

**Por-Si DA KRISTALLITLAR O‘LCHAMINI TOK TASHUVCHANLIK  
MEXANIZMIGA TA’SIRI.**

**Babaxodjeyev Umar Samsaxodjeyevich**

Fizika-matematika fanlari nomzodi, dotsent, Namangan davlat pedagogika instituti.

**Shamsiddinova Sarvinoz Madaminjon qizi**

Magistrant, Namangan davlat universiteti.

**E-mail:** sshamsiddinova000@gmail.com

**Usmonov Muhammadjon Abduxalil o‘g‘li**

O‘qituvchi, Namangan davlat universiteti.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.18979268>

**Annotasiya:** Por-Si qatlamidagi kristallitlar chegaraviy sirtidagi potensial to‘siq balandligini kristallit o‘lchami, legirlash konsentratsiyasi va haroratga bog‘lanishi sonli usulda tadqiq qilingan. Shuningdek tok tashuvchilar harakatchanligi kristallit o‘lchami, potentsial to‘siq balandligiga bog‘liqligini hisobga olgan holda por-Si qatlam uchun volt-amper xarakteristikasini turli grafiklari olingan.

**Kalit so‘zlar:** Por-Si, kristallit o‘lchami, potensial to‘siq, Puasson tenglamasi, legirlash konsentratsiyasi, tok tashuvchilar harakatchanligi, volt-amper xarakteristikasi.

**Аннотация:** Численным методом исследована зависимость высоты потенциального барьера на границах кристаллитов в слое пористого кремния (Por-Si) от размера кристаллитов, концентрации легирования и температуры. Также с учётом зависимости подвижности носителей заряда от размера кристаллитов и высоты потенциального барьера получены различные графики вольт-амперной характеристики слоя Por-Si.

**Ключевые слова:** Por-Si, размер кристаллитов, потенциальный барьер, уравнение Пуассона, концентрация легирования, подвижность носителей заряда, вольт-амперная характеристика.

**Abstract:** The dependence of the potential barrier height on the boundary surface of crystallites in the Por-Si layer on crystallite size, alloying concentration and temperature was studied numerically. Also, taking into account the dependence of the carrier mobility on the crystallite size and potential barrier height, various graphs of the volt-ampere characteristic for the Por-Si layer were obtained.

**Keywords:** Por-Si, crystallite size, potential barrier, Poisson's equation, alloying concentration, carrier mobility, volt-ampere characteristic.

**Kirish.**

Nanokristall va mikrokristall yarimo‘tkazgich materiallar so‘nggi yillarda yarimo‘tkazgichli qurilmalar sohasida, jumladan quyosh fotovoltaikasida qo‘llanishi bilan katta qiziqish uyg‘otmoqda [1-3]. Ushbu turkum yarimo‘tkazgichlarni fotoelektrik xossalari tadqiq qilishda kristallar chegarasidagi potensial to‘siq katta ahamiyat kasb etadi. Bir qator ishlarda tok tashuvchilar mexanizmini tushuntirishda va kerakli formulalar keltirib chiqarishda potensial to‘siqli model taklif qilingan [2,3].

Ushbu modelga ko‘ra kristallitlar hosil bo‘lish jarayonida kristallit sirtida uzilgan bog‘lar hisobiga zaryadli holatlar hosil bo‘ladi va ushbu holatlar kristallit hajmdagi erkin zaryadlarni tutib olish hisobiga kristallit sirti zaryadlanib potensial to‘siq hosil qiladi. Kristallitlar o‘rtasidagi chegarada bunday potensial to‘siqni mavjudligi erkin zaryad tashuvchilarni tok tashish tabiatini xarakterlaydi, ya‘ni kristallitni o‘tkazuvchanligi va xoll harakatchanligi aktivatsion va aniq xarakterga ega bo‘lib aktivlashish energiyasi potensial to‘siqni energetik balandligiga o‘rtasida mutanosiblik kuzatilgan [4].

Potensial to‘siqli modeldan polikremniyning fotoelektrik xossalari tadqiq qilishda ham qo‘llanilgan, jumladan [5,6] larda polikremniyli yarimo‘tkazgichlardagi rekombinatsion jarayon va zaryadni ko‘chirishiga yo‘rug‘likning ta’siri nazariy tadqiq qilingan, ammo [7] dagi muallifning fikricha [5,6] da taklif qilingan nazariyani qo‘llanish oralig‘i juda ham chegaralanganligi uchun polikristall kremniydagi jarayonlarni o‘rganishga yangicha yondashuv zarurligini ta’kidlagan. Jumladan [4,7] ishlarda yangi umumlashgan model asosida polikremniyning o‘tkazuvchanligini hisoblashda kristallit hajmidagi tok tashuvchilarning konsentratsiyasiga tashqi kuchlanish va yorug‘likning ta’sirini hisobga olgan holda volt-amper xarakteristikasi va rekombinatsion toklar uchun ifodalar keltirib chiqarilgan. Ammo yuqorida sanab o‘tilgan barcha ishlarda, ya‘ni [4,8,6,7] larda potensial to‘siq balandligini baholashda asoslangan J.Y.W. Seto ( model Seto) yoki Shottki yaqinlashishdan

## “Ilmiy tadqiqotlarni amaliyotga joriy qilishning muammo va yechimlari” mavzusidagi onlayn xalqaro ilmiy-amaliy anjuman materiallar to‘plami. NamDU - 2026-yil 20-21-fevral

foydalanilgan va ushbu modellar bir o‘lchovli hollar uchun ishlab chiqilgan. Sirtiy zaryadlarni erkin tok tashuvchilarda ekranlashuvini hisobga olmasdan va potensial to‘siq balandligini va kristallit tarkibidagi kirishmalar konsentratsiyasiga bog‘lanishni chiziqli ifodalaydi.

Bundan tashqari potensial to‘siq balandligini qiymati kristallit o‘lchamiga deyarli bo‘g‘liq holda ifodalamaydi, shuning uchun [7] da turli xil qalinlikdagi namunalarda uchun potensial to‘siq balandligini qiymati bir hil olingan. Potensial to‘siq kattaligining polikremniyning elektrofizik xossalarni xarakterlaydigan bir qancha parametrlarlarda ishtirok etgani uchun uning qiymatini aniq hisoblash katta ahamiyatga ega.

Shuningdek kristallit o‘lchami qancha kichrayishi bilan potensial to‘siq balandligi va kengligini aniq hisoblashni ahamiyati tobora ortadi. Bu esa por-Si uchun yanada dolzarbdir, chunki por-Si dagi kristallitlar o‘lchami polikristall kremniydagi kristallitlar o‘lchamidan kichikroqdir. Shuning uchun polikristall kremniyning elektrofizik xossalarni o‘rganish uchun taklif qilingan usullarini por-Si uchun ham deyarli qo‘llash mumkin bo‘ladi.

Ushbu ishda [9] da taklif qilingan kristallitlar o‘rtasidagi potensial to‘siq balandligi ( $V_0$ ) ni aniqlash uchun taklif qilingan usuldan foydalanamiz va ushbu usul yordamida topilgan  $V_0$  ni qiymatlaridan foydalanib tok tashuvchilar uchun asosiy parametr hisoblangan elektron va kovaklarning harakatchanligi ( $\mu$ ) va o‘rtacha yashash vaqti ( $\tau$ ) ni kristallit o‘lchamiga bo‘g‘liqligi tadqiq qilamiz.

### Por-Si kristallitning fizik modeli

Kristallitlar orasida yuzaga kelgan potensial to‘siq balandligini aniqlashda [7,8,10] ishlarda yuqorida ta’kidlaganimizdek kristallitning kub shaklidagi zarracha sifatida olingan va bir o‘lchovli Puasson tenglamasi Shottki yaqinlashish yoki Seto modelidan foydalanilgan. Puasson tenglamasini ishlash orqali potensial to‘siq balandligi uchun  $V_S = \frac{e^2 L^2 N_d}{2 \epsilon_0 \epsilon}$  va  $V_S = \frac{e^2 n_s^2}{8 \epsilon_0 \epsilon N_d}$  ko‘rinishidagi ifodalar olingan. Ushbu ifodalar yordamida potensial to‘siq balandligini haroratga yoki kristallit o‘lchamiga bo‘g‘liqligini tadqiq qilish juda murakkab, chunki ifodalarda harorat va kristallit o‘lchami bevosita ishtirok etmaydi. (Bu yerda  $L$  - kambag‘allashgan qatlam qalinligi). Bundan tashqari kristallitlar o‘rtasidagi yuzaga kelgan potensial to‘siq kengligini aniqlash imkoniyati yo‘q.

Ushbu kamchiliklarni bartaraf etish maqsadida [9] da tavsiya qilingan usuldan foydalanamiz, ya’ni kristallit shakli sferik sirt bilan chegaralangan va zaryadlangan qatlam deb hisoblab, sferik koordinatalarda Puasson tenglamasini sonli usulda ishlaymiz.

Por-Si kristalliti konsentratsiyasi  $N_d$  bo‘lgan donor aralashma bilan legirlangan deb hisoblab, umumiy holda Puasson tenglamasini quyidagicha tuzamiz.

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = -\frac{1}{\epsilon_0 \epsilon} \rho(x) \quad (1)$$

bu yerda  $\varphi = \varphi(x)$  - hajmiy zaryadlar sohasidagi potensial taqsimoti.

$\rho(x)$  - hajmiy zaryadlar taqsimot funksiya bo‘lib umumiy holda

$$\rho(x) = e\{p(x) - n(x) + N_a^+(x) - N_a^-(x) + N_{ta}^+(x) - N_{ta}^-(x)\}$$

ko‘rinishida yoziladi. Biz qarayotgan hol uchun esa  $p(x)$ ,  $N_a^+(x)$ ,  $N_{ta}^+(x)$ ,  $N_{ta}^-(x)$  hadlarni  $n(x)$  va  $N_a^+(x)$  hadlar nisbatan hisobga olmasak ham bo‘ladi. U holda Puasson tenglamasi

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon} (n(x) - N_a^+(x)) \quad (2)$$

ko‘rinishida bo‘ladi.

$n(x)$  - hajmiy zaryadlar sohasidagi erkin elektronlar konsentratsiyasi bo‘lib uni  $n(x) = n_0 \exp\left(\frac{e\varphi(x)}{kT}\right)$  kabi yozilishi mumkin.

$x \geq L$  ( $L$ - hajmiy zaryadlar sohasi kengligi) shart bajarilsa  $n(x) \approx n_0 \approx N_d$  munosabat o‘rinli bo‘ladi. U holda (2) tenglamani quyidagi ko‘rinishda yozishimiz mumkin

$$\frac{\partial^2 \varphi(x)}{\partial x^2} = \frac{eN_d}{\epsilon_0 \epsilon} \left( \exp\left(\frac{e\varphi(x)}{kT}\right) - 1 \right) \quad (3)$$

Sferik simmetriya xossasidan kelib chiqib Puasson tenglamasi (3) ni sferik koordinatalar sistemasida quyidagicha yoza olamiz.

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial \varphi(r)}{\partial r} \right) = \frac{eN_d}{\epsilon_0 \epsilon} \left[ \exp\left(\frac{e\varphi(r)}{kT}\right) - 1 \right] \quad (4)$$

Sferik sirtida zaryadlarni bir tekis taqsimotidan kelib chiqib chegaraviy shartlarni quyidagicha yoza olamiz.

$$\begin{aligned} r = 0 \text{ (sfera markazida)} \quad E = 0 &\Rightarrow \left. \frac{d\varphi}{dr} \right|_{r=0} = 0 \\ r = R \text{ (sfera sirtida)} \quad E = \frac{eN_s}{\epsilon \epsilon_0} &\Rightarrow \left. \frac{d\varphi}{dr} \right|_{r=R} = \frac{e}{\epsilon \epsilon_0} N_s \end{aligned}$$

**“Ilmiy tadqiqotlarni amaliyotga joriy qilishning muammo va yechimlari” mavzusidagi onlayn xalqaro ilmiy-amaliy anjuman materiallar to‘plami. NamDU - 2026-yil 20-21-fevral**

Bu yerda  $N_s$  - kristallit sirtidagi zaryadli holatlarni sirtiy konsentratsiyasi sonli usulda echishni osonlashtirish uchun (4) tenglamani o‘lchovsiz  $x$  va  $y$  kattaliklar orqali ifodalaymiz. Buning uchun  $r = xR$  va  $y = \frac{e\varphi}{kT}$  kabi almashtirish bajaramiz va quyidagi tenglamaga ega bo‘lamiz.

$$\frac{1}{x^2} \frac{\partial}{\partial x} \left( x^2 \frac{\partial y}{\partial x} \right) = \frac{e^2 N_d R^2}{\varepsilon_0 \varepsilon k T (e^y - 1)} \quad (5)$$

Chegaraviy shartlarni esa quyidagicha yozamiz:

$$\left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=0} = 0 \quad \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=1} = \frac{e^2 N_s R}{\varepsilon_0 \varepsilon k T} \quad (6)$$

(5) tenglamani (6) chegaraviy shartlar asosida sonli usulda ishlanadi.

[9] da olingan natijalardan kelib chiqib  $R \geq 20 \text{ nm}$  o‘lchamli kristallitlar chun potentsial to‘siq balandligini legirlash konsentratsiyasiga va haroratga bog‘lanish grafiklarni oldik (1-2 rasm).

Ushbu olingan natijalardan foydalanib por-Si qatlam volt-amper xarakteristikasi uchun [11] da olingan formulalar yordamida VAX grafigini keltirib chiqarishda foydalanamiz.

$$j = e \mu n_0 \sqrt{\frac{V_1 N_d}{2 \varepsilon_0 \varepsilon}} \left( 1 + \frac{eU}{V_0} \right) \exp \left( -\frac{V_1}{kT} \right) \left( 1 - \exp \left( -\frac{eU}{kT} \right) \right) \quad (7)$$

Bu yerda  $V_1 = V_0 \left( 1 - \frac{eU}{4V_0} \right)^2$  va  $V_0$  - potentsial to‘siq balandligi,  $U$  – tashqi kuchlanish,  $n_0$  - erkin elektronlar konsentratsiyasi.

(7) ifodaga ko‘ra VAX kristallit o‘lchamiga bevosita bog‘liqligi ko‘rinmaydi va bundan tashqari [11] da tok tashuvchilarning harakatchanligi ( $\mu$ ) turli o‘lchamdagi kristallitlar uchun bir xilda olingan. Ammo [12] da keltirilganidek tok tashuvchilarning harakatchanligi kristallit o‘lchami va potentsial to‘siq balandligiga quyidagicha bog‘langan, ya’ni

$$\mu = \frac{eL}{\sqrt{2\pi m^* kT}} \exp \left( -\frac{V_0}{kT} \right) \quad (8)$$

Tok tashuvchilarning o‘rtacha issiqlik tezligi

Yoki  $V_0 = \sqrt{\frac{kT_0}{2\pi m^*}}$  ekanini hisobga olib ( $V_0$  - elektronning  $T_0 = 300 \text{ K}$  haroratdagi issiqlik tezligi)

(8) ni quyidagicha yozishimiz mumkin bo‘ladi.

$$\mu = \frac{eLV_0}{\sqrt{T_0}} \exp \left( -\frac{V_0}{kT} \right) \quad (V_0 = 6 \cdot 10^6 \text{ cm/s}) \quad (9)$$

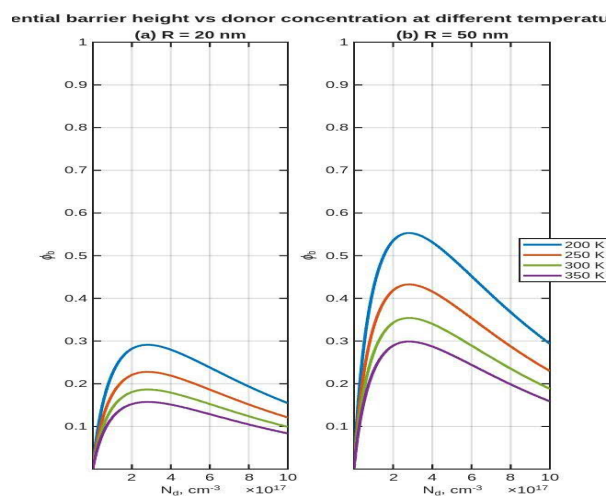
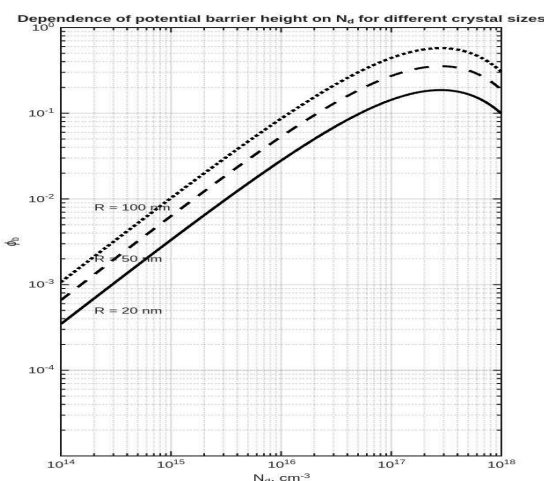
$U$  holda (7) va (9) quyidagi formulani keltirib chiqaramiz

$$j = \frac{e^2 LV_0 n_0}{\sqrt{T_0}} \sqrt{\frac{V_1 N_d}{2 \varepsilon_0 \varepsilon}} \left( 1 + \frac{eU}{V_0} \right) \exp \left( -\frac{V_1 + V_0}{kT} \right) \left( 1 - \exp \left( -\frac{eU}{kT} \right) \right) \quad (10)$$

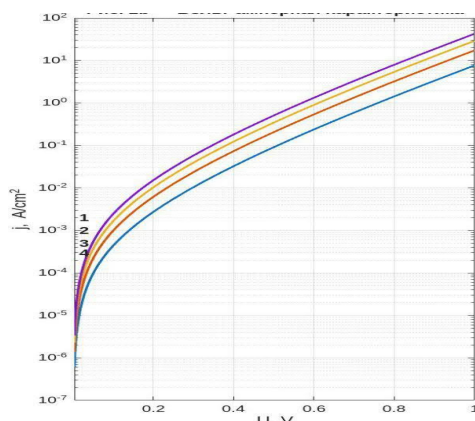
Por-Si qatlami uchun kristallitlar o‘lchami turlicha bo‘lgan hol uchun VAX grafigi (9) va (10) formulalar yordamida yasalgan (3-a va 3-b rasm).

Qolgan kattaliklar barcha o‘lchamdagi kristallitlar uchun bir xil.

Har ikki grafiklar uchun  $n_0$  kattalik bir xil olingan, ammo  $n_0$  kattalik ham kristall o‘lchamiga bog‘liq bo‘lishi ham mumkin, agar  $n_0 \sim f(L)$  bog‘liqlik bajarilsa, ya’ni tog‘ri proporsional bo‘lsa, u holda grafiklardagi farq yanada kuchaydi va bu holat alohida tadqiqot talab qiladi.

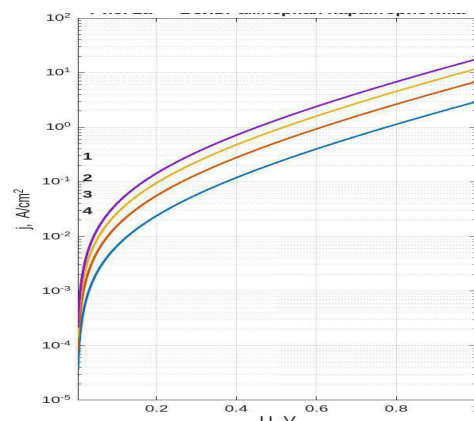


1- rasm por-Si dagi kristallitlar o‘rtasidagi potensial to‘siq balandligini kristallitlar o‘lchamiga bog‘liqligi



a

2- rasm Turli qalinlikdagi kristallitlardagi potensial to‘siq balandligini haroratga bog‘liqligi



b

3-a va 3-b rasm por-Si qatlamining volt-ampere xarakteristikasi. a- tok tashuvchilar harakatchanligi o‘zgarimas, b- tok tashuvchilar harakatchanligi kristallit o‘lchamiga bog‘liq

#### Adabiyotlar

1. Zhong, J. Nanostructured materials for room-temperature gas sensors / J. Zhong, X. Liu, N. Neri, N. Pinna // *Advanced Materials*. — 2016. — Vol. 28, № 5. — P. 795–831.
2. Sharma, K. Study of photovoltaic properties of silicon solar cell and their dependence on grain boundaries / K. Sharma // *Advanced Research in Engineering and Technology*. – 2020. – Vol. 11, № 9. – P. 1112–1119.
3. Burgelman, M., Nollet, P., & Degraeve, S. (2000). Modelling polycrystalline semiconductor solar cells. *Thin Solid Films*, 361-362, 527–532.
4. Дошанов, К. М. (1997). Температурная зависимость электрических свойств поликристаллического кремния в темноте и при воздействии солнечного излучения. *Физика и техника полупроводников*, 31(8), 954–956.
5. Joshi, D. P., & Bhatt, D. P. (1984). Theory of grain boundary recombination and barrier height in polycrystalline silicon. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 31(7), 920–927. Joshi, D. D., & Sharma, K. (2012). Effects of grain boundaries on the performance of polycrystalline silicon solar cells. *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, 50, 661–669.
6. Mandurah, M. M., Saraswat, K. C., & Kamins, T. I. (1981). A model for conduction in polycrystalline silicon—Part I: Theory. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 28(10), 1163–1171.
7. Дошанов, К. М. (1996). Рекомбинация и перенос заряда в поликристаллических полупроводниках при воздействии оптического излучения. *Физика и техника полупроводников*, 30(3), 558–568.
8. Зимин, С. П. Электрофизика пористого кремния и структур на его основе : дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.04.10 / Зимин Сергей Павлович. — Ярославль, 2003. — 304 с.
9. Ильченко, А. С. Расчет потенциального барьера в пористом кремнии и нанокристаллических полупроводниках / А. С. Ильченко, В. М. Гололобов, Е. А. Форш, П. К. Кашкаров // *Известия вузов. Материалы электронной техники*. — 2017. — Т. 20, № 2. — С. 122–128.
10. Козловский, А. С. Электрические свойства мелкозернистых поликристаллов CdTe / А. С. Козловский, Ю. В. Клевков, А. Ф. Плотников // *Физика и техника полупроводников*. — 2004. — Т. 38, № 4. — С. 473–478.