

# **Félvezetők és optikailag sűrű plazmák gerjesztése KrF lézerimpulzusokkal**

**Kovács Zsolt**

Doktori értekezés tézisei

Témavezetők:

**Prof. Dr. Földes István DSc**, tudományos tanácsadó  
Wigner Fizikai Kutatóközpont, Részecske- és Magfizikai  
Intézet

**Prof. Dr. Szatmári Sándor DSc**, egyetemi tanár  
Szegedi Tudományegyetem, Kísérleti Fizikai Tanszék

Fizika Doktori Iskola  
Szegedi Tudományegyetem, Fizikai Intézet

**Szeged**  
**2020**

A közel 60 éves lézerfizika történetében fordulópontot jelentett a nagy energiájú, rövid ( $< \text{ps}$ ) impulzusok keltésére alkalmas technikai megoldások elterjedése. Anyaggal való kölcsönhatásuk már önmagában is fizikában gazdag jelenségekhez vezetnek, de az utóbbi években egyre perspektivikusabbá vált *másodlagos fényforrások* meghajtójaként is. Ilyenek mint az attoszekundumos, koherens röntgen, vagy az EM spektrum másik szélén elhelyezkedő *terahertz impulzusforrások*. Dolgozatomban bemutatom hogy az általam alkalmazott speciális ultraibolya fényforrások alkalmasak *THz impulzusok keltésére, valamint újszerű plazmafizikai kísérletekhez* is. A két tématerületet nem csak a gerjesztő lézerimpulzusok jellege, a gerjesztés *időbeli és térbeli koherenciájának* jelentősége is összeköti, mint a kölcsönhatások kimenetelének egyik döntő paramétere.

A továbbiakban tézispontokba szedve összesítem elért eredményeimet.

Egy közös magyar-kanadai kísérlet során, kísérletileg demonstráltam a Szatmári-típusú lézerek alkalmazhatóságát fotovezető antenna alapú (PCA), terahertes im- pulzusok keltésére. A kanadai INRS-ben tervezett és legyártott, különböző félvezető szubsztrátokból felépített antennák teljesítményét és hatásfokát összehasonlítottam. A nagy átütési feszültségű, és tiltott-sávzsélességű félvezetőkből épített antennák a következők voltak: ZnSe, GaN, 4H-SiC, 6H-SiC, valamint béta-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. A tesztelésükhöz épített elrendezéssel az energiasűrűség és az előfeszítő feszültség függ- vényében jellemeztem az általuk elért THz hozam mértékét. Kompresszált impulzusokkal is megkíséréltem karakterizálásukat, ám a megjelenő, pikoszekundumos vállak a várt teljesítményt lerontották. A nagy apertúrájú SiC antennákat hasonló elrendezésben először atmoszférán karakterizáltam, majd a csúcsteljesítményt, egy általam tesztelt házi tervezésű feszültségforrással vákuumban értem el 64 kV/cm előfeszítéssel. Ezekkel, fotovezető antennákkal az eddig a szakirodalomban fellelhető legnagyobb (11 $\mu$ J) impulzusenergiát értem el a kvázi-félciklusú működés során. Megfigyeltem a THz hozamok látványos, közel lineáris energiakontraszt függését is, amire fenomenologikus magyarázatot is adtam. Az energiakontraszt változtatásával, elsőként mutattam ki hogy a nanoszekundumos ESE mértéke döntően befolyásolhatja az ilyen típusú kísérletek kimenetelét ezen a hullámhossztartományon.

A fenti eredmények tézispontszerű megfogalmazása:

**I. Kísérleti módszerekkel jellemeztem különböző, nagy tiltott sávészélességű félvezetőkből készült fotovezető antennákat relatív teljesítményük szempontjából. Fotovezető antennákkal az eddig mért legnagyobb kvázi-félciklusú impulzusenergiát sikerült elérnem (11  $\mu\text{J}$ ). Elsőként mértem meg fotovezető antennák optikai-THz impulzusenergia konverziójának energiakontraszt függését, amelyre fenomenologikus magyarázatot adtam.**

A keltett THz sugárzások spektrális karakterizáláshoz egy erre a frekvenciatartományra alkalmas Michelson-interferométert építettem. A kapott hullámformából a THz impulzusok időbeli hosszának a félértékszélességét (2,2 ps), majd teljesítményspektrumát is meghatároztam. A spektrális csúcs 50 GHz-nél helyezkedett el, és a származtatott ponderomotoros potenciál, valamint a maximális elektromos tér-erősség 60 eV illetve 117 kV/cm értékű volt. A létrehozott nagy teljesítményű (6 MW) sugárforrás alkalmas nemlineáris szilárdtestfizikai kísérletekhez is. E célból vákuumkamrába építettem elrendezést, ami alkalmas volt egy n-típusú, szennyezett félvezető film (InGaAs) intenzitásfüggő, nemlineáris THz transzmisszióváltozásának mérésére. A maximális növekmény 1,7 értékű volt, amiből a korábbi, kanadai kollégáim által felállított modellt alkalmazva 90 kV/cm térerősségre következtettem, ami jó nagyságrendi egyezést adott a spektrális mérés eredményeivel. Ebből a félvezető töltésdinamikájára és a pumpáló impulzus jellemzőire következtettem. Kísérleteim révén bizonyítottá vált hogy lehetséges jelentős hozambéli javulást elérni nagy átütési feszültségű félvezetőkből készült fotovezető antennákkal.

Ezen eredmények tézispontszerű megfogalmazása:

**II. Megterveztem és megépítettem egy THz impulzusok spektrális jellemzésre alkalmas Michelson-interferométert. Ennek eredményeire építve egy 4H-SiC félvezetőből gyártott fotovezető antennára alapuló THz nyalábutat fejlesztettem, amelynek alkalmazhatóságát egy InGaAs félvezető nemlineáris terahertz-transzmissziójának mérésével demonstráltam. Ezek szerint a rendkívül nagy ponderomotoros potenciállal bíró THz-sugárforrás (60 eV), egyedi körülményeket teremt szilárdtestfizikai gerjesztési kísérletekhez.**

Napjaink nagyintenzitású lézer-plazma kísérleteinek értelmezéséhez elengedhetetlen az előimpulzusok által keltett felületi perturbációk figyelembevétele. Ez az állítás igaz nem csak az általam használt ultraibolya lézerekre, hanem általánosan, minden típusú jelenlegi és tervezett rendszerre, és jelentősége a folyamatosan növekvő csúcstesztekkel kihangsúlyozódik.

Dolgozatom második fejezetében elsőként demonstráltam a nemrégiben bemutatott Nemlineáris Fourier-szűrés, mint hatékony intenzitáskontraszt javító technika alkalmazását intenzív lézer-plazma kísérletben. Használatával  $10^{12}$  kontraszt mellett, unikális körülmények között vizsgáltam bór és arany céltárgyak reflexióját  $10^{15}$  W/cm<sup>2</sup> és  $10^{18}$  W/cm<sup>2</sup> közötti intenzitástartományon. Az intenzitás-, kontraszt, és polarizációfüggés (lineáris S és P) eredményei alacsony intenzitásokon jól visszaadják a korábbi irodalmi értékeket. Magas intenzitásokon az abszorpció jelentősen megnő (akár > 90% értékig), amit a megjelenő, majd dominánssá váló ütközésmentes, nemlineáris mechanizmusok (Rezonancia-abszorpció, Brunel-abszorpció) hatásával, fenomenologikusan értelmeztem. A szűrést megkerülve,  $5,5 \cdot 10^5$  kontrasztarányú nyalábokkal dolgozva kimutattam az ESE által keltett előplazma jelentős mértékű hatását. Egy házi fejlesztésű, diódán alapuló röntgen-fotodetektorral és annak jeléből, relatív méréssel összehasonlítottam a különböző gerjesztésű és anyagú plazmák teljes, integrált röntgenhozamait. Az alacsony kontraszt esetén tapasztalt jelentős növekedést, főleg a hosszú előplazmában jelen lévő ütközéses, szabad átmenetek hatásával értelmeztem. Ezen a méréseim hozzájárulhatnak egy jövőbeni KrF alapú, koherens, impulzusüzemű röntgenforrás fejlesztéséhez.

Ezen eredmények tézispontszerű megfogalmazása:

**III. A szakirodalomban KrF hullámhosszon (248 nm) eddig nem közölt intenzitáskontraszt értékek mellett vizsgáltam arany és bór céltárgyak tükörszerű reflexióképességét. Az általam felépített kísérleti elrendezés lehetővé tette a lézer-plazma kölcsönhatásokat befolyásoló előimpulzusok hatásának kimutatását, azok intenzitásának változtatásával. A széles intenzitástartományt lefedő méréseim ( $10^{15}$  W/cm<sup>2</sup> –  $10^{18}$ W/cm<sup>2</sup>) a reflexióképesség logaritmikus csökkenését mutatják. A csúcshintenzitások közelében mért jelentős reflexióképesség csökkenésre fenomenologikus magyarázatot adtam. A két eltérő rendszámú céltárgyon keltett lézerplazmák relatív röntgenhozamait összehasonlítottam a gerjesztő lézerimpulzusok paramétereinek függvényében.**

A reflektáló kritikus rétegről értékes tájékoztató információt nyújt annak gerjesztés során történő mozgása, amire spektrális vizsgálatokból következtettem. E célból felépítettem egy kísérleti elrendezést ami párhuzamosan mérte a beérkező, és a reflektált nyalábok spektrumait. A méréseim során végig kékeltolódást, azaz a céltárgy felületéről kifelé táguló plazmafrontot észleltem. Nagyobb,  $> 10^{17}$  W/cm<sup>2</sup> intenzitások felett az eltolódás mértéke erősen függött

az intenzitáskontrasztól. Tisztított nyalábokkal közel kétszeres növekményt mértem mindkét céltárgyon. Ezt az alacsony kontraszt esetén megjelenő előplazma okozta gyengébb lézer-plazma csatolással magyaráztam. A csúcsintenzitásokon, tisztított impulzusokkal mért jelentős, 0,6 nm kék-eltolódás több mint háromszorosa a korábbi, KrF lézerekkel mért értékek- hez képest. A klasszikus, nem-relativisztikus Doppler-eltolódásból meghatároztam a tágulási sebességeket az intenzitás függvényében. A származtatott tágulási sebességek ( $6 \cdot 10^7 \text{ cm s}^{-1}$ ) magyarázatára bór céltárgy esetén közelítő, a nyomásviszonyokat figyelembe vevő számítást adtam. A reflektált lézerimpulzusok spektrális sáv szélességének változásából közvetlenül a kritikus réteg gyorsulására is következtettem, amelynek maximális értéke  $\approx 3,1 \cdot 10^{18} \text{ ms}^{-2}$  volt a csúcsintenzitás környezetében. Ez a korábbiaknál közel  $\approx 50\%$ -al nagyobb érték.

Az így kapott gyorsulásértékekből származtattam a tágulási sebességeket is. A két megközelítés nagyságrendileg hasonló értékeket adott, ám tapasztalatom szerint az általam használt impulzushossz mellett a klasszikus Doppler-formulával számított értékeknek jelentősen kisebb a szórása.

Ezen eredmények tézisponyszerű megfogalmazása:

**IV. Spektroszkópiai módszerekkel a reflektáló kritikus felület mozgását vizsgáltam. A mérések során a reflektált gerjesztő lézerimpulzus hullámhosszának kék-eltolódását tapasztaltam, ami egy lézer irányába táguló plazmafrontra utal. Nagy intenzitáskontrasztú gerjesztéssel spektrális csúcs eltolódásából (0.6 nm), a legnagyobb következtetett tágulás sebesség  $6 \cdot 10^7 \text{ cm/s}$ -nak adódott. Ez több mint kétszer nagyobb érték a korábbi, hasonló lézerrendszerekkel végzett kísérletekhez képest. Az ebből számolt gyorsulás értékét ( $1,7 \cdot 10^{18} \text{ m/s}^2$ ) összehasonlítottam a lézerimpulzus spektrális sáv szélességének változását alapul vevő modellel. Az így számított  $3,1 \cdot 10^{18} \text{ m/s}^2$  gyorsulás nagyságrendi egyezést mutat a klasszikus módszerrel számolttal. A csúcsintenzitás környezetében tapasztalt nagy tágulási sebesség értelmezéséhez közelítő számítást adtam az elektronhőmérséklet és a lézertér fénynyomásának figyelembe vételével.**

## **Az értekezéshez felhasznált referált folyóiratcikkek :**

MTMT azonosító: 10052608

### **I.**

X. Ropagnol, **Zs. Kovács**, B. Gilicze, M. Zhuldybina, F. Blanchard, Carlos, M. Garcia-Rosas, S. Szatmári, I. B. Foldes, T. Ozaki; "*Intense sub-terahertz radiation from wide-bandgap semiconductor based large-aperture photoconductive antennas pumped by UV lasers*". New Journal of Physics 21(11), (2019)

### **II.**

X. Ropagnol, **Zs. Kovács**, B. Gilicze, M. Zhuldybina, F. Blanchard, Carlos, M. Garcia-Rosas, S. Szatmári, I. B. Foldes, T. Ozaki; "*Intense sub-terahertz radiation from wide-bandgap semiconductor based large-aperture photoconductive antennas pumped by UV lasers*". New Journal of Physics 21(11), (2019).

### **III.**

**Zs. Kovács**, K. Bali, B. Gilicze, S. Szatmári and I. B. Földes; "*Reflectivity and spectral shift from laser plasmas generated by high-contrast, high-intensity KrF laser pulses*". Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences Volume 378, Issue 2184, (2020).

### **IV.**

**Zs. Kovács**, B. Gilicze, S. Szatmári, I. B. Földes; "*Large Spectral Shift of Reflected Radiation From Laser Plasmas Generated by High Contrast KrF Laser Pulses*". Frontiers in Physics, Frontiers in Physics, Volume 8, id. 321, (2020).