

Գ.Ե. ԱՅՎԱԶՅԱՆ, Կ.Գ. ԱՅՎԱԶՅԱՆ, Ս.Խ. ԽՈՒՂԱՎԵՐԴՅԱՆ

ՍԵՎ ՍԻԼԻՑԻՈՒՄԻՑ ՀԱԿԱԱՆԴՐԱԴԱՐՁՆՈՂ ՄԱԿԵՐՆԵՎՈՒՅԹՈՎ
ԱՐԵՎԱՅԻՆ ՏԱՐԵՐԻ ՊԱՏՐԱՍՏՄԱՆ ԵՂԱՆԱԿ

Մշակվել է սև սիլիցիումից հակաանդրադարձնող մակերևույթով արևային տարրերի պատրաստման տեխնոլոգիական եղանակ, համաձայն որի ասեղիկների նախընտրելի բարձրությամբ սև սիլիցիումի ձևավորումը և ասեղիկների թաղանթավորումն իրականացվում են տեխնոլոգիական գործընթացի հիմնական քիմիական և ջերմային մշակումներից հետո:

Առանցքային բառեր. արևային տարր, սև սիլիցիում, հակաանդրադարձնող մակերևույթ, պատրաստման եղանակ:

Արևային տարրերի (ԱՏ) օպտիկական կորուստների փոքրացման և օգտակար գործողության գործակցի (օ.գ.գ.) մեծացման արդյունավետ մեթոդներից է հակաանդրադարձնող մակերևույթների կիրառումը: Դրանք ներկայացնում են մակերևութային կանոնավոր կամ անկանոն տեղաբաշխված ծակոտիներ, ակոսներ, ասեղիկներ, բուրգեր, փոսիկներ, որոնք հանգեցնում են ընկնող լուսային ճառագայթի անդրադարձման գործակցի փոքրացմանը:

Վերջին տասնամյակում ակտիվ հետազոտական աշխատանքներ են իրականացվում, այսպես կոչված, “սև սիլիցիումից” հակաանդրադարձնող մակերևույթի ստացման և կիրառման ուղղությամբ [1-6]: Սև սիլիցիումը կազմված է մեծ խտությամբ բարակ ասեղիկներից, որոնց բարձրությունը կազմում է մի քանի μm , իսկ տրամագիծը՝ 50...500 μm : Ասեղիկների առկայությունը սիլիցիումին տալիս է սև երանգավորում, որտեղից էլ այն ստացել է իր անվանումը՝ “սև սիլիցիում” (black silicon):

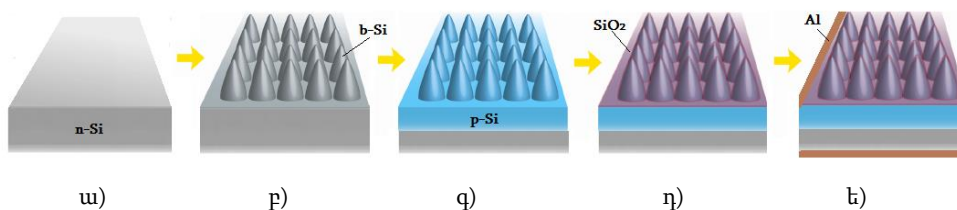
Սև սիլիցիումի ձևավորումն իրականացվում է ռեակտիվ իոնային խաճատման (reactive ion etching) եղանակով որոշակի բաղադրությամբ մեկուսացնող և խաճատող գազային հոսքի պայմաններում: Որպես սիլիցիումի մակերևույթը մեկուսացնող գազ կիրառվում է O_2 կամ N_2O , N_2 , իսկ որպես խաճատող գազ՝ SF_6 կամ CF_4 , CHF_3 , C_4F_8 , NF_3 , SiF_4 , C_2F_6 , HF , BF_3 , PF_3 , Cl_2 , HCl , SiH_2Cl_2 , SiCl_4 , BCl_3 , HBr :

Սև սիլիցիումը՝ հեռանկարային է որպես ԱՏ-երի հակաանդրադարձնող մակերևույթ: Դա պայմանավորված է ստացվող ասեղիկների մեծ խտությամբ և հետևաբար՝ անդրադարձման փոքր գործակցով: Բացի այդ, սև սիլիցիումի ձևավորումը ռեակտիվ իոնային խաճատմամբ ընթանում է առանց դիմակների

(maskless) կիրառման, այսպես կոչված, “ինքնադիմակավորման” (self-masked) ռեժիմում: Սև սիլիցիումի ստացման տեխնոլոգիան ունի ավտոմատացման հնարավորություն և խաճատման մեծ համասեռություն:

Սև սիլիցիումից հակաանդրադարձնող մակերևույթները, մի կողմից՝ փոքրացնում են օպտիկական կորուստները, սակայն, մյուս կողմից՝ լիցքակիրների կյանքի փոքր տևողության (life time) և մակերևութային վերամիավորման մեծ արագության (surface recombination velocity) հետևանքով հանգեցնում են էներգետիկական զգալի կորուստների: Նշված էլեկտրաֆիզիկական պարամետրերի ոչ ցանկալի արժեքների պատճառներն են սև սիլիցիումի ասեղիկների մակերևութային վիճակները (surface states) և չհագեցած կապերի (dangling bonds) մեծ խտությամբ՝ ասեղիկների գոմարային մեծ մակերևութային մակերեսը: Արդյունքում՝ նվազում է ՄՏ-երի օ.գ.գ.-ն: Այս խնդիրը լուծվում է ասեղիկների հետագա թաղանթավորմամբ (passivation) SiO_2 , SiN_x , $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ կամ ZnO բարակ ծածկույթներով [4-6]:

Նկ. 1-ում բերված է սև սիլիցիումից (b-Si) հակաանդրադարձնող մակերևույթով ՄՏ-երի պատրաստման ներկայումս կիրառվող տեխնոլոգիական գործընթացի երթուղին:



Նկ. 1. ՄՏ-երի պատրաստման տեխնոլոգիական գործընթացի երթուղին. ա – էլակետային սիլիցիումային թիթեղ, բ – սև սիլիցիումի ձևավորում, գ – դիֆուզիոն p տիրույթի ձևավորում, դ – ասեղիկների թաղանթավորում, ե – մետաղական թիկունքային և ճակատային հպակների ստեղծում

Այն աշխատանքներում, որտեղ հայտնի եղանակով գործնականում պատրաստվել են սև սիլիցիումից հակաանդրադարձնող մակերևույթով ՄՏ-եր [1-3], օ.գ.գ.-ի մեծացման դիտարկված փոփոխությունը կազմում է ընդամենը 3...4%՝ հաշվարկներով ակնկալվող 7...10%-ի փոխարեն: Հիմնական պատճառն այն է, որ սև սիլիցիումի ձևավորումից հետո հաջորդող քիմիական և ջերմային բազմաթիվ մշակումներն առաջացնում են ասեղիկների մասնակի բթացում, հարթեցում և փշրում: Արդյունքում՝ վատանում է սև սիլիցիումի հակաանդրադարձնող հատկությունը: Բացի այդ, թաղանթավորման լրացուցիչ գործողությունը բարդացնում է ՄՏ-երի պատրաստման տեխնոլոգիական գործընթացը՝ մեծացնելով տևողությունը, ավելացնելով օգտագործվող սարքավորումների թիվը, նյութերի և էներգիայի ծախսը:

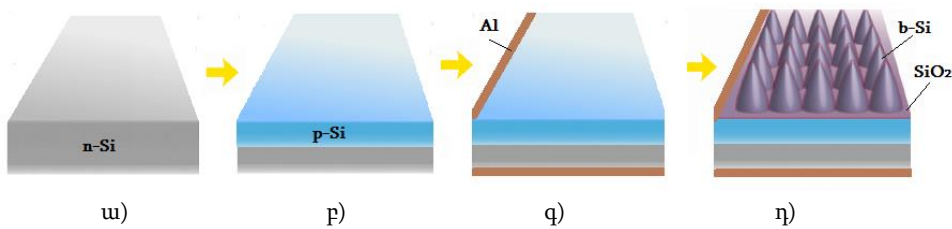
Մեր կողմից մշակվել է սև սիլիցիումից հակաանդրադարձնող մակերևույթով ԱՏ-երի պատրաստման նոր եղանակ, որը թույլ է տալիս պարզեցնել տեխնոլոգիական գործընթացը և մեծացնել ԱՏ-երի օ.գ.գ.-ն:

Համաձայն այդ եղանակի՝ սև սիլիցիումի ձևավորումն իրականացվում է ԱՏ-երի պատրաստման գործընթացի ջերմային և քիմիական մշակումներից հետո: Այսպիսի մոտեցման հիմքում ընկած է տեսական և փորձնական հետազոտությունների արդյունքում արձանագրված այն հանգամանքը, որ սև սիլիցիումի ասեղիկների նախընտրելի բարձրությունը կազմում է մոտ 650 նմ, իսկ ժամանակակից գործարանային արտադրության (կոմերցիոն) ԱՏ-երի դիֆուզիոն p-ն անցման խորությունն առնվազն 1,2 անգամ մեծ է այդ արժեքից [7, 8]: Դա նշանակում է, որ սև սիլիցիումը կարելի է ձևավորել ԱՏ-երի արդեն իսկ ստացված դիֆուզիոն տիրույթում՝ էականորեն չփոխելով p-ն անցման հատկությունները: Բացի այդ, նշված գործողությունը կարելի է իրականացնել նաև մետաղական հալկների պատրաստումից հետո, քանի որ հալկների համար կիրառվող ալյումինը կամ քրոմը սև սիլիցիումի ձևավորման համար անհրաժեշտ մեկուսացնող և խաժատող գազային հոսքի նկատմամբ ունեն բարձր քիմիական կայունություն և նույնիսկ կիրառվում են որպես դիմակներ [9]:

Եղանակի երկրորդ առանձնահատկությունն այն է, որ ասեղիկների թաղանթավորումն իրականացվում է սև սիլիցիումի շերտի ձևավորումից անմիջապես հետո, *in-situ* ռեժիմում՝ նույն տեխնոլոգիական սարքավորումում: Դրա համար անհրաժեշտ է դադարեցնել խաժատող գազերի հոսքը և մշակումը շարունակել միայն մեկուսացնող գազի միջավայրում: Կախված կիրառվող մեկուսացնող գազից՝ O_2 կամ N_2 , N_2O , սև սիլիցիումի ասեղիկները թաղանթավորվում են SiO_2 կամ SiN_x , SiO_2/SiN_x բարակ ծածկույթներով: Քանի որ սև սիլիցիումի ձևավորման և դրա ասեղիկների թաղանթավորման գործողություններն իրականացվում են միևնույն տեխնոլոգիական սարքավորումում՝ նույն տեխնոլոգիական ցիկլով, ապա բացառվում են միջանկյալ լրացուցիչ տեխնոլոգիական գործողությունները:

Արդյունքում՝ պարզեցվում է ԱՏ-երի պատրաստման տեխնոլոգիական գործընթացը, և մեծանում է դրանց օ.գ.գ.-ն:

Նկ. 2-ում բերված է սև սիլիցիումից հակաանդրադարձնող մակերևույթով ԱՏ-երի պատրաստման առաջարկված տեխնոլոգիական գործընթացի երթուղին:



Նկ. 2. ՄՏ-երի պատրաստման առաջարկված տեխնոլոգիական գործընթացի երթուղին.
ա – էլակետային սիլիցիումային թիթեղ, բ – դիֆուզիոն p տիրույթի ձևավորում,
գ – մետաղական հպակների ստեղծում, դ – սև սիլիցիումի ձևավորում և ասեղիկների
թաղանթավորում

Սև սիլիցիումից հալանդրադարձնող մակերևույթով փորձնական ՄՏ-երի պատրաստումն իրականացվել է կոմերցիոն բազմաբյուրեղային ՄՏ-երի հիման վրա: Սև սիլիցիումը ձևավորել են իոնալլազմային մշակման սարքավորումում՝ ՄՏ-երի ճակատային մակերևույթը ենթարկելով ռեակտիվ իոնային խաճատման՝ մեկուսացնող և խաճատող գազային խառնուրդի միջավայրում: Կիրառվել է 1:20 հարաբերությամբ SF₆-ի և O₂-ի գազային խառնուրդ: Խաճատման տևողությունը կազմել է 1 *րոպե*: Սև սիլիցիումի ձևավորումից անմիջապես հետո արգելափակվել է SF₆-ի հոսքը, և ռեակտիվ իոնային խաճատումը շարունակվել է միայն O₂-ի միջավայրում 1 *րոպե* տևողությամբ: Արդյունքում՝ սև սիլիցիումի ասեղիկները թաղանթավորվել են SiO₂-ի ծածկությամբ, ընդ որում, սև սիլիցիումի ասեղիկները բարձրությունը կազմում էր 600 *նմ*, իսկ թաղանթավորման ծածկույթի հաստությունը՝ 50 *նմ*:

Բերված աղյուսակում խմբավորված են սև սիլիցիումից և առանց դրա հալանդրադարձնող մակերևույթով ՄՏ-երի պարամետրերի հետազոտությունների արդյունքները՝ պարապ ընթացքի լարումը - V_{oc}, կարճ միացման հոսանքը - I_{sc}, լցման գործակիցը - FF, օ.գ.գ.-ն - μ: Վերջինս սյունակում նշված է սև սիլիցիումի առկայությամբ պայմանավորված օ.գ.գ.-ի փոփոխությունը՝ հաշվարկված հետևյալ բանաձևով.

$$\eta = \frac{\mu_{bsi} - \mu_{si}}{\mu_{bsi}} \cdot 100\%,$$

որտեղ μ_{bsi} -ն և μ_{si} -ն համապատասխանաբար սև սիլիցիումով և առանց սև սիլիցիումի ՄՏ-ի օ.գ.գ.-ներն են:

Հետազոտված ԱՏ-երի պարամետրերը

N	Արևային տարր	Արևային տարրի պարամետրերը				η , %
		V_{oc} , մՎ	I_{sc} , մԱ/սմ ²	FF	μ , %	
1	առանց սև սիլիցումի	618	26,9	0,761	12,6	7,4
	սև սիլիցիումով	616	29,8	0,742	13,6	
2	առանց սև սիլիցումի	614	29,1	0,741	13,2	7,7
	սև սիլիցիումով	614	31,1	0,75	14,3	
3	առանց սև սիլիցումի	594	30,3	0,741	13,3	7,0
	սև սիլիցիումով	596	32,4	0,739	14,3	

Ինչպես երևում է աղյուսակից, սև սիլիցիումից հակաանդրադարձնող մակերևույթի կիրառումը հանգեցնում է ԱՏ-երի օ.գ.գ.-ի մեծացմանն ավելի քան 7%, որը համապատասխանում է հաշվարկներով ակնկալվող արդյունքներին:

Այսպիսով, կարող ենք փաստել, որ ԱՏ-երի պատրաստման առաջարկված եղանակը զգալիորեն մեծանում է ԱՏ-երի օ.գ.գ.-ն և պարզեցնում տեխնոլոգիական գործընթացը:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Svetoslav K., Martins B., Stutzmann S.** Black Nonreflecting Silicon Surfaces for Solar Cells // Appl. Phys. Lett. - 2012. - V. 100. - P. 19-25.
2. **Koynov S., Brandt M., Stutzmann M.** Black Multi-Crystalline Silicon Solar Cells // Phys. Stat. Sol.; Rapid Research Letters. - 2007. - V.1 (2). - R53-R55.
3. **Shen Ze-Nan, Xia Yang, Liu Bang-Wu, Liu Jin-Hu.** Realization of Conformal Doping on Multicrystalline Silicon Solar Cells and Black Silicon Solar Cells by Plasma Immersion Ion Implantation // Chin. Phys. - 2014. - V. 23, N. 11. - P. 118801-1.
4. Effective Passivation of Large Area Black Silicon Solar Cells by SiO₂/SiNx:H Stacks / **Zengchao Zhao, Bingye Zhang, Ping Li**, et al // International Journal of Photoenergy. - 2014. - V. 2014, Article ID 683654. - P. 1-7.
5. **Ayvazyan K.G., Ayvazyan G.Y., Lakhoyan L.M., Kovalenko D.L.** Surface Passivation of Black Silicon Solar Cells // Proceedings of EAA. - 2016. - V. 13, № 4. - P. 491-493.
6. **Liua W.F., Biana J.M., Zhao Z.C.** Low Temperature Surface Passivation of Black Silicon Solar Cells by High-Pressure O₂ Thermal Oxidation // ECS Solid State Letters. - 2013. - V. 4. - P. Q17-20.
7. **Այվազյան Կ.Գ., Խուդավերդյան Ս.Խ.** Սև սիլիցիումից հակաանդրադարձնող մակերևույթի մոդելավորումը // ՀՊՃՀ Լրաբեր. - 2015. - Մաս 1. - էջ 278-288:
8. **Айвазян Г.Е., Айвазян К.Г., Лахоян Л.М., Оганисян А.С.** Оптические характеристики черного кремния // Вестник ИАА. - 2015. - Т. 12, № 3. - С. 555-557.

9. Реактивное ионное травление поверхности синтетического алмаза / **А.В. Голованов, В.С. Бормашов, А.П. Волков** и др. // Труды МФТИ. - 2013. - Т. 5, N 1. - С. 31-35.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութն ներկայացվել է խմբագրություն 03.06.2016:

Г.Е. АЙВАЗЯН, К.Г. АЙВАЗЯН, С.Х. ХУДАВЕРДЯН

**МЕТОД ИЗГОТОВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С
АНТИОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ИЗ ЧЕРНОГО КРЕМНИЯ**

Разработан метод изготовления солнечных элементов с антиотражающей поверхностью из черного кремния, согласно которому формирование черного кремния с предпочтительной высотой игл и их пассивация осуществляют после основных термических и химических обработок технологического процесса.

Ключевые слова: солнечный элемент, черный кремний, антиотражающая поверхность, метод изготовления.

G.Y. AYVAZYAN, K.G. AYVAZYAN, S.Kh. KHUDAVERDYAN

**A METHOD FOR MAKING SOLAR CELLS WITH A BLACK SILICON
ANTIREFLECTION SURFACE**

A method for making solar cells with black silicon antireflection surface is developed according to which, the formation of b-Si with preferable height of needles and their passivation is carried out simultaneously after the main chemical and thermal treatments of the technological process.

Keywords: solar cell, black silicon, antireflection surface, making method.