

NAMANGAN DAVLAT
UNIVERSITETI
ILMIY AXBOROTNOMASI, [2026-9]
ISSN:2181-1458
ISSN:2181-0427



01.00.00-FIZIKA-MATEMATIKA
journal.namdu.uz
PHYSICS AND MATHEMATICS

MIS KONTAKTLI CHUQUR ARALASHMA SATXGA EGA $\text{Cu}_{2-x}\text{CdS}-\text{CdTe}$ TURIDAGI QUYOSH ELEMENTLARINING ESKIRISHINI O'RGANISH

Otajonov Salom Madraximovich

Farg'ona davlat universiteti, Professor f.-m.f.d.

Email: otajonov_s@mail.ru,

Raxmonqulov Maxammadjon Xamroqulovich

Farg'ona davlat universiteti, F.-m.f.n. dotsent

Ergashev Ravshanbek Nazirovich

Farg'ona davlat universiteti, katta o'qituvchi f.-m.f. PhD

E-mail: rova08@mail.ru,

Botirov Qodir Abdullayevich

Farg'ona davlat universiteti, katta o'qituvchi

E-mail: botirov_q1969@gmail.com,

Yo'ldashev Alimardon Yursinali o'g'li

Farg'ona davlat universiteti, magistr

Annotatsiya: Ishda $\text{Cu}_{2-x}\text{CdS}-\text{CdTe}$ geterotuzilmalari asosidagi chuqur kirishmaviy sathli quyosh elementlarining eskirish jarayonlari tadqiq etilgan. Fotoelektrik parametrlarning barqarorligiga texnologik omillar va foydalanish sharoitlarining ta'siri tahlil qilingan. Normal sharoitda uzoq muddat saqlash jarayonida salt ishlash kuchlanishi, qisqa tutashuv toki, volt-ampere xarakteristiklari va spektral sezgirlikning o'zgarish kinetikasi eksperimental o'rganildi. Degradatsiya jarayoni ikki bosqichda kechishi ko'rsatilgan: boshlang'ich bosqichda salt ishlash kuchlanishi biroz oshganda qisqa tutashuv tokining pasayishi kuzatiladi, ikkinchi bosqichda esa ikkala parametrlarning bir vaqtning o'zida yomonlashishi sodir bo'ladi. CdS qatlamining elektrofizik xususiyatlari, shuningdek mis sulfidning fazaviy tarkibi o'zgarishi beqarorlikda muhim rol o'ynashi aniqlandi.

Kalit so'zlar: $\text{Cu}_{2-x}\text{CdS}-\text{CdTe}$, quyosh elementlari, eskirish, degradatsiya, geteroo'tish, spektral sezgirlik

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАРЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТИПА $\text{Cu}_{2-x}\text{CdS}-\text{CdTe}$ С ГЛУБОКИМ ПРИМЕСНЫМ УРОВНЕМ И МЕДНЫМ КОНТАКТОМ

Аннотация: В работе исследованы процессы старения солнечных элементов с глубокими примесными уровнями на основе гетероструктур $\text{Cu}_{2-x}\text{CdS}-\text{CdTe}$. Проанализировано влияние технологических факторов и условий эксплуатации на стабильность фотоэлектрических параметров. Экспериментально изучена кинетика изменения напряжения холостого хода, тока короткого замыкания, вольт-амперных характеристик и спектральной чувствительности при длительном хранении в нормальных условиях. Показано, что процесс деградации протекает в две стадии: на начальной стадии наблюдается уменьшение тока короткого замыкания при незначительном увеличении напряжения холостого хода, тогда как на второй стадии происходит одновременное ухудшение обоих параметров. Установлено, что существенную роль в нестабильности характеристик играют изменения электрофизических свойств слоя CdS, а также фазового состава сульфида меди.

Ключевые слова: $\text{Cu}_{2-x}\text{CdS}-\text{CdTe}$, солнечные элементы, старение, деградация, гетеропереход, спектральная чувствительность.

STUDY OF THE AGING OF $\text{Cu}_{2-x}\text{CdS}-\text{CdTe}$ SOLAR CELLS WITH A DEEP IMPURITY LEVEL AND A COPPER CONTACT

Abstract: This paper investigates the aging processes of solar cells with deep impurity levels based on $\text{Cu}_{2-x}\text{CdS}-\text{CdTe}$ heterostructures. The influence of technological factors and operating conditions on the stability of the photoelectric parameters is analyzed. The kinetics of changes in the open-circuit voltage, short-circuit current, current-voltage characteristics, and spectral sensitivity during long-term storage under normal conditions were experimentally studied. It is shown that the degradation process occurs in two stages. At the initial stage, a decrease in the short-circuit current is observed together with a slight increase in the open-circuit voltage, whereas at the second stage both parameters deteriorate simultaneously. It was established that changes in the

electrophysical properties of the CdS layer, as well as changes in the phase composition of copper sulfide, play a significant role in the instability of the device characteristics.

Keywords: $Cu_{2-x}CdS$ -CdTe, solar cells, aging, degradation, heterojunction, spectral sensitivity.

KIRISH

CdTe geterotuzilmalari asosidagi yupqa plyonkali quyosh elementlari yuqori yutilish koeffitsiyenti, optimal taqirlangan zona kengligi ($\sim 1,45$ eV) va yuqori samarali hamda nisbatan arzon quyosh energiyasi o' zgartirgichlarini olish imkoniyati tufayli zamonaviy fotovoltaikada yetakchi o' rinlardan birini egallamoqda [1–3]. $Cu_{2-x}CdS$ -CdTe geteroo' tishlar alohida qiziqish uyg' otadi, ularda misning mavjudligi yuqori omli to' siqlarning shakllanishiga va qurilmalarning elektr xususiyatlarini yaxshilashga yordam beradi [4,5].

Biroq, bunday tuzilmalarning muhim muammosi vaqt bo' yicha parametrlarning beqarorligi bo' lib qolmoqda. Ma' lumki, CdTe oilasiga mansub quyosh elementlarining degradatsiyasi mis diffuziyasi, mis sulfidining stexiometriyasi o' zgarishi, shuningdek, atrof-muhitdan kislorod va namlik ta' siri bilan bog' liq [6–8]. Aksariyat ishlarda asosiy e' tibor $Cu_{2-x}S$ qatlamida kechadigan jarayonlarga qaratilgan bo' lib, CdS bazaviy qatlamining elektrofizik xususiyatlarining o' zgarishi va ularning uzoq muddatli barqarorlikka ta' siri yetarlicha o' rganilmagan [9].

Geteroo' tishlarda rekombinatsiya, fotoo' tkazuvchanlik va tok o' tkazish mexanizmlariga sezilarli ta' sir ko' rsatadigan chuqur kirishma sathlarining mavjudligi qo' shimcha murakkablik tug' diradi [10]. Bu sathlar ham fotosezgirlikni oshirishi, ham uzoq muddatli foydalanish paytida degradatsiya jarayonlarini tezlashtirishi mumkin.

Shu munosabat bilan, ushbu ishning maqsadi $Cu_{2-x}CdS$ -CdTe quyosh elementlarining eskirish jarayonlarini o' rganish, ularning fotoelektrik parametrlarining vaqt o' tishi bilan o' zgarishini tahlil qilish, shuningdek, CdTe va $Cu_{2-x}CdS$ qatlamlari xususiyatlarining o' zgarishi va geterostruktura xususiyatlarining degradatsiyasi o' rtasidagi bog' liqlikni aniqlashdan iborat.

TADQIQOT USULLARI

CdS-CdTe yupqa pardalarining optik va fotoelektrik xususiyatlari [11] mualliflari tomonidan fotoo' tkazuvchanlik va fotoelektrik harakatlantiruvchi kuchning spektral bog' liqligini o' lchash usullari yordamida tadqiq etilgan. Vakuumda purkash usuli bilan olingan va keyinchalik kislorod atmosferasida faollashtirilgan CdTe yupqa pardalari mualliflar tomonidan [12] ishida tadqiq etilgan.

$Cu_{2-x}CdS$ -CdTe polikristall yupqa pardalarining rentgenodifraksion spektrlari 190 nm dan 1100 nm gacha bo' lgan diapazondagi nurlanishni o' lchash uchun UV-1900i ikki nurli spektrofotometr yordamida olingan. Spektrometr analitik masalalar uchun optimal spektral diapazon, yorug' likning past sochilishi, 29000 nm/min qiymatli skanerlash tezligi va qulay foydalanuvchi interfeysi bilan ajralib turadi.

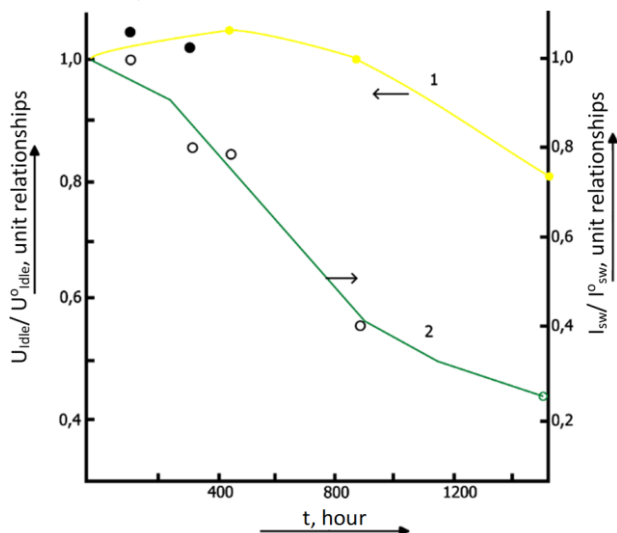
CdTe plyonkalarining tuzilishini o' rganish va tahlil qilish uchun JEOL (Yaponiya) kompaniyasida ishlab chiqarilgan JEOL JSM-6700F dala emissiyasiga ega skanerlovchi elektron mikroskop (SEM) ishlatilgan. Mikroskopning past aberratsiyali obyektivlari va o' lchov zondi toklarning keng diapazonida ham (15 kV da 200 nA dan ortiq) yuqori barqarorlik va aniqlikni ta' minlaydi.

TAJRIBA NATIJALARI VA ULARNING MUHOKAMASI

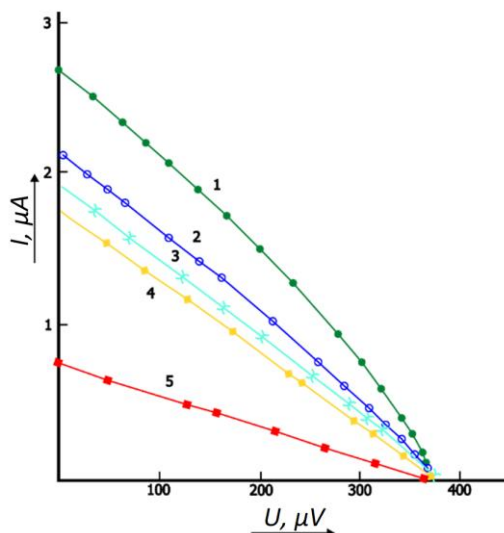
Germetik qoplamasiz quyosh elementlarining (QE) eskirishini o' rganish. Ma' lumki, germetiklanmagan QE larda parametrlarning kuchli o' zgarishi kuzatiladi. Buning sababini aniqlash uchun maxsus germetik bo' lmagan himoya qoplamalari bilan qoplangan namunalarning eskirish kinetikasi o' rganildi. O' rganilayotgan namunalarning bir qismida $Cu_{2-x}CdS$ dan tok oluvchi mis kontakt to' ri mavjud edi, asboblarning boshqa qismida $Cu_{2-x}CdS$ qatlamiga ikkita nuqtali In kontaktlar o' rnatildi. Namunalar yaratilgandan so' ng ularga texnik xizmat ko' rsatilmagan.

1-rasmda U_{si} va I_{qt} larning o' zgarish kinetikasi ko' rsatilgan. Ushbu rasmdan ko' rinib turibdiki, eskirishning boshlanishida salt ishlash kuchlanishining qiymati biroz oshadi, ammo keyinchalik saqlashda U_{si} pasayadi. Shu bilan birga, I_{qt} qiymati monoton pasayadi.

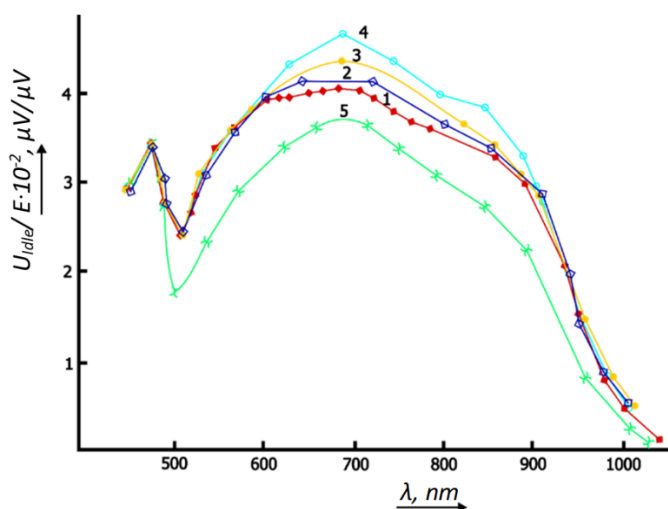
Mis kontaktli $Cu_{2-x}CdS$ -CdTe QE ning $Cu_{2-x}CdS$ ga yuklanish VAXining o' zgarishi 2-rasmda keltirilgan. Qarish jarayonini ikki bosqichga bo' lish mumkin. Birinchi bosqichda ($t \approx 700$ soat) I_{qt} kamayadi, U_{si} esa biroz ortadi (1-4 egri chiziqlar), ikkinchi bosqichda esa ($700 < t \leq 1500$ soat) I_{qt} va U_{si} qiymatlarining pasayishi kuzatiladi.



1-rasm U_{si}/U_{si}^0 (1) va I_{qt}/I_{qt}^0 (2) QE $Cu_{2-x}CdS-CdTe$ ning eskirish vaqti bilan nisbiy o'zgarishi.



2-rasm. Eskirish jarayonida $Cu_{2-x}CdS-CdTe$ QE germetizatsiyasiz yuklanish VAXining o'zgarishi: 1- $t=0$; 2- $t=140$; 3- $t=340$; 4- $t=580$; 5- $t=1500$ soat



3-rasm. U spektral bog'liqligining o'zgarishxx $Cu_{2-x}CdS-CdTe$ germetizatsiyalanmagan QE eskirish vaqti bilan: 1- $t=0$ s; 2- $t=200$ s; 3- $t=340$ s; 4- $t=700$ s; 5- $t=1500$ soat

Mis kontaktli to'g'ri quyosh elementlarining eskirish jarayoni.

3-rasmda U_{si} geteroo' tishlarning tayyorlangandan so'ng darhol (1-egri chiziq) va 1500 soat davomida keyingi eskirish jarayonida (2-5-egri chiziqlar) spektral taqsimoti ko'rsatilgan. Barcha egri chiziqlar CdTe da yorug'likning zona-zona yutilishi bilan bog'liq bo'lgan umumiy qisqa to'liqlik maksimumga keltirilgan. Qarishning birinchi bosqichida (1-4 egri chiziqlar) spektral xarakteristika asosan CdS foto sezgirlik markazlarida yorug'likning aralashma yutilishi bilan bog'liq bo'lgan 0,60-0,70 mkm to'liqlik uzunliklari sohasida o'zgaradi. Bunda kirishmaviy foto sezgirlik intensivligining-zonaviy zonaga nisbati ortadi. Spektral xarakteristikaning uzun to'liqlik chegarasi ($\lambda \approx 0,80-0,90$ mkm) deyarli o'zgarmaydi. Ikkinchi bosqichda 0,80-0,90 mkm sohada fotosezgirlikning kamayishi va spektral xarakteristikaning uzun to'liqlik chekkasining qisqa to'liqlik uzunligiga siljishi sodir bo'ladi. Eskirish jarayonini keyingi tadqiq qilish ($t > 1500$ soat) fototok kattaligining kuchli kamayishi sababli imkonsiz (1 va 2-rasmlar).

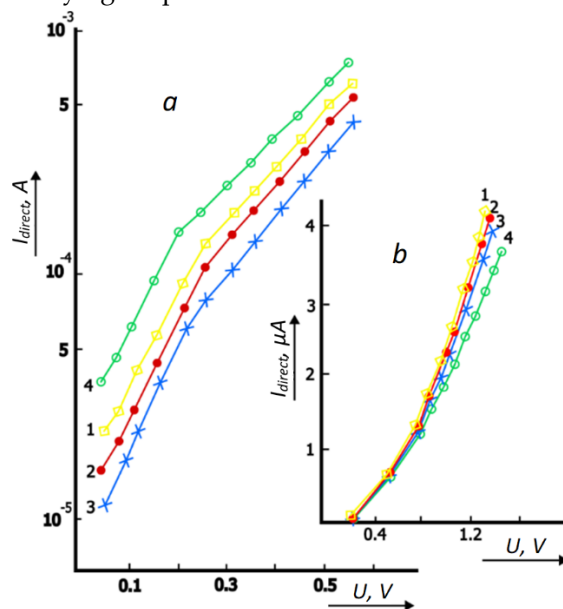
4-rasm, a va b da mos ravishda yarim logarifmik va chiziqli masshtablarda geteroo' tishlarning qorong'ulik VAXining to'g'ri tarmoqlari ko'rsatilgan.

Rasmdan ko'rinib turibdiki, kichik to'g'ri siljishlarda tok kuchlanishga eksponensial bog'liq. Turli haroratlarda VAXni o'lchash sudanning chegaraviy oksidlanishi yoki o'lchash paytida o'rganilayotgan namunalarning kuydirilmasligi tufayli imkonsiz edi. Shu sababli geteroo' tishlar orqali tok o'tish mexanizmi haqida fikr yuritish qiyin. Biroq, quyida ko'rsatilganidek, VAX to'g'ri tarmog'ining bunday ko'rinishi, ushbu kuchlanishlarda bunday tok darajasi bilan, tok o'tkazishning tunnel mexanizmi bilan tushuntiriladi. Bu bizga VAX ning to'g'ri tarmog'ini quyidagi ifoda bilan yaqinlashtirishga asos beradi:

$$I = I_{01} \exp(\alpha_1 u) + I_{02} \exp(\alpha_2 u) \quad (1)$$

bu yerda I_{01} va I_{02} - to' yinganlik qorong' ulik tokining tashkil etuvchilari, mos ravishda $I_{01}=1,3 \cdot 10^{-5}$ A va $I_{02}=2,7 \cdot 10^{-5}$ A ga teng va QE tayyorlangandan so' ng darhol o' lchangan; α_1 va α_2 - haroratga bog' liq bo' lmanan koeffitsiyentlar mos ravishda 10,6 va 5,56 qiymatlarga ega bo' lib, eskirish jarayonida deyarli o' zgarishsiz qoladi, bu esa uzatish toki mexanizmda sezilarli o' zgarish sodir bo' lmaydi deb ta'kidlashga asos beradi.

3.4-rasmdan ko' rinib turibdiki, I_{01} qiymatlari kamayadi va birinchi bosqich oxiriga kelib ushbu geterostruktura uchun minimal qiymatga ega bo' ladi. Keyingi saqlashda I_{01} va I_{02} oshadi.



4-rasm Yarim logarifmik (a) va chiziqli (b) masshtablarda eskirish vaqti bilan germetizatsiyalanmagan $\text{Cu}_{2-x}\text{CdS}$ -CdTe QE qorong' u VAXining to' g' ri tarmoqlarining o' zgarishi: 1-t=0 soat; 2-t=140 soat; 3-t=800 soat; 4-t=1700 soat.

Yuqoriroq kuchlanishlarda ($U > 0,6$ V) tok p-n geteroo' tishlarning ketma-ket qarshiligi bilan cheklanadi (4b-rasm). Birinchi bosqichda qorong' u VAXning boshlang' ich va chiziqli uchastkasi bo' yicha hisoblangan geteroo' tishlarning diffuziyalanadigan ketma-ket qarshiligining sekin o' sishi sodir bo' ladi. Bunda VAX chiziqli uchastkasini kuchlanish o' qiga ekstrapolyatsiyalash orqali aniqlangan uzilish toki kuchlanishi deyarli o' zgarmaydi. Ikkinchi bosqichda R_n ning sezilarli darajada oshishi va uzilish kuchlanishi qiymatining kamayishi kuzatiladi.

XULOSA

$\text{Cu}_{2-x}\text{CdS}$ -CdTe geterotuzilmalari asosidagi quyosh elementlarining uzoq muddatli eskirish jarayonlari eksperimental tadqiq etildi va ularning fotoelektrik hamda elektrofizik parametrlaridagi vaqtga bog' liq o' zgarishlar tahlil qilindi. Olingan natijalar asosida quyidagi xulosalarga kelindi.

$\text{Cu}_{2-x}\text{CdS}$ -CdTe quyosh elementlarining eskirishi ikki bosqichli xarakterga ega ekanligi aniqlandi. Birinchi bosqichda, taxminan 700 soatgacha, qisqa tutashuv toki (I_{qt}) kamayib boradi, salt ishlash kuchlanishi (U_{si}) esa biroz ortadi yoki deyarli o' zgarmaydi. Ikkinchi bosqichda, ya'ni 700–1500 soat oralig' ida, I_{qt} va U_{si} ning bir vaqtning o' zida pasayishi kuzatiladi, bu esa geterotuzilmaning fotoelektrik xususiyatlari sezilarli degradatsiyaga uchrayotganini ko' rsatadi.

Spektral xarakteristikalarini o' rganish shuni ko' rsatdiki, eskirishning birinchi bosqichida asosiy o' zgarishlar 0,60–0,70 mkm spektral sohada yuz beradi va ular CdS qatlamidagi kirishmaviy fotosezgirlik markazlarining holati bilan bog' liq. Bu bosqichda 0,80–0,90 mkm sohadagi uzun to' lqinli chegara deyarli o' zgarmaydi. Ikkinchi bosqichda esa uzun to' lqinli fotosezgirlikning kamayishi va spektral chegaraning qisqa to' lqinlar tomon siljishi kuzatiladi.

Qorong' ulik volt-ampere xarakteristikalarining tahlili kichik to' g' ri kuchlanishlarda tokning eksponensial xarakterga ega ekanligini va uning tunnel mexanizmi orqali o' tishi mumkinligini ko' rsatdi. Eskirish davomida α_1 va α_2 koeffitsiyentlarining deyarli o' zgarmasligi tok o' tkazishning asosiy mexanizmi saqlanib qolishini tasdiqlaydi. Shu bilan birga, to' yinganlik toklarining I_{qt} va U_{si} qiymatlari vaqt davomida o' zgarib, geteroo' tishdagi rekombinatsion va nuqsonli holatlarning evolyutsiyasini aks ettiradi.

Yuqori kuchlanishlar sohasida tokning qiymati geterotuzilmaning ketma-ket qarshiligi bilan cheklanishi aniqlandi. Birinchi bosqichda ketma-ket qarshilik sekin ortadi, ikkinchi bosqichda esa uning keskin oshishi kuzatiladi. Bu holat CdS qatlamining elektrofizik xususiyatlari, Cu_{2-x}S fazasining stexiometrik tarkibi va kontakt sohalaridagi o' zgarishlar bilan bog' liq ekanligini ko' rsatadi.

Shunday qilib, $\text{Cu}_{2-x}\text{CdS}$ -CdTe quyosh elementlari parametrlarining uzoq muddatli beqarorligi faqat Cu_{2-x}S qatlamida kechadigan jarayonlar bilan emas, balki CdS bazaviy qatlamidagi chuqur kirishmaviy sathlar, nuqsonlarning

qayta taqsimlanishi hamda ketma-ket qarshilikning ortishi bilan ham belgilanadi. Olingan natijalar ushbu turdagi quyosh elementlarining uzoq muddatli barqarorligini oshirish uchun CdS qatlamining nuqsonli tarkibini, Cu_{2-x}S fazasining stexiometriyasini va kontakt tuzilishini optimallashtirish zarurligini ko'rsatadi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Arturo Morales-Acevedo. Thin film CdS/CdTe solar cells: Research perspectives. June 2006 *Solar Energy* 80(6):675-681. DOI:10.1016/j.solener.2005.10.008
2. M. A. Scarpulla, Brian McCandless, Adam Phillips, Yanfa Yan. CdTe-based thin film photovoltaics: Recent advances, current challenges and future prospects. June 2023 *Solar Energy Materials and Solar Cells* 255(1):112289. DOI:10.1016/j.solmat.2023.112289
3. Abhijit T. Supekar, Ramesh S. Kapadnis, Sanjay Bansode, Pankaj K. Bhujbal. Cadmium Telluride/Cadmium Sulfide Thin Films Solar Cells: A Review. January 2020 *ES Energy & Environments*. DOI:10.30919/eseec8c706
4. Kapil Kumar, Vijay Kumar, Sham Singh. Cu_2S -CdS Heterojunctions for Solar Cell Applications. July 2020 *Research Journal of Chemistry and Environment* 24(7):167-179. <https://www.researchgate.net/>
5. Elisa Artegiani, Jonathan D Major, Huw Shiel, Vin Dhanak. How the amount of copper influences the formation and stability of defects in CdTe solar cells. January 2020 *Solar Energy Materials and Solar Cells* 204:110228. DOI:10.1016/j.solmat.2019.110228
6. Christina Gretener, Julian Perrenoud, Lukas Kranz, E. Cheah. New perspective on the performance stability of CdTe solar cells. March 2016, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 146:51-57. DOI:10.1016/j.solmat.2015.11.017
7. Elisa Artegiani, Jonathan D Major, Huw Shiel, Vin Dhanak. How the amount of copper influences the formation and stability of defects in CdTe solar cells. January 2020, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 204:110228. DOI:10.1016/j.solmat.2019.110228
8. Michael A. Scarpulla, Brian McCandless, Adam B. Phillips and others. CdTe-based thin film photovoltaics: Recent advances, current challenges and future prospects. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 255, 15 June 2023, 112289. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2023.112289>
9. F. Göde. Effect of Cu doping on CdS as a multifunctional nanomaterial: Structural, morphological, optical and electrical properties. August 2019, *Optik* 197:163217. DOI:10.1016/j.ijleo.2019.163217
10. Zeng Liu, Ling Du, Shao-Hui Zhang, Lei Li. Synergetic Effect of Photoconductive Gain and Persistent Photocurrent in a High-Photoresponse Ga_2O_3 Deep-Ultraviolet Photodetector. October 2022, *IEEE Transactions on Electron Devices* 69(10):5595-5602. DOI:10.1109/TED.2022.3195473
11. Abhijit T. Supekar, Ramesh S. Kapadnis, Sanjay Bansode, Pankaj K. Bhujbal. Cadmium Telluride/Cadmium Sulfide Thin Films Solar Cells: A Review. September 2020. DOI:10.30919/eseec8c706
12. Yaroslav Saliy, Lyubomyr Nykyruy, Rostyslav Yavorskyi, Stanislaw Adamiak. The Surface Morphology of CdTe Thin Films Obtained by Open Evaporation in Vacuum. October 2017, *Journal of Nano- and Electronic Physics* 9(5):05016-1-05016-5. DOI:10.21272/jnep.9(5).05016