

Kutasi Kinga

**HIDEG-KATÓDOS KÖDFÉNYKISÜLÉSEK
ALAPJELENSÉGEINEK HIBRID MODELLEZÉSE**

PhD értekezés tézisei

Témavezető: **Donkó Zoltán**, a fizika tudomány kandidátusa

Szegedi Tudományegyetem - Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet

Budapest

2003

1. Bevezetés

A ködfénykisüléseket számos területen alkalmazzák, pl. gáz- és fémgőzlécek, spektrállámpák, analitikai anyagvizsgálat, felületkezelés, rétegleválasztás céljára. A tisztán tudományos érdeklődésen kívül, az alkalmazások optimalizálása is szükségessé tette és teszi a gázkisülések kutatását, a bennük lejátszódó folyamatok alapos megismerése érdekében. Kezdetben analitikus modellek segítségével próbálták megérteni a gázkisülésekben lejátszódó folyamatokat és azok szerepét. A gyors számítógépek megjelenése a numerikus modellek megjelenéséhez és fejlődéséhez vezetett, amelyek lehetővé tették a kisülések mélyebb, kvantitatív megismerését. A korai numerikus modellek külön tárgyalták a kisülések különböző térrészeit és nem adtak önkonzisztens leírást a teljes kisülésről. Az utóbbi időben kifejlesztett hibridmodellek [1] segítségével egyidejűleg leírhatók a kisülések különböző térrészei. A hibridmodellek egy folyadékmodellből [2] és egy Monte Carlo modellből [3] tevődnek össze. A folyadékmodell segítségével leírható a kis elektromos térrel rendelkező térrészekben (negatív fény, pozitív oszlop), a térrel hidrodinamikai egyensúlyban lévő töltések mozgása, míg a Monte Carlo modell lehetővé teszi a katód közvetlen közelében lévő, térben gyorsan változó elektromos térben mozgó töltések követését.

Ahhoz, hogy pontos képet kapjunk a gázkisülésekről és megértsük működésüket meg kell ismerjük:

- az áram-feszültség-nyomás karakterisztikájukat, amely megadja a kisülés működési feltételeit,
- a kisülésben lejátszódó elemi folyamatokat és ezek szerepét a gázkisülés működésében,
- a kisülésben jelenlévő töltött és gerjesztett részecskék forrásait, veszteségeit és sűrűségüket, valamint a különböző folyamatokban játszott szerepüket.

Dolgozatom elsődleges célja olyan önkonzisztens gázkisülési modellek kidolgozása, amelyek segítenek ezen kisülési jellemzők meghatározásában. További célom, hogy a kidolgozott modellek segítségével az eddiginél pontosabb képet adjak egyes nemesgáz kisülésekben megfigyelhető néhány érdekes jelenségről.

2. Előzmények és célkitűzések

Dolgozatomban három problémával foglalkozom:

1. axiális fényintenzitás-eloszlások és elektronok kiváltása a katódfelületből abnormális argon kisülésekben,
2. üreges katódú effektus kialakulása sík-párhuzamos üreges katódú kisülés esetén,
3. molekuláris ionok jelenléte és szerepe a kisülés önfenntartásában hélium kisülésekben.

Az alábbiakban röviden bemutatom ezen problémák hátterét.

1. A gázkisülések alapfolyamatainak vizsgálata hosszú múltra tekint vissza. A hidegkatódú kisülések önfenntartásáért felelős folyamatok a kezdetektől az érdeklődés középpontjában álltak. Az alacsony áramú kisülési tartományra, valamint az alacsony nyomású átütésre először Townsend dolgozott ki elméletet [4]. A későbbi elméletek, továbbfejlesztve Townsend elméletét, figyelembe vették a tértöltések hatását, valamint a gyors atomok, metastabil atomok és fotonok szerepét az elektronok keletkezésében a katódnál és a gázfázisban. A közelmúltban végzett kutatások [5] megmutatták, hogy a katódnál történő elektronkiváltásban nagyszámú folyamat vesz részt, az ionok csak egy szűk kisülési tartományban dominálnak, emellett fontos szerepet kapnak a gyors semleges atomok, metastabil atomok és ultraibolya fotonok.

Az utóbbi néhány évben jelentős előrehaladást értek el az alacsony hőmérsékletű plazmák modellezése területén a hibridmodellek kifejlesztésével, amelyek fontos információt szolgáltatnak a kisülésekben lejátszódó folyamatokról [1, 6–8]. A modellek számára fontos adat a katódi folyamatokat jellemző elektronkiváltási tényező értéke, mivel ennek ismeretében meghatározhatók a kisülések elektromos karakterisztikái. A hibridmodellek általában minden elektronkiváltást az ionoknak tulajdonítanak, azaz egy látszólagos elektronemissziós tényezőt használnak, amelynek értékét ráadásul állandónak tételezik fel, igen eltérő kisülési feltételekre is. A hibridmodellek pontosságának növelése érdekében felvetődött a kérdés, hogy vajon kisáramú Townsend kisülési feltételek (homogén elektromos tér) mellett kapott, a kisülési körülményektől függő elektronkiváltási tényezők használatával a modellek pontosabb eredményeket szolgáltatnának-e a normális és abnormális kisülések esetén? Elvégezve ezt a

tesztet azt találták, hogy a kisülés elektromos karakterisztikái nem adták vissza a kísérletileg tapasztalt viselkedést [9].

A modellek pontosságának elemzése és javítása érdekében a látszólagos elektronkiváltási tényezőt később meghatározták az abnormális kisülési tartományra egy nehéz-részecske hibridmodellel, energiafüggő másodlagos elektronkiváltási tényezőt használva az argon ionokra és a gyors atomokra [10]. A számolások során kapott elektronkiváltási tényezők: (i) lényegesen alacsonyabbak, mint a homogén tér esetén kapott értékek és (ii) jelentősen változnak a kisülési feltételek változásával. Ez arra a következtetésre vezetett, hogy meglehetősen nehéz olyan konstans elektronkiváltási tényezőt találni, amely helyesen írja le a kisülést a működési feltételek széles skáláján.

Az elektronkiváltásra vonatkozó adatok az irodalomban korlátozottan állnak rendelkezésre. Továbbá ezen adatok többsége nagyvákuum feltételek mellett, ionsugaras módszerekkel végzett mérésekből származik, és közvetlenül nem alkalmazható ködfénykisülések esetére. *Emiatt vizsgálataim egyik célja a látszólagos elektronkiváltási együttható illesztéses módszerrel történő meghatározása az abnormális kisülések tartományára.*

Ezt az alternatív megoldást választva, az elektronkiváltási tényezőt úgy változtatom a modell iteratív megoldása során, hogy a különböző kisülési feltételek mellett a számolt elektromos karakterisztikák megegyezzenek a mértekkel. A modell hitelességének ellenőrzése céljából a modellből számolt axiális fényintenzitás-eloszlásokat összehasonlítom a mért eloszlásokkal. Ezek további információt is szolgáltatnak a kisülésről, pl. katód sötét tér hossza, és ezáltal segítenek a kisülés viselkedésének jobb megértésében.

2. A kisülések fizikájának sokat tanulmányozott, de részben még máig is nyitott kérdése az elektródák geometriájának hatása a kisülés működésére és jellemzőire. A speciális elektróda-geometriák egyik gyakorlati szempontból is fontos fajtáját az üreges katódú kisülések jelentik. Az üreges katódú kisülések esetén a kisülés negatív fényét a katódüreg belsejébe kényszerítjük. Ez különbözőképpen érhető el, pl. ha henger alakú cső katódot használunk és a kisülést a katódüregben indítjuk, vagy ha a kisülést két sík katód között hozzuk létre megfelelő gáznyomás mellett.

Az üreges katódú kisülésben folyó áram lényegesen nagyobb lehet, mint az azonos feszültségen működő egy-katódú kisülések esetén, ami a plazmában

megnövekedett ionizációs hatások (ú.n. *üreges katódú effektus*) hatása. Az üreges katódú effektus megjelenésének okai: a gyors elektronok oszcilláló mozgása a katódfelületek között, a (a geometria következményeként) megnövekedett fotoelektron-emisszió és a kisülésben (a megnövekedett plazmasűrűség miatt) megjelenő többlépéses folyamatok. Az üreges katódú kisülésekben jelenlévő oszcilláló elektronok létezését eredetileg Güntherschulze [11] tételezte fel, és kísérletileg elsőként Helm [12] mutatta ki hengeres üreges katódú kisülésekben.

Mivel az üreges katódú kisülések negatív fény térrészében a fénykibocsátás intenzívebb, mint az egy-katódú kisülések esetén, az üreges katódú kisülések széleskörű felhasználásra találtak, alkalmazhatók pl. fémgőzlézerek [13–15] és spektrállámpák [16] építésére. Nagy nyomások esetén mikro-üreges katódú kisüléseket használnak nagyintenzitású fényforrásokként [17, 18], ugyanakkor alacsony nyomások esetén egyes üreges katódú konfigurációk kapcsolókként működnek [19, 20].

Dolgozatomban egy sík-párhuzamos üreges katódú argon kisülésben vizsgálom az üreges katódú effektus kialakulásának feltételeit, kísérleti és szimulációs úton. A kisülés szimulációs vizsgálatához egy 2 dimenziós modellt használok. Ezzel a modellel kapott eredményeket összehasonlítom a kísérleti eredményekkel, ellenőrizve a modell helyességét. Céлом kísérletileg és számolásokkal követni az üreges katódú effektus kialakulását a kisülési paraméterek változtatásával állandó elektródatávolság mellett, és a modell segítségével bizonyítani az oszcilláló elektronok jelenlétét a kisülésben.

3. Az eddigiekben említett, nemesgázokban működő kisülésekben, az alacsony nyomás és az alacsony ionizációs fok miatt a pozitív töltést jó közelítéssel egyszeres töltésű atomi ionok alkotják. Ugyanakkor valamelyest nagyobb nyomások mellett, ($p \sim 20\text{-}100$ mbar) a fényforrásokban, spektrállámpákban, különböző típusú lézerekben széleskörűen alkalmazott nemesgáz (pl. hélium) kisülésekben fontos szerepet játszanak a molekuláris ionok. Az említett nyomástartományban azt találták, hogy a molekuláris ionok befolyásolják a kisülési jellemzőket, résztvesznek pl. a He-Cd⁺ lézer, He-Zn⁺ lézer és He-Ar⁺ lézer gerjesztési mechanizmusában. Plazmakijelzőknél használt kisülésekben (amelyek egyes H₂+He gázkeverékben $p \sim 100$ mbar nyomáson működnek) fontos szerepük van a kisülés fenntartásában [21].

Nagynyomású hélium kisülésekben UV és VUV lézerek valósíthatók meg:

pl. He-N₂⁺ lézer, amelyben a felső lézernívó a molekuláris hélium ion nitrogén molekulával történő ütközésekor lejátszódó reakció során pumpálódik [22, 23]. Az UV és a VUV hélium kisülési lámpák esetén a fénykibocsátás a gerjesztett He₂ és He₂⁺ molekuláktól származik [24]. Mivel a He₂ molekula alapállapota nem stabil, a gerjesztett He₂ molekulák a He₂⁺ molekulák rekombinációjából származnak.

Korábbi, pozitív oszlopú hélium kisülésekre végzett számolások szerint már ≈ 15 mbar nyomásnál a kisülésben a molekuláris ionok a domináns töltések [25], így várható, hogy alacsony nyomásoknál ($p < 15$ mbar) is jelentős mennyiségben vannak jelen He₂⁺ ionok a kisülésekben.

Vizsgálataim célja meghatározni a molekuláris ionok jelentőségét katód környéki hélium kisülésekben, megfigyelve, hogyan nő szerepük a nyomás növekedésével. További céloom meghatározni a kisülésben az atomi és molekuláris ionok forrásait és veszteségeit. A célok megvalósításához egy hélium kisülést vizsgálók széles nyomástartományban kísérleti úton és egy egydimenziós hibridmodell segítségével.

3. Vizsgálati módszerek

A kisüléseket hibrid modellek segítségével és kísérletileg vizsgálom.

A hibrid modellek egy folyadék és egy Monte Carlo modellből tevődnek össze. Az ionok és a lassú elektronok mozgását a folyadékmodellben (folyadék-egyenletek segítségével) írom le, míg a gyors elektronokat (amelyeknek kinetikus+potenciális energiája nagyobb, mint a gázatomok minimális gerjesztési energiája) a Monte Carlo (MC) modellben (részecske szimulációval) követem. A kisülésben a potenciáeloszlást a folyadékmodellben a Poisson-egyenlet segítségével számolom. A folyadékmodell bemenő paramétereit a gáz nyomása, a kisülés feszültsége, a diffúziós együtthatók, a mozgékonyágok és az elektronok hőmérséklete. Az MC modell bemenő adatait a gáznyomáson kívül az elektron-ütközéses folyamatok hatáskeresztmetszetei.

A hibridmodellben a folyadék- és az MC modelleket iteratív módon oldom meg, amíg el nem érem a stacionárius állapotot. Az első lépésben a folyadékmodellt oldom meg források és veszteségek nélkül, hogy egy kezdeti téreloszlást kapjak, amelyben majd az MC modellel a kezdeti elektronokat követhetem. Az

MC modellben meghatározom a lassú elektronok és ionok forrásait, amelyeket mindig az aktuális áramerősséggel (I , amelyet az előző folyadék ciklusban határoztunk meg) normálok. A következő folyadék ciklust már az MC modell által adott töltésforrásokkal oldom meg.

A kísérletek során meghatároztam a kisülések elektromos karakterisztikáit, az emissziós fényintenzitás axiális eloszlását és a kisülések spektrumát. A kisülés fényintenzitás-eloszlása fontos információt szolgáltat a kisülés szerkezetéről és ugyanakkor a modellek egy ellenőrzési lehetősége. Az kisülések elektromos karakterisztikái a hibrid modellek bemenő paramétereit, a kisülés spektruma lehetővé teszi az elektronok hőmérsékletének meghatározását, amely szintén a modellek bemenő paramétere.

4. Új tudományos eredmények

1. *Hibridmodellrel dolgoztam ki abnormális argon kisülések vizsgálatára. A modell segítségével meghatároztam az abnormális kisülési tartományban működő kisülések esetén a látszólagos elektronkiváltási tényezőt [f3,k3,k4].*

Egy $d = 1.1$ cm elektródatávolságú gázkisülést vizsgáltam a $pd = 45 - 150$ Pa cm nyomás- és $I = 300 - 2000$ μ A áramtartományban, amely az abnormális kisülési tartománynak felelt meg. A modell megoldása során az elektronkiváltási tényezőt úgy változtattam, hogy a modell reprodukálja a mért elektromos karakterisztikákat. A modell megadta a kisülés általános jellemzőit: töltéssűrűségek, töltésfluxusok, elektromos téreloszlás. A kapott eredményekkel rámutattam arra, hogy a kisülési paramétereiktől függően különböző gamma értékeket kell használni, valamint, hogy a homogén tér esetén és ionnyaláb kísérletekben meghatározott elektronkiváltási tényezőket használva a modellek nem reprodukálják az abnormális kisülések elektromos karakterisztikáit. Ahhoz, hogy a modellek helyesen írják le ezeket a kisüléseket, az elektronkiváltási tényezőre homogén tér esetén kapott értékeknél jóval kisebb értékeket kell használni.

2. *Összehasonlítva a modell alapján számolt emissziós fényintenzitás-eloszlásokat a mért intenzitáseloszlásokkal igazoltam a modell helyességét. A számolt intenzitáseloszlásból és elektromos téreloszlásból meghatározva a katód sötét tér hosszát, igazoltam a korábbi állítások helyességét, amely szerint az intenzitá-*

seloszlások maximumának a helye megegyezik a katód sötét tér - negatív fény határával. [f3,k3,k4].

Az összehasonlítás során jó egyezést találtam a mért és a számolt intenzitáseloszlások között, mind alakban, mind a relatív intenzitás értékében. Ez a jó egyezés a modell helyességét bizonyítja. Az intenzitáseloszlásokból meghatároztam a katód sötét tér hosszát, feltételezve, hogy a katód sötét tér - negatív fény határa megegyezik az intenzitáseloszlás maximumának a helyével. Az így kapott eredményeket összehasonlítottam az elektromos tereleszlásból kapott eredményekkel (a katód sötét tér és negatív fény határát a katód sötét térben jelenlévő elektromos tér lineáris interpolációjának zéró értéke jelöli ki). Az összehasonlítás eredményeképpen bizonyítottam, hogy az intenzitáseloszlások maximumának a helye megegyezik a katód sötét tér - negatív fény határával.

- 3. Kísérletileg és szimulációs módszerrel vizsgáltam egy sík-párhuzamos 2 cm katód - katód távolságú üreges katódú argon kisülést. A kisülés elméleti vizsgálatához egy kétdimenziós hibridmodellt fejlesztettem ki. A modell segítségével meghatároztam a töltések forrásfüggvényeit, valamint a kisülés emissziós intenzitáseloszlását, amelyek segítségével bizonyítottam az üreges katódú effektus megjelenését alacsony nyomások esetén. Regisztrálva az elektronok pályáját, bizonyítottam az oszcilláló elektronok jelenlétét a sík-párhuzamos üreges katódú kisülésekben [f1].*

A modell megadta a kisülés általános jellemzőit, valamint az ionizációs forrásfüggvényeket. Nagy nyomások esetén az ionok forrása a katód környékére koncentrálódik. A nyomás csökkenésével egyre több ion keletkezik a negatív fényben és kis nyomások esetén ($p \leq 0.4$ mbar) az ionizációs forrásfüggvény a kisülés közepén egyenletessé válik. Regisztrálva az elektronok pályáját azt találtam, hogy a vizsgált legalacsonyabb nyomáson ($p = 0.2$ mbar) az elsődleges elektronok és azok által keltett lavinában keletkezett másodlagos elektronok 90%-a belép a szemközti katód sötét terébe, és ezeknek az elektronoknak 80%-a oszcilláló mozgást végez a két katódfelület között. A legnagyobb nyomáson ($p = 1$ mbar) az elektronoknak csak 1%-a képes átlépni a negatív fényt, és ezek sem végeznek oszcilláló mozgást. A mért és a számolt intenzitáseloszlások kvalitatív összehasonlításával bizonyítottam a modell hitelességét.

- 4. Széles nyomástartományban regisztráltam a hélium molekulák emissziós spektrumát sík elektródájú hélium kisülésben, és ezeknek a spektrumoknak a vizs-*

gálatával bizonyítottam a molekuláris ionok jelenlétét már alacsony nyomások esetén is ($p \approx 20$ mbar). Kísérletileg, spektroszkópiai módszerrel meghatároztam a lassú elektronok hőmérsékletét [f2,k1].

Mivel a He_2 molekula alapállapota instabil, a gerjesztett He_2 molekulák nem elektronütközéses gerjesztés során keletkeznek, hanem a He_2^+ ionok rekombinációjával. Merve a He_2 molekula emissziós spektrumát megállapítottam, hogy már viszonylag alacsony nyomások esetén is ($p \geq 20$ mbar) a kisülésben a He_2^+ ionok jelentős mennyiségben vannak jelen és ugyanakkor a rekombinációs folyamatok nagyon hatékonyak. Mivel a rekombinációs folyamatok reakciósebességei erősen függenek az elektronhőmérséklettől ($dn/dt \sim T_e^{-4}$), annak érdekében, hogy a kisülés leírása a modellel minél hitelesebb legyen, az elektronhőmérsékletet kísérleti úton, spektroszkópiai módszerrel határoztam meg. Megmutattam, hogy a 6-60 mbar nyomástartományban az elektronhőmérséklet értéke a 0.1-0.12 eV intervallumba esik.

5. *Egy egydimenziós modellt dolgoztam ki a hélium kisülések vizsgálatára. A modell segítségével meghatároztam a különböző folyamatok hozzájárulását a töltött részecskék (atomi és molekuláris ionok, valamint elektronok) forrásához és veszteségéhez. A modellel számolt töltéssűrűség-eloszlásokkal elméletileg is bizonyítottam, hogy alacsony nyomások esetén is ($p = 6$ mbar) a kisülésben jelentős mennyiségű molekuláris ion van jelen. A számolt részecskefluxusok segítségével rámutattam arra, hogy a molekuláris ionoknak fontos szerepük van a kisülés önfenntartásában [f2,k1].*

Az atomi ionok a vizsgált nyomástartományban 99%-ban elektronütközéses ionizáció során keletkeznek. Alacsony nyomások esetén az ionok veszteségét az elektródákon való elnyelődés jelenti ($p = 6$ mbar-on 85%), a nyomás növekedésével viszont jelentősen nő a rekombinációs és ionkonverziós folyamatok szerepe ($p = 60$ mbar-on 30%, illetve 12%).

A molekuláris ionok nagyrészt ionkonverzió és asszociatív ionizáció során keletkeznek ($p = 6$ mbar-on 49%, illetve 47%) és a folyamatok szerepe a nyomás növekedésével csak kis mértékben változik. Alacsony nyomások esetén az ionok veszteségét az elektródákon való elnyelődés jelenti ($p = 6$ mbar-on 92%), a nyomás növekedésével viszont jelentőssé válik a rekombinációs folyamatok szerepe, és $p = 60$ mbar-on már a rekombinációs veszteségek lesznek a dominánsak (az ütközéses-sugárzásos rekombináció (44%) és a háromtest rekombináció (9%)).

A számolások szerint az atomi ionok sűrűségének maximuma és a molekuláris ionok sűrűségének maximuma közötti arány $p = 6$ mbar esetén ≈ 3.4 , és ez az arány a nyomás növekedésével csökken, $p = 60$ mbar-on ≈ 2.2 . Ez az eredmény rámutat arra, hogy alacsony nyomáson ($p = 6$ mbar) a gerjesztett molekulák sávjai nem azért hiányoznak a kísérletileg megfigyelhető spektrumból, mert a kisülésben nincsenek jelen a molekuláris ionok, hanem azért, mert a molekuláris ionok rekombinációjának kicsi a sebessége.

Figyelembe véve a különböző részecskék elektronkiváltási tényezőjének értékét, valamint a katódra érkező részecskék fluxusát, megmutattam, hogy a katód felületéből kilépő elektronok $\approx 10\%$ -át a molekuláris ionok váltják ki (ez az érték alig változik a nyomással).

Hivatkozások

- [1] Surendra M, Graves D B and Jellum G M 1990 *Phys. Rev. A* **41** 1112
- [2] Bouef J P 1988 *J. Appl. Phys.* **63** 1342
- [3] Boeuf J P and Marode E 1982 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **15** 2169
- [4] Townsend J S 1915 *Electricity in Gases* (Oxford: Clarendon)
- [5] Phelps A V and Petrović Z Lj 1999 *Plasma Sources Sci. Technol.* **8** R21
- [6] Boeuf J P and Pitchford L C 1991 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **19** 286
- [7] Donkó Z 1998 *Phys. Rev. E* **57** 7126
- [8] Bogaerts A, Gijbels R and Goedheer W J 1995 *J. Appl. Phys.* **78** 2233
- [9] Phelps A V, Pitchford L C, Pédoussat C and Donkó Z 1999 *Plasma Sources Sci. Technol.* **8** B1
- [10] Donkó Z 2001 *Phys. Rev. E* **64** 026401
- [11] Güntherschulze A 1923 *Z. Physik* **19** 313
- [12] Helm H 1972 *Z. Naturforsch.* **27a** 1812
- [13] Tobin R C, Peard K A, Bode G H, Rózsa K, Donkó Z and Szalai L 1995 *IEEE J. of Selected Topics in Quant. Electron.* **1** 805
- [14] Gerstenberger D C, Solanki R and Collins G J 1980 *IEEE Journal of Quant. Electron.* **16** 820
- [15] Mezei P, Apai P, Jánossy M and Rózsa K 1990 *Optics Commun.* **78** 259
- [16] Walsh A 1956 *Spectrochimica Acta* **7** 108
- [17] Schoenbach K H, El-Habachi A, Shi W and Ciocca M 1997 *Plasma Sources Sci. Technol.* **6** 468
- [18] El-Habachi A and Schoenbach K H 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 885

- [19] Schaefer G and Schoenbach K H *Physics and Applications of Pseudospark, NATO ASI Series B* **219** 55 (New York: Plenum Press, 1990)
- [20] Christiansen J and Schulteiss Ch 1979 *Z. Phys. A* **290** 35
- [21] Hagelaar G J M, Kroesen G M W, van Slooten U and Schreuders H 2000 *J. Appl. Phys.* **88** 2252
- [22] Collins C B, Cunningham A J and Stockton M 1974 *Appl. Phys. Lett.* **25** 344
- [23] Rothe D E and Tan K O 1977 *Appl. Phys. Lett.* **30** 152
- [24] Hill P C and Herman P R 1993 *Phys. Rev. A* **47** 4837
- [25] Ichikawa Y and Teii S 1980 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **13** 2031

Hivatkozott saját publikációk

- [f1] Kutasi K and Donkó Z 2000, "Hybrid model of a plane-parallel hollow-cathode discharge", *J. Phys. D: Appl. Phys.* **33** 1081
- [f2] Kutasi K, Hartmann P and Donkó Z 2001, "Self-consistent modelling of helium discharges: Investigation of the role of He_2^+ ions", *J. Phys. D: Appl. Phys.* **34** 3368
- [f3] Marić D, Kutasi K, Malović G, Donkó Z and Petrović Z Lj 2002, "Axial emission profiles and apparent secondary electron yield in abnormal glow discharges in argon", *Eur. Phys. J. D* **21** 73
- [k1] Kutasi K, Hartmann P and Donkó Z 2000, "Self-consistent modeling of helium discharges in a wide pressure range", *Abstract book of ESCAMPIG XV Conference* August 26-30, Miskolc-Lillafüred, Hungary, Europhysics Conference Abstracts (Eds.: Donkó Z, Jenik L and Szigeti J) **24F** 238
- [k2] Kutasi K, Donkó Z and Hartmann P 2001, "Numerical modelling of low temperature plasmas", *Proc. of Contributed papers, 10th Annual Conference of Doctoral Students*, June 12-15, 2001, Prague, Check Republic, (Ed.: Safránková J), 366
- [k3] Kutasi K, Donkó Z, Marić D, Malović G and Petrović Z Lj 2002, "Apparent secondary electron yield in abnormal argon glow discharges", *Proc. of Joint Conference ESCAMPIG 16 & ICRP 5*, July 14-18, 2002, Grenoble, France, (Eds.: Sadeghi N and Sugai H) **1** 263
- [k4] Marić D, Kutasi K, Malović G, Donkó Z and Petrović Z Lj 2002, "Axial emission profiles and apparent secondary electron yield in abnormal argon glow discharge", *Proc. 21st SPIG Symposium on physics on ionized gases*, Niš, Yugoslavia, (Eds.: Radović M K and Jovanović M S) 438