

## KARAKTERISTIKE MAGNETRONSKE CELICE S PLOŠČATO ELEKTRODO

### CHARACTERISTICS OF A MAGNETRON CELL WITH A RECTANGULAR ELECTRODE

Alenka Vesel, Miran Mozetič

Inštitut za tehnologijo površin in optoelektroniko, Teslova 30, 1000 Ljubljana, Slovenija

Prejem rokopisa - received: 1999-11-22; sprejem za objavo - accepted for publication: 1999-12-20

Predstavljamo električne karakteristike magnetronske celice v tlačnem območju med  $10^{-10}$  mbar in  $10^{-8}$  mbar, ki jo bomo uporabili kot sestavni del nove vakuumske črpalke. Eksperimentalna magnetronska celica je bila sestavljena iz valjaste anode premera 2,7 cm in dolžine 3,6 cm, v kateri se je nahajala ploščata katodna palica debeline 1 mm in širine 6 mm. V prečnem električnem in magnetnem polju v magnetronski celici se je vzpostavila stabilna razelektritev. Molekule plina so se ob neprožnih trkih z elektroni ionizirale in pospešile proti katodi. Merili smo tok ionov na katodo v odvisnosti od anodne napetosti pri različnih tlakih in različnih gostotah homogenega magnetnega polja, ki je bilo usmerjeno vzdolž celice. Ugotovili smo, da je ionski tok skozi celico močno odvisen od anodne napetosti, gostote magnetnega polja in tlaka. V vsakem primeru obstaja dobro definiran maksimum na krivulji  $I = I(U)$ , ki narašča z naraščajočim magnetnim poljem in tlakom. Maksimalni ionski tok je v omenjenem tlačnem območju približno linearno odvisen od tlaka.

Ključne besede: ultra visoki vakuum, ionska črpalka, magnetronska celica, razelektritev

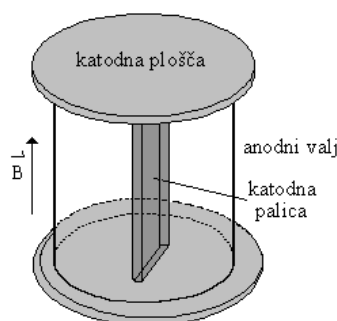
Electric characteristics of a magnetron cell, which will be used in our new sputter ion pump, are described. Experimental magnetron cell consisted of an anode cylinder of the diameter of 27 mm and the length of 36 mm. Inside the anode cylinder a rectangular cathode stick was located. A stable electric discharge was established in the crossed electric and magnetic fields inside the magnetron cell. The molecules were ionized in inelastic collisions with electrons and accelerated toward the cathode. We measure the resulting ion current against the anode voltage at different pressures and at different magnetic fields. It was found that the ion current was strongly dependent on the anode voltage, the magnetic field density and the pressure. In any case, a well defined maximum was found on the  $I = I(U)$  curve, and it increased with the increasing magnetic field and pressure. The maximum ion current depended approximately linearly on pressure in the range between  $10^{-10}$  mbar and  $10^{-8}$  mbar.

Key words: UH vacuum, ion-getter pump, magnetron cell, discharge

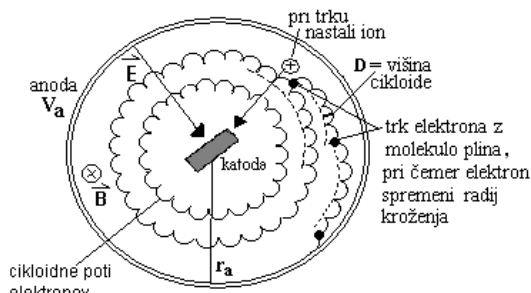
## 1 UVOD

Za vzdrževanje ultra visokega vakuuma se največkrat uporabljajo ionsko naprševalne črpalke<sup>1,7</sup>. Ena izmed oblik celic, iz katerih so lahko črpalke sestavljene, je tudi magnetronska. Le-ta je sestavljena iz anodnega valja, ki je na obeh koncih omejen s katodnima ploščama, na osi znotraj anodnega valja pa se nahaja še katodna palica (slika 1). Delovanje celice sloni na vzpostavitvi razelektritve med obema elektrodama, med katerima je velika potencialna razlika. Anoda je priključena na visoko pozitivno napetost (več kilovoltov), katoda pa je ozemljena. Celica se nahaja še v zunanjem magnetnem polju, ki je vzporedno z osjo anode in tako pravokotno na električno polje (slika 2). Po priključitvi anodne napetosti začnejo elektroni, ki so na začetku že v samem plinu, doživljati neprožne trke z molekulami plina, pri čemer nastajajo novi elektroni, ki ostanejo ujeti v prečnem električnem in magnetnem polju znotraj celice<sup>6</sup>. Tako se v celici ustvari osno simetričen oblak elektronov, v katerem poteka ionizacija plina. V prečnem električnem in magnetnem polju se elektroni gibljejo po cikloidnih poteh, kot je prikazano na sliki 2<sup>5</sup>. Elektroni se lahko približajo anodi le, če trčijo, pri čemer se spremeni njihov radij kroženja. Tako lahko šele po večkratnih trkih pridejo do anode<sup>3,6</sup>. Ioni, ki nastanejo pri

trkih z elektroni, se v električnem polju pospešijo proti katodni palici in z veliko hitrostjo trčijo vanjo. Ioni lahko pri trku v katodo izbijajo iz nje atome kovine, ki se nato napršujejo na stene anode, kjer kemijsko reagirajo s plini. Tako dosežemo črpalni učinek. Za črpanje je zato potreben stalen dotok izbitih kovinskih atomov, ki jih dobimo le ob zadostnem bombardiranju katode z ioni plina. Izdatno bombardiranje z ioni pa lahko zagotovimo le, če z ustrezno kombinacijo električnega in magnetnega polja podaljšamo poti elektronov in s tem povečamo verjetnost njihovega trka z molekulo plina in nastanka iona.



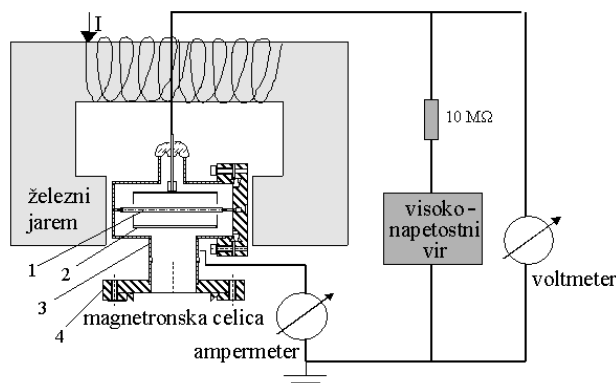
Slika 1: Shematski prikaz magnetronske celice  
Figure 1: Schematic presentation of a magnetron cell



**Slika 2:** Ionizacija in gibanje delcev v prečnem električnem in magnetnem polju znotraj celice  
**Figure 2:** Ionization and motion of particles in crossed electric and magnetic field

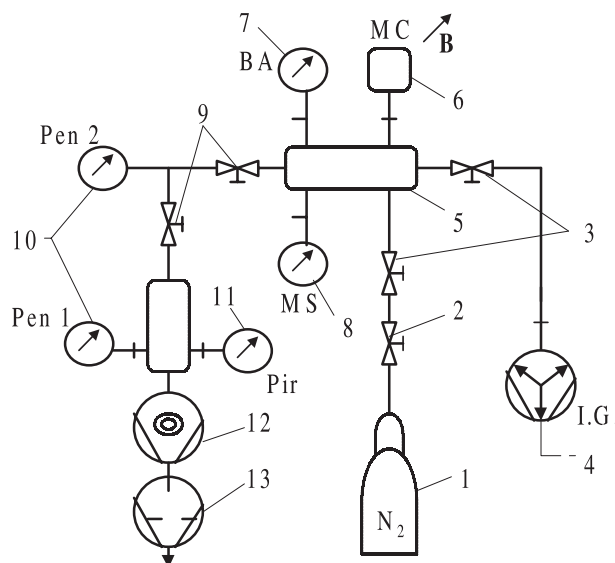
## 2 MERITVE ELEKTRIČNIH KARAKTERISTIK CELIC

Odprševanje titanovih atomov iz katode je bistveno za delovanje črpalke. Ker je število odpršenih titanovih atomov odvisno od toka vpadnih ionov na katodo, smo merili odvisnost toka ionov od anodne napetosti, magnetnega polja in tlaka. Merili smo v tlačnem območju med  $5 \times 10^{-10}$  mbar in  $8 \times 10^{-9}$  mbar. Anodno napetost smo spreminjali med 1 in 8 kV, magnetno polje pa od 0,1 do 0,17 T. Shema električnega merilnega sistema je prikazana na **sliki 3**. Vir magnetnega polja je bil železen jarem, okrog katerega je bila navita tuljava. S spreminjanjem toka skozi tuljavo smo spreminjali magnetno polje v reži, kjer je bila naša magnetronska celica. Eksperimentalna magnetronska celica je bila sestavljena iz anodnega valja, dolžine 36 mm in širine 27 mm, izdelanega iz nerjavnega jekla. Znotraj valja je bila ploščata titanova katodna palica debeline 1 mm in širine 6 mm. Celica je bila zaprta v ohišje iz nerjavnega jekla ter pritrjena na vakuumski sistem, ki je prikazan na **sliki 4**.



**Slika 3:** Prikaz eksperimentalne magnetronske celice in električnega merilnega sistema: 1-katodna palica, 2-anodni valj, 3-ohišje celice, 4-prirobnica na vakuumsko cev

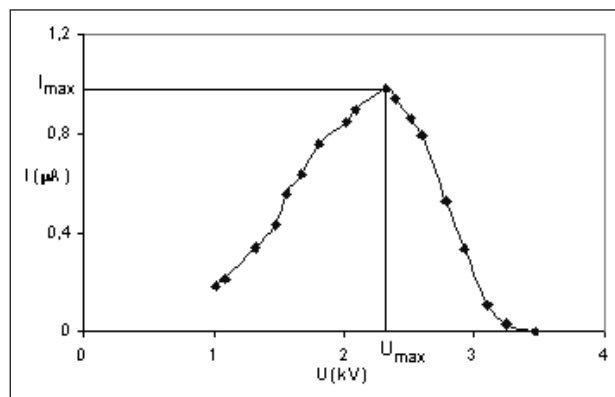
**Figure 3:** Schematic diagram of an experimental magnetron cell and experimental setup for measuring the discharge current: 1-central cathode stick, 2-anode cylinder, 3-cell housing, 4-pumping connection



**Slika 4:** Vakuumski sistem: 1-jeklenka z dušikom, 2-dozirni ventil, 3-UHV ventil, 4-ionsko-naprševalna črpalka, 5-vakuumska komora, 6-magnetronska celica, 7-Bayard-Alpertov vakuummeter, 8-masni spektrometer, 9-UHV ventil, 10-Penningov vakuummeter, 11-Piranijev vakuummeter, 12-turbomolekularna črpalka, 13-rotacijska črpalka

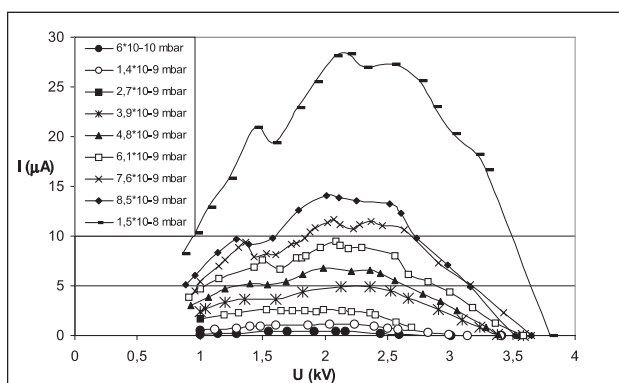
**Figure 4:** Vacuum system: 1-nitrogen flask, 2-precise leak valve, 3-UHV valve 4-ion getter pump, 5-vacuum chamber, 6-magnetron cell, 7-Bayard-Alpert gauge, 8-mass spectrometer, 9-UHV valve, 10-Penning gauge, 11-Pirani vacuum gauge, 12-turbomolecular pump, 13-rotary pump

Vakuumski sistem je bil sestavljen iz vakuumske komore, kamor sta bili pritrjeni preskusna magnetronska celica in jeklenka z dušikom, s katero smo po potrebi spreminjali tlak v celici. Tlak smo spreminjali z ročno nastavljenim ventilom, s katerim smo dovajali dušik v vakuumsko komoro. Tlak v komori smo merili z Bayard-Alpertovim vakuummetrom. Sestavo residualne atmosfere smo spremljali z masnim spektrometrom. Vakuumski sistem je bil predhodno segret na okoli 200°C, da bi zmanjšali kasnejše razplinjevanje sten in s



**Slika 5:** Značilna odvisnost ionskega toka od anodne napetosti, ki je bila izmerjena pri tlaku  $6 \times 10^{-10}$  mbar in magnetnemu polju 0,11 T

**Figure 5:** A typical ion current dependence on the anode voltage, which was measured at pressure  $6 \times 10^{-10}$  mbar and at magnetic field of 0.11 T



**Slika 6:** Odvisnost toka od napetosti pri različnih tlakih in konstantnem magnetnem polju 0,11 T

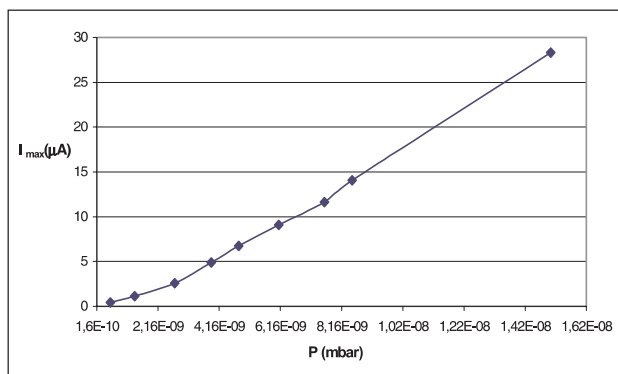
**Figure 6:** Ion current dependence on the anode voltage at different pressures and at constant magnetic field of 0.11 T

tem dosegli boljši vakuum. Tlak v sistemu smo vzdrževali z ionsko-naprševalno črpalko. Končni tlak, ki smo ga dosegli, je bil okoli  $10^{-9}$  mbar. Pri tem tlaku je bil v sistemu večinoma le še vodik.

### 3 REZULTATI MERITEV

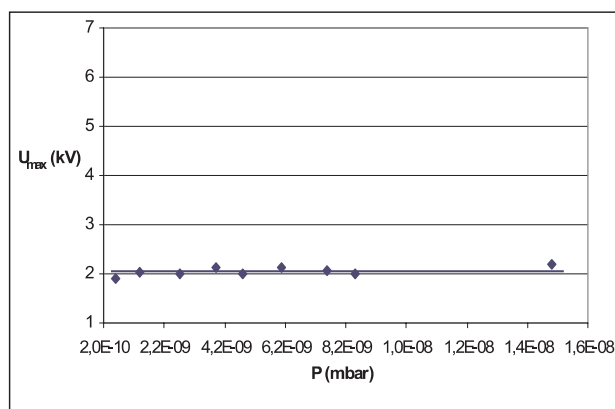
Značilna odvisnost toka ionov ( $I$ ) na katodo od anodne napetosti ( $U$ ) je prikazana na **sliki 5**. Ionski tok je naraščal z naraščajočo anodno napetostjo, pri neki anodni napetosti  $U_{max}$  dosegel maksimum ( $I_{max}$ ), nato pa je z nadaljnjim večanjem anodne napetosti začel počasi padati.

Maksimalni ionski tok ( $I_{max}$ ) je bil odvisen od magnetnega polja in tlaka. Na **sliki 6** je prikazana skupina meritev  $I = I(U)$ , ki so bile narejene pri različnih tlakih. Iz meritev je razvidno, da je maksimalni ionski tok naraščal s tlakom linearno, kar je prikazano tudi na **sliki 7**, medtem ko je bila anodna napetost ( $U_{max}$ ), pri kateri je ionski tok dosegel maksimum, konstantna in neodvisna od tlaka (**slika 8**).



**Slika 7:** Odvisnost maksimalnega toka od tlaka pri magnetnem polju 0,11 T

**Figure 7:** Maximum ion current dependence on pressure at constant magnetic field of 0.11 T



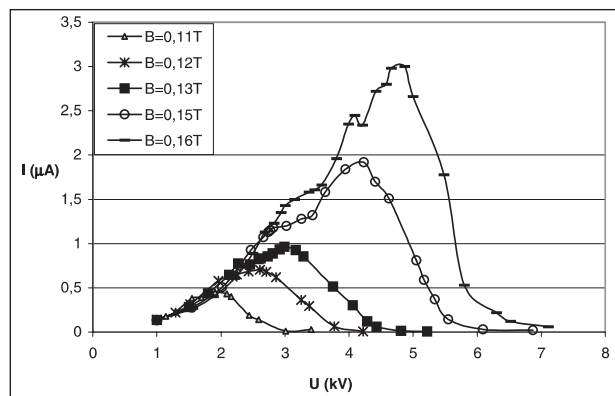
**Slika 8:** Odvisnost napetosti, pri kateri je dosežen maksimalni tok, od tlaka pri magnetnem polju 0,11 T

**Figure 8:** Pressure dependence of anode voltage, at which the maximum ion current was reached, at constant magnetic field of 0.11 T

**Slika 9** prikazuje meritve ionskega toka pri različnih magnetnih poljih. Tudi tu je maksimalni ionski tok ( $I_{max}$ ) naraščal z naraščajočim magnetnim poljem (**slika 10**), vendar nelinearno. Drugače pa je bilo z anodno napetostjo ( $U_{max}$ ), pri kateri je ionski tok dosegel maksimum. Nasprotno od meritev pri različnih tlakih, kjer je bila  $U_{max}$  konstantna, je pri meritvah pri različnih magnetnih poljih  $U_{max}$  linearno naraščala z naraščajočim magnetnim poljem (**slika 11**).

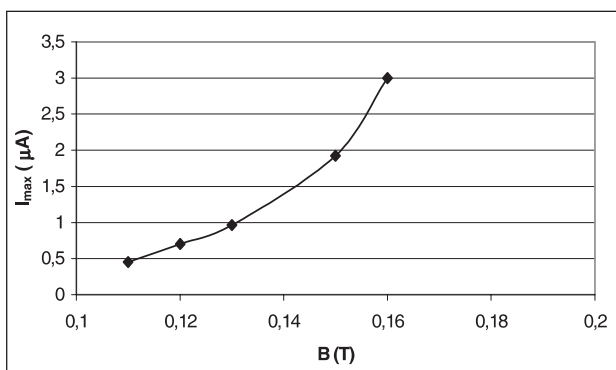
### 4 DISKUSIJA

Ionski tok v celici je odvisen od gostote oblaka elektronov, v katerem poteka ionizacija plina, in od kinetične energije elektronov. Večja gostota elektronov pomeni večjo verjetnost za trk z molekulo plina in s tem intenzivnejšo ionizacijo. Da se oblak elektronov, v katerem poteka ionizacija, neprestano vzdržuje, je treba, da je število elektronov, ki nastanejo pri ionizacijskih trkih, večje od števila elektronov, ki pobegnejo na



**Slika 9:** Odvisnost toka od napetosti pri tlaku  $6 \times 10^{-10}$  mbar in pri različnih magnetnih poljih

**Figure 9:** Ion current dependence on the anode voltage at different magnetic fields and at pressure  $6 \times 10^{-10}$  mbar



**Slika 10:** Odvisnost napetosti, pri kateri je bil dosežen maksimalni tok, od magnetnega polja pri tlaku  $6 \times 10^{-10}$  mbar

**Figure 10:** Magnetic field dependence of the anode voltage, at which the maximum ion current was reached, at pressure  $6 \times 10^{-10}$  mbar

anodo. Število novo nastalih elektronov je odvisno od višine cikloide, ker je od nje odvisno število trkov, ki jih naredi elektron, preden pride do anode. Čim manjša je višina cikloide, tem več trkov naredi elektron in možnost za nastanek novih elektronov se poveča. Verjetnost, da pri trku elektrona z molekulo plina sploh pride do ionizacije in nastanka novega elektrona in iona, pa je odvisna od kinetične energije elektrona in narašča z naraščajočo energijo elektrona. Višina cikloide ( $D$ ) in kinetična energija ( $W_k$ ) elektrona sta odvisni od električnega ( $E$ ) in magnetnega polja ( $B$ ) znotraj celice:

$$D = \frac{2m}{e} \frac{E}{B^2} \propto \frac{U}{B^2} \quad (1)$$

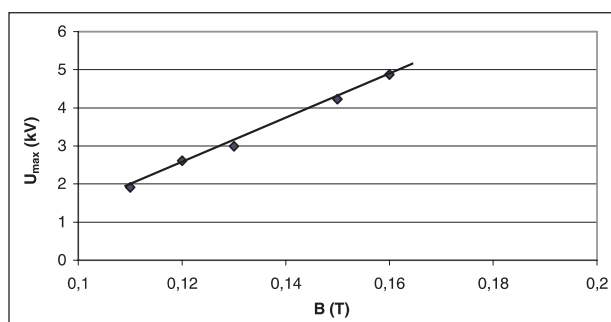
in

$$W_{kin} = eED \propto \frac{U^2}{B^2}, \quad (2)$$

kjer je  $m$  masa elektrona in  $e$  osnovni naboj, zato moramo za optimalno delovanje celice, to je takrat, ko je gostota elektronov maksimalna, izbrati primerno kombinacijo obeh polj.

Vzrok za dobljeno odvisnost toka od napetosti, kot je prikazana na **sliki 5**, lahko torej razložimo na naslednji način. Tok z napetostjo narašča zato, ker narašča energija elektronov (**enačba 1**) in se povečuje verjetnost, da pri trku pride do ionizacije. Ker pa z naraščajočo anodno napetostjo narašča tudi višina cikloide (**enačba 2**), postane pri neki napetosti le-ta prevelika, kar privede do zmanjšanja števila trkov<sup>5</sup>. Elektroni prehitro pridejo do anode in ne uspejo ionizirati zadosti molekul plina. Ker ni več zadostnega pomnoževanja elektronov, razelektritev ugasne. Zato pri višji anodni napetosti pride do padca ionskega toka.

Vzrok za naraščanje anodne napetosti  $U_{max}$  z magnetnim poljem je verjetno v kinetični energiji elektrona. Iz **enačbe (2)** izhaja, da če hočemo, da elektroni obdržijo zadostno kinetično energijo za



**Slika 11:** Odvisnost maksimalnega toka od magnetnega polja pri tlaku  $6 \times 10^{-10}$  mbar

**Figure 11:** Maximum ion current dependence on magnetic field at pressure  $6 \times 10^{-10}$  mbar

ionizacijo, je potrebna pri višjih magnetnih poljih večja anodna napetost. Zato se anodna napetost  $U_{max}$ , pri kateri pride do maksimalnega ionskega toka, povečuje z naraščajočim magnetnim poljem.

## 5 SKLEP

Merili smo električne karakteristike magnetronskih celic, ki bodo sestavni del nove UVV črpalke. Meritve celic kažejo, da obstaja neko optimalno področje, kjer je ionski tok večji. Ionski tok pri neki anodni napetosti doseže maksimum, nato pa z nadaljnjim večanjem anodne napetosti pade. Maksimalni ionski tok in anodna napetost, pri kateri ionski tok doseže maksimum, sta odvisna od magnetnega polja in tlaka. Maksimalni ionski tok narašča linearno s tlakom. Prav tako ionski tok narašča (nelinearno) tudi z magnetnim poljem v območju od 0,1 do 0,17 T, v katerem so potekale meritve. Anodna napetost, pri kateri ionski tok doseže maksimum, je neodvisna od tlaka, medtem ko z magnetnim poljem linearno narašča.

## 6 LITERATURA

- <sup>1</sup> G.L. Saksaganskii, Getter and Getter-ion Vacuum Pumps, Harwood Academic Publisher, Chur, (1994) 177-204
- <sup>2</sup> P.A. Redhead, Operation of an inverted-magnetron gauge in the pressure range  $10^{-3}$  to  $10^{-12}$  mmHg, *Can. J. Phys.*, 36 (1958) 271-278
- <sup>3</sup> P.A. Redhead, The Townsend Discharge in a Coaxial Diode with Axial Magnetic Field, *Can. J. Phys.*, 36 (1958) 255-270
- <sup>4</sup> R.N. Peacock, N.T. Peacock in D.S. Hauschulz, Comparison of hot cathode and cold cathode ionization gauges, *J. Vac. Sci. Technology*, 9 (1991) 1978-1985
- <sup>5</sup> R.L. JEPSEN, Magnetically Confined Cold Cathode Gas Discharges at Low Pressures, *J. Appl. Phys.*, 32 (1961) 2619-2626
- <sup>6</sup> P.A. Redhead, The Magnetron Gauge: A Cold-Cathode Vacuum Gauge, *Can. J. Phys.*, 37 (1959) 1260-1271
- <sup>7</sup> VARIAN Vacuum Products, The Complete Solution To All Ion Pumping Needs, Varian SpA, Torino, (1993)