Nagyenergiájú terahertzes impulzusok előállítása és alkalmazása (az ELI-ALPS-ban) Lehetőségek és kihívások

> Almási Gábor, <u>Fülöp József</u>, Hebling János, Mechler Mátyás, Ollmann Zoltán, Pálfalvi László, Tőke Csaba

> > PTE Fizikai Intézet hebling@fizika.ttk.pte.hu





#### Nagyenergiájú terahertzes impulzusok



- Lineáris THz-es spektroszkópia ( $E_{max} \approx 100 \text{ V/cm} \rightarrow 10 \text{ fJ energia}$ )
- Nagyenergiájú THz-es impulzusok ( $E_{max} \approx 100 \text{ kV/cm} \rightarrow \mu \text{J energia}$ )
- Extrém nagy energiájú THz-es impulzusok



 $E_{\text{max}} \approx 100 \text{ MV/cm} \rightarrow 10 \text{ mJ pulse energy}$ 

### PTE Nagyenergiájú Terahertzes Laboratórium

THz Lab

1.03 μm

High-Energy

- NIR femtoszekundumos Yb:KGW lézer erősítő rendszer
- (beszerzés alatt)

- hullámhossz
- impulzushossz
  180 fs
- impulzusenergia
  1 mJ
- ismétlési frekvencia
  1 kHz

LIGHT

CONVERSION

**High-power Femtosecond Laser System** 



CECCP.

#### ZnTe-al és LN-al történő THz keltés összehasonlítása



#### Nagyenergiájú THz-es impulzusok alkalmazásai

- Nemlineáris THz-es optika (ön-fázismoduláció, Kerr-effektus)
- Nemlineáris THz-es spektroszkópia (THz pumpa próba)
- "Egylövéses" THz-es képalkotás
- "Egylövéses" THz-es spektrálisan bontott képalkotás



#### Ön-fázismoduláció a LN THz-es forrásban 10 K hőmérsékleten





#### **Terahertzes Kerr effektus**



#### THz pumpa – THz próba elrendezés





Hoffmann et al.: Phys. Rev. B 79, 161201R (2009)

#### Szabad töltéshordozók abszorpciójának telítődése félvezetőkben

#### Germanium



Similar observed in GaAs, Si

Mayer & Keilmann: PRB 1986

Saturation coused by scattering of electrons into valleys with larger effective mass

Back relaxation observed by THZ pump –probe meas.

Increased absorption for Ge at intermediate THz intensity!

Hebling et al.: Phys. Rev. B 81, 035201 (2010) 9



Red: Ge

#### Impakt ionizáció InSb-ban

InSb, 450 µm, Eg=0.24 eV at 77 K

Doped sample, N=2x10<sup>15</sup> cm<sup>-3</sup> at T=80 K





Hoffmann et al.: Phys. Rev. B 79, 161201R (2009)

#### Impakt ionizáció in InSb-ban

Undoped sample, N=5x10<sup>13</sup> cm<sup>-3</sup> , T=80 K

Used model (avalanche ionization): Appl. Phys. A **29**, 125 (1982),  $\tau_e$ =7 ps,  $\epsilon_0$ =1.3 eV

Zener effect (tunneling) plays any role?

Accordings to Phys. Rev. B 82, 075204 (2010), YES it does





#### Más csoportok THz pumpa - próba mérései





Excitonok szén nanocsövekben

Doi et al.: Opt. Express 18, 18415 (2010)



THz free induction decay tirozinból

Liu et al.: Appl. Phys. Lett. **97**, 111103 (2010) Fotolumineszcencia kioltása THz-es impulzussal



#### THz-es képalkotás

# Tárgyakon történő áthaladáson, vagy visszaverődésen alapul

Fémek reflektálják, papír, műanyagok, ruházat nagymértékben átengedi a T-sugarakat





transzmisszió

reflexió



optikai



### Képek táskában, cipősarokban elrejtett tárgyakról

optikai

THz-es

#### Spektrális képalkotás









MDMA, Metamfetamin,



aszpirin

K. Kawase et al: Opt. Express 11, 2549 (2003)

#### Spektrálisan feloldott képalkotás



Usami et al.: Appl. Phys. Lett. 86, 141109 (2005)



### Extrém nagy energiájú THz-es impulzusok alkalmazásai

- THz-es impulzussal kvázi-fázisillesztett as impulzuskeltés
- HHG levágási frekvenciájának növelése
- THz-es undulátor UV EUV szabadelektron lézerhez
- Egyciklusú impulzusok előállítása a közepes IR EUV tartományon
- Lézerrel keltett protonnyaláb energiájának növelése hadronterápiás célra



#### Kvázi-fázisillesztett as impulzuskeltés



C. Serrat, J. Biegert: Phys. Rev. Lett. **104**, 073901 (2010)

K. Kovács et al.: Phys. Rev. Lett. beküldve





 $E_{THz} = 2 \div 6 \text{ MV/cm}$ 



18

#### HHG levágási frekvenciájának növelése

HHG THz-es tér jelenlétében Varjú K. (SZTE), Farkas Gy. (SZFKI)

Kombinált THz + IR terek

 $E(t) = E_0 \cos(\omega_{IR}t) + E_1 \cos(\omega_{THz}t)$ 

- Megbontja az IR tér szimmetriáját Hong et al., Opt. Expr. 2009
- Módosítja a HHG spektrumot

Lewenstein, PRA 1994

Modell számítások





E. Balogh et al.: Phys. Rev. A (2011)

#### Attoszekundumos impulzusok keltése

### HHG erős THz-es tér jelenlétében 1560 nm 800 nm

Mind páros és páratlan harmonikusok  $\rightarrow \rightarrow$  csak egy as impulzus gerjesztésenként





F. Junginger et al., Opt. Lett. **35**, 2645 (2010):  $E_{THz}$ = 12 MV/cm @ 20 THz by OPA in GaSe, birefrigent PM 20

#### Lézerrel történő elektrongyorsítás vákuumban



#### Röntgen Szabadelektron lézer







Bekerülési költség: LCLS: 380 M\$ Euro-XFEL: 850 MEUR 22



#### Röntgen szabadelektron lézerek paraméterei

Projects	Euro-XFEL	LCLS (SLAC)
Wavelength	6 – 0.085 nm	1.5 – 0.15 nm
Beam Energy	10 - 20 GeV	14.3 GeV
Main Accelerator	Super Conducting	S-band Normal Conducting
Accelerator Length Gradient x Active Length	2.1 km 23.5 MV/m x 900 m	1 km 19 MV/m x 800 m
Undulator Period Total undulator Length	26 mm 133 m	30 mm 113 m
Total Length Undulator Lines (X-ray)	3.4 km 3 (5)	1.6 km 1 (5)
Construction Cost	850 M-Euro	380 M\$

Gun TCAV0 L1X (320 m) (540m) (9m) Vert. L3-linac L2-linac Heater L1S dump (132m) 0000 DL1 • ا BC1 BC2 Undulator TCAV3 DL2 135 MeV 4.3GeV 250 MeV 3.5-14 GeV



Proc. PAC07, MOZBAB01 (2007), N Phot. 4, 641 (2010), Nature 466, 56 (2010)

 $\lambda_{\rm u}$  = 200 µm, E = 20 MV/cm,  $\lambda_{\rm R}$  = 1.5 Å, L<sub>G</sub> = 6 cm, E<sub>THz</sub> = 500 mJ 23

#### THz-es undulátor UV – EUV szabadelektron lézerhez





EECC



z

24

#### THz-es undulátor UV – EUV szabadelektron lézerhez





#### Elektroncsomag időbeli fókuszálása



 $\lambda$  = 1  $\mu$ m,  $\Delta$ t<sub>f</sub> = 30 zs

A. E. Kaplan, A. L. Pokrovsky: Optics Express 17, 6194 (2009)





#### út=0.0m, $\gamma_{min}$ =19.93, $\gamma_{max}$ =20.059





út=3.238m,  $\gamma_{min}$ =19.93,  $\gamma_{max}$ =20.059







út=3.268m,  $\gamma_{min}$ =19.93,  $\gamma_{max}$ =20.059

# Elektroncsomag időbeli fókuszálása inverz-szabadelektron lézerrel





# Egyciklusú impulzusok előállítása az IR – EUV tartományon koherens Thomson szórással





#### Legrövidebb: $\lambda$ = 20 nm, t = 66 as

#### Protongyorsítás THz-es impulzussal

Gyorsítás 40 MeV-ről 70 MeV-re 60 cm-en 1mJ THz energiával

Szabadalmi bejelentés előkészítés alatt



### Összefoglalás

- THz pumpa próba mérések, nemlineáris optika, "egylövéses" leképezés, stb. 1 µJ THz energiával
- 1 10 mJ THz energia: attoszekundumos impulzusok időtartamának csökkentése, intenzitásának növelése
- 1 10 mJ THz energia töltött részecskék manipulálására: undulátor sugárzás, "asztali" UV – EUV szabadelektron lézer, egyciklusú (tetszőleges időbeli lefutású) IR – EUV impulzusok előállítása, proton gyorsítás
- Részletesebb numerikus modellezés szükséges
- Kísérleti megvalósítás
- Ez csak a kezdet (molekulák orientáláse, stb.)