

PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM

FIZIKA DOKTORI ISKOLA

Nemlineáris optika és spektroszkópia program

Döntött impulzusfrontú gerjesztésen alapuló terahertzes sugárforrások analízise

PhD értekezés tézisei

Tokodi Levente

Témavezető:

Dr. Pálfalvi László

egyetemi tanár



PÉCS, 2020

1. Előzmények

A THz-es sugárzás (0,1 THz – 10 THz) az elektromágneses spektrumon a néhány század millimétertől néhány milliméteres (0,03–3 mm) hullámhosszúságú tartományba esik. Ez a terület sokáig THz-résként volt emlegetve a tudományokban a mikrohullámok és az infravörös tartomány között források hiánya miatt. A THz-es fizika és a THz-es források intenzív fejlődése bő 30 éve, az 1980-as évek közepétől, illetve az 1990-es évek elejétől indult meg igazán, a lézer alapú THz idő-domén spektroszkópia kifejlődése után [1].

Reflexiós THz-es spektroszkópiát alkalmaznak manapság például fémeket tartalmazó festékek azonosítására műtárgyaknál, de a gyógyszer- és élelmiszeriparban is széleskörben alkalmazzák a minták érintkezésmentes és nem-destruktív vizsgálatára. Hétköznapijaink során az egészségügyben használják például bőrfelszíni elváltozások, (melanóma, égési sérülés) illetve fogszuvasodás diagnosztizálásánál [2-4]. A THz-es sugárzás a nem-ionizáló sugárzások közé tartozik, szemben például a röntgensugárzással, tehát az ilyen

vizsgálatok nem okoznak a mintában további elváltozást. Azonban fontos említést tenni arról a tényről, hogy a THz-es sugárzásra nézve a víz, nagyon jó elnyelő közegként viselkedik, ami jól láthatóan a fenti vizsgálati-, illetve felhasználási területeknek némileg határt szab. További kiemelendő felhasználási terület a biztonságtechnika, például repterek biztonsági átvilágító kapuinál [5] illetve csomagátvilágító berendezéseknél is egyre több helyen találkozhatunk THz-es képalkotáson alapuló berendezésekkel. Ezek előnye a már említett nem-ionizáló jelleg és a jó térbeli felbontás mellett, hogy jól felismerhetőek különböző robbanószerek, kábítószerek, illetve az antrax spórái is a csomagolás felbontása nélkül. Hátrányuk azonban, hogy a kicsi behatolási mélység miatt a testüregekben található-csempészett objektumokat nem mutatják ki.

Az optikai egyenirányítással történő THz-es impulzuskeltés egyik széleskörűen használt módszere a döntött impulzusfrontú gerjesztés lítium-niobát (LN) kristályban [6]. A kristály, habár kiváló nemlinearitással rendelkezik, mely az egyik leghatékonyabb és

legideálisabb kandidátusává teszi az alacsony THz-es frekvenciákon (0,1–2 THz) történő impulzuskeltésre, a sebességillesztési feltétel által kirótt nagymértékű impulzusfront dőlés mellett ($\sim 63^\circ$) a hagyományos gerjesztési elrendezések leképező elemei által a rendszerbe bevitt optikai aberrációk, a pumpáló impulzus torzulásaihoz vezetnek, mely a THz keltés hatásfokára és az elérhető keltett THz-es impulzusenergiára nézve kedvezőtlenül hatnak.

A sugárkövetés módszere régóta elterjedt eszköz mind optikai/lézerfizikai kutatási területeken nem csupán kvalitatív hanem kvantitatív vizsgálatokhoz is. Habár a geometriai optikán alapszik, bizonyos hullámoptikai jelenségeket is igen jól kezelhetünk vele, értékes adatokat szolgáltatva további analízisekhez, illetve optimalizációkhoz, így hathatós segítséget nyújthat

2. Célkitűzés és módszerek

Céлом volt egy olyan sugárkövetésen alapuló numerikus szimulációs módszer kidolgozása, mely alkalmas a megvalósítandó THz keltő elrendezéseket, a leképezésből származó hibák okozta impulzustorzulás szempontjából még kísérleteket megelőzően megvizsgálni. Ennek fontossága, hogy a lehetséges elrendezéseken további optimalizációkat lehet végrehajtani megvalósítás előtt, így idő- és költséghatékonyabbá tehetők az intézetben történő forrásfejlesztések. Feladatomból volt, zárt formulákkal jól leírt geometriájú rendszerek sugárkövetéses vizsgálata, ehhez sugárkövető szoftvert keresni, illetve olyan matematikai kódot megírni, mely alkalmas a sugárkövető szoftver által szolgáltatott adatok alapján a pumpáló impulzus impulzushossz torzulását és az impulzusfront alakjának meghatározására.

Célul tűztem ki a továbbá a LN-hoz hasonlóan kiemelkedő nemlinearitással rendelkező LT kristály vizsgálatát abból a szempontból, hogy – a konvencionálistól eltérő – hibrid elrendezésben milyen

kontaktrács-paraméterek mellett lehetséges a kristályban nagy-energiájú THz-es impulzusok előállítására. Ehhez a szigorúan csatolt hullám analízis módszerén alapuló, a diffrakciós rácsok vizsgálatára és optimalizációjára fejlesztett célszoftvert alkalmaztam.

Vizsgálataim és az optimalizációk során kiemelt hangsúlyt kapott az elrendezések megvalósíthatósága. Így, habár az értekezés jobbára elméleti vizsgálatok, szimulációk és numerikus számolásokat tartalmaz, mégis a leírások és eredmények tekinthetők egyfajta receptnek az adott geometriájú döntött impulzusfrontú gerjesztési módszerén alapuló THz-es impulzusforrás összeállításához.

3. Új tudományos eredmények

1. Döntött impulzusfrontú terahertzes források vizsgálatához a pumpáló impulzusok torzulásainak karakterizálására sugárkövetésen alapuló algoritmust dolgoztam ki. Ennek segítségével elvégeztem az afokális leképező rendszert tartalmazó terahertzes sugárforrás vizsgálatát, illetve összehasonlítottam a hagyományos egy BK7-es lencsét-, egy akromát lencsét-, valamint a két BK7-es lencsét-, illetve két akromát lencsét tartalmazó afokális elrendezéseket. Numerikus szimulációs módszeremmel megmutattam, hogy akromát lencse konvencionális gerjesztési geometriában alkalmazva szignifikánsan redukált impulzutorzulásokat okoz a korábbi, kísérletekben alkalmazott egy darab BK7-es lencsés összeállításhoz képest. Megállapítottam továbbá, hogy az egy darab akromát lencsés esetenél némileg jobb BK7 lencsés afokális elrendezésnél még jobb eredményt érhetünk el, ha két darab akromát lencséből álló afokális geometriát alkalmazunk. [S1]

2. Az 1. tézispontbeli módszer átdolgozásával, sugárkövetéses szimulációkkal és számolásokkal vizsgáltam a hibrid kontaktrácsos terahertz keltő elrendezést. A pumpáló nyaláb torzulásait néhány esetre (geometriai és rácsparaméterek) megvizsgálva egyértelműen megmutattam, hogy a hibrid rendszer egy darab BK7-es üveglencsével is kiválóan teljesít: 16 mm-es nyalábátmérőnél mintegy harmadakkora időbeli torzulást számoltam a nyaláb szélein az egy darab BK7-es lencsét tartalmazó konvencionális elrendezéshez képest. Emellett a hibrid rendszer LiNbO_3 kristályának mindössze $\sim 25\text{-}30^\circ$ -os ékszöggel kell rendelkeznie a konvencionális elrendezés nagy mértékű (63° -os) ékszöge helyett, és ez a hibrid forrás esetében jelentősen jobb minőségű THz-es nyalábprofil eredményezhet. [S2]
3. A lítium-tantalát kristályt tartalmazó hibrid terahertzes forrás diffrakciós elemeit optimalizáltam a hatásfok maximalizálás érdekében. A kristály bemeneti felületén létrehozandó bináris

rácsstruktúra geometriai paramétereinek (kitöltési tényező, maratási mélység és rácsállandó) szisztematikus változtatásával egyértelműen meghatároztam azon kondíciókat, mellyel a rács diffrakciós hatásfoka maximális lesz. A THz keltési hatásfok növelésének érdekében javaslatot tettem a korábbi reflexiós rács transzmissziós típusúra történő cseréjére, lehetőséget adva a rács közel Littrow-konfigurációban való alkalmazására mellyel hatékonyabb pumpáló-nyaláb becsatolás érhető el. [S3]

4. Elvégeztem lépcsős-rácsos bemeneti felülettel rendelkező plán-paralel nemlineáris kristályt tartalmazó hibrid terahertzes sugárforrás, sugárkövetéses algoritmussal történő vizsgálatát. A sugárkövető szoftver korlátai miatt megoldást kerestem és találtam a rendszer kvantitatív analizésére, mely alkalmassá vált az elrendezés optikai aberrációinak, a pumpáló impulzusra gyakorolt hatásainak megvizsgálására. A módosított módszerrel megállapítottam, hogy a leképezési

hibák csökkenésének az eredményeként az impulzustorzulás jelentősen csökken az egy lencsét tartalmazó hibrid-lépcsős rácsos elrendezésben, a konvencionális egy lencsés elrendezéshez képest.
[S4]

4. A disszertációhoz kapcsolódó publikációk

- S1. **L. Tokodi**, J. Hebling, and L. Pálfalvi, "*Optimization of the Tilted-Pulse-Front Terahertz Excitation Setup Containing Telescope*," Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves **38**, 22-32 (2017).
- S2. L. Pálfalvi, Z. Ollmann, **L. Tokodi**, and J. Hebling, "*Hybrid tilted-pulse-front excitation scheme for efficient generation of high-energy terahertz pulses*," Opt. Express **24**, 8156-8169 (2016).
- S3. **L. Tokodi**, A. Buzády, J. Hebling, and L. Pálfalvi, "*Possibility of high-energy THz generation in LiTaO₃*," Applied Physics B **122**, 1-7 (2016).
- S4. L. Pálfalvi, G. Tóth, **L. Tokodi**, Z. Márton, J. A. Fülöp, G. Almási, and J. Hebling, "*Numerical investigation of a scalable setup for efficient terahertz generation using a segmented tilted-pulse-front excitation*," Opt. Express **25**, 29560-29573 (2017).

5. Irodalomjegyzék

1. D. H. Auston and M. C. Nuss, "Electrooptical generation and detection of femtosecond electrical transients," *IEEE Journal of Quantum Electronics* **24**, 184-197 (1988).
2. D. D. Arnone, C. M. Ciesla, A. Corchia, S. Egusa, M. Pepper, J. M. Chamberlain, C. Bezant, E. H. Linfield, R. Clothier, and N. Khammo, *Applications of terahertz (THz) technology to medical imaging*, Industrial Lasers and Inspection (EUROPTO Series) (SPIE, 1999), Vol. 3828.
3. B. E. Cole, R. M. Woodward, D. A. Crawley, V. P. Wallace, D. D. Arnone, and M. Pepper, *Terahertz imaging and spectroscopy of human skin in vivo*, Photonics West 2001 - LASE (SPIE, 2001), Vol. 4276.
4. D. M. Mittleman, M. Gupta, R. Neelamani, R. G. Baraniuk, J. V. Rudd, and M. Koch, "Recent advances in terahertz imaging," *Applied Physics B* **68**, 1085-1094 (1999).

5. L.-t. Guo, C. Deng, Y.-m. Zhao, and C.-l. Zhang, *Passive terahertz imaging for security application*, ISPDI 2013 - Fifth International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging (SPIE, 2013), Vol. 8909.
6. J. Hebling, G. Almási, I. Z. Kozma, and J. Kuhl, "Velocity matching by pulse front tilting for large-area THz-pulse generation," *Opt. Express* **10**, 1161-1166 (2002).