

Válasz Dr. Rácz Béla bírálataira

Szeretném megköszönni Dr. Rácz Béla professzor úrnak a dolgozatom gondos átolvasását, támogató és elismerő bírálói véleményét és elgondolkodtató kérdéseit. A feltett kérdésekre válaszaim a következők. (A szakirodalmi hivatkozások jegyzéke az összes válasz után található.)

1. kérdés: „Az impulzus alakformáló (shaper) működésével kapcsolatban megjegyzi, hogy a Nd:YAG erősítési sávszélessége korlátozza az elérhető paramétereket. Az elmúlt időszakban változott-e a rendelkezésre álló aktív közegek száma?”

A kísérletben alkalmazott Nd:YAG erősítő kis sávszélessége – amely az alkalmazott erősítési tényezőtől is függ – korlátozta az erősített formált impulzusok intenzitásának fel- és lefutási idejét. Ez a hatás nagyobb sávszélességű lézerezősítő alkalmazásával jelentősen csökkenthető.

Alkalmas erősítőközeg pl. az Yb:CaF₂, amelyben kb. 20 nm sávszélesség érhető el 1030 nm körüli központi hullámhossz mellett [Kaksis, 2016]. Egy ilyen erősítőrendszert a mi ösztönzésünkre fejlesztett ki a Bécsi Műszaki Egyetem Fotonikai Intézetének A. Baltuska vezette csoportja. A fejlesztés eredményét összefoglaló közös publikációban [Kaksis, 2016] 110 mJ energiájú és 225 fs hosszúságú impulzusok előállításáról számoltunk be. (Egy hasonló, valamivel kisebb energiájú rendszer a pécsi laboratóriumunkban működik.)

Az 1 μm körüli hullámhosszon más lézereközegek is használhatók, amelyekkel nagyobb sávszélesség érhető el, mint a Nd:YAG-ban. Ilyenek pl. az Yb:KGW, az Yb:YAG, vagy a Nd:üveg. Megjegyzem, hogy rövidebb időtartamú, nagyobb sávszélességű impulzusok alakformálása a spektrum modulációjával általában könnyebben megoldható, mint a dolgozatban tárgyalt ~20 ps-os impulzusoké.

2. kérdés: „A néhány ciklusú rövidimpulzusok előállítása terén van-e versenytársa az Önök által leírt 5-6 fs jeleknek?”

Eredményeink publikálása idején hasonlóan rövid impulzusokat más csoportok is előállítottak OPCPA technikával, az általunk leírtánál nagyobb energiával. Pl. Witte és munkatársai 7,6 fs-os, 15,5 mJ energiájú impulzusokról számoltak be [Witte, 2006]. Tavella és munkatársai 10 fs-os, 90 mJ-os impulzusokat állítottak elő [Tavella, 2006]. Ezekben a munkákban azonban viszonylag hosszú, 60 ps-os ill. 100 ps-os pumpáló impulzusokat használtak. Munkánk fő újdonsága a rövid (~100 fs) pumpáló impulzus alkalmazása volt. A 10 fs alatti impulzushossz tartományban az akkor legnagyobb energiát érték el ezzel a technikával. Ez egyben az első lépés volt a rövid impulzusokkal pumpált OPCPA módszer teljesítményre skálázása felé.

A munkánk publikálása óta eltelt bő egy évtizedben jelentős fejlődés történt a kevés ciklusú, nagy teljesítményű optikai impulzusok előállítása területén. A közelmúltban Kessel és munkatársai rövid impulzusokkal pumpált OPCPA rendszerben előállított 7 fs-os, 42 mJ energiájú impulzusokról számoltak be [Kessel, 2018]. A hosszabb ps-os impulzusokkal pumpált OPCPA rendszerek közül érdemes megemlíteni két nagy kontrasztú, kevés ciklusú rendszert: 4,5 fs, 18 TW, 10 Hz [Rivas, 2017] és 8 fs, 5,5 TW, 1 kHz [Budriunas, 2017]. Utóbbi az ELI-ALPS számára épített rendszerrel kapcsolatos munka.

3. kérdés: „A kifejlesztett numerikus modell számos paramétert figyelembe véve adott eredményeket a rendszer javítására, melyiket tartja a gyakorlati alkalmazásoknál a legfontosabbnak.”

Az optikai egyenirányítással történő THz keltés leírására kifejlesztett numerikus modell – amely egyszerű fizikai modellen alapult – lehetővé tette számos alapvető paraméter optimalizálását. A gyakorlatban fontos paraméterek közé tartozik pl. a nemlineáris kristály anyaga, annak hőmérséklete, a kristályhossz, a pumpálás hullámhossza, impulzushossza és intenzitása. A legtöbb esetben ezek mindegyike fontos.

LiNbO₃ esetében kiemelném a Fourier-limitált pumpáló impulzushossz optimális megválasztásának fontosságát. A korábban szokásosan használt viszonylag rövid (~100 fs) pumpáló impulzusok helyett lényegesen (4×–10×) hosszabbat használva kb. *egy nagyságrenddel* sikerült megnövelnünk a THz keltés hatásfokát, amely így 1% közelébe került.

Félvezető anyagok esetében a legfontosabb az elegendően hosszú pumpáló hullámhossz alkalmazása. Ezzel az alacsonyrendű többfotonos abszorpció – és a THz tartományban ezzel együtt járó szabad töltéshordozó abszorpció – erős korlátozó hatása kiküszöbölhető. A szokásosan használt 1 μm körüli hullámhossz helyett 2 μm-hez közeli infravörös pumpálást használva ZnTe-ban *több, mint két nagyságrenddel* sikerült megnövelnünk a THz keltés hatásfokát, amely így szintén 1% közelébe került. Hasonló növekedés várható más anyagban (pl. GaP-ban) is. A 2 μm-hez közeli infravörös pumpáló hullámhosszal végzett kísérleteink szerint a négyfotonos abszorpció hatása nagyobb intenzitásoknál jelentőssé válhat. Ezért másodikként kiemelném a pumpáló intenzitás optimális megválasztásának fontosságát.

4. kérdés: „A THz-es jelkeltésben szerzett tapasztalatok alapján melyik paraméter javulását tarja a legjelentősebbnek?”

A legfontosabb eredménynek a THz keltés hatásfokának jelentős növelését tartom. Ebben mind LiNbO₃, mind félvezető anyagú források esetében sikerült jelentős előrelépést elérnünk (ld. a 3. kérdésre adott választ is). Az általunk javasolt módszereket mások is sikerrel alkalmazták, eddig elsősorban LiNbO₃ esetében.

Fontosnak tartom a félvezető anyagú, kollineáris pumpáló geometriát megvalósító kontakt rácscs forrás megvalósítását. Az egyenletes kristályvastagság és a leképező optika hiánya miatt ez könnyen – a méret és a pumpáló energia növelésével – skálázható nagy THz energiára és a jó fókuszálhatóság következtében nagy térerősségre. Megjegyzem, hogy hasonló skálázási tulajdonágú, de más elven működő – lépcsős rácsot és szegmentált impulzusfrontot alkalmazó – megoldást a közelmúltban javasoltunk [Pálfalvi, 2017] és demonstráltunk [Nugraha, 2018] LiNbO₃ esetében.

5. kérdés: „A félvezető THz források vizsgálata egy igen fontos önálló fejezete az értekezésnek, a megvalósított rendszerek gyakorlati felhasználása mikorra várható?”

A ZnTe kontakt rácscs THz forrás kísérletünkben demonstrált paraméterei (3,9 μJ, 0,5 MV/cm, 0,1–2 THz) jól alkalmazhatók nemlineáris THz-es spektroszkópiai vizsgálatokhoz. A meghajtásához szükséges kb. 2 mJ pumpáló energia célszerűen előállítható 10 mJ osztályú Ti:zafír vagy Yb alapú lézerekkel meghajtott optikai parametrikus erősítőkből. Megfelelő lézerek, ill. optikai parametrikus erősítők kereskedelmi forgalomban kaphatók. A nemlineáris THz-es spektroszkópiai alkalmazásokhoz a technológia így jelenleg már elérhető, de eddig ilyen felhasználás még nem történt.

A technológiában rejlő igazi potenciál kihasználáshoz azonban további fejlesztés szükséges. Ez a – már folyamatban lévő – munka elsősorban nagy, 0,1–1 mJ THz impulzusenergia nagy hatásfokú előállítását és extrém nagy térerősség elérését célozza. Jelenleg dolgozunk az ehhez szükséges 5–10 cm² felületű GaP kontakt rácscs forrás prototípusának megvalósításán. A nagy energia és térerősség demonstrálása várhatóan egy éven belül megtörténhet, megnyitva az utat az extrém nagy térerősségű alkalmazások felé (pl. különböző anyagok és biológiai rendszerek erős terű kontrollálása, részecskegyorsítás). A meghajtáshoz szükséges néhány 10 mJ-tól néhány 100 mJ-ig terjedő pumpáló energia biztosítása 2 μm körüli hullámhosszon ma még kihívást jelent és világszerte csak kevés helyen érhető el. Ez lassíthatja a technológia elterjedését. Várható azonban, hogy hamarosan megjelennek a piacon 2–2.5 μm tartományban működő nagyobb energiájú optikai parametrikus erősítők és lézerek.

Az egyciklusú THz-es impulzusok előállításán túl hangolható frekvenciájú és kontrollált számú ciklusból álló impulzusok, valamint pl. radiálisan polarizált THz-es impulzusokat előállítását is célul tűztük ki, ami néhány éven belül tovább szélesítheti majd a lehetséges alkalmazások körét.

Fülöp József András

Hivatkozások

[Kaksis, 2016] E. Kaksis et al., Opt. Express **24**, 28915 (2016).

[Witte, 2006] S. Witte et al., Opt. Express **14**, 8168 (2006).

[Tavella, 2006] F. Tavella et al., Opt. Express **14**, 12822 (2006).

[Kessel, 2018] A. Kessel et al., Optica **5**, 434 (2018).

[Rivas, 2017] D. E. Rivas et al., Sci. Rep. **7**, 5224 (2017).

[Budriunas, 2017] R. Budriunas et al., Opt. Express **25**, 5797 (2017).

[Pálfalvi, 2017] L. Pálfalvi et al., Opt. Express **25**, 29560 (2017).

[Nugraha, 2018] P. S. Nugraha, submitted to Opt. Lett. (2018).