

Válasz Prof. Pálfalvi László opponensi véleményére

Köszönöm az opponens munkáját, a dolgozatom gondos átolvasására szánt időt, támogató és elismerő bírálói véleményét és elgondolkodtató kérdéseit. Az észrevételekre és a feltett kérdésekre azok eredeti sorrendjében az alábbiakban válaszolok.

1. Az attoszekundumos impulzusok amplitúdó és fáziskontrollja kapcsán elért eredmények [T5] voltak az első lépések a tetszőleges formájú attoszekundumos impulzusok előállításának irányába. Kb. 10 évre rá (2015 környékén) részt vett genetikusan algoritmus fejlesztésében a célzott attoszekundumos impulzusstruktúra eléréséhez [T6, T7]. Kérem vázolja a technika mai állását a formázott attoszekundumos impulzusok tekintetében, és térjen ki az alkalmazásokra is!

Első munkánk a HHG sugárzás amplitúdó- és fáziskontrollja terén [López-Martens, 2005] fontos mérföldkő volt, hiszen a keltett sugárzás spektrális, térbeli szűrése és a csőrp kontrollja vezetett oda, hogy a kísérleti célterületen valódi attoszekundumos impulzusokat sikerült előállítani, a 200 as alatti tartományban. Az elmúlt 20 évben egyre rövidültek az előállított attoszekundumos impulzusok. Ahogy dolgozatomban is említettem, a jelenlegi rekord 43 as [Gaumnitz, 2017], de az arXivon már megjelent egy publikáció, ami 25 attoszekundumos impulzus keltéséről számol be [Gao, arXiv]. Az impulzusok rövidítése – amely spektrális szűréssel kombinált csőrpkompenzációval érhető el – komoly technológiai előrelépés, de jelenleg nem látszik még az az alkalmazási terület, ahol kritikus lenne az impulzushossz. Ezzel szemben sokféle alkalmazást tesz lehetővé a spektrális szűrés, ami a széles HH sugárzást néhány harmonikusra (néha szubharmonikusra) szűkíti – természetesen az impulzushossz növelése árán –, és ezáltal konkrét elektronátmenetek gerjesztése valósulhat meg [Cucini 2020, Wang 2015]. A spektrális szűrést súrlódó beesésű rácsos monokromátorral, többrétegű tükrökkel illetve fém szűrők kombinációjával érhetjük el (e technológiákról a további kérdések kapcsán lesz még szó).

A genetikusan algoritmust alkalmazó munkáinkban a keltő nyaláb terének kontrolljával elérhető attoszekundumos impulzusok formálását mutattuk be. Mind attoszekundumos impulzusok rövidítésére, mind kettős impulzusok keltésére tettünk javaslatot [Balogh, 2014, Bodi, 2016]. Ebben a munkában a kontrollparamétereket a Goulielmakis csoportban kifejlesztett [Wirth, 2011] fényszintetizátor alapján határoztuk meg, és munkánk jól illusztrálta annak sokrétű kontrollálhatóságát. A fényszintetizátorok (és általánosabban a különböző frekvenciájú impulzusokból koherens kombinációval előállított kevert terek) technikai fejlődését, a kapcsolódó elméleti és kísérleti eredményeket, illetve az alkalmazásokat [Cirmi, 2023] tekinti át. E publikáció 2. táblázata bemutatja a HH sugárzás paramétereinek javulása terén elért, térszintetizáláson alapuló eredményeket. Ez a technika lehetővé tette az XUV impulzusenergia növelését, a spektrum kiterjesztését és hangolhatóságát, illetve az izolált attoszekundumos impulzusok kontrasztjának növelését.

A dolgozatomban nem tértem ki rá, de különböző polarizációjú impulzusok kombinációjával elliptikusan poláros XUV nyaláb kelthető [Kfir, 2015], amelynek jelentős alkalmazásai lehetnek királis molekulák fotoionizációjának vagy mágneses dikroizmus vizsgálatában.

2. A rétegszerkezet, az alkalmazott anyagok, illetve gyártástechnológiai szempontok alapján kérem, hasonlítsa össze a femtoszekundumos technikában használt csörpölt tükröket az attoszekundumos tartományra kifejlesztett többrétegű tükörrel!

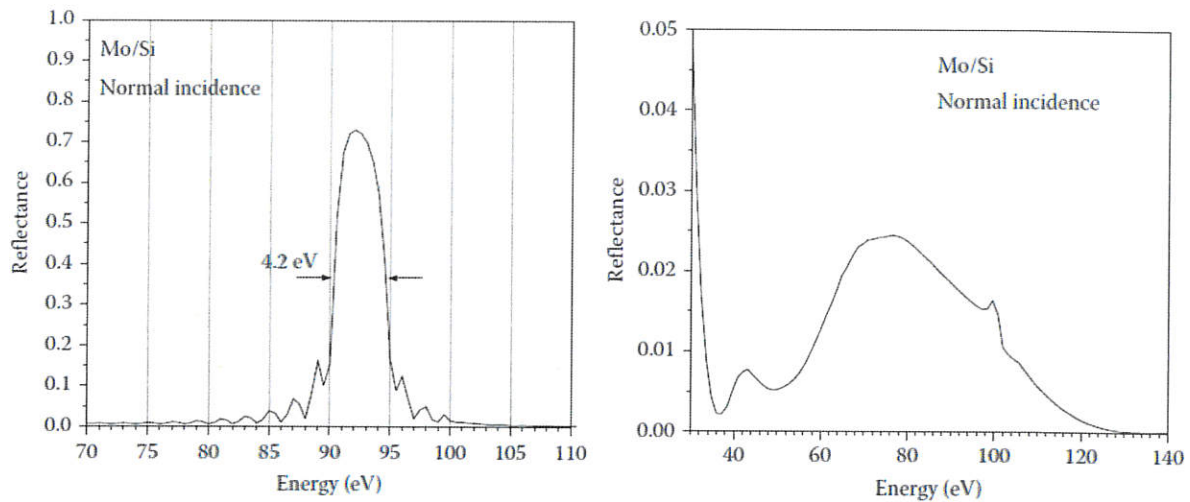
A disszertáció 4.1-es tézispontjához kapcsolódó projektben az XUV többrétegű tükrök tervezéséhez a sáv szélesség és a GDD értékek megadásával, vagyis a tervezési paraméterekkel járultam hozzá. A rétegstruktúra tervezését AS Morlens végezte és az együttműködő Charles Fabry de l'Institut d'Optique laboratóriumában készítették. Csörpölt tükör rétegszerkezetet én nem terveztem, sem az IR-látható, sem az XUV tartományban, tehát az összehasonlítást csak a technológia fizikai alapjai alapján tudom megtenni.

A csörpölt tükör alapelve, hogy a váltakozó alacsony (n_L) és magas (n_H) törésmutatójú dielektrikum rétegekből felépülő struktúrával kontrollálni tudjuk a különböző hullámhosszúságú komponensek effektív bejutási mélységét. (Ennek alapja, hogy az egyes réteghatárokon a Fresnel-reflexió miatt létrejött elemi sugarak interferenciájában az erősítés a rétegek optikai vastagsága (d_H és d_L) és a hullámhossz (λ) viszonyától függ, pl. ha a rétegek vastagsága egy adott mélységben $n_H \cdot d_H + n_L \cdot d_L = \lambda/2$, akkor effektíven ebből a mélységből verődik vissza az adott hullámhosszú sugár.) A rétegek vastagságának módosításával elérhető, hogy a hullámhossz függvényében változzon a behatolási mélység, következésképp az optikai késleltetés. A tükörstruktúra tervezésekor a rétegek anyaga (törésmutatója), vastagsága és száma szabadon változtatható. Minél több réteget használunk, annál nagyobb mértékben tudjuk kontrollálni a visszaverődő fényt. Az XUV tartományban a magas abszorpció limitálja a használható rétegszámot, körülbelül 10-re. (A látható tartományban akár 100 réteget is használnak.) A rétegszám által megengedett sáv szélesség/reflexió korlátokat az 1. ábrán illusztrálom. A rétegstruktúra tervezésénél az XUV tartományban háromféle anyagot alkalmaznak (Mo, Si, B₄C) a szabadsági fokok növelése érdekében. [Bourassin-Bouchet, 2011]

Mindebből azonnal következnek az XUV csörpölt tükrök alkalmazhatóságának, gyártásának nehézségei:

- 1) Az XUV tartományban nem igazán találhatók „magas” törésmutatójú anyagok, ebben a tartományban a törésmutató többnyire 1-hez közeli. A csörpölt tükör működéséhez szükséges törésmutató-különbség az abszorpció közelében érhető el, tehát a veszteségek sokkal nagyobbak, mint a látható–NIR tartományban.
- 2) A hullámhossztartomány a láthatóban megszokottnál 20–100-szor kisebb, így a rétegeknek is ennyivel vékonyabbnak kell lenniük; ezért ebben a tartományban a felületi érdességből származó egyenetlenség igen jelentős lehet.
- 3) Az XUV tartományban az anyagok abszorpciója nagy, ezért igen jelentősek az optikai komponenseken tapasztalható veszteségek (pl. az 50%-os reflexió kimagaslónak minősül, tipikusan 20% alatti).
- 4) Az attoszekundumos impulzusok sáv szélessége több 10 eV, így a multirétegnek is extrém nagy sáv szélességben kell reflektálnia.

Optikai tartományban már a kezdeti többrétegű tükrök is igen jó reflexiós képességgel bírtak, Szípcs Róberték 98% feletti reflexiót tudtak elérni 700–1000 nm tartományban ($\sim 0,5$ eV) [Szípcs, 1993, Szípcs, 1994]. Az attoszekundumos technológiában elsőként Krausz Ferenc laboratóriumaiban használtak többrétegű tükröket, sávszűrő reflektorként, attoszekundumos impulzusok izolálására és fókuszálására. [Kienberger, 2004]

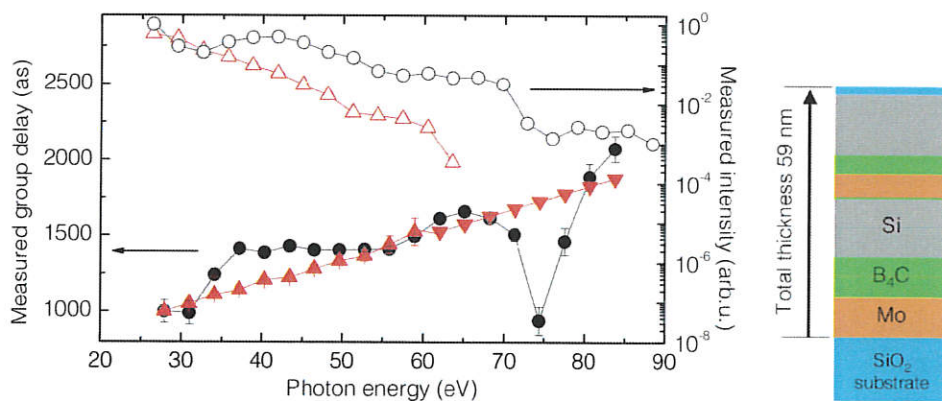


1. ábra: Két példa XUV tartományra tervezett többrétegű, normál beesésű tükörre.

[Forrás: Chang, 2011] A tükrök Mo/Si rétegpárokból épülnek fel.

40 rétegpár alkalmazásával a reflexió akár a 70%-ot is elérheti, de mindössze 4,2 eV sávszélességben. A sávszélesség növelhető a rétegszám csökkentésével; két periódus Mo/Si rétegpár alkalmazásával a sávszélesség közel tízszeresére növelhető, de a reflexió alig több 2%-nál.

Mindezen nehézségek ellenére vannak sikeres XUV csörpölt tükrök tervezéséről és gyártásáról szóló munkák, de a sikerességet (reflexió, illetve a csörp kontrollálása tekintetében) más tartományban értékeljük. Komoly eredménynek számít az 50 eV-ra centrált, 20–30 eV sávszélességű, 10–20% reflexiójú csörpölt tükör gyártása [Bourassin-Bouchet, 2011], amelynek jellemzőit a 2. ábra mutatja.



2. ábra: A széles sávú csörpölt XUV tükör reflexiója és csoportkésleltetése (kör szimbólumok), összehasonlítva egy referencia ezüsttükör által reflektált nyalábbal (háromszög szimbólumok). Megjegyzés, az ezüsttükör által reflektált nyaláb esetén a GD értékeket 65 eV fölött extrapolálták. Az ábra jobb oldalán a három anyagból álló rétegstruktúra látható. [Bourassin-Bouchet, 2011]

Tudomásom szerint az első XUV csörpölt tükrö gyártását és a csoportkésleltetés mérését a lundi csoportban, a francia Laboratoire d'Optique Appliquée intézettel együttműködésben végeztük [Morlens 2006]. Ebben a munkában Mo/Si/B4C rétegrendszeret használtunk, és igazoltuk a GD hangolhatóságát. A fő problémának a törésmutatók pontatlanságát találtuk a 20–50 eV tartományban, illetve a leválasztott rétegek hullámhosszal összemérhető érdességbeli és vastagságbeli bizonytalanságát.

Az XUV tartományban alkalmazható csörpölt tükrök tervezése tekintetében [Hofstetter, 2011] így fogalmaz: „A látható tartományban kifejlesztett csörpölt tükrökkel ellentétben az XUV csörpölt többrétegű tükrök megvalósítása új megközelítéseket igényel a számítógépes tervezésben, gyártásban és karakterizálásban, amelyek eddig nem álltak rendelkezésre. ... A speciálisan tervezett, nem periodikus, két vagy három anyagi rétegből készített többrétegű XUV tükrök nagyfokú szabadságot biztosítanak az XUV impulzusjellemzők befolyásolásában a tükrök visszaverődése révén.”

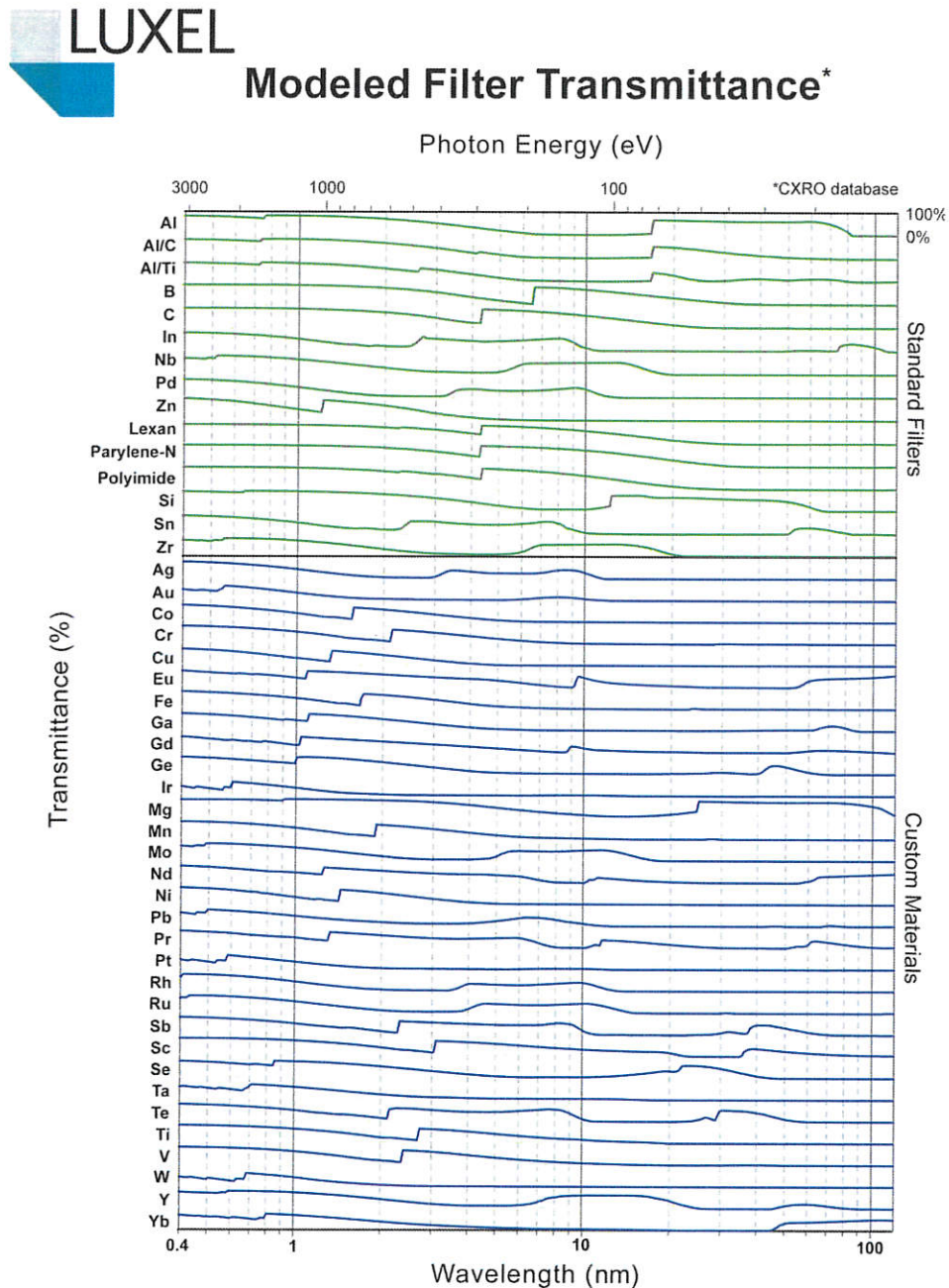
3. Az XUV kompresszor optimális rácsparaméterei az aberrációk minimalizálása alapján lettek meghatározva sugárkövetésen alapuló analízis alapján, ahogy az [T5]-ből kiderül. Milyen programmal lettek végezve a szimulációk?

A bíráló által hivatkozott munkában olasz kollégáinkkal együttműködve hasonlítottuk össze a súrlódó beeséssel megtervezett rácsos kompresszor és megfelelően megválasztott anyagú és vastagságú fém szűrők attocsörp kompenzáló hatását. A rácsparamétereket az olasz kutatók határozták meg, a cikk hivatkozásai között megadott [7]-es publikáció alapján („A ray tracing simulation was used to find the optimal grating parameters that minimize aberrations following the procedure described in Ref. [7].”) Az említett cikkben [Frassetto, 2008] a szerzők leírják, hogy saját fejlesztésű szoftvert használtak („The modeling of the compressor is done with a ray-tracing program written by the authors ...”). Együttműködésünk során felmerült a SHADOW (X1) program használata, de végül feladtuk ezt a kutatási irányt, így nem volt szükségünk további számolásra.

4. Számításba jöhetnek-e az alumíniumon és cirkóniumon kívül más, megfelelő diszperziós és transzmissziós tulajdonsággal rendelkező anyagok az attoszekundumos impulzusok chirpjének kompenzálására?

Természetesen. A dolgozatomban is említett publikációkban alumínium szűrőt használtunk argonban keltett [López-Martens, 2005], illetve cirkóniumot neon harmonikusok [Gustafsson, 2007] csörpjének kompenzálására. Az azóta eltelt időben sokat fejlődött a magasharmonikus-keltésen alapuló XUV sugárzások alkalmazási köre, és mind sávszűrésre, mind csörpkompenzációra sokféle vékony film áll rendelkezésre. Az ELI attoszekundumos nyalábvonalaiban számos szűrőt használunk különböző spektrális tartományok szelekciójához. Készletünkben megtalálhatók többek között Al, Zr, Te, Mg, Mo, Ti, Py (pyrlene-N), Sn, Cr, Fe szűrők, illetve használjuk ezek kombinációit is. A 3. ábra az egyik beszállítónknál elérhető szűrők áteresztőképességi értékeit mutatja be. Ezek határozzák meg, hogy mely tartományokban használhatóak.

A Kramers–Kronig-összefüggések szerint egy anyag diszperziója negatív GDD-t erős abszorpcióközel frekvenciatartományban mutat, így a gyártott fóliáknak ultravékonynak kell lenniük. A szűrőfóliák leggyakrabban néhány 10–100 nm vastagságúak, de esetenként akár a néhány mikront is elérhetik. A szűrőanyagok meghatározásakor a sáváteresztő-képesség jellemzői és a mechanikai tulajdonságok a legfontosabbak. Az alumínium a leggyakrabban használt anyag; mivel széles az XUV sáváteresztő-képessége, kiszűri a látható fényt, és kiváló mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik.

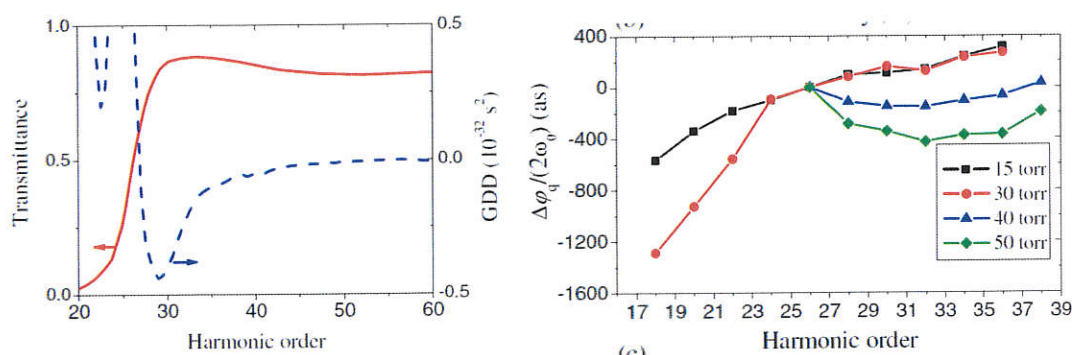


3. ábra: A Luxel által forgalmazott szűrők transzmissziója [X2]

5. Létrejöh-e az attoszekundumos impulzust keltő gázközegben a gáz diszperziós karakterisztikájából fakadóan olyan mértékű önkompreszió, mely során transzformáció limitált impulzusokhoz jutunk? Mik a korlátok?

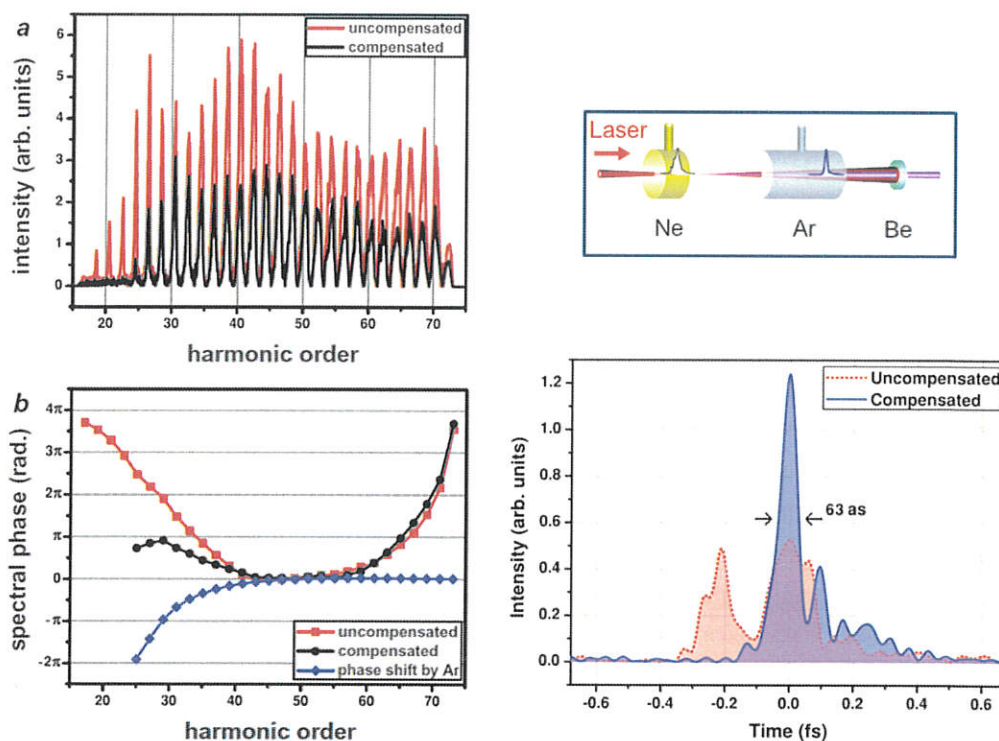
Igen. Attoszekundumos impulzusok csörpjének kompenzálása gáz közeg negatív GDD-je által is történhet. A HHG közegként is használt nemesgázok, mint például az Ar, Kr és Xe, jó transzmisszióval és bizonyos tartományban negatív GDD-vel rendelkeznek. A gáz GDD-je lineárisan hangolható a közeg hosszával vagy nyomásával. [Kim, 2007, Ko, 2010, Kroon 2014, Kovács, 2019]

Nemesgázok anyagi diszperziójának alkalmazását attoszekundumos impulzusok kompressziójára két példával illusztrálom; ezek a korlátokat is jól mutatják. [Kim, 2007] és munkatársai a keltő argon gázt használták a keltett sugárzás csörpkompenzációjára is (4. ábra). A csörpöt a gáznyomáson keresztül folyamatosan tudták hangolni. A legrövidebb impulzust 40 torr nyomásnál érték el, az impulzusok hossza 206 as volt. Összehasonlításként, a Fourier-korlát 200 as lett volna. Megjegyzem, hogy az abszorpció hatására a spektrum beszűkült, a GD kompenzációja kisebb tartományban valósult meg.



4. ábra: (a) Argon gáz (1 mm, 40 torr) transzmissziója és GDD-je. (b) RABBIT módszerrel mért GD értékek különböző gáznyomások esetén. (A keltés és csörpkompenzáció 12 mm argon cellával, a RABITT karakterizálás He-ban történt). [Kim, 2007]

Ha a harmonikusok keltéséhez Ne vagy He gázt használunk, a csörp kompenzálása nem hatékony (nincs negatív GDD a használt spektrális tartományban), így a csörp kompenzálásához egy további gázcellát kell használni [Ko, 2010]. A publikációban leírt kísérlet során neonban keltett harmonikusok csörpjét kompenzálták argon cellán átvezetve a sugárzást. Ebben az esetben a második cella csupán a csörp kompenzálásáért felelős, így nyomása szabadon állítható a csörp minimalizálása érdekében.



5. ábra: A keltett harmonikusok intenzitása (a) és spektrális fázisa (b) a második cellában jelenlévő argon (25 torr, 9 mm) hatására (fekete) illetve nélküle (piros).

Az eredeti harmonikus sugárzás erősen modulált, közel 300 as impulzusokat tartalmaz. A csőrp kompenzációja révén az impulzusok hossza 63 as-ra csökkenthető (Fourier-korlát: 47 as). [Ko, 2010]

Az 5. ábrán reprodukált eredmények jól mutatják a csőrp anyagi diszperzióval való kompenzálásának korlátait: a harmonikusok késleltetése a plató teljes tartományában pozitív meredekségű, lineáris függést mutat. Ezzel szemben az anyagok negatív GDD-t csak az abszorpciós sáv közelében, egy viszonylag keskeny tartományban mutatnak, és a GDD értéke még itt sem állandó. Tehát a csőrpöt csak minimalizálni tudjuk, kiküszöbölni nem. Ugyanez igaz a szűrőkre és az XUV rácsos kompresszorra is.

A lundi csoportban mi is végeztünk kísérleteket a gáz céltárgy harmonikusok időbeli szinkronjára (attocsőrp) gyakorolt hatásának meghatározása érdekében [Ruchon, 2008]. Azt találtuk, hogy a közegbeli terjedés az attoszekundumos impulzusok rövidüléséhez vezethet, illetve a gáz az attoszekundumos impulzusok csoportkésleltetését is befolyásolja, ezért megbízható pumpa-próba mérésekhez a keltő gázcella nyomását stabilan kell tartani. [Kroon, 2014]

Megjegyzem, hogy az attocsőrp kompenzálására ionizált gáz közeg (plazma) negatív diszperzióját is javasolták. [Chang, 2018]

6. Terahertzes impulzusok segédtere az attoszekundum-generálás során a fázisillesztés megvalósításához egy hatékony lehetőség. A numerikus szimulációkhoz jellemzően a korabeli, kísérletileg elérhető THz-es impulzusok paramétereit használták. A terahertzes technikák elmúlt évtizedbeli fejlődése azonban felveti a kérdést, hogy a ma rendelkezésre álló THz-es források optimálisabb feltételeket teremtenek-e az attoszekundumos impulzusok keltésére nézve?

THz-asszisztált kvázi-fázisillesztési számolásainkban egy konkrét HHG esetet vizsgáltunk (gáznyomás, IR impulzusparaméterek, fókuszálás), ebben határoztuk meg a THz impulzus paramétereit, ami a kvázi-fázisillesztést optimalizálta [Kovács, 2012; Balogh, PhD]. A használt paraméterek nem az akkor kísérletileg demonstrált, hanem a kvázi-fázisillesztéshez optimalizált értékek voltak. A cikkben tárgyalt esetben 120 μm központi hullámhosszú (2,5 THz), sokciklusú (8 ps) impulzusra volt szükség, amelyben a térerősség ugyan nem túl nagy ($\sim 5 \text{ MV/cm}$), de mivel a teljes gázcellát (4 mm) ki kellett világítania, 70 mJ impulzusenergiára volt szükség. A cikkünk írásakor e paraméterek még nagyon távol álltak az elérhető értékektől, és nincs tudomásom arról, hogy elérték-e őket. (A mai technológiával talán már megközelíthetőek.) Nemlineáris lítium-niobát kristályban a legnagyobb demonstrált energia kb. 14 mJ, 7,5 MV/cm becsült térerősséggel (0,2 THz-es frekvencián) [Wu, 2023]. A váltakozó orientációjú LN lapokból összeállított kvázi-fázisillesztett módszer (amit az ELI laboratóriumában is demonstráltak) skálázható lehet nagyobb energiákra, így potenciális jelölt lehet javaslatunk megvalósításához. [Dalton, 2024].

Megjegyezném, hogy ha a HHG paraméterek változnak, akkor a THz paraméterek is változni fognak (a koherenciahossz befolyásolja a szükséges hullámhosszat, a fázisillesztetlenség pedig a szükséges térerősséget).

Hivatkozások:

[Balogh, 2014] E Balogh, B Bodi, V Tosa, E Goulielmakis, **K Varjú**, P Dombi, *Genetic optimization of attosecond-pulse generation in light-field synthesizers*. Physical Review A; **90**; 2; 023855 (2014)

[Balogh, PhD] E Balogh, *Macroscopic study and control of high order harmonic and attosecond pulse generation in noble gases*. PhD thesis (2014)

[Bodi, 2016] B Bodi, E Balogh, V Tosa, E Goulielmakis, **K Varjú**, P Dombi, *Attosecond pulse generation with an optimization loop in a light-field-synthesizer*. Optics Express **24** 21957 (2016)

[Borrego-Varillas, 2022] Borrego-Varillas, Lucchini and Nisoli, *Attosecond spectroscopy for the investigation of ultrafast dynamics in atomic, molecular and solid-state physics*. Rep. Prog. Phys. **85**, 066401 (2022)].

[Bourassin-Bouchet, 2011] C. Bourassin-Bouchet, Z. Diveki, S. de Rossi, E. English, E. Meltchakov, O. Gobert, D. Guenot, B. Carre, F. Delmotte, P. Salieres, and T. Ruchon, *Control of the attosecond synchronization of XUV radiation with phase-optimized mirrors*. OPTICS EXPRESS **19**, 3809 (2011)

[Chang, 2011] Z Chang, *Fundamentals of Attosecond Optics*. CRC Press, 2011

[Chang, 2018] Z. Chang, *Attosecond chirp compensation in water window by plasma dispersion*. Opt. Express **26**, 33238 (2018)

[Cirimi, 2023] Giovanni Cirimi, Roland E. Mainz, Miguel A. Silva-Toledo, Fabian Scheiba, Hüseyin Çankaya, Maximilian Kubullek, Giulio Maria Rossi, and Franz X. Kärtner, *Optical Waveform Synthesis and Its Applications*. Laser Photonics Rev. **17**, 2200588 (2023)

[Cucini, 2020] Riccardo Cucini, Tommaso Pincelli; Giancarlo Panaccione; Damir Kopic; Fabio Frassetto, Paolo Miotti; Gian Marco Pierantozzi; Simone Peli, Andrea Fondacaro; Aleksander De Luisa; Alessandro De Vita, Pietro Carrara; Damjan Krizmancic; Daniel T. Payne; Federico Salvador; Andrea Sterzi; Luca Poletto; Fulvio Parmigiani; Giorgio Rossi; Federico Cilento, *Coherent narrowband light source for ultrafast photoelectron spectroscopy in the 17–31 eV photon energy range*. Struct. Dyn. **7**, 014303 (2020)

[Dalton, 2024] P. J. Dalton, C. T. Shaw, J. T. Bradbury, C. D. W. Mosley, A. Sharma, V. Gupta, J. Bohus, A. Gupta, J.-G. Son, J. A. Fulop, R. B. Appleby, G. Burt, S. P. Jamison, M. T. Hibberd and D. M. Graham, *Cryogenically cooled periodically poled lithium niobate wafer stacks for multi-cycle terahertz pulses* Appl. Phys. Lett. **125**, 141101 (2024)

[Du, 2023] JX Du, GL Wang, XY Li, ZH Jiao, SF Zhao, XX Zhou: *Generation of a quasi-chirp-free short isolated attosecond pulse from high-order harmonics by optimized multicolor laser fields*, PHYSICAL REVIEW A **108**, 023101 (2023)

[Frassetto, 2008] F. Frassetto, P. Villoresi, and L. Poletto, *Optical concept of a compressor for XUV pulses in the attosecond domain*. Opt. Exp. **16**, 6652–6667 (2008)

[Gaumnitz, 2017] Gaumnitz T, Jain A, Pertot Y, Huppert M, Jordan I, Ardana-Lamas F, Wörner HJ: *Streaking of 43-attosecond soft-X-ray pulses generated by a passively CEP-stable mid-infrared driver*. Optics Express. **25** (22): 27506–27518 (2017).

[Gao, arXiv] Jingsong Gao, Mahmudul Hasan, Hao Liang, Ming-Shian Tsai, Yiming Yuan, Zach Eisenhutt, Christoph H. Keitel, Chii-Dong Lin, Yunquan Liu, Ming-Chang Chen, Meng Han, *Bright 25-attosecond light pulses reach the one atomic unit of time*. arXiv:2508.14774

[Gustafsson, 2007] E Gustafsson, T Ruchon, M Swoboda, T Remetter, E Pourtal, R López-Martens, Ph Balcou, and A L’Huillier, *Broadband attosecond pulse shaping*. Optics Letters **32**, 1353 (2007)

[Hofstetter, 2011] Michael Hofstetter, Martin Schultze, Markus Fieß, Benjamin Dennhardt, Alexander Guggenmos, Justin Gagnon, Vladislav S. Yakovlev, Eleftherios Goulielmakis, Reinhard Kienberger, Eric M. Gullikson, Ferenc Krausz, and Ulf Kleineberg, *Attosecond dispersion control by extreme ultraviolet multilayer mirrors*. OPTICS EXPRESS **19**, 1767 (2011)

[Kfir, 2015] Ofer Kfir, Patrik Grychtol, Emrah Turgut, Ronny Knut, Dmitriy Zusin, Dimitar Popmintchev, Tenio Popmintchev, Hans Nembach, Justin M. Shaw, Avner Fleischer, Henry Kapteyn, Margaret Murnane & Oren Cohen, *Generation of bright phase-matched circularly-polarized extreme ultraviolet high harmonics*. Nature Photonics **9**, 99–105 (2015)

[Kienberger, 2004] R. Kienberger, E. Goulielmakis, M. Uiberacker, A. Baltuška, V. Yakovlev, F. Bammer, A. Scrinzi, Th. Westerwalbesloh, U. Kleineberg, U. Heinzmann, M. Drescher, and F. Krausz, *Atomic transient recorder*. Nature **427**(6977), 817–821 (2004).

[Kim, 2007] Kim K T, Kang K S, Park M N, Imran T, Umesh G and Nam C H, *Self-Compression of*

Attosecond High-Order Harmonic Pulses. PRL **99**, 223904 (2007)

[Ko, 2010] Dong Hyuk Ko, Kyung Taec Kim, Juyun Park, Jae-hwan Lee and Chang Hee Nam, *Attosecond chirp compensation over broadband high-order harmonics to generate near transformlimited 63 as pulses*. New J. Phys. **12**, 063008 (2010)]

[Kovács, 2012] K Kovács, E Balogh, J Hebling, V Tosa, and K Varjú, *Quasi-phase-matching high-harmonic radiation using chirped THz pulses*. Physical Review Letters **108**, 193903 (2012)

[Kovács, 2019] K. Kovacs, V. Tosa, *Macroscopic attosecond chirp compensation*. OPTICS EXPRESS **27**, 21873 (2019)

[Kroon 2014] D Kroon, D Guenot, M Kotur, E Balogh, EW Larsen, CM Heyl, M Miranda, M Gisselbrecht, J Mauritsson, P Johnsson, K Varjú, A L'Huillier, and CL Arnold, *Attosecond pulse walk-off in high-order harmonic generation*. Optics Letters, **39**, 2218 (2014)

[López-Martens, 2005] Rodrigo López-Martens, Katalin Varjú, Per Johnsson, Johan Mauritsson, Yann Mairesse, Pascal Salières, Mette B Gaarde, Kenneth J Schafer, Anders Persson, Sune Svanberg, Claes-Göran Wahlström, Anne L'Huillier, *Amplitude and phase control of attosecond light pulses*. Phys. Rev. Lett. **94** 033001 (2005)

[Morlens, 2005] A.-S. Morlens, Ph. Balcou, Ph. Zeitoun, C. Valentin, V. Laude, and S. Kazamias, *Compression of attosecond harmonic pulses by extreme-ultraviolet chirped mirrors*. Opt. Lett. **30**, 1554–1556 (2005).

[Morlens, 2006] A.-S. Morlens, R. López-Martens, O. Boyko, Ph. Zeitoun, Ph. Balcou, K. Varjú, E. Gustafsson, T. Remetter, A. L'Huillier, S. Kazamias, J. Gautier, F. Delmotte, and M.-F. Ravet, *Design and characterization of extreme-ultraviolet broadband mirrors for attosecond science*. Opt. Lett. **31**, 1558–1560 (2006).

[Ruchon, 2008] T Ruchon, C P Hauri, K Varjú, E Mansten, M Swoboda, R López-Martens and A L'Huillier, *Macroscopic effects in attosecond pulse generation*. New Journal of Physics **10** 025027 (2008)

[Szipocs, 1993] Szipöcs R., Ferencz K., *Recent developments of laser optical coatings in Hungary*. Opt. Engineering, **32** 2525 (1993)

[Szipocs, 1994] R. Szipocs, K. Ferencz, C. Spielmann, and F. Krausz, *Chirped multilayer coatings for broadband dispersion control in femtosecond lasers*. Opt. Lett. **19**, 201–203 (1994)

[Wang, 2015] H Wang, Y Xu, S Ulonska, JS Robinson, P Ranitovic & RA Kaundl, *Bright high-repetition-rate source of narrowband extreme-ultraviolet harmonics beyond 22 eV*. Nat Commun **6**, 7459 (2015)

[Wirth, 2011] A Wirth, M Th Hassan, I Grguras, J Gagnon, A Moulet, T T Luu, S Pabst, R Santra, Z A Alahmed, A M Azzeer, V S Yakovlev, V Pervak, F Krausz, E Goulielmakis, *Synthesized light transients*. Science **334** 195–200 (2011)

[Wonich, 2004] A. Wonisch, T. Westerwalbesloh, W. Hachmann, N. Kabachnik, U. Kleineberg, and U. Heinzmann, *Aperiodic nanometer multilayer systems as optical key components for attosecond electron spectroscopy*. Thin Solid Films **464-465**, 473–477 (2004).

[Wu, 2023] Xiaojun Wu, Deyin Kong, Sibao Hao, Yushan Zeng, Xieqiu Yu, Baolong Zhang, Mingcong Dai, Shaojie Liu, Jiaqi Wang, Zejun Ren, Sai Chen, Jianhua Sang, Kang Wang, Dongdong Zhang, Zhongkai Liu, Jiayan Gui, Xiaojun Yang, Yi Xu, Yuxin Leng, Yutong Li, Liwei Song, Ye Tian, and Ruxin Li, *Generation of 13.9-mJ Terahertz Radiation from Lithium Niobate Materials*. Adv. Mater. **2023**, 2208947 (2023)

[X1] <https://www.esrf.fr/computing/scientific/raytracing/>

[X2] <https://luxel.com/products/filters/standard-filters/>

Szeged, 2025. október 25.



Dr. Geretovszkyné Dr. Varjú Katalin

