

THz-es impulzusok keltése optikai egyenirányítással

Haladó laboratóriumi gyakorlat, Fizikus MSc.

Lombosi Csaba, Monoszlai Balázs, Fülöp József András

A hELios oktatási projekt támogatásával

PTE Kísérleti Fizika Tanszék, 2012.

Tartalomjegyzék

1. Elmélet	2
1.1. Nemlineáris polarizáció	2
1.2. Fázisillesztés	3
1.3. Optikai egyenirányítás	4
1.4. Sebességillesztés döntött impulzusfrontú gerjesztéssel	4
2. Kísérlet	5
2.1. Kísérleti elrendezés	5
2.2. Lézerbiztonság	7
2.3. Feladatok	8

1. Elmélet

A terahertzes (THz-es) sugárzás – csakúgy, mint a rádióhullámok vagy a fény – az elektromágneses hullámok egy fajtája. Rezgési frekvenciája jellemzően a 0,1–10 THz, hullámhossza az 3 mm–30 μm tartományba esik, ami a mikro-hullámok és az infravörös sugárzás tartománya között található az elektromágneses spektrumban. $1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$.

A THz-es sugárzás alkalmazási területei közé tartozik többek között az anyagtudomány, a biológia, az orvosi diagnosztika és a biztonságtechnika. Szerves molekulák jól azonosíthatók THz-es spektrumuk alapján, amely a molekulák konformációjára és hidratációs (vizes környezetbeli) állapotára is érzékeny lehet. Az alkalmazási lehetőségeket jelentősen bővíti, hogy a THz-es tartományban – szemben a jóval nagyobb frekvenciájú optikai sugárzással – könnyen mérhető az elektromos tér időbeli lefutása. Erre alkalmas módszer az elektro-optikai mintavételezés.

A THz-es tudomány viszonylag új, mintegy két évtizedes múltra visszatekintő interdiszciplináris tudományterület. A THz-es vizsgálatok széleskörű kiterjesztését a femtoszekundumos lézerek alapuló THz források megjelenése tette lehetővé. Ezek közé tartozik egy nemlineáris optikai folyamaton, az optikai egyenirányításon alapuló THz forrás is, amellyel igen rövid, akár egyetlen oszcillációs ciklusból álló THz-es impulzusok kelthetők.

1.1. Nemlineáris polarizáció

Nagy intenzitású fény – jellemzően lézerfény – hatására az anyagok optikai tulajdonságai megváltozhatnak. Ilyen jelenségekkel foglalkozik a nemlineáris optika. Ekkor a közeg válasza a fény elektromos térerősségének nemlineáris függvénye. A nemlinearitásnak köszönhetően a kölcsönhatás során új frekvenciakomponensek is keletkezhetnek, amelyek a bemenő fényben nem voltak jelen. A lézerek frekvenciakonverziója számos műszaki és tudományos alkalmazás alapja. A nemlineáris optika alapjainak áttekintéséhez javasolt irodalom: R. W. Boyd: *Nonlinear Optics* [1] című könyvének 1.1 és 1.2 fejezetei.

Kérdések:

- Hogyan adható meg a másod- és a harmadrendű nemlineáris polarizáció, ha a közeg ω frekvenciájú monokromatikus lézerfényvel világítjuk meg? Milyen új frekvenciakomponensek keletkezhetnek?
- Hogyan adható meg a másodrendű nemlineáris polarizáció, ha a bemenő lézerfény két különböző frekvenciájú komponenst tartalmaz: $E(t) =$

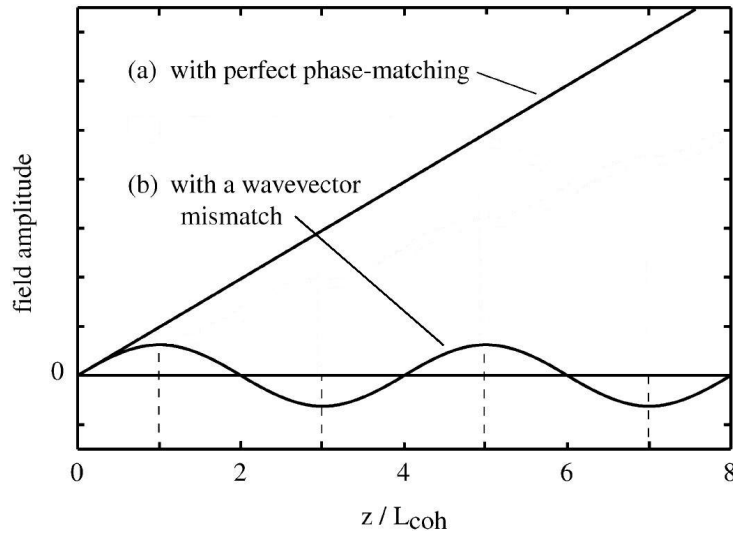
$E_1 e^{-i\omega_1 t} + E_2 e^{-i\omega_2 t} + \text{c.c.}$? Milyen új frekvenciakomponensek keletkezhetnek?

- Mit értünk optikai egyenirányítás és különbségfrekvencia-keltés alatt? Mi a kettő közötti kapcsolat?

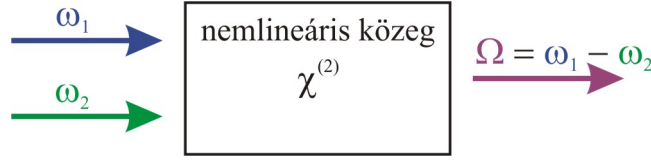
1.2. Fázisillesztés

A nemlineáris optikai folyamatok hatásfokát az effektív nemlineáris együtthatón kívül meghatározhatja a keltő elektromágneses hullám és az indukált nemlineáris polarizáció közötti fázisviszony. Fázisillesztésről beszélünk, ha a közeg különböző helyein a nemlineáris polarizáció révén keltett térerősségjárulékok fázishelyesen adódnak össze a közeg teljes hosszában. A kimeneten a nemlineáris kölcsönhatás során keltett mező intenzitása és a keltés hatásfoka ekkor maximális.

Ha fázisillesztés nem teljesül, a keltett mező amplitúdója az $L_{\text{koh}} = 2/\Delta k$ koherenciahosszig nő, utána csökken (1. ábra). $\Delta k = |\Delta \vec{k}|$ a nemlineáris kölcsönhatásban résztvevő hullámok hullámvektorainak adott folyamatra jellemző lineáris kombinációjával adható meg. Különbségfrekvencia-keltésre (2. ábra) $\Delta \vec{k} = \vec{k}(\Omega = \omega_1 - \omega_2) - (\vec{k}(\omega_1) - \vec{k}(\omega_2))$.



1. ábra. A keltett mező amplitúdója a z terjedési hossz függvényében (a) fázisillesztés esetén ($\Delta k = 0$) és (b) fázisillesztés hiányában ($\Delta k \neq 0$). ([1] alapján.)



2. ábra. A különbségfrekvencia-keltés sémája.

1.3. Optikai egyenirányítás

Szélessávú THz-es sugárzás keltésére alkalmas egyik módszer femtoszekundumos impulzusok optikai egyenirányítása. A THz-es sugárzás a femtoszekundumos pumpáló impulzus különböző frekvenciájú Fourier-komponensei közötti különbségfrekvencia-keltés révén keletkezik. Az optikai egyenirányítással való THz keltés rövid leírása megtalálható a [2] cikk 4.1 fejezetében.

1.4. Sebességillesztés döntött impulzusfrontú gerjesztéssel

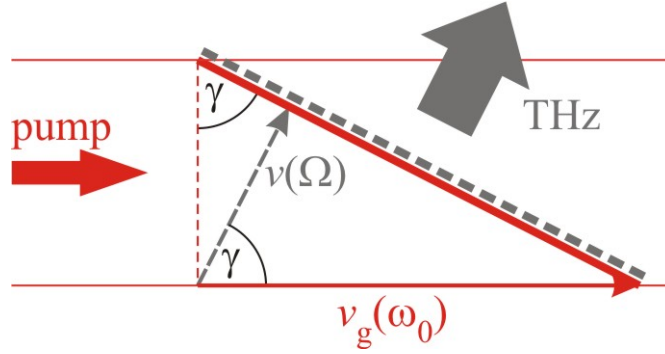
Optikai egyenirányításra többféle anyag alkalmas, pl. különböző félvezetők (ZnTe, GaAs, GaP, GaSe). A félvezetőkénél lényegesen nagyobb effektív nemlineáris együtthatóval rendelkezik a szigetelő lítium-niobát (LiNbO_3 , LN) kristály, ami a THz-keltés szempontjából kedvező. Azonban az optikai tartománybeli csoport-törésmutató ($n_g(1 \mu\text{m}) \approx 2,2$) és a THz tartománybeli törésmutató ($n(1 \text{ THz}) \approx 5,0$) közötti nagy különbség miatt LN-ban nem érhető el kollineáris sebességillesztés.

A pumpáló impulzus intenzitásfrontjának a fázisfrontokhoz viszonyított γ szögű megdöntésével a keletkező THz-es sugárzás erre a frontra merőleges irányban terjed a v_{THz} fázissebességgel (3. ábra). A THz-es sugárzás és a pumpálás terjedési irány egymással γ szöget zár be. A THz-es sugárzás fázisa a pumpáló impulzusfronthoz képest állandó, ha teljesül a

$$v_g(\omega) \cdot \cos \gamma = v(\Omega)$$

sebességillesztési feltétel, ami a γ impulzusfront-dőlés alkalmas megválasztásával elérhető. Az döntött impulzusfrontú gerjesztéssel kapcsolatban további részletek a [2] cikk 4.2 fejezetében találhatók. Megjegyezzük, hogy ez a PTE Fizikai Intézet THz-es csoportja által kifejlesztett módszer [4] a THz-es impulzusok energiájának nagyságrendekkel való növelését tette lehetővé, megnyitva a kaput számos új alkalmazás előtt.

A pumpáló impulzus intenzitásfrontjának megdöntése szögdiszperzió bevezetésével lehetséges. Az impulzusfront-dőlés γ szöge és a $d\varepsilon/d\lambda$ szögdiszperzió kapc-



3. ábra. THz-keltés döntött impulzusfrontú gerjesztéssel. Vastag piros/folytonos vonal: pumpáló impulzusfront, vastag szürke/szaggatott vonal: THz fázisfront, a vékony piros/folytonos, illetve a vékony szürke/szaggatott nyilak a megfelelő frontok haladási irányát és sebességét jelzik.

solatára a

$$\tan \gamma = -\frac{n}{n_g} \lambda \frac{d\varepsilon}{d\lambda}$$

összefüggés érvényes, ahol $\varepsilon(\lambda)$ a λ hullámhosszú spektrális komponens haladási iránya.

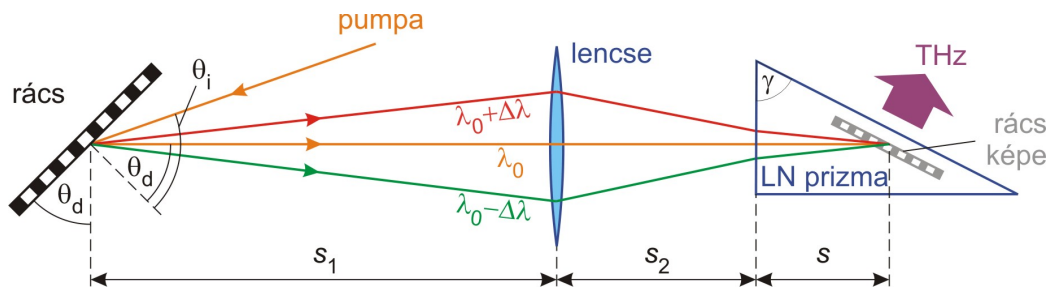
2. Kísérlet

A gyakorlat célja egy döntött impulzusfrontú gerjesztésen alapuló THz-es forrás megépítése és néhány jellemzőjének mérése.

2.1. Kísérleti elrendezés

A kísérleti elrendezés vázlatát és az elrendezés paramétereit a 4. ábra mutatja. A felépített kísérleti elrendezést a 5. ábra mutatja. Az impulzusfrontdőlést optikai rácson való diffrakció segítségével hozzuk létre, amelynek felületét egy lencsével leképezzük a LN kristályba. A kristálybeli szögdiszperziót a beesési szög, a rácsállandó, a leképezési arány és a levegő–LN határfelületen a fénytörés határozza meg.

Az elrendezés paramétereire optimális értékek adhatók meg úgy, hogy a kívánt szögdiszperzió mellett a leképezés okozta torzulások is minimálisak legyenek [5]. Az elrendezés optimális paramétereit a p rácsperiódus, a lencse



4. ábra. A kísérleti elrendezés vázlata és paramétereit.

f fókusztávolsága, és a 4. ábrán megadott s távolság ismeretében a következő módon határozhatók meg:

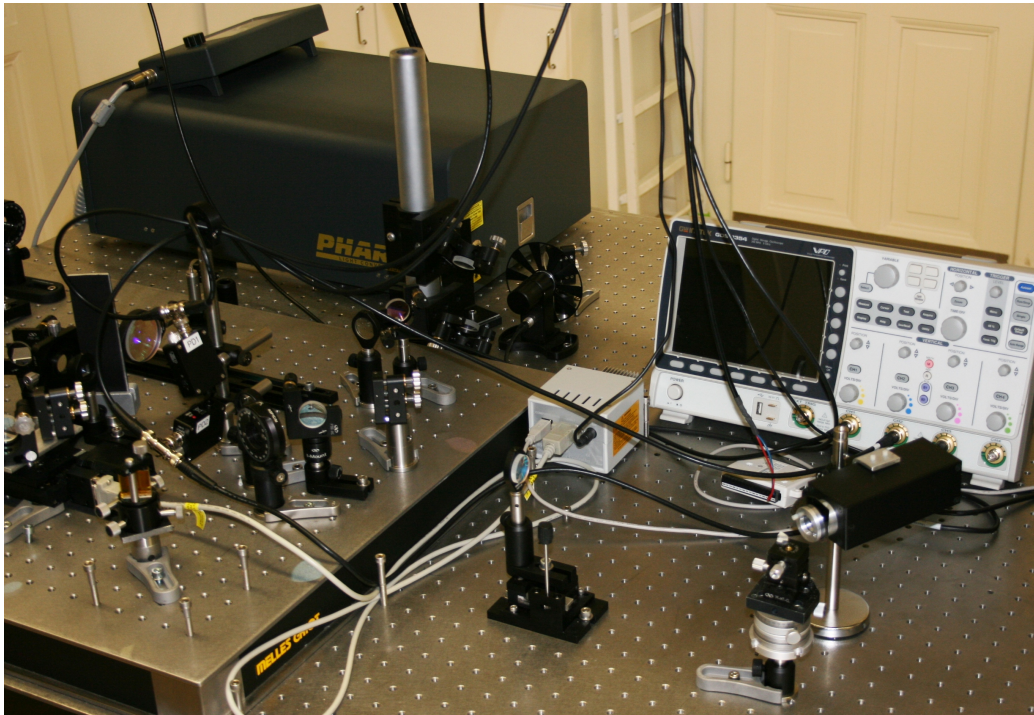
$$\begin{aligned}\sin \theta_d &= \frac{\lambda_0}{nn_g p} a, \\ \sin \theta_i &= \frac{\lambda_0}{p} - \sin \theta_d, \\ s_1 &= f(\sqrt{a} + 1), \\ s_2 &= \frac{f s_1}{s_1 - f} - \frac{s}{n}.\end{aligned}$$

Itt $n = n(\lambda_0)$, $n_g = n_g(\lambda_0)$, valamint

$$a = \frac{n^2 n_g p}{2 \lambda_0} \cdot \sqrt{\frac{\lambda_0^2}{n_g^2 p^2 \tan^4 \gamma} + \frac{4}{n^2}} - \frac{n^2}{2 \tan^2 \gamma}.$$

Kérdések:

- Adja meg egy optikai rács szögdiszperzióját!
- Rajzolja be a 4. ábrába a pumpáló impulzus intenzitásfrontját a rács előtt, a rács és a lencse között, valamint a LN kristály belsejében!
- Számolja ki LN-ban a sebességillesztéshez szükséges impulzusfront-dőlés γ szögét, ha a pumpálás központi hullámhossza $\lambda_0 = 1035$ nm és a THz frekvencia $\Omega_0 = 1$ THz. A LN törésmutatója $n(1 \text{ THz}) = 4,94$, az optikai tartományban (extraordinárius törésmutató) $n^2(\lambda) = 4.57906 + 0.099318/(\lambda^2 - 0.042286) - 0.0224\lambda^2$, ahol λ -t μm -ben kell megadni.
- Határozzuk meg $\lambda_0 = 1035$ nm és $\Omega_0 = 1$ THz esetén az optimális elrendezés paramétereit! A gyakorlaton használt eszközökre: $1/p = 1400$ vonal/mm, $f = 150$ mm, $s \approx 3$ mm.



5. ábra. A felépített kísérleti elrendezés.

2.2. Lézerbiztonság

A gyakorlat során használt pumpáló lézer egy Light Conversion gyártmányú, Pharos SP típusú Yb:KGW lézer. A lézer impulzus üzemben működik, 1 kHz ismétlési frekvenciával 180 fs-os fényimpulzusokat bocsát ki, amelyek energiája 1 mJ, központi hullámhossza 1035 nm. Az átlagteljesítmény 1 W (maximálisan 6 W). Lézerbiztonsági szempontból a lézer a 4. osztályba tartozik, azaz a legveszélyesebb csoportba. Ezért az pl. a szem számára különösen veszélyes. Nem csak a teljes lézernyaláb, hanem annak diffúz felületről szóródó igen kis része is a szem mardandó károsodását okozhatja. Fókuszált nyaláb a bőrön is sérülést okozhat.

A nagy kimenő teljesítményű lézerek óvatossággal és odafigyeléssel azonban biztonságosan használhatóak. A következő szabályokat a gyakorlat során szigorúan be kell tartani:

- Ha a lézer bekapcsolt állapotban van, a laborban mindenkinek védőszemüveget kell viselni!
- Reflektáló felületű tárgyakat tilos a lézerfény útjába tenni. A munka

kezdeté előtt órát, gyűrűt, stb. le kell venni.

- Nem csak a közvetlen lézernyaláb jelent veszélyt. Különböző felületekről (pl. optikai elemekről, csavarhúzóról, stb.) visszavert vagy szórt lézerfény is károsíthatja a szemet. A nyalábút megváltoztatása vagy optikai elemek behelyezése különös figyelmet igényel. A különböző felületekről reflektálódó vagy szórt nyalábokat csapdázni kell.
- Nem csak a saját, hanem mások testi épségére is vigyázni kell, másokat veszélyeztetni tilos.
- Az infravörös tartományban működő lézerrel való munka különösen nagy körültekintést igényel, mert a nyalábok nem láthatók.
- Közvetlenül a lézernyalábba nézni még védőszemüvegben is szigorúan tilos! Figyelni kell arra, hogy a szem ne kerüljön a lézernyalábok síkjába. Ezért bekapcsolt lézer mellett pl. tilos a laborban leülni!
- Tilos gyúlékony vagy robbanásveszélyes anyagot a lézernyalábba helyezni.
- A gyakorlat során nagyértékű eszközöket használunk, azok épségére fokozottan figyelni kell. Csak a gyakorlatvezető utasításai szerint szabad dolgozni.

A fenti szabályok tudomásulvételét és elfogadását a gyakorlat megkezdése előtt aláírással igazolni kell.

Kérdések:

- Hol keletkezik fókusz a THz-keltő elrendezésben?

2.3. Feladatok

1. A lézer bekapcsolása, teljesítménymérés, a nyalábút ellenőrzése (gyakorlatvezetővel).
2. Az előzőleg elvégzett számítások alapján építse fel a THz-keltő elrendezést! Csökkentett lézerteljesítménnyel (< 100 mW) dolgozzon!
3. A piroelektromos detektor segítségével végezze el a lencse és a LN kristály pontos beállítását!
4. A detektor gyári kalibrációjának, valamint a szűrőként használt Si lap mért transzmissziójának felhasználásával adja meg a THz-es impulzusok energiáját!

5. Mérje meg különböző minták (Si, papír, műanyag, víz, stb.) THz-es abszorpcióját!
6. Mérje meg a THz-es energia függését a pumpáló energiától. (A maximális pumpáló energia 1 mJ alatt legyen!)
7. Határozza meg a pumpáló intenzitást a pumpa foltméret és impulzusenergia mérésével!
8. Mérje meg a THz nyalábprofilt a LN kristály kilépő felületétől különböző távolságokra! A mérés alapján határozza meg a THz nyaláb divergenciáját és a nyalábnyak méretét (1 THz frekvenciát feltételezve)!

Eszközök:

- pumpáló lézer (impulzusenergia ≤ 1 mJ, impulzushossz 180 fs, ismétlési frekvencia 1 kHz);
- lézer teljesítménymérő;
- az impulzusfront-döntéshez 1400 vonal/mm karcolatsűrűségű optikai rács és $f = 150$ mm fókusztávolságú infravörös akromát lencse, tükör, $\lambda/2$ retardációjú lemez a lézer polarizációjának elforgatásához;
- LN prizma THz-keltéshez;
- piroelektromos detektor, Si szűrő, fényszaggató tárcsa (chopper) és oszcilloszkóp a THz-es impulzusok energiájának méréséhez;
- CCD kamera, szoftver, laptop a pumpáló foltméret méréséhez.

Kérdések:

- Hogyan működik egy ($\lambda/2$ retardációjú) retardációs lemez?

Hivatkozások

- [1] R. W. Boyd, *Nonlinear Optics*, Academic Press (2008).
- [2] M. C. Hoffmann, and J. A. Fülöp, "Intense ultrashort terahertz pulses: generation and applications," J. Phys. D **44** (2011) 083001.
- [3] Y.-S. Lee, *Principles of Terahertz Science and Technology*, Springer (2009).

- [4] 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** (2002) 1161.
- [5] J. A. Fülöp, L. Pálfalvi, G. Almási, and J. Hebling, "Design of high-energy terahertz sources based on optical rectification," *Opt. Express* **18** (2010) 12311 and *Opt. Express* **19** (2011) 22950.