



- [2] Záray, Gy. (szerk.): Az elemanalitika korszerű módszerei, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2006.
- [3] Pröfrock, D.; Prange, A.: Appl. Spectrosc. (2012) 66, 843–868.
- [4] Limbeck, A.; Galler, P.; Bonta, M.; Bauer, G.; Nischkauer, W.; Vanhaecke, E.: Anal. Bioanal. Chem. (2015) 407, 6593–6617.
- [5] Galbács, G.: Anal. Bioanal. Chem. (2015) 407, 7537–7562.
- [6] Degueldre, C.; Favarger, P. Y.: Colloids Surf. A. (2003) 217, 137–142.
- [7] Lee, S.; Bi, X.; Reed, R.B.; Ranville, J.F.; Herckes, P.; Westerhoff, P.: Environ. Sci. Technol. (2014) 48, 10291–10300.
- [8] Montaña, M. D.; Olesik, J.W.; Barber, A.G.; Challis, K.; Ranville, J.F.: Anal. Bioanal. Chem. (2016) 408, 5053–5074.
- [9] Sági, A.; Kéri, A.; Kálomista, I.; Dobó, D.G.; Szamosvölgyi, Á.; Juhász, K.L.; Kukovecz, Á.; Kónya, Z.; Galbács, G.: J. Anal. At. Spectrom. (2017) 32, 996–1003.
- [10] Kálomista, I.; Kéri, A.; Galbács, G.: Talanta (2017) 172, 147–154.
- [11] Kálomista, I.; Kéri, A.; Galbács, G.: J. Anal. At. Spectrom. (2016) 31, 1112–1122.
- [12] Montaña, H. D.; Badiei, H. R.; Bazargan, S.; Ranville, J.F.: Environ. Sci.: Nano (2014) 1, 338–346.
- [13] Kálomista, I.; Kéri, A.; Ungor, D.; Csapó, E.; Dékány, I.; Prohaska, T.; Galbács, G.: Colloquium Spectroscopicum Internationale XL, Pisa, Italy, 2017, Paper III/PP-23.
- [14] Wang, J.; Lankone, R. S.; Reed R. B.; Fairbrother H.D.; Ranville, J. E.: Nanoimpact (2016) 1, 65–72.
- [15] Mitrano, D. M.; Ranville, J. E.; Bednar, A.; Kazor, K.; Hering A.S.; Higgins, C. P.: Environ. Sci.: Nano (2014) 1, 248–259.
- [16] Navratilova, J.; Praetorius, A.; Gondikas A.; Fabienke W.; von der Kammer, E.; Hofmann, T.: Int. J. Environ. Res. Public Health (2015) 12, 15756–15768.
- [17] Peters R.; Herrera-Rivera Z.; Undas A.; van der Lee M.; Marvin H.; Bouwmeester, H.; Weigel, S.: J. Anal. At. Spectrom. (2015) 30, 1274–1285.
- [18] Miyashita, S.; Fujii, S.; Shigeta, K.; Inagaki, K.: In Metallomics: Recent Analytical Techniques and Applications; Y. Ogra, T. Hirata; Eds.; Springer, Tokió, 2017, 107–124.
- [19] Mácsik Z., Vajda N., Széles, É.; Katona, R.: IAEA Safeguards symposium, Vienna, 2010, Paper IAEA-CN-184/177.
- [20] Liu, Z.; Li, X.; Xiao, G.; Chen, B.; He, M.; Hu, B.: Trends in Anal. Chem. (2017) 93, 78–101.
- [21] Bettmer, J.; Montes Bayón, M.; Encinar, J. R.; Fernández Sánchez, M. L.; del Rosario Fernández de la Campa, M.; Sanz Medel, A.: J. Proteomics (2009) 72, 989–1005.
- [22] Wang, M.; Feng, W.-Y.; Zhao, Y.-L.; Chai, Z.-F.: Mass Spectrom. Rev. (2010) 29, 326–348.
- [23] Hann, S.; Dernovics, M.; Koellensperger, G.: Current Opinions in Biotech. (2015) 31, 93–100.
- [24] Victor, G. M.; Tatár, E.; Virág, I.; Cseh, E.; Fodor, F.; Záray, Gy.: Anal. Bioanal. Chem. (2005) 383, 461–466.
- [25] Limbeck, A.; Galler, P.; Bonta, M.; Bauer, G.; Nischkauer, W.; Vanhaecke, E.: Anal. Bioanal. Chem. (2015) 407, 6593–6617.
- [26] Agatemor, C.; Beauchemin, D.: Anal. Chim. Acta. (2011) 706, 66–83.
- [27] Sinclair, D.J., Kinsley, L.P.J., McCulloch, M.T.: Geochim. Cosmochim. Acta. (1998) 62, 1889–1901.
- [28] Perkins, W.T.; Fuge, R.; Pearce, N.J.G.: J. Anal. At. Spectrom. (1991) 6, 445–449.
- [29] Phung, A.T.; Baeyens, W.; Leermakers, M.; Goderis, S.; Vanhaecke, F.; Gao, Y.: Talanta (2013) 6–14.
- [30] Jochum, K.P.; Scholz, D.; Weis, U.; Wilson, S.A.; Yang, Q.; Schwalb, A.; Börner, N.; Jacob, D.E.; Andrae, M.O.: Chem. Geol. (2012) 318, 31–44.
- [31] Pozebon, D.; Scheffler, G.L.; Dressler, V.L.; Nunes, M.A.G.: J. Anal. At. Spectrom. (2014) 29, 2204–2228.
- [32] Harel, D.J.; Kysenius, K.; Paul, B.; Knauer, B.; Hutchinson, R.W.; O'Connor, C.; Fryer, F.; Hennessey, T.P.; Bush, A.I.; Crouch, P.J.; Doble P.A.: J. Visualized Experiments (2017) 119, 1–8.
- [33] Becker, J.S.; Zoriy, M.; Wu, B.; Matusch, A.; Becker, J.S.: J. Anal. At. Spectrom. (2008) 23, 1275–1280.

Bozóki Zoltán – Szabó Anna – Ajtai Tibor – Szabó Gábor

■ MTA-SZTE Fotoakusztikus Kutatócsoport | Szegedi Tudományegyetem, Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

A fotoakusztikus gázdetektálás gyakorlati alkalmazásai

Bevezetés

A gázkoncentrációt mérő műszerek piacán egyre jelentősebb szerephez jutnak az optikai abszorpciós spektroszkópián alapuló mérési módszerek, sok esetben háttérbe szorítva az alternatív mérési módszereket (pl. szilárdtest-szenzorok, katalitikus érzékelők stb.). Ehhez a gyors népszerűség-növekedéshez szükséges hajtóerőt döntő mértékben a spektroszkópiai módszerek megbízhatósága, szelektivitása biztosítja, mivel egy molekula optikai abszorpciós spektruma ujjlenyomatszerűen azonosíthatóvá teszi a molekulát még egy sokkomponensű gázkeverék esetében is. A fotoakusztikus spektroszkópia egyike a látványosan fejlődő spektroszkópiai módszereknek, ami nagyrészt a módszer egyedi előnyeinek köszönhető.

Jelen dolgozat keretében megvizsgáljuk, hogy melyek azok az alkalmazási területek, ahol a fotoakusztikus módszer a legelőnyösebben használható, és arra a következtetésre jutunk, hogy mind ez idáig a módszer egy speciális változata, amit a továbbiakban differenciális fotoakusztikának fogunk nevezni, terjedt el leginkább

a gyakorlatban. A differenciális fotoakusztika legfontosabb jellemzője, hogy az alkalmazott fotoakusztikus rendszer kétcsatornás, és segítségével két, egymástól csak kismértékben eltérő gázáramban a két gázáram közötti kis koncentrációkülönbségek nagy pontosságú mérésére alkalmas (**1. ábra**).

A dolgozat felépítése a következő: a következő fejezetben ismertetjük a fotoakusztika alapjait és azokat az előnyös tulajdonságokat, amelyek a módszer gyakorlati elterjedését elősegítik. Ezután bemutatjuk a fotoakusztikus módszer néhány gyakorlati alkalmazását. Végül a módszer lehetséges új fejlődési irányait mutatjuk be.

A fotoakusztika alapjai

A fotoakusztikus jelkeltés alapja, hogy ha egy anyagmintában, amely lehet gáznemű, folyékony vagy akár szilárd halmazállapotú is [1], időben változó mértékben fény nyelődik el, akkor a mintában (illetve annak környezetében) akusztikus jel (hanghullám) keletkezik, melyet egy, a zárt vagy kvázizárt gáztérhez illesztett



mikrofonnal detektálni lehet. Ez az ún. fotoakusztikus vagy – a főleg az amerikai szakirodalomban időnként alkalmazott szóhasználat szerint – optoakusztikus effektus. A jelenséget A. G. Bell fedezte fel 1880-ban, amikor egy fonendoszkóp membránját, illetve a membránnal érintkező, erősen fényelnyelő folyadékot egy fényzaggató egységen (azaz egy forgó tárcsán) átvetetett, és így teljesítménymodulált napfényrel megvilágítva hangot észlelt. További vizsgálatai során azt is megfigyelte, hogy bizonyos fényzaggatósi frekvenciákon a keletkező jel rezonáns módon megerősödik. Megállapította, hogy a rezonáns erősödés frekvenciái megegyeznek a mintatartó (későbbiekben fotoakusztikus kamra) egy-egy akusztikus rezonanciafrekvenciájával.

Már a múlt század negyvenes éveiben felvetődött, hogy a fotoakusztikus módszert alkalmazni lehetne gázkomponensek koncentrációjának mérésére, de a megfelelő fényforrás hiánya miatt csak néhány ilyen irányú próbálkozás történt. A lézerek felfedezése a tudomány és a technika számos területe mellett a fotoakusztikus gázdetektálásban is forradalmi fejlődést idézett elő. Szinte a lézerek felfedezésével egy időben elkezdték vizsgálni a lézerek alkalmazhatóságát fotoakusztikus mérésekben. Hamar nyilvánvalóvá vált, hogy lézerekre alapozva olyan mérőeszközöket lehet létrehozni, amelyekkel szennyező komponensek koncentrációját kiemelkedően kis koncentrációban (ppb vagy sub-ppb) és – a lézerek keskeny emissziós sáv szélességének köszönhetően – nagy szelektivitással lehet mérni (2–3. ábra).

Virágkorát a fotoakusztikus módszer a múlt század 80-as éveiben élte, amikor CO és CO₂ gázlézerekre alapozva ppb vagy ppb alatti koncentrációk kimutathatóságát demonstrálták különböző kutatólaboratóriumokban. A gázlézerek előnye, hogy fénytelsítményük a watt nagyságrendbe esik, és működési hullámhosszuk a közép-infravörösben található, ahol a legtöbb gázkomponens erős (jellemzően rezgési alapátmenetekhez tartozó) elnyelési vonalakkal rendelkezik. Azonban ezek a lézerrendszerek rendkívül bonyolultak és nehezen üzemeltethetők voltak, ezért a kezdeti lelkesedés elmúta után egyértelművé vált, hogy a gázlézereken alapuló fotoakusztikus rendszerek gyakorlati alkalmazhatósága erősen korlátozott. Példaként megemlíthető az a zürichi ETH intézetben kifejlesztett CO₂-lézeres fotoakusztikus gázdetektáló rendszer [2], melyet egy kamionba telepítettek, és működtetéséhez jelentős szakembergárdára volt szükség. A rendszer bonyolultsága az elért nagy érzékenység ellenére meggátolta a módszer széles körű elterjedését.

Az 1990-es évek elejétől kezdve újfajta fényforrások alkalmazása tette lehetővé a fotoakusztikus módszer egyre szélesebb körű elterjedését az iparban és a környezetvédelemben. Különösen

előnyösen alkalmazhatóknak bizonyultak fotoakusztikus mérések céljára a szobahőmérsékleten működő, a lézere adott áram változtatásával hullámhossz-hangolható, optikai szálba csatolt fényű diódalézerek, melyeket eredetileg telekommunikációs alkalmazásokra fejlesztettek ki. E lézerek várható élettartalma meghaladja a tíz évet, nagy mechanikai stabilitással rendelkeznek, és működésük teljesen automatizálható. A diódalézeres fényforrások alkalmazásával a fotoakusztikus rendszerek felépítése jelentősen leegyszerűsödött. Ugyanakkor, mivel a szoba-hőmérsékletű diódalézerek a közeli infravörös tartományban emittálnak, ahol a molekulák viszonylag gyenge rezgési felhangjai és kombinációs sávjai találhatóak, a diódalézeres fotoakusztikus detektálással elért legkisebb kimutatható koncentráció jellemzően a ppm, néhány esetben a sub-ppm tartományba esik. Ezért a fotoakusztikus rendszerek fejlesztésének és alkalmazásának elsődleges irányává az emissziós mérések váltak, ahol viszonylag nagy koncentrációkat kell mérni, de kiemelkedő fontossággal bír a rendszer rövid (lehetőleg másodperc közeli) válaszideje, nagy megbízhatósága, robusztussága.

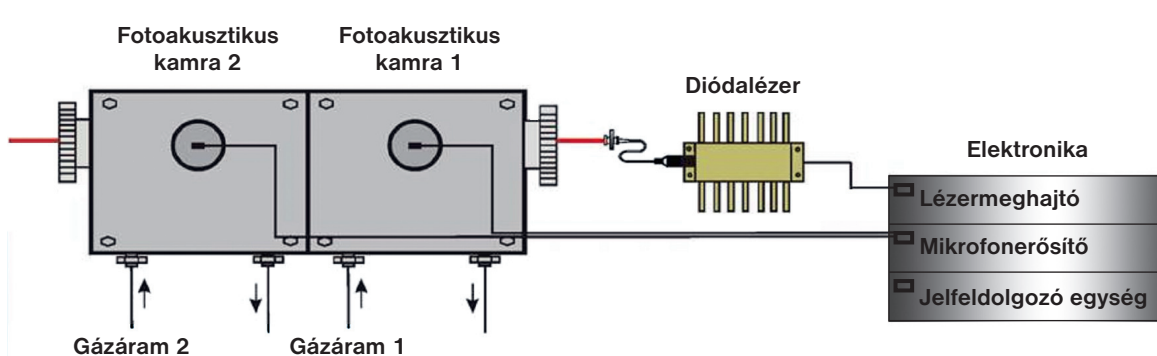
Továbbá a fotoakusztikus módszer egyik nagy előnye, hogy a fotoakusztikus jelet gerjesztő fény a fotoakusztikus kamrán áthaladva általában csak kismértékben gyengül, és mivel a fotoakusztikus mérések során nem a mérőkamrán áthaladó, hanem a kamrában elnyelt fény mérése történik, az áthaladó fény felhasználható egy második (esetleg egy harmadik stb.) kamrában a fotoakusztikus jel mérésére (1. ábra). Ennek megfelelően a fotoakusztikus mérési módszert korábban már számos olyan esetben alkalmazták sikeresen, amikor két vagy több gázáramban szimultán vagy kváziszimultán folyik egy vagy több komponens mérése.

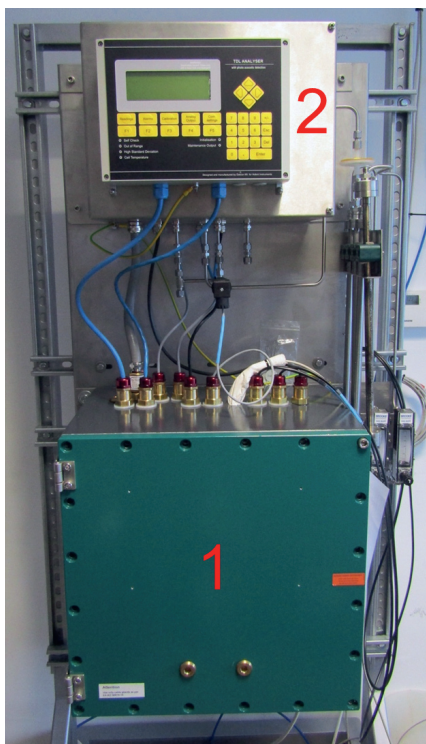
Példák a fotoakusztika gyakorlati alkalmazásaira

Földgáz kén-hidrogén- és vízgőztartalmának mérése

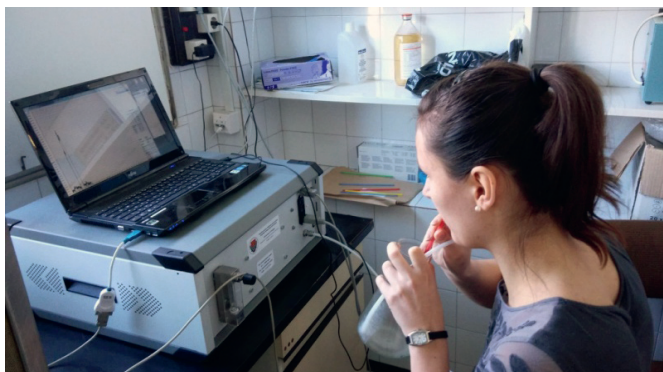
A kén-hidrogén (H₂S) és a vízgőz (H₂O) mérése kiemelt fontossággal bír a földgáziparban, mivel a H₂S rendkívül korrozív hatású a csővezetésekre, különösen abban az esetben, amikor a földgáz nagy koncentrációban vízgőzt is tartalmaz. Továbbá a földgáz elégetésekor a H₂S-ből a környezetre káros kén-dioxid (SO₂) keletkezik. Ezért a kén-hidrogén-tartalom a vízgőz- és szén-dioxid- (CO₂) tartalommal együtt a földgáz kritikus minőségi paramétere, és mint ilyet szigorúan szabályozni és ellenőrizni kell. Különböző módszerek léteznek ezeknek a komponenseknek a koncentrációmérésére, de ezek hosszú távú megbízhatósága erősen korlátozott, ezért egyik módszer alkalmazása sem vált még

1. ábra. A fotoakusztikus mérési összeállítás két gázáramban történő mérésekhez. Ez az elrendezés optimálisan használható a két gázárambeli kis különbségek differenciális méréséhez



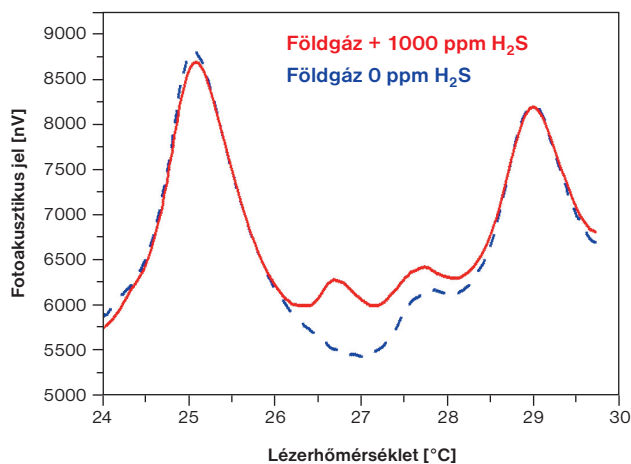


2. ábra. Fotoakusztikus kén-hidrogén-mérő fényképe. 1. A nyomás-állító tokozás, amelyben az elektronika és a lézerek találhatók, 2. a fotoakusztikus kamrákat tartalmazó rozsdamentes doboz



3. ábra. Kilélegzett levegő metánkoncentrációjának mérése fotoakusztikus műszerrel. Az alany egy csövön keresztül fújja egy üvegpalackba a kilélegzett levegőt, amelyet a műszer folyamatos gázáramlás mellett mintavételez

teljesen rutinszerűvé, illetve általánossá földgáziparban. A kén-hidrogén és a vízgőz olyan földgázszennyező komponensek, melyek koncentrációjának folyamatos mérését törvényi szabályozás írja elő. Spektroszkópiai elvű mérésekre kiválóan alkalmas a közeli infravörös tartomány, ezen belül vízgőz esetén az 1371 nm, míg kén-hidrogén esetében az 1574 nm körüli hullámhossztartomány. Azonban a spektroszkópiai elvű koncentrációméréseket nehezíti az a körülmény, hogy a közeli infravörös hullámhossztartományban a földgáz fő komponensei (azaz a szénhidrogének és ezen belül elsősorban a metán (CH_4), valamint a szén-dioxid) jelentős mértékű elnyeléssel bír. Valójában ezeknek a spektrális interferenciát okozó CH_4 -, CO_2 -elnyelési vonalaknak az egységnyi koncentrációra normált elnyelése nagyságrendekkel kisebb, mint a mérendő H_2S és H_2O komponenseké, azonban a koncent-



4. ábra. Földgáz fotoakusztikus spektruma mesterségesen megnövelt H_2S -tartalom mellett, illetve a kén-hidrogén-mentesített esetben (megjegyzés: a valódi mérési körülmények között, amikor néhány ppm H_2S -koncentráció mérésére van szükség, vizuálisan nem érzékelhető a H_2S -t tartalmazó és a nullgáz spektruma közötti különbség)

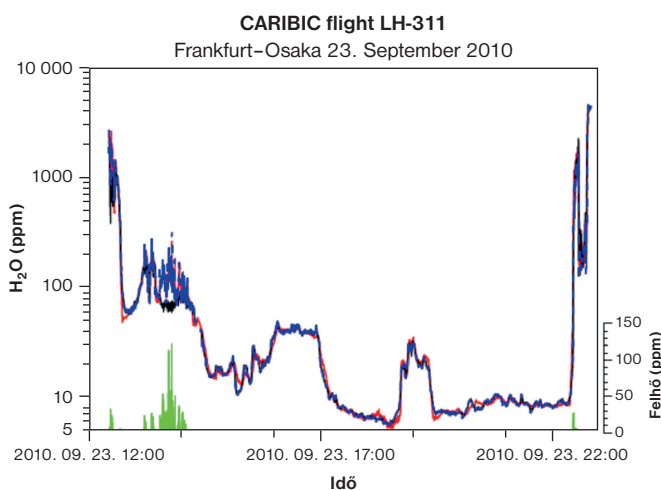
rációjuk nagyságrendekkel nagyobb (4. ábra). Ez teszi szükségessé a differenciális mérési elrendezést, amit úgy valósítunk meg, hogy az egyik kamrába a mérendő gázmintát juttatjuk, míg a másik kamrába bevezetett gázmintát előzetesen átvezetjük egy kén-hidrogén-mentesítő vegyszerezen, azaz nullgázt (kén-hidrogén-mentes gázt) generálunk [3]. Mivel a vegyszer lényegében nem változtatja meg a H_2S -koncentrációt, így a mérőkamrában mért $\text{H}_2\text{S} + \text{CO}_2$ jelből levonva a referenciakamrában mért CO_2 jelet, a különbségi jel arányos lesz a H_2S -koncentrációval, azaz a differenciális mérés segítségével a H_2S -jel elfedését meg lehet szüntetni (vagy legalábbis nagymértékben csökkenteni lehet). Erre a differenciális mérési eljárásra alapozott fotoakusztikus mérőműszereket gyárt a holland Hobre Instruments BV cég, illetve magyarországi leányvállalata, a Hobre Laser Technology Kft. Eddig több mint 60 ilyen műszert telepítettek a világ számos részén, például Norvégiában, Brazíliában, többek között tengeri fúrótornyokra; és éveken át tartó folyamatos, hibamentes működésükkel bizonyítják a fotoakusztikus módszer előnyös tulajdonságait.

Repülőgépes vízgőz- és teljes víztartalom-mérés

A légkörben található vízgőznek, illetve a felhőknek a globális energiamérlegben játszott szerepének fontossága közismert. Ennek megfelelően évtizedek óta komoly erőfeszítések történnek arra, hogy minél több repülőgépet felszereljenek legalábbis vízgőz-, de optimális esetben kombinált vízgőz- és teljes víztartalom-mérő műszerekkel (lásd a különböző nemzetközi projekteket, pl. MOZAIC, CARIBIC, IAGOS). Ezen belül a CARIBIC-projektben egy Szegedi Tudományegyetemen kifejlesztett műszer szolgál a vízgőz és a teljes víztartalom mérésére az alábbiak szerint [4]. A repülőgépre telepített fotoakusztikus műszerbe a repülőgép külső testére szerelt speciális mintavételező egységből jut a két mérendő gázminta, méghozzá oly módon, hogy az egyik mérőkamrába (ami a levegő vízgőztartalmát méri) a levegőből csak a vízgőz jut, míg a másik mérőkamrába (ami a levegő teljes víztartalmát méri) a vízgőzön kívül bejutnak a levegőben található folyékony vagy szilárd fázisú ún. felhőcseppek is. (Megjegyzés: a mintavételezés úgy van kialakítva, hogy a felhőcseppek teljes mértékben elpárolognak, mire a fotoakusztikus mérőkamrába jutnak, azaz



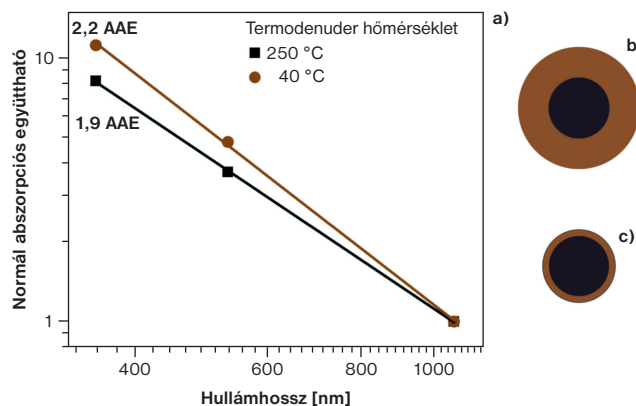
vízgőzként jelennek meg a teljes víztartalmat mérő kamrában). Ha a két mérőkamrában ugyanazt a vízgőz-koncentrációt mérjük, azt jelenti, hogy az aktuálisan mintavételezett levegőtérben nincsenek felhőcseppek. Azonban, ha a teljes víztartalmat mérő kamrában mért vízgőz-koncentráció meghaladja a másik kamrában mért vízgőz-koncentrációt, akkor a repülőgép felhőn halad keresztül, és a teljes víztartalmat mérő kamrában mért vízgőz-koncentrációból levonva a vízgőzt mérő kamrában mért vízgőz-koncentrációt megkapjuk az ún. felhőcsepp-koncentrációt (5. ábra).



5. ábra. Atmoszférikus vízgőz (fekete görbe) és a teljes víztartalom (piros görbe: fotoakusztikusan mért, kék görbe: referenciamódszerrel mért), valamint a kettő különbségéből számolt felhőcsepp-koncentráció (zöld görbe) mérése fotoakusztikus rendszerrel egy repülőgépes út során

Légköri aeroszol-részecskék vizsgálata

A légköri fényelnyelő aeroszol-részecskék jellemzően a teljes láttható tartományban elnyelik a fényt, de az elnyelés hullámhosszfüggése függ a részecskék összetételétől, és attól, hogy milyen forrásból származnak [5]. A részecskék abszorpciós spektrumának jellemzésére bevezették a log-log skálán ábrázolt abszorpciós spektrum meredekségét, az ún. Absorption Angström Exponentst (AAE). Az AAE érték fotoakusztikus mérése így egyedülálló módon teszi lehetővé a légköri aeroszol-részecskék in-situ (természetes közegükben) és valós időben történő azonosítását. A fényelnyelő (korom) részecskéket bonyolult keveredési geometriájú, alacsony termális stabilitású (illékony) és magas hőtűrő képességgel rendelkező (nem illékony) komponensek alkotják. Az illékony komponenseket (pl. termikus módon, azaz felfűtve) eltávolítva a részecskékről, megváltozik az optikai abszorpció mértéke és hullámhosszfüggése, így az optikai mérésekből mennyiségi és minőségi információt kaphatunk a részecske keveredési állapotáról is. Ilyen célú mérésekre lett kifejlesztve egy több hullámhosszon működő kétkamrás fotoakusztikus rendszer, ahol az egyik kamra ki lett egészítve egy ún. termodenuder (TD) egységgel, amely alkalmas az aeroszol-részecskék illékony komponensének eltávolítására [6]. Ha a két mérőkamra egyikébe környezeti levegőt, míg a másikba a TD egységben, adott hőmérsékleten előkezelt környezeti levegőt juttatunk, akkor a két kamrában mért, az aeroszol által keltett fotoakusztikus jelek különbsége már nemcsak a részecske átlagolt spektrális sajátosságairól, hanem a keveredési állapotáról, az illékony komponensek kémiai



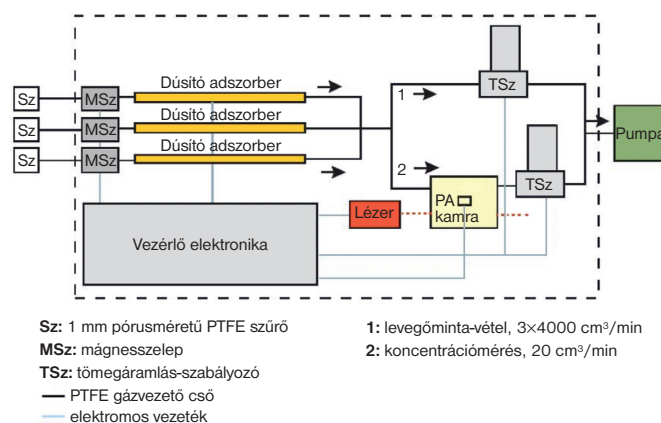
6. ábra. a) Fotoakusztikus aeroszolvérővel különböző termodenuder hőmérséklet mellett mért AAE értékek (szerves)mag – (szervetlen)burok aeroszolkeveredési geometriák esetén, illetve sématis ábrák a különböző keveredési geometriákról: b) környezeti hőmérsékleten, c) termális kezelés után

és fizikai tulajdonságairól is hordoz információt. A légköri fényelnyelő részecskék fotoakusztikus, több hullámhosszú, többsatornás, komplex, összetétel- és keveredési állapotfüggő spektrális válaszában in-situ vizsgálata a jövőben új lehetőséget teremthet a legfontosabb klimatikus és élettani kockázattal rendelkező részecskék szelektív és valós idejű monitorozásában (6. ábra).

Föld-felszín feletti koncentrációgradiensek mérése

A légkörben számos komponens koncentrációja változik a Föld-felszín feletti magasság függvényében, és a koncentrációgradiens, illetve az ebből számolt kibocsátási vagy ülepedési fluxus fontos információkat hordoz például a növényzetről. Egy háromsatornás fotoakusztikus rendszer bizonyítottan alkalmas ilyen (pl. ammóniafluxus) mérésre. A koncentrációprofil meghatározásához általában 2–6 különböző magasságban mért koncentrációértéket használnak. A fluxus számításához elvileg elegendő két különböző magasságban mérni, a további mérési pontok a számítás pontosságát, megbízhatóságát növelik. A Szegedi Tudományegyetemen fejlesztett terepi ammóniafluxus-mérő fotoakusztikus műszer (7. ábra) három mintavevő ággal rendelkezik, így három egyidejű, különböző magasságú mérést tesz lehetővé oly módon, hogy a rendszer mindegyik mérőága tartalmaz egy-

7. ábra. Három különböző mérési magasságban nagy pontosságú ammóniakoncentráció-mérésre alkalmas fotoakusztikus berendezés





egy dúsító abszorbert, amin első lépésben keresztüláramlik a különböző mérési magasságokból vett levegőminta, majd ezek egymás után történő kifűtésének segítségével visszanyerjük az elnyelt ammóniát, aminek összmenyiségét egy fotoakusztikus mérőkamrában mérjük [7]. Egy háromhetes nemzetközi összehasonlító mérésorozat eredményei bizonyítják, hogy a fotoakusztikus műszer kimutatási határa és időbeli felbontása megfelel a környezetvédelmi célú ammóniakoncentráció-mérés elvárásainak, továbbá lényegesen kevesebb karbantartást igényel és egyszerűbben működtethető, mint a legtöbb, más elven működő mérőműszer [8].

Orvosi alkalmazások

A kilélegzett gázok a szervezet anyagcseréjéről, biológiai állapotról hordoznak információt, ezért detektálásuk az orvosi diagnosztikai kutatások egyik dinamikus fejlődő területe. A módszer valós idejű, non-invazív vizsgálatokat biztosít, alkalmazható diagnosztikai célra, terápia és fiziológiai folyamatok nyomon követésére. A kilélegzett levegőanalízishez használt mérőrendszereknél a kiváló szelektivitás és reprodukálhatóság alapkövetelmény, emellett fontos a folyamatos mintavételezés lehetősége, a rövid válaszidő, a hordozhatóság és a könnyű kezelhetőség. A lézerspektroszkópiai elven működő gázkoncentráció-mérőket – köztük a fotoakusztikus spektroszkópiai elvűeket – elterjedten alkalmazzák élettani és orvosi kutatásokhoz. A diódalézeres fotoakusztikus mérés különösen előnyösnek bizonyult a kilélegzett metánkoncentráció meghatározásához humán és állatmodellekben [9]. A vizsgálatok során a mérési tartomány tipikusan 0,5–200 ppmV között változhat. A Szegedi Tudományegyetem Sebészeti Műtéttani Intézetében az oxidoreduktív stresszállapotok és a vékonybél mikrokeringési zavarainak kilélegzett metánkoncentráció-változásaival kapcsolatos összefüggéseit vizsgálják fotoakusztikus műszerrel [10]. Eredményeik alapján a kilélegzett metánkoncentráció mérése non-invazív, valós idejű diagnosztikai eljárásnak ígérkezik különböző nehezen észlelhető kórállapotokban [11].

Lehetséges új fejlődési irányok

Mindenképpen fontos megemlíteni az új fényforrások megjelenését, melyek ára folyamatosan csökken, míg megbízhatóságuk nő, így egyre inkább alkalmassá válnak arra, hogy a fotoakusztikus mérőrendszerek fényforrásaiként hasznosuljanak [12]. Ezek közül is kiemelkednek az ún. kvantumkaskád-lézerek, melyek a közép-infravörösben működnek, és segítségükkel a közeli infravörösnél nagyságrendekkel erősebb elnyelési vonalakon lehet fotoakusztikus méréseket végezni, azaz a közeli infravörös tartományra jellemző ppm helyett ppb vagy sub-ppb érzékenységek érhetők el. Félvezető lézerekben alapvetően a félvezető anyagok változtatásával érhetők el különböző, tipikusan 3 μm -nél kisebb emissziós hullámhosszak. A kvantumkaskád-lézerek esetén viszont a hullámhossz elsősorban a geometriai struktúráról függ, és megfelelő tervezéssel 4–24 μm között bármely hullámhosszú emisszió elérhetővé válik. A nagyobb érzékenységnek és a gerjeszthető hullámhossz-tartomány bővülésének köszönhetően új komponensek válnak mérhetővé, és ez által jelentősen bővül az alkalmazási lehetőségek köre is.

Az új fényforrások fotoakusztikus rendszerekbe történő integrálása mellett intenzíven kutatott az új típusú detektorok, valamint új kamratípusok bevezetése. Egyre szélesebb körben elterjedt például a kvarckristály detektoron alapuló mérés, amelynek a detektor egy hangvilla alakú kvarckristály [13]; legfőbb elő-

nyei a nagy érzékenység és a kis térfogatú gázminta mérésének lehetősége. A fotoakusztikus kamrák fejlesztésekor általános cél a mérés pontosságnak növelése, emellett azonban érdemes megemlíteni, hogy a valós idejű, rövid válaszidejű koncentrációadatokot igénylő alkalmazások megjelenése miatt gázkezelés nélküli, nyitott kamrák is készülnek [14, 15].

Köszönetnyilvánítás. Szerzők köszönetet nyilvánítanak a GINOP-2.3.2-15-2016-00036 és az EFOP-3.6.1-16-2016-00014 projektek által nyújtott támogatásáért.

IRODALOM

- [1] Kovács M., Dóka O., Bicanic D., Ajtony Zs.: *Microchemical Journal* (2017) 135, 100–104.
- [2] Meyer, P. L.; Sigrist, M. W.: *Rev. Sci. Instrum.* (1990) 61, 779–1807.
- [3] Varga, A.; Bozóki, Z.; Szakáll, M.; Szabó, G.: *Appl. Phys. B* (2006) 85, 315–321.
- [4] Tátrai, D.; Bozóki, Z.; Smit, H.; Rolf, C.; Spelten, N.; Krämer, M.; Filges, A.; Gerbig, C.; Gulyás, G.; Szabó, G.: *Atmos. Meas. Tech.* (2014) 7, 6359–6384.
- [5] Utry, N.; Ajtai, T.; Filep, Á.; Pintér, M.; Török, Z.; Bozóki, Z.; Szabó, G.: *Atmos. Environ.* (2014) 91, 52–59.
- [6] Ajtai, T.; Pintér, M.; Utry, N.; Kiss-Albert, G.; Gulyás, G.; Pusztai, P.; Puskás, R.; Bereczky, Á.; Szabados, Gy.; Szabó, G.; Kónya, Z.; Bozóki, Z.: *Atmos. Environ.* (2016) 134, 109–120.
- [7] Pogány, A.; Mohácsi, Á.; Jones, S. K.; Nemitz, E.; Varga, A.; Bozóki, Z.; Galbács, Z.; Weidinger, T.; Horváth, L.; Szabó, G.: *Atmos. Environ.* (2010) 44, 1490–1496.
- [8] von Bobrutzki, K.; Braban, C. E.; Famulari, D.; Jones, S. K.; Blackall, T.; Smith, T. E. L.; Blom, M.; Coe, H.; Gallagher, M.; Ghalaieny, M.; McGillen, M. R.; Percival, C. J.; Whitehead, J. D.; Ellis, R.; Murphy, J.; Mohacs, A.; Pogany, A.; Junninen, H.; Ranttanen, S.; Sutton, M. A.; Nemitz, E.: *Atmos. Meas. Tech.* (2010) 3, 91–112.
- [9] Tuboly, E.; Szabó, A.; Erős, G.; Mohácsi, Á.; Szabó, G.; Tengölics, R.; Rákhely, G.; Boros, M.: *J. Breath Res.* (2013) 7 (4), 046004.
- [10] Szabó, A.; Ruzsanyi, V.; Unterkofler, K.; Mohácsi, Á.; Tuboly, E.; Boros, M.; Szabó, G.; Hinterhuber, H.; Amann, A.: *J. Breath Res.* (2015) 9(1) 016009.
- [11] Tuboly, E.; Molnár, R.; Tőkés, T.; Turányi, R.; Hartmann, P.; Mészáros, A.; Striffler, G.; Földesi, I.; Siska, A.; Szabó, A.; Mohácsi, Á.; Szabó, G.; Boros, M.: *Sci. Rep.* (2017) 7, 7329.
- [12] Zhang, L.; Tian, G.; Li, J.; Yu, B.: *Appl. Spectrosc.* (2014) 68(10), 1095–1107.
- [13] Patimisco, P.; Scamarcio, G.; Tittel, F. K.; Spagnolo, V.: *Sensors* (2014) 14(4), 6165–6206.
- [14] Bozóki, Z.; Szabó, A.; Mohácsi, Á.; Szabó, G.: *Sensor Actuat. B* (2010) 147, 206–212.
- [15] Lang, B.; Bergmann, A.: *Proc. IEEE Sensors* (2016) 1–3.

A cikk első szerzője, Bozóki Zoltán 2017 végén Gábor Dénes-díjat kapott.

HUNGARIAN CHEMICAL JOURNAL

LXXIII. No. 2. February

CONTENTS

ANALYTICAL CHEMISTRY – 2018

<i>Editorial remarks</i>	38
KATALIN KÖVÉR, FERENC RITZ, and GÁBOR GALBÁCS	
<i>Challenges in the analysis of biologics</i>	39
ZOLTÁN URBÁNYI	
<i>Characterization of therapeutic proteins: primary structure investigations with MS</i>	43
ZSOLT BIHARI, ATTILA BAGDI, SAROLTA BAGI-TIMÁRI, and VIKTOR HÁDA	
<i>Role of NMR in the analysis of biologics</i>	49
RÓBERT KISS, ÁDÁM FIZIL, and CSABA SZÁNTAY	
<i>Application of chromatographic packing in microchips</i>	56
ATTILA GÁSPÁR	
<i>Recent research trends in ICP–MS</i>	60
MIHÁLY BRAUN, and GÁBOR GALBÁCS	
<i>Practical applications of photoacoustic gas detection</i>	64
ZOLTÁN BOZÓKI, ANNA SZABÓ, TIBOR AJTAI, and GÁBOR SZABÓ	