Unit. https://en.wikipedia.org/wiki/Dalton_%28unit%29

kur A_G ir the **Ričardsona konstante** un W ir kvēldiega materiāla izejas darba funkcija. Vispār Ričardsona konstanti var izrisināt teorētiski, taču ērtāk ir pielietot empīrisku sakarību $A_G = \lambda_R * A_0$, kur λ_R ir materiāla korekcijas faktors un $A_0 = 4 * \pi * m_e * k_e^2 / h^3$ ir teorētiskais lielums. Ne katrs metāls ir labi piemērots kvēldiega funkcionalitātei, tāpēc te sarindotas vērtības izplatītākajiem kvēldiegu materiāliem.

Piemēram, iedomāsimies 10 cm garu tantāla vadu ar 1.5 mm diametru - tas sasniegs 1 A elektronu atdevi pie 2300 K temperatūras. Lai šādu T nodrošinātu aptākļos, kad dominē siltumstarošana, būs vajadzīgi 250 W jauda. Piemēram, ja e-lielgabals elektronus ražos no ūdeņraža, tad pie 100 eV ātruma elektroniem sadursmes šķēsgriezums ar H_2 ir orientējoši $1E-16$ cm². Ja spiediens ir 0.5 Pa, tad molekulārā H_2 koncentrācija ir $1.2E20$ m⁻³. Tāpēc brīvais noskrējiens jonizācijas procesā ir apmēram 80 cm, kas ir daudz lielāks kā parasti vakuumkambara izmēri. Tāpēc, ja iespējams pielietot magnētisku plazmas saspišanu, tas spēcīgi palielina plazmas koncentrāciju, kad gāzes spiediens ir zems.

Tabula dažiem populāriem kvēldiegu materiāliem: Ričardsona konstante A_G ir pirmais skaitlis (cm⁻²*K⁻²) un otrs skaitlis ir izejas darba funkcija (eV). *Tantāls* 60&4.25; *Volframs* 60&4.55; *Bārijs* 60&2.7; *Cēzijs* 160&2.14; *Volframs plus 1% Torijs* 3&2.63; *LaB6* 29&2.70. Plašākus datus par kvēldiegu materiāliem var atrast ¹⁴³ un ¹⁴⁴.

Atzīmēšanas vērts ir tas, ka ekstrāģējot jonus no plazmas, plazmas blīvums vietām samazinās, un tad šajās mazāka blīvuma zonās, t.i. plazmas burbuļa ārpusē notiek faktiskā masas pārnese. Tāpēc plazmas ārējais perimetrs, gan izmērs, gan forma noteicoši ir atkarīgi no ekstrakcijas elektroda cauruma un attāluma attiecības un pieliktā sprieguma - te blīvuma sadalījuma funkcija formē negaidītu pašradušos lēcu, kas labi pašfokusē staru (kūli), lai tas saglabājas neizkliedēts. Tad saka, lai tā diverģence būtu minimāla. Respektīvi, katram avotam ir vērts nodarboties ar optimālā ekstrakcijas režīma piemeklēšanu, vai arī nāksies pielietot speciālu "kondensora" tipa fokusēšanas



Tomēr visbiežāk ekstrakciju ierobežo apertūras cauruma izmērs, tad runā par **tilpuma lādiņa limitētu jonu kūļa strāvu**, jo taisni tilpuma lādiņa spēki šai sistēmā ir vislielākie. Šo efektu var novērtēt ar Puasona diferenciālvienādojumu pa vienu koordināti $d^2(\phi)/d(z^2) = \rho/\epsilon_0 = -J/\epsilon_0 * \sqrt{m/2/q/\phi}$, kur z ir koordināte, ϕ ir potenciāls un J ir kūļa strāvas blīvums. Emitējošā virsma atrodas $\phi(z=0)=0$, bet ekstraktora virsma atrodas $\phi(z=d)=V$. Kad $J=0$, tad potenciāla sadalījums starp šīm

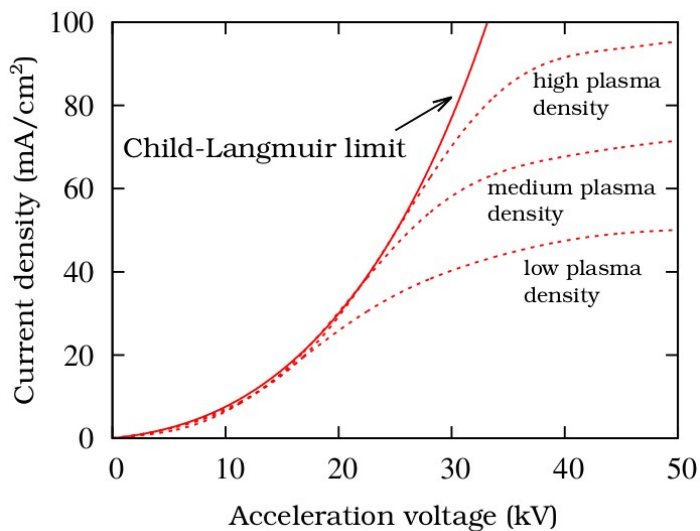
143 - Wolf, B. (1995). Handbook of ion sources, CRC Press

144 - Kuznetsov G.I. (2004). IrCe cathodes for EBIS, 9th International Symposium on Electron Beam Ion Sources and Traps, J. Phys. Conf. Series 2, 35 (2004)

virsmām ir lineārs. Tomēr pieaugot ekstrāģjamās strāvas blīvumam, atkarība paliek eksponentveidīga, līdz sasniedz lēzenu piesātinājumu (attēlā - Čailda-Lengmīra limits). Iemesls ir tas, ka lielā strāvas drenāža samazina elektrisko lauku uz emitējošās virsmas un pat draud sasniegt nulli. Kur atrodas vislielākās iespējamās strāvas blīvuma punkts var atrisinot Puasona difviena dojumu ar robežslāņa nosacījumu $d\phi(z=0)=0$. Šo nosacījumu sauc par telpiski limitēta dz emisiju un J limitu apraksta Čailda-Lengmīra likums¹⁴⁵ ar

$J_{max}=4/9*\epsilon_0*\sqrt{2*q/m}*V^{(3/2)}/d^2$. Pie zema akseleratora sprieguma emisija ļoti labi ierakstās šajā sakarībā. Tomēr pie liela ekstrāģējošā sprieguma līkne ieiet piesātinājumā, jo I sasniegts plazmas emisijas limits. Tāpēc Čailda vienādojumu jālieto saprātīgi, jo tas neņem

vērā plazmas plēves dinamisko iedabu un nenulles sākuma ātrumu daļiņām pie plazmas ekstrakcijas. Katrā gadījumā, maksimumālā ekstrāģējamā strāva ir atkarīga no avota ģeometrijas, izlādes strāvas blīvuma, un sprieguma - caur tilpuma strāvas limitu. Kad visu sāk limitēt tilpuma lādiņš, tad strāva ir proporcionāla $V^{(3/2)}$. Tā tiek definēta jonu kūļa perveance $P=I/V^{(3/2)}$, kas pēc jēgas ir sistēmu aprakstošā vienādojuma proporcionalitātes koeficients. Ja emisija ir tilpuma lādiņa limitēta, tad perveance ir orientējoši konstanta. Savukārt, kad spriegums tiek palielināts līdz kūļa emisiju vairs nenosaka tilpuma lādiņš, tad jonu kūļa perveance samazinās.



Tālāk Čailds un Lengmīrs apraksta arī kā aprēķināt cik strauji dilst jonu kūļa spilgtums atkarībā no tā cik šķībi uz to skatīties, bet mūsu gadījumā tas nav būtiski. Čailda oriģinālā publikācija par trīs pušu likumu lasāma¹⁴⁶, bet elektronu kūļa avotu ierīkojums izklāstīts¹⁴⁷ un¹⁴⁸ un¹⁴⁹, šajā pēdējā ievērojamu lomu atstājot arī šīs tehnoloģijas vēsturei, pie kuras noteikti pieder Lengmīra zondes plazmu pētīšanai izgudrošana¹⁵⁰ un pirmie mēģinājumi iegūt ātrus smagos jonus¹⁵¹. Vispārīgo uzlādēto daļiņu fiziku izklāsta¹⁵², bet robežas implantācijas tehnikas pielietojumiem apskata¹⁵³.

Problēmas var radīt izolatoru materiālu virsmas uzlāde, kas noris proporcionāli $V \sim x^{(4/3)}$, kur x ir attālums kūļa virzienā no punkta ar spriegumu $V=0$, tādējādi viss, ko vien var, ir jāiezemē, bet ko nevar iezemēt, to ir jāattālina uz zonu, kur joni to sasniegt nespēj. Grafiski šis efekts izskatās sekojoši. Ar r zīmējumā apzīmē kūļa radiusu. Tas nenozīmē, ka Pīrsa ģeometrija ir obligāta, taču, ja to lieto, tad rodas divas derīgas īpašības - jonu kūļa daļiņu ātrums tāpat kā potenciāls ir nemainīgs pa kūļa šķērsriezumu, un kūļa jonu strāva ir virtuāli neierobežota, ja vien inducētais virsmas lādiņš

145 - Child C.D. (1911). Discharge from Hot CaO, Phys. Rev. 32, 492 (1911)

146 - Child CD (1911) Discharge from Hot CaO. Phys Rev 32:492

147 - Pierce JR (1940) Rectilinear electron flow in beams. J Appl Phys 11:548

148 - Pierce JR (1949) Theory and design of electron beams. Van Nostrand, New York

149 - Donets ED (1998) Historical review of electron beam ion sources. Rev Sci Instrum 69:614

150 - Langmuir I, Compton KT (1931) Electrical discharges in gases. II. Fundamental phenomena in electrical discharges. Rev Mod Phys 3:191

151 - Sloan D, Lawrence E (1931) The production of heavy high speed ions without the use of high voltages. Phys Rev 38:2021

152 - Lawson JD (1977) The physics of charged-particle beams. Clarendon Press, Oxford

153 - Freeman JH (1976) The boundaries of ion implantation. In: Carter G, Colligon JS, Grant WA (eds) Applications of ion beams to materials 1975, Conference Series no. 28. Institute of Physics, p. 340

to nesāk samaitāt.

Tagad ERAF Projekta **tehniskais uzdevums** (Jonu avota parametriem)

Jonu koncentrācija dobā katoda apgabalā: Avotā teikts, ka Richardson-Dushman vienādojums¹⁵⁵ nosaka, ka dobā katoda apgabalā pie 2A strāvas jonu koncentrācija ir **1E18 gab/m³**, bet pie vēl lielākas strāvas pat **1E19 gab/m³**¹⁵⁶. Goebel/Katz (*chap 6, Cathode*) saka, ka zem **1E14 gab/m³** koncentrācijas dobā katoda izlāde nodziest, jo nespēj pašuzturēties. Jāsecina, ka **mums interesējošā reģionā no 0.05 mA līdz 500 mA** katoda strāvas intervālam, koncentrācija ir prognozējama starp 1E15-1E17 gab/m³, kas atbilst **1E9-1E11 gab/cm³**. Attēls no Goebel/Katz.

Vienlaikus no dotā attēla labi var orientēties, izvēloties korektu garenisko distanci starp anodu un katodu, tāpat anodu un ICP spoles tuvāko galu. Respektīvi, bez-apertūras izpildījumā 1...3 mm ir akceptējami, bet 3 mm ir par daudz. Jautājums ir aktuāls arī tāpēc, ka ICP soples lauks "dedzina" jebkādu strāvu vadošu virsmu (Fuko efekts un virpuļstrāvas), tāpēc parasti cenšas ievērot 1-2 cm drošības distanci. Šajā kontekstā prasības ir nesavietojamas un ar zināmu jaudas zudumu spolei un anoda zonas karšana būs jāpiecieš.

Avotā¹⁵⁷ teikts "*The Sidenius type ion source, which is described in detail further on and which is distributed by the Danfysik company under the name "High-Temperature, Hollow-Cathode, Ion Source", modified Type 911, in conjunction with boron halides as an ion source material, permits generating ion currents of the order of 40 microamps*". Mums tehniskais uzdevums ir implantēt klājuma biezumu **1E13...1E16 atomi/cm²** apmēram 1-5 minūšu alias 5*60=(60 līdz 300) sekunžu laikā. Pieņemot 100 sekundes, tas nozīmē jonu plūsmu uz mērķi **1E11-1E14 gab/sek**. Ņemot lielāko vērtību, tā atbilst jonu strāvai $i=q/t=1,6E-19*1E14=1,6E-5$ A, kas ir 16 mikroampēri. Šāda strāva jonu tehnikā skaitās maza strāva. Faktiski pat 5 mikroampēri būtu apmierinoši. Tomēr ieviešam 1 kārtas rezervi zudumiem (QMS, ekstrakcija utt). Tātad 160 mikroampēri.

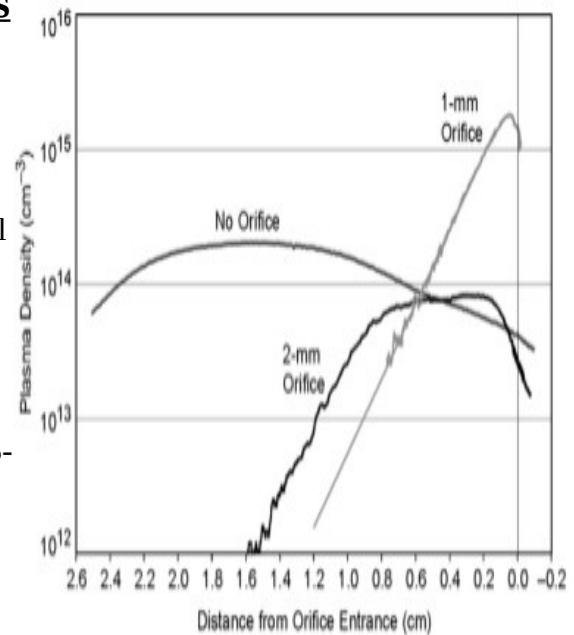
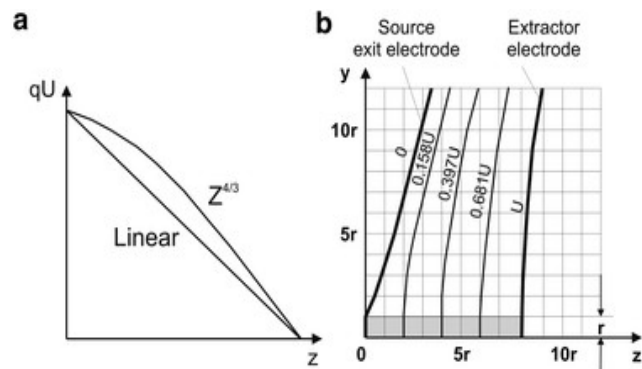


Fig. 6-6. Cathode plasma density profile examples as the orifice diameter is increased for a constant discharge current and flow rate.



154 - Modeling and Development of the RF-Controlled Hollow Cathode Concept by Matthew L. Plasek, Christopher J. Wordingham, and Edgar Y. Choueiri (Electric Propulsion and Plasma Dynamics Laboratory, Princeton University, Princeton, NJ 08544 USA) <https://alfven.princeton.edu/publications/plasek-jpc-2013-4036>

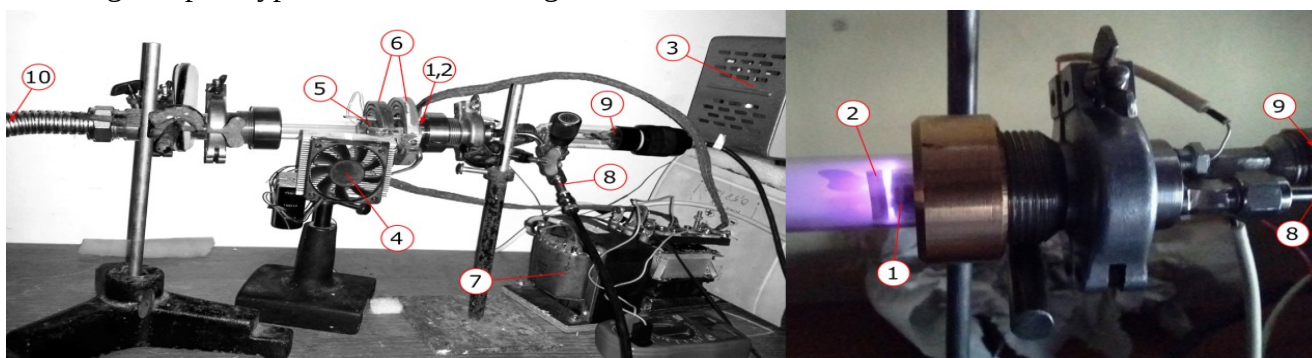
155 - Goebel, D. M. and Katz, I., Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters, Vol. 1, John Wiley & Sons Inc, 2008.

156 - Paolo Gessini, Stephen B. Gabriel, David G. Fearn. The Hollow Cathode as a Micro-Ion Thruster. Astronautics Research Group, School of Engineering Sciences, University of Southampton

157 - patents.google.com/patent/US3960605

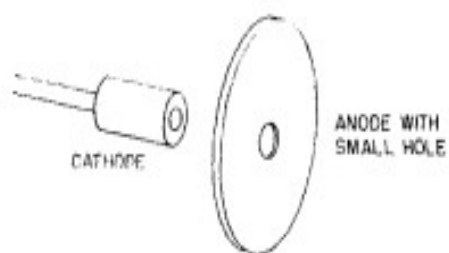
Līdz ar to izriet pirmie eksperimenti ar Type 911 jonu avotu, to atverot un savienojot ar ICP ģeneratoru, ierīkojot caurplūdes nesējgāzes traktu, galā pievienojot ekstrakcijas elektrodu un Faradeja Kausu jonu strāvas uzmērīšanai. Eksperimenta mērķis ir pārliecināties par tīra metaliskā bora izmantošanas iespējām un tā funkcionalitāti lielas anodstrāvas apgabalā.

Iepriekš tika veikts eksperiments ar borskābes pildījuma lietošanu pašdarinātā dobā katoda ierīcē¹⁵⁸, skat attēlu. Tajā 1 ir dobais katods, 2 ir anods, 3 ir HC augstsprieguma avots, 4 ir ICP ģenerators (300 V 5A 50 MHz), 5 ir ICP spole, trīs vijumi. Seši ir ātrizjaucamie KF vakuumsavienojumi, 7 ir 1 V un 120 A regulējams paša izgatavots barošanas avots pastāvīgā magnēta (solenoida) barošanai. Vēlāk tas izrādījās nelietderīgs. Astoņi ir nesējgāzes (argona) traksts ar regulējošo mikrokrānu, 9 ir vakuuma kontroles sensors, 10 ir "zarniņa" tipa (t.i. silfons) vakuumvads uz forvakuumsūkni. Šāds avots uzrādīja ievērojamu jonu strāvu un spektrometriski cauri kvarca caurulei bora jonu koncentrāciju, kas bija ievērojami lielāka nekā Type 911 lampā no tīra bora. Tomēr jāņem vērā, ka šāds avots dod iespaidīgu daudzumu skābekļa un ūdeņraža piesārņojumu, kas tālākām sistēmām var būt kaitīgs. Tāpēc Type 911 inav ideāls augstas tīrības avotam.



Mazākās pieļaujamās izlādes strāvas novērtējums:

Diemžēl izlādes apgabala reģenerēšanās laiks īsti nav zināms, tāpēc pieturoties pie strāvu modeļa nevis koncentrācijas modeļa, kā pirmo iterāciju pieņemot dobā katoda iekārtas "lietderības koeficientu" ap 1%, iegūstam $5 \cdot 10 \cdot 100 = 5 \text{ mA}$ katoda strāvu par minimāli pieļaujamo. Kā atzīmēts daudzās publikācijās, nav grūtību iegūt pat 100 reizes lielāku strāvu (bet tikai ne no bora!). Faktiski augstāk citētā *Goebel/Katz 6 nodaļa* motivē, ka pie **29 mA** masas utilizēšanas lietderība dobajā katodā ir ~13%¹⁵⁹, kas saskatot ar Crofton agrāk veikto aprēķinu ~10%¹⁶⁰, kaut gan atsevišķos gadījumos šis lielums var pārsniegt pat 80% līdz 90%¹⁶¹. Tas nozīmē, iespējams, ka mūsu gadījumam arī 0,5 mA katodstrāva nebūtu par maz, kaut arī lieka nodrošināšanās te neizmaksā neko daudz.



Respektīvi, līdz eksperimentālai validēšanai, kas skaitli precīzēs, jāreķinās ar mērķlielumu intervālā **100 mikroampēri līdz 500 mikroampēri**. Nav jāuztraucas par abu novērtējuma paņēmieni precīzu nesakrītību, jo tas, ka iegūta lieluma puslīdz sakrītoša kārtā, jau vien ir sasniegums. Lielas strāvas lietojums ir jonu atdeves lietderību veicinošs faktors, bet droši drīkst vidusmēra strāvu samazināt, lietojot barošanu impulsu režīmā¹⁶².

158 - Blahins J., Bzishkyan A., Cinins A, Atvars A. (2017). *Innovative design of boron ion source for next generation ion implanter*. Scientific yearly conference of Latvia University

159 - Goebel, D. M. and Katz, I. (2008). *Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters, Vol. 1*, John Wiley & Sons Inc, 2008. Available at https://descanso.jpl.nasa.gov/SciTechBook/series1/Goebel_cmprsd_opt.pdf

160 - Boyd I.D., Crofton M.W. (2004). *Modeling the Plasma Plume of a Hollow Cathode*, Journal of Applied Physics, vol. 95, pp. 3285–3296, 2004

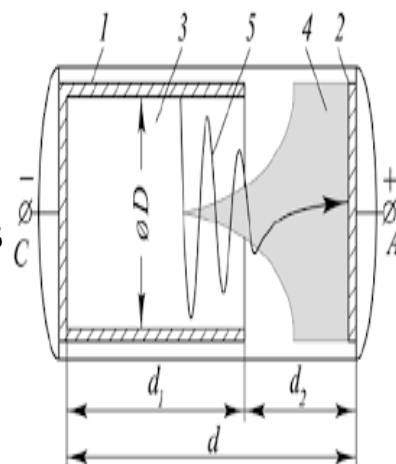
161 - Houk R.S. (1980). Dissertation, Iowa State University, Available at <https://core.ac.uk/download/pdf/38917764.pdf>.

162 - Masamba W.R., Smith B.W., Krupa R.J., Winefordner J.D. (1988). *Atomic and Ionic Fluorescence in an*

Attēlos: a) dobā katoda princips, mūsu gadījumā anoda apertūra ir liela. b) plazmas zonas ģeometrijas piemērs.

Dobā katoda kameras izmēri

Avots ¹⁶³ iesaka lietot kameras diametru **40 mm**, garumu **25 mm** un ekstrakcijas dīzes diametru 8 mm priekš lielstrāvas (Ampēri) ierīces. Citi augstāk minētie autori iesaka apmierināties ar **10-12-15 mm** diametru un **2-3 mm** caurumu, vai pat **1 mm** caurumu ekstrakcijas sprauslai.



Tomēr nedomājas, ka plazmai varētu patikt vajadzība atjaunoties ātrāk kā ar milisekunžu ātrumu. Jo mikrosekundes jau rada ICP līdzīgus efektus, tāpēc atgriežoties pie tilpuma koncentrācijas modeļa - kad tilpumā ir $1E17$ gab/m³ jeb $1E13$ gab/cm³, savukārt ekstrakcija noris ar $1E14$ gab/sek, tad plazmas zonas tilpums 1 cm³ nodrošinātu pašatjaunošanās laiku 100 msek un ņemot vērā plazmas nenoplicināšanas drošības koeficientu 10 reizes - 10 ms. Tātad arī 0,1 cm³ būtu gana liela kamera. Tāpēc izvēlēsimies (ar krietnu drošības koeficientu) **12-15 mm resnu un 5-7 cm garu kameru ar caurumu 1 mm**. Labāk gribētos teikt 2-3 mm, taču tad nesamērīgi pieaug prasības vakuumsūkņa jaudai.

Bora nostiprināšana

HC caurules materiāls principā var būt jebkurš metāls, taču tā joni bagātīgi piesārņos jonu kūli kā arī oksidēsies O un HO jonu ietekmē, kas radīsies no borskābes (ja ne tīrs bors, kam skābekļa piesmērējuma nav). Tāpēc izdevīgi ir lietot tīru un korozijnoturīgu metālu, kam atommasa ir iespējami tālu no bora (10 Daltoni un 11 Da dabiski piemaisītam izotopam). Tāpēc niķelis ar saviem 58,7 Daltoniem ir ļoti labs kandidāts. Nerūsošais metāls ar savu daudzelementu sastāvu ir sliktāks kandidāts, kaut arī apspriežams. No kā tas sastāv, lasāms ražotāja mājaslapā ¹⁶⁴. Lieto arī alumīniju, taču tas nav labs vakuumam. Titāns nav ieteicams. Cēlie un retzemju metāli par dārgu. Pretestības stieplu materiāli (nihroms, nikelīns, konstantāns, volframs, kantāls) vienkārši netiek lietoti. Kāpēc, vismaz man nav zināms.

Caurules konstrukcija ultramazas jaudas avotiem ir pildīts cilindrs, kam viens gals ir ciet. Šādā gadījumā plazmas tilpums ir ļoti neliels, un niķeļa jonu īpatsvars argona nesējgāzes plazmā ir liels. Izdevīgāk ir lietot jonu raķešdzinēju konfigurāciju, kam argons plūst cauri pa iekšpusi caurulei, kas no iekšas pārklāta ar atbilstošo materiālu, mūsu gadījumā boru. Jautājums kā nostiprināt borskābes vai citu pulveri uz gluda metāla ir netriviāls, taču vienā galā aizdambēta cilindra gadījumā ļoti efektīvs izrādījās izšķīdināt borskābes pulveri ūdenī līdz putriņas konsistencei, iesmērēt dobumā un labi nožāvēt. Tomēr iekšējā virsmā plāna kārtiņa tā neturēsies. Nepieciešams šūnveida struktūras vadulis, karkass, šūnu sienīņas. Kristālisko boru tirgo Sigma Aldriht malta metala bāzes pulvera formā (CAS-7440-42-8), precīzais marķējuma nosaukums (rakstu no etiķetes) crystalline 325 mesh 98% metal basis boron powder, kam 1 grams maksā 53 Eur. Līdz ar to, šim pulverim problēma ir vēl asāka, jo to ūdenī šķīdināt noteikti nedrīkst.

Par šādu vaduli var kalpot jebkāda strāvu nevadoša stiklveida pietiekami tīra kompozīcija, siets vai audums. Vislabāk kvarca audums, jo kvarcam ar tā 60 Daltoniem un tā atlūzām Silīcijam ar 14 un skābeklim ar 16 un 32 Daltoniem ir pietiekama masas atšķirība, lai tos atseparētu QMS filtra sekcijā, kaut arī 10 un 14 ir samērā tuvas vērtības. Masas slānim nav jābūt biežākam par 0,5-1 mm,

Inductively Coupled Plasma Using Hollow Cathode Lamps Pulsed at High Currents as Excitation Sources. Appl. Spectrosc. 42, 872-878

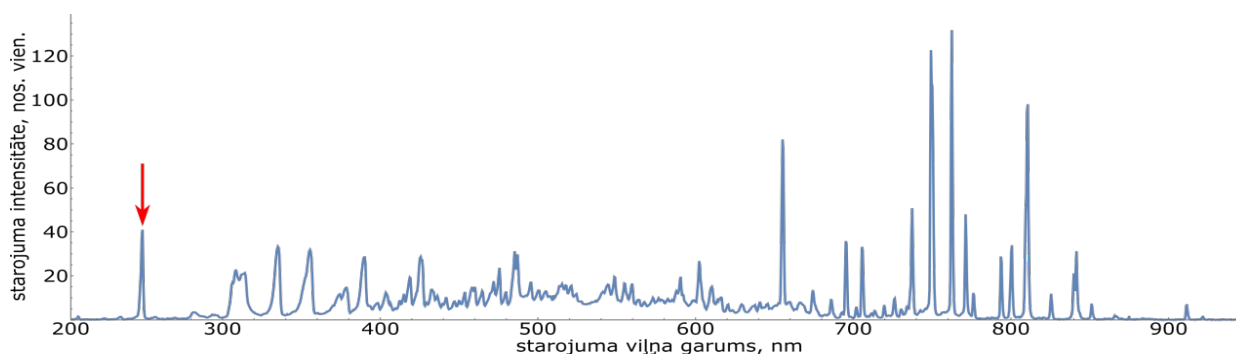
163 - Hiroki Watanabe, Junichiro Aoyagi, Haruki Takegahara. Dependence of Cathode Configuration on Performance in an Inductively Coupled Plasma Cathode. Tokyo Metropolitan University, University of Yamanashi

164 - <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2868>

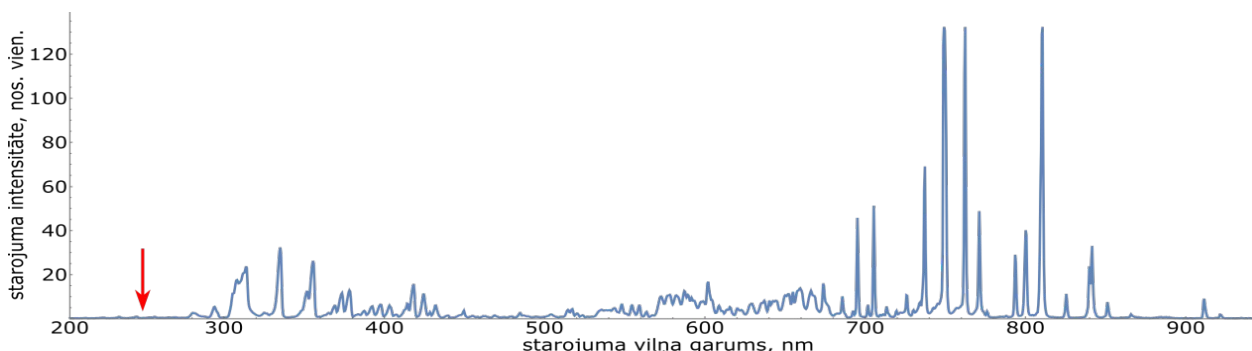
citādi pieaugs nepieciešamais katoda spriegums. Audumam cilindrā jāturas ar berzi, kam var piepalīdzēt drāts cilpiņa(cilpiņas). Alternatīva ir iespēja pulveri zem liela spiediena, piemēram viegli koniskā presformiņā sapsesēt līdz saķepšanai. Trešā iespēja ir sapsesēšanas procesā pielietot kādu piemērotu saistvielu vai līmvielu, tomēr tāda pagaidām nav apzināta. Cilindra gals ir slēgts ar ekstrakcijas vāciņu, kam centrā ir sprauslas caurums. Tūlīt aiz ekstrakcijas cauruma jāsākas ICP zonai, kas molekulāros jonus ar tipiskām enerģijām 0,2-0,5 eV samals par atomāriem joniem, kā literatūra saka, 2-20 un dažkārt pat 30 eV. Pirms HC, kur ieplūst argons, jāstāv otrai ICP spolei, kas “sakaitinās” gāzes daļiņas tā, ka to kinētiskā enerģija būs labāk spējīga izsist boru no kristaliskā režģa, kā arī pretoties dielektriķa (ja vien tas ir dielektriķis) elektriskajam inducētajam atgrūžošajam laukam. Ja jonizējamais izejmateriāls ir strāvu vadošs, tad pēc ieejā uzstādītā ICP vajadzības nav, ja vien jonu strāva rodas pietiekama.

No otras puses:

Mūsu iepriekšējie eksperimenti ar slēgta tipa dobā katoda konstrukciju, kam tikai viens gals ir vaļā un pildījums ir borskābe, pie 10 mA strāvas ļāva spektroskopiski konstatēt bora esamību, kas vairāk kā desmitkārt pārsniedza standarta rūpnieciski ražota bora references avota bora koncentrāciju. Tātad, iespējams, pilnīgi pietiek ar no ārpuses ar nesējgāzi appūstu dobo katodu, jo tādu ir daudz vieglāk izgatavot un uzpildīt. Tomēr apmēram pēc diviem gadiem kā eksperimentālais stends bija noārdīts ienāca aizrādījums, ka esam nepareizi identificējuši boru. Jo mērijām raksturīgo spektrālīniju dupletu 249 nm, taču jona identificēšanai vajadzēja lietot 291.8 nm. Šobrīd tiek gatavota iekārta šī lieluma pārmērīšanai, izmantojot kristalisko boru.



Attēlos a) Ocean Optics spektrogramma HC-ICP avotam ar borskābi un b) tas pats ar Type 911 metāliska bora lampu identiskā mērogā. Ar bultiņu iezīmēta vieta, kas atbilst atomārā bora spektrālīnijai



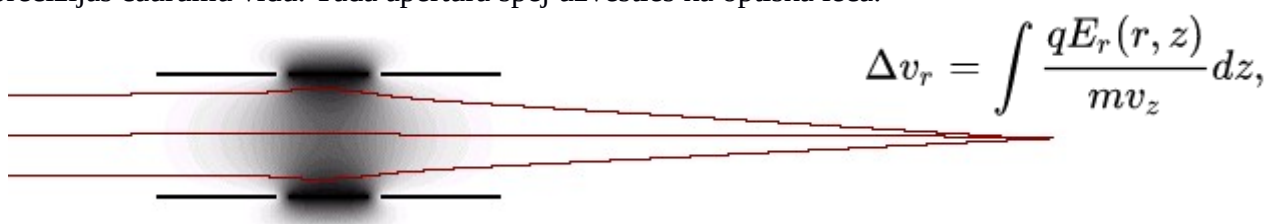
Masas zudums

Masas iznese pie $M=10$ Daltoni boram būs $10 \text{ amu} * 1,66E-27 \text{ kg/amu} * 1E14 \text{ gab/sek} = 16,6E-13 \text{ kg/sek} = 16,6E-7 \text{ mg/sek} = 1,7 E-6 \text{ miligrami sekundē}$ jeb $1,7 E-2 \text{ miligrami nepārtrauktas darbības gadā}$. Respektīvi, viena uzlāde kalpos līdz avota korozijai, nevis līdz bora izsīkšanai. Tāpēc bora uzpilde ražošanā nepieciešama tikai remonta nolūkos, nevis ikdienas ekspluatācijā.

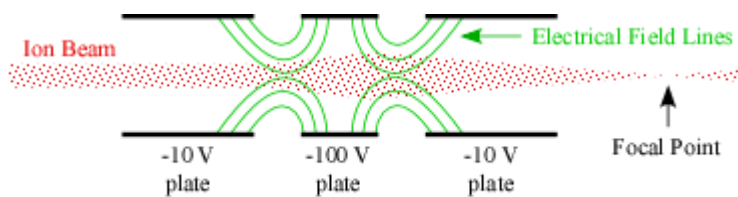
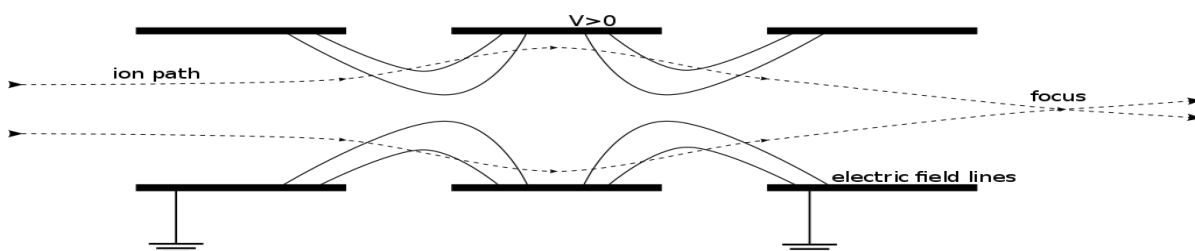
No ICP zonas jonus ekstragē ar Einzell paātrinātāja konusa palīdzību. Šis konuss ar šauru atvērumu vērsts pret jonu avotu, atrodas augstāka diferenciālā vakuuma zonā, orientējoši 1E-5 līdz 1E-7 Torr, kas pats par sevi nodrošina jonu ekstrakciju, ko papildus stūrē konusam pievienotais spriegums. Jāparūpējas, lai jonu ātrumu galvenokārt noteiktu šis spriegums, nevis nejaušības procesā iegūts pneimatiskais impulss. Citādi jonu kūļa enerģijas nevienādība varētu būt par lielu tālākam masselekcijas filtram.

Par jonu optiku

Viens no jonu optikas pamatmezgliem ir Einzell lēcas. Nosaukums radies no Vācu valodas, kurā šis termins nozīmē Viena Lēca vai alternatīva tulkojuma versija - Viena Sprieguma Lēca. Pateicoties elektrostatiskā lauka gradienta iedarbībai uz kustošu lādiņu, tas tiek novirzīts sānvirzienā tāpat, kā optiskās lēcas novirza gaismas starus fokusa (vai izkliedējošas lēcas antifokusa) virzienā, ko var aprakstīt ar integrālvienādojumu ātrumam radiālvirzienā (skat zemāk)¹⁶⁵ un ¹⁶⁶. Attēlā redzama tipiska šīs ierīces shēma. Jonu kūļa elektrostatiskās jeb **imersijas lēcas** būvē kā plānu plāksnīti ar precīzijas caurumu vidū. Tāda apertūra spēj uzvesties kā optiska lēca.



Attēlos zemāk skaidrots kā stara noliekšana rezultējas par lēcas veida uzvedību



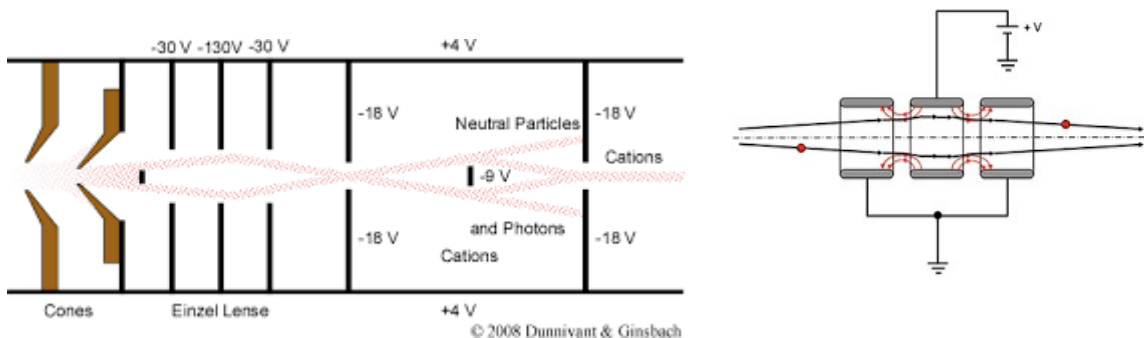
© 2008 Dunnivant & Ginsbach

Viens piemērs, kā var tikt organizēta ekstrakcijas un kolimēšanas sekcija, sniegts sekojošā attēlā. Cita starpā, salīdzinot magnētiskās lēcas ar elektrostatiskajām – 1 T magnētiskais lauks ir ekvivalents lēcās 300 MV/m E laukam.

Empīriskā sakarība **imersijas lēcām** (tas ir sinonīms Einzellēcām) dod **lēcas fokālo attālumu** $f/L = 4 \cdot \sqrt{(V_2/V_1 + 1)/(V_1/V_2 + V_2/V_1 - 2)}$, kur L ir distance starp elektrodiem (sprauga) un potenciāli V_1 un V_2 ir atbilstošie elektrodu spriegumi, nosacīti pieņemot, ka kūļa potenciāls ir

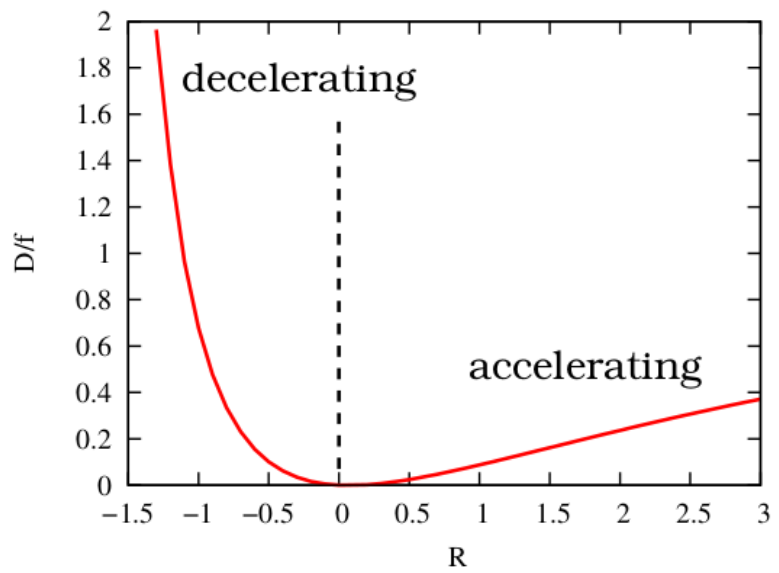
165 - Liebl H. (2008). *Applied Charged Particle Optics*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. p.39. ISBN 978-3-540-71924-3

166 - Heddle D.W.O. (2000). *Electrostatic Lens Systems (2 ed.)*. Bristol and Philadelphia: IOP Publishing. p.63. ISBN 0_7503_0697_1



nulle, ja kūļa daļiņu ātrums ir nulle (t.i plazmai jonu avotā vēl pirms ekstrakcijas)¹⁶⁷. **Einzell lēcas** būvē kombinējot divas spraugas tipa lēcas vienā trīselektrodu sistēmā, kur pirmais un trešais tiek turēti pie kūļa līnijas potenciāla, parasti $V_1=0$, bet centrālais elektrodus pie sprieguma V_2 , kurš nosaka fokusa attālumu.

Einzellēca var strādāt režīmā, kad pirmā sprauga paātrina un otrā sprauga bremsē, vai arī tieši otrādi. Tad raksta pirmā ir **paātrinoša jeb $R > 0$** lēca un otrā ir **bremsējoša jeb $R < 0$** lēca. Abas konfigurācijas ir fokusējošas, tomēr refrakcijas spēja otrajam paveidam ir lielāka (t.i. var panākt īsāku fokusa attālumu). Piemērs sniegts grafikā, kur redzams, ka, piemēram, kādai izvēlētai ģeometrijai, kam cilindru iekšējais diametrs ir D , spraugas ir $D/4$ un vidējā cilindra garums ir $D/2$, bremsējošā tipa fokusa attālumu $F=10 \cdot D$ var panākt ar $-0.5V$, bet lai to panāktu ar paātrinošā tipa lēcu, vajadzīgi 1.1 Volts. Tomēr paātrinošajām lēcām piemīt mazāka sfēriskā aberācija, un jo īpaši, kad nepieciešams augsts refrakcijas spēks. Otrā vērtīga īpašība paātrinošajām lēcām ir potenciāla barjeras radīšana, kas lielā mērā kompensē tilpuma lādiņu, ko jonu kūlis inducē apkārtējos dreifa apgabalos, savukārt bremsējošās lēcas savāc kompensējošos tilpuma lādiņus, tāpēc apkārt lēcām rodas tilpuma uzlādēti apgabali. Ir iespējams arī lēcu speciālgadījums, kurā pirmās un trešās lēcas potenciāli atšķiras, parasti to lieto kā zūma objektīvu, to dēvē arī par **trīs apertūru imersijas lēcu**.



Solenoidālas lēcas

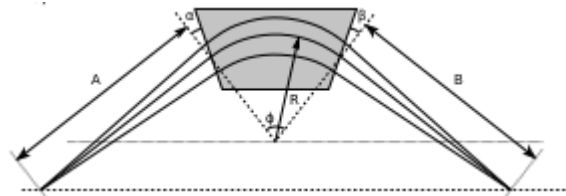
Solenoidālas lēcas ir jebkāds magnētisks elements ar asimetriskiem fokusējošiem spēkiem. Parasti tā ir rotācijas simetriska spoļu sistēma apkārt jonu kūļa asij, kas rada garenvirziena mag.lauku ar kasimālo vērtību spoles centrā. Fokusējošo spēku spolei ir pagrūti izvest, bet orientāciju var gūt līdzīgi kā plānās stikla lēcas gadījumam [93]. Radiāls mag.lauks solenoīda ieejā dod daļiņai azimutālu grūdienu $v_{\theta} = q \cdot B \cdot r_0 / m$, kur daļiņas $v_{\text{radiāls}} = 0$ un r_0 ir lauka rādiuss. Tas nozīmē, ka daļiņas trajektorija spoles iekšienā kļūst helikāla. Spoles izejā daļiņa iegūst pretēju grūdienu kā ieejā, tāpēc azimutālais ātrums izejā ir nulle, toties radiālais ir iegūstams no izteiksmes ar integrāli $v_r = r_0 \cdot q^2 / 4 \cdot m^2 \cdot v_z \cdot \int (B^2 dz)$. Šis radiālais ātrums liek kūlim konverģēt tuvāk asij, tāpēc fokusu var noteikt kā $1/f = q^2 / 8 \cdot m^2 \cdot E_k \cdot \int (B^2 dz)$.

167 - H. Liebl, Applied Charged Particle Optics, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008.

Dipola optika (elektrostatiski un magnētiski dipoli)

Pamatā šādus dipolus lieto, lai daļiņu kuli saliektu, novirzītu. Magnētisko dipolu veido no solenoīda, tā, lai magnētiskais lauks būtu vērsts kūlim šķērsvirzienā. Lādētas daļiņas magnētiskajā laukā seko cirkulārām trajektorijām ar radiusu $\rho = p/q/B = m \cdot v_z/q/B = 1/B \cdot \sqrt{2 \cdot m \cdot V_0/q}$, kur V_0 ir spriegums, ar ko daļiņa bija paātrināta līdz ātrumam v_z . Tieši tāpat elektrostatisku dipolu var uzbūvēt no cilindriskiem elektrodiem ar radiusiem r_1 un r_2 un ar spriegumiem V_1 un V_2 . Tad liekuma radiuss trajektorijai starp platēm būs $\rho = 2 \cdot \phi/E$, kur E ir lauka intensitāte un ϕ ir orbitālais potenciāls, pieņemot, ka jonu kūlis atrodas zem references potenciāla nulle Volti. Tā kā spriegums starp platēm tagad iznāk $V = V_1 + (V_2 - V_1) \cdot \log(r/r_1)/\log(r_2/r_1)$ un $E = V_2 - V_1/\log(r_2/r_1)/r$. Ja plašu spriegumus izvēlas simetriski, uz vienas plates $V_1 = V_0 + V_{\text{plate}}$ un uz otras $V_2 = V_0 - V_{\text{plate}}$, tad $V_{\text{plate}} = V_0 \cdot \log(r_2/r_1)$. Šādas sistēmas optiskā ass, kuras pazīme ir $\phi = V_0$, ir ar radiusu $\rho = \sqrt{r_1 \cdot r_2}$. Vai arī alternatīvi, var ietaisīt asimetriskus plašu spriegumus, tādējādi panākot optisko asi pa vidu starp platēm, tai skaitā dodot vai nedodot platēm fokusējošas īpašības. Magnētiskajā dipolā fokusēšanās ir atkarīga no magnētvasda polu kurpju leņķa, skat zīm.

Gadījumā, kad $\alpha = \beta = 0$ (tātad polu kurpes ir aprautas 90 grādu stāvumā) apraksta Bārbera likums - trajektorijas liektā posma centrs un abi fokusi atrodas uz vienas līnijas (zīmējuma apakšā raustīta līnija). Tā kā zīmējumā abu polu kurpju leņķi ir pozitīvi un atšķiras no 90 grādiem, tad fokusējošais spēks samazinās, bet negatīviem leņķiem fokuss, pretēji, pietuvojas, konkrēti $f_y = R/\tan(\alpha)$, turklāt polu kurpju leņķus var variēt pa abām koordinātēm, ar mērķi abās fokusu panākt vienādā attālumā, tad runā par **dubultas fokusēšanas magnētu**.



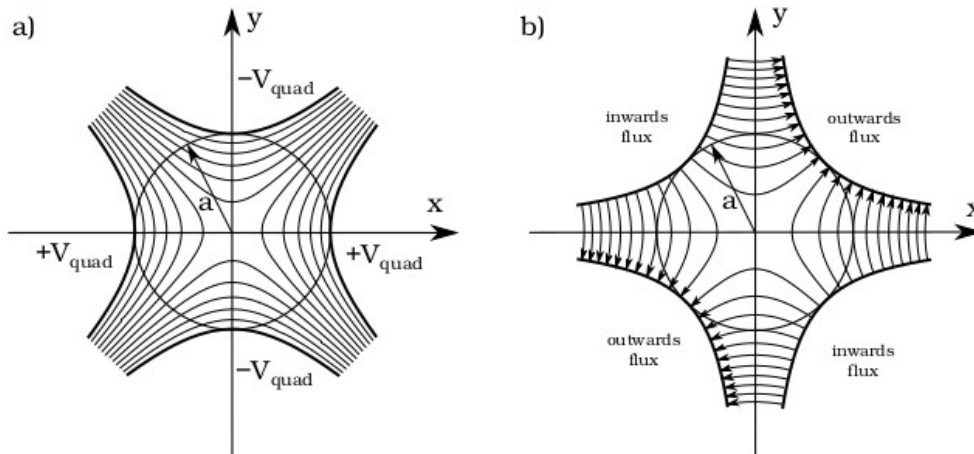
Simetriskam šādam magnētam ir $A = B = 2 \cdot R/\tan(\theta/2)$. Ja gadījumā lieto $\theta = 90$ grādi, tad polu kurpju spicums kļūst $\alpha = \beta = 26.6$ grādi un tad abi fokusi $A = B = 2R$. Ļoti līdzīgi uzvedas arī elektrostatisks dipols, kas fokusē pa x asi, bet fokusēšanu pa y asi var ieregulēt, ierullējot galus cilindriski vai toroidāli. Ja ar $+V_{\text{plate}}$ un V_{plate} apzīmē spriegumus uz platēm, tad $\theta = V_{\text{plate}} \cdot L/V_0/d$, kur L ir plates garums pa z asi un d ir attālums no vienas plates līdz otrai. Šādu sistēmu parasti lieto stara stūrēšanas nolūkiem. Magnēti, kuru poli izvietoti uz xy ass ir šādu nolieces plašu magnētiskais ekvivalents, kam nolieces efektu rēķina kā $\theta = L \cdot B \cdot \sqrt{q/m/V_0}$, kur L ir magnētiskā lauka iecirkņa garums, bet B ir magnētiskā lauka indukcija.

Kvadrupola lēcas

Gan E gan B tipa lēcas var izmantot arī kvadrupola izpildījumā. Strikti ņemot, kvadrupolu jāmontē no hiperboliskas virsmas elektrodiem, tikai šādu virsmu izgatavot ir naktsmurgs, ja nu vienīgi ar CNC metodēm, taču hiperbolas vietā droši var lietot cilindriskus stieņus, un no tā radusies kļūda ir niecīga, ar nosacījumu, ka elektrodi nav ļoti tuvu kūļa asij. Spriegumus pieslēdz sekojoši: $+V_{\text{quad}}$ uz elektrodiem, kas atrodas asīs $+x$ un x koordinātēs, bet $-V_{\text{quad}}$ uz elektrodiem, kas atrodas $+y$ un $-y$ virzienos. Darbojošies spriegums šādā sistēmā būs $V = (x^2 - 2y^2)/a^2 \cdot V_{\text{quad}}$, kur a ir puse no kvadrupola apertūras (skat shēmu zemāk). Tas nozīmē, ka vektoriālais E lauks (ar kvadrātiekvām apzīmēsīm, ka lielums ir vektoriāls) $[E] = -2 \cdot V_{\text{quad}}/a^2 \cdot x \cdot [x] + 2 \cdot V_{\text{quad}}/a^2 \cdot y \cdot [y]$. Tātad tas fokusē pozitīvos jonus x virzienā un defokusē y virzienā, respektīvi refraktīvie spēki ir $1/f_x = k \cdot \sin(k \cdot L)$ un $1/f_y = -\sinh(k \cdot L)$, kur ar \sinh tiek saprasta hiperboliskā sinusa funkcija $(e^x - e^{-x})/2$, bet $k = \sqrt{V_{\text{quad}}/a^2/V_0}$ un L ir kvadrupola efektīvais garums¹⁶⁸.

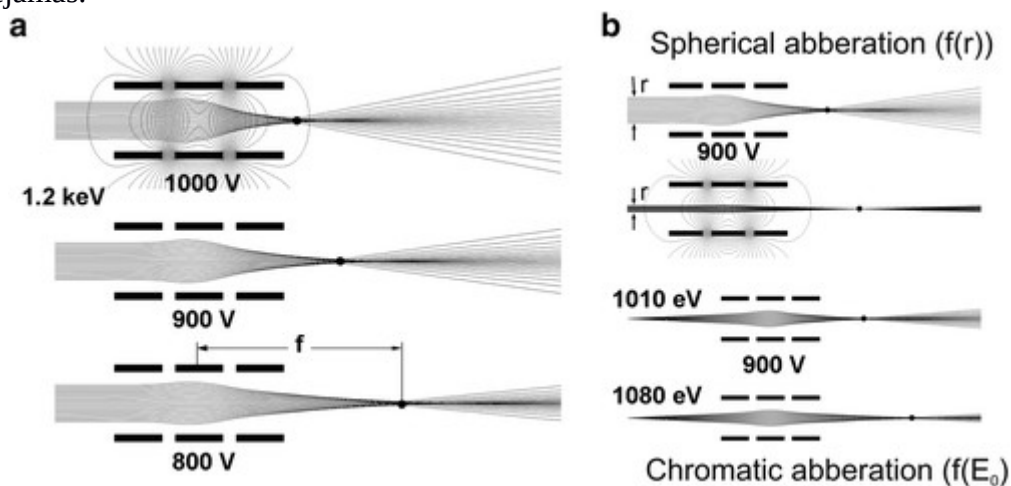
Magnētisks kvadrupols ir līdzīgi būvēts kā elektrostatisks, polu kurpes ir hiperboliskas vai vismaz cilindriskas, un tinumus izvieto tā, lai vieniem pretējiem poliēm magnētiskā plūsma ietu pretī jonu kūlim, bet otrā pāri kūļa virzienā. Tad magnētiskā lauka indukcija šādai ģeometrijai ir

168 - H. Wollnik, Optics of Charged Particles, Academic Press, Inc., Orlando, Florida, 1987.



Attēlā (a) elektrostatisks kvadrupols (b) magnētisks kvadrupols

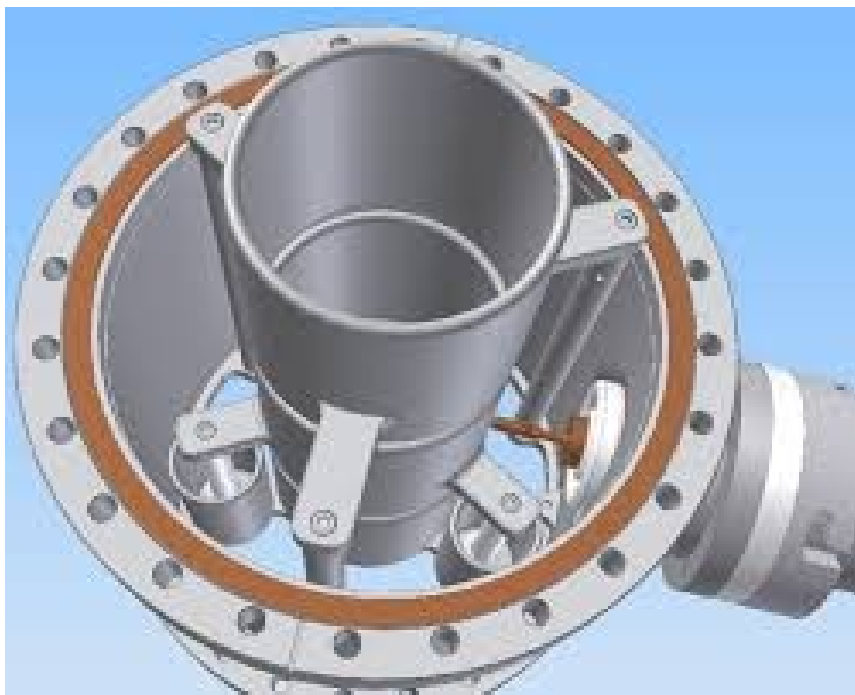
$[\mathbf{B}] = \mathbf{B}_T/a * \mathbf{y} * [\mathbf{x}] + \mathbf{B}_T/a * \mathbf{x} * [\mathbf{y}]$, kur B_T ir magnētiskā lauka blīvums polu kurpes galā. Pozitīvie joni, kam ātruma komponente ir $[\mathbf{v}] = v_z * [\mathbf{z}]$ izjutīs spēku $[\mathbf{F}] = q * \mathbf{B}_T * \mathbf{v} * (-x * [\mathbf{x}] + y * [\mathbf{y}])/a$, kas kūli fokusē x virzienā un defokusē y virzienā. Šis spēks rada refraktīvo spēju $k_B^2 = q/p * B_T/a$, līdzīgi kā iepriekšējā gadījumā pa abām asīm. Uzstādot divas vai trīs viena otrai sekojošas šādas lēcas iegūst fokusējošo sistēmu, kam ir punktveida fokuss. Zīmējumā parādīta aberāciju veidošanās. Visas optisko lēcu neidelaitātes imersijas lēcai nav svešas, un tās ir jūtāmākas kā optikā un grūtāk kompensējamas.



Visbeidzot, jautājums, kā tehniski ierīkot nemaz ne tik mazskaitlīgās **elektrodu sistēmas iekarinašanu**, lai dažādie spriegumi netaisa īsslēgumus, elektrodi neļogās un ievēro ļoti augstu pozīcijas precizitāti. Parasti 0,1 mm novirze ir pilnīgi nepieļaujama, bet 10 mikroni ir ļoti laba. Lieki teikt, ka pēdējo sasniegt ir milzu izaicinājums, bet 50 mikroni ir reālistiski. Pirmkārt, paši elektrodi ir tikpat precīzas nerūsošā tērauda plāksnītes gan attiecībā uz caurumu vietu, gan malu griezumu akurātību un pat griezuma stāvuma leņķi, un protams, griezuma viļņainību. Respektīvi, ar frēzi, un kur vēl ar vīli/urbmašīnu pat sliktu elektrodu uztaisīt nevar, vienīgā metode ir lāzergriezums vai augstspiediena ūdensstrūklas griezumums. Gadījumos, kad vajag lielāku tīrību, lieto metālisko niķeli, taču tas ir nepatīkami mīksts. Kad vajag ultimātīvu tīrību, iesaka molibdēnu, taču tā cena ir biedējoša un apstrāde smaga, tomēr ar molibdēnu man pieredze ir tikai ar stieplēm. Bet ir pieredze ar Cirkoniju, tā cietība ir graužoša. Kad man nācās viena projekta ietvaros iegriezt M3 mm vītņi šajā izcilajā metālā, tad parasts vītņurbis par 20 centiem pat skrāpējumu neatstāja, parasts HSS

urbis par 3 Eur atstāja skrāpējumu un ne vairāk, augsti leģēts HSS++ klases vītņurbis par 30 Eur iegrieza pusapgriezīenu un tad izbeidzās, un tad kaut kur no Amerikas apsūtīnāja kosmisko tehnoloģiju cienīgu vītņurbī par 300 Eur, un tas ļāva iegriezt trīs šādas vītnes un arī bija pagalam. Toties cirkonijš ir izcili nereaģējošs, netvaikojošs, un cietība nozīmē arī formas stabilitāti. Ko tas ilustrē - labākā iespēja, kā elektrodus izgriezt, ir ar lāzergriešanas palīdzību. Slikts lāzeris dod 50 mikronu akurātību un labs 10 mikronu.

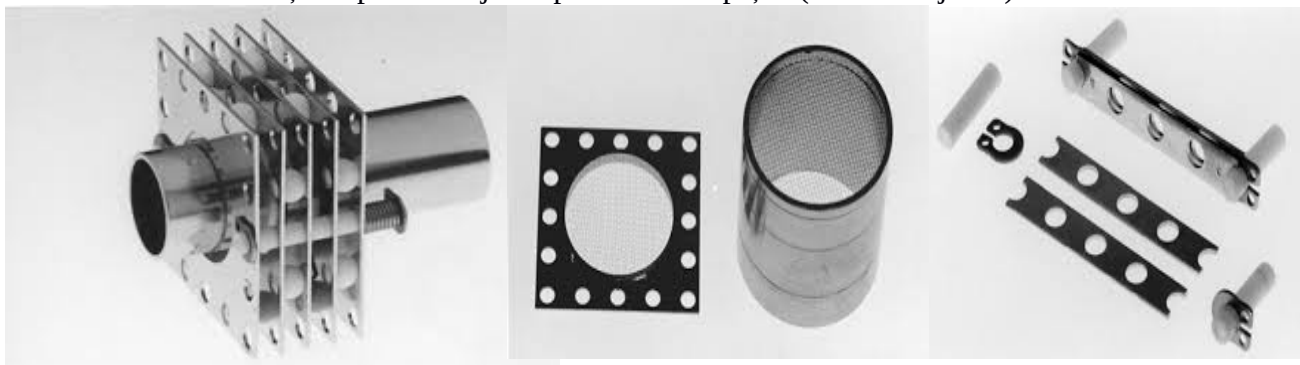
Kad elektrodi izgriezti un nopulēti, plāksnītes stara ceļā izvieto, uzverot uz četriem vadstieniņiem caurumos, kas ietaisīti katrā četrstūra elektroda (pēc ārpusēs) kaktā. Ja elektrods ir caurulīte, tad to iespiež starp divām plakanām plāksnītēm, kam centrālais urbums ir vienāds ar caurulītes iekšējo diametru, tātad atbalsta caurulītes galus. Vienu vai labāk divas plāksnītes, kam caurums ir vienāds ar cilindra ārējo diametru, centrēšanas nolūkos ieregulē kaut kur pa vidu caurulītei. Elektrodu no elektroda atdala precīzi izolatora distanceri (arī ieteicams lāzergriezums, taču var griezt ar dimanta disku un atlasīt labākos). Distancerus un caurulītes rekomendē izgatavot no bora nitrīda vai safīra, taču lielākajā daļā visu gadījumu der gan parasts porcelāns, gan kvarcs, un ja nav lielu termisko spriegumu vai prasību pret tvaikošanu vakuumā, pat stikls. Tātad elektrodu sistēma ir uzvērta uz četriem "iesmiem", bet vēl ir jānodrošina, lai tie nebīdās gareniski. Formāli varētu lietot resnāku distancera caurulīti ar skrūvēti, taču termiskās staigāšanas dēļ tā nedara nekad. Varētu lietot labu pāris vijumus garu atsperīti, kas ar vieglu iestiepi pēc savērpšanas izvietojas un atlaižot pašfiksējas uz "irbuļa". Taču tā kā labas atsperītes sanāk no tērauda, kas ir vakuumam nedraudzīgs materiāls, tā dara reti. Visbiežāk lieto iekšējā tipa aptveratsperpaplāksni (**Retaining Ring**) - attēlota fotogrāfijā. Parasti tiek prasīts, lai tā ir vismaz no nerūsošā tērauda. Šāda konstrukcija ir vienkārši samontējama, pielāgojama un kvalitatīva. Protams, visi "iesmi" tiek fiksēti kaut kāda paveida biezākā gredzenā, ko ar 3 vai 4 skrūvēm var fiksēt vakuumkanāla iekšējā diametrā.



Elektrostatisko lēcu nostiprināšanu var veikt ar "ausīm", taču tā ir sarežģīta sistēma izgatavošanā un ieregulēšanā. Nesalīdzināmi ērtāka ir sistēma ar "iesmiem", skat. zīmējumus zemāk. Ja vakuumvada materiāls ir trausls, piemēram, ultratīrām sistēmām ieteicamais kvarcs, tad skrūvju kontakta cietību ar sienīņu, kas var sagraut kvarcu

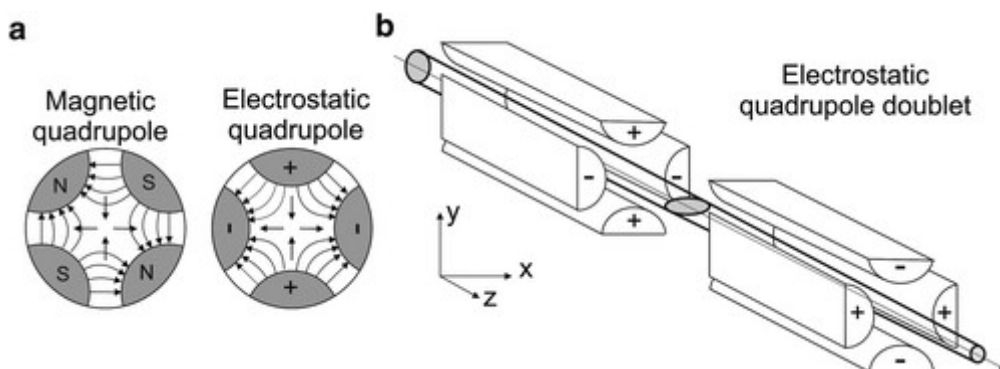
termiski staigājot, var mīkstināt vismaz divas skrūves amortizējot ar piemērotu atsperīti. Tieši šīs skrūves visbiežāk ir regulējams elements, ko ar lāzera vizieri iestata pēc centrālā cauruma, cik vien iespējams ideāli koaksiāli.

Dažus praktiskus know how var mācīties no publikācijas ¹⁶⁹. Praktiski, izrēķinātos cilindru gabalus fiksē ar izolatora stieņiem pozicionējošās plānskārda lapiņās (skat. zīmējumu).

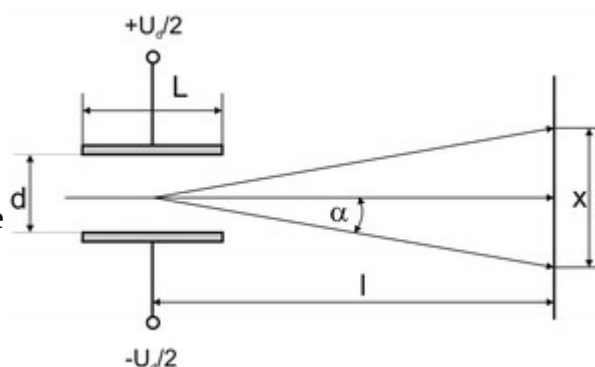


Plāksnišu materiāls vismaz AISI-316. Gatavus šādus materiālus plašā izvēlē ražo firma **Kimball Physics**, taču cenas nav pircējam draudzīgas ¹⁷⁰. Fiksējošās paplāksnītes uzmauc vai noņem ar smalkām stārķknaiblēm, kam gals ir gana smalks, lai ievietotos atspērpaplāksnītes caurumos, parasti 1 mm vai 0,7 mm.

Šķirošana pēc zīmes. Daudzos gadījumos ir nozīme jonu kūļa apstrādes procesā atdalīt "nepareiza" lādiņa jonus. Piemēram, pozitīvo jonu kūli var būt nelieli piemaisījumi ar negatīvajiem joniem vai neitrālām daļiņām (piemēram, savstarpēju sadursmju upuris). Tādā gadījumā lieto **kvadrupola lādiņa filtrus**. Kvadrupols, līdzīgi kā aprakstīts par fokusējošām ierīcēm, ir hiperboliska virsma elektrodam un četri šādi elektrodi aplikti apkārt kūlim gareniski, ar noteiktu izrēķinātu attālumu. Pieļaujams,



sarežģītības izgatavošanā dēļ, hiperbolisko liekumu aizstāt ar cilindrisku, taču tad tikai neliels "stara" diametrs pašā simetrijas centrā uzvedas pietiekami "ideāli". Patiesībā visbiežāk kvadrupoli ir kā reiz cilindriski. Pieliekot krusteniski pretējas zīmes spriegumus, iegūst to, ka joni šādā sistēmā, negatīvie un pozitīvie joni - katrs pagriežas par 90 grādiem un dodas pretējos virzienos, bet elektriski neitrālo trajektorija netiek ietekmēta. Zīmējums palīdzēs saprast šī filtra uzbūvi. Elektrostatiskās filtrācijas vietā tikpat labi var lietot magnētisku filtrāciju.



169 - Aberth, William H. (1974). Construction of an einzel lens capable of high voltage operation. Review of Scientific Instruments, 45 (10): 1289, Bibcode:1974RScI...45.1289A, doi:10.1063/1.1686484

170 - izstrādājumu katalogs: www.kimballphysics.com/downloadable/download/sample/sample_id/1776/

Jonu optikas datormodelēšana

Principā lēcām un cita veida jonu optikai analītisks aprēķins ir iespējams, kā to rāda CERN publikācija ¹⁷¹ un augstāk atainotās formulas. Tomēr daudz darba un iespējamu kļūdu var ietaupīt izmantojot datormodelēšanas softu, no kā visredzamākais šai jomā ir SimIon ¹⁷². Alternatīvi, iespējama arī lēcu modelēšana ar Comsol ¹⁷³. **Modelēšanas softu** nosaukumus neslikti summarizē tīkla resurss ¹⁷⁴, kas iesaka sekojošu programmatūras sarakstu (tajā atrodami arī linki, kur atbilstošo programmu var iegūt): ATOMKI-Guide (brīvpieklūve), COMSOL Multiphysics (maksas), GICOSY (brīvpieklūve), IBSimu (GNU licence), LIMIOPTIC (GNU licence), SIMION (maksas), WinTRAX (GNU licence). Šķiet, ka arī ANSYS eksistē iespēja modelēt šādu sistēmu, taču par (augstu) maksu. Starp dažādām FEA (Finite Element Analysis) programmatūrām viena no jaunākajām ar GNU licences noteikumiem ir LISA v7 ¹⁷⁵, kam arī ir elektronoptikas modulis.

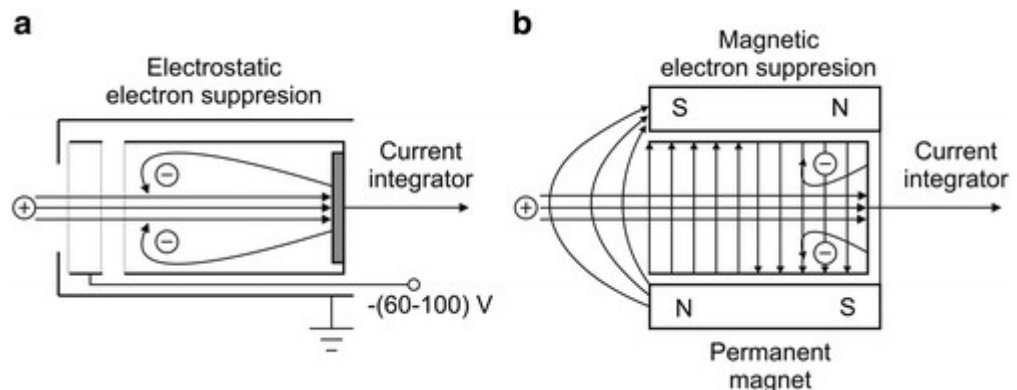
Ja nu tomēr ir vēlme aprēķināt ar rokām, tad jāzina, ka grāmatu skaits elektronoptikas aprēķinu jomā ir impresīvs, kaut vai neliels uzskaitījums ^{176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186}. Pilns saraksts ir daudz plašāks, un nav garantijas, ka tas ir pilnīgs, bet par šaurākiem aprēķina jautājumiem ir vērts pieminēt tādas kanoniskas publikācijas kā piemēram ^{187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197}.

-
- 171 - M.H. Rashid. Simple analytical method to design electrostatic einzel lens. Proceedings of the DAE Symp.on Nucl. Phys. 56 (2011)1132-1133. Pieejams <https://s3.cern.ch/inspire-prod-files-7/72726de99f83d15f026fa56930f1de08>
- 172 - Rokasgrāmata Simion lietošanai par lēcām. <https://simion.com/info/lens.html>
- 173 - Rokasgrāmata Comsol lietošanai par lēcām. www.comsol.com/model/einzel-lens-14405
- 174 - www.ionbeamcenters.eu/resources/ion-optics-software/
- 175 - <https://lisafea.com/>
- 176 - Spangenberg K., Field L.M. (1942) Some Simplified Methods of Determining the Optical Characteristics of Electron Lenses. Elec. Commun. 20 305-313
- 177 - Spangenberg K., Field L.M. (1943) The Measured Characteristics of Some Electrostatic Electron Lenses. Elec. Commun. 21 194-204
- 178 - Grivert P. (1965) Electron Optics. London: Pergamon Press
- 179 - Hawkes P.W. (1967). Focusing of Charged Particles. Vol.1 ed A Setier, London, Academic Press 411-68
- 180 - Paszkowski B. (1968). Electron Optics. London: Iliffe
- 181 - Read F.H. (1969). Accurate calculations of double-aperture electrostatic immersion lenses. J. Phys. E: Sci. Instrum 165-169
- 182 - Klemperer O., Barnett M.E. (1971) Electron Optics. 3rd edn, Cambridge: Camb. Uni. Press
- 183 - Read F.H., Adams A., Montiel J.R.S. (1971). Electrostatic cylinder lenses I: Two element lenses. J. Phys. E: Sci. Instrum 625-32
- 184 - Mulvey T., Wallington M.J. (1973). Electron lenses. Rep.Prog.Phys. 36 347-421
- 185 - Read F.H. (1978). Electrostatic lenses. Inst.Phys.Conf.38 249-56
- 186 - Harting E., Read F.H. (1976). Electrostatic Lenses. Amsterdam: Elsevier
- 187 - Heddle D.W.O. (1969). The design of three-element electrostatic electron lenses. J.Phys.E:Sci.Instrum.2 1046-50
- 188 - Heddle D.W.O., Kurepa J. (1970). The focal properties of three element electrostatic electron lenses. J. Phys. E: Sci. Instrum.3 552-4
- 189 - Heddle D.W.O., Papadovassilakis N., Yateem A.M. (1982). Measurement of the magnification behaviour of some three-element electrostatic lenses. J. Phys. E: Sci. Instrum.15 1210-3
- 190 - El-Kareh A.B., Sturans M.A. (1971). Analysis of the 3-Tube Symmetrical Electrostatic Unipotential Lens. J. Appl. Phys.42 1870-6
- 191 - El-Kareh A.B., Sturans M.A. (1971). Analysis of the 3-Tube Asymmetrical Unipotential Lens. J. Appl. Phys.42 4902-7
- 192 - Adams A., Read F.H. (1971). Electrostatic cylinder lenses II: Three element einzel lenses. J. Phys. E: Sci. Instrum.5 150-5
- 193 - Read F.H. (1969). Calculated properties of electrostatic einzel lenses of three apertures. J. Phys. E: Sci. Instrum. 2 679-84
- 194 - Riddle G.N.H. (1978). Electrostatic einzel lenses with reduced spherical aberration for use in field-emission guns. J.Vac.Sci.Technol.15(3) 857-60
- 195 - Brunt J.N.H., Read F.H. (1975). Aberrations in electrostatic lenses. J. Phys. E: Sci. Instrum. 81015-20
- 196 - Renau A., Heddle D.W.O. (1985). Geometric aberration in electrostatic lenses: I. A simple and accurate computer model. J. Phys. E: Sci. Instrum.19 284-88
- 197 - Renau A., Heddle D.W.O. (1985). Geometric aberration in electrostatic lenses: II. Aberration coefficients and

Kopsavelkot – racionālākais konstruktora darbošanās veids tomēr ir datormodelēšana.

Tulīt aiz ekstrakcijas pielietojot fokusējošos elektrodu (plāksnīti ar caurumu) un stūrējošos plāksnīšu pārus (uz augšu/leju un uz abiem sāniem) panāk labu stara ģeometriju un koaksialitāti. **Stara izejā ierīko volt-neitrālu** (zem GND sprieguma) apertūru, kas ļauj nofiltrēt tos jonus, kuru reakcija uz cauri noieta lēcu laukiem ir parādījusi, ka tiem enerģijas atšķiras no vidusmēra rādītāja. Tālāk ar pretēji vērsta konusa palīdzību staru salēnina līdz orientējoši nelielam spriegumam, kam QMS filtrs ir ar maksimālu efektivitāti.

Stūrēšanas elektrodi. Izvēsei, kā arī stara koaksialitātes piekorigēšanai, nepieciešams staru noliekt par kontrolēti nelielu leņķi pa labi/kreisi vai uz leju/augšu. To dara ar **nolieces platēm** (deflection), kas pēc jēgas ir plakanais kondensators. Nolieces attālums ir rēķināms kā $x=L \cdot I \cdot U(d)/2/d/U(a)$.



Arī Faradeja Kausam ir iespējama versija, kur elektronu

izlekšanu no FC (tā paliekot nepiereģistrētiem) var novērst arī ar magnētiskas darbības "lamatām", kaut arī parastākā izpildījumā to var darīt ar elektrostatisku lamatu. *Zīmējumā:* divi paņēmieni pret elektronu zaudēšanu FC ierīcē.

Jonu paātrināšanas metodes

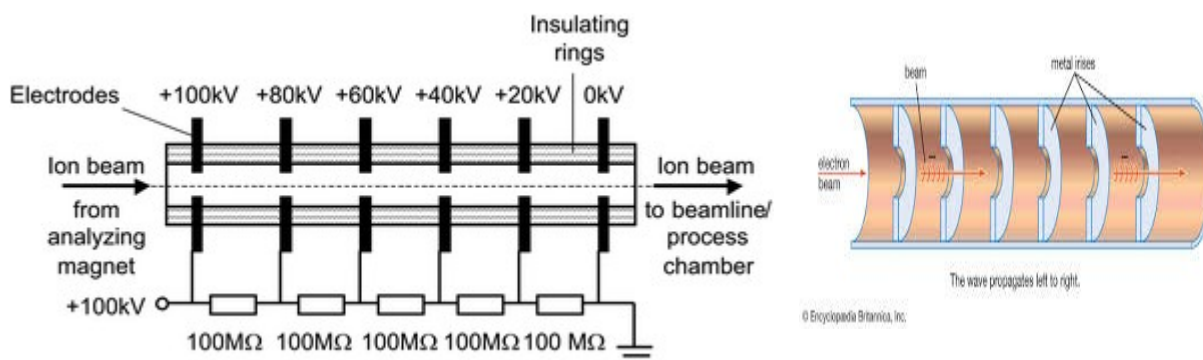
Paātrināšanai nepieciešams palielināt kūļa enerģiju, tādu enerģiju (kā zināms elektriskais spriegums ir definēts kā tāds darbs, kas...un tā tālāk pēc zināmā teksta) ko var iegūt ar vairāk vai mazāk parastu transformatoru un sprieguma daudzkārstāju - droši 10 kV un grūtāk 30 kV. Tādā gadījumā vienkāršākais iespējamais DC paātrinātājs ir viena vai nedaudzu gredzenveida elektrodu sistēma. Attālumam spraugā un griezuma 90 grādu slīpumam akurātība ir vissvarīgākais. Tipiska iesācēja "iekrišana" var sanākt pat uz tik vienkāršu lietu kā rezistori. Jo maksimāli pieļaujamais spriegums uz rezistora ir diezgan zems, SMD pretestībām pat 75...100...150V, DIP rezistoriem, piemēram padomijā ražotajiem 0.125W ap 150 V; 0,25W ap 250 V; 1W 350V un tikai 2W līdz 750V uz gab. Respektīvi katru rezistoru jāformē kā garāku virteni no kompozītiem daudziem vienādiem komponentiem. Turklāt, lai arī SMD šķietami būs vajadzīgi nesalīdzināmi daudzāki diskrētie elementi, jo to max spriegums ir mazāks kā diskrētiem rezistoriem, tomēr PCB virtene ar SMD sanāk graciozāka, acij tīkamāka, mazāka un viegli defektējama, kad vajadzīgs diagnosticēt vainu. Augstsprieguma iegūšanai nav labāka resursa par **Kokrofta-Valtona shēmu** (Cockroft-Walton), kuri sevišķu slavu ar pikantuma piesitienu iemantoja, kad 1951.g. nopelnīja Nobeļa Prēmiju (for their pioneer work on the transmutation of atomic nuclei by artificially accelerated atomic particles), bet publiski sagrasiņās no tās atteikties (pirmo reizi Prēmijas vēsturē) ar vārdiem: "mēs šo shēmu radījām Cilvēces labklājības labā, nevis kā kodolsintēzes bumbas palaišanas detonatoru". Patiesībā notikums gan norisa mazliet maigāk, un skandāla iniciators bija Valtons, galu galā abi Prēmijas naudu saņēma, tomēr draudzību abiem zinātniekiem šī lieta izjauca. Kokrofts turpināja

their interactions. J. Phys. E: Sci. Instrum.19 288-95

strādāt militāriem pētījumiem, kamēr Valtons, būdams dziļi reliģiozs, devās uz dzimto Īriju strādāt Katoļu skolā mācīt bērnus. Patiešām, shēma ekstrēmā gadījumā ļauj iegūt tādu spriegumu, ka temperatūra izlādes apgabalā sasniedz kodolsintēzes (fusion) uzsākšanās temperatūru, tādējādi nav vajadzīga masīva kodolskaldīšanas bumba (fission) kā detonators. Taču šī vēsture shēmu par netikumisku nekādi nedara. Jāzina, ka izdevīgāk to darbināt ar augstu frekvenci, lai kondensatori būtu nelieli un diodes nāksies likt virknē, jo ar augstfrekvences diodēm virs 1...1,2 kV ir pavisam vāji, it īpaši lielākām strāvām, kur tās paliek arī dārgas. Tādas lētas un stipras ir nopērkamas tikai zemām frekvencēm. Man ir nācies konstruēt 36 kV 5 A Greca taisngriezi 120 kW jaudai, tur izdevās atrast vienu vienīgu diodes kandidātu, ko nācās likt 36 gab virknē, montējot katru uz 6x8 cm alumīnija dzesētāja plāksnītes. Plāksnītes tika izvietotas pa perimetru radiāli, iespējot starp divām apaļām sānu “pankūkām” iefrēzētās ligzdās, kam abās malās vidū ventilatori pūta iekšā gaisu, dzesētāju apskalošanai. Laimīgā kārtā tik lielas strāvas šim paātrinātājam ir pārmērīgas, bet līdz 1 A bez radiatora labi strādā tādas diodes (1 kV 10 ns) kā UF4007.

Jāņem vērā, ka kondensatoros cirkulēs ievērojamas reaktīvās strāvas, respektīvi **zudumu leņķa tangenss** (nejaukt ar kosinusu no f_i , kas ir šī lieluma pretmets) var izrādīties tehnoloģiska problēma, kas rada pārmērīgu karšanu. Ja tas tā ir, tad efektīvs bet neparasts risinājums ir *Rogers Duroid(TM)* - trīs dažādas izvēles ar speciāla teflona pamatnes vakuumuzputināta vara PCB, labākais rezultāts $\tan(d)=0,0003@2,4\text{ GHz}$, kā arī vēl īpašākus keramikas pamatnes vakuumuzputinātus PCB, ko piedāvā *KOA/VIA Electronic* kā zeltīta pārklājuma materiālus KLC, DuPont-951 un pats labākais DuPont-9K7, kam $\tan(d)=0,001@10\text{ GHz}$ (tātad ievērojami mazāk uz zemākām frekvencēm, jo daļējas zudības frekvenču apgabalā dielektriķiem spēkā ir sakarība, zudumi proporcionāli frekvences kvadrātsaknei. Teiktais neattiecas uz apgabalu ļoti “caurspīdīgajā” RF-EM lauka spektra daļā un ļoti “necaurspīdīgajā” (absorbējamā) spektra daļā. Zināms, ka katram izolatoram ir kāda frekvence, kas tuva molekulārajām rezonansēm, rotācijai un vibrācijai, pie kā materiāls ir EM viļņus necaurļaidošs un absorbējošs. Ja starojums būtu gaisma, tad teiktu, ka materiāls ir necaurspīdīgs. Savukārt ļoti tālu uz leju no šīs frekvences, RF-EM starojums brīvi cauri dielektriķi ar ļoti maziem zudumiem, un tad optikā runātu par materiāla caurspīdīgumu. Pa vidu atrodas puscaurspīdības dēļ viegli zudīgais apgabals, kurā izteiksme ir spēkā ¹⁹⁸.

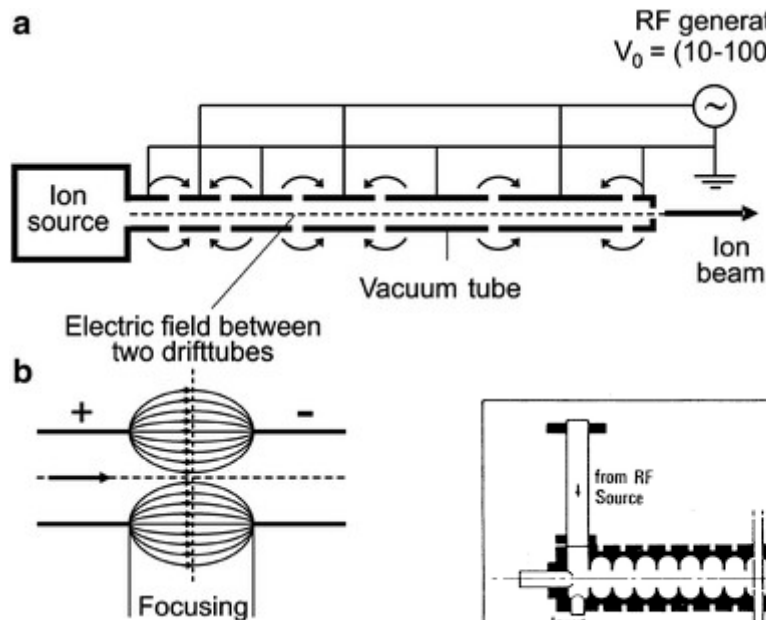
Vērts atzīmēt, ka joniem ieejot šādā DC paātrinātājā, dažādu masu joniem ātrumu attiecība izejā būs kvadrātsakne no molmasu attiecības. Vēl lielāka šī starpība būs, ja daļiņu ieejas trajektorija būtu viegli iešķība, tā kā enerģijas palielinājums ir proporcionāls $\sin^2(\text{no leņķa})$, tad lēnākās daļiņas iegūs daudz mazāku ātrumu kā ātrākās, tāpēc "nepareizos" ātrumus un "nepareizās" molmasas varēs vieglāk vēlāk atfiltrēt. Tomēr parasti traktu taisa taisnu.



Attēlos: DC lineārais akselerators (Viderøe tubulus)

198 - Ngai K.L., White C.T. (1978). Frequency Dependence of Dielectric Loss in Condensed Matter. US Naval Research Lab Memorandum Report No 3863. Available at <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA060368.pdf>

Pilnīgi savādāk ir ierīkota **RF jeb LINAC paātrinātāja** sistēma. Tajā izmanto augstsprieguma augstfrekvences barošanas avotu, piemēram Klappa shēmu vienkāršiem risinājumiem vai daudz stabilāko DDS sistēmas topoloģiju, ko var vadīt datorizēti. Frekvence 13,56 MHz līdz 3 GHz nosaka paātrinājumu, tāpat kā spriegums. Princips ir tāds, kamēr lādētā daļiņa nolido no cilindra Nr i līdz cilindram Nr i+1, tikmēr sprieguma fāze ir paguvusi nomainīties uz pretējo, proti, daļiņu nevis grūž atpakaļ no kurienes nākusi, bet gan turpina vilkt pa kanālu uz priekšu. Šādi var iegūt ļoti lielas stara enerģijas, kas tālu pārsniedz mums vajadzīgos 100 keV. Jāatzīmē, ka sprieguma pārkritiens uz



spraugu jālīmitē 100-500 V robežās, jo vakuma drošs attālums augstsprieguma caursītei ir orientējoši 1 kV/mm. Galējā gadījumā spraugas tiek aizvietotas ar dobumiem, kas cikliski paplašinās un sašaurinās līdzīgi kā resnajai zarnai, un ar šādu **skrejviļņa konstrukciju** iespējams strādāt pat mikroviļņu frekvencēs ar milzīgām

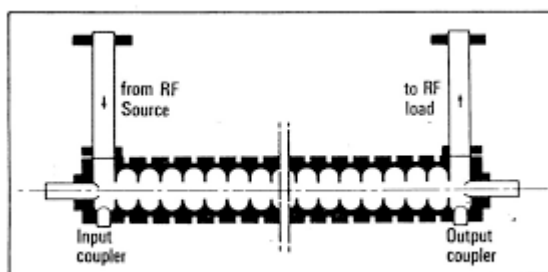


Fig. 7 - Travelling wave accelerating structure

kūļa enerģijām.

Elektronikas apsaiste akseleratoram un novirzes sistēmai

Pēc QMS sekcijas implantēšanas mašīnā ir jāliek klasisks RF LINAC paātrinātājs ir viena alternatīva, vai krietni vienkāršāks DC 10-100 kV *Widerøe* tubulus, kas ir cilindru spraugas tipa DC akselerators. Minētās sprieguma vērtības izriet no ERAF darba uzdevuma, respektīvi no industrijas vēlmju listes. Tātad, runājot elektronikas valodā, Kokrofta-Waltona daudzkārstotājs baro akseleratora cilindrus, un rezistoru matrica tos sadala pa elektrodiem. Iespējams **vienādu cilindru garuma režīms**, kad - jo tuvāk lielo spriegumu galam, jo lielākam jābūt elektroda potenciālam, vai pretēji, uz visiem elektrodiem ir vienāds potenciāla pieaugums, bet jo elektrods tuvāks lielo izejas galam, jo tas ir garāks, ar apsvērumu, **lai katrā dreifa cilindrā pavadītais laiks būtu vienāds**. Pilna viļņa C-W daudzkārstotājam tomēr izejas spriegums ir stipri atkarīgs no slodzes strāvas un pulsējošs. Pret pulsācijā līdz LC filtrs, bet spriegumu var stabilizēt ar atgriezenisko saiti uz pirms C-W daudzkārstotāja stāvošo SMPS konvertoru. Parasti šādu konvertoru lietderīgāk taisīt uz tādiem labi pazīstamiem plašpatēriņa čipiem kā TL594 (kas atšķiras no labāk pazīstamā ATX datoru barošanas bloku shematikā lietotā TL494 vai SG2525 tikai ar precīzākam un mazāk dreifējošām raksturlielēm. Čips satur regulējamu meandra ģeneratoru un divām PWM atgriezeniskajām saitēm (viena strāvas un otra sprieguma stabilizēšanai). Var domāt par vienkāršāko IR2153, tomēr tam nav PWM režīma, tāpēc stabilizācija iespējama tikai start-stop režīmā, un tas nav pārāk precīzi. Vēl variants ir NC555 vai citi 555 varianti, taču tur PWM realizācija uz divu diožu bāzes ir pavisam termiski dreifējoša.

Novērtējot **akseleratora prasības pēc jaudas: Joules/sec=ions/sec*E(particle)=1E16 ions/sec*100keV*1.6E-19J/charge=160J/sec=160 W**. Kas sastāda strāvu $i=N/U=160/1E5=1.6 \text{ mA}$.

Tātad nekāds sevišķi masīvs barošanas bloks te nav nepieciešams un TL595 ir labākais pieejamais shemotehnikas risinājums ar topoloģiju atbilstoši AN. Vēl vajadzētu novērtēt reaktīvās strāvas iedarbību uz kondensatoriem, ja C-W shēma lieto potenciālu uz tiem katru apmēram 10 kV, tad $2 \cdot 10 \text{ kV} \cdot 1.6 \text{ mA} = 32 \text{ VAR}$, kas ir salīdzinoši neliela reaktīvā jauda, kas vidusmēra labam kondensatoram ar $\tan(\delta) < 0.001$ ģenerēs siltumplūsmu (reizinām abus minētos kontrolskaitļus) 32 mW no katra kondensatora. Visbeidzot, ir vērts pieskarties atgriezeniskās saites galvaniskajai izolēšanai. Strāvas saiti iespējams organizēt caur izejas ķēdes "lejasgalu", līdz ar to faktiskais spriegums pret nosacīto zemi būs mazāk par Voltu, kas ir sprieguma kritums uz strāvas mērītāju rezistoru. Šādā gadījumā ideāli var lietot Holla sensoru, kas detektē strāvu caur spolīti uz ferīta serdeņa. Tiesa vairumam Holla sensoru ir problēmas ar ātrdarbību, vai arī problēmas ar iekšējo pastiprinātāju, un tad ņemt ātru bezpastiprinātāja sensoru, kam konstruēt ātru ārēju operacionāli ir viena no iespējām, bet komplicēta. Otra iespēja ir ņemt vidēji ātru sensoru ar labu iekšēju pastiprinātāju kā TLE-4923, diemžēl izrādījās nepatīkams pārsteigums, tas ir stipri pagrūti pieejams. Trešā iespēja ir klasisks ferīta gredzena transformators ar vienu vijumu vienam tinumam un ar kārtu 30-100 vijumi otram tinumam, bet tādā gadījumā pirms taisngrieža, AC ķēdēs posmā. Sprieguma atgriezeniskajai saites, bez šaubām nepieciešamas rezistīvs sprieguma dalītājs, tomēr mērķlielumu konstatējošajai mikroshēmai būtu jābūt iespējami ātrai un akurātai. Šādām prasībām gandrīz ideāla ir ACPL-790B ar iebūvētu optoizolatoru.

Par kūļa novirzes spriegumiem izejas galā pirms targeta ir neskaidrība. Viens no variantiem ir likt paraugu skenējošās novirzes plates aiz galvenā akseleratora. Tomēr tādā gadījumā vai nu nāksies ģenerēt ļotu augsta sprieguma zāģzoba formas signālus, kas nemaz nav shemotehniski vienkārši, vai lietot garu dreifēšanas kanālu, kas gan ļauj strādāt ar mazām nolieces leņķa vērtībām, bet nepatīkami palielina vakuumtrakta garumu (izmērus). Otra iespēja ir likt nolieces sistēmu pirms paātrinātāja, taču tad paātrinātājā stars nebūs kaut kas ļoti tievs ļoti tuvu optiskajai asij, tātad paātrinātāja cilindru diametrs kļūs nepatīkami resns. Inženiertehniskais lēmums faktiski jāpieņem uz abu variantu datormodelēšanas datu pamata.

Par Maselekciju

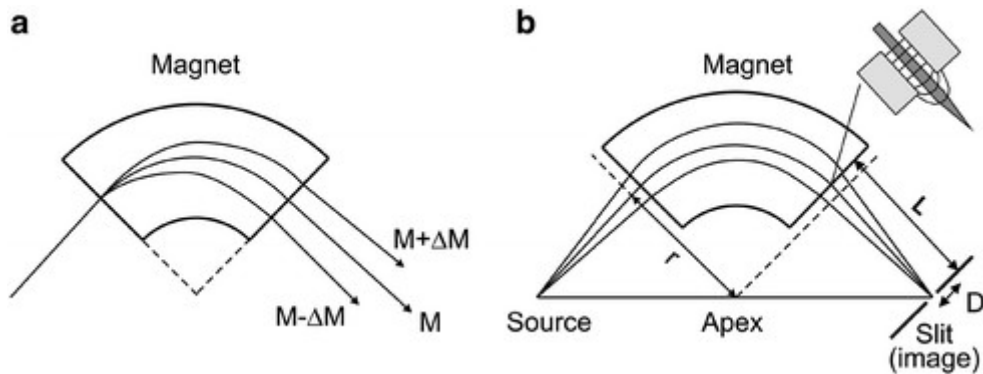
Palicis neapskatīts pēdējais kritiskais mezgls jonu implantācijas sistēmās, **jonu sašķirošana pēc masas un ātruma**. Vienmēr, kaut vai no vakuumvirsmu parazitiskās tvaikošanas un kur nu vēl no virsmas mikrodefektu radītās tvaika, eļļas un atmosfēras gāzu sorpcijas un izrietošas desorpcijas porās, tāpat konstrukciju materiālu permeācijas, rodas piemaisījumi, bet industrijas prasības pret dopanta tīrību ir mākslas līmenī. Saprņu lielums šobrīd ir ar kārtu 1 pret 10^{20} . Parasti jonu kūļa attīrīšanai lieto magnētiskos sektoru filtrus. Šo filtru pamatā ir magnēts, kas rada no molmasas atkarīgu nolieci. Nav problēma, ja piemaisījums ir pēc molmasas "tālu" no mērķa vielas. Taču, ja molmasa ir skaitliski tuvu stāvoša, tas ir visbiežāk ķīmisko elementu periodiskās tabulas lielo masu galā, tās pašas tabulas, ko psrs laikos politikorekti dēvēja par Mendelejeva tabulu. Nenoliedami nopelni tabulas racionālākā izkārtošanā viņam piemīt, tomēr ne tik lieli, lai aizmirstu daudziem desmitiem līdzīgas tabulas versijas, kas pastāvēja pat pirms viņa dzimšanas¹⁹⁹. Tāpēc daudzas valstis, ja ne vairākums, šādu terminu neatpazīst, nelieto, uztver to ar sākumā izbrīnu un pēc tam ar sašutumu, paši lietojot šīs tabulas sinonīmu Elementu Periodiskā Sistēma (vai Tabula)²⁰⁰. Galu galā, kur tādā gadījumā paliek nopelni šīs tabulas veidošanā ko pelnījuši tādi dižgari ar nopelniem šai jomā kā Antoine-Laurent de Lavoisier, Johann Wolfgang Döbereiner, John Newlands, Julius Lothar Meyer, Glenn T. Seaborg²⁰¹? Tomēr pēdējā laikā strikts dalījums vairs nav tik kritisks un

199 - Juris Avotiņš (2009). Vai ķīmija ir nesaprotama? ISBN:9984332993/9789984332994 Pētergailis, lpp 127

200 - Roberts Siobhan (27 August 2019). "Is It Time to Upend the Periodic Table? - The iconic chart of elements has served chemistry well for 150 years. But it's not the only option out there, and scientists are pushing its limits". *The New York Times*. Retrieved 27 August 2019

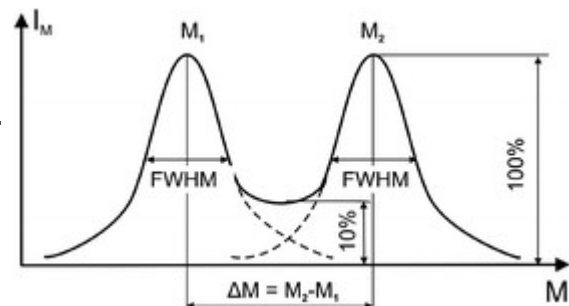
201 - Scerri E.R. (2006). *The Periodic Table: Its Story and Its Significance*; New York; Oxford University Press.

abas formas lēnītēm ieiet aprītē, ja vēl 25 gadus atpakaļ amerikāņu fiziķu diskusiju kopās dabūju stingru aizrādījumu neievieš viņiem nesaprotamus “krievu” nosaukumus, tad šobrīd zinātniskajās publikācijās ir atrodams gan viens, gan otrs variants un pat abi kopā, drošvien tā ir Globalizācija.



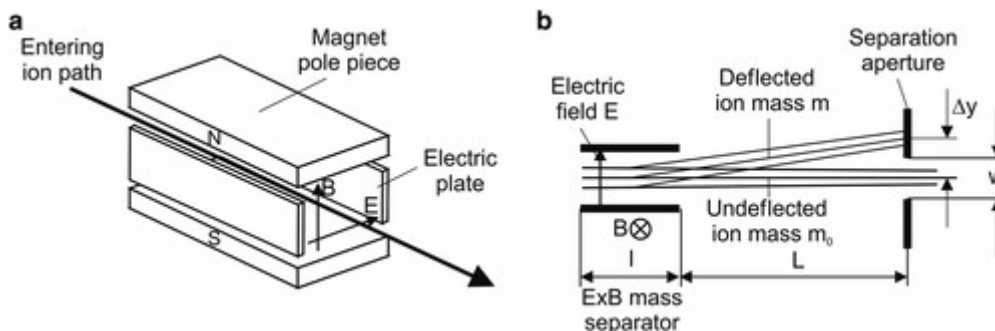
Lai vai kā ar tabulu, bet lielumiem dM un FWHM ir ļoti būtiska nozīme, it īpaši tad, ja ir vēlme dopēt ar izotopiski tīriem materiāliem, un bors te nav pēdējā kandidatūra, jo dabā tam ir vairāki stabili izotopi. Šādam magnētam masas rezolūcija $M/\Delta M = (L+r)/4D$ (skat.apzīmējumu nozīmi attēlā).

Magnēts savērpj jona trajektoriju ar radiusu $r = M \cdot v / qB = (1/B) \cdot \sqrt{2M \cdot U} / q$. Te $U(x)$ ir izejas ātrums jonu kūlim. Polu vaigi parasti tiek taisīti ar nošļauptu ģeometriju, lai uzlabotu fokusējumu. Šādu sistēmu sauc par dubultfokusēšanas magnētisko filtru. Saskaņā ar **Bārbera likumu**, objekta fokusēts attēls un magnēta apekss atrodas uz taisnas līnijas. Šādas sistēmas lielākā vaina ir magnēta izmēri ap metru un attiecīgi izrietošs svārs un cena.



Tāpēc gadījumos, kad jonu strāva nav daudz lielāka par 0,1 mA, droši var lietot Vīna filtru (Wien velocity filter), kas lieto perpendikulārus elektrostātisko un magnētisko lauku, kas abi ortogonāli jonu virzienam.

Attēlā: Vīna filtra uzbūve



Šeit E lauks noliec staru par $y(e) = -E/2U \cdot l(d) \cdot (l(d)/2 + L)$. Apzīmējumus skat attēlā.

Savukārt B lauks nolieks staru par $y(m) = \sqrt{q/2M} \cdot B / \sqrt{U} \cdot l(d) \cdot (l(d)/2 + L)$.

Līdz ar to izveidojas šķirošanas kritērijs $E/B = \sqrt{2qU/M}$. Tāpēc gan enerģija (spriegums, ātrums) gan masa rada noteiktu dispersiju, kas salīdzinājumā ar magnētisku ir izteikti maza. Piemēram 10x10 cm izmēra Vīna filtrs mūsu GRIBA(m) iekārtā dod filtrācijas faktoru elementam ar kārtas numuru 10 kā bors, no tuvākā kaimiņu elementa apmēram 4 reizes. Toties Vīna filtrs ir neliels, sver

dažus kg, un tos drīkst kaskadēt virknē. Cita starpā, vēsturiski, pirmās Amerikas kodolbumbas dabūja savu skaldāmmateriālu no Oakridžas tolaik slepenās izotopu seperācijas fabrikas Y-12, kur taisni mūsu izmēra Kalutroni (pēc ražotāja vārda Calutron saīsināts no California University tāpēc bieži redzētais transskribējums Colutron attiecas uz ražotājfirmu, nevis uz ierīci) ar Vīna filtriem atdalīja U235 no U238. Darbā pagāja gadi, kaut arī strādāja daudzi tūkstoši iekārtas paralēli - tiek minēts skaitlis 42 000 gab²⁰²). Tāpēc mūsdienās vienu atsevišķi ņemtu Kalutronu vairs neklasificē kā kodolaprites rīku, kam lietošana būtu jāuzrauga un jākontrolē, jo gada laikā var saseparēt desmitus mikrogramus skaldāmmateriāla. *Attēlā* Y-12 meitenes pie darba ar Calutroniem.



Sīkāk par to, ko masselekcijas jomā raksta citi.

Par to cik svarīga loma ir masselekcijas filtram nanotehnoloģijās runā²⁰³. Pirmpublicācijas par sektora magnētu masas filtriem lasāmas²⁰⁴ un par Vīna filtru²⁰⁵ un²⁰⁶. Jonu optiku labi apskata²⁰⁷ un²⁰⁸, bet magnētiskā lauka optiku²⁰⁹. Gatavu implantācijas mašīnu līmenī apskats atrodams²¹⁰ un

202 - en.wikipedia.org/wiki/Calutron

203 - Bischoff L (2008) Application of mass-separated focused ion beams in nano-technology. Nucl Instrum Meth Phys Res B 266:1846

204 - Enge HA (1967) Deflecting Magnets. In: Septier A (ed) Focusing of charged particles, vol. 2, New York, Academic, p. 203

205 - Seliger RL (1972) E x B mass separator. J Appl Phys 43:2352

206 - Cui Z (1996) Investigation of $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ mass filters for focused ion beam systems. Nucl Instrum Methods A 368:288

207 - Großer J (1983) Einführung in die Teilchenoptik. B.G. Teubner Verlag, Stuttgart

208 - Hinterberger F (1997) Physik der Teilchenbeschleuniger und Ionenoptik. Springer, Berlin

209 - Glavish HF (1981) Magnet optics for beam transport. Nucl Instrum Methods Phys Res 189:43

210 - Ryding G, Wittkover AB (1975) Industrial ion implantation machines. IEEE Trans Manuf Technol 4:21

²¹¹ un ²¹² un ²¹³, implantēšanas dažādu konceptu apskats lasāms ²¹⁴ un ²¹⁵ un ²¹⁶ un ²¹⁷ un ²¹⁸. Nozīmīga loma sevišķi mazo dziļumu implantēšanai ir plazmas imersijas tehnoloģijai, kas tiek detalizētāk aplūkota ²¹⁹ un ²²⁰ un ²²¹ un ²²² un ²²³ un ²²⁴ un ²²⁵. Rokasgrāmata mazo enerģiju **imersijas implantācijas tehnoloģijai** ir ²²⁶. Tās pielietojums berzes īpašību modificēšanai aplūkots ²²⁷ un ²²⁸.

Par vienu no svarīgiem jonu implantēšanas gala produktiem - kodolstarojuma sensoriem, kas ir Latvijas redzamākā augsto tehnoloģiju sensoru ražotāja radiācijas mērījumiem sia BSI ikdienas maizīte, detalizēti var lasīt publikācijās ²²⁹ un ²³⁰ un citiem sensoriem ²³¹. Par MCP detektoriem un lasāms ²³² un ²³³ un ²³⁴ un ²³⁵, bet par čannelotriem ²³⁶ ar nosacītu to modifikāciju ²³⁷. Tā kā vispār starojuma kontrole ir cieši saistīta ar implantēšanu gan no sensoru ražošanas, bet arī no implantatora

-
- 211 - Kaim RE, van de Meulin PFHM (1991) The EXTRION 220 parallel scan magnet. Nucl Instrum Methods Phys Res B 55:453
- 212 - Pippins MW (1991) A system and performance overview of the EXTRION 220 medium-kurrent ion-implanter. Nucl Instrum Methods Phys Res B 55:423
- 213 - Mera K, Tomita H, Tokiguchi K (2002) High current ion implanter for 300 mm SIMOX wafer production. Hitachi Rev 51:113
- 214 - Rose PH, Ryding G (2006) Concepts and designs of ion implantation equipment for semiconductor processing. Rev Sci Instrum 77:111101
- 215 - Rose PH (1997) Ion implantation, yesterday and today. Solid State Technol 40:129–130
- 216 - Purser KH, Cleland M, Naylor H, Smick T (1985) Concepts and designs of ion implantation equipment. In: Proceedings SPIE advanced applications of ion implantation, vol 0530
- 217 - Turner N, Purser KH, Sieradzki M (1987) Design considerations of VLSI compatible production MeV ion implantation system. Nucl Instrum Methods Phys Res B 21:285
- 218 - Glavish HF, Bernhardt D, Boisseau P et al (1987) Production high energy ion implanters using radio frequency acceleration. Nucl Instrum Methods Phys Res B 21:264
- 219 - Conrad JR, Radtke J, Dodd RA, Worzala FJ (1987) Plasma source ion-implantation technique for surface modification of materials. J Appl Phys 62:4591
- 220 - Tendys J, Donnelly IJ, Kenny MJ, Pollock JTA (1988) Plasma immersion ion implantation using plasmas generated by radio frequency techniques. Appl Phys Lett 53:2143
- 221 - Anders A (1997) Metal plasma immersion ion implantation and deposition. Surf Coat Technol 93:158
- 222 - Chu PK, Qin S, Chan K (1996) Plasma immersion ion implantation a fledgling technique for semiconductor processing. Mater Sci Eng R17:207
- 223 - Ensinger W (1998) Semiconductor processing by plasma immersion ion implantation. Mater Sci Eng A 253:258
- 224 - Chu PK (2003) Semiconductor applications of plasma immersion ion implantation. Plasma Phys Control Fusion 45:555
- 225 - Liebert C, Walther S, Felch S (2000) Proceedings of the 12th international conference on ion implantation technology. IEEE, Alpbach, Austria
- 226 - Anders A (ed) (2000) Handbook of plasma immersion ion implantation and deposition. Wiley, New York
- 227 - Günzel R, Brutscher J, Mändl S, Möller W (1997) The use of plasma source ion implantation for wear protection. In: Pauleau Y, Barna PB (eds) Protective coatings and thin films. Kluwer, Dordrecht, p 635
- 228 - Ensinger W (1998) Modification of mechanical and chemical surface properties of metals by plasma immersion ion implantation. Surf Coat Technol 100–101:341–352
- 229 - Leroy C, Rancoity PG (2009) Principles of radiation interaction in matter and detection, 2nd edn. World Scientific, Singapore
- 230 - Lutz G (1999) Semiconductor radiation detectors. Springer, Berlin
- 231 - Laegsgaard E (1979) Position sensitive semiconductor detectors. Nucl Instrum Methods 162:93
- 232 - Wiza JL (1979) Microchannel plate detectors. Nucl Instrum Methods 162:587
- 233 - Matsuura S, Umebayashi S, Okuyama C, Oba K (1985) Characteristics of the newly developed MCP and its assembly. IEEE Trans Nucl Sci NS-32:350
- 234 - Langstaff DP, Chase T (2007) A multichannel detector array with 768 pixel developed for electron spectroscopy. Nucl Instrum Methods Phys Res A 573:169
- 235 - Mantus DS, Morrison GH (1990) Ion image detection with a microchannel plate evaluated by using a charge coupled device camera. Anal Chem 62:1148
- 236 - Adams J, Manly BW (1965) The mechanism of channel electron multiplication. Nucl Sci Electron Eng 37:180
- 237 - Martin C, Jelinsky P, Lampton M et al (1981) Wedge-and-strip anodes for centroid-finding position-sensitive photon and particle detectors. Rev Sci Instrum 52:1067

drošības kontroles viedokļa, tad ir vērts ieskatīties šai tēmai veltītos avotos kā²³⁸ un²³⁹ un²⁴⁰. Ja mērījums vajadzīgs instrumentālai iespīšanās dziļuma kontrolei, noderīga lāsāmviela ir²⁴¹ un²⁴². Par tehnoloģiskiem jautājumiem, kā tieši implantēt silīcijā vai germānijā, rakstīts grāmatā²⁴³ un²⁴⁴, bet vairāk vēsturiskā griezumā²⁴⁵. Dažādi aspekti no konferencēm par implantācijas jautājumiem, šķiet, būtu vērts iepazīties ar vismaz²⁴⁶ un²⁴⁷ un²⁴⁸ un²⁴⁹ un²⁵⁰ un²⁵¹ un²⁵² un²⁵³ un²⁵⁴ un²⁵⁵ un²⁵⁶ un²⁵⁷ un²⁵⁸ un²⁵⁹ un²⁶⁰ un²⁶¹. Silīcija dopēšanu un rezultāta mērīšanas metodes apskata²⁶². Konkurējoša dopējuma kvalitātes kontroles metode **‘mikro-atomparaugošana’** apskatīta²⁶³ un²⁶⁴ un²⁶⁵ un²⁶⁶.

Tehnoloģiski, bieži svarīga ir mērķa dopēšanas vienmērīgums, vienkāršrunā, lai “krāsojums”

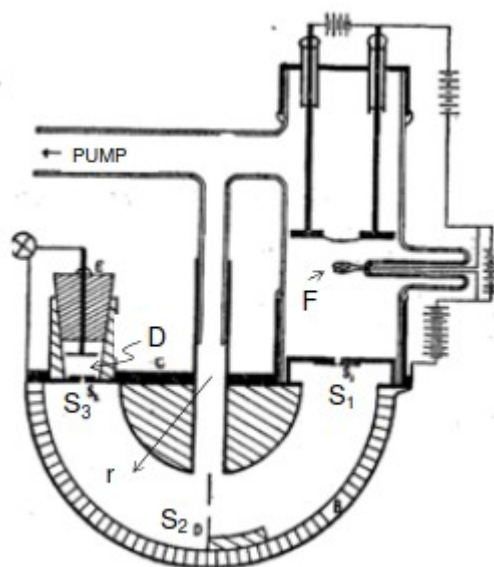
-
- 238 - Fulbright HW (1979) III. Ionization detectors, ionization chambers. Nucl Instrum Meth 62:21
 239 - Döbeli M, Kottler C, Stocker M et al (2004) Gas ionization chambers with silicon nitride windows for the detection and identification of low energy ions. Nucl Instrum Phys Res B 219–220:415
 240 - Price W (1958) Nuclear radiation detectors. McGraw-Hill, New York
 241 - Hentschel E, Kotte R, Ortlepp HG et al (1989) Performance of a bragg ionization chamber for depth profiling and surface analyses. Nucl Instrum Methods Phys Res B 43:82
 242 - Assmann W (1992) Ionization chambers for materials analysis with heavy ion beams. Nucl Instrum Meth Phys Res B 64:267
 243 - Mayer JW, Eriksson L, Davies JA (1970) Ion implantation in semiconductors: silicon and germanium. Academic, New York
 244 - Rimini E (1995) Ion implantation: basics to device fabrication. Kluwer, Norwell
 245 - Rose H (1985) A history of commercial implantation. Nucl Instrum Methods Phys Res B 61:1
 246 - Tokiguchi K et al (2002) 14th IEEE international conference on ion implantation technology proceedings. IEEE, New York, p 629
 247 - McKenna CM (2000) 12th IEEE international conference ion implantation technology proceedings. IEEE, New York, p 1
 248 - Nobes MJ, McLaren MG (1996) Proceedings of the 11th IEEE international conference on ion implantation technology. IEEE, New York, p 379
 249 - Benveniste V, Kellerman P, Graf MA (1998) Proceedings IEEE international conference on ion implantation technology. IEEE, New York, p 432
 250 - Harlan JM, Petry K (1998) Proceedings of the IEEE international conference on ion implantation technology. IEEE, New York, p 266
 251 - Cambell OF, Ray AM (1998) Proceedings of the international conference on ion implantation technology. IEEE, New York, p 154
 252 - Angel G et al (1998) Proceedings of the IEEE international conference on ion implantation technology. IEEE, New York, p 188
 253 - Murrell A et al (2004) Proceedings of the international conference on ion implantation technology. IEEE, New York, p 20
 254 - Sundström H et al (2008) Proceedings of the international conference on ion implantation technology. IEEE, New York, p 184
 255 - Murakami J et al (2008) Proceedings of the international conference on ion implantation technology. IEEE, New York, p 180
 256 - Tokiguchi K et al (2000) Proceedings of the 12th international conference on ion implantation technology. IEEE, Alpbach, Austria, p 372
 257 - Blake J, Richards S (2002) Proceedings of the 14th IEEE international conference on ion implantation technology. IEEE, New York, p 395
 258 - Blake J et al. (2002) Proceedings 2002 international SOI conference, Williamsburg, p 109
 259 - Sato M et al (2002) Proceedings of the 14th IEEE international conference on ion implantation technology. IEEE, New York, p 383
 260 - Tokoro N, Holbrook N, Hacker D (2000) Proceedings of the 12th international conference on ion implantation technology. IEEE, Alpbach, Austria, p 368
 261 - Sun HL, Lee W, Xu K et al (2000) Proceedings of the 12th international conference on ion implantation technology. IEEE, Alpbach, Austria, p 385
 262 - Chason E, Picraux ST et al (1997) Ion beams in silicon processing and characterization. J Appl Phys 81:6513
 263 - Breese MBH, Jamison DN, King PJC (1996) Materials analysis with nuclear microprobe. Wiley, New York
 264 - Breese MBH, Grime GW, Watt F (1992) The nuclear microprobe. Annu Rev Nucl Part Sci 42:1–38
 265 - Watt F (1997) The nuclear microprobe: a unique instrument. Nucl Instrum Methods Phys Res B 130:1–8

nesanāk pleķains, šo jautājumu apskata ²⁶⁷ un ²⁶⁸ un par mehāniskām parauga grozīšanas sistēmām raksta ²⁶⁹, bet par parauga griešanas tehnoloģijām ²⁷⁰. Dopēto materiālu analīžu tehnikas rokasgrāmata atrodama ²⁷¹.

Par iespējām augsto enerģiju fokusētus kūlus izmantot rakstīšanai, erozij-frezēšanai un tamlīdzīgi apskata avoti ²⁷² un ²⁷³ un ²⁷⁴ un ²⁷⁵ un ²⁷⁶. Vispārīgs pārskats par jonu tehnoloģijām atrodams grāmatā ²⁷⁷.

Implantēšanas doza un dziļums

Implantēšanas tehnoloģijai piemīt izcila īpašība "krāsot" apstrādājamo materiālu ar citām metodēm nerasniedzami mazu dopanta plūsmu. Tā kā dopantam pusvadītāju ierīcē parasti ir jābūt ļoti nedaudz, tad tā ir metodes priekšrocība. Daudzumu regulē pirmkārt masas plūsma jeb citās mērvienībās pārrēķinot, jonu strāva reizināta ar ekspozīcijas laiku. Savukārt iespiešanās dziļumu regulē spriegums jonu paātrinātājā. Lai arī pastāv neslikti atstrādāts matemātiskais aparāts, kā aprēķināt iespiešanās dziļumu, faktiski pēdējais ir aparāta galalietotāja atbildība, kurš ieregulē cik vajag. Ir ticis novērtēts, ka jonu enerģiju intervāls 10 keV līdz 100 keV nosedz visus praktiski iedomājamus gadījumus tādā uz inovācijām balstītā sensoru ražotnē kā BSI, tātad arī citiem mazajiem uzņēmumiem diez vai vajadzīgs plašāks intervāls. Arī no izgatavošanas viedokļa 100 kV ir reālistiska robeža, ko var sasniegt ar 10 kV ieejas spriegumu Kokrofta-Waltona daudzkārstotājā, kā piemēram 35 kV ar viena pusperioda Willarda trīskārstotāju reiz ieguva kineskopa paaudzes krāsainajos TV anodspriegumam. Šī ir samērā labi atstrādāta shemotehnika elektronikā, kur "zemūdens akmeņu" atrašanās ir ne tik varbūtiska.



Aprēķinu iespējas masselekcijai

- 266 - Jamison DN (1997) Recent applications of nuclear microprobes analysis to frontier materials. Nucl Instrum Methods Phys Res B 130:706–716
- 267 - Howard K (1991) Implant uniformity evaluation using a Varian/Extrion scan compensator module on an electrostatic scanning ion implanter. Nucl Instrum Methods Phys Res B 55:202
- 268 - Murata H et al (2006) Uniformity improvement of the Ion implantation system for Low temperature poly-silicon TFTs. J Korean Phys Soc 48:S27
- 269 - Ryding G (1981) Target chambers for ion implantation using mechanical scanning. Nucl Instrum Methods Phys Res 189:239
- 270 - Aspar B, Bruel M, Moriceau H et al (1997) Basic mechanisms involved in the smart-cut (R) process. Microelectron Eng 36:233
- 271 - Wang Y, Nastasi M (eds) (2010) Handbook of modern ion beam materials analysis, vol 2, 2nd edn. Materials Research Society, Warrendale, PA, pp 285–305
- 272 - Watt F, Grime GW (1987) Principles and applications of high energy ion microbeams. Adam Hilger, Bristol
- 273 - Watt F, Breese MBH, Bettiol AA, van Kan JA (2007) Proton beam writing. Mater Today 10:20–29
- 274 - Watt F (1999) Focused high energy proton beam micromachining: a perspective view. Nucl Instrum Methods Phys Res B 158:165–172
- 275 - van Kan JA, Sanchez JL, Xu B et al (1999) Resist materials for proton micromachining. Nucl Instrum Methods Phys Res B 158:179–184
- 276 - Teo EJ, Tavernier EP, Breese MBH et al (2004) Three-dimensional micromachining of silicon using a nuclear microprobe. Nucl Instrum Methods Phys Res B 222(513):517
- 277 - Schmidt B., Wetzig K. (2012) Ion Beam Technology. In: Ion Beams in Materials Processing and Analysis. Springer, Vienna. https://doi.org/10.1007/978-3-211-99356-9_3, print ISBN 978-3-211-99355-2

Tūdaļ aiz kūli fomējošo lēcu sistēmas jāatrodas masas filtram. Vēsturiski iesākumā masas filtrs bija sektora tipa magnēts, kam kūļa daļiņu trajektorijas noliece ir atkarība no molmasas. Pirmo masas spektrogrāfu 1918.g. ieteica Dempsters.

Matemātika šādam masas filtram ir Lorenca spēks, kas ir balansā ar centrīces spēku $q \cdot v \cdot B = m \cdot v^2 / r$, pie kam $0.5mv^2 = qV$, kur V ir spriegums. Algebriski to pārveidojot iegūst jona caurīšanas nosacījumu traktam $m/q = B^2 \cdot r^2 / 2V$, kur m=M (molmasa) un q=e (elektrona lādiņš).

Tagad jau ir zināmas daudzas alternatīvas ģeometrijas, kā šo ierīci realizēt, vismaz pieminot (un ir vērts iepazīties ar to pārskatu ²⁷⁸) **Bainbridge-Jordan** ģeometrija (127.30° elektriskais sektors bez sākotnēja noskējienu iecirkņa, kam seko 60° magnētisks sektors); **Mattauch-Herzog** ģeometrija ar 31.82° elektrisku sektoru un noskrējienu iecirkni, kam seko 90° magnēta sektors ar pretēju izliekumu; **Hinterberger-Konig** ģeometrija ar 42.43° elektrisko sektoru ²⁷⁹, garu vidējā posma noskrējienu posmu un sekojošu 130° magnētisko sektoru ar sakrītošu kurvatūras virzienu; **Takeshita** ģeometrija ar 54.43° elektrisko sektoru un īsu noskrējienu posmu, ar sekojošu otru elektrisko sektoru ar sakrītošu kurvatūru, kam seko noskrējienu posms ar 180° magnētisko sektoru pretējā liekuma virzienā; **Matsuda** ģeometrija ar 85° elektrisko sektoru, a kvadrupola lēcu un 72.5° magnētisko sektoru tai pašā liekuma virzienā; **Nier-Johnson** ģeometrija ar 90° elektrisko sektoru ²⁸⁰, garu stapsavienojuma noskrējienu posmu (drift-tube) un 60° magnētisko sektoru tai pat liekuma vērsumā un citi mazāk populāri ģeometriju veidi.

Novērtējot pārējās zināmās masas separēšanas metodes, **Time-of-Flight** metode nav redzēta implantācijas mašīnās, varbūt tāpēc ka to nāktos izmantot impulsu režīmā. Otrs labs kandidāts ir **Vīna filtrs** (Wien), kas izmanto ortogonāla elektriskā un magnētiskā lauka superpozīciju, un tad tikai joni ar pareizu noskaņoto ātruma attiecību $v = E/B$ spēš šķērsot filtra traktu. Protams, daļiņu ātrums ir atkarīgs no molmasas pirms paātrinātāja, tāpēc šis filtrs ir arī masas filtrs. Tomēr šī filtra atdalīšanas koeficients ir ar kārtu 4 līdz 10, un konstrukcija nemaz nav tik vienkārša, tik vien kā



salīdzinoši neliela divu kulaku lielumā, tāpēc šādu filtru izretis lieto ļoti vienkāršās jonu ierīcēs, piemēram zemas klases hēlija teces meklētājos.

QMS masselektors

Tomēr ir arī kāda ekselenta filtra konstrukcija, kas saucas RF kvadrupola masas filtrs (quadrupole mass selector) jeb QMS. Agrīnajos 1950-os to izgatavoja W.Pauls (tas pats, kurš 1989.g. saņēma Nobeļa Prēmiju fizikā par jonu slazda tehnikas attīstīšanu). QMS sastāv no četriem cilindriskiem metāla stieņiem, kas neparsti precīzi

278 - Burgoyne W.B., Hieftje G.M. (1996). *An introduction to ion optics for the mass spectrograph*. Mass Spectrometry Reviews. 15 (4): 241–259.

279 - Prohaska T., Irrgeher J. Zitek A., Jakubowski N. (2005). *Sector Field Mass Spectrometry for Elemental and Isotopic Analysis*. Royal Society of Chemistry, ISBN 978-1-84973-392-2

280 - Gross M.L., Caprioli R.: *The Encyclopedia of Mass Spectrometry*: 10 Volume Set, ISBN 0080438504, Pergamon Press, 2004

ir gan izmēru ziņā, gan paralēlumā, gan novietojuma ģeometrijas pārējo pielaižu ziņā. Stieņus pa pāriem baro ar DC un RF AC superpozīciju un šis filtrs jonus selektē pēc (m/z) attiecības, kur z ir jona lādiņš. Pa vienu plakni iesvārstās un tāpēc zaudē trajektorijas stabilitāti visi vieglie joni, ietriekdamies stieņos, kamēr pa otru plakni stabilitāti zaudē visi smagie joni un tāpēc aiziet sāniski. Vienīgie, kas saglabā spēju iet pa nedaudz ondulētu taisnvirziena trajektoriju ir tie joni, kam saregulēta caurlaidība. Šo molmasu ieregulē, mainot DC un AC attiecību. Parasti DC spriegumu apzīmē ar U un AC spriegumu ar V . Tad vienādojumu sistēma, kas apraksta filtra cauriešanu, ir sekojošs:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\left(\frac{e}{m}\right) \frac{[U + V \cos(\omega t)]}{r_0^2} x.$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \left(\frac{e}{m}\right) \frac{[U + V \cos(\omega t)]}{r_0^2} y.$$

$$\frac{d^2z}{dt^2} = 0$$

Attēlā: Reliance piedāvātais QMS stieņu komplekts ar stiprinājuma konvertu (attēls no *Reliance*)

Šim vienādojumam līdzīgas matemātiskās sistēmas pirmais 1868.g. iemācījās risināt matemātiķis Mathieu attiecībā par bungu ādas vibrācijām, tāpēc bieži šo vienādojumu sauc par **Mathieu vienādojumu**, lai gan piekasīgi vērtējot, matemātiķim nebija ne jausmas, ka viņa metodi reiz lietos kvadrupolu aprēķinam, tāpēc korektāk būtu izteikties, ka QMS vienādojumu risina ar Mathieu paņēmieni. Vienādojumā $2r(0)$ ir tuvākais iespējamais attālums starp elektrodu iekšas virsmām. Pēc jēgas šie vienādojumi ir Ņūtona kustības vienādojumi, kam spēks ir jona lādiņš reiz E lauka intensitāte. Ar analītisku risinājumu šai v -mu sistēmai ir pavāji, tāpēc parasti to risina skaitliski. Atrisinājuma reālā daļa ir trajektorijas stabilitātes apgabals. Tikai tas apgabals (iekrāsots), kur stabila ir kustība pa abām koordinātēm vienlaicīgi, ir tas apgabals, kur QMS darbība ir jēgpilna. Iesakāms iepazīties ar ekselentu apskatu ²⁸¹. Stingra rekomendācija – nekad un pat īslaicīgi nepieļaut QMS ekspluatāciju pie vakuuma, kas sliktāks par $1E-4$ Torr, taču vēlams ne sliktāku kā $1E-6$ līdz $1E-7$ Torr.

Ja vienādojumu raksta kā otrās pakāpes diferenciālvienādojumu attiecībā pret U un V :

$$\frac{d^2u}{d\xi^2} + (a_u - 2q_u \cos 2\xi)u = 0 \quad a_u = \frac{8eU}{mr_0^2 \Omega^2} \quad q_u = \frac{4eV}{mr_0^2 \Omega^2}$$

Tad tā risinājums ir sinusu un kosinusu garumgara summa (rinda):

$$u(\xi) = \Gamma \sum_{n=-\infty} C_{2n} \exp(2n + \beta)i\xi + \Gamma \sum_{n=-\infty} c_{2n} \exp-(2n + \beta)i\xi$$

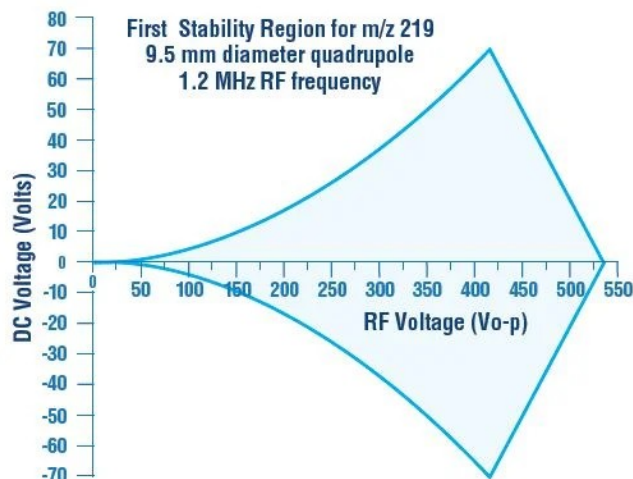
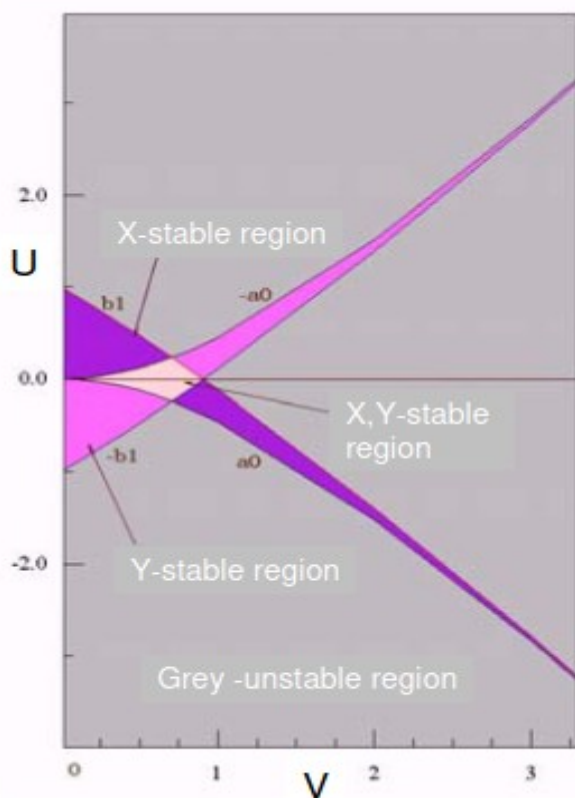
Jāatzīmē, ka gadījumā, kad AC sprieguma sinusoidalitāte ir vāja, vai pat pavisam meandriska, apskata publikācija ²⁸². Secināts, ka labāk lietot iespējami tīri sinusoidālu formu, citādi bojājas selektivitāte.

281 - R.E. March, An Introduction to Quadrupole Ion Trap Mass Spectrometry, Journal of Mass Spectrometry 32, 351-369 (1997)

282 - A.C.C. Voo, R.Ng, J.J. Tunstall, S.Taylor. Transmission through the quadrupole mass spectrometer mass filter: The effect of aperture and harmonics (1997). J.Vac.Sci.Technol. A 15(4), Jul/Aug 1997, pieejams <https://www.liverpool.ac.uk/media/livacuk/massspectrometry/pdfs/Transmission,through,the,quadrupole,mass,spectrometer,mass,filter,the,effect,of,aperture,and,harmonics.pdf>

Pavisam detalizēti QMS teoriju apskata PhD monogrāfija ²⁸³. Izvelkot stabilitātes apgabalu labāk saskatāmos mērogos iegūst sekojošus divus populārus attēlus, skat. zemāk.

Kāpēc nav tradīciju lietot QMS priekš implantēšanas, to var tikai minēt, tomēr izskatās, ka iemesls ir precizitātes jautājums. Ja filtra mehāniskās pielaiides ir ar kārtu 10-50 mikroni, tad joniem uz kuru masu filtrs noskaņots, būtu jāiziet neskartiem 100%, īstenībā cauriet neliela daļa, varbūt vien 2% vai 5%, vai 10%. Protams, joni uz kuriem filtrs



nav noskaņots, visi 100% nespēj cauriet filtra traktu.

Tad var terminoloģijas deficīta apstākļos patapināt terminu no optikas (causpīdīgums) un teikt, ka QMS filtra caurspīdīgums ir, piemēram, 5...10%. Tātad milzīgi zudumi, ātra filtra piesmērēšanās, bieža apkope un visādas citas nepatīkšanas garantētas. Taču mūsdienās ir izgudrotas CNC

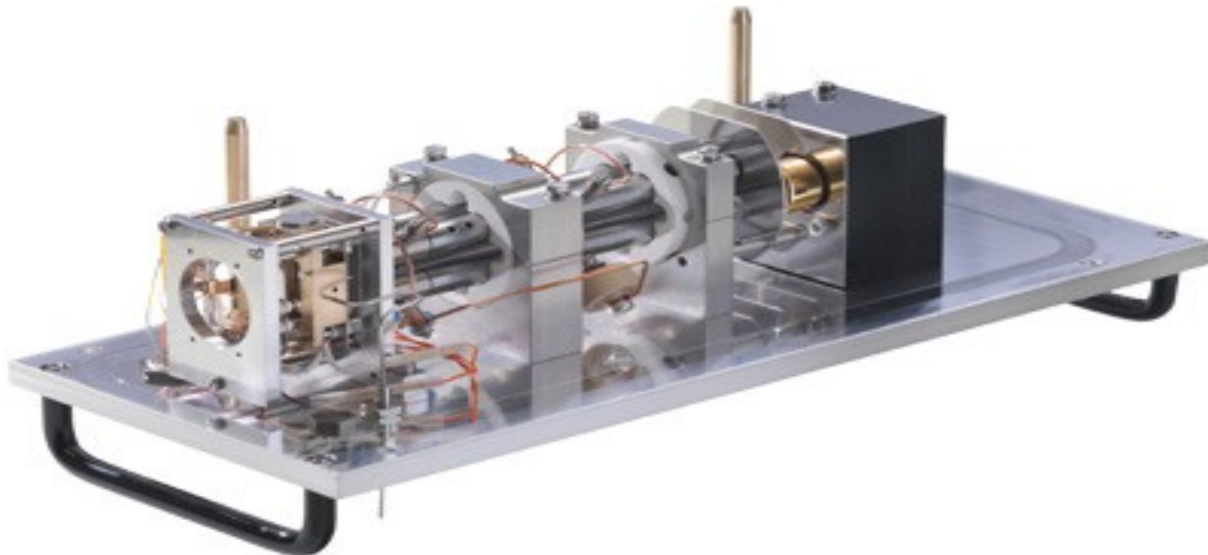
mehāniskās apstrādes sistēmas, tai skaitā 3-D apstrāde iegremdējot zem ūdens vai cita siltumnovadītāja, kurš savukārt tiek lielā tilpumā termostabilizēts. Pat Latvijā šādi spēj iegūt mehāniku ar pielaidi 3 līdz 5 mikroni. Uzņēmumi BSI Rīgā, Līvānos *Lighquide Optics*, un viens uzņēmums Cēsīs. Savukārt Japānā strādā uzņēmums, kas specializējies QMS stieņu izgatavošanā masveidā un nodrošina vismaz 1 mikronu akurātumu, bet Skotijā atrodas uzņēmums, kas tāpat ražo lieltirzā šos elektrodus kopā ar stiprinājumu sistēmu un sludina, ka pielaiide esot 20 ppm jeb 12 mm stieņiem $12 \cdot 20 / 1E6 = 0.24$ mikroni. Saucas *Reliance.co.uk*. Pie šādas akurātības QMS trakta caurspīdīgums caurlaižamajai vielai ir visai tuvs 100% (vai vismaz būtiski labāks par 90%) un necaurlaižamajai vielai tuvs 0%. Ja salīdzina cenu, tad QMS ir apmēram par kārtu lētāka alternatīva kā sektora magnēts, orientējoši 4,5 kEur pērkot mazumā, turklāt cena ir ļoti maz atkarīga no materiāla, molibdēna izpildījums ir tikai par dažiem procentiem dārgāks kā AISI-316. Salīdzinot izmērus, QMS ir tikpat miniatūrs kā Vīna filtrs. Salīdzinot svaru, tā ir konstrukcija stipri zem kilograma nevis kā Vīna filtrs ar 10 kg un vairāk. Pēc filtrācijas koeficienta viss atkarīgs no noskaņojuma, bet filtrācijas faktors ap miljonu nebūt nav robeža, tāpēc pie vēlmes, vismaz principā, iespējams ekspluatēt filtru izotopiski tīra dopanta formēšanai, kas attiecīgiem pusvadītāju tehnoloģijām var šķist ļoti pievilcīgi. Šo filtru precīzas caurspīdīguma vērtības atkarībā no izpildījuma precizitātes sniedz darbs ²⁸⁴. ERAF Projektā esam solījuši izmēģināt taisni šo filtrēšanas

283 - Richards J.E. An Improved Quadrupole Mass Spectrometer. South Wales University, 1972, pieejams <http://unsworks.unsw.edu.au/fapi/datastream/unsworks:57647/SOURCE01?view=true>

284 - Taylor S., Gibson J. (2008). *Prediction of the effects of imperfect construction of a QMS filter*. Journal of mass

paņēmienu. *Attēlā:* QMS stieņu komplekts uzstādītā veidā ar noņemtu vakuumkambara vāku (no *Reliance* mājaslapas).

Tomēr, lai filtrēšanas topiks būtu pabeigts, redzeslauka pilnīgumam būtu vērts nosaukt vēl dažus nepieminētus masselekcijas paņēmienu, ko tomēr implantēšanā nelieto: 3-D ion trap, Linear quadrupole ion trap, Orbitrap analyser, Fourier Transform Ion Cyclotron Resonance analyser.



Par QMS elektronikas apsaisti, kas ir ievērojami sarežģītāka par sektora magnētām vajadzīgo līdzstrāvas stabilizatoru, pēdējos gados parādījusies izcils mazcenas un augstas precizitātes masveida produkts *Direct Digital Synthesis* (DDS) ģenerators. Pat ja tas taisīts ar pašu vienkāršāko risinājumu AD-9850 čipu, izstrādi, kas pārpludinājusi e-bay par sīknaudu, ir labāks kā jebkad var ievajadzēties masselekcijai. Pielietojot Mathieu faktoros $U(DC)=1.2122E-8 \cdot M \cdot r_o^2 \cdot f^2$ un $V(AC) = 7.2226E-8 \cdot M \cdot r_o^2 \cdot f^2$ (kā pamāca ²⁸⁵) abiem spriegumiem bora $M=10$ Da gadījumā iespējamās kombinācijas pie 3 MHz $U=52$ V un $V=309$ V; vai pie 2 MHz ir 23 V un 138 V; vai pie 1.5 MHz ir 13 un 77; vai pie 1 MHz ir 9.8 un 58 V. Jāizvēlas kāda no šīm kombinācijām, un pasvītrotā šķiet tehniski ērtākā. Lauka efektīvo rādiusu aprēķina no stieņa diametra kā $r_o = D_{rod}/2.288 = 5.245$ mm. Te M ir mērķvielas molmasa Daltonos un f ir Hercos.

Problemātiskāk ir ar RF ģenerators jaudas novērtējumu, jo dažādi autori dod formulas, kas dod krasi atšķirīgu novērtējuma prognozi. Viena formulas versija nāk no Pfeiffer mājaslapas rokasgrāmatas, kas dod $N = C/Q \cdot M^2 \cdot f^5 \cdot r_o^4$. Ievietojot atbilstošās vērtības iegūstam Petavatu mēroga skaitli, kas, protams, ir maldinošs. Sarakstoties ar viņu konsultantu, atklājās formulas pirmavots ²⁸⁶, kas to raksta sekojoši $N = 6.5E-4 \cdot (C/Q) \cdot M^2 \cdot f^2 \cdot r_o^4$ (W; pF; MHz; cm) tādējādi dodot prognozi 0.0035 W pat tad, ja svārstību sistēmas rezonanses labuma faktors ir tik mazs kā $Q=1000$ (un tiek apgalvots, ka biežāk tas esot ap miljonu, kaut arī elektronika ausīm šāds skaitlis skan pārsteidzoši liels). Novērtējot jaudu savādāk, var rezonējošo sistēmu iztēloties kā četru paralēlu stieņu veidotu kondensatoru zudīgā LC kontūrā, kam jonu paātrināšanas/palēnināšanas/nolieces radītie zudumi ir vairākas kārtas zem vienkārši rezistīviem zudumiem kontūrā. Ja tādām kontūram tic ieteiktajam $Q=1E6$, kas tiek uzskatīts par tipisku QMS pielietojumiem, tas uztaisa $N_{loss} = V^2/R_{loss}$, kur R ņem no $Q = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot R_{para} \cdot C$ jeb izsakot SI mērvienībās $N_{loss} = V^2/2/\pi \cdot f/$

spectrometry : JMS. 43. 609-16. 10.1002/jms.1356.

285 - Product manual: *chap: 6.3.1 Quadrupole mass filter*. Available at www.pfeiffer-vacuum.com/en/know-how/mass-spectrometers-and-residual-gas-analysis/quadrupole-mass-spectrometers-qms/quadrupole-mass-filter/

286 - Balzers factbericht: *Das Funktionsprinzip des Quadrupol- Massenspektrometers*

Q/C kas rezultējas ar $N=2 W$. Kaut arī ir acīmredzama neapšaubāma nesaiste starp $2 W$ un $0.004 W$, tomēr abas prognozes nozīmē, ka DDS ģenerators spēj pavilkst slodzi bez papildus jaudas pastiprinātāja kaskādes. Un ar to ir gana konstruktora lēmuma pieņemšanai.

Vispārēji apsvērumi QMS konstruēšanai: detalizēti tikusi pētīta²⁸⁷ QMS filtru caurlaidības spēja (optiskā analogijā - ierīces caurspīdīgums uz noskaņoto gaismas viļņa garumu - jeb šeit masas attiecību). Secinājums ir, ka lietojot meandrisku signālu sinusoidāla vietā pazeminās filtra selektivitāte, un caurspīdīgums ir labāks, ja ieejošajiem joniem ir pietiekami liela enerģija. Protams, ar kanāla šķērsriezuma laukuma pieaugumu (apertūru) caurspīdīgums (pārsteidzoši) pasliktinās, jo iespējama plašāka variācija ienākošo jonu kustības leņķim pret asi. Ar kanāla garumu caurspīdīgums pasliktinās. Raksts tomēr neanalizē mehānisko neprecizitāšu lomu. Vērtīga izziņu literatūra ir arī²⁸⁸.

Iespējas vakuumtraktam

Tradicionāli visus mezglus montē **nerūsošā tērauda vakuumtraktā**, ja uz austrumiem no mums ilgus laikus tika lietotas 302 līdz 304 eitektikas (pazīme, magnēts nedaudz pievelk, pa desmitgadēm mazliet rūšē), tad mūsdienās AISI SS-306L ir minimuma prakse, bet pielietojumos, kur parādās vārds "tīrība" lieto arī AISI-316. Toties tur, kur tiek prasīta ultimātīva jonu tīrība, tiek praktizēts visu vakuumtraktu izgatavot no tīra molibdena, ar izrietošām izmaksām. Tomēr šķiet, te ir kāda nu jau labi aizmirsta iespēja ar izcelsmi no pašām pirmajām vakuumsistēmām vēsturē, kad Evangelista Toričelli tās taisīja no stikla un kvarca un tikai Magdeburgas eksperimentos ar zirgu viktajām pussfēām 1657.gadā jau sāka lietot metālu, tāpat arī tādi pētnieki vakuum-lietās kā Guericke, Schott, Huygens, Boyle, Hooke lietoja vieglāk apstrādāmos stiklveida materiālus, pie kam augstvakuumā sūknis tolaik bija ar dzīvsudraba pildījumu. Kaut gan, mūsdienu izpratnē tā vēl nebija gana "īsta" vakuumtehnika, jo laistīšanās ar dzīvsudrabu ļāva iegūt diezgan nožēlojamu vakuumu – tehnoloģiskais sasniegums 1 Torr tika nodemonstrēts tik vēlu kā 1850.gada Lielajā Tehnoloģiju Izstādē. Tomēr 8 gadus vēlāk Geisslers sasniegta 0.1 Torr, 1865.g. Sprengel pietuvojās 1E-2 Torr, mīnus trešo pakāpi sasniegta Edisons 1876.g., bet pietuvojās mīnus piektajai pakāpei Gimininghams 1884.g. Sesto pakāpi pievārēja Kahlbaums 1894. Tā ka mūsdienu pašsaprotamais "must-to-be" mīnus 6 līdz mīnus 10 apgabals ir tiem laikiem neiedomājama greznība²⁸⁹.

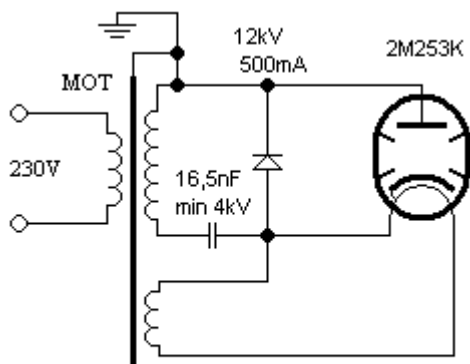
Kvarcs ir ne tikai viegli sametināms ar platliesmas autogena degli (pēc tam tomēr prasot termisku atlaidināšanu krāsni), bet arī ir materiāls, kam termiskā izplešanās ir par kārtu mazāka kā metāliem, to caur molibdēnstikla pareju var sametināt ar molibdena stieplu vakuumizvadu izgatavošanai strāvas pievadiem, un ātrizjaucamos savienojumos var organizēt gan ar KF tipa (ISO-K vai ISO-F) vakuumsavienojumu palīdzību (ar Vittona vai vēl labākas gumijas gredzentiņu) gan ar ķīmijas kolbām tradicionālā konusa palīdzību. Tā kā vakuumsmēres esamība konusam ir svarīga, tad eksistē augstvakuumā modelis, kas lieto Apiezonu vai labāku vakuumsmēri konusa ārējā daļā, tad seko konusa spraugas radiāls kanālītis, lai smēre nevarētu pāriet uz nākošo sekciju, un tad pagara sausā sekcija, kas ir aerodinamisks šķērslis augstam vakuumam.

287 - www.liverpool.ac.uk/media/livacuk/massspectrometry/pdfs/Transmission,through,the,quadrupole,mass,spectrometer,mass,filter,the,effect,of,aperture,and,harmonics.pdf

288 - Peter H. Dawson. Quadrupole Mass Spectrometry and Its Applications. Pieejama https://books.google.lv/books?hl=lv&lr=&id=A6o3BQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&ots=MkmrBEn3N5&sig=AHP-6inLcpuTiX5qAdeiyPsRvHo&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

289 - Jousten, K. (2016). The History of Vacuum Science and Vacuum Technology. Handbook of Vacuum Technology, 1–18. doi:10.1002/9783527688265.ch1

Kvarcam virsmas gāzēšanās ir aptuveni vienāda ar nerūsošo tēraudu, un virsmas sorbēto gāzu lēna atbrīvošanās ir lielākais vakuuma piesārņojuma avots parastās metāla vakuumsistēmās ²⁹⁰. Tomēr metāla sistēmā nav daudz paņēmieni kā virsmas gāzēšanos ietekmēt, viens paņēmieni ir dienām vai nedēļām ilgi gaidīt ar ieslēgtu sūkni, otra metode ir kambari pasildīt un tad atdzēsēt. No praktiskiem apsvērumiem, silda ar karstu ūdeni, piemēram, 90C un dzesē ar aukstu ūdeni, piemēram 10C, tāpēc efekts nav gigantisks. Otrs paņēmieni ir izmantot sildīšanas kabelus, tie no grīdā lejamajiem DEVI© atšķiras ar to, ka ir daudz platāki un mīkstāki, bet daudz vairāk par 100C tik un tā nedod. Savukārt kvarca cauruli var un drīkst karsēt ar visām pieejamām metodēm cik tik tūk, un tāpēc sorbētās gāzes dabūt nost ir daudz vienkāršāk, it īpaši ar tādām elegantām metodēm, kā plazmas ečingu vai ICP. Ečingu taisa spica stieplīte vakuumā, ko baro MOT transformators ar oriģinālo



Zdroj 12W pro magnetron

danyk.cz Paša materiāla tvaiku parciāls spiediens pie normālas temperatūras kvarcam ir mazāks kā nerūsošajam tēraudam,

tomēr stāv rakstīts, ka paša materiāla tvaikošana ir minoritātes piesmērējums vakuumsistēmās. Nedaudz trūkums ir palielināta ūdeņraža permeācija, taču tā piemīt arī metāliem, tomēr, ja lietošanā paredzams turbomolekulārais sūknis, kas ir daudz labāka alternatīva kā eļļas difūzijas sūknis, tomēr tā vienīgais trūkums ir samazināta spēja tikt galā ar ūdeņraža plūsmām, ar kurām sūktspēja samazinās vairākas reizes. Vispār permeācija gan molibdēnam, gan nerūsošajam tēraudam ir minimāla. Piemēram, no manas karjeras jaunībā, reiz nācās taisīt ūdeņraža līniju no gāzu skapja pagalmā uz hromatogrāfijām augšstāvā, un cits materiāls kā misiņš nebija pieejams. Izrādījās, ka līdz augšai neaiziet nekas. Pārbaudīju, vai līnija nav aizdambējusies, vai nav caura, testēju ar saspīestu gaisu, tai skaitā kontūru iemērcot Daugavā, bet kad izlēmu to testēt piepūstu ar ūdeņradi, tad varēju tikai nožēlot, ka tolaik vēl nebija izgudrota videofilmēšana ar telefonu. Kontūrs Daugavas ūdenī izskatījās kā ar gaisu piepūsta sieviešu zeķe – visa virsma noklāta ar sulojošiem mikroburbuliņiem. Tik stipri kvarcs gan nepermeē, bet parādības iedaba ir viena un tā pati. Tomēr vispār sūknis spēj nedaudz sūknēt arī ūdeņradi, tā ka šis punkts nav ļoti traucējošs, turklāt germānijam ūdeņradis nemaz nav ļoti kaitīgs.

Jāatceras, ka lietojot turbosūkni ir ļoti kļūdaini pirms tā likt parastu eļļas tipa forvakuumsūkni, ko mazliet banalizējot skaidro populārais arguments ²⁹² un ²⁹³, ka lāpstiņas perimetrālais ātrums ir tik augsts, ka pārsniedz ūdeņraža termiskās kustības ātrumu, tāpēc lāpstiņai uzsitot pa ogleņūdeņražu

290 - Chiggiato P.: *Materials and Properties IV, Outgassing*. CERN Accelerator School on Vacuum for Particle Accelerators, June 18, 2017. Available at <https://indico.cern.ch/event/565314/contributions/2285743/attachments/1466415/2277367/Outgassing-CAS-Lund-final.pdf>. Accessed at 13.08.2020

291 - radioamatiera privāts vebsaīts www.danyk.cz/mot_r.html

292 - Chew A.D., Cameron A., Goodwin D., Hamilton J., Hawley-Jones T., Meares P., Pumfrey J., Ramsden J., Steele D. *Considerations for Primary Vacuum Pumping in Mass Spectrometry Systems*. Spectroscopy 20(1) January 2005, available at https://alfresco-static-files.s3.amazonaws.com/alfresco_images/pharma/2014/08/22/d73b2b66-fd29-4d05-82cc-07d2b4796b34/article-142099.pdf

293 - Umrath W. (1998) *Fundamentals of Vacuum Technology* (book, 200.pp). ASIN : B007OG6KV6

molekulu (piemēram, eļļas), molekula spēj izjukt pa ūdeņraža un citu atlikumu molekulām. Pareizi ir lietot bezēļļas forvakuumsūkni, piemēram, diafragmas. Otra alternatīva ir lietot veco labo eļļas difūzijas sūkni ar parastu lētu forvakuumsūkni, bet starp sistēmu un sūkņiem lietot kriogēnu ceolīta vai silikagela filtru. Saprotams, tad filtrs ik pa dienai būs jāatkausē desorbēšanas nolūkos.

Attēlā: stiklapūtēja darbavietas tipveida aprīkojums. Redzams deglis stiklam un deglis kvarcam. Attēls ilustrē to, ka kvarca metināšanas tehnoloģija nebūt nav tik sarežģīta kā kosmosa kuģa izgatavošana.



No plazmas **kambara** (Latviski gan ierastāk skan rusifisms plazmas **kamera**, taču šāds termins

sabojā spēju terminu raiti notulkot angļiski, un šāds trūkums nepiemīt senlatviskam germānismam kambaris - "vacuum chamber"), kam galā ievietota apertūra (caurums, dīze), ir jāpanāk **diferenciālā vakuuma režīms** starp 1 Torr zonu un $1E-5$ bet vēlams vismaz $1E-6$ vai labāka vakuuma zonu pie staru veidojošās optikas. Ja argona vietā būtu gaiss, tad orifices vakuumaerodinamiskā vadītspēja būtu $C=11.6 \cdot A$ (l/s; cm²). Tā kā gaisa molmasa ir

$M=0.79 \cdot 28 + 0.21 \cdot 32 = 28.84$ Da bet argonam $M=36$ Da tātad nesējgāzei konduktance būs $\sqrt{36/28.84} = 1.1173$ -reizes lēnāka plūsma kā gaisam jeb $C=12.96 \cdot A$ (cm²). Ņemot 1 mm diametra caurumu $Q=CdP$ (l/s, hPa), kur $C=0.00785$ cm² $\cdot 12.96 = 0.102$ dodot $Q=0.102 \cdot (1E-2$ hPa - $1E-7$ hPa) $=0.1E-2$ l/s STP (jēdziens STP zināms no vidusskolas kursa – standarta spiediens un temperatūra).

Konvertējot šo plūsmu uz vakuumsūkņa ieeju (jo pumpjus marķē pēc ieejas nevis izejas), nepieciešamais turbosūkņa ražīgums $S=0.1E-2 \cdot (1E3$ Torr/ $1E-6$ Torr) $=1E6$ l/s=1000 m³/s. Respektīvi, sapņus par 2 mm vai 3 mm resnu jonu ekstrahēšanas dīzi ir jāatmet uzreiz kā pilnīgi nereālistiskus.



Visa aparāta datorvadības sistēma

Tā kā par sistēmas vadības neesamību industrija būtu nepatīkami šokēta, visu barošanas bloku spriegumiem, strāvām, un dažos gadījumos arī frekvencei jātiek vadītai (un atainotai) centrālā datorā. Piemēram, caur **LabView Runtime** (bet var jebkādu citu iespēju, ja tā ir labāka), tātad rodas jautājums, kas regulēs PWM, dators vai lokālais automāts. Tīri ātrdarbības apsvērumu dēļ noteikti ACPL790 ir lēmuma pieņēmējs, kas priekš TL594 pasaka samazināt, palielināt vai nemainīt PWM, bet dators tikai padod mērķlielumu caur savu PWM I/O outputu uz lokālo ARM un caur savu ADC I/O inputu saņem precizēto vērtību, cik tieši spriegums ir saregulējies.

Par interfeisiem

Vispār protams ir iespējams tāds iekārtas dizainiskais noformējums, kādu rāda šausmu filmās par kodolreaktoru vai citām tehnogēnajām avārijām – tūkstošiem grozāmu rokturu un mērskalu, un kupls personāls, kas izveicīgi tos visus groza pēc sev vien zināmiem kritērijiem, līdz iesākas sižetā iecerētā bēda un aiziet spraigi saplānotā trillera daļa. Tomēr mūsdienās šādas sistēmas pieņemts datorizēt, un visu kloķu grozīšana noris digitālā vidē ar saprātīgiem ierobežojumiem un aizsardzībām pieejamajām kombinācijām, un tāpat arī parametru vērtības nolasa digitāli. Noteikti grafisko saskarni var taisīt ļoti dažādās sistēmās, tik daudzās, ka tās nosaukt nav jēgas. Tomēr nevar neatzīmēt, ka mazāk datoristikā avancētam datorlietotājam ir pieejama ekselenta noformējuma vide, kas saucas **LabView**. Tā gan nav gluži bezmaksas, toties nākamās iekārtas galalietotāja lietošanai tā ir bezmaksas, jo par maksu ir tikai noformējuma taisīšanas softs, kamēr softa izpildes pagarinājums noris bezmaksas **LabView RunTime** vidē. Respektīvi, tur, kur svarīgāka ir iekārtas fizikas izpratne labākā iespējamā noformējuma taisīšanai, ir derīgs fiziķa - konstruktora darbaspēks, un datorprogrammētājs jāaicina tikai salāgot dažādus digitālos standartus saskarnes DIO (data input/ data output) jomā. Šim darbam svarīgāks ir cilvēks, kas saprot iekārtu, nevis, kas labi saprot programmēšanu, un tā ir LabView lielā priekšrocība.

Mazliet atruna, kāpēc tālākā lapaspusē izmantojam visu laiku lielākās enciklopēdijas pasaulē references, kas zinātniskās aprindās tiek nosmādētas kā nepietiekami zinātniskas, kaut arī miljonalgvains peer-review process tur nostādīts pat mazliet pārāk strikti. Vienkārši te mēs nerunāsim ne par pētījumiem, ne par zinātni attiecībā uz sekojošiem standartiem, no kuriem jāizvēlas viens ar ko tālāk strādāt, taču pieminot tos galīgi bez atsaucēm, lasītājs zaudētu iespējas ātri atrast un izlasīt vienkāršā valodā, kas tas ir un kāpēc tālāk mēs ar attiecīgo paņēmieni nenodarbosimies, vai otrādi, taisni darbosimies.

Starp ļoti daudzajiem barošanas blociņiem, kam jāspēj uzdot vēlamā sprieguma (vai/un strāvas) vērtība, kā arī jākontrolē sistēmā patiešām attīstījusies strāva un spriegums, dažos gadījumos arī frekvence, ir nepieciešama labākais pieejamais **datu interfeisa standarts** (ietverot arī štekera veidu). Nemaz neielaižoties diskusijā, ka šādam mērķim daudz kur izmanto tādus dārgus standartus kā Hewlett-Packard²⁹⁴, vai kodolfizikas eksperimentos iecienīto CAMAC²⁹⁵, te tomēr, pirmkārt, vajag **lētu un vienkāršu standartu, ar iespējami mazu vadu skaitu**, ar pieļaujamo apraides attālumu līdz 2 vai 3 metriem, bez lielām prasībām uz izpildes ātrumu, ar pieļaujamo tīkla platumu (aparātu skaitu) desmitos. No šādiem standartiem, atmetot paralēlos interfeisus kabeļa dzīslu skaita dēļ, populārākie no **virtnes datu pārneses interfeisiem** (paralēlos interfeisus atmetam kabeļa dzīslu skaita dēļ) ir:

ARINC 818 Avionics Digital Video Bus lidmašīnām²⁹⁶; Atari SIO (štekēris kā USB)²⁹⁷; BSC (Binary Synchronous Communications)²⁹⁸; CAN (Control Area Network Vehicle Bus)²⁹⁹, kas iemontēts sākot ar 1990.g. vairumā automašīnu; ccTalk ko lieto bankomātu sistēmas un automatizētie tidzniecības punkti³⁰⁰; CoaXPress industriālo kameru standarts³⁰¹, DMX512 teātra

294 - <https://en.wikipedia.org/wiki/HP-IL>

295 - https://en.wikipedia.org/wiki/Computer_Automated_Measurement_and_Control

296 - https://en.wikipedia.org/wiki/ARINC_818

297 - https://en.wikipedia.org/wiki/Atari_SIO

298 - https://en.wikipedia.org/wiki/Binary_Synchronous_Communications

299 - https://en.wikipedia.org/wiki/CAN_bus

300 - <https://en.wikipedia.org/wiki/CcTalk>

301 - <https://en.wikipedia.org/wiki/CoaXPress>

gaismotāju vadības standarts ³⁰²; Ethernet ³⁰³, ko lieto visos datoros inerneta pieslēgumiem ar štekeri RS-45 (un tas ir visai interesants variants mūsu vajadzībām); Fibre Channel (ātrgaitas līnija datoru saslēgšanai ar liela izmēra HDD) ³⁰⁴; FireWire ³⁰⁵ (kas arī labi zināms datoraprīkojumam, sākotnēji videokamerām, taču salīdzinot ar USB-3 jau ātrdarbībā atpaliek); HyperTransport ³⁰⁶; InfiniBand (ulta-augsts ātrums salīdzināms ar PCI) ³⁰⁷; I²C multidrop serial bus ³⁰⁸ (parasts lietošanā Arduino, Raspberry un līdzīgās ARM sistēmās, un ir ļoti piemērots kandidāts mūsu mērķiem); MIDI (elektronisko mūzikas instrumentu kontroles standarts) ³⁰⁹; Excalibur MIL-STD-1553A/B ³¹⁰ (kura stabilitāte un uzticamība caurredzama nosaukumā); Morzes koda telegrāfija, kas pārāk smaržo pēc antīka ³¹¹; PCI Express ³¹²; Profibus ³¹³; RS-232 (maza ātruma seriālo portu sistēma, kuru lietošanai mums var apspriest) ³¹⁴; RS-422 (uzlabota 232 versija) multidrop serial bus ³¹⁵; RS-423 ³¹⁶; RS-485 (vēl vairāk uzlabota versija) multidrop multimaster serial bus ³¹⁷; SDI-12 industriālo sensoru protokols ³¹⁸; Serial ATA ³¹⁹ datoru HDD pieslēgšanas (jaunākais) standarts; Serial Attached SCSI ³²⁰; SONET un SDH (ātrgaitas telekomunikācija pa optošķiedru līnijām) ³²¹; SpaceWire (kosmosa kuģu komunikāciju standarts) ³²²; SPI (Serial Peripheral Interface), kas arī ir nopietns kandidāts mūsu mērķim ³²³; augsta ātruma telekomunikāciju līnijas T-1 ³²⁴ un E-1 ³²⁵ ar apakšvariantiem; USB jeb Universal Serial Bus (ko nevar neatpazīt datoru sīkās perifērijas pieslēgumu jomā) ³²⁶, un ko vismaz ir jēga apdomāt; UNI/O multidrop serial bus ³²⁷; 1-Wire multidrop serial bus ³²⁸ un NMEA, kas ir ģenuīns kuģu saskarnes standarts ³²⁹. Teorētiski varētu aplūkot arī iespēju datus nogādāt caur kādu no radiolinku protokoliem, no kuriem LoRa ir izcili uzticams, bet Nordic NRF-24 ir izcili lēts (zem 1 USD) un abi uzticami pateicoties FSK modulācijai un paritātes kontrolei ar iespēju telegrammu atkārtot tik ilgi, kamēr paritāte apstiprina saņemšanu bez kļūdām. Tomēr šo iekārtu ievērojams daudzums vietā, kur pilns ar augstsprieguma laukiem un jaudīgiem radiofrekvencu avotiem noteikti nav laba ideja, temporālas atteices un krustisko reakciju riski ir gana varbūtīgi, un lietojot vairāk par duci ierīču vienviet rada problēmas, bet tādu gadījumā garantēti izslēgt impolantācijas iekārtas bojājumus nevar. Par LORA savietojamību man ir bijusi pieredze uzstādot telemetrijas sistēmu Jūras Glābšanas Stacijai pierīgā, kam uz jumta atradās GSM telefona antenu

-
- 302 - <https://en.wikipedia.org/wiki/DMX512>
 - 303 - <https://en.wikipedia.org/wiki/Ethernet>
 - 304 - https://en.wikipedia.org/wiki/Fibre_Channel
 - 305 - https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_1394
 - 306 - <https://en.wikipedia.org/wiki/HyperTransport>
 - 307 - <https://en.wikipedia.org/wiki/InfiniBand>
 - 308 - <https://en.wikipedia.org/wiki/I%C2%B2C>
 - 309 - <https://en.wikipedia.org/wiki/MIDI>
 - 310 - <https://en.wikipedia.org/wiki/MIL-STD-1553>
 - 311 - <https://en.wikipedia.org/wiki/Telegraphy>
 - 312 - https://en.wikipedia.org/wiki/PCI_Express
 - 313 - <https://en.wikipedia.org/wiki/Profibus>
 - 314 - <https://en.wikipedia.org/wiki/RS-232>
 - 315 - <https://en.wikipedia.org/wiki/RS-422>
 - 316 - <https://en.wikipedia.org/wiki/RS-423>
 - 317 - <https://en.wikipedia.org/wiki/RS-485>
 - 318 - <https://en.wikipedia.org/wiki/SDI-12>
 - 319 - https://en.wikipedia.org/wiki/Serial_ATA
 - 320 - https://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Attached_SCSI
 - 321 - https://en.wikipedia.org/wiki/Synchronous_optical_networking
 - 322 - <https://en.wikipedia.org/wiki/SpaceWire>
 - 323 - https://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface
 - 324 - <https://en.wikipedia.org/wiki/T-carrier>
 - 325 - <https://en.wikipedia.org/wiki/E-carrier>
 - 326 - <https://en.wikipedia.org/wiki/USB>
 - 327 - <https://en.wikipedia.org/wiki/UNI/O>
 - 328 - <https://en.wikipedia.org/wiki/1-Wire>
 - 329 - https://en.wikipedia.org/wiki/NMEA_0183

sistēma. Ja normāli LORA velk uz 3 un pat 5 km distanci, tad šajā gadījumā tā nespēja radīt stabilu datu nogādāšanu nieka 200 metru attālumā. Samērot 868 MHz frekvencē LORA radīto EM lauku un sakaru torņa radīto lauku, izrādījās, ka atšķirība ir par 3 līdz 4 kārtām, telefons “aizcirta ciet” Lora uztvērēja ieejas kaskādi. Nācās ietaisīt šauras virziendarbības Yagi antenu un ekranējošu plātņi, un tikai tad sakari “aizgāja”.

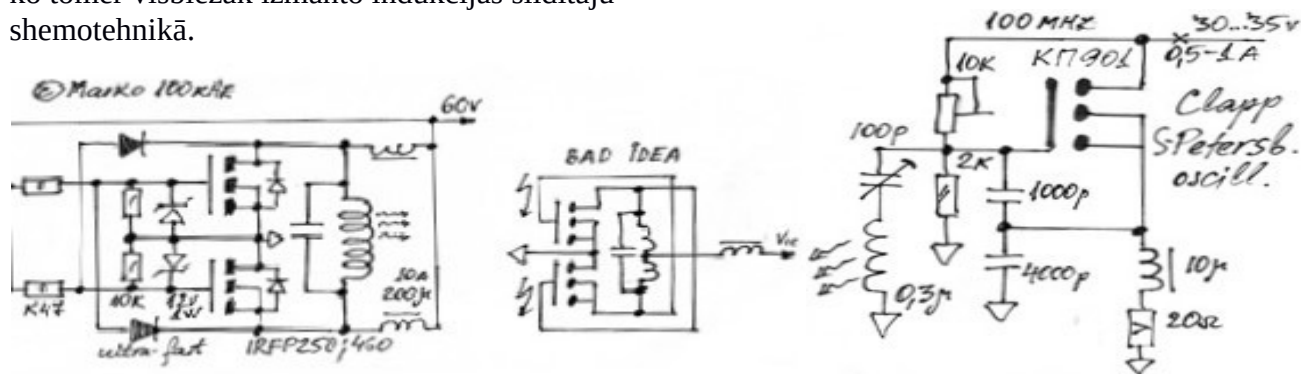
No šī saraksta, kas, iespējams, ir tuvu pilnīgam eksistējošo standartu uzskaitījumam, atmetot izteikti nepiemērotos vai arī eksotiskos, un tāpat pārmērīgi labos bet neparastos, vai aparatūriski sarežģītos, paliek sekojoši plašpazīstami kandidāti – Ethernet, USB, RS232, UART, SPI, i2C.

- Ethernet ir lielisks standarts ar to, ka nav ierobežots pieslēdzamo aparātu skaits, ir lēts specializētā 8-dzīslu vītā pāra kabeļu resurss, labi zināmi un puslīdz stabili un dabūnami štekeri, tomēr ir diezgan nepatīkama datu kodēšanas/atkodēšanas sistēma (čips SMSC 91x), no ka gribētos izvairīties, kā arī nāktos lietot habus, jo vienu līniju splitot tehniski iespējams tikai uz pusēm, zaudējot ātrumu. Piemēram, manās mājās interneta provaideris visus lietotājus splito pa divi, no katra vītā pāra krāsas vadiņiem viens man, otrs kaimiņam, līdz ar to štekerī ir nevis 8, bet tikai 4 vadiņi, bet viss strādā.
- USB ir vienkārši izcils standarts datora galā, un tāpat eksistē ap 1 USD maksājoshi gatavi transkoderi uz ARM saprotamiem standartiem, taču te nelaieme slēpjas aparātu skaitā. Ja 2-4, un par 8 gab vēl ir iespējams sapārot, tad vēl lielākam skaitam nākas iepirkt vai nu (pasīvus) USB Splitter, bet tik lielam skaitam tie ir retums, ir lēni, un nemaz nav lēti. Vai arī (aktīvus) USB Hub, kas atkal nozīmē papildus izdevumus un sistēmas izskatu, kas nepatīkami atgādina elektrības pagarinātājus, kas iesprausti viens otrā. No šādām sistēmām gribētos izvairīties.
- RS232 (vecais datoru peles štekerā standarts), un bieži to lieto arī Arduino, ir labs ar to, ka ir vienkārša un lēta mikroshēma (Max232), kas organizē šo UART apakšpaveida interfeisu 10 metru attālumam (ar iespēju pagarināt ar papildus mikroshēmu līdz 1 km), taču 19 kBps ātrums ir nožēlojams, un 32 ierīces tīklā ir maksimums. Pat ja varbūt ar to pietiktu, šis skaitlis liek nervozēt, kas būs, ja pāris ierīces gadīsies vairāk.
- UART, kas izcils ar tikai divu datu vadu (Tx un Rx) nepieciešamību (trešais ir GND) nodrošina stabili 15 m attālumu, ļoti vienkāršs protokols, taču apkalpojamo ierīču skaits ir viena vienīga, respektīvi, katra ierīce prasa divus “privatizētus” kontroliera i/o vadus, kas ir summāri milzīgs skaitlis pat priekš tāda ARM kā Arduino Mega, standarta ātrums ir 5 Mbps, kas ir līdzīgs kā i2C.
- Savukārt SPI ir izcils ar to, ka protokolu, tāpat kā UART, elementāri realizē pats ARM procesors softvēriski, standarta bibliotēkas ir bez maksas pieejamas visādās modifikācijās, taču datu pārraide noris pa divvadu pāri MOSI/MISO un atlikušie divi vadi SCK un SS ir lietojami tīklošanas mērķim. Tomēr, ja ierīču skaits ir vairāk kā 2 līdz 4 un vēl lielāks, tad tīkls paliek nepatīkams, it īpaši gadījumam, kad perifērā ierīce ir ne tikai Slave, bet pa brīžam vēlas būt arī Master, kā tas ir derīgi mūsu gadījumam. Standarts neatbalsta Hot Swapping (iebāz, un uzreiz sāk strādāt), nav kontroles gadījumā, ja Slave ir pazudis no tīkla, maksimālais attālums ir ap 10 metriem, bet ieteicams zem metra, ātrums ir atzīstams – 10 līdz 20 Mbps. Kad būtiska ir traucējumnoturība un tīkla distance, eksistē tīkla paplašinātājs čips LTC6820 (padārgs, 3-4 USD/gab).
- Toties i2C ir ļoti kārdinošs standarts ar to, ka lietojot divus signālvadus (dati pa SDA un

tāpēc to šeit lietot nevar. Varētu uz aizvāriem lietot sprieguma dalītāju, taču tas sāk pietrūkt tranzistora stāvība, turklāt Roijera shēma nozīmē paralēlu rezonansi.

Zīmējumā – lampu ierīču shemotehnika, kas adaptēta izpētīt (atsprākleniskā inženierija) saglabātās vēsturiskās ierīces kā arī no publikācijām ³³², ³³³ un ³³⁴.

Zīmējumā, bezperspektīvs priekš ICP pielietojuma Roijera shēmas variants ar pusvadītāju ierīcēm, ko tomēr visbiežāk izmanto indukcijas sildītāju shemotehnikā.



Arī tranzistori – bjt (t.i. bipolārie tranzistori) kā ierīce - ja augstfrekvences, tad barošanas spriegums ir 28 V, kas ir stipri par maz, IGBT ir par lēnu, bet no MOSFET sērijām der tikai vertikālā kanāla ierīces, kam ir gana maza aizvara uzlādes kapacitāte. Viens labs kandidāts ir KII-901, taču šī ierīce ir mazjauģīga, ap Vatu vai nedaudz virs, nedaudz arhaiska, un ģeneratorā tā strādā savos galēji pieļaujamajos režīmos, respektīvi, bieži iziet no ierindas. Shemotehnikas piemērs ar šo ierīci ir apskatāms sekojošā ilustrācijā (Ļeņingradas 90-to gadu sākuma izstrādne).

Tāpēc attīstot ģeneratoru shemotehniku man loģisks solis bija pāriet uz pamatīgākām ierīcēm kā piemēram IXFH42N60, shēmā ieviešot nelielas korekcijas. Pirmkārt, kad strāva oscilācijām ir ar kārtu 5 līdz 10 A, tad aizvara priekšsprieguma veidojošais maiņrezistors nespēj tikt galā ar skinefektu, tāpēc “bez iemesla” nodeg dažu sekunžu laikā. Tāpēc priekšspriegumu no rezistīvā dalītāja padod caur mazu augstfrekvences droseļīti. Tas ir pietiekams drošības pasākums.

Otrkārt, jaudīgajam tranzistoram iekšējās parazitiskās kapacitātes ir gana lielas, lai paralēlotu abus atgriezeniskās saitei organizējošos kondensatorus (shēmā 1000p un 4000p), tāpēc tie vienkārši vispār nav vajadzīgi, pat ir kaitīgi. Palaižot šādu ģeneratoru, sākas zemas frekvences oscilācijas, kas modulē RF oscilācijas, respektīvi, notiek ģenerācijas cikliska notrūkšana ar kārtu 10 Hz. Noskaidrojot, ka šīs parādības iemesls ir barošanas avota pārslodze ar RF komponenti, risinājums ir paralēli barošanas filtra elektrolītiem (un protams, atsaistošajai droselei) uzstādīt “ķekaru” ar keramiskajiem atsaistīšanas kondensatoriem. Tomēr rezultāts bija neiepriecinošs. Pētīt neveiksmes iemeslus, pārdošanā parādījās mazcenas tīkla vektoru analīzē “nano-VNA”, kas spēj strādāt atkarībā no modifikācijas 50 kHz līdz 1.7 GHz vai no 50 kHz līdz 3.5 GHz rajonā, un ar šo unikālo rīku izdevās konstatēt, ka orientējoši 99% no visiem nopērkamiem kondensatoriem pie attiecīgās frekvences, savu parazitisko parametru dēļ, ir vairāk spolītes nekā kondensatori(!). Daudz labāks ir stāvoklis ar SMD keramiskajiem bloķēšanas kondensatoriem, taču tik un tā, apmēram ¾ visu alternatīvu bija jāizbrāķē kā nederīgas, bet tie, kas strādā, ir nešpetni dārgi, stipri virs 1 Eur/gab (pat

332 - Smalins E., Gross U., Jansons J., Ubelis A. Atomic Spectra from RF Electrodeless Discharge Sources for UV and VUV Spectrometry and Analytical Measurements. Measurement 5(3):94-97 · January 2005

333 - Ubelis A., Silinsh Yu., Berzinsh U., Racko Z. Vacuum ultraviolet spectra of electrodeless high-frequency lamps. Journal of Applied Spectroscopy 35(2):838-841 · August 1981, DOI: 10.1007/BF00605324

334 - Silins J. Generators for feeding the high frequency electrodeless discharge lamps (at Russian), Acta Universitatis Latviensis Nr.573, anno 1992.

līdz 3 un 4 Eur), kur prasība pēc skaita ir daudzos desmitos. Šobrīd iespēju salāgošana ar vēlmēm te nav ideāli atrisināta, tomēr nelieli iekrājumi un pieredze ir savākti, tāpēc ģeneratori strādā kā nākas, un bez raustīšanās.

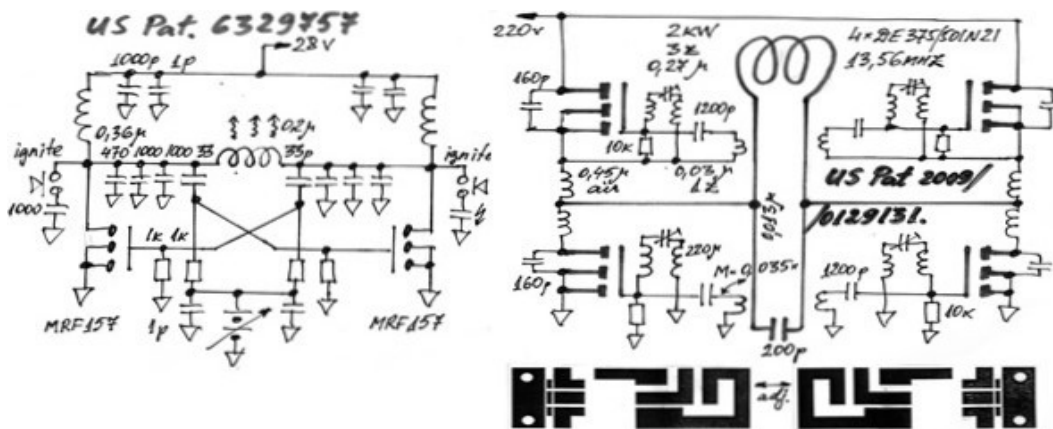
Kad šī iestrāde bija apgūta, izrādījās, ka kontūra virknē rezonējošais kondensators nespēj panest reaktīvās strāvas komponenti. Piemēram, ja kontūrā ir 2 kV un 5 A, bet kondensatora tangenss no delta ir vidusmēra keramiskajiem kondensatoriem raksturīgais 0.01, tad reaktīvā jaudas daļa, kas izdalās siltumā ir $0.01 \cdot 5 \cdot 2000 = 100$ W un, protams, kondensators uzsprāgst. Pirmais risinājums, ko mēģināju, bija sadalīt kondensatorus mazas kapacitātes bet liela sprieguma COG klases SMD, ko montē paralēli. Izmantoju 10 pF 2 kV kubiciņus, ko slēdzu pa 2 gab virknē un šādus zarus paralēli līdz 80 pF sasniegšanai. Ģenerācija bija iespējama, taču pēc dažām sekundēm tie saspāra. Izmantojot termogrāfisku attēlu iespējas ar FLIR infrasarkanu kameru, izrādījās, ka saspārgšanas iemesls nav termisks, šoreiz, bet gan ievērojami palielinājies kontūra Q-faktors un pieaudzis spriegums. Izmēģinātas tika arī 3 kondensatoru virknes, 4-gab virknes, taču problēma radās lokāli, vienā vietā atkal un atkal sprāgstot ar izvirduma caurumu (izdegumu). Izdevās atklāt, ka iemesls ir montāžas stingums, tur, kur montāža ir spējīga staigāt, tur viss kārtībā, bet vidū, kur montāža ir stingra, tur pjezostrikcijas dēļ kondensators pats sevi saspridzina stāpoties. Citādi sakot, jo dziļāk mežā, jo vairāk malkas.

Tajā situācijā atteicos no SMD bloka idejas kā tādas, un sāku attīstīt mikroviļņiem specializētas pcb ideju. Proti, ir firma Rogers, kas pirmā pasaulē apguva iespiedplašu izgatavošanu uz kompozītas teflona plāksnes. Pateicoties tam, zudumu tangenss ir neparasti mazs, ar kārtu 0.0003. Ja 1 cm² dod kapacitāti 1.8 līdz 2.2 pF atkarībā no izstrādājuma modeļa un biezuma, tad 80 pF sasniegšanai ir pietiekami ar pastmarkas izmēra plakanu gabalu, un šī svārstību kontūra realizācija pārspēja vispārdošākās gaidas. Par to tiku sarakstījis publikāciju, diemžēl pirmie seši žurnāli, kam to piedāvāju, atbildēja vai nu nejēdzības (“tā kā visiem zināms, ka kondensatori un rezistori nav elektronikas komponentes, tad... publikācija atteikta”), vai aizrādīja, ka atbilstošas klases kondensatorus tomēr ir iespējams iegādāties par nieka 6 tūkst Eur vai nedaudz vairāk (kas nav nepatīkama, bet nav arī risinājums problēmai). Tāpēc šo nenopublicēto publikāciju iekļāvu te pievienoto pielikumu skaitā. Vēlāk ražošanā parādījās interesants jauns MOSFET ar nosaukumu APT6038, kas labāk uzvedas frekvencēs ap un virs 100 MHz, tomēr ir mazāk jaudīgs. Sākotnēji šķita, ka pieļaujama aizvara spriegums 40 V ir izcils, taču tomēr no aizvara pret izteci pakāpeniski uzkrājošies aizkaves rada lielus pārspriegumus, un tāpēc barošanas spriegums virs 24 V (maksimums 28 V) tomēr izraisa ātru ierīces avārijas izdegšanu. Savukārt labai ģenerācijas aizdedzināšanai gribētos pārsniegt 30-36 V barošanu. Pēdējā modifikācija ir DE150, DE275, DE275, DE375 sēriju lietojums. Tā ir ļoti jaudīga sērija, lai arī ne sevišķi lēta, un arī ātrdarbību virs 46 MHz īsti neatbalsta, tomēr ir stabila, uzticama, ar nosacījumu, ka bloķēšanas kapacitāšu ātrdarbība un kondensatoru zudumi ir atbilstoši kvalitatīvi.

Ļoti fascinējoša ideja ir vairākos US Patentos, kas iesaka pašģenerāciju E-klases režīmā uz pušpula shēmas bāzes, piemēram kā sekojošā patenta zīmējumā (zemāk).

Diemžēl pirmā shēma ³³⁵ nespēj labi uzsākt ģenerāciju, tam vajag paaugstinātu aizvara biasingu

335 - Morrisroe P.J., Gagne P.J. High frequency transistor oscillator system. Perkins Elmers, 1996. US Patent Nr. US6329757B1



(priekšspriegumu), savukārt, kad oscilācija palaidusies, tad priekšspriegums strauji jāsamazina, citādi ģenerators pašnokausies. Šo shēmu sekmīgi realizē daudzu QMS ICP ķīmiskajai analītikai domātu rūpniecisko ģeneratoru izstrādes, ar DE-275 vai DE-375 palīdzību. Tomēr nepieciešamais mezgls ir priekšsprieguma datorizēts kontroles mezgls uz ARM bāzes. Un tas izklausās nepatīkami komplicēti. Esam mēģinājuši vienkāršotu veidu – uz 555 veidots vai ar diviem palīgtranzistoriem taisīts monovibrators iedod noteikta garuma PON signālu, kas starta brīdī paaugstina priekšspriegumu un tad atslēdzas. Ideja nav slikta, taču rezultāts bija vājāks kā cerības. Otrā shēma³³⁶ ir sevišķi interesanta ar to, ka daudzie “tinumi” uz transformatora, pēc būtības, ir induktīvā saite starp diviem paralēliem vadiem, kam spraugas platumu var zem skrūvītes piespieduma viegli piergulēt. Tā ka realizācijā šī shēma ir ne tikai stabilāka, bet arī vienkāršāka kā iepriekšējā, skatīta pašā zīmējumā iespaidplates konstrukciju, ko izdevās ekstrahēt no Patenta. Tomēr pārsteidzoši, ka veicot shēmas SPICE-LT datormodelēšanu, tā neuzsāka adekvāti strādāt un arī nestrādāja dzīvā veidā salodēta. Joprojām šīs pēdējās shēmas attīstīšana ir nepadarīts darbs, bet perspektīvs, ko noteikti jāplāno nākotnei. Tā ir bieža parādība, ka Patentu autori kādu būtisku niānsi pataupa kā know-how, ja nesamaksā, tad bez priekšzināšanām nepalaidīs (protams, netaisāms pārkāpt patenttiesības, jo šis Patents jau sen kopš zaudējis prioritāti). Tā kā par šo ģeneratoru shemotehniku man ir bijusi informatīvi detalizēta publikācija 2017.g. LU pavasara Zinātniskajā konferencē, un šī publikācija var ievajadzēties, ja lasītājs patstāvīgi ar lodāmuru rokās grib atkārtot ICP ģeneratorus, tad pievienoju šo rakstu³³⁷ pielikumu sadaļā.

Iespējas parauga terminālim

Terminālis atšķiras no visām citām vakuumpakārtas detaļām ar ērtu piekļūšanu parauga (mērķa) nomaiņas nolūkos, tāpēc ticamāk ka tās ir vakuumpakārtas nevis samaukums ar konusu, jo konusu izārdīt nesaplēšot, ir roku veiklības jautājums. Papildus tam, paraugu vēlams grozīt (griezt), orientējoši 10-60, maksimums 120 rpm ir laba izvēle. Griešanas asi parasti (izņemot speciālus gadījumus) orientējoši 15 grādu leņķī pret optisko asi. Visas nepatīkšanas sākas ar to, ka parasts motors, kaut vai soļu motors vakuumā nespēj kvalitatīvi dzesēties, tātad draud pārkaršana. To īpaši padziļina fakts, ka gana labā vakuumā gultņiem un visiem citiem materiāliem ir tendence gaitā sametināties. Pašsametinājies gultnis, kam lodītes uz mūžiem salīpušas ar skrejceļiņiem, nozīmē mehānisku avāriju. Laimīgā kārtā pastāv gultņi, kam ir veikta tāda virsmas apstrāde, ka pat Kosmiskos apstākļos tie nesalīp. Protams, cena ir Kosmosam atbilstoša. Savukārt motori, kas kvalificēti vakuūmam arī ir atrodami, taču cenas dēļ izdevīgāk piedziņu labāk veidot caur ārpusē montētu parastu CNC trakcijas ierīcēm domātiem soļu dzinēju ar magnētiem, kas magnētiski sasaistīti ar iekšpusē pie parauga turētāja piestiprinātajiem magnētiem. Te jāraugās, lai magnētisko

336 - Hosemans S.W. (2009). Power Generator for Spectrometry. US Pat Nr 20090129131, available at www.freepatentsonline.com/y2009/0129131.html

337 - Blahins J., Apsitis A., Busenbergs J. (2017). Short historical compendium on RF ICP power sources circuitry

līniju parazitiskā noplūde parauga virzienā neizraisītu magnetrona efektu, citiem vārdiem, “pleķus” dopējuma “krāsojuma” vienmērībā. Ja vispār magnēta spēks, neņemot vērā gaisa spraugu, ir ar kārtu 10 kg/cm² pie 1.6 T, tad ar gaisa spraugu daudz mazāk. Efektu var ievērtēt ar bieži lietoto formulu solenoīdam, kam magnetomotive force $n \cdot I = H_{\text{core}} \cdot I_{\text{core}} + H_{\text{air}} \cdot I_{\text{air}}$ jeb atbilstoši izdalot, lai atklājas B, iegūstam $n \cdot I / B = h(\text{core}) / 4400 + [h(\text{air})] / 12,6 \cdot 10^{-7}$, kur spēks $F = B^2 \cdot A / (2\mu_0)$. Tā varam novērtēt, ka magnētiskās ķēdes garums, piemēram, 12 mm garam neodima magnētam ar gaisa spraugu starp identiskiem magnētiem 12 mm un tikpat atpakaļvirzienā caur citu magnētu (kur ķēdes serdes tomēr dominējoši nosaka polu kurpes nevis magnēts, kam var būt ievērojami labākas magnētiskās īpašības) nozīmē $(24/4400) / (24 \cdot 12,6 \cdot 10^{-7}) = 180.4$ reizes samazinātu indukciju B, kas ir 32 400 reizes samazināts sasaistes spēks. Ja normāli neodima magnēti ar doto izmēru nodrošina empīriski ap 20 kg, tad pāri paliksies 0.62 gramu uz pāri. Ja šādu magnētu pāru skaits ir vismaz 6, tad vilces spēks ir noteikti lielāks par **3.6 gramu**, kas ir minimāli pietiekoši, tomēr norāda, ka gaisa sprauga ir jāsamazina visiem iespējamajiem līdzekļiem.

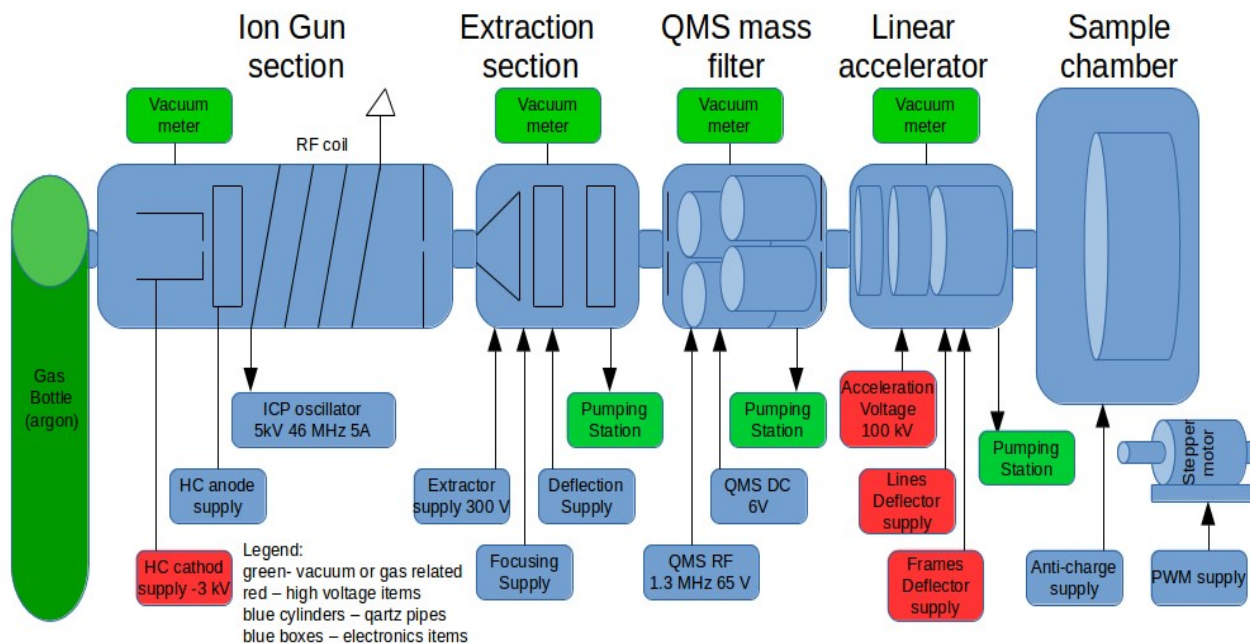
Par ekonomiku

Ir laiks mazliet **paskaidrot ekonomikas motivāciju** jauna implantēšanas aparāta konceptam. Tirgus struktūrā jau šobrīd vērojams ļoti lēto aparātu segmenta piedāvājumu pieaugums. Piemēram, Alibaba piedāvā dažus modeļus par tikai 20-50 K\$ cenu. Tomēr 2M-5M\$ cena modernam lieljaudas aparātam ir daudz parastāka izvēle ³³⁸ un, ja runājam par mazajiem un vidējiem uzņēmumiem (SME), tad šāda investīcija daudziem nešķiet iespējama. Savukārt ir zināms, ka taisni SME segments šobrīd sāk pārņemt nozares “ekonomikas motora” lomu, ja vēl nesen taisni lielindustrija ģenerēja lielāko daļu nozares ienākuma, tad šobrīd svaru kausi strauji sāk nosvērties par labu SME. Vēsturiski, elektronikas komponentu ražošanu spēja “pavilkt” tikai nedaudzas megakorporācijas, tāpēc piemēram 250 waferi stundā ražība tika uzskatīta par priekšrocību. Šobrīd jonu implementācijas mašīnu tirgus segmentu pasaulē novērtē uz ~1.4 biljonu USD (2018), un ja vien trends būs stabils, tad sasniegs ~3 biljonus USD jau 2027.gadā, un 70% no šīs industrijas ienākumiem ģenerē SME, raksta ³³⁹, līdz ar to atslēgas vārdi liels, jaudīgs, ražīgs ir drīzāk trūkums nevis priekšrocība, bet gan tā vietā nāk: elastīgs pārmaiņām, viegli modificējams, ātri adaptējams, un, nebūt ne pēdējā vietā – augstas tīrības. Lai vai kā, augsti inovatīvas, bet mazas kompānijas, kas varbūt attīsta jaunus tirgus produktus vai ražo tos mazās tirāžās, tādās kā šauras nišas produkti, ir spiestas ņemt implantāciju kā ārpalpojumu. Pavirši ieskatoties var rasties ilūzija, ka viss kārtībā, ārpalpojums pieejams vairākās vietās Eiropā, vainas nekādas. Tomēr produkta transportēšana daudzu tūkstošu kilometru attālumā augsta vakuuma apstākļos visbiežāk noved pie vakuuma kvalitātes samazināšanās vakuumkonteinerā vai citiem izrietošiem defektiem, ko rada slikts vakuums, vibrācija un laiks (t.sk. vecēšana), tāpēc, piemēram BSI pieredze ar šo pakalpojumu Francijā, rādīja virs 90% brāķa procentu, kad izdarot visu uz vietas, brāķis visticamāk būtu tuvs nullei. Un tas nemaz nerunājot par vides piesārņojuma aspektiem, kur mazu, vieglu, bet dārgu kravu nākas vest milzu attālumā lielos apjomos radot Globālo Klimatu ietekmējošās motora izplūdes atgāzes un arī transporta izmaksas nav nemaz mazas.

Zīmējumā: ***Plānotā implantēšanas aparāta pilna blokhēma***

338 - Rubin L., Poate J. *Ion Implantation in Silicon Technology*. Industrial Physicist Jun/Jul 2003

339 - Overview: *Ion implantation machine market 2020*. www.transparencymarketresearch.com/ion-implantation-machine-market.html



Par eksperimentālo darbu

Bez eksperimentālas elementu piedzišanas darbiem implantācijas mašīnas būvēšana būtu neiespējama. Tāpēc apskatīsim eksperimentus hronoloģiskā kārtībā, kas ļāva konkrētizēt ieregulējamās iekārtas sastāvdaļu parametrus.

Daudzi pirms darba veiktie “nulltie” eksperimenti

Aplūkoti sadaļā par ICP ģeneratoriem, kā arī ievada sadaļās par cita veida jonu instrumentiem.

Pirmais eksperiments

Stikla 25 mm caurulē ievietojam niķeļa katodu un niķeļa anoda gredzentiņu. Niķeļa avots – nolietotas vakuometra lampas JIM-2 elektrods pēc stikla sadauzīšanas. Iekšā katodā iesmērē borskābes putriņu ūdenī un nokaltē. Pieslēdz regulējamu Villarda shēmu ar pārsledzamu 1 līdz 3 kV spriegumu, mēram strāvu. Novērojam, ka uz katoda izlāde pēc spīduma ir ļoti vāja, bet samainot polus vietām ievērojami pastiprinās. Strāva ir ar kārtu zem miliampēra invertētajai barošanai un mikroampēru desmiti normālai barošanai. Iegūtie spektrometriskie rezultāti ir atspoguļoti vairākas nodaļas augstāk.

Otrais eksperiments

Ņemam svaigu bora references spektra lampu un izpētām spektru spektrometriski. Tad atgriežām lampu vaļā, padodam 1 Torr argona plūsmu un izpētām spektru. Ievietojam argona ieplūdes traktā 40 MHz apmēram 50W RF-ICP avotu, un novērtējam, cik reizes raksturīgās spektrālīnijas palikušas spilgtākas. Paralēli novērtējam, cik rizes palielinājusies HC patērētā strāva no HV avota. Pārbaudām, vai un kā izmainījies spektrālīniju sastāvs

Trešais eksperiments

Kvarca caurulē uzstādam niķeļa katodu, anoda gredzentiņu un konisku bora kristāliskā pulvera sapresētu konusu (ieliktņi). Atkārtojam iepriekšējo eksperimentu. Uz niķeļa uzveram kvarca čaulīti, kam uztīta sildstieples krāsniņa un termopāris. Ieregulējam 550 C un 600 C, un 650 C, un 700 C, atkārtojam datu savākšanu.

Ceturtais eksperiments

Papildinām cauruli ar ekstrakcijas elektrodu un aiz tā novietotu Faradeja Kausiņu. Izmēram ekstrahētā kūļa strāvu pie dažādām ekstrakcijas intensitātēm.

Piektais eksperiments

Papildinām cauruli ar QMS filtru un FC novietojam aiz filtra. Izmantojot FC rādījumus, noskaņojam QMS uz bora molmasu. Salīdzinām iegūtās kūļa jonu strāvas lielumu ar neattīrta kūļa stāvu.

Sestais eksperiments

Samontējam paātrinātāja elektrodus un izmantojot luminiforu apskatām uz targeta fokusētu jonu kūli, pēc tam to defokusējam un vizuāli novērtējam kūļa nevienmērību (pleķainību). Izmēģinām dopēt parasta logu stikla mērķi. Novērtējam uzlādes laiku līdz kūļa rejekcija. Aprēķinām cik liela strāva būtu jākompensē.

Septītais eksperiments

Ierīkojam atzaru ar e-lielgabalu un pielasām e-lielgabala strāvu, lai rejekcijas laiks būtu daudzās minūtēs vai ilgāks.

Astotais eksperiments

Palaižam stara skenēšanu un parauga rotāciju. Veicam eksperimentālu implantēšanu reāla germānija kristālā un novērtējam implantēšanas kvalitāti.

Pateicības

Īpaša pateicība **ERAF Projektam Nr S369-ESS381-ZR-N-109** par finansiālu atbalstu disertācijas rakstīšanai un mērījumu veikšanai;

Tāpat LU Zinātniskajai Platformai **FOTONIKA-LV** par nerimtīgu atbalstu un uzmundrinājumu;

Tāpat **BSI.lv** mūsu industriālajam Partnerim par milzum daudz jautājumu riosināšanu attiecībā ar industriju