

Plačiajuostės terahercų dažnio spinduliuotės generavimas oro plazmoje, indukuotoje kompaktiško Yb:KGW lazerio impulsais

Generation of broadband terahertz radiation in air plasma induced by compact Yb:KGW laser pulses

G. Balčas, D. Buožius, V. Tamulienė ir V. Vaičaitis
Vilniaus universiteto Lazerinių tyrimų centras, Saulėtekio al. 10, LT 10223 Vilnius
Virgilijus.Vaicaitis@ff.vu.lt

Terahercų (THz) dažnio spinduliuotės generavimas fokusuotais femtosekundiniais lazerio impulsais sukurtoje oro plazmoje šiuo metu yra vienas iš perspektyviausių metodų, leidžiančių lengvai gauti labai plataus spektro (iki 100 THz) ir santykinai didelės energijos ($>1 \mu\text{J}$) impulsus, pasižyminčius itin aukštu ($>1 \text{MV/cm}$) elektrinio lauko stipriu [1]. Šie THz dažnio spinduliuotės parametrai ją leidžia naudoti ne tik laikinės skyros ar netiesinei spektroskopijai, bet ir valdyti įvairių medžiagų fazinius virsmus ar net chemines reakcijas [2, 3]. Pagrindinis šio metodo trūkumas yra tai, jog efektyviai plačiajuosčių THz dažnio impulsų generacijai reikia naudoti kuo trumpesnius femtosekundinius kaupinimo impulsus, todėl dažniausiai šiems tikslams naudojami 30-40 fs trukmės impulsus generuojantys didelių matmenų Ti:Safyro lazeriai. Iš kitos pusės, Yb:KGW lazeriai yra gerokai pigesni ir kompaktiškesni, tačiau generuoja ilgesnius 150-200 fs trukmės impulsus. Remiantis šiuo metu esančiais teoriniais modeliais tokios trukmės lazerio impulsais kuriamoje oro plazmoje THz dažnio spinduliuotės generavimas efektyvumas turėtų būti labai žemas, tačiau mūsų eksperimentai parodė, jog naudojant Yb:KGW lazerio impulsus galima gauti panašų ar net didesnį, nei gaunamas, naudojant gerokai trumpesnius Ti:Safyro lazerio impulsus, generacijos efektyvumą.

Eksperimentų metu oro plazmos kūrimui ir THz dažnio spinduliuotės generavimui vienu metu buvo naudojamos ir pirmoji ir antroji femtosekundinio Yb:KGW lazerio „Pharos“ (Light conversion Ltd) harmonikos (atitinkamai PH ir AH), fokusuotos 10 arba 15 cm židinio nuotolio veidrodėliais. Maksimali lazerio galia buvo 6W, o bangos ilgis ir pluošto diametras – atitinkamai 1030 nm ir 2 mm ($1/e^2$ lygyje). Lazerio impulsų trukmė buvo apie 190 fs (pusės aukštyje), o jų pasikartojimo dažnį buvo galima derinti tarp 1 ir 200 kHz. Maksimali generuojamų PH impulsų energija buvo 1 mJ, bet ji atitinkamai mažėjo, didinant impulsų pasikartojimo dažnį. Antroji lazerio harmonika buvo generuojama įvairaus storio netiesiniuose BBO kristaluose, o energinės ir spektrinės generuojamų THz impulsų savybės buvo analizuojamos, atitinkamai naudojant itin jautrų kalibruotą piroelektrinį kompanijos "Spectrum detector Inc" radiometrą ir laboratorijoje surinktą Maikelsono (Michelson) interferometrą.

Eksperimento metu gauta maksimali THz dažnio spinduliuotės galia siekė $21.4 \mu\text{W}$ (1 lentelė), kas atitinka maždaug 0.4×10^{-5} energijos keitimo efektyvumą, t. y., labai panašų į gaunamą, naudojant gerokai didesnius

gabaritų Ti:Safyro lazerius.

1 lentelė. Generuojamos THz dažnio spinduliuotės galios priklausomybė nuo fokusuojančių veidrodėlių židinio nuotolio ir BBO kristalo storio (lazerio galia ir pasikartojimo dažnis atitinkamai buvo 6 W ir 6 kHz).

Kristalo storis	0.5 mm	1.5 mm	2 mm
Židinio nuotolis			
10 cm	12.8 μW	11 μW	8.5 μW
15 cm	21.4 μW	11.3 μW	9.4 μW

Tolesnė generuojamų THz dažnio impulsų analizė parodė, jog jų spektras apima sritį tarp 0,1 ir 40 THz, ir taip pat yra palyginamas su spektru, gaunamu, naudojant Ti:Safyro lazerius. Kaip parodė ankstesni mūsų eksperimentai, tokius plačiajuosčius impulsus galima naudoti lazeriu sukurtos oro plazmos charakterizavimui, t. y., tiesiogiai matuoti jonizuotų dalelių (elektronų) erdvinius skirstinius, temperatūrą, gesimo konstantas ir kitus parametrus [4].

Skaitmeninis modeliavimas, įskaitantis šviesos pluoštų tiesinį bei netiesinį sklidimą (difrakciją, dispersinį plitimą, trečios eilės netiesiškumą, saviveiką, nuostolius oro plazmoje ir pan.) ir netiesinę oro jonizaciją, parodė, jog sklidimo metu žadinimo impulsai patiria erdvines-laikines modifikacijas, dėl kurių susiformuoja daug trumpesni šviesos impulsai ar jų fragmentai. Taigi, nors pradiniai lazerio impulsai yra gana ilgi, THz dažnio spinduliuotės generaciją indukuoja modifikuoti ir gerokai trumpesni, nei pradiniai, PH ir AH impulsai, o tai lemia ir platų generuojamų impulsų spektrą, ir santykinai didelį generacijos efektyvumą.

Taigi, šiame darbe yra demonstruojama, jog naudojant Yb:KGW lazerio impulsus galima efektyviai generuoti plačiajuostę THz dažnio spinduliuotę. Kadangi šie prietaisai yra gerokai pigesni ir kompaktiškesni nei paprastai tokiems tikslams naudojami Ti:Safyro lazeriai, tikimės, jog šio tyrimo rezultatai paspartins kompaktiškų didelės galios koherentinių THz dažnio šaltinių kūrimą ir vystymą.

Reikšminiai žodžiai: femtosekundiniai lazerio impulsai, oras, terahercų dažnis, plazma.

Literatūra

- [1] T. I. Oh et al, New J. Phys. **15**, 075002 (2013).
- [2] P. Salén et al, Physics Reports, **836–837**, 1-74, (2019).
- [3] J. L. LaRue et al, Phys. Rev. Lett. **115**, 036103, (2015).
- [4] V. Vaičaitis et al, Phys. Rev. E **107**, 015201 (2023).