

GÜNƏŞ ELEMENTLƏRİNDƏ PƏNCƏRƏ LAYI CdSe NAZİK TƏBƏQƏLƏRİNİN SPEKTROSKOPİK ELLİPSOMETRİYA METODU İLƏ TƏDQIQI

X.N. ƏHMƏDOVA^{1,2}, L.N. İBRAHİMOVA³

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

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

³Naxçıvan Dövlət Universiteti, Naxçıvan, AZ-7012, Azərbaycan

khuramanahmadova85@gmail.com

Bu işdə şüşə altlıqlar üzərində alınmış CdSe nazik təbəqələrinin optik xassələri spektroskopik ellipsometriya metodu ilə tədqiq edilmişdir. Hazırlanmış nümunələr M-2000 fırlanma kompensatorlu spektroskopik ellipsometrdə otaq temperaturunda, 1.5-7.0 eV foton enerji intervalında ölçülmüşdür. Optik sabitlərin spektral dispersiyası uyğun dispersiya modelindən istifadə etməklə alınmışdır. Nazik təbəqələrin qalınlığı, dielektrik nüfuzluğu (həqiqi və xəyali hissəsi), sındırma və ekstensiya əmsalları hesablanmışdır. CdSe nazik təbəqələrinin ölçüsündən asılı olaraq yüksək şəffaflıq müşahidə edilmişdir. Kimyəvi çökdürmə metodu ilə alınmış 350 və 400 nm qalınlıqlı nümunələr üçün qadağan olunmuş zonanın eni təyin edilmişdir.

Açar sözlər: Spektroskopik Ellipsometriya, CdSe, nazik təbəqələr, optik sabitlər.

DOI:10.70784/azip.2.2025220

1. Giriş

CdSe birləşməsi II-VI qrupuna daxil olan mürəkkəb yarımkeçiricilərindən biridir. Bu birləşmə fundamental tədqiqatlarda və müxtəlif texnoloji tətbiqlərdə mühüm rol oynayır. CdSe görünən spektrin geniş diapazonunda udma spektrinə malikdir. Belə nazik təbəqələrin qadağan olunmuş zonasının eninin artırılma texnologiyası məlumdur [1]. Lakin, məlum texnologiyayı təsdiq edən hərtərəfli optik analiz təklif edilməmişdir. Məlumdur ki, kadmium selenidin ölçü və formasının onun fiziki xassələrinə birbaşa təsiri vardır. Ona görə də, bu birləşmənin nanostrukturlarından günəş batareyalarında, lazerlərdə, işıq diodlarında tətbiq imkanları vardır. Son illərdə CdS və CdSe nanostrukturlarının tədqiqi istiqamətində kifayət qədər irəliləyişlər müşahidə edilmişdir. Bu materialların nazik təbəqələrinin quruluşunun və optik parametrlərinin öyrənilməsi onlara olan marağı daha da artırmışdır [2-7].

Məlumdur ki, nazik təbəqələrin optik xassələrinin tədqiq edilməsi üçün bir sıra tədqiqat metodları vardır. Bu metodlardan biri də Spektroskopik Ellipsometriya metodudur. Dünyanın qabaqcıl metodlarından biri olan Ellipsometriya nazik təbəqələrin fiziki parametrlərinin tədqiqi üçün ideal metod sayılır və optoelektronikada geniş istifadə olunur. Məlum olduğu kimi, işıq signalının halı haqqında məlumat 4 Stoks parametri ilə müəyyən olunur. Hal-hazırda bərk, maye və qaz halında olan mühitlərin tədqiqi üçün dünya standartına çevrilən ellipsometrik metod 4 Stoks parametrini yüksək dəqiqliklə təyin etməyə imkan verir [8-9]. Ona görə də, Ellipsometrik spektroskopiya metodu ilə alınmış nəticələr optik tədqiqatları təcrübi olaraq tam əhatə edir [10-13].

Bu tədqiqatlar zamanı əldə olunan fundamental xarakteristikalardan biri də sistemin dielektrik funksiyasıdır. Dielektrik funksiyası, obyektin molekul və atomlarının elektron keçidlərinə və vibrasiya həyəcanlanmasına uyğun gələn tezlik diapazonunda təyin olunan və onun təkrarolunmaz xüsusiyyətidir (dielektrik fingerprint). Nazik təbəqələrin qalınlığının çoxlaylı strukturun qalınlığından asılı olaraq dəyişən optik xassələrinin öyrənilməsi çox vacibdir. Ellipsometriya, standart metodlarda olduğu kimi işığı buraxma və udulmaya uyğun olaraq təyin etmir. Bu metod, digər metodlardan fərqli olaraq, işığın intensivliyini deyil, polarizasiya halını ölçür. Ona görə də, optik parametrləri daha yüksək dəqiqliklə təyin edir. Bu metodun digər üstünlüklərindən biri odur ki, mürəkkəb sistemlərin hər bir hissəsinin ayrı-ayrılıqda geniş spektral diapazonda analiz etməyə imkan verir. Ellipsometrik ölçmə texnikası xətti polarlaşmış işıq şüasının nümunənin səthindən əks olunmasından sonra Ψ və Δ polarizasiya parametrlərinin dəyişməsinin təhlilindən asılıdır. Bu dəyişmə işığın elektrik sahəsinin düşmə müstəvisinə paralel (p) və perpendikulyar (s) komponentlərinin amplitudalarının nisbəti və faza dəyişməsinə təsvir edən iki dəyişən ψ və Δ ilə ifadə olunur. Bu kəmiyyətlər p və s polarizasiyasının r_p və r_s Frenel əmsallarının nisbəti şəklində verilir:

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \tan \Psi e^{i\Delta} \quad (1)$$

Səthində defekt olmayan həcmli materialın ellipsometrik ölçməsinin nəticələrini bilavasitə materialın optik sabitlərinə: n sındırma əmsalına və k ekstensiya əmsalına çevrilmək olur:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2 = \tilde{n} = (n + ik)^2 = \sin^2 \Phi \left[1 + \tan^2(\Phi) \cdot \left(\frac{1-\rho}{1+\rho} \right)^2 \right] \quad (2)$$

Lakin, praktikada yuxarıda göstərilən ehtimallara nadir halda rast gəlinir və real materialların hər birinin səthində müəyyən defektlər, oksidlər və s. mövcud olur [14-15]. Bu halda, sistemin optik parametrlərini təsvir

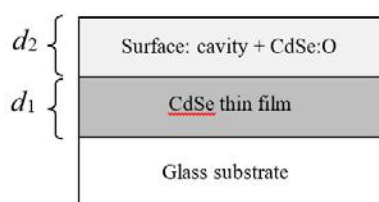
edən optik model qurulur və eksperimental nəticələrlə uyğunlaşdırılır.

CdSe nazik təbəqələrinin bir çox fiziki xassələri tədqiq olunsun da, onların optik xassələri kifayət qədər

öyrənilməmişdir. Bu işdə, 350 nm və 400 nm qalınlığında kadmium selenid nazik təbəqələri alınmış və onların optik parametrləri Spektroskopik Ellipsometriya metodu ilə tədqiq edilmişdir.

2. Təcrübə

Tədqiqatlar zamanı CdSe nazik təbəqələri standart metodla kimyəvi çökdürmə üsulu ilə şüşə altlıqlar üzərində alınmışdır [16]. Nazik təbəqələrin optik xassələri fırlanma kompensatorlu Spektroskopik Ellipsometrdə (M-2000DI J.A. Woollam Co.,Inc.) 1.5-7 foton enerjisi intervalında, otaq temperaturunda, 55°-70° düşmə bucağı intervalında yerinə yetirilmişdir. Analizlər zamanı düşmə bucağının optimal qiyməti kimi 65° istifadə edilmişdir. Foton enerjilərinin bütün diapazonunda eksperimental nəticələr üçün üçlaylı optik modeldən istifadə edilmişdir. Nazik təbəqəli sistem üçün qurulmuş model şəkil 1-də göstərilmişdir.



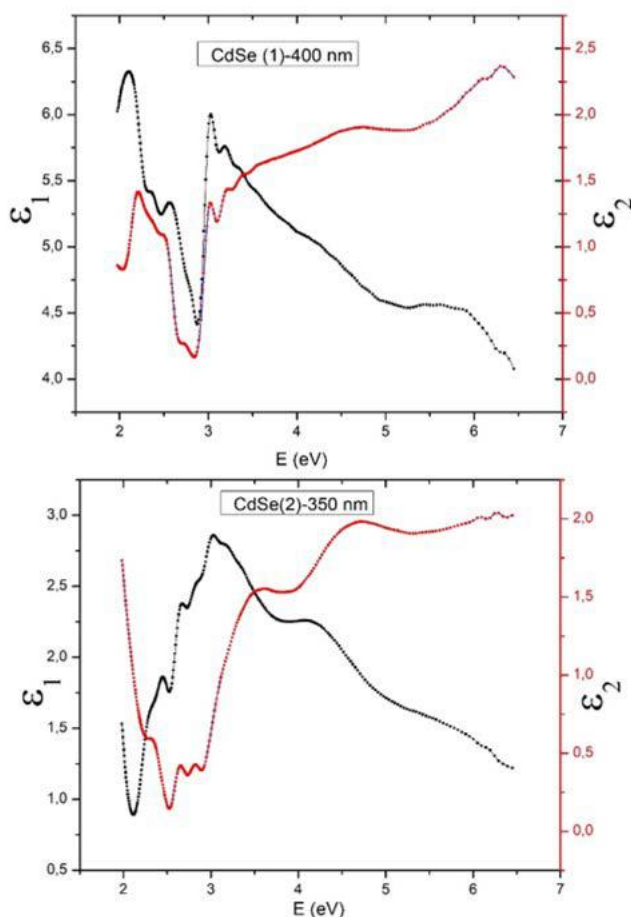
Şəkil 1. Analiz zamanı istifadə olunmuş optik model.

Şəkil 1-dən göründüyü kimi, optik model üç müxtəlif laydan ibarətdir. Modeldə göstərilmiş sistem şüşə

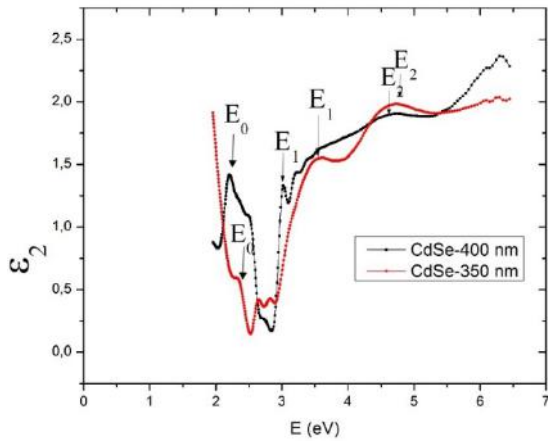
altlıq, CdSe nazik təbəqəsi və nazik təbəqənin səthində formalaşmış CdSe:O+boşluq layından ibarətdir. CdSe nazik təbəqəsinin optik sabitləri müvafiq Qauss və PsemiTri dispersiya modellərindən istifadə edilməklə modelləşdirilmiş, səth təbəqəsinin optik sabitləri isə CdSe:O və boşluğun qarışığına Bruggeman Effektiv Mühit Yaxınlaşması (BEMA) tətbiqi ilə əldə edilmişdir [17]. Səthin kələ-kötürlüyü isə qurulmuş model əsasında təyin edilmişdir. Xətti regressiya analizi (XRA) ilə: d – CdSe nazik təbəqələrin qalınlığı, ε_1 və ε_2 – CdSe təbəqələrinin dielektrik funksiyasının həqiqi və xəyali hissəsi, n – sındırma və k – ekstensiya əmsalı təyin edilmişdir.

3. Nəticələrin və müzakirəsi

Təcrübə nəticələrin iki müxtəlif laylı struktur nümunələri üçün qurulmuş modelə uyğunlaşdırılması yolu ilə CdSe nazik təbəqələrinin qalınlıqları hesablanmışdır. Müəyyən edilmişdir ki, kimyəvi çökdürmə metodu ilə alınmış nazik təbəqələrin qalınlıqları 350 nm və 400 nm qiymətlərinə uyğun gəlir. Bu nazik təbəqələrin optik sabitləri ossilyator modeli çərçivəsində Qauss və PsemiTri ossilyatorundan istifadə edilərək təyin edilmişdir. Hesablamalar zamanı orta kvadratik xəta 1 ətrafında dəyişir ki, bu da, qurulmuş optik modelin eksperimental parametrləri kifayət qədər yüksək dəqiqliklə təsvir etməsinin göstəricisidir. Müxtəlif qalınlıqlı CdSe nazik təbəqələrinin analizdən tapılan dielektrik funksiyaları şəkil 2-də göstərilmişdir.



Şəkil 2. Qalınlığı 350 və 400 nm olan CdSe nazik təbəqələrinin dielektrik funksiyasının həqiqi və xəyali hissəsi.

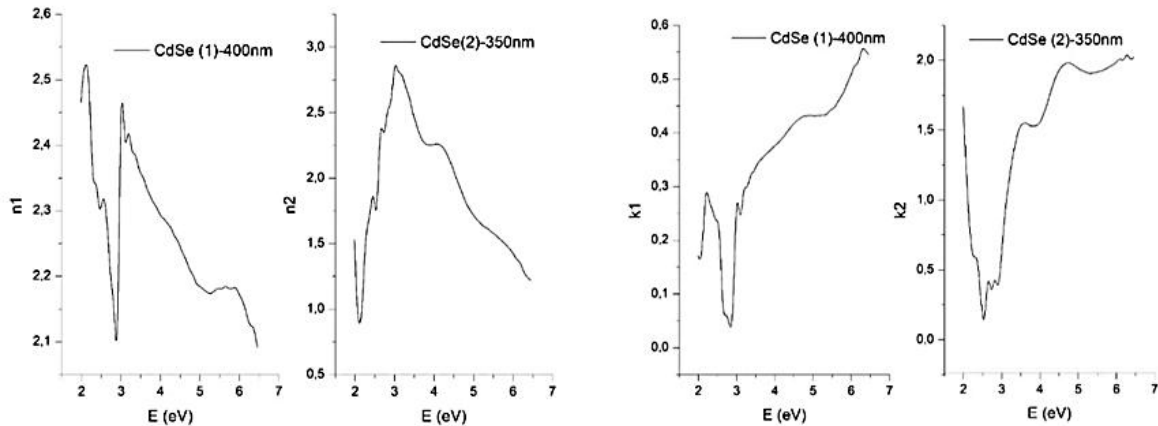


Şəkil 3. Qalınlığı 350 nm və 400 nm olan CdSe nazik təbəqələrinin dielektrik funksiyalarının xəyali hissələrinin müqayisəsi.

Qalınlıqları 350 nm və 400 nm olan CdSe nazik təbəqələrinin dielektrik funksiyasının xəyali hissələrinin müqayisəsi şəkil 3-də göstərilmişdir. Şəkil 3-dən görünür ki CdSe, nazik təbəqələrinin enerji keçidləri CdSe kristalına uyğun olsa da qadağan olunmuş zonanın eni təbəqənin qalınlığının azalması ilə qısa dalğalara tərəf sürüşür. Aparılmış tədqiqatlardan məlum olur

ki, həcmi CdSe-də qadağan olunmuş zonanın eni 1.7 eV olduğu halda tavanmış, nazik təbəqələrdə bu zonanın eni qalınlığı $d=400$ nm olan nümunədə $E_g=1.9$ eV, qalınlığı $d=350$ nm olan nümunədə isə $E_g=2.2$ eV enerji intervalına tərəf sürüşür.

Tədqiq olunan müxtəlif qalınlıqlı CdSe nümunələrinin ekstensiya və sındırma əmsalları Spektroskopik ellipsometriya metodu ilə aparılmış tədqiqatların nəticələrinə əsasən hesablanmışdır şəkil 4. Şəkil 4-dən göründüyü kimi, CdSe nazik təbəqələrinin ekstensiya və sındırma əmsalları geniş enerji intervalında (1.5-7 eV) tədqiq edilmişdir. Alınmış nəticələrə əsasən qalınlığı $d=400$ nm olan nazik təbəqənin sındırma əmsalı 2.3-2.8 eV, qalınlığı $d=350$ nm olan CdSe nümunəsində isə 2.1-2.9 eV intervalında dəyişir ki, bu da həcmi yarımkəçirici CdSe-nin sındırma əmsalının dəyişmə intervalı (2.5-2.65 eV) ilə tam uyğunlaşır. Tədqiqatlardan görünür ki, görünən oblastda yüksək şəffaflığa və ultrabənövşəyi şüaları udma qabiliyyətinə malik olan həcmi CdSe kimi, tədqiq etdiyimiz müxtəlif qalınlıqlı nazik təbəqəli nümunələr də bu xüsusiyyətləri daşıyır. CdSe nazik təbəqələrinin optik sabitlərinin dəyişməsinin müasir metodologiya ilə öyrənilməsi onların müxtəlif optik təbii imkanlarını genişləndirir.



Şəkil 4. 350 və 400 nm qalınlıqlı olan CdSe nazik təbəqələrinin sındırma və ekstensiya əmsalları.

4. Nəticələr

Təqdim olunmuş işdə kimyivəvi çökdürmə metodu ilə şüşə altlıqlar üzərində alınmış CdSe nazik təbəqələri spektroskopik ellipsometriya metodu ilə tədqiq edilmişdir. Dispersiya modelindən istifadə etməklə optik sabitlər hesablanmışdır. Nazik təbəqələrin qalınlığı, dielektrik nüfuzluğu (həqiqi və xəyali hissəsi), sındırma və ekstensiya əmsalları təyin edilmişdir. Müəy-

yən edilmişdir ki, 350 nm və 400 nm qalınlıqlı kadmiyum selenid nazik təbəqələrində qadağan olunmuş zonanın eni $E_g = 1.9$ eV və $E_g = 2.2$ eV qiymətlərinə uyğun gəlir. Qadağan olunmuş zonanın genişlənmə faktı nazik təbəqələrdə faza əmələgəlmə prosesi ilə izah edilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, nazik təbəqələrin qalınlığı artdıqca faza əmələgəlmə prosesinə uyğun olaraq qadağan olunmuş zonanın eni CdSe kristalına uyğunlaşır.

- [1] X. Wu. High-efficiency polycrystalline CdTe thin-film solar cells, *Solar Energy*, 77, P.803-814, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.06.006>
- [2] Y. Shim, J. Sakamoto, A. Suzuki, Kh. Khalilova, K. Wakita, N. Mamedov, A. Bayramov, E. Huseynov, I. Hasanov. Spectroscopic ellipsometry studies of CdS:O layers for solar cells, *Japanese Journal of*

- Applied Physics*, 50, P.05FC14, 2011. <https://doi.org/10.1143/JJAP.50.05FC14>
- [3] A. Kitano, Y.G. Shim, K. Wakita, Kh. Khalilova, N. Mamedov, A. Bayramov, E. Huseynov, I. Hasanov. Optical characterization of non-annealed CdS:O films for window layers in solar cells, *Physica Status Solidi C*, 10, P.1107-1110, 2013. <https://doi.org/10.1002/pssc.201200834>

- [4] Kh. Khalilova, Y.G. Shim, I. Hasanov, R. Asaba, K. Wakita, N. Mamedov. Spectroscopic ellipsometry studies of as-prepared and annealed CdS:O thin films, *Physica Status Solidi C*, 12, P.592-595, 2015. <https://doi.org/10.1002/pssc.201400272>
- [5] X.N. Əhmədova. laylı metal-oksüd nanostrukturalarının quruluş dizaynı, alınması və tədqiqi *AJP FİZİKA*, vol. XXX № 4, section: A, s.3-8, 2024. DOI:10.70784/azip.2.2024403
- [6] X.N. Əhmədova. Al/Fe₃O₄ nazik təbəqəli sistemlərinin alınması və struktur tədqiqi// *AJP FİZİKA*, vol. XXIX №4, səh.19-23, 2023.
- [7] 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
- [8] M. Nakajima, R. Asaba, A. Suzuki, Y.G. Shim, K. Wakita, Kh. Khalilova, N. Mamedov, A. Bayramov, E. Huseynov. Structure and optical properties of CdS:O films by cathode sputtering, *Physica Status Solidi C*, 12, P.781-784, 2015. <https://doi.org/10.1002/pssc.201400347>
- [9] 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>
- [10] A. Bayramov, E. Alizade, S. Mammadov, A. Tavkhelidze, N. Mamedov, Y. Aliyeva, Kh. Ahmedova, 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>
- [11] 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>
- [12] 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.
- [13] 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>
- [14] L.N. Ibrahimova, N.M. Abdullayev, S.R. Azimova, Y.I. Aliyev. Surface properties and composition analysis of nano-sized thin films of CdSe: by SEM analysis, *East European Journal of Physics*, 2, P.293-296, 2024. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2024-2-32>
- [15] L.N. Ibrahimova, N.M. Abdullayev, M.E. Aliyev, G.A. Garashova, Y.I. Aliyev. Phase formation process in CdSe thin films, *East European Journal of Physics*, 1, P.493-496, 2024. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2024-1-54>
- [16] N.M. Abdullayev, L.N. Ibrahimova, M.E. Aliyev, Y.I. Aliyev. Investigation of the atomic dynamics of CdSe thin layers by Raman spectroscopy, *Chemical Problems*, 22, P.231-236, 2024. <https://chemprob.org/wp-content/uploads/2024/03/231-236.pdf>
- [17] D.E. Aspnes. Optical properties of thin films, *Thin Solid Films*, 89, P.249-262, 1982. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(82\)90590-9](https://doi.org/10.1016/0040-6090(82)90590-9)

Kh.N. Ahmadova, L.N. Ibrahimova

STUDY OF CdSe THIN LAYERS AS WINDOW LAYERS IN SOLAR CELLS USING SPECTROSCOPIC ELLIPSOMETRIC METHOD

In this work, the optical properties of CdSe thin films grown on glass substrates were studied by spectroscopic ellipsometry. The prepared samples were measured at room temperature in the photon energy range of 1.5-7.0 eV on an M-2000 rotation-compensated spectroscopic ellipsometer. The spectral dispersion of optical constants was obtained using an appropriate dispersion model. The thickness, dielectric permittivity (real and imaginary parts), refractive and extension coefficients of the thin films were calculated. High transparency was observed depending on the size of the CdSe thin films. The width of the forbidden zone was determined for samples with a thickness of 350 and 400 nm obtained by the chemical deposition method.

Qəbul olunma tarixi: 22.04.2025