

LÉZERFEJLESZTÉSEK ÉS LÉZERALKALMAZÁSOK A KFKI-BAN, MAJD AZ SZFKI-BAN

Czitrovszky Aladár
az MTA doktora, tudományos tanácsadó
czi@szfki.hu

Farkas Győző
a fizikai tudomány doktora,
tudományos tanácsadó

Bánó Gergely
PhD, tudományos munkatárs

Nagy Attila
PhD, tudományos munkatárs

Oszetzky Dániel
PhD-ösztöndíjas

Jani Péter
az MTA doktora, tudományos tanácsadó

Gál Péter
PhD-ösztöndíjas

Donkó Zoltán
az MTA doktora, tudományos főmunkatárs

Kiss Árpád
kandidátus, tudományos főmunkatárs

Rózsa Károly
a fizikai tudomány doktora, tudományos tanácsadó

Koós Margit
az MTA doktora, tudományos tanácsadó

Varga Péter
az MTA doktora, tudományos tanácsadó

Csillag László
kandidátus, tudományos főmunkatárs
MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet

*A fejlődést magalapozó tudást azért is
kötelességünk megszerezni,
hogy továbbadhassuk azt utódainknak*

Bevezetés

Optikai és spektroszkópiai kutatások a KFKI-ban már annak megalakulása (1950) óta folytak, amikor a fény kettős tulajdonságát, fényhullámok sajátosságait, a fotonok viselkedését, az atomok és a fény kölcsönhatását kezdték tanulmányozni. 1959-ben alakult itt meg az optikai osztály, amely az optikai mérés technikai csoportból, valamint a fényanyag kölcsönhatást, a koherenciát és a

fluktuációkat tanulmányozó részlegekből és a spektroszkópiai csoportból állt (Jéki, 2001). Nem véletlen, hogy az első hazai lézer – egy He-Ne gázlézer, 1963-ban, kb. három évvel az első gázlézer megalkotása után – a KFKI-ban készült el (Bakos József, Csillag László, Kántor Károly és Varga Péter építették). Ez a hazai lézer annyiban jelentett előrelépést Ali Javan lézeréhez képest (Bertolotti, 1983), hogy a tükrök a vákuumrendszeren kívülre kerültek. A másik különbség, hogy a tükrök anyaga nem dielektrikum, hanem ezüstretegűből készült, ezért a lézer több vonalon is működött: az 1,15, 2,39 és 3,39 mikrométeres hullám-

hosszon. A kilépő teljesítmény az 1,15-ös vonalon 2,5 mW volt.

A következő évben (1964) ugyanitt jött létre az első hazai rubinlézer (Farkas Győző, Náray Zsolt és Varga Péter), 1965-ben pedig a látható hullámhosszon – 0,63 mikronon – működő He-Ne lézer (Bakos József, Csillag László, Kántor Károly és Salamon Tamás).

1970-ben megépült az első He-Cd⁺ lézer (Csillag László, Jánossy Mihály, Kántor Károly, Rózsa Károly), 1972-ben pedig az első hazai Nd-YAG lézer (Czigány Imre és Kertész Iván). Jelentős előrelépés volt az első DFB festéklézer megépítése 1974-ben (Bakos József, Füzesy Zoltán, Sörlei Zsuzsa és Szigeti János), valamint az első He-Kr⁺ és He-Cu⁺ üreges katódú lézerek létrehozása, amelyek világviszonylatban is újdonságok voltak. Az újfajta lézerek közül itt épült az első Nd-foszfát üveg hordozható minilézer (1981, Czigány Imre és Kertész Iván), amely néhány gyufaskatulya méretű volt és tepről is üzemelt.

Több új lézer a 60-as években megalakult lézeralkalmazási osztályon jött létre (például a Nd-YAG lézer, a Nd-foszfát üveg lézer), ahol ezek ipari, orvosi (főleg sebészeti) és mérés technikai alkalmazása is elkezdődött. A Lézerfizikai osztályon ugyanebben az időben készült az első hazai hologram (Jánossy Mihály, Füzesy Zoltán), később pedig a világon elsőként itt felfedezett Glória lézer, amely a *Laser Focus* címlapján is szerepelt (Horváth Zoltán).

A 60-as évek közepétől a fény-anyag kölcsönhatás kutatása a kvantumelektrodinamika (QED) linearitásának kérdéseire irányult, például a foton-elektron kölcsönhatás tanulmányozására alacsonyabb fényintenzitások (akár egyetlen foton) esetén (Farkas – Varga, 1964). A QED azonban nagy fényintenzitásoknál előre jelezte az addig ismeretlen nemlineáris jelenségeket is. Az ilyen jelenségek vizsgálata céljából a közreműködő kutatóink (Farkas Győző, Horváth Zoltán Gy., Kertész Iván, Kóházy-Kis Ambrus, Náray Zsolt, Tóth Csaba,

Varga Péter) egyre nagyobb teljesítményű impulzusüzemű szilárdtestlézereket építettek; az első ilyen egy 0,69 μm hullámhosszú „óriás impulzusú” szilárdtest rubinlézer volt (~100 MW). E lézerimpulzusok alkalmazásaival tarták fel a világon elsőként a fémek QED által előre jelzett sokfotonos fotoeffektusát (Farkas et al. 1967, 1971). Nagyobb lézerintenzitásokhoz érve a 10 ns-os impulzusoknál termikus elektron-emisszió lépett fel, mely eltakarta a fotoeffektust, ezért olyan rubin- és neodímium módusszinkronizált (mode-locked) lézereket építettek, melyek jóval rövidebb, 1 ps hosszúságú, GW teljesítményű lézerimpulzusokat generáltak. Ezen ultrarövid impulzusokkal szintén 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” (a Keldis-elmélet első igazolása) (Farkas et al., 1972, 1977; Farkas, 1978). 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 elsőként mutatta meg, hogy a módusszinkronizált lézerimpulzusok vonulatából izolált egyetlen hangolható pikoszekundumos impulzust használva a szabadelektron gáz elektronjai csak egész számú $h\nu$ lézerfotont nyelnek el (Lompré et al., 1979). E kísérlet volt a megalapozója az ún. „Above threshold ionization” jelenségnek (ATI), melynél atomok, illetve fémek fotoelektronjai mindig csak egymástól $h\nu$ fotonenergiával követő energiaértékekből álló diszkrét vonalas spektrum alakjában jelennek meg. Ezt fémkatódok esetén elsőként igazolták (Farkas – Tóth, 1989, 1990; Farkas et al., 1993). Ezen elektronok, valamint

szabad elektronok esetére kidolgozták a röntgenemisszió keltését, valamint a lézeres elektrongyorsító új elvét (Tóth et al., 1991; Bergou et al., 1983). A további vizsgálatokhoz szükséges még nagyobb intenzitások eléréséhez elkészült egy ún. „Chirped Pulse Amplification” elnevezésű összetett lézerrendszer, mely negatív visszacsatolással működött. Közben ugyancsak elsőként egymást $h\nu$ fotonenergiával követő, magasrendű harmonikusok keltését (HHG) figyelték meg fémfelületeken, mely HHG jelenség az ATI-val együtt jelentkező folyamat. Az így nyert szabályos diszkrét vonalakból álló spektrumok a röntgentartományig terjednek, és a lézerrel hangolhatóak (Varró et al., 1999).

A fotoeffektus során nyert, rendkívül nagy áramsűrűségű, igen rövid elektronimpulzusokat a hivatkozások szerint a nagy elektrongyorsítók, továbbá a szabadelektronlézerek katódjaiban stb. használják. Ugyancsak fontos eredmény, hogy a fotoeffektust taszító külső elektrosztatikus térben keltve igen erős UV- és röntgenemissziót detektáltak (Varró et al., 1999).

Kitűzött alapkutatói programjuk egyik legújabb eredménye az *attoszekundumos* fényimpulzusok ($1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$) keltésének felismerése (Farkas – Tóth, 1992). Az ez ideig előállított legrövidebb ilyen impulzusok időtartamának szemléltetése: az elektron a hidrogénatom Bohr-pályáján 140 attosec alatt tesz meg egy fordulatot. Így $1 \text{ as} = 1/140$ Bohr-körülfordulási idő, ami térben 0,3 nanométer távolságnak felel meg. Így az attofizika találkozik a nanofizikával: új kísérleti eszköz született az atom belső dinamikájának attoszekundumos időbeli, illetve nanométeres térbeli skálán történő felbontásához. Ilyen vizsgálatokat (Auger-effektus dinamikája, szabad elektron dinamikája stb.) a rohamosan fejlődő attofizikai kutatóközpontokban sikeresen és rutinszerűen végeznek.

A 70-es években a lézeralkalmazási osztályon már lézeres berendezések és rendszere-

rek fejlesztése is folyt, amelyek között ellenállás-trimmelő berendezések voltak a REMIX számára, lézeres gravírozó berendezések, melyeket a Gammában helyeztek üzembe, szubmikronos mérő interferométerek a Szerszámgépipari Művek (SZIM Csepel) részére, orvosi lézerrendszerek különböző diagnosztikai és sebészeti célokra. Később, a különböző lézerek több új méréstechnikai módszer kidolgozását is lehetővé tették – például a szórt fény frekvenciájának spektrális felbontása a kontaktusmentes lézeres sebességmérés terén lehetővé tette új doppleres sebességmérő berendezések kifejlesztését (Jani – Czitrovsky, 1989–1991). Lézerfény-szórással, amit fotonszámlálással detektáltunk és korrelációs módszerrel dolgoztunk fel, fázisátmeneteket lehetett vizsgálni, diffúziós állandókat lehetett meghatározni (Krivokhiza et al., 1993; Chaikov et al., 1994). Az interferenciakísérletek új mérő-interferométerek létrehozásához vezettek (Yearbook, 1985–86, 1989-91).

A lézerek kutatása segítette a plazmafolyamatokat hasznosító, új anyagudományi mérési eljárások kifejlesztését. Ezek közül fontos kiemelni a gyémántszerű vékonyrétegek, a szilícium-karbid, szilícium-nitrid kompozit anyagok plazmakisüléssel történő előállítását, azok kötési, valamint elektron szerkezeti jellemzőinek meghatározását, amelyre kiválóan alkalmas a Raman-szórás és fluoreszcencia-spektroszkópiai módszer.

Később, a 80-as években, a *cocom*-listás időszakban, az embargós berendezések kiváltása is napirendre került – ilyenek voltak például a *high tech* megvalósításához nélkülözhetetlen, pormentes tiszta terek mérésére szolgáló levegőportartalom-mérő és részecskeszámláló berendezések, amelyek a lézerfényszórás alapján határozták meg a levegőben lebegő porszemcsék méreteloszlását és koncentrációját. A 90-es években ezekből a berendezésekből fejlődtek ki a magasabb porkoncentrációk mérésére alkalmas műszercsaládok a légkör aeroszol-szennyezett-

ségének monitorozására, valamint ipari üzemek porszennyezettségének mérésére. A kifejlesztett, szabadalmazott műszercsaládok a 90-es évek közepétől széles körben hasznosultak a környezetvédelemben (az ÁNTSZ-szel közösen), a gyógyszergyártásban (Kőbányai Gyógyszergyár, PHARMA Kft.), a toxikológiában (NEVIKI, Toxikológiai központ, Veszprém), az egészségügyben (pl. kórházak műtőiben – Szent Imre Kórház, Szent János Kórház), a vegyiparban (Viscosa, Nyergesújfalu), az acéliparban (Alcoa, Székesfehérvár), a gáziparban (Fővárosi Gázművek) és számos kisüzemben (például a Paraplán Kft.-ben, szűrők minősítésére, a Kisipari Termelő Vállalatban pomonitorozásra stb.) (Czitrovsky – Jani, 1993a, b, 1994a, 1995; Czitrovsky, 1997). A 90-es években, az igényeknek megfelelően a levegőtisztaság-mérő berendezésekből fejlődtek ki a folyadék tisztaság-mérő berendezések (Czitrovsky – Jani, 1994b); ezek a fotokémiai iparban (FORTE, Vác), a gyógyszergyártásban (HUMET Rt.) és a vegyipar számos területén hasznosultak (Czitrovsky – Kertész, 1997).

A magas hőmérsékletű nukleáris aeroszolok mérésére kifejlesztett részecskeszámláló berendezések egyik érdekes tudományos hasznosítására az Atomenergia Kutatóintézzettel közösen végzett atomreaktor-katasztrófa szimulációs kísérletekben került sor egy nemzetközi projekt keretében. Itt a fűtőelemekből felszabaduló aeroszolok méreteloszlásának és koncentrációjának hőmérsékletfüggésében találtunk érdekes összefüggéseket a 100–2200 °C-os hőmérséklettartományban (Czitrovsky et al., 1996c, 1998a, b; Jani et al., 1999; Pintér et al., 2000; Hózer et al., 2003).

Ugyancsak az AEKI-vel közösen történt a lézer ionizációs repülési idő tömeganalizátor kifejlesztése (LIRITA) (Vértes et al., 1988). Ezzel párhuzamosan folyt a lézeralkalmazási osztályon a kontaktusmentes lézeres sebességmérési módszerek fejlesztése, ahol foton számlálásos korrelációs módszerekkel sikerült javítani az érzékenységet és a felbontást (Jani – Czitrovsky, 1996). A lézeres interferometriát a gépipari méréseken kívül fel lehet használni felületek topológiájának nagyfelbontású vizsgálatára is.

A kvantumoptikai mérés technikai módszerek lehetővé tették, hogy a nem klasszikus fény tulajdonságait kihasználva új módszereket dolgozzunk ki a fotodetektorok paramétereinek mérésére. Ezek közül megvalósítottuk a kvantumhatásfok etalon nélküli mérését, az egyfotonos és kétfotonos csúcs amplitúdótartományának gyors meghatározását a foton számlálási görbe elemzése alapján (Czitrovsky et al., 2000a, b).

A lézerfizikai osztályon intenzív kutatások folytak a fém/szigetelő felületen keltett optikai hullámok (plazmonok) terén, melyek lehetővé tették ezen felületek állapotának (érdesség, tisztaság, esetleges kémiaiilag és/vagy fizikailag kötött adszorbeált rétegek jelenléte) meghatározását. A rétegek vastagságának és komplex törésmutatójának mérésére kidolgoztak csillapított teljes visszaverődésen alapuló módszert (Kroó – Szentirmay, 1995, 1996). Meghatározták, hogy a bevonatként széles körben alkalmazott arany vékonyrétegek optikai tulajdonságai drasztikusan függenek a hordozó érdességétől, valamint megállapították, hogy a Fresnel-egyenletek, eredeti formájukban, nem alkalmasak érdes felületek optikai folyamatainak (transzmisszió, reflexió) leírására. A felületi plazmonok által közvetített emisszióból kimutatták, hogy az így mért érdességi paraméterek jelentősen különböznek az atomierő-mikroszkóppal (AFM) mért paraméterektől. Ennek valószínű oka, hogy a fényszórással kapcsolatos folyamatok a fény hullámhosszával összemérhető komponensekre érzékenyek, míg az AFM ezeket – számára mérhetetlen – hullámoságként detektálja. A Max Planck Intézzel együttműködésben közelítér-pásztázó alagútmikroszkóppal vizsgálták különböző vékonyréteg-rendszerekben keltett plazmonok fluktuációját. Megállapították hogy a közvetlen plazmon jel keskeny Gauss- vagy Poisson-eloszlást, míg a plazmon rezgés termikus jele Boltzmann-eloszlást mutat. A

keskeny Poisson-eloszlás arra utal, hogy a keltett plazmonok sugárzásának nem klasszikus sajátságai lehetnek (Kroó et al., 2005).

A lézeralkalmazási osztályon a 90-es években kezdődött a femtoszekundumos lézerek létrehozása és alkalmazása, melyeket az új diszperzió-kompenzált lézertükrök megalkotása tett lehetővé.

A kísérleti tevékenységben sokat segített az optikai vékonyréteg laboratórium (Bakos József és Szigeti János), ahol az ott dolgozó szakemberek és a jó műszaki háttér gyakorlatilag bármilyen optikai réteg (lézertükrök, interferenciaszűrők, polarizációs osztótükrök, antireflexiós rétegek, felületi hullámvezetők) létrehozását lehetővé tette. Itt készült az első rezgőkvarcos rétegvastagság-mérő berendezés, és a világújdonságot jelentő diszperziós (csörpölt) lézertükrök, amelyekkel 1997-ben sikerült kb. 4 femtoszekundumos világcsúcsot beállítani a rövid lézerimpulzusok generálásában (Szipőcs Róbert és Ferencz Kárpát). Az utóbbi években itt jöttek létre a genomikában és a klónozási technológiában alkalmazható speciális interferenciaszűrők, amelyeket génátültetésben is használnak.

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

A lézerfizikai osztályon az 1970-es években fontos szerepet kapott a fűtött fémionlézerek kutatása. Ilyen típusú lézerre példa a kék ($\lambda = 441,6 \text{ nm}$) fényt sugárzó He-Cd⁺ lézer (Csillag et al., 1970), amely a gázkisülés pozitív oszlop térrészében működik. A lézerátmenet szelektív gerjesztésének mechanizmusa a $\text{He}^m + \text{Cd} \rightarrow \text{He} + \text{Cd}^*$ Penning-ionizációs folyamat (ahol He^m metastabil állapotú héliumatomokat jelöl). A szükséges Cd fémgőzkoncentrációt egy, az anód környékén elhelyezkedő Cd fém 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 egyenletes fémgőzsűrűséget alakítottak ki.

A 80-as évektől kezdődően a gázlézerkutatások központi témája az SZFKI-ban az üreges katódú lézerek fejlesztése volt, ahol aktív közegként a ködfénykisülés negatív fény részét használjuk 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 két csoportjának terén, a nemesgázkeverék-lézerek és fémionlézerek fejlesztésében folytak kutatások. Nemesgázkeverék-lézerekre példaként a He-Kr⁺ valamint a He-Ne-Xe⁺ típusok említhetők (Jánossy et al., 1984, 1988). Az üreges katódú fémionlézereket a legtöbb esetben nemesgáz-ionok és fématomok közötti töltéscsereelő ütközések gerjesztik. Ilyen például a $\text{He}^+ + \text{Cu} \rightarrow \text{He} + \text{Cu}^{**}$ 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 sűrűségét állítsunk elő. Fématomok számottevő koncentrációjának elérésére (tipikusan néhányszor 10^{13} cm^{-3} sűrűsége van szükség) két lehetőség adódik. Az első esetben a már említett pozitív oszlopú fűtött kadmiumion-lézerhez hasonlóan a fém termális úton egy oldalkályhából lehet a kisülési térfogatba párologtatni. Fontos előrelépésnek számított, amikor az SZFKI-ban felismerték, hogy üreges katódú kisülésekben a megfelelő fémgőz-koncentráció katódporlasztással szobahőmérsékleten is elérhető (Csillag et al., 1974).

A fent említett időszakban közben a KFKI Szilárdtestkutató Intézetből (SZTKI), amelyhez a lézerfizikai és lézeralkalmazási osztály tartozott, 1981. április 1-jén két intézet alakult – a KFKI Szilárdtestfizikai Kutatóintézet (KFKI SZFKI) és a KFKI Anyagtudományi Kutatóintézet (KFKI ATKI). 1992-ben az SZFKI független intézetté vált, az 1998-as akadémiai átszervezések során az MTA Kristályfizikai Kutatólaboratórium csatlakozása után módosult a neve Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézetre. Az egyesítés során az SZFKI olyan kutatógárdával erősödött, amely addig is kimagasló tudományos tevékenységet végzett az elméleti kvantumoptika területén (Janszky József). Ugyanakkor a lézerfizikai és lézeralkalmazási osztályok átvészelték az átalakulásokat, és a két osztály létszáma folyamatosan nőtt. Jelenleg ezen a területen mintegy harminc kutató dolgozik, akik számos nemzetközi programban vesznek részt és számos NKFP, GVOP, OTKA, TÉT szerződést teljesítenek, valamint kb. harminc kül- és belföldi kutatóintézettel és egyetemmel működnek együtt.

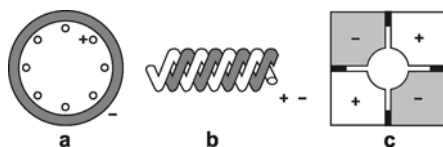
Az új eredmények hasznosításában segítséget nyújtottak az intézetből kinőtt vállalkozások (például Optilab Kft., Technoorg-Linda Kft., R&D Ultrafast Kft.), valamint az együttműködő ipari partnerek (régbben a MOM, Gamma, KUTESZ, ma a LASRAM, GE, Videoton). Ezekben a cégekben, illetve rajtuk

keresztül számos új eredmény, berendezés, új mérési módszer és eljárás hasznosult különféle ipari területeken, mind Magyarországon, mind külföldön.

A hosszúra nyúlt bevezetés még hosszabb lenne, ha felsorolnánk minden olyan újdonságot, amely a KFKI-ban és az SZFKI-ban született, ezért inkább bemutatunk néhány perspektivikusnak mutakozó jelenlegi kutatási eredményt.

Ultraibolya fémionlézerek fejlesztése napjainkban

A szilárdtest- és félvezetőlézerek előretörése miatt a gázlézerek kutatásának az utóbbi évtizedben a távoli ultraibolya hullámhosszknál volt jelentősége. Az ultraibolya tartományba eső fémion-lézerátmenetek közül érdemes megemlíteni a rézion 248 nm-es, az aranyion 280 nm-es és az ezüstion 224 nm vonalát. Ez utóbbi a jelenleg ismert leg-rövidebb hullámhosszú folytonosan gerjeszhető lézerátmenet. Ha sikerül megoldani az üreges katódú fémionlézerek gyártásával kapcsolatos kérdéseket, ezek a lézerek nemcsak a rohamosan fejlődő ultraibolya Raman-spektroszkópia olcsó fényforrásai lehetnek, de számos más területen is hasznosíthatók. A rövid hullámhossz nagy határfokú gerjesztést (rezonáns Raman-szórás) és jó határfokú detektálást tesz lehetővé, továbbá kiküszöbölhetővé teszi a zavaró fluoreszcencia-jelet, ami nagyon sok szerves anyag vizsgálatánál alapvetően fontos. Napjainkban egyetlen gyártó (Photon Systems, USA) forgalmaz porlasztott üreges katódú ultraibolya réz- és ezüstlézereket. Ezek a lézerek hagyományosnak nevezhető, ún. felhasított üreges katódú elektrodaelrendezésen alapulnak, amelynek alacsony az égési feszültségük. A porlasztott lézerek határfokának növelésére az SZFKI-ban az elmúlt időszak során ún. *nagyfeszültségű üreges katódú kisüléseket* fejlesztettünk ki (lásd az *1.a* és *1.c ábrákat*), amelyek segítségével az irodalomban talál-



1. ábra • Nagyfeszültségű üreges katódú kisülések. a) üreges anód-katód kisüléskeresztszmet (az irodalomban a HAC rövidítés terjedt el, hollow anode-cathode); b) helikális kisülés – oldalnézet; c) szegmenált üreges katódú kisülés – keresztmetszet.

ható korábbi adatokkal összehasonlítva jelentősen magasabb erősítést sikerült elérni több lézerátmeneten (Tobin et al., 1995; Donkó et al., 1998).

Az elmúlt néhány évet a lézerfizika osztály gázlézer csoportjában egy praktikus üreges katódú fémionlézer kifejlesztésére irányuló, szisztematikus kutatásnak szenteltük. Elsőként arra a kérdésre kerestünk választ, hogy a lehetséges hagyományos, illetve nagyfeszültségű elektrodaelrendezések közül melyikben – és a fémgőznek porlasztott vagy fűtött előállításával mellett – lehet a leghatékonyabb lézergérsztést elérni. A kérdés eldöntéséhez a He-Zn⁺ lézerrendszer 492 nm-es kék átmenetén végzett erősítésméréseket vettük alapul. Az irodalomban található adatok kiegészítésére a saját magunk megítélése alapján ígéretesnek tűnő fűtött üreges anód-katód (HAC – hollow anode-cathode) lézert és porlasztott szegmentált üreges katódú (SHC – segmented hollow-cathode) lézert építettünk. A legnagyobb erősítést a porlasztott szegmentált üreges katódú kisülésemben sikerült elérni (Bánó et al., 2003, 2005), ezért a továbbiakban ennek az elrendezésnek a fejlesztésével foglalkoztunk.

Az elérhető fémion-lézerátmenetek közül az ultraibolya Raman-spektroszkópia céljainak a 224 nm-es Ag-II és a 248 nm-es Cu-II vonalak felelnek meg. A 248 nm-es átmenetet a rézatomok neonionokkal történő töltéskicserélő ütközése gerjeszti, a 224 nm-es vonal esetében a gerjesztéshez ezüstatomokra és héliumionokra van szükség. Mivel a héliumkisülések sokkal stabilabbak, mint a neonkisülések, döntésünk porlasztott szegmentált üreges katódú ezüstionlézer kifejlesztésére esett.

Praktikus lézer építésénél fontos, hogy szem előtt tartsuk nemcsak a teljesítményre, de az élettartamra vonatkozó elvárásokat is. Az üreges katódú porlasztott lézerek élettartamát két komoly tényező korlátozza. A lézerek kimenő teljesítménye nagymértékben

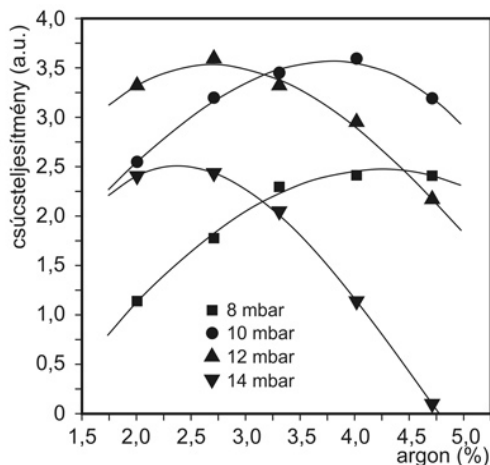
csökken, ahogy a töltőgáz tisztasága időben romlik. A különböző szennyeződések szintjét csak maximálisan tiszta kisülési csövekben lehet hosszú távon alacsonyan tartani. A második korlátozó tényező a porlott fém lerakódásaival függ össze. A lerakódott fémréteg kedvezőtlen esetben az elektródák közötti zárlathoz vezethet.

Az SZFKI-ban épített első szegmentált üreges katódú ezüstionlézer a *2.a ábrán* látható. A lézert belső tükrökkel láttuk el, mivel a rövid hullámhossz (magas abszorpciós veszteségek) miatt nem engedhető meg a Brewster-ablakok használata. A porlasztás hatásfokának növelésére a hélium töltőgázhoz kis mennyiségű argont kevertünk. Az argon-adalék koncentrációjának és a töltőgáz nyomásának optimalizálását mutatja a *2.b ábra*. (Bánó et al. 2005).

A tapasztalatok alapján megépítettük az ezüstionlézer javított változatát. Az új lézer moduláris felépítésű, egy modul szerkezetét mutatja a *3.a ábra*. Három modul összekapcsolásával 45 cm aktív kisülési hossz kaptunk. A katód túlhevülésének elkerülésére a lézert kvázifolytonos üzemmódban, 0,3 ms hosszú áramimpulzusokkal járatunk. A maximálisan elért 150 mW csúcsteljesítményt a használt tápegység maximális feszültsége korlátozta (*3.b ábra*). A lézer további tesztelése jelenleg is folyamatban van, reményeink szerint az ipari partnerek bevonásával néhány éven belül kereskedelmileg is forgalmazható terméket tudunk előállítani.

Kvantumoptikai módszerek a modern optikai mérés technikában

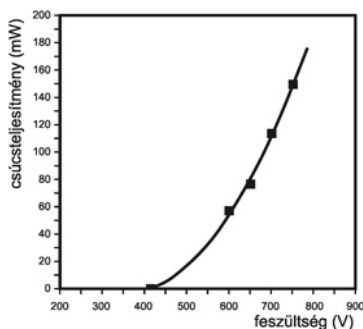
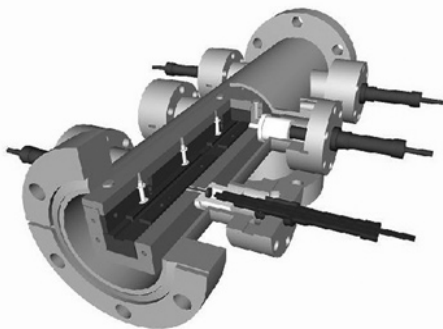
Az utóbbi időben az összefonódott fotonpárokkal végzett kísérletek új kutatási területet nyitottak a kísérleti kvantumoptikában. Az összefonódott fotonpárok generálásának legelterjedtebb módja nemlineáris optikai folyamat, a parametrikus fényszórás vagy dekonverzió (parametric down conversion – PDC). A parametrikus fényszórást olyan



2. ábra • a) Az első szegmentált üreges katódú 224 nm-es ezüstionlézer
b) Az argonadalék és a nyomás optimalizálását mutató eredmények

nemlineáris törésmutató-változások idézik elő, amelyeket maga a fényhullám indukál, a jelenség hatásfoka viszont csak $\sim 10^{-7}$. Ez a fajta fényszórás azért érdekes, mert ennek során úgynevezett összefonódott fotonpárok keletkeznek, melyeknek bizonyos szempontból rendhagyóak a tulajdonságaik (nem klasszikus fény jön létre). Az összefonódott fotonpárok generálásához lézerrel világítunk meg egy nemlineáris kristályt. A folyamat során a belépő nyaláb egy fotonja a nemlineáris kristállyal való kölcsönhatás során két foton-

ra bomlik, kielégítve az energia-, illetve impulzusmegmaradás törvényeit. Az így keletkezett fotonpárok egy képzeletbeli körkúp felületén hagyják el a kristályt, amelynek a tengelye a bejövő fényre van felfűzve. A keletkező fotonokat összefonódottoknak nevezik, mert tökéletes korreláltság tapasztalható fizikai paramétereik (energia, impulzus, polarizáció, irányultság stb.) között. A dekonverzió nagy előnye más folyamatokhoz képest, hogy itt a fotonok mindig párokban keletkeznek, azaz egyikük detektálása bizonyossá teszi „párja”



3. ábra • a) Az ezüstionlézer jelenlegi változatának szerkezete
b) A lézer teljesítménye a kisülés feszültségének függvényében

létezését. Az így előállított fotonpárok igen széles körben alkalmazhatóak az optikai mérés technikában (fotodiódák kvantumhatásfokának hitelesített etalon nélküli mérése), a kvantum-kriptográfiában vagy az ellipszometriában. Mi néhány általunk megvalósított eljárást mutatunk be, amelyeket széleskörűen alkalmaztunk a kvantumoptikai mérés technikában (Czitrovszky et al., 2000a, b).

Fényforrásnak egy ultraibolya vonalakra hangolt Ar-ion lézert használunk, amely 351,1 nm hullámhosszon sugároz. A lézer maximális teljesítménye egy ultraibolya vonalon ~800 mW. Az összefonódott fotonpárok keltéséhez, a dekonverzióhoz nemlineáris anyagként egy KDP kristályt alkalmazunk. A keletkező fotonpárokból azokat használjuk, amelyek energiája megegyezik ($\lambda=702$ nm); ezek egy kb. 3 fok nyílásszögű kúp felületén hagyják el a kristályt.

A fotonpárok detektálásához magas kvantumhatásfokú, hűtött lavina-fotodiódákat alkalmaztunk fotonszámítási üzemmódban. Mivel a fotonpárok egyszerre keletkeznek, detektálásuk során a fotodiódáknak egyszerre kell megszólalniuk. Ha az így keletkezett fotoelektromos jelek egyikét konstans értékkel késleltetjük, és a jelek időbeli eloszlását egy idő-amplitúdó konverter után helyezett sokcsatornás analizátorral vizsgáljuk, éles koincidencia-csúcsot kell kapnunk. A mért koincidencia-csúcsokon jól látható, hogy a véletlenszerűen jövő fotonok száma 3-4 nagyságrenddel kisebb a koincidenciában jövő fotonpárokéhoz képest.

E berendezéssel a detektorok kvantumhatásfoka egyszerűen, az igen költséges kalibrált etalon nélkül megadható. A mérési elv azon a már ismertetett tényen alapszik, hogy ha az egyik ágban detektálunk egy foton, akkor annak párja a másik ágban bizonyosan jelen van; ha azonban a detektor nem szólal meg, akkor az a detektor hibája.

Mérve a beütésszámot az egyik, illetve másik ágban, és a koincidenciabeütések számát, a fotodiódák kvantumhatásfoka ezek arányából kiszámolható.

Az eddigiekben leírt kísérleti összeállítás lehetőséget ad egy ún. előre programozható fotonszámú fényforrás megalkotására, mely az összefonódott fotonpárok előnyös tulajdonságait kihasználva képes adott irányban előre meghatározott számú, adott frekvenciájú és polarizációjú foton kibocsátására. A megvalósítás lényege, hogy az egyik ágban detektáljuk a foton, míg a másik ágban késleltetjük annak párját. A detektált foton ágában a detektor után egy gyors vezérlő elektronika a késleltetett ágba helyezett opto-elektronikai kapcsolót vezérel. Így lehetőségünk nyílik arra, hogy a detektált foton által keltett trigger jellel nyissuk vagy zárjuk a kapcsolót, így vezérelve annak kimenetét, azaz a fotonforrásunkat. E módszerrel elérhető, hogy adott számú, előre meghatározott tulajdonságú foton generáljunk, létrehozva az előre programozott fotonszámú fényforrást.

Multifunkciós aeroszol analizátor környezetvédelmi célokra

Környezetünket, egészségünket, az éghajlatot, valamint egyes ipari technológiákat jelentősen befolyásolják a levegőben jelen lévő, szubmikronos vagy mikronos méretű aeroszol részecskék, mikroorganizmusok, spórák, pollenek, vírusok. E részecskék fizikai paramétereinek vizsgálatkor fontos szerepet töltenek be a fényszóráson alapuló mérési módszerek.

A fényszóráson alapuló optikai részecskeszámítókban a részecskéket a többnyire lézerfényvel megvilágított érzékelő térfofagon vezetik át, ahol méri a részecskéről kiszórt fényt. Ezt elemelve határozzák meg a méreteloszlást, valamint kiszámolják a koncentrációt. A monokromatikus fényvel megvilágított homogén, gömb alakú részecskék fényszórását a Mie-elmélet írja le. Ezen az el-

ven alapuló műszerek által megcélzott méret-tartomány a néhány száz nanométertől kb. tíz mikrométerig terjed. A részecskeszámológok megjelenése óta rengeteg kísérlet történt az ideális detektálási geometria megtalálására, a monoton válaszfüggvényt előállító berendezés megalkotására.

Az általunk fejlesztett kéthullámhosszú multifunkciós aeroszol-analizátor esetében két, különböző hullámhosszú megvilágító lézert használtunk, és mindkét hullámhosszon mérjük a részecskéről az előre és a hátra szórt fény intenzitását egy bizonyos optimalizált térszögben (Nagy et al., 2001; Szymanski et al., 2002). Az így detektált négy intenzitásértéket összehasonlítva az elmélet által meghatározott értékekkel, négydimenziós kereséssel nemcsak a részecskék mérete vagy méreteloszlása határozható meg, de azok törésmutatója, illetve extinkciója is. Ezenkívül mérettartományonként mérhető a darabszám-koncentráció is, amit bizonyos közelítéssel át lehet számolni tömegkoncentrációra. A fenti paraméterek meghatározásának gyorsasága nagymértékben függ a digitalizálás felbontásától. Numerikus szimulációval megmutattuk, hogy a módszer még 10 % detektálási bizonytalanság esetén is megbízható adatokat szolgáltat, és a pontosság nem függ számottevően a mérettől.

Az általunk javasolt és kidolgozott mérési módszer nagy előnye, hogy nagy felbontással, *real-time* üzemmódban *in situ* képes meghatározni az aeroszol részecskék geometriai és optikai paramétereit (illetve ezek eloszlását), valamint a darabszám- és tömegkoncentrációt. Mindez lehetőséget ad a különböző



4. ábra • A légtör aeroszolszennyezettség mérő mobil laboratórium.

fajta légtör aeroszolok eredetének meghatározására, a szennyező források pontosabb felderítésére, ami mind környezetvédelmi, mind toxikológiai szempontból igen fontos.

A kifejlesztett berendezést csakúgy, mint az aeroszol szemcsék elektromos töltését mérő műszert beépítésre szánjuk a környezetvédelmi mérésekre létrehozott mobil aeroszol-vizsgáló laboratóriumba, amelyet a Széchenyi-program támogatásával hoztunk létre (4. ábra).

Fotonkorrelációs lézeres mérés technika

A légtörben lebegő szubmikronos (néhány-szor tíz nm méretű) részecskék sebességének és méretének kontaktusmentes meghatározására integrált optikai fotonkorrelációs berendezést építettünk. A berendezés fontosabb részegységei a valós idejű fotonkorrelátor, a stabilizált lézerefényforrás, a száloptikás levilágító és detektáló optika, valamint az adatgyűjtő és -feldolgozó elektronika. A berendezést ismert bemenő jelekre polisz-tíren latexszel kalibráltuk, majd különböző megvilágítási körülmények és beállítási paraméterek mellett végeztünk méréseket.

A mérés technikai eljárás számítástechnikai modellezése is megtörtént. Megállapítottuk, hogy az általunk alkalmazott fotonkorrelációs eljárással a részecskék sebessége és mérete egyidejűleg az 50 nm-es mérethatártól regisztrálható.

*

Számos gyakorlati alkalmazásban a szórt intenzitás eloszlásának ismerete fontos, mert ez hordoz alapvető információt az aeroszol optikai tulajdonságairól, vagy mert más fizikai mennyiségek meghatározásának pontosságát befolyásolja. Kézenfekvő példa erre a fény repülési idejének meghatározása a szórt fényimpulzusok alapján. Analitikus kifejezést találtunk a szórt intenzitás eloszlására abban az esetben, amikor az érzékelő térfogatban levő részecskék száma Poisson-

eloszlást, a részecskék mérete pedig log-normál eloszlást mutat (Jani – Czitrovsky, 1996a; Jani et al., 2002; Lipp – Jani, 2002). Az elért eredmény fontos következménye, hogy egy adott aeroszolmintára vonatkoztatva a szórt intenzitás várható értékének és szórásának aránya csak a részecskeszámától függ. E tulajdonságból következik, hogy az intenzitáseloszlás pontossági feltételeket szab a szórt felvillanásokhoz tartozó repülési idő mérésének pontosságára. Ennek detektálására új típusú Time to Digital Converter

(TDC) alapú többcsatornás mérésadatgyűjtő és kiértékelő rendszert (DAS) hoztunk létre. Ennek segítségével az általunk fejlesztett kiértékelő szoftver a környezetben terjedő lézerrimpulzusok jelenlétét és terjedési irányát határozza meg 1 fok pontossággal.

Kulcsszavak: *aeroszolak, fény-anyag kölcsönhatás, fényszórás, fotoeffektus, foton-számlálás, interferometria, korrelációs technika, környezetvédelem, kvantumoptika, sokfotonos folyamatok, squeezing*

IRODALOM

- Bánó G. – Horváth P. – Donkó Z. – Rózsa K. – Adamowicz, T. M. (2003): Applied Physics B. **77**, 403–407.
- Bánó G. – Horváth P. – Csillag L. – Glosik J. – Adamowicz, T. M. – Rózsa K. (2005): Applied Physics B. **80**, 215–219.
- Bergou, J. – Vamó S. – Farkas Gy. – Fedorov, M. V. (1983): Soviet Physics JETP. **85**, 57.
- Bertolotti, M. (1983): *Masers and Lasers, an Historical Approach*. Adam Hilger Ltd. Bristol
- Chaikov, L. L. – Fabelinski, I. L. – Krivokhizha, S. V. – Lugovaia, O. – Czitrovsky A. – Jani P. (1994): Journal of Raman Spectroscopy. **25**, 7–8, 463–468.
- Csillag L. – Jánossy M. – Kántor K. – Rózsa K. – Salamon T. (1970): Journal of Physics D: Applied Physics. **3**, 64.
- Csillag L. – Jánossy M. – Rózsa K. – Salamon T. (1974): Physics Letters. **50A**, 13.
- Czitrovsky A. (1997): In: Czitrovsky A. (ed.) *Trends in Laser Development, Application and Technologies*. Technoorg-Linda Ltd, Budapest, 105–127.
- Czitrovsky A. – Jani P. (1993a): Journal of Aerosol Science. **24**, 227–228.
- Czitrovsky A. – Jani P. (1993b): Optical Engineering. **32**, 10, 2557–2562.
- Czitrovsky A. – Jani P. (1994a): Journal of Aerosol Science. **25**, 465–466.
- Czitrovsky A. – Jani P. (1994b): Journal of Aerosol Science. **25**, 447–449.
- Czitrovsky A. – Jani P. (1995): Journal of Aerosol Science. **26**, 793–794.
- Czitrovsky A. – Kertész I. (eds.) (1997): *Trends in Laser Development, Application and Technologies*. Technoorg-Linda, Budapest
- Czitrovsky A. – Csonka P. – Jani P. – Ringelhann Á. – Bobvos J. (1996a): Egészségtudomány. XI. 215–25
- Czitrovsky A. – Csonka P.L. – Jani P. – Ringelhann Á. – Bobvos J. (1996b): Journal of Aerosol Science. **27S**, 19–20.
- Czitrovsky A. – Frecska J. – Jani P. – Matus L. – Nagy A. (1996c): Journal of Aerosol Science. **27S**, 467–68
- Czitrovsky A. – Jani P. – Maróti L. – Matus L. – Windberg P. (1998a): Journal of Aerosol Science. **29S1**, 471–472.
- Czitrovsky A. – Jani P. – Maróti L. – Matus L. – Pintér A. – Windberg P. (1998b): Journal of Aerosol Science. **29S1**, 469–470.
- Czitrovsky A. – Sergienko, A. – Jani P. – Nagy A. (2000a): Laser Physics. **10**, 1, 86–89.
- Czitrovsky A. – Sergienko, A. – Jani P. – Nagy A. (2000b): Metrologia. **37**, 617–620.
- Donkó Z. – Szalai L. – Rózsa K. – Ulbel, M. – Pöckl, M. (1998): THE IEEE Journal Of Quantum Electronics. **34**, 47.
- Farkas Gy. (1978): In: Eberly, J. H. (ed.): *Multiphoton Processes*. John Wiley and Sons, New York, 81.
- Farkas Gy. – Tóth Cs. (1989): In: Ehlötzky, F. (ed.): *Fundamentals of Laser Interactions II*, Springer, Heidelberg, 289.
- Farkas Gy. – Tóth Cs. (1990): Physical Review. **A41**, 4123.
- Farkas Gy. – Tóth Cs. (1992): Physics Letters. **A168**, 447–450.
- Farkas Gy. – Varga P. (1964): Journal of Scientific Instruments. **41**, 704.
- Farkas Gy. – Kertész I. – Náray Zs. – Varga P. (1967): Physics Letters. **25A**, 572.
- Farkas Gy. – Horváth Z.Gy. – Kertész I. – Kiss G. (1971): Lettere al Nuovo Cimento. **1**, 314.
- Farkas Gy. – Horváth Z.Gy. – Kertész I. (1972): Physics Letters. **39A**, 231.
- Farkas Gy. – Horváth Z.Gy. – Lompré, L. A. – Petite, G. (1977): Physica status solidi. **39**, (a) K25.
- Farkas Gy. – Tóth Cs. – Kőházi-Kis A. (1993): Optical Engineering. **32**, 2476.
- Hózer Z. – Windberg P. – Nagy I. – Maróti L. – Matus L. – Horváth M. – Pintér A. – Czitrovsky A. – Jani P. (2002): Nuclear Technology. **141**, 3, 244–256.
- Jani P. – Czitrovsky A. (1989–1991): In: *Yearbook of the Central Res. Inst. for Physics*. Res. Inst. for Solid

- State Physics, B12–B15.
- Jani P. – Czitrovsky A. (1996): In: *Simulation and Experiment in Laser Technology*: Akademie Verlag, Berlin, 269–274.
- Jani P. – Czitrovsky A. – Nagy A. – Hummel R. (1999): *Journal of Aerosol Science*. **30S**, 101–2
- Jani P. – Koniorczyk, M. – Nagy A. – Lipp Z. – Barta L. – László B. – Czitrovsky A. (2002): *Journal of Aerosol Science*. **33**, 697–704.
- Jánossy M. – Rózsa K. – Apai P. – Csillag L. (1984): *Optics Communication*. **49**, 278.
- Jánossy M. – Mezei P. – Horváth P. (1988): *Optics Communication*. **65**, 287.
- Jéki L. (2001): *KFKI. Arteria Studio*, Budapest
- Krivokhizha, S. V. – Lugovaia, O. – Fabelinski, I. L. – Chaikov, L. L. – Czitrovsky A. – Jani P. (1993): *JETP*, **103**, 115–124.
- Króó N. – Szentimay Zs. (1995): *Surface Science*. **331**, 1305.
- Króó N. – Szentimay Zs. (1996): *Surface Science*. **352**, 1043.
- Króó N. – Szentimay Zs. – Walter H. (2005): *Surface Science*. **582**, 110.
- Lipp Z. – Jani P. (2002): *SPIE*. **4829**, 1039–1040.
- Lompré, L. A. – Mainfray, G. – Manus, C. – Thébault, J. – Farkas Gy. (1979): *Physical Review Letters*. **43**, 1243.
- Nagy A. – Szymanski, W. W. – Czitrovsky A. – Schindler C. – Jani P. (2001): *Journal of Aerosol Science*. **32**, 1028–1029.
- Pintér A. – Csordás A. – Matus L. – Czitrovsky A. – Jani P. – Maróti L. – Hózer Z. – Windberg P. – Hummel R. (2000): *Journal of Nuclear Materials*. **282**, 205–215.
- Szymanski, W. – Nagy A. – Czitrovsky A. – Jani P. (2002): *Measurement Science and Technology*. **13**, 303–308.
- Tobin, R. C. – Peard, K. A. – Bode, G. – Rózsa K. – Donkó Z. – Szalai L. (1995): *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. **1**, 830.
- Varró S. (szerk.) (1985): *A kvantumelektronika alapjai*. Téli iskola, Visegrád
- Tóth Cs. – Farkas Gy. – Vodopyanov, K. L. (1991): *Applied Physics B*. **53**, 221–225.
- Varró S. – Farkas Gy. – Ehlötzky, F. (1999): *Optics Communication*. **172**, 47.
- Vétes Á. – Juhász P. – Jani P. – Czitrovsky A. (1988): *International Journal of Mass Spectrometry*. **82**, 45–70
- Yearbook (1985–1986): *Yearbook of Central Research Inst. for Physics*. KFKI, Budapest
- Yearbook (1989–1991): *Yearbook of Central Research Inst. for Physics*. Research Institute for Solid State Physics, KFKI-SZFKI, Budapest

