Ikkinchidan, impulsli qo‘zg‘atish va wavelet transformatsiya o‘rtasidagi analitik moslik chiqarildi hamda wavelet energiya maksimumining impuls vaqtiga konsistent baho berishi teorema sifatida isbotlandi.

Uchinchidan, wavelet operatorining freym xossalari diagnostika barqarorligi bilan bog‘landi va energiya invariantligi qat’iy matematik asosda ko‘rsatildi.

To‘rtinchidan, wavelet fazosida Neyman–Pirson va Bayes optimal detektorlari sintez qilinib, diagnostik qaror qabul qilish jarayoni statistik qaror nazariyasi bilan integratsiyalandi.

Beshinchidan, katta og‘ishlar nazariyasi qo‘llanib, noto‘g‘ri signal ehtimolining eksponentsial kamayishi analitik tarzda asoslandi.

Oltinchidan, signalning siyrak wavelet tasviri diagnostik sezgirlikning fundamental oshishiga olib kelishi nazariy jihatdan ko‘rsatildi.

Natijada ushbu ish texnik diagnostikani ko‘p rezolyutsiyali stochastik deteksiya modeli sifatida qayta talqin qiladi va aqlli monitoring tizimlari uchun universal matematik metodologiyani taklif etadi.

Xulosa. Taklif etilgan model signal diagnostikasini global spektral paradigmadan lokal-stochastic paradigmaga o‘tkazadi. Operator nazariyasi, statistik deteksiya va wavelet analizning integratsiyasi metodning yuqori aniqligi hamda barqarorligini ta’minlaydi. Ushbu yondashuv aqlli monitoring tizimlari va prediktiv texnik xizmat platformalari uchun istiqbolli matematik asos yaratadi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati:

(1). Mallat S. Wavelet tahlil va ko‘p rezolyutsiyali analiz asoslari. “Academic Press”, 2008.

(2). Daubechies I. Waveletlar bo‘yicha o‘n ma’ruza. SIAM, 1992.

(3). Percival D.B., Walden A.T. Vaqt qatorlarini wavelet asosida tahlil qilish. Cambridge University Press, 2000.

(4). Vetterli M., Kovacevic J. Waveletlar va subpolosli kodlash. Prentice Hall, 1995.

(5). Donoho D.L. Shovqinni yumshoq chegaralash usuli bilan kamaytirish. IEEE Transactions on Information Theory. 1995, 41(3), 613–627-betlar.

(6). Coifman R.R., Wickerhauser M.V. Entropiyaga asoslangan optimal bazis tanlash. IEEE Transactions on Information Theory. 1992, 38(2). 713–718-betlar.

(7). Oksendal B. Stoxastik differensial tenglamalar va ularning qo‘llanilishi. Springer, 2003.

(8). Gardiner C.W. Stoxastik metodlar bo‘yicha qo‘llanma. Springer, 2009.

(9). Applebaum D. Lévy jarayonlari va stoxastik hisob. Cambridge University Press, 2009.

(10). Dembo A., Zeitouni O. Katta og‘ishlar nazariyasi va qo‘llanilishi. Springer, 1998.

(11). Kay S.M. Statistik signalni aniqlash nazariyasi asoslari. Prentice Hall, 1998.

(12). Poor H.V. Signalni aniqlash va baholashga kirish. Springer, 1994.

(13). Antoni J. Nostatistik signallarda spektral ekstsess diagnostikasi. Mechanical Systems and Signal Processing. 2006, 20(2), 282–307-betlar.

(14). Peng Z.K., Chu F.L. Mashina diagnostikasida wavelet transformatsiya qo‘llanilishi. Mechanical Systems and Signal Processing. 2004, 18(2), 199–221-betlar.

(15). Sharibayev N.Y., Davlatov A.B., Abdullayev L.A. Diskret wavelet transformatsiya asosida impulsli vibratsion jarayonlarni stoxastik modellashtirish. AIP Conference Proceedings. 2023, 2700, 030045.

(16). Davlatov A.B., Sharibayev N.Y. Elektromexanik tizimlarda impulsli buzilishlarning matematik modeli. Mexanika mashinalar, mexanizmlar va materiallar. 2022, 2-son, 34–42-betlar.

Ibragimova Madinabonu (Urganch davlat universiteti, Hamid Olimjon ko‘chasi, 14-uy, Urganch, 220100, O‘zbekiston; madinabonubahodir2024@gmail.com)

CIGS YUPQA QATLAMLI QUYOSH ELEMENTLARI: SO‘NGGI YUTUQLAR, MUAMMOLAR VA KELAJAK ISTIQBOLLARI

Annotatsiya. *Ushbu maqolada Copper Indium Gallium Selenide (CIGS) asosidagi yupqa qatlamli quyosh elementlarining so‘nggi yutuqlari, texnologik cheklovlari va kelajak istiqbollari tahlil qilinadi. CIGS yuqori optik yutish koeffitsiyenti ($>10^5$ cm^{-1}) va 1,0–1,7 eV band bo‘shlig‘i bilan ajralib turadi. Laboratoriya samaradorligi 23–24%, Shockley–Queisser limiti esa 33–40%ni tashkil qiladi. Yupqa qatlamlarni tayyorlash usullari: ko-evaporatsiya, sputtering va elektrodepozitsiya tahlil qilingan. Natijalar CIGS texnologiyasining moslashuvchan quyosh panellari va integratsiyalashgan fotovoltaik tizimlarda istiqbolini ko‘rsatadi.*

Kalit so‘zlar: *CIGS, yupqa qatlam, Shockley–Queisser limit, deposition, fotovoltaika, samaradorlik.*

Ибрагимова Мадинабону (Ургенчский государственный университет, ул. Хамида Олимжона, д. 14, г. Ургенч, 220100, Узбекистан; madinabonubahodir2024@gmail.com)

ПОСЛЕДНИЕ ДОСТИЖЕНИЯ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ CIGS

Аннотация. *В статье проанализированы последние достижения, технологические ограничения и перспективы тонкопленочных солнечных элементов на основе Copper Indium Gallium Selenide (CIGS). Материалы CIGS обладают высоким коэффициентом поглощения света (>10^5 $см^{-1}$) и шириной запрещенной зоны 1,0–1,7 эВ. Лабораторная эффективность составляет 23–24%, теоретический предел Шокли–Квайссера: 33–40%. Рассмотрены методы формирования тонких слоев: ко-испарение, распыление (sputtering) и электроосаждение. Результаты показывают перспективность технологии CIGS для гибких солнечных модулей и интегрированных фотоэлектрических систем.*

Ключевые слова: *CIGS, тонкопленочные элементы, предел Шокли–Квайссера, депозиция, фотоэлектрические системы, эффективность.*

Ibragimova Madinabonu (Urgench State University, 14 Hamid Olimjon Street, Urgench, 220100, Uzbekistan; madinabonubahodir2024@gmail.com)

RECENT ADVANCES AND CHALLENGES IN CIGS THIN-FILM SOLAR CELLS

Annotation. *This paper reviews recent advances, technological limitations, and future prospects of thin-film solar cells based on Copper Indium Gallium Selenide (CIGS). CIGS exhibits a high optical absorption (>10^5 cm^{-1}) and a band gap of 1.0–1.7 eV. Laboratory efficiencies reach 23–24%, while the Shockley–Queisser theoretical limit is 33–40%. Key thin-film deposition methods: co-evaporation, sputtering, and electrodeposition: are analyzed. Results highlight the potential of CIGS technology for flexible solar modules and building-integrated photovoltaic systems.*

Keywords: *CIGS, thin-film solar cells, Shockley–Queisser limit, deposition, photovoltaic technology, efficiency.*

Kirish. Quyosh energiyasi bugungi kunda global energiya muammolarini hal qilishda eng istiqbolli va ekologik xavfsiz manbalardan biri hisoblanadi. U cheksizligi, atrof-muhitga zarar yetkazmasligi hamda qayta tiklanuvchi energiya manbayi sifatida muhim ahamiyat kasb etadi. Jahon miqyosida energiya iste'molining ortib borishi va an'anaviy yoqilg'i resurslarining kamayib borishi fonida quyosh energiyasidan samarali foydalanish bo'yicha ilmiy tadqiqotlar jadal rivojlanmoqda. Shu sababli yuqori samaradorlikka ega bo'lgan fotoelektrik qurilmalarni ishlab chiqish va ularning texnologiyasini takomillashtirish dolzarb ilmiy masalalardan biri hisoblanadi.

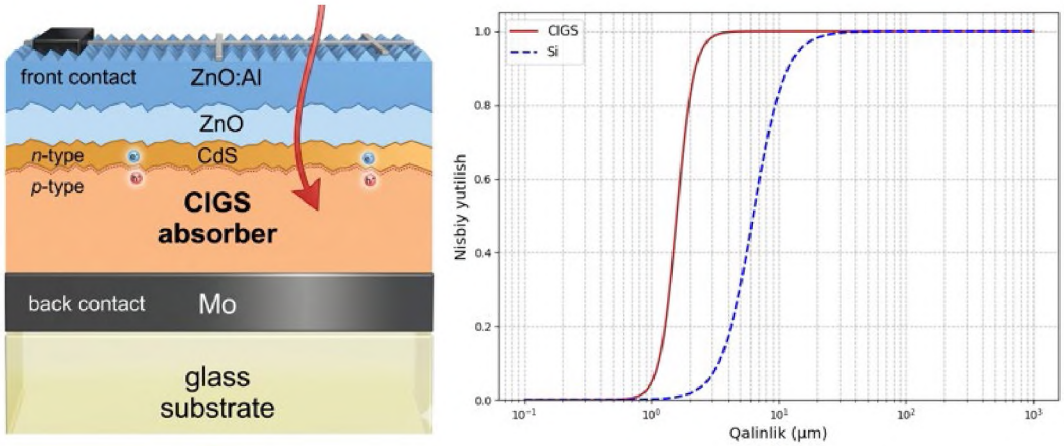
Mavzuga oid adabiyotlarning tahlili. Hozirgi kunda quyosh batareyalarining asosiy qismi kremniy asosida ishlab chiqariladigan fotoelementlarga to'g'ri keladi. Ushbu texnologiya ko'pincha "birinchi avlod" quyosh batareyalari deb ataladi va sanoatda keng qo'llaniladi. Biroq kremniy asosidagi texnologiyalar yuqori haroratli ishlab chiqarish jarayonlari va katta miqdordagi material sarfi tufayli iqtisodiy jihatdan ma'lum cheklovlarga ega. Shu sababli so'nggi yillarda material sarfini kamaytirish, ishlab chiqarish jarayonini soddalashtirish hamda moslashuvchan qurilmalar yaratish imkonini beruvchi yupqa qatlamli ("ikkinchi avlod") fotoelektrik texnologiyalar keng rivojlanmoqda [1]. Yupqa qatlamli quyosh batareyalari orasida Copper Indium Gallium Selenide (CIGS) asosidagi fotoelementlar yuqori samaradorligi va yaxshi optoelektrik xususiyatlari bilan ajralib turadi. CIGS materialining to'g'ridan-to'g'ri energiya zonasi (direct band gap) mavjudligi va yuqori yorug'lik yutilish koeffitsiyenti uning juda yupqa qatlamlarda ham samarali ishlashini ta'minlaydi. Laboratoriya sharoitida CIGS asosidagi quyosh batareyalarining samaradorligi 23%dan yuqori qiymatga yetgani qayd etilgan. Bundan tashqari, moslashuvchan polyimid substratlar ustida ishlab chiqarilgan qurilmalarda ham 20%dan ortiq samaradorlikka erishilganligi tasdiqlangan. Shu bilan birga, ushbu material tizimi uchun nazariy maksimal samaradorlik, ya'ni Shockley–Queisser limiti taxminan 33–40 % atrofida baholanadi, bu esa CIGS texnologiyasini yanada rivojlantirish orqali samaradorlikni sezilarli darajada oshirish imkoniyati mavjudligini ko'rsatadi [2]. CIGS fotoelementlarining samaradorligi ko'plab texnologik va material omillariga bog'liq. Xususan, substrat materiali, natriy (Na) dopingi, elementlarning diffuziyasi, shuningdek, yarimo'tkazgich qatlamining kristall sifati muhim rol o'ynaydi. Natriy elementining CIGS qatlamiga diffuziyasi donachalar o'sishini yaxshilaydi, nuqsonlar sonini kamaytiradi va fotoelementning umumiy samaradorligini oshiradi. Shu sababli substrat va oraliq qatlamlarning tarkibi va xossalarini optimallashtirish CIGS texnologiyasini rivojlantirishda muhim ilmiy yo'nalishlardan biri hisoblanadi [3]. Moslashuvchan va arzon substratlar asosida quyosh batareyalari ishlab chiqarish texnologiyasini rivojlantirish ham katta ahamiyatga ega. Zanglamaydigan po'lat (Stainless Steel, SS yoki STS) substratlari

mexanik mustahkamligi, yuqori haroratga chidamliligi hamda sanoat miqyosida qo‘llash imkoniyati tufayli istiqbolli asoslardan biri hisoblanadi. Biroq bunday substratlardan foydalanishda asosiy muammolardan biri temir (Fe) atomlarining CIGS qatlamiga diffuziya qilib kirishi hisoblanadi. Bu jarayon yarimo‘tkazgich qatlamining elektr xossalarini yomonlashtirib, qurilma samaradorligining pasayishiga olib keladi. Mazkur muammoni bartaraf etish uchun odatda SiO_2 yoki Si_3N_4 kabi materiallardan tayyorlangan diffuziya to‘suvchi qatlamlar qo‘llaniladi [4]. Shuningdek, ayrim tadqiqotlarda CIGS qatlamini past haroratli jarayonlarda o‘stirish orqali diffuziya muammosini kamaytirish mumkinligi ham ko‘rsatib berilgan. Masalan, Mo/Ti qoplamali zanglamaydigan po‘lat substratlarida diffuziya to‘suvchi qatlam qo‘llamasdan ham 17.7% samaradorlikka ega bo‘lgan quyosh batareyalari ishlab chiqilganligi qayd etilgan [5]. Bu esa texnologik jarayonni soddalashtirish va ishlab chiqarish xarajatlarini kamaytirish imkonini beradi. Umuman olganda, CIGS asosidagi yupqa qatlamli quyosh batareyalari yuqori samaradorlik, kam material sarfi va moslashuvchan substratlar ustida ishlab chiqarish imkoniyati bilan ajralib turadi. Shu bilan birga, sanoat miqyosida ishlab chiqarish jarayonida stoixometriyani aniq nazorat qilish, qatlam sifatini barqaror ta’minlash, yuqori ishlab chiqarish unumdorligi va past tannarxga erishish muhim muammolardan biri bo‘lib qolmoqda. Ayniqsa, kichik maydonli qurilmalardan katta maydonli modullarga o‘tishda jarayonning barqarorligi va takrorlanuvchanligini ta’minlash alohida ahamiyat kasb etadi [6]. Shu sababli CIGS asosidagi quyosh batareyalarida substrat materiali, diffuziya jarayonlari va qatlamlararo o‘zaro ta’sirlarni chuqur o‘rganish hamda ularni optimallashtirish bugungi kunda muhim ilmiy va amaliy tadqiqot yo‘nalishlaridan biri hisoblanadi.

Tadqiqot metodologiyasi (Research Methodology). CIGS materiali $Cu(In_{1-x}Ga_x)Se_2$ qotishma yarimo‘tkazgich bo‘lib, unda Ga/In nisbati o‘zgarishi bilan taqiqlangan energiya kengligi ham o‘zgaradi, odatda, quyidagi empirik tenglama bilan ifodalanadi [7]:

$$E_g(x) = 1.01 + 0.626x - 0.167x \cdot (1-x) \quad (1)$$

Shu paytgacha ko‘pgina ilmiy ishlarda shu formuladan foydalanilgan bo‘lsa-da, biroq bir necha kamchiliklari mavjud, masalan, bu formula yordamida Ga/In nisbati o‘zgarishini hisobga olingan lekin temperature o‘zgarishidagi effektni hisobga olmagan.



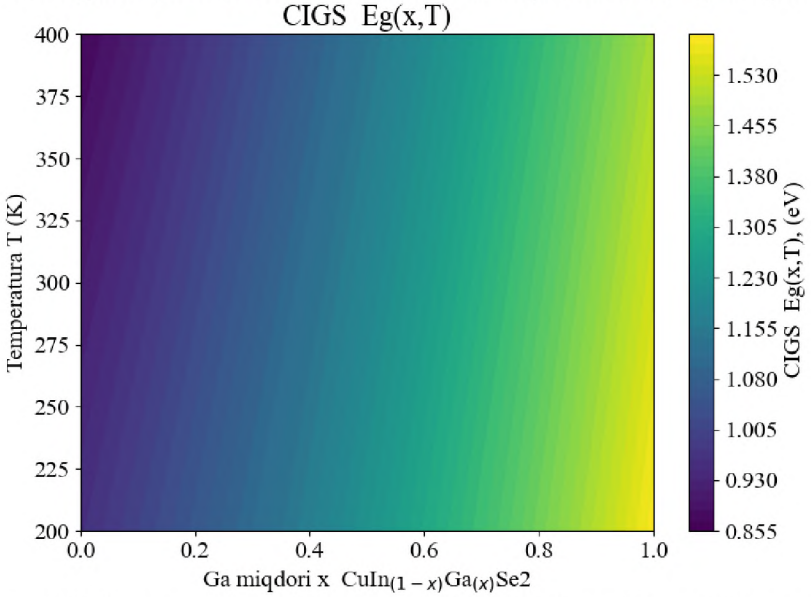
1-rasm. Namunani CIGS va Si fotovoltaik materiallarining qalinlikga bog‘liq nisbiy yutilishi.

1-rasm: b) CIGS quyosh elementlarining har bir qatlamining qalinligi va legirlanish (konsentratsiya) darajasi qurilmaning umumiy samaradorligi, to‘ldirish koeffitsiyenti FF va ochiq zanjir kuchlanishini V_{oc} aniqlab beruvchi kritik parametrlardir. Quyida ushbu qatlamlarning ilmiy asoslangan texnik ko‘rsatkichlari keltirilgan: 1. CIGS quyosh elementlarining qatlam parametrlari.

2. Ilmiy asoslash va fizik mexanizmlar, CIGS Absorber (p-type). CIGS qatlamining qalinligi odatda 2 μm atrofida tanlanadi. Ilmiy jihatdan, bu qalinlik barcha tushayotgan fotonlarning 90%dan ortig‘ini yutish uchun yetarli $\alpha > 10^5$. Konsentratsiya 10^{16} cm^{-3} atrofida saqlanishi kerak; agar u juda yuqori bo‘lsa, diffuziya uzunligi kamayadi, agar juda past bo‘lsa, ichki elektr maydoni kuchsizlashadi. CdS Bufer qatlam (n-type), Bu qatlam juda yupqa (taxminan, 50 nm) bo‘lishi shart. Buning sababi, CdS keng polosali yarimo‘tkazgich bo‘lsa-da, Eg=2.4 eV, u qisqa to‘lqinli (ko‘k) nurlarni yutib yuboradi.

Tahlil va natijalar (Analysis and results). Qatlam qanchalik yupqa bo‘lsa, "parasitic absorption" (parazit yutilish) shunchalik kam bo‘ladi va quyosh elementining ko‘k spektrdagi sezgirligi ortadi. ZnO:Al (TCO) qatlam, Bu qatlam yuqori konsentratsiyaga 10^{20} cm^{-3} ega bo‘lishi kerak, chunki u metall kabi tokni

yaxshi o‘tkazishi (past qarshilik), shu bilan birga, shaffof bo‘lishi lozim. Al (Alyuminiy) bilan legirlash orqali uning o‘tkazuvchanligi oshiriladi, bu esa seriyali qarshilikni R_s kamaytirib, foydali ish koeffitsiyentini oshiradi. Qalinlikning samaradorlikka ta'siri (Tahlil). Siz taqdim etgan grafikda (b-rasm) ko‘ringanidek, CIGS qalinligi 1 μm.dan oshganda yutilish keskin ortadi. Optik nuqtai nazardan 2 μm optimal hisoblanadi.



2-rasm. CIGS materialining energetik taqiqlangan soha kengligining galliy tarkibi va temperatura bilan o‘zgarishi tasvirlangan.

Hozirgi zamonaviy tadqiqotlarda material sarfini kamaytirish uchun "ultra-thin" < 0.5 μm. CIGS elementlari ustida ishlanmoqda, biroq bunda yutilishni oshirish uchun orqa tomonda yorug‘likni qaytaruvchi teksturalar ishlatish talab etiladi. 1-rasm b) dan ko‘rinib turibdiki, CIGS materiallari juda ingichka qatlamlarda ham fotonlarni samarali yutadi: 0.1 μm qalinlikda nisbiy yutilish ~0.12, 0.5 μm qalinlikda ~0.70, va 1 μm qalinlikda ~0.90 ga yetadi. Shu bilan birga, Si materiallarida yuqori yutilishga erishish uchun ancha qalinroq qatlam talab qilinadi: 1 μm qalinlikda nisbiy yutilish ~0.35, 50 μm qalinlikda ~0.85, va ~200 μm qalinlikda ~0.95 ga yetadi. Bu farq CIGSning yuqori optik yutilish koeffitsiyenti bilan izohlanadi, u ingichka qatlamlarda ham samarali foton yutilishini ta’minlaydi. Natijalar PV hujayralarda material tanlash va qalinlik dizayni bo‘yicha qarorlar qabul qilishda muhim ahamiyatga ega. CIGS yarimo‘tkazgichida taqiqlangan zona kengligi $E_g$galliy ulushi $x$va temperatura Tga sezilarli darajada bog‘liq. Hisoblashlar empirik band gap modeli va Varshni tenglamasi asosida amalga oshirildi. Natijalarga ko‘ra, galliy ulushi ortishi bilan band gap qiymati $E_g \approx 1.01$eV (x=0) dan $E_g \approx 1.67$eV (x=1)gacha oshadi. Temperatura ta’siri natijasida 200–400 K diapazonda band gap qiymati o‘rtacha 0.05–0.08 eV ga kamayishi kuzatildi. Masalan, $x = 0.3$ holatda $E_g$qiymati 1.22 eV (200 K)dan 1.16 eV (400 K) gacha kamayadi. Ushbu natijalar CIGS materialida galliy tarkibini o‘zgartirish orqali band gap energiyasini 1.0–1.7 eV diapazonda boshqarish mumkinligini ko‘rsatadi. Bu esa yuqori samaradorlikka ega quyosh elementlarini loyihalashda muhim ahamiyatga ega.

Xulosa va takliflar. CIGS ($Cu(In,Ga)Se_2$) asosidagi yupqa qatlamli quyosh elementlari yuqori yorug‘lik yutish koeffitsiyenti ($\alpha \approx 10^5$ sm^{-1}) va moslashuvchan energiya zonasi kengligi ($E_9 \approx 1.0–1.7$ eV) tufayli samarali fotoelektrik material hisoblanadi. So‘nggi ilmiy tadqiqotlar laboratoriya sharoitida CIGS quyosh elementlarining maksimal fotoelektrik samaradorligi 23–23,5%gacha yetkazilganini ko‘rsatdi. Absorber qatlam qalinligi odatda 1–3 μm bo‘lib, bu kremniy asosidagi elementlarga nisbatan ancha kam material sarfini talab qiladi. Tadqiqotlar shuni ko‘rsatdiki, alkali metall elementlari (Na, K) bilan modifikatsiya qilish zaryad tashuvchilar konsentratsiyasini 10^{15}–$10^{17}$$sm^{-3}$ oralig‘ida oshirib, rekombinatsiya yo‘qotishlarini kamaytiradi. Shu bilan birga, kristall panjaradagi nuqsonlar, elementlarning notekis taqsimlanishi va indiy hamda galliy kabi kamyob elementlarning mavjudligi CIGS texnologiyasining keng sanoat miqyosida qo‘llanilishini cheklashda davom etmoqda. Kelajakda ekologik toza buffer qatlamlar yaratish, defektlarni kamaytirish va material tarkibini optimallashtirish orqali CIGS asosidagi quyosh elementlarining samaradorligini 25%dan yuqori darajaga yetkazish imkoniyati mavjud. CIGS yarimo‘tkazgichida taqiqlangan zona kengligi (E_9) galliy ulushi (x) va temperatura (T) ga sezilarli darajada bog‘liq. Hisoblashlar empirik band gap modeli va Varshni tenglamasi asosida amalga oshirildi. Natijalarga ko‘ra, galliy ulushi ortishi bilan

band gap 1,01 eV (x=0)dan 1,67 eV (x=1) gacha oshadi. Temperatura ta'siri natijasida 200–400 K diapazonda band gap qiymati o'rtacha 0,05–0,08 eV ga kamayadi. Masalan, x=0,3 holatda E_9 qiymati 1,22 eV (200 K)dan 1,16 eV (400 K)gacha kamayadi. Ushbu natijalar CIGS materialida galliy tarkibini o'zgartirish orqali band gap energiyasini 1,0–1,7 eV diapazonda boshqarish mumkinligini ko'rsatadi, bu esa yuqori samaradorlikka ega quyosh elementlarini loyihalashda muhim ahamiyatga ega.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati:

(1). Kim K.-B., Kim M., Lee H.-C., Park S.-W., & Jeon C.-W. (2017). Materials Research Bulletin, 85, p. 168–175. https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2016.09.018

(2). Zhou J., & Lia C. (2021). E3S Web of Conferences, 267, 02031. https://doi.org/10.1051/e3sconf/ 2021 26702031

(3). Kumar V., Prasad R., Chaure N.B., Singh U.P. (2022). Advances in Sustainability Science and Technology. Springer, https://doi.org/10.1007/978-981-19-3724-82

(4). Pianezzi F., Chirilă A., Blösch P., Seyrling S., Buecheler S., Kranz L., Fella C., & Tiwari A.N. (2012). Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 20(3), p. 253–259. https://doi.org/10.1002/pip.1247

(5). Tang Y. (2017)., Nanostructured Solar Cells. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/65291

(6). Li W., Chen L., Wang D., Liang B., Shao X., Sun Y., & Yang C. (2025)., Materials Futures, 4(4), 045105. https: //doi.org/10.1088/2752-5724/ae0ce4.

(7). Zeboudj H., & Hadri B. (2025). Physica Scripta, 100(11), 115918. https://doi.org/10.1088/1402-4896/ae 1900.

Qarshiyeva Adiba Chorshambiyevna (Denov Tadbirkorlik va pedagogika instituti talabasi),
Razzokov Alijon Shonazarovich (Urganch davlat universiteti professori),
Omonqulova Umida Husan qizi (Denov Tadbirkorlik va pedagogika instituti o'qituvchisi),
O'ljayev O'tkir Boymamatovich (Denov tadbirkorlik va pedagogika instituti dotsenti;
e-mail: utkir.uljaev@outlook.com)

GRAFENDAGI STRUKTURAVIY NUQSONLARNING VODOROD ADSORBSIYASIGA TA'SIRI

Annotatsiya. *Ushbu ishda nuqsonli grafenlarda H_2 molekulalarining fizisorbsiyasi reaktiv molekular dinamika usuli bilan o'rganildi. Nuqsonlar o'lchami va konsentratsiyasi ortishi qismiy zaryadlar qayta taqsimlanishi hisobiga adsorbsiyani kuchaytirishi, shuningdek, eng yuqori nuqson ulushida gravimetrik zichlik 2,16 wt.%ga yetdi.*

Kalit so'zlar: *vodorod saqlash, nuqsonli grafen, vodorod fizisorbsiyasi, reaktiv molekulyar dinamika.*

Каршиева Адиба Чоршамбиевна (студентка, Деновский институт предпринимательства и педагогики).
Раззоков Алижон Шоназарович (профессор Ургенчского государственного университета),
Омонкулова Умида Хусан кизи (преподаватель, Деновский институт предпринимательства и педагогики),
Улжаев Уткир Боймаматович (доцент, Деновский институт предпринимательства и педагогики).

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ ГРАФЕНА НА АДСОРБЦИЮ ВОДОРОДА

Аннотация. *В работе методом реактивной молекулярной динамики исследована физическая адсорбция молекул H_2 на дефектном графене. Показано, что увеличение размера и концентрации дефектов усиливает адсорбцию за счёт перераспределения частичных зарядов. При максимальной доле дефектов гравиметрическая плотность достигла 2,16 wt.%.*

Ключевые слова: *хранение водорода, дефектный графен, физическая адсорбция водорода, реактивная молекулярная динамика.*

Karshiyeva Adiba Chorshambiyevna (Student, Denov Institute of Entrepreneurship and Pedagogy).
Razzokov Alijon Shonazarovich (Professor of Urgench State University,
Omonqulova Umida Husan qizi (Teacher, Denov Institute of Entrepreneurship and Pedagogy),
Uljayev Utkir Boymamatovich (Associate Professor of the Denov Institute of Entrepreneurship and Pedagogy)

EFFECT OF STRUCTURAL DEFECTS IN GRAPHENE ON HYDROGEN ADSORPTION

Annotation. *In this work, the physisorption of H_2 molecules on defective graphene was studied using reactive molecular dynamics. The results show that increasing the size and concentration of defects enhances adsorption through the redistribution of partial charges. At the highest defect fraction, the gravimetric density reached 2.16 wt.%.*