

**PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM**

**Fizika Doktori Iskola**

**Nemlineáris Optika és Spektroszkópia Program**

**Extrém nagy hatásfokú félvezető anyagú  
terahertzes források**

**PhD értekezés**

**Polónyi Gyula**

**Témavezető:**

**Dr. Fülöp József András**



**PÉCS, 2018**

## I. Előzmények és célkitűzések

A terahertzes (THz) sugárzás az elektromágneses spektrum 0,1 – 100 THz-es frekvenciatartományába esik. Ez a tartomány óriási érdeklődésre tart számot az olyan alkalmazási lehetőségek között, mint a képalkotás és spektroszkópia például az orvosi diagnosztikában, szélessávú kommunikáció, biztonságtechnika, nem-destruktív anyagvizsgálat, vagy éppen részecskegyorsítás [1, 2, 3, 4, 5].

Ma már hétköznapiak számító femtoszekundumos lézerekkel rutinszerűen állítanak elő THz-es impulzusokat példátlan impulzusenergiával és elektromos- és mágneses csúcstérerősséggel. Az alacsony frekvenciájú THz-es tartományban az optikai egyenirányítás biztosította eddig a legnagyobb impulzusenergiákat [6] és térerősségeket [7, 8] lítium-niobát ( $\text{LiNbO}_3$ , LN) kristályban, döntött-impulzusfrontú gerjesztéssel. Azonban a módszer korlátait

ismerve komoly akadálynak tűnik a kinyerhető THz-es energia további növelése. A legfőbb ok a fázisillesztéshez szükséges nagy impulzusfront-döntési szög ( $\sim 63^\circ$ ). Közepes frekvenciákon az optikai egyenirányítás szerves kristályokban hozhat létre nagy térerősségeket és energiákat [9].

A félvezetők, mint cink-tellurid (ZnTe), vagy gallium-foszfid (GaP), LN-hoz hasonló módon az alacsonyabb frekvenciájú THz-es tartományban bocsátanak ki THz-es sugárzást optikai egyenirányítást alkalmazva. LN-tal ellentétben nem szükséges impulzusfront-döntés a fázisillesztéshez a hagyományos lézerhullámhosszakon, mint 800 (ZnTe) vagy 1000 (GaP) nm, viszont jóval alacsonyabb határfokkal működnek és jóval kisebb impulzusenergiákat szolgáltatnak. Ennek az oka a kisebb nemlineáris együttható, az erős kétfotonos abszorpció a pumpálás hullámhosszán és a kapcsolódó szabad töltéshordozókból eredő abszorpció a THz-es frekvenciákon.

Munkámban félvezető THz-es források kísérleti és elméleti vizsgálatán keresztül szeretném megmutatni, hogy képesek a LN-hoz hasonló hatásfokok és energiák elérésére, és megfelelő körülmények között túl is szárnyalhatják azokat az egyre bővülő alkalmazások igényeihez igazodva.

Céлом annak vizsgálata, hogy félvezető anyagú THz-es források alkalmassá tehetők-e nagy energiájú THz-es impulzusok előállítására, illetve LN viszonylatában milyen hatásfok érhető el. Céлом annak bizonyítása, ha elegendően hosszú hullámhosszúságú pumpálást alkalmazok, amivel elnyomhatom a két- és háromfotonos abszorpciót, akkor több nagyságrenddel növelhetem a félvezető anyagú THz-es források hatásfokát. Megmutatom, hogy egy új típusú kontaktrácson alapuló félvezető anyagú THz-es forrás egyszerűen megvalósítható, optikai torzulásoktól mentes, kompakt, illetve a méretek növelésével lehetőséget ad az

energia és a térerősség felskálázására. Megmutatom, hogy optimális pumpáló feltételek mellett van lehetőség tovább növelni a félvezető anyagú THz-es források hatásfokát, ezzel megnyitni az utat újabb, a távoli infravörös sugárzásokkal foglalkozó alkalmazások előtt.

## II. Módszerek

Az elméleti számolásokhoz felhasznált modell az egydimenziós, nemlineáris polarizációval számoló hullámeqyenletet oldja meg a spektrális tartományban. Figyelembe veszi az anyagi- és szögdiszperzió okozta pumpáló nyaláb impulzushossz változását a terjedés függvényében, a pumpa és a THz-es nyaláb nemkollineáris terjedését a fázisillesztésnél, valamint a fonon rezonanciából és a szabad töltéshordozók abszorpciójából fakadó abszorpciót (ez utóbbiért a

többfotonos abszorpció felelős) a THz-es tartományban. A szimulációk során azt vizsgáltam, hogy van-e lényeges különbség a kettő-, háromfotonos abszorpciós határhullámhossznál rövidebb és hosszabb hullámhosszal való pumpálás esetén, és ha van, milyen határfokokat várunk a forrástól és milyen pumpáló intenzitást érdemes választani egy kísérletben.

A kísérletek egy részében egy ZnTe anyagú félvezető prizmat használtam THz-es forrásként döntött impulzusfrontú elrendezésben a háromfotonos abszorpciós határhullámhossznál rövidebb és hosszabb hullámhosszakon pumpálva. Egy másik kísérletben pedig az első ZnTe anyagú kontaktrácsot teszteltem THz-es forrásként.

A kísérleti eredmények lehetővé tették, hogy a szimulációk segítségével becslést adhassak ZnTe egyik az irodalomból hiányzó anyagi paraméterére.

A megkezdett szimulációs vizsgálatokat folytatva pedig optimális pumpáló paramétereket kerestem a félvezető anyagú THz-es források hatékonyságának további növelésére.

### III. Új tudományos eredmények

1. Kísérletileg megmutattam, hogy ha a kétfotonos abszorpció kiküszöbölésére elegendően hosszú pumpáló hullámhosszat (1450 nm) választunk ZnTe-ban, akkor a THz keltés hatásfoka több mint egy nagyságrenddel növelhető ([10],  $4 \cdot 10^{-4}$ ). Demonstráltam további 3,5-szeres növekedést ( $1,4 \cdot 10^{-3}$ ), amikor a háromfotonos abszorpciót is kiküszöböltem (1700 nm). [S1]
2. Elsőként valósítottam meg egy monolitikus, könnyen beállítható, ZnTe félvezető anyagú, kontaktrácsos THz-es forrást és demonstráltam annak működését nagy hatásfokkal (0,3%), egyciklusú THz-es impulzusokkal, továbbá megmutattam, hogy a THz-es nyaláb diffrakciós limithez közeli foltméretre fókuszálható. A forrás



egyszerűen, a pumpáló foltméret és energia növelésével felskálázható mJ-szintű THz-es energiákra. [S2]

3. Nagy energiájú pumpáló forrást használva 1700 nm-es pumpálás mellett 0,7%-os hatásfokot és 14  $\mu\text{J}$ -nyi THz-es impulzusenergiát állítottam elő ZnTe félvezető kristállyal, hagyományos döntött impulzusfrontú elrendezést használva. A mért impulzusenergia közel 10-szer nagyobb, a hatásfok pedig 220-szorosa a korábban mások által ZnTe-ban elértnél. [S1]
4. Kísérleti eredményeinket és numerikus szimulációkat felhasználva  $(4\pm 1)\cdot 10^{-5} \text{ cm}^5/\text{GW}^3$  értékű becslést adtam ZnTe kristály esetén a négyfotonos abszorpciók együttható értékére. [S1,S3]

5. Megmutattam, hogy ZnTe és GaP esetén található optimális impulzushossz és ahhoz tartozó pumpáló intenzitás, ami a legnagyobb THz-es térerősséget illetve THz-keltési hatásfokot adja. Ehhez elegendően hosszú hullámhosszat kell választunk (1700 nm), hogy a két- és háromfotonos abszorpciót kiküszöböljük. A maximális térerősség előállításához ZnTe kristályban 15 GW/cm<sup>2</sup> pumpáló intenzitás és 225 fs pumpáló impulzushossz szükséges, GaP-ban ezekre a paraméterekre 20 GW/cm<sup>2</sup> és 150 fs adódott. A maximális hatásfokra ZnTe kristályban 15 GW/cm<sup>2</sup> pumpáló intenzitás és 150 fs pumpáló impulzushossz szükséges, GaP-ban ezekre a paraméterekre 20 GW/cm<sup>2</sup> és 100 fs adódott. Ezen

paraméterek meghatározása segítheti a további kísérletek megtervezését. [S3]

6. Megvizsgáltam a THz-es spektrum és a hullámforma függését a kristályhossztól, különböző fázisillesztési frekvenciákon, GaP-ban 1700 nm hullámhosszon való pumpálás esetén. Megmutattam, hogy GaP-ban fázisillesztési frekvenciától függően, de elsősorban kisebb vastagságú kristályhosszakkal ( $L < 5$  mm) nagyobb sávzélességű impulzusokat kelthetünk, míg a vastagabb kristályokkal ( $L > 5$  mm), 3-4 THz-es fázisillesztéssel kelthetők keskeny sávzélességű, többciklusú, nagy spektrális intenzitású impulzusok. [S3]

#### IV. Az értekezéshez kapcsolódó saját publikáció

- [S1] **Gy. Polónyi**, B. Monoszlai, G. Gäumann, E. J. Rohwer, G. Andriukaitis, T. Balciunas, A. Pugzlys, A. Baltuska, T. Feurer, J. Hebling, and J. A. Fülöp, „*High-energy terahertz pulses from semiconductors pumped beyond the three-photon absorption edge*” *Optics Express* **24** (21), 23872-23882 (2016).
- [S2] J. A. Fülöp, **Gy. Polónyi**, B. Monoszlai, G. Andriukaitis, T. Balciunas, A. Pugzlys, G. Arthur, A. Baltuska, and J. Hebling, “*Highly efficient scalable monolithic semiconductor terahertz pulse source,*” *Optica*, **3**, 1075-1078 (2016).
- [S3] **Gy. Polónyi**, M. I. Mechler, J. Hebling, and J. A. Fülöp, “*Prospects of semiconductor terahertz pulse sources,*” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **23** (4), 1-8 (2017).

#### V. Egyéb publikációk

- [S4] Cs. Lombosi, **Gy. Polónyi**, M. Mechler, Z. Ollmann, J. Hebling, and J. A. Fülöp, „*Nonlinear distortion of intense THz beams*” *New Journal of Physics* **17**, 083041 (2015).

## VI. Hivatkozások

- [1] J. Hebling, J. A. Fülöp, M. I. Mechler, L. Pálfalvi, C. Töke, and G. Almási, “*Optical manipulation of relativistic electron beams using THz pulses,*” 2011.
- [2] L. J. Wong, A. Fallahi, and F. X. Kärtner, “*Compact electron acceleration and bunch compression in THz waveguides,*” *Opt. Express*, vol. 21, pp. 9792–9806, Apr 2013.
- [3] L. Pálfalvi, J. A. Fülöp, G. Tóth, and J. Hebling, “*Evanescence-wave proton postaccelerator driven by intense THz pulse,*” *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, vol. 17, p. 031301, Mar 2014.
- [4] A. Sharma, Z. Tibai, and J. Hebling, “*Intense terahertz laser driven proton acceleration in plasmas,*” *Physics of Plasmas*, vol. 23, no. 6, p. 063111, 2016.
- [5] E. A. Nanni, W. R. Huang, K.-H. Hong, K. Ravi, A. Fallahi, G. Moriena, R. J. Dwayne Miller, and F. X. Kärtner, “*Terahertz-driven linear electron acceleration,*” vol. 6, p. 8486, Oct. 2015.
- [6] J. A. Fülöp, Z. Ollmann, C. Lombosi, C. Skrobel, S. Klingebiel, L. Pálfalvi, F. Krausz, S. Karsch, and J. Hebling, “*Efficient generation of THz pulses with 0.4 mj energy,*” *Opt. Express*, vol. 22, pp. 20155–20163, Aug 2014.

- [7] H. Hirori, A. Doi, F. Blanchard, and K. Tanaka, “*Single-cycle terahertz pulses with amplitudes exceeding 1 MV/cm generated by optical rectification in LiNbO<sub>3</sub>*,” *Applied Physics Letters*, vol. 98, no. 9, p. 091106, 2011.
- [8] M. Sajadi, M. Wolf, and T. Kampfrath, “*Terahertz-field-induced optical birefringence in common window and substrate materials*,” *Opt. Express*, vol. 23, pp. 28985–28992, Nov 2015.
- [9] C. Vicario, A. V. Ovchinnikov, S. I. Ashitkov, M. B. Agranat, V. E. Fortov, and C. P. Hauri, “*Generation of 0.9-mJ THz pulses in DSTMS pumped by a Cr:Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> laser*,” *Opt. Lett.*, vol. 39, pp. 6632–6635, Dec 2014.
- [10] F. Blanchard, L. Razzari, H.-C. Bandulet, G. Sharma, R. Morandotti, J.-C. Kieffer, T. Ozaki, M. Reid, H. F. Tiedje, H. K. Haugen, and F. A. Hegmann, “*Generation of 1.5 μJ single-cycle terahertz pulses by optical rectification from a large aperture ZnTe crystal*,” *Opt. Express*, vol. 15, pp. 13212–13220, Oct 2007.