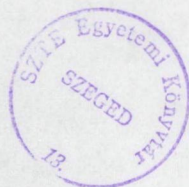


Szilárdtest lézerplazmában keletkező
felharmonikusok vizsgálata

PhD értekezés tézisei

Gál Kinga-Izabella



Témavezető: Földes István, a fizikai tudomány kandidátusa
Egyetemi konzulens: Szatmári Sándor, a fizikai tudomány doktora

Szegedi Tudományegyetem
Kísérleti Fizikai Tanszék
Szeged
2002

1. Tudományos előzmények, célkitűzések

A plazmafizikai kutatásokra serkentőleg hatott azon felismerés, hogy a Napban a plazmaállapotú hidrogén fúziója az energia forrása. Ez a magas hőmérsékletű, sűrű plazma létrehozása felé fordította a kutatások irányát. Magas hőmérsékletű plazmát kétféle módon állítanak elő napjainkban: mágneses összetartással (tokamakokban), illetve nagyintenzitású lézerek anyaggal való kölcsönhatásának eredményeként. A lézer-anyag kölcsönhatások során észlelt nemlinearitások más alkalmazások irányába is eltolták az alapkutatásokat. Ezek közül az egyik legfontosabb az ún. vízablakba (2.3-4.1 nm közötti hullámhossztartomány) eső koherens röntgensugárzás előállítása, amely mind az élő mind az élettelen tudományok számára egy hatékony diagnosztika alapjául szolgálhat.

A nagyintenzitású lézereknek atomokkal, molekulákkal vagy atomcsoportokkal illetve szilárdtesttel való kölcsönhatása során az anyagban nemlinearitások lépnek fel, aminek következtében a lézerfény körfrekvenciájának többszörösével rendelkező körfrekvenciájú koherens sugárzás jön létre. Ezt nevezzük *felharmonikusok keltésnek*. A felharmonikusok keltésének egyik legígéretesebb megoldása a plazmában történő felharmonikusok keltés.

A plazmában keletkező felharmonikusok gerjesztési mechanizmusainak feltárása céljából több kutatócsoport is végzett kísérleteket, amelyek során különböző impulzushosszú és hullámhosszú lézereket használtak. A gerjesztési mechanizmus megértése szempontjából fontos a különböző lineáris polarizációjú lézernyalábok által keltett felharmonikusok összehasonlítása.

A felharmonikusok polarizációjának a keltő lézer polarizációjától való függésének meghatározására irányuló kísérleti eredmények ellentmondók. Ugyanakkor a kísérleti eredmények értelmezését célzó modellek nem támasztják alá teljes mértékben a mérési tapasztalatokat.

A különböző hullámhosszú és impulzushosszú lézerek által keltett szilárdtest-lézerplazmában keletkező felharmonikusok tulajdonságai eltérőek, ezért

- vizsgálni kívántuk a 700 fs-os KrF lézerimpulzus által keltett másod- és harmadrendű felharmonikusok polarizációját a gerjesztő nyaláb polarizációjának, valamint a céltárgy anyagi minőségének függvényében.

A felharmonikusok keltés határfokának optimalizálása érdekében fontos megérteni a gerjesztő nyaláb paramétereinek hatását a felharmonikusok keletkezésére, ezért

- célul tűztük ki egy olyan hidrodinamikai modell kidolgozását, amely a kritikus réteg körül keletkező felharmonikusok polarizációját írja le a gerjesztő nyaláb polarizációjának függvényében. A modellezés során, analitikus, nemperturbatív, lokális leírást használtunk, amely a perturbatív modellek továbbfejlesztése.

Áttekintve a 100 fs -10 ps impulzushosszú lézerekkel keltett plazmákban létrejövő felharmonikusok irodalmát, azt tapasztaltuk, hogy s-polarizált nyalábbal is lehet páros rendű s-polarizált felharmonikusokat keltetni ebben az impulzushossz tartományban. A jelenség okára a hidrodinamikai modellek nem világítanak rá. Feltételeztem, hogy az elméletek és kísérletek közötti eltérés oka a mágneses tér elhanyagolása az elektronok mozgásának szempontjából nemrelativisztikus esetben.

- Ezért elemezni kívántam az elektromágneses teret az optikailag ritka és sűrű plazmákban, különös tekintettel a mágneses tér

szerepére, valamint

- célul tűztem ki ebben a speciális konfigurációjú elektromágneses térben mozgó elektron által kibocsátott felharmonikusok polarizációjának meghatározását.

2. Vizsgálati módszerek

A meredek sűrűséggradiensű plazmában keltett felharmonikusok polarizációs állapotának vizsgálatát célzó mérések egy Szatmári-féle hibrid festék-excimer lézerrendszer által kibocsátott 15 mJ energiájú, 700 fs impulzusedejű, 248 nm hullámhosszú lézerimpulzussal történtek. Az így kapott lineárisan polarizált nyalábot egy $f=330$ mm fókusztávolságú lencse lefókuszálta egy céltárgy felületére, ahol a maximális fókusztávolságú intenzitás $5 \cdot 10^{15}$ W/cm² volt.

Az előimpulzustól való mentesség biztosítására, amely a meredek sűrűséggradiensű plazma létrehozásának feltétele, a Szatmári-féle hibrid festék-excimer lézerrendszer erősítő fokozatai közé szűrőket helyeztem el. Ennek eredményeként a nagyintenzitású lézernyaláb valóban a szilárdtest felületen, azaz a meredek sűrűséggradiensű plazmában, és nem az erősített spontán emisszió által keltett előplazmában keltette a felharmonikusokat.

A második és harmadik felharmonikus polarizációjának a keltő lézer polarizációjától való függésének meghatározásához a keltő lézerimpulzus polarizációjának változtatása, illetve a keletkezett felharmonikusok polarizációjának elemzése szükséges. A lézerrendszer és a céltárgy geometriai elrendezésének következtében a bccsés p-polarizáltak adódtak. Az s-polarizációjú

gerjesztést a p-polarizált nyaláb sorozatos reflexiójával állítottuk elő. Az keletkező felharmonikusok polarizációjának megállapítása egy házi készítésű speciális vákuum-ultraibolya polarizátorral történt.

A kísérletek során tapasztalt tulajdonságok értelmezése céljából kidolgozott modell a plazma hidrodinamikai egyenleteire alapszik. Ez az egyenletrendszer a Maxwell egyenletekből, a kontinuitási egyenletből illetve a mozgásegyenletből áll, figyelembe véve a plazma kvázineutralitásából és a gerjesztő elektromágneses tér intenzitásának nagyságából származó egyszerűsítéseket. Az egyenletek Fourier analízisének eredményeként megadhatók a kritikus felület környezetében keletkező magasabb rendű áram-sűrűségek, amelyeket az elektronok rezgési sebességének és sűrűségének különböző rendű Fourier komponenseinek csatolása eredményez. A hullámegyenlet értelmében a magasabb rendű áram-sűrűségek a magasabb rendű felharmonikusok forrásai.

A hullámhosszal összemérhető méretű plazmában keltett felharmonikusok polarizációs állapotának leírására kidolgozott egy elektron modell klasszikus elektrodinamikai elgondolásokon alapszik. A modell kidolgozása során az alábbi gondolatmenetet követtem: 1. meghatároztam az elektromágneses teret az optikailag ritka és sűrű plazmában, 2. elemeztem az elektronok mozgását a plazmában, 3. elemeztem az elektronok nemlineáris rezgése során kibocsájtott elektromágneses sugárzás polarizációját és relatív nagyságát.

A plazmában keletkező elektromágneses tér meghatározása céljából a plazmát infinitezimális rétegekre bontottam. Az egyes réteghatárokon az elektromos térerősség és a mágneses indukció amplitúdó-változásának leírására a Fresnel formulákat használtam figyelembe véve a plazma törésmutatójának helyfüggését.

Az elektronok rezgésének leírása céljából egy koordináta-transzformációt alkalmaztam, amely lehetővé tette, hogy egyszerű tárgyalásmódot alkalmazzunk s- és p-polarizált gerjesztés esetén, ugyanakkor a számításokat is átláthatóbbá tette.

A nemlineáris rezgést végző elektronok által kibocsájtott sugárzást a retardált vektorpotenciállal jellemeztem, amelyből az egy elektron által kibocsájtott felharmonikus intenzitását származtattam.

3. Új tudományos eredmények

1. Részt vettem annak kimutatásában, hogy a 248 nm hullámhosszú és 700 fs impulzushosszú lézernyalábbal szilárdtest felületén keltett felharmonikusok megtartják a gerjesztő lézer polarizációját.

A kísérleti tapasztalatok alapján levonható a következő, hogy a KrF lézer által kibocsájtott lézernyalábbal keltethető másod- és harmadrendű felharmonikus szilárdtest felületen. Előimpulzus-mentes esetben a keltett másod- és harmadrendű felharmonikus megtartja a gerjesztő lézer polarizációját. A kísérletsorozat különlegessége, hogy s-polarizált másodrendű felharmonikust is észleltünk s-polarizált gerjesztés esetén. A másod- és harmadrendű felharmonikusok polarizációjának foka független a céltárgy anyagának minőségétől [2, 3, 5].

2. Egy Fourier analízisre épülő hidrodinamikai modellt dolgoztam ki, amely megmagyarázza a másod és harmadrendű felharmonikusok keletkezését a kritikus felület környezetében.

A Maxwell-egyenletekre, a mozgásegyenletre és a kontinuu-

itási-egyenletre épülő modell a másod- és harmadrendű felharmonikus keletkezését magyarázza meg nemperturbatív módon. Az egyenletrendszer Fourier analízisével meghatároztam a különböző rendű áramsűrűségeket, amelyek az adott rendű felharmonikusok forrásai. Ismerve a forrástagot, a Maxwell-egyenletekből származtatott hullámegyenletek alapján meghatároztam a felharmonikusok polarizációját. A másodrendű felharmonikus a beeső nyaláb polarizációjától függetlenül p-polarizált a nemperturbatív elmélet szerint is. A harmadrendű felharmonikus keletkezését különböző csatolások eredményezik, a fő járulékot az alapharmonikus illetve a másodrendű felharmonikus csatolása adja [2, 5].

3. Analitikus módon tanulmányoztam az elektromágneses tér szerkezetét a közepes meredekségű plazmákban. Bebizonyítottam, hogy meredek sűrűséggradiensű plazmák esetén az elektromágneses tér konfigurációja megegyezik s- és p-polarizált esetben. Ráműtattam arra, hogy a fény anomális teljes visszaverődést szenved a klasszikus reflexió pont és a kritikus felület közötti rétegen, majd a nyaláb transzmittálódott része a inhomogén hullámként hatol be az optikailag sűrű közegbe.

Optikailag ritka plazmák esetében az elektromágneses tér struktúráját Ginzburg az 1900-as évek közepén hidrodinamikai alapelveket használva határozta meg. Ultrarövid impulzusok esetében ez a módszer csak a keletkezett plazma optikailag ritka térrészében alkalmazható. Ezért a Fresnel formulák segítségével egységes leírási módszert használva az optikailag ritka és sűrű plazmában egyaránt meghatároztam a tér struktúráját. Kiderült, hogy rövid skálahosszú plazmákban az s- és p-polarizált nyaláb keltette elektromágneses tér konfigurációja megegyezik. Meredek sűrűséggradiensek esetében a klasszikus fordulópont és

a kritikus felület közötti távolság a hullámhossz törtrésze és ekkor egyúttal a réteg törésmutatója kisebb, mint az ϵ_0 mindkét oldalon határoló plazmáé, ily módon ezen a rétegen a hullám anomális teljes visszaverődést szenved. Az anomális teljes visszaverődés során transzmittálódott nyaláb inhomogén hullámként hatol be az optikailag sűrű térrészbe. Rámutattam arra, hogy az inhomogén hullám mágneses indukciójának amplitúdója a közeg sajátosságainak következtében egy lokális maximummal rendelkezik [1, 6, 9].

4. Analitikusan vizsgáltam az elektron mozgását a 3. pontban meghatározott elektromágneses térben. Bebizonyítottam, hogy a plazma optikailag sűrű tartományában a mágneses indukciónak nemrelativisztikus esetben is meghatározó szerepe van az elektronok mozgásában. Kimutattam, hogy a teljes Lorentz erő hatására mozgó elektronok mozgásának nemlinearitásai okozhatják a visszaszórt sugárzásban észlelt, az alapfrekvencia többszörösével rendelkező koherens sugárzás jelenlétét.

Az optikailag sűrű közeg sajátosságainak következménye, hogy a mágneses indukció amplitúdójának lokális értéke az elektromos tér amplitúdójának többszöröse is lehet. Ekkor a Lorentz erőben a mágneses indukciót tartalmazó tag nem hanyagolható el. A teljes Lorentz erő hatására az elektronok nemlineárisan rezegnek. Egy koordináta-transzformáció segítségével sikerült egységes tárgyalási módot találni az s- illetve p-polarizált nyalábok terében rezgő elektronok mozgásának leírására. A nemlineáris rezgések során az elektronok felharmonikusokat is tartalmazó elektromágneses sugárzást bocsájtanak ki. Számolásaim szerint ezeknek a felharmonikusoknak a polarizációja megegyezik a keltő lézer polarizációjával. A p-polarizált nyalábok által keltett adott rendű felharmonikus intenzitása egy nagyságrenddel nagyobb

adódott, mint s-polarizált gerjesztés esetén [1, 6, 9].

A doktori értekezésben ismertetett tudományos eredmények a nagyintenzitású KrF lézer által, szilárdtest-lézerplazmában keletkező felharmonikusokat elemzik. A felharmonikusok gerjesztésének megértése egy perspektívát jelenthet koherens vákuumult-raibolya illetve röntgen fényforrás létrehozására.

Az értekezésben bemutatott eredmények részben Szegeden a Szegedi Tudományegyetem Kísérleti Fizikai Tanszékén, részben Budapesten a KFKI Részecske és Magfizikai Kutató Intézetének Plazmafizikai Főosztályán születtek.

4. Irodalom

Referált folyóiratban megjelent publikációk:

- [1] K. Gál and S. Varró, "Polarization Properties of High Harmonics Generated on Solid Surfaces", *Opt. Comm.* **198**, pp. 419-431, 2001.
- [2] G. Veres, J.S. Bakos, I.B. Földes, K. Gál, Z. Juhász, G. Kocsis, and S. Szatmári, „Polarization of Harmonics Generated by Ultrashort KrF-laser Pulses on Solid Surfaces”, *Europhys. Lett.* **48**, pp. 390-396, 1999.
- [3] I.B. Földes, J.S. Bakos, K. Gál, Z. Juhász, M. Á. Kedves, G. Kocsis, S. Szatmári, and G. Veres, „Properties of High Harmonics Generated by Ultrashort Laser Pulses on Solid Surfaces”, *Laser Physics* **10**, 264-269, 2000.
- [4] *B. Hopp, Z. Tóth, K. Gál, Á. Mechler, Zs. Bor, S.D. Mostaizis, S. Georgiou and C. Fotakis, „Time-resolved investigation of the transient surface reflection changes of subpicosecond excimer laser ablated liquids”, *Appl. Phys. A* **69**, pp. S191-S194, 1999.

Konferencia kiadványban megjelent publikációk:

- [5] I.B. Földes, K. Gál, „Felharmonikus-keltés lézerplazmában”, Fény-anyag kölcsönhatás, kvantumoptika -Tavaszi iskola, Pécs, Magyarország, 64-72 o., 1999.

- [6] S. Varró and K. Gál, „Single Particle Analysis of Second and Third Harmonic Generation on Solid Surfaces”, *Europhysics Conference Abstracts 24B*, pp. 1701-1704, 2000.
- [7] *I.B. Földes, J. S. Bakos, K. Gál, G. Kocsis, E. Rácz, S. Szatmári, S. Varró and G. Veres, „On Polarization Properties of Harmonics Generated in Laser Plasmas on Solid Surfaces”, XVth Europhysics Conference on Atomic and Molecular Physics of Ionized Gases, pp. 380-381, Lillafüred, Magyarország, 2000.
- [8] *G. Veres, J.S. Bakos, I.B. Földes, K. Gál, G. Kocsis, E. Rácz, S. Szatmári, S. Varró, „Szilárdtest lézerplazmában keltett felharmonikusok polarizációs tulajdonságai”, IV. Szimpózium a hazai kvantumelektronikai kutatások eredményeiről, Budapest, Magyarország, P20-P21 o., 2000.
- [9] K. Gál and S. Varró, „Single Electron Model of Second and Third Harmonic Generation on Solid Surfaces”, *Proceedings of SPIE 4424*, pp. 228-231, 2001.

A *-gal jelölt munkákat nem használtam fel az értekezésben.

