

NANOÖLÇÜLÜ Al NAZİK TƏBƏQƏLİ STRUKTURLARIN OPTİK XÜSUSİYYƏTLƏRİ VƏ FUNKSIONAL TƏTBİQ PERSPEKTİVLƏRİ

X.N. ƏHMƏDOVA^{1,2}

¹ Elm və Təhsil Nazirliyi Fizika İnstitutu, H. Cavid pr.131, AZ-1073, Bakı, Azərbaycan,

² Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti, Bakı, AZ1010 Azərbaycan

khuramanahmadova85@gmail.com

Nanoölçülü Al/soda-əhəng şüşəsi (SLG) nazik təbəqə sistemləri termal buxarlanma üsulu ilə hazırlanmışdır. Müxtəlif qalınlığa malik Al təbəqələri şüşə altlıqlar üzərində çökdürülmüş və ilkin material kimi 50 nm ölçülü Al nanohissəciklərdən istifadə olunmuşdur. Al/SLG nazik təbəqələrinin optik parametrlərinin müəyyənləşdirilməsi üçün spektral ellipsometriya üsulu tətbiq edilmişdir. Ellipsometriya işığın səthlə qarşılıqlı təsirdən sonra əks olunan komponentinin polarizasiya vəziyyətində baş verən dəyişikliklərin yüksək dəqiqliklə təhlilinə əsaslanan metod olub, müxtəlif mühitlərin sərhəd və səth xüsusiyyətlərini öyrənməkdə effektivdir. 0.5–6 eV enerji diapazonunda otaq temperaturunda aparılan ölçmələr nəticəsində əldə olunmuş ellipsometrik məlumatlar Cauchy tipli osillatorlara əsaslanan dispersiya modelləri ilə analiz edilmişdir. Sındırma əmsalında müşahidə olunan dəyişikliklərin, nazik təbəqələrin oksigenin qismən təzyiqindən asılı olaraq formalaşan mikrostruktur xüsusiyyətləri ilə əlaqəli olduğu müəyyən edilmişdir. Əldə olunan nəticələr göstərir ki, bu tip Al/SLG nazik təbəqə sistemləri optoelektron qurğuların, yüksək həssas sensorların və müxtəlif funksional elektronika komponentlərinin hazırlanmasında perspektivli materiallar ola bilər.

Açar sözlər: Spektroskopik Ellipsometriya, nazik təbəqələr, sındırma əmsalı
DOI:10.70784/azip.2.2025338

1. Giriş

Nanotexnologiyanın inkişafı elektronika və spintronikanın da inkişafına səbəb olmuşdur. Kiçik ölçülü funksional materialların əldə olunması yeni çeviricilərin hazırlanması üçün zəruridir. Buna görə də, tanınmış materialların nanosəviyyədə sintez olunması istiqamətində tədqiqatlar davam edir. Müəyyən edilmişdir ki, nanomateriallar fərqli fiziki-kimyəvi xassələr göstərir [1, 2]. Nazik metal layların alınması və öyrənilməsi onların aerokosmik texnologiyalarda tətbiqi üçün imkanlar açır. Nanomateriallar arasında Al nanohissəcikləri xüsusi əhəmiyyət daşıyır. Aşkarlanmışdır ki, alüminium nanohissəciklərinin səthindəki atomlar oksigen və su ilə birləşərək alüminium oksid və alüminium hidraksid əmələ gətirir [3,4]. Yaxşı məlumdur ki, bir çox materialların səthində örtük rolunu oynayan oksid qatı formalaşır [5,6]. Buna görə də, materialların nazik qatlarının tədqiqi onların real təsvirini verməyə imkan yaradır.

Alüminium oksid (alümina) nazik təbəqələri mexaniki, optik, kimyəvi, termal və elektrik xassələrinin mükəmməlliyinə görə böyük maraq doğurmuşdur. Alümina ən mühüm oksid keramika materiallarından biridir və optoelektronika, kataliz, dielektriklər, optika, sensorlar kimi sahələrdə geniş tətbiq sahəsinə malikdir. O, həmçinin optik şəffaf keramik örtüklərdə, üzvi işıq saçan cihazlarda, günəş selektiv örtüklərdə, barkod oxuyucularda, optik linzalarda və pəncərələrdə, odada-vamlı örtüklərdə, əksətdirmə örtüklərində istifadə olunur [7–9].

Kristallit ölçüsü idarə olunan Al₂O₃ nanostrukturları qabaqcıl mühəndislik materiallarında müxtəlif tətbiqlərə malikdir. Bu tətbiqlərin hamısı yaxşı homogenlik, aşağı səth pürüzlülüyü və qalınlığın dəqiq idarəsi tələb edir. Bundan əlavə, xassələrin böyük hissəsinin təbəqələrin mikrostruktur və morfologiyasından asılı olduğu da vurğulanır. Mikrostruktur, texnoloji parametrlər və xassələr arasındakı qarşılıqlı əlaqənin başa

düşülməsi qabaqcıl xassələrə malik nazik təbəqələrin hazırlanmasına gətirib çıxara bilər.

Yuxarıda qeyd olunan tədqiqatlar göstərmişdir ki, materialların ölçüsü onların fiziki xassələrinə təsir göstərir. Nanoqiyətlərinin təsirlərini öyrənməyin iki üsulu vardır. Onlardan biri materialların toz nümunələrinin öyrənilməsidir. Digəri isə materialların nazik qatlarının öyrənilməsidir. Bu üsulların hər birinin fərqli xüsusiyyətləri mövcuddur. Nazik qatların öyrənilməsi daha böyük elmi və praktik əhəmiyyət daşıyır. Çünki nazik qatların tətbiq imkanları genişdir. Bu qatlar müasir elektronikada müxtəlif çeviricilərin hazırlanmasında istifadə olunur.

Al nanohissəciklərinin quruluşu və termofiziki xassələri yaxşı öyrənilmişdir. Lakin alümina nazik təbəqələrinin struktur və optik xassələri üzrə sistemli tədqiqat mövcud deyil. Bu işdə şüşə altlıq üzərində vakuum termal buxarlanma yolu ilə nazik alüminium layları alınmışdır. Müxtəlif qalınlıqlı Al nazik təbəqələrinin optik xassələri Spektroskopik Ellipsometriya metodu ilə öyrənilmişdir. Spektroskopik ellipsometriya nazik təbəqələrdə və kütləvi materiallarda enerji qadağan zonası üzərində optik keçidlərin öyrənilməsi üçün ən güclü vasitələrdən biri kimi qəbul olunur [10–15]. Bundan əlavə, digər optik üsullarla müqayisədə spektroskopik ellipsometriya öz-özünə uyğunlaşdırılmış optik metod olub, məhdud foton enerjiləri intervalında ölçmələr apararaq dielektrik funksiyaları və zonalarası vəziyyət sıxlığını (dielektrik funksiyanın xəyali hissəsi) əldə etməyə imkan verir [16–19]. Bu işdə təbəqələrin struktur, morfoloji və optik xassələri tədqim olunur.

2. Təcrübi hissə

Bu işdə öyrənilən iki müxtəlif qalınlıqlı Al təbəqəsi nanotozlardan termal çökdürmə üsulu ilə hazırlanmışdır. Termal çökdürmə prosesi Leybold-Herause L-560 vakuum qurğusunda həyata keçirilmişdir. Vakuum kamerasında işçi təzyiq 2×10^{-5} mbar

olmuşdur. Altılıq kimi kimyəvi yolla təmizlənmiş 25×19 mm ölçülü şüşə lövhə istifadə edilmişdir. Termal çökdürmədən əvvəl şüşə səthi 800 W gücü ilə ionlaşdırılmışdır. Çökdürmə prosesini yaxşılaşdırmaq üçün şüşə əsas vakuum kamerasında 100°C temperaturadək qızdırılmışdır. Termal püskürtmə prosesi 25 saniyə davam etmişdir.

Alınmış iki Al təbəqəsinin optik parametrləri M-2000 firlanan kompensatorlu spektroskopik ellipsometr vasitəsilə 0.5 – 6 eV foton enerjisi diapazonunda tədqiq olunmuşdur. Ellipsometrik ölçmələr zamanı işıq düşmə bucağı otaq temperaturunda 55°, 60°, 65° və 70° olaraq dəyişdirilmişdir. Al/SLG sistemlərinin optik sabitləri əldə olunmuş ellipsometrik məlumatların reqressiya təhlili nəticəsində müəyyən edilmişdir.

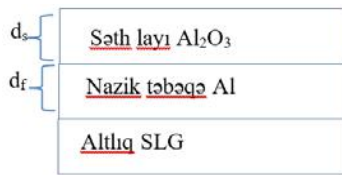
Ellipsometrik parametrlər Ψ və Δ müvafiq olaraq əks olunan işığın paralel (p) və perpendikulyar (s) komponentlərinin amplituda nisbətini və faza sürüşməsinə ifadə edir. Polyarlaşmış işığın kompleks əks olunma nisbəti aşağıdakı kimi verilmişdir:

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \tan\Psi e^{i\Delta}$$

Biz tədqiqat işində üçqat optik modeldən istifadə edirik. Model aşağıdakı qatları özündə birləşdirir: altılıq SLG (soda-əhəng şüşəsi), nazik təbəqə(Al) və səth pürüzlülüyünü təqlid edən səthi qat – alumina (Al_2O_3).

Al-un dielektrik funksiyası müxtəlif dispersiya modelləri əsasında qurulmuşdur, səthi qatın dielektrik funksiyası isə Al-un dielektrik funksiyası əsasında Bruggeman Effektiv Mühit Yaxımlaşması (BEMA) tətbiq olunmaqla modelləşdirilmişdir [20, 21]. SLG-nin dielektrik funksiyası əvvəlcədən SLG lövhələri üzərində aparılmış birbaşa ellipsometrik ölçmələrlə müəyyən edilmişdir.

Aparılmış xətti regresiya təhlilində (LRA) dəyişənlər aşağıdakı olmuşdur: d_f – Al nazik plyonkasının qalınlığı, d_s – səthi Al_2O_3 qatının qalınlığı, ϵ_1 və ϵ_2 – müvafiq olaraq Al nazik təbəqələrinin dielektrik funksiyasının həqiqi və xəyali hissələri (Şəkil 1).

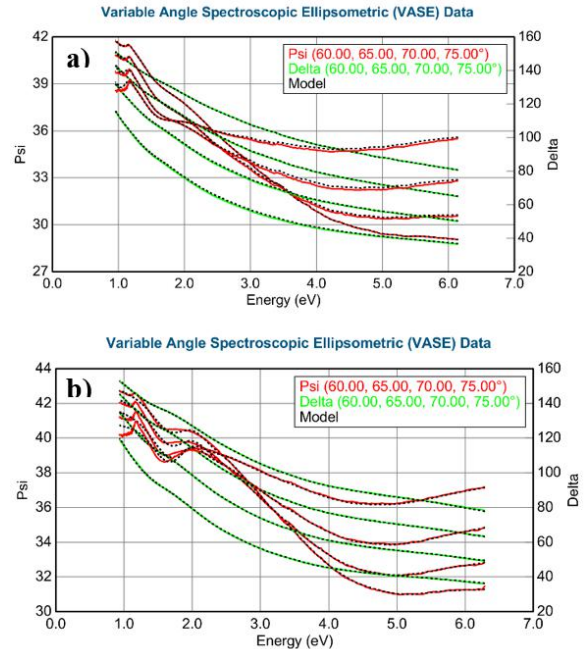


Şəkil 1. Ellipsometrik analizdə istifadə olunan optik model.

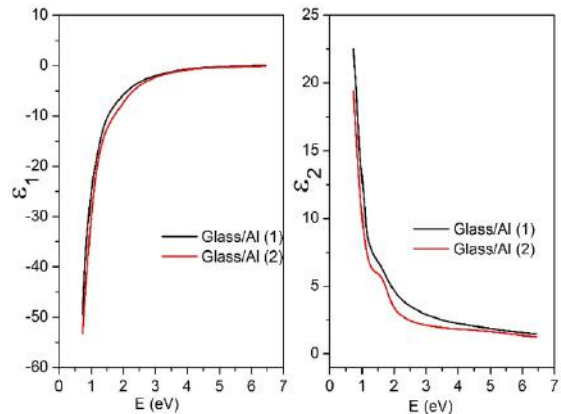
Optik sabitlər — n (sındırma əmsli) və k (ekstensiya əmsali), hansı ki, dielektrik funksiyanın həqiqi və xəyali hissələri ilə əlaqəlidir ($\epsilon_1 = n^2 - k^2$ və $\epsilon_2 = 2nk$), dielektrik funksiya ilə eyni vaxtda müəyyən edilmişdir.

Hesablanmış məlumatların eksperimental Ψ və Δ ilə uyğunlaşdırılması üçün izotrop mühit və ya izotrop nazik təbəqə/altılıq sistemi üçün optik modeldən istifadə olunmuşdur. Ellipsometrik məlumatların uyğunlaşdırılması prosesi WVASE32 kompüter proqramı vasitəsilə həyata keçirilmişdir. Orta kvadrat xəta (MSE) 1.5-dən kiçik olmuşdur. Eksperimental məlumatlar Levenberg–Marquardt alqoritmi tətbiq edilməklə parametrik

model dielektrik funksiyalarından istifadə olunan optik modelə uyğunlaşdırılmışdır və bütün UV/VIS diapazonunda ölçülmüş nöqtələr üçün eyni vaxtda analiz aparılmışdır. Al-un dielektrik funksiyasını modelləşdirmək üçün Complete Ease bazasında mövcud olan Cauchy dispersiya modeli 55°, 60°, 65° və 70° işığın düşmə bucaqları üçün bütün dalğa uzunluqları diapazonunda tətbiq edilmişdir. Ölçülmüş ellipsometrik parametrlər (tam qırmızı və yaşıl əyrilər) və onların uyğunlaşdırılmış nəticələri (qırıq qara əyrilər) 60°, 65°, 70° və 75° işıq düşmə bucaqları üçün müvafiq olaraq şəkil 2-də Al/SLG (iki nümunə) sistemləri üçün verilmişdir. Digər işıqdüşmə bucaqları üçün də oxşar, yaxşı uyğunluq müşahidə olunmuşdur. MSE (xəta funksiyası) 1.5-dən aşağı olması, həmçinin digər modelləşdirmə parametrlərinin uyğunluğu, əldə edilmiş nazik təbəqələrin yüksək keyfiyyətini və yaxşı səth hamarlığını təsdiqləmişdir. Kiçik MSE və səth pürüzlülüüyü (örtük qalınlığı) dəyərləri nəticələrin dəqiqliyini göstərmişdir.

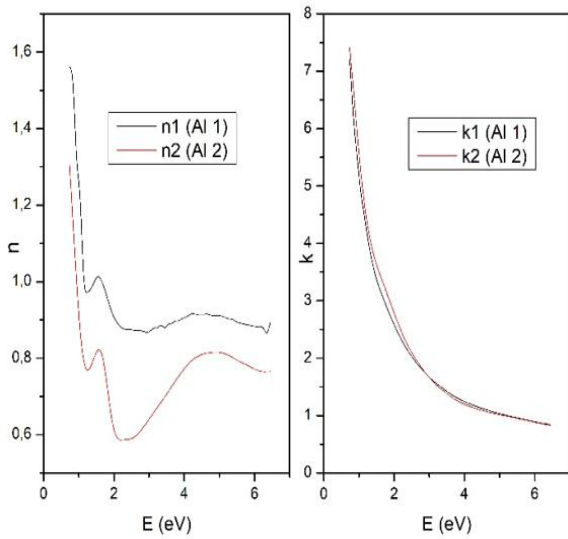


Şəkil 2. Təcrübi(bütün qırmızı və yaşıl əyrilər)və nəzəri (qırıq-qırıq qara xətt)ellipsometrik nəticələr: a) d_1 (Al nazik təbəqə)=100 nm b) d_2 (Al nazik təbəqə)=80 nm.



Şəkil 3 Qalınlıqları (qara xətt $d_1=100$ nm və qırmızı xətt $d_2=80$ nm) Al nazik təbəqələri üçün dielektrik funksiyanın həqiqi ϵ_1 və xəyali ϵ_2 hissəsi.

Al nazik təbəqələri üçün Dielektrik funksiyasının həqiqi ε_1 və xəyali ε_2 hissəsi şəkil 3-də göstərilmişdir. Al nazik təbəqələri nümunələri üçün optik sabitlər, n və k , Cauchy ossillator dispersiya modeli istifadə edilərək əldə edilmiş və şəkil 3-də göstərilmişdir.



Şəkil 4. Müxtəlif qalınlıqlı Al nazik təbəqələri üçün sındırma əmsalı (n) və ekstensiya əmsalı (k).

Nəticələr

Bu işdə, alüminium nazik təbəqələri şüşə altlıqlar üzərində termal vakuum buxarlanması ilə yerləşdirilmiş və onların struktural-optik xüsusiyyətləri potensial optoelektron tətbiqlər üçün təhlil edilmişdir. Spektroskopik ellipsometriya təbəqələrinin sındırma əmsalı və udma əmsalının dəqiqliklə müəyyən etdi və bu göstəricilərin qalınlıqdan asılı olduğunu göstərdi. Daha qalın qatlar 1–3 eV diapazonda udmanın azaldığını nümayiş etdirərkən, yüksək foton enerjiləri (3–6 eV) udmanı artırdı ki, bu da sensor və detektor tətbiqləri üçün faydalıdır.

Səth xarakterizasiyası kiçik nizamsızlıqları və yerli Al_2O_3 qatının mövcudluğunu ortaya qoydu; bu qatın formalaşması bütün nümunələrdə nisbətən vahid idi. Bu xüsusiyyətlər, işıq–madə qarşılıqlı təsirlərini optimalaşdırmaq üçün istehsal zamanı dəqiq nəzarətin vacibliyini vurğulayır. Cauchy dispersiya modeli və Levenberg–Marquardt alqoritmi ilə modelləşdirmə eksperimental məlumatlarla yaxşı uyğunluğu təmin etdi ($MSE < 1.5$).

Ümumilikdə, nəticələr göstərir ki, Al təbəqələrin optik sabitləri və səth morfologiyası qalınlığın idarə olunması ilə tənzimlənə bilər və bu, LED-lər, modul-yatorlar və fotodetektorlar kimi səmərəli optoelektron cihazların dizaynı üçün faydalı istiqamətlər təmin edir.

- [1] H.D. Ibrahimov, F.A. Amirov, H.J. Huseynov, Z.M. Ibragimova, L.S. Zamanova, R.N. Asadzadeh, S.H. Jabarov. “Carbon Nanotubes Obtained from Natural Gas by CVD”, Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, Vol. 13, № 6, pp.1244-1247, 2019.
<https://doi.org/10.1134/S1027451019060338>
- [2] I. Sen, M. Saglam. “The Use of Magnetic Nanoparticles in Postoperative Antibiotherapy”, New Materials, Compounds and Applications, Vol. 5, № 2, pp. 110-115, 2021.
https://jomardpublishing.com/UploadFiles/File/s/journals/NMCA/V5N2/Sen_Saglam.pdf
- [3] T.T. Abdullayeva, S.H. Jabarov, S. Huseynli, B.A. Abdurakhimov, A.S. Abiyev, M.N. Mirzayev. “Effect of Electron Beam on the Crystal Structure of Nanoscale Al Particles”, Modern Physics Letters B, Vol. 34, № 22, p. 2050231, 2020.
<https://doi.org/10.1142/S0217984920502310>
- [4] S.H. Jabarov, T.T. Abdullayeva, S. Huseynli, M.N. Mirzayev, A.S. Abiyev, E. Demir, M.Yu. Tashmetov, B.A. Abdurakhimov. “Comparative Properties of Irradiated Al Nanoparticles via Vibrational Spectroscopy and X-ray Diffraction Method”, Modern Physics Letters B, Vol. 35, № 34, p. 2150512, 2021.
<https://doi.org/10.1142/S0217984921505126>
- [5] A.S. Abiyev. “Physicochemical Processes in Aluminum Nanoparticles at High Temperatures”, Advanced Physical Research, Vol. 3, № 3, pp. 137-141, 2021.
<https://jomardpublishing.com/UploadFiles/File/s/journals/APR/V3N3/4AbiyevA.pdf>
- [6] J. Wang, Y.H. Yu, S.C. Lee, Y.W. Chung. Surf. Coat. Technol. 146 189 2001.
[https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01387-1](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01387-1)
- [7] D. Yan, J. He, X. Li, L. Jianxin, Z. Huili Ding. Surf. Coat. Technol. 141 2001.
[https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01170-7](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01170-7)
- [8] Y.S. Chang, N. Roy. Thin Solid Films 193/194 959 1990.
- [9] X.N. Əhmədova. Laylı metal-oksüd nanostrukturlarının quruluş dizaynı, alınması və tədqiqi AJP FİZİKA, vol.XXX № 4, section: A, s.3-8, 2024.
<https://doi.org/10.70784/azip.2.2024403>
- [10] X.N. Əhmədova. Al/Fe₃O₄ nazik təbəqəli sistemlərinin alınması və struktur tədqiqi, AJP FİZİKA, vol. XXIX № 4, səh.19-23, 2023.
- [11] X.N. Əhmədova, S.H. Cabarov, Ş.N. Əliyeva, X.O. Sadiq. Nano ölçülü al nazik təbəqələrinin alınması və onların quruluş xüsusiyyətləri, AJP FİZİKA, section C: Conference H.A. Aliyev, səh 94-97, 2023.
- [12] X.N. Əhmədova, L.N. İbrahimova. Günəş elementlərində pəncərə layı cdse nazik təbəqələrinin spektroskopik ellipsometriya metodu ilə tədqiqi, AJP FİZİKA, vol. XXXI № 2, səh.21-23, 2025

- [13] *N. Mamedov, A. Tavkhelidze, A. Bayramov, K. Akhmedova, Y. Aliyeva, G. Eyyubov, L. Jangidze, G. Skhiladze.* Spectroscopic planar diffraction ellipsometry of Si-based multilayer structure with subwavelength grating, *Physica Status Solidi C*, 14, P.1700092, 2017. <https://doi.org/10.1002/pssc.201700092>
- [14] *A. Bayramov, E. Alizade, S. Mammadov, A. Tavkhelidze, N. Mamedov, Y. Aliyeva, Kh. Akhmedova, S. Asadullayeva, L. Jangidze, G. Skhiladze.* Optical properties of surface grating Si-based multilayer structure, *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 37, P.061807, 2019. <https://doi.org/10.1116/1.5120799>
- [15] *Kh.N. Ahmadova.* Spectroscopic ellipsometric investigation of optical parameters of oil-water thin multiple systems, *International Journal of Modern Physics B*, 34, P.2050058, 2020. <https://doi.org/10.1142/S0217979220500587>
- [16] *Kh.N. Ahmadova, S.H. Jabarov.* Obtaining of Al nanolayers and crystal structure, *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*, 52, P.116-120, 2022.
- [17] *Kh.N. Ahmadova, S.H. Jabarov.* Obtaining of Al nanosized thin layers and their structural properties, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48, P.8083-8088, 2023. <https://doi.org/10.1007/s13369-022-07449-2>
- [18] *Kh. N. Ahmadova.* The new innovative optic complete method of identification of oil and its fraction. *International Journal of Modern Physics B* 2150241,2021. <https://doi.org/10.1142/S0217979221502416>
- [19] *Kh.N. Ahmadova, S.H. Jabarov, Y.I. Aliyev, Sh.N. Aliyeva, A.V. Trukhanov, S.V. Trukhanov, M.N. Mirzayev.* Design, production and investigation of structural singularities of layered metal-oxide nanostructures, *International Journal of Nanoscience*, 2025 <https://doi.org/10.1142/S0219581X24500157>
- [20] *S. Adachi.* Optical constants of crystalline and amorphous semiconductors: numerical data and graphical information, Springer, 1999
- [21] *D. E. Aspnes.* *Thin Solid Films* 89, 249, 1982

Kh.N. Ahmadova

OPTICAL PROPERTIES AND FUNCTIONAL APPLICATION PERSPECTIVES OF NANOSCALE AI THIN FILM STRUCTURES

Nanoscale Al/soda-lime glass (SLG) thin film systems were fabricated using the thermal evaporation technique. Aluminum layers with different thicknesses were deposited onto glass substrates, and Al nanoparticles with an average size of 50 nm were used as the initial material. To determine the optical parameters of the Al/SLG thin films, spectral ellipsometry was applied. Ellipsometry is a highly precise method based on analyzing changes in the polarization state of the reflected light after its interaction with the surface, and it is an effective approach for studying the boundary and surface properties of different media. Measurements were carried out at room temperature within the photon energy range of 0.5–6 eV. The obtained ellipsometric data were analyzed using dispersion models based on Cauchy-type oscillators. Variations in the refractive index were found to be related to the microstructural features of the films, which depend on the partial pressure of oxygen during deposition. The results indicate that such Al/SLG thin film systems can be considered as promising materials for optoelectronic devices, highly sensitive sensors, and various functional electronic components.

Qəbul olunma tarixi: 06.10.2025