FIATAL MŰSZAKIAK TUDOMÁNYOS ÜLÉSSZAKA XIX.

Kolozsvár, 2014. március 20–21.

ATTOSZEKUNDUMOS IMPULZUSOK TÖRTÉNETE

HISTORY OF ATTOSECOND LIGHT PULSES

KÓHÁZI-KIS Ambrus

Kecskeméti Főiskola, GAMF Kar, Természet- és Műszaki Alaptudományi Tanszék, H6000, Magyarország, Kecskemét, Háromszék utca, 10.; Telefon: +36-76-516436, Fax: +36-76-516299, kohazi-kis.ambrus@gamf.kefo.hu

Abstract

The application fields of the attosecond (10^{-18} s) pulses are rapidly expanding in the fields of basic research and of the applied science. Revolutionarily new type of investigations are possible with attosecond light pulses, since the typical time-scale of the elementary atomic processes is in the picosecond to attosecond realm. In the Bohr-model of the hydrogen atom the time period of the circulating electron is approximately 150 attosecond. I make a overview of the fundamental modes of the production of attosecond light pulses, and outline a short history this important new technology.

Keywords: Laser; high-harmonic generation; nonlinear optics; attosecond pulses.

Összefoglalás

Az attoszekundumos (10^{-18} s) impulzusok alkalmazása az alap- és az alkalmazott alapkutatóban gyorsan terjed. Az attoszekundumos impulzusokkal forradalmian újszerű vizsgálatok végezhetők, hiszen az impulzusok időtartama összemérhető az atomokon belüli elemi folyamatok jellemző idejével, nevezetesen a Bohr-atommodellben az elektronok keringési idejével. Előadásomban bemutatom az attoszekundumos impulzusok előállításának alapvető módjait, és felvázolom ennek a fontos, új technikának a rövid történetét.

Kulcsszavak: lézer; magas felharmonikus keltése; nemlineáris optika; attoszekundumos impulzusok.

1. Bevezetés

A folyamatok, szerves- és szervetlen anyagok jellemzőiről egyre több információt nyerhetünk ahogyan egyre rövidebb időskálán vizsgálhatjuk azokat. A fényjelek hossza röviddel a lézerek felfedezését követően alulmúlták a legrövidebb elektromos jelek hosszát.

A legrövidebb elektromos jelek hossza a tranzisztor felfedezésével (1947, Walter Brattain, John Bardeen és William Shockley, 1956-ban Nobel-díj) csökkent a μ s (mikroszekundum= 10^{-6} s) érték alá, napjainkra a félvezetőtechnika fejlődésével a legrövidebb elektromos jelek hossza felülről a ps (pikoszekundum= 10^{-12} s) értéket közelítik. Napjainkban a számítógépek, a leggyorsabb kommunikációs rendszerek GHz (10^9 Hz) feletti jelátviteli sebességgel rendelkeznek [1].

Az elérhető legrövidebb jelek előállítása terén azonban a fényjelek messze az elektromos jelek előtt járnak. Rövid, kis előadásomban felvázolom röviden azokat a megoldásokat,

amelyek az extrém rövid fényimpulzusok előállításához vezettek. A témában részletesebben elmélyülni vágyók számára ajánlom Varjú Katalin sokkal részletesebb, kiváló előadását [2].

2. Ultrarövid lézerimpulzusok

A legrövidebb fényimpulzusok hossza a lézerek felfedezését (1961, Theodore Maiman) követően csökkent a μs -os érték alá. Nagy egyszeri átmeneti erősítésű lézeranyag és eléggé nagy áteresztőképességű nyitótükör esetén a szilárdtestlézerek bekapcsolási tranziense különálló, jellemzően μs -os időtartamú fényimpulzusokat eredményez.

Már a lézer kifejlesztésének az évében sikerült ns-os (nanoszekundum= 10^{-9} s) fényimpulzusokat előállítani az úgynevezett Q-kapcsolásos technikával. A lézer működésének beindulását késleltetik egy optikai zárral, ezzel nagy mértékű populációinverziót hoznak létre. A zár nyitása után a nagyobb fényerősítés miatt gyorsabban megnő a lézer impulzusa. Az erősebb fény a lézerben gyorsabban megszünteti a populációinverziót, ezzel a lézeraktív közegben tárolt energia a normál lézerimpulzusos működéshez lépest közel ezred résznyi idő alatt kicsatolható a Q-kapcsolás segítségével.

A lézer rezonátoránál körülfutási idejénél rövidebb fényimpulzusok előállításához már egy fontos trükköt kell bevetni [3]: a lézer fényének állóhullámait, longitudinális módusait fázisban össze kell lebegtetni. A frekvenciában egyenközű módusok összelebegése a körülfutási időközönként megjelenő ps-os, illetve fs-os (femtosekundum= 10^{-15} s) fényimpulzusok megjelenését eredményezi. A kialakuló fényimpulzusok hossza függvénye a lézeraktív anyag emissziója spektrális szélességének, a módusok csatolását megvalósító moduláció erősségének, gyorsaságának [4]. Ebben az impulzushossz tartományban már jelentős szerepet játszik az anyagok diszperziója is, amit optikai rácsokkal, diszperziós prizmákkal, illetve fázismodulált tükrökkel lehet kompenzálni. Ezzel a technikával elérhető legrövidebb impulzus időtartama 5 fs közelébe esik [5]. A lézerből kilépő fény spektrumának az önfázismoduláció jelensége segítségével történő további szélesítésével 4 fs körüli impulzushosszakokat lehet kapni [6]. Ezen impulzusok hosszát már lényegében a lézerfény periódusideje korlátozza (Ti:zafír lézer esetén a fény elektromágneses hullámának periódusideje 2,67 fs).

A néhány fényhullám-periódus hosszúságú lézerimpulzusok esetében már nagyon fontos a vivőhullám és annak burkolójának relatív fázisa, az úgynevezett CEP (Carrier-Envelope Phase) is [7]. A nemlineáris folyamatok intenzitása függ a CEP fázis értékétől.

Nemlineáris jelenségek fontos szerepet játszanak az impulzuslézerek működésében is. Az ultrarövid impulzusokat szolgáltató lézerek működésében az egyik legfontosabb jelenség az optikai Kerr-effektus, amely esetében az intenzív fény megváltoztatja a közeg törésmutatóját. Ez okozza az impulzusok spektrális szélességét megváltoztató önfázismoduláció jelenségét, de ennek következtében alakul ki az úgynevezett Kerr-lencsés módusszinkronizáció, vagy a két lézerezonátor fényének nemlineáris interferenciáján alapuló, úgynevezett additív módus-csatolás is [8].

3. Felharmonikus keltése nemlineáris kristályokkal

Optikailag nemlineáris kristályok segítségével, többek között, a beérkező intenzív fény felharmonikusát is kelthetjük [8]. A közegek atomjainak, molekuláinak nemlineáris válasza rendszerint meglehetősen gyenge (jellemzően csak nagyságrendileg 10^{20} W/m² intenzitású terekben változtatja meg csak lényegesen a tér a közeg törésmutatóját). Ahhoz, hogy a beeső fénynyaláb jelentős hányada más frekvenciára transzformálódjon a közeg atomjainak választát

koherensen, fázisban kell felösszegezni. Azonban a közegek jellemzően normális diszperzióval rendelkeznek, azaz a hosszabb hullámhosszakon a közegben nagyobb a fény terjedési sebessége. Ezért a transzformálódott és az eredeti fény terjedése során fázisban elcsúsznak egymástól: a különböző helyeken keltett transzformált jelek nem adódnak össze azonos fázisban, sőt a relatív fáziseltolódás miatt egymást ki is olthatják. A hatásos frekvencia-konverzió megvalósításához nélkülözhetetlen az eredeti és a transzformált fény fázisterjedési sebességének pontos kiegyenlítése, fontos az úgynevezett fázisillesztés. Ennek megvalósítására van szükség általában optikailag kettőtörő kristályos nemlineáris közegek alkalmazására. A különböző kristálytani irányokba eső az eredeti- és a gerjesztett fény polarizációs irányai esetén az anizotróp jelleg és a diszperzió eredőjeként megvalósítható a fázisillesztés.

Legtöbbször csak a második vagy legfeljebb csak a harmadik felharmonikus kelthető egy nemlineáris konverzió segítségével: a frekvenciák túl nagy aránya esetén a kristályok anizotrópiája nem elég erős a diszperzió miatt nagy értékű fázissebességek kompenzálásához.

A felharmonikus-keltéssel nyert nagyobb frekvencián elvileg fs-nál rövidebb fényimpulzusok is kelthetők lennének, de a rövid impulzusok esetén széles spektrumú fázisillesztés és az anyagi diszperzió miatt kristályokban nem sikerült átlépni a fs-os impulzustartam határt. Továbbá nincs olyan nemlineáris optikai kristály, amely a 100 nm körüli hullámhossz tartományon ne lenne erősen elnyelő.

4. Többfotonos effektusok, magas felharmonikusok keltése

A lézerek felfedezését követően 1965-ben adtak hírt először gázok nemlineáris ionizációjáról [9]: az atomban kötött elektron ionizációjához egy foton energiája nem elegendő, egyszerre több foton elnyelése szükséges. 1983-ban vizsgálták először [10] atomok ionizációját az úgynevezett nemperturbatív intenzitástartományban: nagyon erős elektromágneses térben a fény-anyag kölcsönhatás már nem írható le perturbációs elméletekkel. Ebben az esetben úgy képzelhetjük el az ionizációt, hogy a fény elektromos tere periódikusan letöri az elektron előtt az atom potenciálgátját, az elektron az atomból alagúteffektussal távozik, mint ahogyan azt a Keldysh-Faisal- Reiss-elméletek leírják [11].

1979-ben fedezték fel, hogy intenzív lézertérben az ATI (Above Threshold Ionization) jelenségét: az elektron nem feltétlenül csak az ionizációhoz minimálisan szükséges számú fotont vesz fel, hanem annál többet is. Ez az elektronok energiaspektrumában a foton energiájával elkülönülő diszkrét csúcsokban volt megfigyelhető. A jelenség úgy is felfogható, hogy az elektronok az intenzív elektromágneses térbeli Volkov-állapotokra [12] ugranak: ezek az állapotok éppen a fény fotonenergiájával elválasztott energiaállapotok.

1987-ban fedezték fel [13], hogy eléggé intenzív lézerfény hatására atomok a lézerfény magas rendű felharmonikusait sugározzák ki (HHG=High Harmonic Generation). A jelenség úgy magyarázható, hogy az intenzív fény hatására az elektronok alagúteffektussal elhagyják az atomot, az elektromágneses térben fotonok elnyelésével energiát nyernek, majd az elektromos tér megfordulásával visszatérnek az atomhoz, ahol rekombinálódnak az elnyelt energia kisugárzásával. Nagyon leegyszerűsítve úgy is mondhatjuk, hogy az elektron visszapottyan a Volkov-állapotok létrájáról egy nagyenergiás foton kibocsátásával kísérve.

5. Attoszekundumos impulzusok előállítása

1992-ben Farkas Győző és Tóth Csaba vetette fel először [14] attoszekundumos fényimpulzusok előállításának lehetőségét a magas rendű felharmonikusok keltésével. Az elv nagyon hasonlít a móduscsatolt lézerimpulzusok előállításának elvéhez: a frekvenciában egyenközű hullámkomponenseket fázisban összeadva

Néhány évvel később az előbb vázolt elv működését demonstrálták is [15]. Az attoszekundumos impulzusok keltését optimalizálták, sőt többféle módozatát is kifejlesztették [16]. Így nem csupán szabad térben elhelyezkedő atomokon, de hullámvezetőben, illetve még plazmák felületén is kelteneek attoszekundumos impulzusokat.

6. Összefoglalás

Az ultragyors impulzusok előállítása és az azokkal vizsgált ultragyors jelenségek vizsgálata napjaink egyik legdinamikusabban fejlődő területe a fizikának. Előadásomban az ezen a tudományterületen felbukkanó elvek, módszerek alapjait és történeti fejlődését igyekszem felvázolni.

Jelen kutatási eredmények megjelenését az „Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra” című, TÁMOP-4.1.1.C-12/1/KONV-2012-0005 azonosítószámú projekt támogatja. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

Irodalom

- [1] Cheng, R., és mások: *High-frequency self-aligned graphene transistors with transferred gate stacks*, PNAS 2012, 109 (29), 11588-11592 oldal.
- [2] Varjú, Katalin: *Attoszekundumos impulzusok keltése és alkalmazásai*, ELI Téli Iskola, Szeged, (2012), http://tisk.mafihe.hu/tisk12/eloadasok/0202/VK_MaFiHE_teli_iskola.pdf.
- [3] DiDomenico, M.: *Small-signal analysis of internal (coupling type) modulation of lasers*, J. Appl. Phys., (1964) 35. kötet, 2870–2876. oldalak.
- [4] Huas, H.A.: *Mode-Locking of Lasers*, IEEE J. on Sel. Top. in Quant. Electr. (2000) 6. kötet, 1173-1185. oldalak.
- [5] Morgner, U. és mások: *Sub-two-cycle pulses from a Kerr-lens mode-locked Ti:Sapphire laser*, Opt.Lett. (1999) 24. kötet, 411–413. oldalak.
- [6] Schenkel, B. és mások: *Generation of 3.8-fs pulses from adaptive compression of a cascaded hollow fiber supercontinuum*, Opt. Lett. (2003), 28. kötet, 1987-1989. oldalak.
- [7] Diels, J. és Rudolph, W.: *Ultrashort Laser Pulse Phenomena*, Academic Press, Elsevier, 2006.
- [8] Boyd, R.W.: *Nonlinear Optics*, Academic Press, 2008.
- [9] Voronov, G. S. és mások: *Multiphoton Ionization of the Hydrogen Molecule in the Strong Electric Field of Ruby Laser Emission*, Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters (1965) 2. kötet 237-238. oldalak.
- [10] Chin, S.L. és mások: *Observation of Kr and Xe ions created by intense nanosecond CO2 laser pulses*, J. Phys. B (1983) 16. kötet, L223-L226 oldalak.
- [11] Keldysh, L.V., JETP (1964) 47. kötet, 1945. oldal. (Keldysh, L.V.: *Ionization in the field of a strong electromagnetic wave*. Sov. Phys. JETP (1965) 20. kötet, 1307. oldal.)
- [12] Bergou, J. és Varró, S.: *Wavefunctions of a free electron in an external field and their application in intense field interactions. II. Relativistic treatment*, (1980) J. Phys. A: Math. Gen., 13. kötet, doi:10.1088/0305-4470/13/8/030.
- [13] McPherson, A. és mások: *Studies of multiphoton production of vacuum-ultraviolet radiation in the rare gases*, JOSA B, (1987) 4. kötet, 595-601 oldalak.
- [14] Farkas, Gy., Tóth, Cs.: *Proposal for attosecond light pulse generation using laser induced multiple-harmonic conversion processes in rare gases*, Physics Letters A, (1992) 168. kötet, 447–450 oldalak.
- [15] Hentschel, M. és mások: *Attosecond metrology*, Nature (2001) 414. kötet, 509-513. oldalak.
- [16] Brabec, T. (szerkesztő): *Strong field laser physics*, Springer, 2009.