

# FEMTOSZEKUNDUMOS LÉZER- ÉS PARAMETRIKUS OSZCILLÁTOROK FEMTOBIOLÓGIAI ALKALMAZÁSOKHOZ

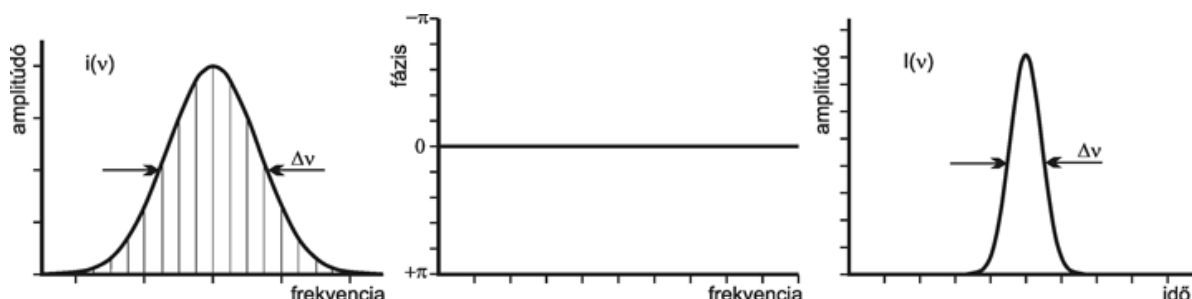
Szipócs Róbert

tudományos főmunkatárs, MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet –  
tudományos főmunkatárs, MTA Kísérleti Orvostudományi Kutatóintézet –  
ügyvezető igazgató, R&D Ultrafast Lasers Kft.  
szipoecs@sunserv.kfki.hu • r.szipocs@szipocs.com

Napjaink lézerfizikai kutatásainak és fejlesztéseinek egyik legdinamikusabban fejlődő területe a femtoszekundumos ( $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$ ) időtartományban működő lézerek kutatása, fejlesztése és alkalmazása a fizika, a kémia, a biológia, az orvostudomány és az informatika területén. Magyarországon jelentős, több évtizedes hagyománya van e területnek, amit e lézerfizikai cikkgyűjtemény vendégszerkesztőjének, Bor Zsoltnak és munkatársainak munkássága is bizonyít (Szabó et al., 1984; Bor – Rácz, 1985).

A 80-as években a fejlesztések közepontjában a módusszinkronizált, elosztott visszacsatolású festéklézerek álltak, melyek megfelelő sáv szélességet biztosítottak ahhoz, hogy a fényimpulzusok időtartama a femtoszekundumos időtartományba essen

(Szabó et al., 1984). Fontos itt megjegyeznünk, hogy a festékek mint lézeraktív közegek alkalmazására a lézerimpulzusok időbeli és a frekvenciatartománybeli leírása között fennálló Fourier-traszformációs kapcsolat miatt volt szükség. Ez gyakorlatilag két dolgot jelent: az egyik, hogy minél rövidebb egy lézerimpulzus, annál nagyobb a spektrális sáv szélessége, és viszont – amennyiben feltesszük, hogy a különböző frekvenciakomponensek (végtelen szinuszhullámok) a tér egy adott pontjában egy adott időpillanatban azonos fázisban rezegnek (lásd *1. ábra*). Ez a matematika nyelvén fordított arányosságot jelent, vagyis  $\Delta\nu\Delta\tau = \text{állandó}$ . A másik fontos következmény, hogy a lézerimpulzusok időbeli hossza, gyakran alakja is erősen függ a különböző frekvenciakomponensek relatív



*1. ábra* • Az ultrarövid fényimpulzusok komplex frekvenciaspektruma (a) és (b) és időbeli alakja (c) között fennálló Fourier-traszformációs kapcsolat szemléltetése:

$$\Delta\nu\Delta\tau = \text{állandó, ha a fázis is állandó}$$

fázisától, az ún. csörptől is. (A „csörp” angol eredetű szó – eredetileg madárcsiripelést jelent –, és az akusztikus, elektromos vagy optikai jel időben változó frekvenciájára utal.)

Az eddigiekből következik, hogy egy femtoszekundumos lézer megépítésekor a megfelelő sávzélességű erősítő közeg megválasztásán kívül még meg kell oldanunk a lézer módusszinkronizálását (vagyis azt, hogy a fényimpulzus frekvenciakomponensei közel azonos fázisban rezegjenek), valamint azt, hogy az így létrejövő lézerimpulzus különböző frekvenciakomponensei a lézert alkotó optikai közegeken (például a lézeraktív közegen) való áthaladáskor időben ne folyjanak szét, vagyis az ún. diszperziókompenzálást. A diszperzió a különböző frekvenciájú fénykomponensek különböző terjedési sebességéből származik: optikai közegekben tipikusan a „piros” komponensek gyorsabban terjednek, mint a „zöld” illetve „kék” komponensek. A diszperziókompenzálásra sokáig közel tökéletes megoldást nyújtottak a Brewster-szögű prizmákból álló kompresszorok (Bor – Rácz, 1985).

Jelentős technológiai fejlődést hozott a femtoszekundumos lézerek területén a jó termikus tulajdonságokkal és széles erősítési tartománnyal jellemezhető Ti-zafír kristály (Moulton, 1986) felfedezése. E femtoszekundumos szilárdtestlézerek fő előnye egyszerűbb felépítésük és megbízhatóbb működésük volt, talán azzal az egy hátránnyal, hogy működési tartományuk a vörös, illetve a közeli infravörös (IR) hullámhossztartományba esett, míg az erősítő közegként alkalmazott lézerfestékek megfelelő megválasztásával a festéklézerek gyakorlatilag a teljes látható hullámhossztartományt lefedték.

Az ultrarövid impulzusú lézereknek azonban megvan az az előnyük, hogy viszonylag kis átlagteljesítmények (0,1-1 W) mellett is nagy a fényintenzitásuk a lézerimpulzusok időtartama alatt, így a lézernyaláb megfelelő

optikai közegre történő fókuszálásakor különböző nemlineáris hatások lépnek fel, például a másodharmonikus-keltés, optikai parametrikus lekonverzió, önfázis-moduláció, két- és többfoton-abszorpció, csak hogy a dolgozatunk szempontjából legfontosabbakat említsük.

A lézerek módusszinkronizálása szempontjából van még egy fontos nemlineáris hatás, mely nemcsak a lézerimpulzusok spektrumának változásaként (önfázis-moduláció) figyelhető meg, hanem a lézersugár nyalábparamétereiben is jelentkezik: ez az ún. Kerr-nemlinearitás. Ekkor a közeg törésmutatója már jelentősen függ az aktuális fényintenzitástól ( $n(I) = n_0 + n_2 I$ ), és például térbeli intenzitását tekintve Gauss-eloszlású fénynyaláb esetében  $n_2$  előjelétől függően a lézernyaláb fókuszálásában vagy defókuszálásban jelentkezik.

1993-ban az MTA SZFKI Optikai Vékonyréteg Laboratóriumának munkatársaként speciális dielektrikum lézertükröket fejlesztettem ki femtoszekundumos lézerrendszerekhez. A fényimpulzusok fázisát korrigáló tükröket mint *csörpölt tükröket* ismeri azóta a szakirodalom (Szipócs et al., 1994). Az első lézerkísérletek óta – melyek osztrák-magyar tudományos együttműködés keretében a Bécsi Műszaki Egyetemen egy csörpölt tükrökkel diszperziókompenzált Ti-zafír lézerrel zajlottak (Stingl et al., 1994) – az új technológia jelentős tudományos fejlődést hozott a femtoszekundumos lézerfizika területén, és – többek között – az addigi *legrövidebb (4,5 fs) fényimpulzus előállításához* vezetett 1997-ben a Groningeni Egyetemen (Hollandia) (Baltuska et al., 1997). Az új találmány – ami a diszperzív lézertükrökre, illetve velük diszperziókompenzált Ti-zafír lézerekre vonatkozik – szabadalmi védeltséget is élvez Magyarországon, illetve az USA-ban (Lajstromszám: 214 659, illetve US Pat. No. 5,734, 503; feltalálók: Szipócs Róbert [70 %] és Krausz Ferenc [30 %]), és már több kommerciális lézerrendszerben is alkalmazzák azt.

Az *R&D Lézer-Optika Bt.*-t akkori munkatársaimmal, Kőházi-Kis Ambrussal és Kovács Attilával alapítottuk 1995-ben, hogy tudományos ismereteinket a gyakorlatban is kamatoztassuk: az általunk kifejlesztett fáziskorrigáló tükrökre (Stingl et al., 1994) és az azokat minősítő eljárásokra (Kovács et al., 1995) több kiemelt tudományos kutatóhelytől, iparvállalattól érkezett igény, amit ebben a formában lehetett (és kellett) kielégíteni. 1997-ben az R&D Lézer-Optika Bt. a KFKI telephelyén megalapította az *R&D Ultrafast Lasers Kft.*-t abból a célból, hogy tevékenységét a femtoszekundumos lézeroszillátorok kutatásának-fejlesztésének és gyártásának területére is kiterjessze.

A korábbi megoldásokkal (kisdiszperziójú, negyedhullámú rétegekből álló dielektikumtükrökkel) szemben a csörpölt tükrök nagy előnye, hogy szélesebb frekvenciatartományon biztosítanak nagy visszaverőképességet, továbbá diszperziós tulajdonságaik is tervezhetőek a rétegvastagságok megfelelő megválasztásával. Ennek következtében a csörpölt tükrök segítségével a korábbiaknál lényegesen rövidebb fényimpulzusokat előállító rendszerek tervezhetőek. Ilyen például az R&D Ultrafast Laser Kft. által is gyártott, 10 fs-nál rövidebb fényimpulzusokat előállító, Kerr-lencsével módusszinkronizált *FemtoRose 10 MDC Ti-zafír lézer* (2. és 3. ábra). Ezek a rendkívül rövid lézerimpulzusok már közel 100 nm-es spektrális féltékszélességűek, és előnyösen alkalmazhatóak például a széles-



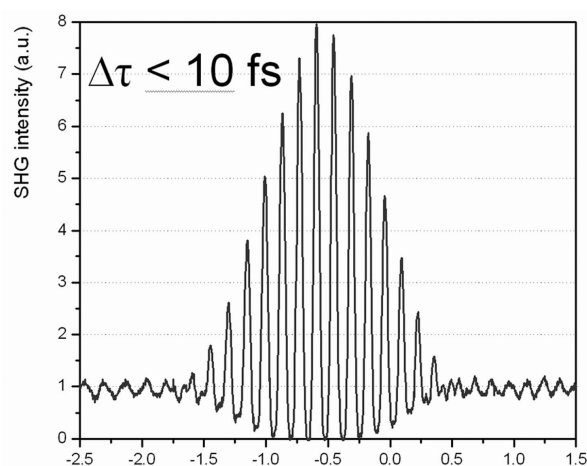
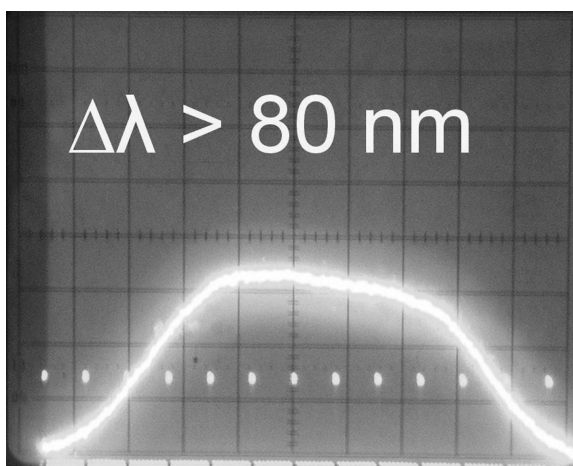
2. ábra • Az R&D Ultrafast Lasers Kft. FemtoRose 10 MCD csörpölt tükrökkel kompenzált, Kerr-lencsével módusszinkronizált Ti-zafír lézere

sávú, ultrarövid impulzusú *erősítő rendszerek* meghajtó oszcillátoraként, vagy *3D biológiai képalkotó eljárások*, például az *optikai koherencia tomográfia (OCT)* fényforrásaként.

A mindennapi orvosi diagnosztika, a gyógyítás ma már szinte elképzelhetetlen a korszerű háromdimenziós (3D) képalkotó eljárások alkalmazása nélkül, gondoljunk például a számítógépes röntgentomográfiára (CT), vagy akár a korszerű ultrahangos vizsgálatokra. A lézereket és a különböző optikai képalkotási módszereket, például a fent említett optikai koherens tomográfiát (OCT) – a fény hullámhosszából és az orvosi, biológiai minták elnyelési tulajdonságaiból adódóan – elsősorban közvetlen felületi vizsgálatokra (például bőr, retina), testüregek endoszkópos vizsgálatára (például nyelőcső, gyomor, belek és erek) vagy különböző szövetmetszetek vizsgálatára használhatjuk. Rendkívül jelentősek azok a különböző mikroszkópiai módszerek, melyek a fény hullámhosszának nagyságrendjébe eső felbontással adnak képet a vizsgált biológiai objektumokról.

A korábban említettekén túl a femtoszekundumos lézerek fontos további alkalmazása a *2-foton abszorpciós fluoreszcencia mikroszkópia* (Denk et al., 1990), amelynek segítségével szubmikronos felbontású 3D képeket lehet készíteni – többek között – élő biológiai szövetekről (például az agyban lévő idegsejtek hálózatáról). Jelenleg az MTA Kísérleti Orvostudományi Kutató Intézetben munkatársaimmal közösen egy nagy felbontású, pásztázó kétfotonmikroszkóp továbbfejlesztésén dolgozunk (Rózsa et al., 2005). Az általunk vizsgált kétfoton-mikroszkópiában az egyes fényimpulzusok nagy intenzitásával együtt járó nemlineáris hatást, az alkalmazott indikátorfestékekben kétfoton-abszorpció révén létrejövő fluoreszcencia-jelet használjuk a mikron alatti térbeli felbontású 3D képek előállítására.

Az R&D Ultrafast Lasers Kft. *FemtoRose 100 TUN* Ti-zafír lézerét olyan alkalmazásokhoz fejlesztettük ki, ahol hangolható, 80-150



3. ábra • A 2. ábrán látható lézer tipikus mért spektruma (a) és másodrendű interferometrikus autokorrelációs függvénye (b)

fs-os lézerimpulzusokra van szükség, mint például a kétfoton-mikroszkópiában, ahol az egyes festékek kétfotonos, specifikus gerjesztéséhez szükséges a lézer működési hullámhosszának megfelelő beállítás. Ebben az elrendezésben a kb. 25 mm hosszú lézerkristály anyagi diszperzióját egy nagy diszperziójú SF10-es prizmapárral kompenzáljuk. A lézer hangolásához egyelemű kettőtörő szűrőt használunk, amellyel a lézer fs-os impulzusai a tipikusan a 720–920 nm-es hullámhossztartományban hangolhatóak; e tartományban a legtöbb indikátorfesték kétfotonosan gerjeszthető. Magyarországon többek között *FemtoRose 100TUN* típusú lézeroszillátor biztosítja a hangolható femtoszekundumos fényimpulzusokat az MTA SZFKI Lézerfizikai és Lézerspektroszkópia Laboratóriumában femtokémiai és nemlineáris optikai, az MTA KOKI Gyógyszerkutató Osztályán kétfoton-mikroszkópiái alkalmazásokhoz, valamint az MTA Szegedi Biológiai Kutatóközpont Biofizika Intézetében femtoszekundumos pumpa-próba mérésekhez és Pécsi Tudományegyetem Általános Orvosi Kar Biofizikai Intézetében fluoreszcencia élettartammérésekhez. Mint a felsorolásból kitűnik, a lézer a kétfoton-mikroszkópiái alkalmazások mellett jól alkalmazható *időfelbontásos lézerspektroszkópiái vizsgálatokhoz* is.

A hangolható, femtoszekundumos lézerek segítségével nagyon gyors, a fs-os időskálán lejátszódó fizikai, kémiai vagy biológiai

folyamatokat vizsgálhatunk lézerspektroszkópiái módszerekkel. A téma jelentőségét jelzi, hogy 1999-ben a kémiai Nobel-díjat Ahmed H. Zewail kapta a *femtokémia* területén végzett munkásságáért. Ő olyan, ún. pumpa-próba mérési eljárást fejlesztett ki, mellyel a femtoszekundumos időskálán követhető a kémiai, biológiai reakciók időbeli lefolyása.

Az eltelt néhány évben mi is hasonló pumpa-próba mérőrendszer fejlesztésén dolgoztunk, melyben gerjesztő (pumpa) jelként fs-os Ti-zafir lézerünk (UV vagy kék) másodharmonikus impulzusait használjuk, míg próbaimpulzusként az infravörös tartományban működő, hangolható femtoszekundumos optikai parametrikus oszcillátorok (IR fs OPO) – zöld, sárga vagy piros – másodharmonikus impulzusait használjuk. Ezek az IR OPO-k az ún. kvázi-fázisillesztéses technikán alapulnak, és például az MTA SZFKI, a PTE és az R&D Ultrafast Lasers Kft. által közösen fejlesztett PPLN (periodically poled lithium niobate) frekvenciakonvertáló eszközöket tartalmaznak nemlineáris elemként (Pálfalvi et al., 2004). A PPLN minták előnyös tulajdonsága, hogy az IR OPO működési hullámhossza a PPLN minták periódusának megfelelő beállításával (kvázi-fázisillesztés) megválasztható, míg a korábban alkalmazott KTP kristály esetén (Hebling et al., 1995) ez csak a pumpáló

lézer hullámhosszának megváltoztatásával volt lehetséges. APPLN-t tartalmazó IROPO-ktovábbi előnyös tulajdonsága nagyobb konverziós hatásfokuk is.

Tapasztalatom szerint a femtoszekundumos lézereken alapuló mérési technikák elterjedésének két fő gyakorlati korlátja van: az egyik a femtoszekundumos lézerek jelenleg még viszonylag magas ára; a másik, hogy az említett rendszerek kezelése viszonylag bonyolult, többnyire lézerfizikus alapismeretek meglétét feltételezi. Ezért az utóbbi időben jelentős erőfeszítéseket teszünk fs-os lézerrendszereink árának jelentős csökkentése és a rendszerek kompakttá tétele érdekében (Császár et al., 2005). Ehhez a munkánkhoz reményeink szerint megfelelő anyagi háttérrel biztosít majd 2006-tól a kutatási konzorciumunk által a napokban elnyert *Femtobiológia* című, NKFP1-00007/2005

számú pályázatunk. Befejezésül a teljesség igénye nélkül megemlítem azokat a kollégáimat, akik a fent hivatkozott lézer-, illetve mikroszkóprendszerek fejlesztésében az utóbbi években részt vettek: *Császár Balázs, Katona Gergely, Kőházi-Kis Ambrus, Lukács András, Szipócs Ferenc (mind R&D Ultrafast Lasers Kft.), Bogár István (Optometal Kft.), Groma Géza, Makai András (MTA SZBK), Hebling János (Pécsi Tudományegyetem TTK), Fekete Júlia, Bányász Ákos (MTA SZFKI), Rózsa Balázs és Vizi E. Szilveszter (MTA KOKI).*

Kulcsszavak: *femtoszekundumos lézerek, femtoszekundumos pumpa-próba mérések, fáziskorrigáló dielektrikum tükrök, optikai parametrikus oszcillátorok, pásztázó két-foton-abszorpciós fluoreszcencia-mikroszkópia*

#### IRODALOM

- Baltuska, A. – Wie, Z. – Pshenichnikov, M. S. – Wiersma, D. A. – Szipócs R. (1997): *Applied Physics*. **65**, 175–188.
- Bor Zs. – Rácz B. (1985): *Optics Communication*. **54**, 165–170.
- Császár B. – Kőházi-Kis A. – Szipócs R. (2005): in *Advanced Solid State Photonics Conference*, Vienna, Austria, 6-9 February 2005, Paper WB17 (ISBN 1-55752-781-4)
- Denk, W. – Strickler, J.H. – Webb, W.W. (1990): *Science*. **248**, 73–76.
- Hebling, J. – Mayer, J. – Kuhl, J. – Szipócs R. (1995): *Optics Letters*. **20**, 919–921.
- Kovács A. P. – Osvay K. – Bor Zs. – Szipócs R. (1995): *Optics Letters*. **20**, 788–790.
- Moulton, P. F. (1986): *Journal of the Optical Society of America*. **B3** 125.
- Pálfalvi L. – Hebling J. – Almási G. – Péter Á. – Polgár K. – Lengyel K. – Szipócs R. (2004): *Journal of Applied Physics*. **95**, 902–908.
- Rózsa B. – Vizi E. Sz. – Katona G. – Lukács A. – Váralyay Z. – Sággy A. – Valenta L. – Maák P. – Fekete J. – Bányász Á. – Szipócs R. (2005): in *Advanced Solid State Photonics 2005*. Craig Denman (ed.): *Trends in Optics and Photonics Series (TOPS)*. Vol. **98**. Optical Society of America
- Stingl, A. – Spielmann, Ch. – Krausz F. – Szipócs R. (1994): *Optics Letters*. **19**, 204–206.
- Szabó G. – Rácz B. – Müller A. – Nikolaus B. – Bor Zs. (1984): *Applied Physics*. **B34**, 145–147.
- Szipócs R. – Ferencz K. – Spielmann Ch. – Krausz F. (1994): *Optics Letters*. **19**, 201–203.

