

Գ.Ե. ԱՅՎԱԶՅԱՆ

**ՄԻԼԻՑԻՈՒՄԱՅԻՆ ԱՐԵՎԱՅԻՆ ԷԼԵՄԵՆՏՆԵՐԻ ՀԱԿԱՆԴՐԱԴԱՐՁՆՈՂ
ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՅԹՆԵՐԻ ԱՐԴՅՈՒՆԱՎԵՏՈՒԹՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ
ՄԱՍ 1. ՕՂՏԻԿԱԿԱՆ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐ**

Ժամանակային տիրույթի վերջավոր տարբերության մեթոդով մոդելավորվել և փորձ-նականորեն հետազոտվել են սիլիցիումային արևային էլեմենտների տարբեր տեսքերի անհարթություններով (միկրոկառուցվածքային բուրգ, նանոկառուցվածքային անցք, սյուն և կոն) հակաանդրադարձող մակերևույթների օպտիկական բնութագրերը: Ցույց է տրվել, որ առավել արդյունավետ են կոնաձև անհարթություններով մակերևույթները, որոնք ձևավորվում են ռեակտիվ իոնային խաձատմամբ սև սիլիցիումի առաջացման ռեժիմում: Քննարկվել է արդյունաբերական նշանակությամբ արևային էլեմենտներում միկրո- և նանոկառուցվածքային հակաանդրադարձող մակերևույթների հիբրիդային կիրառման նպատակահարմարությունը:

Առանցքային բառեր. արևային էլեմենտ, հակաանդրադարձող մակերևույթ, սև սիլիցիում, օպտիկական բնութագրեր:

Ներածություն: Միլիցիումային արևային էլեմենտների օպտիկական կորուստների փոքրացման արդյունավետ մեթոդներից է հակաանդրադարձող մակերևույթների կիրառումը: Դրանք մակերևութային կանոնավոր կամ անկանոն տեղաբաշխված ծակոտիների, ասեղիկների, բուրգերի կամ փոսիկների տեսքով տեքստուրաներ են, որոնք, ըստ անհարթությունների չափսերի, կարող են լինել միկրո- կամ նանոկառուցվածքային [1-5]:

Ընդհանուր առմամբ, լուսային ճառագայթների հետ հակաանդրադարձող մակերևույթների փոխազդեցությունը բացատրվում է հետևյալ երկու սահմանային մեխանիզմով [5-8].

1. Միկրոկառուցվածքային մակերևույթների դեպքում, երբ անհարթության բնորոշ Λ չափսը մեծ է ընկնող լուսային ճառագայթների ալիքի λ երկարությունից ($\Lambda > \lambda$), հարևան անհարթություններից տեղի են ունենում բազմաթիվ անդրադարձումներ՝ հանգեցնելով ճառագայթների ծուղակավորման: Արդյունքում՝ էականորեն նվազում է ընկնող լուսային ճառագայթների անդրադարձումը, և դրանք հիմնականում կլանվում են:

2. Նանոկառուցվածքային մակերևույթների դեպքում, երբ փոխազդեցությունը տեղի է ունենում ենթաալիքային տիրույթում ($\Lambda < \lambda$), առաջնային է դառնում տեքս-

տուրայում բեկման ցուցչի օպտիկապես փոքր խտությամբ միջավայրից ավելի մեծ խտությամբ միջավայր գրադիենտային փոփոխությունը՝ հանգեցնելով բազմաշերտ օպտիկական ծածկույթների նմանակությամբ անդրադարձման նվազմանը:

Բնականաբար, լայնաշերտ ճառագայթման դեպքում այս երկու մեխանիզմն էլ գործում են, իսկ յուրաքանչյուրի ներդրումը կախված է բազմաթիվ գործոններից, այդ թվում՝ անհարթությունների չափսերից և տեսքից:

Գրականությունում ինչպես տեսականորեն, այնպես էլ փորձնական ճանապարհով լայնորեն հետազոտվել են հակաանդրադարձող մակերևույթների օպտիկական և էլեկտրական բնութագրերը՝ կախված անհարթությունների չափսերից (բարձրություն, հիմքի մակերես, պարբերականություն) [9-16]: Սակայն գրեթե բացակայում են դրանց տեսքերին առնչվող նմանատիպ հետազոտությունները: Մինչդեռ տեքստուրավորման տարբեր տեխնոլոգիական մեթոդներ հանգեցնում են տարբեր տեսքերի անհարթությունների ձևավորմանը՝ միկրոկառուցվածքային բրգաձև (անիզոտրոպ ընտրողական քիմիական խաճատում) [9, 10], նանոկառուցվածքային անցքեր (էլեկտրաքիմիական խաճատում ծակոտկեն սիլիցիումի առաջացման ռեժիմում) [15, 16], նանոկառուցվածքային սյունաձև (էլեկտրոնա-ճառագայթային լիտոգրաֆիա) [17], նանոկառուցվածքային կոնաձև (ռեակտիվ իոնային խաճատում սև սիլիցիումի առաջացման ռեժիմում) [11, 12] և այլն:

Աշխատանքում (Մաս 1) իրականացվել է տարբեր տեսքերի անհարթություններով հակաանդրադարձող մակերևույթների օպտիկական բնութագրերի համեմատական վերլուծություն: Էլեկտրական բնութագրերի հետազոտությունների արդյունքները կներկայացվեն Մաս 2-ում:

Մոդելավորում: Հակաանդրադարձող մակերևույթները դիտարկվել են որպես երկչափ համակարգեր, որոնք պարբերական են երկու ուղղություններով և սահմանափակ են երրորդ ուղղությամբ: Հետազոտվել են համակարգեր, որոնց միավոր բջիջները ներկայացնում են կանոնավոր միկրոկառուցվածքային բուրգ և նանոկառուցվածքային անցք, սյուն և կոն:

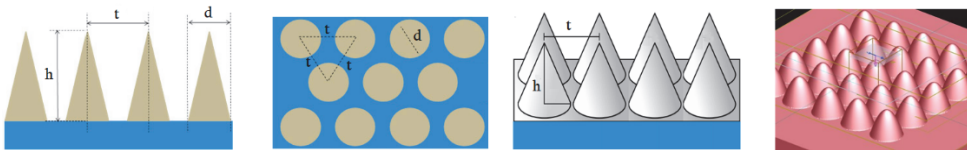
Միկրոկառուցվածքային հակաանդրադարձող մակերևույթների օպտիկական հատկությունները կարելի է թվայնորեն մոդելավորել երկրաչափական օպտիկայի տեսությամբ՝ կիրառելով ճառագայթների հետազոտման (ray-tracing, RT) մեթոդը [6, 8]: Վերջինս ներառում է բազմաթիվ երկրաչափական ճառագայթներից յուրաքանչյուրի անդրադարձման-կլանման-անցման դիտարկում անհարթություն-օդ սահմանագծային կետերում: Նանոկառուցվածքային մակերևույթների օպտիկական բնութագրերի մոդելավորումն իրականացվում է արդյունավետ միջավայրի մոտարկմամբ (effective medium approximation, EMA), վերջավոր տարրերի մեթոդով (finite element method, FEM), խիստ զուգակցված ալիքի վերլուծությամբ (rigorous coupled-wave analysis, RCWA), մատրիցային փոխանցման մեթոդով

(transfer matrix method, TMM), հարթ ալիքների մեթոդով (plane wave method, PWM) և այլն [18-22]:

Շնորհանուր առմամբ, սիլիցիումային արևային էլեմենտներում կիրառվող նանոկառուցվածքային մակերևույթների անհարթությունների չափսերը համեմատելի են սիլիցիումի համար «աշխատանքային» հանդիսացող սպեկտրի տեսանելի տիրույթի ալիքների երկարությունների հետ՝ $\lambda \sim 400 \dots 800$ նմ: Ուստի հակաանդրադարձնող մակերևույթների օպտիկական հատկությունների մոդելավորումը սահմանային այս կամ այն մեթոդով կարող է հանգեցնել զգալի սխալանքների:

Ելնելով վերոնշյալից՝ մեր կողմից ընտրվել է ժամանակային տիրույթի վերջավոր տարբերության (finite-difference time-domain, FDTD) մեթոդը, որը մեծ ճշտությամբ հաշվի է առնում ճառագայթների հետ անհարթությունների փոխազդեցության երկու մեխանիզմն էլ և, հետևաբար, կարող է միաժամանակ կիրառվել ինչպես միկրո-, այնպես էլ նանոկառուցվածքային մակերևույթների դեպքում [19, 23-25]: Կիրառվել է FDTD Solutions (Lumerical Solutions Inc, Canada) առևտրային ծրագրային փաթեթի Rough Surface (version 8.17.1072, 2017a) մոդուլը, որը հնարավորություն է տալիս, կախված պարբերական համակարգի միավոր բջջի տեսքից, չափսերից, ալիքի երկարությունից և անկման անկյունից, ստանալ և 2D/3D արտապատկերել հակաանդրադարձնող մակերևույթների անդրադարձման և կլանման սպեկտրները:

Մոդելավորման ընթացքում դիտարկվող հարթ պարբերական համակարգերը բնութագրվել են հետևյալ բազային պարամետրերով՝ h -բարձրություն, d -տրամագիծ (բուրգի դեպքում՝ հիմքի ներգծող շրջանագծի տրամագիծը), t -պարբերականություն: Նկ. 1-ում որպես օրինակ ցուցադրված են կոնաձև բջջով պարբերական համակարգի լայնական հատույթը, տեսքը վերևից, եռաչափ պատկերը և FDTD Solutions ծրագրային փաթեթով ստացված գրաֆիկական տեսքը:



Նկ. 1. Կոնաձև բջջով պարբերական համակարգի լայնական հատույթը, տեսքը վերևից, եռաչափ պատկերը և FDTD Solutions ծրագրային փաթեթով ստացված գրաֆիկական տեսքը

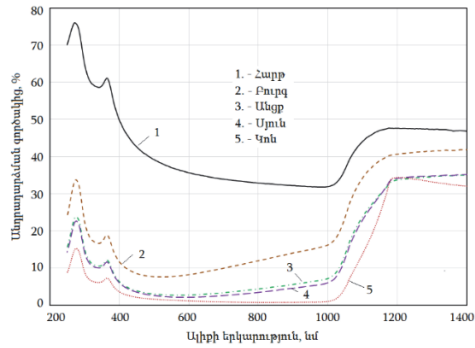
Նանոկառուցվածքային մակերևույթների համար ընտրվել են բազային պարամետրերի հետևյալ բնորոշ արժեքները՝ $h=600$ նմ, $d=150$ նմ և $t=250$ նմ: Միկրոկառուցվածքային բրգաձև մակերևույթի դեպքում այդ պարամետրերի բնորոշ արժեքները հետևյալն էին՝ $h=4,0$ մկմ, $d=5,0$ մկմ և $t=6,0$ մկմ: Օպտիկական գրգռումն իրականացվել է լայնաշերտ ($\lambda = 250 \dots 1400$ նմ) ալիքների աղբյուրով:

Մոդելավորվել են պարբերական համակարգերի անդրադարձման $R(\lambda)$ և թափանցիկության $T(\lambda)$ սպեկտրները, իսկ կլանման սպեկտրը որոշվել է $A(\lambda) = 1 - R(\lambda) - T(\lambda)$ արտահայտությամբ: Նկ. 2-ում բերված են միկրոկառուցվածքային բուրգի և նանոկառուցվածքային անցքի, սյան և կոնի տեսքերով միավոր բջիջներով պարբերական համակարգերի մոդելավորման արդյունքում ստացված անդրադարձման, կլանման և անցման սպեկտրները: Համեմատության համար այնտեղ զետեղված են նաև հարթ (առանց անհարթությունների) մակերևույթների համապատասխան սպեկտրները:

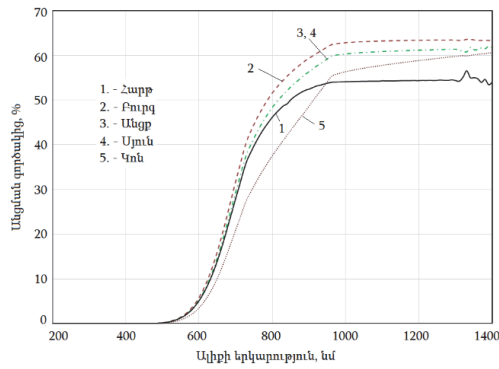
Ինչպես երևում է ստացված սպեկտրներից, հակաանդրադարձնող մակերևույթները հանգեցնում են լայնաշերտ տիրույթում անդրադարձման գործակցի զգալի նվազմանը և կլանման գործակցի մեծացմանը: Նվազագույն անդրադարձում դիտվում է սպեկտրի ամբողջ տեսանելի տիրույթում և ինֆրակարմիր տիրույթի կարճալիքային միջակայքում: Ուլտրամանուշակագույն տիրույթում ճառագայթների զգալի մասն անդրադառնում է, իսկ ինֆրակարմիր տիրույթի երկարալիքային միջակայքում՝ հիմնականում թափանցում: Միկրոկառուցվածքային բրգաձև բջիջներով համակարգերն իրենց օպտիկական բնութագրերով զգալիորեն զիջում են նանոկառուցվածքային համակարգերին, որոնցից առավել արդյունավետ են կոնաձև բջջով պարբերական համակարգերը:

Նկատված օրինաչափությունները կարելի է բացատրել հետևյալ հանգամանքներով: Նախ՝ նանոկառուցվածքային հակաանդրադարձնող մակերևույթներն ունեն ավելի մեծ մակերես, քան միկրոկառուցվածքային բրգաձև մակերևույթը: Դա էական է ճառագայթների ծուղակավորման արդյունավետության տեսանկյունից: Այնուհետև, նանոկառուցվածքային կոնաձև միավոր բջիջների դեպքում, բեկման ցուցիչի փոփոխությունը սահուն է՝ ի հակադրություն անցքի և սյան տեսքերով բջիջների, որոնց համար այդ փոփոխությունը կտրուկ է: Տեսակականորեն հիմնավորվել և փորձերով հաստատվել է, որ սահուն փոփոխվող բեկման ցուցիչներով բազմաշերտ հակաանդրադարձնող ծածկույթները միաշերտ ծածկույթների համեմատ ավելի արդյունավետ են [7, 21, 26]:

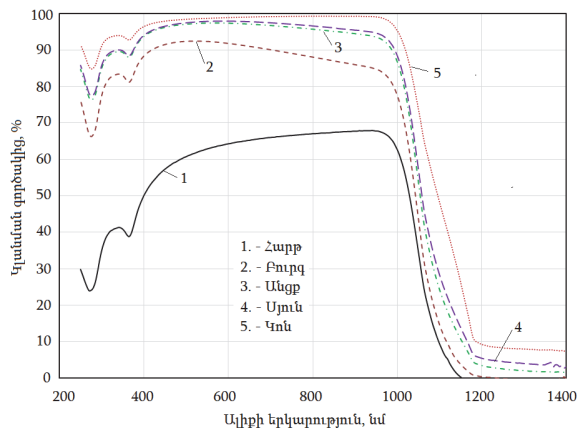
Փորձնական հետազոտություններ: Պատրաստվել են փորձնական նմուշներ, որոնց հակաանդրադարձնող մակերևույթներն ունեն միկրոկառուցվածքային բուրգի և նանոկառուցվածքային անցքի և կոնի տեսքերով անհարթություններ: Որպես ելակետային կիրառվել են Չոխրալսկու մեթոդով աճեցված, բյուրեղագիտական (100) կողմնորոշմամբ, 2,0...10,0 *Օւ.սւ* տեսակարար դիմադրությամբ և երկկողմանի ողորկված P-տիպի միաբյուրեղային արևային դասի սիլիցիումային հարթակներ: Հարթակների չափսերը կազմում են 100x100 *մմ*, իսկ հաստությունը՝ 350 *մկմ*:



ա)



բ)



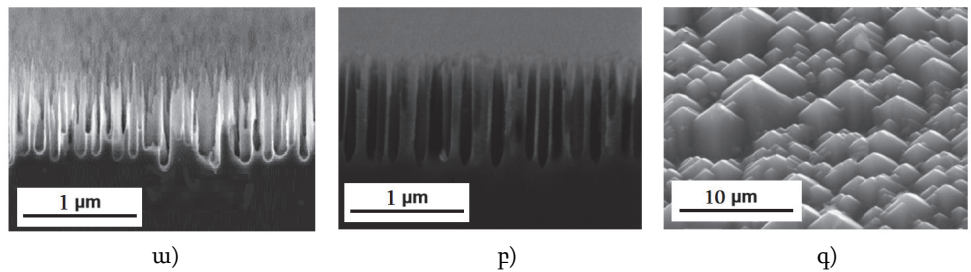
գ)

Նկ. 2. Տարբեր տեսքերով միավոր բջիջներով պարբերական համակարգերի անդրադարձման (ա), անցման (բ) և կլանման (գ) սպեկտրները

Նանոկառուցվածքային կոնաձև (սև սիլիցիում) և անցքի տեսքով (ծակոտ-կեն սիլիցիում) անհարթություններով հակաանդրադարձող մակերևույթների

ձևավորումն իրականացվել է համապատասխանաբար ռեակտիվ իոնային և էլեկտրաքիմիական խաճատման մեթոդներով: Սև սիլիցիումի պարամետրերի միջինացված արժեքներն են՝ $h=640$ նմ, $d=130$ նմ և $t=245$ նմ, իսկ ծակոտկեն սիլիցիումիը՝ $h=670$ նմ, $d=155$ նմ և $t=270$ նմ: Միկրոկառուցվածքային բրգաձև անհարթությունները ձևավորվել են քիմիական ընտրողական խաճատման մեթոդով կալիումի հիդրօքսիդի (KOH) լուծույթում: Անհարթությունների պարամետրերի միջինացված արժեքները հետևյալն են՝ $h=4,1$ մկմ, $d=5,3$ մկմ և $t=5,8$ մկմ:

Դիտարկված հակաանդրադարձնող մակերևույթների JEOL JSM-6700F մանրադիտակով ստացված լայնական կտրվածքների բնորոշ SEM (scanning electron microscope) միկրոֆոտոպատկերները բերված են նկ. 3-ում:



Նկ. 3. Սև սիլիցիումի (ա), ծակոտկեն սիլիցիումի (բ) և քիմիական ընտրողական խաճատմամբ ձևավորված (բ) հակաանդրադարձնող մակերևույթների լայնական կտրվածքների SEM միկրոֆոտոպատկերները

Օպտիկական չափումներն իրականացվել են լաբորատոր նշանակության T70 UV-VIS սպեկտրաֆոտոչափով ճառագայթման ալիքների երկարության $\lambda = 300...1100$ նմ տիրույթում՝ համագումարող գնդի (integrating sphere) կիրառմամբ: Ալիքի երկարության փոփոխման քայլը կազմում է $5...10$ նմ, իսկ չափման սխալանքը՝ $2...5\%$: Ստացվող սպեկտրային կախվածությունները գրանցվել, մշակվել և պահպանվել են ավտոմատ: Համեմատական վերլուծությունների համար գնահատվել են նշված սպեկտրային տիրույթում անդրադարձման գործակցի նվազագույն (R_{min}), առավելագույն (R_{max}) և միջին կշռված (R_{WAR}) արժեքները: Վերջին պարամետրը հաշվարկվել է հետևյալ արտահայտությամբ.

$$R_{WAR} = \frac{\int_{300nm}^{1100nm} R(\lambda)S(\lambda)d\lambda}{\int_{300nm}^{1100nm} S(\lambda) d\lambda},$$

որտեղ $R(\lambda)$ -ն և $S(\lambda)$ -ն, ալիքի երկարությունից կախված, համապատասխանաբար անդրադարձումը և AM1.5 ստանդարտ թեստային պայմաններում լուսային ֆոտոնների հոսքն են:

Աղյուսակում խմբավորված են տարբեր տեսքերի անհարթություններով հակաանդրադարձնող մակերևույթների օպտիկական բնութագրերը:

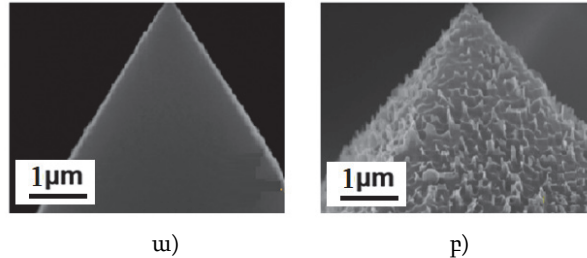
Հակաանդրադարձնող մակերևույթների օպտիկական բնութագրերը

Հակաանդրադարձնող մակերևույթ	$R_{min}, \%$	$R_{max}, \%$	$R_{WAR}, \%$
Հարթ	31,81 ($\lambda=990$ նմ)	64,83 ($\lambda=300$ նմ)	38,72
Միկրոկառուցվածքային բուրգ	10,43 ($\lambda=1000$ նմ)	32,52 ($\lambda=300$ նմ)	14,19
Նանոկառուցվածքային անցք	2,66 ($\lambda=580$ նմ)	23,8 ($\lambda=1100$ նմ)	6,33
Նանոկառուցվածքային կոն	1,05 ($\lambda=870$ նմ)	23,6 ($\lambda=1100$ նմ)	2,67

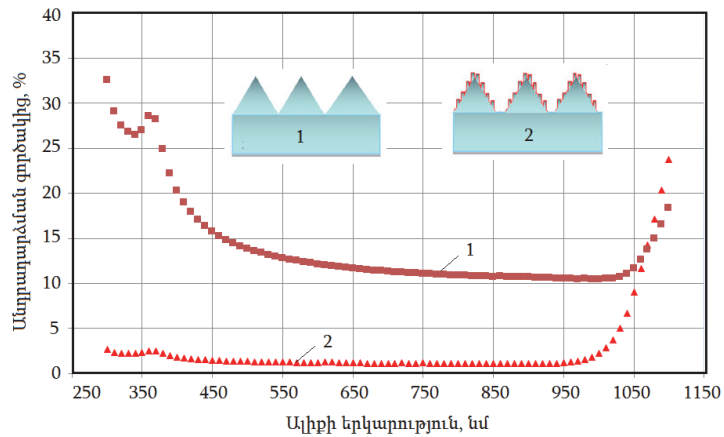
Ինչպես երևում է աղյուսակից, միկրոկառուցվածքային բրգաձև անհարթություններով մակերևույթներն իրենց օպտիկական բնութագրերով ($R_{WAR} = 14,19\%$) զիջում են նանոկառուցվածքային հակաանդրադարձնող մակերևույթների ($R_{WAR} = 2,67 \dots 6,3\%$): Լավագույն օպտիկական բնութագրեր ունեն սև սիլիցիումից հակաանդրադարձնող մակերևույթները ($R_{WAR} = 2,67\%$): Փորձնական արդյունքները որակապես համապատասխանում են մոդելավորման արդյունքներին: Քանակական որոշակի անհամապատասխանությունները պայմանավորված են փորձնական նմուշների և դրանց մոդելների բազային պարամետրերի տարբերություններով, ինչպես նաև չափման սխալանքով:

Տրամաբանական է ենթադրել, որ միկրո- և նանոկառուցվածքային անհարթությունների համատեղ (հիբրիդային, հիերարխիական) կիրառումը կհանգեցնի հակաանդրադարձնող մակերևույթների արդյունավետության որոշակի մեծացմանը: Այդպիսի լուծում առաջարկվել և քննարկվել է [5, 27-30] աշխատանքներում: Մասնավորապես, սպեկտրի տեսանելի տիրույթում գրանցվել են գրեթե գրոյական անդրադարձումներ, որը բացատրվում է ճառագայթների իդեալական ծուղակավորմամբ և ներթափացմամբ՝ համապատասխանաբար միկրոկառուցվածքային և նանոկառուցվածքային անհարթությունների միջոցով:

Մեր կողմից պատրաստվել են հակաանդրադարձնող մակերևույթներով նմուշներ, որոնցում հաջորդաբար կատարվել են քիմիական ընտրողական և ռեակտիվ իոնային խաճատումներ՝ ձևավորելով նանոկառուցվածքային կոնաձև ասեղիկներով պատված միկրոկառուցվածքային բրգաձև անհարթություններ: Անհարթությունների լայնական կտրվածքների բնորոշ SEM միկրոֆոտոպատկերները նշված խաճատումներից հետո ցույց են տրված նկ. 4-ում, իսկ նկ. 5-ում բերված են այդ նմուշների անդրադարձման փորձնական սպեկտրները:



Նկ. 4. Անհարթությունների լայնական կտրվածքների SEM միկրոֆոտոպատկերները քիմիական ընտրողական (ա) և հաջորդող ռեակտիվ իոնային (բ) խաճատումներից հետո



Նկ. 5. Նմուշների անդրադարձման սպեկտրները քիմիական ընտրողական (1) և հաջորդող ռեակտիվ իոնային (2) խաճատումներից հետո

Ստացված արդյունքների համեմատական վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ նանոկառուցվածքային հակաանդրադարձնող մակերևույթների համեմատ հիբրիդային մակերևույթների անդրադարձման գործակցի միջին կշռված արժեքը նվազում է ընդամենը 0,23...0,41 %-ով: Դա պայմանավորված է այն հանգամանքով, որ նանոկառուցվածքային մակերևույթների հակաանդրադարձման արդյունավետությունը 2,2...5,3 անգամ մեծ է միկրոկառուցվածքային մակերևույթների արդյունավետությունից: Հետևապես՝ հիբրիդային հակաանդրադարձնող մակերևույթների կիրառումն արդյունաբերական նշանակությամբ արևային էլեմենտներում նպատակահարմար չէ, քանի որ տեխնոլոգիական գործընթացի բարդացումը չի նպաստում այդ մակերևույթների օպտիկական բնութագրերի էական լավացմանը:

Եզրակացություն: Միլիցիումային արևային էլեմենտների հակաանդրադարձնող մակերևույթների արդյունավետությունը կախված է ոչ միայն անհարթությունների չափսերից, այլև դրանց տեսքից: Լավագույն օպտիկական բնութագրերն ունեն նանոկառուցվածքային կոնաձև անհարթություններով սև սիլիցիումից հակաանդ-

բաղադրված մակերևույթները: Միկրո- և նանոկառուցվածքային անհարթությունների հիբրիդային կիրառումը հանգեցնում է հակաանդրադարձող մակերևույթների անդրադարձման գործակցի որոշակի փոքրացմանը, սակայն նպատակահարմար չէ կիրառել արդյունաբերական նշանակությամբ արևային էլեմենտներում՝ պայմանավորված տեխնոլոգիական գործընթացի բարդացմամբ:

Հետազոտությունն իրականացվել է ՀՀ գիտության կոմիտեի ֆինանսական աջակցությամբ՝ 21AG-2B011 ծածկագրով գիտական թեմայի շրջանակներում:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Photocurrent Enhancement in Thin Film Silicon Solar Cells by Combination of Anti-reflective Sub-wavelength Structures and Light-trapping Textures / **H. Sai, T. Matsui, K. Saito**, et al // Prog. Photovolt.- 2015.- V. 23.- P. 1572–1580. DOI: 10.1002/pip.2594.
2. Anti-reflective Surfaces: Cascading Nano/microstructuring /**Y. Nishijima, R. Komatsu, S. Ota**, et al // APL Photonics.- 2016.- V. 1 (7).- P. 076104 1-11. DOI: 10.1063/1.4964851.
3. **Soudi N., Nanayakkara S., Jahed N., Naahidi S.** Rise of Nature-inspired Solar Photovoltaic Energy Convertors // Solar Energy.- 2020.- V. 208 (15).- P. 31-45. DOI: 10.1016/j.solener.2020.07.048.
4. **Boden S., Bagnall D.** Moth-eye Antireflective Structures. In Encyclopedia of Nanotechnology. -New York, Springer, 2012.- P. 1467-1477. DOI: 10.1007/978-90-481-9751-4_262.
5. Fabrication of Hierarchical Moth-eye Structures with Durable Superhydrophobic Property for Ultra-broadband Visual and Mid-infrared Applications / **Litong Dong, Ziang Zhang, Lu Wang**, et al // Applied Optics. – 2019.- V. 58 (24).- P. 6706-6715. DOI:10.1364/AO.58.006706.
6. **Deinega A., Valuev I., Potapkin B., Lozovik Y.** Minimizing Light Reflection from Dielectric Textured Surfaces // J. of the Optical Society of America A.- 2011.- V. 28 (5).- P. 770-777. DOI: 10.1364/JOSAA.28.000770.
7. **Raut H.K., Ganesh V.A. Nairb A.S., Ramakrishna S.** Anti-reflective Coatings: A Critical, In-depth Review // Energy Environ. Sci.- 2011. – V. 4.- P. 3779–3804. DOI: 10.1039/c1ee01297e.
8. **Saive S.** Light Trapping in Thin Silicon Solar Cells: A Review on Fundamentals and Technologies // Prog. Photovolt. – 2021. – V. 29 (10). – P. 1125-1137. DOI: 10.1002/pip.3440.
9. **Deinega A., Valuev I., Potapkin B., Lozovik Y.** Antireflective Properties of Pyramidally Textured Surfaces // Optics Letters .- 2010.- V. 35 (2).- P. 106-105. DOI: 10.1364/OL.35.000106.
10. **Baker-Finch S.C., McIntosh K.R., Terry M.L.** Isotextured Silicon Solar Cell Analysis and Modeling // IEEE J. of Photovol.- 2012.-V. 2 (4).- P. 457 - 464. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2012.2206569
11. **Ayvazyan G.Y.** Crystalline, Porous and Black Silicon: Research and Application.- Yerevan: Chartaraget, 2020.- 240 p.
12. Review Application of Nanostructured Black Silicon / **J. Lv, T. Zhang, P. Zhang**, et al // Nanoscale Res. Lett.- 2018.- V. 13.- P. 1-10. DOI: 10.1186/s11671-018-2523-4.
13. Optimization of the Optical Properties of Nanostructured Silicon Surfaces for Solar Cell Applications / **Di Zhou, Y. Pennec, B. Djafari-Rouhani**, et al // J. of Appl. Phys. – 2014.- V. 115.- P. 134304 1- 10. DOI: 10.1063/1.4870236.
14. **Arias M, Briceño M., Marzo A., Zárate A.** Optical and Electrical Properties of Silicon Solar Cells by wet Chemical Etching // J. Chilean Chem. Soc.- 2019.- V. 64 (1).- P. 4268-4274. DOI: 10.4067/s0717-97072019000104268.

15. **Omar K., Salman K.** Porous Silicon Solar Cell with Anti-reflection Coating Layer for Efficiency Improved // *Pontr.* – 2016. -V. 72 (5).- P. 190-208. DOI: 0.21506/j.ponte.2016.5.32.
16. **Korotcenkov G.** Porous Silicon. From Formation to Application.- CRC Press, 2016.- 439 p. DOI: 10.1201/b19342.
17. Optical Properties of High Aspect Ratio Plasma Etched Silicon Nanowires: Fabrication-induced Variability Dramatically Reduces Reflectance / **A. Smyrnakis, E. Almpanis, V. Constantoudis,** et al // *Nanotechnology.*- 2015.- V. 26.- P. 085301 1-12. DOI: 10.1088/0957-4484/26/8/085301.
18. Application and Validity of the Effective Medium Approximation to the Optical Properties of Nano-textured Silicon Coated with a Dielectric Layer / **Tsun Hang Fung, T. Veeken, D. Payne,** et al // *Optics Express.* - 2019.- V. 27 (26).- P. 38645-38660. DOI: 10.1364/OE.27.038645
19. **Han K., Chih-Hung Chang.** Numerical Modeling of Sub-Wavelength Anti-Reflective Structures for Solar Module Applications // *Nanomaterials.*- 2014.- V. 4.- P. 87-128. DOI: 10.3390/nano4010087.
20. **Rahman T., Boden S.** Optical Modelling of Black Silicon for Solar Cells using Effective Index Techniques // *IEEE J. of Photovolt.*- 2017.- V. 7 (6).- P. 1556-1562. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2017.2748900.
21. Optical Modelling of Black Silicon using an Effective Medium/multi-layer Approach / **A.A. Elsayed, Y.M. Sabry, F. Marty,** et al // *Optics Express.*- 2018.- V. 26 (10).- P. 13443-13460. DOI: 10.1364/OE.26.013443.
22. **Deinega A., Belousov S., Valuev I.** Transfer-matrix Approach for Finite-Difference Time-Domain Simulation of Periodic Structures // *Phys. Rev. E.*- 2013.- V. 88.- P. 053305 1-10. DOI 10.1103/PhysRevE.88.053305
23. **Deinega A., Belousov S., Valuev I.** Hybrid Transfer-Matrix FDTD Method for Layered Periodic Structures // *Optics Letters.*- 2009.- V. 39 (6).- P. 13443-13460. DOI: 10.1364/OL.34.000860.
24. **Katkov M.V., Ayvazyan G.Y., Shayapov V.R., Lebedev M.S.** Modeling of the Optical Properties of Black Silicon Passivated by Thin Films of Metal Oxides // *J. of Contemp. Phys.*- 2020. – V. 55 (1). – P. 16-22. DOI: 10.3103/S106833722001003X.
25. Anti-Reflection Properties of Black Silicon Coated with Thin Films of Metal Oxides by Atomic Layer Deposition / **G.Y. Ayvazyan., M.V. Katkov., M.S. Lebedev,** et al // *J. of Contemp. Phys.*- 2021. – V. 56 (3). – P. 240-246. DOI: 10.3103/S1068337221030075.
26. The Design and Optimization of an Anti-Reflection Coating and an Intermediate Reflective Layer to Enhance Tandem Solar Cell Photons Capture / **H Sayed, Z.S Matar, M Al-Dossari,** et al // *Crystals.*- 2022.- V. 12 (1).- P. 57-79. DOI:10.3390/cryst12010057.
27. **Cho S.J., An T., Lim G.** Three-dimensionally Designed Anti-reflective Silicon Surfaces for Perfect Absorption of Light // *Chem. Commun.*- 2014.- V. 50.- P. 15710—15713. DOI: 10.1039/c4cc07341j.
28. **Dimitrov D.Z., Chen-Hsun Du.** Crystalline Silicon Solar Cells with Micro/nano Texture // *Appl. Surf. Sci.*- 2013.- V. 266 (1).- P. 1-4. DOI: 10.1016/j.apsusc.2012.10.081.
29. **Ingenito A., Isabella A., Zeman M.** Nano-cones on Micro-pyramids: Modulated Surface Textures for Maximal Spectral Response and High-efficiency Solar Cells // *Prog. Photovolt.*- 2015.- V. 23 (11).- P. 1649–1659. DOI: 10.1002/pip.2606.
30. **Putra I.R., Li J.-Y., Chen Ch.-Y.** 18.78% Hierarchical Black Silicon Solar Cells Achieved with the Balance of Light-trapping and Interfacial Contact // *Appl. Surf. Sci.*- 2019.- V. 478.- P. 725–732. DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.02.001.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 02.02.2022:

Г.Е. АЙВАЗЯН

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АНТИОТРАЖАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
КРЕМНИЕВЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ЧАСТЬ 1. ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

Методом конечных разностей во временной области смоделированы и экспериментально исследованы оптические характеристики антиотражающих поверхностей кремниевых солнечных элементов с неровностями различных видов (микроструктурная пирамида, наноструктурные отверстие, столбец и конус). Показано, что наиболее эффективными являются поверхности с коническими неровностями, которые формируются методом реактивного ионного травления в режиме образования черного кремния. Обсуждена целесообразность гибридного применения микро- и наноструктурных антиотражающих поверхностей в солнечных элементах промышленного назначения.

Ключевые слова: солнечный элемент, антиотражающая поверхность, черный кремний, оптические характеристики.

G.Ye. AYVAZYAN

**EVALUATING THE EFFICIENCY OF ANTI-REFLECTIVE SURFACES OF
SILICON SOLAR CELLS
PART 1. OPTICAL CHARACTERISTICS**

Optical characteristics of anti-reflective surfaces of silicon solar cells with various types of irregularities (microstructured pyramid, nanostructured hole, column and cone) are modeled by the finite-difference time-domain method and experimentally studied. It is shown that surfaces with conical irregularities, which are formed by the method of reactive ion etching in the black silicon formation mode, are the most effective. The expediency of hybrid application of micro- and nanostructured antireflection surfaces in industrial solar cells is discussed.

Keywords: solar cell, anti-reflective surface, black silicon, optical characteristics.