

ՀՀ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ
ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Հարությունյան Լևոն Արամի

ԱՊԱԿԵ-ԲՅՈՒՐԵՂԱԿԱՆ ՏԱԿԴԻՐԼԵՐԻ ՎՐԱ CIGS ԱՐԵՎԱՅԻՆ ԷԼԵՄԵՆՏՆԵՐԻ
ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆ

Ա.04.10 – “Կիսահաղորդիչների ֆիզիկա” մասնագիտությամբ
ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի
գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ-2015

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РА
ЕРЕВАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Арутюнян Левон Арамович

ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ CIGS НА СТЕКЛО-
КЕРАМИЧЕСКИХ ПОДЛОЖКАХ

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности
01.04.10 – “Физика полупроводников”

ЕРЕВАН - 2015

Ատենախոսության թեման հաստատվել է ՀՀ ԳԱԱ Ռադիոֆիզիկայի և էլեկտրոնիկայի ինստիտուտում:

Գիտական ղեկավար՝

Ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր, ՀՀ ԳԱԱ թղթակից-անդամ, պրոֆ.

Ս.Գ. Պետրոսյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝

Ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆ.

ՀՀ գիտ. վաստ. գործիչ

Շ.Ռ. Փանոսյան

տեխ. գիտ. թեկնածու, դոցենտ

Վ.Ա. Գևորգյան

Առաջատար կազմակերպություն՝

Հայաստանի պետական

ճարտարագիտական համալսարան

Ատենախոսության պաշտպանությունը կայանալու է 2015 թ. հունիսի 9-ին ժամը 15:00-ին, Երևանի Պետական Համալսարանում գործող ֆիզիկայի 049 մասնագիտական խորհրդի նիստում: Հասցե՝ Երևան, Ալեք Մանուկյան 1:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵՊՀ գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 2015 թ. մայիսի 8-ին:

Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար,

Ֆիզ.-մաթ. գիտ. թեկնածու, դոցենտ

Վ.Պ. Քալանթարյան

Тема диссертации утверждена в Институте радиофизики и электроники НАН РА.

Научный руководитель:

доктор физ.-мат. наук, член-корр. НАН РА, проф. С.Г. Петросян

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук, проф., заслуженный деятель наук РА

Ж.Р. Паносян

кандидат техн. наук, доцент

В.А. Геворгян

Ведущая организация:

Государственный инженерный университет Армении

Защита диссертации состоится 9-го июня 2015 г. в 15:00 часов, на заседании специализированного совета физики 049 при Ереванском Государственном Университете по адресу: Ереван, ул. А. Манукяна 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕГУ.

Автореферат разослан 8-го мая, 2015г.

Ученый секретарь специализированного совета

Канд. физ.-мат. наук, доцент

В.П. Калантарян

Աշխատանքի ընդհանուր բնութագիրը

Ատենախոսության արդիականությունը

Ֆոտովոլտային փոխակերպիչների նկատմամբ աճող հետաքրքրությունը պայմանավորված է այն փաստով, որ այսօր, բացի ավանդական սիլիցիումային բազմաբյուրեղային և մոնոբյուրեղային արևային մարտկոցներից, արդեն հասանելի են շահագործման ժամանակ չափազանց կայուն, էժան և բարձր արդյունավետությամբ աշխատող բարակթաղանթային արեգակնային մոդուլները: Նման մոդուլները հիմնված են այնպիսի բազմաբյուրեղային կիսահաղորդիչ նյութերի վրա, որոնք ի վիճակի են կլանել արեգակնային էներգիայի մեծ մասը: Դրանց դասին են պատկանում a-Si, CdTe, CuInGa(S,Se) (CIGS) և CuSnZn(S,Se) (CZTS) [1-3]:

Բավականաչափ մեծ առաջընթաց է առկա CIS, CIGS կիսահաղորդչային միացությունների հիման վրա բարձր արդյունավետությամբ և էժան արևային էլեմենտների արտադրության բնագավառում, որոնք ունակ են մրցակցել սիլիցիումի հիման վրա արևային էլեմենտների հետ ինչպես ՕԳԳ-ի, այնպես էլ արևային էլեմենտի արտադրության ինքնարժեքի տեսակետից [4]:

Մյուս կողմից, համաշխարհային տնտեսությունը անցում է կատարում դեպի, այսպես կոչվող, «կանաչ տնտեսություն», որը ենթադրում է հաստատուն էներգամատակարարում, այդ թվում նաև արեգակնային էներգիայի լայնածավալ օգտագործում, էներգաարդյունավետության բարձրացում, բնական ռեսուրսների խնայում, էկոլոգիապես մաքուր քաղաքաշինություն և ճարտարապետություն, «խելացի քաղաքներ», «կանաչ» ապրանքների առևտուր, օրգանական գյուղատնտեսություն և այլն: Աշխարհի շատ երկրներում էներգաարդյունավետ շինություններին անցնելու պահանջը խթանել է նաև այլընտրանքային տակդիրների, այդ թվում կերամիկական կամ ապակե-բյուրեղական տակդիրների վրա արևային էլեմենտների ստեղծման գիտատեխնիկական աշխատանքները, ինչը պետք է թույլ տա ոչ միայն իջեցնել արևային էլեմենտների ինքնարժեքը, այլև հնարավոր դարձնի արևային մարտկոցները ինտեգրել զանազան շինարարական կառուցվածքային տարրերի հետ [5-9]: Այդ առումով մեծ հետաքրքրություն են ներկայացնում նաև այն աշխատանքները, որոնք նպատակաուղղված են ծածկելու շենքերի ապակիները էներգախնայողական թաղանթներով, կիսաթափանցիկ, բարակթաղանթային արեգակնային մոդուլներով [10] և այլն:

Մի շարք առավելություններից ելնելով (էկոլոգիական մաքրություն, ձայնամեկուսացվածություն, ջերմակայունություն և գործնականում երկարակյաց

նյութ)՝ վերջին ժամանակներում շինարարական կառույցներում ավելի հաճախ են սկսել կիրառել բնական պեռլիտը: Բնական պեռլիտը դա հրաբխային ապար է, որը պարունակում է 65-75% SiO₂ և 2-5% H₂O: Հայաստանում կան բնական պեռլիտի հսկայական պահուստներ: Բնական պեռլիտի հիման վրա պատրաստելով հատուկ հումքային խառնուրդ՝ կարելի է սինթեզել տարբեր ապակենման նյութեր, այդ թվում և ապակե-բյուրեղական նյութեր: Վերջինս կարող է լրիվ փոխարինել ավանդական, դյուրաբեկ ապակե տակդիրներին երկրորդ սերնդի արևային էլեմենտների համար (օրինակ, հիմնված CIGS-ի վրա): Պեռլիտային ապակե-բյուրեղական նյութի ջերմային ընդարձակման գործակիցը ($7.9 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) մոտ է CIGS կիսահաղորդչային նյութի ջերմային ընդարձակման գործակցին ($8.6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), ինչը և թույլ է տալիս թաղանթների նստեցման համար օգտագործել ավելի բարձր ջերմաստիճաններ (պեռլիտային ապակե-բյուրեղի փափկելու ջերմաստիճանը $\approx 1000^\circ\text{C}$): Այս գործոնը հնարավոր է դարձնում ապահովել բարձր արդյունավետությամբ աշխատող արևային էլեմենտների համար ցանկալի՝ CIGS-ի ավելի խոշոր հատիկային կառուցվածքը: Հատուկ սինթեզված և բյուրեղացման ենթարկված ապակիների և նրանց հիման վրա պատրաստված պեռլիտե ապակե-բյուրեղական տակդիրների բաղադրությունը ավելի կառավարվող է, քան ապակունը, ինչպես նաև այդ սինթեզված նյութերը չունեն ամբողջովին ամորֆ կառուցվածք, որը կարևոր է լավ աղգեզիայով մետաղական թաղանթների ստացման համար: Այդպիսի տակդիրի հաստությունը կարելի է նվազեցնել մինչև 500 միկրոն՝ օգտագործելով սիլիցիումային հարթակների համար նախատեսված հղկման և ողորկման գործընթացները: Ելնելով վերոգրյալից՝ հետևում է, որ ատենախոսության թեման՝ այլընտրանքային ապակե-բյուրեղական տակդիրների վրա արևային էլեմենտների ստացումը շինարարական կառույցներում նրանց հետագա ինտեգրման հնարավորությամբ, հանդիսանում է արդիական և կարևոր գործնական տեսանկյունից:

Աշխատանքի նպատակը

Ատենախոսության նպատակն է հատուկ սինթեզված պեռլիտային ապակե-բյուրեղական տակդիրների վրա ստեղծել CuIn_{1-x}Ga_xSe₂ (CIGS) և/կամ CuInSe₂ (CIS) արևային էլեմենտներ, հետագոտել դրանց բնութագրերը՝ կախված տեխնոլոգիական ռեժիմներից, ինչը ներառել է հետևյալ խնդիրների լուծումը՝

1. Արհեստական պեռլիտե ապակե-բյուրեղական տակդիրների ստացում և ֆիզիկական հատկությունների ուսումնասիրություն:

2. Պեռլիտային ապակե-բյուրեղական տակդիրի վրա մագնետրոնային փոշեցրման մեթոդով ցածր տեսակարար դիմադրությամբ մոլիբդենե (Mo) կոնտակտային շերտի ստացման օպտիմալ տեխնոլոգիական ռեժիմների մշակում:
3. Ապակե-բյուրեղական տակդիր/Mo կառուցվածքի վրա CIGS և/կամ CIS կլանիչ կիսահաղորդչային շերտերի ստացման վակուումային և էլեկտրաքիմիական բարակթաղանթային տեխնոլոգիաների մշակումը:
4. Ապակե-բյուրեղական տակդիր/ Mo/ CIGS կամ CIS/ CdS/ ZnO/ մետաղ կառուցվածքով արևային տարրի պատրաստումը:
5. Ստացված կառուցվածքի էլեկտրական և ֆոտոէլեկտրական հատկությունների ուսումնասիրություն, արևային տարրի ՕԳԳ-ի չափում ստանդարտ լուսավորման պայմաններում:

Գիտական նորություն

1. Առաջին անգամ ռենտգենակառուցվածքային անալիզի միջոցով ուսումնասիրվել է արհեստական պեռլիտային ապակե-բյուրեղական նյութի էլեմենտային բաղադրությունը և կառուցվածքը՝ ստացված զանգվածի 50% բնական պեռլիտ, 40% կալցիումի կարբոնատ ($CaCO_3$), 5% նատրիումի կարբոնատ (Na_2CO_3) և 5% բյուրեղացման կատալիզատորներ պարունակող հումքային խառնուրդի՝ 1350°C եփված ապակու երկրորդային բյուրեղացման արդյունքում:
2. Գտնվել են պեռլիտային ապակե-բյուրեղական տակդիրի վրա մագնետրոնային փոշեցրման մեթոդով նստեցված մոլիբդենի մինչև 1 մկմ հաստությամբ շերտերի ստացման օպտիմալ տեխնոլոգիական ռեժիմները՝ CIGS արևային էլեմենտներում դրանք որպես հետին կոնտակտ օգտագործելու համար:
3. Առաջարկվել է մոլիբդենի շերտերի ադզեզիան ստուգելու էքսպրես մեթոդ՝ օգտագործելով պղնձի էլեկտրաքիմիական նստեցման վաննան:
4. Մշակվել է պեռլիտե տակդիր/Mo կառուցվածքի վրա էլեկտրոլիտից CIS կլանիչի շերտի էլեկտրանստեցման տեխնոլոգիան:
5. Մշակվել է պեռլիտային ապակե-բյուրեղական տակդիրների վրա CIGS արևային էլեմենտների պատրաստման տեխնոլոգիական երթուղին, որտեղ կլանիչը նստեցվել է տարրերի համագոլորշացման եղանակով, ինչը կարող է ապահովել ավելի քան 10% ՕԳԳ, որը կարևոր քայլ է հանդիսանում նմանատիպ ֆոտովոլտային փոխակերպիչները շինարարական կառուցվածքների, մասնավորապես, տանիքի կղմինդրի հետ ինտեգրման հնարավորության տեսանկյունից:

Գործնական արժեքը

Պեռլիտային ապակե-բյուրեղական տակդիրների վրա CIGS արևային էլեմենտների ֆիզիկական հատկությունների փորձարարական ուսումնասիրությունից ստացված արդյունքները կարող են օգտակար լինել տարբեր նշանակության շենքերի և կառույցների՝ էներգետիկ տեսակետից անկախության մակարդակի բարձրացման լուծման հարցերում: Ստացված արդյունքների ներդրումը կբերի զգալի տնտեսական օգուտ շնորհիվ այն բանի, որ, օրինակ, տանիքների ծածկման աշխատանքներում կօգտագործվեն, այսպես կոչված, «արևային» կղմինդրները:

Պաշտպանությանը ներկայացվող հիմնական դրույթները

Պեռլիտային ապակե-բյուրեղական տակդիրի վրա CIGS արևային էլեմենտների պատրաստման տեխնոլոգիական գործընթացի մշակման և ստացված ֆոտովոլտային փոխակերպիչների փորձնական հետազոտությունների հիման վրա հաստատվել են հետևյալ դրույթները՝

1. Պեռլիտի հիման վրա սինթեզված կերամիկանման նյութը, ի տարբերություն նախնական ելքային ամորֆ նյութերի (բնական պեռլիտ, կալցիումի կարբոնատ և նատրիումի կարբոնատ), ունի ապակե-բյուրեղական կառուցվածք: Ապակե-բյուրեղական նյութը բաղկացած է միկրոնային չափերի բյուրեղներից, որոնք շրջափակված են ապակե ֆազայով, ընդ որում բյուրեղական ֆազան կազմում է ծավալի ավելի քան 95%:
2. Պեռլիտային ապակե-բյուրեղական տակդիրի վրա հաստատուն հոսանքի մագնետրոնային փոշեցրման եղանակով հնարավոր է ստանալ մոլիբդենի համասեռ շերտեր, որոնք, եթե նստեցվում են 250°C-ից բարձր ջերմաստիճաններում, ցուցաբերում են տակդիրի հետ ուժեղ ադգեզիա (ավելի քան 30 ՄՊա հպման ամրություն), օժտված են բարձր կարգի տեքստուրայնությամբ՝ 100 նմ կարգի բյուրեղահատիկների չափսերով, իսկ շերտի նստեցման փոքր արագության և ավելի խորը աշխատանքային վակուումի դեպքում՝ բավականաչափ ցածրահոծ են (տեսակարար դիմադրությունը՝ 5×10^{-4} Օհմ·սմ) և կարող են ծառայել որպես օհմական կոնտակտ p-CIGS հետ :
3. Պեռլիտային տակդիր/Mo/CIGS/CdS/i-ZnO/ZnO:(Al)/Ni-Al բազմաշերտ կառուցվածքը, որի CIGS բազմաբյուրեղային կլանիչ շերտը նստեցվել է պղնձի, գալիումի, ինդիումի և սելենի վակուումային համագործընթացման եղանակով, իսկ CdS պատուհանային շերտը նստեցվել է քիմիական եղանակով, AM1.5 (1000 Վտ/մ²) պայմանի դեպքում ապահովում է ավելի քան 10% լույսի փոխակերպման

ՕԳԳ՝ բնութագրվող վոլտ-ամպերային բնութագրի 48.4% լցման գործակցով և 518մՎ պարապ ընթացքի լարման արժեքով:

Ատենախոսության արդյունքների փորձահավաստությունը

Ատենախոսության հիմնական արդյունքները զեկուցվել են հետևյալ գիտաժողովներում՝

1. Восьмая годовичная научная конференция РАУ, 2-6 декабря, 2013, Ереван
2. Наука, техника и инновационные технологии в эпоху могущества и счастья, 12-14 июня, 2014 г., Ашхабад.
3. The First International conference on scientific development in Europe, 23 December 2014, Vienna.
4. The First European Conference on Physics and Mathematics, 3 March, 2015, Vienna.
5. ՀՀ ԳԱԱ Ռադիոֆիզիկայի և էլեկտրոնիկայի ինստիտուտի “Պինդ մարմնի ֆիզիկայի” և “Կիսահաղորդչային էլեկտրոնիկայի” լաբորատորիաների սեմինարներում:

Տպագրություններ

Ատենախոսության թեմայով տպագրվել է 6 աշխատանք, 1 հոդված՝ “European Physical Journal: Applied Physics” միջազգային գիտական ամսագրում, 1 հոդված “Известия НАН Армении, Физика” ամսագրում, 1 հոդված Հայ-Ռուսական (սլավոնական) համալսարանի ութերորդ ամենամյա գիտաժողովի նյութերում և 3 միահեղինակային հոդված՝ միջազգային գիտաժողովներում, որոնց ցուցակը բերված է սեղմագրի վերջում:

Ատենախոսության կառուցվածքը

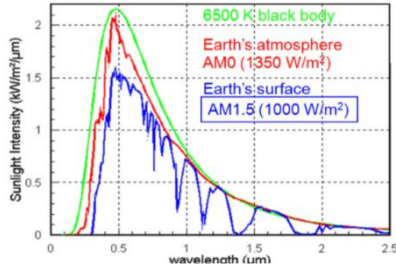
Ատենախոսությունը բաղկացած է ներածությունից, երեք զլովաներից, եզրակացությունից և 129 հոդում պարունակող գրականության ցանկից: Աշխատանքի ընդհանուր ծավալը 101 էջ է, պարունակում է 36 նկար և 5 աղյուսակ:

Ատենախոսության բովանդակությունը

Ներածության մեջ հիմնավորված է ատենախոսության արդիականությունը, ձևակերպված են աշխատանքի նպատակներն ու խնդիրները, ինչպես նաև պաշտպանության ներկայացվող հիմնական դրույթները, առանձնացված է ստացված արդյունքների գիտական նորույթը և դրանց գործնական արժեքը:

Գլուխ 1-ում ներկայացված է թեմային վերաբերվող գրականության ամփոփումը: Ներկայացված են արևային էներգետիկայի դերը, արևային էլեմենտի

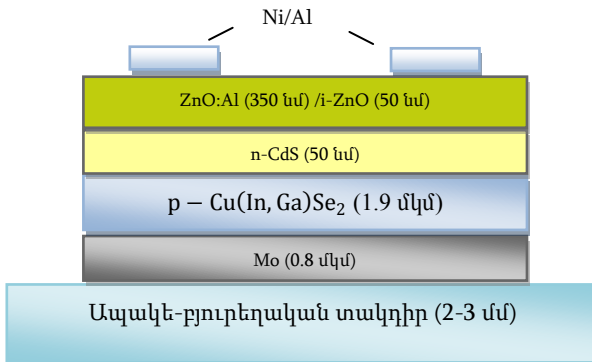
աշխատանքի սկզբունքները, զարգացման էտապները և դրանց ժամանակակից դասակարգումը: Նկ.1-ում ցույց է տրված արևային ճառագայթման սպեկտրը տարբեր օդային զանգվածների դեպքում և այն սպեկտրային տիրույթը, որտեղ կարող են CIGS կիսահաղորդչային պինդ լուծույթները ապահովել լույսի արդյունավետ կլանում In/Ga տարբեր հարաբերակցության համար:



Նկ.1. Արևային ճառագայթման սպեկտրը տարբեր պայմաններում

Քննարկվում են CIGS և CIS միացությունների հիման վրա բարակթաղանթային արևային էլեմենտները, դիտարկվում են դրանց առավելությունները և թերությունները, հատկությունները, նստեցման տեխնոլոգիաները, կառուցվածքը և ՕԳԳ մեծացման հնարավոր ուղիները:

Նկ.2-ում բերված է հետազոտվող CIGS արևային էլեմենտների կառուցվածքը, որը ստեղծվել է ապակե տակդիրի վրա ստանդարտ CIGS արևային էլեմենտի նմանությամբ:



Նկ.2. CIGS արևային էլեմենտի կառուցվածքը

Գլուխ 2-ը նվիրված է ատենախոսության հիմնական նորարարություններից մեկին, այն է ապակե-բյուրեղական պեռլիտե տակդիքի սինթեզին և դրա ֆիզիկական հատկությունների ուսումնասիրությանը:

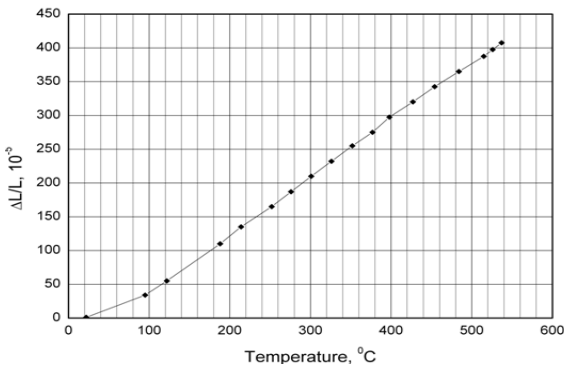
Այդպիսի նյութերի ստացման տեխնոլոգիայի հիմքում ընկած է ապակու կատալիտիկ բյուրեղացման սկզբունքը: Այդ նպատակով ելքային հումքային խառնուրդի մեջ ներմուծվում են հատուկ միացություններ (ֆտորիդներ, ֆոսֆիդներ), որոնք առաջացնում են ապակու մեջ բյուրեղացման կենտրոններ դրանց հետագա ջերմամշակման ընթացքում: Մովորաբար ապակե-բյուրեղական նյութի սինթեզը բաղկացած է մի քանի փուլից: Առաջին փուլում բնական պեռլիտից, կալցիումի կարբոնատից (CaCO_3), նատրիումի կարբոնատից (Na_2CO_3), կատալիզատորներից և որոշ այլ գունավոր օքսիդներից /ըստ անհրաժեշտության/ պատրաստվում է հումքային խառնուրդ, որը գնդային աղացի օգնությամբ դարձվում է փոշենման խառնուրդ՝ մինչև 100 մկմ հատիկայնությամբ: Այնուհետև իրականացվում է ապակեփման պրոցես մոտ 1400°C ջերմաստիճանում, ընդ որում բովախառնուրդը տաքացվում է հատուկ ռեժիմով. սկզբում ջերմաստիճանը բարձրացվում է շատ դանդաղ, մոտ 6 ժամվա ընթացքում մինչև $1250\text{--}1300^\circ\text{C}$ (այսինքն, $3.6^\circ\text{C}/\text{րոպե}$ արագությամբ): Այնուհետև սկսվում է ապակեգոյացման ռեակցիան, որը տևում է մոտ 1 ժամ, որից հետո հալույթի ջերմաստիճանը 30 րոպեի ընթացքում բարձրացվում է մինչև 1400°C : Ապակին այդ ջերմաստիճանում պահվում է մոտ մեկ ժամ, որի ընթացքում նրանից անջատվում են լուծված գազերը պղպջակների տեսքով: Հաջորդ քայլում ստացված ապակին կարելի է կաղապարավորել, որի ժամանակ հալույթի ջերմաստիճանը մի քանի րոպեների ընթացքում ընկնում է մինչև 500°C : Ապակու հետագա սառեցումը (թրծաթորումը) սովորականի պես կատարվում է շատ դանդաղ (մոտ $0.5^\circ\text{C}/\text{րոպե}$ արագությամբ)՝ կուտակված մեխանիկական լարումներից ազատվելու համար:

Հաջորդ փուլում կատարվում է ստացված ապակու բյուրեղացում՝ այն ենթարկելով հատուկ ռեժիմի ջերմամշակման: Այդ նպատակով նյութի ջերմաստիճանը սենյակայինից մոտ երկու ժամվա ընթացքում բարձրացվում է մինչև 700°C , որի ժամանակ ծավալում սկսվում է բյուրեղացման կենտրոնների առաջացումը: Այդ ջերմաստիճանում նյութը պահվում է մոտ մեկ ժամ, որից հետո ջերմաստիճանը արագորեն բարձրացվում է մինչև 950°C և պահվում այդ ջերմաստիճանում ևս 2 ժամ, որի ընթացքում տեղի է ունենում բյուրեղների չափսերի մեծացում մինչև մի քանի միկրոմետր, որոնք գրավում են ծավալի ավելի քան 95%՝ մնալով իրարից բաժանված ապակու բարակ՝ միկրոմետրական հաստության շերտերով: Եվ վերջապես այս պրոցեսներից հետո բյուրեղացված ապա-

կին, ինչպես և նախորդ դեպքում, շատ դանդաղ սառեցվում է մինչև սենյակային ջերմաստիճան (մոտ 1.3°C/րոպե արագությամբ ավելի քան 12 ժամվա ընթացքում): Ելքային խառնուրդում, գունավորող օքսիդների բացակայության դեպքում, ստացվող ապակե-բյուրեղական նյութը կաթնագույն է:

Ստացված ապակե-բյուրեղական նյութը հեշտորեն ենթարկվում է մեխանիկական մշակման՝ հղկման և փայլեցման: Հղկված և փայլեցված ապակե-բյուրեղական տակդիրներում բացակայում են միկրոճեղքերը և խոռոչները, իսկ մակերևույթի անհարթությունները կարելի հասցնել մինչև տասնյակ նանոմետրերի:

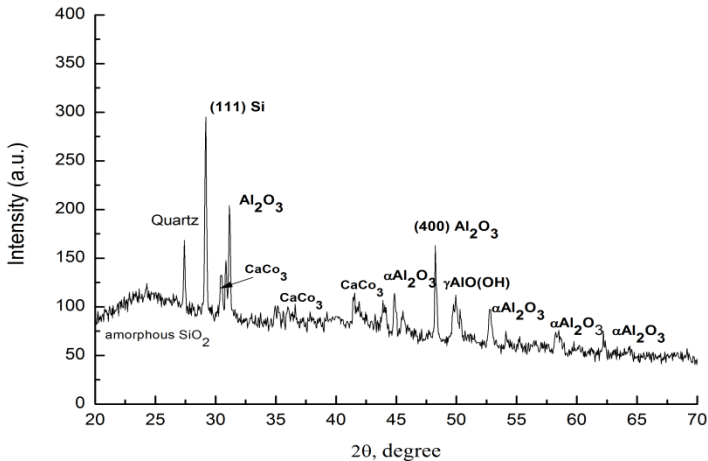
Ապակե-բյուրեղական թիթեղի ջերմային ընդարձակման գործակիցը չափվել է ДKB-4 սարքավորման միջոցով: Տակդիրի հարաբերական երկարացման կախվածությունը ջերմաստիճանից բերված է նկ.3-ում, որի հիման վրա հաշվարկվել է տակդիրի ջերմային ընդարձակման գործակիցը, ինչը 100-550°C ջերմաստիճանային միջակայքում կազմել է $7.9 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$:



Նկ.3. Տակդիրի հարաբերական երկարացման կախվածությունը ջերմաստիճանից

Տակդիրի նյութի կարծրությունը չափվել է Մոոսի և Վիկկերսի հայտնի մեթոդներով: Ըստ Մոոսի սանդղակի տակդիրը ունի 7.5 կարծրություն, իսկ ըստ Վիկկերսի՝ 500-600 HV:

Ինչպես նշվել է տակդիրի կառուցվածքը ամորֆ-բյուրեղային է: Դա բնորոշ է բոլոր նմանատիպ նյութերին, որոնք պատկանում են այսպես կոչված սիտալների (պիրոկերամների) դասին: Մեր կողմից ստացված ապակե-բյուրեղական տակդիրի ռենտգենոգրամման բերված է նկ.4-ում:

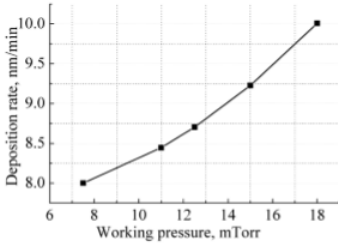


Նկ.4. Ապակե-բյուրեղական տակդիրի
 ռենտգենոգրամմա

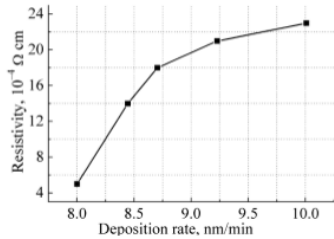
Երևում է, որ բացի ամորֆ SiO_2 , $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$, CaCO_3 և $\gamma\text{AlO}(\text{OH})$ (բյուրիտ) ֆազաներից, պարունակում է նաև Si , Al_2O_3 և կվարցի բյուրեղներ: Տակդիրի նյութի ռենտգենյան միկրոանալիզի արդյունքները ցույց են տալիս, որ նրա մեջ նատրիումի իոնների պարունակությունը 3-4%, ինչը, ինչպես հայտնի է, կարևոր դեր է խաղում արևային էլեմենտի համար, քանի որ այդ իոնները ջերմային մշակման ժամանակ դիֆուզվում են մոլիբդենի բարակ շերտի միջով դեպի կլանիչ շերտ և բերում են վերջինիս բյուրեղների չափերի մեծացման, լիցքակիրների շարժունակության և ֆոտոհոսանքի աճին:

Ատենախտության 3-րդ գլխում քննարկվում են պեղիտե ապակե-բյուրեղական տակդիրի վրա մագնետրոնային փոշեցրման մեթոդով մոլիբդենե (Mo) կոնտակտային շերտի ստացման օպտիմալ տեխնոլոգիական ռեժիմները, ապակե-բյուրեղական տակդիր/Mo կառուցվածքի վրա CIGS կ/կամ CIS կլանիչ կիսահաղորդչային շերտերի ստացման վակուումային և էլեկտրաքիմիական բարակթաղանթային տեխնոլոգիաների մշակումը, ապակե-բյուրեղական տակդիր/Mo/CIGS կամ CIS/CdS/ZnO/մետաղ կառուցվածքի պատրաստումը, ստացված կառուցվածքի էլեկտրական և ֆոտոէլեկտրական հատկությունների ուսումնասիրությունը: Բերված են մագնետրոնային փոշեցրման մեթոդով մոլիբդենի շերտերի ստացման տեխնոլոգիական ռեժիմները: Նկ.5 և նկ.6-ում

բերված են, համապատասխանաբար, շերտերի նստեցման արագության կախվածությունը արգոնի աշխատանքային ճնշումից և տեսակարար դիմադրության կախվածությունը շերտերի նստեցման արագությունից: Մոլիբդենի տեսակարար դիմադրությունը չափվել է ստանդարտ չորս գոնդային մեթոդով, իսկ շերտի հաստությունը՝ AMBIOS XP-1 պրոֆիլոմետրի օգնությամբ:



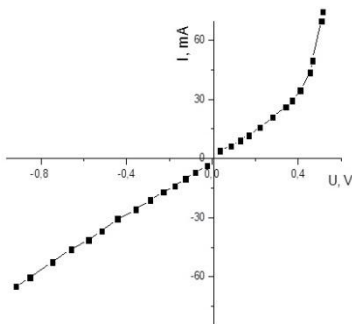
Նկ.5. Mo շերտերի նստեցման արագության կախվածությունը արգոնի աշխատանքային ճնշումից



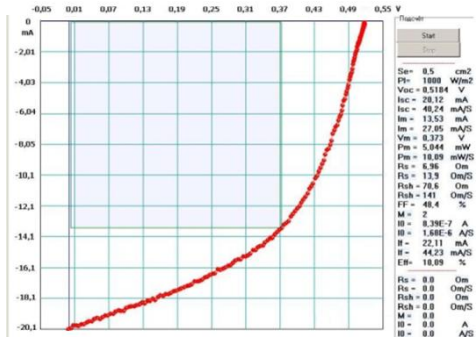
Նկ.6. Mo շերտերի տեսակարար դիմադրության կախվածությունը շերտի նստեցման արագությունից

Մոլիբդենով մետաղացված տակդիրների վրա համատեղ գոլորշացման եղանակով նստեցվել է մոտ 1.9 մկմ հաստությամբ CIGS կլանիչ շերտը, որի վրա քիմիական վաննայից նստեցնել է n-CdS բարակ պատուհանային շերտը, որը ձևավորում է անիզոտիպ հետերոանցում p-CIGS շերտի հետ: Այնուհետև մագնետրոնի օգնությամբ նստեցվել է ZnO թափանցիկ կոնտակտային շերտը, որի մակերևույթին ձևավորվել է Ni/Al երկշերտ օհմական կոնտակտային ցանցը:

Ստորև բերված նկ.7 և նկ.8-ում պատկերված են լավագույն արևային էլե-



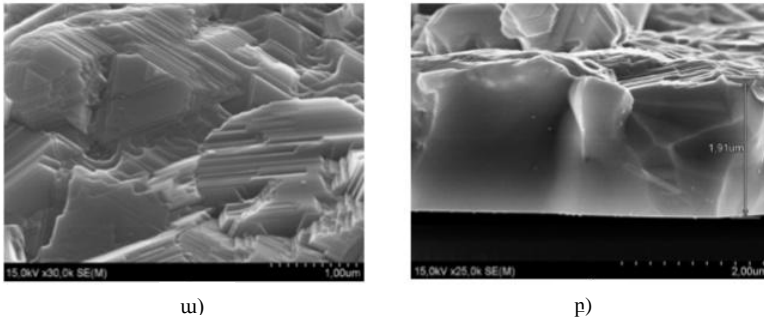
Նկ.7. Լավագույն ՕԳԳ ցուցաբերած արևային էլեմենտի մթնային վոլտ-ամպերային բնութագիրը



Նկ.8. Լավագույն ՕԳԳ-ով օժտված արևային էլեմենտի լուսային վոլտ-ամպերային բնութագիրը

մենտի մթնային (ուղիղ ճյուղը բնութագրվում է $I \sim \exp\left(\frac{eU}{nkT}\right)$ բանաձևով, որտեղ n –ը ոչ իդեալականության գործակիցն է և տվյալ դեպքում ունի $n=5$ արժեք:) և լուսային վոլտ-ամպերային բնութագրերը: Մթնային վոլտ-ամպերային բնութագրի տեսքից երևում է նրա ոչ իդեալականությունը (հոսանքի զգալի աճը հակադարձ լարումների դեպքում և ավելի դանդաղ, քան սովորական էքսպոնենցիալ աճը ուղիղ լարումների դեպքում), ինչը պայմանավորված է հետերոանցման սահմանին մակերևութային վիճակների և տարածական լիցքի շերտում գեներացիայի-ռեկոմբինացիայի կենտրոնների առկայությամբ:

Նկ.9-ում պատկերված են CIGS շերտի մակերևութի և լայնական հատույթի SEM պատկերները:

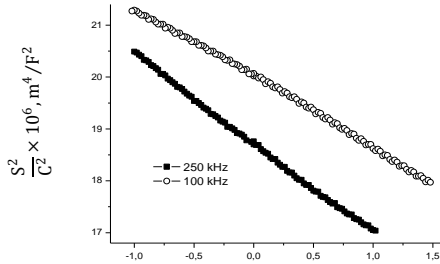


Նկ.9. CIGS շերտի մակերևութի (ա) և լայնական հատույթի (բ) SEM պատկերները

Ինչպես երևում է նկարից, նստեցված բազմաբյուրեղ CIGS շերտը ձևավորվել է խիտ փաթեթավորված բյուրեղահատիկներով, տակդիրին ուղղահայաց արտոնյալ աճի ուղղությամբ առանց հստակ երևացող բաժանման սահմանների: Բյուրեղահատիկների չափսերը կազմում են 2-5 մկմ, իսկ աճի ուղղությամբ բյուրեղահատիկները տարածվում են շերտի ողջ հաստությամբ և հասնում են մոտ 2 մկմ:

Լավագույն արևային էլեմենտը ցուցաբերում է 10.1% էֆեկտիվություն 48.4% լցման գործակցով և 518մՎ պարապ ընթացքի լարումով: Կառուցվածքը բնութագրվում է բավականին մեծ հաջորդական և բավականին փոքր շունտող դիմադրություններով, ինչը և հանդիսանում է համեմատաբար փոքր լցման գործակցի պատճառ:

Ուսումնասիրված են արևային էլեմենտների վոլտ-ֆարադային բնութագրերը տարբեր հաճախությունների դեպքում (նկ.10):

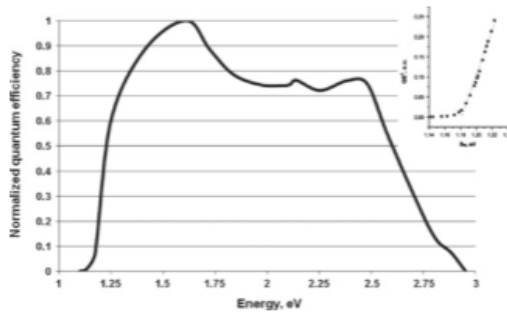


Նկ.10. Լավագույն ՕԳԳ ցուցաբերած էլեմենտի վոլտ-ֆարադային բնութագիրը

Երևում է, որ կառուցվածքի ունակությունը կախված է հաճախությունից, ինչը նշանակում է, որ հետերոանցման բաժանման սահմանին գոյություն ունեն մակերութային վիճակներ, որոնց լիցքային վիճակի փոփոխությունը կարող է բերել լրացուցիչ ներդրման համակարգի ունակության: Մակերութային վիճակների վերալիցքավորման բնութագրական ժամանակները 10^{-5} վ կարգի են: Ինչքան մեծ է կիրառված լարման փոփոխման հաճախությունը, այնքան մակերևութային վիճակների լիցքավորման և իոնիզացման գործընթացները չեն հասցնում հետևել լարման փոփոխությանը և այնքան փոքր է ստացվում անցման չափված ունակությունը, որը իր մեջ ընդհանուր դեպքում ներ է առնում տարածական լիցքի շերտի և բաժանման սահմանի մակերութային վիճակների ունակությունները: Օգտագործելով $p - \text{CIGS} - n^+ - \text{ZnO}$ հետերոանցման ունակության չափված արժեքները որպես ֆունկցիա կիրառված հակադարձ լարումից՝ կարելի է գնահատել կլանիչ շերտի լեգիրացման մեծությունը: Ոչ համաչափ լեգիրացման հետևանքով ծավալային լիցքի տիրույթը ավելի խորն է տարածված CIGS շերտում, և $1/C^2$ կախումը լարումից ունի գծային կախվածություն, իսկ p -տիպի կիսահաղորդչային շերտի N_A խառնուրդների կոնցենտրացիան կարելի է որոշել այդ բնութագրի թեքությամբ՝ $\frac{d(S^2/C^2)}{dV} = \frac{2}{q\epsilon\epsilon_0 N_A}$: Լավագույն արևային էլեմենտի համար կլանիչ շերտում ակցեպտորային խառնուրդների կոնցենտրացիան կազմել է $N_A = 1.12 \cdot 10^{17} \text{ սմ}^{-3}$:

Արևային էլեմենտի սպեկտրալ բնութագիրը բերված է նկ.11-ում: Այստեղ ցույց է տրված նորմավորված ներքին քվանտային էֆեկտիվության կախումը ֆոտոնների էներգիայից, ինչից հետևում է, որ արևային լույսի տեսանելի և

մոտակա ինֆրակարմիր տիրույթի ֆոտոնների գերակշիռ մասը փոխակերպվում է օգտակար հոսանքի:



Նկ.11. Արևային էլեմենտի քվանտային էֆեկտիվություն

Ելնելով էներգիաների ցածր արժեքների տիրույթում քվանտային էֆեկտիվության մեծության քառակուսու՝ ֆոտոնի էներգիայից կախվածությունից (նկ.11, վերևի աջ անկյունում)՝ կարելի է գնահատել կլանիչ շերտի արգելման գոտու լայնությունը: Էներգիայի առանցքի հետ հասումը բնութագրում է CIGS կլանիչ շերտի արգելման գոտու լայնությունը, որը տվյալ դեպքում կազմում է 1.2ԷՎ, ինչը համապատասխանում է $CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$ պինդ լուծույթի $x \approx 0.3$ բաղադրությանը:

Եզրակացություն

Մինթեզվել են պեռլիտային ապակե-բյուրեղական տակդիրներ, ուսումնասիրվել են դրանց ֆիզիկական հատկությունները: Այդպիսի տակդիրների վրա ստեղծվել և հետազոտվել են բարակաթաղանթային CIGS արևային էլեմենտները, որոնք ցուցաբերել են ավելի քան 10% ՕԳԳ: Ապակե-բյուրեղական տակդիրների վրա պատրաստված CIGS արևային էլեմենտների ֆիզիկական հատկությունների փորձարարական ուսումնասիրությունների հիման վրա ստացվել են հետևյալ հիմնական արդյունքները՝

1. Աբրազիվ մեթոդով մշակված արհեստական պեռլիտե տակդիրները ունեն մոտ 14 նմ անհարթությունների միջին բնութագրական չափ, ինչը բավարար է որակյալ արևային էլեմենտներ ստանալու համար: Պեռլիտային ապակե-բյուրեղական նյութը մեկուսիչ է, որի տակդիրի տեսակարար դիմադրությունը կազմում է $\sim 10^{11}$ Օհմ·սմ:

2. Ի տարբերություն նախնական ամորֆ նյութերի, որոնց հիման վրա պատրաստվել է տակդիրը (բնական պեռլիտ, կալցիումի կարբոնատ, նատրիումի կարբոնատ), այն ունի ամորֆ-բյուրեղական կառուցվածք: Բացի ամորֆ SiO_2 , $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$, CaCO_3 և $\gamma - \text{AlO}(\text{OH})$ (բյուրեղ), դիտվել է նաև բյուրեղական կվարցի, Al_2O_3 և սիլիցիումի բյուրեղահատիկների առկայություն:

3. Կատարված կառուցվածքային, ադգեզիոն և էլեկտրական հետազոտությունների հիման վրա սահմանվում է, որ հաստատուն հոսանքի մագնետրոնային փոշեցրման համակարգի միջոցով պեռլիտային ապակե-բյուրեղական տակդիրի վրա 250°C բարձր ջերմաստիճանների դեպքում ստացված մոլիբդենի շերտերը ունեն լավ ադգեզիա 30 ՄՊա հպման ամրությամբ՝ ձևավորելով մետաղի մակերևույթի վրա գալվանոստատիկ ռեժիմում պղնձի շերտ 0.1 Ա/սմ^2 հոսանքի խտության դեպքում; ունեն բարձր կարգի տեքստուրայնություն մոտ 100 նմ բյուրեղահատիկների չափսերով; որքան փոքր է շերտի նստեցման արագությունը և որքան ավելի խորը վակուումում են դրանք նստեցվում, այնքան ավելի ցածրաօհմ են ($5 \cdot 10^{-4} \text{ Օհմ}\cdot\text{սմ}$): Առաջարկված է Mo շերտերի ադգեզիայի որակական գնահատման համար էքսպրես մեթոդ՝ օգտագործելով պղնձի էլեկտրաքիմիական նստեցման մեթոդը:

4. Մշակվել է CuCl_2 , InCl_3 , H_2SeO_3 և նատրիումի ցիտրատ պարունակող թթվային լուծույթից պեռլիտե ապակե-բյուրեղական տակդիր/ Mo կառուցվածքի վրա գալվանոստատիկ ռեժիմում միաէտապային էլեկտրանստեցման մեթոդով CuInSe_2 շերտերի ստացման տեխնոլոգիան: Էներգադիսպերսիվ ռենտգենյան միկրոնալիզի միջոցով ցույց է տրվել է, որ շերտում առկա են ստեխիոմետրիկ CuInSe_2 և ոչ ստեխիոմետրիկ Cu_{2-x}Se ($x \sim 0.2$) ֆազաներ: Ստացված շերտերը, հետազոտվող ալիքի երկարությունների տիրույթում, ունեն մեծ կլանում ($A/d = 2 \times 10^5 \text{ սմ}^{-1}$):

5. Կոմպոնենտների միաժամանակյա համագոլորշացման եղանակով պատրաստվել է ապակե-բյուրեղական տակդիր/ $\text{Mo}/\text{CIGS}/\text{CdS}/i\text{-ZnO}/\text{ZnO}:(\text{Al})/\text{Ni-Al}$ բազմաշերտ կառուցվածքը, որտեղ մոլիբդենի շերտը (0.8 մկմ հաստությամբ), $i\text{-ZnO}$ (50 նմ)/ $\text{ZnO}:(\text{Al})$ (350 նմ) նստեցվել են մագնետրոնային փոշեցրման մեթոդով, 50 նմ հաստությամբ CdS բուֆերային շերտը՝ քիմիական նստեցման մեթոդով, իսկ Ni-Al վերին կոնտակտը՝ ջերմային նստեցման մեթոդով: Մոտ 1.9 մկմ հաստությամբ CIGS բազմաբյուրեղ շերտը նստեցվել է պղնձի, ինդիումի, գալիումի և սելենի վակուումային համագոլորշացման մեթոդով: Ստացված հետերոնանցումները հեռու են իդեալականից և նրանց բնութագրերի ձևավորման

պրոցեսներում մեծ դեր են խաղում մակերութային վիճակները և տարածական լիցքի տիրույթում գտնվող խորը մակարդակները:

6. Ցույց է տրվել, որ պեռլիտային ապակե-բյուրեղական տակդիրը կարող է հաջողությամբ կիրառվել որպես CIGS արևային էլեմենտի տակդիր: Լավագույն արևային էլեմենտները ապահովել են ավելի քան 10% փոխակերպման ՕԳԳ՝ բնութագրի 48.4% լցման գործակցի և 518 մՎ պարապ ընթացքի լարման պայմաններում:

Օգտագործված գրականության ցանկ

- [1]. Yoshihiro Hamakawa. Thin-Film Solar Cells: Next Generation Photovoltaics and Its Applications. Springer, 2004;
- [2]. Jef Poortmans, Vladimir Arkhipov, Thin Film Solar Cells: Fabrication, Characterization and Applications, John Wiley & Sons, 2006;
- [3]. Гременок В.Ф., Тиванов М.С., Залесский В.Б., Солнечные элементы на основе полупроводниковых материалов, Минск: Изд. Центр БГУ, 2007;
- [4]. U. Rau, H.-W. Schock, Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Appl., p.369-413, Elsevier, 2003.
- [5]. A. Slaoui, E. Pihan, A. Focsa, Sol. Energy Mater. Sol. Cells90, 1542 (2006);
- [6]. H. Li, Y. Huang, Zh. Wan, H. Zhang, Y. Xu, Mater. Sci.Forum, v. 475, 1231 (2005);
- [7]. L. Carnel, I. Gordon, D. Van Gestel, K. VanNieuwenhuysen, et al. Thin Solid Films 511–512, 21 (2006);
- [8]. T. Kieliba, S. Bau, R. Schober, D. Oszwald, S. Reber, A.Eyer, G. Willeke, Sol. Energy Mater. Sol. Cells 74, 261(2002);
- [9]. S. Petrosyan, V. Babayan, A. Musayelyan, L. Harutyunyan, et al., Eur.Phys. J. Appl. Phys., 2013, v. 62, p. 30103-p1-p5;
- [10]. С.Н. Аболмасов, Г.М. Аблаев, А.С. Абрамов, Д.А. Андроников и др., Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики: сборник трудов российской конференции, 11–14 ноября 2013 г., стр. 245-246:

Հրատարակված աշխատանքների ցուցակ

1. S.G. Petrosyan, A.S. Musayelyan, V.H. Babayan, L.A. Harutyunyan, V.B. Zalesski, V.M. Kravchenko, T.R. Leonova, A.M. Polikanin, and A.A. Khodin “Thin-film solar cells on perlite glass-ceramic substrates”, Eur. Phys. J.: Appl. Phys. (2013) v.62, pp. 30103-P.1-5
2. С.Г. Петросян, Л.А. Арутюнян, А. Мусаелян, В.Г. Бабаян “Исследование солнечных элементов CIGS выращенных на стеклокерамических подложках”, Сборник научных статей восьмой годичной научной конференции РАУ, стр.109-113, 2-6 декабря, 2014, Ереван.
3. L.A. Harutyunyan, “One-step electrodeposition technology for fabrication of CuInSe films on molybdenum coated perlite substrates”, Proceedings of International Conference on “Microwave and THz Technologies and Applications” (IRPhE’2014), pp.159-161, October 2-3, 2014, Aghveran.
4. L.A. Harutyunyan “Molybdenum coated perlite substrates for building integrated photovoltaics”, Proceedings of European Conference on Physics and Mathematics, pp. 41-45, 3 March 2015, Vienna.
5. L.A. Harutyunyan, “X-ray diffraction studies of perlite/Mo structure”, Proceedings of the first international conference on scientific development in Europe, pp.70-73, 23 December 2014, Vienna.
6. Л.А. Арутюнян, С.Г. Петросян, К.Э. Авджян, “Физические характеристики пленок молибдена, осажденных на перлитовых стекло-керамических подложках методом магнетронного распыления”, Известия НАН Армении, Физика, v. 50, no. 2, 2015, стр. 239-244.

ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ CIGS НА СТЕКЛО-КЕРАМИЧЕСКИХ ПОДЛОЖКАХ

АННОТАЦИЯ

В работе были синтезированы перлитовые стекло-керамические подложки и изучены их физические свойства. На таких подложках созданы и исследованы тонкопленочные CIGS солнечные элементы, которые обеспечивают более 10% эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую. На основе экспериментальных исследований физических свойств CIGS солнечных элементов, выращенных на стекло-керамических подложках, были получены следующие основные результаты:

1. Обработанные абразивным методом перлитовые стекло-керамические подложки имеют среднеквадратичное отклонение профиля неровностей порядка 10-15 нм, что является достаточным для получения качественного солнечного элемента. Подложка является диэлектриком и его удельное сопротивление составляет $\sim 10^{11}$ Ом · см.
2. Перлитовая стекло-керамическая подложка, в отличие от исходных аморфных материалов (природный перлит, карбонаты кальция и натрия), имеет аморфно-кристаллическую структуру. В нем помимо аморфных SiO_2 , $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$, CaCO_3 и $\gamma\text{AlO}(\text{OH})$ (бемит), обнаружено наличие кристаллического кварца, Al_2O_3 и кремния.
3. На основе проведенных структурных, адгезионных и электрических исследований установлено, что полученные магнетронной распылительной системой постоянного тока пленки Mo на перлитовой стекло-керамической подложке при температуре выше 250°C обладают хорошей адгезией и имеют прочность сцепления 30 МПа; имеют высокую степень текстурированности с размерами

кристаллитов порядка 100 нм; более низкоомны (5×10^{-4} Ом·см) при меньших скоростях роста и более глубоком рабочем вакууме. Предложен экспресс метод определения степени адгезии пленок Мо, используя ванну элетрохимического осаждения меди.

4. Разработана технология получения CuInSe пленок на структуре стекло-керамическая подложка/Мо путем одностадийного электроосаждения в гальваностатическом режиме из водного кислотного раствора, содержащего CuCl_2 , InCl_3 , H_2SeO_3 и Na-цитрат. Из энергодисперсионного рентгеновского микроанализа установлено наличие фаз, близких к стехиометрическим CuInSe₂ и нестехиометрическим Cu_{2-x}Se ($x \sim 0.2$). Полученные пленки имеют высокую абсорбцию в исследуемом диапазоне длин волн ($A/d \sim 2 \times 10^5 \text{ см}^{-1}$).
5. Изготовлена многослойная структура стекло-керамическая подложка/Мо/CIGS/CdS/i-ZnO/ZnO:(Al)/Ni-Al, где слой молибдена (толщина 0.8 мкм), i-ZnO (50 нм)/ZnO:(Al) (350 нм) осаждались магнетронным распылением, буферный слой CdS толщиной 50 нм осаждался методом химического нанесения, а Ni-Al верхний контакт методом термического осаждения. Поликристаллическая пленка CIGS толщиной около 1,9 мкм была нанесена методом вакуумного соиспарения меди, галлия, индия и селена с последующей селенизацией.
6. Показано, что перлитовая стекло-керамическая подложка, содержащая 3-4% натрия, может быть успешно использована в качестве подложки для CIGS СЭ. Лучшие СЭ показали эффективность более чем 10% с коэффициентом заполнения вольт-амперной характеристики 48.4% и напряжением холостого хода 518 мВ.

THE STUDY OF CIGS SOLAR CELLS ON GLASS-CERAMIC SUBSTRATES

SUMMARY

There were synthesized perlitic glass-ceramic substrates and investigated their physical properties. On such substrates was developed and characterized CIGS thin film solar cells, which provide more than 10% efficiency. Based on the physical properties of experimental studies CIGS solar cells grown on glass-ceramic substrates produced the following results:

1. Treated by abrasive method perlitic glass-ceramic substrate has an average roughness profile range of about 14 nm, which is sufficient to obtain a high quality solar cell. The substrate is an insulator and its resistivity is $\sim 10^{11}$ Ohm \cdot cm.
2. Perlitic glass-ceramic substrate, in contrast to the initial amorphous materials (natural perlitic, calcium carbonate and sodium carbonate), has an amorphous-crystalline structure. Aside from amorphous SiO₂, α -Al₂O₃, CaCO₃ (chalk) and γ -AlO(OH) (boehmite), revealed the presence of crystalline quartz, Al₂O₃, and silicon.
3. On the basis of structural, electrical and adhesion studies found that Mo films deposited on perlitic glass-ceramic substrate by DC magnetron sputtering system at a temperature above 250°C exhibit good adhesion to form a film of copper in a galvanostatic mode at the surface thereof at a current density of 0.1 A/cm² and have a bonding strength of 30 MPa; have a high degree of texture with a crystallite size of 100 nm; have low impedance ($5 \cdot 10^{-4}$ Ohm \cdot cm) at a lower growth rate and a deeper

working vacuum. Proposed rapid method for determining the adhesion of Mo films using copper electrochemical deposition bath.

4. The technology of CuInSe films on glass-ceramic substrate/ Mo structure by one step electrodeposition in the galvanostatic mode from an aqueous acidic solution containing CuCl_2 , InCl_3 , H_2SeO_3 and Na-citrate (as a complexing agent) was treated. From the energy dispersive X-ray microanalysis were found phases close to stoichiometric CuInSe_2 and non-stoichiometric Cu_{2-x}Se ($x \sim 0.2$). These films have a high absorption in the investigated wavelength range ($A/d \sim 2 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$).
5. Glass-ceramic substrate / Mo / CIGS / CdS / i-ZnO / ZnO:(Al) / Ni-Al multilayer structure was made, where the molybdenum layer (thickness 0.8 microns), i-ZnO (50 nm) / ZnO:(Al) (350 nm) was deposited by magnetron sputtering, 50 nm thick CdS buffer layer was deposited by chemical deposition, and Ni-Al top contact was deposited by thermal deposition. The polycrystalline CIGS film thickness of about 1.9 micron was coated by vacuum co-evaporation of copper, gallium, indium and selenium.
6. It is shown that the perlite glass-ceramic substrate can be successfully used as a substrate for CIGS solar cells. The best solar cell demonstrated the efficiency of more than 10% with 48.4% fill factor and 518mV open circuit voltage.