

Laboratóriumi plazmák időbeli fejlődésének vizsgálata

Készítette: Hajdu Péter

Létesítménymérnök MSc

Debreceni Egyetem, Természettudományi és Technológiai Kar

Témavezetők: Dr Biri Sándor, Rácz Richárd

MTA Atommagkutató Intézet, ECR Laboratórium



Debrecen

2012

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. ECR ionforrás bemutatása	4
3. ECR ionforrás működési elve	6
3.1. A vizsgált tranziens jelenség	7
4. Kísérleti berendezés ismertetése	10
5. Vizsgálati módszerek	12
5.1. Mérés elektrosztatikus szondával	12
5.1.1. Mérési eredmények kiértékelése	14
5.2. Mérés gyorskamera segítségével	25
5.2.1.1. Gáznyomás függvényében	27
5.2.1.2. Becsatolt mikrohullámú teljesítmény függvényében	29
6. Területorientált kiértékelés	31
7. Diskusszió	35
8. Összegzés	36
Irodalomjegyzék	37
Köszönetnyilvánítás	38

1. Bevezetés

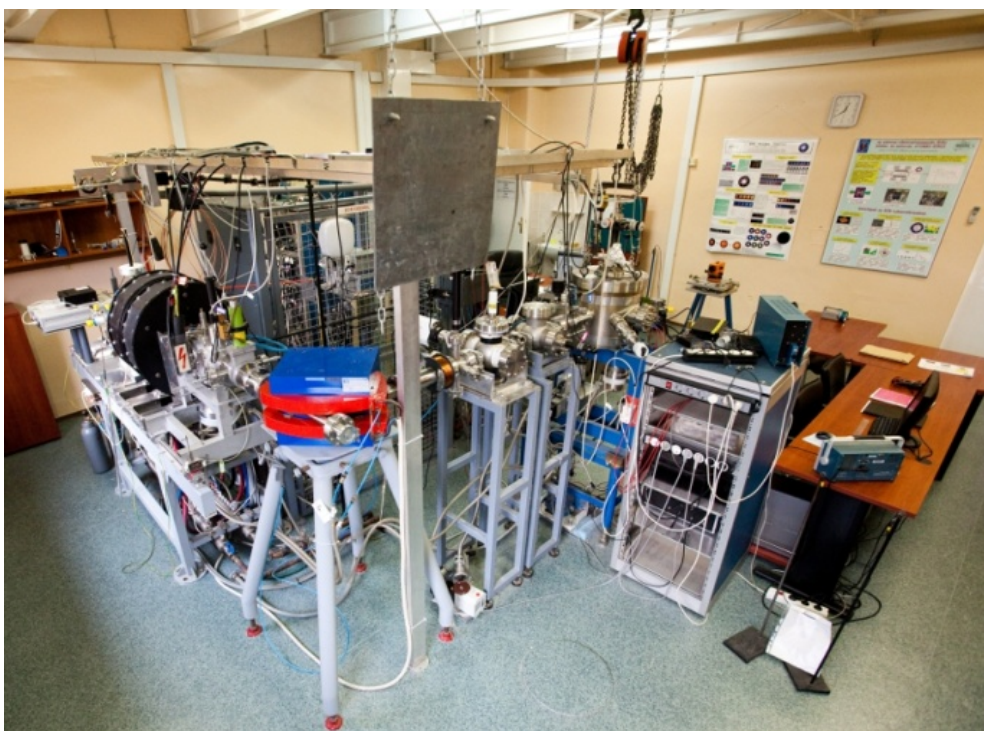
Plazmának speciális feltételeket kielégítő ionizált gázt (az atomok elvesztették egy vagy több elektronjukat) nevezünk. Általában a plazma három összetevő keverékét jelenti: semleges atomokét, szabad elektronokét illetve pozitív ionokét. A plazma az anyag leggyakoribb állapota a természetben. A világegyetemünk több mint 99,9%-át plazma halmazállapotban lévő anyag alkotja, és a mindennapi életben is gyakran találkozhatunk vele, mint pl.: gyertya lángja, ívhegesztés, villám, plazma tv esetén. Laboratóriumi körülmények között is létrehozható, és szabályozott körülmények között történő „megcsapolásával” ionforrásként szolgálhat. Az ionforrások lelke a plazma. Az általuk előállított ionnyaláb minőségét a plazma nagymértékben meghatározza. Így a plazmában – a külső beállítási paraméterek hatására – bekövetkező folyamatok ismerete elemi fontosságú a minél jobb minőségű nyaláb előállítása szempontjából.

A plazmafizikai kutatások azok fundamentális jelentőségén túl, gyakorlati szempontból is nagy jelentőséggel bírnak. Intenzív kutatásuk indokolt többek között anyagtudományi-, atomfizikai kísérletek továbbá felületmódosítások esetén.

Egy a plazma kialakulását és kialvását feltérképező kutatásba kapcsolódtam be, dolgozatomban pedig az ezen a területen végzett munkámat és elért eredményeimet foglalja össze.

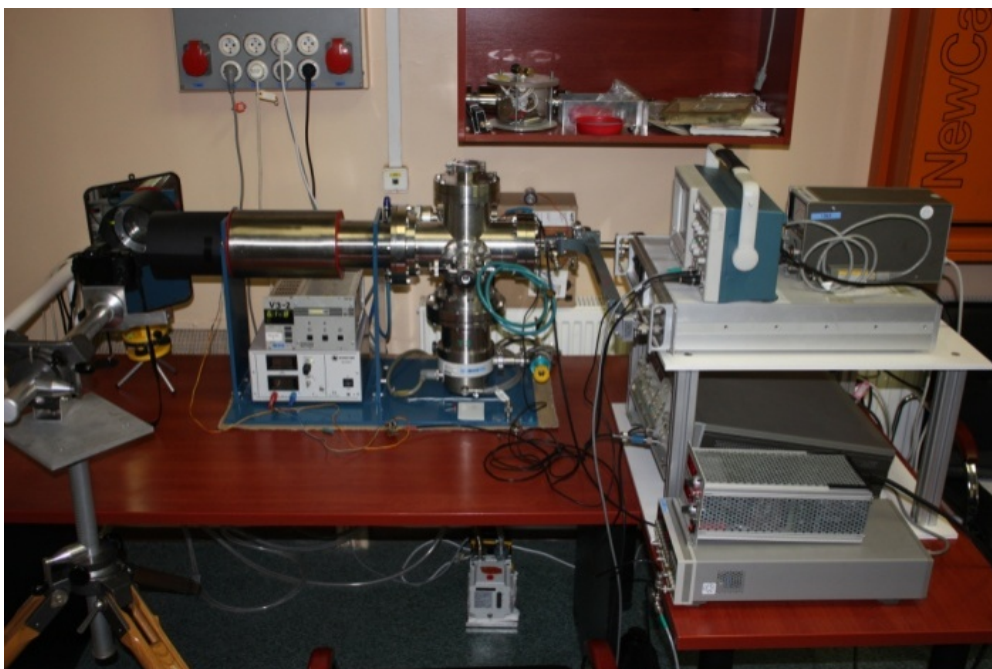
2. ECR ionforrás bemutatása

Az ECR (elektron-ciklotronrezonanciás) ionforrások leggyakrabban nagyenergiás gyorsítók injektoraként használatosak. Azonban az ATOMKI-ban található 14GHz-es, szobahőmérsékleten üzemelő ECRIS [1] különálló, kisenergiás részecskegyorsítóként szolgáltató változatos nyalábokat és plazmákat atomfizikai-, anyagtudományi- és plazmafizikai kutatások számára. Ez az ionforrás nagy töltésű ionok előállítására szolgáló berendezés (*1. ábra*). A természetben megtalálható elemek nagy részéből képes nagy ionizáltsági fokú plazmát és ionnyalábot előállítani.



1. ábra: ECR ionforrás

Az ECR laboratóriumban nemrégiben megépítésre került egy kisméretű asztali plazmaforrás [2] (*2. ábra*) is, mely sokban hasonlít és sokban különbözik a nagy berendezéstől. A legjellemzőbb különbség, hogy esetében csak radiális plazmacsapdázás van (nincs axiális) és nincs nyalábkivonás sem. A kisméretű kompakt berendezés oktatási, demonstrációs és mérés-előkészítési célokat szolgál, de kisebb kutatásokra is kiválóan alkalmas.

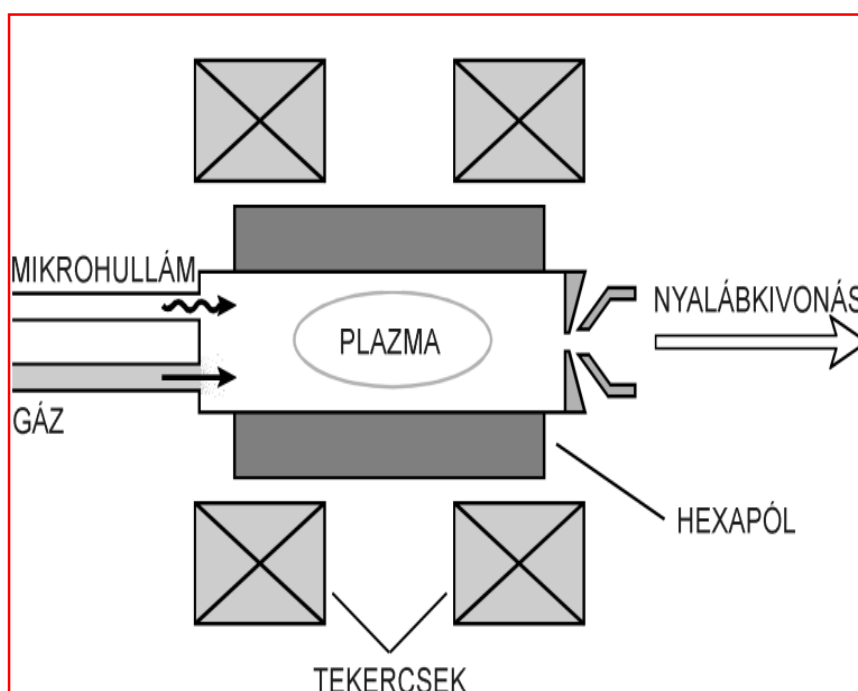


2. ábra: Kisméretű asztali plazmaforrás

3. ECR ionforrás működési elve

Magában az ECRIS-ben – vagyis az elektron-ciklotronrezonanciás ionforrásban – energiaátadás az elektronok részére mikrohullámok segítségével történik. A felgyorsított elektronok a plazmakamrába bejuttatott atomokból ionokat hoznak létre (3. ábra). A mágneses térben az elektronok és az ionok csapdába esnek. Majd ezt követően a csapdázott elektronok illetve ionok egymással ütköznek egyre nagyobb töltésű ionokat hozva létre, melyeket kivonhatunk nyaláb formájában, és azt egy adott céltárgyra (target) vagy utógyorsítóba vezethetjük.

Az ionforrás egyik legjelentősebb alrendszere a mágneses csapda, melynek alapvetően két feladata van. Az egyik az, hogy összetartsa a töltött részecskéket, másképpen fogalmazva csapdázza azokat. A másik pedig, hogy a csapda biztosítsa a feltételt ahhoz, hogy a mikrohullám energiát tudjon átadni az elektronoknak.



3. ábra: Sematikus ábra az ATOMKI ECRIS felépítéséről és működési elvéről. A nagy berendezés esetén beszélünk nyalábkivonásról, azonban az általam használt asztali plazmaforrásnál kivonás nem történik és nincsenek tekercsek.

Ugyanis az elektronok ott tudnak energiát felvenni a mikrohullámtól, ahol azok mágneses tér indukció vektora körüli körfrekvenciája megegyezik a becsatolt mikrohullám frekvenciájával. A6 pólusú 24 szegmensből álló állandó mágnes – ún. hexapól mágnes – csak az egyik része a mágneses csapdának, mivel található körülötte két elektromágnes is. Ez utóbbi az axiális csapda, míg a hexapól csak a radiális csapdázásért felelős. A szuperpozíciójuk által létrehozott mágneses tér olyan szerkezetű, hogy a benne lévő töltött részecske a plazmakamra bármely pontjából indulva olyan erőt érez, mely visszatéríti őt a középpont irányába. Ez az úgynevezett B-minimum mágneses struktúra. Ellipszoidhoz hasonló ekvimagnetikus felületek jönnek létre. A becsatolt mikrohullámú frekvencia által az ECR ionforrások alapegyenlete (1) által meghatározott módon kiválasztott ekvimagnetikus felületet rezonáns zónának nevezzük.

$$(1) \omega_{RF} = \frac{e}{m_e} B_r$$

Ahol e az elemi töltés, m_e az elektron tömege, B_r rezonáns tér értéke, az ω_{RF} pedig a becsatolt mikrohullámú körfrekvencia, mely ω_{RF} ha megegyezik az ω a körfrekvenciával, akkor jön létre a ciklotronrezonancia.

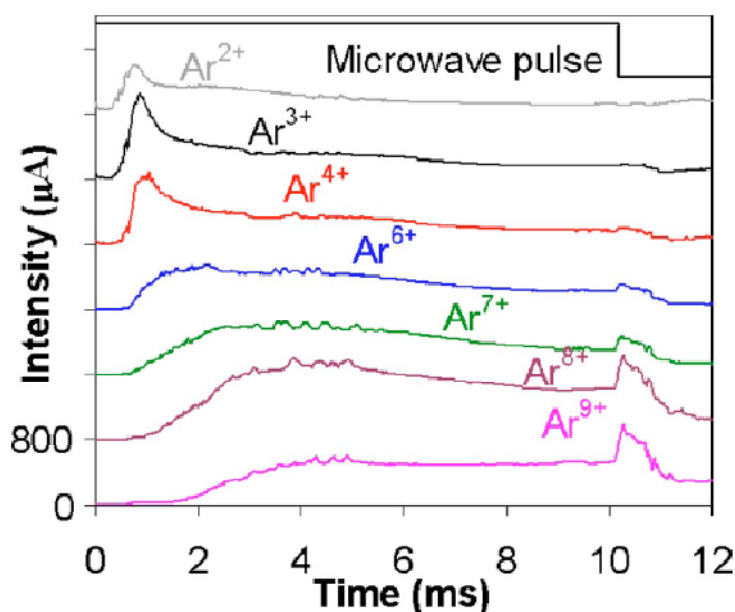
Azonban a kisméretű kompakt plazmaforrás esetén csak radiális csapdázásról beszélhetünk, így nem ellipszoid alakú, hanem egymással koaxiális alakú ekvimagnetikus hengerfelületek alakulnak ki.

3.1. A vizsgált tranziens jelenség

Az ECR ionforrásokban előállított laboratóriumi plazmák leggyakrabban folyamatos üzemmódban működnek. Azonban bizonyos esetekben az impulzus (szaggatott) üzemmód is indokolt lehet. Hatására két tranziens jelenség is megfigyelhető (4. ábra).

Az egyik az ún. kialvási csúcs a mért áramnyalámban –amire mostantól afterglow-ként fogok hivatkozni– egy régóta ismert és jól alkalmazott csúcs, mely az impulzus végén figyelhető meg. A mikrohullám megszűnésekor jelentkezik, és rövid időszakra a töltésállapoteloszlás nagyobb töltésállapotok irányába való eltolódását eredményezi.

Rev. Sci. Instrum. 79, 02A314 (2008)

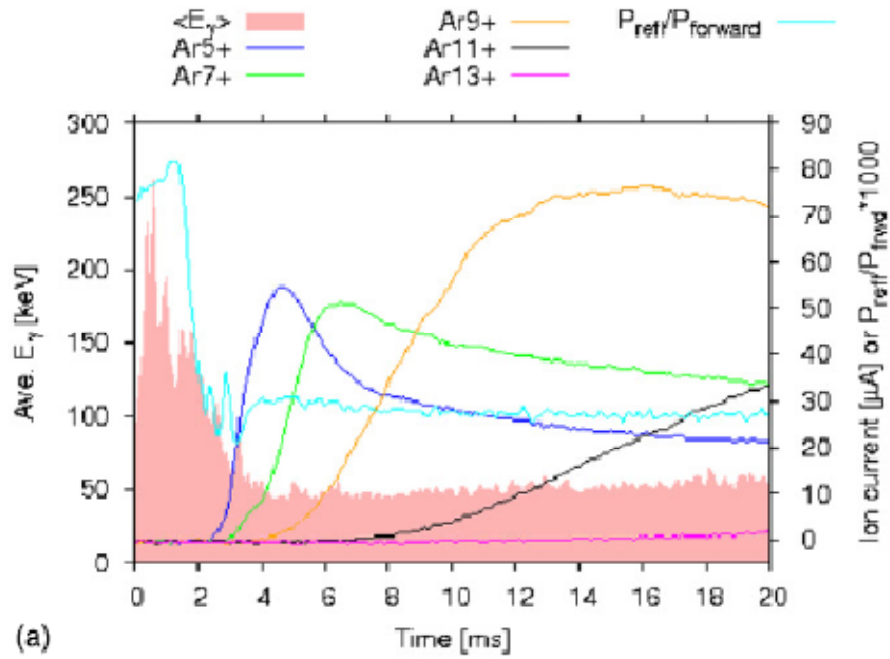


4. ábra mutatja a preglow és az afterglow jelenségeket [3].

A másik a nemrégiben (2004) felfedezett ún. begyújtási tranziens – amire mostantól úgy fogok utalni, hogy preglow– napjainkban intenzív kutatások tárgyát képezi, vizsgálata pedig nagy jelentőséggel bír. A plazmafizikai kutatások fundamentális jelentőségén túl pontos megértése gyakorlati szempontból is indokolt. Ugyanis a jelenség feltérképezését követően effektív és gyors ionizáció lehetőségével kecsegtet az olyan gyorsan bomló radioaktív nyalábokat igénylő kutatások esetén, mint például a neutrínó fizikával foglalkozó Betabeam project[4].

A preglow csúcs hátterében az elektronok energia sűrűség függvényének (EEDF) gyors változása áll, amely a kezdeti szuperadiabatikus eloszlásból Maxwell átmenetbe való alakulását jelenti, melynek kísérleti bizonyítéka az 5. ábrán látható. Ezek a mérések röntgen tartományban készültek, és kísérleti bizonyítékát adták a szuperadiabatikus sűrűségfüggvénynek, ám a preglow csúcsot röntgen tartományban nem tudták kimutatni (csak nyalábáramban), mert ott kisenergiájú elektronok keletkeznek nagy számban, melyek nem röntgen tartományban sugárzó ionokat gerjesztenek. Ezért a preglow csúcs elektromágneses

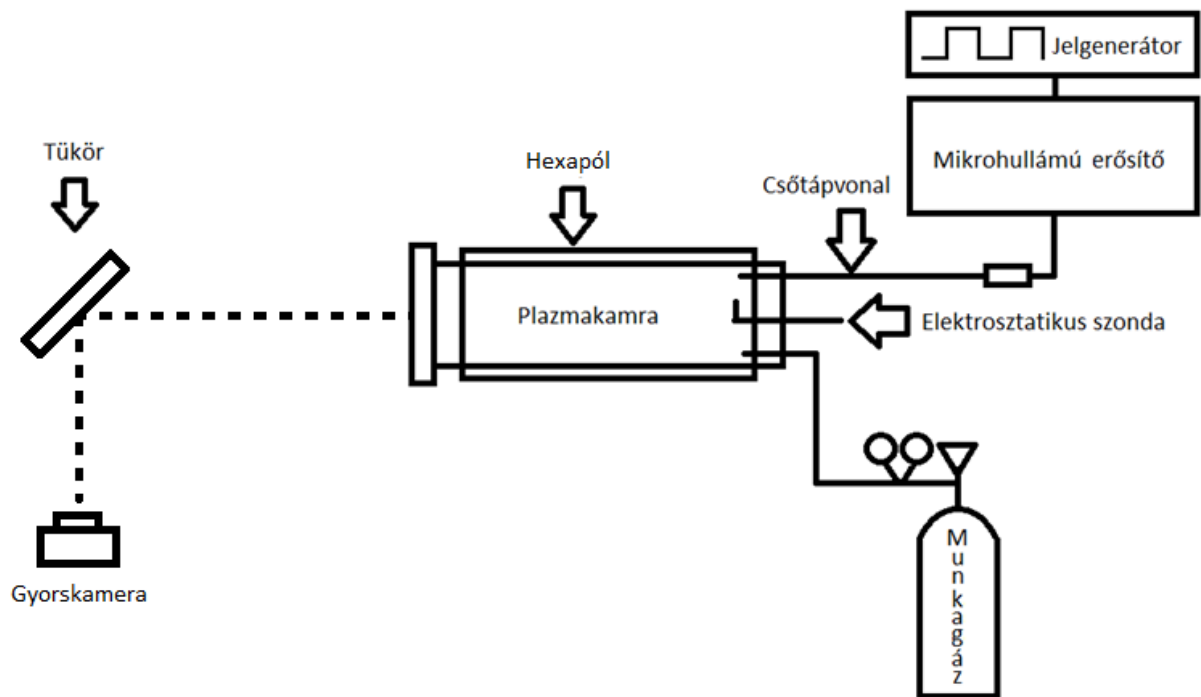
sugárzásban történő kimutatásához alacsony fotoenergián történő mérések szükségesek. Én tehát az ATOMKI ECR laboratóriumában a preglow csúcs kimutatását és a plazma kialakulását és kialvását feltérképező kutatásba kapcsolódtam be, a dolgozatom pedig az ezen a területen végzett munkámat és eredményeimet foglalja össze.



5. ábra: A kezdeti superadiabatikus eloszlást követően Maxwell átmenetbe történő átalakulás látható [5].

4. Kísérleti berendezés ismertetése

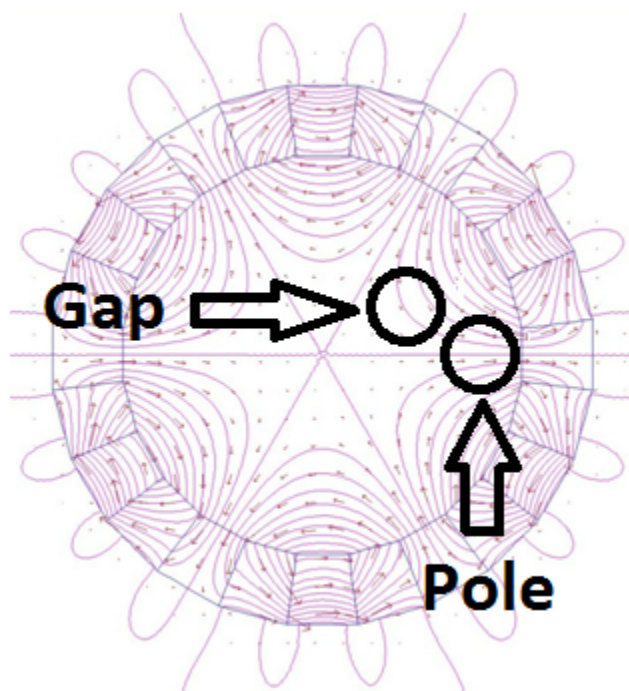
Munkámat az impulzus üzemben működtetett asztali plazmaforráson végeztem melynek sematikus elrendezése 6. ábrán látható. A nagy ionforrástól eltérő módon az asztali plazmaforrás nem rendelkezik elektromágneses tekercessel, mely az axiális csapdázásért felelős, csak a radiális csapdázást biztosító hexapól mágnessel. Így nem elipszoid alakú ekvimagnetikus terek alakulnak ki, hanem egymással koaxiális hengerfelületek.



6. ábra: A mérési összeállítás elvi sematikus ábrája

Ez a hexapól mágnes egy 24 szegmensből álló neodímium-vas-bór ötvözet szupererős 6 pólusú mágnes, melynek erővonal szerkezete a 7. ábrán látható. Az ábrán feltüntettem a pólus (pole) és a pólusköz (gap) pozíciókat, amelyekre a későbbiekben így (tehát magyarul) fogok hivatkozni.

A mérési elrendezésben található egy jelgenerátor (sweeposcillator), amely külsőjelel is modulálható (méréseink során a moduláló frekvencia $f_{\text{mod}}=10\text{Hz}$ volt), és melynek segítségével képesek vagyunk a mikrohullámú jelet amplitúdó modulálni, vagyis impulzus üzemben működtetni.



7. ábra: A hexapól mágneses erővonal szerkezete.

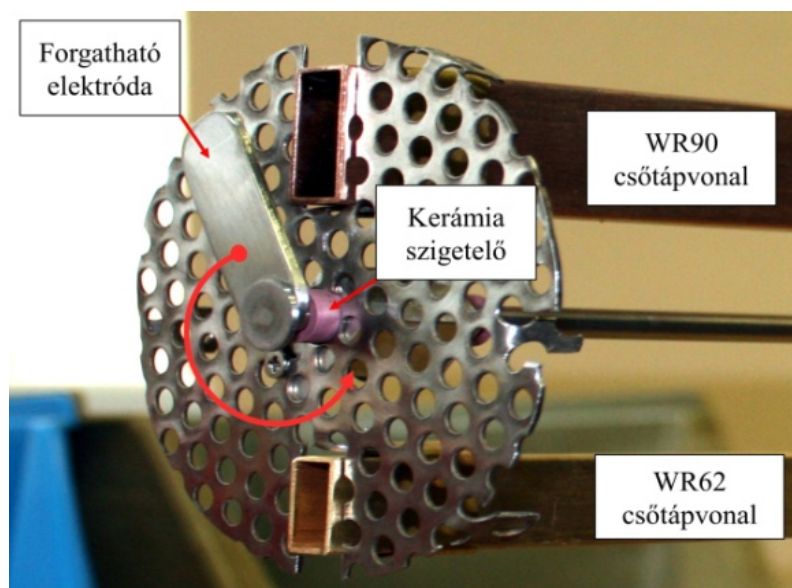
A plazma begyűjtéséhez szükséges mikrohullámnak a plazmakamrába való bejuttatása csőtápvonalon keresztül valósul meg, mely csőtápvonal pedig a mikrohullámú erősítőn keresztül kapja meg a mikrohullámú jelet. Plazmakamra belsejében található a plazma. A plazmakamra mindkét végén le van zárva ráccsal, mely a becsatolt mikrohullám kiszóródásának a csökkentésére szolgál (biztonságtechnikai okokból nem elhanyagolható szempont). Egy kvarc benéző ablakon keresztül pedig 45° szögben elhelyezett tükör segíti azt, hogy biztonságos távolságból lehessen fényképeket készíteni a laboratóriumi plazmáról kamera segítségével. A mérési elrendezés egy másik fontos eleme a forgatható elektrosztatikus szonda (diszk), mellyel plazmadiagnosztikai mérések lehetségesek. Az elektrosztatikus szonda segítségével mért –esetünkben– ionáram értékek jól visszatükrözik a plazma tulajdonságait. Ezzel segítve a plazmában lejátszódó fizikai jelenségek könnyebb megértését. A kamrába bejuttatott munkagázként levegőt használtunk.

5. Vizsgálati módszerek

A plazma időbeli fejlődésének vizsgálata során alkalmazott mérési módszerek alkalmazását megelőzően alapvetően két fontos szemléletmódot vettem figyelembe. Az egyik az volt, hogy a plazmát belülről kell megvizsgálni, vagyis egy, a plazmakamra belsejében elhelyezett szondával [6] vizsgáljuk a plazma viselkedését, így nyerve betekintést annak működési mechanizmusába. A másik pedig az volt, hogy nagyobb rálátást kapjunk a plazmában lejátszódó folyamatokra, – kívülről vizsgálva gyorskamera segítségével– vagyis feltérképezni azokat a fotonokat, amelyeket emittál a plazma. Így esett a választás gyorskamerás mérésre a második mérési módszerként. A következő két alponthoz ezeket a mérési eljárásokat ismertetem részletesen.

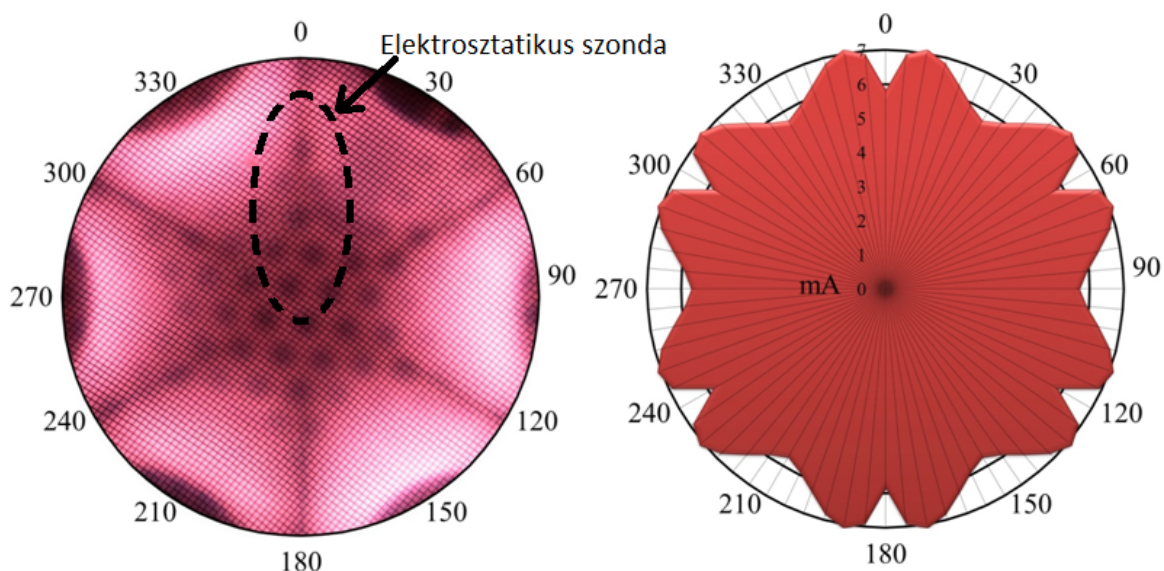
5.1. Mérés elektrosztatikus szondával

Az elektrosztatikus szonda gyakorlatilag nem más, mint egy elektróda, mely feszültség-áramkarakterisztikák mérésére szolgál. Ennek segítségével feltérképezhetőek a plazma részecskékből mért áramértékek az idő függvényében is. Így kapható átfogó kép a plazma szerkezetéről, mely nagyban hozzájárul a laboratóriumi plazmák mechanizmusának a megértéséhez. Ez a szonda nagyméretű és speciális formájú volt, alkalmas a plazma sűrűségviszonyainak leképezésére.



8. ábra: Elektrosztatikus szonda

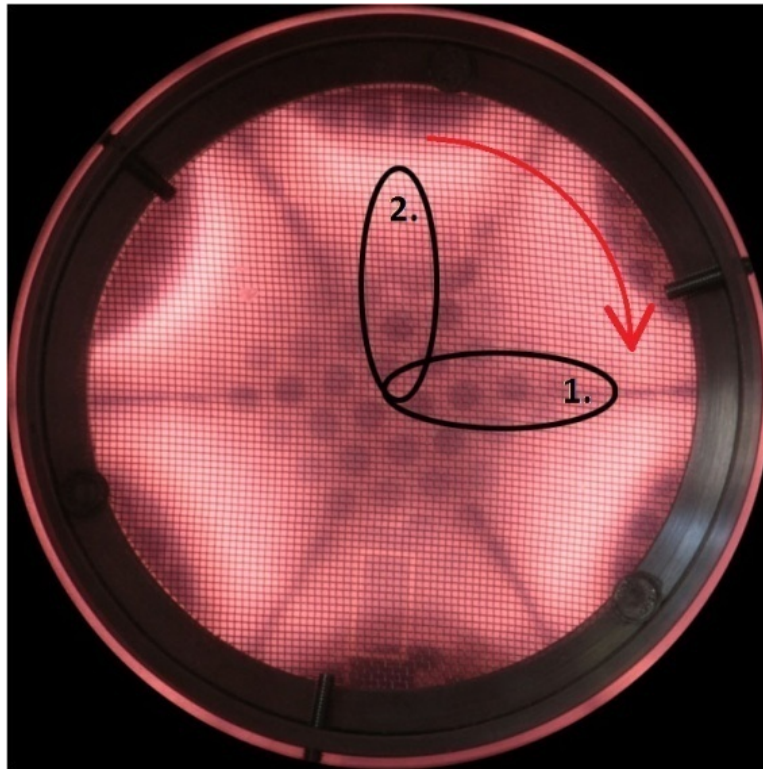
Ugyanis az elektrosztatikus szondával mért áramértékek fix feszültségen, körbeforgatva, a szög függvényében tendenciózan tükrözik a plazma szerkezetét (hatékonyságát a 9. ábra szemlélteti). Ezek az áramértékek nagyon jól összhangban vannak a plazma tulajdonságaival, sajátosságaival. Ezzel szemléltetve, hogy az elektrosztatikus szondás mérési módszer hasznos információkkal szolgál a plazma részecskékből kialakuló áram értékek analizálását követően a plazma belsejében kialakuló illetve abban lezajló folyamatokról.



9. ábra: Bal oldalon az elektrosztatikus szonda elvi helyzete látható a plazmakamra alapsíkjával párhuzamos metszetéhez képest, a jobboldalon pedig az elektróda áram látható az elfordulási szög függvényében.

5.1.1. Mérési eredmények kiértékelése

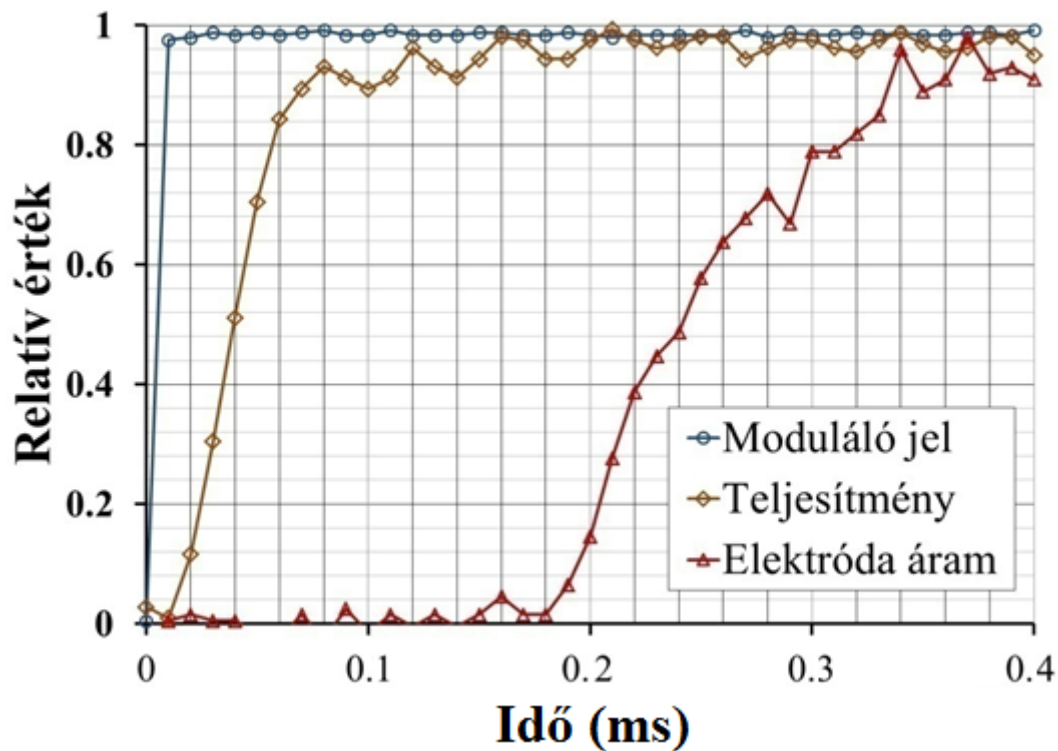
Az elektrosztatikus szondával történő méréseimet alapvetően két részre lehet bontani. Az egyik, amikor az elektrosztatikus szonda pólus pozícióba történő beforgatásával történt, a másik, pedig amikor a szonda pólusköz állásban volt. A szonda ezen pozíciói jól láthatóak a 10. ábrán.



10. ábra: A szonda pólus (1.) illetve pólusköz (2.) pozíciója látható.

Az oszcilloszkóp által kapott adatok segítségével meghatározható a moduláló jel, a mikrohullámú teljesítmény jel, illetve az elektródaáramok időbeli karakterisztikája.

A moduláló jel felépüléséhez $10\mu\text{s}$ -ra van szükség. A 25W -nál mért teljesítmény jel azonban $100\mu\text{s}$ késéssel rendelkezik a moduláló jelhez képest. Az ehhez tartozó elektródaáram érték pedig $200\mu\text{s}$ -ot késik.

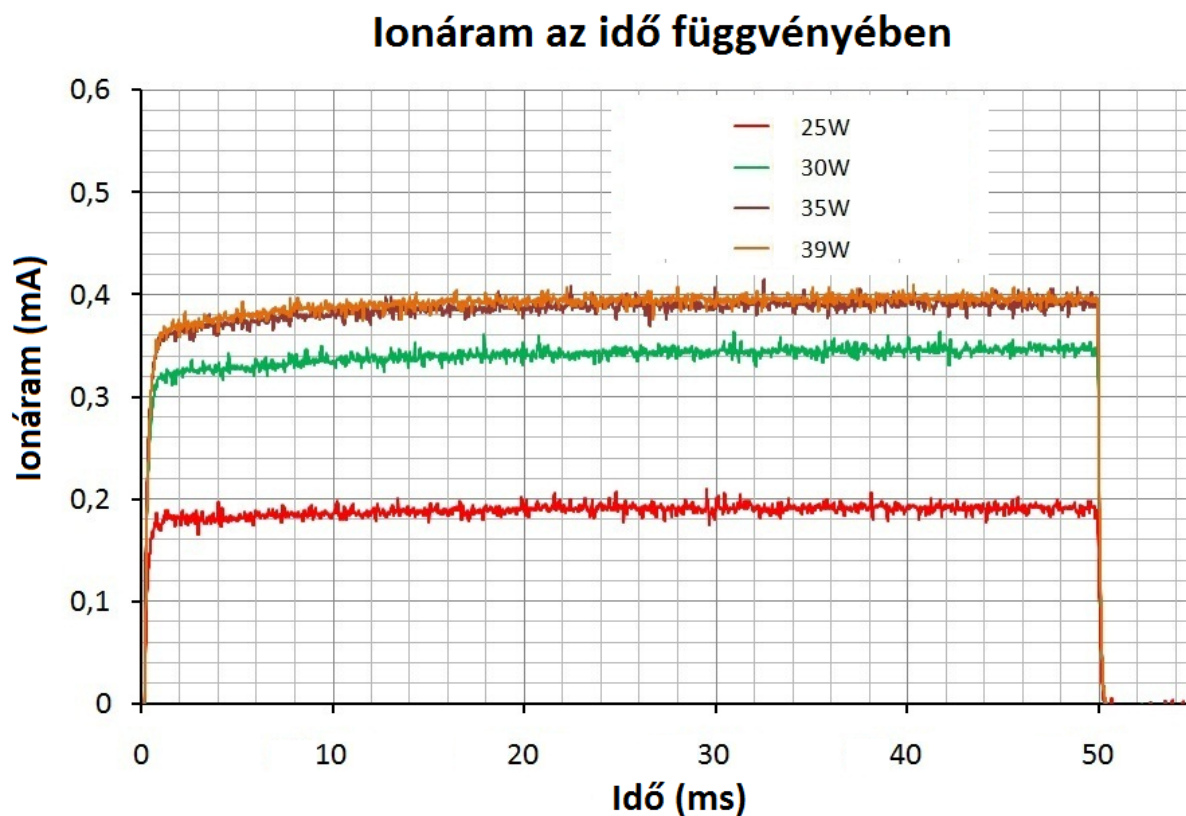


11. ábra: A jelgenerátor által előállított moduláló jelhez viszonyítva a teljesítmény illetve az elektróda áram időbeli fejlődése látható.

5.1.1.1. Mérés pólus pozícióban

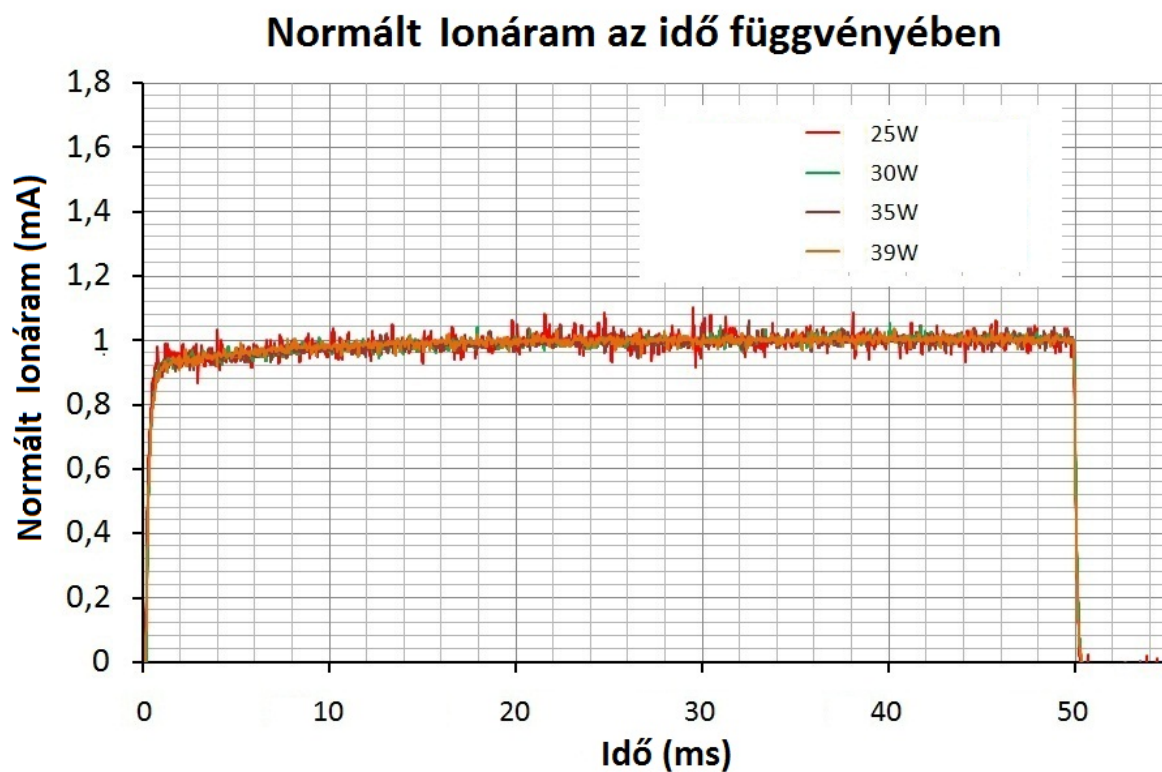
5.1.1.1.1. Becsatolt mikrohullámú teljesítmény függvényében

A méréseket először a becsatolt mikrohullámú teljesítmény függvényében végeztük. A munkapontok felvétele a következő pontokon történt: 25W, 30W, 35W, 39W. A plazma minimális begyújtási teljesítménye 21W volt, és mivel ezen a teljesítményen a jel-zaj arány igen nagyra bizonyult, így ez a munkapont nem került kiértékelésre, mivel ahhoz, hogy tendenciózus eredményekre jussunk, fontos, hogy a zaj a lehető legkisebb legyen.



12. ábra: Ionáramok az idő függvényében, szonda pólus pozícióban

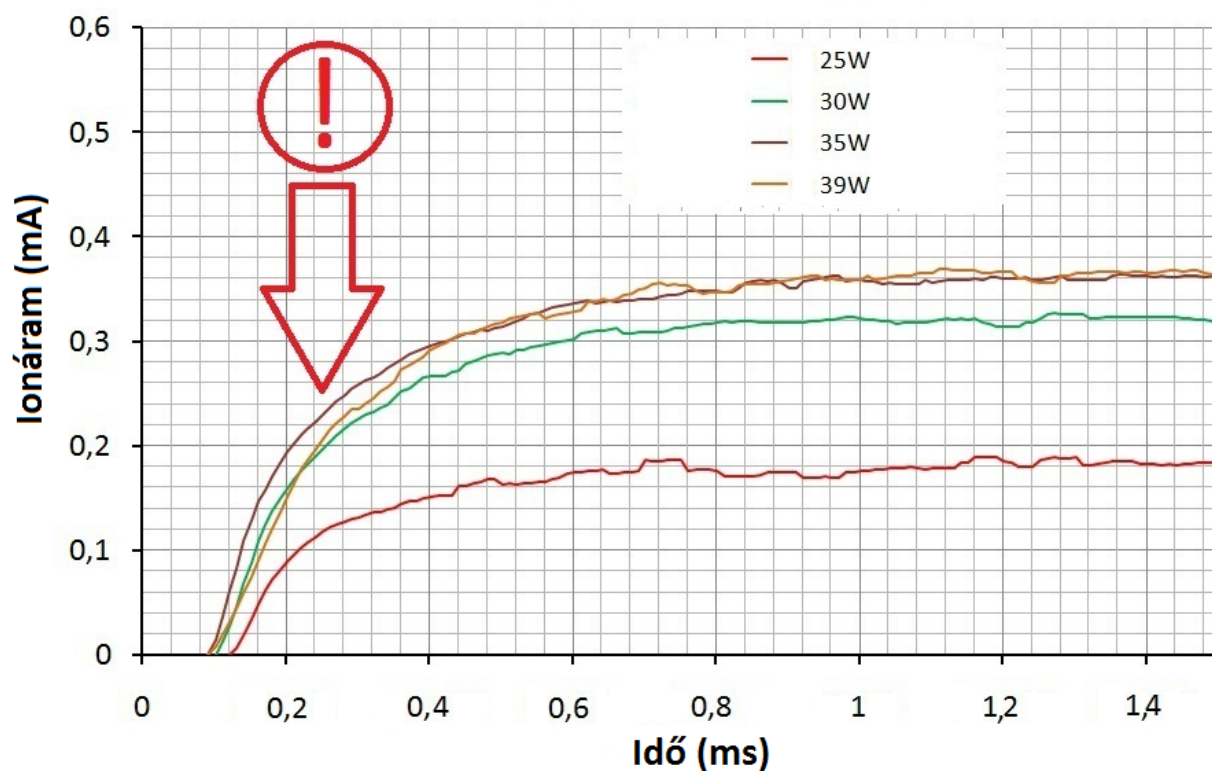
A 12. ábrán jól látható, hogy minél nagyobb a teljesítmény, annál nagyobb az elektróda áram telítési értéke. Másképpen fogalmazva az elektródán folyó áramértékek telítési értéke a teljesítménnyel monoton nő. Pólus pozícióban nem tapasztaltunk preglow jelenséget.



13. ábra: Normált ionáram értékek az idő függvényében

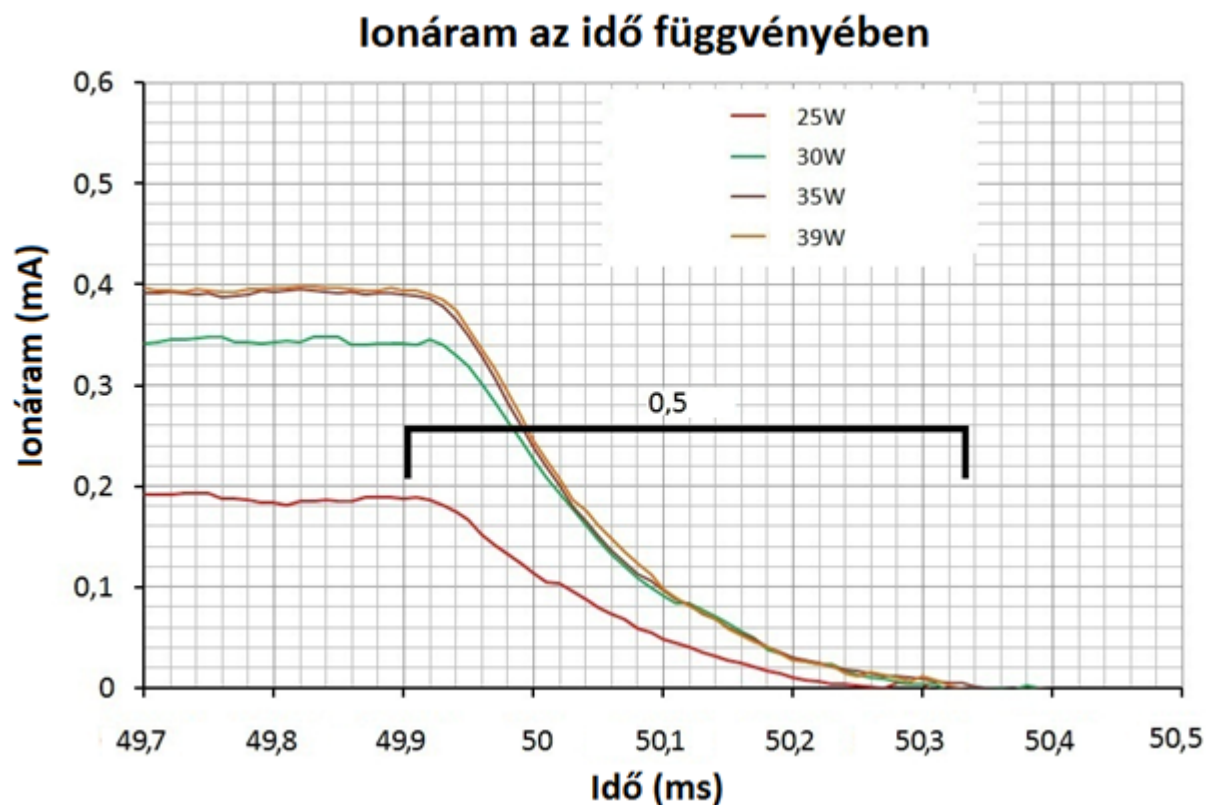
Összenormalálást követően a jelek az 13. ábrán látható módon néznek ki. Teljesítménytől függetlenül a jelek időbeli lefutása közel azonos. Vagyis az elektrosztatikus szondán folyó áram időbeli karakterisztikája becsatolt mikrohullámú teljesítménytől független.

Ionáram az idő függvényében



14. ábra: A 12. ábra kezdeti részének kinagyítása

Az elektródán mért áramértékek telítési értéke a teljesítménnyel monoton növekvő összefüggést mutat. A 14. ábrából még jobban megállapítható, hogy (pólus pozícióban) nem tapasztalható begyújtási tranziens (preglow).



15. ábra: Az ionáramok az idő függvényében kialakulási része.

A jelek elhalási ideje egy nagyságrenddel rövidebb, mint azok felfutási ideje.

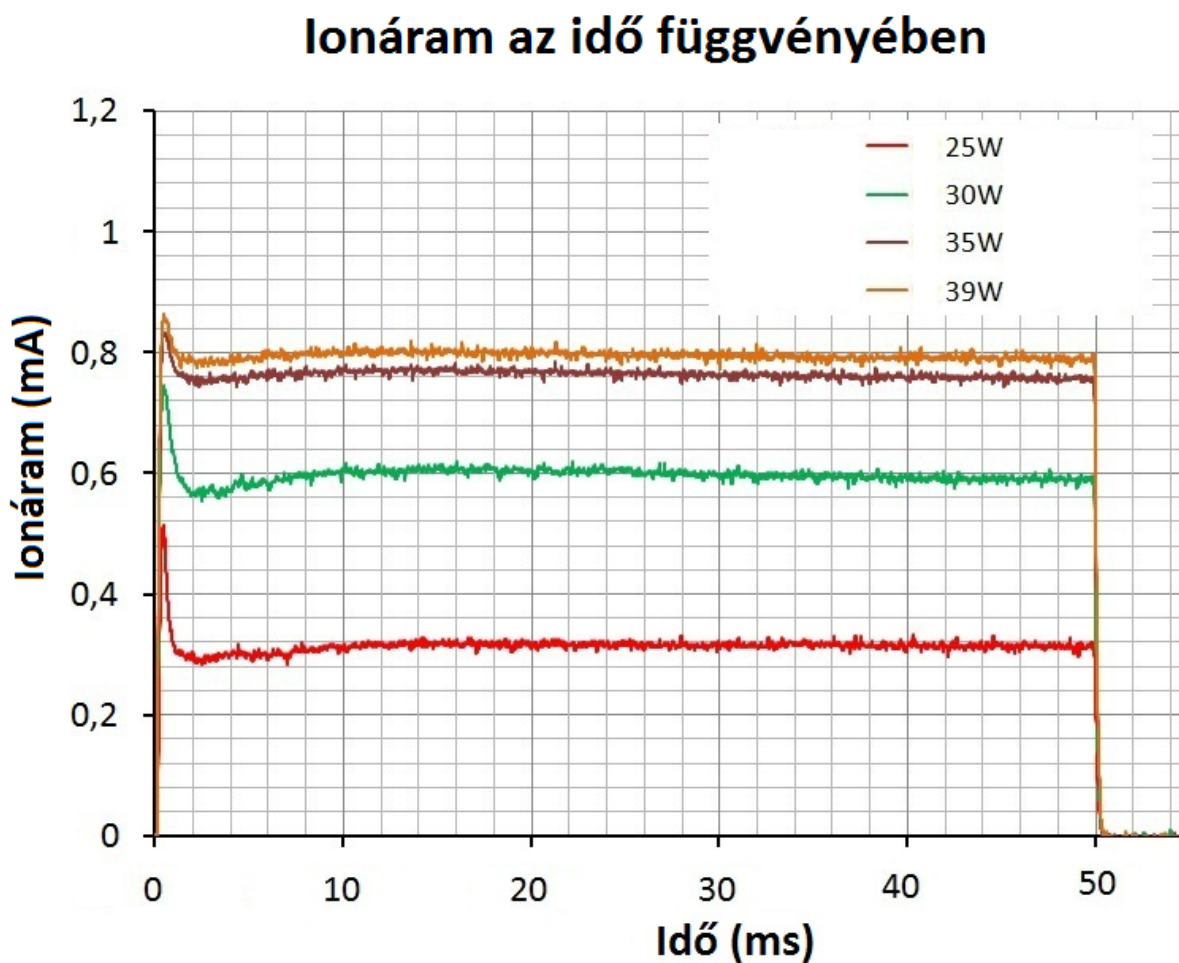
Mivel pólus pozícióban preglow jelenség nem volt tapasztalható, így az elektrosztatikus szonda ezen helyzetében nem történtek egyéb méréseket (változó gáz nyomás függvényében).

Ezt követően az elektrosztatikus szondát pólusköz pozícióba forgatva folytattuk a méréseket.

5.1.1.2. Mérés pólusköz pozícióban

5.1.1.2.1. Becsatolt mikrohullámú teljesítmény függvényében

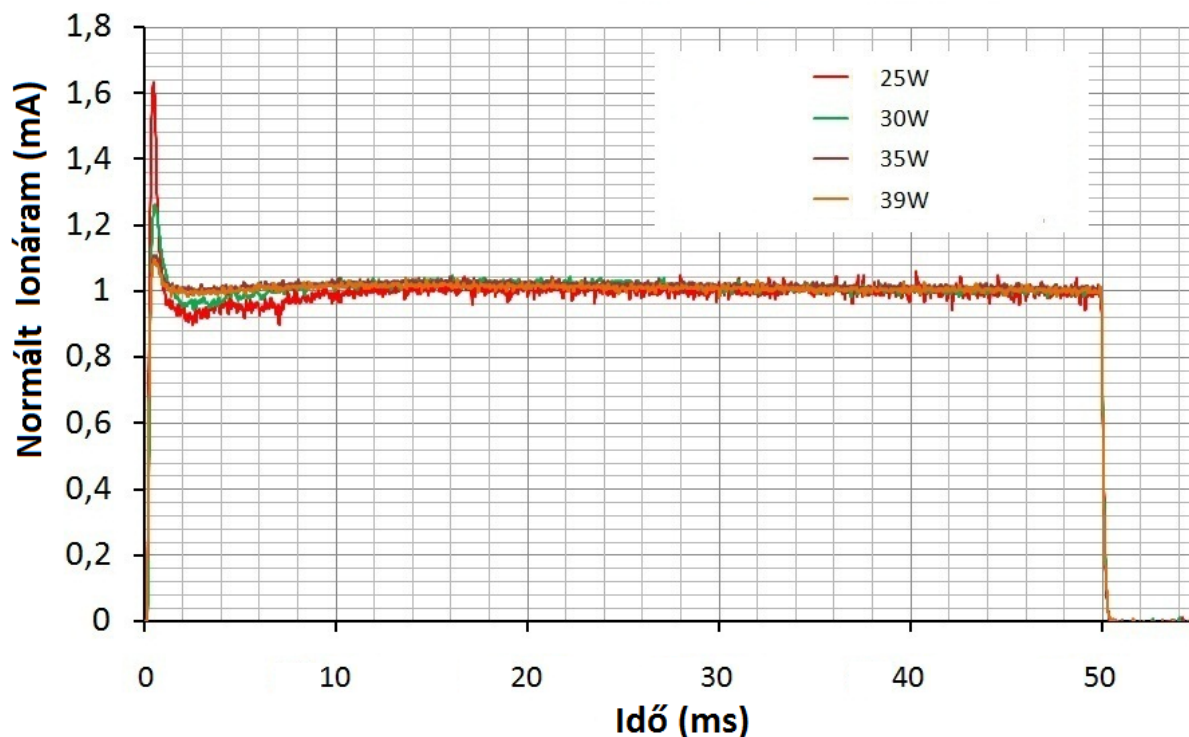
Pólusköz pozícióba forgatva a szondát vizsgáltuk a begyújtási tranziens viselkedését. A vizsgált munkapontok felvétele a már fent említett módon történt.



16. ábra: Ionáram az idő függvényében

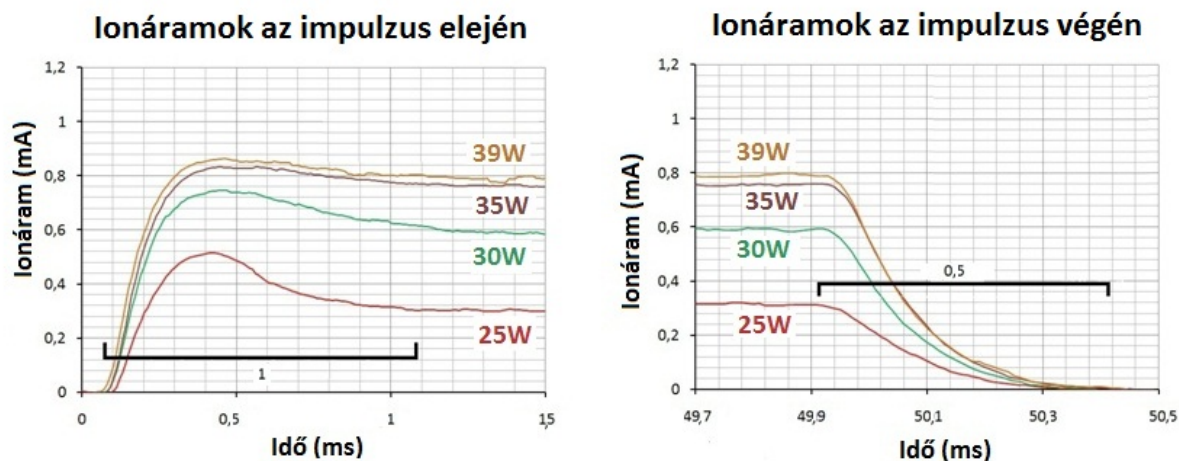
Pólusközbe forgatott szonda esetén preglow jelenség tapasztalható. Továbbá megállapítható az is, hogy – hasonlóan a pólus pozícióban mértেকnél – a teljesítmény növekedésével nő a szondán folyó áram is.

Normált Ionáram az idő függvényében



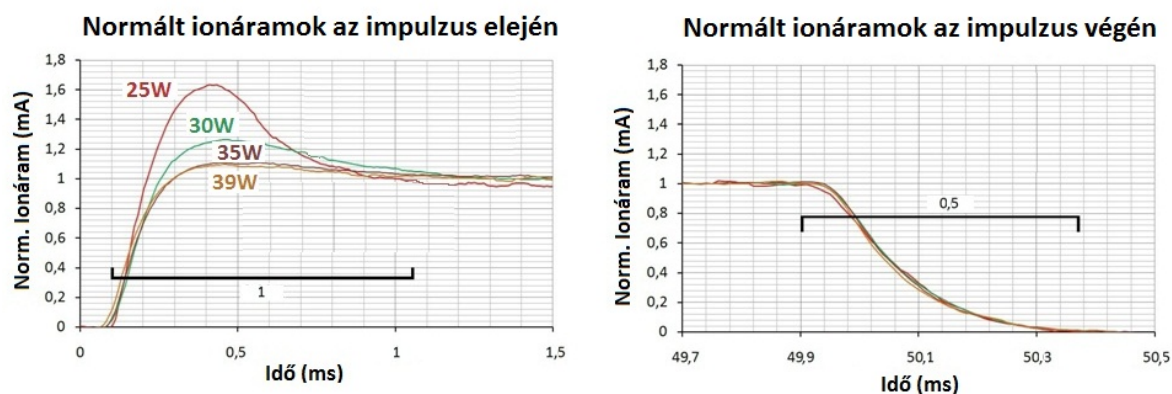
17. ábra: Normált ionáramok az idő függvényében

Az előző 16. ábrán lévő jelek összenormálást követően a 17. ábra szerint néznek ki. Megfigyelhető, hogy a teljesítmény csökkentésével nő a jel elején található túllövés mértéke, vagyis a preglow nagysága. Illetve az is, hogy a jelek időbeli lefolyását tekintve nem mutatnak jelentős eltérést a becsatolt mikrohullámú teljesítmény változása esetén. A stacionárius állapotba kerülés után pedig ez az eltérés szinte elhanyagolható.



18. ábra: A 16. ábra elejének illetve végének a kinagyítása látható

Minél nagyobb a teljesítmény, annál nagyobb az elektródán folyó áram erőssége. Ahhoz, hogy a jel beálljon stacionárius állapotba, ahhoz átlagosan 1ms szükséges. Elhalási ideje pedig szinte pontosan a begyújtási időnek a fele, mivel az elhalás csupán 0,5ms alatt megy végbe.

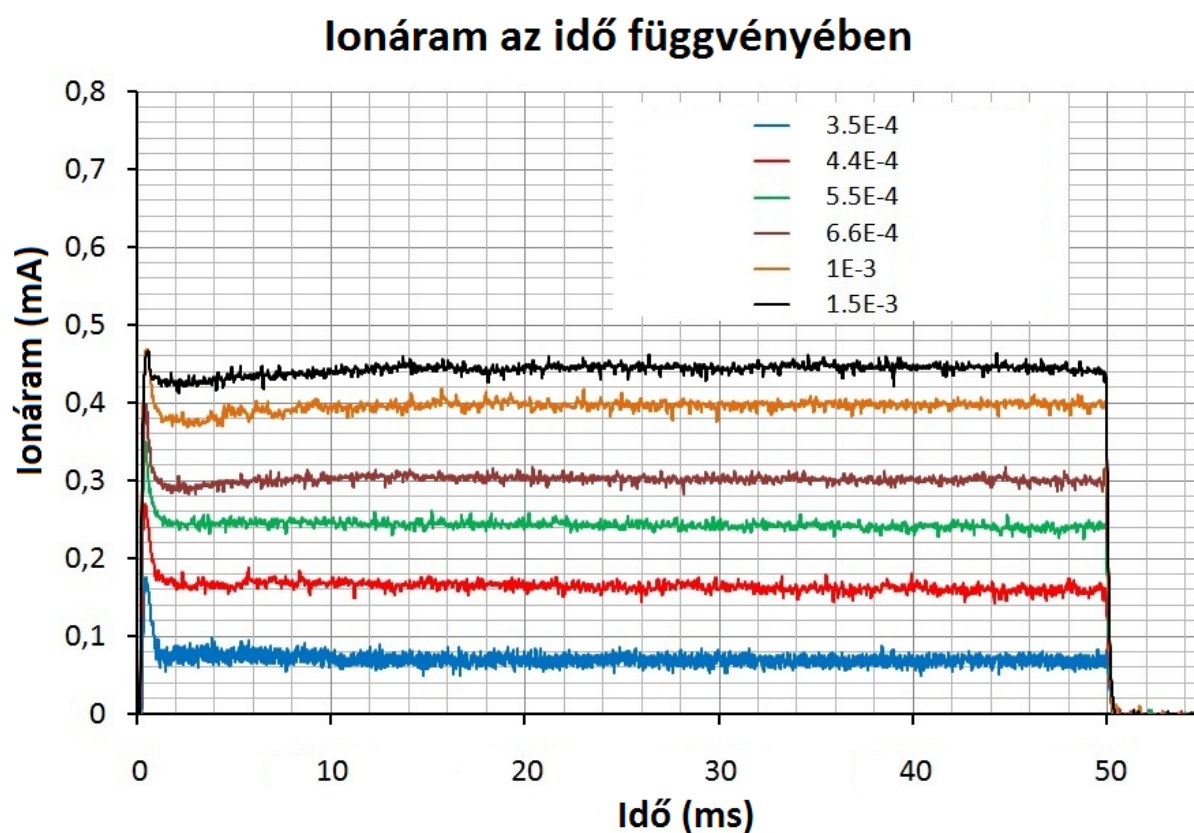


19. ábra: Normált ionáramok az idő függvényében

A normált értékeknél jól látható módon csökken a preglow túllövésének a mértéke a teljesítmény növekedésének a függvényében. A preglow félérték szélessége közel azonos a jel elhalási idejével. A jelek elhalása időben független a becsatolt mikrohullámú teljesítménytől.

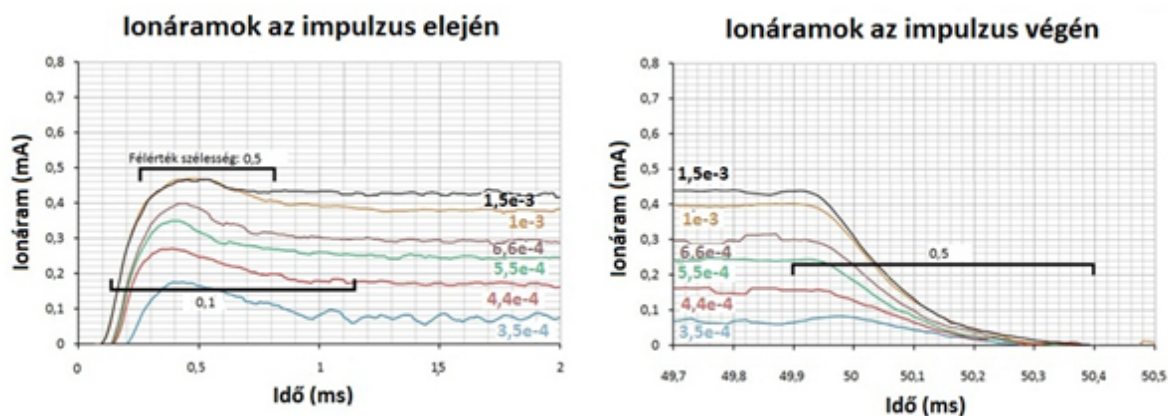
5.1.1.2.2. Gáz nyomásának függvényében

Mivel pólusköz pozícióban sikerült találni preglow-t a becsatolt teljesítmény függvényében, így motiváltak voltunk a munkagáz nyomásának függvényében is végrehajtani a kísérletet. Változó gáz nyomás esetén is tapasztaltunk preglow-t, mint ahogy azt a 20. ábra is mutatja. Változó gáznyomás esetén – fix 25W becsatolt teljesítmény mellett – a munkapontok felvétele az alábbi módon történt: $3,5 \times 10^{-4}$, $4,4 \times 10^{-4}$, $5,5 \times 10^{-4}$, $6,6 \times 10^{-4}$, 1×10^{-3} , $1,5 \times 10^{-3}$ mbar.



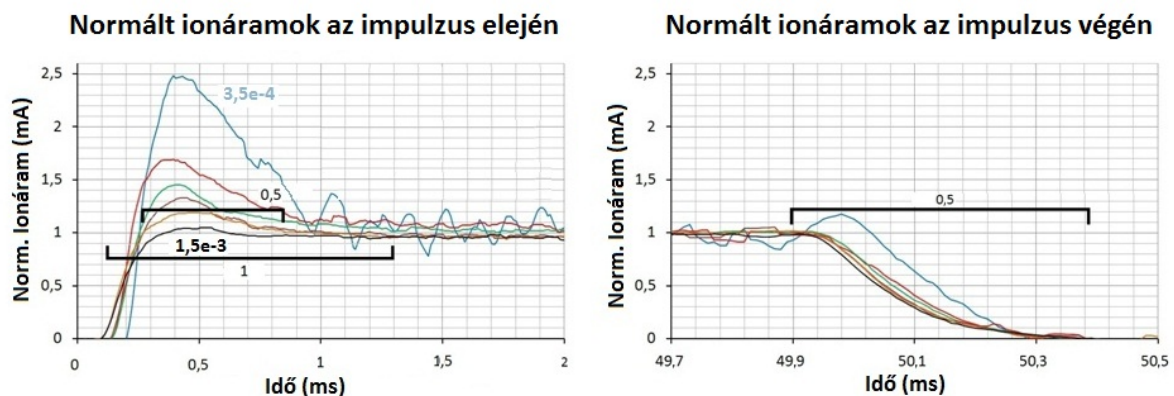
20. ábra: Ionáram az idő függvényében változó gáznyomások mellett

Az elektródán folyó áramok telítési értéke a változó gáznyomással monoton növekvő összefüggést mutat. Még ezen az ábrán is szignifikánsan látszik, hogy a legkisebb gáznyomás esetén a legnagyobb a preglow mértékének a nagysága.



21. ábra: Az ionáramok az időfüggvényében változó gáznyomás mellett előző ábra nagyítása látszik.

A baloldali ábrán jól látható módon kimutatásra került a preglow. A gáznyomás növekedésével nő az elektrosztatikus szondán mért áram telítési értéke. Megfigyelhető továbbá, hogy a kialakult preglow félértékszélessége 0,5ms. Ennek az értéknek pedig közel a duplájára van szükség ahhoz, hogy az ionáramok stacionárius állapotba kerüljenek. A kialakítási idő ezzel szemben - az ábrán is megfigyelhető módon- sokkal hamarabb megy végbe, mint hogy a jel elérné a szaturált állapotot.



22. ábra: A normál ionáramok az időfüggvényében változó gáznyomás mellett

A gáznyomás csökkenésével nő az elektrosztatikus szondával mért preglow mértékének a nagysága. Egy ilyen csúcs átlagos félértékszélessége 0,5ms. A $3,5 \times 10^{-4}$ mbar nyomás esetén jól látható, hogy a jel meglehetősen zajos. Ez annak tudható be, hogy a plazma begyűjtési gáznyomásánál meglehetősen nagy a jel-zaj arány. Ez a zaj azonban olyan kismértékű volt, hogy érdemben a mérések kiértékelését nem nehezítette.

Elmondható, hogy az általunk alkalmazott elektrosztatikus szondás mérési módszer segítségével pólusköz pozícióban kimutatható a preglow. Ezek után méréseinket a láthatófény tartományba is kiterjesztettük annak érdekében, hogy még nagyobb betekintést nyerjünk a tranziens jelenség működési mechanizmusába.

5.2. Mérés gyorskamera segítségével

A láthatófény tartományban végzett kísérleteinket nagyon jó időbeli feloldású Casio Exilim EX-FH25 típusú gyorskamerával végeztük. Ez az általam használt gyorskamera számos nagysebességű technológián alapuló funkcióval rendelkezik. Ilyenek például a nagysebességű sorozatfelvétel, mellyel másodpercenként akár 30 képet készíthet 9 megapixel felbontás mellett, míg a nagysebességű filmfelvétel másodpercenként akár 1000 kép rögzítésének lehetőségét nyújtja. A méréseim során ez utóbbi tulajdonságát használtuk ki, mely segített az emberi szem számára már nem követhető gyorsaságú mozgások pillanatainak megörökítésében. Nagy érzékenységgű CMOS szenzor optimális expozíciót és 10.1 megapixel felbontást biztosít. Emellett a nagy teljesítményű, 26mm nagylátószögű és 20x optikai zoomátfogásra képes objektív nyújtott segítséget a fotózáshoz.

A méréseim során az alábbi konfigurálási értékek kerültek beállításra:

- ISO 100
- Záridő: 1/2000s
- 1000fps
- Apertúra: F3.6
- Gyűjtótávolság: 73mm
- MF – manuális fókusz
- MWB – manuális fehéregyensúly

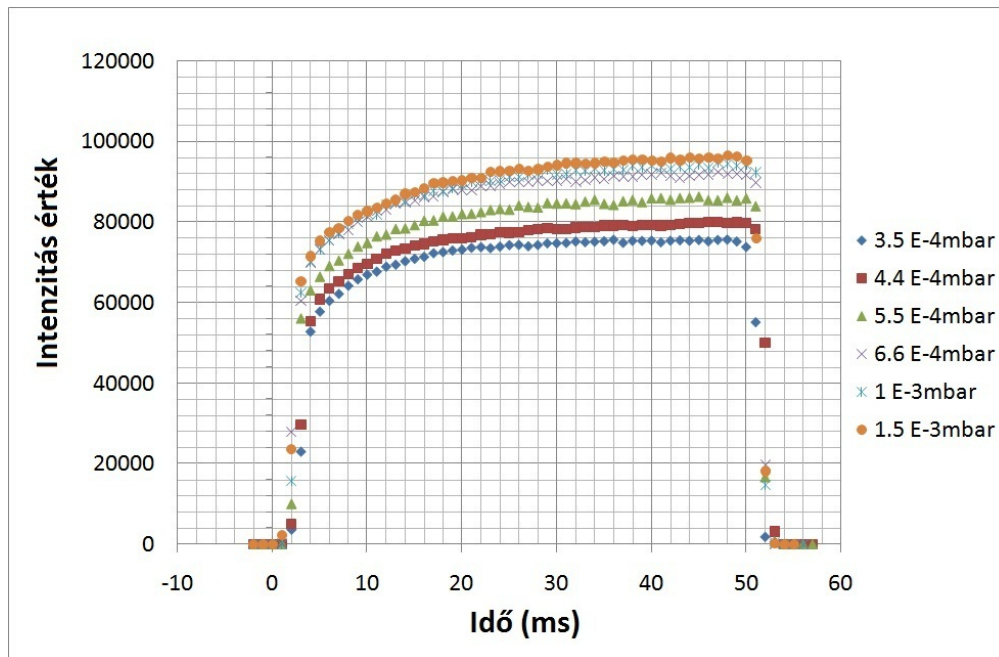
5.2.1. Mérési eredmények kiértékelése

A láthatófény tartományban felvett plazma-fotók kiértékelése összetett folyamat volt. Először az emberi szem feloldási idejénél sokkal gyorsabb (1000kép/másodperc) kamera segítségével rögzítésre kerültek a plazma ki- és bekapcsolási jelenségei. Majd a videó (egy videó-szerkesztő szoftver segítségével) képkockákra történő vágása után, a képek bitmap formátumba kerültek. A képpontok RGB értékeinek összege megfeleltethető egy ugyanabban a mátrixpontban lévő pixel értékével. Ezt a számértéket (ascii) rendeltük hozzá minden egyes pixelhez, s ezek összege adta az egyes képek intenzitás értékei.

A mérés szinkronizálása

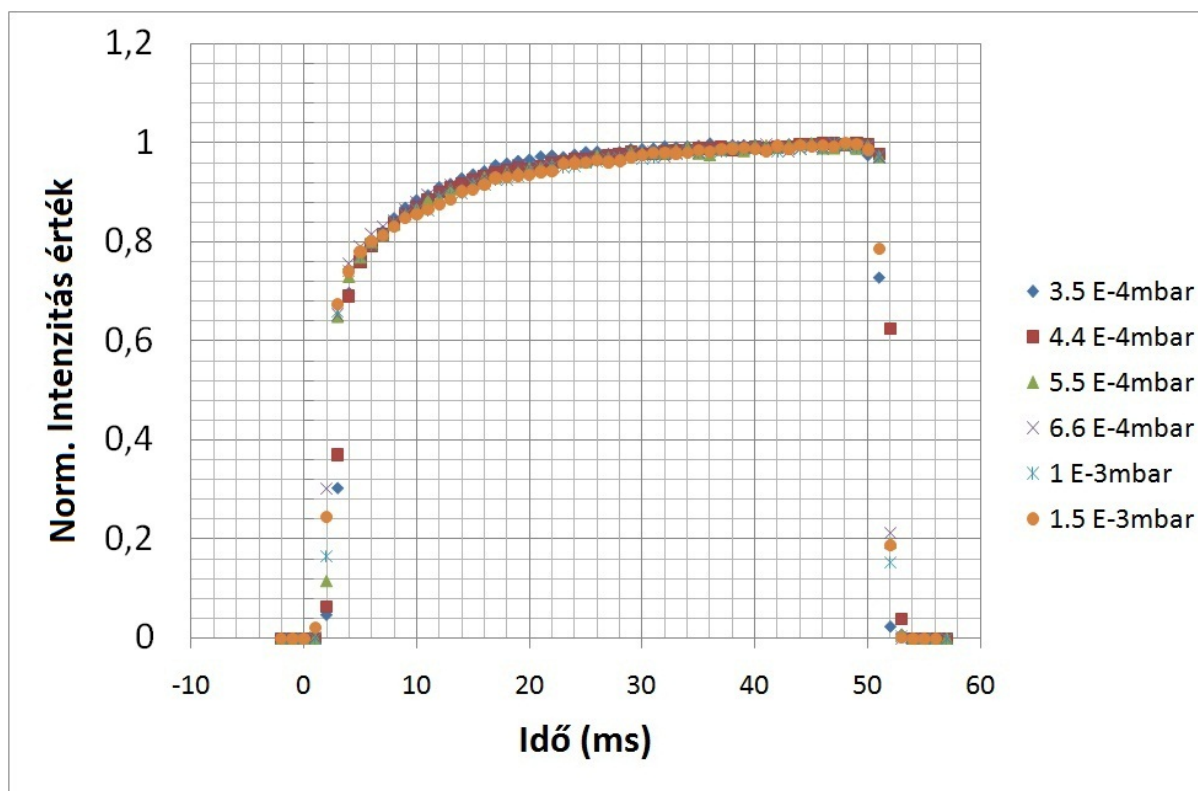
Az általunk használt gyorskamera (Casio Exilim EX-FH25) feloldási ideje a milliszekundumos nagyságrendbe esik, a mikrohullámú teljesítmény pedig ennél sokkal hamarabb jut be a plazmakamrába. Ezért hogy a méréseink a lehető legpontosabbak legyenek, egy fényemittáló dióda (LED) párhuzamos bekötésére került sor a plazmakamra szélére. A LED-ek reakcióideje ugyanis 6 nagyságrenddel kisebb (ns), mint a gyorskamera időbeli feloldása, így gyakorlatilag a mikrohullám becsatolásának időpontjában felgyullad. Az általunk készített sorozatképeken megjelenő LED tehát egyértelműen mutatja a bekapcsolás pillanatát. Így ehhez a bekapcsolási pillanathoz szinkronizálva a jeleket, sokkal pontosabb mérési eredményekre jutunk. Elképzelhető olyan eset is, amikor még nem épül fel a plazma, de LED már világít. Ez azonban nem amiatt van, mert nincs becsatolva a mikrohullám, hisz a mikrohullám a láthatófény tartományban nem érzékelhető. Éppen ezért kell láttatni a mikrohullámú jel becsatolásának pillanatát.

5.2.1.1. Gáznyomás függvényében



23. ábra: A LED kigyulladásához szinkronizált intenzitás értékek az idő függvényében

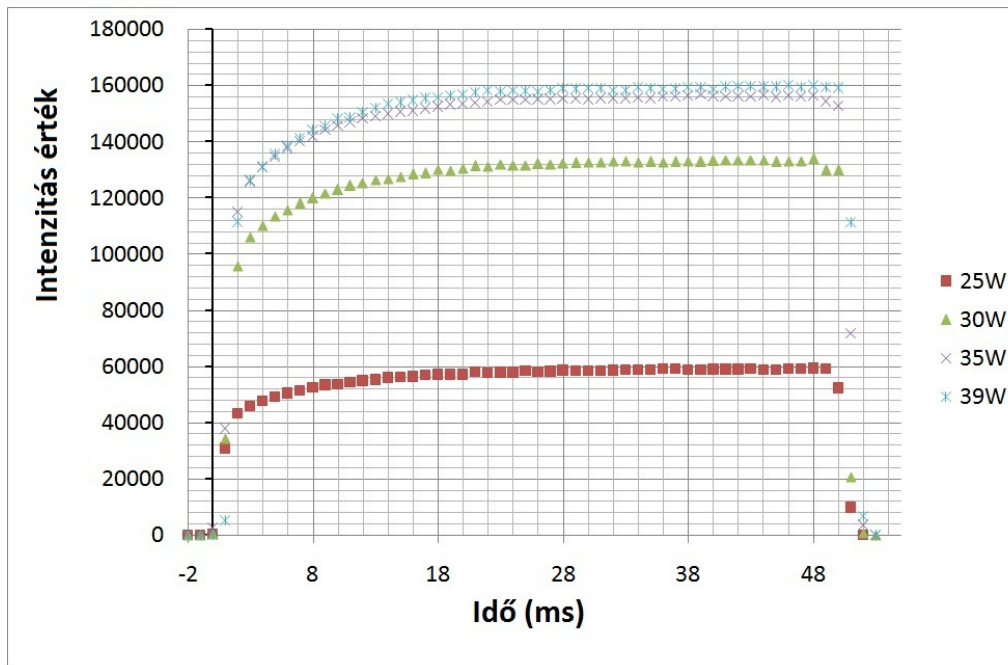
A 23. ábrán látható módon a gáznyomás emelkedésével a telítési érték – a szondával végzett mérésekhez hasonlóan – itt is monoton növekvő tendenciát mutat. Meglehetősen hosszú idő kell, hogy az intenzitás értékek stacionárius állapotba kerüljenek. Az intenzitás értékek felfutási ideje (felépülés) meglehetősen lassú. Azonban ez nem mondható el a kialvás pillanatára, ami meglehetősen gyorsan megtörténik (4ms).



24. ábra: A LED-hez szinkronizált normált intenzitás értékek az idő függvényében

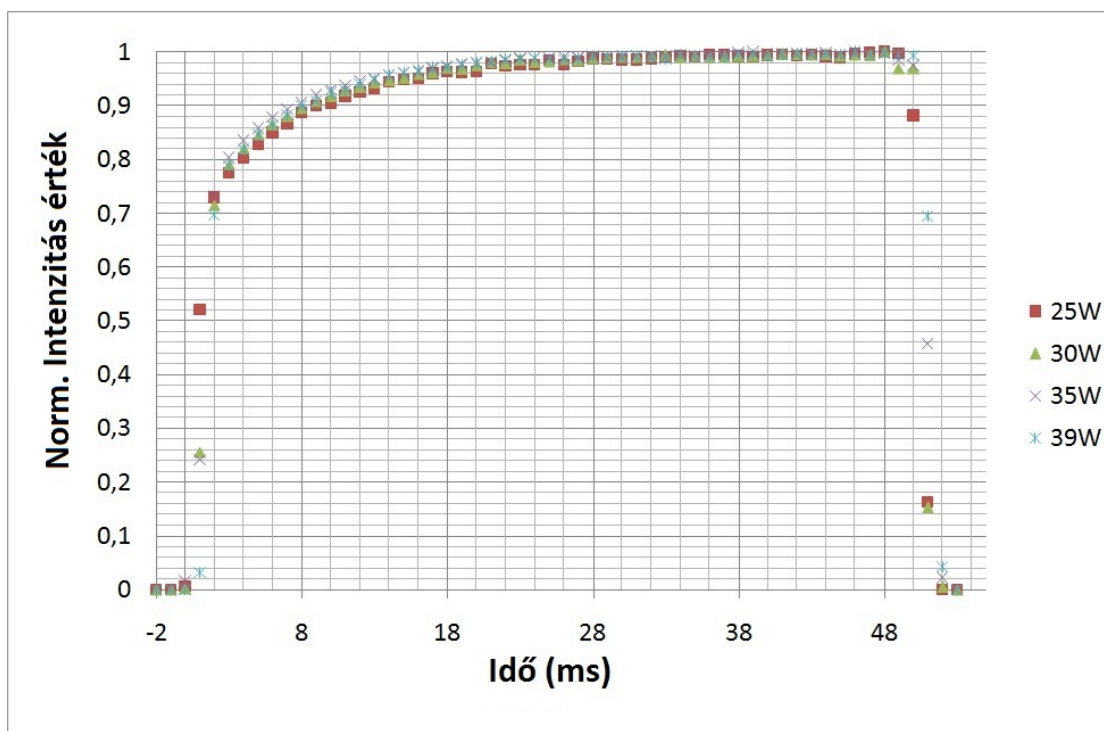
Tudjuk, hogy a plazmából érkező láthatófény fotonokat gerjesztett atomok és ionok bocsájtják ki, melyek a gerjesztésükhöz szükséges energiát az ún. „hideg” (néhány eV-energiájú) elektronoktól nyerik, ütközés révén. A hideg elektronok beállási ideje telített állapotba a 24. ábra alapján tehát kb. 20ms-ra tehető, bár az intenzitás 80-90%-át az első 10ms-ban már el is éri. Azonban mégis hosszú idő kell, hogy stacionárius állapotba kerüljön az intenzitás érték. Szinte végig monoton növekvő összefüggést mutatnak a normált intenzitás értékek az idő függvényében (24. ábra). A különböző munkapontokból adott képkockákból vett intenzitás értékek normált értéke nem mutat eltérést egymáshoz képest. Időbeli karakterisztikájuk nem különbözik egymástól. Felépülése meglehetősen lassú folyamat, míg az elhalása rövid időre tehető (4ms).

5.2.1.2. Becsatolt mikrohullámú teljesítmény függvényében



25. ábra: A már LED reakció idejével szinkronizált intenzitás értékek az idő függvényében

A 24. és 25. ábrákon nem látható a preglow jelenség. A 25. ábrán látható módon gáznyomás emelkedésével a telítési érték itt is monoton növekvő összefüggést mutat, vagyis a becsatolt mikrohullámú teljesítmény növekedésével, nő az intenzitás értékek telítési értéke is. Meglehetősen hosszú idő kell, hogy az intenzitás értékek stacionárius állapotba kerüljenek. Az intenzitás értékek felfutási ideje meglehetősen lassú. Azonban ez nem mondható el a kialvás pillanatára, ami meglehetősen hamar bekövetkezik (4ms).



26. ábra: Normált intenzitás értékek az idő függvényében

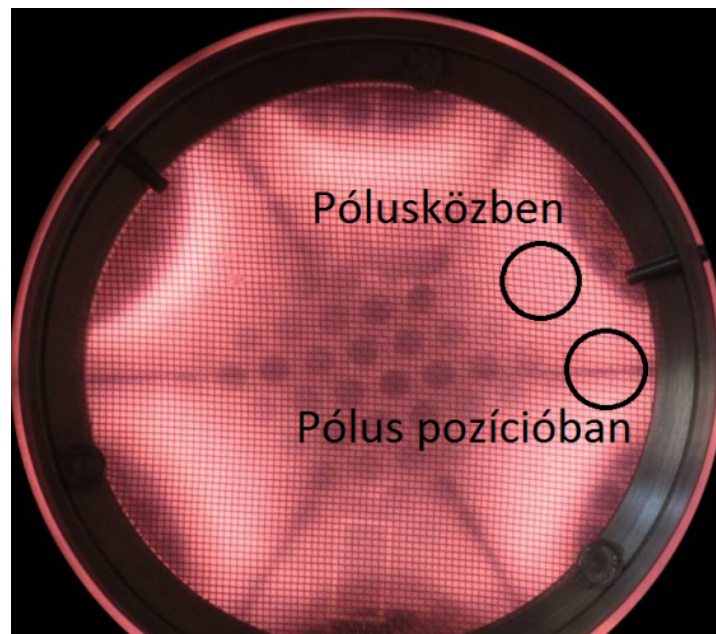
A hideg elektronok beállási ideje szaturált állapotba kb. 20ms-ra tehető, mely hideg elektronok az intenzitás 80-90%-át az első 5ms-ban már el is érik. Azonban mégis hosszú idő kell, hogy stacionárius állapotba kerüljön az intenzitás érték. Szinte végig monoton növekvő összefüggést mutatnak a normált intenzitás értékek az idő függvényében (24. ábra). A különböző munkapontokból adott képkockákból vett intenzitás értékek normált értéke nem mutat eltérést egymáshoz képest. Időbeli karakterisztikájuk nem különbözik egymástól. Felépülése meglehetősen lassú folyamat, míg az elhalása rövid időre tehető (6ms).

Mivel a láthatófény tartományban végrehajtott teljes-plazma fotók elemzésével nem tapasztaltunk preglow jelenséget illetve arra utaló jelet, a rögzített képkockákból – területorientáltan véve mintákat– folytattuk a plazma bekapcsolási jelenségének (preglow) feltérképezését.

6. Területorientált kiértékelés

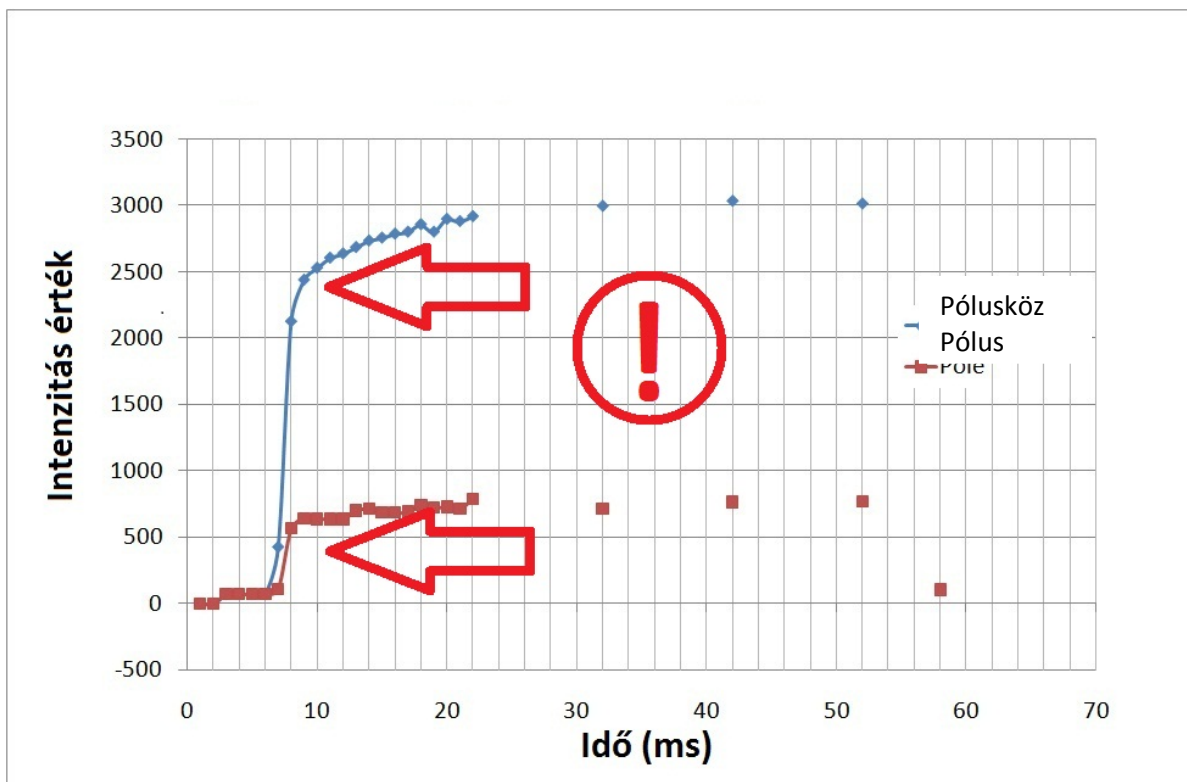
Mivel láthatófény tartományban nem sikerült kimutatni a preglow-t, ezért területorientált mérések váltak indokolttá. Ugyanis a pólusköz pozícióból és a pólusból gyűjtve az intenzitás értékeket (tanulva a szondával tapasztalt pozíciófüggő eredményekből), azok hordozhatnak magukban preglow-ra utaló jelenséget.

A területorientált mérések úgy történtek, hogy minden egyes képkockából pixelpontosan ugyanonnan (pólusközből és pólus pozícióból egyaránt) véve mintát, vizsgáltuk meg az egyes képkockák intenzitás értékeit a 27. ábrán látható módon. Vagyis a képpontok RGB értékeinek összege megfeleltethető egy ugyanabban a mátrixpontban lévő pixel értékével.



27. ábra

A területorientált kiértékelések mind változó gáznyomás, mind pedig a becsatolt mikrohullámú teljesítményváltozása mellett történtek –az eddigiekhez hasonlóan – a plazma begyűjtési jelenségének komplett vizsgálata és későbbi megértése érdekében.



28. ábra: A pólusköz és pólus pozícióból gyűjtött minták

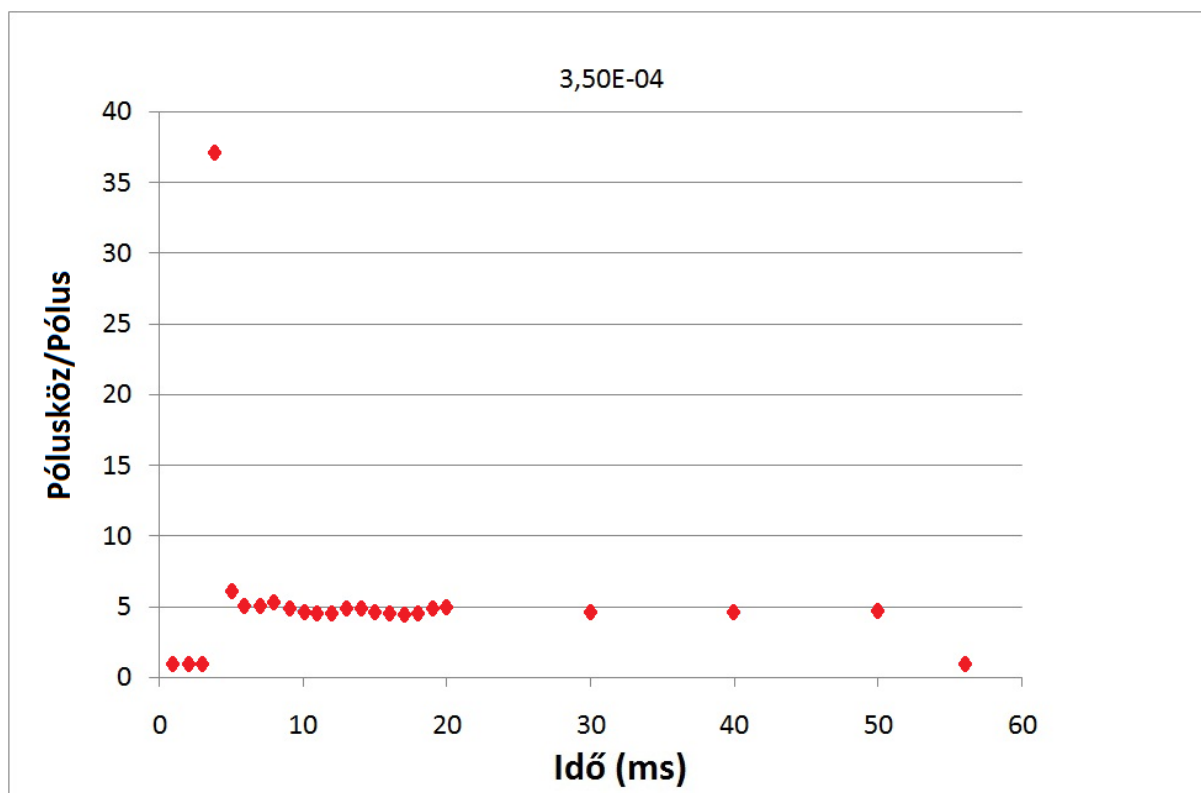
A 28. ábra alapján a pólusköz és pólus pozícióból mintavételezett intenzitás értékek abszolút viselkedésében sem tapasztalható preglow. Mindkét karakterisztika egy, már a teljes képintenzitásokat ábrázoló karakterisztikákhoz hasonló telítésbe menő képet mutat, nem pedig túllövést az elején.

Mivel preglow-ra utaló jelet közvetlenül nem találtunk a területorientált kiértékelés során, ezek után az egymáshoz viszonyított arányukat vizsgáltuk, ugyanis két karakterisztika egymáshoz viszonyított aránya jobban kiemelheti azok tényleges tulajdonságait, s az effektív zaj arány is kisebb lesz. Az alábbi táblázatban láthatóak a változó gáznyomás mellett felvett munkapontokból kapott pólusközből és pólusból vett intenzitás értékek egymáshoz viszonyított arányai (a két érték egyszerű hányadosa) az eltelt idő függvényében:

No. Of Frame	1,50E-03	1,00E-03	3,50E-04	4,40E-04	5,50E-04	6,60E-04
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1
4	1	1	37	24	16,3750	24
5	1	9,3421	6,1287	4,7389	4,1196	4,9091
6	3,4833	4,1768	5,0574	4,5440	3,2473	5,0959
7	4,0457	4,1544	5,0399	4,4047	3,7035	5,8264
8	3,9609	4,3504	5,2551	4,5095	3,5250	5,6334
10	3,8686	4,5658	4,6913	4,6373	3,6759	5,7638
11	3,9682	4,1558	4,4969	4,4184	3,4448	5,4200
12	3,9051	4,1544	4,5772	4,4624	2,9724	5,0967
13	4,0163	4,3944	4,9138	4,4876	3,1616	5,6559
14	4,0418	4,4435	4,8309	4,4401	3,4748	5,3434
15	4,0401	4,4175	4,5860	4,2487	3,3220	5,5597
16	4,0953	4,1832	4,5523	4,2438	3,2398	5,7847
17	4,0189	4,1871	4,4495	4,4692	3,2590	5,4592
18	3,8316	4,3211	4,4355	4,1385	3,2886	4,9300
19	4,0092	4,3906	4,8171	4,4365	3,0735	5,5371
20	4,0492	3,9930	5,0189	4,3410	3,1070	5,1226
30	3,8368	4,5616	4,6595	4,2690	3,1182	5,1606
40	3,8403	4,2742	4,5824	4,3930	3,2334	5,2234
50	3,7434	4,2089	4,2089	4,7065	4,3811	3,1096
56	1	1	1	1	1	1

1. táblázat

Az 1. táblázatból is látszik, hogy a pólusköz és a pólus egymáshoz viszonyított növekménye hordoz preglow-ra utaló jelenséget. Ugyanis túllövés tapasztalható az így kapott intenzitás értékekben. Tehát közvetve a plazma emittált fényintenzitásában is kimutattuk a preglow-t.



29. ábra: *Pólusköz/Pólus aránya az idő függvényében*

Az 1. táblázat alapján kinyert adatok segítségével ábrázolásra került az egyik munkapontban a pólusköz/pólus aránya az idő függvényében, mely szerint egyértelműsíthető a preglow jelenléte. A pólusköz/pólus arány már magában hordozza a preglow-ra utaló, mivel jelentős túllövés tapasztalható az intenzitás értékek arányában. Habár nem jelenthetjük ki, hogy ez effektív preglow-t jelent, azonban megállapítható, hogy a begyújtási tranziens és a láthatófény tartományban vizsgált plazma pólusköz helyzetben keletkezik. Rögtön a begyújtási csúcsot követően beáll a szaturált állapot. Ez az általunk használt gyorskamera feloldási idejének hosszából ered.

7. Diszkusszió

A szakirodalomból tudjuk, hogy kezdetben (közvetlenül a begyújtáskor) nagy számban nagy energiájú elektronok keletkeznek.

A preglow ezen nagy energiájú elektronok stacionárius állapotba történő relaxációja.

A tranziens folyamat során belőlük később alacsonyabb energiájú elektronok is keletkeznek, melyek alacsony töltésállapotú ionokat keltenek (elektrosztatikus szondával vizsgálhatók) és látható fény tartományba eső gerjesztéseket végeznek (gyorskamerával vizsgálhatók).

Ezek az elektronok és ionok leginkább a mágneses erővonalak mentén, a kamra falánál vesznek el, másképpen a pólusoknál, ahol az erővonalak merőlegesek a kamra falára. Ebből következik, hogy ezeknek a töltött részecskéknak az átlagos tartózkodási ideje pólusközben a legnagyobb, a plazma tehát pólusközben sokkal sűrűbb, mint a pólusoknál. Ez határozza meg tehát a preglow térbeli helyzetét.

A folyamat kezdetén, amikor hirtelen nagy energiát juttatunk a tiszta közegbe, energiát adunk át az elektronoknak, a nagyenergiájú elektronok száma folyamatosan nő, és az előzőek alapján pólusközben találhatók nagyobb valószínűséggel.

A nagyenergiájú elektronokból sorozatos ütközések révén keletkező hideg elektron populáció két folyamatot indít el: (1.) atomokat gerjesztenek láthatófény tartományban és (2.) atomokat ionizálnak. Az elektronok ott tudnak atomokat illetve ionokat gerjeszteni, ahol az ehhez szükséges energia megfelelő az adott folyamathoz. Ekkor következik be a preglow jelensége a plazma fényében is. Vagyis rövid ideig (néhány ms) több foton emittálódik a pólusközből, mint előtte. Az ionizáció során pedig nagyobb mennyiségben keletkeznek ionok, mint előtte.

Fenti megállapítások kvalitatív módon magyarázzák a preglow tranziensfolyamat pólusköz pozícióban való keletkezését.

8. Összegzés

Impulzus üzemmódban előállított ECR-plazma időbeli fejlődését vizsgáltam két módszerrel: elektrosztatikus szondával és gyorskamerával.

Az elektrosztatikus szondás mérések során bebizonyosodott, hogy pólusközben megfigyelhető a preglow, pólus pozícióban viszont nem.

Láthatófény tartományban végrehajtott mérések során közvetlenül nem tapasztaltunk preglow jelenséget. Így a láthatófény mérések során rögzített képkockákból –területorientáltan véve mintákat– folytattunk a plazma bekapcsolási jelenségének (preglow) feltérképezését. Az egymáshoz viszonyított relatívkiértékelések során a pólusköz/pólus arány az idő függvényében már magában hordozza a preglow-ra utaló jelenséget, mivel túllövés tapasztalható az intenzitás értékek arányában (a begyújtás pillanatában).

Összegzésképpen elmondható, hogy az általunk kidolgozott és alkalmazott két mérési módszer hasznos információkkal szolgált a preglow feltérképezésével kapcsolatban.

A jövőbeli konkrét terveket illetően elmondható, hogy az erősebb mágnes csapdával rendelkező nagy ionforrás (Atomki-ECRIS) segítségével lenne érdemes behatóbban tanulmányozni a laboratóriumi plazmaműködési mechanizmusát, annak minél jobb megértése szempontjából. Egy 1000fps-nél is gyorsabb digitális kamera alkalmazása a jelen dolgozatban bemutatottaknál nagyobb időbeli feloldású méréseket tenne lehetővé.

Irodalomjegyzék

- [1] S. Biri, R. Rácz and J. Pálinkás, *Status and special features of the Atomki ECR ion source*, Review of Scientific Instruments **83** (2012) 02A341 (3pp)
- [2] R. Rácz, S. Biri, J. Pálinkás, *An ECR table plasma generator*, Proceedings of the 19th International Workshop on ECR Ion Source. ECRIS10. Grenoble, France, 23-26 Aug., 2010. (2011) 124-126.
- [3] T. Thuillier, T. Lamy, L. Latrasse, I. V. Izotov, A. V. Sidorov, V. A. Skalyga, V. G. Zorin and M. Marie-Jeanne - *Study of pulsed electron cyclotron resonance ion source plasma near breakdown: The preglow*, Review of Scientific Instruments **79** (2008) 02A314 (4pp)
- [4] P. Zucchelli, A novel concept for $a\bar{\nu}_e/\nu_e$ neutrino factory: the beta-beam, Physics Letters B **532** (2002) 166-172.
- [5] T. Ropponen, O. Tarvainen, I. Izotov, J. Noland, V. Toivanen, G. Machicoane, D. Leitner, H. Koivisto, T. Kalvas, P. Peura, P. Jones, V. Skalyga and V. Zorin, *Studies of plasma breakdown and electron heating on a 14 GHz ECR ion source through measurement of plasma bremsstrahlung*, Plasma Sources Science and Technology **20** (2009) 055007 (14pp)
- [6] O. Tarvainen, T. Ropponen, V. Toivanen, J. Arje and H. Koivisto, *Plasma breakdown diagnostics with the biased disc of electron cyclotron resonance ion source*, Plasma Sources Science and Technology **18** (2009) 035018 (9pp)

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megköszönni a tudományos diákköri dolgozatom megvalósításához nyújtott segítséget Dr. Biri Sándornak és Rácz Richárdnak, továbbá a dolgozat elkészítéséhez a támogatásukat és a kitartó munkájukat. Nagy segítséget nyújtottak a rendelkezésemre bocsátott szakirodalommal illetve segítő tanácsaikkal. Végül, de nem utolsósorban hálás vagyok a tanszéknek azért, amiért segítettek a munkámat azzal, hogy rendelkezésemre bocsátották az Atommag Kutató Intézet területén található tanszéki berendezéseket, így biztosítva a kutató munkám sikerét.