

## НАНОКЕУЕКТИ ШАЛАӨТКІЗГІШ ҚАБЫРШАҚТАРДАҒЫ РЕЗОНАНСТЫҚ ФОТОӨТКІЗГІШТІК

З.Ж. Жанабаев

*ф.- м.ғ.д., профессор, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы қ.*

М.А. Алимова

*докторант, оқытушы, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы қ.*

А.О. Тілеу

*магистр, оқытушы, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы қ.*

Т.С. Дуйсебаев

*докторант, оқытушы, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы қ.*

Е.Ж.Тезекбай

*магистр, оқытушы, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы қ.*

### Кіріспе

Шалаөткізгішті нанокеуекті қабыршақтардың әртүрлі электрлік және оптикалық қасиеттері бар. Олар сенсорларды, фотовольтаиканы және цифрлық технологияны жақсарту үшін қолданылады. Нанокеуекті шалаөткізгіштердің электрлік сипаттамаларының секіргіштік, гистерезистік қасиеті олардың жалпы физикалық заңдылықтарын анықтау үшін зерттелуде [1-7].

Бұл жұмыстың мақсаты фракталдық құрылымы бар нанокеуекті шалаөткізгіш қабыршақтарда ток пен жадыны өзгертудің теориялық моделін ұсыну, эксперименттік зерттеу болып табылады. Қарастырылып отырған құбылысқа сыртқы сәулелендірудің әсерін теориялық және эксперимент түрінде анықтау.

### Нанокеуекті қабыршақтағы ток күші болған кездегі фракталдық ұяшықтағы электронның потенциалдық энергиясы

Біз қолданатын белгілеулер:  $U$  – нанокеуекті қабыршақтың контактілері арасындағы кернеу,  $V(U)$  – фракталдық құрылымы бар кристалдық ұяшықтағы электронның потенциалдық энергиясы,  $D, d$  – сәйкесінше ұяшықтың фракталдық және топологиялық өлшемдері,  $\gamma = |D - d|$  – масштабтау индексі (масштабтық инвариант). Физикалық шама мәндерінің фракталдық жиыны үшін  $D > d$ . Тұтас ортада физикалық шаманың фракталдық өзгерісі үшін  $d > D$ .

Фракталдық өлшемнің жалпы теориясына сәйкес формуланы қолданамыз [2]:

$$V(U, \gamma) = E_g \delta(V)^{-\gamma}, \quad (1)$$

мұндағы  $E_g$  – энергияның тиым салынған диапазоны және  $\delta(V)$  – шаманы өлшеуге арналған өлшемдік шкала. Фракталды талдаудың стандартты алгоритмдері  $\delta$  мәнінің біркелкі шкаласын таңдауға негізделген. Алайда,  $\delta = 10^{-2} - 10^{-4}$  интервалда токтың жылдам өзгеру құбылысын сипаттау үшін  $U \sim E_g$  аралықта шаманың өзгеруіне тәуелді өлшем шкаласын таңдау керек  $\delta = \delta(U)$ . Сондықтан  $V(U)$  шамасын бейсызық фракталдық өлшем ретінде анықтаймыз [4]:

$$V(U, \gamma) = E_g \left( \left| 1 - \frac{V(U, \gamma)}{|U|} \right| \right)^{-\gamma} \quad (2)$$

Бейсызық (2) теңдеуді талдау үшін қолайлы әдіс – дискретті кадаммен итерациялау:

$$V_{i+1}(U, \gamma) = E_g \left( \left| 1 - \frac{V_i(U, \gamma)}{|U|} \right| \right)^{-\gamma} \quad (3)$$

Нанокеукеті қабыршақтың фотостимуляциялық секірмелі өткізгіштігі (3) формуланың оң жағына фотон энергиясын ( $\hbar\omega$ ) қосу арқылы сипатталады:

$$V_{i+1}(U, \gamma, \omega) = E_g \left( \left| 1 - \frac{V_i(U, \gamma, \omega)}{|U|} \right| \right)^{-\gamma} + \alpha(\omega)\hbar\omega, \quad (4)$$

$\alpha(\omega)$  - жұтылу коэффициенті. Ток күшінің артуы  $\hbar\omega$  плазмондық резонансқа байланысты. Нанокеукеті қабыршақ бетіндегі электрондардың плазмалық жиілігі

$$\omega_0 = \sqrt{4\pi n e^2 / m}, \quad (5)$$

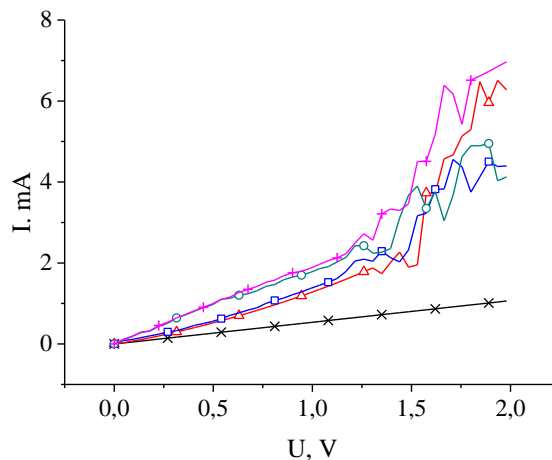
мұндағы  $n$  – электрондардың концентрациясы,  $m$ ,  $e$  – электронның массасы, заряды. Лазерлік сәулелену жиілігіне  $\omega = 2\pi c / \lambda$  және  $\omega_0$  тең болғанда резонанс болады ( $c$  - жарық жылдамдығы,  $\lambda$  – толқын ұзындығы).

Лазерлік сәулеленудің қабыршақ бетіне ықтимал ену тереңдігі  $kT$  жылу энергиясы бар электрондар үшін Дебай радиусымен бағаланады :

$$r_D = \sqrt{kT / 4\pi n e^2} \quad (6)$$

Кәдімгі жағдайда  $T = 300\text{K}, n = 10^{19}\text{cm}^{-3}$   $r_D \approx 3.8$  нм.

1-суретте (4), (5), (6) формулаларына сәйкес толқын ұзындығы  $\lambda = 630$  нм болатын инфрақызыл лазерлік сәулелену арқылы  $\alpha(\omega)\hbar\omega$  фотостимуляциясы ескерілген, нанокеукеті қабыршақтың вольт-амперлік сипаттамасы көрсетілген:

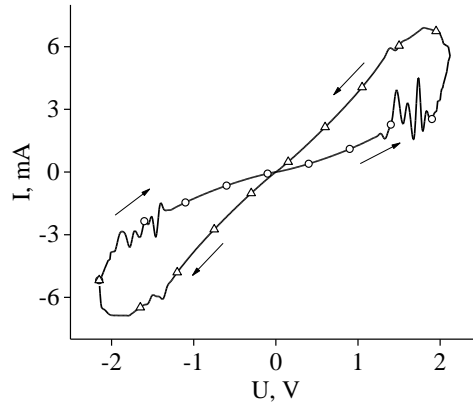


Сурет – 1 – Әртүрлі  $\gamma$  мәндері үшін нанокеукеті кремний қабыршағының вольт-амперлік сипаттамасы

(4) формулаға сәйкес  $\alpha(\omega)=0.05$   $\gamma$  мәндері: x - 0.24,  $\Delta$  - 0.2,  $\square$  - 0.15,  $\circ$  - 0.12, + - 0.09

$$\hbar\omega = hc/\lambda = 2 \text{ эВ}, \quad (7)$$

Нанокеукеті қабыршақтардың жадысы болуы теріс және оң кернеу мәндері үшін гистерезис ток-кернеу қисықтары түрінде көрінеді (2-сурет).



Сурет – 2 – Вольт-амперлік сипаттамасының гистерезисі  
 ○ –  $\gamma_1 = 0.2$ ,  $R_1 = 10^3 \text{ Ом}$ ,  $\Delta$  –  $\gamma_2 = 0.06$ ,  $R_2 = 304 \text{ Ом}$

### Нанокеукеті шалаөткізгіш қабыршақтардың резонанстық фотоөткізгіштігін эксперименттік зерттеу

Кеукеті кремний үлгілері p-n құрылымды және өлшемдері  $8 \times 2 \text{ мм}^2$  электрохимиялық жеміру арқылы алынды [8]. Қабыршақты алу уақыты 3 мин, ток тығыздығы  $50 \text{ mA/см}^2$ . Бастапқы субстрат ретінде p-n<sup>+</sup> - түйісуі бар дайын монокристалды кремний қолданылды, мұнда n<sup>+</sup> - қабаты негізгі заряд тасымалдаушылардың концентрациясы  $10^{19} \text{ см}^{-3}$  фосфор қоспаларының градиентті таралуы бар диффузиялық қабат болып табылады. p-n өткелінің шекарасына дейін қоспаның біртіндеп төмендеуімен p – кремнийдің қалыңдығы 350 мкм, кедергісі  $10 \text{ Ом} \times \text{см}$ , n<sup>+</sup> қабатының қалыңдығы шамамен 500 нм болды. Фосфорсиликат шыныны алу үшін кремний беті 10% фторлы қышқыл ерітіндісінде жемірілген және ультрадыбыстық құрылғыны пайдаланып изопропил спиртінде жуылған, содан кейін кептірілді.

Кеукеті кремний қабыршағының вольт-амперлік сипаттамаларын өлшеу NI ELVIS II<sup>+</sup> платформасында [9] пленкаларға ұзындығы 630 нм (2 эВ) инфрақызыл гелий-неонды лазерлік сәулеленуге әсер ету мүмкіндігімен жүргізілді. кернеу диапазоны 0-ден 2 В-қа дейін. Лазерлік сәулелену көзінен қабыршақ қашықтығы 5 см.

Фотостимуляция кезінде вольт-амперлік сипаттамасын өлшеуге арналған қондырғының схемалық диаграммасы:



Сурет – 3 – Вольт-амперлік сипаттамаларын өлшеуге арналған қондырғының схемасы

### **Қорытынды**

Нанокеуекті шалаөткізгіш қабықшада токтың ауысуы және фазалық жады құбылыстары қарастырылды. Қарастырылып отырған құбылыстардың негізгі қасиеттері бейсызық фракталдық өлшем формуласымен түсіндіріліп, сипатталды.

Электр өткізгіштік, фотостимуляцияланған өткізгіштік, токтың ауысу механизмі және ток-кернеу сипаттамасының гистерезис қасиеті туралы теорияның негізгі нәтижелері тәжірибе арқылы дәлелденді.

Осы жұмыста қарастырылған плазмонды резонанс арқылы секірмелі өткізгіштігін (фотостимуляциялау эффектісін) фазалық жадыны іске асыру технологияларында қолдануға болады.

### **Әдебиеттер тізімі**

- 1 Tsendin K. D., Bogoslovskiy N. A., J. Opt. Adv. Mat. 1429 (2011) 11-12.
- 2 Feder J., Fractals, Plenum Press, New York, 1988.
- 3 Zhanabaev, Z.Z. and Grevtseva, T.Y., Fractal properties of nanostructured semiconductors, Physica B: Condensed Matter. 391 (2007) 12-17. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2006.07.072>.
- 4 Zhanabaev, Z.Z. and Grevtseva, T.Y., Physical fractal phenomena in nanostructured semiconductors, Reviews in Theoretical Science. 2 (2014) 211-259. <https://doi.org/10.1166/rits.2014.1023>.
- 5 Panigrahy, C., Seal, A. and Mahato, N.K., Quantitative texture measurement of gray-scale images: Fractal dimension using an improved differential box-counting method, Measurement. 147 (2019) 106859. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.106859>.
- 6 Ibraimov, M.K., Sagidolda, Y., Rummyantsev, S.L., Zhanabaev, Z.Z. and Shur, M.S., Selective gas sensor using porous silicon, Sensor Letters. 14 (2016) 588-591. <https://doi.org/10.1166/sl.2016.3657>.
- 7 Zhanabaev, Z.Z., Grevtseva, T.Y., Danegulova, T.B. and Assanov, G.S., Optical processes in nanostructured semiconductors, Journal of Computational and Theoretical Nanoscience. 10 (2013) 673-678. <https://doi.org/10.1166/jctn.2013.2754>.
- 8 L.T. Canham, Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical dissolution of wafers, Appl. Phys. Lett. 57 (1990) 1046-1048. <https://doi.org/10.1063/1.103561>.
- 9 Fahd Ouatik, Mustapha Raoufi, Farouk Ouatik, Mohammed Skouri, Online instrument systems in reality for remote wiring and measurement of electronics in e-learning from LabVIEW+NI ELVIS II vs embedded system+web services, International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). 11 (2021) 1178-1185. <http://doi.org/10.11591/ijece.v11i2.pp1178-1185>.