

Érzékelő nanoszerkezetek fejlesztése és optikai monitorozása

A K115852 számú projekt záró beszámoló

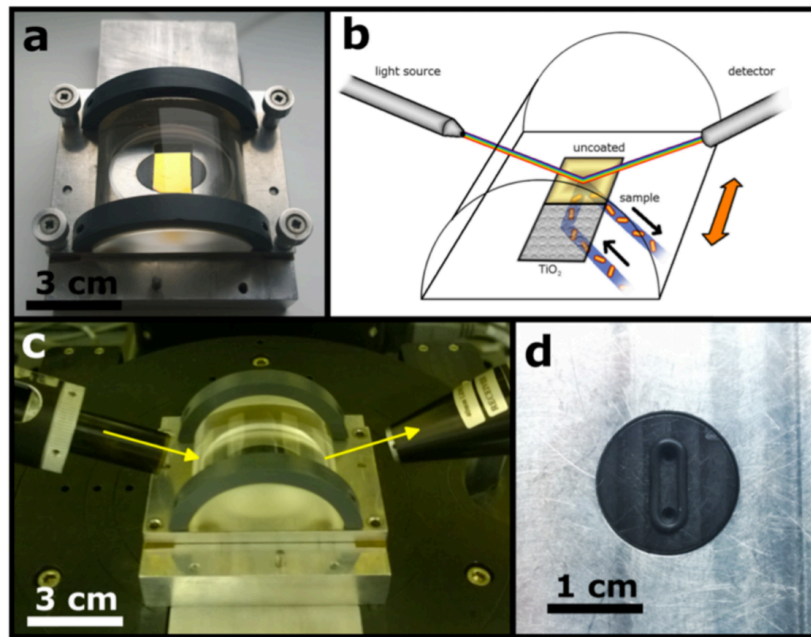
A projekt során elért legfontosabb eredmények

A projekt célja *in situ* optikai vizsgálatra alkalmas cellák és mérési elrendezések, valamint az érzékeny mérések elvégzéséhez szükséges rétegrendszerek megtervezése és létrehozása volt. A projekt ezzel kapcsolatos legfőbb eredményei:

- Megépítettünk egy belső visszaverődés elvén működő Kretschmann elrendezésű folyadékcellát (1. ábra), amelyben több beesési szögben, szabályozott hőmérsékleten, kis mintatérfogat mellett (~10 mikroliter) 0,9 mm x 0,3 mm fókuszméret pásztázásával [1] végezhető spektroszkópiai ellipszometriai mérés. [2,3]
- Az *in situ* bioellipszometriát interferometrikus hullámvezető módszerrel kombináltuk, és az érzékenység demonstrálására a saját építésű integrált berendezéssel méréseket végeztünk fehérjéken, törésmutató-hangolt folyadékban és polimer molekulák adszorpciója közben. [4,5]
- A Kretschmann cellában plazmon erősített ellipszometriai méréseket valósítottunk meg aranyozott üveglapokkal, melyek során meghatároztuk az optimális mérési paramétereket és rétegvastagságokat, valamint az érzékenység jelentős javulását mutattuk ki a hagyományos mérési módszerekhez képest. [6]
- Vizsgáltuk fehérjerétegek kitapadását és mérési pontosságát aranyfelületen referenciamódszerekkel összevetve [7], és a kovalens kötést segítő eljárások kidolgozásával [lab19a].
- Nanostrukturált [8–10] és homogén [11–18] vékonyrétegeket fejlesztettünk amelyek közvetlenül segítik az érzékelést [2], elősegítik vagy gátolják [11] az érzékelendő anyagok adszorpcióját vagy optikai erősítést tesznek lehetővé plazmonikus vagy Bragg multiréteg szerkezetben.
- A projekt során kifejlesztett plazmonikus Kretschmann ellipszometriai cellával megmutattuk, hogy arany felületére felvitt titanát nanoszerkezetek segítik a fehérjék és sejtek felületre való kitapadását és érzékelését. [2]
- Kvantitatív modellt alkottunk felületi érdesség optikai minősítésére spekuláris elrendezésben különböző korrelációs hosszal és amplitudóval jellemezhető érdességek esetében. [19]
- Az egy év hosszabbítást felhasználtuk többek között jövőbe mutató lehetőségek feltárására is, melynek során a kombinatorikus anyagtudomány alkalmazhatóságát tanulmányoztuk. [20]
- Az eredmények alapját képezték két sikeresen megvédett és egy 90 százalékos állapotban lévő PhD munkának valamint 22 közleménynek, amelyek összesített impakt faktora 43,03 (3,9/FTE, 2,7/MFt).

Az egyes években elvégzett munka összegzése

Az első évben elkészítettünk egy speciális félhengeres folyadékcellát (1. ábra), amely alkalmas több beesési szögű, többcsatornás, plazmonikai spektroszkópiai ellipszometriai mérés elvégzésére másodperc alatti időfelbontással a 350-1690 nanométer hullámhossztartományban. A spektroszkópiai mérésből komplex modellek alkothatók, így lehetővé válik összetett szerkezetek vizsgálata, mint a titanát nanorészecske rétegre leválasztott fibrinogén, polielektrolit és sejtek vizsgálata. Ezeket a méréseket megvalósítottuk és publikáltuk [2], valamint Nádor Judit sikeresen megvédett doktori értekezésének is alapját képezte.



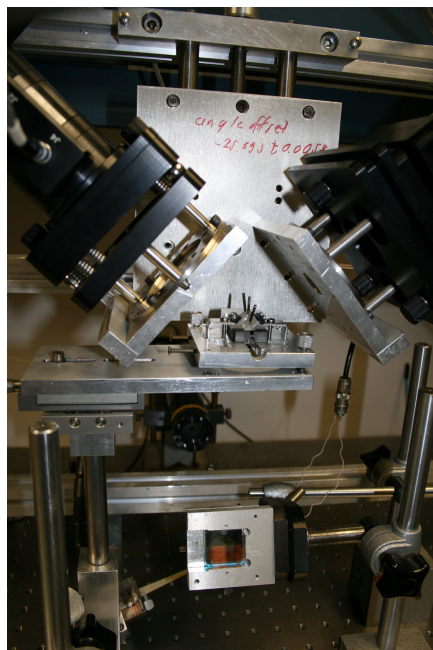
1. ábra: Saját tervezésű, változtatható beesési szögű, kis térfogatú (10 mikroliter), több pozícióban való mérést is lehetővé tevő, kereskedelmi ellipszométer léptetőasztalára szerelhető, plazmonikus Kretschmann elrendezésű folyadékcella. [2]

Elkezdtünk megépíteni egy javított cella konstrukciót, amellyel a 193-350 nanométer közötti hullámhossztartomány is lefedhető. Ez a fehérjék vizsgálatának érzékenységét hivatott növelni. A cella első konstrukciója és a tesztmérések elkészültek.

Megépítettünk és demonstrációs méréseket végeztünk egy speciális ellipszometriai - hullámvezető interferometriai kombinált berendezéssel (2. ábra). Ebben egyidőben végezhető el az ellipszometriai és az interferometriai mérés ugyanazon leválasztás közben. A berendezéssel glicerinnel oldat és fehérjeadszorpció folyamatkövető mérést végeztünk el. [4] [ago16a]

Tanulmányoztuk szenzorikai célra is alkalmazható porózus anyagok ellipszometriai modellezését. Foglalkoztunk az inhomogenitással és széles a hullámhossztartományban végzett mérések előnyeivel. Ez a szerzőcélú ellipszometriai alkalmazáshoz elengedhetetlenül fontos. Az eredmények a rangos publikáció mellett [8] fontos részét képezték Fodor Bálint sikeresen megvédett doktori értekezésének is.

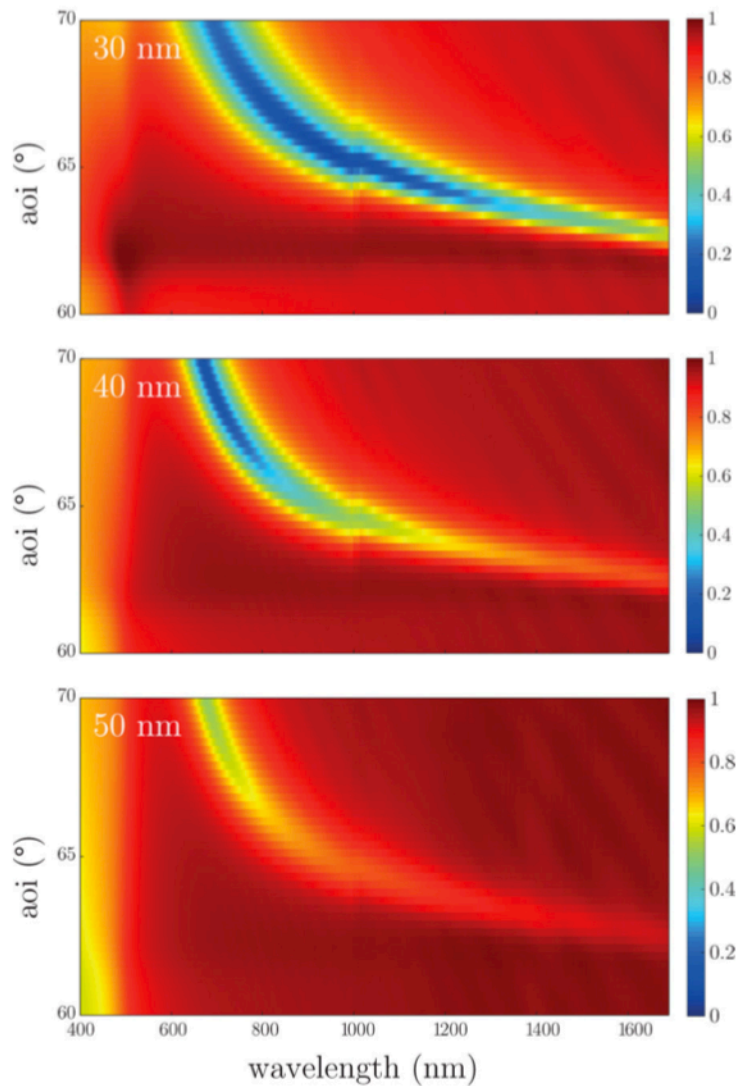
Foglalkoztunk egy a szenzorikában és a végelelemes optikai modellezésben egyaránt fundamentális problémával, a felületi érdesség figyelembevételével. Egy 1998-as cikk eredményeit felidézve szisztematikusan változó RMS érdesség és korrelációs hossz paraméterekkel modelleztünk felületi struktúrákat, amelyeket az ellipszometriában szokásos effektív közeg módszerrel közelítettünk, és a modell illesztéséből kapott rétegvastagság és az érdesség-paraméterek közötti összefüggéseket vizsgáltuk. [19]



2. ábra: Saját fejlesztésű kombinált ellipszometriai-hullámvezető interferometriai mérőberendezés. [4] [ago16a] A kép tetején saját építésű goniométerre szereltünk egy gyári ellipszométert. Alul található a lézerforrás és a fázistolást létrehozó optikai elemek. A kép közepén látható kisméretű folyadékcella nyomtatással készült. A mérés speciális hullámvezető chipen folyik, amelybe nagyon finom jusztirozást igénylő folyamat végén alulról csatoljuk be a lézer fényét.

A második évben megterveztünk és megépítettünk egy Fourier scatterométert periodikus szerkezetek vizsgálatára. A mintát olyan mintatartóra helyeztük, amely mikron alatti pontossággal képes pozicionálni a mintát. Optikai elrendezést építettünk, amely alkalmas a továbbfejlesztésre olyan módon, hogy ellipszometriai méréseket is végezhesünk vele.

Lapkákat fejlesztettünk az interferometriai és ellipszometriai mérésekhez. A kombinált mérés továbbfejlesztéséhez elkezdtük a lapkabefogó. Tesztméréseket végeztünk nanocsövek, platina nanorészecskék, és plazmonikus elrendezésben leválasztott fehérjék vizsgálatára. Célunk annak megállapítása volt, hogy a beesési szögtől, hullámhossztól és a plazmonikus réteg vastagságától (3. ábra) függően milyen érzékenységet tudunk elérni az optikai méréssel. Üveglapra különböző vastagságban leválasztott aranyrétegeken vizsgáltuk fibrinogén időfüggő kitapadását. Összehasonlítottuk, hogy a felületi plazmon erősített rezonancia (SPR) méréshez képest az ellipszometriában meglévő fázis mérési képesség mennyiben növeli az érzékenységet [6].



3. ábra: Saját fejlesztésű plazmonikus Kretschmann cellában mért $\tan(\Psi)$ értékek, amelyek a plazmonikus kioltást mutatják. A mérésből jól látható a használható széles hullámhossz- és beesési szög (aoi) tartományt. [6]

Összehasonlító méréseket végeztünk röntgen, ionsugaras és ellipszometriai módszerekkel. Arany és amorf szén hordozókra leválasztott fibrinogén rétegek mennyiségét határoztuk meg röntgen fluoreszcencia, Rutherford visszaszórásos spektrometria és spektroszkópiai ellipszometria segítségével. Az egyes módszerek kvantitatív eredményei jó egyezést mutattak, de számos hatást (pl. laterális inhomogenitás vagy időbeni stabilitás) figyelembe kell venni az eredmények értékelésénél. [7] [kal17a]

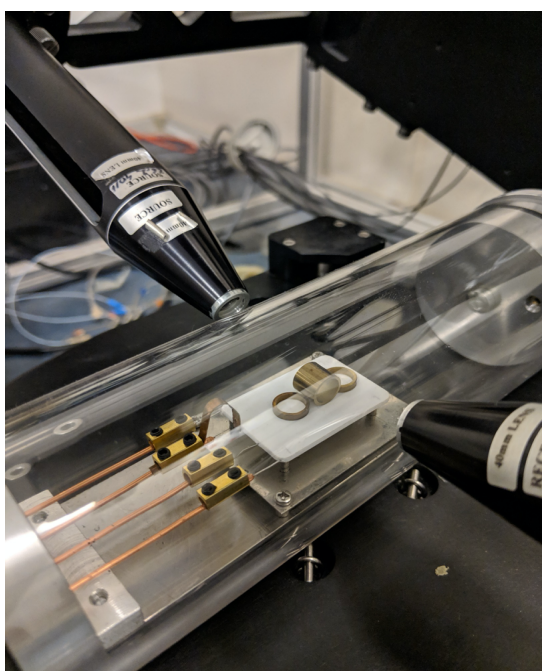
Referencia méréseket végeztünk nanostrukturált [8–10] és homogén [11–18] vékonyrétegeken modellfejlesztés és referencia dielektromos függvények meghatározása céljából. Vizsgáltuk továbbá olyan nanorészecskék kitapadását arany felületre, mint a flagelláris filamentumok és a titanát nanocsövek.

A harmadik évben méréseket végeztünk plazmon erősített elrendezésben filamentum szerkezeteken [kal18a, kal18b], valamint numerikus szimulációs eljárást dolgoztunk ki a 3D szerkezetű fehérjék kitapadási dinamikájának a megértése céljából [rom18a]. Az interferometriai, ellipszometria, folyadék-szilárd határfelületi jelenségek optikai vizsgálati módszereit összefoglaló előadás [pet18a] és publikáció [3] formájában ismertettük.

Fotonikus és kombinatorikus szerkezeteket terveztünk a Kretschmann elrendezésű mérőcellánk felületi érzékenyítésére, amelyeket el is készítettünk, minősítettünk, és számos változattal méréseket is végeztünk [20] [kal18b, saf18a, saf18b, saf18c]. Megállapítottuk, hogy a flagelláris filamentumokat is használó szenzorszerkezet alkalmas vízben oldott nikkel és arzén nagy-érzékenységgű detektálására [saf18c, gar18a].

A plazmonkus szerkezeteket optimalizáltuk és az érzékenységet multiréteg szerkezet alkalmazásával további egy nagyságrenddel növeltük valamint a rezonancia hullámhosszat a rétegek vastagságával és a beesési szöggel hangolhatóvá, és az UV tartományban is használhatóvá tettük. Kidolgoztunk egy új, kombinatorikus leválasztásra épülő módszert, amellyel az optimalizált méretű mérőfolt [1] mozgathatósága során lehet a szenzor rezonancia tulajdonságait hangolni [20]. A kombinatorikus módszer fejlesztéséhez megvizsgáltuk különböző nanoszerkezetekre épülő vékonyrétegek processzási eljárásoktól függő optikai tulajdonságait [12] [buk18a, hri18a, kol18a].

A cellafejlesztést kiterjesztettük fűthető *in situ* környezeti cellára is (4. ábra). Megépítettünk egy olyan félhengeres elrendezést, amelyben több beesési szög mellett tudunk maximum 600 °C-ig hőkezelés közben, adott gázterben ellipszometriai méréseket végezni 1 másodperc felbontással, 200-tól 1700 nanométeres hullámhosszig [pet18c, pet18d]. Ez a rendszer lehetővé teszi felületi rétegek fejlesztését és optimalizálását a multi-réteges Kretschmann elrendezésű szenzorok esetében is.



4. ábra: Saját tervezésű, változtatható beesési szögű hőkezelő cella. A fehér színű fűtőlapp, amelyen a cirkónium csöveket elhelyeztük 600 °C hőmérsékletig hevíthető. A cella gyári ellipszométer mintatartóira helyezhető és azzal együtt jusztrórozható. Az ellipszométer fókuszálója is használható, és a maga hőmérsékletű mérés közben a henger hossz tengelye mentén a fókuszált mérőfolt mozgatható.

A hosszabbítás évében meghívott összefoglaló cikket írtunk "*In Situ Characterization of Biomaterials at Solid-Liquid Interfaces Using Ellipsometry in the UV-Visible-NIR Wavelength Range*" címmel, részben a projekt főbb eredményeinek összefoglalásaként. Ugyancsak a projekt főbb eredményeire épült a 8. Nemzetközi Ellipszometriai Konferencián „*In situ bioellipsometry*” címmel tartott megívott előadás [pet19a]. Az ugyanezen a konferencián

„Performance comparison of planar nanostructures for biosensing applications by Total Internal Reflection Ellipsometry” [kal19a], „Combinatorial biosensing by total internal reflection spectroscopic ellipsometry” [kal19b] és „Real Time Characterization of Filamental Nano-objects at Solid-liquid Interfaces – Numerical Reconstruction from SE Measurements” [rom19b] címmel bemutatott legfőbb eredményeink publikálása folyamatban van.

Az egy év hosszabbítást kihasználtuk előremutató koncepciók kidolgozására is (a fenti [kal19b] prezentáció mellett a [20] publikáció is ide tartozik). A filamentumok adszorpciós kinetikáját tartalmazó modell [rom19a] és ennek egy alkalmazási példája [lab19a] egyaránt publikálás alatt áll. A kiterjesztett fűthető cellát atomerőművi cirkónium rudak *in situ* optikai oxidációs vizsgálatára alkalmaztuk. Feltérképeztük a rendszer korlátait, és referencia törésmutató adatokat határoztunk meg az ultraviola, a látható, a közeli infra és a közép infra hullámhossztartományokban egyaránt. [18] [ago19a]

Prezentációk

[ago16a] E. Agocs, P. Kozma, J. Nador, A. Hamori, M. Janosov, B. Kalas, S. Kurunczi, B. Fodor, E. Ehrentreich-Förster, M. Fried, R. Horvath, P. Petrik, ”Grating coupled optical waveguide interferometry combined with *in situ* spectroscopic ellipsometry to monitor surface processes in aqueous solutions”, 7th International Conference on Spectroscopic Ellipsometry, Berlin, Germany, June 6-10, 2016 (poster).

[ago16b] E. Agocs, D. Lehninger, L. Khomenkova, B. Kalas, J. Heitmann, and P. Petrik, ”Optical characterization of Ge clusters embedded in ZrO₂”, 7th International Conference on Spectroscopic Ellipsometry, Berlin, Germany, June 6-10, 2016 (poster).

[fod16a] B. Fodor, T. Defforge, B. Bardet, E. Agocs, M. Fried, G. Gautier, and P. Petrik, ”Spectroscopic ellipsometry of columnar porous Si thin films and Si nanowires”, 7th International Conference on Spectroscopic Ellipsometry, Berlin, Germany, June 6-10, 2016, poster.

[kal16a] B. Kalas, J. Nádor, E. Agócs, M. Fried, P. Petrik, “Protein adsorption monitored by plasmon-enhanced semi-cylindrical Kretschmann ellipsometry”, 7th International Conference on Spectroscopic Ellipsometry, Berlin, Germany, June 6-10, 2016 (poster).

[kal16b] Kalas Benjamin, Agócs Emil, Nádor Judit, Kurunczi Sándor, Horváth Róbert, Petrik Péter, „Fehérje adszorpció vizsgálata plazmon erősítésű spektroszkópiai ellipszometriával”, Műszaki Kémiai Napok”, Veszprém, Április 26-28, 2016 (poszter).

[loh16a] T. Lohner, M. Serényi, E. Szilágyi, Z. Zolnai, Z. Czigány, N. Q. Khánh, P. Petrik, M. Fried, “Spectroellipsometric detection of silicon substrate damage caused by radiofrequency sputtering of niobium oxide”, 7th International Conference on Spectroscopic Ellipsometry, Berlin, Germany, June 6-10, 2016 (poster).

[loh16b] Lohner Tivadar, Serényi Miklós, Szilágyi Edit, Zolnai Zsolt, Czigány Zsolt, Nguyen Quoc Khánh, Petrik Péter, Fried Miklós: Rádiófrekvenciás porlasztás által egykristályos szubsztrátban okozott rácskárosodás vizsgálata. Fizikus Vándorgyűlés, Szeged, 2016. aug. 24-27 (poster).

[maj16a] C. Major, G. Juhasz, Z. Herczeg, Z. Labadi, P. Petrik, Z. Horvath, and M. Fried, “High speed spectroscopic ellipsometry technique for on-line monitoring in large area thin layer production”, 7th International Conference on Spectroscopic Ellipsometry, Berlin, Germany, June 6-10, 2016 (talk).

[nad16a] J. Nador, B. Kalas, E. Agocs, O. Kozak, E. Molnar, L. Korosi, R. Horvath, M. Fried, and P. Petrik, ”Dual-channel plasmon-enhanced semi-cylindrical Kretschmann ellipsometry for the monitoring of protein adsorption on nanostructured surfaces”, 7th International Conference on Spectroscopic Ellipsometry, Berlin, Germany, June 6-10, 2016 (poster).

[pet16a] P. Petrik, E. Agocs, B. Kalas, P. Kozma, J. Nador, M. Fried, “Improvement of instrumentation for bioellipsometry”, 7th International Conference on Spectroscopic Ellipsometry (ICSE-7), Berlin, Germany, June 6-10, 2016 (**invited**).

[pet16b] P. Petrik, B. Fodor, E. Agocs, T. Lohner, B. Bardet, T. Defforge, F. Cayrel, D. Alquier, G. Gautier, M. Fried, “Characterization of porous and nanostructured materials by ellipsometry”, Energy, Materials and Nanotechnology (EMN) meeting, Prague, Czech Republic, June 13-17, 2016 (**invited**).

[pet16c] P. Petrik, E. Agocs, B. Kalas, B. Fodor, T. Lohner, J. Nador, A. Saftics, S. Kurunczi, T. Novotny, E. Perez-Fero, R. Nagy, A. Hamori, R. Horvath, Z. Hozer, M. Fried, “Nanophotonics of biomaterials and inorganic nanostructures”, International School of Condensed Matter Physics, Varna, Bulgaria, August 29 - September 2, 2016 (**invited**).

[pet16d] P. Petrik, B. Kalas, E. Agocs, T. Lohner, D. Lehninger, L. Khomenkova, R. Nagy, T. Novotny, E. Perez-Fero, J. Heitmann, and Z. Hozer, “Optical properties of Zr and ZrO₂”, 7th International Conference on Spectroscopic Ellipsometry, Berlin, Germany, June 6-10, 2016 (poster).

[saf16a] A. Saftics, S. Kurunczi, B. Türk, E. Agocs, B. Kalas, P. Petrik, M. Fried, A. Sulyok, Sz. Bosze, R. Horvath, “Ellipsometric characterization of thin surface layers for biosensor applications”, 16th International Conference of Physical Chemistry, ROMPHYSICHEM-16, September 21-23, 2016 (poster).

[zol16a] Z. Zolnai, P. Petrik, A. Deák, S. Pothorszky, D. Zámbo, G. Vértesy, N. Nagy, A. K. Rossall, and J. A. van den Berg, “A three dimensional analysis of Au-silica core-shell nanoparticles using medium energy ion scattering”, 8th International Workshop on High-Resolution Depth Profiling (HRDP8), London, Canada, August 7-11, 2016 (poster).

[fog17a] Zs. Fogarassy, P. Petrik, L. Duta, I.N. Mihailescu, M. Anastasescu, M. Gartner, K. Antonova, A. Szekeres, “TEM and AFM Studies of AlN films synthesized by Pulsed Laser Deposition”, Spring Meeting, Symposium X, May 22-26, 2017, Strasbourg, France.

[hri17a] T. Hristova-Vasileva, P. Petrik, D. Nesheva, S. Kaschieva, S. N. Dmitriev, ”Spectroscopic ellipsometry studies of SiO_x films irradiated with high energy electrons”, EMRS Spring Meeting, Symposium R, May 22-26, 2017, Strasbourg, France (poster).

[kal17a] B. Kalas, B. Pollakowski, A. Nutsch, C. Streeck, J. Nador, M. Fried, B. Beckhoff, P. Petrik, „Combined ellipsometric and X-ray spectrometric investigation of fibrinogen protein

layers on different substrates”, EMRS 2017 Spring Meeting (May 22-26), Symposium S, (talk).

[kal17b] Benjamin Kalas, Judit Nádor, Miklós Fried, Péter Petrik, „Protein Adsorption on Different Nanostructures Monitored by Kretschmann Ellipsometry”, EMRS Fall Meeting, 18-21 September, 2017, Warsaw (poster).

[maj17a] C. Major, G. Juhasz, Z. Herczeg, Z. Labadi, P. Petrik, Z. Horvath, M. Fried, „High Speed Spectroscopic Ellipsometry Technique for On-Line Monitoring in Large Area Thin Layer Production”, Opto X Nano, 19-23 November, Okajama, Japán (**invited**).

[nad17a] J. Nador, A. Saftics, B. Kalas, L. Illes, C. Moldovan, M. Gartner, B. Kovacs, S. Kurunczi, M. Fried, É. Tóth, F. Vonderviszt, P. Petrik, „Sensor surface preparation using genetically modified bacterial filaments”, EMRS Fall Meeting, 18-21 September, 2017, Warsaw (poster).

[nad17b] Nador J., Saftics A., Kalas B., Illes L., Kovacs B., Moldovan C., Romanenko A., Gartner M., Fried M., Vonderviszt F., Petrik P.: "Fabrication of genetically modified bacterial filament coatings to develop sensor surfaces for detecting water pollution", 5th Conference on Sustainable Energy Brasov, 19-21. October 2017 (talk).

[nad17c] J. Nador, A. Saftics, B. Kalas, L. Illes, C. Moldovan, M. Gartner, M. Fried, F. Vonderviszt, P. Petrik: "Bevonatok létrehozása genetikailag módosított bakteriális filamentumokból vízszennyező anyagok detektálására alkalmas érzékelőfelületekhez", magyar biofizikai társaság xxvi. kongresszusa, szeged, 2017. augusztus 22-25 (poster).

[pet17a] P. Petrik, E. Agocs, B. Kalas, J. Nador, B. Fodor, A. Saftics, S. Kurunczi, R. Horvath, M. Fried, „Development of optical devices for ellipsometry, scatterometry and interferometry”, Matheon Workshop - 10th Annual Meeting “Photonic Devices”, Zuse Institute Berlin, February 9-10 2017, (**invited**).

[pet17b] P. Petrik, E. Agocs, B. Kalas, B. Fodor, T. Lohner, J. Nador, A. Saftics, S. Kurunczi, T. Novotny, E. Perez-Fero, R. Nagy, A. Hamori, R. Horvath, Z. Hozer, M. Fried, „High-sensitivity real time ellipsometry of complex interface structures”, Opto X Nano, 19-23 November, Okajama, Japán (**invited**).

[pet17c] P. Petrik, A. Sulyok, T. Novotny, E. Perez-Feró, B. Kalas, E. Agócs, T. Lohner, M. Menyhárd, Z. Hózer, „Ellipsometric and XPS study of Zr and ZrO₂”, European Conference on Surface Science (ECOSS-33), Szeged, August 27, 2017 (poster).

[saf17a] A. Saftics, J. Nádor, B. Kalas, B. Türk, F. Vonderviszt, S. Kurunczi, R. Horvath, P. Petrik, M. Fried: “Ellipsometric characterization of carbohydrate and protein layers for biosensor applications” 5th Conference on Sustainable Energy Brasov, 19-21. October 2017 (talk).

[ros17a] A. K. Rossall, J. A. van den Berg, Z. Zolnai, P. Petrik, A. Deák, S. Pothorszky, G. Vértesy, L. Illés, and G. Battistig: Three-dimensional analysis of Au-silica core-shell nanoparticle clusters using medium energy ion scattering, The 23rd International Conference on Ion Beam Analysis (IBA-2017), Sanghaj, Kína, 2017., október 8-13 (poster).

[zol17a] Z. Zolnai, P. Petrik, A. K. Rossall, J. A. van den Berg, A. Deák, S. Pothorszky, G. Vértesy, L. Illés, and G. Battistig: The role of large-angle dual scattering in the MEIS analysis of gold nanostructures, The 23rd International Conference on Ion Beam Analysis (IBA-2017), Sanghaj, Kína, 2017., október 8-13 (talk).

[buk18a] D. Bukatova, D. Lehninger, M. Boissérie, V. Yukhymchuk, X. Portier, F. Gourbilleau, J. Heitmann, P. Petrik, L. Khomenkova, „Effect of annealing temperature on phase separation in GeHfOx thin films”, NANO2018, Kiev, 27-30 August, 2018 (poster).

[fod18a] B. Fodor, T. Defforge, E. Agocs, M. Fried, G. Gautier, P. Petrik, „Ellipsometric characterization of anisotropy in porous silicon thin films and silicon nanowire”, GREMAN UMR 7347, France, Porous Semiconductors – Science and Technology 11-16 March, 2018, Montpellier (poster).

[gar18a] M. Gartner, C. Lete, M. Chelu, H. Stroescu, M. Zaharescu, C. Moldovan, C. Brasoveanu, M. Gheorghe, S. Gheorghe, A. Duta, Z. Labadi, B. Kalas, A. Saftics, M. Fried, P. Petrik, E. Toth, H. Jankovics, F. Vonderviszt, „Electrochemical sensors for detection of different ionic species (nitrites / nitrates and heavy metals) in natural water sources”, CAS-2018, 10-12 October, 2018 (talk).

[hri18a] T. Hristova-Vasileva, P. Petrik, D. Nesheva, Zs. Fogarassy, J. Lábár, B. Kalas, M. Šćepanović, S. Kaschieva, S. N. Dmitriev, K. Antonova, „Changes in composite nc-Si-SiO₂ thin films caused by 20 MeV electron irradiation”, EMRS Spring Meeting, Strasbourg, June 18-22, 2018 (talk).

[kal18a] B. Kalas, J. Nador, A. Saftics, C. Moldovan, L. Illes, M. Gartner, M. Gheorghe, M. Fried, F. Vonderviszt, P. Petrik, "Detection and control of surface nanostructures at solid-liquid interface for sensing", 10th Workshop Ellipsometry, 19-21 March, 2018, Chemnitz (poster).

[kal18b] B. Kalas, A. Romanenko, B. Fodor, A. Saftics, J. Nador, K. Ferencz, S. Kurunczi, M. Fried, F. Vonderviszt, P. Petrik, „Advanced Kretschmann-Raether ellipsometry of surface nanostructures at solid-liquid interfaces”, EMRS Spring Meeting, Strasbourg, June 18-22, 2018 (talk).

[kol18a] L. Kolaklieva, V. Chitanov, K. Antonova, A. Szekeres, P. Terziyska, P. Petrik, Zs. Fogarassy, L. Duta, I.N. Mihailescu, „Mechanical, Optical and Structural Properties of Aluminum Nitride Synthesized by Pulsed Laser Deposition”, EMRS Spring Meeting, Strasbourg, June 18-22, 2018 (talk).

[pet18a] P. Petrik, „Monitoring of solid-liquid interfaces using ellipsometry”, ISCMP-20, September 3-7, 2018, Varna (**invited**).

[pet18b] P. Petrik, B. Kalas, A. Romanenko, B. Fodor, E. Agocs, T. Lohner, M. Fried, „Advanced heat- and flow-cells for real time ellipsometry”, EMRS Spring Meeting, Strasbourg, June 18-22, 2018 (talk).

[pet18c] P. Petrik, A. Romanenko, B. Kalas, L. Peter, B. Fodor, E. Agocs, T. Lohner, T. Novotny, E. Perez-Feró, Z. Hózer, „In situ and ex situ ellipsometry on zirconium surfaces for nuclear cladding”, EMRS Spring Meeting, Strasbourg, June 18-22, 2018 (poster).

[pet18d] P. Petrik, A. Romanenko, B. Kalas, L. Peter, E. Agocs, T. Lohner, T. Novotny, E. Perez-Fero, Z. Hozer, „Optical characterization of zirconium tubes for nuclear cladding”, EOSAM (Annual Meeting of the European Optical Society) 8-12 October, 2018, Delft, Netherlands (talk).

[rom18a] A. Romanenko, B. Kalas, J. Nador, É. Tóth, F. Vonderviszt, M. Fried and P. Petrik, „Adsorption of filamental nano-objects at solid-liquid interface: *in situ* optical characterization and numerical reconstruction”, EMRS Spring Meeting, 18-22 June, 2018, Strasbourg (poster).

[saf18a] G. Sáfrán, T. Lohner, M. Serényi, P. Petrik, B. Kalas, Zs. Zolnai, M. Németh, J. Gubicza, „One-sample combinatorial for high throughput TEM, RBS, XRD and ellipsometry studies of thin SiGe layers”, Montpellier, July 29 to August 3, 2018 (poster).

[saf18b] A. Saftics, B. Kalas, J. Nador, A. Romanenko, E. Toth, Z. Labadi, M. Gheorghe, L. Illes, B. Kovacs, C. Moldovan, M. Gartner, M. Fried, F. Vonderviszt, P. Petrik, "Coatings for electronic water pollution sensors", EMRS Spring Meeting, 18-22 June, 2018, Strasbourg (poster).

[saf18c] A. Saftics, B. Kalas, J. Nador, A. Romanenko, É. Tóth, Z. Labadi, M. Gheorghe, L. Illes, B. Kovacs, C. Moldovan, M. Gartner, F. Vonderviszt, M. Fried, P. Petrik, „Coatings for electronic water pollution sensors”, CAS-2018, 10-12 October, 2018 (talk).

[ago19a] E. Agócs, A. Romanenko, B. Kalas, L. Péter, T. Novotny, E. Perez-Feró, T. Lohner, Z. Kerner, P. Terziyska, Z. Hózer, P. Petrik, “Environmental ellipsometry on metal surfaces”, ICSE-8, 8. Int. Conf. on Spectroscopic Ellipsometry, 2019.05.26-31 Barcelona, Spain (poster).

[fri19a] M. Fried, R. Bogar, Z. Lábadi, Z. Zolnai, “Combinatorial Investigation of WO₃–MoO₃ Mixed Layers by SE”; ICSE-8, 8. Int. Conf. on Spectroscopic Ellipsometry, 2019.05.26-31 Barcelona, Spain (talk).

[kal19a] B. Kalas, A. Romanenko, A. Saftics, K. Ferencz, M. Fried, P. Petrik; Performance comparison of planar nanostructures for biosensing applications by Total Internal Reflection Ellipsometer, ICSE-8, 8. Int. Conf. on Spectroscopic Ellipsometry, 2019.05.26-31 Barcelona, Spain (talk).

[kal19b] B. Kalas, M. Serenyi, G. Safran, M. Fried, P. Petrik, “Combinatorial biosensing by total internal reflection spectroscopic ellipsometry”, CAS 2019, International Semiconductor Conference, October 9-11, 2019, Sinaia, Romania (talk).

[kho19a] L. Khomenkova, D. Lehninger, E. Agocs, X. Portier, P. Petrik, T. Torchynska, O. Meknichuk, F. Gourbilleau, J. Heitmann, “Effect of doping and plasma conditions on optical and structural properties of HfO₂-based films produced by magnetron sputtering”, EMRS Fall Meeting, Warsaw, September, 2019 (talk).

[lab19a] Z. Lábadi, H. Jankovics, P. Szekér, É. Tóth, A. Saftics, B. Kalas, M. Fried, F. Vonderviszt, P. Petrik, “Detection of Arsenic in water using bacterial flagellin variants”, EMRS Fall Meeting, Warsaw, September, 2019 (poster).

[loh19a] T. Lohner, E. Szilágyi, Z. Zolnai, A. Németh, P. Petrik, M. Fried, “Determination of complex dielectric function of ion-implanted amorphous germanium by spectroscopic

ellipsometry”, ICSE-8, 8. Int. Conf. on Spectroscopic Ellipsometry, 2019.05.26-31 Barcelona, Spain (poster).

[pet19a] P. Petrik, “In situ bioellipsometry”, ICSE-8, 8. Int. Conf. on Spectroscopic Ellipsometry, 2019.05.26-31 Barcelona, Spain (**invited**).

[pet19b] P. Petrik, B. Kalas, K. Ferencz, M. Serényi, G. Safran, M. Fried, M. Stoica, M. Gartner, “Surface-enhanced optical detection using multilayers in internal reflection ellipsometry”, CAS 2019, International Semiconductor Conference, October 9-11, 2019, Sinaia, Romania (talk).

[rom19a] A. Romanenko, B. Kalas, A. Nemeth, J. Nador, F. Vonderviszt, M. Fried, P. Petrik, “Real Time Characterization of Filamental Nano-objects at Solid-liquid Interfaces – Numerical Reconstruction from SE Measurements”, ICSE-8, 8. Int. Conf. on Spectroscopic Ellipsometry, 2019.05.26-31 Barcelona, Spain (poster).

[rom19b] A. Romanenko, E. Agócs, É. Kiss, P. Petrik, G. Gyulai, “Membrane aZnity of polylactide-co-glycolide (PLGA) nanoparticulate systems studied by *in situ* spectroscopic ellipsometry”, ICSE-8, 8. Int. Conf. on Spectroscopic Ellipsometry, 2019.05.26-31 Barcelona, Spain (poster).

[saf19a] G. Sáfrán, T. Lohner, M. Serényi, P. Petrik, B. Kalas, Zs. Zolnai, M. Németh, J. Gubicza, N.Q. Chinh, M. Fried, G. Dobrik, I. Cora, Zs. Fogarassy, L.J. Lábár, N. Szász: „One-sample concept” micro-combinatory; a new approach for high throughput characterization of binary films, International Conference on Material Science and Nanotechnology(ICMSN 2019), Paris, France, September 17-18, 2019 (**invited**).

[saf19b] G. Sáfrán, T. Lohner, M. Serényi, P. Petrik, B. Kalas, Z. Zolnai, M. Fried, J. Gubicza, N.Q. Chinh: A micro-combinatorial approach for a reveal of composition dependent properties of binary films by TEM and further analytical techniques, 6th International Congress on Microscopy and Spectroscopy Oludeniz, Turkey, May 12-18, 2019 (**invited**).

Publikációk

- [1] S. Gurbán, P. Petrik, M. Serényi, A. Sulyok, M. Menyhárd, E. Baradács, B. Parditka, C. Cserhádi, G.A. Langer, Z. Erdélyi, Electron irradiation induced amorphous SiO₂ formation at metal oxide/Si interface at room temperature; Electron beam writing on interfaces, Sci. Rep. 8 (2018). doi:10.1038/s41598-018-20537-4.
- [2] J. Nador, B. Kalas, A. Saftics, E. Agocs, P. Kozma, L. Korosi, I. Szekacs, M. Fried, R. Horvath, P. Petrik, Plasmon-enhanced two-channel in situ Kretschmann ellipsometry of protein adsorption, cellular adhesion and polyelectrolyte deposition on titania nanostructures, Opt. Express. 24 (2016) 4812. doi:10.1364/OE.24.004812.
- [3] B. Kalas, E. Agocs, A. Romanenko, P. Petrik, In Situ Characterization of Biomaterials at Solid-Liquid Interfaces Using Ellipsometry in the UV-Visible-NIR Wavelength Range, Phys. Status Solidi Appl. Mater. Sci. 216 (2019) 1800762. doi:10.1002/pssa.201800762.
- [4] E. Agocs, P. Kozma, J. Nador, A. Hamori, M. Janosov, B. Kalas, S. Kurunczi, B. Fodor, E. Ehrentreich-Förster, M. Fried, R. Horvath, P. Petrik, Grating coupled optical waveguide interferometry combined with in situ spectroscopic ellipsometry to monitor surface processes in aqueous solutions, Appl. Surf. Sci. 421 (2017) 289–294.

- doi:10.1016/j.apsusc.2016.07.166.
- [5] P. Petrik, E. Agocs, B. Kalas, B. Fodor, T. Lohner, J. Nador, A. Saftics, S. Kurunczi, T. Novotny, E. Perez-Feró, R. Nagy, A. Hamori, R. Horvath, Z. Hózer, M. Fried, Nanophotonics of biomaterials and inorganic nanostructures, in: *J. Phys. Conf. Ser.*, 2017. doi:10.1088/1742-6596/794/1/012004.
 - [6] B. Kalas, J. Nador, E. Agocs, A. Saftics, S. Kurunczi, M. Fried, P. Petrik, Protein adsorption monitored by plasmon-enhanced semi-cylindrical Kretschmann ellipsometry, *Appl. Surf. Sci.* 421 (2017) 585–592. doi:10.1016/j.apsusc.2017.04.064.
 - [7] B. Kalas, B. Pollakowski, A. Nutsch, C. Streeck, J. Nador, M. Fried, B. Beckhoff, P. Petrik, Ellipsometric and X-Ray Spectrometric Investigation of Fibrinogen Protein Layers, *Phys. Status Solidi Curr. Top. Solid State Phys.* 14 (2017). doi:10.1002/pssc.201700210.
 - [8] B. Fodor, E. Agocs, B. Bardet, T. Defforge, F. Cayrel, D. Alquier, M. Fried, G. Gautier, P. Petrik, Porosity and thickness characterization of porous Si and oxidized porous Si layers - An ultraviolet-visible-mid infrared ellipsometry study, *Microporous Mesoporous Mater.* 227 (2016) 112–120. doi:10.1016/j.micromeso.2016.02.039.
 - [9] E. Agocs, Z. Zolnai, A.K. Rossall, J.A. van den Berg, B. Fodor, D. Lehninger, L. Khomenkova, S. Ponomaryov, O. Gudymenko, V. Yukhymchuk, B. Kalas, J. Heitmann, P. Petrik, Optical and structural characterization of Ge clusters embedded in ZrO₂, *Appl. Surf. Sci.* 421 (2017) 283–288. doi:10.1016/j.apsusc.2017.03.153.
 - [10] B. Fodor, T. Defforge, E. Agócs, M. Fried, G. Gautier, P. Petrik, Spectroscopic ellipsometry of columnar porous Si thin films and Si nanowires, *Appl. Surf. Sci.* 421 (2017) 397–404. doi:10.1016/j.apsusc.2016.12.063.
 - [11] A. Saftics, S. Kurunczi, B. Türk, E. Agócs, B. Kalas, P. Petrik, M. Fried, A. Sulyok, R. Horváth, Spin coated carboxymethyl dextran layers on TiO₂-SiO₂ optical waveguide surfaces, *Rev. Roum. Chim.* 62 (2017) 775–782.
 - [12] Z. Fogarassy, P. Petrik, L. Duta, I.N. Mihailescu, M. Anastasescu, M. Gartner, K. Antonova, A. Szekeres, TEM and AFM studies of aluminium nitride films synthesized by pulsed laser deposition, *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.* 123 (2017). doi:10.1007/s00339-017-1296-4.
 - [13] T. Lohner, M. Serényi, E. Szilágyi, Z. Zolnai, Z. Czigány, N.Q. Khánh, P. Petrik, M. Fried, Spectroellipsometric detection of silicon substrate damage caused by radiofrequency sputtering of niobium oxide, *Appl. Surf. Sci.* 421 (2017). doi:10.1016/j.apsusc.2016.11.232.
 - [14] P. Petrik, A. Sulyok, T. Novotny, E. Perez-Feró, B. Kalas, E. Agocs, T. Lohner, D. Lehninger, L. Khomenkova, R. Nagy, J. Heitmann, M. Menyhard, Z. Hózer, Optical properties of Zr and ZrO₂, *Appl. Surf. Sci.* 421 (2017) 744–747. doi:10.1016/j.apsusc.2016.11.072.
 - [15] T. Hristova-Vasileva, P. Petrik, D. Nesheva, Z. Fogarassy, J. Lábár, S. Kaschieva, S.N. Dmitriev, K. Antonova, Influence of 20 MeV electron irradiation on the optical properties and phase composition of SiO_x thin films, *J. Appl. Phys.* 123 (2018). doi:10.1063/1.5022651.
 - [16] D. Nesheva, P. Petrik, T. Hristova-Vasileva, Z. Fogarassy, B. Kalas, M. Šćepanović, S. Kaschieva, S.N. Dmitriev, K. Antonova, Changes in composite nc-Si-SiO₂ thin films caused by 20 MeV electron irradiation, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms.* 458 (2019) 159–163. doi:10.1016/j.nimb.2019.05.035.
 - [17] L. Kolaklieva, V. Chitanov, A. Szekeres, K. Antonova, P. Terziyska, Z. Fogarassy, P. Petrik, I. Mihailescu, L. Duta, Pulsed Laser Deposition of Aluminum Nitride Films: Correlation between Mechanical, Optical, and Structural Properties, *Coatings.* 9 (2019)

195. doi:10.3390/coatings9030195.
- [18] P. Petrik, A. Romanenko, B. Kalas, L. Péter, T. Novotny, E. Perez-Feró, B. Fodor, E. Agocs, T. Lohner, S. Kurunczi, M. Stoica, M. Gartner, Z. Hózer, Optical Properties of Oxidized, Hydrogenated, and Native Zirconium Surfaces for Wavelengths from 0.3 to $25\ \mu\text{m}$ - A Study by Ex Situ and In Situ Spectroscopic Ellipsometry, *Phys. Status Solidi*. 216 (2019) 1800676. doi:10.1002/pssa.201800676.
 - [19] B. Fodor, P. Kozma, S. Burger, M. Fried, P. Petrik, Effective medium approximation of ellipsometric response from random surface roughness simulated by finite-element method, *Thin Solid Films*. 617 (2016) 20–24. doi:10.1016/j.tsf.2016.01.054.
 - [20] T. Lohner, B. Kalas, P. Petrik, Z. Zolnai, M. Serényi, G. Sáfrán, Refractive Index Variation of Magnetron-Sputtered a-Si_{1-x}Gex by “One-Sample Concept” *Combinatory, Appl. Sci.* 8 (2018) 826. doi:10.3390/app8050826.