

PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM

Fizika Doktori Iskola

Nemlineáris optika és spektroszkópia program

Kontaktrácson alapuló nagyenergiájú terahertzes impulzusforrások fejlesztése

PhD értekezés

Ollmann Zoltán



Témavezető:

Dr. Almási Gábor

Egyetemi docens

Pécs, 2015

1 ELŐZMÉNYEK ÉS CÉLKITŰZÉSEK

A nemlineáris spektroszkópia [1], a részecske manipuláció [2], és sok más alkalmazás (orvosi, biztonságtechnikai) [3,4] megkövetelik a nagyenergiájú és nagy térerősségű THz-es impulzusok keltését. A femtoszekundumos lézerrimpulzusok optikai egyenirányítása (OE) nemlineáris kristályokban hatékony módszer pikoszekundumos THz-es impulzusok keltésére [5,6]. ZnTe félvezetőt $0,8\ \mu\text{m}$ hullámhosszon pumpálva kollineáris elrendezés esetén lehetséges az OE-sal történő THz keltés [7]. Azonban a két-fotonos abszorpció miatt a pumpáló intenzitás [8-10], és ennek következtében a THz keltés határfoka korlátozott [7].

Optikai egyenirányításra alkalmas anyag a LiNbO_3 (LN). Nemlineáris együtthatója kiemelkedően nagy, és $0,8\ \mu\text{m}$ hullámhosszúságú pumpálás esetén a két-fotonos abszorpció nem valósulhat meg. A LN THz-es tartományon vett

törésmutatója jóval nagyobb, mint a közeli infravörös tartományon, ezért kollineáris esetben a sebességillesztés nem teljesül. Azonban a döntött impulzusfrontú gerjesztés (DIFG) megoldást jelent a sebességkomponensek kiegyenlítésére [11]. A DIFG egy korábbi megvalósításában az impulzusfront megdöntését létrehozó diffrakciós rács és a nemlineáris kristály között leképező optika helyezkedik el. Egy ilyen elrendezés esetén a leképezésből származó optikai torzítások és a reflexiós veszteségek jelentősen korlátozzák a hatékony THz keltést [12]. Ezek elkerülhetőek, ha a diffrakciós rácsot a nemlineáris kristály belépő felületén alakítják ki [13]. Ezt a speciális DIFG-t hívják kontaktrács (KR) elrendezésnek. A KR bevezetésével az optikai torzítások minimalizálhatók, ami a THz-es nyaláb minőségi javulását eredményezi. Ezen kívül a pumpáló keresztmetszet, és ennek következtében a pumpáló energia is növelhető, ami a keltett THz-es impulzusok energiájának növekedését

eredményezi. Nagashima és Kosuge LN domborzati rácsok diffrakciós hatásfokát vizsgálta [14]. Numerikus számolásaik azt mutatják, hogy ha egy bináris LN rács belépő felületét ömlesztett kvarccal töltik fel, a diffrakciós hatásfok 40%-ról 90%-ra nő. Egy ilyen elrendezés azonban a mikrostruktúrák megfelelő illesztése miatt nehezen kivitelezhető.

A DIFG megoldást jelent a ZnTe félvezető hosszabb hullámhosszú pumpálására is. A hosszabb hullámhosszakon jelentősen nagyobb konverziós hatásfok érhető el [12]. Ebben az esetben csak a magasabb rendű több-fotonos abszorpciók lesznek effektívek, ami lehetővé teszi a pumpáló intenzitás növelését. Így a ZnTe és más félvezetők (mint például a GaAs vagy GaP) a nagyenergiájú THz-es források alapanyagai lehetnek [12]. ZnTe esetében a 0,8 μm -nél hosszabb pumpáló hullámhossz megköveteli a DIFG használatát. A szükséges impulzusfront dőlésszög 2,0 μm -nél rövidebb hullámhosszak

esetén kisebb, mint 30° . Ez a dőlésszög lényegesen kisebb, mint a LN esetében szükséges 63° . A kisebb impulzusfront dőlésszög és ennek következtében a kisebb szögdiszperzió [15], illetve a kisebb törésmutató együttesen teszik lehetővé egy nagy pumpáló keresztmetszetű KR rendszer megvalósítását.

Az értekezés tudományos eredményeket bemutató részének első felében javaslatot teszek egy LN alapú KR elrendezésre, ahol a domborzati rácsprofil feltöltésére szilárd anyag helyett törésmutató illesztő folyadékot (TIF) használok majd. A javasolt elrendezés esetén különböző TIF-ok esetében meghatározom a diffrakciós hatásfokokat és ismertetem a bináris rácsprofilhoz tartozó optimális paramétereket. A gyakorlati megvalósítás érdekében javaslatot teszek egy olyan elrendezésre, ahol a TIF belépő-felülete és a LN kilépő-felülete döntött. A döntött felületek minimalizálják a fellépő veszteségeket és lehetővé teszik a gyakorlati megvalósítást.

A második részében bemutatom azoknak a modellszámításoknak az eredményeit, melyekben a KR ötletét félvezetőkre (ZnTe, GaAs, GaP) alkalmazom. A különböző anyagok és profiltípusok esetében részletes modellszámításokat végzek, melynek következményeként ismertetem az optimális elrendezéshez tartozó kivitelezési paramétereket. A modellszámítások során elsősorban a diffrakciós hatásfokok maximalizálása a cél. Ismertetem a numerikus számolások eredményeit, a félvezető alapú KR előnyeit és a lehetséges korlátozó tényezőket.

2 MÓDSZEREK

A DIFG esetén a gerjesztés hatásfokát fokozottan befolyásolja a rács diffrakciós hatásfoka. Dielektrikum felületén kialakított transzmissziós rácsok esetében nagy diffrakciós hatásfokot lehet elérni [16] szinusz, illetve bináris profilt alkalmazva [17]. LN esetében reaktív ionmaratással lehet kialakítani a rácsprofil

[18]. Félvezetők esetében (mint például a ZnTe) a különböző domborzati struktúrákat lézeres abláció [19], vagy ionmaratás [20] segítségével lehet létrehozni, melyek közül előbbivel szinusz, utóbbival bináris profil készíthető. Az elrendezések diffrakciós hatásfokát a GSolver szoftver segítségével határoztam meg. A program a szigorú csatolt hullám analízisen alapul [21]. Ez az eljárás a Maxwell egyenletek numerikus megoldását adja meg homogén és periodikus struktúrákra.

Annak érdekében, hogy a Fresnel veszteségek minimalizálva legyenek, a LN és a ZnTe KR-ok kilépő felületét meg kell dönteni. A terjedési hosszak a LN, illetve a ZnTe belsejében is különbözőek, mivel a nyaláb különböző részei, különböző hosszúságú utakat tesznek meg az anyagban. Ez az elrendezés szögdiszperziót okoz, ami a csoportsebesség diszperzió növekedését jelenti. LN alapú KR esetében a törésmutató illesztő folyadék (TIF) belépő felületét meg kell

dönteni. A megdöntés lehetővé teszi a pumpáló nyaláb nagy szögben való belépését és minimalizálja a Fresnel reflexióból adódó veszteséget. A megdöntött felület miatt a pumpáló nyaláb különböző részei különböző utakat tesznek meg a TIF-ban. Ezért megvizsgáltam az ultrarövid lézerimpulzusok terjedését a LN-ban, ZnTe-ban és a TIF-ban.

3 ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

I. Modellszámolások segítségével megmutattam, hogy ha a LN domborzati rács (kontaktrács) rácsfelületét megfelelő törésmutató illesztő folyadékkal töltjük fel, akkor a rács diffrakciós hatásfoka nagyobb lehet, mint 90 %. A törésmutató illesztő folyadékok széles körét kipróbálva arra a következtetésre jutottam, hogy egy LN kristályon kialakított bináris rácsfelületet a korona-üveg (BK7) törésmutatójával megegyező illesztő-folyadékkal feltöltve diffrakciós hatásfokmaximum érhető el. [S1]

II. A jelenlegi anyag megmunkálási technológiával megvalósítható rácsstruktúrát tartalmazó eszközt terveztem, amelyben a törésmutató illesztő folyadék, illetve a LN felületeinek megfelelő kialakítása minimalizálja a Fresnel reflexióból és a szögdiszperzióból adódó veszteségeket. Az

alkalmazott illesztő folyadék törésmutatója megegyezik a korona-üvegével, a rácsállandó $d = 0,35 \mu\text{m}$, a rácsprofil kitöltési tényezője $f = 0,4$, és a kialakított profil mélysége $h = 0,5 \mu\text{m}$. Ezen paramétereket alkalmazva a -1 -es diffrakciós rend teljesíti a sebesség illesztés feltételét és a rendhez tartozó diffrakciós hatásfok értéke 99%. Ezek a feltételek együttesen lehetővé teszik a mJ energiatartományba eső közel egyciklusú THz-es impulzusok keltését. [S1]

III. Az ionmaratás esetleges pontatlansága miatt az előállítás során létrejött rács paraméterei eltérőek lehetnek az általam megadott optimális értékektől. A gyakorlati megvalósítás érdekében meghatároztam a 10%-os diffrakciós hatásfok veszteséget megengedő tolerancia értékeket. A megvizsgált paraméterek közül a bináris rács falmeredeksége befolyásolja legjelentősebben az elérhető diffrakciós hatásfok maximális

értékét, ezért a megvalósítás során ennek a szögnek a csökkentésére különös figyelmet kell fordítani. [S1]

IV. Vizsgálataim szerint ZnTe félvezetőt kontaktrácsként alkalmazva nagy hatásfokú THz-es forrás készíthető. Modellszámítások segítségével megmutattam, hogy megfelelő paramétereket alkalmazva a diffrakciós hatásfok értéke meghaladhatja a 80%-ot és 90%-ot szinusz, illetve bináris domborzati rácsprofil esetén. Az optimális esetekhez tartozó beesési szögek értéke 35° , illetve $17,5^\circ$ volt, $1,7\ \mu\text{m}$ -es pumpálás esetén. Az új modell alapján megtervezett ZnTe félvezető kontaktrács az $1,4 - 1,7\ \mu\text{m}$ hullámhossz tartományon pumpálható. A hullámhossztartomány megválasztását indokolja, hogy az alkalmazható pumpáló intenzitás itt jelentős mértékben meghaladhatja a $0,8\ \mu\text{m}$ hullámhosszú pumpálásnál

elérhető értéket, mivel a hosszabb hullámhosszú tartományon csak két-fotonosnál magasabb rendű abszorpció van jelen. [S2]

V. Az általam elvégzett számítások azt mutatják, hogy az elérhető legmagasabb diffrakciós hatásfok merőleges pumpálást alkalmazva is meghaladja a 75%-ot mind a szinusz, mind a bináris rácsprofil esetében. ZnTe kontaktrácsot merőleges beeséssel pumpálva egy megbízható, kompakt, beállítást nem igénylő, közel egyciklusú, nagyenergiájú THz-es impulzusok keltésére alkalmas forrás készíthető. Ezzel az elrendezéssel az alkalmazható pumpáló nyaláb átmérőt csak az elérhető kristályméret korlátozza. Ennek következtében nagy pumpáló energiát lehet alkalmazni anélkül, hogy a keltett impulzus jelentős időbeli és térbeli torzulást szenvedne. [S2]

VI. A ZnTe esetében kidolgozott eljárás segítségével más típusú félvezetők, mint például a GaAs és a GaP is alkalmassá tehetők arra, hogy kontaktrács rendszerként működjenek. Az eljárás hatékonyságát bizonyítva részletes számolásokat végeztem ezekre a félvezetőkre. A kapott eredmények is alátámasztják, hogy a kontaktrácsok vizsgálatára kidolgozott módszer hatékony és egyszerűen alkalmazható. [S2]

4 AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN

MEGJELENT PUBLIKÁCIÓK

[S1] **Z. Ollmann**, JA Fülöp, J Hebling, G Almási „Design of a high-energy terahertz pulse source based on ZnTe contact grating” OPTICS COMMUNICATIONS 315: pp. 159-163. (2014)

[S2] **Z. Ollmann**, J. Hebling, G. Almási „Design of a contact grating setup for mJ-energy THz pulse generation by optical rectification” APPLIED PHYSICS B - LASERS AND OPTICS 108:(4) pp. 821-826. (2012)

5 EGYÉB PUBLIKÁCIÓK

[S3] JA Fülöp, **Z. Ollmann**, Cs Lombosi, C Skrobol, S Klingebiel, L Pálfalvi, F Krausz, S Karsch, J Hebling „Efficient generation of THz pulses with 0.4 mJ energy” OPTICS EXPRESS 22:(17) pp. 20155-20163. (2014)

6 HIVATKOZÁSOK

- [1] C. Luo, K. Reimann, M. Woerner, and T. Elsaesser, *Appl Phys A* **78**, 435 (2004).
- [2] L. Pálfalvi, J. A. Fülöp, G. Tóth, and J. Hebling, *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams* **17**, 031301 (2014).
- [3] P. H. Siegel, *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on* **52**, 2438 (2004).
- [4] J. F. Federici, B. Schulkin, F. Huang, D. Gary, R. Barat, F. Oliveira, and D. Zimdars, *Semiconductor Science and Technology* **20**, S266 (2005).
- [5] M. Bass, P. A. Franken, J. F. Ward, and G. Weinreich, *Physical Review Letters* **9**, 446 (1962).
- [6] X. C. Zhang, Y. Jin, and X. F. Ma, *Applied Physics Letters* **61**, 2764 (1992).
- [7] F. Blanchard *et al.*, *Opt. Express* **15**, 13212 (2007).
- [8] A. A. Said, M. Sheik-Bahae, D. J. Hagan, T. H. Wei, J. Wang, J. Young, and E. W. Van Stryland, *Journal of the Optical Society of America B* **9**, 405 (1992).
- [9] W.-Q. He, C.-M. Gu, and W.-Z. Shen, *Opt. Express* **14**, 5476 (2006).
- [10] Q. Xing, L. Lang, Z. Tian, N. Zhang, S. Li, K. Wang, L. Chai, and Q. Wang, *Optics Communications* **267**, 422 (2006).
- [11] J. Hebling, G. Almási, I. Kozma, and J. Kuhl, *Opt. Express* **10**, 1161 (2002).
- [12] J. A. Fülöp, L. Pálfalvi, G. Almási, and J. Hebling, *Opt. Express* **18**, 12311 (2010).
- [13] L. Pálfalvi, J. A. Fülöp, G. Almási, and J. Hebling, *Applied Physics Letters* **92** (2008).

- [14] K. Nagashima and A. Kosuge, Japanese Journal of Applied Physics **49**, 122504 (2010).
- [15] J. Hebling, Opt Quant Electron **28**, 1759 (1996).
- [16] T. Clausnitzer, J. Limpert, K. Zöllner, H. Zellmer, H.-J. Fuchs, E.-B. Kley, A. Tünnermann, M. Jupé, and D. Ristau, Appl. Opt. **42**, 6934 (2003).
- [17] T. K. Gaylord, W. E. Baird, and M. G. Moharam, Appl. Opt. **25**, 4562 (1986).
- [18] Z. Ren, P. J. Heard, J. M. Marshall, P. A. Thomas, and S. Yu, Journal of Applied Physics **103** (2008).
- [19] M. C. Kelly, G. G. Gomlak, V. G. Panayotov, C. Cresson, J. Rodney, and B. D. Koplitz, Applied Surface Science **127–129**, 988 (1998).
- [20] M. A. Foad, C. D. W. Wilkinson, C. Dunscomb, and R. H. Williams, Applied Physics Letters **60**, 2531 (1992).
- [21] M. G. Moharam and T. K. Gaylord, J. Opt. Soc. Am. **72**, 1385 (1982).