



Azerbaijan Journal of Physics

FIZIKA

1

www.physics.gov.az

A

XXXI
2025



Published from 1995
Ministry of Press and Information
of Azerbaijan Republic,
Registration number 514, 20.02.1995

ISSN 1028-8546
vol. XXXI, Number 01, 2025
Section: A

Azerbaijan Journal of Physics

FIZIKA

*Ministry of Science and Education Republic of Azerbaijan
Institute of Physics*

HONORARY EDITORS

Arif PASHAYEV

EDITORS-IN-CHIEF

Arif HASHIMOV

SENIOR EDITOR

Talat MEHDIYEV

INTERNATIONAL REVIEW BOARD

Arif Hashimov, Azerbaijan
Boris Denker, Russia
Vyacheslav Tuzlukov, Belarus
Gennadii Jablonskii, Belarus
Vladimir Man'ko, Russia
Dieter Hochheimer, USA
Victor L'vov, Israel
Majid Ebrahim-Zadeh, Spain
Natig Atakishiyev, Mexico

Huseyn Ibragimov, Azerbaijan
Nazim Mamedov, Azerbaijan
Anatoly Boreysho, Russia
Mikhail Khalin, Russia
Javad Abidinov, Azerbaijan
Faik Mikailzade, Türkiye
Tayar Djafarov, Azerbaijan
Kerim Allahverdiyev, Azerbaijan
Talat Mehdiyev, Azerbaijan

Zakir Jahangirli, Azerbaijan
Salima Mehdiyeva, Azerbaijan
Nadir Abdullayev, Azerbaijan
Oktay Tagiyev, Azerbaijan
Ayaz Bayramov, Azerbaijan
Tofiq Mammadov, Azerbaijan
Shakir Nagiyev, Azerbaijan
Rauf Guseynov, Azerbaijan

TECHNICAL EDITORIAL BOARD

Senior secretary: Elmira Akhundova; Nazli Huseynova,
Elshana Aleskerova, Rena Nayimbayeva, Nigar Aliyeva

PUBLISHING OFFICE

131, H. Javid ave., AZ-1073, Baku
Ministry of Science and Education Republic of Azerbaijan
Institute of Physics

Tel.: (99412) 539-51-63, 539-32-23
Fax: (99412) 537-22-92
E-mail: jophysics@gmail.com
Internet: www.physics.gov.az

It is authorized for printing:

CdGa₂Te₄ KRİSTALININ DİNAMİK XASSƏLƏRİNİN Ab-İNİTİO TƏDQIQI

Z.A. CAHANGİRLİ^{1,2}, B.H. MEHDİYEV^{1,3}, R.G. SEYİDOV¹,
T.O. BAYRAMOVA², S.S. OSMANOVA⁴

¹AR Elm və Təhsil Nazirliyi Fizika İnstitutu, AZ-1073, Bakı, Azərbaycan

²AR Elm və Təhsil Nazirliyi BDU, AZ-1148, Bakı, Azərbaycan

³Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti, Azadlıq pr., 16/21, Bakı, Azərbaycan

⁴Azərbaycan Texniki Universiteti, Hüseyn Cavid Prospekti 25, Bakı 1073, Azərbaycan
zakircahangirli@yahoo.com

CdGa₂Te₄ yarımkəçirici kristalının dinamik xassələri Həyəcənlaşma Sıxlıq Funksionalı nəzəriyyəsi (DFPT) istifadə edilərək tədqiq olunmuşdur. Səkkiz Raman aktiv və on iki infraqırmızı (İQ) aktiv modları qrup-simmetriya analizindən istifadə etməklə identifikasiya olunmuşdur. Nəzəri olaraq hesablanmış nəticələr ədəbiyyatdakı eksperimental nəticələrlə müqayisə edilmişdir.

Açar sözlər: CdGa₂Te₄, Raman, İQ aktiv modlar, fonon dispersiyası, PDOS.

DOI: 10.70784/azip.2.2025103

1. Giriş

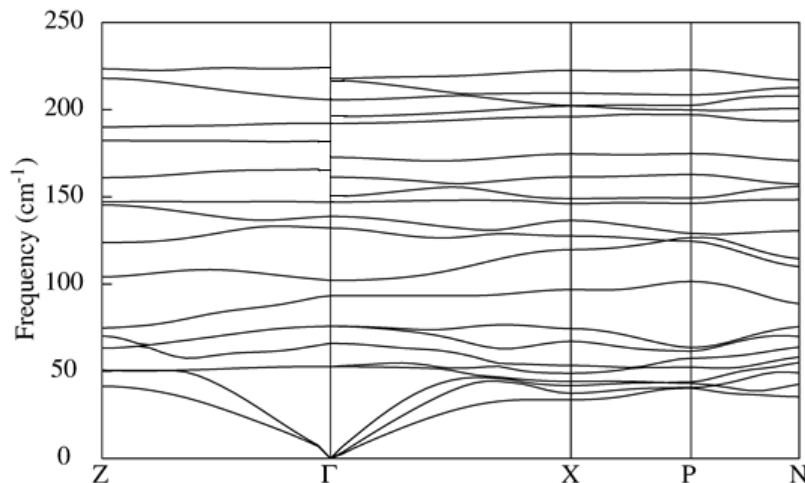
$A^II B_2^{III} C_4^{VI}$ üçlü birləşmələri elektrooptik, opto-elektron və qeyri-xətti optik cihazlarda istifadə üçün perspektivli sayıldığı üçün tədqiqatçıların diqqətini cəlb edir [1]. Bu birləşmələrə optik anizotropiya, ikiqat şüasınma, böyük qeyri-xətti həssaslıq əmsalları, yüksək fotohəssaslıq kimi xüsusiyyətlər xasdır. Bu xüsusiyyətlərin mövcudluğu, eləcə də geniş qadağan olunmuş zona bu birləşmələri yarımkəçirici cihazların hazırlanmasında perspektivli materiallar sırasına çıxarır [1]. Buna görə də, bu birləşmələrin fiziki xüsusiyyətlərinin tədqiqi mühümdür. Bu məqalədə CdGa₂Te₄ kristalının dinamik xassələrinin nəzəri tədqiqatının nəticələri təqdim olunur.

2. CdGa₂Te₄-ün dinamik xassələri

Ab-initio hesablamaları DFPT [2-4] vasitəsilə həyata keçirilmişdir. Hesablamalar ABINIT kodunda reallaşdırılmış psevdopotensial metodu ilə aparılmışdır [5]. CdGa₂Te₄ kristalının primitiv qəfəsində 7 atom var və fonon spektri buna görə 21 normal moddan ibarətdir.

Qrup nəzəriyyəsi analizi aşağıdakı fonon modlarını verir: $\Gamma=3A+6B+6E$, akustik modlar: $\Gamma_{acoustic}=B+E$ və optik modlar: $\Gamma_{optic}=3A+5B+5E$. E simmetriyalı modlar ikiqat cırlaşmışdır. Bütün optik modlar Raman aktivdir, B və E modları isə həmçinin infraqırmızı (İQ) spektrlərdə aktivdir. A modları qeyri-polyar Raman aktiv modlardır, B və E modları polyar modlardır və buna görə LO-TO parçalanma göstərir. A modlarında atomlar əsasən kristalloqrafik x , y və z oxları boyunca hərəkət edir. B modlarında isə kation qəfəsi ilə anion alt qəfəsi arasındakı hərəkət əsasən tetragonal c oxu boyunca baş verir. E_x və E_y simmetriyalı modların hərəkəti əsasən c oxuna perpendikulyar ab müstəvisində baş verir.

CdGa₂Te₄ kristalının fonon modlarının dispersiyası Brillüen zonasının yüksək simmetriyalı xətləri boyunca şəkil 1-də göstərilmişdir. Şəkil 1-dən görüldüyü kimi, P-N xətti istisna olmaqla, bütün yüksək simmetriyalı istiqamətlərdə optik fononların dispersiyası əhəmiyyətsizdir, bu da xüsusilə tetragonal c oxu boyunca Γ -Z istiqamətində zəif atomlararası qarşılıqlı təsiri göstərir. İQ aktiv B və E modları Brillüen zonasının mərkəzində LO-TO parçalanmasına səbəb olur və spektrdə qırılmalar kimi görünür (şəkil 1).

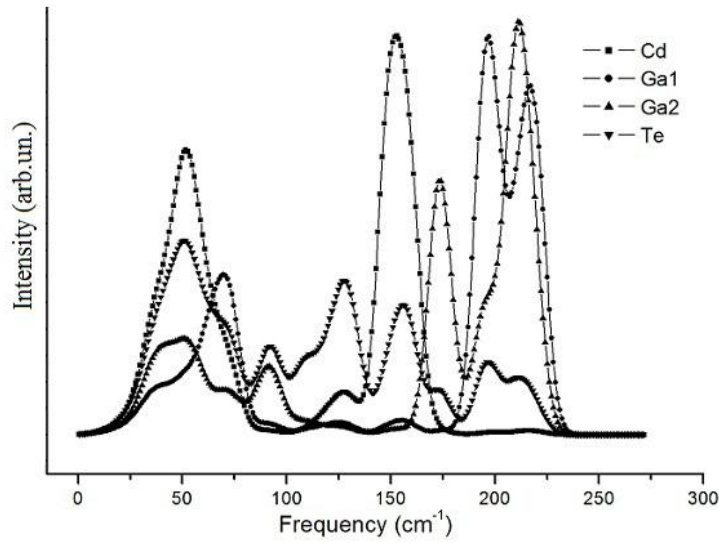


Şəkil 1. CdGa₂Te₄ kristalının fonon spektri.

İzostruktur birləşmələrin CdGa_2Se_4 [6], CdGa_2S_4 [7] və CdGa_2Te_4 fonon spektrlərinin müqayisəsi göstərir ki, bütün birləşmələrdə fononların dispersiyasının xarakteri ümumilikdə üst-üstə düşür. İki mühüm fərqi vurğulamaq olar: birincisi, anionun atom kütləsinin azalması ilə uyğun optik modların əlavələri azalır, ikincisi, kation və anion atomları arasındakı böyük kütlə fərqinin nəticəsi olan enerji aralıqları CdGa_2S_4 -də böyükdür, CdGa_2Se_4 -də azalır və CdGa_2Te_4 -də yox olur. Həmçinin, xalkogenlərin vibrasiya payı atom kütləsi artdıqca (S, Se, Te) aşağı tezliklərə doğru sürüşür. Atomlara proyeksiya edilmiş fonon sıxlığı (PDOS) şəkil 2-də göstərilmişdir. Hər bir atom üçün PDOS-un təhlili göstərir ki, 0 ilə 60 cm^{-1} tezlik aralığında maksimumu 50 cm^{-1} olan B və E modları ilə akustik və aşağı tezlikli optik budaqlar Cd və Te atomlarının hərəkətini əhatə edir. 85 -dən 170 cm^{-1} -ə qədər olan ikinci tezlik

aralığı, əsasən, Cd atomunun vibrasiyası ilə əlaqəlidir, Te-un isə az miqdarda payı var. Bu aralıqda Ga atomları fonon vibrasiyalarında iştirak etmir. Qeyd etmək lazımdır ki, Cd atomları yalnız 20 - 85 cm^{-1} və 140 - 170 cm^{-1} tezlik diapazonlarında vibrasiyalarda iştirak edir. Orta tezliklərdə onların payı demək olar ki, yoxdur. Yüksək tezlikli üçüncü sahə əsasən kristalloqrafik mövqelərdə (2b) və (2c) olan Ga atomlarının hərəkəti ilə bağlıdır. Spektrin 132 cm^{-1} -dəki ən güclü piki yalnız anion Te atomlarının iştirak etdiyi A modasına uyğundur. Aşağı tezlikli və yüksək tezlikli sahələr əsasən B və E modalarına uyğundur, halbuki qeyri-polyar A modaları orta tezlik intervalında yerləşir.

Cədvəl 1-də CdGa_2Te_4 üçün hesablanmış fonon tezlikləri və İQ və KR spektrləri verilmişdir. Cədvəldən görüldüyü kimi, nəzəri və eksperimental tezliklər kifayət qədər uyğundur.



Şəkil 2. CdGa_2Te_4 kristalının atomlara proyeksiya edilmiş fonon sıxlığı.

Cədvəl 1.

CdGa_2Te_4 üçün hesablanmış və eksperimentdən alınmış İQ və Raman fonon tezlikləri.

CdGa_2Te_4		
$\omega_{theo}, \text{ cm}^{-1}$	$\omega_{exp}, \text{ cm}^{-1}$	
	IR	R
102		
132		132
138.8		
63.4	58/77	64
90.2	98	85
161.2	140	114
172.6	182	
228.1	220/237	234
52.6		
75.8	78	
150.2	140	162
197	201	203
215.1	213	
50.1		57
75.8		
146.9	155	
192		
205.6		

3. Nəticə

Hesablama nəticələri göstərir ki, aşağı və yüksək tezlikli enerjilər əsasən B və E modlarına uyğun gəlir, orta tezlikli modlar isə qeyri-polyar A modları ilə bağlıdır. Ən intensiv spektral pik 132 cm^{-1} tezliyindədir və

Te anionlarının stexiometrik vakansiya ətrafında simmetrik hərəkətinə uyğundur.

-
- [1] *A.H.Георгобиани, С.И.Радауцан, И.М.Тугиняну*, ФТП, 19, 193, 1985.
- [2] *P.Gianozzi, S.de Gironcoli, P.Pavone, S.Baroni*. Phys. Rev. B, 43, 7231, 1991.
- [3] *S. Baroni, S. de Gironcoli, A. Dal Corso, P.Gianozzi*. Rev. Mod. Phys. 73, 515, 2001.
- [4] *X. Gonze*. Phys. Rev. B, 55, 10337, 1997.
- [5] *X. Gonze, J.M. Beuken, R. Caracas, F. Detraux, M. Fuchs, G.M. Rignanese, L. Sindic, M. Verstraete, G. Zerah, F. Jallet*. Comput. Mater. Sci. 25, 478, 2002.
- [6] *З.А. Джахангирли, Т.Г. Керимова, Н.А. Абдуллаев, И.А. Мамедова, Н.Т. Мамедов*. ФТП, 51, в.5, 585, 2017.
- [7] *З.А. Джахангирли, Т.Г. Керимова, И.А. Мамедова, Н.А. Абдуллаев, Н.Т. Мамедов*, ФТТ, 60,11, 2265, 2018.

Z.A. Jahangirli, B.G. Mekhtiev, R.G. Seidov, T.O. Bayramova, S.S. Osmanova

Ab INITIO INVESTIGATION OF THE DYNAMIC PROPERTIES OF CdGa₂Te₄

The dynamic properties of CdGa₂Te₄ have been investigated using density functional theory (DFT). Eight Raman-active modes and twelve IR-active modes were discovered and identified by considering the point group symmetry. The theoretically calculated results are compared with the experimental data of this study and with the available experimental data from the literature, obtained by infrared spectroscopy and Raman scattering methods.

З.А. Джахангирли, Б.Г. Мехтиев, Р.Г. Сеидов, Т.О. Байрамова, С.С. Османова

Ab INITIO ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ CdGa₂Te₄

Динамические свойства CdGa₂Te₄ исследованы с использованием теории функционала плотности (DFT). Восемь Раман активных мод и двенадцать ИК активных мод были обнаружены и идентифицированы из рассмотрения точечной группы симметрии. Теоретически рассчитанные результаты сравнены с экспериментальными данными настоящей работы и с результатами имеющихся в литературе экспериментальными данными, полученными методами инфракрасной спектроскопии и комбинационного рассеяния света.

Qəbul olunma tarixi: 16.12.2024

GÜNƏŞ ELEMENTLƏRİNİN İNKİŞAF PERSPEKTİVLƏRİ

A.V. QƏDİROVA, S.X. MƏMMƏDOVA, S.Q. NURİYEVA

*Bakı Dövlət Universiteti, Nanoaraşdırmalar Laboratoriyası**Z. Xəlilov küç.23, Bakı, AZ-1148*E-mail: aytacqedkrova@gmail.com

mob: +994558908594

Günəş elementləri üçün yeni materialların istehsalı tədqiqatçıların daima marağında olduğundan uzunmüddətli stabilliyə, əla enerji səmərəliliyinə, yüksək foton udulmasına və asan elektron transferinə malik materialların sintezi, tədqiqi və tətbiqi vacib elmi istiqamətlərdən hesab olunur. İcmal məqalədə ilk olaraq, hər dövr üçün aktual olan günəş elementləri təhlil edilmiş, bundan əlavə onların səmərəliliyi, baza elementləri, hazırlanma texnologiyaları və çatışmazlıqları vurğulanmışdır. Gələcək perspektiv üçün günəş elementlərində ən optimal hesab edilən üstün materialların seçimi vurğulanmışdır.

Açar sözlər: günəş elementlərinin nəsilləri, səmərəlilik, nanomateriallar.

DOI:10.70784/azip.2.2025106

1. Giriş

Son dövrlərdə təbii yanacaqdan istifadənin ekoloji problemlərə, qlobal iqlim dəyişikliyinə səbəb olması alimləri alternativ enerji mənbələrini daha da inkişaf etdirməyə təşviq edir. Günəş enerjisindən təmiz və müəyyən mənada limitsiz enerji istehsal edilə bildiyi üçün alternativ enerji mənbələri arasında o ön sıralardadır. Günəş elementlərindən istifadə ətraf mühitin mühafizəsini təmin etməklə yanaşı, həmçinin təbii yanacaqdan asılılığı da azaltmağa imkan verir. Bu baxımdan günəş elementlərin istehsalı üçün materialların doğru seçimi onların səmərəliliyinə əhəmiyyətli dərəcədə təsir göstərir. Ona görə də, mövcud olan günəş elementlərinin keyfiyyətlərini artırmaq və yeni nəsillə hibrid günəş elementləri yaratmaq alimlərin yeni tədqiqat sahəsinə çevrilmişdir. Yeni nəsillə günəş elementlərində metal və metal oksid nanohissəciklərindən, karbonun allotropik formalarından (qrafen, karbon nanoboruları), perovskitlərdən və onların əsasında hibrid materiallardan istifadə edilmişdir. Son elmi ədəbiyyatlarda bununla bağlı kifayət qədər işlər var. Tədqiqat işinin məqsədi hazırda mövcud olan və yeni nəsillə günəş elementləri ilə bağlı məqalələri təhlil etmək və gələcək perspektivləri müəyyənləməkdən ibarətdir.

Araşdırılan tədqiqat işində hər dövr üçün aktual olan günəş elementləri təhlil edilmiş, onların səmərəliliyi, baza elementləri və hazırlanma texnologiyaları arasındakı və son dövr üçün ən aktual hesab edilən hibrid günəş elementlərinin üstünlükləri vurğulanmışdır.

2. Günəş elementlərinin inkişaf mərhələləri

Günəş elementlərinin inkişaf mərhələlərinə nəzər saldıqda onların əsasən 4 qrupa bölündüyünü görmək olur (şəkil 1) [1-3].

Birinci nəsillə günəş elementləri əsasən mono-, poli- və multikristal silisiumdan və ya GaAs əsaslı təbəqələrdən hazırlanmışdır. GaAs günəş elementlərinin istehsalı üçün istifadə edilən ilkin material olmasına baxmayaraq, günəş elementlərinin 90%-i silisium əsasıdır [4-5]. Bunun səbəbi silisiumun yer qabığında çox

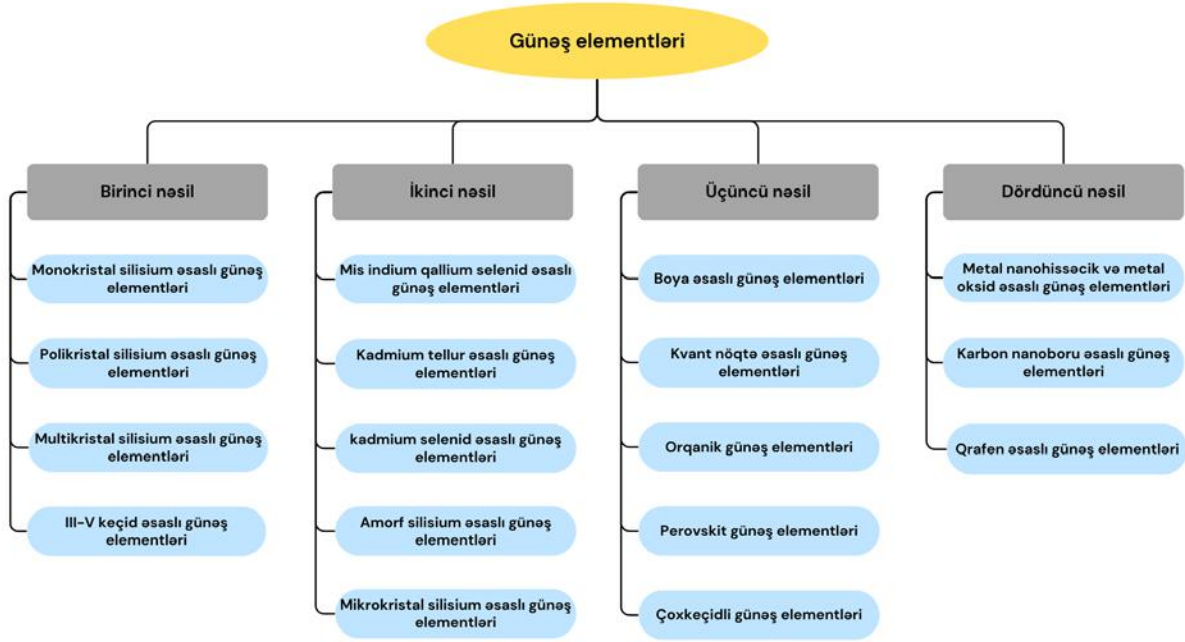
rast gəlinməsi, qeyri-toksik maddə olması və mikroelektronikaya asanlıqla uyğun olmasıdır [7]. Lakin bu günəş elementlərinin böyük istehsal xərcləri, yüksək temperatur həssaslığı və material itkisinə malik olması polikristal silisium əsaslı günəş elementlərinin istifadəsinə zərurət yaratmışdır [2, 8]. Məlumdur ki, polikristal silisiumun kristallitləri arasında rekombinasiya mənbəyi hesab edilən əlavə sərhəd bu material əsasında hazırlanmış günəş elementlərinin daha aşağı effektivliyə malik olmasına səbəb olmuşdur. Bu da daha səmərəli material hesab edilən, böyük qadağan olunmuş zona enerjisi (1,43 eV) malik, daha yaxşı optik xüsusiyyətlər nümayiş etdirən GaAs-dən hazırlanan günəş elementlərindən istifadəsini aktuallaşdırmışdır [2, 9]. Bu tip günəş elementləri bir çox üstünlüklərə malikdirlər: ultrabənövşəyi radiasiya və rütubət kimi sərt ekoloji şəraitə davamlı, yüksək səmərəlilik, alçaq temperatur həssaslığı və s., lakin GaAs istehsalının bahalı olması, həmçinin qalium və arseninin nadir elementlər olması, onların istehsal qabiliyyətinin məhdudlaşdıran səbəblər olmuşdur [2, 11].

Birinci nəsillə günəş elementlərinin yuxarıdakı çatışmazlıqlarını aradan qaldırmaq üçün amorf silisium (a-Si), mikrokristal silisium (μc-Si), kadmium tellurid (CdTe), kadmium sulfid (CdS), mis indiumdan hazırlanmış nazik təbəqəli ikinci nəsillə günəş elementlərindən istifadə olunmuşdur [2, 6, 13]. Altiq üzərində nazik mis, indium, qalium və selen təbəqəsinin çökdürülməsi ilə istehsal olunan günəş elementləri yüksək udulma əmsalına malikdir [14]. Hazırlanan bu günəş elementlərinin səmərəlilik əmsalını dəyişmək üçün In:Ga və Cu:Se nisbətərini dəyişməklə ən yüksək səmərəlilik (20%) əldə edilmişdir [15]. Bu günəş elementlərinin üstünlüyü istehsal üçün az materialın tələb olunması olsa da, çatışmayan cəhətləri temperatura həssas olması və In-un bahalı olması onun istifadə imkanlarına məhdudiyət yaratmışdır [16]. Ona görə də, yüngül çəkiyə görə günəş elementlərinin istehsalında CdTe/CdS əsaslı super nazik elementlərin tətbiqi geniş vüsət almış, lakin kadmiumun zəhərli olması ilə yanaşı, həm tellurun nisbətən nadir element olması, həm də səmərəlilik faizinin aşağı olması bu günəş elementlərinin istehsal qabiliyyətini də zəiflətməmişdir [2, 17]. Yer qabığında geniş yayılan amorf silisiumdan (a-Si) istifadə daha az maliyyə hesabına yüngül çəkiyə malik günəş

GÜNƏŞ ELEMENTLƏRİNİN İNKİŞAF PERSPEKTİVLƏRİ

elementlərinin istehsalında səmərəliliyin 5-7% artmasına imkan vermişdir. Görmə oblastında güclü udulma əmsalına malik olan mikrokristal silisium əsaslı günəş

elementlərinin ($\mu\text{c-Si}$) səmərəliliyinin 8-12%-ə qədər yüksəlməsinə baxmayaraq onlar aşağı istehsal qabiliyyətlərinə malik olmuşdurlar.

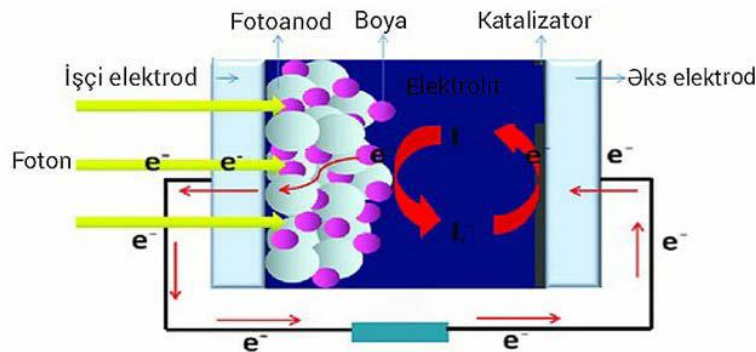


Şəkil 1. Günəş elementlərinin nəsilləri.

Sadalanan bu çatışmazlıqlar yüksək səmərəliliyə malik üçüncü nəsil günəş elementlərinin yaranmasına təkan vermiş və boya ilə həssaslaşdırılmış günəş elementləri (DSSCs), perovskit günəş elementləri (PSC), kvant nöqtəli günəş elementləri (QDSSCs) və çoxkeçidli günəş elementləri kimi aşağı istehsal xərclərinə malik elementlərin sürətlə inkişafı və geniş tətbiqi vüsət almışdır [2, 16-19]. Bu elementlərin bəzilərinin 25 ildən çox müddət ərzində tədqiq olunmasına baxmayaraq, bazara zəif nüfuz etmələrinə görə bəzən “yeni yaranan, inkişaf edən texnologiyalar” da adlandırılırdı. Səmərəliliyi 5-20% arasında dəyişən boya ilə həssaslaşdırılmış günəş elementlərinin əsas strukturu iki şəffaf keçirici oksid şüşəsi arasına sıxışdırılmış əsas elementlər olan fotoanod, həssaslaşdırıcı boya və elektrolitdən ibarətdir. Fotoanod üçün material olaraq yarımkeçirici oksidlərdən daha çox TiO_2 və ZnO istifadə edilmişdir. Bəzi tədqiqatçılar TiO_2 -ə ən uyğun alternativ

kimi ZnO -i istifadə etmiş və fotoanodun səmərəliliyini artırmışdır.

Boya ilə həssaslaşdırılmış günəş elementlərində fotoanodun hazırlanması üçün müxtəlif üsullardan- fırlanma örtük, doktor bleyd, SILAR (ardıcıl ion təbəqəsinin adsorbsiyası və reaksiyası) metodlarından istifadə edilmişdir. Digər əsas element olan boya (N719) günəş enerjisini effektiv udmaq və onu elektrik enerjisinə çevirmək məqsədi daşıyır. Elektrolitin tərkib komponentləri- redoks cütü, həlledici, əlavələr, ionlu mayelər, kationlar günəş elementinin sabitliyinə və səmərəliliyinə təsir göstərə bilər. Sonuncu əsas element olan əks elektrod redoks cütünü bərpa etmək üçün elektronları xarici dövrədən elektrolitə ötürür [19, 20]. Az işıqlı şəraitdə, alçaq temperaturda işləyə bilməsi, möhkəmliyi və uzun ömürlüliyü, asanlıqla təkrar istifadəyə yararlılığı, aşağı qiymətə və sadə istehsal prosesinə malik olan boya ilə həssaslaşdırılmış günəş elementlərinin sxematik təsviri şəkil 2-də təsvir olunub.



Şəkil 2. Boya ilə həssaslaşdırılmış günəş elementlərinin sxematik təsviri.

Son illərdə tədqiqatçıların diqqətini çəkən digər bir element- ABX_3 kimyəvi formuluna malik perovskit materialdan hazırlanmış effektiv uducu təbəqəyə malik günəş elementləridir. Burada A və B müxtəlif atom radiuslu kationlar, X isə aniondur [21-23]. İlk perovskit əsaslı günəş elementini 2009-cu ildə istifadəyə verilmiş və əvvəlki elementlərdən təxminən 3.8% artıq səmərəliliyə malik olmuşdur [24]. Üç il sonra təqdim edilən günəş elementinin səmərəliliyi 10%-ə, on illik tədqiqatdan sonra isə 25.2%-ə yüksəlmişdir [2]. Bu günəş elementlərini istehsalı üçün də fırlanma örtük, inkjet printer, sprey örtük, doktor bleyd üsullarından istifadə edilmişdir. Lakin perovskit günəş elementlərinin qeyri-stabillikləri bu günəş elementlərinin istehsal qabiliyyətinin zəifləməsinə səbəb olmuşdur. Eyni çatışmazlığa malik olan kvant nöqtəli günəş elementlərində günəş enerjisinin elektrik enerjisinə çevrilməsi dörd ardıcıl prosədə baş verir: işığın udulması və eksitonun əmələ gəlməsi (1), eksitonun yayılması (2), yükün ayrılması (3) və daşınması (4). Eksitonların yaşama müddətinin az olması səbəbindən üzvi birləşmələr kiçik eksitonun diffuziya uzunluqları (10-20 nm) ilə xarakterizə olunur [2, 25]. Bu günəş elementlərinin səmərəlilikləri təxminən 1.1-1.9%-dir [2, 16].

Son dövrlərdə nanotexnologiyanın inkişafının digər sənaye sahələrinə verdiyi müsbət qatqı günəş elementlərinə də təsirsiz qalmamış və hibrid günəş elementləri kimi də tanınan dördüncü nəsil formalaşmışdır. Nanomaterialların işığı daha effektiv udması faktı, bununla da fotoelementlərdə günəş spektrinin daha geniş diapazonunun istifadəsi bu elementlərin səmərəliliyinin artmasına səbəb olmuşdur. Hibrid günəş elementlərində ənənəvi fotovoltaiq texnologiyalar yeni nanomateriallar-qrafen, karbon nanoboruları, metal və metal oksid və sulfid nanohissəcikləri, kvant nöqtələri və s. bir-biri ilə kombinasiya edilərək hazırlanmışdır. Belə ki, silisium günəş elementləri ilə perovskit materiallar və ya kvant nöqtələri birləşdirilərək daha yüksək səmərəlilik əldə etmək mümkün olmuş, həm də istehsal xərcləri azalmışdır [27].

Son iki onillikdə qrafen fotovoltaiq material anlayışı ilə birləşdirilib və günəş elementlərində qrafen əsaslı materiallardan istifadə edilmişdir [2, 26]. Gələcəyin nanomaterialı hesab olunan qrafenin yüksək keçiriciliyə malik olması onu günəş elementlərində istifadə üçün məqsədəuyğun edir. Bununla yanaşı qrafen yarımmetaldir, qadağan olunmuş zonaya malik deyil və qrafendə yükdaşıyıcıların mütəhərrikliliyi silisiumdan min dəfə yüksəkdir. Bu kəşf nəticəsində günəş elementlərində İTO-nu (indium qalay oksid əsaslı substrat) əvəz etmək üçün ucuz qrafen təbəqələrindən istifadə olunmuşdur [29].

Hibrid yanaşmalardan digər bir nümunə geniş yayılmış və yüksək enerji çevirmə səmərəliliyinə malik silisium və işıq spektrinin müxtəlif hissələrini daha effektiv şəkildə udmaq qabiliyyətinə malik perovskit nanomateriallar əsasında texnologiyaların birləşdirilməsidir. Belə ki, silisiumun görünən işığı, perovskit materialların ultrabənövşəyi və infraqırmızı işığı daha effektiv udması faktı bu iki materialın birləşməsi ilə daha geniş işıq spektrindən istifadə etməyə imkan vermiş, bu da günəş elementlərinin ümumi səmərəliliyinin 30%-ə

qədər artmasına səbəb olmuşdur. Həmçinin perovskit materiallar silisiuma nisbətən daha ucuz, istehsalı isə daha asandır [27].

3. Gələcək perspektivlər

Müəyyən dövr ərzində günəş elementlərinin tərkib hissələrinin materialları daima yenilənsə də mövcud çatışmazlıqları aradan qaldıra biləcək unikal optik və elektrik xassələrinə malik olan maddələrin axtarışı hələ də davam etməkdədir. Bu da müxtəlif formalı və quruluşlu nanomateriallar əsasında tandem strukturlu hibrid birləşmələrin yaradılmasına və onların gələcək nəsil fotovoltaiq texnologiyalarda istifadəsinə zərurət yaradır [7-9]. Tərəflərinin nisbəti yüksək olan 1D strukturlar (nanonaqillər, nanoborular və nanorodlar) üstün elektrik keçiriciliyi və işığın udulması qabiliyyətinə görə, 2D strukturlar tənzimlənə bilən zona eninə, böyük səth sahəsinə, yükdaşıyıcıların yüksək mütəhərrikliliyinə və əla optik xüsusiyyətlərinə görə gələcək perspektivlərdə maraq çəkən komponentlərdir [10-13]. Hesab olunur ki, bu kimi materialların karbon nanostrukturlar (karbon nanoborular, qrafen) ilə kombinasiyası əsasında günəş elementlərinin səmərəliliyi daha da artacaq, maliyyə xərcləri isə azalacaqdır [14-16]. Belə ki, karbon nanostrukturlarının davamlılığı, yüksək səmərəliliyi və aşağı istehsal xərcləri bu texnologiyaların günəş elementlərində istifadəsinə əvəzlənməzdir. Tədqiqatlar göstərir ki, onların istifadəsi ilə 40%-dən yuxarı enerji çevirmə səmərəliliyinə nail olmaq mümkündür, bu isə ənənəvi günəş elementlərindən çox yüksəkdir [28]. Hal-hazırda yüksək keçiriciliyə, aşağı qiymətə və tənzimlənən optik xüsusiyyətlərinə (fərqli qadağan olunmuş zona qiyməti), xüsusən də işığın udulmasını yaxşılaşdıran səth plazmon rezonansına (SPR) görə sink sulfid, kadmium tellurid əsasında fotovoltaiqlər, kadmium selenid, mis oksid, titan oksidi, indium-qallium nitridi, qallium arsenid və indium arsenid nanonaqilləri və nanosəthləri tədqiq edilir və istehsal olunur [17-19]. Əldə edilmiş uğurlar nəticəsində nanomaterialların gələcək enerji bazarında əhəmiyyətli islahatlar aparacağı və bu bazarın yeni perspektivlərinə töhfə verəcəyi gözlənilir.

4. Nəticə

Son bir neçə onillikdə elmi tədqiqat sahəsində yüksək enerji çevirmə səmərəliliyinə, təkmilləşdirilmiş foton udma qabiliyyətinə, uzunmüddətli stabilliyə və asan elektron nəqlinə malik olan günəş elementləri üçün yeni materialların hazırlanması və tədqiqi aktual tədqiqat mövzudur. Bu baxımdan, təqdim olunan icmal məqalədə günəş elementlərinin inkişaf xronologiyası araşdırılmış, hər nəsil üçün uyğun elementlərin əsas tərkib materiallarının üstünlükləri və çatışmazlıqları vurğulanmışdır. Nanotexnologiyanın inkişaf sürətinin günəş elementlərinə də təsirsiz ötürmədiyi bəlli olmuş və müxtəlif 1D və 2D nanoquruluşlar əsasında günəş elementlərinin xassələri araşdırılmışdır. Alternativ enerji mənbələrinin perspektivləri nəzərə alınaraq gələcəkdə günəş elementləri üçün yaxşılaşdırılmış xüsusiyyətlərə malik material seçimi üçün istiqamətlər müəyyən edilmişdir.

- [1] G.M.Wilson, M.Al-Jassim, W.K.Metzger, S.W.Glunz, P.Verlinden, G.Xiong, L.M.Mansfield, B.J.Stanbery, K.Zhu, YaY. J.Phys.Appl.Phys., The 2020 photovoltaic technologies roadmap. 2020;53:493001.doi: 10.1088/13616463/ab9c6a.
- [2] Justyna Pastuszek, Paweł Węgierek. Photovoltaic Cell Generations and Current Research Directions for their development. Materials 2022, 15(16),5542; <https://doi.org/10.3390/ma15165542>].
- [3] M.V. Dambhare, B. Butey, S.V. J. Moharil, Solar photovoltaic technology: A review of different types of solar cells and its future trends Phys. Conf. Ser.2021;1913:012053.doi:10.1088/17426596/1913/1/012053.
- [4] P.G.Sampaio, M.O.González. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017;74:590-601.
- [5] Muhammad Aamir Iqbal, Maria Malik, Wajeehah Shahid, Syed Zaheer Ud Din, Nadia Anwar, Mujtaba Ikram and Faryal Idrees Materials for Photovoltaics: Overview, Generations, Recent Advancements, and Future Prospects, DOI: 10.5772/intechopen.101449
- [6] Neeraj Kant, Pushpendra Singh. Review of next-generation photovoltaic solar cell technology and comparative materialistic development <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.116>
- [7] A.M. Kuhlmann. The second most abundant element in the earth's crust. Journal of Metals 1963;15(7):502-505
- [8] Thejo Kalyani, S.J.Dhoble, B.Vengadaesvaran, Abdul Karim Arof. Chapter 20 - Sustainability, recycling, and lifetime issues of energy materials, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823710-6.00015-7>
- [9] Francesco Calise, Massimo Dentice D'Accadia, Massimo Santarelli, Andrea Lanzini, Domenico Ferrero, Solar Hydrogen Production, Processes, Systems and Technologies 2019, Pages 559-567
- [10] Mehmet Emin Meral, Furkan Dinçer, Renewable and Sustainable Energy Reviews, June 2011, 10.1016/j.rser.2011.01.010
- [11] A.A.Yaroshevsky, Abundances of chemical elements in the Earth's crust. Geochemistry International, 44 (1), 48-55. (2006).
- [12] M.Nayeripour, M.Mansouri, F. Orooji, E.Waffenschmidt, Solar Cells; IntechOpen Limited: London, UK, 2020; pp. 1–50.
- [13] Mugdha V Dambhare et al., Solar photovoltaic technology: A review of different types of solar cells and its future trends 2021 J. Phys.: Conf. Ser. 1913 012053, 10.1088/1742-6596/1913/1/012053
- [14] K.Zweibel, Thin films: Past, present and future Photo-volt-3, 279 1995
- [15] M.A.Green, Y.Hishikawa, E.Dunlop, D.Levi, J.Hohl-Ebinger, M.Toshita, A.WY. Ho-Baillie, Solar cell efficiency tables (version 53). Prog. Photovolt. Res. Appl. 2018, 27.
- [16] Vincenzo Muteri, Maurizio Cellura, Domenico Curto, Vincenzo Franzitta, Sonia Longo, Marina Mistretta and Maria Laura Parisi, Review on Life Cycle Assessment of Solar Photovoltaic Panels
- [17] X.Wu, High-efficiency polycrystalline CdTe thin-film solar cells. Sol. Energy 2004, 77, 803–814.
- [18] X.X.Gao, W.Luo, Y.Zhang, R.Hu, B.Zhang, A.Züttel, M.K.Nazeeruddin, Stable and high-efficiency methylammonium-free perovskite solar cells. Adv. Mater. 2020, 32, 1905502.
- [19] N. Shah, A. A. Shah, P. K. Leung, S. Khan, K. Sun, X. Zhu, Q. Liao, A Review of Third Generation Solar Cells
- [20] N. Jamalullail, I. Smohamad, M. Nnorizan, and N.Mahmed Enhancement of Energy Conversion Efficiency for Dye-Sensitized Solar Cell Using Zinc Oxide Photoanode
- [21] Yang Yang, MinhTam Hoang, Aman Bhardwaj, Michael Wilhelm, Sanjay Mathur, Hongxia Wang, Perovskite solar cells based self-charging power packs: Fundamentals, applications, and challenges,
- [22] P. Basumatary, P. Agarwal, A short review of progress in perovskite solar cells. Mater. Res. Bull. 2022, 149, 111700
- [23] D.Sharma, R.Mehra, B.Raj, Design and comparative analysis of various planar perovskite solar cells through numerical simulation using different HTLs to improve efficiency. Opt. Mater. 2022, 126, 112221
- [24] A.Kojima, K.Teshima, Y.Shirai, T.Miyasaka, Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells. J. Am. Chem. Soc. 2009, 131, 6050–6051.
- [25] D.Bera, L.Qian, T.-K.Tseng, P.H.Holloway, Quantum Dots and Their Multimodal Applications: A Review. Materials 2010, 3, 2260–2345.
- [26] S.Das, D.Pandey, J.Thomas, T. Roy, The role of graphene and other 2D materials in solar photovoltaics. Adv. Mater. 2019, 31, 1802722.
- [27] Yuanhang Cheng, Liming Ding, Perovskite/Si tandem solar cells: Fundamentals, advances, challenges, and novel applications, September 2021, 10.1002/sus2.25
- [28] Colin Klinger, Yogeshwari Patel, W.Ch.Henk, Carbon Nanotube Solar Cells, 10.1371/journal.pone.0037806
- [29] Y.Wang, X.Chen, Y.Zhong, F.Zhu, K.P.Loh, Large area, continuous, few-layered graphene as anodes in organic photovoltaic devices. Appl. Phys. Lett. 2009, 95, 209.

A.V. QƏDİROVA, S.X. MƏMMƏDOVA, S.Q. NURIYEVA

A.V. Gadirova, S.X.Mammadova, S.G. Nuriyeva

CHRONOLOGY AND FUTURE PROSPECTS OF SOLAR CELL

The production of new materials for solar cells has always interested researchers, as the synthesis, investigation, and application of materials with long-term stability, high energy efficiency, high photon absorption, and easy electron transfer are considered current directions. In the review article, the solar cells relevant for each period were analyzed, and their efficiency, base elements, preparation technologies, and shortcomings were emphasized. The selection of superior materials in the most relevant solar cells for prospects was highlighted.

Qəbul olunma tarixi: 25.12.2024

Bi₂Sr₂CaCu₂O_x ƏSASINDA QALIN TƏBƏQƏLİ İFRATKEÇİRİCİ PLYONKANIN ALINMASI VƏ TƏDQIQI

V.M. ƏLİYEV, Q.İ. İSAKOV, ¹C.Ə. RƏHİMOV, ²G.Ə. ƏLİYEV, S.Z. DƏMİROVA

Elm və Təhsil Nazirliyinin Fizika İnstitutu, AZ 1073, Bakı ş. H.Cavid pr. 131

¹*Azərbaycan Tibb Universiteti, AZ 1022, Bakı ş. Bakıxanov küç. 23*

²*Elm və Təhsil Nazirliyinin Neft-Kimya Prosesləri İnstitutu, AZ 1025, Bakı ş. Khojalı pr., 30*

E-mail: v_aliev@bk.ru

Bi₂Sr₂CaCu₂O_x yuxarı temperaturlu ifratkeçirici əsasında alınmış plyonka onda əmələ gələn əlavə keçiriciliyi Aslamazov-Larkin nəzəri modeli əsasında BKSŞ nəzəri modelindən Boze-Eynşteyn kondensatı nəzəri modelinə keçidi nəzərə almaqla tədqiq edilmişdir. Tədqiq edilən ifratkeçirici materialın 2D fluktuasiya oblastından 3D oblastına krossover temperaturu (T_{cr}), əmələ gələn Kuper cütlərinin koherentlik uzunluğu (ξ_c) hesablanmışdır. Eyni zamanda əmələ gələn orta sahəyə yaxınlaşan kritik temperaturu (T_c^{mf}), İK keçid temperaturu (T_c), Ginzburq temperaturunu (T_G) da təyin edilmişdir.

Açar sözlər: ifratkeçiricilik, koherentlik uzunluğu, krossover temperaturu

DOI:10.70784/azip.2.2025111

GİRİŞ

Hal-hazırda müxtəlif üsullarla yüksək kritik parametrlərə malik ifratkeçirici (İK) plyonka nümunələrinin alınması məlumdur. Metaloksid plyonkaların stexiometrik tərkibə uyğun alınması üçün molekulyar-şüa epitaksiya üsulundan [1], keramik nişangahdan lazerlə uçurtmadan [2], diod tozlandırılmasından [3], yüksək tezlikli maqnetron tozlandırılmadan [4] və kimyəvi üsullardan müvəffəqiyyətlə istifadə edilərək qalın təbəqəli İK plyonkalar alınmışdır.

Bütün bu göstərilən üsullarla alınan İK təbəqələrin alınması mürəkkəb texniki hazırlıqla, eyni zamanda onun komponentlərinin xüsusi kimyəvi birləşmələrdən ibarət olması ilə xarakterizə olunur.

Son zamanlar, İK materialların kəşfindən indiyədək, nazik təbəqəli plyonkaların alınması ilə bərabər qalın təbəqəli (50-200 mkm) plyonkaların alınması üzrə də elmi işlər çap olunmuşdur. Onların alınma texnologiyası nazik təbəqəli plyonkaların alınmasından çox sadədir. Belə ki, onların alınması mürəkkəb texniki apparatur hazırlığı və komponentlərinin xüsusi kimyəvi birləşmələrdən ibarət olması tələb olunmur.

Eyni zamanda qeyd etmək lazımdır ki, trafaret üsulu ilə də müxtəlif ifratkeçirici strukturlar almaq olar.

Aşağıda müxtəlif üsullarla alınmış və tədqiq olunmuş Bi-Sr-Ca-Cu-O İK qalın təbəqəli materialları nəzərdən keçirək.

[5]-ci işdə trafaret möhürləmə üsulu ilə Bi-Sr-Ca-Cu-O əsaslı qalın İK plyonka alınmışdır. İfratkeçirici Bi-Sr-Ca-Cu-O plyonka almaq üçün onun komponentlərinin oksalat birləşmələrini və səthi aktiv agentini üzvi həllediciyə əlavə etməklə pasta hazırlanmışdır. Altıq kimi cilalanmış monokristallik MgO-dan istifadə olunmuşdur.

Nümunələr 890°C temperaturda bir saat termiki emal edilmiş və sonra 40 saat 870°C temperaturda yandırılmışdır. Trafaret üsulu ilə sintez edilmiş, qalınlığı 40 mkm olan plyonkanın İK keçidi iki keçidli olmuşdur (105K və 80K).

Bi-Sr-Ca-Cu-O əsasında [6] trafaret möhürləmə üsulu ilə qalın təbəqəli İfratkeçirici plyonka alınmışdır. Göstərilmişdir ki, alınmış İfratkeçirici plyonkanın

elektrik xassələri və kristallik strukturu altlığın materialından və qızdırılma temperaturundan çox asılıdır. Plyonka sintezi SrTiO₃ altlıq üzərində 850°C-də alınmış və keçid $T_c=68K$ temperaturda baş vermişdir.

Bi-Sr-Ca-Cu-O sistemi əsasında qalın İfratkeçirici plyonka [7] monokristallik MgO üzərində alınmışdır. Sintez komponentlərin altlıq üzərində sürənlə əritmə üsulu ilə aparılmışdır. Bi₂O₃, SrCO₃, CaCO₃, və CuO toz əsasında Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_x, Bi₂Sr_{2,5}Ca_{2,5}Cu₄O_x, Bi₄Sr₃Ca₃Cu₄O_x tərkiblər hazırlanmış və asetonla qarışdırılaraq plyonka üzərinə çəkilərək 910-1050°C temperaturda 5dəqiqə ərzində qızdırılmışdır. Alınmış ərinti otaq temperaturuna qədər soyudulur. Alınmış plyonkanın qalınlığı 50-150 mkm olmuş, keçid temperaturu isə 85K olmuşdur.

[8]-ci işdə qalınlığı 40-60 mkm olan Bi_{1,9}Pb_{0,4}Sr₂Ca₂Cu₃O_x və Bi_{1,95}Pb_{0,6}Sr₂Ca₂Cu₃O_x İfratkeçirici plyonkalar alınmışdır. Sintez İfratkeçiricilərin stexiometrik tərkibləri əsasında CH₃(CH₂)₆OH həlledicisində qarışıq hazırlayaraq monokristallik MgO üzərinə çəkilərək 800-875°C temperaturda 5-50 saat qızdırmaqla aparılmışdır.

Təqdim olunan işin əsas məqsədi Bi₂Sr₂CaCu₂O_x ifratkeçirici material əsasında sapfir altlıq üzərində qalın təbəqəli ifratkeçirici plyonka alaraq onun fiziki xassələrinin təyiniidir.

EKSPERİMENTİN NƏTİCƏLƏRİ VƏ ONLARIN TƏHLİLİ

Qalın təbəqəli İK plyonka almaq üçün altlıq kimi sapfir seçilmişdir. Plyonkanın materialı kimi İK yarımfabrikat kimi Bi₂O₃, SrCO₃, CaCO₃, və CuO oksidlərdən istifadə etməklə Bi₂Sr₂CaCu₂O_x simtez edilmişdir.

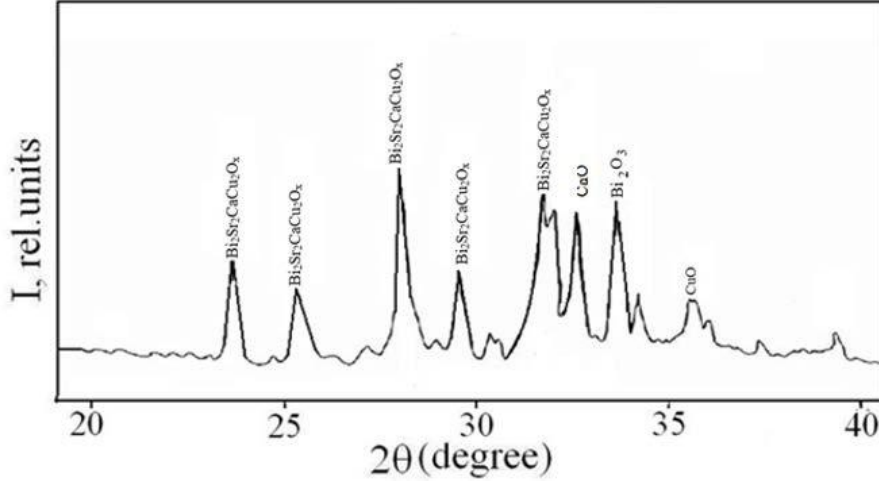
İfratkeçirici materialın oksidləri Bi₂O₃ işıraqı olmadan qarışdırılaraq preslənərək 5 saat ərzində 1173K temperaturda qızdırılmışdır. Sonra oksidlər qarışığının tərkibinə Bi₂O₃ əlavə edilərək 1123K temperaturda beş saat yandırılmışdır. Alınmış material plyonka almaq üçün istifadə edilmişdir.

Sintez olunmuş İK material sapfir üzərində qalın təbəqəli plyonka almaq üçün istifadə edilmişdir. Bunun

üçün alınmış Bi-Sr-Ca-Cu-O material aqat həvəngdəstədə əzilərək altlıq üzərində yerləşdirilərək $T=1373\text{K}$ temperaturda beş dəqiqə yandırılmışdır. Alınmış İK plyonkanın qalınlığı 50-100 μm olmuşdur.

Alınmış İK plyonkanın xüsusi müqaviməti dördzondlu üsulla sabit cərəyanda dördzondlu üsulla ölçülmüşdür.

Rentgenstruktur analiz üsulu ilə İK qalın plyonkanın alınması təsdiqlənmişdir (şəkil 1). Aparılmış rentgenstruktur analizin təhlili göstərmişdir ki, nümunə polikristal quruluşa malikdir və tərkibdə az miqdarda 2223 və 2201 ifratkeçiriciliyə malik fazalar da iştirak edir.



Şəkil 1. $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ ifratkeçirici materialın rentgenoqramması

$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ İK PLYONKANIN ELEKTRİK XASSƏLƏRİNİN TƏDQIQI

Sintez edilmiş vismut əsaslı ifratkeçiricinin (a) və onun əsasında alınmış İK plyonkanın xüsusi müqavimətlərinin temperatur asılılığı şəkil 2-də göstərilmişdir. Nümunələrin xüsusi müqavimətləri 65-300K temperaturda dördzondlu üsulla ölçülmüşdür.

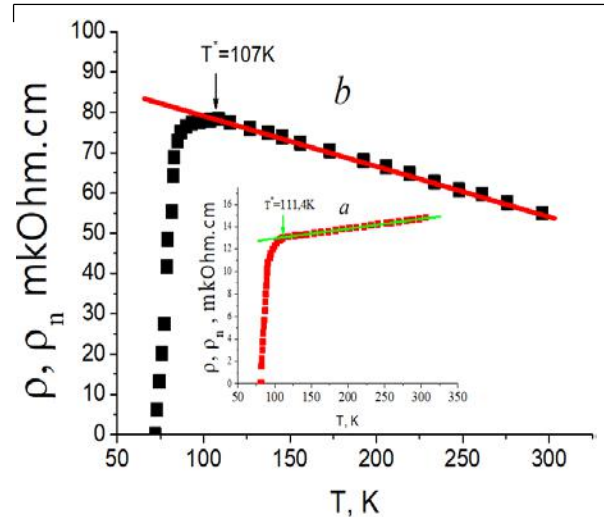
İkinci şəkildən görüldüyü kimi nümunələrin kritik temperaturları (T_c) müvafiq olaraq $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ İK material üçün 81,2 K, ondan istifadə etməklə alınmış İK plyonka üçün isə 71,1K olmuşdur.

$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ əsasında alınmış ifratkeçirici plyonkanın (şəkil 2, a) xüsusi müqavimətinin $T^*=107\text{K}$ temperaturda düzxətlikdən çıxmasını bu temperaturda lokal cütlərin əmələ gəlməsi kimi qəbul edərək eksperimentdən alınan nəticələri əlavə keçiriciliyin aşağıdakı tənliyi ilə yəni kritik temperaturdan bir qədər yuxarıda keçiriciliyə fluktuasiya əlavəsi üsulu ilə analiz etmişik:

$$\Delta\sigma(T) = \rho - 1(T) - \rho_n - 1(T), \quad (1)$$

Əlavə keçiriciliyin ($\Delta\sigma(T)$) təhlili üçün $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ İK plyonkanın $\rho(T)$ asılılığında xüsusi müqavimət normal fazada ($T > T_c$) $\rho_n(T) = (\rho_0 + \kappa T + BT^2)$ ifadəsi ilə ekstrapolyasiya edilmişdir.

Bu nümunə üçün $\rho_0 = 85 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}$, k əmsalı - 0,04 və $B = 0,00021$ olmuşdur. 2-ci şəkildə göstərilmiş düz xətt aşağı temperatur oblastına ekstrapolyasiya olunmuş $\rho_n(T)$ asılılığını göstərir [8, 9].



Şəkil 2. a- ifratkeçirici $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ -nin və b- ondan istifadə etməklə alınmış İK plyonkanın xüsusi müqavimətlərinin temperatur asılılığı.

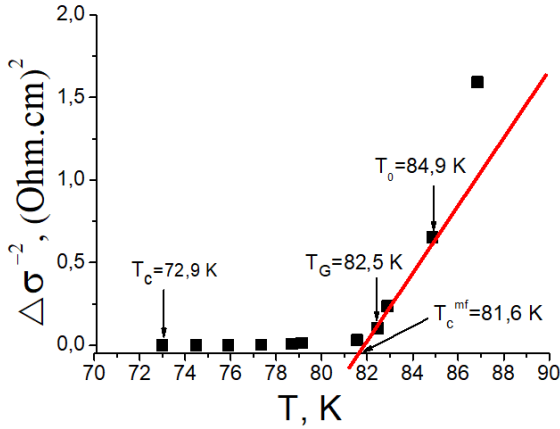
Fluktuasiya keçiriciliyini (FLK) lokal cütlər (LC) modeli əsasında [10] təyin etmək üçün lazımdır ki, kritik temperaturu yaxınlaşan orta sahədə təyin edilsin. Belə ki, fluktuasiya kritik temperaturun (T_c^{mf}) təyini fluktuasiya keçiriciliyinin analizi üçün lazımdır və aşağıdakı tənliklə hesablanır:

$$\varepsilon = (T/T_c^{mf} - 1) \quad (2)$$

$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ İK material üçün fluktuasiya kritik temperaturun (T_c^{mf}) təyini temperatur asılılığından hesablanmış və 3-cü şəkildə göstərilmişdir.

Şəkil 3-dən görüldüyü kimi, $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ polikristalın yuxarıda qeyd edilən üsulla ifratkeçiricilik

temperaturu- T_c , Ginzburq temperaturu- T_G [11] və 3D-2D temperaturu- T_0 təyin edilmişdir [12].



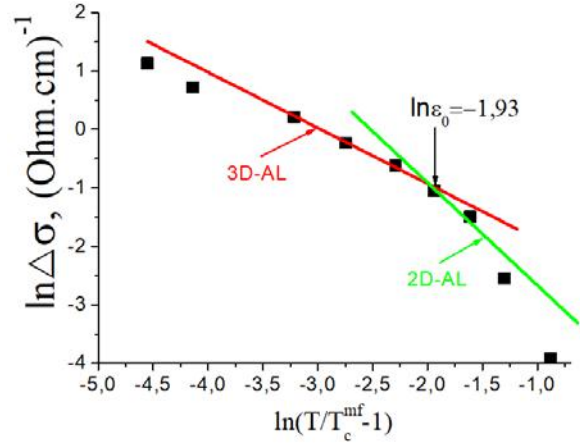
Şəkil 3. $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ nümunəsinin T_c^{mf} təyini əlavə keçiriciliyin tərs qiymətinin kvadratının $\sigma^2(T)$ temperatur asılılığından təyin edilmişdir. Oxlarla xarakterik temperaturalar T_c , T_G və T_0 göstərilmişdir.

Düz xətlər Aslamazov-Larkin nəzəriyyəsi əsasında hesablamaları göstərir.

$\sigma^2(T)-T$ asılılığı (T_c^{mf}) təyin etdikdən sonra $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ İK material üçün $\ln \Delta\sigma - \ln \varepsilon$ asılılığını qurmaq olar (şəkil 4).

Şəkildən görüldüyü kimi, (şəkil 4) kritik temperatur (T_c) yaxınlığında fluktuasiya keçiriciliyi fluktuasiyanı AL-3D sistemi üçün yaxşı zənginləşdirir. (3D-AL düz xəttinin mailliyi $\lambda = -1/2$ olur). Bu onu göstərir ki, klassik 3D FLK-yinin temperaturu kritik temperatura (T_c) yaxınlaşaraq həmişə ifratkeçirici kuprat yaradır [13, 14, 15]. 3D-2D temperaturundan (T_0) yuxarıda $\ln \Delta\sigma - \ln \varepsilon$ asılılığında maillik kəskin dəyişir. Belə asılılıq mailliyi ($\lambda_{2D} = -1$) 2D-AL və ($\lambda_{3D} = -0,5$) fluktuasiyasına uyğundur [16]. Eyni zamanda, $\ln \varepsilon$ -ni

təyin edərək (şəkil 4) Kuper cütlərinin c oxu istiqamətində koherentlik uzunluğunu $\zeta_c(0) = d\sqrt{\varepsilon_0}$ tənliyi ilə hesablaya bilərik. Tənlikdəki d $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ ifratkeçirici materiallar üçün 15 \AA -dir [17]. Hesablanmış Kuper cütlərinin koherentlik uzunluğu $5,71 \text{ \AA}$ olmuşdur.



Şəkil 4. $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ nümunəsinin əlavə keçiriciliyinin loqarifmasının $\ln(T/T_c^{mf}-1)$ asılılığı.

YEKUN

Beləliklə, belə bir nəticəyə gəlmək olar ki, tədqiq etdiyimiz $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ ifratkeçirici plyonka $T \gg T_c$ şərti daxilində yükdaşıyıcı local cütlər yaratmağa malikdir.

Tədqiqat göstərdi ki, $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ ifratkeçirici plyonkanın fluktuasiya keçiriciliyi kritik temperatura yaxınlığında Aslamazov-Larkin nəzəriyyəsi ilə yaxşı uzlaşır. 3D-2D krossover temperaturundan yuxarıda 2D-AL nəzəriyyəsi bu İK material üçün qəbul ediləndir.

[1] R.J. Spah, H.F.Hess, H.L.Stormer, K.T.Short. Appl. Phys. Lett., 1988, 53, №5, p. 441-443.
 [2] I. Frohingsdors, W.Zanger, B.Stritzrer. Solid. State Commun., 1988, 67, 10, p. 965-966.
 [3] H.C.Li, G.Linrer, I.Geerk. Appl. Phys. Lett., 1988, 52, № 13, p. 1098-1100.
 [4] I.Fuajtra, A.Ranuzy, T.Satoh. J. Appl. Phys., 1988, v. 64, № 3, p. 1292-1295.
 [5] T.Nakamori, H.Abe, Y.Takahashi, et al. Jap. J. Appl. Phys., 1988, pt 2, 27, 4, L649-L651.
 [6] T.Hashimoto, T.Kosaka, Y.Yoshida, et al. Jap. J. Appl. Phys., 1988, pt 2, 27, 3, p. L384-L386.
 [7] J.Kwo, T.C.Hsich, M.Hong, S.H.Hiou. Phys. Rev. B., 1987, № 7, p. 4039-4042.
 [8] N.Lchinose, H.Maiva. Preparation, Bull. Bismuth Inst., 1989, № 58, p.1-6.
 [9] V.M.Əliyev, A.N.Məmmədova, S.S.Rəhimov, R.İ.Səlimzadə, B.A.Tahirov. Azərb. MEA Xəbərləri, fizika, texn. və riy. Elm.Ser., 2, 36-41, 2016.

[10] Kl.W. Yeh, J.Y. Gan, and Y. Huang. J. Gryst. Growth 269, 505, 2004.
 [11] A. Kapitulnik, M. R. Beasley, C. Castellani, and C. Di Castro. Phys. Rev. B, 37, 537, 1988.
 [12] S. Hikami and A. I. Larkin. Mod. Phys. Lett. B 2, 693, 1988.
 [13] A.Л. Соловьев, В.М.Дмитриев. ФНТ, т.35, № 3, с.227-264, 2009.
 [14] Л.П.Козеев, М.Ю. Каменев, А.И. Романенко, О.Б.Аникеева, В.Е.Федоров. Материалы 6-й международной конференции «Кристаллы: рост, свойства, реальная структура, применение»: Александров, 8-12 сентября, 2003, Изд-во ВНИИСИМС.
 [15] P. G. De Gennes, Superconductivity of Metals and Alloys, W. A. Benjamin. INC., New York-Amsterdam, 1966, p. 280.
 [16] L.G. Aslamazov and A.I. Larkin, Phys. Lett. A 26, 238, 1968.
 [17] P.Villers, R.A.Doyle. J.Phys., Condens. Matter, 4, 9401, 1992.

V.M.Aliev, G.I.Isakov, J.A.Ragimov, G.A.Alieva, S.Z.Damirova

OBTAINING SUPERCONDUCTING $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ MATERIAL AND STUDYING ITS PHYSICAL CHARACTERISTICS

$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ HTSC material of the resulting excess conductivity was studied taking into account the Aslamazov-Larkin theory with the transition from the BCS theory model to the theory of the Bose-Einstein condensate model. For the sample, the critical temperature in the mean field approximation (T_c^{mf}), the 3D-2D crossover temperature (T_D), the coherence length of Cooper pairs (ξ_c), were determined, the temperature T_c of the SC transition and T_G —the Ginzburg temperature—were determined.

В.М.Алиев, Г.И.Исаков, Дж.А.Рагимов, Г.А.Алиева, С.З.Демирова

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЛСТОСЛОЙНОЙ СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ ПЛЕНКИ НА ОСНОВЕ $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$

$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ ВТСП материале образовавшейся избыточной проводимости исследованы учитывая теории Асламазова-Ларкина с переходом из модели теории БКШ к теории модели конденсаты Бозе-Ейнштейна. Для образца были определены критическая температура в приближении среднего поля (T_c^{mf}), температура 3D-2D кроссовера ($T_{ск}$), длины когерентности куперовский пар (ξ_c), определены температура T_c СП перехода и T_G — температура Гинзбурга.

Qəbul olunma tarixi: 17.01.2025

CuAlS₂ ƏSASLI LAMİNAR QURULUŞUN ZƏRBƏ İONLAŞMASI KEÇİRİCİLİYİ VƏ TUTUMUN KİNETİKASININ SPEKTRAL XARAKTERİSTİKASI

İ. QASIMOĞLU, Q.S. MEHDİYEV

Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyi, H.M.Abdullayev adına Fizika İnstitutu.
AZ 1073, Bakı şəhəri. H.Cavid pr. 131.

E-mail: gasimoğlu@yahoo.com.

Xüsusi texnoloji rejim qradiyenti seçməklə, CuAlS₂ monokristalının səthində formalaşan, laminar quruluşunda zərbə ionlaşması keçiriciliyi [1] və tutumun kinetikasının spektral xarakteristikası araşdırılmışdır. Göstərilmişdir ki, daşınmada nöqtəvi və xətti defektlər hesabına keçiriciliyin pilləli xarakter alması və tutum kinetikasının spektrində dipol domeninin yaranması, nəzəri və tətbiqi işlərin izahında açar rolunu oynaya bilər.

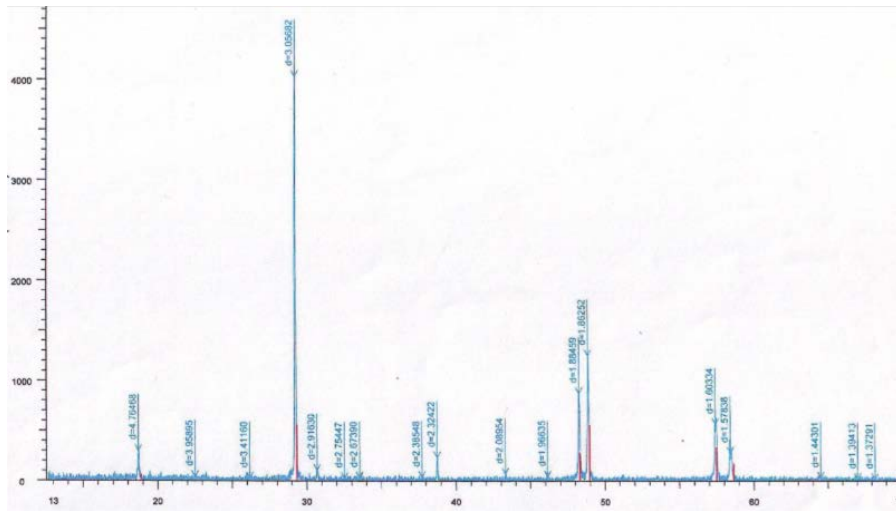
Açar sözlər : Kristal qəfəs, tutum,laminar quruluş, donar, acceptor, ion.

DOI:10.70784/azip.2.2025115

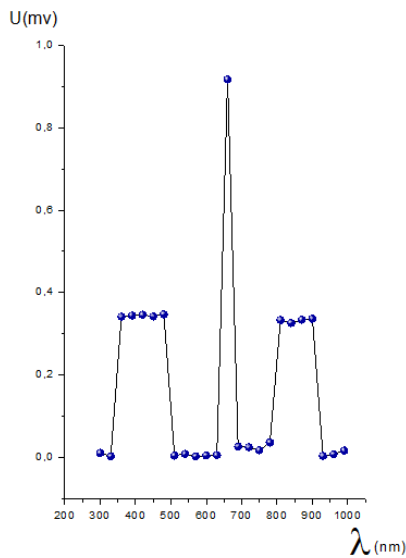
Son illər almazabənzər quruluşlu yarımkeçiricilərə, tədqiqatçıların marağı artmışdır.

Həmin qrupa daxil olan birləşmələrin bir qismi, A^IB^{III}C₂^{VI} ümumi formulası ilə ifadə olunur. Onlardan

biri də CuAlS₂-dir. Elektrik hərəkət qüvvəsinin işarəsinə görə, tərkibimizdən P-tip keçiriciliyə malik olduğu müəyyən edilmişdir.



Şəkil 1. CuAlS₂ monokristalında Rentgen şüalarının difraksiyası spektri.



Şəkil 2. CuAlS₂ monokristalının fotokeçiriciliyinin spektral xarakteristikası. Qadağan olunmuş zonanın enerjisi ($E_g=1,84$ eV)-dur.

Rentgen analizinin nəticələri (şəkil 1), alınan maddənin yarımkeçirici olduğunu sübut edir. Fotokeçiriciliyin spektral xarakteristikasından (şəkil 2) tapılan bağlı zonaya məxsus enerjinin qiyməti ədəbiyyatda verilən qiymətlərlə uyğunluq təşkil edir ($E_g=1,84$ eV). Yeni alınan kristalın qəfəs parametrləri aşağıda göstərilirdiyi kimidir. $a=b=5,32$ Å, $C=10,39$ Å, fəza simmetriya qrupu (42m)-dir.

Mövzunun aktuallığı

Biroxlu kristalların alınma texnologiyası çox çətin olsa da tətbiq imkanları böyükdür. İkiqat analoqlarından fərqli olaraq tetraqonal formada kristallaşma, birtipli atomlardan ikitipli fərqli metal sfərelit atomlarına keçid, sfaleritlərə nisbətən xalkopiritlərin simmetriyasının zəifləməsinə səbəb olur. Bu isə xarici təsirlərin (ışıq, elektrik sahəsi,rentgen,amma şuaı) plastik deformasiyası hesabına, daxili sahənin güclənməsinə səbəb olur. Belə bir güclü sahə hesabına donor akseptor

tipli atomların otaq temperaturunda ionlaşması mümkün olur. Bu xüsusiyyət otaq temperaturunda fiziki xassələrin ölçülməsini asanlaşdırır və nümunələrin tətbiqi üçün geniş imkanlar yaradır.

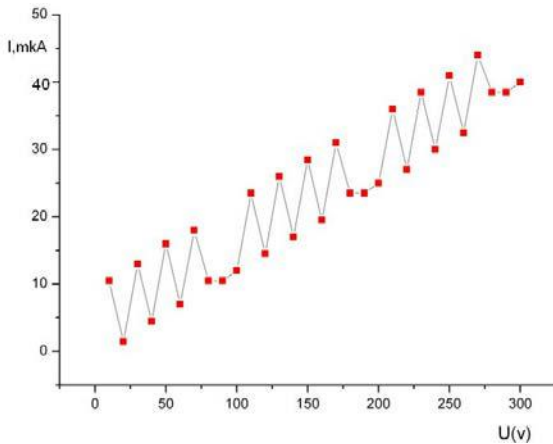
Məsələnin qoyuluşu

CuAlS₂ monokristalının elektrik və optik xassələrinin ölçülməsi ilə bərabər, səthdə formalaşan laminar quruluşun zərbə ionlaşması keçiriciliyi və tutumun kinetikasının spektral paylanmasını öyrənməklə çoxlu məlumat əldə etmiş oluruq. Bizə elə gəlir ki, kvantlanmış keçiriciliyin və tutumun spektral xarakteristikasının araşdırılması nəzəri təhlillər və tətbiq imkanları baxımından mühüm hesab olunur.

Təcrübənin aparılması

Elektrik və Optik ölçülər aparmaq üçün alınan kristalları kimyəvi təmizlənmə və hamarlanma mərhələsindən keçiririk, sonra isə Volt-Amper xarakteristikasını ölçürük. Tutumun spektral paylanmasını ölçmək üçün məqalədə [2] metodikasını verdiyimiz yeni üsul olan kondensator üsulundan istifadə olunmuşdur. Yeni yaradılan optik kompleks aşağıdakı cihazlardan təşkil olunmuşdur. MDR-23, üç güzgü qəfəsdən ibarət olmaqla, böyük bir dalğa uzunluğu oblastını əhatə edir. I-güzgü qəfəs (şerti işarəsi-1200), oblastı (200-500)nm, II-güzgü qəfəs (şerti işarəsi 1200), oblastı (350-1000)nm, III-güzgü qəfəs şerti işarəsi-600), oblastı (700-2000)nm-dir. Güclü işıq mənbəyindən düşən şüalar linzalar dəsti (kondensor) vasitəsi ilə nümunənin üzərinə yönəldilir. Nümunədə alınan siqnal tutumölçənə ötürülür. Əvvəlcə qaranlıq şəraitində cihazlara məxsus tutum qeyd olunur, sonra içərisində kristalın yerləşdiyi xüsusi dərjətelin tutumunu ölçürük yekun olaraq alınan ümumi tutumdan qaranlıq tutumun qiyməti çıxılır. Nəticə olaraq laminar quruluşa məxsus „p-n., keçidin tutumunu qeyd etmiş oluruq.

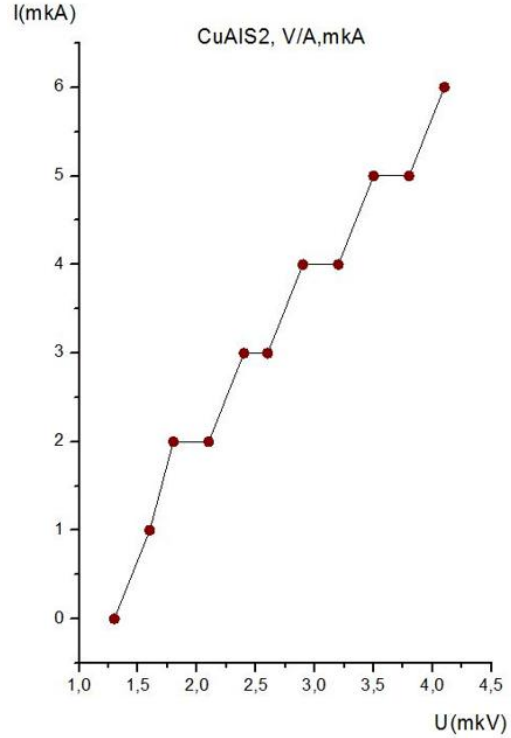
Təcrübədən alınan nəticələr



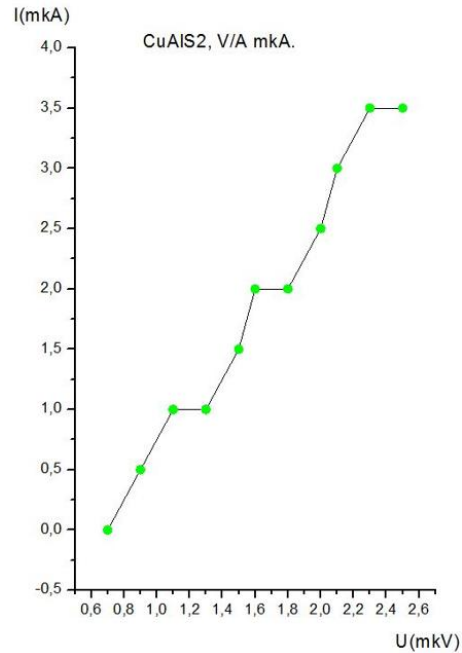
Şəkil 3. Xarici sahənin böyük qiymətlərinin geniş intervalda(0-300V). CuAlS₂ monokristalının Volt-Amper xarakteristikası.

Massiv maddə CuAlS₂ və səthində formalaşan laminar quruluşun zərbə ionlaşması keçiriciliyi və tutumun kinetikasının spektral xarakteristikasını ölçməklə

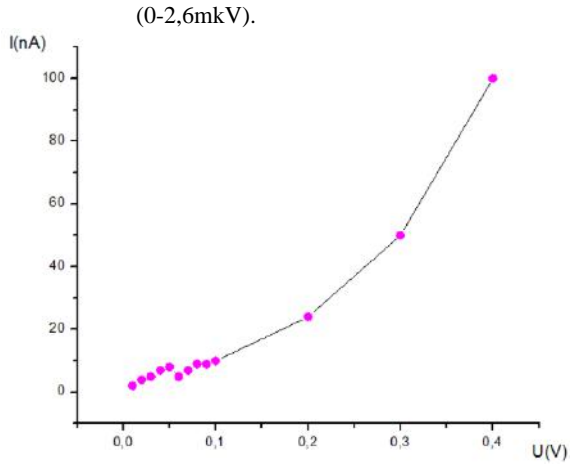
aşağıdakıları müəyyənləşdirmək mümkündür. Bilirik ki, hər bir kristalın səthində qəfəsin qırılma nöqtələri mövcuddur. Volt-Amper xarakteristikasının bircinsli olmamasının səbəbi səthdəki defektlərə məxsus səviyələrin olmasıdır. Xarici elektrik sahəsi böyük olduqda atomlar ionlaşana qədər elektronlar diffuziya məsafəsinə sürətli qət etmiş olurlar. Ona görə də, biz şəkildə elektron dalğalarına məxsus periodik funksiyanı görürük (şəkil 3).



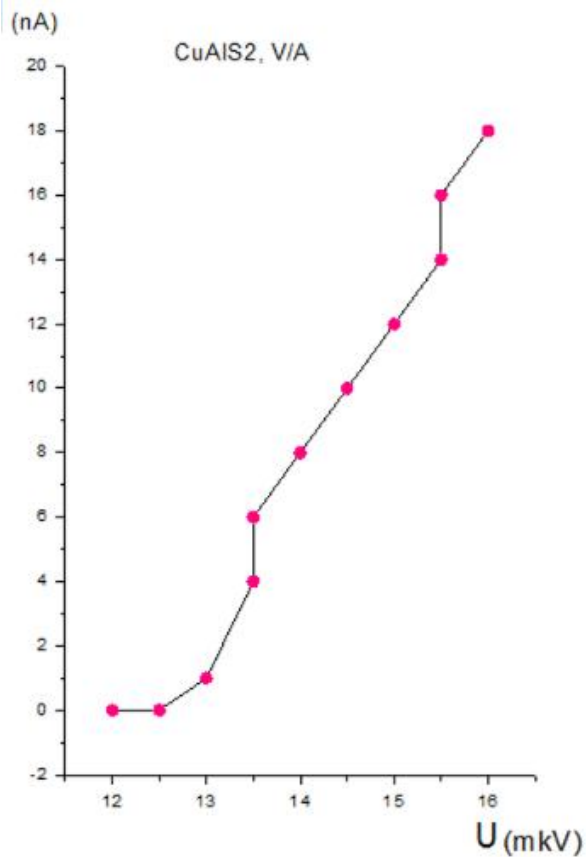
Şəkil 4. Xaricdən verilən sahənin kiçik qiymətlərində xətti dislokasiyalar hesabına, CuAlS₂ monokristalının Volt-Amper xarakteristikasında pilləli keçiricilik(0-4,5mkV).



Şəkil 5. Xaricdən verilən sahənin qiymətinin mütənəsb nasib artmasına uyğun dislokasiyalar hesabına, CuAlS₂ monokristalının keçiriciliyində eksponensial artım müşahidə olunmuşdur



Şəkil 6. CuAlS₂ monokristalının Volt-ampere xarakteristikasında, tunel diodu keçiriciliyi və görünən aşqar səviyyələrinin spektri.

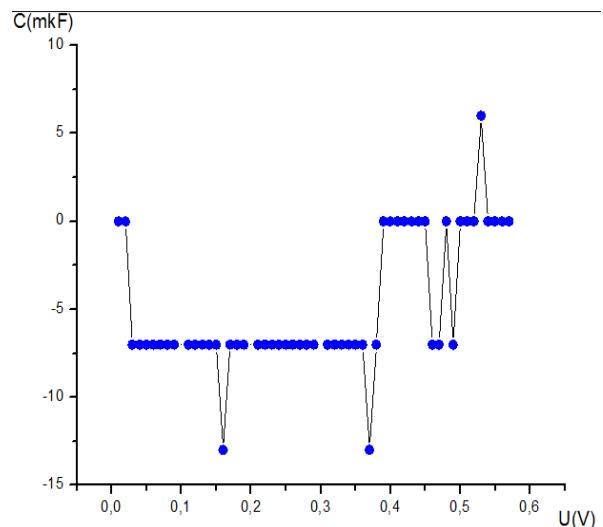


Şəkil 7. CuAlS₂ monokristalının Volt-Ampere xarakteristikasında, anizotrop və izotrop keçiriciliyin zərbə ionlaşması ilə tənzimlənməsi.

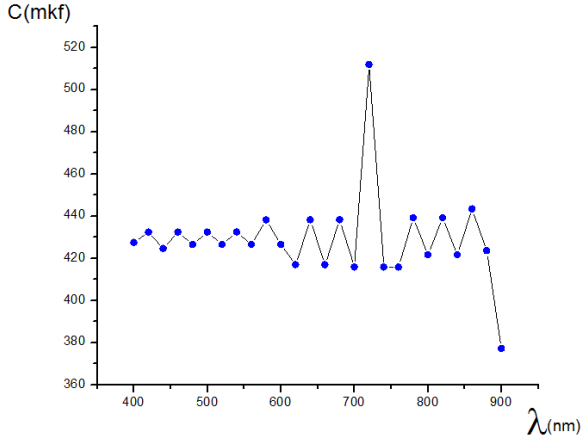
1. Volt-Ampere xarakteristikasını böyük və kiçik sahələrdə ölçməklə xətti defektlərin keçiriciliyə təsiri haqqında məlumat əldə etmiş oluruq. Xarici sahənin kiçik qiymətlərində başqa mənzərənin şahidi oluruq. Laminar quruluşun Volt-Ampere xarakteristikasında elektron dalğalarının kvantlanmış keçiriciliyini görmüş oluruq (şəkil 4, 5). Pilləli keçiricilik metallarda olduğu kimi xətti defektlərdən əksolunmalar hesabına yaranır və elektron dalğalarının zəif lokallaşmanın nəticəsidir [3]. Laminar quruluşun Volt-Ampere xarakteristikasında tunel keçidinin müşahidə olunması tətbiq baxımından maraqlıdır, çünki tunel diodları adi diodlardan fərqli

olaraq radiasiyaya [4] davamlı olmaları ilə fərqlənirlər (şəkil 6). Tunel keçidləri kristallarda qəfil soyudulma zamanı yaranır [5]. Xaricdən verilən sahənin kiçik qiymətində laminar quruluşa aid yeni bir xassə müşahidə edirik. Spektrdə xətti və qeyri-xətti keçiricilik bir-birini əvəzləmiş olur. Yükdaşıyıcıların sürəti artdıqca zərbə ionlaşması hesabına stasionar hal bərpa olunur, sahənin qiyməti böyüdüüyü üçün yenidən zərbə ionlaşması təkrar olur. Ona görə də, keçiriciliyin qiymətindəki artma xətti keçiriciliklə qeyri-xətti keçiricilik arasında faza dəyişməsi ilə müşahidə olunur. Bu qiymət artımı elektron və deşiklərin konsentrasiyasının zərbə ionlaşmasından kəskin artdığını göstərir (şəkil 7).

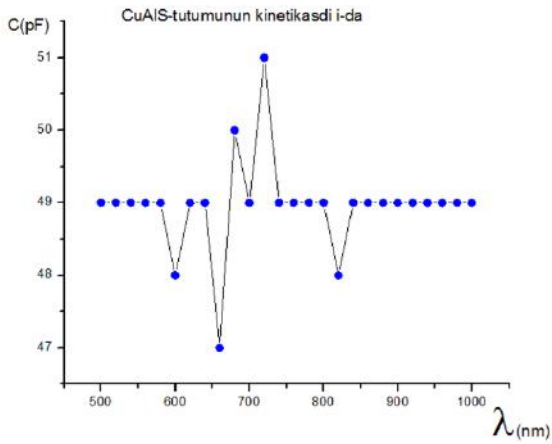
2. Tutumun spektral xarakteristikasını və kinetikasını ölçməklə səthdəki səviyyələrin fiziki parametrlərə təsiri haqqında məlumat əldə etmiş oluruq. Tutumun xarici sabit sahədən asılılığını ifadə edən spektrdə (şəkil 8) doyma halını ifadə edən düz xəttin aşağı yemməsi əsas yükdaşıyıcıların konsentrasiyasının artdığını göstərir. Maraqlı cəhət odur ki, diferensial mənfi müqavimət halı $U=0,38V$ -dan sonra stasionar vəziyyətə döndür, sonrakı sahə artımı tutumun qiymətinin də müsbət işarəli olmasını təmin edir. Bu o deməkdir ki, sahədən asılı olaraq fermi səviyyəsi aşağı enmiş ona görə də, əsas yükdaşıyıcıların konsentrasiyası artmışdır. Fermi səviyyəsinin yuxarı qalxması isə qeyri-əsas yükdaşıyıcıların yəni elektronların konsentrasiyasını artırmışdır. Yuxarıda deyilənlər oxşar olaraq tutum üçün də baş vermişdir. Donor akseptor ionlarının qarşılıqlı rekombinasiyası hesabına "p-n" keçidin tutumu dəyişmiş olur. Başqa bir təcrübədə (şəkil 9) eyni enerjiyə malik monoxromatik işıq fotonlarının təsirindən sonra periodu dalğaların enerjisi azaldıqca artan, tutumun döyülmə halını, bir də rezonans pikini görürük. Bu isə laminar quruluşun süni qəfəsə malik olduğunu göstərir [6]. Görünən və infraqırmızı işığın radiyasiyasından sonra laminar quruluşa məxsus həcmi yüklərin eninin azaldığını, ona mütənasib olaraq tutumun kəskin artmasını müşahidə edirik (şəkil 10). Qaranlıqda tutumun kinetikasını ifadə edən başqa bir təcrübədə donar və akseptor ionları arasındakı qarşılıqlı təsiri ifadə edən rekombinasiya dalğalarının dipol domenini [7] yaratdığını görürük (şəkil 11)



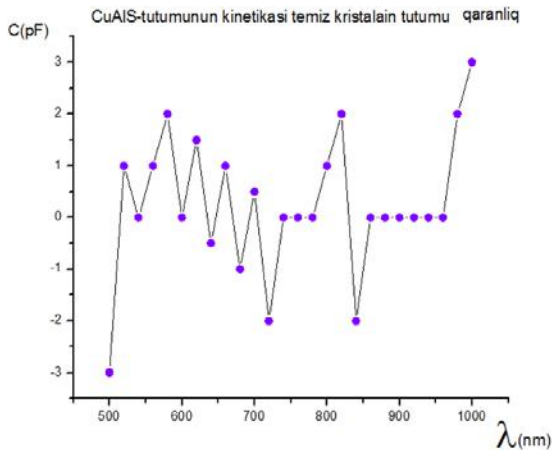
Şəkil 8. CuAlS₂ monokristalında həcmi yüklərə məxsus tutumun xarici sabit sahədən asılılığı.



Şəkil 9. CuAlS₂ monokristalında tutumun monoxromatik işığın sabit enerjiyə məxsus fotonları hesabına periodik dalğalarla ifadə olunan spektral xarakteristikası.



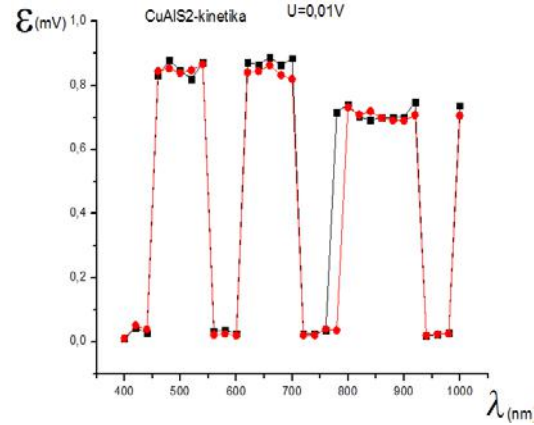
Şəkil 10. CuAlS₂ monokristalının tutumunun işıqdakı spektral xarakteristikasının kinetikasi.



Şəkil 11. CuAlS₂ monokristalının tutumunun qaranlıqdakı spektral xarakteristikasının kinetikasi.

3. Xətti defektlər, donar, akseptor ionları kristal qəfəsi ilə əlaqədə olduqlarından, xarici təsirdən sonra generasiya və rekombinasiyasının mütənasib tənzimlənməsi hesabına, stasionar hal baş verir. Yükdəşıyıcıların konsentrasiyasının mütənasibliyini, elektrik hərəkət qüvvəsinin spektrindən görmək mümkündür (12). Səviyələrin elektronlarla dolub boşalması kristal səthindəki həcmi yüklərə və səthə məxsus diferensial tutuma təsir etmiş olur. Diferensial tutumu ölçərək donar,

acceptorların konsentrasiyasının nisbətini bilməmiş olur.



Şəkil 12. CuAlS₂ monokristalında elektrik hərəkət qüvvəsinin spektral xarakteristikasının kinetikasi.

Alınan nəticələrin izahı

Məlumdurki, istənilən kristalın səthində defektlər mövcuddur və bu defektlər kristalın fiziki xassələrinə təsir edir. Tutumu ölçərkən də bunun şahidi oluruq. Əvvəlcə bizə lazım olan həcmi yüklərin qiymətini bilmək üçün səthdə olan ümumi tutum haqqında məlumatımız olmalıdır. Ümumi tutumu aşağıdakı kimi ifadə edə bilərik.

1. Səthə məxsus həcmi yüklərin tutumu;
2. Səthdə olan aşqar səviyyələrin tutumu;
3. Kondensator lövhələri arasındakı dielektrikin tutumu.

Həcmi yüklərin tutumunu müəyyən etmək üçün xarici sahənin təsirinin hər bir tutuma ayrı-ayrılıqda necə təsir etdiyini bilməliyik. Üçüncü bənddən başlasaq dielektrikin dielektrik nüfuzluğu qalınlıqdan asılıdır dielektrikin növünə görə müxtəlif qiymətlər ala bilər. Dielektrikə məxsus tutum xarici sahədən asılı deyil. Dielektrikə məxsus tutumu kondensator lövhələri arasına yerləşdirməklə sahə olmadan tutumu ölçə bilərik. Ona görə dielektrikə məxsus üçüncü tutumun qiyməti bəlli olduğu üçün biz onu yekunda nəzərə almırıyıq. Bu isə bizə lazım olan tutumu təyin etmək üçün apardığımız hesablamaları asanlaşdırır. İkinci tutum isə səthdəki səviyyələrə məxsus tutumdur. Bu tutuma xarici sahənin təsiri olduğu üçün sahənin təsirindən sonra həcmi yüklərə məxsus tutumla, səthi yüklərə məxsus tutum arasındakı fərqi müəyyənləşdirməliyik. Xarici sahənin qiymətindən asılı olaraq yəni kondensatorun lövhəsi ilə yarımkeçirici arasındakı tutuma məxsus əyri $U < 0$ olarsa sağa doğru, $U > 0$ olarsa sola doğru X-oxu istiqamətinə yönəlsə, verilən sahə səth səviyyələrinə məxsus tutuma təsir etməmişdir. Deməli, spektral asılılıq həcmi yüklərə məxsus tutumu ifadə etmiş olur. Bundan əlavə verilən xarici sahənin qiyməti kiçik olarsa, səth səviyyələrini ifadə edən tutum kiçik olduğu üçün onu nəzərə almırıqlar.

Yekun nəticə

Ondan ibarətdir ki, massiv CuAlS₂ kristalının səthində formalaşan laminar quruluşun zərbə ionlaşması

keçiriciliyinin və tutumun kinetikasının ölçülməsi kristalların səthində baş verən fiziki proseslərin izahı üçün geniş imkanlar yaratmış olur. Məsələn bu araşdırmalar hesabına donör-akseptor ionları haqqında, onların konsentrasiyası haqqında məlumata sahib oluruq. Həcmi yüklərə məxsus oblastın eninin dəyişməsi hesabına

“p-n” keçidin gücləndirici xassəsinin öyrənilməsi kristalların tətbiqi zamanı fiziki parametrlərin dəqiqləşdirilməsində böyük əhəmiyyətə malikdir.

-
- [1] Л.А. Голован, В.Ю. Тимошенко, П.К. Каишкаргов. Оптические свойства нанокomпозитов на основе пористых систем, УФН, 2007, том 177, № 6, с.619-638.
- [2] CuGaSe₂ monokristalının səthindəki “n-p-n” keçidin elektrik hərəkət qüvvəsinin spektral xarakteristikasının kondensator üsulu ilə tədqiqi. AJP Fizika 2024 Volume XXX, № 2, p.3-6.
- [3] В.Ф. Гантмахер. Электроны в неупорядоченных средах. М. 2003. ст. 175.
- [4] Samner Levin. Основы полупроводниковой микроэлектроники. М.1966, ст.242.
- [5] В.И. Фистуль. Сильнолегированные полупроводники.
- [6] Ф.Г. Басс, А.А. Булгаков, А.П. Тетервов. М.1989. ст. 286. Высокочастотные свойства полупроводников со сверхрешетками.
- [7] Ю.К.Пожела. Плазма и токовые неустойчивости в полупроводниках. М.1977. ст367.

I. Gasimoglu, G.S. Mehdiyev

SPECTRAL CHARACTERIZATION OF IMPACT IONIZATION CONDUCTIVITY AND CAPACITANCE KINETICS IN A CuAlS₂-BASED LAMINAR STRUCTURE

By choosing a special technological mode gradient, the spectral characteristics of the shock ionization conductivity [1] and capacitance kinetics formed on the surface of the CuAlS₂ single crystal in its laminar structure were investigated. And it has been shown that the stepwise nature of conductivity due to point and linear defects in transport and the formation of a dipole domain in the spectrum of capacitance kinetics can play a key role in explaining theoretical and applied works.

Qəbul olunma tarixi: 22.01.2025

EİM-İ ÜÇFAZALI DÜZLƏNDİRİCİNİN PARAMETRLƏRİNİN TƏKMİLLƏŞDİRİLMƏSİNİN TƏDQIQI ÜSULLARI

K.K. ƏZİZOVA^{1,2}, L.V. MƏMMƏDOV^{2,3}, G.X. HÜSEYNOVA^{1,4},
N.V. KAZIMOVA⁵

¹Elm və Təhsil Nazirliyi, Fizika İnstitutu¹, Bakı, Hüseyn Cavid 131, AZ1073,

²Azərbaycan Universiteti,

³Bakı Mühəndislər Universiteti,

⁴Azərbaycan Texniki Universiteti,

⁵Azərbaycan Texnologiya Universiteti, Gəncə şəh., Şah İsmayıl Xətai prospekti 103, AZ2011.

E-mail: kama-azizova2025@rambler.ru

Sinusoidal qanunla dəyişən eninə impuls modulyasiyasının müxtəlif növlərinin formalaşdırılması zamanı üçfazlı gərginlik inverterlərinin çıxış gərginliyinin spektrlərinin və keyfiyyət göstəricilərinin müqayisəsi aparılmışdır: birfazlı ikiqütblü EİM, "klassik" üçfazlı EİM, üçüncü harmonikanın modulyasiyaqabağı EİM-sı və "vektorlu" EİM. EİM-sı ilə inverterlərin çıxış gərginliyinin keyfiyyətinin yüksəldilməsi üçün meyarlar təklif edilmiş, çıxış gərginliyinin ən yaxşı keyfiyyətini təmin edən EİM-ləri formalaşdırılma üsulları müəyyən edilmişdir.

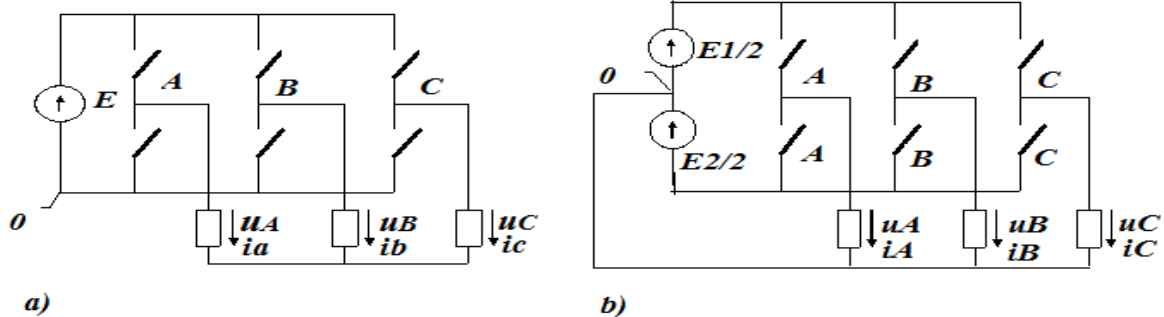
Açar sözlər: üçfazlı inverter, modulyasiya, elektrik intiqalı, tezlik çeviricisi, yarımkəçirici çevirici

DOI:10.70784/azip.2.2025120

Məsələnin qoyuluşu

Dəyişən cərəyan elektrik intiqallarının qidalandırılmasında və sabit tezlikli dəyişən cərəyan qidalandırıcılarının zəmanətli təchizat sistemlərində üçfazlı gərginlik inverterlərdən geniş istifadə edilir. İnverterin çıxışında yüksək keyfiyyətli elektrik enerjisini təmin etmək üçün müxtəlif növ eninə-impuls modulyasiyaları (EİM) tətbiq edilir. Müxtəlif formalı EİM-ləri üzərində aparılmış analizin nəticələri göstərir ki, çoxlu sayda tədqiq olunmuş modulyasiyalı inverterin çıxış gərginliyi onlara müvafiq olanlarına görə seçilir. Bu da onların nəticələrini inverterlərin çıxış gərginliyinin key-

fiyyətini eninə-impuls modulyasiyası ilə obyektiv müqayisə etməyə imkan vermir. Bu işdə məqsəd vahid riyazi modelə əsaslanaraq eyni mülahizələr əsasında EİM-nin formalaşdırılma üsullarından düzgün istifadə edilməsindən ibarətdir. Qeyd etmək lazımdır ki, dövlətlərarası elektrotexniki komissiya (DEK) impulsların eni və tezliyi yaxud bu və başqa sözlə hər ikisinin çıxış parametrlərini müəyyən etmək üçün əsas tezlik müddəti daxilində modulyasiyalı idarəetmə sistemindən istifadə etmək zərurəti yaranır. Əksər ədəbiyyatlarda EİM anlayışı, bir qayda olaraq yalnız sabit keçid tezliyi ilə formalaşma üsullarına aid edilir. Üçfazlı inverterlərin iki əsas transformatorsuz sxemi məlumdur şəkil 1.



Şəkil 1. Üçfazlı inverterlərin transformatorsuz elektrik sxemləri.

1. Üçfazlı körpü inverteri (şəkil 1, a) sıfır nöqtəsi çıxış olmayan bir simmetrik yükü qidalandıran üçün istifadə olunur.

2. "Üç ədəd birfazlı yarı körpü" sxemi şəkil 1, b-də qeyri-simmetrik yük daxil olmaqla, sıfır nöqtəli çıxışı olan yükü işlətmək üçün tətbiq olunur.

İdeallaşdırılmış inverterin analizi zamanı belə hesab olunur ki, E -sabit qida gərginliyi döyüntünü ixtisar edir və ideallaşdırılmış açarlar qoşulurlar. Belə bir ideallaşdırma, dövrənin ideal parametrlərinin EİM-sı tətbiq edilmiş növündən asılı olmayaraq inverterin çıxış

gərginliyinin keyfiyyət göstəricilərinə təsir göstərməsi ilə əsaslandırılır.

Şəkil 1-dəki sxemlərin analizi üçün Pspice, Matlab Simulink və digər virtual proqramların məlum paketlərindən istifadə olunur. Bununla yanaşı, periodik təkrarlanan bir neçə yüz və daha çox kommutasiya inverterlərində çeviricilərdəki proseslərin hesablanması, modelləşdirmə təcrübəsinin aparılması çox vaxt tələb edir və nəticələrin ümumiləşdirilməsi üçün lazım olan nəticələrin toplanmasını çətinləşdirir. Bu işi yerinə yetirərkən spektral modelləşdirilmə metodundan, yəni çevirici funksiyaların modifikasiya üsulundan istifadə edilir

ki, bu da təsirin onlarla dəfə artırılmasına imkan verir [4]. Bir sıra rejimlərdə aparılan spektral modelləşmə və Pspice bazasında modelləşmənin nəticələrinin müqayisəsi ümumi nəticələrin eyniliyini göstərir.

EİM-İ çeviricinin çıxış gərginliyinin keyfiyyətinin qiymətləndirilməsi meyarları

Müxtəlif EİM növlərini müqayisə etmək üçün çıxış gərginliyinin keyfiyyətini qiymətləndirilməsinin effektiv meyarlar müəyyən olunmalıdır. Çıxış gərginliyini harmonika əmsalının köməyiylə qiymətləndirmək üçün kifayət qədər məlumat olmur, çünki bu halda alçaq və yüksək tezliklərin harmonikanın yükünə mümkün təsirləri nəzərə alınmır. Çıxış cərəyanı üçün harmonika əmsalı eyni zamanda, yükün parametrlərindən də asılıdır, belə ki, bu əmsal EİM-İ invertorun parametrləri ilə yanaşı inverter-yük sisteminin parametrləri ilə də xarakterizə olunur. Bu səbəbdən, qiymətləndirmənin daha müasir və effektiv meyarlara əsasən aparılması məsələsini aşdıdırılması aktuallaşır.

Şəkil 1b-dəki inverter sxemində, hər fazada müstəqil olaraq ikiqütblü, birləşməli EİM ardıcılığı formalaşır, bu zaman əsas harmoniklərin qarşılıqlı olaraq 120° sürüşməsi nəzarət sistemi tərəfindən həyata keçirilir. Şəkil 2a-da impulsun ön hissəsinin, yaxud kəsiminin modulyasiyası, şəkil 2b-də isə ikitərəfli modulyasiya - impulsun həm ön, həm də arxa hissəsinin müəyyən kəsiminin modulyasiya halında EİM ardıcılığının spektri göstərilmişdir. Burada k -harmonikanın nömrəsi, C_k - k -cı harmonikanın amplitudasıdır. Verilmiş nümunədə, kommutasiya tezliyi $f_k = A f_{\text{çix}} = 48 f_{\text{çix}}$, modulyasiya əmsalı- çıxış gərginliyi impulsunun ən uzun müddətinin kommutasiya intervalları arasındakı müddətə olan nisbəti - $K_m = 0,5$ bərabər olur.

Spektrin bu xarakteri sinusoidal qanunla EİM üçün səciyyəvidir. Spektrin aşağı tezlikli hissəsi yalnız $f_{\text{çix}}$ ($k=1$) tezlikli əsas harmonikanı və tezliyin ətrafında yerləşən f_k kommutasiyalar tezliyi çoxluğundan yaranan harmonik kommutasiyalardan təşkil edilir. İkiqütblü EİM-da əsas harmonikanın amplitudu $1/2EK_m$ -yə bərabərdir. Burada, E - qida mənbəyinin gərginliyidir.

Beləliklə, şəkil 1a - diaqramında bir fazanın EİM ardıcılığı başqa bir faza ilə qarşılıqlı təsir göstərir, buna görə də burada üçfazlı eninə-impuls modulyasiyasının formalaşdırılmasına baxılır, çünki çıxış gərginliyinin spektri əhəmiyyətli dərəcədə dəyişir. Şəkil 1a sxemində çıxış gərginliyinin spektri şəkil 2 b impulsun ön, yaxud kəsiminin modulyasiyası və $2q$ -də ikitərəfli modulyasiyası verilmişdir. Kommutasiya tezliyi $f_k=48f_{\text{çix}}$, modulyasiya əmsalı $K_m=0,5$ -ə bərabər olur. Xətt gərginliyinin spektri faza spektrində olduğu kimidir, yalnız bütün harmonikaların amplitudaları 3 dəfə böyükdür.

Birləşməli və üçfazlı EİM arasındakı fərqlərə aşağıda baxılmışdır. Əvvəlcə onu qeyd etmək lazımdır ki, üçfazlı EİM-nin spektrindəki cəbhələrin iki tərəfli modulyasiyası ilə kommutasiya tezliyinə yaxın olan harmonik komponentlər azalır, lakin kommutasiya tezliyinin ikinci harmonikasının sahəsindəki harmonikalar əhəmiyyətli dərəcədə artır. Bu harmonikalar, tezliyin iki dəfə yüksək olmasına baxmayaraq, daha yüksək

harmonikalar üçün induktiv reaksiya verməsi səbəbindən yük cərəyanına əhəmiyyətli dərəcədə təsir göstərə bilər. Beləliklə, yuxarıda aşkar edilmiş $k_{g,k}$ və $k_{g,2k}$ əmsalları EİM-nin müxtəlif növlərində çıxış gərginliyinin keyfiyyətinin müqayisəsini həyata keçirməyə imkan verir. $A > A_{\text{son}}$ olduqda, kommutasiya tezliklərinin seçilməsindən asılı olurlar, EİM-1 və EİM-2 üçün fərqlənmirlər, sadəcə ön modulyasiya, həmçinin impulsun ön/kəsim modulyasiyası və ya ikitərəfli modulyasiya üsulu və mövcud modulyasiya əmsalından istifadə edilməklə EİM müxtəlifliyinin seçilməsi ilə müəyyən olurlar.

Çıxış gərginliyinin əsas harmonikasının amplitudunun artırılması üsulları

Yuxarıda nəzərdən keçirilən EİM növləri üçün AGÇ- avtonom gərginlik çeviricilərinin faza çıxış gərginliyinin əsas harmonikasının qida mənbəyi gərginliyinə nisbətinin ən böyük qiyməti 0,354-ə bərabərdir. Eyni zamanda, şəkil 1 a-dakı dövrəyə görə idarəolunmayan körpü düzləndiricisindən və inverterdən ibarət olan transformatorsuz bir tezlik çeviricisində çıxış gərginliyi şəbəkə gərginliyinin 0,827 nisbətindən çox olmur. Real çeviricilərdə bu nisbət daha da aşağıdır, çünki çeviricidə gərginlik itkiləri olduğundan kommutasiya şərtlərini yerinə yetirmək zərurətindən modulyasiya əmsalı 1-ə çatmır. Buna görə də, inverterin çıxış gərginliyinin əsas harmonikasının qida mənbəyinin gərginliyinə nisbətinin artırılması məsələsi çox aktualdır.

Bu məsələnin həll edilməsinin yalnız bir yolu var ki, bu da faza potensiallarının - φ_A , φ_B və φ_C impulslarının davam etmə müddətlərinin modulyasiyasının qeyri-sinusoidal qanununun istifadə olunmasıdır, hansı ki, bu modulyasiya qanununun seçilməsi əsas harmonikanın amplitudasının artmasını təmin etməlidir. Əsas harmonikada tələb olunan bu artımı təmin edən modulyasiya qanunları arasında düzbucaqlı və trapesiya qanunlarına görə modulyasiyaları göstərmək olar. Lakin bu modulyasiyaların istifadəsi zamanı inverterin faza və xətti çıxış gərginliklərinin harmonik tərkibi pisləşir: spektrin aşağı tezlikli hissəsində, ilk növbədə çıxış tezliyinin 5, 7, 11 və 13-cü harmonikalarında tərkibi φ_A , φ_B və φ_C EİM ardıcılıqlarından ibarət olan təhrif harmonikaları yaranır. Üçdən artıq eyni ardıcılıqlardan ibarət harmonikalar sıfırıncı harmonikanın ardıcılığı adlanır, simmetrik yükə faza və xətti yük gərginliklərində olurlar.

Buradan əvvəlcə modulyasiya ideyası ortaya çıxır, φ_A , φ_B və φ_C faza potensiallarının impulslarının müddətinin modulyasiyası üçün qeyri-sinusoidal qanunun tətbiqi, hansı ki, əsas harmonikanın amplitudunun artımını təmin edəcəkdir. Bu zaman φ_A , φ_B və φ_C EİM ardıcılığı spektrdə əsas harmonikadan başqa yalnız sıfırıncı harmonikanın ardıcılığından ibarət olacaqdır. Beləliklə, inverterin faza və xətti gərginliklərinin aşağı tezlik spektrində təhrif harmonikalarının olmaması təmin olacaqdır.

Əvvəlcədən modulyasiyanın prinsipi geniş yayılmış simmetrik yüklü üçfazlı inverterlərin eninə-impuls idarəetmə metodunun əsasında yaranmışdır.

Üçüncü harmonikanın əvvəlcədən EİM modulyasiyası

Üçüncü harmonikanın əvvəlcədən EİM modulyasiyası "vektorlu" EİM zamanı spektrdəki fərq, ilk növbədə u_{yA} , u_{yB} , u_{yC} ilə xarakterizə olunurlar ki, bunlar da gərginliklərinin forma və harmonik tərkibindəki fərqlə bağlıdır. Yuxarıdakı məlumatlardan belə nəticə çıxır ki, modulyasiya əmsalının azalması zamanı nəzarət gərginliyinin əyrisində daha yüksək harmoniklərin artması baş verir ki, nəticədə daha yüksək harmonikalar əsas harmonikanı əhəmiyyətli dərəcədə üstələyə bilər.

φ_A , φ_B və φ_C faza potensiallarının EİM ardıcılığını formalaşdırarkən bu harmonikalar kommutasiya tezliyinin çoxalması və kommutasiya tezlikləri sahəsində əlavə kombinasiyalar fərqi yaradır. İdarəetmə gərginliyinin yüksək harmonikaları əsas tezliyə nisbətən daha yüksək tezliyə nail olduqlarından, əlavə kombinasiyalı harmonikaları əsas harmonikanın EİM modulyasiyasına səbəb olaraq birləşmə harmonikalarına nisbətən kommutasiya tezliyindən kənarda yerləşir və amplitudası yüksək olur. Əlavə kombinasiya harmonikalarının yaranması kommutasiya tezliyinin çoxaldığı tezliklərdə və kommutasiya tezliyinə yaxın hissədə kombinasiya harmonikalarının bölgəsinin genişlənməsinə səbəb olur.

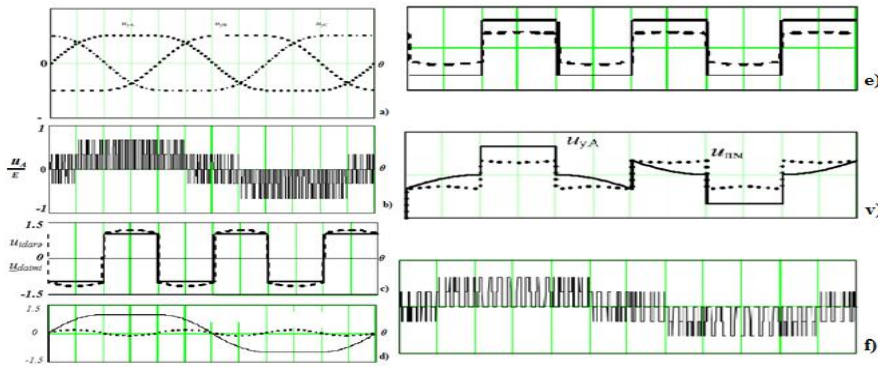
Harmonikalar kombinasiyasının sahəsi əsas harmonikaya doğru genişləndiyindən, A-nın kiçik qiymətlərində də bu harmonikalar əsas tezliyin yaxın ətrafında olurlar. Nisbətən yüksək dərəcələrdə modulyasiya əmsallarının aşağı qiymətlərində də baş verir $K_m < 0,3$. Buna görə də, A_{son} qiyməti "vektorlu" EİM-li invertorlarda yuxarıda göstərilən digər modulyasiya növlərindəki nisbətən daha böyük olur. "Vektorlu" EİM - da $A_{son} = 90-110$, kiçik əmsallarda isə $K_m < 0,2$, $A_{son} = 150-200$ olur. $A < A_{son}$ şərti seçildiyi zaman, spektrin aşağı tezlikli hissəsində təhrif harmonikaları nəzərə çarpan dərəcədə vardır. Yalnız kommutasiya tezliyinin yüksək seçildiyi halda, $f_k = A_{son} f_{çix}$, harmonika əmsallarının k_k və $k_{r,2k}$ keçid tezliyindən asılı olmadığı mü-

şahidə olunur və əsas harmonikanın sahəsi kifayət qədər böyük harmonika kombinasiyalarının mövcudluğundan azad olur.

"Vektorlu" EİM tətbiq edərək ön (parça) və iki tərəfli modulyasiya arasındakı fərq böyük dərəcədə düzəldilir. Modulyasiya əmsalının azaldılması ilə ikitərəfli modulyasiyalı EİM-də kommutasiya tezliyinə yaxın olan harmonikaların azalması müşahidə edilmir. Bu, sıfır ardıcılığın komponentlərinin φ_A , φ_B və φ_C potensiallarının spektrlərindəki kiçik rolu ilə əlaqədardır. Nəticədə $k_{r,k}$ və $k_{r,2k}$ əmsalları arasındakı ədədi fərq az olur.

"Vektorlu" EİM və üçüncü harmonikanın ilkin modulyasiyası ilə EİM-nin harmonik əmsallarının ən yaxşı göstəricilərini müqayisə edək, bunun üçün iki modulyasiyanın həyata keçirildiyi zaman qeyd olunan EİM növləri üçün harmonik əmsallarının $k_{r,2k}$ nisbətini tapırıq. Təqdim olunan məlumatlar göstərir ki, üçüncü harmonikanın əvvəlcədən modulyasiyalı olan EİM, "vektorlu" EİM ilə müqayisədə çıxış gərginliyinin daha yaxşı harmonik tərkibini təmin edir və bu üstünlük modulyasiya əmsalının azalması ilə artır. Ancaq bu nəticə tamamilə belə deyil.

"Vektorlu" EİM icra edildiyi zaman çıxış tezliyinin 1/3 periodu ərzində fazaların hər biri passiv olur və passiv fazada heç bir kommutasiya həyata keçirilmir. Ona görə də, vektorlu EİM zamanı güc açarlarının orta kommutasiya tezlikləri EİM-nin digər növlərindəki çıxış tezliklərinin eyni saydakı impulslarının tezlikləri ilə müqayisədə 1,5 dəfə kiçik olur. Əgər "vektorlu" EİM istifadə edilən zaman A parametrini 1,5 dəfə artırıq, onda invertordakı kommutasiya itkiləri, əvvəlki kommutasiya tezlikləri ilə EİM-nin digər növlərindəki invertorla eyni olacaq, cərəyanın harmonika əmsalı isə yüksək harmonikaların tərkib hissələri üçün yükün induktiv reaksiyası zamanı 1,5 dəfə azalacaq. Cihazların orta kommutasiya tezliyinin qorunması halında, gerçək yarımkeçirici cihazlarda keçid proseslərinin invertorun çıxış gərginliyinin harmonik tərkibinə təsiri dəyişməyəcəkdir [3].



Şəkil 2. EİM-nin müxtəlif üsullara görə çıxış siqnallarının formaları

Lakin bu mülahizələrdə bir çatışmazlıq var. Güc açarlarında aktual kommutasiya prosesləri modulyasiya əmsalının minimum və maksimum dəyərini məhdudlaşdırır. Məhdudluğu invertorun çıxış gərginliyində minimum icazə verilən impuls müddəti ilə əlaqələndirilir və tətbiq olunan güc açarlarının xüsusiyyətlərindən asılıdır.

Kommutasiya tezliyinin artması bu minimum icazə verilən müddəti dəyişmir, ona görə də, əgər ilkin kommutasiya tezliyində modulyasiya əmsalının maksimum dəyəri 0,9 olarsa, o zaman keçid tezliyinin 1,5 dəfə artması ilə maksimum modulyasiya əmsalı 0,85-ə qədər azalacaq. Eyni zamanda, çıxış gərginliyinin əsas harmonikasının maksimum amplitudunun

EİM-İ ÜCFAZALI DÜZLƏNDİRİCİNİN PARAMETRLƏRİNİN TƏKMİLLƏŞDİRLMƏSİNİN TƏDQIQI ÜSULLARI

qıda gərginliyi E -yə nisbəti 6% azalır və buna görə keçid tezliyinin artması əsassız ola bilər.

Beləliklə, üçüncü harmonikanın əvvəlcədən modulyasiyalı EİM və "vektorlu" EİM arasındakı seçim birmənalı deyil və konvertorun parametrləri və "enerji mənbəyi - çevirici - yük" sisteminin ətraflı müqayisəsini tələb edir ki, onun üçün bu araşdırmada göstərilən nəticələrdən istifadə edə bilər.

NƏTİCƏLƏR

1. Eninə-impuls modulyasiyalı inverterin çıxış gərginliyinin keyfiyyətini qiymətləndirmək üçün kommutasiya tezliyinin ikiqat artırılması və kommutasiya tez-

liklərinin yaxın yerləşdirilməsi, spektrlərin kombinasiyalı tərkiblərini nəzərə alan harmonik əmsallarından istifadə etmək təklif olunur.

İnvertorun çıxış cərəyanının məlum yük parametrlərində göstərilən harmonik əmsalları yüksək dəqiqliklə hesablamağa imkan verir.

2. EİM-nin formalaşdırılması zamanı çıxış gərginliyinin spektrində əsas harmonikanın amplitud artımı ilə proseslərin bir ortaqlığı müəyyən edilmişdir.

EİM "vektorlu" və üçüncü harmonikanın modulyasiyadan əvvəlki EİM-si ilə reallaşdırılmasında ardıcıl sıfırıncı harmonikalı siqnalın idarəedicisi modulyasiyaqabağı prinsipindən istifadə olunur, modulyasiyaqabağı siqnalın yalnız formaları fərqlənilir.

- [1] *E.E. Чаплыгин, Н.Г. Калугин.* Влияние снабберов на работу автономных инверторов с ШИМ. *Электричество*, № 1, 2003.
- [2] *E.E. Чаплыгин, Д.В. Малышев.* Спектральные модели автономных инверторов напряжения с широтно-импульсной модуляцией. *Электричество*, № 8, 1999.
- [3] *А.С. Сандлер, Ю.М. Гусяцкий.* Тиристорные инверторы с широтноимпульсной модуляцией для управления асинхронными двигателями. М.: Энергия, 1968. 98 с.
- [4] *E.E. Чаплыгин, Нгуен Хоанг Ан.* Спектральные модели импульсных преобразователей с переменной частотой коммутации. *Электричество*, № 4, 2006.
- [5] *Д.Б. Изосимов, С.Е. Рывкин, С.В. Шевцов.* Симплексные алгоритмы управления трёхфазным автономным инвертором напряжения с ШИМ. *Электротехника*, 1993, № 12.
- [6] *В.В. Коровин, С.Г. Обухов.* Модуляционные методы построения импульсных преобразователей. *Практическая силовая электроника*. 2005, № 19, С.38-43.

К.К. Azizova, L.V. Mamedov, G.X. Huseynova, N.V. Kazimova

RESEARCH METHODS OF ESTIMATING THE PARAMETERS OF A TRANSVERSE IMPULSE MODULATED THREE-PHASE RECTIFIER

The comparison of three-phase inverter's output voltage harmonic spectrum and quality when using various PWM techniques, such as "classical" three-phase PWM, PWM with third harmonic injection, space vector PWM (simplex PWM) is carried out. Performance criterions of output voltage of PWM inverters are proposed. PWM techniques, providing the best quality of output voltage, are obtained.

К.К. Азизова, Л.В. Мамедов, Г.Х. Гусейнова, Н.В. Казымова

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ТРЕХФАЗНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ ПОПЕРЕЧНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛИРОВАНИЯ

Проведено сопоставление спектров и показателей качества выходного напряжения трехфазных инверторов напряжения при формировании различных видов широтно-импульсной модуляции по синусоидальному закону: однофазной двухполярной ШИМ, «классической» трехфазной ШИМ, ШИМ с предмодуляцией третьей гармоникой, «векторной» ШИМ. Предложены критерии оценки качества выходного напряжения инверторов с ШИМ, определены способы формирования ШИМ, обеспечивающие наилучшее качество выходного напряжения.

Qəbul olunma tarixi: 24.01.2025

POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLƏRDƏ FAZALARARASI QARŞILIQLI TƏSİRİNİN DİFERENSİAL SKAN KALORİMETRİYA(DSC) VƏ TERMOQRAVİMETRİK ANALİZ (TG) METODLARI İLƏ TƏDQIQI

Z.A. DADAŞOV, G.X. HÜSEYNOVA, İ.S. RAMAZANOVA, Ü.V. YUSİFOVA,
A.F. NURALİYEV, F.F. YƏHYAYEV

*Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyinin Fizika İnstitutu
H.Cavid küçəsi 131. Bakı AZ 1073*

Email: dadashov.zamir87@gmail.com

Polyar (PVDF) və qeyri-polyar (YSPE) polimer matrisli və müxtəlif strukturlu keramikalardan (PKR1-romboedrik, PKR8-tetraqonal) ibarət kompozitlərdə fazalararası qarşılıqlı təsir diferensial skan kalorimetriya (DSC) və termoqravimetrik analiz metodları (TGA) ilə tədqiq edilmişdir. DSC analizləri vasitəsilə kompozitlərdə matris ilə doldurucu arasında yaranan qarşılıqlı təsirlərin, faza keçidlərinin və kristallik strukturun dəyişməsi tədqiq edilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, doldurucunun növü, miqdarı və dispersiya dərəcəsi, kompozitlərin termiki stabilliyi və faza keçidinə əhəmiyyətli təsir göstərir. Həmçinin TGA metodu ilə müxtəlif strukturlu pyezokeramikalardan ibarət kompozitlərin kütlə itkisi, termiki stabilliyi qiymətləndirilmiş, fazalarası sərhəddə baş verən qarşılıqlı təsirlərin kompozitin ümumi termiki parametrlərinə təsiri müəyyən edilmişdir. Əldə olunan nəticələr göstərir ki, doldurucunun növü, miqdarı və dispersiyası qarşılıqlı təsirə və kompozitlərin dekompozisiya mərhələlərinə əhəmiyyətli təsir göstərir. DSC və TGA metodları ilə aparılan eksperimentlərin polimer matrisli kompozitlərin struktur və termiki xüsusiyyətlərinin yaxşılaşdırılması üçün etibarlı və effektiv bir metodlar olduğu göstərilir.

Açar sözlər: polimer, kompozit, matris, şüşələşmə, entalpiya, entropiya, kütlə itkisi, plazma, xüsusi istilik tutumu.

DOI: 10.70784/azip.2.2025124

GİRİŞ

Perovskit (ABO_3) kristal quruluşuna malik olan seqnetopyezokeramikalar ən geniş yayılmış və effektiv pyezoelektrik materiallardır. Kimyəvi tərkibinə görə pyezokeramikalar adətən qurğuşun və barium (Ba) ikivalentli ionlarından, həmçinin titan (Ti) və sirkonium (Zr) dördvalentli ionlarının birləşməsindən ibarət mürəkkəb oksidlərdir. $Pb(Zr,Ti)O_3$ (PZT- qurğuşun Zirkonat Titanat). Qurğuşunlu (Pb) pyezokeramika materialları yüksək pyezoelektrik xassələrinə (pyezoəmsal $-d_{33}$, pyezohəssaslıq - g_{33} və s.) və yüksək dielektrik sabitlərinə (dielektrik nüfuzluğu - ϵ_{33} , dielektrik itki bucağı - $tg\delta$ və s.) malikdir. Bu materialların kimyəvi tərkibini, ilkin materialların faiz nisbətini dəyişməklə və müxtəlif əlavələr qatmaqla müəyyən elektrofiziki, pyezoelektrik xassələrə malik pyezokeramik tərkib sintez etmək mümkündür.

Son dövrlər qurğuşunsuz keramikalar da ($KNbO_3$ – kalium niobat və $NaNbO_3$ – natrium niobat) tədqiq edilir. $(K,Na)NbO_3$ (KNN) – yüksək Küri temperaturuna və nisbətən yaxşı pyezoelektrik xüsusiyyətlərə materiallardır. Həmçinin, $Bi_{0.5}Na_{0.5}TiO_3$ (BNT) və $Bi_{0.5}K_{0.5}TiO_3$ (BKT) – qurğuşunsuz alternativlər arasında daha vacib materiallar hesab olunur. Qurğuşunsuz pyezokeramik materiallar ekoloji cəhətdən daha təhlükəsizdir [1, 2]. Lakin qurğuşun əsaslı pyezokeramikalar hələ də ən güclü pyezoelektrik materiallar hesab olunur. Qurğuşunsuz materiallar bəzi sahələrdə uyğun alternativlər təqdim etsələr də, onların tam şəkildə PZT-ni əvəz etməsi üçün daha çox optimallaşdırma və inkişaf tələb olunur. Qurğuşun (Pb) əsaslı seqnetopyezokeramikaların bu göstərilən üstünlükləri ilə yanaşı yüksək dərəcədə kövrəklik xassəsinə malik olması onlardan hazırlanmış nümunələrin deformasiyasının azalmasına səbəb olur. Bu baxımdan, elastik xassələrə malik olan material almaq üçün pyezokeramik ovuntunu

polimer matrisaya daxil edilərək kompozit nümunə alınması tədqiq olunur [3]. Metalların əridilməsi və keramikanın modelləşdirilməsindən sonra, ilk sintetik polimerin sənaye miqyasında istehsalı insan cəmiyyətinin təkamülündə əlamətdar hadisə idi. O, vaxtdan bəri polimerlər daha sürətlə inkişaf edir və polimer matrisli kompozitlərin alınmasında vacib matris kimi istifadə olunur. Hazırda kompozitlər yüksək performansla malik materiallar sinfi kimi tanınır [4-6]. Kompozitlərin istehsalı, tərkibi, həm də texnologiyası, demək olar ki, sonsuzdur. Bu materiallar qabaqcıl texnologiyanın bütün sahələrində geniş istifadə olunur (aerokosmik, robotexnika, maşınqayırma və s.) [7, 8]. Son bir neçə 10 illikdə polimer matrisli kompozitlər sənaye və akademiya üçün, xüsusilə avtomobil, aerokosmik, elektronika sistemlərində tibbi məhsullar, kimya sənayesi və digər sahələr üçün maraqlı olmuşdur. Düzgün dizayn edildikdə, yeni birləşmiş material ilkin materialdan daha yaxşı xüsusiyyətlər nümayiş etdirir. Kompozit materialları müxtəlif yollarla təsnif etmək olar. İstehsalatda matris kimi, yüksək sıxlıqlı polietilenin (YSPE) istifadə olunduğu kompozitlər geniş istifadə olunur. Bu kompozitlər təmiz polimerlə müqayisədə daha yaxşı mexaniki və fiziki xassələrə malikdir [9, 10]. Bundan əlavə, polimer kompozitlərin emalında və tətbiq sahəsinin seçilməsində istilik xüsusiyyətlərinin öyrənilməsi vacib faktordur. Polimer matrisli kompozitlərdə fazalararası qarşılıqlı təsir (interfeys) materialın mexaniki, istilik və kimyəvi xüsusiyyətlərinə təsir göstərən amillərdən biridir. Bu qarşılıqlı təsiri öyrənmək üçün diferensial skan kalorimetriya (DSC) və termoqravimetrik analiz (TGA) kimi termal analiz üsulları geniş istifadə olunur [11,12]. Son dövrlər yaradılan yeni cihazlar maddədə istilik selinin dəyişmə sürətini (DSC) termoqravimetrik analizlə (TG) kütlənin

dəyişməsi, parçalanma və ya korroziya haqqında məlumat verir [13]. Bu metodlarla nümunələrin tədqiqi həmçinin faza çevrilməsini, istilik tutumunu, ərimə və kristallaşma hadisəsini, oksidləşmə stabilliyini və müxtəlif proseslərin kinetikasını dəqiq təyin etməyə imkan verir [14-16].

Bu məqsədlə, tədqiq olunan nümunələrin (təmiz YSPE, PVDF və YSPE+PKR1, PVDF+PKR1 kompozitləri) diferensial skan kalorimetriya (DSC) və termogravimetriya (TG) analizi aparılaraq fazalarası sərhəddə baş verən proseslər öyrənilmiş və termodinamik parametrlər təyin edilmişdir.

2. Materiallar və üsullar.

Matris kimi yüksək sıxlıqlı polietilen (YSPE) və polivinildenftorid (PVDF)-dən istifadə etdik. Matrisə daxil edilmiş doldurucu olaraq müxtəlif strukturlu seqnetopyezokeramikalar PKR-1, PKR-8 seçilmişdir. Pyezoelektrik hissəciklərin diametri 63÷100 mkm götürülmüşdür. Pyezoelektrik hissəciklər (50% həcm payı olan) polimer (YSPE, PVDF) tozuna əlavə edilmişdir. Sonra alınan qarışıq 1 saat otaq temperaturunda maqnit qarışdırıcıda qarışdırılmış, davamı olaraq 4 saat ərzində disperqator Ultrasonik Təmizləyici NATO CD – 4800 (Çin) ilə qarışdırılmışdır. Diskşəkilli kompozit nümunələri 165°C temperaturda və 15 MPa təzyiqdə isti presləmə yolu ilə alınmışdır. Seçilmiş temperatura çatdıqdan sonra presləmə müddəti 15-20 dəqiqədir.

Ölçmələr diferensial skan kalorimetriyası (DSK) NETZSCH DSC 204 F1 cihazında (Almaniya) arqon atmosferində aparılmışdır. Araşdırılan kompozit nümunəsi alüminium yuvacıqda yerləşdirilir. Etalon nümunə kimi safir (Al₂O₃) götürülmüş, qızma sürəti 10 K/dəq, təsirsiz qaz axınının sürəti 20 ml/dəq, nümunələrin çəkisi təxminən 40 mq seçilmişdir. Tədqiqatlar -100÷600°C temperatur intervalında aparılmışdır. Bu cihaz vasitəsilə kompozitlərin termodinamik parametrləri ölçülmüş və aşağıdakı düsturların köməyiylə hesablanmışdır:

Termoqram əyrisində yaranan pikin sahəsini bilməklə entalpiyanın dəyişməsi:

$$\Delta H = S_{sahə} = \int_0^T c_p dT \quad (1)$$

Pikin sahəsini pikin keçid temperaturuna bölməklə nümunə üçün vacib parametr ola entropiyanın dəyişməsi:

$$\Delta S = \frac{\Delta H}{T_{keçid}} = \int_0^T \frac{c_p}{T} dT \quad (2)$$

İstifadə olunan nümunə amorf və kristallik fazadan ibarət olduğundan termoqram əyrisindən istifadə edərək kristallıq dərəcəsi:

$$K = \frac{|\Delta H_{ərimə} + \Delta H_{soyuma}|}{\Delta H_{etalon}} \cdot 100\% \quad (3)$$

Həmçinin, nümunənin T temperaturundakı xüsusi istilik tutumu (c_p):

$$c_p = \frac{m_{standart}}{m_{sample}} \cdot \frac{DSC_{sample} - DSC_{bas}}{DSC_{standart} - DSC_{bas}} \cdot c_{p,standart} \quad (4)$$

Burada c_p və $c_{p,standart}$ – nümunənin və etalonun T temperaturundakı xüsusi istilik tutumu, $m_{standart}$ və m_{sample} – uyğun olaraq etalonun və nümunənin kütləsi, $DSC_{standart}$ və DSC_{sample} – etalonun və nümunənin T temperaturuna uyğun DSC signalının qiymətidir.

Tədqiqatın davam olaraq nümunələr termogravimetrik (TG) analiz metodu ilə NETZSCH STA 449 F1 Yupiter cihazında ölçülmüşdür. Eksperimentlər 20-850°C temperatur intervalında Al₂O₃ tiqellərində aparılmış, nümunənin qızma sürəti 1K/dəq götürülmüşdür. Ölçmələr sintetik hava mühitində (80% oksigen qazı, 20% azot qazı və axın sürəti 35 ml/dəq) toz halında olan nümunələr üçün aparılmışdır. Bu cihaz vasitəsilə faza keçidləri, udma, adsorbsiya və desorbsiya kimi fiziki hadisələr öyrənilir. Həmçinin termogravimetrik (TQ) termoqramından istifadə edərək tədqiq olunan kompozitlərin kinetik parametri olan aktivləşmə enerjisini (E_a) Arrenius tənliyinə və Kissinger metoduna görə də təyin etmək olar.

$$\ln(k) = \ln(A) - \frac{E_a}{R \cdot T} \quad (5)$$

Burada k – dəyişmə sabiti, A – eksponensial faktor, E_a – aktivləşmə enerjisi, T – mütləq temperatur, R – universal qaz sabitidir.

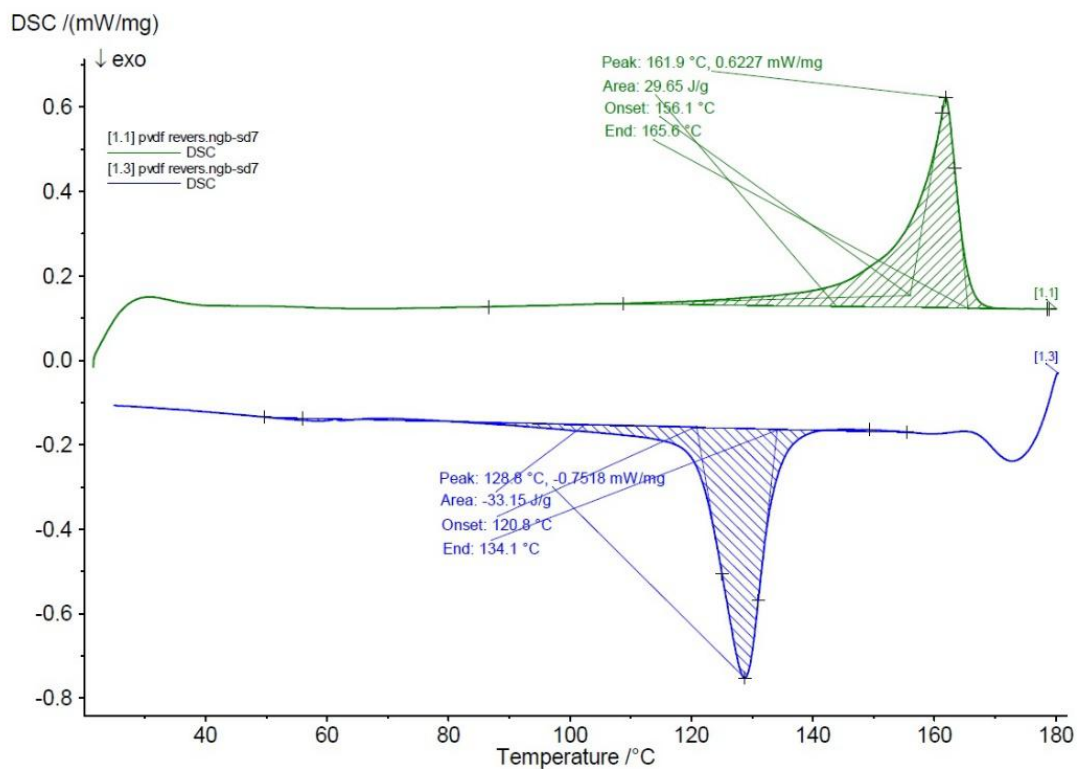
Kissinger metoduna görə isə:

$$\ln\left(\frac{\beta}{T_p^2}\right) = \ln\left(\frac{A \cdot R}{E_a}\right) - \frac{E_a}{R \cdot T_p} \quad (6)$$

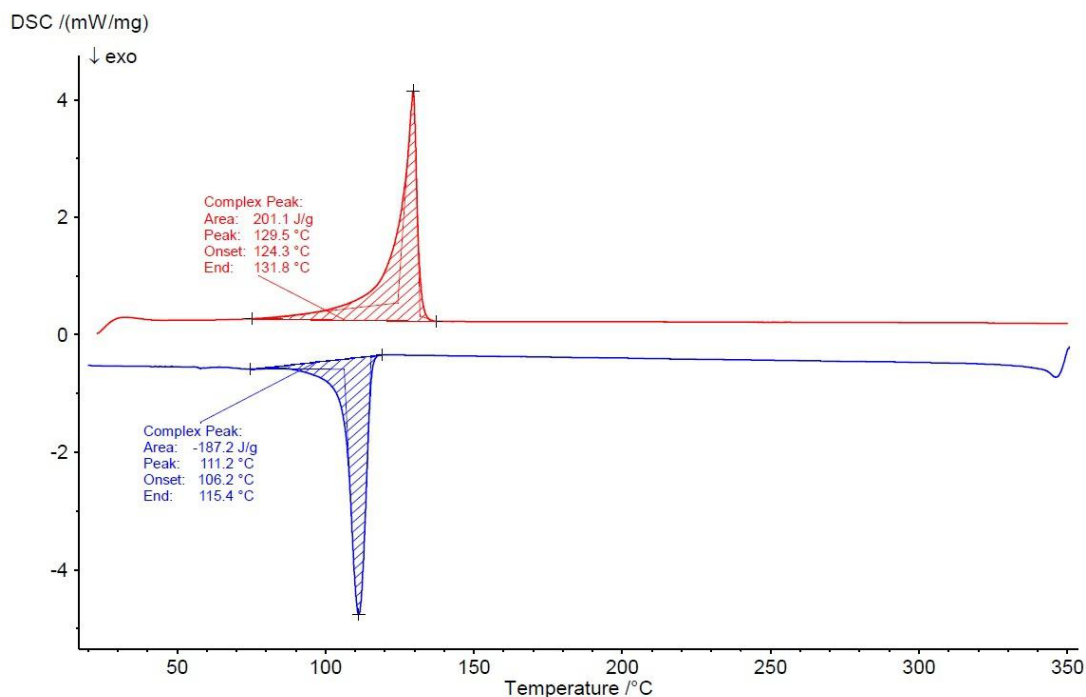
Burada T_p – maksimumun temperaturu, β – qızma sürətidir.

Nəticə və müzakirə

Şəkil 1 və 2-də təmiz yüksək sıxlıqlı polietilen (YSPE), polivinildenftorid (PVDF) üçün istilik enerjisinin temperaturdan asılılığı (DSC termoqramı) göstərilib. Şəkiləndən görünür ki, YSPE-nin termoqram əyrisində 124°C-də pik yaranır. Əgər YSPE-ni bir tsikl qızma və soyutmaya məruz etsək və DSC termoqramını alsaq, tam qrafikdə (yəni soyutma-qızma) yaranan yeni pik (maksimum) 111°C-də müşahidə olunmuşdur. Şəkil 2-də göstərdiyi kimi, qeyri-polimer matrisin əvəzinə müəyyən dipol momentinə malik polyar ftor tərkibli polimer polivinildenftorid (PVDF) istifadə etdikdə, DSC əyrisində birinci maksimum 162°C-də, ikinci maksimum 129°C-də müşahidə olunmuşdur. Fikrimizcə, hər iki halda DSK əyrisində maksimumun temperaturunun fərqli olması termoişləmənin təsirindən polimerlərdə oksigenli destruksiya (parçalanma) prosesləri baş verir və bu hal PVDF-də YSPE-nə nəzərən daha yüksək temperaturlarda müşahidə olunur. Eksperimentin davamı olaraq, DSC termoqramından istifadə edərək polimerlərin praktikada tətbiqi üçün mühüm parametr olan şüşələşmə temperaturunu, ərimə temperaturunu, xüsusi istilik tutumunu (c_p), entalpiya, entropiya (ΔS), kristallıq dərəcəsini (K) təyin etmişik. Alınan nəticələr cədvəl 1-də göstətilmişdir.



Şəkil 1. Yüksək sıxlıqlı polietilenin DSC termoqramı.

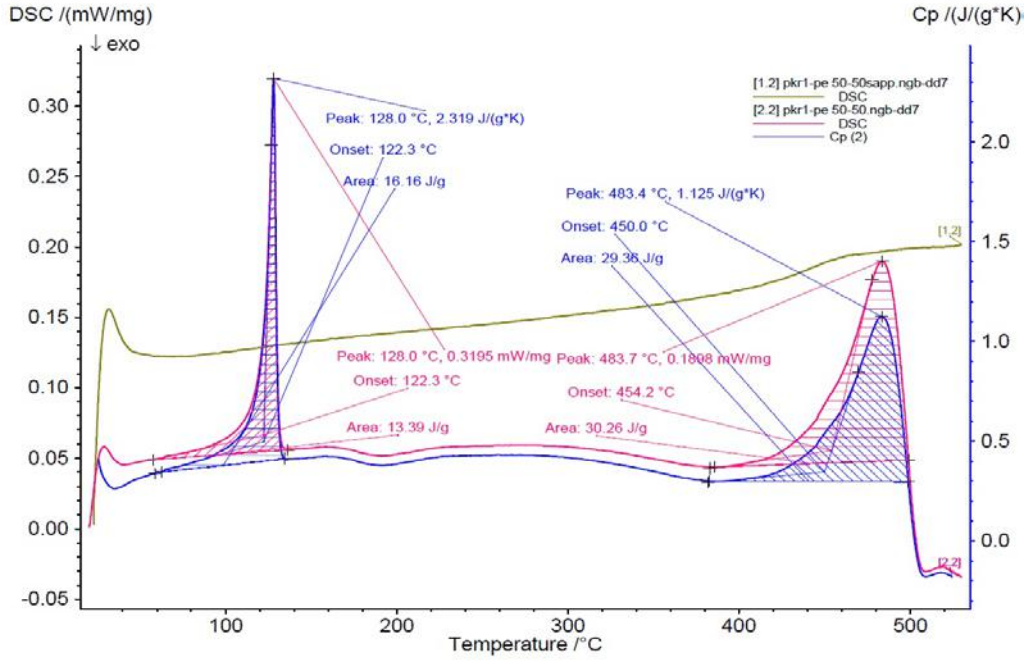


Şəkil 2. Polivinildenftorid (PVDF)-in DSC termoqramı.

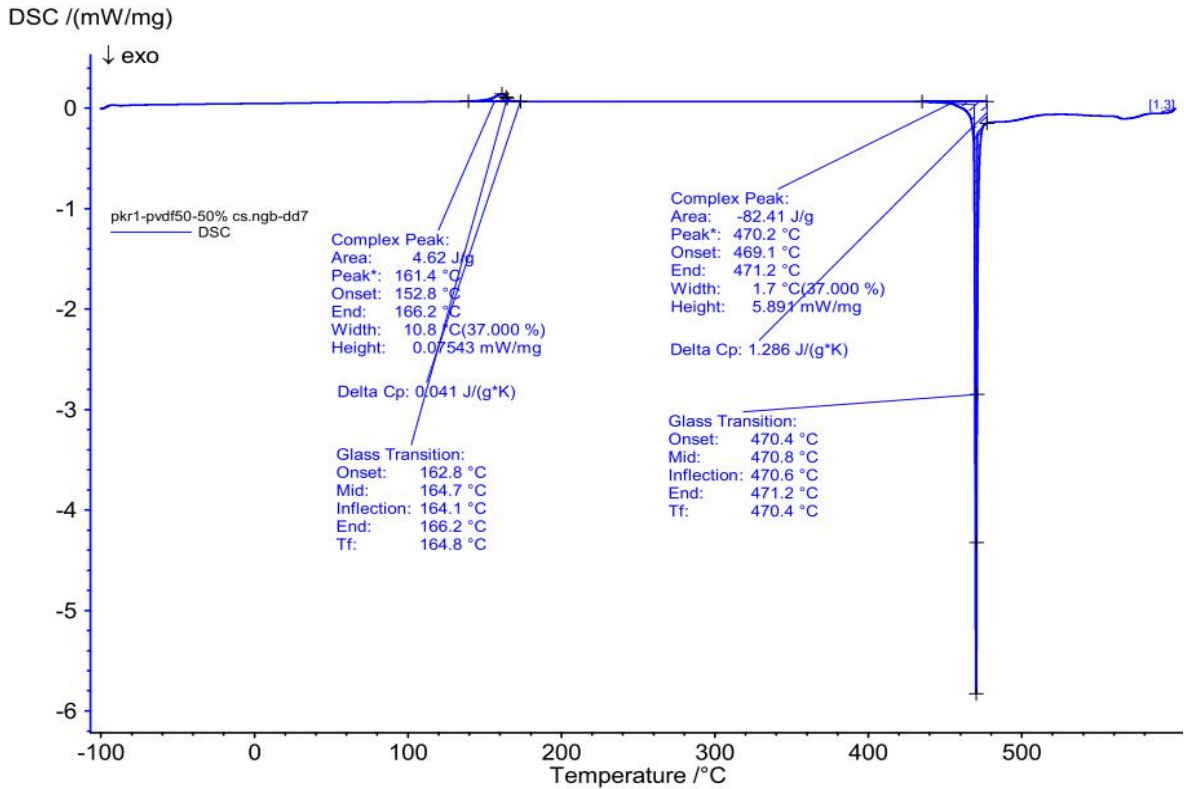
Cədvəl 1.

Təmiz polimerlərin DSK spektrində alınan nəticələri

Polimer	Şüşə temp. (T_g), °C	Ərimə temper. (T_m), °C	Xüsusi istilik tutu. (c_p), C/q·°C	Entalpiya (ΔH), C/q	Entropiya (ΔS), C/K	Kristallıq dərəcə. (K), %
YSPE	100	124-131	1,8 - 2,7	60,3	2,36	4,75
PVDF	40	156-165	0,96 - 1,4	31,5	0,65	3,33



Şəkil 3. YSPE+PKR1 kompozitinin DSC termoqramı.



Şəkil 4. PVDF+PKR1 kompozitinin DSC termoqramı.

Təmiz polimerlərdən əlavə polimer matrisli seqnetopyezokeramika əsasında kompozitlərin istilik enerjisinin temperaturdan asılı olaraq dəyişməsi öyrənilmişdir. Bu məqsədlə verilmiş müxtəlif strukturlu seqnetokeramikalardan (PKR1, PKR8 və s.) və polimerlərdən (YSPE, PVDF) ibarət kompozitlər üçün DSC termoqramları çəkilmiş və tədqiqatlar -100÷600°C temperatur intervalında aparılmışdır. Şəkil 3 və 4-də YSPE+PKR1 və PVDF+PKR1 kompozitlərinin DSC termoqramları göstərilib. Göstərilən qrafiklərdə temperaturdan asılı olaraq YSPE+PKR1 və PVDF+PKR1

kompozitlərində gedən struktur dəyişikliklərinə uyğun maksimumlar (faza keçidləri) çox dəqiq görünür. Qrafikdən görünür ki, YSPE+PKR1 kompoziti (şəkil 3) üçün istilik enerjisinin temperaturdan asılılığında 128°C temperaturda kiçik ekzotermik pik müşahidə olunur və hesab edirik ki, bu pik polimerin ərimə temperaturuna yaxındır. Fikrimizcə, bu ekzotermik pik temperaturun artması ilə YSPE+PKR1 kompozitində olan oksigen tərkibli funksional qrupların (CO, CO₂) parçalanması ilə əlaqədardır. Daha sonra temperaturun

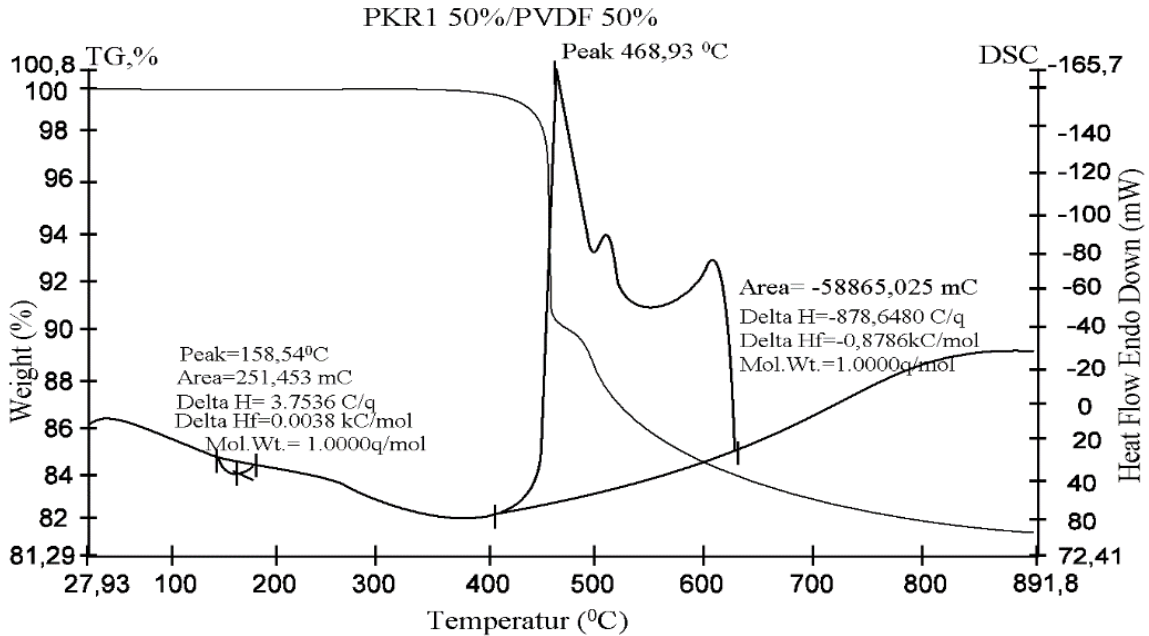
480°C qiymətindən sonra pikin kəskin düşməsi və endotermik reaksiyanın baş verməsi müşahidə olunur. Endotermik pik 480,4°C temperaturda müşahidə olunur. Yəni, bu artıq polimer ilə seqnetopyezokeramika hissəcikləri arasında əlaqələri qırmaq üçün çox miqdarda istiliyin udulmasını göstərir. Eyni ilə, PVDF+PKR1 kompoziti üçün də istilik enerjisinin temperaturdan asılılıq termoqramı şəkil 4-də göstərilib. Termoqramdan görünür ki, PVDF+PKR1 kompozitində ekzotermik pik (161,4°C), endotermik pik (470,2°C) müşahidə olunur. Alınan nəticələr göstərir ki, PVDF-də YSPE-nə nəzərən spektrlərin öyrənilməsi daha mühümdür. Çünki PVDF polyar polimerdir, pyezokeramik hissəciklər kristallaşma mərkəzləri rolunu oynaya bilər və son nəticədə polimer matrisada kristallik fazanın miqdarı art-

dığı üçün DSC termoqramında yaranan birinci maksimumun formalaşma temperaturu yüksək temperatur istiqamətində sürüşə bilər. Bundan əlavə, polimer matrisanın həcmi payı artdıqca polimer matrisa ilə pyezokeramik fazanın kontakt səthi artır və struktur dəyişmələrin intensivliyi də yüksəlir. Fikrimizcə DSC əyriələrində müşahidə olunan maksimumlar temperaturun təsirdən strukturun dəyişməsi, fazalararası qarşılıqlı təsirlə əlaqəlidir. Hesab edirik ki, fazalararası qarşılıqlı təsir artıqca kristallik dərəcəsi azalır, həmçinin makromolekullar özlərinin sərbəstliyini müəyyən qədər itirirlər. DSC termoqramlarından istifadə edərək tədqiq olunan kompozitlər üçün şüşələnmə temperaturu, entalpiya, entropiya, xüsusi istilik tutumu hesablanmışdır. Alınan nəticələr cədvəl 2-də verilmişdir.

Cədvəl 2.

Müşahidə olunan keçidlərdə entalpiyanın dəyişməsi və xüsusi istilik tutumu.

Kompozit	Pik, T_{pik} °C	Şüşə.temp T_g , °C	Entalpiya (ΔH), C/q	Entropiya (ΔS), C/K	Xüsusi İst.tutumu (c_p) C/q·K	DSC,area A, C/q	Pikin adı
YSPE+PKR1	128	122	4,85	0,0121	2,319	16,16	Ekzotermik
	483,4	454	8,81	0,0116	1,125	29,36	Endotermik
Kompozit	Pik, (T_{pik}), °C	Şüşə.temp T_g °C	Entalpiya (ΔH), C/q	Entropiya (ΔS), C/K	Xüsusi İst.tutumu C_p , C/q·K	DSC,area A, C/q	Pikin adı
PVDF+PKR1	161,4	162,4	0,19	0,0004	0,041	4,62	Ekzotermik
	470,2	470,4	24,72	0,0333	1,286	-82,41	Endotermik



Şəkil 5. PKR1+PVDF kompozitinin termoqravimetrik (TG) spektri.

Şəkil 5-də PVDF+PKR1 kompozitinin kütlə itkisinin temperaturdan asılılığı (TG termoqram əyrisi) göstərilib. Şəkildən görünür ki, TG əyrisində müxtəlif temperaturlu (161°C, 454°C, 503°C, 606°C) maksimumlar müşahidə olunur. Əvvəlcə kütlə itkisinin temperaturdan asılılığında 161°C-yə uyğun olan kütlə itkisi

baş verməyən enli, aydın olmayan endotermik effekt müşahidə olunur. Fikrimizcə, bu mərhələdə ikinci növ faza keçidi baş verir (yəni, kütlə itkisi olmadan materialın fiziki xassələri dəyişir) nümunənin kristal quruluşu dəyişir, daha doğrusu temperaturun artması ilə

kompozitin polimer fazanın makromolekulları öz sərbəstliyini itirir. Bu temperatur polimerin (PVDF) ərimə temperaturuna yaxın olduğundan polimeri təşkil edən makromolekullar arasında rabitə qırılır. Termoqram ayrışının ikinci effekti 450°C-dən 470°C-yə qədər davam edir. Belə ki, 454°C temperaturda kütlə itkisi 10% təşkil edir. Fikrimizcə, alınan nəticə termoişləmənin təsirdən polimerdə oksigenli destruksiya prosesləri baş verməsi ilə əlaqədardır. Hesab edirik ki, bu temperaturda PVDF polimerinin zəncirlərində C–H və C–F rabitəsi zəifləyir və qismən parçalanmağa başlayır. Parçalanma nəticəsində polimer zəncirlərində radikalalar əmələ gəlir və dehidroflüorlaşma prosesi başlayır. Proses zamanı PVDF zəncirindən hidrogen flüorid (HF) kimi uçucu maddələr ayrılır. Bu rekaksiya polimerin müəyyən hissəsinin kimyəvi strukturunu dəyişdirərək, uçucu maddələrin ayrılmasına və nəticədə göstərilən (10%) kütlə itkisinə səbəb olur. Daha sonra, 503°C temperaturda çox kiçik ölçülü pik müşahidə olunur. Yeni pikin yaranması əvvəlki mərhələdən (450-470°C) tamamilə çevrilə bilməyən və daha stabil hissələrin bu temperaturda əlavə oksidləşmə və ya son dehidroflüorlaşma mərhələsindən keçərək daha da parçalanması ilə izah oluna bilər. Bundan əlavə, hesab edirik ki, həmin temperaturda üçüncü effekt üzvü maddələrin yanması nəticəsində baş verir və bu halda kütlə itkisi təxminən 2% təşkil edir. Nəhayət, termoqram ayrışında dördüncü pik 602°C-dən 609°C-yə qədər temperatur intervalında formalaşır. Fikrimizcə, bu temperatur intervalında daha stabil qalmış karbonlu hissə (qalıq maddə) yüksək temperaturun təsiri altında tam oksidləşir və ya pirolitik reaksiyaya girir. Bu mərhələdə qalan karbon strukturlarında mövcud olan güclü C–C rabitələri əlavə istilik

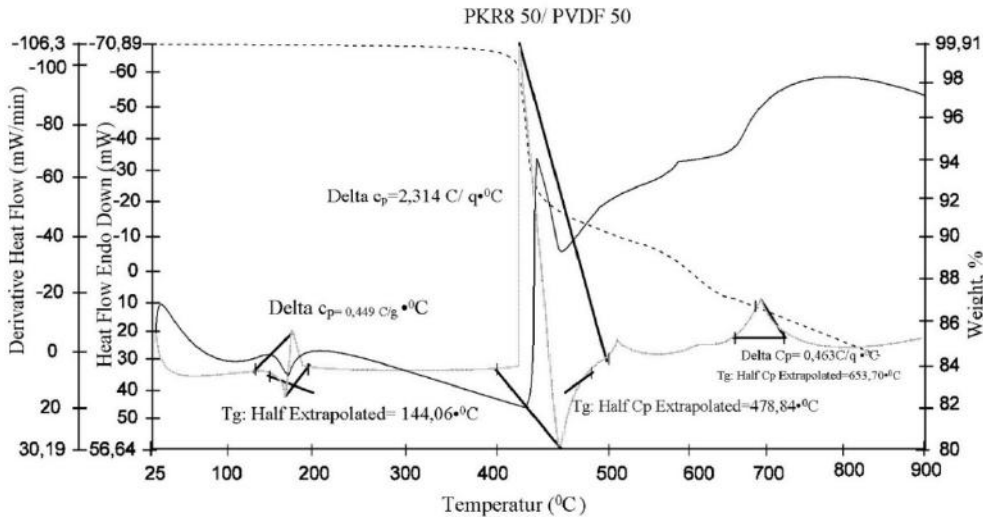
enerjisi hesabına parçalanır, nəticədə qalıq hissə qaz halına keçərək az miqdarda kütlə itkisinə (təxminən 2%) səbəb olur. Lakin kompozitin qeyri-üzvi fazası olan seqnetopyezokeramika (PKR 1 və PKR8) yüksək termiki stabilliyə malik olduğundan göstərilən temperatur intervalında onda termiki parçalanma baş vermir. Beləliklə, PVDF+PKR1 kompoziti üçün alınan nəticə göstərir ki, 450°C temperatura qədər nümunə davamlıdır. Bundan yuxarı temperatura isə kompozitdə tədricən destruksiya prosesləri baş verir ki, bu proses bir neçə mərhələdə başa çatır. Analoji təcrübə PVDF+PKR8 kompoziti üçün də aparılmışdır (şəkil 6). Alınan nəticə TQ/DSK əyrisi vasitəsilə şəkil 6-da verilmişdir. Şəkildən görünür ki, PVDF+PKR8 kompoziti üçün də müxtəlif temperaturalarda (158°C, 448°C, 653°C) maksimumlar müşahidə olunur.

Ekspərimentin davamı olaraq, tədqiq olunan nümunələrin (PVDF+PKR1, PVDF+PKR8 kompozitləri) TGA termoqramlarından istifadə edərək aktivasiya enerjisi (E_a), riyazi düsturların (Kissinger tənliyinə əsasən (6)) köməyi ilə hesablanmışdır. Alınan nəticələr cədvəl 3-də verilmişdir.

Cədvəl 3.

Kompozitlərin parçalanma (destruksiya) temperaturları.

Nümunələr	T_{onset} , °C	T_{pik} , °C	Aktivasiya enerjisi (E_a), kC/mol
PVDF+PKR1	454	468,9	0,0038
PVDF+PKR8	440	448	0,0042



Şəkil 6. PVDF+PKR8 kompozitinin termoqravimetrik (TG) spektri.

Nəticə

DSC və TGA analizlərinin nəticələri göstərmişdir ki, polimer matrisə ilə doldurucu (seqnetopyezokeramik hissəcik) arasındakı fazalararası qarşılıqlı təsir kompozitin istilik xüsusiyyətlərinə əhəmiyyətli dərəcədə təsir edir. PVDF+PKR1 kompozitinin DSC nəticələri göstə-

rir ki, PVDF ilə PKR1 hiisəcikləri arasında güclü qarşılıqlı təsir polimerin kristallaşma temperaturu, ərimə temperaturunu dəyişmişdir. Həmçinin PVDF-in kristallikliyi artırılmış və faza keçidlərini stabilləşdirmişdir. PVDF+PKR1 kompozitində TGA metodları ilə polimerlə pyezokeramik hissəcik arasındakı güclü qarşılıqlı nümunənin termiki stabilliyini artırmış parçalanma temperaturunu yüksəltmiş və kütlə itkisi daha yüksək

temperaturda baş vermişdir. TGA termogramlarından görünür ki, PVDF+PKR1 kompoziti 450°C temperaturda qədər davamlıdır və işlək temperaturu həmin tempe-

ratura qədərdir. Bu tədqiqat göstərir ki, uyğun doldurucu seçimi polimer matrisli kompozitlərin tətbiq sahələrini genişləndirə bilər.

- [1] *Jurgen Rodel, Wook Jo, Klaus T. P. Seifert, Eva-Maria Anton.* Perspective on the Development of Lead-free Piezoceramics. *Journal of the American Ceramic Society.* Vol. 92, № 6. pp. 1153-1177, 2009.
- [2] *P. Noorunnisa Khanam, Mariam Al Ali Al Maadeed.* Processing and characterization of polyethylene-based composites. *Adv. Manuf.: Polym. Compos. Sci.*, 2015, 1, 63-79.
- [3] *N.M. Nurazzi, M.R.M. Asyraf, M. Rayung.* Thermogravimetric Analysis Properties of Cellulosic Natural Fiber Polymer Composites: A Review on Influence of Chemical Treatments. *Polymers* 2021, 13, 2710.
- [4] *Beatriz Adriana Salazar-Cruz, María Yolanda Chávez-Cinco, Ana Beatriz Morales-Cepeda.* Evaluation of Thermal Properties of Composites Prepared from Pistachio Shell Particles Treated Chemically and Polypropylene. *Molecules* 2022, 27, 426. pp1-12.
- [5] *Carmen Albano, Gema González, Jordana Palacios, Arquímedes Karam.* characterization of poly l-lactide/hydroxyapatite composite: chemical, thermal and thermomechanical properties. *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V.*, Vol. 28, № 3, pp. 97-108, 2013.
- [6] *Luciano Pisanu, Josiane Barbosa, Ricardo Souza and Marcio Nascimento.* Evaluating the influence of coupling agents in the structural properties of polypropylene coconut fiber composites. *Mater. Res. Express* 6, 2019, 11532.
- [7] *César Leyva-Porras, Pedro Cruz-Alcantar, Vicente Espinosa-Solís.* Application of Differential Scanning Calorimetry (DSC) and Modulated Differential Scanning Calorimetry (MDSC) in Food and Drug Industries. *Polymers* 2019, 12, 5.
- [8] *Raluca Maria Florea, Ioan Carcea.* Polymer matrix composites – routes and properties. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies* ISSN 2067–3604, Vol.IV, № 1/20.
- [9] *X.J. Fan, S.W.R. Lee, Q. Han.* Experimental investigations and model study of moisture behaviors in polymeric materials. *Microelectronics Reliability* 49, 2009, 861–871.
- [10] *Carola Esposito Corcione and Mariaenrica Frigione.* Characterization of Nanocomposites by Thermal Analysis. *Materials* 2012, 5, 2960-2980.
- [11] *Hassan Omar, Glen J. Smales, Sven Hennin.* Calorimetric and Dielectric Investigations of Epoxy-Based Nanocomposites with Halloysite Nanotubes as Nanofillers. *Polymers* 2021, 13.
- [12] *Jérémie Audoit, Lisa Rivière, Jany Dandurand, Antoine Lonjon, Eric Dantras, Colette Lacabanne.* Thermal, mechanical and dielectric behaviour of poly (aryl ether ketone) with low melting temperature. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Springer Verlag, 2019, 135 (4), pp.2147-2157
- [13] *Mateusz Bor, Tomasz Borowczyk, Wojciech Karpiuk, Mikołaj Krakowiak, Rafał Smolec.* Assessment of the possibility of applying ceramic materials in common rail injection systems. *Advances in Science and Technology Research Journal* Volume 12, Issue 1, March 2018, pages 312–321.
- [14] *Franziska Eichhorn, Simone Kellermann, Ulf Betke and Tobias Fey.* Phase Evolution, Filler-Matrix Interactions, and Piezoelectric Properties in Lead Zirconate Titanate (PZT)-Filled Polymer-Derived Ceramics (PDCs). *Materials* 2020, 13, 1520; doi:10.3390/ma13071520. pp. 1-14.
- [15] *В.М. Егоров.* Калориметрия твердых растворов $(1-x)\text{BaTiO}_{3-x}\text{Ba}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$. *В.М.Егоров, Е.П. Смирнова, В.В. Леманов.* Физика и Техника Полупроводников, 2007, т.49, вып8, с. 1456-1459.
- [16] *Ю.И. Юрасов, А.В. Назаренко, А.В. Павленко, И.А. Вербенко.* Прогнозирование свойств бесвинцовых пьезокерамик и модификация конструкции вибродатчиков на основе свинецсодержащих композиций. *Наука юга России* 2017, Т. 13 № 4 С. 23–31

Z.A. DADASHOV, G.Kh. HUSEYNOVA, İ.S. RAMAZANOVA, U.V. YUSİFOVA,
A.F. NURALİYEV, F.F. YAHYAYEV

STUDY OF INTERPHASE INTERACTION IN POLYMER MATRIX COMPOSITES BY DIFFERENTIAL SCANNING CALORIMETRY (DSC) AND THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS (TGA) METHODS

Interphase interaction in composites consisting of polar (PVDF) and non-polar (HDPE) polymer matrix and ceramics with different structures (PZT1- rhombohedral, PZT8- tetragonal) was studied by differential scanning calorimetry (DSC) and thermogravimetric analysis methods (TGA). Through DSC analyses, the interactions between the matrix and the filler in the composites, phase transitions and changes in the crystal structure were studied. It was determined that the type, amount and degree of dispersion of the filler have a significant effect on the thermal stability and phase transition of the composites. Mass loss and thermal stability of composites consisting of piezoceramics with different structures were also evaluated by the TGA method, and the effect of interactions occurring at the interphase boundary on the overall thermal parameters of the composite was determined. The obtained results show that the type, quantity and dispersion of the filler have a significant effect on the interaction and decomposition stages of the composites.

**З.А. ДАДАШОВ, Г.Х. ГУСЕЙНОВА, И.С. РАМАЗАНОВА, У.В. ЮСИФОВА,
А.Ф. НУРАЛИЕВ, Ф.Ф. ЯХЬЯЕВ**

**ИЗУЧЕНИЕ МЕЖФАЗНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ПОЛИМЕРНО-МАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТАХ
МЕТОДАМИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ КАЛОРИМЕТРИИ (ДСК) И
ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА (ТГА)**

Методами дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и термогравиметрического анализа (ТГА) исследовано межфазное взаимодействие в композитах, состоящих из полярной (ПВДФ) и неполярной (ПЭВП) полимерной матрицы и керамики различной структуры (ПКР1-ромбоэдрическая, ПКР 8-тетрагональная). С помощью ДСК-анализа изучены взаимодействия матрицы и наполнителя в композитах, фазовые переходы и изменения кристаллической структуры. Установлено, что тип, количество и степень дисперсности наполнителя оказывают существенное влияние на термостабильность и фазовый переход композитов. Методом ТГА также оценены потеря массы и термическая стабильность композитов, состоящих из пьезокерамики различной структуры, и определено влияние взаимодействий, происходящих на межфазной границе, на общие тепловые параметры композита. Полученные результаты показывают, что тип, количество и дисперсность наполнителя оказывают существенное влияние на стадии взаимодействия и разложения композитов.

Qəbul olunma tarixi: 26.02.2025

A.Z. Abasova, L.H. Həsənova, Ə.Z. Məhəmmədov, S.Ə. Cahangirova

(GaSe)_{0,8}(InSe)_{0,2} MONOKRİSTALININ FOTOKEÇİRİCİLİYİ VƏ ONA γ -KVANTLARLA ŞÜALANMANIN TƏSİRİ

(GaSe)_{0,8}(InSe)_{0,2} kristalında müxtəlif temperaturalarda adi və polyarizə olunmuş işıqla fotokeçiriciliyin spektral xarakteristikaları çıxarılmış, onların xarakterinin GaSe-ə uyğun olduğu göstərilmişdir. γ -kvantlarla şüalanmanın təsiri olmamışdır.

Fizuli Məmmədov

RADİASİYA AMPLİTUDALARININ SIFIR ŞƏRTİNİN KVANT SİSTEMLƏRİNİN STRUKTUR MÜRƏKKƏBLİYİNİN SAXLANMASI KİMİ, STRUKTUR MÜRƏKKƏBLİYİNİN SAXLANMASININ FUNDAMENTAL MƏNŞƏLİ OLMASI

Radiasiya amplitudalarının sıfır şərtinə kvant sistemlərində qarşılıqlı təsirin struktur mürəkkəbliyinin saxlanmasının təzahürü kimi baxıla bilər. Bu tədqiqat işində bu uyğunluğun müxtəlif cəhətləri araşdırılır. Bu analiz vasitəsi ilə görmək olar ki, struktur mürəkkəbliyi Standard Model əlaqəli simmetriyanın dağılmasından əvvəl mövcud olan və simmetriyanın dağılmasından sonra meydana gələn kəmiyyətləri özündə cəmləşdirir. Uzun müddətdir ki, mövcud olan suallar, nisbilik nəzəriyyəsinə əsaslanan paradoksu və 'məyayən məsafədə heybətli aksiya' sualları, sistemlərin struktur mürəkkəbliyi çərçivəsində qısaca müzakirə edilir.

İ.A. Mamedova, İ.Q. Qasımoğlu, N.A. Abdullayev

CuInS₂ –nin FOTOLÜMİNESSENSİYA XASSƏLƏRİ

CuInS₂ kristalları Brucen metodu ilə yetişdirilmiş və rentgen şüalarının difraksiyası və Raman səpilməsi metodları ilə xarakterizə edilmişdir. CuInS₂-nin fotoluminensensiyası konfokal lazer mikroskopiyası ilə tədqiq edilmişdir. Lüminensensiya intensivliyinin həyəcanlaşdırıcı işığın intensivliyindən qeyri-xətti (kvadratik) asılılığı müəyyən edilmişdir.

Ç.E. Səbzəliyeva, N.N. Mursakulov, X.M. Quliyeva, N.N. Abdalzadə

Ar⁺ İONLARI İLƏ İMPLANTASIYADAN SONRA CuInSe₂ NAZİK TƏBƏQƏLƏRİNDƏ YARANMIŞ DEFEKTLƏRİNİN DƏRİNLİK PROFİLLƏRİNİN ANALİZİ

Günəş elementlərində uducu təbəqə kimi istifadə olunan və yüksək konversiya effektivliyinə malik CuInSe₂ xalkopirit yarımkeçirici materiallarının ion implantasiyası xüsusi maraq doğurur. CuInSe₂ nümunəsi otaq temperaturunda ion cərəyan sıxlığı 3 mKA/sm², şüalanma dozası 10¹²-dən 3×10¹⁶ ion /sm²-ə qədər olan 30 keV enerjili Ar⁺ ionları ilə implantasiya olunmuşdur. 3×10¹⁵ ion/sm² dozada implantasiyadan sonra ümumi defektlər 3×10¹⁶ sm⁻³ olaraq hesablanmışdır ki, bu da implantasiya olunmuş hər Ar⁺ ionunun yaratdığı 525 defektdən yalnız 10-nun bərpa olunmamış qaldığını göstərir.

V.M. Əliyev, Q.İ. İsakov, C.Ə. Rəhimov, V.İ. Eminova, G.Ə. Əliyeva

Y_{1-x}Cd_xBa₂Cu₃O_{7-δ} İK MATERİALLARDA İTTRİ ELEMENTİNİN KADMI İLƏ ƏVƏZ EDİLMƏSİNDƏN ALINMIŞ NƏTİCƏLƏRİN ANALİZİ

İfratkeçirici Y_{1-x}Cd_xBa₂Cu₃O_{7-δ} (x=0÷1) polikristallarda ittri elementini kadmi elementi ilə əvəzləməsinin əlavə keçiriciliyin əmələgəlmə mexanizminə təsiri mexanizmi tədqiq edilmişdir. Göstərilmişdir ki, əvəzetmənin artması ilə nümunələrin xüsusi müqavimətləri (ρ) nəzərə çarpacaq dərəcədə artır, eyni zamanda onların keçid temperaturları (T_c) azalır.

Kadmi elementinin qatılığının 0,7 hissəyə qədər artdıqda nümunələrin kuper cütlərinin əmələgəlmə temperaturu (T^{*}) və psevdazolağın əmələgəlmə temperaturları əvvəlcə x=0,5-ə qədər artır, sonra azalmağa başlayır. Sayırıq ki, buna səbəb Cd-nin əlavə edilməsi nümunələrdə daxili gərginlik yaradır ki, bu da YBKO-da struktur defektləri əmələ gətirir.

Ş.Ş. ƏMİROV, A.İ. HƏSƏNOVA, N.Ə. MƏMMƏDOVA

TEZLİYİN İKİ QEYRİ-XƏTTİ KRİSTALDA İKİLƏŞMƏSİNİN NƏZƏRİYYƏSİNƏ DAİR

Tezliyin ikiləşməsinə iki müxtəlif qeyri-xətti kristalda sabit intensivlik yaxınlaşmasında baxılmışdır. Çevrilmənin effektivliyi nəzərə çarpacaq dərəcədə qarşılıqlı təsirdə olan dalğaların faza münasibəti ilə təyin olunur. By yaxınlaşmada kristalın uzunluğu, dalğa ədədləri fərqi və faza münasibətinin optimal qiymətləri üçün analitik ifadələr alınmışdır. Göstərilmişdir ki, ikinci kristalda dalğa ədədləri fərqi və qeyri-xətti əlaqə əmsallarını birinci kristalda olduğundan fərqli və optimal faza münasibəti seçməklə eyni kristalların olduğu hal ilə müqayisədə tezliyin çevrilməsinin effektivliyini kifayət qədər artırmaq olar.

Dilara Sadigova, Rasim Jabbarov

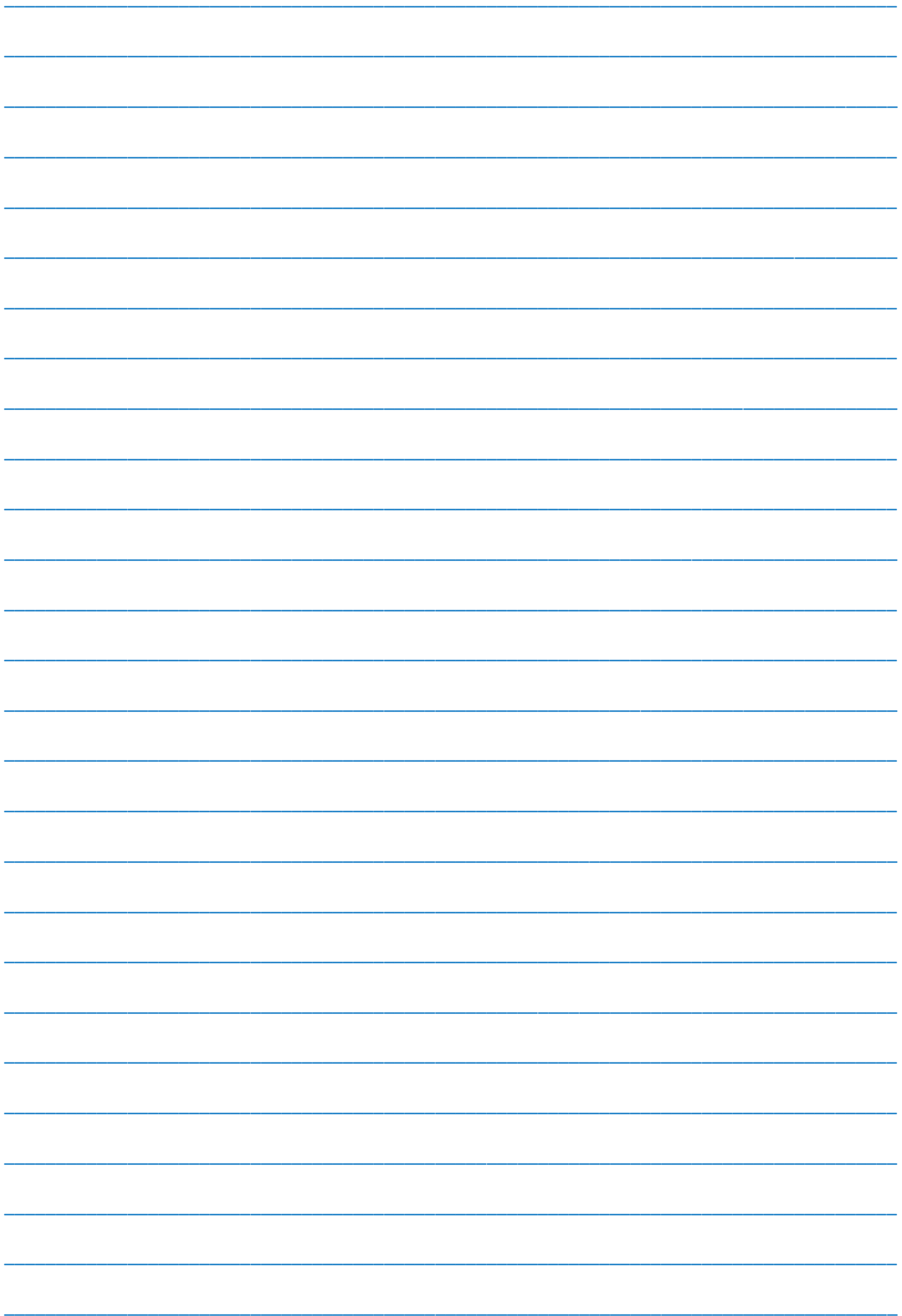
YÜKSƏK MÜNTƏZƏM QURULUŞLU FERROQNETİK PVDF/Fe₃O₄ NANOKOMPOZİT ÖRTÜYÜNÜN QURULUŞ VƏ MORFOLOJİ XARAKTERİSTİKASI

PVDF yarımkristal fluoropolimerdir, istilik stabilliyi, kimyəvi davamlılığı və pyezoelektrik xüsusiyyətləri kimi xüsusi keyfiyyətlərinə görə müxtəlif sənaye tətbiqlərində böyük maraq doğurmuşdur. β -fazasında qütblü faza mövcuddur. Sensorlar, aktuatorlar, enerji yığıma sistemləri, batareyalar, filtrlər, kimyəvi müharibə müdafiəsi, maqnetoelektrik və polimer əsaslı kompozitlər kimi bir çox tətbiq sahələrində istifadə olunmuşdur. Bu məqalədə PVDF/Fe₃O₄ nanokompozitinin β -faza fraksiyası X-rey difraksiyası analizi ilə ölçülmüşdür.

İ.İ. Əliyev, N.İ. Yaqubov, A.N. Sultanova, A.A. Həsənov, C.A. Ahmedova

Ga₂Sr-SrSe SİSTEMİNDƏ KİMYƏVİ QARŞILIQLI TƏSİRİN XARAKTERİ

Fiziki-kimyəvi analiz metodları (DTA, RFA, MQA, həmçinin sıxlığın və mikrobərkliyin ölçülməsi) vasitəsilə Ga₂Sr-SrSe sistemində kimyəvi qarşılıqlı təsir tədqiq edilmiş və onun T - x faza diaqramı qurulmuşdur. Müəyyən edilmişdir ki, Ga₂Sr-SrSe sistemi Sr-Ga-Se üçlü sisteminin kvazibinar kəsiyi olub, evtektika tiplidir. Ga₂Sr-SrSe sistemində otaq temperaturunda ilkin komponentlər əsasında kiçik sayda bərk məhlul mövcuddur. Mikroquruluş analiz vasitəsilə müəyyən edilmişdir ki, sistemdə otaq temperaturunda Ga₂Sr birləşməsi əsasında 5 mol % SrSe bərk məhlul əmələ gəldiyi halda, SrSe əsasında 3,5 mol % Ga₂Sr təşkil edir. Ga₂Sr və SrSe birləşmələri arasında əmələ gələn estetikanın tərkibi 25 mol % SrSe, temperaturu 850°C-dir. (SrSe)_{1-x}(Ga₂Sr)_x ($x=0,01; 0,02; 0,03$) bərk məhlul ərintilərinin rentgenoqrafik analizi nəticəsində qəfəs parametrləri hesablanmışdır, uyğun olaraq, SrSe birləşməsi üçün $a=6,243 \text{ \AA}$, bərk məhlul ərintiləri üçün, $a=6,263 \text{ \AA}$ (1 % Ga₂Sr) və $a=6,275 \text{ \AA}$ (2 % Ga₂Sr) və $a=6,298 \text{ \AA}$ (3 % Ga₂Sr). (SrSe)_{1-x}(Ga₂Sr)_x ($x=0,01; 0,02; 0,03$) bərk məhlul ərintilərinin elektrik keçiriciliyinin və termo-e.h.q-nin tərkibdən və temperaturda asılılığı öyrənilmişdir.



MÜNDƏRİCAT

1. CdGa₂Te₄ kristalının dinamik xassələrinin ab-initio tədqiqi
Z.A. Cahangirli, B.H. Mehdiyev, R.G. Seyidov, T.O. Bayramova, S.S. Osmanova 3
2. Günəş elementlərinin inkişaf perspektivləri
A.V. Qədirova, S.X. Məmmədova, S.Q. Nuriyeva 6
3. Bi₂Sr₂CaCu₂O_x əsasında qalın təbəqəli ifratkeçirici pilyonkanın alınması və tədqiqi
V.M. Əliyev, Q.İ. İsakov, C.Ə. Rəhimov, G.Ə. Əliyeva, S.Z. Dəmirova 11
4. CuAlS₂ əsaslı laminar quruluşun zərbə ionlaşması keçiriciliyi və tutumun kinetikasının spektral xarakteristikası
İ. Qasımoğlu, Q.S. Mehdiyev 15
5. EİM-1 üçfazlı düzləndiricinin parametrlərinin təkmilləşdirilməsinin tədqiqi üsulları
K.K. Əzizova, L.V. Məmmədov, G.X. Hüseynova, N.V. Kazımova 20
6. Polimer matrisli kompozitlərdə fazalararası qarşılıqlı təsirin diferensial skan kalorimetriya (DSC) və termogravimetrik analiz (TG) metodları ilə tədqiqi
Z.A. Dadaşov, G.X. Hüseynova, İ.S. Ramazanova, Ü.V. Yusifova, A.F. Nuraliyev, F.F. Yəhyayev 24
7. **FİZİKA, vol. XXXI, №1 2025, section: E** buraxılışında dərc olunan məqalələrin qısa xülasəsi 32



www.physics.gov.az