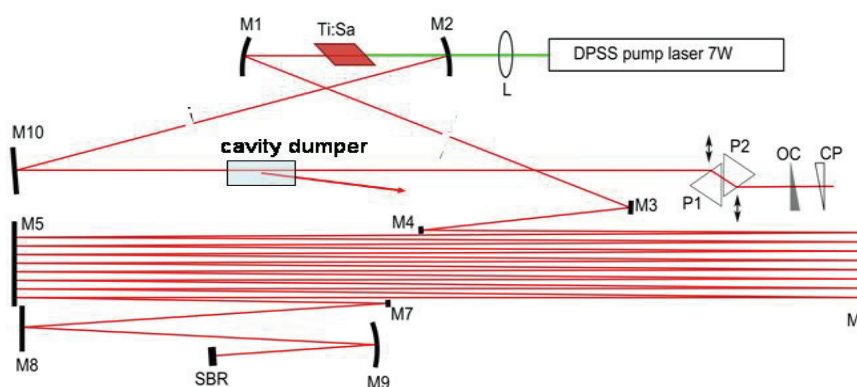


## Zárójelentés az OTKA F60256 sz. pályázat megvalósításáról 2006/02/01-2010/01/31, Vezető kutató: Dombi Péter

### A) Femtoszekundumos lézertechnológiai fejlesztések

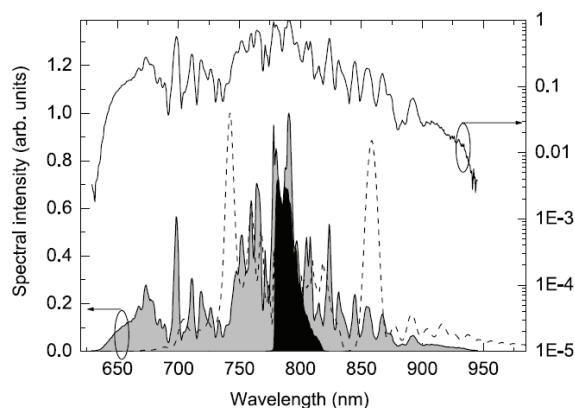
A pályázati támogatás segítségével felépítettem egy ún. hosszú rezonátoros femtoszekundumos Ti:zafir lézeroszillátort, amely 200-500 nJ közötti impulzusenergiájával és 3.6 MHz-es ismétlési frekvenciájával átmenetet képez az oszcillátorok és az erősített lézerrendszerek között (impulzusenergiája két nagyságrenddel nagyobb mint a szokásos Ti:zafir oszcillátoroké). Ezt a lézerrendszert (ld. 1. ábra) aztán mind femtoszekundumos technológiai mind fény-anyag kölcsönhatási, alapkutatói kísérletekhez használtuk (különös tekintettel a felületi plazmosos elektrongyorsításra), összhangban a kutatási tervvel. A femtoszekundumos technológiai fejlesztések ugyan némiképp eltérnek a 2005-ben eredetileg javasolttól, ennek az oka az, hogy ezen a gyorsan fejlődő területen elengedhetetlen az időközbeni fejleményekhez való gyors alkalmazkodás. Az időközben megjelent cikkek és pl. az ún. erősen diszperzív tükrökhöz szinte elsőként való hozzáférés [OE2009/1] olyan lehetőségeket kínáltak, amelyek jól publikálható kísérletek elvégzését tették lehetővé, mégha azok nem is teljesen azonosak az öt évvel ezelőtti kutatási tervben leírtakkal. A döntés helyességét a projekt publikációs listája is igazolja, mely 13 eddig megjelent referált nemzetközi folyóiratcikket tartalmaz 34,8 összesített impakt faktoral.



**1. ábra** A megépített hosszú rezonátoros Ti:zafir oszcillátor. M1-M10: multiréteg (részben ún. csörpölt) tükrök, OC: kicsatolótükör, CP: kompenzálólemez, SBR: telítődő Bragg-reflektor.

A femtoszekundumos technológiai kísérletek közül először is megvizsgáltam az ilyen hosszú rezonátoros oszcillátorok tervezésekor felhasználható alapvető skálázási összefüggéseket a rezonátorarchitektúra különböző paraméterei (rezonátorhossz, nettó diszperzió stb.) és az elérhető impulzushossz illetve impulzusenergia között, és ezeket kísérletileg is igazoltam [LPL]. Majd kísérleteket végeztünk 150 nJ-os, 40 fs-os lézerimpulzusok spektrális kiszélesítésével kapcsolatban és javaslatot tettem az ún. csörpölt impulzusos superkontinuum-keltésre, amit kísérletileg is demonstráltunk (2. ábra). Itt 40 fs-os transzformációlimitű, 150 nJ-os lézerimpulzusokból sikerült egy egyszerű 5.2  $\mu\text{m}$  magátmérőjű és 780 nm levágási hullámhosszal rendelkező egymódusú optikai szálban nagyenergiás superkontinuumot keltetni a szál roncsolása nélkül, amit a bemenő impulzusok

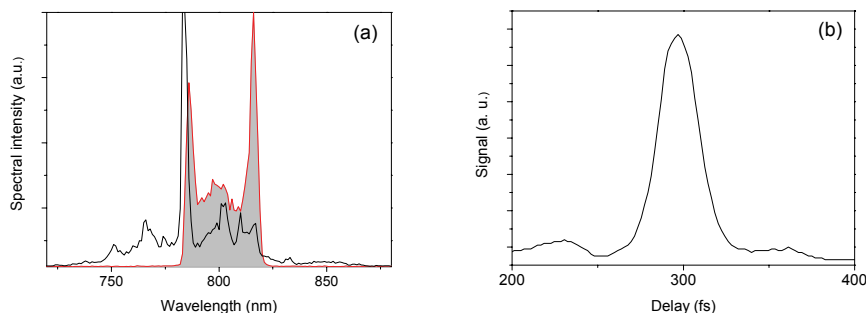
csőrpölésével értünk el [APB]. A módszer új utat nyit az ilyen oszcillátorok impulzusainak további kompressziójához (ld. alább) illetve ultragyors spektroszkópiai alkalmazásokhoz.



**2. ábra** Hosszú rezonátoros oszcillátor spektruma (fekete terület), egymódusú szálban előállított nagyenergiás szuperkontinuum mért (szürke) illetve számolt (szaggatott vonal) spektruma. A mért spektrumot logaritmus skálán is ábrázoltam (folytonos fekete).  
Forrás: [APB]

Elsőként teszteltük továbbá ún. erősen diszperzív tükrök Ti:zafír lézerezőoszillátorbeli alkalmazhatóságát. Ezek a tükrök a hagyományos fáziskorrigáló (csőrpölt) tükrökhöz képest 1-2 nagyságrenddel nagyobb diszperziót tudnak biztosítani ( $-1500 \text{ fs}^2$ -ig). A gyártásuk után nem sokkal néhány mintapéldányon tesztelni is tudtuk ezen tükrök rezonátoron belüli használhatóságát és megmutattuk, hogy ilyenekkel kompakt módon lehet nagy, rezonátoron belüli anyagmennyiség (pl. egy cavity dumper) diszperzióját kompenzálni [OE2009/1]. A lézerbe ezután egy akusztóoptikus cavity dumpert építettünk be (40%-os hatásfokkal), majd ennek segítségével 520 nJ-os kicsatolt impulzusenergiát értünk el, aminél nagyobb Ti:zafír lézerezőoszillátor esetén csak kb. kétszeres pumpálóteljesítmény mellett tudtak a közelmúltban demonstrálni [Siegel], ami a konstrukció nemzetközi versenyképességét is mutatja. Ennek az eredménynek a publikálása folyamatban van.

Mivel az ilyen oszcillátorok spektrális sávzélessége különböző okok miatt limitált (diszperziókompenzáció korlátai, a telítődő abszorber sávzélessége stb.), ezért rezonátoron kívüli spektrális kiszélesítési és impulzuskompressziós kísérleteket is végeztünk. Mivel az elérhető több száz nJ-os impulzusenergia a szokásos oszcillátorok illetve erősítők impulzusenergiája között helyezkedik el, így sem az oszcillátoroknál alkalmazott egymódusú optikai szálak, sem az erősítőknél megszokott, kapillárisban történő impulzuskompresszió nem jöhet szóba. Ezért a választásom az ún. nagy módusfelületű fotonikus optikai szálban történő kompresszió vizsgálatára esett, melyekben nagy magátmérő (10-50  $\mu\text{m}$ ) mellett is egymódusú viselkedést és kellő nemlinearitást lehet elérni, így egy skálázható impulzuskompressziós módszer alapjául szolgálhatnak. Az ilyen irányú kísérletek biztató első eredményeit a 3. ábrán mutatom be, további kísérletek után pedig ez is egy jól hasznosítható módszer demonstrálását és jól publikálható eredményeket ígér.

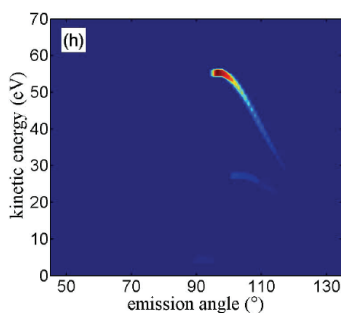


**3. ábra** (a) Nagy módusfelületű fotonikus optikai szálba bemenő (vörös) és abban kiszélesített spektrum (fekete) illetve (b) a  $\sim 80$  fs-ről 17fs-ra összenyomott impulzusok mért háttérmentes autokorrelációs függvénye.

Az oszcillátornak a kutatási tervben említett vivő-burkoló fázisstabilizálását nem valósítottam meg részben a szükséges anyagi erőforrások hiánya miatt (pl. ÁFA visszaigénylési lehetőség időközbeni megszűnése), részben pedig mert a kapcsolódó kísérleteket a garchingi Max Planck Kvantumoptikai Intézetben illetve a Bécsi Műszaki Egyetemen számomra biztosított lézerekkel optimálisan el tudtam végezni (ld. következő fejezet).

### **B) Felületi plazmontérben lejárszódó jelenségek vizsgálata kevés optikai ciklusból álló (few-cycle) lézerpulzusokkal**

A pályázati támogatás segítségével, a kutatási tervvel összhangban numerikus és kísérleti vizsgálatokat végeztem a felületi plazmonos elektrongyorsítással kapcsolatban. Első lépésként, egy kanadai csoporttal együttműködésben numerikus, végeselemes módszerekkel megvizsgáltuk a felületi plazmonos elektrongyorsítási folyamatot kevés optikai ciklusból álló gerjesztő lézerpulzusok esetén, melynek eredményeit a Physical Review Lettersben publikáltunk [PRL]. Később megalkottam a felületi plazmonos elektrongyorsítás egyszerűsített, háromlépéses modelljét, amit Rácz Péter diplomamunkás segítségével a folyamat numerikus vizsgálatához használtunk fel, melynek során javaslatot tettünk ultragyors, monoenergiás elektronforrás létrehozására (4. ábra). Az ebből született Optics Express cikkről [OE2008] a Nature Photonics „Research Highlights” rovatában is jelent meg összefoglaló [NP]. Ezen túlmenően, publikáltuk az újfajta, egyszerűsített modell és számolás részleteit, ahol a folyamat attosekundumos dinamikájával kapcsolatos megállapításokat is tettünk [LPB]. Ebben a témakörben összefoglaló cikket írtam a jelenséggel kapcsolatos eddigi vizsgálatokról is [AIEP].

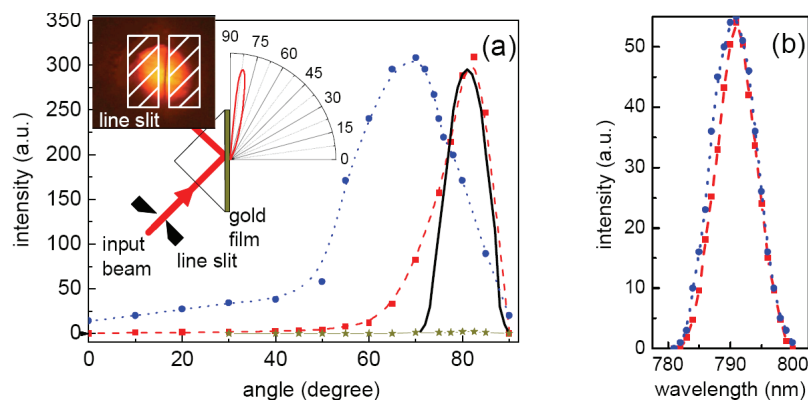


**4. ábra** Felületi plazmonos elektrongyorsítás esetén az elektronnaláb 5 fs-os, lézerpulzusokkal elérhető, számolt szög- és spektrális eloszlása  $5.8 \times 10^8$  V/cm maximális plazmontérfősség és 600 attosekundumos alagutazási időtartam esetén. Forrás: [OE2008/1]

A numerikus vizsgálatokon túl felépítettem egy hordozható, kompakt, retardáló potenciál elven alapuló elektronspektrométert (5. ábra), amivel a garchingi Max Planck Kvantumoptikai Intézetben illetve a Bécsi Műszaki Egyetemen rendelkezésre álló, kevés optikai ciklusú (5-7 fs-os), vivő-burkoló-fázisstabilizált lézerimpulzusokkal megvizsgáltuk a folyamat tulajdonságait. Az eredményeinknek köszönhetően kimutathatóvá vált i) kevés optikai ciklusból álló felületi plazmonok keltése 6,5 fs körüli időtartammal, ii) keV-ig terjedő elektrongyorsítás lehetősége ilyen extrém rövid keltőimpulzusok esetén is illetve iii) megfigyeltük az elektronemisszió sokfotonos-tunnel átmenetét szokatlanul alacsony lézertérerőségek esetén. Ez utóbbi oka a plazmontér többszörösére erősödése a lézertérhez képest, ami egy ismert jelenség, viszont ebben a konkrét konfigurációban tudomásom szerint eddig még senki sem mutatta ki. Az i)-iii) eredményekből cikket írtunk, amelynek bírálata jelenleg is folyamatban van. Ezen túlmenően, méréseket végeztünk vivő-burkoló fázisstabilizált impulzusokkal is és megállapítottuk, hogy az elektronspektrumok nem érzékenyek az optikai hullámformára. Ez utóbbi meglepő eredmény megfelelő interpretációjához további mérések szükségesek atomi szinten sík felületekkel illetve ultranagy vákuum alatt tartott mintákkal, melyeket a közeljövőben tervezünk, az eddigi eredmények publikálása pedig folyamatban van (bírálat alatt) [B2010].

### C) Egyéb kutatások femto- és attoszekundumos fizika témakörben

A megépített lézerrel különböző vizsgálatokat végeztünk el nemlineáris plazmonikai jelenségekkel kapcsolatban is. Itt kimutattuk, hogy a felületi plazmonok által kiszórt fény szögeloszlása jelentősen függ a gerjesztő lézertér intenzitásától (5. ábra) illetve hogy nagy intenzitások esetén másodharmonikus illetve kontinuumkeltési folyamatok is lejátszódnak a plazmontérben [JMO2008, OE2008/2]. Ezeknek a folyamatoknak a megfelelő interpretációjához és értelmezéséhez további elméleti/modelllezési munka szükséges.



**5. ábra** Nemlineáris plazmonikus jelenségek vizsgálata: (a) A kísérleti elrendezés sémája illetve a felületi plazmonok által kiszórt fény spektruma 120 fs-os, p-polarizált gerjesztő impulzusok esetén („input beam”). A csúcshintenzitás  $2 \times 10^{10}$  W/cm<sup>2</sup> (kék körök illetve pontozott vonal) illetve  $5 \times 10^{11}$  W/cm<sup>2</sup> volt (piros négyzetek illetve szaggatott vonal). Szintén ábrázoltuk az s-polarizált gerjesztő fény esetén mérhető eloszlást (csillagok) illetve az elméleti görbét (fekete vonal). (b) A felületi plazmonok által kiszórt fény spektrum a két fent említett csúcshintenzitás esetén. Forrás: [OE2008/2].

Mindezekon túlmenően további eredményeket értünk el XUV spektrális tartományba eső impulzusokkal történő koherens kontroll vizsgálatával kapcsolatban [CEJP] illetve tudomásom szerint elsőként javaslatot tettünk arra, hogy hogyan lehet fókuszált ultrarövid lézerimpulzusok vivő-burkoló fázisát a fókusz közelében történő terjedés során a Rayleigh-hosszal összemérhető tartományban stabilizálni [OE2009/2]. Ez utóbbinak jelentős alkalmazásai lehetnek attoszekundumos impulzusok keltésénél is, ahol az infravörös tér

fókuszbeli fázislefutásának változtatásával a keltett magasrendű harmonikusokra jobb fázisillesztési feltételek érhetők el ezzel a konfigurációval. Javaslatot tettünk továbbá attoszekundumos impulzusok előállítására is infravörös és THz-es tér egyidejű jelenlétében [CLEO].

## Összefoglalás

A fentieket összefoglalva, az eredeti kutatási terv fő irányainak megfelelően, azokat az időközben történt tudományos fejleményekhez igazítva sikeresen megvalósítottam az OTKA támogatásával indított projektet, melynek eredményeképpen felépítettem Budapesten egy korszerű femtoszekundumos és ultragyors fény-anyag kölcsönhatási laboratóriumot, melyben 2008/2009 óta egy doktorandusszal és egy posztdoktori kutatóval dolgozom együtt. Témavezetője voltam/vagyok két befejezett (Antal Péter, Rác Péter, BME) és két megkezdett diplomamunkának (Bódi Balázs, BME és Philipp Heck, Rhein Ahr Campus, B.Sc.) és egy doktorandusznak (Rác Péter, BME). A kutatással kapcsolatban eddig referált nemzetközi folyóiratban 13 publikáció jelent eddig meg 34,8-es összesített impakt faktorial. Emellett 3 ismeretterjesztő cikket és egy könyvfejezetet is írtam, 4 meghívott előadást tartottam nemzetközi konferenciákon, valamint 3 félévben speciális kurzust tartottam a témakörben a Budapesti Műszaki Egyetemen és a Szegedi Tudományegyetemen.

## Hivatkozások

[AIEP] **P. Dombi**, "Surface plasmon-enhanced photoemission and electron acceleration with ultrashort laser pulses", Adv. Imaging and Electron Phys. 158, 1-26 (2009).

[APB] **P. Dombi**, P. Antal, J. Fekete, R. Szipöcs, Z. Várallyay "Chirped-pulse supercontinuum generation with a long-cavity Ti:sapphire oscillator", Appl. Phys. B, 88, 379 (2007).

[B2010] **P. Dombi**, S. E. Irvine, P. Rác, M. Lenner, N. Kroó, G. Farkas, A. Mitrofanov, A. Baltuska, T. Fuji, F. Krausz, A. Y. Elezzabi, „Few-cycle, strong-field plasmonics,” közlésre benyújtva, bírálólat alatt (2010).

[CEJP] I. F. Barna and **P. Dombi**, "Coherent control for the spherical symmetric box potential in short and intensive XUV laser fields", Centr. Eur. J. Phys. 6, 205 (2008).

[CLEO] K. Varjú, J. A. Fülöp, **P. Dombi**, G. Farkas, J. Hebling, „Attosecond Pulse Generation in Noble Gases in the Presence of Extreme High Intensity THz Pulses” CLEO/QELS Conference, San José, USA, paper number JThE120 (2010).

[JMO2006] **P. Dombi**, F. Krausz, Gy. Farkas, "Ultrafast dynamics and carrier-envelope phase sensitivity of multiphoton photoemission from metals", J. Mod. Opt. 53, 163 (2006).

[JMO2008] N. Kroó, S. Varró, G. Farkas, **P. Dombi**, D. Oszetzky, A. Nagy, A. Czitrovsky, "Nonlinear plasmonics," J. Mod. Opt. 55, 3203 (2008).

[JMO2010] S. Varró, N. Kroó, G. Farkas, **P. Dombi**, „Spontaneous emission of radiation by metallic electrons in the presence of electromagnetic fields of surface plasmon oscillations”, J. Mod. Opt. 57, 80-90 (2010).

[LPB] **P. Dombi**, P. Rác, B. Bódi, "Surface plasmon-enhanced electron acceleration with few-cycle laser pulses", Laser and Particle Beams 27, 291-296 (2009).

[LPL] **P. Dombi** and P. Antal, "Investigation of a 200-nJ chirped-pulse Ti:Sapphire oscillator for white light generation", Laser Phys. Lett. 4, 538 (2007).

[NP] "Research Highlights", Nature Photonics, vol. 2, 206-207 (2008).

[OE2008/1] **P. Dombi** and P. Rácz, "Ultrafast monoenergetic electron source by optical waveform control of surface plasmons", *Optics Express* 16, 2887 (2008).

[OE2008/2] N. Kroó, G. Farkas, **P. Dombi**, S. Varró, "Nonlinear processes induced by the enhanced, evanescent field of surface plasmons excited by femtosecond laser pulses", *Optics Express* 16, 21656 (2008).

[OE2009/1] **P. Dombi**, P. Rácz, M. Lenner, V. Pervak, F. Krausz "Dispersion management of femtosecond laser oscillators with highly dispersive mirrors", *Opt. Express* 17, 20598-20604 (2009).

[OE2009/2] M. A. Porras, **P. Dombi**, "Freezing the carrier-envelope phase of few-cycle light pulses about a focus", *Opt. Express* 17, 19424-19434 (2009).

[PRL] S. E. Irvine, **P. Dombi**, Gy. Farkas, A. Y. Elezzabi, "Influence of Carrier-Envelope Phase of Few-Cycle Pulses on Surface-Plasmon-Ponderomotive Electron Interaction", *Phys. Rev. Lett.* 97, 146801 (2006).

[Siegel] M. Siegel et al., *Opt. Lett.* 34, 740-742 (2009).