

LÉZERFEJLESZTÉSEK ÉS ALKALMAZÁSOK A KFKI-BAN ÉS ANNAK UTÓDINTÉZETEIBEN

Czitrovsky Aladár[®], Veres Miklós, Nagy Attila Tibor
HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest
[®]E-mail: czitrovsky.aladar@wigner.hun-ren.hu

Előzmények

A Központi Fizikai Kutatóintézet 1950-es megalakulása után az optikai kutatások fejlődését serkentette, hogy 1959-ben a KFKI-ban megalakult az Optikai Osztály, amely optikai mérés technikai csoportból, fény-anyag kölcsönhatást, koherenciát és fluktuációkat tanulmányozó részlegekből, valamint spektroszkópiai csoportból állt. Nem véletlen, hogy az első hazai lézer – egy hélium-neon (He-Ne) gázlézer – 1963-ban, kb. három évvel a világ első lézerének megalkotása után, a KFKI-ban készült el. Ehhez rendelkezésre állt egy jól felkészült optikai és spektroszkópiai csapat (*Bakos József, Csillag László, Farkas Győző, Jánossy Mihály, Kántor Károly, Náray Zsolt, Salamon Tamás, Varga Péter*), egy univerzális üvegtechnikai és vákuumtechnikai laboratórium (*Sárközi Elek*) és egy elektronikai csoport (*Pálmai Imre*). Ezeket egészítette ki egy jól felszerelt gépészeti és mechanikai műhely, amelynek *Tóth József* volt az „aranykezü” műszerésze. Az első lézerek kifejlesztése és megépítése után az intézetben, majd annak jogutódaiban szerteágazó kutatómunka folyt és folyik az elméleti és alkalmazott optika, a spektroszkópia, a kvantumoptika és a lézeral alkalmazások területén.

A jelen írás ezekről kíván egy rövid áttekintést adni, felvázolva néhány jelentősebb eredményt és eseményt, amelyek ma már tudománytörténeti mérföldkövek lehetnek a természettudományok hazai fejlődésében. Egyes dokumentumok felkutatásán és rendszerezésén kívül a cikk megírásában az is segített, hogy az egyik szerzőnek lehetősége volt a hetvenes évektől napjainkig együtt dolgozni a kutatásokban, fejlesztésekben és felfedezésekben fontos szerepet játszó kollégákkal. Ők céltudatos, gyakran megszállott munkájukkal hozzájárultak ahhoz, hogy az intézmény, amely már az V. EU-keretprogramban elnyerte a Centre of Excellence of EU címet, jelenleg a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont egyik kutató-

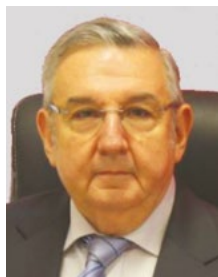
intézeteként nemzetközileg ismert és elismert, élvonalbeli kutatóműhellyé váljon. Mivel a területi korlátok miatt nem tudunk kitérni minden új eredményre, itt csak röviden foglaljuk össze a fontosabb mérföldköveket az első lézerek megépítésétől, azok egyes alkalmazásán keresztül a jelenleg is folyó kvantumoptikai és lézerfizikai kutatásokig és különböző alkalmazásokig. Megjegyezzük, hogy a *Domokos Péter* által vezetett kvantumoptikai kutatásokról kevesebb szó esik, mivel azokról részletes cikkeket olvashattunk a *Fizikai Szemle* áprilisi tematikus számában.

Koherens fényforrások kutatása és fejlesztése

A KFKI-ban az egyik első, optikával kapcsolatos tudományos kérdés az 50-es évek elején arra irányult, hogy a fényt leíró, egyrészt az elektromágneses mező hullámainak fogalmával, másrészt a fotonokkal operáló elmélet nem valamilyen, csak nagy fotonszámok esetén érvényes átlagot ír-e le (statisztikailag írja le a jelenségeket, és azok csak nagy számoknál érvényesek). *Jánossy Lajos* először 1952-ben kezdeményezte, hogy az erre irányuló gondolat kísérleteket valósítsák meg, ezt követték azok a kutatások, amelyek kis fényáramoknál és nagy fényintenzitásoknál vizsgálták az interferenciát és a koincidienciát.



Veres Miklós, fizikai tudományok, DSc. A HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Szilárdtestfizikai és Optikai Intézetének tudományos tanácsadója. Fő kutatási területei a szén alapú nanokompozitok, nanogyémánt, amorf szén, kalkogenidok és más nanoszerkezetek előállítása és tulajdonságainak vizsgálata, valamint az optikai spektroszkópia, ezen belül is a Raman-spektroszkópia, a felületerősített Raman-szórás és a stimulált Raman-spektroszkópia.



Czitrovsky Aladár, kísérleti fizikus, DSc. A Wigner Fizikai Kutatóközpont Szilárdtestfizikai és Optikai Intézetének nyugalmazott igazgatója, professzor emeritusa, a Mémőkakadémia tagja. A KFKI-ban 1978-ban kezdte kutatói tevékenységét. Szakterülete az alkalmazott és nemlineáris optika (akusztóoptika, elektrooptika), lézerfizika és lézeral alkalmazások, az aeroszolok optikai mérés technikája, környezetvédelmi és légkörfizikai jelenségek tanulmányozása. Foglalkozott fotonstatistikával, a fény nemklasszikus állapotaival (squeezing, entanglement), optoelektronikai műszerfejlesztéssel, több mint 223 tudományos publikáció társszerzője, 13 szabadalmat hasznosult.



Nagy Attila Tibor, kísérleti fizikus, DSc. A HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Szilárdtestfizikai és Optikai Intézetének tudományos tanácsadója. Fő kutatási területe a lézerek optikai mérés technika, a fényszórás elméleti és kísérleti tanulmányozása, gyakorlati alkalmazása az aeroszolok vizsgálatára, környezetvédelmi kutatások a légkör szennyezettségének meghatározására, szoftveres és hardveres műszerfejlesztés.

Az interferenciakísérletet *Náray Zsolt*, a koincidenziakísérletet *Ádám András* és *Varga Péter* végezte el. Az előbbinél két különböző tükrőtávolságot használtak egy Michelson-interferométerben, és vizsgálták, hogy nagy és kis fotonmennyiségek esetén található-e különbség az interferenciaképekben. Nagy energiáknál egy időpillanatban jóval több mint egy foton energiájának megfelelő fotonszám volt az interferométeren belül, kis energiáknál pedig jóval kevesebb volt az energia átlagértéke, mint egy foton energiája. A mérések azt mutatták, hogy az eredmény egyik kísérletsorozatban sem függött az energia átlagától.

A koincidenziakísérlet eredménye, amelyet egy féligáteresztő tükrön végeztek el, szintén negatív volt. Pontosabban – mivel egy fizikai mennyiség nemlétét nem lehet kimutatni – a konklúzió az lett, hogy annak a valószínűsége, hogy a két fotonszámoló egyidejűleg megszólaljon, a hibahatáron belüli hat ezrelék alatti.

A két kísérlet bebizonyította az elmélet várakozását, hogy a fény mindkét reprezentáció esetén ugyanúgy viselkedik kis energiáknál, mint nagyoknál és itt is létezik a kettősség (ezt egyesek úgy interpretálták, hogy a foton önmagával is tud interferálni).

Az első hazai lézert – egy He-Ne gázlézert – 1963-ban, kb. három évvel a világ első lézerének megalkotása után *Bakos József*, *Csillag László*, *Kántor Károly* és *Varga Péter* építette meg a KFKI-ban [1]. Ez annyiban jelentett előrelépést *Ali Javan* lézéréhez képest, hogy a tükrök a vákuumrendszeren kívülre kerültek. A másik különbség, hogy a tükrök anyaga nem dielektrikum, hanem ezüst-réteg volt, ezért a lézer több hullámhosszon is működött – 1,15, 2,39 és 3,39 mikrométeren. A kilépő teljesítmény az először detektált 1,15 μm -es vonal esetében 2,5 mW volt.

A következő évben (1964) ugyanitt készült el az első hazai rubinlézert (*Farkas Győző*, *Náray Zsolt* és *Varga Péter*), 1965-ben pedig a látható hullámhosszon – 0,63 mikronon – működő He-Ne lézert (*Bakos József*, *Csillag László*, *Kántor Károly* és *Salamon Tamás*) [2]. 1970-ben megépült az első He-Cd⁺ lézert (*Csillag László*, *Jánossy Mihály*, *Kántor Károly*, *Rózsa Károly*), 1972-ben pedig az első hazai Nd-YAG lézert (*Czigány Imre* és *Kertész Iván*) [2].

Jelentős előrelépés volt az első elosztott visszacsatolású (DFB) festéklézer megépítése 1974-ben (*Bakos József*, *Füzessy Zoltán*, *Sörlei Zsuzsa* és *Szigeti János*). A festéklézerben oldott szerves festékanyag szolgál lézerműködésként. A festékmolekulák széles abszorpciós és fluoreszcenciaspektrummal rendelkeznek, igen erősen elnyelik a fényt, ugyanakkor jól is fluoreszkálnak. Az alkalmazható festékek száma több százra tehető, melyekkel az egész látható és közeli infravörös tartományt le lehet fedni. Mivel az abszorpciós és fluoreszcenciasávjuk viszonylag széles, egy adott festékoldatot tar-



1. ábra. Az első hazai 633 nm-es He-Ne lézer (balra), hordozható foszfátüveg minilézer (középen) és szemészeti műtétekhez használt hazai impulzusüzemű hordozható szilárdtestlézer (jobbra). A He-Ne lézerek a MOM-nak lettek átadva sorozatgyártásra, a szilárdtestlézereket később a Technoorg Kft. gyártotta

talmazó festéklézer hullámhossza hangolható, ami – a rövid impulzushossz mellett – számos alkalmazásban előnyt jelent.

Ezt követte a világviszonylatban is újdonságnak számító első He-Kr⁺ és He-Cu⁺ üreges katódú lézerek megalkotása. Az újfajta lézerek közül itt épült az első hordozható Nd-foszfátüveg minilézer – a LINDA (1981, *Czigány Imre* és *Kertész Iván*), amely néhány gyufaskatulya méretű volt, és külső hűtés nélkül, telepről is üzemelt (később ezeket a lézereket távcsövekkel összeépítve a 70-es években Ausztriában gyártott optikai távolságmérőkben – angol nevükön range finderekben – alkalmazták) [2].

Több új lézer az 1960-as években megalakult Lézeralkalmazási osztályon hasznosult (például a Nd-YAG lézer, a Nd-foszfátüveg lézer) ipari, orvosi (főleg sebészeti) és mérés-technikai alkalmazásokban. Mivel az intézetben belül nem volt gyártókapacitás, az első prototípusok megépítése után az orvosi és sebészeti alkalmazásokat később a LASRAM Kft. fejlesztette. Az ipari alkalmazások terén a REMIX Rádiótechnikai Vállalattal volt együttműködés (pl. ellenállás-trimmelés lézergravírozással). A lézeres mérés-technika a csepeli Szerszámgépipari Műveknél (SZIM) és a Szerszámgépipari Fejlesztő Intézetnél (SZIMFI) hasznosult – ide készültek az első nagy pontosságú lézeres mérőinterferométerek, amelyekkel golyósorsók menetemelkedésének linearitását lehetett szubmikronos pontossággal hitelesíteni; később ezeket nanotechnológiai célokra is hasznosították.

A Lézerfizikai Osztályon készült az első hazai hologram (*Jánossy Mihály*, *Füzessy Zoltán*), később pedig a világon elsőként *Horváth Zoltán György* által megalkotott glórialezert, amely a *Laser Focus* című folyóirat címlapján is szerepelt [3]. Megjegyezzük, hogy *Horváth Zoltán*nak később a lézerek orvosi alkalmazására irányuló tevékenysége is igen jelentős volt.

A lézerek fejlesztése gyakran összekapcsolódott a spektroszkópiai kutatásokkal, hiszen az alkalmazás szempontjából is fontos volt meghatározni a lézerek hullámhosszát, sávzélességét, hullámhossz-, illetve frekvenciastabilitását. Kezdetben erre saját fejlesztésű interferometrius spektroszkópiai műszereket fejlesztettek, később tértek rá a nagyobb felbontású kalibrált Jobin Yvon-féle pásztázó Fabry–Perot-spektrométerekre, illetve interferométerekre.

A 60-as évek közepétől a fény-anyag kölcsönhatás kutatása a kvantumelektrodinamika (QED) linearitá-

sának kérdéseire irányult, például a foton-elektron kölcsönhatás tanulmányozására alacsonyabb fényintenzitások (akár egyetlen foton) esetén. A QED azonban nagy fényintenzitásoknál előre jelezte az addig ismeretlen nemlineáris jelenségeket is.

Az ilyen jelenségek vizsgálata céljából a KFKI munkatársai (Farkas Győző, Horváth Zoltán György, Kertész Iván, Kőházy-Kis Ambrus, Náray Zsolt, Tóth Csaba, Varga Péter) egyre nagyobb teljesítményű impulzusüzemű szilárdtestlézereket építettek; az első ilyen egy 0,69 mikron hullámhosszon működő „óriás impulzusú” rubinlézer volt, amelynek csúcsteljesítménye elérte az 100 MW-ot. E lézerimpulzusok alkalmazásával tárták fel a világon elsőként a fémek felületén a QED által előrejelzett sokfotonos fotoeffektust.

Nagyobb lézerintenzitások esetén a 10 ns-os impulzusoknál termikus elektronemisszió lépett fel, mely eltakarta a fotoeffektust, ezért olyan módusszinkronizált (mode-locked) rubin- és neodímiumlézereket építettek, melyek jóval rövidebb, 1 ps hosszúságú, GW teljesítményű lézerimpulzusokat generáltak. Ilyen ultrarövid impulzusokat alkalmazva elsőként írták le, hogy a rövid kölcsönhatási idő következtében külön elektron-, illetve ionhőmérséklet lép fel, és elnyomhatóvá válik a termikus emisszió, valamint a megnövekedett intenzitás kimutathatóvá tette az „optikai tunnelemissziót”; ez volt a Keldis-elmélet első igazolása. E kísérleti eredmények lényegében igazolták, hogy az extrém kis intenzitásoknál érvényes egyfotonos perturbációs kölcsönhatás az intenzitás növelésével sokfotonos kölcsönhatásba, majd még további növelés esetén a perturbációs küszöb átlépésével az ún. „optikai tunnelemissziós” kölcsönhatásba megy át.

Ugyanez a kutatócsoport – külföldi kollégákkal együttműködve – elsőként mutatta meg, hogy a módusszinkronizált lézerimpulzusok vonulatából izolált egyetlen hangolható pikoszekundumos impulzust használva a szabad elektronok elektronjai csak egész számú lézerfotont nyelnek el. E kísérlet volt a megalapozója az ún. küszöb feletti ionizáció (above threshold ionization, ATI) jelenségnek, melynél az atomok, illetve fémek fotoelektronjainak kinetikus energiája mindig csak egymást $h\nu$ fotonenergiával követő energiaértékekből álló diszkrét vonalas spektrum alakjában jelenik meg. Ezt fémkatódok esetén elsőként igazolták. Ezen elektronok, valamint szabad elektronok esetére kidolgozták a rönt-

genemisszió, valamint a lézeres elektrongyorsító új elvét.

A Lézerfizikai Osztályon az 1970-es években fontos szerepet kapott a fűtött fémionlézerek kutatása. Ilyen típusú lézere például a kék ($\lambda = 441,6$ nm) fényt sugárzó He-Cd⁺ lézer, amely a gázkisülés pozitív oszloptérrészében működik. Itt a lézerátmenet szelektív gerjesztésének mechanizmusa a He^{m+}Cd → He⁺Cd⁺ Penning-ionizációs folyamat – ahol a He^{m+} metastabil (gerjesztett) állapotú héliumiont jelöl. A szükséges kadmiumgőzkoncentrációt egy, az anód környékén elhelyezkedő, kadmiumot tartalmazó kályha biztosította. A héliumgázzal töltött kisülési csőbe jutva a Cd-atomok az alacsony ionizációs potenciál miatt könnyen ionizálódtak, és a pozitív oszlopú plazmában (azaz a lézer aktív közegében) a katód felé haladva a kisülésben egyetlen fémgőzsűrűséget alakítottak ki.

A 80-as évektől kezdődően a gázlézerkutatások egyik témája az SZFKI-ban az üreges katódú lézerek fejlesztése volt, ahol aktív közegként a ködfénykisülés negatív térrészét használták fel. Az üreges katódokban egymással szemben álló katódfelületek találhatók, és olyan járulékos folyamatok léphetnek fel, amelyek jelentősen módosíthatják a kisülés tulajdonságait. A legfontosabb folyamat a gyors elektronok oszcilláló mozgása a szemben elhelyezkedő katódfelületek között kialakuló potenciálvölgyben, ami az ionizáció nagymértékű növekedéséhez vezet. Ennek tudható be, hogy üreges katódú kisülésekben elsősorban olyan lézerátmeneteket lehet előnyösen működtetni, amelyek gerjesztési mechanizmusában az ionok szerepe meghatározó.

Az üreges katódú lézerek esetében két területen, a nemesgázkeverék-lézereknél és a fémionlézereknél folytak kutatások. Előbbiekre példaként a He-Kr⁺ valamint a He-Ne-Xe⁺ lézerek említhetők. Az üreges katódú fémionlézereket a legtöbb esetben nemesgázionok és fématomok közötti töltéscsere előtti ütközések gerjesztik. Ilyen például a He⁺ + Cu → He + Cu⁺ folyamat, amelynek során a rézatom egy lépésben ionizálódik és gerjesztődik. A fémionlézerek hatékony gerjesztéséhez fontos, hogy az aktív közegben (jelen esetben az üreges katódú kisülésben) nemesgázionok és fématomok nagy sűrűsége álljon elő. A fématomok számottevő koncentrációjának elérésére (tipikusan néhány száz 10¹³ cm⁻³ sűrűsége van szükség) két lehetőség adódik. Az első esetben a már említett pozitív oszlopú fűtött kadmiumion-lézerhez hasonlóan a fémet termális úton, egy oldalkályhából lehet a kisülési térfogatba párologtatni. Fontos előrelépésnek számított, amikor az SZFKI-ban felismerték, hogy az üreges katódú kisülésekben katódporlasztással szobahőmérsékleten is elérhető megfelelő fémgőz-koncentráció (Rózsa Károly és Donkó Zoltán).

Az alapkutatási programok egyik, új tudományágat elindító eredménye



2. ábra. A szilárdtestlézer-laboratórium a 80-as években, benne az első (ma is működő) hazai 120 W-os, folyamatos üzemű szilárdtestlézerral (balra) és a szilárdtestlézer rezonátorral (jobbra). Ennek minden részegysége (a mechanika, az optika és az elektronika) a KFKI-ban készült



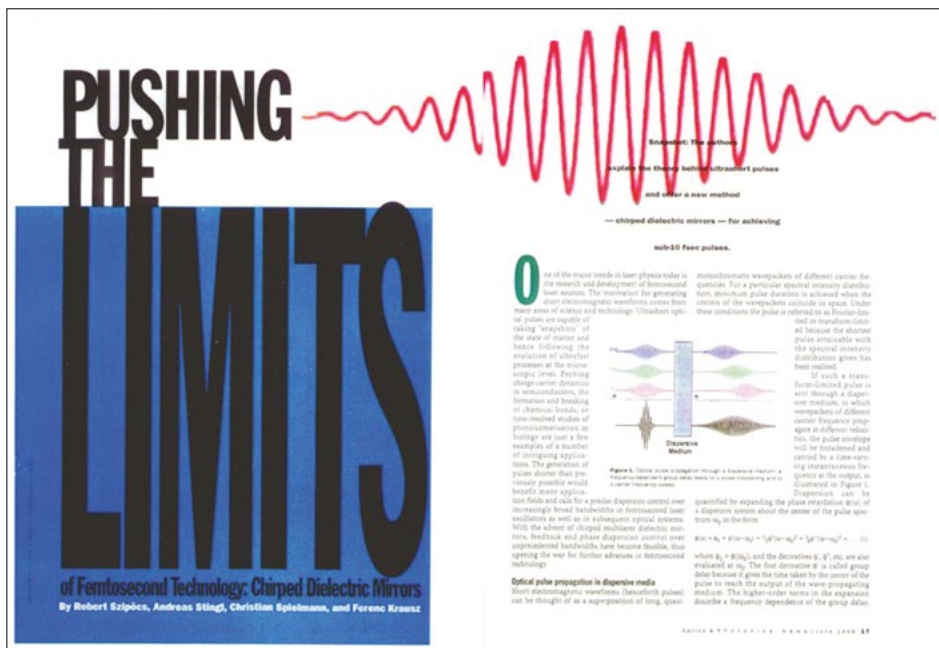
3. ábra. A Balzers párologtató berendezés, amelyen *Ferencz Kárpát*, *Szipőcs Róbert*, *Kőházy-Kis Ambrus* és kollégái kifejlesztették az első csörpölt lézertükröket. A berendezésnél *Kaspari János*né

az attoszekundumos fényimpulzusok ($1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$) keltésének felismerése. (Az ilyen rövid impulzusok időtartamának szemléltetése: a Bohr-modellben az elektron a hidrogénatom Bohr-pályáján 140 attoszekundum alatt tesz meg egy fordulatot, vagyis $1 \text{ as} = 1/140$ Bohr-körülfordulási idő, ami ha a fény terjedését vesszük figyelembe a térben, 0,3 nanométer úthossznak felel meg.) Így az attofizika találkozott a nanofizikával – új kísérleti eszköz

született az atomok belső dinamikájának attoszekundumos időbeli, illetve nanométeres térbeli skálán történő vizsgálatához. Ilyen vizsgálatokat (az Auger-effektus dinamikája, a szabad elektronok dinamikája stb.) a rohamosan fejlődő attofizikai kutatóközpontokban ma már sikeresen és rutinszerűen végeznek. Ezt a kutatási területet később *Krausz Ferencék* vitték sikerre először a Bécsi Műszaki Egyetemen, majd a garchingi Kvantumoptikai Max Planck Intézetben, és ezek alapozták meg *Krausz Ferenc* 2023-as Nobel-díját [4].

Közben az SZFKI-ban – ugyancsak elsőként – egymást $h\nu$ fotonenergiával követő, magasrendű harmonikusok keltését (HHG) írták le fémfelületeken. A fotoeffektus során nyert, rendkívül nagy áramsűrűségű, igen rövid elektronimpulzusokat a hivatkozások szerint a nagy elektrongyorsítók, továbbá a szabadelektronlézerek katódjaiban használják. Ugyancsak fontos eredmény, hogy a fotoeffektust külső elektrosztatikus térben keltve erős UV- és röntgenemissziót lehet detektálni.

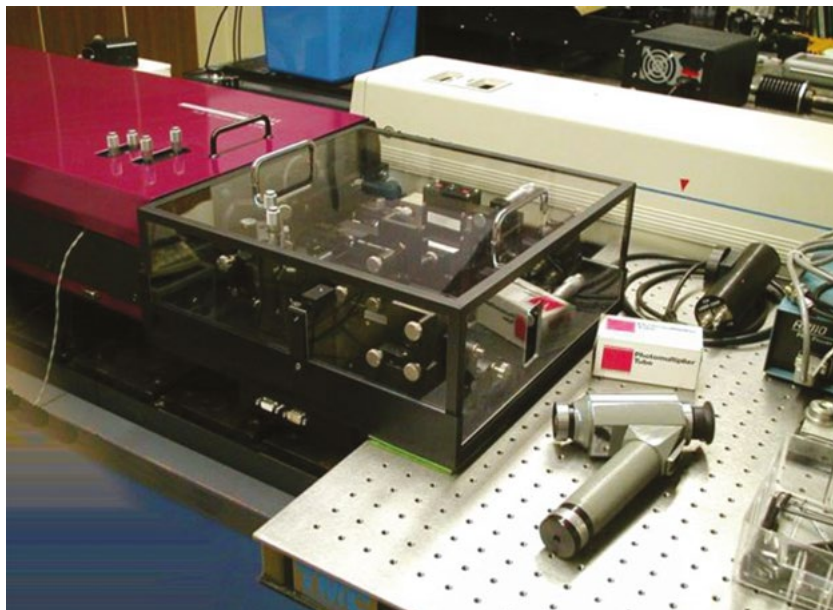
A vékonyréteg-technológia megalapozásában sokat segített az optikai vékonyréteg-laboratórium (*Bakos József* és *Szigeti János*), ahol a magas szintű szakértelem és a jó műszaki háttér lehetővé tették gyakorlatilag bármilyen optikai réteg (lézertükrök, interferenciaszűrők, polarizációs osztótükrök, antireflexiós rétegek, felületi hullámvezetők) előállítását. Ezt a tevékenységet a 70-es években *Lutter András* és *Ferencz Kárpát* folytatta, akik élvonalbeli optikai vékonyréteg-technológiát valósítottak meg az intézetben (*Ferencz Kárpát* alapította meg a ma is prosperáló OPTILAB Kft. spin-off vállalkozást, amely a világ 3 kontinensére exportál egyedülálló termékeket). Itt készült az első rezgőkvarcos rétegvastagság-mérő berendezés. A Lézeralkalmazási Osztályon a 90-es években kezdődött a femtoszekundumos lézerek létrehozása



4. ábra. A csörpölt lézertükrökkel kapott legrövidebb impulzusok és azok alkalmazása több szaklap címlapján is megjelent [6]

és alkalmazása, melyeket az új diszperziókompenzált (csörpölt) lézertükrök megalkotása tett lehetővé. [5] Ezt a témát *Krausz Ferencékkel* együttműködve *Ferencz Kárpáték* és *Szipőcs Róberték* művelték, akik szabadalmaztatták is a csörpölt lézertükröket. Ebben a kutatásban részt vett még *Kőházy-Kis Ambrus* is, aki a Covid következtében 3 éve hagyott itt minket.

A csörpölt lézertükrökkel sikerült 1997-ben kb. 4 femtoszekundumos, világcsúcsot jelentő rövid lézerrimpulzusokat létrehozni (*Szipőcs Róbert*, *Ferencz Kárpát* és *Krausz Ferenc* – az ezzel kapcsolatos publi-

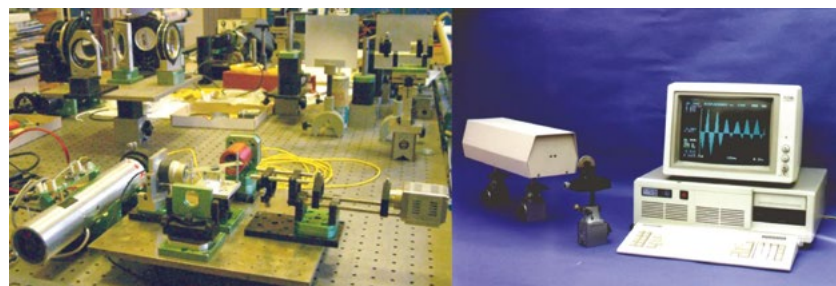


5. ábra. Hangolható 100 fs-os Ti-zafír lézer a pumpa-próba egységgel (Szípcős Róbert)

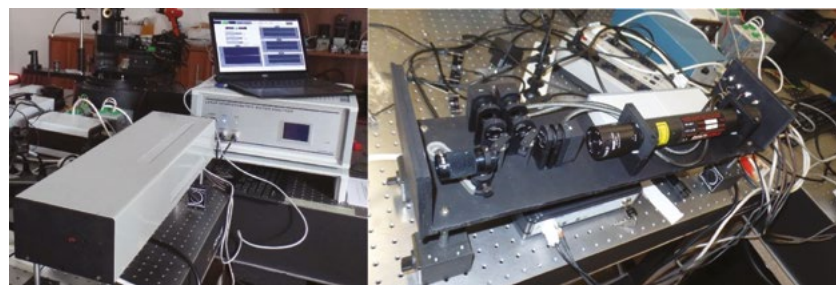
kációk több szaklap címlapjára is felkerültek [6]). Ezek az eredmények is meg vannak említve Krausz Ferenc Nobel-díjának indoklásában.

Az utóbbi években itt fejlesztették ki a genomikában és a klónozási technológiában alkalmazható speciális interferenciaszűrőket, amelyeket génátültetésben is használnak.

A csörpölt tükrökre épülő rövid impulzusú lézerek fejlesztése és gyártása a Szípcős Róbert nevéhez fűződő Lézeralkalmazási Csoporthoz, illetve az általa alapított Ultrafast R&D Kft.-hez fűződik. Ennek eredménye pl. a pumpa-próba mérésekhez is használt, hangolható 100 fs-os Ti-zafír lézer.



6. ábra. A KFKI-ban kifejlesztett, szabadalmaztatott interferometriás spektrumanalizátor laboratóriumi bemérése (balra) és prototípusa (jobbra). A berendezés szubmikronos pontossággal mérte a mechanikai rezgések frekvencia szerinti amplitúdóeloszlását



7. ábra. A lézerinterferometriás mozgásanalizátor (balra) és belső felépítése (jobbra)

A fenti kutatásokat nagyban elősegítette a lézerplazmában lezajló folyamatok modellezése, ahol Donkó Zoltán kutatócsoportjának munkatársai értek el nemzetközileg elismert eredményeket.

A lézerek hasznosítása és egyes lézeralkalmazások

A 60-as években kifejlesztett lézerek hasznosítása és széles körű alkalmazása a 70-es években kezdődött. Ebben nagy előnyt jelentett, hogy az intézetben a mechanikai tervezéstől a vákuum- és üvegtechnikán, az optikai alkatrészek és vékonyrétegek fejlesztésén és gyártásán keresztül az elektronikai egységek építéséig minden rendelkezésre állt. A mérés-

technikai feladatokhoz szükség volt a nagy koherenciahosszal rendelkező gázlézerek frekvenciastabilitására, amely pl. a mérőinterferométereknél volt különösen fontos, mivel ott az elmozdulást és annak időbeli deriváltjait (a sebességet és a gyorsulást, ezeken keresztül a vibrációkat) a hullámhossz alapján határozzuk meg. Ezért a Lézeralkalmazási Osztályon ezek előzményeként stabil gázlézerek fejlesztése kezdődött. A hullámhossz-, illetve frekvenciastabilitást egy ismert hullámhosszú stabilizált lézerrel történő összelebegtetéssel vizsgálták, együttműködve a Mérésügyi Hivatallal, ahol egy Hewlett-Packard típusú etalonlézerrel történt az összemérés.

Először a gázlézerek erősítési görbéjének maximuma körül megjelenő lokális minimumra (angolul „Lamb dip”-re), később a két módus intenzitásának különbségére stabilizált lézerek relatív frekvenciastabilitása elérte a $\Delta\nu/\nu = 10^{-9}$ értéket. Később különböző interferométerek a Miskolci Egyetem számára is készültek, valamint ezeket plazmadiagnosztikára is alkalmazták.

A 80-as években sikeres lézeralkalmazás volt a LIRITA – LézerIonizációs RepülésIdő-TömegAnalizátor (spektrométer) kifejlesztése, amely az AEKI-vel közösen történt. Ebben a berendezésben egy saját fejlesztésű impulzusüzemű Ni:YAG lézer volt az ionizáló fényforrás, amely az analizálandó minta felületét meglöve ionfelhőt hozott létre. Az ionfelhőt egy gyűrűelektróda után egy reflektornba vezették, ahol a töltés-tömeg arány szerint szeparálódtak az ionok [7–10].



8. ábra. A Lézerionizációs RepülésiIdő-TömegAnalizátor (spektróméter), a LIRITA (balra) és annak optikai rendszere (jobbra)



9. ábra. A spektrális mérésekre kifejlesztett korrelációs fényszórás mérő berendezés a 80-as évekből

Fontos megjegyezni, hogy a berendezés vákuumrendszere, optikai egységei, elektronikája, mechanikája, szoftvere is (egy OMFB-szerződés támogatásával) a nyolcvanas években az intézetben készült.

A fotonszámoláson alapuló fotonstatisztikai mérések, az elektronikai eszközök időbeli felbontásának javulása és az érzékenység növelése tették lehetővé egy új spektroszkópiai módszer kidolgozását, amely nagyságrendekkel megnövelte a felbontást, és akár 1 Hz-es frekvenciakülönbség meghatározását is lehetővé tette. A korrelációs technikát először a radarjelek feldolgozá-

sában kezdték el alkalmazni a malverni Royal Signals and Radar Establishmentben, később ez az optikai jelek spektrumának feldolgozásában is sikeresé vált. Az eljárás lényege, hogy a korrelációs függvényből a Wiener-tétel alapján visszaállítható a spektrum [11], azaz az egyik ismeretében a másik meghatározható (ha arra gondolunk, hogy az autokorrelációs függvényt úgy is megkaphatjuk, hogy egy $v(t)$ jelet egy $h(t) = v(-t)$ súlyfüggvényű hálózaton visszük keresztül – a konvolúciót frekvenciatartományú szorzással helyettesítve közvetlenül jutunk az energiaspektrumhoz, vagyis a Wiener-tétel felismeréséhez).

A korrelációs technikát az intézetben először a moszkvai Fizikai Intézet (FIAN) együttműködve kezdték el alkalmazni a fázisátmenetek strukturális változásainak tanulmányozására, amelyet a fényszórás statisztikai tulajdonságainak vizsgálatával végeztek. Fotonszámolós módszerrel mérve a szórt fényt, az autokorrelációs függvényből meghatározták a diffúziós állandó és a korrelációs rádiusz változását is a kritikus hőmérséklet közelében [12, 13]. Ezt a nagyfelbontású korrelációs spektroszkópiát, amelyhez egy sor új technikai eljárást kellett megvalósítani, később más területen is lehetett alkalmazni – pl. a különösen érzékeny lézeres Doppler-mérőrendszerekben [14]. De ezt alkalmazták a légkörben lebegő szubmikronos részecs-

kék sebességének és méretének kontaktusmentes meghatározására is. A berendezés fontosabb részegységei a valós idejű fotonkorrelátor, a stabilizált lézerefényforrás, a száloptikás levilágító és detektáló optika, valamint az adatgyűjtő és feldolgozó elektronika. Megállapítottuk, hogy az általunk alkalmazott fotonkorrelációs eljárással a ~50 nanométeres részecskék sebessége és mérete egyidejűleg regisztrálható.

A fény statisztikai tulajdonságainak tanulmányozása terén fontos eredmény volt a nem klasszikus fény (squeezed light) generálása és annak alkalmazása az abszolút kvantumhatásfok etalon nélküli meghatározására [15, 16], valamint fontosak voltak a Kroó Norbert vezetésével történt plazmonos fotonstatisztikai vizsgálatok.

A mikroelektronikai gyártósor azonban, amit a COCOM-listát megkerülve vásároltak meg nyugatról (egy harmadik ország beiktatásával), rögtön a telepítés után leégett, ezzel a mikroelektronikai program sorsa is



10. ábra. Az első hazai mikroprocesszoros pormérő berendezés a 80-as évekből (balra) és a környezetvédelmi mérésekre kifejlesztett lézeres berendezések prototípusai (jobbra)

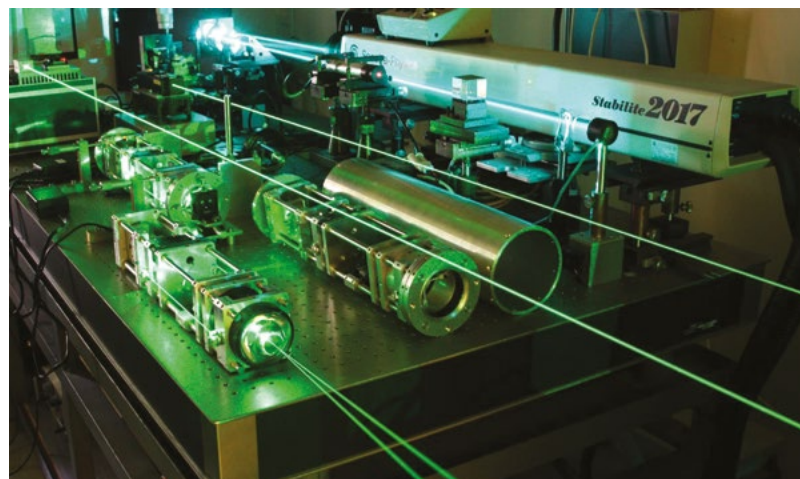


11. ábra. Az SZFKI lézeres berendezései a Hannoveri Ipari Vásáron

megpecsételődött [17], ugyanakkor az erre a célra kifejlesztett műszerek egy része máshol hasznosult. Ilyen volt a levegő porkoncentrációjának mérésére kifejlesztett műszerfamilia is, amelyet eredetileg alacsony koncentrációk monitorozására fejlesztettek, de továbbfejlesztve később magas koncentrációknak, és ezzel a nagyvárosok levegőjének mérésére is alkalmassá vált. Ezeket a műszereket később kültéri és beltéri aeroszolmérésekre is felkészítették, így ipari környezetben is lehetett alkalmazni őket egészségvédelmi és környezetvédelmi monitorozásra [14].

A fenti fejlesztésekhez hozzájárult az elektronikai osztály, ahol a lézertápegységektől a mérésautomatizálásig gyakorlatilag minden felmerülő feladatot meg tudtak oldani.

A 90-es évektől kezdve a lézerek fontos alkalmazási területe lett a környezetvédelem – a levegőszennyezettség mérése optikai módszerekkel – pl. lézerfényszórással, illetve a fény statisztikai tulajdonságainak vizsgálatával. Ez a téma eredetileg a tiszta terek monitorozására alkalmas műszerek fejlesztésével indult, amelyek az ak-



12. ábra. Az SZFKI-ban kifejlesztett lézeres Doppler-anemométer laboratóriumi változata

kor induló magyarországi mikroelektronikai programhoz voltak szükségesek.

A 90-es évektől sikeres fejlesztések folytak a lézeres Doppler-anemometria területén is (*Jani Péter*), amelyeket később az ellenséges katonai távolságmérő (range finder) berendezések érzékelésére és lokalizálására fejlesztettek tovább.

A 2000-es években sikeres fejlesztés volt a BME-vel közösen létrehozott kiterjesztett látószögű digitális holografikus berendezés (DIADEM) létrehozása is *Füzessy Zoltán* vezetésével

Az új eredmények hasznosításában segítséget nyújtottak az intézetből kinőtt vállalkozások (például az Optilab Kft., a Technoorg-Linda Kft., az R&D Ultrafast Kft., az Envi-Tech Kft.), valamint az együttműködő ipari partnerek (régében a MOM, Gamma, KUTESZ, REMIX, BIOINNO-

IKORD, MMG, FORTE (Vác), később a GE, SIEMENS, Kőbányai Gyógyszergyár, PARMA Kft., KTV, Viscosa Rt., ma a LASRAM, Videoton, HOYA, Műszerautomatika és mások). Ezekben a cégekben, illetve rajtuk keresztül számos új eredmény, berendezés, új mérési módszer és eljárás hasznosult különféle ipari területeken – mind Magyarországon, mind külföldön.

A gázlézerek és a szilárdtestlézerek kutatásán, fejlesztésén és alkalmazásán kívül a KFKI egyik utódintézetében (a Műszaki Fizikai Kutatóintézet fuzionálása után a KFKI Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézetben, azaz az MFA-ban) félvezetőlézerek fejlesztése és alkalmazása is folyt *Serényi Miklós* vezetésével; ezek főleg a méréstechnika egyes területein hasznosultak. Ezeket a III-V típusú félvezetőkön végzett kutatásokat főleg a gyorsan fejlődő fénytávközlésben és a szelektív spektroszkópiában alkalmazott félvezető fényforrások iránt jelentkező igény motiválta. Továbbfejlesztett és szabadalmaztatott, kis küszöbáramú és a nagy hatásfokú, folytonos üzemben működő lézerdiódák előállítására szolgáló, csak egyetlen folyadékfázisú epitaxiás

lépést tartalmazó módszerük egyidejűleg hozta létre a keskeny aktív réteget és a laterális áramszétfolyást hatékonyan akadályozó záróstruktúra is. A nagyobb teljesítményű eszközök fejlesztése során a fénykibocsátó kristálylapka felületére többféle dielektromos rétegekből álló, reflexiócsökkentő bevonatot leválasztva sikerült növelniük a kilépő fénytelsítményt. Az in situ monitorozással készülő antireflexiós bevonatok lehetővé tették a lézerdiódák külső rezonátorhoz való csatlakozását, és így hullámhossz szerint hangolható lézerek építését. Ezek fejlesztése során az MFA együttműködést épített ki a müncheni székhelyű TOPTICA ipar-



13. ábra. A BME-vel közösen létrehozott DIADEM holografikus berendezés laboratóriumi változatának részegységei

vállalattal, melynek eredményeként több mint egy tucat, az iparban is hasznosult eszközt építettek.

Összefoglalás

A szerzők a teljesség igénye nélkül igyekeztek röviden áttekinteni a lézeres kutatások, fejlesztések és alkalmazások egyes fejezeteit és mérföldköveit a KFKI-ban és annak jogutódjaiban a 2000-es évekig, vállalva azon kollégák jogos kritikáját, akiknek az eredményeit nem sikerült kellő súllyal és terjedelemben bemutatni. A modern lézeres kutatások és alkalmazások ebben a számban, más cikkekben vannak bemutatva. Az intézmény átalakulásai miatt a kutatás ezeken a területeken nem mindig volt zökkenőmentes, és a különböző szakterületek egyensúlyának megteremtése és megtartása is néha nehézségekbe ütközött. Ezzel együtt talán hasznos fel-eleveníteni és felsorolni azokat az eredményeket, amelyek a fizika mellett más tudományterületeken, ipar-gakban, berendezésekben és eszközökben hasznosultak – az attosekundumos kvantumkémiaától vagy a CD-lejátszótól kezdve a lézernyomtatón vagy a vonalkód-leolvasón, telekommunikáción, nagyfelbontású optikai mérés technikán keresztül a lézermutatóig –, ezzel serkentve a tudományos, technológiai, ipari és gazdasági fejlődést.

Talán azt is sikerült bemutatni, hogy a KFKI és annak utódintézményei a lézerek felfedezése, fejlesztése és alkalmazása területén nemcsak Magyarországon, de nemzetközi szinten is a világ vezető kutatóintézetei közé tartoztak és tartoznak ma is, és az ott született számos kimagasló eredmény megalapozta Gerard Mourou 2018-as

és Krausz Ferenc 2023-as Nobel-díjának odaítélését.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönik azok segítségét, akik személyes visszaemlékezésekkel, fényképekkel, dokumentumokkal hozzájárultak a cikk tartalmához. Kiemelten köszönetet mondanak Horváth Zoltán Györgynek, Konczos Gézának, Kroó Norbertnek, Plósz Bélának, Csillag Lászlónak a rendelkezésre bocsátott dokumentumokért és a személyes visszaemlékezésekért. Hálával és tisztelettel emlékeznek Farkas Gyözőre, Varga Péterre, Kőházi-Kis Ambrusra, Janszky József-re, Czigány Imrére, Hartmann Ervinre, Szentirmay Zsoltra, Kertész Ivánra, Matus Lajosra, Ticska Kálmánra, Cséri Hubára, Watterich Andreára, Kiss Árpádra, Nemes Tiborra, Pócsik Istvánra, Rózsa Károlyra, Szigethy

Jánosra, akik már eltávoztak közülünk, de áldozatos munkájukkal nagyban hozzájárultak ahhoz, hogy a lézerfizika, a lézeral alkalmazások, a spektroszkópia és az optika területén az intézeteinkben kimagasló eredmények szülessenek.

Irodalom

1. Bakos J., Csillag L., Kántor K., Varga P.: *KFKI Közl.* 13 (1965) 195–197.
2. Csillag L.: *Fizikai Szemle* 63 (2013) 197–200.
3. Horváth Z. Gy.: *Laser Focus* 16 (1980) 32.
4. Krausz Ferenc Nobel-díja, *Fizikai Szemle* 74 (2024).
5. Szipócs R.: *Fizikai Szemle* 74 (2024) 7–8.
6. Szipócs R., Stingl A., Spielmann C., Krausz F.: *Optics and Photonics News* 6 (1995) 16.
7. Vértes Á., Juhász P., Jani P., Czitrovsky A.: *International Journal of Mass Spectrometry* 82 (1988) 45–70.
8. Czitrovsky A., Frecska J., Jani P., Matus L., Nagy A.: *Journal of Aerosol Science* 27S (1996) 467–468.
9. Czitrovsky A., Jani P., Maróti L., Matus L., Windberg P.: *Journal of Aerosol Science* 29S1 (1998) 471–472.
10. Czitrovsky A., Jani P., Maróti L., Matus L., Pintér A., Windberg P.: *Journal of Aerosol Science* 29S1 (1998) 469–470.
11. Zaitsev V. P., Fabelinski I. L., Czitrovsky A., Chaikov L. L., Jani P.: *JETP Letters* 43 (1986) 112–116.
12. Chaikov L. L., Fabelinski I. L., Krivokhizha S. V., Lugovaia O., Czitrovsky A., Jani P.: *Journal of Raman Spectroscopy* 25 (1994) 463–468.
13. Krivokhizha S. V., Lugovaia O., Fabelinski I. L., Chaikov L. L., Czitrovsky A., Jani P.: *JETP* 103 (1993) 115–124.
14. Czitrovsky A. In: Czitrovsky A. (ed.) *Trends in Laser Development, Application and Technologies*. Technoorg-Linda Ltd., Budapest (1997).
15. Czitrovsky A., Sergienko A., Jani P., Nagy A.: *Laser Physics* 10 (2000) 86–89.
16. Czitrovsky A., Sergienko A., Jani P., Nagy A.: *Metrologia* 37 (2000) 617–620.
17. Borvendég Zs.: Az „impexek” kora. *NEB*, 2017.