

AVİASIYA ELEKTRONİKASI

PACS 61.80.Hg,78.70.Nx

NANO SiO₂ BİRLƏŞMƏSİNİN ELEKTRİK XÜSUSİYYƏTLƏRİNƏ NEYTRONLA ŞÜALANMANIN TƏSİRİ

R.N. Mehdiyeva

Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Radiasiya Problemləri İnstitutu

Təqdim olunan işdə şüalanmamış və 5, 10, 15, 20 saat müddətlərində neytron selinin təsirinə məruz qalmış nano SiO₂-nin elektrik keçiriciliyinə temperatur və düşən neytronların miqdarının təsiri müxtəlif tezlik oblastlarında tədqiq edilmiş, 100K, 200K, 300K və 400K sabit temperaturalarda elektrik keçiriciliyinin tezlik asılılıqları nəzərdən keçirilmiş, hər bir temperaturda tezliyin 0,09Hz÷2,5MHs aralığında 95 qiymətində ölçmələr aparılmışdır.

Müəyyən edilmişdir ki, neytronların birbaşa təsiri, eləcə də, neytron aktivləşmə nəticəsində yaranan məhsulların buraxdıqları şüaların təsiri altında əlavə elektroaktiv radiasiya defektləri əmələ gəlir. Belə ki, neytron selinin $6,7 \cdot 10^{17} \div 2,7 \cdot 10^{18}$ n/sm² san intervalında dəyişməsi nano SiO₂-nin elektrik keçiriciliyini 30 dəfəyə qədər artırır. Şüalanmamış nümunənin temperatur asılılığında əsasən iki, neytronla şüalanmış nümunədə isə üç temperatur oblastı aşkar olunub.

İşdə alınmış nəticələri izah edən elektrik keçiriciliyinin mexanizmi verilmişdir.

Açar sözlər: Elektrik keçiriciliyi, nano hissəciklər, neytron aktivləşmə, şüalanma müddəti, radiasiya defektləri.

1. GİRİŞ

Təqdim olunan işdə istifadə olunan nano SiO₂ birləşməsi mikro ölçülərdə nüvə texnoloji sistemlərdə və kosmik elektronikada çox geniş tətbiq sahəsinə malikdir [1-3]. Nanometr-10⁻⁹ m tərtibli ölçülərdə maddənin xarakterik xüsusiyyətlərindən istifadə edilməsi elektronika, materialşünaslıq, mexanika, eləcə də elmin və texnikanın digər sahələrinin qarşısında yeni imkan və perspektivlər açdığından belə materialların alınması və onların əsasında müxtəlif strukturların yaradılması son zamanlar diqqət mərkəzindədir.

Odur ki, yaxın gələcəkdə SiO₂-nin tətbiq sahələrinin nano səviyyədə olması qaçılmazdır və məhz buna görə də neytron şüalanmanın bu birləşmələrin elektrik xassələrinə təsirini araşdırmaq bu günün aktual məsələlərindənədir. SiO₂-nin tətbiq sahəsinin geniş olmasının nəticəsidir ki, son zamanlar SiO₂ nanohissəcikləri dünya tədqiqatçılarının maraq dairəsindədir [4-7]. Tədqiqatın əsas məqsədi nüvə və kosmik texnologiyalarda istifadə olunan cihazların elektronika sisteminin istismar müddətinin uzadılmasıdır. Belə ki, nüvə və kosmik texnologiyalarda istifadə olunan elektron cihazlar aqressiv mühitə, ionlaşdırıcı şüalanmaya məruz qalırlar. Bunun nəticəsində istismar müddətində müəyyən vaxt keçdikdən sonra elektron cihazın həssaslıq dərəcəsi aşağı düşür. Belə ki, ionlaşdırıcı şüalanma olan mühitdə istifadə olunan cihaz vasitəsi ilə aparılan ölçmələrdə bir müddət sonra xəta böyük olduğundan yararsız hala düşür. Odur ki, elektron cihazlarda istifadə olunan materialların (bizim təcrübələrdə SiO₂-nin) elektrofiziki xassələrində ionlaşdırıcı şüalanmanın yaratdığı təsiri öncədən bilməklə bu xətanı aradan qaldırmaq yolları araşdırılır. Belə ki, ionlaşdırıcı şüalanmanın elektrofiziki xassələrdə yaratdığı dəyişikliyi elektron cihazların proqram təminatında nəzərə almaqla bu xətanı azaltmağa çalışırlar.

Neytron seli ilə şüalanma zamanı yaranan defektlər nümunənin elektrofiziki xassələrində mühüm dəyişikliklər yaradır. İlk olaraq müxtəlif müddətlərdə kəsilməz olaraq neytron şüalanmasına məruz qalmış nanobirləşmədə yaranmış defektləri qısa olaraq nəzərdən keçirək. Belə ki, SiO₂ nanobirləşməsi tetraedr formasında birləşmiş Si və O atomlarından ibarətdir ki, neytron selinin qəfəs atomlarına təsiri zamanı bəzi atomların yüksək enerji səviyyəsinə keçidi baş verir (high

energy recoils, primary knock-on atoms – PKA). Bu PKA atomları ilə digər qonşu atomlar arasında enerji mübadiləsi zamanı nöqtəvi defektlər və ya klasterlər əmələ gəlir ki, bunlar da fundamental defektlərin əsasını təşkil edir. Neytron selinin təsiri ilə yaranmış bu defektlər miqrasiya oluna bilər və hər hansı yükün müxtəlif müddətlərdə saxlanması üçün real məkandır [12, 13, 14]. Yaranmış bu defektlər neytronların təsiri ilə meydana gəlmiş digər yükləri (məsələn, elektronları) saxlamaq üçün sanki “tələ” rolunu oynayır. Lakin çox az ehtimalla bu tələlərdə təsadüfi elementlər və ya atmosferdən adsorbsiya olunan qazlar da tutula bilər [15, 16, 17].

Məlumdur ki, SiO₂ piezoelektrik kimi də çox geniş tətbiq sahəsinə malikdir. Belə ki, son on illikdə bu birləşmələr dünya tədqiqatçılarının diqqət mərkəzində olmuşdur və onların xassələri təcrübə və nəzəri öyrənilmişdir [1-11]. Bu tədqiqatlar əsasən onların struktur, elektrik, elastik və piezoelektrik xassələrini araşdırmağa yönəlmişdir. Son zamanlar bu birləşmələr mikro səviyyədə filtirlər, ossilyatorlar, sensorlar kimi elektronkada, kompüterlərdə, şəbəkələrdə, telefonlarda, detektorlarda və s. geniş tətbiq olunur və gələcəkdə onların nano ölçülərdə sadalanan sahələrdə tətbiqi realdır. Nəzərə alsaq ki, sadalanan avadanlıqların əksəriyyəti nüvə texnologiyaları və kosmik fəzada geniş istifadə olunur, onda bu işdə nano SiO₂ birləşməsinin elektrik xassələrinin öyrənilməsinin nə dərəcədə önəmli olması aşkar görünür.

Silisiyum və onun oksidli birləşmələri elektronkada, ionlaşdırıcı şüa detektorlarında sorbent və radiasiyaya davamlı material kimi geniş tətbiq edilir [18-19]. Tətbiq sahələrində silisiyum üzərində adətən, ölçüləri nano tərtibdə olan oksid təbəqəsi yaranır. Səthi oksid təbəqəsi silisiyumu xarici təsirlərdən qorumaqla bərabər, onun fiziki və səthi fiziki-kimyəvi xassələrinə güclü təsir göstərir. Digər tərəfdən də SiO₂ tərkibcə sadəliyi, alınmasının asanlıığı, ekstremal təsirlərə davamlı oksid dielektrik və müxtəlif məqsədlə istifadə olunan material kimi geniş tətbiq sahəsinə malikdir [18-19]. Bu xassələrinə görə silisiyumun oksidli birləşmələri kosmik texnikada və nüvə texnologiyasında da böyük əhəmiyyət kəsb edən birləşmədir. Son dövrlərdə oksid dielektriklərin fiziki və səthi fiziki-kimyəvi xassələrinin hissəcik ölçülərindən asılılığı, xüsusən də nano tərtibli ölçülərdə həcmi elektron həyəcanlanmaların, defektlər və digər faktorların səthə güclü təsiri aşkar olunub. Odur ki, klassik oksid dielektrik olan SiO₂-nin nano ölçülü nümunələri müasir dövrdə tədqiqatçıların diqqət mərkəzindədir. Bu məqsədlə nano SiO₂-nin fiziki və səthi fiziki-kimyəvi xassələrinə ionlaşdırıcı şüaların təsiri tədqiq olunur və nano ölçülü nümunələrin müxtəlif sahələrdə tətbiqi üzrə təkliflər hazırlanır [20-24].

Təqdim olunmuş bu məqalədə epitermal neytronların nano SiO₂ – nin elektrik keçiriciliyinə təsirinə tədqiqi də yer alıb. Epitermal neytronlarla şüalanmış nano SiO₂ –nin elektrik keçiriciliyinin müxtəlif tezlikli dəyişən sahədə temperaturdan asılılığı aşkar olunub.

2. TƏCRÜBƏ

2.1. Tədqiqat obyektı

Tədqiqat obyektı olaraq xüsusi səth sahəsi 160m²/q, hissəcik ölçüləri 20nm və təmizliyi 99,5% olan SiO₂ götürülüb [istehsalçı firma: SkySpring Nanomaterials, Inc. Houston, USA]. Nano SiO₂ Sloveniyanın Lyublyana şəhərində Jozef Stefan İnstitutunun “Reaktor Mərkəzində” TRIGA Mark II yüngül su (light water pool type reactor) tipli tədqiqat reaktorunda mərkəzi (kanal A1) kanalda 2·10¹³ n/sm²san sel sıxlığına malik neytron seli ilə tam güc rejimində (250kVt) şüalandırılmışdır. Neytron seli reaktor tam güc rejimində işlədikdə aşağıdakı tərkib hissəyə malikdir [8-9]: termal neytronlar üçün 5.107·10¹² n/sm²san (1±0.0008, E_n<625eV), epitermal neytronlar üçün 6.502·10¹² n/sm²san (1±0.0008, E_n~625eV±0.1MeV), sürətli neytronlar üçün 7.585·10¹² n/sm²san (1±0.0007, E_n>0.1MeV) və nəhayət bütün neytronlar üçün mərkəzi kanalda sel sıxlığı 1.920·10¹³ n/sm²san (1±0.0005) kimidir. Son nəticədə mərkəzi kanalda alınan neytronlar orta enerjisi E_n~625eV±0.1MeV olan epitermal neytronlar kimi xarakterizə oluna bilər.

2.2. Nümunə hazırlığı

Neytronlarla şüalanmış nano SiO₂-nin elektrik keçiriciliyi Sloveniyanın Lyublyana şəhərində Jozef Stefan İnstitutunun “Keramika Elektronkası K5” laboratoriyasında “Novocontrol Alpha High Resolution Dielectric Analyzer” cihazında tezliyin 0,000001Hz və temperaturun isə 0,01K dəqiqliyi ilə ölçülmüşdür [26]. Neytronla şüalandırma və neytron selinin xarakterik parametrlərinin təyini ədəbiyyatlarda verilən məlum metodika ilə aparılmışdır. Nano SiO₂ tozu

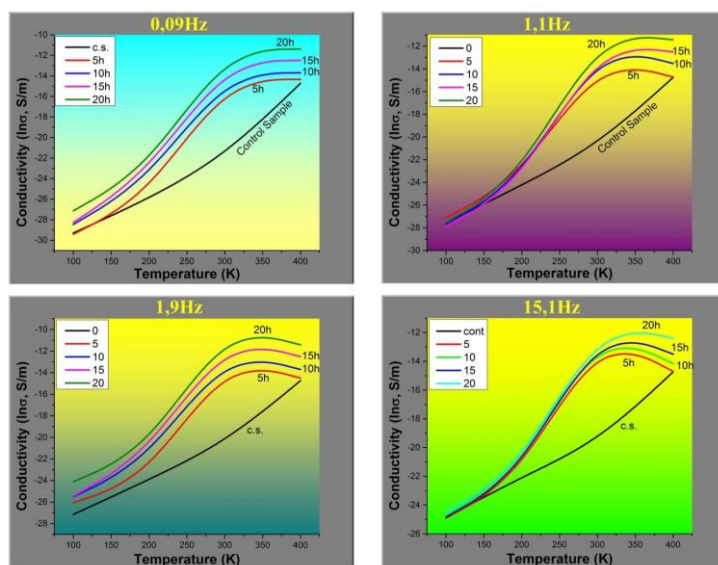
Jozef Stefan İnstitutunun “Nazik təbəqələr və səthlər fizikası” lobaratoriyasında xüsusi şəraitdə $7\text{kN}/\text{sm}^2$ təzyiqdə sıxılaraq hündürlüyü $550\mu\text{m}$ və diametri $5,5\text{mm}$ olan tabletka formasında hazırlanaraq reaktorun kanallarına uyğun alüminium konteynerdə yerləşdirilir. Hazırlanmış nümunələr mərkəzi kanalda 5, 10, 15 və 20 saat müddətlərində kəsilməz olaraq şüalandırılıb. Şüalanmadan sonra nümunələrin səthinə xüsusi şəraitdə gümüş kontaktlar vurulub və mikroskop ilə onun keyfiyyəti yoxlanılıb. Sonra alınmış nümunələr iki platin lövhələr arasına alınaraq ölçmələr aparılmışdır. Nümunələrin elektrik keçiriciliyi “Novocontrol Alpha High Resolution Dielectric Analyzer” cihazında dəyişən sahə üçün ($\sim 0,5\text{V}$) temperaturun $100\text{--}400\text{K}$ intervalında ölçülmüşdür. Ölçmələr zamanı temperaturun hər hansı dərəcədə saxlanma dəqiqliyi $0,01\text{K}$ kimi olmuşdur və bu dəqiqlik körpü metodu ilə əldə edilmişdir [26]. Təcrübələrdən birbaşa nümunələrin müqaviməti ölçülmüşdür və buradan nümunələrin məlum parametrləri nəzərə alınaraq elektrik keçiricilikləri hesablanmışdır [27-32]. Hesablanmış qiymətlərə uyğun alınan bütün nəticələr “OriginPro 9.0” proqramında qrafik olaraq təsvir edilmişdir.

3. ÖLÇMƏLƏR VƏ MÜZAKIRƏLƏR

3.2. Nano SiO₂-nin elektrik keçiriciliyinin temperatur asılılıqları

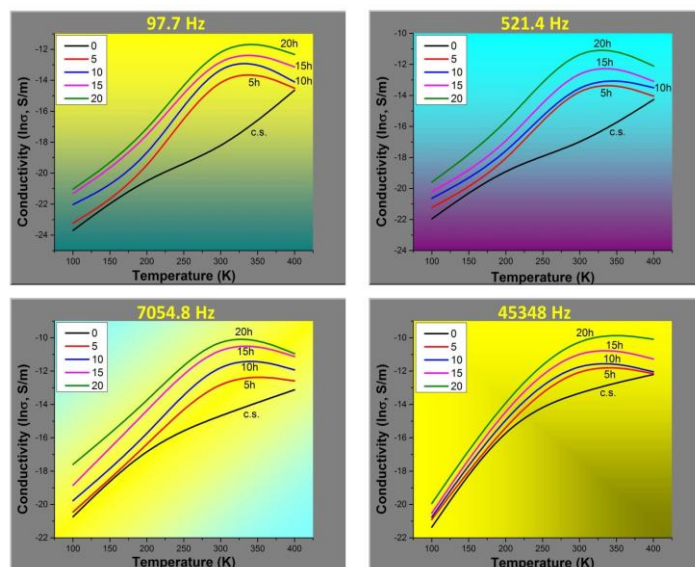
Nano SiO₂-nin elektrik keçiriciliyinin temperatur asılılıqları müxtəlif tezliklərin sabit qiymətlərində nəzərdən keçirilmişdir. Təcrübələr tezliyin $0,09\text{--}2260000\text{Hz}$ aralığında 90 müxtəlif sabit qiymətlərində aparılmışdır və ölçmələr zamanı məlum olmuşdur ki, tezliyin müxtəlif qiymətlərində keçiriciliyin temperatur asılılığı fərqlidir. Tezlik aralığının geniş olduğunu və sabit qiymətlərin çoxluğunu nəzərə alaraq tezlik aralıqları şərti olaraq üç qrupa ayırmışdır. Hər qrupda 4 tezlik olmaqla, ümumilikdə 12 sabit tezlik oblastında elektrik keçiriciliyinin temperatur asılılığı nəzərdən keçirilmişdir. Birinci qrupu şərti olaraq aşağı tezliklər ($0,09\text{--}15\text{Hz}$) oblastı, ikinci qrupu orta tezliklər ($100\text{--}45000\text{Hz}$) oblastı və üçüncü qrupu yüksək tezliklər ($200000\text{--}2260000\text{Hz}$) oblastına ayırmaq olar. Aşağı tezlik oblastında elektrik keçiriciliyinin temperatur asılılıqlarını nəzərdən keçirək (şək.1).

Şəkillərdən görüldüyü kimi şüalanmamış nümunənin (control sample) elektrik keçiriciliyi temperaturun demək olar ki, xətti artan funksiyasıdır. Lakin müxtəlif müddətlərdə neytron şüalanmaya məruz qalmış nümunələrin elektrik keçiriciliyi temperaturdan xətti asılı deyil. Temperaturun $100\text{--}330\text{K}$ qiymətləri aralığında keçiricilik temperaturdan düz mütənasib olaraq artsa da, temperaturun təqribən 330K qiymətindən başlayaraq keçiricilik demək olar ki, dəyişmir. Bütün hallarda şüalanma müddətinin artması ilə keçiricilik artır və bu fərq temperaturun $200\text{--}350\text{K}$ aralığında daha kəskin hal alır. Bunu isə şüalanma müddətinin artması ilə nümunələrdə yaranan və şüalanma müddətindən düz mütənasib asılı olaraq artan yeni yükdaşıyıcıların yaranması ilə izah etmək olar.

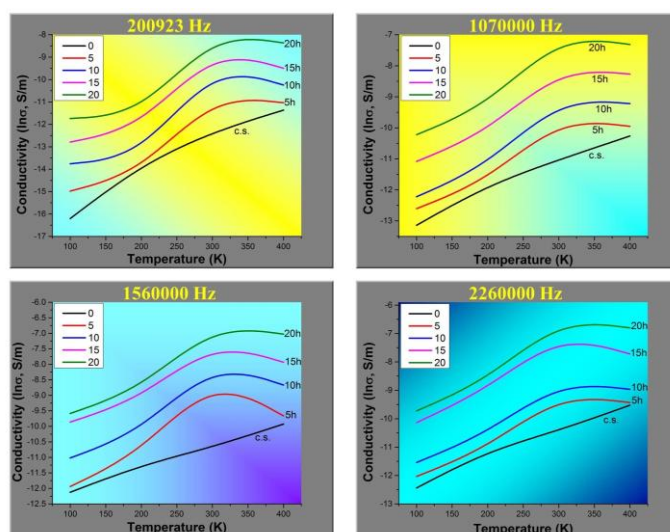


Şək.1. Aşağı tezlik oblastında müxtəlif tezliklərdə elektrik keçiriciliyinin temperatur asılılıqları

Orta tezlik oblastında keçiriciliyin temperatur asılılığında müşahidə olunan əyrilər keçiricilik oxuna nisbətən daha çox meyl edir (şək.2). Başqa sözlə, bu aralıqda temperaturun artması ilə keçiricilik nisbətən aşağı sürətlə artır. Belə ki, aşağı tezlik oblastında elektrik keçiriciliyinin natural loqarifmasının qiyməti (-10, -30) aralığında dəyişirdisə, orta tezlik oblastında keçiriciliyin natural loqarifmasının qiyməti (-10, -24) aralığında dəyişir.



Şək. 2. Orta tezlik oblastında müxtəlif tezliklərdə elektrik keçiriciliyinin temperatur asılılıqları

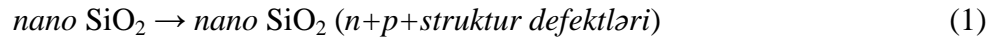


Şək. 3 Yüksək tezlik oblastında müxtəlif tezliklərdə elektrik keçiriciliyinin temperatur asılılıqları

Yüksək tezlik oblastında şək. 3-də mövcud əyriləri nəzərdən keçirərkən məlum olur ki, 100–330K aralıklarında tezliyin artması ilə elektrik keçiriciliyinin temperatur asılılığı demək olar ki, xəttiləşir.

Bundan əlavə, bu oblastda elektrik keçiriciliyinin natural loqarifmasının qiyməti yuxarı oblastda dəyişməsə də aşağı oblastda bu qiymət -30-dan -24-ə qədər artır. Belə ki, bu dəyişmə yalnız temperaturun aşağı qiymətlərində müşahidə olunur (100–200K aralıklarında). Yüksək tezlikli oblastlarda isə elektrik keçiriciliyinin temperaturdan asılı olaraq dəyişməsi çox zəif sürətlə müşahidə olunur (şək.3). Şəkildən görüldüyü kimi elektrik keçiriciliyinin natural loqarifmasının yüksək tezlik oblastında minimum qiyməti -17-dir. Tezliyin daha yüksək qiymətlərində (1.56MHz–2.26MHz) bu minimum -12 – yə qədər artır. Bundan əlavə yüksək tezliklər oblastında temperaturun yüksək qiymətlərində də elektrik keçiriciliyinin natural loqarifmasının qiyməti -6 – ya qədər artır. Həmçinin bu oblastda elektrik keçiriciliyinin temperatur asılılığında elektrik keçiriciliyinin şüalanma müddətindən asılı olaraq dəyişməsi daha aşkar görünür.

Göstərilən tezlik intervalında keçiriciliyin $\ln\sigma=f(T)$ koordinatlarında temperatur asılılıqları şəkl.1-3-də verilib. Alınmış nəticələr göstərir ki, tədqiq olunmuş temperatur $T=100\div 400\text{K}$ və tezlik intervalında şüalanma vaxtı $\tau=5\div 20$ saat, ölçmə temperaturu və dəyişən cərəyan tezliyi yüksəldikcə nano SiO_2 -nin elektrik keçiriciliyi artır. Nümunələrin şüalandırıldığı neytronlar əsasən epitermal enerji intervalına uyğun olduğundan nano SiO_2 -nin tərkibinə daxil olan nüvələrlə neytronların qarşılıqlı təsir mexanizmində radiasion tutma mexanizmi üstünlük təşkil edir. Neytronların təsiri altında yeni həyəcanlaşmış nüvələr alınır ki, onların da həyəcanlaşmış haldan əsas səviyyəyə keçidi nəticəsində müxtəlif enerjili qamma şüalar alınır. Alınmış qamma şüaların müxtəlif atomların elektronları ilə qeyri-elastiki toqquşması nəticəsində elektron-deşik cütləri və neytronların təsiri ilə struktur defektləri yaranır.



Nümunələr mərkəzi kanalda şüalanan zaman neytron selinin tərkibində sürətli neytronlar da var ki, onların nüvələrlə elastik qarşılıqlı təsiri nəticəsində ionlaşma prosesi də baş verə bilər [33-34]. Bundan əlavə $2\cdot 10^{13}\text{n/sm}^2$ saxlıqlı neytron selinin $\tau=5\div 20$ saat vaxt intervalında təsiri zamanı yaranan radioaktiv nüvələrin parçalanma məhsullarının təsiri nəticəsində nano SiO_2 -də qeyri-tarazlıqda olan yükdaşıyıcılar da yaranır. Həmin qeyri-tarazlıqlı yükdaşıyıcılar nano SiO_2 -də mövcud olan kation və anion vakansiyalarında lokallaşma bilər. Nəzərə alsaq ki, nano SiO_2 -nin hissəcik ölçüləri ($d=20\text{nm}$), oksid dielektrlərdə $10^2\div 10^3\text{eV}$ enerjili elektronların sərbəst qaçış məsafəsi $l_{el}=10^2\div 10^3\text{nm}$ tərtibindədir [32] və oksid sistemlərin bioqrafik defektlərinin əsas hissəsi səthdə cəmlənib, onda radioaktiv parçalanma şüalarının (β və γ) təsiri nəticəsində yaranan müxtəlif nəsil δ -elektronların həm həcmdə, həm də səthi səviyyələrdə lokallaşması nəticəsinə gəlmək olar. Şüalanmamış nano SiO_2 -nin elektrik keçiriciliyinin $\ln\sigma=f(T)$ koordinatlarında temperatur asılılığında əsas iki hissəni ayırmaq olar: $I\leq 275\text{K}$, $II\leq 275\text{K}$. Bu onu göstərir ki, ilkin nano SiO_2 -də energetik xarakteristikalarına görə fərqlənən iki tip yükdaşıyıcılar var. I tip yükdaşıyıcılar daha kiçik energetik baryerli mərkəzdə olan yükdaşıyıcılardır. Bu tip yükdaşıyıcılar ilə elektrik keçiricilik oblastı elektrik sahəsinin tezliyi artdıqca daha aşağı temperaturu oblasta sürüşür. Məsələn, elektrik sahəsinin tezliyi $f=0,09\text{Hs}$ olduqda bu oblast $T\leq 275\text{K}$ – də, $f=2,26\cdot 10^6\text{Hs}$ olduqda isə $T\leq 220\text{K}$ –də müşahidə olunur (şəkl.1,3). İkinci oblastın başlanğıc temperaturu da uyğun qaydada aşağı temperatura doğru dəyişir.

Nano SiO_2 -də neytronların təsiri altında əmələ gələn əlavə qeyri-tarazlıqlı yükdaşıyıcıları elektrik keçiriciliyinin artmasına səbəb olur. Şəkl.1–3–də verilmiş nəticələr göstərir ki, neytronla şüalanma vaxtının dəyişməsi elektrik keçiriciliyinin natural loqarifmik qiymətinin təqribən 3 tərtib atmasına səbəb olur. Neytronla şüalanmış nümunələrin elektrik keçiriciliyinin temperatur asılılığı şüalanmamış nümunələrin asılılığından fərqlənir. Belə ki, əksər hallarda $\ln\sigma=f(T)$ asılılığında üç oblast müşahidə olunur. Birinci aşağı temperatur oblastı $T\leq 170-175\text{K}$ temperaturu əhatə edir. Temperatur asılılığının bucaq əmsalı təqribən şüalanmamış nümunələrin $\ln\sigma=f(T)$ asılılığının I oblastına uyğundur. Görünür bu oblastda keçiriciliyə səbəb olan yükdaşıyıcılar nano SiO_2 -yə xas məxsusi yükdaşıyıcılardır. Onların qatılıqları da şüalanma dozəsindən asılı olaraq artır və bu artım da orta hesabla təqribən e^3 tərtibindədir. Bu nəticələr onu göstərir ki, şüalanmamış nano SiO_2 -də yükdaşıyıcılar müxtəlif səviyyələrdə lokallaşmış hallarda olur. Keçirici zonaya ən yaxın səviyyələr aşağı temperaturalarda azad olurlar. Görünür ki, adi halda bu səviyyələr qismən dolur və neytron şüalanma bu səviyyələrə əlavə yükdaşıyıcıların dolmasına səbəb olur. Odur ki, şüalanmış nümunələrdə I oblastda şüalanmamış nümunələrdə eyni energetik parametrlə keçiricilik müşahidə olunur. Şüalanmış nümunələrin $\ln\sigma=f(T)$ asılılığında ikinci oblast $II\sim 175\div 300\text{K}$ temperatur oblastını əhatə edir. Bu oblastda elektrik keçiriciliyi daha çox dərin energetik səviyyələrdə tutulan yükdaşıyıcılarının hesabına baş verir. Həmin oblastda $\ln\sigma=f(T)$ asılılığının bucaq əmsalı nisbətən çoxdur ki, bu da keçiriciliyin daha çox enerjitutumlu olmasını göstərir. Neytronla şüalanmış nano SiO_2 -nin elektrik keçiriciliyinin üçüncü oblastı $T\sim 300\div 400\text{K}$ oblastıdır. Müşahidə edilmiş təcrübə nəticələri göstərir ki, $T\sim 300\div 350\text{K}$ oblastında şüalanmış nano SiO_2 -nin elektrik keçiriciliyinin temperatur asılılığında maksimum müşahidə edilir. Bəzi tezliklərdə $\ln\sigma=f(T)$ asılılıqlarının ekstremal xarakter daşması daha açıq şəkildə görünür.

Alınmış nəticələrin analizi göstərir ki, epitermal neytronlarla şüalanmış nano SiO₂-nin elektrik keçiriciliyinin temperatur asılılığı şüalanmamış nümunələrdən fərqli olub, bütün temperatur oblastlarında keçiricilik orta hesabla təqribən 30 dəfə artıqdır. Müşahidə olunmuş fərq göstərir ki, epitermal neytronların təsiri altında nano SiO₂-də əlavə yükdaşıyıcılar əmələ gəlir. Elektrik keçiriciliyini müşahidə etmək üçün hazırlanmış silindirik nümunələrə neytronların təsir sahəsi geometrik ölçülər əsasında təyin edilib $S \approx 1,8525 \text{sm}^2$ və müxtəlif vaxtlarda şüalandırıldıqda tərkibində olan ~0,5% qatışıq element nümunələri aktivləşir və onların şüalanma prosesinin sonunda aktivlikləri $A \approx 0,36 \text{kBq} \div 54 \text{MBq}$ intervalında dəyişir. Nümunələr üzərinə $\tau = 5 \div 20$ saat müddətlərdə neytron şüalanması nəticəsində düşən enerji $0,3334 \div 1,334 \cdot 10^{17} \text{MeV}$ təşkil edir. Dielektriklərdə elektron-deşik cütlərinin əmələ gəlməsinin hədd enerjisi

$$E_{ch} = 2E_g \quad (2)$$

kimi təyin olunur. Burada E_c – bir cütün əmələ gəlməsi üçün hədd enerjisi, eV, E_g – qadağan olunmuş zolağın enidir, eV. Nano SiO₂ dielektrik olub qadağan olunmuş zolağının eni təqribən 10 eV götürsək, şüalanma enerjisinin birbaşa təsiri altında yarana biləcək yükdaşıyıcıları tədqiq olunmuş udulma doza intervalında

$$N_{eh} = \frac{D_n}{E_{ch}} = \frac{D_n}{2E_g} \quad (3)$$

münasibətindən $N_{eh} \sim (1,67-6,67) \cdot 10^{15}$ hissəcik tərtibində olardı. Digər tərəfdən də şüalanma nəticəsində yaranmış yeni radioaktiv Fe-59, Sc-46, Sc-47, Ta-182, Hf-181, Mn-54, Sb-124, Br-82, Sb-122, Cr-51, La-140, Sm-153, W-187 və Na-24 izotoplarının parçalanmasından alınan qamma şüaların təsiri altında da nano SiO₂-də qeyri-tarazlıqlı yükdaşıyıcılar əmələ gələ bilər. Əmələ gəlmiş bu yükdaşıyıcılar nano SiO₂-də olan anion və kation vakansiyalarında lokallaşma bilər.



Tərkibində təqribən ~0,5 % qatışıq olan nano SiO₂-də qeyri – tarazlıqlı yükdaşıyıcıları digər səviyyələr tərəfindən də tutula bilər. Aktivləşmə nəticəsində yaranan izotoplardan Cr-51, Fe-59, Sc-46, Ta-182, Hf-181, Mn-54 və Sb-124 – ün yarımparçalanma dövrü daha çoxdur və odur ki, onların parçalanma məhsulları elektrik keçiriciliyinin müşahidə müddətində də öz təsirini göstərə bilər.

Şüalanma prosesi və şüalanmadan sonra stabilləşmə müddətində (192 saat) nümunələr otaq temperaturunda saxlanılıb. Odur ki, elektrik keçiriciliyini müşahidə etdiyimiz şərait ilə qeyri stabil ilkin radiasion defektlər relaksasiya oluna bilər. Ölçmələr 100K – dən başlayaraq aparılıb və temperatur yüksəldikcə müxtəlif mərkəzlərdə yerləşmiş qeyri tarazlıqlı yükdaşıyıcılar lokallaşma səviyyələrinin energetik parametrlərinə müvafiq şərait olduqca azad olurlar və keçiricilikdə iştirak edirlər.

Temperatur yüksəldikcə ayrı-ayrı səviyyələrin energetik parametrlərinə uyğun olaraq boşalma və keçiricilikdə iştirak prosesi baş verir. Neytronla şüalanmış nümunələrdə birinci temperatur oblastında elektrik keçiriciliyində iştirak edən hissəciklərin təbiəti şüalanmamış ilkin nano SiO₂-də birinci temperatur oblastında iştirak edən hissəciklərlə lokallaşdıqları səviyyələrin energetik parametrləri təqribən eynidir. Temperaturun sonrakı $T \geq 175 \text{K}$ oblaslarında epitermal neytronlarla şüalandırılmış nano SiO₂-nin elektrik keçiriciliyinin temperaturdan asılılığı fərqlidir. Bu isə elektrik keçiriciliyində iştirak edən hissəciklərin əsasən radiasion proseslərlə əlaqəli olmasını göstərir.

Nano SiO₂-də epitermal neytronların təsiri altında yaranmış yükdaşıyıcıların yalnız termik deyil, elektrik sahəsinin təsiri altında da relaksasiyasının baş verməsi faktı da aşkar olunub. Belə ki, gərginliyi sabit saxlamaqla ($U=0,5 \text{V}$) sahənin tezliyinin 0,09Hz-dən 2,26·10⁶Hz qədər artırılması keçiricilikdə iştirak edən yükdaşıyıcıların konsentrasiyasının bütün temperatur oblastında təqribən $10^{17} \div 10^{18}$ qədər artmasına səbəb olur.

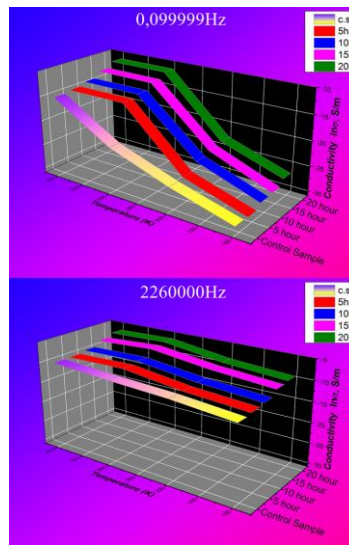
Tədqiq olunmuş nano SiO₂ tipik dielektrikdir və onun elektrik keçiriciliyinin temperatur asılılığı aşağıdakı ifadə ilə şərh olunur:

$$\sigma = \frac{n_0 q^2 \delta^2 \nu}{6kT} \exp\left(-\frac{U}{kT}\right) \quad (6)$$

burada n_0 – yükdaşıyıcıların ilkin qatılığı, bu hissəciklərin sahədə yükdaşması üçün U baryerini aşmalıdır. $\exp\left(-\frac{U}{kT}\right)$ – yükdaşıyıcıların U baryerini aşma ehtimalı, δ - yükdaşıyıcıların sərbəst qaçış məsafəsi, v - yükdaşıyıcıların qəfəsdə rəqs tezliyi (Debay tezliyi), q – yükdaşıyıcıların yüküdür. Yuxarıda göstərilən formula dielektriklərdə ion keçiriciliyini ifadə etsə də, ümumi şəkildə elektron keçiriciliyinin temperatur asılılığını da onun əsasında almaq olar.

$$\ln \sigma = \ln A - \frac{B}{T} \quad \text{burada} \quad A = \frac{n_0 q^2 \delta^2 v}{6kT} \quad \text{və} \quad B = \frac{U}{k} \quad (7)$$

Ümumilikdə tezliyin dəyişməsi ilə elektrik keçiriciliyinin temperaturdan asılı olaraq dəyişməsinə və şüalanma müddətinin bu dəyişməyə təsirini daha aşkar görmək üçün 3D formatda əks olunmuş qrafiki nəzərdən keçirmək kifayətdir (şək. 4). Şəkildə tezliyin yüksək qiymətində aşağı qiymətinə nisbətən elektrik keçiriciliyinin temperatur asılılığında baş verən dəyişiklik asanlıqla müşahidə olunur. Tezliyin artması ilə müşahidə olunan əyrilərin “keçiricilik” oxuna meyl bucağının və elektrik keçiriciliyinin ədədi qiymətinin artması xarici sahənin tezliyinin artması ilə enerjinin artması və beləliklə də keçiricilikdə iştirak edə biləcək yükdaşıyıcıların artması kimi izah olunur.



Şək. 4. Elektrik keçiriciliyinin temperatur asılılıqlarının 3D təsviri

İşdə aparılmış təcrübə nəticələrinə əsasən Arrenius tənliyindən istifadə edərək aktivləşmə enerjisini hesablaya bilərik. Belə ki, Arrenius tənliyini temperaturun T_1 və T_2 aralıqlarına uyğun elektrik keçiriciliyinin σ_1 və σ_2 qiymətləri üçün yazı bilərik:

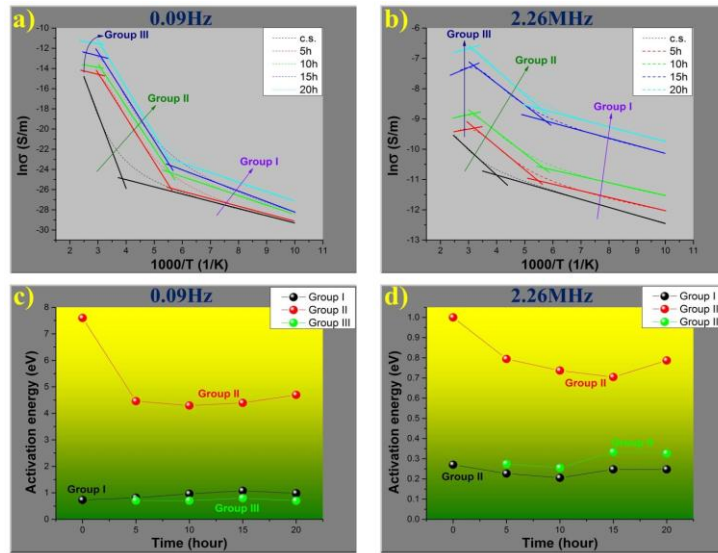
$$\sigma_1 = \sigma'_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT_1}\right) \quad (8)$$

$$\sigma_2 = \sigma''_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT_2}\right)$$

Bu tənlikləri tərəf-tərəfə bölərək, $C = k / \frac{\ln \sigma'_0}{\ln \sigma''_0}$ kəmiyyəti daxil edərək və $T_1 - T_2 = \Delta T$ olduğunu

nəzərə alaraq (8) tənliklərindən aktivləşmə enerjisinin ümumi halda Arrenius tənliyində $\frac{E_a}{k} = \frac{T \ln \sigma}{A}$ olduğunu nəzərə alaraq klassik yanaşmada $f(\ln \sigma) = f(1000/T)$ qrafiklərindən (şək. 5 a, b) xətti asılılığına uyğun hissənin tangensinin birbaşa aktivləşmə enerjisini ifadə etdiyini nəzərə alaraq aktivləşmə enerjisinin neytron şüalanmanın təsir müddətindən asılılıq qrafiklərini təsvir etmək olar (şək. 5, c və d).

Qeyd edək ki, (6) və (9) tənlikləri ilə hesablanmış aktivləşmə enerjiləri də çox az xəta ilə alınmış qiymətlərə uyğundur.

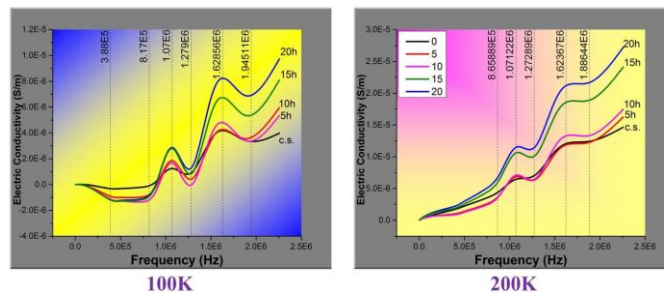


Şək. 5. Nano SiO₂ – nin elektrik keçiriciliyinin 1000/T asılılıqları (a və b) və bu asılılıqlara uyğun aktivləşmə enerjisinin şüalanma müddətindən asılılıqları (c və d)

Şəkildə müqayisə üçün tezliyin 0,09Hz və 2.26MHz kimi iki qiymətinə uyğun aktivləşmə enerjiləri təyin edilmişdir. Şəkildən tezliyin və neytron selinin təsir müddətinin artması ilə aktivləşmə enerjisinin azalma tendensiyası müşahidə olunur (şək. 5 c və d). Bu isə öncə qeyd etdiyimiz nəticələrə uyğun olaraq şüalanma müddətinin və tezliyin artması ilə elektrik keçiriciliyinin ədədi qiymətinin artmasını bir daha təsdiqləyir.

3.3. Nano SiO₂-nin elektrik keçiriciliyinin tezlik asılılıqları

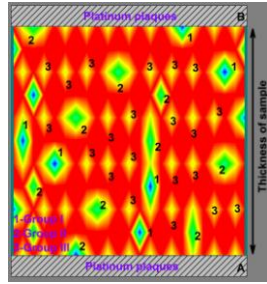
Ölçmələr zamanı nümunələrin elektrik keçiriciliyinin tezlik asılılıqları temperaturun müxtəlif sabit qiymətlərində nəzərdən keçirilmişdir. Təcrübələr tezliyin 0,09–2260000Hzs aralığında 95 müxtəlif sabit qiymətlərində aparılmışdır və ölçmələr zamanı məlum olmuşdur ki, temperaturun müxtəlif qiymətlərində elektrik keçiriciliyinin tezlik asılılığı fərqlidir. Şüalanmamış ilkin və müxtəlif müddətlərdə şüalanmış nümunələrin elektrik keçiriciliyinin tezlik asılılıqları temperaturun dörd qiymətində və tezliyin 0,1Hz – 2,5MHz aralıqlarında nəzərdən keçirilmişdir. İlk olaraq temperaturun 100K və 200K qiymətlərində elektrik keçiriciliyinin tezlik asılılıqlarını nəzərdən keçirək (şək. 6).



Şək. 6. İlk və müxtəlif müddətlərdə neytron selinin təsirində məruz qalmış SiO₂ -nin temperaturun 100K və 200K qiymətlərində elektrik keçiriciliyinin tezlik asılılıqları

Şəkildən görüldüyü kimi temperaturun 100K qiymətində elektrik keçiriciliyinin tezlik asılılığında üç kəskin pik müşahidə olunur. Birinci pik tezliyin 3.88E5 və 8.17E5Hz kimi geniş aralığını əhatə edir ki, bu da müqavimətin mənfi qiymətinə uyğundur. Müqavimətin bu aralıqda mənfi qiyməti 5, 10, 15 və 20 saat neytron selinin təsirində məruz qalmış nümunələrin hamısında demək olar ki, eynidir. Buna əsasən demək olar ki, enerjinin bu qiymətinə bütün nümunələrdə uyğun klasterlərin sayı doyma həddindədir. Cihazın qeyd etdiyi mənfi müqavimətin geniş tezlik oblastında davam etməsi enerjinin uyğun qiymətində parçalana bilən mövcud klasterlərin kifayət qədər çox olmasını deməyə əsas verir. Ümumiyyətlə, 100K temperaturda müşahidə olunan üç pikə əsasən demək olar ki, neytron selinin təsiri ilə enerjilərinə görə fərqli üç tip klaster yaranır.

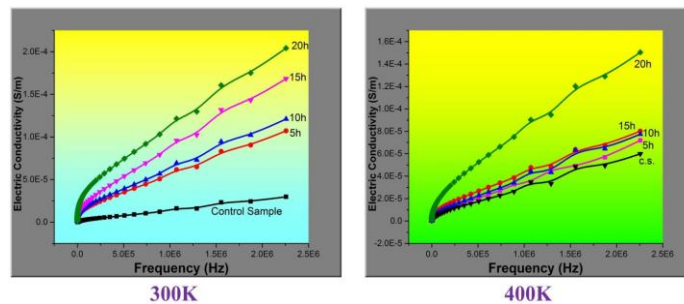
Temperaturun 100K qiymətində tezliyin $1,279E6$ və $1,94511E6$ Hz qiymətlərində müşahidə olunan digər aşağı pikləri də neytron selinin təsiri ilə nümunədə yaranmış klasterlərlə çox yaxşı izah etmək olur. Bunun üçün isə ilk olaraq nümunə daxilində yaranmış bu klasterləri neytron şüalanma nəticəsində nano SiO_2 birləşməsinin en kəsiyində paylanmış fərqli enerjili klasterlərin kompüterdə modelləşmiş şərti təsvirini nəzərdən keçirərək izah edək (şək. 7).



Şək. 7. Neytron şüalanma nəticəsində nano SiO_2 birləşməsinin en kəsiyində paylanmış fərqli enerjili klasterlərin kompüterdə modelləşmiş şərti təsviri

Belə ki, yaranmış bu klasterləri kompüter proqramlarının köməyi ilə izah etmək üçün şəkildə şərti olaraq bu klasterləri üç qrupa ayıraq. Aşağı enerjilərdə parçalanmış III qrup klasterlər "3" nömrəsi, orta enerjilərdə parçalanmış II qrup klasterlər "2" nömrəsi və yüksək enerjilərdə parçalanmış I qrup klasterlər isə "1" nömrəsi ilə işarə edək. Nümunəyə cihaz tərəfindən verilən tezliyin (beləliklə də enerjinin) aşağı qiymətlərində III qrup klasterlər parçalanmağa başlayır və nəticədə nümunənin A və B üzrlərində cihazın qeyd etdiyi gərginlik və cərəyanın qiyməti cihaz tərəfindən verilənlərdən artıq olur. Beləliklə, cihaz bu halda müqaviməti mənfi olaraq qeyd edir. Bu halda sanki nümunə daxilində bir anlıq xarici sahənin enerjisi hesabına yaranan yükdaşıyıcılardan əlavə yükdaşıyıcılar meydana gəlir. Məhz bu yükdaşıyıcılar cihazı mənfi müqavimət göstərməyə vadar edir. Beləliklə cihaz adi halda, məsələn maksimum 10mA qeyd edə biləcəyi halda (müqavimətin sıfır və ya ifrat keçirici halı) bu halda 11mA qeyd edir. Temperaturun 100 K qiymətində elektrik keçiriciliyinin tezlik asılılığında (şək. 10) müşahidə olunan $1,07 \cdot 10^6$ Hz və $1,62856 \cdot 10^6$ Hz tezliklərinə uyğun digər iki pikdə də analogi effektlər hesabına (I və II qrup klasterlərin hesabına) müqavimət azalır və beləliklə də keçiricilik artır. 200K temperaturda isə 100K müşahidə olunan 3 pikdən yalnız ikisi intensivliyi azalmış halda mövcuddur. Tezliyin aşağı qiymətlərində (beləliklə də az enerji ilə parçalanmış bilən) mövcud pik isə temperaturun təsiri ilə itmişdir. Tezliyin $1,07122 \cdot 10^6$ Hz və $1,62367 \cdot 10^6$ Hz qiymətlərində müşahidə olunan digər iki pik isə temperaturun təsiri nəticəsində zəifləmişdir (şək. 6, 200K).

Temperaturun 300K və 400K qiymətlərində mövcud piklər demək olar ki, tamamilə itmişdir (şək.8).



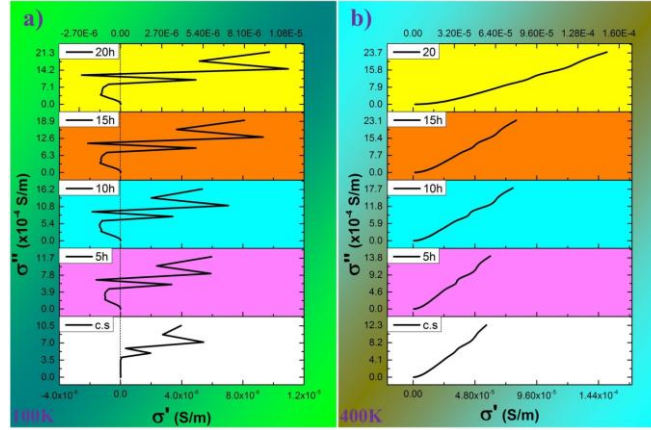
Şək.8. İlk və müxtəlif müddətlərdə neytron selinin təsirinə məruz qalmış SiO_2 nanohissəciklərinin temperaturun 300 K və 400K qiymətlərində elektrik keçiriciliyinin tezlik asılılıqları

Bu asılılıqlara əsasən demək olar ki, temperaturun təsiri ilə neytron şüalanma ilə nümunədə yaranmış klasterlər dağılır və nisbətən yuxarı temperaturalarda bunların effekti müşahidə olunmur.

Qeyd edək ki, alınmış bu nəticələr və klaster nəzəriyyəsi öz təstiqini elektrik keçiriciliyinin həqiqi və xəyali hissələrinin asılılığından da tapır. Ədəbiyyatlardan [17].

$$\begin{aligned}\sigma' &= \varepsilon_0 \omega \varepsilon'' \\ \sigma'' &= \varepsilon_0 \omega \varepsilon'\end{aligned}\quad (9)$$

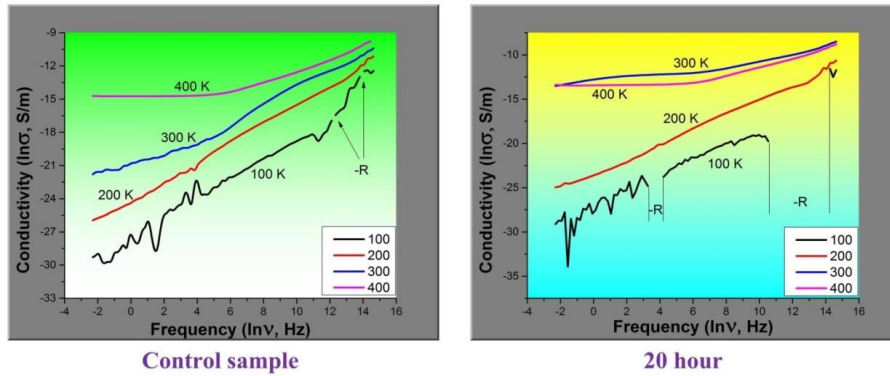
məlum ifadələrindən istifadə edərək təcrübədən alınmış dielektrik nüfuzluğu və ölçmələr zamanı istifadə olunan tezliyin köməyiylə alınmış qiymətlərə uyğun $f(\sigma')=f(\sigma'')$ asılılıqları şək. 9-da təsvir edilmişdir.



Şək.9. Şüalanmadan öncə və sonra temperaturun müxtəlif qiymətlərində elektrik keçiriciliyinin həqiqi və xəyali hissələrinin asılılıqları

Şəkildən görüldüyü kimi neytron selinin təsirindən sonra nümunədə iki halda mənfi müqavimət və digər bir pik müşahidə olunur (şək. 9, a). Bu isə şək. 6 –da temperaturun 100K qiymətinə uyğun təsvir olunan pikləri izah edir. Şək.9b–də təsvir olunan elektrik keçiriciliyinin həqiqi hissəsinin xəyali hissəsindən asılılıqlarında piklərin müşahidə olunmaması isə klaster nəzəriyyəsinə uyğun yaranmış klasterlərin 400K–də parçalanmasını təsdiq edir.

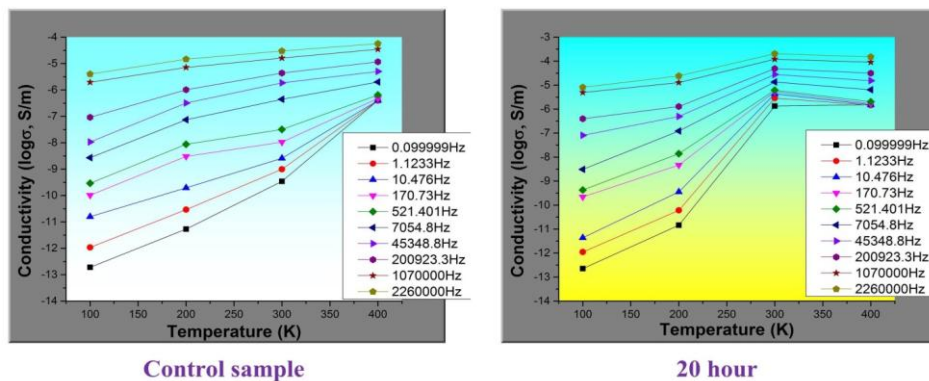
İndi isə şüalanmadan öncə və sonra nümunənin temperaturun müxtəlif qiymətlərində elektrik keçiriciliyinin tezlik asılılıqlarını bir sistemdə nəzərdən keçirək (şək.10).



Şək.10. Şüalanmadan öncə və sonra temperaturun müxtəlif qiymətlərində elektrik keçiriciliyinin tezlik asılılıqları

Şəkildən görüldüyü kimi ilkin nümunənin elektrik keçiriciliyinin tezlik asılılığı tezliyin artması ilə artır. Aşağı temperaturda tezliyin natural loqarifminin 14 qiyməti ətrafında çox kiçik aralıqda iki mənfi müqavimət halı müşahidə olunmuşdur. Bu halı isə öncə qeyd etdiyimiz kimi, aşağı temperaturlarda enerjinin bir mərkəzdə toplanması və tezliyin məlum qiymətində həmin mərkəzdə toplanmış enerjinin bir anlıq parçalanaraq əlavə enerjili yükdaşıyıcıların nümunə daxilində artması kimi izah etmək olar. Bu yükdaşıyıcılar cərəyan istiqamətində hərəkət edərək nümunə daxilində cihazın verdiyi cərəyandan əlavə cərəyan yaradır ki, cihaz da bunu mənfi müqavimət kimi qeydə alır. 20 saat kəsilməz olaraq neytron selinin təsirinə məruz qalmış nümunənin elektrik keçiriciliyinin tezlik asılılığını nəzərdən keçirərkən ilkin nümunənin elektrik keçiriciliyinin tezlik asılılığından kəskin fərqli hallar müşahidə olunmuşdur (şək.10). İlk olaraq

100K temperaturda çəkilmiş əyrini nəzərdən keçirək. Bu əyridə neytron selinin təsiri nəticəsində tezliyin fərqli qiymətlərində biri nisbətən kiçik, digəri isə geniş aralıqda olmaqla iki halda mənfi müqavimət müşahidə olunur (üçüncü hal isə pik olaraq görünür). Birinci hal tezliyin natural loqarifminin 4 qiyməti ətrafında müşahidə olunur, hansı ki, bu hal ilkin nümunədə yoxdur. Digər hal isə ilkin nümunəyə uyğun, lakin tezliyin natural loqarifminin 12 – 14 kimi geniş intervalda müşahidə olunur. Bu halları öncə qeyd etdiyimiz PKA atomları ilə çox yaxşı izah etmək olur. Belə ki, neytron şüalanması nəticəsində nümunə daxilində yüksək enerjili neytronların enerji təpəsi müşahidə olunur və aşağı temperaturlarda bu təpmə enerjisi klaster halını alır. Təbii olaraq alınmış klasterlər öz enerjilərinə görə fərqli stasionar hallar qrupundadır (baxılan halda üç stasionar qrup, şəkl. 7). Tezliyin artması ilə ilk olaraq az dayanıqlılığa malik halda mövcud klasterlər qrupu parçalanır (III qrup) və nəticədə cihazın qeyd etdiyi müqavimət mövcud mexanizmə uyğun olaraq mənfi qiymət alır. Nisbətən dayanıqlı klasterlər tezliyin böyük qiymətlərində (beləliklə də enerjinin böyük qiymətlərində) parçalanır (II qrup) və anoloji effektlər müşahidə olunur. 20 saat neytron selinin təsirinə məruz qalmış nümunənin 200K temperaturda çəkilmiş elektrik keçiriciliyinin tezlik asılılığında müşahidə olunan əyri ilkin nümunədən yalnız keçiriciliyin ədədi qiymətinin çox olması ilə fərqlənir (bu fərq aşağı tezliklərdə daha kəskinidir). Bunun isə əsas səbəbi şüalanma nəticəsində nümunədə yaranmış əlavə yükdaşıyıcılardır və nisbətən yüksək tezliklərdə bu yükdaşıyıcılar azalır ki, bu da fərqi azalmasına səbəb olur. Digər 300K–də alınmış əyri ilkin nümunədə mövcud əyridən kəskin fərqlənir və bunun səbəbi şüalanma nəticəsində lokal hallarda mövcud elektronların keçiricilikdə aktiv iştirak etməsidir. Məhz bu elektronların keçiricilikdə aktiv iştirakı nəticəsində keçiricilik ilkin halda mövcud keçiricilikdən kəskin fərqlənir və bu fərq aşağı tezliklərdə daha kəskinidir. Nəhayət 400K temperaturda müşahidə olunan əyri demək olar ki, ilkin halda uyğun temperaturda müşahidə olunan əyri ilə eynidir. Bu halda elektrik keçiriciliyinin ədədi qiyməti 300K temperaturda müşahidə olunan keçiriciliyin qiymətindən kiçikdir. Bunu isə belə izah etmək olar ki, 400K–də lokal hallarda mövcud sərbəst elektronların sayı temperaturun təsiri ilə azalır və elektrik keçiriciliyinin ədədi qiyməti 400K temperaturda 300K–ə nisbətən kiçik olur. 10 müxtəlif tezliklərdə elektrik keçiriciliyinin temperatur asılılıqlarından şüalanma nəticəsində 300K temperaturda yaranan fərq ilkin və şüalanmadan sonrakı nümunələrdə şəkl. 11 – dən daha aydın görünür.



Şəkl.11. Şüalanmadan öncə və sonra tezliyin müxtəlif qiymətlərində elektrik keçiriciliyinin temperatur asılılıqları

4. Nəticələr

Neytron şüalanmasının və temperaturun nano SiO₂-nin elektrik keçiriciliyinə təsiri üzrə aparılmış təcrübələrdən aşağıdakı nəticələrə gəlmək olar:

1. Epiternal neytronlarla qabaqcadan şüalanmış nano SiO₂ nümunələrində aktivləşmiş qarışıqların parçalanma məhsulları və neytronların birbaşa təsiri altında əlavə yükdaşıyıcılar yaranır.

2. Neytronla şüalanmış nano SiO₂-nin elektrik keçiriciliyi neytron selinin $6,7 \cdot 10^{17} \div 2,7 \cdot 10^{18}$ intervalında dəyişməsi ilə 30 dəfəyə qədər artır.

3. İlk nano SiO₂-nin elektrik keçiriciliyində iki səviyyədə lokallaşmış, neytronla şüalanmış nümunələrdə isə əlavə iki nisbətən daha dərin səviyyələrdə həyacanlaşan yükdaşıyıcıların iştirakı aşkar olunub.

ƏDƏBİYYAT

1. Christian M. Petrie, David P. Hawn, Wolfgang Windl, Thomas E. Blue "Reactor radiation-induced attenuation in fused silica optical fibers heated up to 1000 °C" *Journal of Non-Crystalline Solids*, 409, 2015, 88–94.
2. Christian M. Petrie, David P. Hawn, Wolfgang Windl, Thomas E. Blue "Reactor radiation-induced attenuation in fused silica optical fibers heated up to 1000 °C" *Journal of Non-Crystalline Solids*, 409, 2015, 88–94.
3. Xinjie Fu, Lixin Song, Jiacheng Li "Radiation induced color centers in silica glasses of different OH content" *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 330, 2014, 7–10.
4. Tao Wang, Weihua Ma, Junnan Shangguan, Wei Jiang, Qin Zhong "Controllable synthesis of hollow mesoporous silica spheres and application as support of nano-gold" *Journal of Solid State Chemistry* 215, 2014, 67–73.
5. Hongjian Du, Suhuan Du, Xuemei Liu "Effect of nano-silica on the mechanical and transport properties of lightweight concrete" *Construction and Building Materials* 82, 2015, 114–122
6. C. M. Manjunatha, N. Jagannathan, K. Padmalatha et al "The effect of micron-rubber and nano-silica particles on the fatigue crack growth behavior of an epoxy polymer" *International Journal of Nanoscience* 10, 1095 (2011).
7. Jing Li, Yanhui Feng, Xinxin Zhang "Near-field radiative heat transfer across a pore and its effects on thermal conductivity of mesoporous silica" *Physica B: Condensed Matter* 456, 2015, 237–243.
8. N. H. Tran, M. A. Wilson, A. S. Milev et al "Mechanism of silica nano-plate formation from lucentite" *Surface Review and Letters* 14, 235 (2007).
9. Leandro J. Martínez, Mirna L. Sánchez, Pamela Kikot et al "Preparation of functional currant-bun-like fumed silica/polymethacrylate nanoparticles by radiation-induced polymerization" *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 463, 2014, 110–117.
10. Juan L. Vivero-Escoto, Brian G. Trewyn, and Victor S.-Y. Lin "Mesoporous silica nanoparticles: synthesis and applications" *Annual Review of Nano Research*: 191-231, 2009.
11. T. Zaharescu, I. Borbath, L. Vékás "Radiation effects in polyisobutylene succinic anhydride modified with silica and magnetite nanoparticles" *Radiation Physics and Chemistry* 105, 2014, 22–25.
12. Luka Snoj, Matjaž Ravnik, Power peakings in mixed TRIGA cores, *Nuclear Engineering and Design*, Volume 238, Issue 9, September 2008, Pages 2473-2479
13. JAZBEC, Anže, ŽEROVNIK, Gašper, SNOJ, Luka, TRKOV, Andrej. Analysis of tritium production in TRIGA Mark II reactor at JSI for the needs of fusion research reactors. *Atw. Internationale Zeitschrift für Kernenergie*, iss. 12, vol. 58, pp. 701-705
14. Vladimir Radulović, Žiga Štancar, Luka Snoj, Andrej Trkov, Validation of absolute axial neutron flux distribution calculations with MCNP with ¹⁹⁷Au(n,γ)¹⁹⁸Au reaction rate distribution measurements at the JSI TRIGA Mark II reactor, *Applied Radiation and Isotopes*, Volume 84, February 2014, Pages 57-65.
15. G. Žerovnik et al. On normalization of fluxes and reaction rates in MCNP criticality calculations, *Ann. Nucl. Energy*, 63 (January) (2014), pp. 126–128.
16. Andreja Erste "Investigations and separation of various contributions to dielectric response of advanced ceramic and polymeric materials" *Jozef Stefan Institute, Ljubljana, Slovenia*, 2012.
17. Himanshu, A K, Gupta, D C, Sinha, T P "Dielectric study of Ba(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O₃ at low temperature" *Indian Journal of Pure & Applied Physics (IJPAP)*, Vol.44(05) pp.391-397, New Delhi, India 2006.

18. Yadan Ding, Xueying Chu, Xia Hong, Peng Zou, and Yichun Liu "The infrared fingerprint signals of silica nanoparticles and its application in immunoassay", *Northeast Normal University, Changchun, China, Applied Physics Letters* 100,013701 (2012) 1 – 3.
19. M.Martini, M.Montagna, M.Ou, O.Tillement, S.Roux and P.Perriat "How to measure quantum yields in scattering media: Application to the quantum yield measurement of fluorescein molecules encapsulated in sub-100 nm silica particles" *Université de Lyon, France, Journal of Applied Physics* 106, 094304 (2009) 1-9.
20. M.L.Gamez, M.Velarde, F.Mota, J.Manuel Perlado, M.Leon, A.Ibarra "PKA energy spectra and primary damage identification in amorphous silica under different neutron energy spectra" *Journal of Nuclear Materials* 367–370, pp. 282–285, Spain (2007).
21. R.Chakarova, I.Pazsit "Fluctuations and correlations in sputtering and defect generation in collision cascades in Si" *Nucl. Instrum. and Meth. B* 164&165, 460 – 470, Department of Reactor Physics, Chalmers University of Technology, Sweden (2000).
22. J.G.Mihaychuk, N.Shamir, and H.M. van Driel "Multiphoton photoemission and electric-field induced optical second-harmonic generation as probes of charge transfer across the Si/SiO₂ interface" *Physical Review B*, Volume 59, Number 3, 2164-2173, Department of Physics, University of Toronto, Toronto, Canada (1999).
23. R.Tarumi, K.Nakamura, H.Ogi, and M.Hirao "Complete set of elastic and piezoelectric coefficients of α -quartz at low temperatures" *J. Appl. Phys.* 102, 113508, Osaka University, Toyonaka, Osaka 560-8531, Japan (2007).
24. L.E.Ramos, J.Furthmüller, and F.Bechstedt "Quasiparticle band structures and optical spectra of β -cristobalite SiO₂" *Phys. Rev. B* 69, 085102, (p.8), Institut für Festkörperteorie und Theoretische Optik, Friedrich-Schiller-Universität, Germany (2004).
25. Luka Snoj, Gasper Zerovnik, Andrej Trkov "Computational analysis of irradiation facilities at the JSI TRIGA reactor", *Applied Radiation and Isotopes*, 70, 483–488, Jozef Stefan Institute, Slovenia (2012).
26. Andreja Erste "Investigations and separation of various contributions to dielectric response of advanced ceramic and polymeric materials" *Jozef Stefan Institute, Ljubljana, Slovenia*, 2012.
27. Elchin Huseynov, Adil Garibov and Ravan Mehdiyeva "Study of blend composition of nano silica under the influence of neutron flux" *Nano Convergence* 2014 1:21.
28. E.M. Huseynov, A.A.Garibov, R.N.Mehdiyeva, "Synthesis methods of nano SiO₂ powder" *Transactions of National Academy of Sciences of Azerbaijan, Series of Physics – Mathematical and Technical Sciences, Physics and Astronomy*, ISSN 0002-3108 Vol. XXXII N5, p 83-88/152, Azerbaijan 2012.
29. Ravan Mehdiyeva, Elchin Huseynov "Effects of Neutron Irradiation on the Current–Voltage Characteristics of SiO₂ Nanoparticles" *Silicon* 10/4, 1369–1373, 2018.
30. Elchin Huseynov, Ravan Mehdiyeva "Temperature and frequency dependence of electric conductivity in nano-grained SiO₂ exposed to neutron irradiation" *Physica B: Condensed Matter* 450, 77 – 83, 2014.
31. Elchin Huseynov, Adil Garibov, Ravan Mehdiyeva "Influence of neutron irradiation and temperature on the electric conductivity of SiO₂ nanoparticles" *Journal of Electrostatics*, Volume 74, 73–78, 2015.
32. Elchin Huseynov, Adil Garibov, Ravan Mehdiyeva, Eršte Andreja, Anar Rustamov "Influence of neutron flux, frequency and temperature to electrical impedance of nano silica particles" *AIP Advances*, v.4, N11, 117122 (2014).
33. N.M.Ravindra and J.Zhao "Fowler-Nordheim tunneling in thin SiO₂ films" *Smart Materials and Structures* 1, 197, 1992.
34. Frontasyeva M.V. "Neutron Activation Analysis in the Life Sciences" *Russia, Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei*, ISSN 0367-2026, Volume 42, part 2 (2011) 636 – 718.

**ВЛИЯНИЕ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
СОЕДИНЕНИЙ НАНО SiO₂****Р.Н. Мехтиева**

В настоящей работе было исследовано влияние температуры и количества падающих нейтронов на электропроводность нано SiO₂ не облученных и подвергшихся воздействию нейтронного потока в течении 5, 10, 15 и 20 часов в различных частотных областях. Так же исследованы частотные зависимости электропроводности при постоянных температурах 100К, 200К, 300К и 400К при 95 частотах в интервале 0,09Гц ÷ 2,5МГц.

Установлено, что под воздействием прямого воздействия нейтронов и лучей, испускаемых продуктами, генерируемыми нейтронной активацией образуются дополнительные электроактивные радиационные дефекты. Таким образом, изменение нейтронного потока в диапазоне $6,7 \cdot 10^{17} \div 2,7 \cdot 10^{18}$ н/см²сек увеличивает электропроводность нано SiO₂ до 30 раз. В температурной зависимости не облученных образцов обнаружены два, а в случае облученных образцов три температурные области.

Приведен механизм электропроводности, объясняющий полученные результаты.

Ключевые слова: Электропроводимость, нано частицы, нейтронная активация, время облучения, радиационные дефекты.

**THE EFFECT OF NEUTRON IRRADIATION ON THE ELECTRICAL PROPERTIES OF
NANO SiO₂ COMPOUND****R.N. Mehdiyeva**

Herein, the effect of temperature and amount of falling neutrons on the electrical properties of nano SiO₂, non-irradiated and irradiated with neutron flux for 5, 10, 15, 20 hours has been investigated in different frequency regions, the frequency dependence of the electrical conductivity has been reviewed at 100K, 200K, 300K and 400K constant temperatures, the measurements have been conducted in the value of 95 in the frequency range of 0.09Hz ÷ 2.5MHz at each temperature.

It has been established that the additional radiation defects are generated under the direct effect of neutron, as well as the effect of the rays emitted by the products formed as a result of neutron activation. Thus, the change of neutron flux in the range of $6,7 \cdot 10^{17} \div 2,7 \cdot 10^{18}$ n/cm²sec increases the electrical conductivity of nano SiO₂ up to 30 times. Mainly two temperature regions have been found in the temperature dependence of non-irradiated sample, but in neutron-irradiated sample there are three.

The mechanism of electrical conductivity explaining the obtained results has been given in the current work.

Key words: Electrical conductivity, nano particle, neutron activation, irradiation period, radiation defects.

Rəyçi: akad. B.H. Tağıyev