

## **Analýza emisních čar ve výboji v napařovacím stroji**

*Pavel Oupický, Centrum pro optoelektroniku  
Viktor Sember, Oddělení vysokoteplotního plazmatu  
Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i.*

### **Abstrakt**

V článku v jeho zkrácené verzi pro sborník z konference je stručně analyzováno použití výboje v napařovacích a napařovacích strojích a pro jeden konkrétní případ je proveden pokus o analýzu spektra naměřeného spektrometry USB2000 a HR4000 .

### **Úvod**

V napařovacích strojích se používá výboj k čištění substrátů připravených k napařování tenkých vrstev a v některých případech i k homogenizaci a temperaci napařených vrstev tímtož výbojem v tomto případě nahrazujícím iontovou asistenci.

Vzhledem k prvnímu a základnímu použití, kdy má výboj dočišťovat již předtím mechanicky (mytím) a chemicky (rozpuštědly) ošetřený povrch, je důležité, aby výboj svým účinkem jednak odstranil prach na povrchu substrátů elektrostatickými a adhezními silami přidržovaný a dále přímým ohřevem substrátů působeným opakovanými dopady urychlených iontů uvolnil z povrchu molekuly zbytků rozpouštědel a vody. Přitom je velmi důležité aby výboj skutečně čistil a nikoli naopak na povrch substrátů nanášel nečistoty vznikající interakcí výboje s nečistotami na elektrodách a stěnách vakuové napařovací či napařovací komory. Dalším důležitým faktorem, který je nutné sledovat, je možnost poškození substrátů výbojem zvláště v případech, kdy jde o substráty z hmot neodolávajících zvýšeným teplotám jako jsou např. plasty a laky a nebo substrátů spojených s jiným zařízením, které by mohlo být poškozeno elektrostatickým polem, např. průzory CCD kamer resp. přímo jejich čipů..

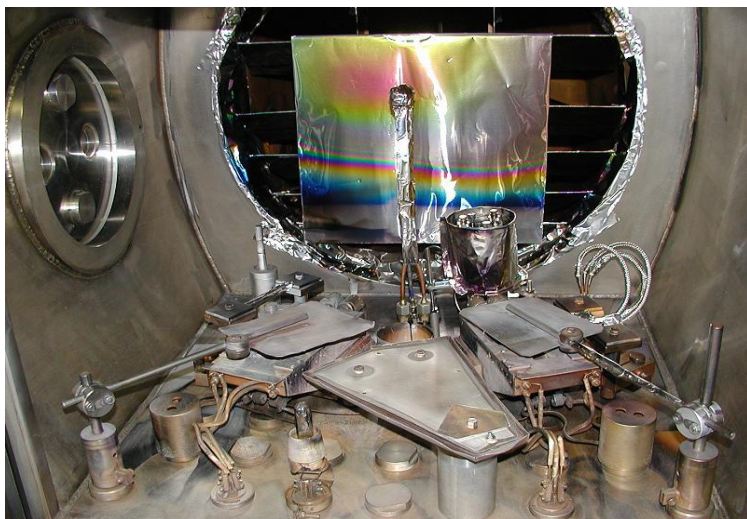
Pro určení alespoň některých parametrů výboje v obou výše uvedených případech byl dále proveden pokus o analýzu jeho emisního spektra. Cílem této analýzy bylo určení jednak vlastního složení probíhajícího výboje se zaměřením na jeho chemické složení a jednak alespoň přibližné určení teploty ve středu výbojové oblasti a to celkem běžně dostupnými měřícími a softwarovými prostředky.

### **Výboj v napařovací aparatuře**

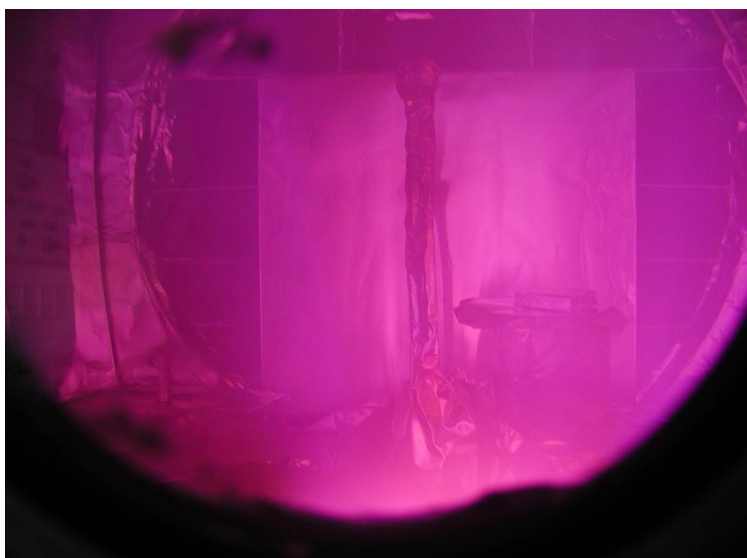
Ke sledování a analýze byl zvolen výboj v napařovací aparatuře typu B63D , která se běžně používá k napařování substrátů až do průměru 630 mm . K napařování se převážně používají materiály aplikované v reflexních a antireflexních vrstvách používaných v optice, jakými jsou kovy Al, Ag, Au, Cr, Ni a dielektrika SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, MgF<sub>2</sub> a řada dalších.

Napařovací komora je opatřena několika průzory, kterými by bylo možné výboj vyfotografovat a nasnímat jeho spektrum. Byla zde možnost použít okénka pro pozorování dění v komoře a nebo průzory používané pro fotonometr.

Zvolena byla jednodušší a méně náročná varianta s použitím pozorovacího průzoru. Pomocí optického vlákna napojeného na kolimační čočkou upevněnou na okénko na jeho jednom konci a spektrometru napojeného na jeho druhém konci bylo nasnímáno emisní spektrum, které výboj při svém vzniku produkuje.



Obr.1 - pohled do otevřených dveří napařovacího stroje B63D. Vpředu je vidět výbojová elektroda ve tvaru lichoběžníku



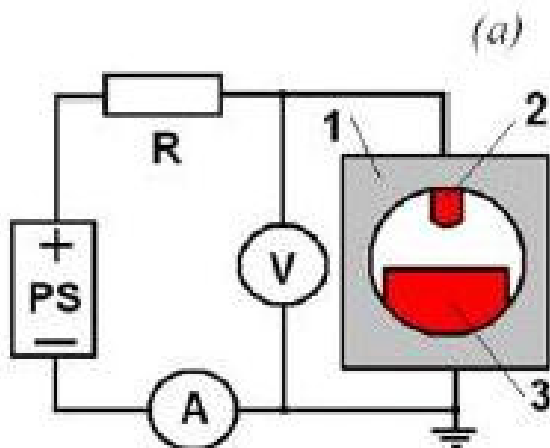
Obr 2. - fotografie výboje ve vakuové komoře napařovacího stroje B63

Spektra byla nasnímana dvěma spektrometry s různými parametry, spektrometrem USB2000 s rozsahem 200 až 850nm a instrumentálním profilem cca 0.8nm a spektrometrem HR4000 s rozsahem 300 až 750nm s instrumentálním profilem cca 0.27nm .

### **Analýza výboje v napařovací aparatuře**

Cílem analýzy je určení složení interní atmosféry v komoře napařovacího stroje a přibližné průměrné teploty částic, které tento výboj tvoří, a to vše z naměřených spekter celkem běžně dostupnými spektrometry, které byly k dispozici.

Výboj ve zředěném plynném prostředí v uzavřené komoře je buzen stejnosměrným napětím vytvářejícím elektrické pole. Při patřičném zředění plynu dochází k ionizaci atomů a k rotaci a vibracím v molekulách, které se projevují vznikem intenzivních emisních čar. Na dalším obrázku je příklad schematického uspořádání výbojových elektrod a příslušných elektrických obvodů. Čistěné substráty jsou spojeny s katodou a výbojová elektroda je na kladném potenciálu vysokého napětí ( cca 300 - 1000 V).



Obr. 3 – běžné uspořádání výbojové aparatury [1]

1 – komora, 2 – anoda, 3 – katoda, R - odporový předřadník, PS - zdroj napětí

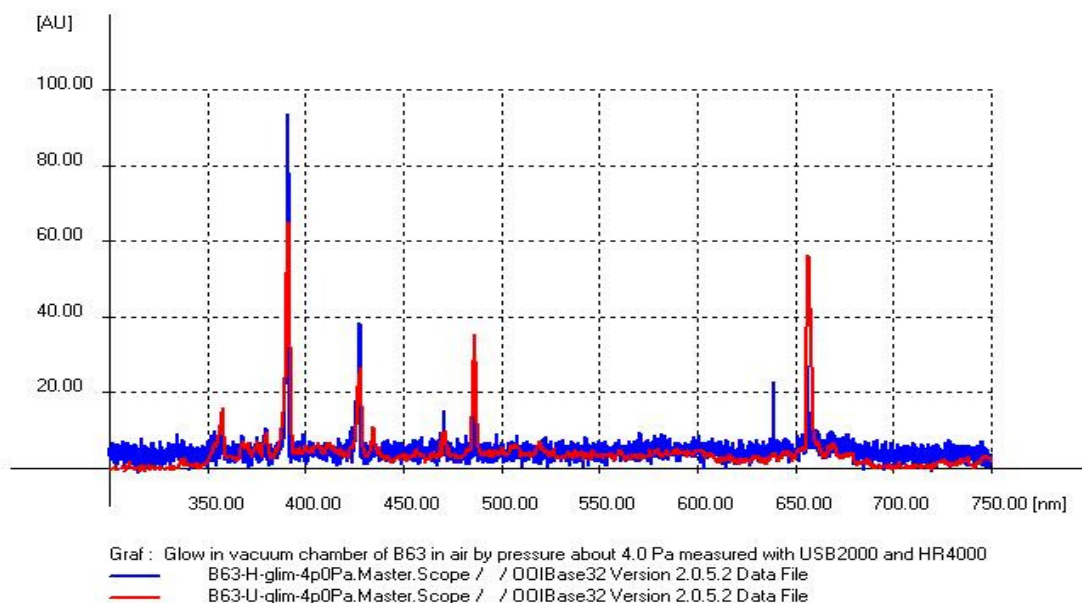
Jako pracovní plyn v komoře lze použít téměř libovolný plyn, v běžné praxi se používá téměř výhradně běžná atmosféra, složená z molekulového dusíku  $N_2$ , kyslíku  $O_2$ , vodní páry  $H_2O$ , kyselého uhličitého  $CO_2$  a řady dalších plynů jako, např. uhlovodíků a vzácných plynů.

Při tomto experimentu byla rovněž použita běžná atmosféra. Tlak plynu v komoře byl měněn v rozsahu cca 1.0 Pa až 6.0 Pa, při těchto tlacích se dařilo udržet výboj při měření v dostatečné stabilitě. Napětí a proud nebylo možné přímo měřit, pouze zprostředkovaně na primáru vysokonapěťového transformátoru. Napětí bylo udržováno víceméně na konstantní úrovni.

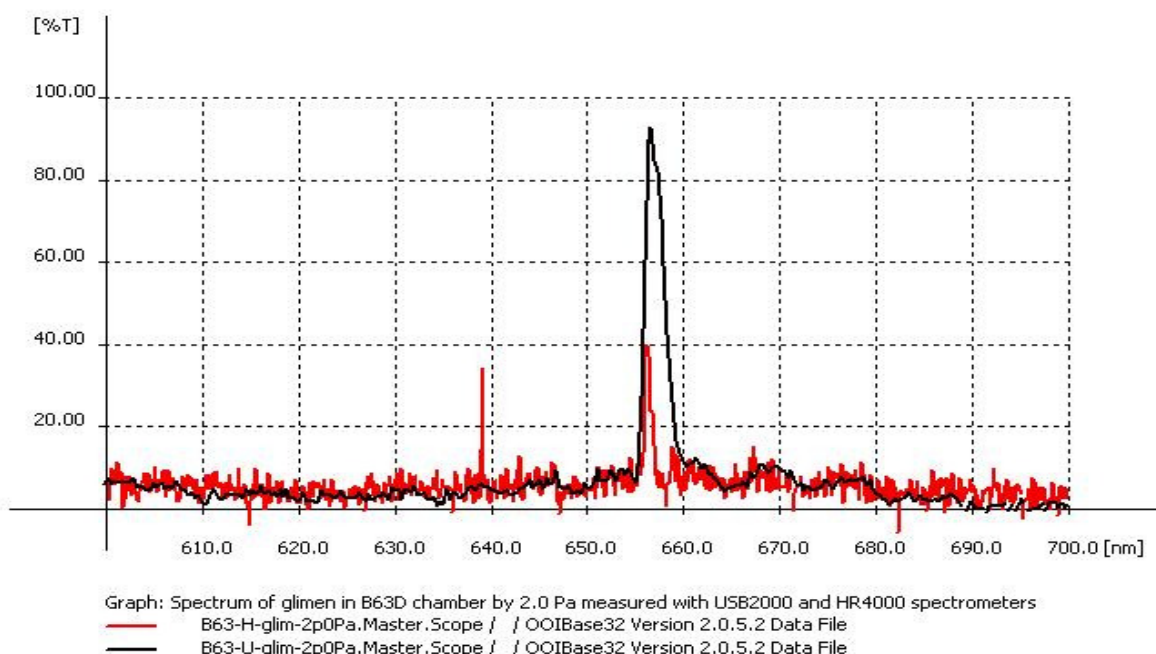
Spektra byla snímána postupně při současném narůstání tlaku v komoře. Tlak bylo možné regulovat pouze připouštěcím ventilem a Rootsovou vývěvou.

Ve spektru ze spektrometru USB2000 (B63-U) jsou evidentní nejvýznamnější spektrální čáry a oblasti se zvýšenou emisní aktivitou (možnost měření v UV oblasti nemohla být vzhledem k použitým průzorům využita), nelze zde však rozlišit detaily a některé emisní čáry tak zde vůbec nejsou zaregistrovány.

Ve spektru ze spektrometru HR4000 (B63-H) s větším rozlišením lze identifikovat velmi mnoho spektrálních čar, přičemž však není zcela jisté, zda se skutečně jedná o emisní čáry či pouze konstantní šum spektrometru. Příklad naměřených spekter je na následujících obrázcích.



Obr. 4 - spektrum výboje v komoře napařovacího stroje B63D změřené dvěma spektrometry USB2000 (U) a HR4000 (H)



Obr. 5 – příklad detailního spektra naměřeného dvěma spektrometry USB2000 (U) a HR4000 (H) při stejném tlaku cca 2.0 Pa

Komparací spekter naměřených při různých tlacích změřených stejným spektrometrem je možné odseparovat zřetelné emisní čáry od potenciálního šumu a výsledek zapsat do tabulek. Takto vyseparované čáry lze rovněž zpětně vynést do grafů.

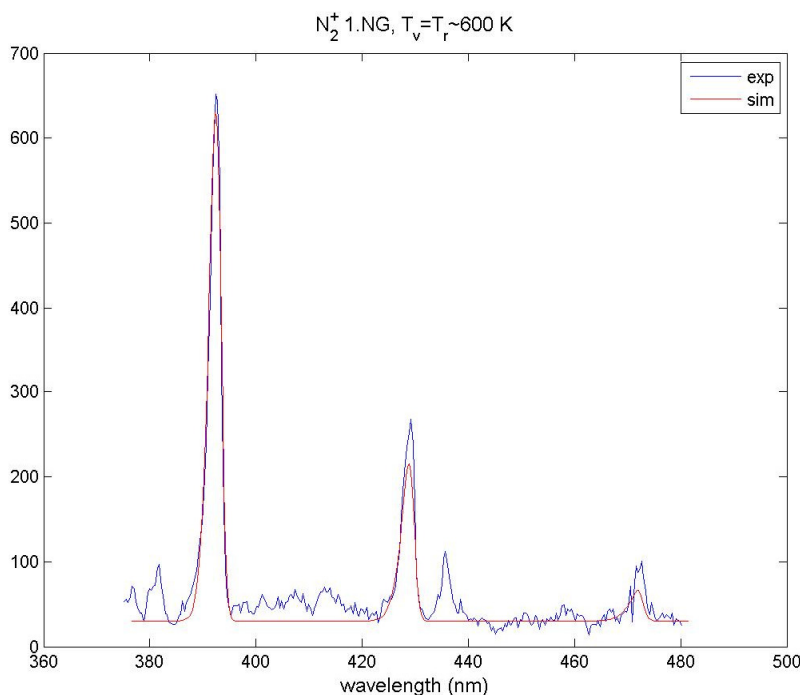
Cílem separace spekter z naměřených dat byla snaha porovnat naměřená spektra s tabulkovými spektry převzatými z databáze NIST .

Z takto získaných a porovnaných detailů bylo zjištěno, že čáry atomů ve spektru výboje s výjimkou atomů vodíku s velkou pravděpodobností nejsou a nebo se tam vyskytují minimálně.

Ve spektru výboje se tak podařilo spolehlivě určit přítomnost vodíkových čar H alfa a H beta. Že se zde žádné další spektra atomů nevyskytují lze zjistit např. i porovná-ním spektra výboje s tabulkou emisních čar zjištěných měření v tokamacích.

Jelikož z atomárních spekter se nepodařilo až na vodík čáry určit, bylo třeba obrátit se ke spektrům molekulovým, tj. ionizačním, rotačním a vibračním. S tím měli větší zkušenosti a potřebné prostředky moji kolegové z UFP Šimek a Sember a proto jsem se s žádostí o další analýzu obrátil na ně.

Kromě evidentních vodíkových čar kolega V. Sember pomocí programu LIFBASE a dalších prostředků určil ve spektru emisní a rotačně–vibračních čáry molekul dusíku a kyslíku, viz následující obrázek.



Obr. 6 – analýza spektra výboje programem LIFTBASE

Na obr. 6 je naznačená analýza spektra výboje, kdy se naměřené spektrum porovnává se spektrem teoretickým a po korekcích na odpovídající instrumentální profil spektrometru (tj. jeho rozlišovací schopnost) lze takto odhadnout i odpovídající teplotu v plynu, která z daného spektra byla určena na cca 600° C .

Z naměřených vodíkových čar, z nichž se preferuje většinou nejvýraznější čára H beta, lze pak např. v programu MATLAB vypočítat z jejího rozšíření - opět po příslušné korekci na instrumentální profil spektrometru USB2000 - hustotu elektronů odpovídající i hustotě iontů a tedy plazmatu ve výboji. Ta byla v tomto konkrétním případě stanovena na hodnotu

$n_e \sim 1.9 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$  .

### Závěr

Jednoduchou technikou i technikou měření, která byla v tomto případě k dispozici a použita a dostupným softwarovým vybavením lze určit složení plynů ve výboji a jeho další parametry pouze přibližně. K tomu použité postupy jsou však zcela obecné a v případě použití spektrometrů s větší rozlišovací schopností bude jistě možné velmi rychle určit hledané charakteristiky výboje přesněji.

Tato práce byla finančně podpořena Evropským regionálním fondem pro rozvoj a Ministerstvem školství, mládeže a sportu České republiky jako projekt CZ.1.05/2.1.00/03.0079: Vývojové centrum pro speciální optiku a optoelektronické systémy.

### Použitá literatura:

- [1] V.I. Arkhipenko, A.A. Kirillov, Ya.A. Safronau, L.V. Simonchik and S.M. Zgirouski: Self-sustained dc atmospheric pressure normal glow discharge in helium: from microamps to amps, Institute of Physics of the NAS of Belarus, Minsk, Belarus Plasma Sources Sci. Technol. **18** (2009) 045013 (17pp) DOI:10.1088/0963-0252/18/4/045013
- [2] NIST ASD Tables
- [3] Pavel Šimek, UFP Impulsní systémy – konzultace