

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Plazma és elektróda folyamatok, degradációs jelenségek nagynyomású kisülőlámpákban

(Adalékok és mikroszennyezések hatása a lámpa paramétereire)

Ph.D. értekezés tézisei

Böröczki Ágoston

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
Fizikai Intézet, Atomfizika Tanszék
2006.

1. Bevezetés

A korszerű nagynyomású kisülőlámpa fényforrások időrendben a legkésőbb - az 1960-as években - megjelent, ugyanakkor legígéretesebb képviselői a fémhalogénlámpák. Működési elvük és szerkezeti felépítésük alapján e lámpák sok tekintetben hasonlítanak a lámpacsalád klasszikus képviselőinek számító higanygőzlámpákhoz, műszaki jellemzőik azonban jelentősen felülmúlják azokat. A kedvező tulajdonságok a fémhalogénlámpákban alkalmazott fénykeltésre szolgáló adalék-összetevők sokféleségének és ezen összetevők előnyös ionizációs-, gerjesztési- és spektrális tulajdonságainak köszönhetőek.

Jelen értekezés keretében a nagynyomású fémhalogénlámpák néhány alapvető konstrukciós kérdésével, a lámpákban zajló plazma- és elektródafolyamatokkal, valamint a magas hőmérséklet és nyomás hatására bekövetkező degradációs jelenségekkel kapcsolatos kutatási és fejlesztési eredményeimet ismertetem.

2. Célkitűzések

A fémhalogénlámpák javított elektromos- és optikai tulajdonságainak ára a kémiai összetétel bonyolultsága folytán a lámpákban zajló fizikai és kémiai folyamatok komplexitása. E komplexitás ez ideig nem tette lehetővé e lámpák működésének teljes körű elméleti leírását, azaz olyan általános és a fizikai-kémiai alaptörvényekre közvetlenül visszavezethető modellek kidolgozását, amelyek tervezési segédeszközként szolgálhatnának. A fémhalogénlámpák tervezése napjainkban a működés egy-egy specifikus jelenségkörét tárgyaló elméleti részmodellek előrejelzéseinek és matematikai statisztikai technikákkal támogatott kísérleti modellek eredményeinek együttes felhasználásával történik.

Célom a nagynyomású kisülőlámpák (közelebbről a fémhalogénlámpák) elektromos-, optikai- és megbízhatósági jellemzőinek továbbfejlesztése volt olyan konstrukciók megoldások keresésével, amelyek alapjait néhány jól meghatározott és viszonylagos függetlenséggel vizsgálható lámpafizikai-kémiai folyamat részleteinek tanulmányozása és megértése szolgáltatja.

A nagynyomású fémhalogénlámpák elektródaműködésével összefüggő új jelenségre vonatkozó megfigyeléseim, a lámpákban alkalmazott fémhalogénid adalékok optimális kompozíciójára vonatkozó kísérleti eredményeim, a kisülési csövekben található elektródák pontosabb pozicionálási módszerére tett javaslatom, valamint a lámpák kisülési kamráiban

fellépő akusztikus rezonanciajelenségek számítógépes modellezéssel feltárt részletei a fémhalogénlámpák konstrukciófejlesztésének problémáihoz kapcsolódnak.

A fényforrásokkal - mint minden egyéb ipari termékkel - szemben alapvető elvárás, hogy előre meghatározott ideig megbízhatóan működjenek. A fokozatos minőségromlásért a lámpák kisülési kamráiban zajló degradációs folyamatok felelősek. Az értekezés keretében a degradációs jelenségekkel összefüggésben a kisülési kamrák gázösszetételének és szennyezési szintjeinek roncsolásos- és roncsolásmentes mérésének új módszereit tárgyalom, valamint a fémhalogénid adalék és az elektródaszervély, továbbá a fémhalogénid adalék és a kamrafal között zajló kémiai korróziós folyamatok feltárt részleteit ismertetem.

3. Alkalmazott kísérleti módszerek

A lámpaalkatrészek (elektródák, áramátvezetések, kvarc kisülési kamra, stb.) működési mechanizmusának valamint korróziójának és degradációs folyamatainak követésére a széles körben alkalmazott optikai- és elektronspektroszkópiás (SEM) módszerek mellett a röntgen fotoelektron spektroszkópia (XPS) és az Auger elektron spektroszkópia (AES) korszerű berendezéseit alkalmaztam.

Mindkét analitikai eljárás nagyon felületérzékeny, mivel a mérési információt a kilépő elektronok kinetikus energiája hordozza, és ezek energiavesztés nélküli szabad úthossza a szilárd mintákban csupán néhány atomi réteg távolságnyi. Az analízis során begyűjtött névleges energiával kilépő elektronok tehát szükségképpen a felülettől csupán néhány atomi réteg mélységből származnak. A felületérzékenység miatt a vizsgálatot ultravákuum körülmények között kell elvégezni, hiszen minden - a környezetből a felületre rakódó - szennyeződés e módszerekkel fokozottan érzékelhető, és lényegesen befolyásolhatja a mérési eredményt. Az XPS analízis tized atomszázalékos érzékenységgű, míg az AES eljárás esetében az érzékenységi küszöb közelítőleg egy atomszázalék. A módszerek alapvetően a primer gerjesztés módjában különböznek. Az XPS esetében röntgen fotonokat, míg AES alkalmazásakor elektronokat alkalmazunk primer gerjesztésre.

A felületanalitikai módszerek mellett a kisülési kamra gáztér-szennyezési szintjének mérésére kidolgoztam és irányításommal megépült egy „in situ” magas hőmérsékletű tömegspektrométeres roncsolásos gáztisztaság-mérő összeállítás. A berendezés a lámpák működési körülményeihez hasonló feltételek között képes a fémhalogénlámpák töltőgázának összetételét és a szennyezők koncentrációit meghatározni. A mérés során a lámpa kisülési csövét - az állandósult működési állapot elérését követően - ultravákuum körülmények között

egy törőberendezés segítségével megrepesztjük, majd a kiszabaduló gáz tömegspektrométeres analízisével következtetünk a gázzennyezők jellegére és mennyiségére.

A roncsolásos gáztisztaság-mérési módszer kifejlesztése mellett kísérleteket végeztem néhány lehetséges roncsolásmentes gáztisztaság-mérési elv alkalmazhatóságára vonatkozóan. Az értekezésben e módszerek közül a fémhalogénlámpa kisülési csövek egyenáramú ködfény-kisülési feszültségének mérésén alapuló vizsgálati elvet ismertetem részletesen.

4. Új tudományos eredmények - tézisek

Elektródafolyamatok vizsgálatával kapcsolatos eredmények 1-2.

1.

Auger elektron spektroszkópiás mérésekkel bebizonyítottam, hogy a nagynyomású kisülőlámpák tóriumos volfrám elektródáinak szokásos technológiai hőkezelési hőmérsékletén (< 2300 K) a felület kilépési munkáját csökkentő Th monoréteg forrásai kizárólag a felületen található szubmikronos ThO_2 szemcsék [1].

Állandósult működési állapotban a lámpák elektródafelületének tórium fedettsége a felületre tóriumot juttató disszociációs és diffúziós folyamatok, valamint a felület tórium mennyiségét csökkentő deszorpciós és párolgási folyamatok kényes egyensúlyának eredménye. Tóriumos volfrám huzalminták felületi tórium fedettségének időbeli kialakulását és hőmérsékletfüggését feltáró vizsgálatokkal megállapítottam, hogy a kisülőlámpák elektródáinak működési hőmérsékletén (tipikusan $2500 - 2900$ K) a felület tórium mennyiségét csökkentő folyamatok dominálnak. Következésképpen, csupán e folyamatok figyelembe vételével stabil felületi tórium monoréteg kialakulása a felületen nem várható.

2.

A nagynyomású kisülőlámpák tóriumos volfrám elektródáinak Auger elektron spektroszkópiás vizsgálata során egy eddig nem tárgyalt új jelenséget azonosítottam, a ThO_2 szemcsék elektron-indukált disszociációját [2, 3].

Méréseink megmutatták, hogy az általánosan alkalmazott $1400 - 2300$ K hőmérsékletű hőkezelés mellett az Auger berendezés gerjesztő elektronnyalábjára is szükség van a felületi ThO_2 szemcsék disszociációja következtében kialakuló tórium fedettség megjelenéséhez az elektródák felületén. A jellemző Auger vizsgálati körülmények között

(1,0 - 2,5 keV elektronnyaláb energia, 350 nm elektronnyaláb átmérő) a besugárzó elektronnyaláb áramsűrűségének egy küszöbértéket is meg kell haladnia a jelenség létrejöttéhez, azaz mérhető felületi tórium fedettség kialakulásához. Ez a kritikus áramsűrűség érték tipikusan $10 - 100 \mu\text{A}/\text{mm}^2$ nagyságrendű.

A ThO_2 szemcsék elektron-indukált disszociációját a tóriumos volfrám elektródaminták felületének pásztázó elektronmikroszkópiás (SEM) vizsgálatával is sikerült nyomon követni.

Az Auger elektron spektroszkópiás analízis mérési körülményei jelentősen eltérnek a nagynyomású kisülőlámpákban uralkodó elektronnyaláb jellemzőktől (elektronnyaláb energia 1 - 10 eV, lényegesen nagyobb áramsűrűség). Nem zárható ki azonban, hogy a feltárt elektron-indukált ThO_2 disszociáció jelensége ennek ellenére szerepet játszhat a kisülőlámpák elektródáinak működése során. Ez különösen igaz a gyújtási folyamatra, ahol a gyújtóimpulzus által szolgáltatott nagy gyorsító feszültség (2 - 25 kV) és a jelentősen alacsonyabb gáznyomás olyan elektron kinetikus energiákat eredményez, amelyek megközelítik az Auger vizsgálatok gerjesztő elektronjainak energiáit. A lámpák legelső begyújtásánál az elektron-indukált disszociáció lehet az egyetlen, az elektródák felületi tórium fedettségét létrehozó - és a felület kilépési munkáját csökkentő - folyamat.

A nagynyomású kisülőlámpák konstrukciós kérdéseivel kapcsolatos eredmények 3-5.

3.

Kidolgoztam egy új fémhalogénlámpa adalékrendszer [4], amelynek fő összetevői: (1) a zöld és (2) a vörös-kék spektrumtartományban széles sávban sugárzó ritkaföldfém halogenid vegyületek (pl. cérium-jodid és diszprózium-jodid), (3) jó elektromos vezetőképességet és ívstabilitást biztosító, és lehetőség szerint intenzív látható sugárzást is kibocsátó alkáli halogenid (pl. nátrium-jodid), és (4) egy célszerűen alacsony forráspontú, illékony, keskeny sávú vonalas sugárzó komponens (pl. tallium-jodid).

Az új fémhalogenid adalékrendszer összetevőinek ismertett kombinációjával sikerült elérnem, hogy a lámpa elektromos teljesítményének 10-15 %-os változása 50-80 %-kal kisebb változást eredményezett a lámpa által kibocsátott fény színezetében, mint az irodalomban eddig ismertett és a piacon megtalálható fémhalogénlámpákban alkalmazott legkorszerűbb adalékrendszerek alkalmazása esetén.

A lámpák által sugárzott fény színezete ezzel érzékletlenebbé válik a gyártási pontatlanságból eredő-, a lámpákat működtető elektromos berendezések

alkatrészszereléséből származó-, valamint az elektromos működtető hálózatban fellépő zavarok okozta teljesítményváltozásokkal szemben. Más szóval, jelentősen csökken az azonos populációból származó és kis mértékben eltérő működési körülmények között üzemelő lámpaegyedek között mérhető színeltérés. Ez a tulajdonság különösen nagy előny a színminőségre és színegyenletességre fokozottan igényes (pl. beltéri) világítástechnikai alkalmazásoknál [5, 6, 7, 8, 9]. A magasabb színhőmérsékletek (4200 K, 5500 K) tartományában mindez ideig ilyen tulajdonsággal rendelkező fémhalogén adalékrendszer nem volt ismert.

Az új fémhalogénlámpa adalékrendszer járulékos előnye a 10-15 %-kal magasabb fényhasznosítás ugyanazon lámpa egységteljesítményre vonatkoztatva.

4.

Szélsőérték analízissel és Monte Carlo számítógépes szimulációval elvégeztem az elektródákat kisülési csővük két átellenes végén tartalmazó, az úgynevezett két végén lapított, nagynyomású kisülőlámpák ívhossza - mint statisztikai változó – méreteloszlásának analízisét. Az analízis alapján kidolgoztam az ívhossz változékonyság (terjedelem, szórás) csökkentésének egy új és egyszerűen megvalósítható módszerét [10], amely az elektródaszerelvények módosított tájolási elvén alapul.

Az új módszer feltételezi, hogy a kisülési cső lezárását követően az elektródák végpontjainak laterális eltérése az ideális tengelyvonaltól erősen nem hengerszimmetrikus eloszlást követ. Más szóval, a laterális hiba lényegesen eltér az elektródaszerelvény molibdén áramátvezető fóliájának síkjában és az e síkra merőleges irányban. Az aszimmetria a lámpaalkatrészek konstrukciójából valamint a lámpagyártási technológiai lépések sajátosságaiból fakad, és mérési adatok is alátámasztják.

A nagynyomású kisülőlámpák kisülési csövének két végén található elektródaszerelvény áramátvezető molibdén fóliáinak síkja a hagyományos tájolási elv szerint megegyezik (síkjai párhuzamosak). Az általam javasolt új tájolási módszer lényege, hogy az átellenesen elhelyezkedő elektródaszerelvények molibdén fóliáinak síkjai egymásra merőlegesek. Egyszerűen belátható, hogy ezzel a tájolással a névleges ívhossz értéktől mért eltérés statisztikai eloszlásának terjedelme elemi geometriai okok miatt jelentősen lecsökken. Mindez az alkatrészek illetve a technológiai műveletek pontosságának növelése nélkül - tehát jelentősebb anyagi és technológiafejlesztési ráfordítás nélkül - vezet eredményre.

Az ívhossz terjedelmének csökkenése függ a konkrét kisülési cső geometriától, mértéke tipikusan 10 - 40 % közötti érték. Az ívhossz változékonyságának csökkenése kihat minden elektromos- és optikai lámpajellemző értékének változékonyságára, azaz főbb elektromos- és optikai paramétereiket tekintve egymáshoz jobban hasonlító lámpák készíthetők.

5.

Szakmai irányítással számítógépes végeelem (FEM) program készült a nagynyomású kisülőlámpák kisülési kamráiban kialakuló akusztikus rezonancia jelenség sajátfrekvenciáinak és a sajátrezgési módusok térbeli sebesség- és nyomáseloszlásának számítására [11]. A végeelem program a hullámegyenlet megoldását végzi olyan peremfeltételek mellett, amelyek nem követelik meg sem a hőmérséklet - és így a hangsebesség – térbeli homogenitását a kisülési kamra térfogatban, sem a hőmérséklet-eloszlás hengersizimetriáját. Ilyen feltételek mellett a számítási eljárás lehetővé teszi a lámpák vízszintes működtetési helyzetében a konvekciós gázáramok által okozott “ívkijárlás” jelenségének figyelembe vételét.

Modellünk segítségével számításokat végeztünk kisteljesítményű fémhalogénlámpák (pl. gázkisülő autólámpák) jellemző kisülési kamra geometriáinak térbeli módusképeire és sajátfrekvenciáira vonatkozóan. A számítások alapján meghatároztam a lámpák rezonanciamentes működését biztosító azon frekvenciasávokat a 100 - 550 kHz működési frekvenciatartományban, amelyek mentesek az akusztikus rezonancia okozta ív instabilitásoktól. Ilyen akusztikus rezonancia keltette ív instabilitások léphetnek fel abban az esetben, ha az időben lüktető elektromos teljesítmény betáplálás a kisülési kamra sajátmódusait gerjeszti. A rezonanciamentes frekvenciaablakok jelölik ki a lámpák nagyfrekvenciás - és ennek következtében elvben lényegesen olcsóbban előállítható - elektronikus működtető egységeinek megengedett működési frekvenciáit.

A kisülési kamra hőmérséklet-eloszlásának térbeli inhomogenitása a degenerált üregrezonátor sajátfrekvenciák felbontása révén csökkenti a megengedett, rezonanciamentes működtetési frekvenciaablakok szélességét. A valós gázsebesség- és nyomásviszonyokat az irodalomban eddig közölt számítási módszereknél jobban megközelítő modellünk eredményeinek felhasználásával az elektronika tervezői pontosabb információval rendelkezhetnek az általuk tervezendő nagyfrekvenciás elektronikus működtető egység megkívánt frekvenciastabilitására vonatkozóan.

Korróziós és degradációs jelenségekkel kapcsolatos eredmények 6.-9.

6.

Megterveztem és közreműködésemmel megépítésre került egy emelt hőmérsékletű „in situ” lámpavizsgáló berendezés, amelynek segítségével az üzemelő lámpákhoz hasonló körülmények között vizsgálhatóak a kisülési kamra szennyezései és gázösszetétele [12, 13]. A berendezés működési elve a következő: a stabilizálódott működési állapot elérését követően a kisülési kamrát nagyvákuum körülmények között feltörjük, és a kiáramló gázt fémkapillárison át a lehető legrövidebb idő alatt (azaz a forró gázok és a hideg vákuumkamra fal hőmérsékleti egyensúlyának beállta előtt) egy kvadrupol tömegspektrométer analizátor terébe vezetjük.

A berendezéssel mód nyílik a hagyományos technikával kapott (szobahőmérsékleten végzett roncsolásos mérés) és a „valós működési körülményekhez közeli” gáztértisztasági mérési eredmények közötti kapcsolat megteremtésére, vagyis az egyszerűbb és gyorsabb hagyományos technika „kalibrálására”.

A vizsgálatok segítségével meghatároztam a gépjármű kisülőlámpák működése szempontjából legkritikusabb szennyezőket (víz, hidrogén, szénmonoxid, nitrogén, argon), azonosítottam ezek forrásait és a javító intézkedések hatásosságát a technológiai láncban.

A víz legjelentősebb forrása a fémhalogenid adalék, amely higroszkóposága révén több ezer ppm-nyi vizet képes felvenni nem megfelelő kezelés esetén. A fémhalogenideknek a kisülési kamrába juttatása (adalékolása) a gyártás során nagy tisztaságú argon védőgáz környezetben biztonságosan megoldható. A vízszennyezés szintje tovább csökkent a technológiai idők rövidítésével, valamint magas hőmérsékletű adalékolási technika bevezetésével. A víz hidrogénre és oxigénre disszociál. A hidrogén gyújtási- és ív instabilitási problémákat okoz, míg az oxigén csökkenti a fémhalogenid adalék „hatásos” mennyiségét, oxidálva annak egy részét. A szénmonoxid elsődlegesen az elektródaszervevények grafit alapú húzási maradékszennyezőitől, valamint a levegőből a felületen adszorbeált széndioxid redukciójából származik. Szintje megfelelő szerelvénytisztítási lépésekkel jelentősen csökkent. A nitrogén ugyancsak az adszorbeált levegőből származó maradékgáz, illetve a szivattyú- és argon tisztabox rendszer tömítetlenségének következménye. Az argon a tisztabox rendszerből származó maradékgáz. Százalék alatti szintje megengedhető, nem okoz lámpaműködési problémákat. Az argon maradékgáz szintje a kisülési cső szivattyúzási-öblítési ciklusok

számának növelésével csökkent. A szivattyúzási ciklusok számának a technológiai idők és gépsébségek szabnak határt.

7.

Kidolgoztam több, nem destruktív vizsgálati módszert a kisülőlámpák legkritikusabb szennyezőjének, a hidrogénnek a kimutatására. Ezek közül a kisülési csövek egyenáramú ködfény-kisülési feszültségének ("glimmfeszültség") mérésén alapuló új módszer bizonyult a legalkalmasabbnak analitikai célra. E módszer lényege abban áll, hogy a lámpát kis intenzitású egyenárammal áramgenerátoros jelleggel működtetjük, és így a ködfény-kisülés működési tartományába kényszerítjük. Megállapítottam, hogy a lámpákon mért egyenáramú kapocsfeszültség (glimmfeszültség) értéke szigorúan monoton függvény-kapcsolatban áll a kisülési kamra töltőgázának hidrogén gázszennyező koncentrációjával.

Bebizonyítottam, hogy a mérés érzékenysége lehetővé teszi a lámpák működését jelentősen - de még nem katasztrofálisan - befolyásoló hidrogén szennyezési szintek kvantitatív meghatározását. A mérés pontossága és érzékenysége kis hidrogén szennyezettségi szinteknél (< 500 ppm) és kis glimm áramerősségeknél (< 0,5 mA) a szükséges stabilizálódási idők betartása mellett 100 ppm nagyságrendű.

8.

Röntgen fotoelektron spektroszkópiás (XPS) és atomabszorpciós (AAS) vizsgálatok segítségével nyomon követtem a fémhalogénlámpák fém-üveg átmeneteiben (lapításaiban) található áramátvezető molibdén fólia és a fémhalogénid adalékanyagok között zajló kémiai degradációs folyamatok időbeli alakulását.

Modellkísérletek és gyártásból származó lámpákon végzett mérések segítségével megállapítottam, hogy a molibdén és a kvarcüveg között létrehozott fém-üveg kötés korróziójában alapvető fontosságú fémhalogénid adalék komponens a nátrium-jodid [14, 15, 16]. A molibdén és a nátrium-jodid reakciója során keletkező nátrium-molibdát (Na_2MoO_4) porózus mechanikai szerkezete következtében a molibdén fólia és a kvarc kisülési cső közötti $\text{Mo-MoO}_2\text{-SiO}_2$ kémia kötés [17] felbomlik az eredetileg vákuumzáró fém-üveg átmenetben, és ez végül a lámpa meghibásodásához vezet.

Más adalék komponensek, mint például az indium-jodid, ugyanakkor nem lépnek kémiai reakcióba a molibdénnel, csupán diffúzió folytán idővel behatolnak az anyag belső

rétegeibe. Indium-jodid alapú fémhalogén adalékrendszerrel működő lámpáknál emiatt nem lép fel jelentős károsodás a fém-üveg kötésben.

Méréseink összhangban vannak a különböző fémhalogenid adalék-összetétellel készült valós lámpákon végzett élettartam-vizsgálati eredményekkel.

9.

Röntgen fotoelektron spektroszkópiás (XPS) vizsgálatokkal nyomon követtem a fémhalogenid adalékanyagok és elektródaanyagok, továbbá a kisülési kamra gázszennyezőinek beépülését a nagynyomású kisülőlámpák kvarc kisülési kamrájának falába. Megállapítottam hogy a beépülő adalékanyagok (Na), valamint az elektródák porlódásából és párolgásából származó anyagok (W, Th) mennyisége a működési idővel monoton nő a kvarc kisülési cső falában. Ezen túlmenően, a nátrium kis ionrádiusza következtében a kisülési kamra falán át történő diffúziója révén folyamatosan fogy a kisülési plazma anyagából, amelyet a kisülési cső külső felületén végzett szekunder-ion emissziós (SIMS) vizsgálataink is igazoltak.

További XPS mérésekkel bizonyítottam, hogy idővel a kvarc kisülési kamrafalban SiC vegyület is képződik. A SiC képződés nagy valószínűséggel a kisülési kamra gázterének CO szennyezéséből és a különösen magas kisülési kamrafal hőmérséklet eredménye. SiC keletkezése SiO₂ felületen magas hőmérsékletű, CO atmoszférában végzett hőkezelés hatására más tudományterületen ismert. Ez alátámasztja a CO gáztér-szennyezésnek a kvarc kisülési kamrafal degradációs reakcióiban játszott szerepére vonatkozó feltételezésünk helyességét.

Az ismertett folyamatok eredményeként a kvarcüveg (fused silica) kisülési kamrafal folyamatosan átkristályosodik (azaz termodinamikailag stabilabb, kristályos szerkezetű kvarccá alakul), fényáteresztő képességét és mechanikai szilárdságát folyamatosan elveszíti.

5. A Ph.D. értekezés téziseihez közvetlenül kapcsolódó saját közlemények

1. Á. Böröczki - I. Gaál - S. Gurbán - M. Menyhárd - L. Petrás - L. Balázs:
Dissociation of thorium oxide on the surface of free surface tungsten
(*10th International Symposium on the Science and Technology of Light Sources, Toulouse, France, Poster No. 203, 2004, Proceedings, IOP Publishing Ltd.*)
2. Á. Böröczki - I. Gaál - S. Gurbán - M. Menyhárd - E. Horváth - A. L. Tóth - L. Petrás - L. Balázs:
Electron stimulated thorium adatom enrichment on the surface of thoriated tungsten below 2300K
(*16th International Plansee Seminar, Reutte, Austria, Paper No. 304, 2005, Proceedings, Plansee Holding AG*)
3. Á. Böröczki - I. Gaál - S. Gurbán - M. Menyhárd - E. Horváth - A. L. Tóth - L. Petrás - L. Balázs:
Electron stimulated thorium adatom enrichment on the surface of thoriated tungsten below 2300K
(*International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, Volume 24, Issue 4, July 2006, pp. 343-349, Elsevier Ltd.*)
4. Boroczki, Agoston:
High pressure mercury vapour discharge lamp with reduced sensitivity to variations in operating parameters
(*European Patent Applications, EP 1 134 776 A2, 15.11.2000*)
5. Scott, Curtis Edward – Boroczki, Agoston – Tambiny, Anthony John – Greskovitch, Charles David – Preston, Barry:
Single ended ceramic arc discharge lamp and method of making the same
(*European Patent Application, EP 1 111 654 A1, 20.12.2000*)
6. Ágoston Böröczki – István Csányi – Sándor Holló – Michael R. Armbruster:
Lighting system for well-defined beam pattern generation using ceramic metal halide lamp as the light source
(*United States Patent, US 6,536,918 B1, Aug. 23, 2000*)
(*World Intellectual Property Organization, WO 02/17350 A1, 28 February, 2002*)

7. Böröczki Ágoston:
Gépjármű kisülőlámpa kifejlesztése és gyártásindítása
(*Nemzeti Kutatási és Fejlesztési Programok, 3. Program, „Élenjáró módszerek és technológiák”, Új hazai kutatási eredmények, pp. 21-33, Nemzeti Kutatási és Technológiai Hivatal, 2004.*)
8. Böröczki Ágoston:
Gépjármű kisülőlámpa kifejlesztése és gyártásindítása
(*Nemzeti Kutatási és Fejlesztési Programok, 3. Program, az OM 3 045/2001 számú projekt vezetője, időközi szakmai jelentések (10) és beszámoló jelentések (2), 2001-2004.*)
(*a nyolc legsikeresebb NKFP projektet bemutató konferencián tartott előadás, Magyar Tudományos Akadémia Felolvasóterem, 2003. május 19.*)
9. M. Gyukics – P. Maák – L. Jakab – P. Richter – T. Torma - Á. Böröczki:
A computational model for simulating volume-emitters in arc lamps
(*10th International Symposium on the Science and Technology of Light Sources, Toulouse, France, Poster No. 152, 2004, Proceedings, IOP Publishing Ltd.*)
10. Boroczki, Agoston:
Electrode arrangement for a discharge arc chamber
(*European Patent Application, EP 1 197 984 A1, 11.10.2001*)
11. Attila Vágvölgyi - Ágoston Böröczki – Szabolcs Gyimóthy – Imre Sebestyén:
Modeling acoustic resonance in high-pressure discharge lamp arc chambers
(*International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics No.13 (2001/2002) pp. 427 - 430, IOS Press*)
12. Ágoston Böröczki - Péter Kovács - György Hárs:
Investigation of gas composition on discharge lamps fractured during operation by means of mass spectrometry
(*Measurement Science and Technology, 16 (2005) 1–5, IOP Publishing Ltd.*)
13. Péter Kovács – Ágoston Böröczki – György Hárs:
Investigation of Impurities in High Intensity Discharge Lamps by Destructive Methods with Quadrupole MS
(*JVC11, Joint Vacuum Conference, Prague, Czech Republic, Poster No. PW35, 2006*)
14. Á. Böröczki - G. Dobos - K. Josepovits – Gy. Hárs:
Surface Analytical Studies on Corrosion Reactions of Metal Halide Salts
(*EMAS 2005 / IUMAS-3, European Microprobe Analysis Society, Florence, Italy, Conference Poster, 2005*)

15. Á. Böröczki - G. Dobos - K. Josepovits - Gy. Hárs:
High Temperature Reactions between Molybdenum and Metal Halides
(*Applied Surface Science* 252 (2006) 8309-8313, Elsevier Ltd.)
16. G. Dobos - Á. Böröczki - K. Josepovits:
High temperature reactions between molybdenum and metal halides
(*COST Materials Action 529*, „Efficient Lighting for the 21st Century”, 2nd Work Group Meeting on Materials Issue in Lighting Technology, Budapest, Paper, 2006)
17. Gábor Dobos – Katalin V. Josepovits – Ágoston Böröczki – István Csányi – György Hárs:
Heat Treatment of Molybdenum under Vacuum Conditions
(*JVC11, Joint Vacuum Conference, Prague, Czech Republic, Poster No. PM1, 2006*)