

POZİTRONLARIN ANNİHİLYASIYA XÜSUSİYYƏTLƏRİ VASİTƏSİLƏ Al VƏ Fe_3O_4 ƏSASLI NAZİK TƏBƏQƏLƏRİN QURULUŞUNUN TƏDQIQI

X.N. ƏHMƏDOVA^{1,2}

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

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

khuramanahmadova85@gmail.com

Epitaksial çökdürmə texnologiyası tətbiq olunmaqla Al (60 və 100 nm), Fe_3O_4 (120 nm) və onların birləşmiş kompozit təbəqəsi (220 nm) şəklində nazik təbəqələr sintez edilmişdir. Hazırlanmış nümunələrdəki mikroyarımçıq sahələr və boşluq tipli defektlər Pozitron Annihilyasiyasının Doppler Genişlənməsi üsulu ilə araşdırılmışdır. Spektral ölçülərin işlənməsi zamanı S və W parametrlərinin enerji üzrə dəyişməsi əldə edilmiş və müvafiq analiz aparılmışdır. Tədqiqat nəticələri göstərmişdir ki, Al və Fe_3O_4 təbəqələrində müşahidə olunan əsas defektlər xətti defektlərdir. Al- Fe_3O_4 kompozit strukturu üçün isə annihilyasiya məlumatları daha çox vakansiya xarakterli mərkəzlərin mövcudluğunu göstərmişdir.

Açar sözlər: Pozitron annihilyasiyası, Doppler genişlənməsi, nazik təbəqələr.

DOI:10.70784/azip.2.2025411

Giriş

Funksional materialların nanoölçülü formada hazırlanması onların elektronika və spintronikadakı tətbiq imkanlarını xeyli genişləndirir. Buna görə də, nazik təbəqələrin alınması və fiziki xüsusiyyətlərinin öyrənilməsi son illər xüsusi diqqət mərkəzindədir [1, 2]. Nazik təbəqələrin sintezində faza əmələgəlmə prosesini təmin edən texnologiyaların seçilməsi vacibdir. Metal və metal oksidlərinin sadə kimyəvi tərkibi onların təbəqə şəklində daha sürətli strukturlaşmasına şərait yaradır. Alüminium, dəmir və onların oksidlərinin nanoölçülü formalarının xüsusiyyətlərinin öyrənilməsi, həmçinin bu xüsusiyyətlərin xarici təsirlərə həssaslığı onların tətbiq sahəsini artırır [3, 4].

Nazik təbəqələrin mikroyarımçıq quruluşunu araşdırmaq üçün istifadə olunan üsullardan biri pozitron annihilyasiya spektroskopiyasıdır (PAS). Bu metod materialların atom miqyasında defektlerini yüksək dəqiqliklə aşkar etməyə imkan verir [5]. PAS metodu müxtəlif materiallarda, xüsusilə də metal, yarımqəbirici və nazik örtüklərdə struktur dəyişikliklərinin təhlilində geniş tətbiq olunur və Al, Fe_3O_4 və Al- Fe_3O_4 kimi sistemlərin öyrənilməsi üçün əlverişlidir [6,7].

Ədəbiyyat məlumatları göstərir ki, PAS Fe_3O_4 strukturlarında ionların daxil olması zamanı baş verən qəfəs dəyişmələrini izləməyə imkan verir. Məsələn, In ionlarının konsentrasiyası artdıqda pozitron ömrünün azalması müşahidə olunmuş və bu, qəfəsin sıxlaşması və boşluqların həcmnin kiçilməsi ilə əlaqələndirilmişdir. Bu zaman pozitronlar oksigen ionlarının daxili qatda olan elektronları ilə annihilyasiya edir. Al və Fe_3O_4 sistemləri müxtəlif aspektlərdən öyrənilsə də, onların nazik təbəqələrində defektlərin formalaşması haqqında məlumat azdır. Bu işdə nanoölçülü nazik təbəqələr hazırlanmış və onların vakansiya və defekt xüsusiyyətləri PAS metodu ilə tədqiq edilmişdir.

2. Materiallar və metodlar

2.1. Nümunələrin xarakteristikası

Al, Fe_3O_4 və Al- Fe_3O_4 sistemlərinə aid nazik təbəqələr xüsusi texnologiya ilə hazırlanmış və proses

zamanı çirkəlin daxil olmasının qarşısı ciddi şəkildə alınmışdır. Nazik təbəqələrin alınması üçün termal püskürtmə üsulu istifadə olunmuşdur. Püskürtmə əməliyyatları Leybold-Herause L-560 tipli vakuum qurğusunda aparılmış və kameradakı işçi təzyiq 2×10^{-5} mbar səviyyəsində saxlanılmışdır.

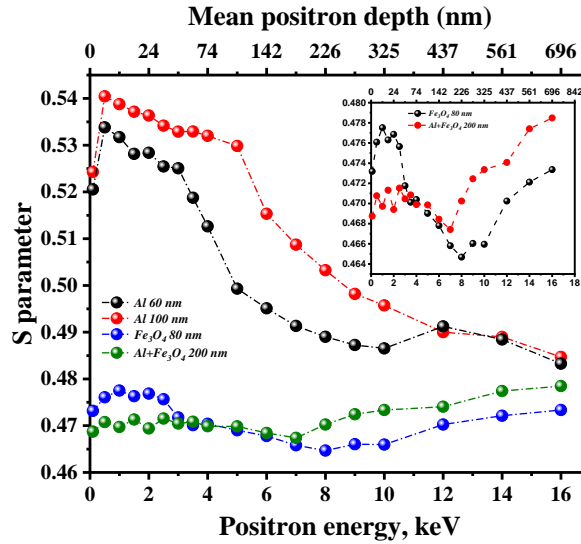
Təcrübələrdə 25×19 mm ölçülü, kimyəvi cəhətdən əvvəlcədən işlənmiş şüşə altlıqdan istifadə edilmişdir. Hazırlanmış təbəqələrdə faza əmələgəlmə prosesini izləmək üçün struktur-faza analizləri aparılmışdır.

2.2. Doppler Genişlənməli Pozitron Annihilyasiya Spektroskopiyası

Nazik təbəqələrin Doppler genişlənməli annihilyasiya spektroskopiyası (DBAS) üzrə tədqiqatları Birləşmiş Nüvə Tədqiqatları İnstitutunun (JINR) Nüvə Problemləri Laboratoriyasında, yüksək beynəlxalq nüfuzlu malik tədqiqat mərkəzində aparılmışdır. Bu qurğuda yavaşladılmış pozitron şüası xüsusi injektor sistemindən uyğunlaşdırılaraq istifadə olunur. Spektroskopiya sistemi yüksək təmizlikdə germanium detektoru (HPGe), yüksək gərginlik mənbəyi, çoxkanallı analizator, gücləndirici və kompyuter kompleksindən ibarətdir [8]. HPGe detektorunun yüksək enerjili γ -kvanta, xüsusilə 511 keV xəttini dəqiq qeyd alması onun əsas üstünlüyüdür [9]. Nümunələr 10^{-9} Torr səviyyəsində yüksək vakuum şəraitində tədqiq olunmuşdur. Annihilyasiya prosesindən alınan spektrlərdən S və W parametrləri müəyyən edilmiş və məlumatlar VEPFIT proqram təminatı ilə işlənmişdir [10]. Elektron impuls paylanması (EMD) spektrləri isə DBAS nəticələri əsasında 4 və 7 keV enerji nöqtələrində analiz olunmuşdur. Bu analiz defektlərin xarakterini və onların ətraf atom mühitini müəyyən etməyə imkan verir [11].

3. Nəticələr və müzakirə

Al, Fe_3O_4 və Al- Fe_3O_4 nazik təbəqələri üçün S-parametrinin pozitron implantasiya enerjisindən asılılığı Şəkil 1-də göstərilmişdir.



Şəkil 1. Doppler Genişlənməsi Annihilasiya Spektroskopiyası ölçmələrindən əldə olunan Al, Fe₃O₄ və Al-Fe₃O₄ nazik layları üçün pozitron implantasiya enerjisindən asılı olaraq S-parametrinin dəyişməsi.

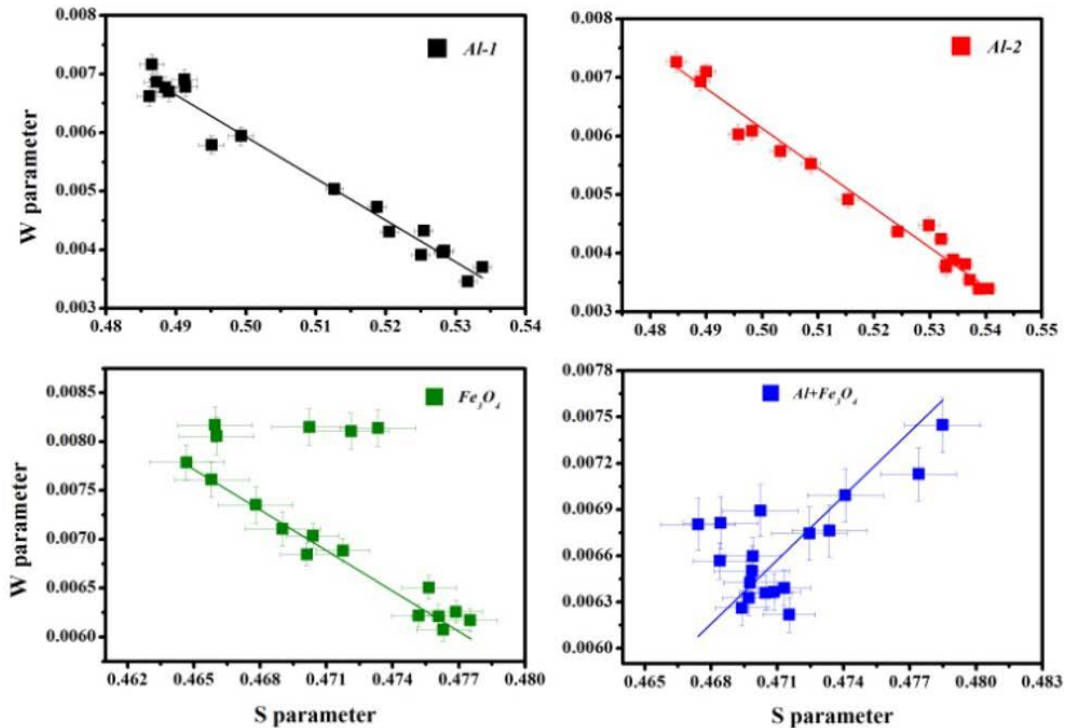
S-parametri elektron–pozitron annihilasiyası prosesinin xüsusiyyətlərini xarakterizə edir və orta pozitron nüfuz dərinliyinə qarşı (nm) təsvir olunmuşdur. Nazik təbəqələr üçün pozitronların orta nüfuz dərinliyi aşağıdakı ifadə ilə hesablanmışdır [12]:

$$Z(E_+) = (40/\rho)E_+^{1.62}$$

Al nümunələrində (60 və 100 nm) 1 keV-ə qədər S-parametridə artım müşahidə olunur; daha yüksək enerjilərdə isə annihilasiya dərinliyi artdıqca S-parametri azalır. Bu dəyişmə oksidləşmiş səthlə təmiz metal arasında olan keçid zonası ilə əlaqəlidir. Təxminən 12eV-dən sonra pozitronlar nümunəni tam keçirdiyi

üçün nəticələr artıq havada annihilasiyaya uyğun gəlir. Bu xüsusiyyət Al ilə müqayisədə Fe₃O₄ kimi aşağı valentlikli materiallar üçün daha tipikdir.

Fe₃O₄ və Al-Fe₃O₄ nazik təbəqələrində isə Al nümunələri ilə müqayisədə S-parametridə daha kəskin fərqlər (azalma) qeydə alınır. Al-Fe₃O₄ təbəqəsində 1keV-də görünən pik demək olar ki, itir. Fe₃O₄-də Al-Fe₃O₄ ilə müqayisədə müşahidə olunan cüzi S-artımı materialın çoxkomponentli quruluşunda əlavə rabitələrin əmələ gəlməsi ilə izah olunur. 3–7 eV aralığında S-parametri hər iki materialda demək olar ki, eyni şəkildə dəyişir ki, bu da annihilasiyanın oxşar struktur zonasında baş verdiyini göstərir.



Şəkil 2. Nümunələrin dərinlik üzrə S–W xarakteristikası.

10 eV-dən yuxarı enerjilərdə hər iki materialda S-parametri nümunədənkənar annihilyasiya nəticələrinə yaxınlaşır. Bu diapazon keçid bölgəsi kimi qiymətləndirilə bilər; burada həm səth, həm də Al/Fe₃O₄ komponentlərinin təsiri mövcuddur. Al-Fe₃O₄ təbəqəsində S-parametrinin Fe₃O₄-dən bir qədər yüksək olması annihilyasiyada Al atomlarının iştirakını göstərir.

Bu nəticələr Fe₃O₄-ün aşağı valentlik və sabit S-enerji asılılığı ilə xarakterizə olunduğunu göstərir. Bu, materialın korroziyaya qarşı dayanıqlığının göstəricilərindən biridir və Fe₃O₄ əsasında davamlı boyalar və örtüklər üçün perspektiv istifadəyə imkan yaradır. Al və Fe₃O₄ birləşməsi də bu dayanıqlığın saxlandığını göstərir.

Şəkil 2-də Al, Fe₃O₄ və Al-Fe₃O₄ təbəqələri üçün S-W uyğunlaşdırılmış qiymətlərin korrelyasiyası verilmişdir. S-W qrafikləri defektlərin növünü və annihilyasiya prosesinə təsir edən elektron mühitini müəyyən etməkdə mühüm rol oynayır [13]. Nümunələrin hər biri üçün xətt çubuqları göstərilmişdir. Fərqli qalınlığa malik Al təbəqələrində nöqtələrin demək olar düz xətt üzərində toplanması 60 və 100 nm-lik nümunələrdə

eyni tipli vakansiya defektlərinin mövcud olduğunu göstərir. 60 nm Al təbəqəsində bu defektlər daha çox səthdə üstünlük təşkil edirdisə, 100 nm-lik təbəqədə onların dərinlikdə üstün olduğu müşahidə olunur.

Bu oxşarlıqlar növbəti iki qrafikin nəticələrini qiymətləndirmək üçün baza kimi qəbul edilə bilər. Defektlərin fiziki quruluşa uyğunluğunu dəqiqləşdirmək üçün MIKA proqramı ilə aparılmış hesablamalara müraciət edilmişdir [14].

4. Nəticə

Təmiz Fe₃O₄-ün aşağı valentliyi onun korroziyaya qarşı dayanıqlığını göstərir. Belə materiallar davamlı boyalar və örtüklər üçün perspektiv material kimi istifadə oluna bilər. Al və Fe₃O₄-nün birləşməsi isə Fe₃O₄-ün korroziyaya qarşı dayanıqlığını qoruyur.

Nümunələrdə iştirak edən çoxkomponentli materialların qarşılıqlı təsiri, pozitron spektroskopiyası üsulları ilə defektlərin növlərinin və həcmələrinin müəyyən edilməsini xeyli çətinləşdirir.

- [1] E.Sh. Alekperov, S.G. Jabarov, T.A. Darziyeva, G.B. Ibragimov, A.M. Nazarov, S.S. Farzaliev. Effect of an electric field on the crystallization behavior of amorphous TlIn_{1-x}Sn_xSe₂ films, *Inorganic Materials*, 59, 1,P.8-11, 2023. <https://doi.org/10.1134/S0020168523010028>
- [2] S. Khayyamifar, G. Sadowski, J. Hektor, D.Music. Amorphous TiNiSn thin films for mechanical flexibility in thermoelectric applications, *Thin Solid Films*, 807, P.140534, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2024.140534>
- [3] T.A. Darziyeva, E.Sh. Alekperov, S.H. Jabarov, M.N. Mirzayev. Influence of heavy ions on the magnetic properties of Fe₃O₄ nanoparticles, *Integrated Ferroelectrics*, 232, 1,P.127-133, 2023. <https://doi.org/10.1080/10584587.2023.2173447>
- [4] I. Leonov, A.N. Yaresko, V.N. Antonov, M.A.Korotin, V.I. Anisimov. Charge and orbital order in Fe₃O₄, *Physical Review Letters* 93, P.146404, 2004. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.146404>
- [5] A. Garcia-Valenzuela, M. Butterling, M.O.Liedke, E. Hirschmann, T.T. Trinh, A.G.Attallah. Positron annihilation analysis of nanopores and growth mechanism of oblique angle evaporated TiO₂ and SiO₂ thin films and multilayers, *Microporous and Mesoporous Materials*, 295, P.109968, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2019.109968>
- [6] S.F. Samadov, N.V.M. Trung, A.A. Donkov, A.A. Sidorin, O.S. Orlov, E. Demir, O.A.Samedov, S.H. Jabarov, N.V. Tiep, E.P.Popov, M.N. Mirzayev. Investigating the impact of gamma irradiation and temperature on vacancy formation and recombination in ZrB₂ ceramics using positron annihilation spectroscopy, *Journal of Nuclear Materials*, 599, P.155242, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2024.155>
- [7] W. Sato, R. Ishizaki, H. Shimizu, M.Sakaguchi, S. Tsutsui. Microscopic probing of the doping effects of In ions in Fe₃O₄, *Journal of Applied Physics*, 132, P.083904, 2022.<https://doi.org/10.1063/5.0091339>
- [8] Kh.N. Ahmadova, S.H. Jabarov. Obtaining of Al nanolayers and crystal structur, *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*, 52, P.116-120, 2022.
- [9] P. Horodek, M. Kulik. Application of positron beam for the long range effect studies in proton implanted iron, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 443, P.84-89, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2019.02.003>
- [10] A. van Veen, H. Schut, M. Clement, J.M.M. de Nijs, A. Kruseman, M.R. Ijpma. VEPFIT applied to depth profiling problems, *Applied Surface Science*, 85, P.216-224, 1995.[https://doi.org/10.1016/0169-4332\(94\)00334-3](https://doi.org/10.1016/0169-4332(94)00334-3)
- [11] L.L. Nguyen, T.D. Xuan, C.V. Chung, L.P. Nguyen, N.T. Phuong, P.T. Hue, N.T.N. Hue, N.V. Tiep, N.V.M. Trung, A. Drozdziel, M. Turek, K. Pyszniaak, H.A.T. Kiet, H.-D. Nguyen, T.-P.T. Pham, N.N. Anh, N.C. Chien, T.T.H. Nguyen, N.Q. Hung, L.A. Tuyen. Solid-state crystallization, oxygen-vacancy rich mesopores and stable triad-silanol nests in ZSM-5 catalyst induced by electron-beam irradiation and calcination, *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 9, P.100646, 2024.<https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2023.100646>
- [12] S. Awad, A. Al-rashdi, E.E. Abdel-hady. Free volume properties of the zinc oxide nanoparticles / waterborne polyurethane coating system studied by a slow positron beam, *Journal of Composite*

- Materials, 53, 13,P.1765-1775, 2018.<https://doi.org/10.1177/0021998318809526>
- [13] *M. Clement, J.M.M. de Nijs, P. Balk, H. Schut, A. van Veen.* Analysis of positron beam data by the combined use of the shape and wing parameters, *Journal of Applied Physics*, 79, 12, P.9029-9036, 1996.<https://doi.org/10.1063/1.362635>
- [14] *T. Torsti, M. Heiskanen, M.J. Puska, R.M. Nieminen.* MIKA: Multigrid-based program package for electronic structure calculations, *International Journal of Quantum Chemistry*, 91, 2,P.171-176, 2003.<https://doi.org/10.1002/qua.10397>

Kh.N. Ahmadova

STRUCTURAL ANALYSIS OF Al AND Fe₃O₄ BASED THIN FILMS USING POSITRON ANNIHILATION TECHNIQUES

Thin films of Al (60 and 100 nm), Fe₃O₄ (120 nm), and their combined composite layer (220 nm) were synthesized using epitaxial deposition techniques. Microstructural features and vacancy-type defects in the prepared samples were examined by Doppler Broadening Positron Annihilation Spectroscopy. Analysis of the measured spectra provided the energy dependence of the S and W parameters. The results indicate that the predominant defects in Al and Fe₃O₄ films are linear in nature, whereas the data for the Al-Fe₃O₄ composite suggest the presence of vacancy-type centers.

Qəbul olunma tarixi: 18.11.2025