

PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM

Fizika Doktori Iskola

Nemlineáris optika és spektroszkópia program

Nanométeres relativisztikus elektroncsomó létrehozása lézeres energia modulációval

PhD értekezés

Tibai Zoltán



Témavezetők:

Dr. Almási Gábor

egyetemi docens

Dr. Hebling János

egyetemi tanár

Pécs, 2016

1. ELŐZMÉNYEK ÉS CÉLKITŰZÉSEK

Az elektrongyorsítók által generált nagyenergiájú elektronokat szinkrotron sugárforrásokban és szabadelektron lézerekben (FEL, Free Electron Laser) használják fel. Ezek a fényforrások jelentős szereppel bírnak több tudományág, többek között a biológia [1], a kémia [2] és a fizika területén.

A technológiai fejlődésnek köszönhetően a relativisztikus elektronok paraméterei mellett az elektronokból keletkező fényforrások tulajdonságai is jelentősen javultak. Ehhez a fejlődéshez nagymértékben hozzájárult a lézerfizika rohamos fejlődése is, ugyanis lézereket használva elektronmanipuláció érhető el. A lézer alapú manipuláció lehetővé teszi az elektronsomagban lévő elektronok eloszlásának módosítását a fázistérben. E módosítások több

alkalmazás szempontjából is előnyösek. Ilyen előny például a longitudinális koherencia javítás és impulzusrövidítés undulátorban keletkező sugárzás előállításnál, vagy a gyorsítás hatékonyságának növelése inverz szabadelektron lézereknél történő elektrongyorsításnál.

A lézeres energiamanipuláció megvalósításához egy sztatikus, periodikus mágnes sorozat (azaz moduláló undulátor), továbbá egy lézertér szükséges. Annak érdekében, hogy az elektron longitudinális helyzete is módosuljon – vagyis elektroncsomó alakuljon ki – egy speciális diszperzív mágnes, chicane használata is szükséges. A relativisztikus elektroncsomag energiája a lézer fázisától függően módosul a moduláló undulátoron való áthaladása során, majd az undulátorból kilépve a diszperzív elem különböző pályákra tereli az különböző

energiájú elektronokat, amelyek a chicane-t elhagyva úgynevezett elektroncsomókba tömörülnek. Ezt a folyamatot csomósításnak nevezzük. Abban az esetben, ha az energiamoduláció mértéke jelentős, a csomósodás az undulátor utáni néhány méteres távolságban, szabad térben való terjedés során is megvalósul. Ekkor a chicane használata elhagyható. Az elektroncsomó előnye, hogy növeli az előállított sugárzás koherenciáját és intenzitását.

Az elektronmanipulációs technika során használt három elem kombinációjától függően több FEL típust különböztetünk meg. Ilyen például a bemenő maginpulzust erősítő FEL, amelynek két altípusa, a HGHG (High Gain Harmonic Generation) és a EEHG (Echo Enabled Harmonic Generation). E technikákat felhasználva az elektronmanipuláció egyik fő alkalmazási

területe femtoszekundumos impulzusok előállítása az extrém ultraibolya [3] és a röntgen tartományon [4]. Kísérletben az első eredmények az infravörös [5] és az ultraibolya [6] tartományban valósultak meg. Napjainkban, HGHG kísérletekben – magasharmonikus keltéssel gázokban előállított lézerimpulzusokat használva moduláló lézerként – sikeresen megvalósítottak 133 nm [7] és 60 nm központi hullámhosszú impulzusokat. Elméleti számításokra alapozva elektronmanipulációt alkalmazva többen javaslatot tettek az ennél is rövidebb, attoszekundumos impulzusok előállítására [8], melyek energiája μJ nagyságrendű [9]. Ezen javasolt megoldások hátránya azonban, hogy az előállított sugárzás időbeli alakja és a sugárzás vivő-burkoló fázisa sztochasztikus, ami a legtöbb alkalmazási területen hátrányt jelenthet.

2014-ben ennek a problémának egy lehetséges megoldására tettünk javaslatot. A javasolt elrendezéssel modellszámításaink szerint vivő-burkoló fáziskontrollált attoszekundumos impulzusokat lehet előállítani az extrém ultraviola tartományon [10]. A módszer lényege, hogy egy lineáris gyorsítóban felgyorsított elektroncsomag a moduláló undulátorban kölcsönhatásba lép terawattos lézertérrel, aminek hatására ultravékony elektroncsomók, úgynevezett nanocsomók keletkeznek. A nanocsomó egy másik (sugárzó) undulátoron áthaladva – a (keresztirányú) gyorsuló mozgásuk hatására – elektromágneses sugárzást keltenek, amelyek időbeli lefutása azonos alakú a sugárzó undulátor mágneses terének térbeli változásával. A modell két fő részből áll. Az első az ultravékony elektroncsomó előállítás, mely lézeres elektron manipulációval állítható elő, míg a

második rész a koherens undulátor sugárzás. Ebben a dolgozatban az ultravékony elektroncsomó előállításával, valamint annak numerikus szimuláción alapuló optimalizálásával foglalkozom.

Az értekezés tudományos eredményeket bemutató részének első felében javaslatot teszek egy olyan elrendezésre, amellyel ultravékony, 10 nm-nél rövidebb elektroncsomót lehet előállítani. A modellben használt elemek a moduláló undulátor, egy nagy teljesítményű lézer és a relativisztikus elektroncsomag. A gyakorlati megvalósítás érdekében meghatározok egy olyan paramétersereget, mellyel a célul kitűzött nanocsomó megvalósítható, továbbá a numerikus számolások során felhasznált elemek mind realiztikusak. A javasolt elrendezésben felhasznált elemeket részletesen elemzem

és optimalizálom annak érdekében, hogy az elektroncsomó hossza minél rövidebb legyen.

A második részben azt vizsgálom, hogy a javasolt elrendezésben a relativisztikus elektroncsomagokat lehet-e a drága LINAC helyett lézerplazma gyorsítóval előállítani. Vizsgálom a döntő fontosságú energiabizonytalanság hatását és javaslatot teszek egy olyan elrendezésre, amellyel a szelet-energiabizonytalanság csökkenthető és az alkalmazás számára megfelelő ultravékony csomó előállítható.

2. MÓDSZEREK

A FEL-ek különböző szimulációs modelljei és a leírásukra használt szoftverek rengeteget fejlődtek az elmúlt években, amiben jelentős szereppel bírt a számítógépek rohamos fejlődése, amivel mára már elérhetővé vált több millió részecske vizsgálata is.

Az elektronmanipulációs számolásokat erre alkalmas numerikus szoftverekkel valósítjuk meg. Ilyen többek között a Genesis [11] és a General Particle Tracer (GPT) [12]. A dolgozatban szereplő numerikus vizsgálatok döntő többségét GPT-vel végeztem. A C++ nyelven íródott GPT segítségével numerikusan szimuláltam az undulátor, a nagyintenzitású lézer és a relativisztikus elektroncsomag kölcsönhatását.

A három elem kölcsönhatásából létrejövő energiamoduláció optimalizálása érdekében egy saját kódot fejlesztettem C# nyelven. E program egyetlen elektron mozgását írja le tetszőleges periódusú, erősségű, trimmelésű undulátorban, ahol Gauss-nyalábú elektromágneses sugárzás van jelen az undulátor közepére fókuszálva. A saját szoftver előnye, hogy segítségével az ideális undulátor paraméter és undulátor periódushossz optimalizálása gyorsabban elvégezhető, mint a GPT-vel. Ebből kifolyólag arra használtam, hogy meghatározzam, mely értékek mellett lesz maximális az energianövekedés az undulátorban. GPT-vel az optimalizált paraméterekkel végeztem el a szimulációt.

3. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

I. Modellszámítások segítségével megmutattam, hogy nagy teljesítményű (> 1 TW) lézerrel, undulátor mágneses terében relativisztikus sebességgel haladó elektroncsomagban, olyan energiamoduláció hozható létre, melynek eredményeként az elektroncsomagban kialakuló elektroncsomók longitudinális hossza ultrarövid, akár 10 nm-nél is rövidebb lehet. A létrejövő elektroncsomók longitudinális hosszának változását az 516 nm központi hullámhosszon működő lézer teljesítményének függvényében vizsgálva, arra az eredményre jutottam, hogy 4 TW teljesítményű lézerimpulzusokkal 9 nm, míg 10 TW-os impulzusokkal 6 nm hosszúságú elektroncsomók állíthatók elő. [S1-S5]

II. Rámutattam, hogy a kétperiódusú moduláló undulátor használatakor a moduláló lézer erős fókuszálása esetén, az energiamoduláció ($\Delta\gamma$) maximális értékét nem a rezonancia egyenlet által meghatározott undulátor periódushossz (λ_u) mellett éri el, hanem 20%-kal hosszabb undulátor periódus esetén. Rámutattam, hogy ennek oka a Gouy-fázis. Optimális undulátor periódushossz esetén 10%-kal nagyobb energiamoduláció érhető el, mint a rezonancia feltételt kielégítő paraméterek esetében. [S1, S5]

III. Megmutattam, hogy néhány ciklusú attoszekundumos impulzusok generálását lehetővé tevő nanocsomók létrehozásának feltétele, hogy az elektroncsomag kezdeti energiabizonytalansága 0,2%-nál kisebb legyen. A szakirodalommal összehangban megmutattam, hogy 0,1%-os energiabizonytalanság érték

felett a csomósításkor keletkező nanocsomó hossza arányos az energiabizonytalanság értékével; 0,1%-os energiabizonytalanság alatt azonban ez a kapcsolata nemlineárisává válik. Ennek oka a Coulomb kölcsönhatás. Ráműtöttem, hogy nem lehet tetszőlegesen rövid nanocsomót előállítani, a csomó minimális hossza 5 nm. [S1]

IV. A lézer teljesítményének nagysága hatással van az előállított elektroncsomó kialakulásának helyére és hosszára. A gyakorlati megvalósítás érdekében meghatároztam, hogy az I. tézispontban ismertetett, 6 nm hosszúságú csomó kialakulásának helyén, az optimálisnak tekinthető, 6 nm-es hosszhoz képest mennyivel növelheti a moduláló lézer energia-instabilitása az elektroncsomó hosszát. Számításaim alapján az elektroncsomó hossza $\pm 10\%$ -os

intenzitásváltozás esetén 35%-kal, $\pm 5\%$ -os intenzitásváltozás esetén pedig 20%-kal nő meg. Eredményeim alapján kísérleti megvalósítás esetén a lézerteljesítmény fluktuációjának minimalizálására különös figyelmet kell fordítani. [S1]

V. Megvizsgáltam, hogyan függ az energia moduláció során keletkező elektroncsomók töltése a moduláló lézerek hullámhosszától. Számításokkal igazoltam, hogy az elektroncsomóban levő össztöltés lineárisan növekszik a lézer hullámhosszával az 516 – 1064 nm-es hullámhossztartományon. A moduláló lézer hullámhosszát 516 nm-nek, 800 nm-nek és 1064 nm-nek választva, a kialakuló elektroncsomag töltése rendre 1,1 pC, 1,8 pC és 2,1 pC. [S1, S3, S4]

VI. Meghatároztam impulzus üzemű moduláló lézer esetén a csomósítás során létrejövő főcsomó és a

szomszédos mellécsomók longitudinális hosszainak egymáshoz viszonyított arányát. 3 ciklusú impulzus esetén ez az arány 1:3, míg 2,5 ciklusnál 1:4, továbbá kettőciklusú vagy annál rövidebb ciklusú impulzus esetén ez az arány 1:5-ra módosul, vagyis izolált nanocsomó érhető el. Ennek következtében rámutattam, hogy amennyiben az 516 nm-es központi hullámhosszú moduláló lézer kettőciklusú vagy annál rövidebb ($<3,4$ fs), az általunk javasolt eljárással izolált attoszekundumos impulzus valósítható meg.

VII. Vizsgálataim alapján az általunk javasolt eljárás alkalmas lézerplazma gyorsító által létrehozott elektroncsomagból történő ultravékony csomók előállítására is. Számításaimmal megmutattam, hogy az általunk javasolt eljárás hatékony működésének érdekében, az elektroncsomag szelet-

energiabizonytalansága chicane-t használva 1%-ról 0,2%-ra csökkenthető. A lézerplazma-gyorsító által létrehozott elektroncsomagok töltései azonban nem érik el a lineáris gyorsítókét, továbbá az elektroncsomagból előállított nanocsomók 10 nm-nél hosszabbak. Emiatt az előállítható energia nagysága lényegesen kisebb a lineáris gyorsítóval elért értékeknél, továbbá csak 40 nm-nél hosszabb központi hullámhosszú vivő-burkoló fáziskontrollált attoszekundumos impulzusok előállítását teszi lehetővé. Számításaink szerint 60 nm-es központi hullámhossz esetén az attoszekundumos impulzus energiája 5 nJ, ami 2%-a a lineáris gyorsítóval kapott eredménynek.

4. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN MEGJELENT PUBLIKÁCIÓK

[S1] **Z. Tibai**, Gy. Tóth, M. I. Mechler, J. A. Fülöp, G. Almási and J. Hebling, “Proposal for Carrier-Envelope-Phase Stable Single-Cycle Attosecond Pulse Generation in the Extreme-Ultraviolet Range”, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 104801 (2014).

[S2] Gy. Tóth, **Z. Tibai**, Zs. Nagy-Csíha, Zs. Márton, G. Almási and J. Hebling, “Circularly polarized carrier-envelope-phase stable attosecond pulse generation based on coherent undulator radiation”, *Opt. Lett.* **40**(18), 4317-4320 (2015).

[S3] Gy. Tóth, **Z. Tibai**, Zs. Nagy-Csíha, Zs. Márton, G. Almási, J. Hebling, „Investigation of novel shape-

controlled linearly and circularly polarized attosecond pulse sources”, Nuclear Instruments And Methods In Physics Research Section B-Beam Interactions With Materials and Atoms, **369**, 2-8 (2016).

[S4] **Z. Tibai**, Gy. Tóth, Zs. Nagy-Csiha, J. A. Fülöp, G. Almási, J. Hebling, „Carrier-Envelope-Phase Stable Linearly and Circularly Polarized Attosecond Pulse Sources”, in Proceedings of the 37th International Free-Electron Laser Conference, FEL2015, Daejeon, South-Korea, 2015, Report No. MOP071, (2015).

[S5] Szabadalmi bejelentés, Gábor Almási, Mátyás Mechler, György Tóth, **Zoltán Tibai**, János Hebling, „Method and Arrangement to Generate Few Optical

Cycle Coherent Electromagnetic Radiation in The EUV-VUV Domain”, US 20160020574 A1.

5. EGYÉB PUBLIKÁCIÓK

[S6] A. Sharma, **Z. Tibai**, J. Hebling, S. K. Mishra
„Spatiotemporal focusing dynamics in plasmas at X-ray wavelength”, Physics of Plasmas **21**, 033103 (2014).

6. HIVATKOZÁSOK

1. Neutze, R., et al., *Potential impact of an X-ray free electron laser on structural biology*. Radiation Physics and Chemistry, 2004. **71**(3-4): p. 905-916.
2. Patel, C.K.N., et al., *The Free Electron Laser: Report*. 1982: National Academy Press.
3. Yu, L.H., et al., *Femtosecond Free-electron laser by chirped pulse amplification*. Physical Review E, 1994. **49**(5): p. 4480-4486.
4. Brefeld, W., et al., *Development of a femtosecond soft X-ray SASE FEL at DESY*. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section a-Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment, 2002. **483**(1-2): p. 75-79.
5. Yu, L.H., et al., *First lasing of a high-gain harmonic generation free- electron laser experiment*. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section a-Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment, 2000. **445**(1-3): p. 301-306.
6. Yu, L.H., et al., *First Ultraviolet High-Gain Harmonic-Generation Free-Electron Laser*. Physical Review Letters, 2003. **91**(7): p. 074801.
7. Labat, M., et al., *High-Gain Harmonic-Generation Free-Electron Laser Seeded by*

- Harmonics Generated in Gas*. Physical Review Letters, 2011. **107**(22): p. 224801.
8. Saldin, E.L., E.A. Schneidmiller, and M.V. Yurkov, *Scheme for attophysics experiments at a X-ray SASE FEL*. Optics Communications, 2002. **212**(4–6): p. 377-390.
 9. Ackermann, W., et al., *Operation of a free-electron laser from the extreme ultraviolet to the water window*. Nature Photonics, 2007. **1**(6): p. 336-342.
 10. Tibai, Z., et al., *Proposal for Carrier-Envelope-Phase Stable Single-Cycle Attosecond Pulse Generation in the Extreme-Ultraviolet Range*. Physical Review Letters, 2014. **113**(10): p. 104801.
 11. Reiche, S., *GENESIS 1.3: a fully 3D time-dependent FEL simulation code*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1999. **429**(1–3): p. 243-248.
 12. Geer, S.B.V.d. and M.J.D. Loos, *General Particle Tracer: A 3D Code for Accelerator and Beam Line Design*, in *6th European Particle Accelerator Conference*. 1998, Accelerators and Storage Rings: Stockholm, Sweden.