

PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM

Fizika Doktori Iskola

Ultrarövid lézerimpulzusok kölcsönhatása dielektrikumközegekkel

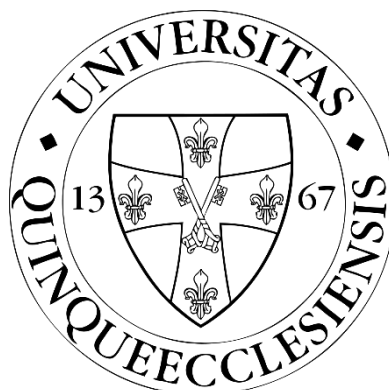
Tézisfüzet

Kalmárné Csajbók Viktória

Témavezető:

Dr. Dombi Péter

Wigner Fizikai Kutatóközpont



2022

A kutatások előzménye

Az elmúlt hatvan évben az impulzusüzemű lézerek technológiájában végbemenő hatalmas fejlődés legszembetűnőbb eredménye az volt, hogy egyre rövidebb lézerimpulzusokat állítottak elő, mind nagyobb impulzusenergiával. Ezen paraméterek nagyságrendeket javultak az első lézerek jellemzőihez képest. A kezdetben nanoszekundumos impulzusokat adó Q-kapcsolt lézereket gyorsan túlszárnyalták a módusszinkronizált pikoszekundumos, majd femtoszekundumos lézerek, melyeket egyre szofisztikáltabb optikai erősítőkkel egészítettek ki. Bármilyen tudományterületen megfigyelhető, hogy egy ilyen gyors ütemű fejlődés maga után vonja új kutatási és fejlesztési területek kialakulását is.

A lézerimpulzusok rövidülésével új kutatási területek alakultak ki az attoszekundumos fizikától kezdve az orvosi alkalmazásokon át egészen a lézeres mikro- és nanostrukturálási eljárásokig. Az 5-50 fs közötti impulzusokat előállítani képes szilárdtestlézerek és lézererősítők (a titán-zafír kristály kiváló lézerfizikai tulajdonságaira építve) az 1990-es évek elején jelentek meg, megnyitva ezzel az utat a lézerfény és az anyag minden eddiginél magasabb intenzitás mellett végbemenő kölcsönhatásának tanulmányozása és ennek alkalmazásai előtt (Brabec & Krausz, 2000) (Krausz & Stockman, 2014).

Optikai elemek roncsolási küszöbével kapcsolatos kutatások

Az egyik újonnan kialakult kutatási terület a lézerimpulzusok energiájának növekedésének köszönhető. A szilárdtestlézer-technológia továbbfejlesztésében kulcsszerepet játszik a lézerrendszerekben található optikai elemek roncsolási küszöbének tanulmányozása és növelése. Az impulzusenergia skálázásához és az ilyen lézerek megfelelő méretezéséhez egyre nagyobb optikai apertúrák váltak szükségessé azért, hogy a megnövelt teljesítményt is jól tőrjék az egyes tükrök, nyalábosztók, erősítőkristályok, rácsok stb. Az optikai elemek méretének növelésével erősen nemlineárisan növekszik az előállítási költség, így ha sikerül nagy roncsolási küszöbű komponenseket előállítani, azzal a teljes lézerrendszer összköltségét drasztikusan csökkenteni lehet azáltal, hogy nem szükséges nagy apertúrájú nyalábok használata.

A dolgozat egyik témája így ebből a szempontból kapcsolódik a nagy intenzitású fény-anyag kölcsönhatás területéhez. Különböző optikai elemek lézeres roncsolási küszöbét vizsgáltam egyidejűleg több szempontból. A tanulmány készítésekor fellelhető irodalomban hiányoztak az egyszerre több tükrőjellelmezőt magukba foglaló cikkek a látható/közeli infravörös

tartományban működő femtoszekundumos impulzushosszúságú tartományban, így szisztematikus vizsgálatokat végeztem erre vonatkozóan. A kísérleteim során a valós használatot jól közelítő körülmények között mértem abszolút roncsolási küszöbököt, egy olyan módszerrel amely egy több optika összehasonlításához alkalmas gyors eljárás is egyben.

A német ipari együttműködésünknek köszönhetően (Layertec GmbH) nagyszámú mintadarabon végezhettem kísérletet. Ezen tükrök egy része kísérleti darab volt, részben pedig valós, általuk forgalmazott tükröket kaptam. Közös bennük, hogy mindegyik darabot femtoszekundumos alkalmazáshoz tervezték és állították elő. Összefüggéseket tudtam feltárni a gyártási technika, a rétegszám, a tükör anyaga, a rétegeken belüli tervezett maximális térerősség, a reflektivitás, a csoportkésleltetés-diszperzió és a roncsolási küszöb között. Ezen szempontokat együttesen figyelembe véve értékeltem ki a mérési eredményeket. A méréseket 1 kHz-es ismétlési frekvenciával végeztem 42 fs-os impulzusokkal 800 nm körüli hullámhosszon.

Optikai úton indukált áramkeltés dielektrikumközegben

A lézerfény és dielektrikumközegek kölcsönhatásának egy másik érdekes jelensége az optikailag indukált tranziens fémesedés. Ez az újonnan felfedezett jelenség a már korábban Jacob Khurgin által megjósolt folyamat (Khurgin, 1995), miszerint lehetséges tiltott sávval rendelkező anyagokban optikai úton áramot kelteni előfeszítés nélkül. Ezt az új jelenséget kísérletileg 2013-ban sikerült először kimutatni. (Schiffrin, et al., 2013) Azóta egyre több tanulmány készült és jelenleg is készül ebben a témakörben. Bár a szigetelőkben optikai úton keltett áramok eredetének kutatása még mindig aktív terület, már számos alkalmazásbeli ötletet igyekeznek életre kelteni. Ez is azt mutatja, hogy milyen gyorsan fejlődik az ultragyors tudomány területe. Magának a jelenségnek a lényege, hogy kevés optikai ciklusú, de nagy intenzitású lézimpulzussal megvilágítva egy dielektrikumközeget, az impulzus áthaladásának idejére vezetővé válik és az impulzus elektromos terének hatására áram folyik az elektródák között. Ennek a keltett áramnak a nagysága és az iránya kapcsolatban áll az impulzus alakjával.

Az optikai úton keltett áramok alkalmazását továbbvittem könnyebben elérhető felhasználási irányokba. Ennek a folyamatnak a megvalósítását elsőként végeztem el egy olyan kompakt titán-zafir oszcillátorral, amivel korábban ezt a jelenséget még nem demonstrálták. Ehhez rendelkezésre állt egy egyedülálló, a Venteon GmbH által gyártott Pulse:ONE típusú oszcillátor, amely <6 fs időtartamú impulzusokat képes biztosítani kb. 270 mW

átlagteljesítménnyel, 80 MHz ismétlési frekvenciával. Ezen peremfeltételek ismeretében terveztem és építettem meg reflektív optikai elemekből egy erős fókuszálást biztosító kísérleti elrendezést az optikai úton keltett áramok méréséhez.

A kísérlet nehézsége, hogy a nyalábtágítás az extrém rövid impulzushossz miatt csak reflektív elemekkel oldható meg, hogy végül egy egyedi optikai rendszer segítségével 2 μm közeli fókuszfolttal elérhetővé váljon a szükséges intenzitás. Mivel az optikai úton történő áramkeltéshez szükséges intenzitás a $\sim 10^{13}$ W/cm² közelébe esik, és ezzel egyidejűleg biztosítani kell, hogy a minta felületére érkező impulzus időtartama 5,5 fs körül maradjon, ezért a rendelkezésre álló oszcillátorral minden elvégzett kísérletnél szűk az optimális működési tartomány.

Optikai erősítők kihagyásával, nJ alatti nagyságrendű impulzusenergiákkal elsőként bizonyítottam, hogy lehetséges optikai úton, külső elektromágneses térrel áramot keltetni tiltott sávval rendelkező anyagokban, amelyeket a szigetelők felületén alkalmasan elhelyezett elektródákkal mérni is lehet. Innen már tovább lehet lépni az áramkeltés és -vezérlés optimalizálása és annak alkalmazásai felé, hiszen a minden eddiginél nagyobb ismétlési frekvencia teszi lehetővé a jelenség tényleges alkalmazásait.

Tézispontok

Mindezek alapján saját kutatási eredményeimre építve a következő tézispontokat fogalmazom meg.

1. tézispont: Nagy reflexiójú lézertükrök esetén kis és nagy törésmutatójú anyagokat felváltva rétegeznek egymásra. Az így kialakított struktúra szerkezete meghatározza a rétegeken belüli maximális elektromos térerősséget. A femtoszekundumos lézerekkel történő megvilágítás során kialakuló nagy térerősség nemlineáris folyamatokat indít be, emiatt az egyes rétegekben sokfotonos gerjesztési folyamatok is lejátszódnak. Ez a hatás a nagy törésmutatójú rétegekben (jellemzően TiO_2) jelentősebb, és jelentősen csökkenti a roncsolási küszöböt. 29 különböző rétegrendszer kísérleti vizsgálatával megmutattam, hogy a nagy törésmutatójú anyagot tartalmazó rétegek femtoszekundumos roncsolási küszöbe jelentősen magasabb a nagy tiltott sávval rendelkező anyagok (Ta_2O_5 , ZrO_2 , HfO_2) használatával, valamint olyan rétegekben, amelyek szerkezetét csökkentett elektromos térerősségre optimalizálták. E két módszer együttes alkalmazásával a roncsolási küszöb akár 2,4-szeresére növelhető a manapság leginkább érdekes <50 fs-os impulzusok esetén [T1].

2. tézispont: Az új fejlesztésű fém-dielektrikum hibridtükrök egy szubsztrátra felvitt ezüstrétegből és az arra párologtatott (vagy porlasztott) 3-7 rétegpárból állnak. Előnyös tulajdonságuk, hogy a dielektrikumtükröknél jóval alacsonyabb rétegszámmal tudják biztosítani a magas reflexiót, nagy reflexiós sáv szélességet és a kontrollált csoportkésleltetés-diszperziót. Kísérleti úton megvizsgáltam ilyen újfajta fém-dielektrikum hibrid tükrök roncsolási viselkedését. A kísérleteket 42 fs időtartamú, 780 nm középhullámhosszú, 1 kHz ismétlési frekvenciájú impulzusokkal végeztem. Megmutattam, hogy fém-dielektrikum hibrid tükrök esetén az ezüstréteg jelenléte nem gátolja a femtoszekundumos felhasználást, az általam mért legnagyobb roncsolási küszöb a fém-dielektrikum tükrökre vonatkozóan $1,06 \text{ J/cm}^2$ volt, amely egy rétegen belül kialakuló maximális térerősségre optimalizált $\text{SiO}_2/\text{HfO}_2$

rétegrendű darab volt. A hagyományos HR tükrök esetén is jellemzően 0,9-1,7 J/cm² közötti érték volt mérhető. A femtoszekundumos felhasználást biztosítja az is, hogy magas reflexió úgy érhető el, ha az ezüstrétegre egyetlen dielektrikum védőréteg helyett dielektrikum multiréteget visznek fel. Ezáltal jön létre egy tulajdonságaiban hangolható új, magas roncsolási küszöbűtükörtípus, mely a lézerimpulzusok számára leginkább fontos 730-880 nm-es hullámhossztartományon képes akár 99 % fölötti reflexiót is biztosítani.[T1, T2].

3. tézispont: 8 darab innovatív, femtoszekundumos dielektrikum- illetve fém-dielektrikum hibrid tükör standard roncsolási tesztelésével megmutattam, hogy a kísérleteknél alkalmazott lövések száma a 10-10⁵-lövéses tartományban csak csekély mértékben befolyásolja a roncsolási küszöböt, valamint hogy a lövésszám-roncsolási küszöb karakterisztika a tükrök típusától függetlenül közel azonos. A roncsolási küszöb csökkenése a 10-10⁵-lövéses tartományban egyik tükör esetén sem volt nagyobb 20%-nál, ami a roncsolás szempontjából meghatározó és ezért intenzíven kutatott inkubációs hatások elhanyagolható jelenlétére utal [T2].

4. tézispont: Megmutattam, hogy dielektrikumközegekben (kvarcüvegben és HfO₂-ban) már nJ alatti energiájú lézerimpulzusokkal is elő lehet idézni a közeg tranziens fémesedését [T3], ami nemrég felfedezett ultragyors optikai jelenséggént a nemzetközi kutatások középpontjában áll. Ezáltal optikai úton áramot lehet kelteni az (ebből a szempontból) új anyagként tesztelt HfO₂ mellett nagy tiltott sávval rendelkező dielektrikumban is, mint például a kvarcüvegben. Az impulzusok vivő-burkoló fázisával az így keltett áram irányát kontrollálni lehet az egyik, illetve a másik elektroda irányába. Ezt a jelenséget korábban csak legalább 30-40 nJ-os impulzusokkal tudták kimutatni, komplex, erősített lézerrendszerek segítségével. A kísérletet én elsőként egy 80 MHz ismétlési frekvenciájú, kompakt lézeroszcillátorra alapozva építettem fel, egy reflektív parabolatükör-rendszer optimalizálásával, amelynek segítségével mind a szoros fókuszálás mind a fókuszbeli rövid impulzushossz elérhetővé vált [T3]. Így mind az ismétlési frekvencia, mind az impulzusenergia tekintetében 2 nagyságrendet javítottam az áramkontroll

megvalósításához szükséges paramétereken, megnyitva ezzel az utat kompakt lézerekre épülő PHz-es optoelektronikai eszközök megvalósítása előtt.

Tézispontokhoz használt saját publikációk

[T1] **V. Csajbók**, L. Szikszai, B. J. Nagy, és P. Dombi, "Femtosecond damage resistance of femtosecond multilayer and hybrid mirrors," *Opt. Lett.* 41, 3527-3530 (2016)

[T2] **V. Csajbók**, Z. Bedőházi, B. J. Nagy, és P. Dombi, "Ultrafast multipulse damage threshold of femtosecond high reflectors," *Appl. Opt.* 57, 340-343 (2018)

[T3] V. Hanus, **V. Csajbók**, Z. Pápa, J. Budai, Z. Márton, G Z. Kiss, P. Sándor, P. Paul, A. Szeghalmi, Z. Wang, B. Bergues, M. F. Kling, G. Molnár, J. Volk, és P. Dombi, "Light-field-driven current control in solids with pJ-level laser pulses at 80 MHz repetition rate," *Optica* 8, 570-576 (2021)

Irodalomjegyzék

- Brabec, T., és F. Krausz. 2000. „Intense few-cycle laser fields: Frontiers of nonlinear optics.” *Rev. Mod. Phys.* 72 545.
- Krausz, F., és M. I. Stockman. 2014. „Attosecond metrology: from electron capture to future signal processing.” *Nature Photonics volume 8* 205-213.
- Khurgin, J. B. 1995. „Generation of the terahertz radiation using $x(3)$ in semiconductor.” *J. Nonlinear Opt. Phys. Mater.* 4, p 163-189.
- Schiffrin, A., T. Paasch-Colberg, N. Karpowicz, V. Apalkov, D. Gerster, S. Mühlbrandt, M. Korbman, és mtsai. 2013. „Optical-field-induced current in dielectrics.” *Nature volume 493* 70–74.
- Nagy, B. J., L. Gallais, L. Vámos, D. Oszetzky, P. Rácz, és and Dombi P. 2015. „Direct comparison of kilohertz- and megahertz-repetition-rate femtosecond damage threshold.” *Optics Letters* 40 2525.