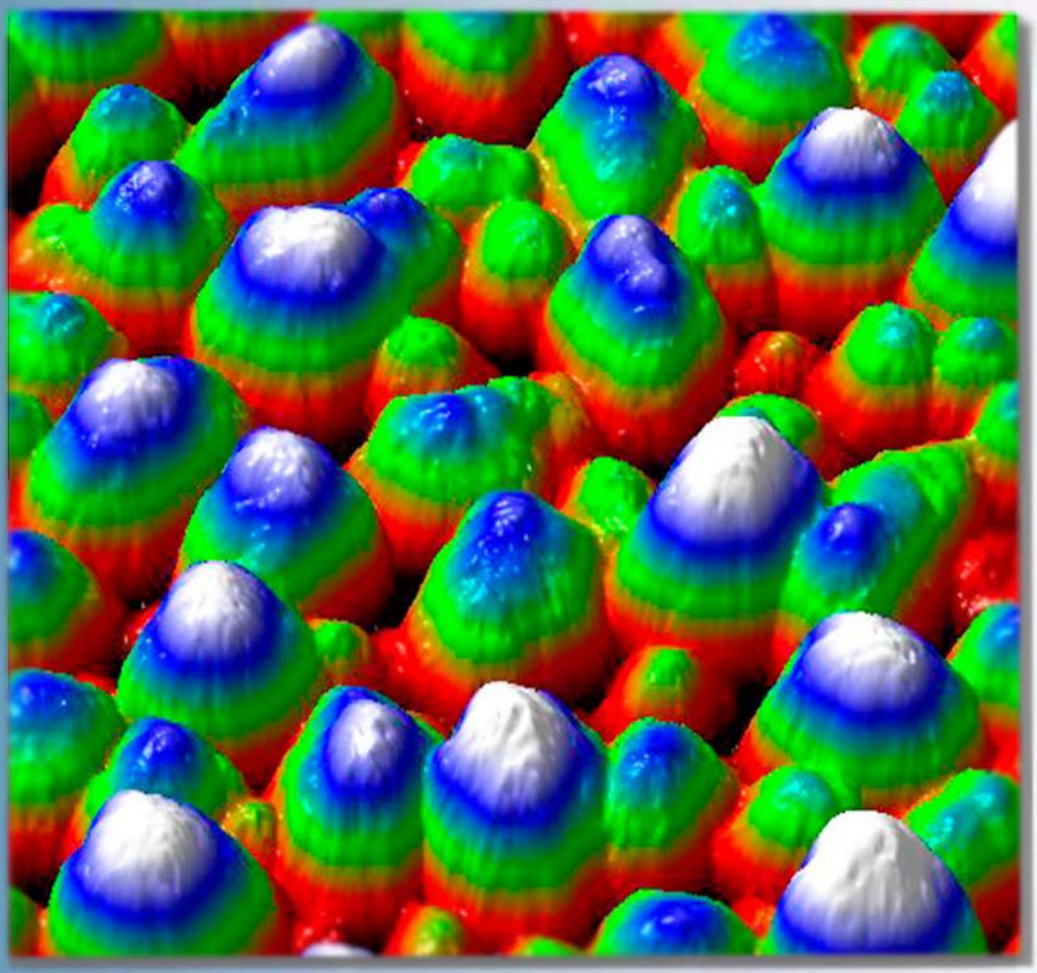
ISSN 1028-8546

Volume XXIX Number 2
Section: Az July 2023

Azerbaijan Journal of Physics

Fizika



www.physics.gov.az
www.physics.gov.az/ajpfizika.html

Institute of Physics
Ministry of Science and Education Republic of Azerbaijan

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

ISSN 1028-8546
vol. XXIX, Number 02, 2023
Section: Az

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
Mirhasan Seyidov, Turkey
Dieter Hochheimer, USA
Victor L'vov, Israel
Majid Ebrahim-Zadeh, Spain
Huseyn Ibragimov, Azerbaijan
Nazim Mamedov, Azerbaijan
Anatoly Boreysho, Russia
Mikhail Khalin, Russia
Javad Abdinov, Azerbaijan
Faik Mikailzade, Turkey
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-1143, 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: jophphysics@gmail.com
Internet: www.physics.gov.az

Published at "_____"
_____str., Baku

Sent for printing on: __.__. 201_
Printing approved on: __.__. 201_
Physical binding:_____
Number of copies:_____200
Order:_____

It is authorized for printing:

α-Si:H ƏSASINDA GÜNƏŞ ELEMENTLƏRİNDƏ GEDƏN EMİSSİYA PROSESLƏRİNİN TƏDQİQİ

E.Ə. KƏRİMOV, S.N. MUSAYEVA
Azərbaycan Texniki Universiteti,
Bakı, AZ-1073, H. Cavid pros. 25.
E-mail: E_Kerimov.fizik@mail.ru

Qadağan zonasındakı hallarda tutulan yük daşıyıcıların ρ_{trap} qiymətləndirilməsi üçün donor- və akseptorabənzər və α-Si:H yürüklük dəliyində amfoter tipli halların modelləri istifadə olunmuşdur. Keçiricilik zonasının quyruğundakı halların akseptorabənzər olduğu qəbul edilmişdir: bu hallar elektronlarla tutulduqada mənfi, elektrondan azad olduğu haıda isə neytraldır. Valent zonanın quyruğunda hallar özünü donorabənzər kimi aparır, zonaların quyruğunda donora- və akseptorabənzər hallar isə eksponensial paylanmaya malikdir.

Açar sözlər: günəş enerjisi, silisium, yük daşıyıcılar, tələlər, donor, akseptor, amfoter, elektron-deşik cütlüyü.
UOT: 666.9-129
PACS: 73.40.Ns, 73.40.Sx, 72.10.-d

Günəş elementlərinin yaradılması üçün α-Si:H təbəqələrinin istifadə olunmasında əsas rolu bu təbəqələrin optik udmasının kristallik silisiumda olduğundan 20 dəfə artıq olması faktı oynamışdır. Görünən günəş işığının əhəmiyyətli dərəcədə udulması üçün maya dəyəri kifayət qədər yüksək olan 300 mkm qalınlıqlı silisium altlıqların istifadə olunması əvəzinə 0,5 – 1,0 mkm qalınlıqlı α-Si:H təbəqələrin alınması kifayətdir. Bundan əlavə, böyük sahəyə malik ifrat nazik təbəqə şəklində amorf silisiumun alınması mümkünlüyü daha perspektivli sayılır və texnoloji imkanlar daha yüksək qiymətləndirilir. Monokristallik silisium əsasında günəş batareyalarının elementlərinin hazırlanması zamanı baxılan texnologiyada kəsilmə, pardaxlama və polirə olunmaqla bağlı texniki itkilər mövcud deyildir.

Amorf silisiumda Fermi kvazisəviyyələri keçirici zonaların sərhədlərindən 2kT qiymətindən daha çox geri qalır. Belə yarımkeçirici üçün Bolsman statistikası ödənilir və sərbəst yük daşıyıcıların konsentrasiyasını aşağıdakı ifadə ilə təyin etmək olur [1]:

$$n = N_C \cdot exp[(E_{fn} - E_C)] \; ;$$

$$p = N_V \cdot exp[(E_V - E_{fp})] \; .$$

Qırılmış rabitələrlə şərtlənən hallar amfoter təbiətli qəbul edilir, yəni donora-, və ya akseptorabənzər hallarda ola bilir. Bu onunla izah edilir ki, onlar üç yük halında ola bilir: müsbət yüklənmiş (elektrondan azad), neytral (bu halda bir elektron mövcuddur) və mənfi (iki elektron vardır). Baxılan halda qırılmış rabitə yürüklük dəliyində iki elektrik səviyyəsinin yaranmasına gətirir: $E^{+/0}$ səviyyəsi *+/0* keçidinə, $E^{0/-}$ səviyyəsi isə *0/–* keçidinə uyğun gəlir. İki səviyyə arasındakı məsafəyə, artıq bir elektronla tutulmuş halda ikinci elektronun peyda olmasına lazım olan enerji (E_U korrelyasiya enerjisi) uyğun gəlir. Amorf yarımkeçiricilərin enerji zonalarının strukturlarının Mott və Devis modelində qırılmış rabitələrlə şərtlənən hallar qaus paylanmasına malikdirlər [2].

Bu halda yük və donora- və akseptorabənzər hallarda uyğun olaraq belə təyin olunacaq:

$$\rho_d = q \int_{E_V}^{E_C} N(E)[1 - f(E)]dE \; ;$$

$$\rho_a = -q \int_{E_V}^{E_C} N(E) f(E) dE,$$

burada, *f(E)* – enerji səviyyəsinin elektronla dolma ehtimalıdır.

Amfoter tipli hallarda yük isə belə hesablanır:

$$\rho_{at} = q \int_{E_V}^{E_C} N(E)[F^+(E) - F^-(E)]dE,$$

burada, $F^+(E)$, $F^-(E)$ – uyğun olaraq, sərbəst və ikiqat tutulmuş vəziyyətdə halların tapılma ehtimallarıdır.

Sadə halda – arxa elektroddan işığın əks olunması mövcud olmadıqda generasiyanın sürəti belə ifadə olunur:

$$G = G_0 \cdot \alpha(\lambda) \cdot exp[\alpha(\lambda)x],$$

burada, G_0 – dalğa uzunluğu λ olan düşən şüalanmanın intensivliyi; $\alpha(\lambda)$ – udulma əmsalı; x – günəş elementinin səthindən olan məsafədir.

Arxa elektroddan işığın əks olunması zamanı isə generasiya

$$G = \frac{G_0 \alpha(\lambda)}{1 - P}[exp(-\alpha x) + P exp(\alpha x)],$$

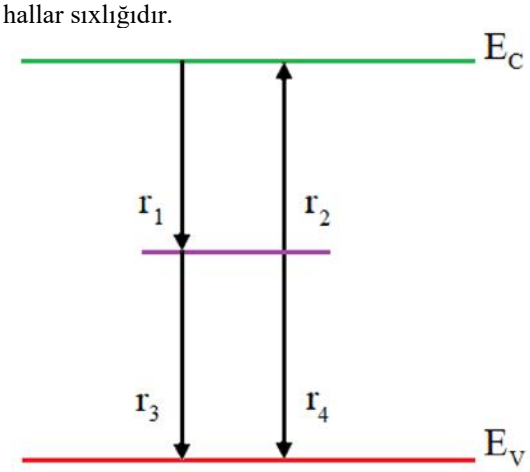
olacaqdır. Burada, P – buraxılma əmsalıdır.

Amorf yarımkeçirici üçün rekombinasiya sürəti bütün hallar üzrə – rekombinasiya sürətinin valent zonanın tavanından keçiricilik zonasının dibinə qədər inteqrallanması ilə hesablana bilər. Əgər $\eta r(E)$ rekombinasiya effektivliyi E enerjili vahid halda rekombinasiya sürəti kimi təyin olunarsa, rekombinasiyanın ümumi sürəti belə yazıla bilər:

$$R = \int_{E_V}^{E_C} N(E) \eta_r(E) dE,$$

131, H.Javid ave, AZ-1143, Baku
Institute of Physics
E-mail: jophphysics@gmail.com

burada, *N(E)* – yarımkeçiricinin yürüklük dəliyində hallar sıxlığıdır.



Şəkil 1. Diskret enerji səviyyənin tutulması və emissiya prosesləri.

Yük daşıyıcıların tutulması və emissiyasının yalnız yayılmış və lokallaşmış hallar arasında baş verdiyinin qəbul olunması, donora- və akseptorabənzər hallarda rekombinasiya proseslərinin təsviri üçün Şokli-Rid-Holl statistikasını istifadə etməyə imkan verir [3, 4]. Bu statistikaya uyğun olaraq diskret enerji səviyyəsinin tutulmasını – iki tutulma və iki emissiya proses təyin edir (şəkil 1): r_1, r_4 – uyğun olaraq E_t səviyyəsinə elektron və deşiyin tutulma sürəti, r_2 və r_3 isə elektron və deşiyin emissiya sürətləridir.

Cədvəl 1-də donora- və akseptorabənzər hallara elektron və deşiklərin bütün emissiya və tutulma prosesləri xarakterizə olunmuşdur. Cədvəl 1-də T_a və T_d – uyğun olaraq akseptora və donarabənzər hallar; v_{th} – yük daşıyıcıların istilik sürəti, N_t – tələlərin konsentrasiyası; σ_n^+, σ_p^0 – uyğun olaraq elektron və deşik üçün tələnin tutma en kəsiyi; e_n^-, e_p^0 – isə uyğun olaraq tutulmuş elektron və tələnin emissiya əmsalıdır. Cədvəldə yer alan «+», «0» və «–» indeksləri tələnin yük halını göstərir.

Cədvəl 1.

Donor- və akseptorabənzər hallarda elektron və deşiklərin tutulması və emissiya prosesləri

Proses	Keçid	Prosesin sürəti
T_d^+ halında elektronun tutulması	$T_d^+ + e \rightarrow T_d^0$	$r_1 = nv_{th}\sigma_n^+ N_t(1-f)$
T_a^0 halında elektronun tutulması	$T_a^0 + e \rightarrow T_a^-$	$r_2 = nv_{th}\sigma_n^0 N_t(1-f)$
T_d^0 halında deşiklərin tutulması	$T_d^0 + h \rightarrow T_d^+$	$r_3 = pv_{th}\sigma_p^0 N_t f$
T_a^- halında elektronun tutulması	$T_a^- + h \rightarrow T_a^0$	$r_3 = pv_{th}\sigma_p^- N_t f$
T_d^0 halında elektronun emissiyası	$T_d^0 \rightarrow T_d^+ + e$	$r_2 = e_n^0 N_t f$
T_a^- halında elektronun emissiyası	$T_a^- \rightarrow T_a^0 + e$	$r_2 = e_n^- N_t f$
T_d^+ halında deşiklərin emissiyası	$T_d^+ \rightarrow T_d^0 + h$	$r_4 = e_p^+ N_t(1-f)$
T_a^0 halında deşiklərin emissiyası	$T_a^0 \rightarrow T_a^- + h$	$r_4 = e_p^0 N_t(1-f)$

Termodinamik tarazlıq halında detal tarazlıq prinsipinə uyğun olaraq $r_1 = r_2$ və $r_3 = r_4$ olacaqdır. Bu zaman halın dolma ehtimalı Fermi-Dirak funksiyası ilə təsvir olunur:

$$f = [1 + exp(E_t - E_F)]^{-1}.$$

Bu ifadədən emissiya əmsalları belə ifadə olunacaqlar:

$$e_n^0 = v_{th}\sigma_n^+ N_C exp\left(\frac{E_t - E_C}{kT}\right),$$

$$e_n^+ = v_{th}\sigma_n^0 N_V exp\left(\frac{E_V - E_t}{kT}\right).$$

Rekombinasiyanın ümumi sürəti belə yazılır:

$$R = r_1 - r_2 = r_3 - r_4. \quad (1)$$

Son ifadəni və emissiya və tutulma sürətləri üçün ifadələri nəzərə alaraq tutulma funksiyasını ala bilərik:

$$f = \frac{nv_{th}\sigma_n^+ + e_p^+}{nv_{th}\sigma_n^+ + pv_{th}\sigma_p^0 + e_n^0 + e_p^+}. \quad (2)$$

(1) ifadəsini r_1, r_2, r_3 və r_4 üçün olan tənlikdə nəzərə alsaq rekombinasiya effektivliyini təyin edə bilərik:

$$\eta_r = \frac{R}{N_t} = v_{th}^2\sigma_n^+\sigma_p^0 \frac{np - n_i^2}{nv_{th}\sigma_n^+ + pv_{th}\sigma_p^0 + e_n^0 + e_p^+}.$$

Teylor və Simmons (2) ifadəsinin aşağıdakı ifadə ilə approksimasiya olunmasını göstərmişlər:

$$f = \frac{nv_{th}\sigma_n^+}{nv_{th}\sigma_n^+ + pv_{th}\sigma_p^0 + e_n^0} \quad (3)$$

Deşiklərin dolma funksiyası belə yazılır:

$$1 - f = \frac{pv_{th}\sigma_n^+}{nv_{th}\sigma_n^+ + pv_{th}\sigma_p^0 + e_n^0}.$$

(3) ifadəsi aşağıdakı kimi çevrilə bilər:

$$f = \frac{n\sigma_n^+}{n\sigma_n^+ + p\sigma_p^0}\left[1 + \frac{e_n^0}{nv_{th}\sigma_n^+ + pv_{th}\sigma_p^0}\right]^{-1}$$

Bu halda kvadrat mötərizə içində olan kəmiyyət Fermi-Dirak funksiyası olacaqdır. Deməli:

$$f = \frac{n\sigma_n^+}{n\sigma_n^+ + p\sigma_p^0}\left[1 + exp\left(\frac{E_t - E_{fnt}}{kT}\right)\right]^{-1}$$

Tutulmuş elektronlar üçün Fermi kvazisəviyyəsi:

$$E_{fnt} = E_C + kTln\left(\frac{n\sigma_n^+ + p\sigma_p^0}{N_C\sigma_n^+}\right).$$

Analoji olaraq deşiklərin dolma funksiyası:

$$1 - f = \frac{p\sigma_p^0}{n\sigma_n^+ + p\sigma_p^0}\left[1 + exp\left(\frac{E_{fpt} - E_t}{kT}\right)\right]^{-1}$$

Tutukmuş deşiklərin Fermi Fermi kvazisəıviyyəsi:

$$E_{fpt} = E_V - kTln\left(\frac{n\sigma_n^+ + p\sigma_p^0}{N_V\sigma_p^0}\right).$$

Rekombinasiyanın effektivliyi üçün alırıq:

$$E_t > E_{t0}\ olduqda \quad \eta_r = v_{th}\frac{\sigma_n^+\sigma_p^0 np}{n\sigma_n^+ + p\sigma_p^0}\left[1 + exp\left(\frac{E_t - E_{fnt}}{kT}\right)\right]^{-1}$$

$$E_t < E_{t0}\ olduqda \quad \eta_r = v_{th}\frac{\sigma_n^+\sigma_p^0 np}{n\sigma_n^+ + p\sigma_p^0}\left[1 + exp\left(\frac{E_{fpt} - E_t}{kT}\right)\right]^{-1}.$$

Bu ifadələrdə E_{t0} elektron və deşiklərin emissiya əmsallarının bərabər olduğu səviyyəyə uyğun gəlir:

$$E_{t0} = \frac{E_V + E_C}{2} - \frac{kT}{2}ln\left(\frac{\sigma_n^+ N_C}{\sigma_p^0 N_V}\right).$$

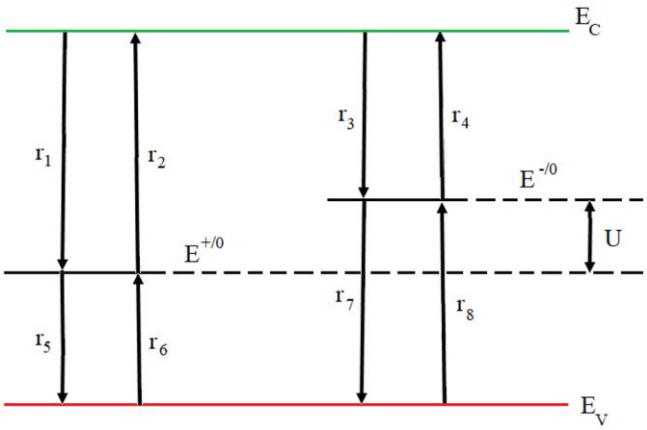
η_r üçün olan ifadəni istifadə edərək, Fermi-Dirak funksiyasını K temperaturda approksmasiya etməklə rekombinasiya sürəti üçün aşağıdakı ifadəni ala bilərik:

$$R = v_{th}\frac{\sigma_n^+\sigma_p^0 np}{n\sigma_n^+ + p\sigma_p^0}\int_{E_V}^{E_{fpt}} N(E)dE.$$

Belə olan halda lokallaşmış hallarda tutulan yük aşağıdakı ifadə ilə hesablanacaqdır:

$$\rho = -q\left(\int_{E_V}^{E_{fpt}} N(E)dE + \frac{n\sigma_n^+}{n\sigma_n^+ + p\sigma_p^0}\int_{E_{fpt}}^{E_{fpn}} N(E)dE\right).$$

Amfoter tipli hallarda rekombinasiya prosesləri Sax və Şokli tərəfindən nəzəri tədqiq edilmişdir. Şəkil 2-də belə hallarda elektron və deşiklərin emissiya və tutulma prosesləri göstərilmişdir.



Şəkil 2. Amfoter tipli hallarda elektron və deşiklərin tutulması və emissiya prosesləri.

Cədvəl 2-də şəkil 2-də təqdim olunan proseslərin izahı verilir.

Cədvəl 2.

Amfoter tipli hallarda elektron və deşiklərin tutulması və emissiya prosesləri prosesləri

Proses	Keçid	Prosesin sürəti
Elektronun tutulması	$D^e + e \to D^0$	$r_1 = nv_{th}\sigma_n^+ N_{DB}F^+$
Elektronun emissiyası	$D^0 \to D^+ + e$	$r_2 = e_n^0 N_{DB}F^0$
Elektronun tutulması	$D^0 + e \to D^-$	$r_3 = nv_{th}\sigma_n^0 N_{DB}F^0$
Elektronun emissiyası	$D^- \to D^0 + e$	$r_4 = e_n^- N_{DB}F^-$
Deşiyin tutulması	$D^0 + h \to D^+$	$r_5 = pv_{th}\sigma_p^0 N_{DB}F^0$
Deşiyin emissiyası	$D^+ \to D^0 + h$	$r_6 = e_p^+ N_{DB}F^+$
Deşiyin tutulması	$D^- + h \to D^0$	$r_7 = pv_{th} - N_{DB}F^-$

Cədvəldə *D* – qırılmış rabitə, *F* – tutulma funksiyası, «+», «*0*» və «–» indeksləri isə qırılmış rabitənin yük halıdır.

Bu halda emissiya əmsalları belə ifadə olunacaqdır:

$$e_n^0 = 0{,}5v_{th}\sigma_n^+ N_C exp\left(\frac{E^{+/0} - E_C}{kT}\right);$$

$$e_n^- = 2v_{th}\sigma_n^0 N_C exp\left(\frac{E^{0/-} - E_C}{kT}\right).$$

$$e_t^+ = 2v_{th}\sigma_p^0 N_V exp\left(\frac{E_V - E^{+/0}}{kT}\right);$$

$$e_n^0 = 0{,}5v_{th}\sigma_p^- N_V exp\left(\frac{E_V - E^{0/-}}{kT}\right).$$

Yük halları üçün tutulma funksiyası:

$$F^+ = \frac{P^0P^-}{N^+P^- + P^0P^- + N^+N^0};$$

$$F^0 = \frac{N^+P^-}{N^+P^- + P^0P^- + N^+N^0};$$

burada, $N^+ = n\cdot v_{th}\cdot\sigma_n^+ + e_p^+$; $N^0 = n\cdot v_{th}\cdot\sigma_n^0 + e_p^0$; $P^- = p\cdot v_{th}\cdot\sigma_p^- + e_n^-$; $P^0 = p\cdot v_{th}\cdot\sigma_p^0 + e_n^0$.

Bu ifadələrdən istifadə edərək, rekombinasiya effektivliyini təyin edirik:

$$\eta_r = r_1 - r_2 + r_3 - r_4 = v_{th}^2(pn - n_i^2)\frac{\sigma_n^+\sigma_p^0 P^- + \sigma_n^0\sigma_p^- N^+}{N^+P^- + P^0P^- + N^+N^0}.$$

Bir qırılmış rabitəyə uyğun gələn orta yük isə belə təyin olunur:

$$Q = q\cdot(F^{+} - F^{-}).$$

NƏTİCƏ

Kristallik yarımkeçiricilərin qadağan zonasında rekombinasiya mərkəzləri kimi təsir edən yalnız diskret səviyyələr mövcud olduğundan, rekombinasiya prosesləri Şokli-Rid-Holl modeli ilə təsvir olunacaqdır. Bir qayda olaraq, ümumi fəza yükünə qadağan zonasında tutulmuş hallardakını yük daşıyıcıların verdiyi əlavəni hallar sıxlığının aşağı qiymətə malik olması səbəbindən nəzərə almamaq mümkündür. Amorf silisiumun yürüklük dəliyində elektron hallarının kvazikəsilməz paylanması mövcuddur ki, bu şərt də materialın elektron xassələrinə nəzərəçarpacaq dərəcədə təsir edir.

[1] *М.С. Нечаев, Д.Ю. Паращук.* Квантово-химическое исследование новых редокс-медиаторов на основе комплексов меди и кобальта для фото-электрохимических солнечных батарей. Вестник Московского университета. (Серия 3). 2012, № 6, с. 67-70.

[2] *R. Loganathan et al.* Journal of Alloys and Compounds, 2014, 616, p. 363-371, (IF 2.726).

[3] *Ю.Д. Арбузов, В.М. Евдокимов*. Основы фотоэлектричества. М.: Изд-во ГНУ ВИЭСХ, 2007. 292 с.

[4] *H. Lindstrom, A. Holmberg, E. Magnusson et al.* A New Method for Manufacturing Nanostructured Electrodes on Plastic Substrates. Nano Letters. 2001, 1 (2), p. 97-100.

E.A. Kerimov, S.N. Musayeva

EMISSION PROCESSES IN SOLAR ELEMENTS BASED ON α-Si:H

Models of donor- and acceptor-like states, as well as amphoteric states in the *α*-Si:H mobility gap, were used to estimate the charge of carriers trapped on states in the forbidden zone trap. It is assumed that the states at the tail of the conduction band are acceptor-like: they are negative when occupied by an electron and neutral when free of an electron. The states at the tail of the valence band have donor-like behavior, while the donor- and acceptor-like states at the tails of the zones have an exponential distribution.

Э.А. Керимов, С.Н. Мусаева

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭМИССИИ В СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ НА ОСНОВЕ α-Si:H

Для оценки заряда носителей, захваченных на состояния в запрещенной зоне ρ_{trap}, использовались модели доноро- и акцепторoподобных состояний, а также состояний амфотерного типа в щели подвижности *α*-Si:H. Принимается, что состояния на хвосте зоны проводимости являются акцепторoподобными: они отрицательны, когда заняты электроном, и нейтральны, когда свободны от электрона. Состояния на хвосте валентной зоны имеют донороподобное поведение, доноро- и акцепторoподобные состояния на хвостах зон –экспоненциальное распределение.

Qəbul olunma tarixi: 17.01.2023

"FAKE FACTOR" METODUNDAN İSTİFADƏ EDƏRƏK HADRONİK TAU LEPTONUN ÖYRƏNİLMƏSİ

NAZİM Əli HÜSEYNOV
Elm və Təhsil Nazirliyinin Fizika İnstitutu,
Azərbaycan, Bakı, Az-1143, H.Cavid pr.131.
nguseynov@jinr.ru

Təqdim olunan işdə elektrik yüklü, eyni işarəli iki yüngül və qarışıq leptonun üst kvark cütü ilə birlikdə yaranması və Standart Model çərçivəsində Hiqqs bozonun hadronik τ_{had}^{vis} parçalanmalarında alınan məhsullarını müəyyən etmək üçün √s=13 TeV və 2LSS1τ-də qiymətləndirilən hadronik parçalanan τ leptonun alqoritmi tədqiq edilmişdir. Alqoritm təkrarlanan neyron şəbəkələrinə (RNN) əsaslanır.

Yenidən qurulmuş yüklü zərrəciklərin izləri və kalorimetrin enerji çoxluqlarında τ_{had}^{vis} üçün verilənlər yüksək dəqiqlikli ayırdetmə dəyişənlərindən asılıdır. √s=13 TeV-ə uyğun alqoritmdə proton-proton toqquşmalarında gözlənilən nəticələrin simulyasiyası və BDT yaxınlaşması ilə müqayisəsi aparılmışdır.

Açar sözlər: Fake Faktor metodu, Hadronik τ lepton, RNN, yüklü hissəciklərin izləri
UOT: 539.1

Tau leptonların hadronik parçalanması

1.777 GeV kütləyə malik τ lepton ən ağır yüklü lepton hesab olunur [1]. τ leptonların ehtimal olunan parçalanma hallarının 65%-i hadronik şəkildə baş verir. Bütün hadronik parçalanma məhsulları 72 və 22%-li bir və yaxud üç yüklü piondan, digər hadronik parçalanmalar yüklü K mezon ibarətdir. Həmçinin 68% hadronik parçalanmaların ən az birində neytral pionun əmələ gəlməsi baş verir. Həmçinin, neytral pionun əmələ gəlməsi, τ lepton parçalanması ilə əlaqəli olan neytral və yüklü hadronların parçalanması zamanı da baş verən proseslərin bir hissəsini təşkil edir. τ_{had}^{vis} qiyməti detektor daxilində parçalanan məhsullar vasitəsi ilə təyin olunur. Hadronik τ parçalanmalarda əsas fon mənbəyi kvarkların və qluonların parçalanması nəticəsində əmələ gələn yüksək enerjili hadronlar şırnağıdır [2]. Şırnaqlardan "imtina" şərtində, kalorimetr daxilində yaranan məlumatlara əsaslanan müqayisə dəyişənlərindən istifadə olunmaqla, τ_{had}^{vis}-nin müəyyənləşdirilmə mərhələsi həyata keçirilir. Prosesdə iştirak edən elektronlar isə fonun mühüm hissəsini təşkil etməklə yanaşı yüklü bir hadronla τ leptonun parçalanma fazasının eyni olmasını göstərə bilirlər.

Xüsusi üsullardan istifadə etməklə fonu minimuma endirmək mümkündür [3]. τ_{had}^{vis}-nun kolorimetirdə böyük ehtimalla bərpa olunması, iz və enerjisi müəyyən olunan mövcud klasterlərdəki enerjilərin cəmi şəklində təyin olunur [3, 4]. Yenidən qurulmuş və ya modifikasiya olunmuş alqoritmlər formalaşmış şırnaqlar vasitəsi ilə yenidən səpilir. Həmçinin, şırnaqlar üçün p_T>10GeV və $|\eta|$<2.5 şərtinin ödənilməsi tələb olunur. τ_{had}^{vis} qiyməti başlanğıc şırnağa toxunan istiqamətində, AR<0.2 intervalında bütün izlərin ən böyük p_T hissəsi kimi müəyyən edilir və kütləsi sıfır olaraq təyin edilir. İzlərin τ_{had}^{vis} istiqamətində (AR<0.2) və izolyasiya (0.2<AR<0.4) regionunda olması ehtimal olunur; izlər p_T-dən, silisium detektorlarındakı toqquşmaların sayından və τ -nun ən yüksək qiyməti ilə əlaqəli olan eninə və uzununa təsir parametrlərindən asılıdır. Təyin olunmuş izlərin sayı prosesdə başlanğıc say kimi qəbul edilir.

Hadronik τ bir ("1-prong" parçalanma) və üç ("3-prong" parçalanma) yüklü piona çevrilir və 1 və 3 izləri τ_{had}^{vis} kimi yenidən qurulur. [4]-cü ədəbiyyatda τ_{had}^{vis}-nin enerjiyə görə dəyişmə intervalı təsvir edilmişdir. τ enerjisinin qiyməti dəqiq ifadə olunan (enerji şəklində) iki əlavə düzəlişdən ibarətdir. τ lepton oxları AR<0.2 intervalında hadronik dəyişən kimi ifadə olunmaqla, top klasterlərin enerji cəmi bərabər korreksiya və verilənlərin toplanması şəklində qəbul olunur.

τ_{had}^{vis} hissəciyinin axını metodundan, əlavə kalorimetr və izlənilmiş məlumatlar ilə gücləndirilmiş reqressiya kimi qəbul olunan çox variantlı texnikada istifadə olunur. τ_{had}^{vis} yenidən qurulması kvark və qluonlarla başlanan şırnaqlar fonuna təsir etmir. Fonu şırnaqlardan ayırmaq üçün ayırdetmə alqoritmindən istifadə olunur. τ leptonunun müəyyən edilməsi gücləndirilmiş BDT metoduna əsaslanır [6]. Fonda verilən siqnal və iki şırnaqlı hadisələr üçün BDT-də modelləşdirilmiş ($Z/\gamma^* \to \tau\tau$) 1-izli və 3-izli τ_{had}^{vis} parçalanmalar hesablanmışdır. Ədəbiyyatda təsvir olunduğu kimi, BDT-də τ_{had}^{vis} -nin ətrafında (əsas, və ya izolyasiya bölgəsində) tapılan izlərə və top klasterlərə əsaslanan dəyişənlər cəm şəklində istifadə olunur. Müxtəlif τ -ların müəyyən olunma effektivliyinə uyğun üç iş nöqtəsi götürülmüşdür. İş nöqtələri üçün yenidənqurma və müəyyənetmə effektivliyi 1 və 3 xətli t parçalanmaları üçün 60% (50%), 55% (40%) və 45% (30%) təşkil edir [4].

Taunun müəyyən olunma effektivliyinin ölçülməsi üçün $Z \to \tau_\mu \tau_{had}$ ilə genişləndirilmiş məlumat nümunəsi və zond metodundan istifadə olunmuşdur. Bir τ lepton muona, digər leptonlar isə əlaqəli neytrinolar şəklində hadronik parçalanır. Şablon fit metodunda məlumatları fon qarışıqlarında qiymətləndirmək üçün iz çoxluğundan istifadə olunur. İzlər çoxluğu τ_{had}^{vis} ilə əlaqəli (AR<0.2) və xarici (0.2<AR<0.6) izlərin cəmi kimi müəyyən edilir.

Xarici izlərə (1) və (2) ifadələrində göstərilən şərtlər daxilində cavab vermək mümkündür.

$$D_{outer} = min\left(\frac{p_T^{core}}{p_T^{outer}}\right) \quad (1)$$

$$\Delta R(\text{əsas, xarici}) < 4 \quad (2)$$

131, H.Javid ave, AZ-1143, Baku
Institute of Physics
E-mail: jophphysics@gmail.com

τ-ların müəyyən olunma tələbini tətbiq etməzdən əvvəl məlumatla siqnalın arasında əhəmiyyətlilik və uyğunluq qiymətləndirilir. Müxtəlif τ-ların müəyyən olunduğu iş nöqtələrinin tətbiqindən sonra siqnal məlumatlarından fonların çıxarılması tələb olunur. Müəyyən bir iş nöqtəsi üçün effektivliyin qiyməti alınan siqnal hadisələrindəki sayın nisbəti ilə hesablanır. Müxtəlif τ-ların orta səviyyədə müəyyənetmə tələbindən əvvəl və sonra izlər çoxluğunun paylanması, τ leptonun yenidən qurulması və müəyyən olunması ATLAS əməkdaşlığında yerləşən τ qiymətləndirmə qrupunun nəticələrində ətraflı təsvir edilmişdir [4]. [4] ədəbiyyatının 4-cü şəklində orta τ leptonun müəyyən olunma tələbinin tətbiqindən əvvəl və sonra iz çoxluğunun paylamaları verilmişdir. İzlər çoxluğu: həmin ədəbiyyat müəyyən edildiyi kimi, $D_{xarici} < 4$ tələbini yerinə yetirən $0.2<\Delta R<0.6$ əsas və xarici izlərin sayının cəmindən ibarətdir. Verilənlər ilə simulyasiya arasındakı kiçik fərqləri nəzərə alaraq müəyyən səviyyədə identifikasiyadan keçmək üçün τ_{had}^{vis} siqnalında verilən effektivliyin (ε_{Data}) simulyasiya effektivliyə (ε_{MC}) olan nisbəti kimi təyin olunan korreksiya faktoru nəzərə alınmalıdır. Simulyasiyada iştirak etməyən taunun müəyyən olunmasının effektivliyi (ε_{MC}) bir iz və $pT > 20$ GeV olan τ_{had}^{vis} verilənləri üçün (ε_{Data}) müşahidə olunan səviyyəyə çatdırmaq üçün lazım olan miqyas faktorları ($\varepsilon_{Data}/\varepsilon_{MC}$) eyni vahiddə uyğunluğu müəyyən edilmişdir. Miqyas faktoru ölçülən effektivliyin modelləşdirmə effektivliyinə olan nisbəti şəklində götürülür. Göstərilən amillər modelləşdirmədə taunun müəyyənedilmə effektivliyini ölçülən səviyyəyə *çatdırmaq* üçün tələb olunur. Bir və üç izli τ_{had}^{vis} üçün uyğunlaşdırılmış əmsallar və korreksiya faktorunun ölçülməsində qeyri-müəyyənliklər müvafiq olaraq bir (üç) izlər üçün təxminən 5% (6%) təşkil edir [4].

τ_{had}^{vis}-ni elektronlardan ayırmaq üçün ehtimal xarakterli diskriminatordan istifadə olunur. $AR<0.4$ intervalında τ lepton üçün qurulmuş proses yenidən hazırlanmış elektron həndəsəsi ilə uyğunlaşdırılır. Elektronun ehtimala əsaslanan identifikasiya alqoritmi boş iş nöqtəsindən keçərsə, göstərilən hallar qəbul edilmir. Ehtimal halı üzrə göstərilən qiymətlər p_T və $|\eta|$-dən asılı olaraq τ_{had}^{vis} üçün 95% sabit effektivliklə təyin etmək üçün tənzimlənir. Bir elektronun tau lepton kimi $Z\rightarrow ee$ hadisələrində səhv təyin edilmə ehtimalı etiket və araşdırma metodu ilə təyin olunur. Yanlış müəyyənetmə ehtimalı 0.5 ilə 2.5% arasında dəyişir və müvafiq uyğunluq əmsalları $|\eta|$-dən asılı olaraq 3-14% dəqiqliklə ölçülür [4]. τ_{had}^{vis} -nin yenidən qurulma ehtimalı qeyri-adi yenidən qurma ehtimalı ilə müqayisədə fərqlənir.

RNN τ-nun təyin edilməsinin qiymətləndirilməsi

Öncə təsvir edilən τ-nun yenidən qurulma alqoritmi detektorda şırnaqların izlərini və digər hissəciklərin eyniliyini təmin etmir. Hardonik tau lepton parçalanmalarını müəyyən etmək üçün xüsusi alqoritmlərdən istifadə olunur. Bir sıra BDT-lər ATLAS təcrübələrində τ_{had}^{vis} şırnaqlarını ayırmaq üçün geniş istifadə edilmiş və şırnaqların qəbul olunmamasını əhəmiyyətli dərəcədə artıran RNN ilə əvəz edilmişdir. RNN-də istifadə edilən ilkin dəyişənləri [5]-da, BDT əsaslı taunun (tau sözlərini tau işarəsi ilə əvəz etmək daha uyğundur, məncə) müəyyən olunma alqoritmində istifadə [3]-də verilmişdir. RNN-də, τ_{had}^{vis} verilənləri ilə bağlı izlər və klasterlər üçün aşağı səviyyəli giriş dəyişənlərin kombinasiyasından, izlər və kalorimetrin verilmiş kəmiyyətlərindən yüksək dəqiqliklə hesablanmış kəmiyyətlərdən istifadə olunmuşdur. Hər bir izdə istifadə edilən məlumat eninə impuls (p_T^{iz}), eninə (d_0^{iz})(düstur kimi dəyişmək lazım) və uzununa ($z_0^{iz} sin\theta$) (düstur kimi dəyişmək lazım) təsir parametrləri, τ_{had}^{vis} oxuna qədər olan bucaq məsafəsi ($\Delta\eta^{iz}$, $\Delta\varphi^{iz}$) və müxtəlif Si detektor təbəqələrində baş verən toqquşmadakı izlərin sayından ibarətdir. Daxili piksel detektorunun təbəqələri (N_{ILB}), digər piksel detektorlarının təbəqələri (N_{Pixel}) və mikrostrip detektorların təbəqələri (N_{SCT}) ilə göstərilmişdir. TopoClusterdə eninə enerji ($E_T^{klaster}$), τ_{had}^{vis} oxuna paralel bucaq məsafəsi ($\Delta\eta^{klaster}$, $T\Delta\varphi^{klaster}$) və klasterlər verilmişdir.

τ təyininin qiymətləndirilməsi

RNN taunun müəyyən olunma alqoritmi $\gamma^*\rightarrow\tau\tau$ (siqnal) və iki-şırnaqlı fon hadisələrində statistik cəhətdən sərbəst sınaq nümunələrində qiymətləndirilir. RNN-nin qiymətləndirilməsi ATLAS təcrübəsində istifadə olunan BDT əsaslı taunun təyin olunma alqoritmi ilə müqayisə edilir [3]. Yanlış təyin edilmiş τ_{had}^{vis} üçün RNN-nin tətbiqi ATLAS əməkdaşlığındakı τ qiymətləndirmə qrupunun nəticələrində ətraflı qeyd edilmişdir [5]. [5]-ci ədəbiyyatın 4-çü şəklində aşkar olunduğu kimi, verilənləri qəbul etməmək gücü 1 və 3 uclu başlıqlarla τ_{had}^{vis} və müstəqil olaraq hər iki təsnifat üçün göstərilən həqiqi τ_{had}^{vis} seçim effektivliyindən asılı olaraq yanlış müəyyən edilmiş τ_{had}^{vis} fonların seçiminin effektivliyinin qiymətindən müəyyən edilir. RNN əsaslı klassifikatorun qəbul etməmək gücü bütün hallarda siqnal seçmə effektivliyi üçün verilmiş BDT əsaslı klassifikatorun ehtimallarından iki dəfə yaxşıdır. RNN qiyməti pT və μ-dən asılı olmayaraq, qəbul olunmamış həqiqi τ_{had}^{vis} payına uyğun gəlir. Siqnal və fon halları üçün RNN qiymətlərinin paylanması [5] ədəbiyyatın 5-ci şəklində göstərilmişdir. Şəkildən göründüyü kimi, fizika analizlərindən istifadə etməklə artan və qəbul olunmayan dörd iş nöqtəsi müəyyən edilmişdir. Üc başlıqlı fon nümunəsinin statistikası yüksək RNN qiymətləri ilə doldurmaq üçün kifayət deyil. Hətta RNN qiyməti > 0.55 kimi müəyyən edilən sıx iş nöqtəsi üçün də fon effektivliyinin qiymətləndirilməsinə cüzi təsir göstərir. Müvafiq siqnal seçmə effektivliyi və qəbul etməmək halları [5]-ci məqalənin 2-ci cədvəlində verilmişdir.

Həqiqi τ_{had}^{vis} seçilmiş effektivliyin eninə impulsdan və şırnağların kəsişməsində toplanan qarşılıqlı təsirlərin sayından asılılığı tədqiq olunmuşdur. Siqnal seçiminin p_T üçün effektivliyi çevrilmə prosesləri istisna olmaqla, digər hallarda p_T-dən asılı deyil. Siqnal effektivliyinin 5-10% azalması ədəbiyyatlarda təsvir olunduğu kimi tam hissəcik axını, tau enerjisi üçün kalorimetrdə alınan məlumatdan və siqnal effektivliyinin hamarlanmasından istifadə etməklə həyata keçirilmişdir. Böyük sıxlıqlı iş nöqtəsi üçün siqnal seçimində 10% effektivlik, şırnaq kəsişməsində və kalorimetrin daxili bölmələri arasında (bölgə ətrafında) yüksək sayda toplanmış qarşılıqlı təsirlər ilə müşahidə olunur.

Əlavə boş iş nöqtələri üçün p_T, n və p-dən asılılıq əhəmiyyətli dərəcədə azalır. Qeyd etmək vacibdir ki, göstərilən halların qəbul olunmamaq gücü p_T, η və p paylanmalarından, fon nümunəsinin kvark-qluon tərkibindən asılıdır. Kvarkla işə salınan şırnaqlar qluon şırnaqlarına nisbətən daha dar zolağa və kiçik iz çoxluğuna malik olduğu üçün həqiqi τ_{had}^{vis}-dən fərqləndirmək çox çətindir. Qəbul olunmayan güc yüksək p_T istiqamətində artır və xüsusilə 3 başlıqlı τ_{had}^{vis} üçün qarşılıqlı təsiri azalır [5].

"Fake Factor" methodu

"Doğru təyin olunmamış" leptonlar və ya hadron parçalanmaları, foton çevrilmələri zamanı, və yaxud da qeyri-müəyyən obyektlərdən yaranır. Digər mənbələrdən verilən leptonlar (düzgün təyin olunuş) "Prompt" kimi təsvir olunur. Bu təsviri (həqiqi təyin olunmuş) səviyyədə yalnız MC nümunələrində yerinə yetirmək mümkündür. Siqnal, fon proseslərini və verilmiş məlumatları göstərmək üçün *TRexFitter* paketindən istifadə olunur. Fərz olunur ki, iki bölgə, siqnal və tədqiqat intervalı mövcudur. Həqiqi təyin olunmamış tau lepton iki üsulla qiymətləndiriləcəkdir. Birinci üsul hadronik τ üçün p_T>25GeV şərtinin tələb olunduğu "məntiqi triggerlərdən" istifadə ilə qiymətləndirmədir. Həmçinin şiqnal bölgəsində eyni işarəli iki leptonun olması şərti tələb olunur. Əvvəlcə 2lSS1tau_had kanalında, Monte Karlo məlumatlarından istifadə etməklə trigger sistemində təhlili, sonrakı mərhələdə Fake Factors metodu nəzərdə tutulur. Fake Factors metodunun əsas ideyası, təxmin edilən fonun zənginləşdirilmiş hadisələr üçün tədqiqat nümunəsinin seçilməsi və hadisələri siqnal bölgəsindəki fonla əlaqələndirmək üçün ekstrapolyasiya faktorundan istifadə olunmaqdır [7].

Tədqiqat nümunəsi verilənlərdən seçildikdə və ekstrapolyasiya əmsalı verilənlərə əsasən ölçülürsə, seçilmiş metod məlumatlara əsaslanır. Tədqiqat bölgəsi təxmin edilən fonu seçmək üçün müəyyən edilir. Fake Factors metodu nəzərdən keçirilən fonda hissəciklərin növlərini doğru müəyyən etməkdir. Əmsallar (3) ifadəsi əsasında hesablanır.

$$FF = \frac{N_{pass}ID - N_{pass}ID,_{true\tau}}{N_{failed}ID - N_{failed}ID,_{true\tau}} \quad (3)$$

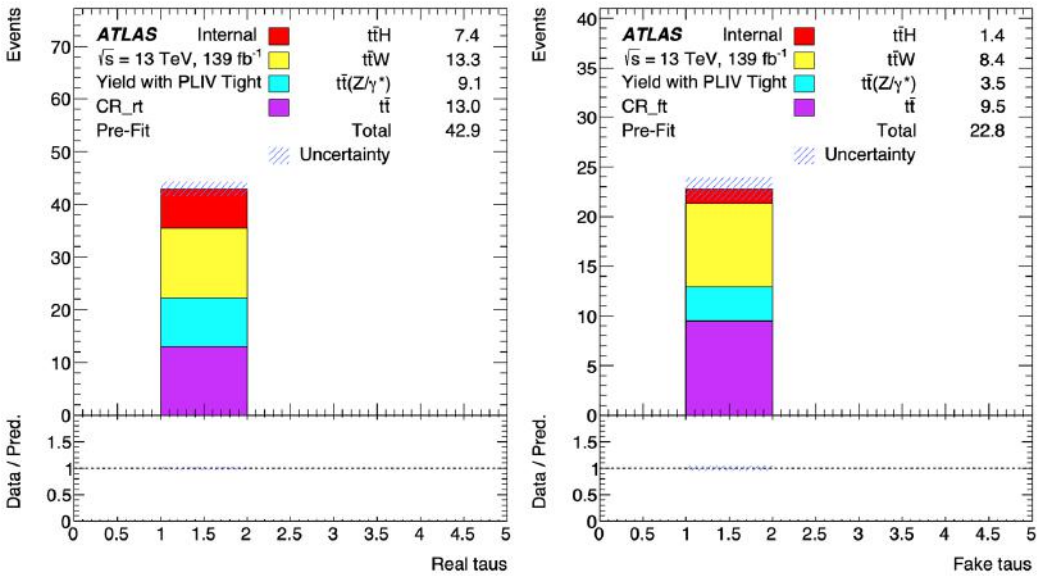
Siqnal bölgəsində düzgün təyin olunmamış hadronik τ lepton (4) ifadəsi ilə hesablanmışdır:

$$N_{passID}^{SR} = \left(N_{failedID}^{SR} - N_{failedID,true\tau}^{SR}\right) \cdot FF \quad (4)$$

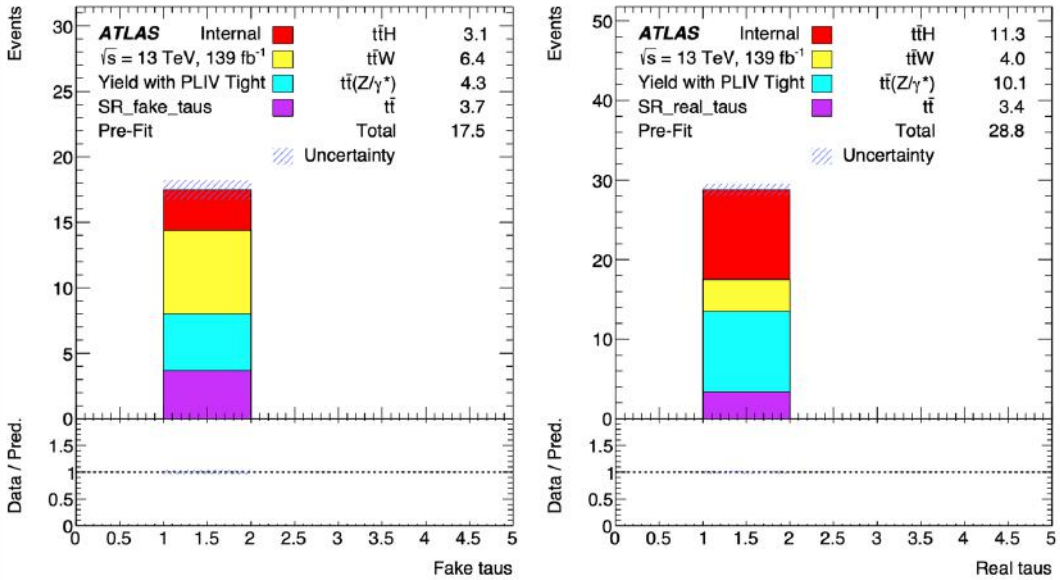
Sayğacdan birinci termin RNN şəbəkəsindən keçən məlumatlardır. Bizim tədqiqat işimizdə birinci termin *tausJetRNNigMedium*=1 və triggerdən keçən məlumatlardır. İkinci termin trigger, RNN və həqiqət məlumatlarından keçən Monte Karlo məlumatlarıdır. Məxrəcdə birinci termin RNN-dən keçməyən, ikincisi Monte Karlo məlumatlarıdır. Bütün dəyişənləri müəyyən etdikdən sonra hesablamaları yerinə yetirmək mümkündür.

Düzgün təyin olunmamış hadronik tau leptonlar hesablanması

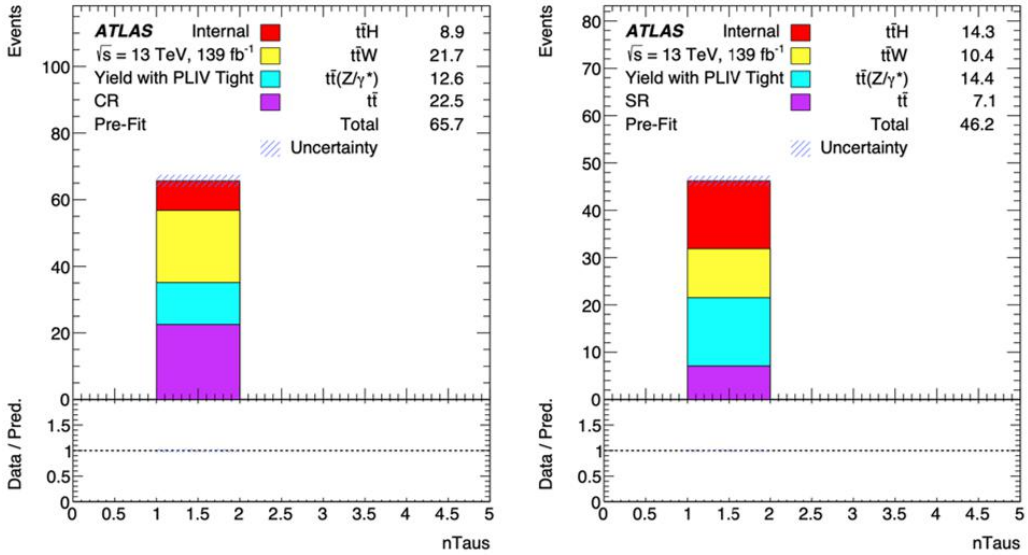
Tədqiqat işində "*tauisHadronic*" dəyişənindən istifadə etməklə verilmiş bütün dəyişənlərin paylanmaları alınmış, həqiqi olmayan və həqiqi tauların sayı müəyyən edilmişdir. Hadronik τ həqiqi olmayan və həqiqi dəyərdir. Yalnız 0 yaxud 1 qiymətini alır. 0 qiymətini qəbul edirsə yanlış, əks halda həqiqi qəbul edilir. Bu dəyişənlərin və digər kəsiklərin tətbiqi ilə siqnal bölgəsində ttH siqnalının qiyməti şəkil 1-3-də verilmişdir. RNN və Fake Factorun iştirakı olmadan düzgün təyin olunmamış qiymətləndirmənin nəticələri göstərir ki, siqnal bölgəsində ttH qiyməti 8.9, seçilmiş bölgədə 14.3 bərabərdir[8].



Şəkil 1. Siqnal və seçilmiş bölgədə hadronik tau leptonların sayı.



Şəkil 2. Siqnal və seçilmiş bölgədə həqiqi olmayan hadronik tau leptonlarının ehtimalı.



Şəkil 3. Seçilmiş bölgədə həqiqi və həqiqi olmayan hadronik tau leptonlarının ehtimalı.

Digər təcrübələrdə hesablama vaxtını azaltmaq üçün əsas fonlar ayrıca hesablanmışdır. Növbəti addımda, digər kəsiklərin tətbiqi ilə yeni seçilmiş bölgələr yaratdıqdan sonra Fake Faktor metodunda FF əmsallarını hesablamaq üçün lazım olan dəyişənlər hesablanmışdır cədvəl 1(a,b).

Cədvəl 1a.
Seçilmiş bölgədə FF əmsalının hesablanması üçün MC məlumatlarından alınan qiymətlər.

Seçilmiş bölgə	Monte Carlo məlumat
$N_{passID}\tau_{true}Medium1prong$	36.554
$N_{passID}\tau_{true}Medium3prong$	14.38
$N_{failedID}\tau_{true}Medium1prong$	4.512
$N_{failedID}\tau_{true}Medium3prong$	2.611

Cədvəl 1 b.
Seçilmiş bölgədə FF əmsalının hesablanması üçün təcrübi məlumatlarından alınan qiymətlər.

Seçilmiş bölgə	Təcrübi məlumat
$N_{passID}\tau_{false}Medium1prong$	56
$N_{passID}\tau_{false}Medium3prong$	14
$N_{failedID}\tau_{false}Medium1prong$	81
$N_{failedID}\tau_{false}Medium3prong$	81

Cədvəl 2a.
Signal bölgədə N^{SR}_{passID} -nin hesablanması üçün MC məlumatlarından alınan qiymətlər.

Signal bölgə	Monte Carlo məlumat
$N_{passID}\tau_{true}Medium1prong$	3.387
$N_{passID}\tau_{true}Medium3prong$	1.906

Cədvəl 2 b.

Signal bölgədə N_{passID}^{SR}-nin hesablanması üçün təcrübi məlumatlarından alınan qiymətlər.

Signal bölgə	Təcrübi məlumat
$N_{passID}\tau_{false}Medium1prong$	55
$N_{passID}\tau_{false}Medium3prong$	55

Dəyişənin qiymətlərində VV, tZ, WtZ, tW proseslərı, digər proseslər və eyni zamanda fonda baş verən proseslər nəzərə alınır.

Verilmiş qiymətlər alındıqdan sonra *FF* əmsalı "1prong" üçün (5) ifadəsi ilə təyin olunur

$$FF_{1prong} = 0.254 \quad (5)$$

və "3prong" hallı üçün (6) ifadəsi ilə təyin olunur

$$FF_{3prongs} = 0.004 \quad (6)$$

Təyin olunmuş qiymətlər cədvəl 2(a,b) və (5), (6) əmsalları əsasən düzgün təyin olunmamış hadronik tau leptonlar (7) ifadəsi ilə hesablanmışdır.

$$N_{passID}^{SR} = 13.363 \quad (7)$$

NƏTİCƏ

Tədqiqat işində 2lSS1tau_had kanalındakı həqiqi olmayan tau leptonlar "Fake Factor" metodu ilə öyrənilmişdir. Göstərilən metodla N_{passID}^{SR}-nın qiyməti üçün 13.363 dəyəri müəyyən olunmuşdur. Ümumilikdə tədqiqat işi TRExFitter paketindən istifadə edilməklə yerinə yetirilmişdir. Doğru olmayan hadronik tau leptonların "Fake Factor" metodu ilə öyrənilməsi gələcək tədqiqatlarda tətbiqi aktual hesab olunur.

[1] *M. Tanabashi et al.*. Review of Particle Physics, Phys. Rev. D 98, 2018, 030001.

[2] *G.Aad, B. Abbott et al.* Reconstruction of hadronic decay products of tau leptons with the ATLAS experiment. *Eur. Phys. J. C* 76, 295, 2016. https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-016-4110-0

[3] *G. Aad, B. Abbott et al.,* Reconstruction, Energy Calibration, and Identification of Hadronically Decaying Tau Leptons in the ATLAS Experiment for Run-2 of the LHC, ATL-PHYS-PUB-2015-045,2015,p.1-25.

[4] *G. Aad, B. Abbott et al.*, Measurement of the tau lepton reconstruction and identification performance in the ATLAS experiment using pp collisions at √s=13TeV, ATLAS-CONF-2017-029, 2017, p.1-44.

[5] *G. Aad, B. Abbott et al.*, Identification of hadronic tau lepton decays using neural networks in the ATLAS experiment, ATL-PHYS-PUB-2019-033, 2019, p.1-15.

[6] J. *H. Friedman*. Stochastic gradient boosting, Computational Statistics & Data Analysis, 38(4), 2002, 367-378. http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167947301000652.

[7] *G. Aad, B. Abbott et al.*. Tools for estimating fake/non-prompt lepton backgrounds with the ATLAS detector at the LHC, CERN-EP-2022-214, 30th November 2022

[8] *G. Aad, B. Abbott et al.*. Analysis of tt H and ttW production in multilepton final states with the ATLAS detector. ATLAS-COM-CONF-2019-062, 2020, p.1-38.

Nazim Huseynov Ali oglu

STUDY OF MISIDENTIFIED OF HADRONIC TAU LEPTON USING FAKEFACTOR METHOD

This paper describes a algorithm to identify the visible decay products of hadronic tau decays ($\tau_{had\text{-}vis}$) in the Standard Model Higgs boson produced in association with a top quark pair in multilepton final states with two light leptons with same-sign electric charges and one hadronically decaying tau lepton, labeled as 2LSS1$\tau_{_had}$ at √s=13 TeV.

The algorithm is based on recurrent neural networks (RNN) employing information from reconstructed charged-particle tracks and clusters of energy in the calorimeter associated to τ had-vis candidates as well as high-level discriminating variables.

The expected performance of this algorithm is evaluated in simulated proton–proton collisions at √s=13 TeV and compared to a BDT-based approach.

Гусейнов Назим Али оглы

ИССЛЕДОВАНИЕ ОШИБОЧНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ АДРОННОГО ТАУ-ЛЕПТОНА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА FAKEFACTOR.

В данной работе описывается алгоритм идентификации видимых продуктов адронных тау-распадов ($\tau_{had\text{-}vis}$) в бозоне Хиггса Стандартной модели, образующемся в ассоциации с топ-кварковой парой в мультилептонных конечных состояниях с двумя легкими лептонами с электрическими зарядами одного знака и одним адронно распадающимся тау-лептоном, обозначенным как 2LSS1$\tau_{_had}$ при √s = 13 ТэВ.

Алгоритм основан на рекуррентных нейронных сетях (РНС), использующих информацию из восстановленных треков заряженных частиц и кластеров энергии в калориметре, связанных с кандидатами $\tau_{had\text{-}vis}$, а также высокоуровневые дискриминационные переменные.

Ожидаемая производительность этого алгоритма оценивается в моделируемых протон-протонных столкновениях при √s=13 ТэВ и сравнивается с подходом на основе BDT.

Qəbul olunma tarixi: 20.02.2023

SINDIRMA ƏMSALI MƏNFİ OLAN METAMATERİALLARIN ƏSAS XASSƏLƏRİ VƏ ONLARIN PERSPEKTİV TƏTBİQLƏRİ

QASIMOV NAĞI ABBASƏLİ OĞLU
Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti
Azadlıq küç.34, Baku
ORCİD: 0000-0001-9243-2297

Materialların optik xassələrini müəyyənləşdirən əsas parametrlərdən biri onun sındırma əmsalıdır. Son illərdə aparılan tədqiqatlar göstərmişdir ki, sındırma əmsalı müsbət dəyərlər almaqla yanaşı mənfi dəyərlər də ala bilər. Bu isə fizikada əsrlərdir bilinən fiziki qanunlara fərqli prizmadan baxmaq üçün yeni üfüqlər açır. Xüsusilə fizikanın optika bölməsində sındırma əmsalı, demək olar ki, bütün fiziki qanunların düsturlarında birbaşa, və ya dolayı yolla iştirak edir. Bu düsturların nəzəri analizi göstərir ki, sındırma əmsalının mənfi olması riyazi ifadənin sadəcə işarəsini deyil, onun fiziki mahiyyətini də əsaslı şəkildə dəyişir. Bu isə öz növbəsində sındırma əmsalı mənfi olan materialların adi materiallarda olmayan bir sıra yeni xassələrini və tətbiq imkanlarını araşdırmağa imkan verir. Bu məqalədə sındırma əmsalı mənfi olan materiallar haqqında ümumi məlumat verilmiş və son illərə aid olan müasir ədəbiyyat istifadə edilərək belə materialların perspektiv tətbiq imkanları araşdırılmışdır. Həmçinin sındırma əmsalının mənfi olmasına dair mövzuların ali təhsil müəssisələrinin ümumi fizika fənnlərinin tədris proqramlarına salınmasının zəruriliyindən bəhs edilmişdir.

Açar sözlər: metamaterial, mənfi sındırma əmsalı, optika
PACS: 78.67.Pt, 81.05.Xj

GİRİŞ

Sındırma əmsalı dedikdə ilk ağla gələn adətən müsbət işarəli bir ədəd olur. Ətrafımızda mövcud olan su, şüşə və s. kimi şəffaf materialların sındırma əmsalı işığın görünən oblastında təqribən 1.3-1.5 civarındadır. Sual oluna bilər ki, sındırma əmsalı hər zaman müsbətdirmi, və ya onu müsbət edən şərtlər nədir? Elə şərtlər təmin etmək olarmı ki, sındırma əmsalı müsbət yox, mənfi işarəli olsun? Bu suallar XX əsrin 60-cı illərində sovet alimi Viktor Veselaqonu düşündürmüş və o, 1967-ci ildə sındırma əmsalının mənfi olmasına dair məşhur məqaləsini yazmışdır [1]. Məqalənin ingilis dilində olan tərcüməsi 1968-ci ildə dərc edilmiş və bu günə qədər 8000-dən çox istinad almışdır [2]. Bu məqaləsində Veselaqo, sındırma əmsalı mənfi olan materialların mövcud ola biləcəyini nəzəri olaraq əsaslandırmış, belə materialların mövcud olma şərtlərini araşdırmış, hətta bəzi tətbiq imkanlarından da bəhs etmişdir. Lakin, o illərdə sındırma əmsalı mənfi olan materialın təcrübi olaraq əldə edilməsi göstərilən səylərə rəğmən mümkün olmamış və nəticədə belə materialların mövcudluğuna skeptik yanaşılmışdır. XX əsrin əvvəllərində Veselaqonu təkrar xatırladılar. 2000-ci ildə [3] ilk dəfə olaraq sındırma əmsalı mənfi olan materialın alınmasına dair tədqiqat işi dərc edilmişdir. Daha sonra bu fakt digər tədqiqatçılar tərəfindən araşdırılaraq təsdiqləndi və bu sahədəki elmi işlər daha da inkişaf etdirilməyə başlandı. Smith və digərləri (2000) mənfi sındırma əmsalını mikrodalğa oblastında metamaterial adlandırılan kompozit materialda müşahidə etmişdilər.

MƏNFİ SINDIRMA ƏMSALI VƏ BƏZİ TƏTBİQ İMKANLARI

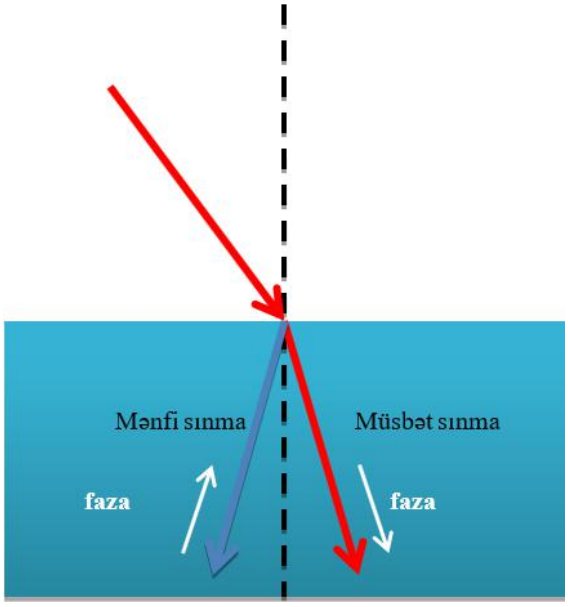
Metamaterial, müəyyən elementlərin periodik olaraq düzülməsi ilə süni şəkildə formalaşdırılan materiallara deyilir. Elementlərin formasını, ölçülərini və aralarındakı məsafəsini dəyişməklə metamaterialların müxtəlif xassələrini dəyişmək və idarə etmək mümkündür. Elementlər material olaraq müxtəlif formalı metal, və ya dielektriklərdən ibarət ola bilər [4]. Sındırma əmsalı mənfi olan ilk metamaterialın ümumi quruluşu şəkil 1-də göstərilmişdir [3]. Şəkildən göründüyü kimi ilk metamaterial metal uzun çubuqlardan və kəsiyi olan dairəvi halqalardan ibarətdir. Uzun çubuqlar elektromaqnit dalğasının elektrik sahəsinə, dairəvi halqalar isə maqnit sahəsinə həssasdır. Çubuq və halqaların müəyyən ölçülərində sındırma əmsalının mənfi olmasını təmin etmək mümkün olur.

Şəkil 1. İxtira edilən ilk metamaterialın vizual görünüşü.

Məlum olduğu kimi, elektromaqnit dalğalarının mühit daxilində yayılması zamanı iki növ sürəti ayırd etmək olar: faza və qrup sürəti. Adətən materiallarda faza və qrup sürətlərinin ədədi qiymətləri bir-birindən fərqli olsa da eyni istiqamətdə olurlar. Sındırma əmsalı mənfi olan metamaterialları digər materiallardan fərqləndirən əsas xassələrdən biri odur ki, belə material daxilində yayılan elektromaqnit dalğalarının faza və qrup sürətləri əks istiqamətlərdə olurlar. Bu xüsusiyyət bir çox fiziki qanunların təəccüblü şəkildə tərs şəkildə baş

131, H.Javid ave, AZ-1143, Baku
Institute of Physics
E-mail: jophphysics@gmail.com

verməsinə səbəb olur. Məsələn, sındırma əmsalı mənfi olan metamateriallarda sınma qanunu, Dopler effekti, Çerenkov effekti kimi bir çox fiziki qanunlar tərs şəkildə baş verir. Misal olaraq optikadan yaxşı bilinən Snell qanununu (işığın sınması) göstərmək olar (şəkil 2). Şəkildən göründüyü kimi, sınan işıq qırmızı oxla göstərilən alışılmış istiqamətdə deyil, ona güzgü əksi olan göy ox istiqamətində davam edir. Elmi ədəbiyyatda bu effekt mənfi sınma olaraq (ingiliscə "negative refraction") adlandırılmış və mikrodalğa oblastında təcrübi olaraq təsdiq edilmişdir.



Şəkil 2. Tərs Snell qanunu

Sındırma əmsalının mənfi olması praktiki nöqteyi nəzərdən bir çox istiqamətlərdə perspektivli tətbiq imkanları açır. Bunlardan superlinza [5], hərbi məqsədlər üçün istifadə oluna bilən optik görünməzlik tətbiqləri (ingiliscə "optical cloaking") [6], zəlzələdən qorunma [7], antena qurğularında tətbiqləri [8] və bir çox digər sahələri misal göstərmək olar [9]. Metamateriallarla bağlı tətbiq imkanları hazırda sürətlə genişlənməkdədir. Praktik tətbiqlərlə yanaşı metamateriallar fundamental fizikanın da bəzi sahələrinə nüfuz edir [10] və bu sahələrin daha yaxşı anlaşılması baxımından önəm kəsb edir [11].

NƏTİCƏ

Nəticə olaraq qeyd edilməlidir ki, metamateriallar və xüsusilə də sındırma əmsalı mənfi olan metamateriallar müasir fizikada mühüm yer tutur və tətbiq nöqteyi-nəzərindən bir çox yeni imkanlar açır. Sındırma əmsalının mənfi olması yaxşı bilinən fiziki qanunauyğunluqların ekzotik formada dəyişilməsinə səbəb olur. Belə materiallar, tətbiq imkanları ilə yanaşı fundamental fizikada da yeni istiqamətlərin formalaşmasına təkan verir. Sındırma əmsalının mənfi olmasının mümkünlüyü təsdiq edildikdən sonra, elektromaqnetizm və optikaya dair kitabların yenidən yazılması zərurəti ortaya çıxmışdır və hazırda bir çox müasir fizika kitablarında bu dəyişikliklər nəzərə alınmışdır. Bu baxımdan bu sahəyə dair mövzuların Azərbaycanın ali təhsil müəssisələrinin tədris proqramlarında da nəzərə alınması tədris və tədqiqat yönündən mühüm əhəmiyyət kəsb edir. Qeyd etmək olar ki, metamaterialların tədqiqi, gələcəkdə məlum bəzi fiziki proses və qanunauyğunluqlara yenidən baxılmasını zəruri edəcəkdir.

[1] *В.Г. Веселаго*. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ε и μ. Успехи Физических Наук, 1967, 92, 517–526.

[2] *V.G. Veselago*. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ε and μ. Soviet Physics Uspekhi, 1968, 10(4), 509–514.

[3] *D.R. Smith, W.J. Padilla, D.C. Vier, S.C. Nemat-Nasser & S. Schultz.* Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. Physical Review Letters, 2000, 84(18), 4184–4187.

[4] *S. Jahani & Z. Jacob*. All-dielectric metamaterials. Nature Nanotechnology. 2016, 11, 23–36.

[5] *J.B. Pendry*. Negative refraction makes a perfect lens. Physical Review Letters. 2000, 85(18), 3966–3969.

[6] *S. Vellucci, A. Monti, M. Barbuto, A. Toscano & F. Bilotti*. Progress and perspective on advanced cloaking metasurfaces: From invisibility to intelligent antennas. EPJ Applied Metamaterials. EDP Sciences, 2021.

[7] *A. Bandari*. Seismic metamaterial protects buildings from earthquake damage. Scilight, 2020, (28), 281101.

[8] *F. Karadağ, F.O. Alkurt, M. Karaaslan & E. Unal.* Microwave Imager Design with 2.46 GHz Microstrip Patch Antennas. Adıyaman University Journal of Science, 2019.

[9] *R. Kumar, M. Kumar, J.S. Chohan & S. Kumar.* Overview on metamaterial: History, types and applications. Materials Today: Proceedings, 2022, 56, 3016–3024.

[10] *V.G. Veselago*. Negative refraction, light pressure and attraction, equation *E=mc 2* and wave-particle dualism. EPJ Applied Metamaterials. EDP Sciences. 2014, 1, 9.

[11] *N. Gasimov, M. Karaaslan, C. Sabah & F. Karadag*. Some aspects of mass-energy equivalence which appears in left-handed metamaterials. EPJ Applied Metamaterials, 2019, 6, 16.

N.A. Gasimov

BASIC PROPERTIES OF METAMATERIALS WITH NEGATIVE REFRACTIVE INDEX AND THEIR PROSPECTIVE APPLICATIONS

One of the main parameters that determine the optical properties of materials is its refractive index. Recent studies have shown that the refractive index can take both positive and negative values. This opens up new horizons to look at the physical laws that have been known in physics for centuries from a different perspective. Especially in the optical branch of physics, the refractive index directly or indirectly participates in the formulas of almost all physical laws. A theoretical analysis of these formulas shows that a negative refractive index fundamentally changes not only the sign of the mathematical expression, but also its physical essence. This, in turn, makes it possible to explore a number of new properties and applications of materials with a negative refractive index that are not available in conventional materials. This article provides general information about materials with a negative refractive index and explores the promising application possibilities of such materials using modern literature in recent years. Mention was also made of the need to include topics related to the negative refractive index in the curricula of general physics subjects in higher educational institutions.

Н.А. Касымов

ОСНОВЫЕ СВОЙСТВА МЕТАМАТЕРИАЛОВ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ ПОКАЗАТЕЛЕМ ПРЕЛОМЛЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Одним из основных параметров, определяющих оптические свойства материалов, является его показатель преломления. Исследования, проведенные в последние годы, показали, что показатель преломления может принимать как положительные, так и отрицательные значения. Это открывает новые горизонты, чтобы посмотреть на физические законы, известные в физике на протяжении столетий, с другой точки зрения. Особенно в оптическом разделе физики показатель преломления прямо или косвенно участвует в формулах почти всех физических законов. Теоретический анализ этих формул показывает, что отрицательный показатель преломления принципиально меняет не только знак математического выражения, но и его физическую сущность. Это, в свою очередь, позволяет исследовать ряд новых свойств и областей применения материалов с отрицательным показателем преломления, недоступных в обычных материалах. В данной статье даны общие сведения о материалах с отрицательным показателем преломления и исследованы перспективные возможности применения таких материалов с использованием современной литературы последних лет. Упоминалось также о необходимости включения тем, связанных с отрицательным показателем преломления, в учебные программы предметов общей физики высших учебных заведений.

Qəbul olunma tarixi: 15.03.2023

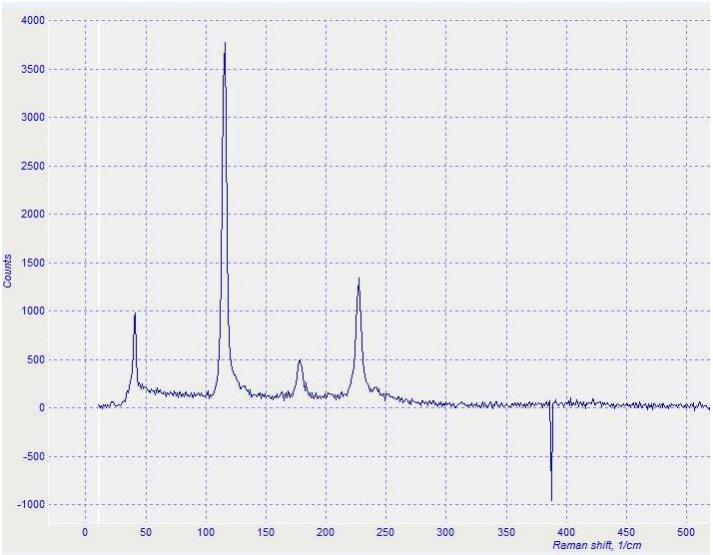
SƏTH QURULUŞ POZULMALARININ $CuInSe_2$ BİROXLU MONOKRİSTALINDA FOTOVOLTAİK EFFEKTƏ TƏSİR MEXANİZMİ

İ. QASIMOĞLU, Q.S. MEHDİYEV, C.T. HÜSEYNOV
Azərbaycan Respublikasının Elm və Təhsil Nazirliyinin Fizika İnstitutu,
Bakı, AZ-1143, H. Cavid, 131.
E-mail: gasimoglu@yahoo.com

Təcrübə yolu ilə müəyyən olunmuşdur ki,$CuInSe_2$ monokristalının spektral xarakteristikasında fotovoltaik effektin qiymətinin dəyişməsinin anizotrop dalğa paketlərindən ibarət olması laylı periodik strukturlara məxsusdur və səth quruluş pozulmaları hesabına baş verir.

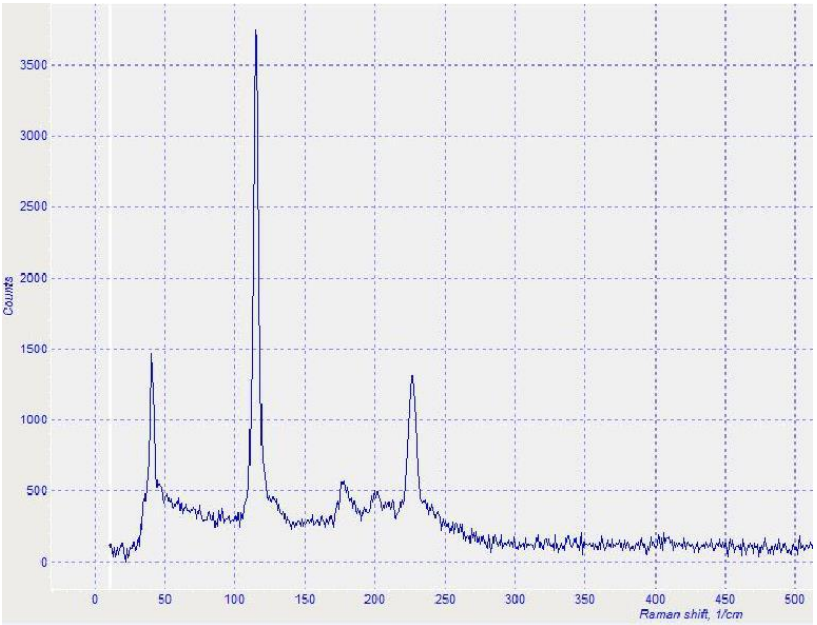
Açar sözlər: Monokristal, yarımkeçirici, period,dalğa, rezonans.
PACS: 61.80.Ed

Son illər tədqiqatçılar tərəfindən almazabənzər quruluşlu yarımkeçiricilərə maraq artmışdır [1]. Həmin qrupa daxil olan birləşmələrin bir qismi $A^{I}B^{III}C_2^{VI}$ ümumi formulu ilə ifadə olunur. A^{I}(Cu,Ag), B^{III}(Ga,In,Al), C^{VI}(S,Se,Te) kimi maddələri ifadə edir. Tədqiqata cəlb etdiyimiz obyekt $CuInSe_2$, CdSe və ZnSe-in üçqat analoqudur. T. Xan və əməkdaşları tərəfindən rentgen analizi üsulu ilə müəyyən olunmuşdur ki, bu sinif birləşmələrin hamısı xalkopirit strukturunda kristallaşır və əksəriyyəti *p*-tip keçiriciliyə malikdir [2]. $CuInSe_2$ nümunəsi *n*-tip keçiriciliyə malikdir. Monokristallarda güclü ikiqat sınma müşahidə olunmuşdur ki, bu xassə qeyri-xətti optika üçün xüsusi əhəmiyyətə malikdir [3]. Materialların üstün cəhətlərindən biri də odur ki, bağlı zonanın daxilində çoxlu sayda energetik səviyyələr mövcuddur. Bunlar passiv və aktiv rekombinasiya mərkəzləridir [4]. Birləşmələr düzgün zona quruluşuna malikdir və mütləq ekstremumları, Brillüen zonasının Γ noqtəsində yerləşir. $A^{I}B^{III}C_2^{VI}$ şəklində birləşən yarımkeçiricilərin fonon spektrlərinin təhlili göstərir ki, qayıtmanı ifadə edən elektron dalğalarının tezliyi zəif olduğundan, onların akustik fononlardan əks olunduğu qənaətinə gəlmək olar [5]. $CuInSe_2$ monokristalının sintezi ilk dəfə tərəfimizdən, ikitemperaturlu alışma deyilən yeni üsulla 2 saat müddətində aparılmışdır. Sonra isə Bricmen-Stokbarqer texnologiyası ilə, monokristalı yetişdirilmişdir. Xam maddələr havası sorulmuş kvars ampulalara doldurulmuşdur. İstifadə olunan maddələrin təmizlik dərəcələri aşağıdakı kimidir. Cu-99,999, In-99,9999, Se-99,9999. Ərimə temperaturu 1423°K-dir. Ampulanın qızdırıcı sistemin içərisindəki sürəti 4mm/saat-dır. Sabitləşmə və soyuma üçün ampula sistem söndürüldükdən 4 saat sonra qızdırıcıdan çıxarılmışdır. Alınan yeni nümunədə, ölçülər aparmağın mümkün olması üçün, aşağıdakı işlər görülmüşdür. Karbid bor tozu ilə səthi hamarlanmışdır. $HCl+HNO_3$(1:1) məhlulunda 40 saniyə müddətində, kənardan daxil olan aşqarlardan təmizlənmişdir. Sonra isə distillə edilmiş suda yuyulmuşdur. 323°K-də 1saat xüsusi qurutma peçində qurudulmuşdur. Nümunənin müqaviməti *R*=4,5om-dur. Ölçüləri 1x0,5x2mm^3-dir. Rentgen analizi üsulu ilə alınan nəticə göstərdi ki, birləşmə yarımkeçiricidir və fiziki parametrləri, elmi ədəbiyyatda mövcud olan nəticələrlə uyğunluq təşkil edir. Raman səpilmə spektrindən alınan maksimumlar da dediklərimizi təsdiq edir (şəkil 1, 2). Parametrlər aşağıdakı kimidir. *a*=5,33, *b*=5,33, *c*=10,41, *α*=90, *β*=90, *ϒ*=90. Fəza simmetriya qrupu (42m)-dir.



Şəkil 1. $CuInSe_2$ monokristalında işığın Raman səpilməsi, kiçik zaman intervalında.

131, H.Javid ave, AZ-1143, Baku
Institute of Physics
E-mail: jophphysics@gmail.com



Şəkil 2. $CuInSe_2$ monokristalı işığın Raman səpilməsi nisbətən böyük zaman intervalında.

MÖVZUNUN AKTUALLIĞI

Maddə müasir texnologiya tətbiq edilməklə alınmışdır. Praktik tətbiq üçün yararlı olduğu məlumdur. Əsas tətbiqi materiallardan biri sayılan CdSe və ZnSe-in üçqat analoqudur. Digər xalkopirit birləşmələrdən fərqli olaraq $CuInSe_2$ kristalları texnoloji olaraq həm *n*-tip, həm də *p*-tip keçiriciliyə malik maddə olaraq alına bilir. Bağlı zonanın enerjisi E= 0,93 eV-dur. Bu qiymət fotoelementlərin bağlı zonasının optimal enerjisinə yaxın olduğundan, material kimi onun əhəmiyyətini bir daha artırır. Bunlara əsaslanaraq deyə bilərik ki, $CuInSe_2$ kristalının fundamental şəkildə öyrənilməsinə ehtiyac duyulur. Görüləcək işləri elektronikanın müasir inkişaf səviyyəsinə uyğun həll etməyə çalışırıq.

MƏSƏLƏNİN QOYULUŞU

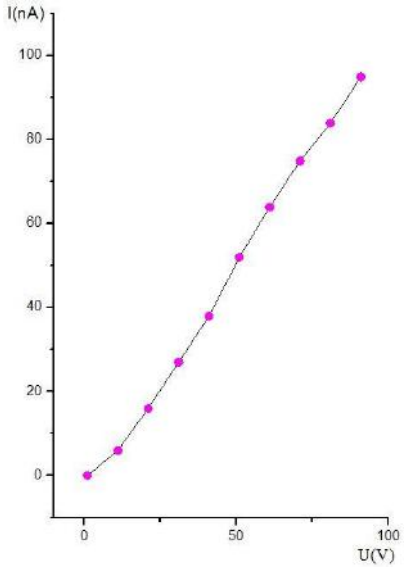
$CuInSe_2$ monokristalı fotoelementlərin hazırlanması baxımından yararlı materiallardan biri hesab olunur. Tətbiq sahələrini genişləndirmək məqsədi ilə yeni fiziki xassələr əldə etmək üçün birləşmələrə fərqli baxış bucağından yanaşılmışdır. Bunun üçün sabit elektrik sahəsinin müxtəlif qiymətlərində Volt-Amper xarakteristikaları çıxarılmışdır və elektrik hərəkət qüvvəsinin ölçülməsi ilə fotovoltaik effektin qiymətinin dəyişməsinin səth quruluş pozulmaları hesabına olduğunu aydınlaşdırmaq qarşıya məqsəd qoyulmuşdur. Laylı periodik quruluşlar üçün tətbiq olunan sərhəd şərtlərinin önəmli olduğu təcrübə yolu ilə sübut olunmuşdur.

TƏCRÜBƏNİN APARILMASI

Rentgen və Raman spektrləri çəkilmişdir. Sabit elektrik sahəsinin müxtəlif qiymətlərində Volt-Amper xarakteristikası çıxarılmışdır. Elektrik hərəkət qüvvəsinin qiyməti modulyasiya olunmuş işığın təsirindən sonra ölçülmüşdür. Aparılan təcrübələrdən sonra klassik yarımkeçiricilərin yeni fərqli xassələrinin tədqiqatına ehtiyacın olduğu məlum olmuşdur.

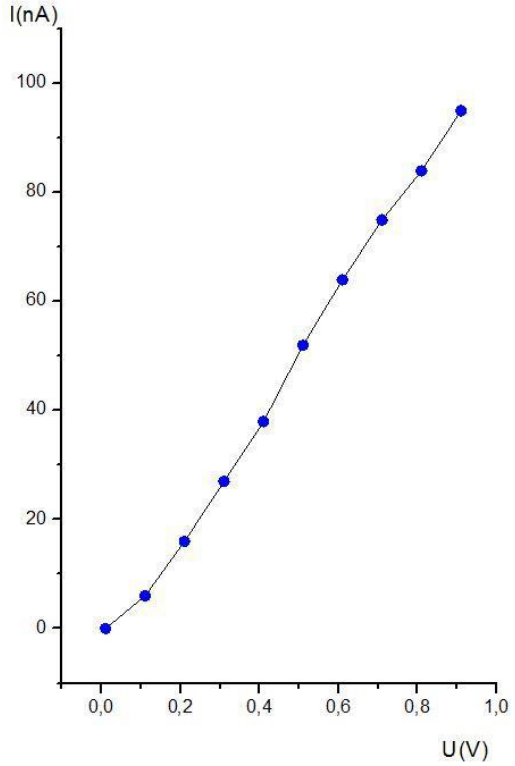
ALINAN NƏTİCƏLƏRİN MÜZAKİRƏSİ

Aparılmış çoxlu sayda təcrübələrə istinadən deyə bilərik ki, üçqat birləşmələrdə baş verən daşınma hadisələrini defektlərsiz təsəvvür etmək mümkün deyil. Bu defektlər texnoloji proseslər zamanı və sonra yarana bilər. Təqdim olunan məqalədə monokristal səthində oksidləşmə hesabına yaranan laylı periodik quruluşlara düşən şüalar stasionar olmayan hallarda özlərini müstəvi monoxromatik dalğalar kimi aparmır. Hər bir təbəqə özünəməxsus rəqs paketi ilə ifadə olunur. Harmonik rəqs paketləri elektronun dalğa xüsusiyyətinin göstəricisidir. Bu o deməkdir ki, laylı periodik quruluşlarda elektron dalğaları superpozisiya qanununa tabe olmur. Əksinə harmoniyalardan ibarət rəqs paketləri tam halda elektronun eksponensional artan funksiyasını ifadə etmiş olur. Volt–Amper xarakteristikasını çıxaran zaman elektron spektrlərində dispersiya qanununun kvadratik olmadığını görürük (şəkil 3, 4, 5).

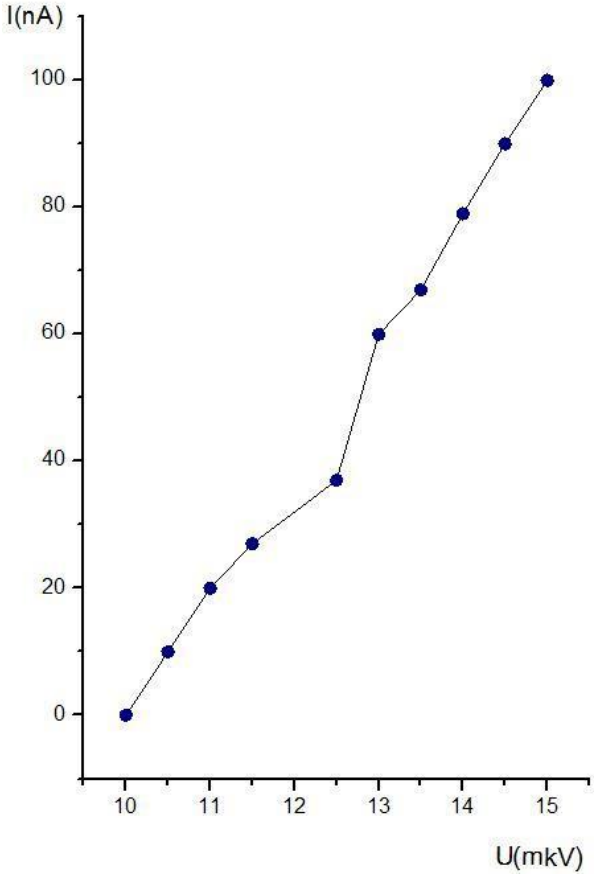


Şəkil 3. $CuInSe_2$ monokristalı Volt-Amper xarakteristikası. Sabit elektrik sahəsinin ardıcıllığa uyğun azalmasını nəzərə almaqla.

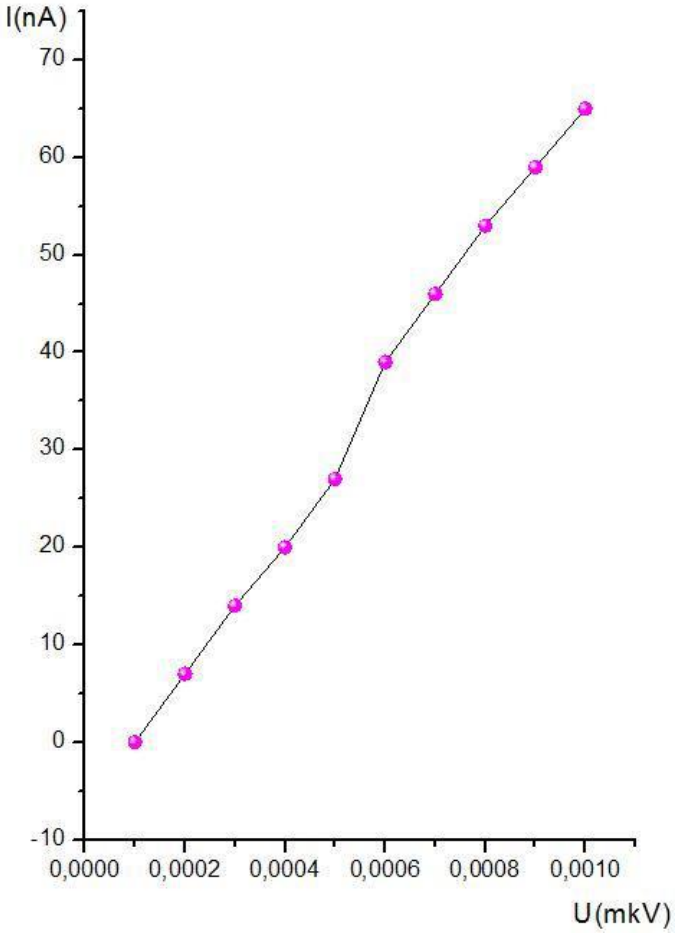
Yəni zərrəciyə bənzər dalğaların enerjisi mini zonaların enerjisinə bərabər, və ya ondan kiçik olduqda, zonaların kənarında güclü udulmalar müşahidə edirik. Bu hal isə yarımkeçiricilərin klassik zona quruluşundan fərqli olaraq, bağlı zonada şəffaf və şəffaf olmayan zolaqlarla müşahidə olunur. Laylı periodik quruluşların sərhəd şərtlərindən biri də kristal səthinə düşən dalğaların uzunluğunun, quruluşun periodundan çox kiçik olmasıdır (şəkil 6, 7, 8).



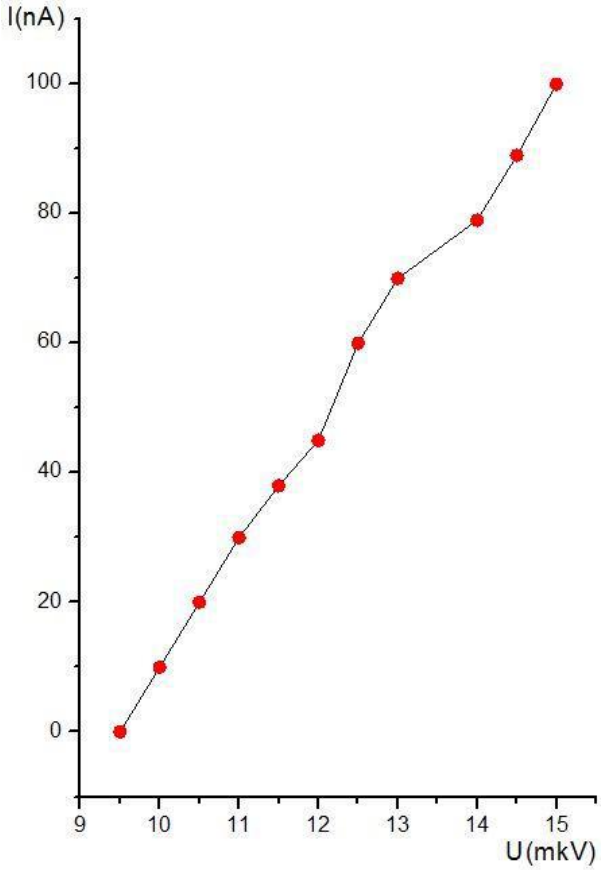
Şəkil 4. $CuInSe_2$ monokristalı Volt-Amper xarakteristikası. Sabit elektrik sahəsinin ardıcıllığa uyğun azalmasını nəzərə almaqla.



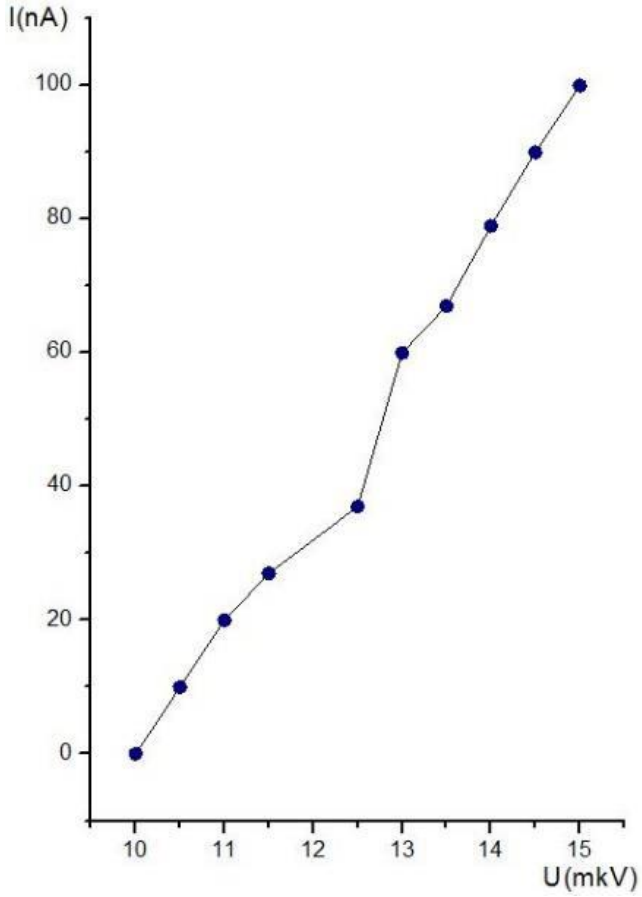
Şəkil 5. $CuInSe_2$ monokristalı Volt-Amper xarakteristikası. Sabit elektrik sahəsinin ardıcıllığa uyğun azalmasını nəzərə almaqla.



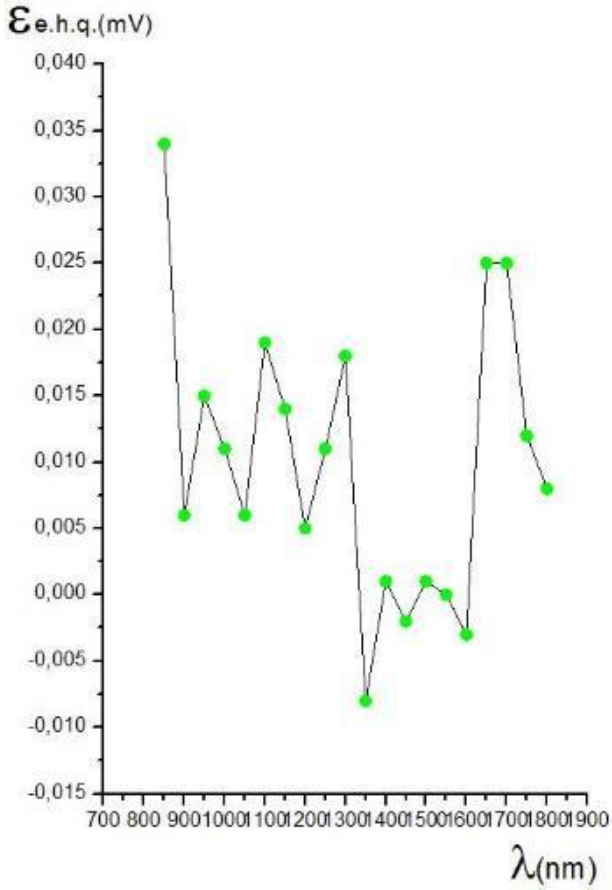
Şəkil 6. $CuInSe_2$ monokristalının Volt-Amper xarakteristikasının kvadratik olmayan qrafikləri, mikrovolt gərginliklərdə.



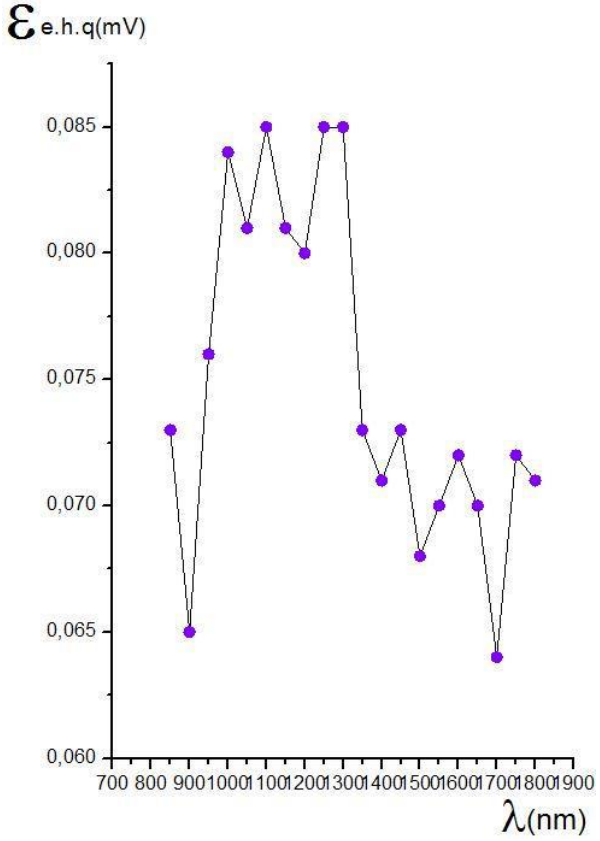
Şəkil 7. $CuInSe_2$ monokristalının Volt-Amper xarakteristikasının kvadratik olmayan qrafikləri, mikrovolt gərginliklərdə.



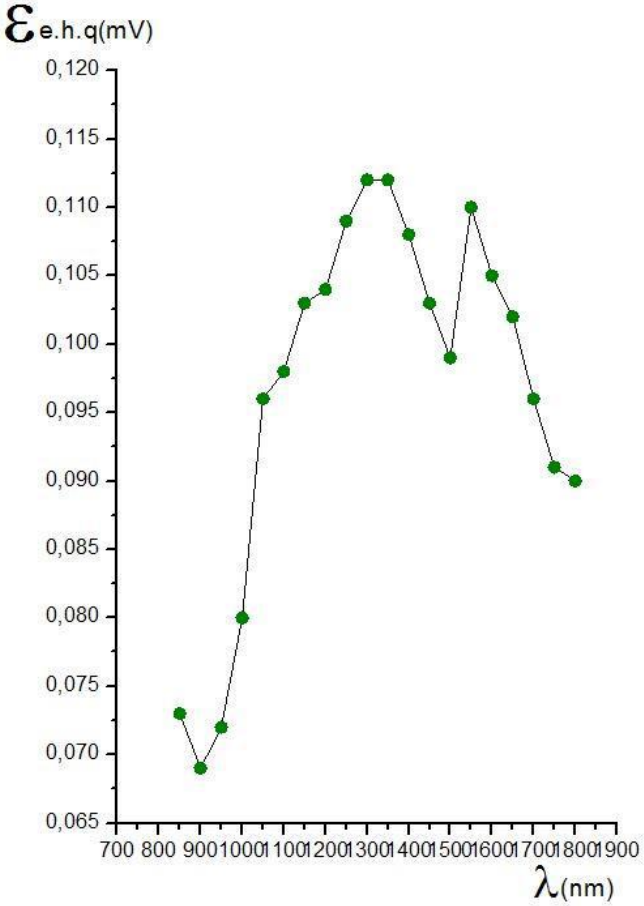
Şəkil 8. $CuInSe_2$ monokristalının Volt-Amper xarakteris tikasının kvadratik olmayan qrafikləri, mikrovolt gərginliklərdə.



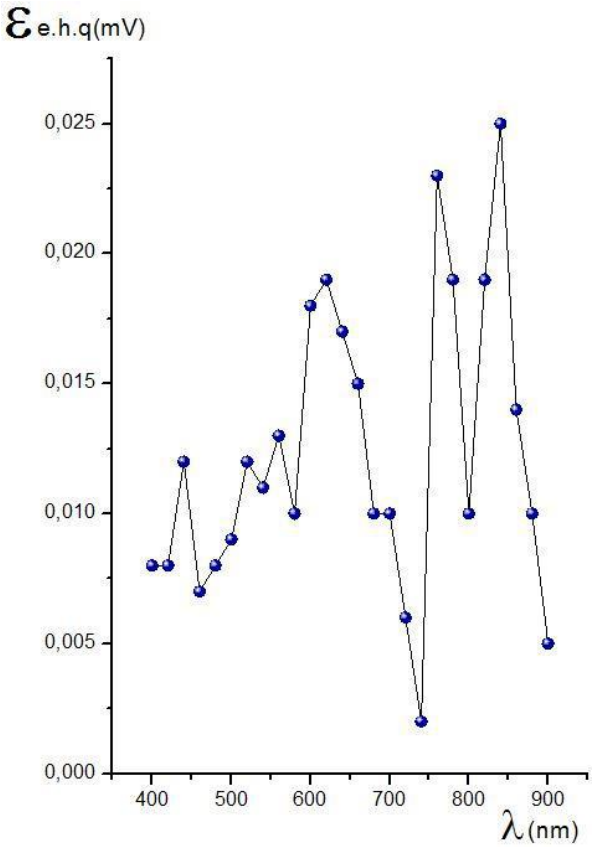
Şəkil 9. $CuInSe_2$ monokristalı: Fotovoltaik effektin qiymətinin modulyasiya olunmuş işığın dalğa uzunluğundan asılılığını ifadə edən spektrlər.



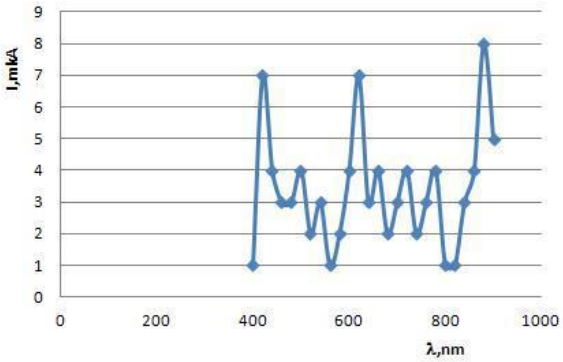
Şəkil 10. $CuInSe_2$ monokristalı. Fotovoltaik effektin qiymətinin modulyasiya olunmuş işığın dalğa uzunluğundan asılılığını ifadə edən spektrlər.



Şəkil 11. $CuInSe_2$ monokristalı: Fotovoltaik effektin qiymətinin modulyasiya olunmuş işığın dalğa uzunluğundan asılılığını ifadə edən spektrlər.



Şəkil 12. $CuInSe_2$ monokristalı. İşığın görünən və infraqırmızı oblastında kiçik enerjiyə malik dalğalar oblastında kəskin zolaqları ifadə edən qrafik.



Şəkil 13. $CuInSe_2$ monokristalı: multimetrin adi rejimində modulyasiya olunmuş işıqda çəkilmiş qayıtma spektri.

Volt–Amper xarakteristikasını nəzərdən keçirərkən defektlərin təsiri aydın görünür. Spektrin pilləli xarakterə malik olması defektlərin texnoloji proses zamanı və oksid təbəqənin üzərində formalaşan nanoquruluşlar hesabına meydana gələ bilər (şəkil 9, 10, 11). Bu isə o deməkdir ki, laylı periodik strukturlarda, layların konsentrasiyasının artması, dalğa paketlərinin intensivliyinin dəyişməsi ilə nəticələnir. Bu isə səth dalğalarının idarə olunması anlamına gəldiyi üçün, yarımkeşiricilərin tətbiqinə geniş imkanlar açmışdır. Əldə olunan nəticələri elektronun kvant sahəsindəki hərəkətinə tətbiq edə bilərik [6]. Modulyasiya olunmuş işığın təsirindən sonra, alınan qayıtma spektrindən görünür ki, massiv maddə $CuInSe_2$ monokristalında dalğa paketləri intensivlik baxımından fərqlənirlər. Bu ona görədir ki, onların oksid atomları ilə qarşılıqlı təsirinin adsorbsiya enerjisi müxtəlifdir (şəkil 12, 13). Yəni, parametrik ölçülərin dəyişməsi ilə dalğa paketlərinin idarə olunması kimi mühüm bir nəticə əldə etmiş oluruq. Alınan nəticələrin mikroaləmə tətbiqi yeni fiziki xassələrin ölçülməsini təmin etmiş olur. Bu isə müasir elektronikanın tələblərinə cavab verə bilən tədqiqat işlərinin aparılmasına şərait yaradır.

YEKUN NƏTİCƏ

Ikiqat analoqlarından fərqli olaraq üçqat biroxlu birləşmələrdə ikiqat sınmanın olması və ion əlaqələrinin güclü olması hesabına tetraqonal deformasiyadan anizotropluğun meydana gəlməsi, yeni fərqli fiziki parametrlərin ölçülə bilməsini təmin edir və bu tip yarımkeçiricilərin tətbiq imkanlarını genişləndirmiş olur. Bircinsli mühitlərdən fərqli olaraq, anizotrop mühitlərdə əldə olunan nəticələr onların tədbiqi üçün geniş imkanlar açmış olur.

[1] *D.Wole, R.Lerner, G.Müller.* Study of the nukleation of $CuInS_2$ on III-V substrates by liquld phase epitakxy. Crystal Research and Texnologu. 1996, vol. 31, p. 317-320.

[2] *İ.Qasımoğlu.* Azerbaijcan journal of Physics, 2014, vol. XX, N3, sektion: Az november3, p. 25-27.

[3] *Л.И.Бергер, Ф.Э.Балыневская*. Неорганические материалы том. III, 1966. N8, стр. 1514-1515.

[4] *С.Н.Мустафаева, М.М. Асадов, Д.Т. Гусейнов, И.Гасымоглу.* ФТТ, 2015, т. 57, в. 6, ст. 1079-1083.

[5] *N.A. Abdullayev, İ. Qasımoğlu, İ.A. Mamedova.*. Physic Status Sol C, 2015, N,6, 789-792.

[6] *Ф.Г. Басс, А.А. Булгаков, А.П. Тетервов.* Высокочастотные свойства полупроводников со сверхрешетками. М.286 ст.

I. Gasimoglu, G.S. Mehdiyev, D.T. Huseynov

MECHANISM OF ACTION OF SURFACE STRUCTURAL DEFECTS, PHOTOVOLTAIC EFFECT, UNIAXIAL $CuInSe_2$ SINGLE CRYSTALS

The spectral characteristics of $CuInSe_2$ single crystals and the change in the value of the photovoltaic effect for anisotropic harmonic waves are experimentally determined. This means the presence of a layered-periodic structure of surface structural defects.

И. Гасымоглу, Г.С. Мехтиев, Д.Т. Гусейнов

МЕХАНИЗМ ДЕЙСТВИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ, ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА, ОДНООСНЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ $CuInSe_2$

Экспериментальным путем определены спектральные характеристики монокристаллов $CuInSe_2$, изменение значении фотовольтаического эффекта при анизотропных гармонических волнах. Это обозначает наличие слоисто-периодической структуры поверхностных структурных дефектов.

Qəbul olunma tarixi: 22.04.2023

$As_{40}Se_{60}$ BİNAR XALKOGENİD ŞÜŞƏVARİ SİSTEMİNDƏ RAMAN SƏPİLMƏSİNİN CÜT-PARSİAL KORRELYASİYA FUNKSİYALARININ RADİAL PAYLANMASI ÜSULU İLƏ ARAŞDIRILMASI

S.İ. MEHDİYEVA, R.İ. ƏLƏKBƏROV, S.M. MƏMMƏDOV, L.Ə. ƏLİYEVA, A.Ç. MƏMMƏDOVA, S.U. ATAYEVA, N.N. EMİNOVA

Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil nazirliyi, Fizika İnstitutu, Bakı, Az 1143, H.Cavid, 131 E-mail: Rahim-14@mail.ru

$As_{40}Se_{60}$ binar xalkogenid şüşəvari sistemində quruluş əmsalının ($S(Q)$) səpilmə vektorundan və intensivliyin tezlikdən asılılıqları neytron difraksiya və Raman səpilməsi metodları ilə tədqiq olunmuşdur. Tədqiq olunan materialın lokal quruluşunu formalaşdıran piramidal quruluş elementlərinin ($AsSe_{3/2}$) və onlar arasındakı körpü əlaqələrin (As-Se-As) Raman səpilməsində müşahidə olunan rəqsi modların tezlikləri ($\nu_{AsSe3/2}$ =226±0.5 sm^{-1} və $\nu_{As\text{-}Se\text{-}As}$=281±0.5 sm^{-1}) neytron difraksiya səpilməsinin nəticələrinə Əks Monte-Karlo modelləşməsini (ƏMK) tətbiq etməklə müəyyənləşdirilmişdir.

Açar sözlər: xalkogenid şüşə, amorf, orta nizam, yaxın nizam.
Pacs: 81.05. Gc

1. GİRİŞ

Müxtəlif maddələrin (Si, Ge, SiC, Se) kristal və amorf modifikasiyalarında Raman səpilməsinə dair tədqiqatlar [1, 2] göstərir ki, istənilən maddəyə (kristal, amorf, polimer və s.) məxsus Raman səpilmə spektri həmin maddənin quruluşu və digər xüsusiyyətləri haqqında mühüm informasiyaya malikdir. Kristal maddələrin otaq temperaturunda birinci tərtib Raman səpilməsi kəskin pikə və dar yarımenə malik olub (full width at half maximum-FWHM≈3,5 sm^{-1}) üçqat cırlaşmış optik fononlarla əlaqələndirilir. Qeyd olunan tədqiqatlar [1, 2] göstərir ki, kristal halından amorf hala keçdikdə uzaq nizamlı düzülüşünün (UND) olmaması ilə bağlı olaraq dalğa vektoru üçün seçmə qaydası pozulur və onun hesabına, Raman səpilməsində bütün optik fononların iştirakı icazəli olur. Bunun nəticəsində amorf maddələrin Raman səpilmə spektrinin mənzərəsi dəyişərək geniş maksimumlu səpilmə zolağı ilə xarakterizə olunan fonon halları sıxlığının paylanması ilə xarakterizə olunur [1]. Səpilmə zolağının vəziyyəti tədqiq olunan maddənin quruluşunu, stexiometrik tərkibini və digər funksional qruplarını analiz etməyə, onun vəziyyətinin sürüşməsi isə təzyiqin, temperaturun, deformasiyanın təsirini tədqiq etməyə imkan verir. Raman səpilmə spektrində birinci pikin yarımeni maddənin kristal, və ya amorfluluq dərəcəsini, defektlərin, müxtəlif aşqarların təsirini müəyyənləşdirməyə, onun intensivliyi isə konsentrasiyanı müəyyənləşdirməyə imkan verir [1, 2]. Bu tədqiqatların müqayisəli təhlili göstərir ki, molekulyar quruluş modelinə əsasən Raman aktiv rəqsi modların tezliklərinin təyini üçün amorf matrisanı əmələ gətirən iki qonşu atomları əlaqələndirən homo- və heteropolyar rabitələrə, və ya müxtəlif atomar quruluş elementlərini təmin edən rabitələrə məxsus qüvvə sabitinin (k) və optik modun kütləsinin (μ) daha dəqiq modelləşmələr və təcrübi metodlara əsaslanaraq hesablanmasına ciddi zərurət vardır.

Təqdim olunan məqalənin əsas ideyası $As_{40}Se_{60}$ tərkibinə məxsus neytron difraksiya səpilməsinin nəticələrinə Əks Monte-Karlo modelləşməsi (ƏMK) tətbiq olunaraq lokal quruluşu formalaşdıran piramidal quruluş elementlərinin ($AsSe_{3/2}$) və onlar arasındakı körpü əlaqələrin (As-Se-As) hesabına Raman səpilməsində yaranan rəqsi modların tezliyini (ν) müəyyənləşdirməkdir.

2. TƏCRÜBƏNİN METODİKASI VƏ NÜMUNƏLƏRİN ALINMASI

$As_{40}Se_{60}$ xalkogenid şüşəvari tərkiblərinin sintezi ortasından tilinə perpendikulyar istiqamətdə yerləşən ox ətrafında fırlanan silindrik soba üsulu ilə yerinə yetirilmişdir. Sintez üçün tərkibə daxil olan xüsusi təmiz (təmizlik dərəcəsi 99,9999%) elementlərdən müvafiq miqdarda elekton tərəzidə çəkib götürməklə, daxili diametri 14÷16 mm və havası 10^{-4} tor təzyiqə qədər sorulmuş kvars ampulalara doldurulmuşdur. Fırlanan soba üsulunun seçilməsi alınmış məhlulun homogenliyini artırmaq məqsədilə nəzərdə tutulmuş və 950°C–dən yuxarı temperaturda sintez edilməklə bu temperaturda 12 saat ərzində saxlanılmışdır. Belə yüksək temperatur tərkibə daxil olan bütün komponentlərin mümkün qədər az özlülüklə bir-birinə qarışmasını təmin etmək məqsədilə yaradılmışdır. Sintez prosesinin sonunda xəlitənin soyudulması sobanı söndürdükdən sonra havada yerinə yetirilmişdir. Neytron-difraksiya səpilməsinə dair eksperimentlər termal neytronlu Budapeşt Tədqiqat reaktorunda ikioxlu monoxromatik neytron difraktometrinin (dalğa uzunluğu λ_0=1.068 Å və səpilmə vektoru Q=0.45÷9.8 $Å^{-1}$) köməyi ilə yerinə yetirilmişdir [3]. Tədqiqat zamanı istifadə olunan maddələr massiv haldan təqribən 3÷4 q miqdarında toz halına salınaraq diametri 8 mm, hündürlüyü (h) 50 mm divarının qalınlığı 0,07 mm olan vanadium tərkibli silindrik qablara doldurulmuşdur. Aparılan bütün təcrübələr otaq temperaturunda yerinə yetirilmişdir. Neytron difraksiya səpilməsinin nəticələrinə Əks Monte-Karlo modelləşməsinin (ƏMK) tətbiq edilməsi üçün paket proqram istifadə olunmuşdur (The software package RMC^{++} [http://www.szfki.hu/~nphys/rmc+/opening.html)) [4]. Hər bir tərkib üçün nizamsız atomik konfiqurasiya olaraq 10.000 atomdan ibarət modelləşmə qutusu götürülmüş $As_{40}Se_{60}$ üçün atomik sıxlıq 0.0355 atoms/$Å^3$ və modelləşmə qutusunun yarımuzunluğu isə 34.668 Å

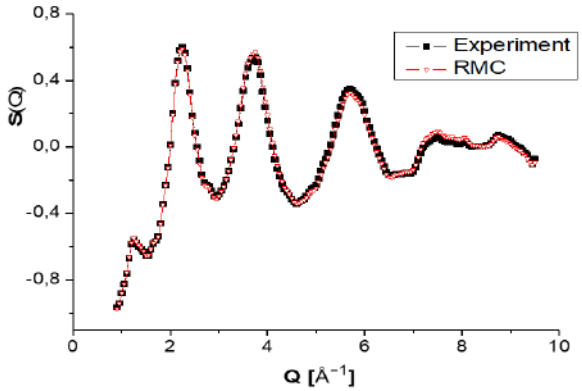
131, H.Javid ave, AZ-1143, Baku
Institute of Physics
E-mail: jophphysics@gmail.com

götürülmüşdür. Raman səpilməsi təcrübələri şüşə altlıqlar üzərində d=10 μm qalınlıqlı nazik amorf təbəqələrdə yerinə yetirilmişdir. Bu tədqiqatlar üç ölçülü konfokal lazer mikrospektroqrafında (Türkiyə, Tubitak tədqiqat mərkəzi) əsasən optik spektrin ν=25÷400 sm^{-1} intervalında edilmişdir.

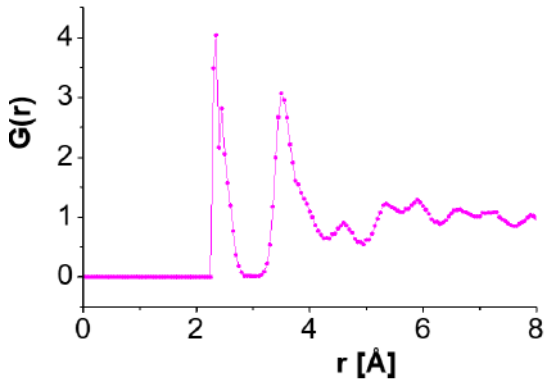
3. NƏTİCƏLƏR VƏ ONLARIN MÜZAKİRƏSİ

Şəkil 1-də $As_{40}Se_{60}$ tərkiblərində neytron difraksiya səpilməsindən alınan quruluş əmsallarının ($S(Q)$) təcrübi (simvollarla təsvir olunan) və modelin (qara xətlə təsvir olunan əyrilər ƏMK modelləşməsinin nəticələridir) verdiyi spektral asılılıqları təsvir olunmuşdur.

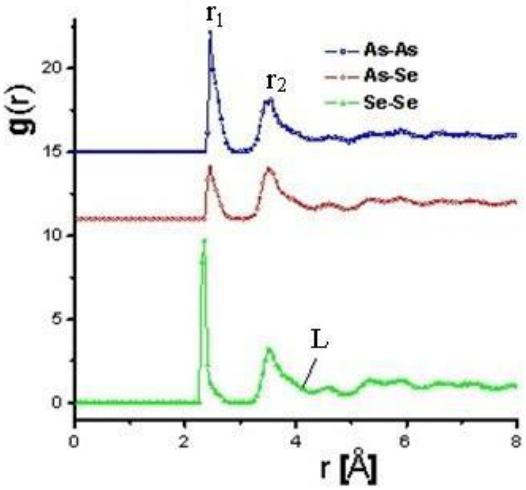
Spektrlərin xüsusiyyəti kovalent rabitəli materiallardakı piklərlə bənzərlik təşkil edən və əsas piklərin sol tərəfində yerləşən kiçik amplitudlu pikin müşahidə olunmasıdır. Bu pik birinci kəskin difraksiya piki (BKDP) adlanır. Tədqiq olunan $As_{40}Se_{60}$-ə məxsus səpilmə əyrilərində müşahidə olunan BKDP-vəziyyəti səpilmə vektorunun Q~1÷1.5$Å^{-1}$ – qiymətləri intervalında yerləşir ki, bu da kovalent rabitəli xalkogenid şüşələrdə orta nizam oblastının varlığı ilə izah olunur [5, 6]. $As_{40}Se_{60}$- maddəsində lokal quruluşu formalaşdıran müxtəlif kimyəvi rabitələrin rolunun aydınlaşdırılması və, o cümlədən, rabitə uzunluğunun müəyyənləşdirilməsi məqsədilə ƏMK modelləşməsi tətbiq olunaraq yekun və parsial cüt korrelyasiya funksiyaları ($g_{ij}(r)$) hesablanaraq nəticələr şəkil 2 və şəkil 3-də təsvir olunmuşdur.



Şəkil 1. $As_{40}Se_{60}$ –tərkibində quruluş əmsalının (S(Q)) səpilmə vektorundan asılılığı.



Şəkil 2. Stexiometrik nisbətli $As_{40}Se_{60}$- tərkibi üçün yekun cüt korrelyasiya paylanması funksiyaları.



Şəkil 3. $As_{40}Se_{60}$ tərkibi üçün cüt parsial korrelyasiya funksiyaları: $g_{As\text{-}As}(r)$, $g_{As\text{-}Se}(r)$, $g_{Se\text{-}Se}(r)$.

Tədqiqatlar [7] göstərir ki, Se-Se və As-As, As-Se, korrelyasiyalarına uyğun olan cüt parsial korrelyasiya funksiyalarının ($g_{Se\text{-}Se}$, $g_{As\text{-}As}$, $g_{As\text{-}Se}$) qrafiklərində müşahidə olunan ikinci piklər isə ONO-nın varlığı ilə bağlı olub, tədqiq olunan maddəyə məxsus $AsSe_{3/2}$ piramidal quruluş elementləri arasındakı korrelyasiyaya uyğun gəlir. Yuxarıda qeyd olunan cüt parsial korrelyasiya funksiyalarının ($g_{ij}(r)$) radial paylanma əyrilərindən istifadə edərək $As_{40}Se_{60}$–maddəsinin lokal quruluşunu formalaşdıran piramidal quruluş elementlərinin ($AsSe_{3/2}$) və onların arasındakı körpü əlaqələrinin hesabına yaranan rəqsi modların tezliyini hesablamaq üçün koordinasiya sferalarının radiusları ($r_1=d$, r_2) və ikinci koordinasiya sferasının bitmə sərhəddi (L) təyin edilərək şəkil 4-də təsvir edilən Raman səpilmə spektrində müşahidə olunan rəqsi modların identifikasiya tezlikləri ilə müqayisə edilmişdir. Təklif edilən ideyanın reallaşdırılması zamanı qeyri-üzvi amorf bərk cisimlərin lokal quruluşunda orta nizam oblastının (ONO) növü və ölçüsü ilə neytron difraksiya təcrübələrinin nəticələrindən əldə edilən radial paylanma funksiyasının müxtəlif sərhəd və intervalları arasındakı korrelyativ əlaqələrin qrafik təsvirləri nəzərə alınmışdır [8].

Məqalədə molekulyar quruluş modelinə əsasən Raman aktiv rəqs modların tezliyi aşağıdakı düsturla hesablanır [9].

$$\nu_0 = \frac{1}{2\pi c}\sqrt{\frac{k}{\mu}} \quad , \qquad (1)$$

burada k - qonşu atomları və ya atomar quruluş elementlərini əlaqələndirən qüvvə sabiti, μ-isə kiçildilmiş kütlə (və ya optik modun kütləsi) adlanır və (2)–düsturu ilə hesablanır.

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_a} + \frac{1}{m_a} \quad , \qquad (2)$$

burada m_a və m_b binar AB-maddəsində A və B elementlərinin atomar kütlələridir (məs: m_{As}, m_{Se}). Təqdim olunan məqalədə göstərilir ki, $As_{40}Se_{60}$ tərkibinə məxsus neytron difraksiya səpilməsinin nəticələrinə Əks Monte-Karlo modelləşməsi (ƏMK) tətbiq olunarsa, (2) düsturuna daxil olan k-qüvvə sabitinin piramidal

(AB_3) quruluş elementlərində hesablanması üçün Walter Gordy [10] tərəfindən təklif olunan (3) düsturundan *d*-rabitə uzunluğunu ($d=r_1$, cədvəl 1) və Herzberg [11] tərəfindən təklif olunan (4) düsturundan piramidal quruluş elementlərinə ($AsSe_{3/2}$) məxsus optik modun kütləsini ($\mu=m_1$) dəqiq hesablamaq mümkünlüyü göstərilir.

$$k=1,67\cdot N\cdot\left(\frac{x_A\cdot x_B}{d^2}\right)^{\frac{3}{4}}+0,30\ , \qquad (3)$$

$$\mu=m_1=\frac{3m_y m_x sin\beta}{m_x+3m_y sin\beta}\ , \qquad (4)$$

(4) düsturunda ifadə olunan $sin\beta$-nı hesablamaq üçün $As_{40}Se_{60}$ tərkibinə məxsus neytron difraksiya səpilməsinin nəticələrinə Əks Monte-Karlo modelləşməsi (ƏMK) tətbiq edilərək alınan cüt parsial korrelyasiya funksiyalarının ($g_{ij}(r)$) radial paylanma əyrilərindən (şəkil 3) koordinasiya sferalarının radiusları ($r_1=d$, r_2) və ikinci koordinasiya sferasının bitmə sərhəddi (L) təyin olunaraq nəticələr (5) və (7) düsturlarında nəzərə alınmışdır (cədvəl 1).

$$\phi=2\arcsin\left(\frac{L}{2r_1}\right)\ , \qquad (5)$$

$$\sin\beta=\frac{2\arcsin(\phi/2)}{\sqrt{3}}\ , \qquad (6)$$

burada ϕ - piramidal quruluş ($AsSe_{3/2}$) elementlərində As-Se rabitələri arasındakı bucaqlar, β-isə piramidal quruluşlu $AsSe_{3/2}$ molekulunun üçqat simmetriya oxu ilə As-Se rabitəsi arasındakı bucaqlardır [9, 12].

$$\alpha=\arcsin\left(\frac{r_2}{2r_1}\right) \qquad (7)$$

(7) düsturundan hesablanan α-bucağının iki misli (2α) As-Se-As körpü əlaqəsindəki rabitə bucağıdır [12]. A bucağının sinusu (sinα) ilə As-Se-As körpü əlaqələrinin tezliyi arasındakı əlaqə aşağıdakı düsturla ifadə edilir:

$$\nu_{As}^2=\frac{1}{4\pi^2c^2}\cdot\frac{2k_r}{m_{As-Se}}\cdot\sin^2\alpha\ , \qquad (8)$$

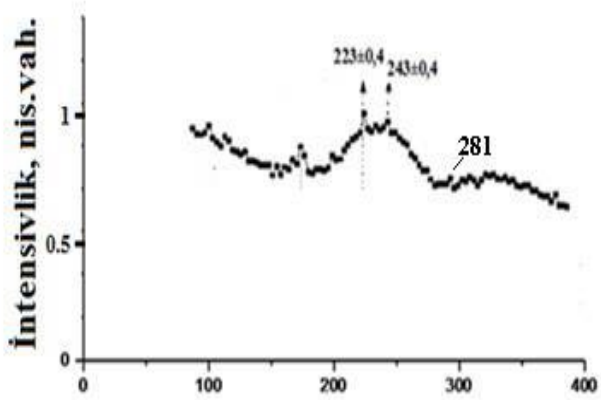
α-bucağının qiyməti (8) düsturunda nəzərə alınaraq As-Se-As körpü əlaqələrinin Raman səpilməsində müşahidə olunan rəqsi tezliyi hesablanmış və nəticələr Cədvəl 1-də göstərilmişdir.

Cədvəl 1.

Tərkib	$d=r_1$, Å		r_2, Å	L, Å	m_{As}, a.k.v.	m_{Se}, a.k.v	X_{As} [13]	X_{Se} [13]
$As_{40}Se_{60}$	2,45		3,5	4,15	74,92	78,968	2	2,4
	ϕ	$sin\beta$	α	$sin^2\alpha$	m_1, a.k.v	k_{As-Se}	$\nu_{AsSe3/2}$, sm^{-1}	$\nu_{As-Se-As}$, sm^{-1}
	116°	0,97	46,4°	0,524	56,63	1,71	226±0.5	281±0.5

Cədvəl 1-də ifadə olunan koordinasiya sferalarının radiuslarının ($r_1=d$, r_2) və ikinci koordinasiya sferasının bitmə sərhəddinin (L) qiymətlərindən istifadə edərək hesablanan piramidal quruluş elementlərinin ($AsSe_3$) və həmin elementlər arasındakı körpü əlaqələrin (As-Se-As) rəqsi tezlikləri ($\nu_{AsSe3/2}$, $\nu_{As-Se-As}$) şəkil 3-də $As_{40}Se_{60}$ tərkibi üçün təsvir edilən təcrübi Raman səpilmə spektrlərinin tezlikləri ilə müqayisə edilmişdir. Uzun müddət müxtəlif xalkogenid şüşələrdə (As_2S_3, As_2Se_3, As_2Te_3, GeS_2, $GeSe_2$ və s.) Raman səpilməsinin fiziki izahı üçün Lukovski və Martin [14] tərəfindən təklif olunmuş molekulyar quruluş modeli istifadə olunmuşdur.

Bu modelin əsas fiziki mahiyyəti daxili rəqsləri valent qüvvə sahələri modeli ilə təsvir olunan molekulyar quruluş elementlərinin identifikasiyasıdır. Burada göstərilir ki, As_2S_3-ün molekulyar quruluşu piramidal AsS_3 molekullarından ibarət olmaqla şəbəkə konfiqurasiyasında aşağıdakı kimi təsvir oluna bilər.



Şəkil 4. $As_{40}Se_{60}$ xalkogenid şüşəvari tərkibini Raman səplmə spektri.

Molekulyar quruluş modelinə əsasən müəyyən olunmuşdur ki, As_2S_3, As_2Se_3, As_2Te_3-ləri əmələ gətirən AsS_3, $AsSe_3$, $AsTe_3$ piramidal quruluş elementləri üçün dominantlıq təşkil edən rəqs modlarının tezlikləri uyğun olaraq ν_1=344 sm^{-1}, 227 sm^{-1}, 195 sm^{-1} olub Raman aktiv rəqs modları hesab olunur. Molekulyar quruluş modelinə əsaslanaraq aparılan müxtəlif tədqiqatlar göstərir ki, As_2S_3-ün kristalından (*c*), şüşə (*a*) və buxarlandırma ilə alınan nazik amorf təbəqələrinə (*b*) keçid zamanı piklərin genişlənməsi müxtəlif piramidal quruluş elementlərinin ($AsS_{3/2}$) rəqsləri və onların qarşılıqlı əlaqələri ilə izah olunmuşdur [15]. Raman aktiv modların nəzəri araşdırılaraq təcrübə ilə müqayisə olunması və alınan nəticələrin mümkün izahı müasir tədqiqat [16] işlərinin əsas ideyasına çevrilmişdir. Məqalədə AsS_nSe_{3-n} (n=0,1,2,3) klasterlərinin əsas Raman aktiv modlarını tədqiq etmək üçün Hartree-Fork nəzəriyyəsinə əsasən hesablamalar aparılmış və tədqiq olunan maddənin molekulyar quruluşu [17]-da təklif olunan "künc sərhədli" klaster konfiqurasiyası ilə təsvir olunmuşdur. Müəllif tərəfindən müəyyən olunan $AsSe_3$, $AsSSe_2$, AsS_2Se, AsS_3-molekulyar quruluş vahidlərinə uyğun rəqsi tezliklər ardıcıllığa 228 sm^{-1}, 238 sm^{-1}, 252 sm^{-1}, 339 sm^{-1}- təşkil edirlər [16]. Şəkil.4-də təsvir olunan Raman səpilmə spektrində 281±0.5 sm^{-1} tezlikli pik piramidal ($AsSe_3$) quruluş elementləri arasındakı körpü əlaqələrinin mövcudluğu ilə əlaqədardır [14]. Təcrübədən alınan bu nəticə cədvəl 1-də göstərilən hesablamanın nəticələri ilə uyğunluq təşkil edir. Beləliklə, məqalədə təklif olunan yeni yanaşma və alınan nəticələr [18] göstərir ki, $As_{40}Se_{60}$ tərkibinə məxsus neytron difraksiya səpilməsinin nəticələrinə Əks Monte-Karlo (ƏMK) modelləşməsi tətbiq olunaraq cüt-parsial korrelyasiya funksiyalarının radial paylanmasının müəyyənləşdirilməsi lokal quruluşu formalaşdıran piramidal quruluş elementlərinin ($AsSe_{3/2}$) və onlar arasındakı körpü əlaqələrin (As-Se-As) Raman səpilməsində müşahidə olunan rəqsi modların tezliyini (ν) dəqiq təyin etməyə imkan verir.

4. NƏTİCƏ

Neytron difraksiya səpilməsinin nəticələrinə Əks Monte-Karlo modelləşməsi (ƏMK) tətbiq olunaraq $As_{40}Se_{60}$-ə məxsus cüt parsial korrelyasiya funksiyalarının radial paylanması müəyyənləşdirilmiş, göstərilmişdir ki, cüt parsial korrelyasiya funksiyalarının radial paylanmasından koordinasiya sferalarının radiuslarını təyin edərək Walter Gordy və Herzberg tərəfindən təklif olunan piramidal quruluş elementlərinə ($AsSe_{3/2}$) məxsus *k*-qüvvə sabitini, optik modun kütləsini və lokal quruluşu formalaşdıran piramidal quruluş elementlərinin ($AsSe_{3/2}$) və onlar arasındakı körpü əlaqələrin (As-Se-As) hesabına Raman səpilməsində yaranan rəqsi modların tezliklərini (ν) hesablamaq mümkündür. Təklif olunan yanaşmaya əsasən piramidal quruluş elementlərinə ($AsSe_{3/2}$) və onların arasındakı körpü əlaqələrinə (As-Se-As) məxsus rəqsi modların tezlikləri $\nu_{AsSe3/2}$ =226±0.5 sm^{-1} və $\nu_{As\text{-}Se\text{-}As}$=281±0.5 sm^{-1} qiymətlərini almışdır.

[1] *Zongwei Xu, Zhongdu He, Ying Song, Xiu Fu, Mathias Rommel, Xichun Luo, Alexander Hartmaier, Junjie Zhang and F. Fengzhou.* Micromachines 2018, 9, 361, Topic Review: Application of Raman Spectroscopy Characterization in Micro/Nano-machining

[2] *A.H. Goldan, C.Li, S.J. Pennycook et al.* Journal Applied of Physics, 2016, 120, p. 135101-135110.

[3] *E. Sváb, Gy. Mészáros, F. Deák.* Neutron powder diffractometer at the Budapest research reactor. Mater. Sci. Forum, 1996, 228, p.247-252. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.228-231.247

[4] *R.L.McGreevy, L.Pusztai*. Reverse Monte Carlo simulation: a new technique for the determination of disordered structures, Mol. Simul. 1, 1988, 359–367.

[5] *M. Bauchy, M. Micoulaut.* J. Non-Crystalline Solids, 2013, 377, p.34-38.

[6] *J. Li, D.A. Drabold*. Phys. Rev. B, 2001, 64(10), p.104206-104208.

[7] *S. Hosokawa, Y. Wang, W.C. Pilgrim et al*. J. Non-Crystalline Solids, 2006, 352(9-20), p.1517-1519.

[8] *S.R. Elliott.* Meium range structural order in covalent amorphous solids. Nature, vol.354, p.445-452.

[9] *G. Lucovsky.* Physical Review B, vol.6, N4, p.1480-1489.

[10] *Walter Gordy.* The Journal of Chemical Physics 14, 305, 1946; doi: 10.1063/1.1724138

[11] *G. Herzberg.* Infrared and Raman Spectra of Polyatomic MolecNEes (Van Nostrand-Reinhold, New York, 1945)

[12] *E.I. Kamitsos, J.A. Kapoutsis, I.P. Culeac, M. S. Iovu.* J. Phys. Chem. B 1997, 101, 11061-11067

[13] *Linus Pauling*. The Nature of the Chemical Bond, Cornell University Press, Ithica, N.Y., 1948.

[14] *G.Lucovsky, R.M.Martin*. J.Non-Cryst. Solids, 1972, 8–10, p.185–190.

[15] *K.Tanaka.* Amorphous Chalcogenide Semiconductors and Related Materials. *K.Tanaka, K. Shimakawa.* Springer Nature Switzerland AG, 2021, 310 p.

[16] *X. Hana, H. Taoa, R. Panb et al*. Structure and vibrational modes of As-S-Se glasses: Raman scattering and ab initio calculations. Physics Procedia, 2013, 48, p. 59-64.

[17] *K. Jackson, A. Briley, S. Grossman*. Phys. Rev. B, 1999, 60(22), p. R14985-R149.

[18] *R.I. Alekberov, S. I. Mekhtiyeva, A.I. Isayev, M.Fabian.* J. Non - Crystalline Solids, 2017, 470(15), p.152-159.

S.I. Mekhtiyeva, R.I. Alekberov, S.M. Mammadov, L.A. Aliyeva, A.Ch. Mammadova, S.U. Atayeva, N.N. Eminova

INVESTIGATION OF RAMAN SCATTERING IN $As_{40}Se_{60}$ BINARY CHALCOGENIDE GLASSY SYSTEM BY METHOD THE RADIAL DISTRIBUTION OF PAIR-PARTIAL CORRELATION FUNCTIONS

The dependences of the structure factor ($S(Q)$) on the scattering vector (Q) and intensity on the frequency were studied by neutron diffraction and Raman scattering methods in the $As_{40}Se_{60}$ binary chalcogenide glass system. The frequencies ($\nu_{AsSe3/2}$=226±0.5 cm^{-1} and $\nu_{As\text{-}Se\text{-}As}$=172±0.5 cm^{-1}) of the oscillation modes of the pyramidal structure elements ($AsSe_{3/2}$) and bridge connections between them (As-Se-As), which form the local structure of the studied substance was determined by applying reverse Monte-Carlo modeling (RCM) to the results of neutron diffraction scattering.

С.И. Мехтиева, Р.И. Алекберов, С.М. Маммадов, Л.А. Алиева, А.Ч. Маммадова, С.У. Атаева, Н.Н. Эминова

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА В БИНАРНОЙ ХАЛЬКОГЕНИДНОЙ СТЕКЛООБРАЗНОЙ СИСТЕМЕ $As_{40}Se_{60}$ МЕТОДОМ РАДИАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРНО-ПАРЦИАЛЬНЫХ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ

Зависимость структурного фактора ($S(Q)$) от вектора рассеяния (Q) и интенсивности от частоты исследованы методами нейтронной дифракции и рамановского рассеяния в бинарной халькогенидной стеклообразной системе $As_{40}Se_{60}$. Определялись частоты колебаний моды ($\nu_{AsSe3/2}$ =226±0.5 cm^{-1} и $\nu_{As\text{-}Se\text{-}As}$=172±0.5 cm^{-1}) элементов пирамидальной структуры ($AsSe_{3/2}$) и мостовых связей между ними (As-Se-As), образующих локальную структуру исследуемого вещества с применением обратного моделирование Монте-Карло (ОМК) к результатам дифракционное рассеяние нейтронов.

Qəbul olunma tarixi: 25.04.2023

$TlGaS_2$ YARIMKEÇİRİCİ BİRLƏŞMƏSİNDƏ İSTİLİK RƏQSLƏRİNİN QEYRİ-HARMONİKLİK DƏRƏCƏSİ VƏ FONONLARIN SƏRBƏST YOLUNUN ORTA UZUNLUĞU

M.M. QURBANOV, M.M. QOCAYEV, K.M. HÜSEYNOVA
Sumqayıt Dövlət Universiteti,
Sumqayıt, Bakı küçəsi 1, 43-cü məhəllə, AZ-5008
*e-mail:***kama.mag@rambler.ru*

Bu işdə istilik parametrləri arasında əlaqəni müəyyən edən termodinamik münasibətlərdən istifadə etməklə $TlGaS_2$ yarımkeçirici birləşməsi üçün hesablanmış Debay xarakteristik temperaturu, Qryunayzen parametri, qəfəs istilikkeçirməsi və fononların sərbəst yolunun orta uzunluğunun qiymətlərinin temperatur asılılıqları cədvəl şəklində verilmişdir. Kristal qəfəsin istilik parametrlərinin qiymətlərindəki dəyişiklik, eləcə də fononların sərbəst yolunun orta uzunluğundakı azalması rəqslərin qeyri-harmonikliyi ilə izah edilir. $TlGaS_2$ – birləşməsində temperaturun artması ilə istilik fononlarının bir-birindən və digər kvazizərrəciklərdən səpilməsinin çoxaldığı göstərilmişdir.

Açar sözlər: yarımkeçirici, izotermik sıxılma, qeyri-harmoniklik dərəcəsi, Debay temperaturu, Qryunayzen parametri
PACS: 71.20 Nr, 63.20Kr, 61.50.Nw

Mürəkkəb yarımkeçiricilərin istilik parametrlərinin temperatur asılılığı izah olunarkən, bu parametrlərin qiymətinin kristal qəfəsin rəqslərinin qeyri-harmoniklik dərəcəsindən, bununla əlaqədar yaranan eninə və uzununa akustik fononların iştirak payından necə asılı olması, eləcə də optik fononların rolunun müəyyənləşdirilməsi aktual məsələlərdən sayılır.

Qəfəs istilikkeçirməsinin və fononların sərbəst yolunun orta uzunluğunun qiymətinin eksperimental təyini metodik baxımdan müəyyən çətinliklərlə üzləşdiyindən çox hallarda bu parametrlər, onların daxil olduğu digər termodinamik münasibətlərdən hesablanır. İstilik parametrlərinin qiymətlərinə elektronların verdiyi əlavəni də müəyyən etmək üçün, həmin maddələrdə paralel olaraq elektrik keçiriciliyi də ölçülür. İstilik parametrlərinin qiymətlərində baş verən kəskin artma hallarını çox zaman həmin maddələrdə Qryunayzen parametrinin temperatur asılılığı ilə əlaqələndirirlər. Bu hallarda fonon-fonon səpilməsində optik fononlarında rolu artmış olur [1]. Mövcud ədəbiyyatlarda həmçinin istilik parametrlərinin, termoelektrik hərəkət qüvvəsinin qiymətindən, fononların sərbəst yolunun orta uzunluğundan, elementin atom çəkisindən və atomlararası kimyəvi rabitədən asılı olduğu da göstərilmişdir [2,3].

Praktik tətbiq baxımından əlverişli hesab edilən termoelektrik materialların seçilməsi zamanı Videman-Frans qanununun ödənildiyi materiallara daha çox üstünlük verilir. Odur ki, bu hallarda istilik parametrlərinin qiymətinin geniş temperatur intervalında təyin olunmasına ehtiyac duyulur.

Bu işdə $TlGaS_2$ yarımkeçirici birləşməsi üçün istidən genişlənmə əmsalı (α), izotermik sıxılma əmsalı (χ_T), sabit təzyiqdə molyar istilik tutumu (C_P)-nin ədəbiyyatdan götürülmüş eksperimental qiymətləri və bu qiymətlər əsasında hesablanmış Debay xarakteristik temperaturu (θ_D-), sabit həcmdə molyar istilik tutumu (C_V), Qryunayzen parametri (γ) , qəfəs istilik keçirməsi (X_L) və fononların sərbəst yolunun orta uzunluğunun ($\bar{l}$) qiymətləri cədvəl şəklində verilmişdir (cədvəl 1 və 2).

Debay xarakteristik temperaturu, Qryunayzen parametri, sabit təzyiqdə və sabit həcmdə molyar istilik tutumlarının fərqi (C_P-C_V), qəfəs istilikkeçiriciliyi və fononların sərbəst yolunun orta uzunluğu mövcud nəzəri və empirik düsturlar vasitəsilə hesablanmışdır. [4, 5, 6].

$$\theta_D = \frac{19.37}{\sqrt{\bar{A}\gamma^{2/3}\alpha}} \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{3\alpha V}{\varkappa_T C_V} \quad (2)$$

$$C_P - C_V = \frac{9\alpha^2 VT}{\varkappa_T} \quad (3)$$

$$\chi_L = \frac{12}{5} L^{\frac{1}{3}} \left(\frac{K}{h}\right)^3 \frac{M\delta\theta_D^3}{\gamma^2 T} \quad (4)$$

$$\bar{l} = \frac{3\chi_L}{\bar{v} C_V} \quad (5)$$

Bu ifadələrdə K-Bolsman sabiti, h-Plank sabiti, M-molyar kütlə, $\bar{A}$ -orta kvadratik atom kütləsi, V- molyar həcm, $\bar{v}$-kristalda səsin orta sürəti, T- mütləq temperaturdur.

Ədəbiyyatda qeyd edildiyi kimi , bu düsturlar eyni bir elementdən təşkil olunmuş və kubik kristallik quruluşa malik olan maddələr üçün çıxarılmışdır. Lakin ilkin yaxınlaşmada bu düsturlardan yarımkeçirici birləşmələr üçündə istifadə etmək olar. [5]. düsturuna daxil olan $\bar{v}$ –nin qiymətidə ədəbiyyatda göstərilmiş

$$\bar{v} = (\rho\chi_T)^{1/2} \quad (6)$$

düsturundan təyin edilmişdir [6]. Burada ρ-sıxlıqdır. Vahid həcmə düşən molyar istilik tutumlarının qiyməti 1-ci cədvəldə verilmişdir. Molyar istilik tutumlarının C_V-lərin qiymətlərinin molyar həcmə olan nisbətindən tapılmışdır. Bu qiymətlərdə cədvəl 2-
ə verilmişdir.

131, H.Javid ave, AZ-1143, Baku
Institute of Physics
E-mail: jophphysics@gmail.com

Cədvəl 1.

T, K	**α,10^{-6} 1/K**	χ_T **, 10^{-12}** m^2/N	C_p C/mol ·K	C_v, C/mol ·K	θ_D, K	Γ
80	3,79	6,02	62	64,82	325	2,65
90	4,29	6,27	68	67,89	319	2,72
100	4,75	6,46	71	70,85	302	2,56
120	5,24	6,54	74	73,79	276	2,78
140	6,42	6,62	76	75,64	267	2,85
160	6,92	6,68	78	77,53	258	2,87
180	7,28	6,71	81	80,41	243	2,85
200	9,21	6,74	85	83,96	228	2,91
220	9,45	6,77	88	85,72	225	2,85
240	9,62	6,81	89	87,21	222	2,87
260	9,91	6,83	90	88,23	218	2,83
280	10,23	6,85	91	89,12	215	2,82
300	10,86	6,87	92	89,87	212	2,79

Cədvəl 2.

T, K	χ_l **,** Vt/sm· K	ϑ, m/san	$\bar{l}$, 10^{-7}m	C_v,10^6 C/m^3 ·K
80	9,67	5281	3,91	1,40
90	7,72	5280	3,08	1,44
100	6,66	5202	2,56	1,50
120	3,59	5171	1,29	1,60
140	2,65	5138	0,96	1,61
160	2,06	5116	0,73	1,65
180	1,55	5104	0,52	1,71
200	1,11	5093	0,36	1,79
220	1,01	5089	0,32	1,84
240	0,88	5085	0,28	1,85
260	0,79	5082	0,24	1,87
280	0,71	5067	0,21	1,96
300	0,65	5044	0,19	1,97

Cədvəldən göründüyü kimi, $TlGaS_2$ –birləşməsi üçün həm qəfəs istilik keçiriciliyinin, həm də fononların sərbəst yolunun orta uzunluğu temperaturun artması ilə azalır. Bu dəyişməni onunla əlaqələndirmək olar ki, temperaturun artması ilə fononların bir-birindən və digər kvazizərrəciklərdən səpilməsi də çoxalır. Temperaturun artması ilə eyni zamanda istilik fononlarının sayı da artır.

Alınan nəticələr göstərir ki, $TlGaS_2$ –birləşməsi üçün fononların sərbəst yolunun orta uzunluğu, birləşməni təşkil edən molekullararası orta məsafədən təqribən 100 dəfə böyük qiymətə malik olur. Bu nəticə analoji kristallik quruluşa malik digər birləşmələrdə olan qiymətlərə tam uyğun gəlir.

Beləliklə, aparılan elmi araşdırma göstərmişdir ki, istilik və elastiklik parametrləri arasında qarşılıqlı əlaqəni müəyyən edən nəzəri və empirik düsturlardan, verilmiş temperatur intervallarında mürəkkəb yarımkeçirici birləşmələr üçün də istifadə oluna bilər.

(2), (4), və (5) ifadələrinə baxsaq görərik ki, qəfəs istilik keçirməsinin qiyməti qeyri-harmoniklik dərəcəsini ifadə edən Qryunayzen parametrinin kvadratı ilə tərs mütənasib asılıdır. Başqa sözlə rəqslərin qeyri-harmoniklik dərəcəsinin artımı qəfəs istilikkeçirməsinin qiymətinin kəskin azalmasına səbəb olur. Belə asılılıq cədvəllərdə verilmiş qiymətlərdən də görünür. Beləliklə, qəfəs istilikkeçirməsinin rəqslərin qeyri- harmoniklik dərəcəsi ilə tərs mütənasib olduğu bir daha təsdiq edilmiş olur.

[1] *С.Г. Абдуллаева, А.М. Абдуллаев, К.К. Мамедов, Н.Т. Мамедов*. ФТТ, том 26, вып. 2, 1984, с.618-620

[2] *M.M.Qurbanov, M.M.Godjayev,A.M.Akhmedova.* Fizika, 2014, vol XX, Num 2, section En., p. 9-11.

[3] $TlGaX_2$ (x=S, Se, Te) birləşməsində atomlararası orta kvadratik dinamik yerdəyişmənin Debay xarakteristik temperaturundan asılılığı. SDU Elmi Xəbərləri cild 14, №1, 2014.seh 10-13.

[4] *M.M.Qurbanov, S.C. Məmmədov, M.M. Qocayev, F.Ə.Məmmədov*.$TlGaS_2)_{1-x}(TlInS_2)_x$ (x=0.1; 0,2) bərk məhlullarının istidən genişlənməsi və izotermik sıxılması. SDU Elmi Xəbərləri cild 19, №1, 2019, s. 4-7.

[5] *M.M.Qurbanov, F.Ə.Məmmədov, S.C. Məmmədov*. SDU Elmi Xəbərləri cild 21, №1, 2021.seh 4-7

M.M. Qurbanov, M.M. Godjayev, K.M. Huseynova

DEGREE OF ANHARMONICITY OF THERMAL OSCILLATIONS AND MEAN FREE PATH OF PHONONS IN $TlGaS_2$ SEMICONDUCTOR COMPOUND

In this study, the temperature dependences of the values of the Debye characteristic temperature, Grüneisen parameter, lattice thermal conductivity, and mean free path length of phonons calculated for the $TlGaS_2$ semiconductor compound using thermodynamic relationships that determine the relationship between thermal parameters are presented in tabular form. The change in the values of thermal thermal parameters of the crystal lattice, as well as the decrease in the average length of the free path of phonons, is explained by the inharmonicity of oscillations. In the $TlGaS_2$ - compound, it has been shown that the scattering of thermal phonons from each other and from other quasiparticles increases with increasing temperature.

М.М. Курбанов, М.М. Годжаев, К.М. Гусейнова

СТЕПЕНЬ АНГОРМАНИЧНОСТИ ТЕПЛОВЫХ КОЛЕБАНИЙ И СРЕДНЯЯ ДЛИНА СВОБОДНОГО ПРОБЕГА ФОНОНОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ $TlGaS_2$

В настоящей работе представлены температурные зависимости значений характеристической температуры Дебая, параметра Грюнайзена, решеточной теплопроводности и длины свободного пробега фононов, рассчитанные для полупроводникового соединения $TlGaS_2$ с использованием термодинамических соотношений, определяющих связь между тепловыми параметрами. в табличной форме. Изменение значений тепловых тепловых параметров кристаллической решетки, а также уменьшение средней длины свободного пробега фононов объясняется негармоничностью колебаний. Показано, что рассеяние тепловых фононов друг на друге и на других квазичастицах увеличивается с ростом температуры в соединении $TlGaS_2$.

Qəbul olunma tarixi: 03.05.2023

F.Ə. Rüstəmov, N.H. Dərvişov, V.Ə. Bağıyev, M.Z. Məmmədov, Y.Y. Bobrova, H.O. Əsgərova

KİMYƏVİ AŞILANMA İLƏ ALINMIŞ MƏSAMƏLİ SİLİSİUMUN FOTOLÜMİNESSENSİYA XASSƏLƏRİNİN MÜXTƏLİF TURŞU VƏ QƏLƏVİLƏRDƏ (ƏSASLARDA) ƏLAVƏ AŞILANMASI ZAMANI DƏYİŞMƏSİ

HF, KOH, NaOH və Na_2SeO_3 -ün sulu məhlullarında əlavə aşınlanmanın sırf kimyəvi aşılama metodu ilə alınmış məsaməli silisiumun fotolüminessensiya spektrinə təsiri tədqiq edilmişdir. Göstərilmişdir ki, yeni hazırlanmış nümunələrin bu cür aşılanması bütün hallarda fotolüminessensiya maksimumunun 1,85 eV-dən 2,1 eV-ə sürüşməsinə səbəb olur. 2-3 dəqiqə davam edən atmosfer oksidləşməsi spektrlərin çevrilməsinə gətirib çıxarır və onun maksimumu yenidən 1,85 eV-də sürüşür. Məsaməli silisiumun əlavə aşılanması zamanı fotolüminessensiyanın intensivliyi aşındırıcının tərkibindən asılıdır. HF məhlulunda o, demək olar ki, dəyişmir, qələvi məhlullarda isə fotolüminessensiyanın intensivliyi azalır ki, bu da silisiumun özünün müxtəlif aşındırıcılarda müxtəlif aşındırma sürəti ilə əlaqədardır. Qadağan olunmuş zonada yaranan və fotolüminessensiyanın müşahidə edilən transformasiyasına səbəb olan lokal şüalanma rekombinasiya mərkəzlərinin yaranmasında oksigen rabitələrinin rolu müzakirə edilmişdir.

T.C. İbrahımov, G.X. Hüseynova, Z.A. Dadaşov, A.F. Nurəliyev

YSPE-BN ƏSASLI KOMPOZİTLƏRİN TERMOFİZİKİ XASSƏLƏRİNƏ ELEKTRİK QAZ BOŞALMASI PLAZMASININ TƏSİRİ

Polietilen və bor nitrid hissəcikləri əsasında kompozitlərin termofiziki xassələri modifikasiyadan əvvəl və dielektrik barryerli qaz boşalması plazmasının təsiri ilə modifikasiya etdikdən sonra tədqiq edilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, doldurucunun həcm fraksiyasının artması ilə entropiya və entalpiya 3 vol.% və 7 vol.% istisna olmaqla azalır. Plazmadan sonra entropiya və entalpiya artır, kritik temperatur isə demək olar ki, dəyişməz qalır. Plazmadan sonra kristallıq dərəcəsi azalır.

S.T. Əzizov

MİKRODALĞALI DİAPAZONDA İZOPROPİL, *n*-BUTİL VƏ İZOBUTİL SPİRTLƏRİNİN UDMA SPEKTRLƏRİNİN DİELEKTRİK RELAKSASİYASI

Məqalədə 3,22, 1.80 və 1.15 sm dalğa uzunluğunda –50°C-dən +50°C-ə qədər olan temperatur intervalında izopropil, *n*-butil və izobutil spirtlərinin dielektrik keçiriciliyinin ε' və udma indeksinin ε'' tədqiqinin nəticələri təqdim olunur. İzopropil, *n*-butil və izobutil spirtlərinin udma spektrlərinin dielektrik relaksasiyası öyrənilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, bütün tədqiq olunan obyektlər üçün əlavə udma bölgəsinin yüksək tezlikli keçiriciliklərinin $\varepsilon(\infty,2)$ qiymətləri optik sındırma göstəricisinin kvadratından böyükdür.

Ə.R. Əhmədova

MƏNFİ SINDIRMA ƏMSALLI MÜHİTDƏ PARAMETRİK QARŞILIQLI TƏSİR ÜÇÜN İTKİLƏR

Faza sinxronizmi şərti daxilində mənfi sındırma əmsalına malik mühitdə üç dalğalı qarşılıqlı təsir zamanı doldurma dalğasının intensivliyinin optimal qiymətini təyin etmək üçün analitik ifadə alınmışdır. Metamaterialdakı itkilər qayıdan dalğa üçün kompensasiya edilə bilər. Doldurma dalğasının intensivliyi üçün optimal qiymət analitik həll yolu ilə əldə edilir. Təhlillər göstərdi ki, bu, qarşılıqlı təsirdə olan siqnal və səmərəsiz dalğaların intensivliyindən asılıdır.

ISSN 1028-8546

volume XXIX, №2, 2023
Section: Az

MÜNDƏRİCAT

1. α-Si:H əsasında günəş elementlərində gedən emissiya proseslərinin tədqiqi
E.Ə. Kərimov, S.N. Musayeva 3
2. "Fake factor" metodundan istifadə edərək hadronik tau leptonun öyrənilməsi
Nazim Əli Hüseynov 8
3. Sındırma əmsalı mənfi olan metamaterialların əsas xassələri və onların perspektiv tətbiqləri
Qasımov Nağı Abbasəli oğlu 13
4. Səth quruluş pozulmalarının $CuInSe_2$ biroxlu monokristalında fotovoltaik effektə təsir mexanizmi
İ. Qasımoğlu, Q.S. Mehdiyev, C.T. Hüseynov 16
5. $As_{40}Se_{60}$ binar xalkogenid şüşəvari sistemində Raman səpilməsinin cüt-parsial korrelyasiya funksiyalarının radial paylanması üsulu ilə araşdırılması
S.İ. Mehdiyeva, R.İ. Ələkbərov, S.M. Məmmədov, L.Ə. Əliyeva, A.Ç. Məmmədova, S.U. Atayeva, N.N. Eminova 24
6. $TlGaS_2$ yarımkeçirici birləşməsində istilik rəqslərinin qeyri-harmoniklik dərəcəsi və fononların sərbəst yolunun orta uzunluğu
M.M. Qurbanov, M.M. Qocayev, K.M. Hüseynova 29
7. **FİZİKA, vol. XXIX, №2, 2023, section: En** buraxılışında dərc olunan məqalələrin qısa xülasəsi 32

www.physics.gov.az