

Գ.Ե. ԱՅՎԱԶՅԱՆ

ՍԵՎ ՍԻԼԻՑԻՈՒՄԻ ՇԵՐՏՈՎ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԱՅԻՆ ԱՐԱՏՆԵՐԻ ՀԵՏԵՐԱՑՄԱՆ
ԱՐԴՅՈՒՆԱՎԵՏՈՒԹՅՈՒՆԸ

Դիտարկվել է սիլիցիումային հարթակների կառուցվածքային արատների՝ սև սիլիցիումի (b-Si) մերձակերևութային շերտով հետերացման հնարավորությունը: Հետերացման արդյունավետությունը գնահատվել է թեստային և ստուգիչ հարթակների տեսակարար դիմադրության, արատների խտության և ոչ հիմնական լիցքակիրների արդյունաբար կյանքի տևողության հետազոտման արդյունքներով: Ցույց է տրվել, որ ջերմային օքսիդացման ընթացքում b-Si-ի շերտը հանդես է գալիս որպես հավելյալ միջանցուցային ատոմների և մետաղական խառնուրդների արդյունավետ կլանիչ (հետեր), դրանով իսկ էականորեն նվազեցնելով կառուցվածքային արատների սաղմերի խտությունը սիլիցիումում: Արդյունքում նվազում է հարթակների տեսակարար դիմադրությունը, և մեծանում է լիցքակիրների կյանքի տևողությունը: Նպատակահարմար է b-Si-ի շերտը որպես կլանիչ ձևավորել հարթակների թիկունքային՝ ոչ աշխատանքային կողմում:

Առանցքային բառեր. սև սիլիցիում, հետեր, կառուցվածքային արատ, տեսակարար դիմադրություն, լիցքակիրների կյանքի տևողություն:

Ներածություն: Սև սիլիցիումը (black silicon - b-Si) բյուրեղային սիլիցիումի նանոկառուցվածքային շերտ է՝ կազմված մեծ խտությամբ բարակ ասեղիկներից, որոնց բարձրությունը կարող է կազմել 0,3...10,0 մկմ, իսկ տրամագիծը՝ 0,05...1,0 մկմ [1]: Ասեղիկների առկայությունն այս նյութին տալիս է մուգ երանգավորում, որից էլ այն ստացել է իր անվանումը: Գրականության մեջ հաճախ b-Si-ն բնութագրվում է որպես ծակոտկեն սիլիցիումի տարատեսակ: Ինչպես և ծակոտկեն սիլիցիումը [2, 3], այն ևս ունի լուսային ճառագայթների կլանման բարձր գործակից, քանի որ մեծ խտությամբ հարակից ասեղիկներից տեղի են ունենում լուսային ճառագայթի բազմաթիվ անդրադարձումներ: Այդ հատկության շնորհիվ b-Si-ն հեռանկարային է որպես արևային էլեմենտների հակաանդրադարձնող մակերևութային շերտ, և ներկայումս իրականացվող հետազոտությունները կենտրոնացված են հենց այս խնդրի ուղղությամբ [4-6]:

Ծակոտկեն սիլիցիումի հետ կառուցվածքային նմանությունը թույլ է տալիս ենթադրել, որ b-Si-ն, ինչպես և իր նախորդ տարատեսակը, կարող է ունենալ գործառական այլ նշանակություններ ևս: Մասնավորապես, մեր նախորդ աշխատանքներում դիտարկվել էր ծակոտկեն սիլիցիումի շերտով կառուցվածքային

արատների արտաքին պլանար հետերացման (external planar gettering - EPG) արդյունավետությունը [7, 8]: Հիմնավորվել էր, որ սիլիցիումային հարթակի դիմային կողմի ոչ աշխատանքային տիրույթներում (օրինակ, հարթակների կտրատման համար նախատեսված մասերում) ձևավորված ծակոտկեն սիլիցիումի շերտը, մեծ մակերևութային մակերեսի շնորհիվ, բարձրջերմաստիճանային թրծման ընթացքում ներքաշում և կլանում է հարթակում առկա ոչ ցանկալի խառնուրդները (հիմնականում՝ մետաղական) և դրանով իսկ հետագա տեխնոլոգիական գործընթացների ժամանակ արգելակում աշխատանքային տիրույթներում այնպիսի կառուցվածքային արատների առաջացումը, ինչպիսիք են դիսլոկացիաները, օքսիդացման փաթեթավորման արատները (oxidation induced stacking faults - OISF) և այլն: Արդյունքում լավանում են այդպիսի հարթակների հիման վրա պատրաստվող կիսահաղորդչային սարքերի և ինտեգրալ միկրոսխեմաների աշխատանքային բնութագրերը, և մեծանում է պիտանի արտադրանքի ելքի տոկոսը:

Աշխատանքում դիտարկվել է սիլիցիումային հարթակների կառուցվածքային արատների՝ b-Si-ի մերձմակերևութային շերտով հետերացման հնարավորությունը:

Նմուշների պատրաստումը և հետազոտության մեթոդները: Որպես ելակետային կիրառվել են Չոխրալսկու մեթոդով աճեցված, բյուրեղագիտական (100) կողմնորոշմամբ, 2,0 *O_h* տեսակարար դիմադրությամբ և երկկողմանի ողորկված P-տիպի միաբյուրեղային արևային դասի (solar-grade) սիլիցիումային հարթակներ: Հարթակների չափսերն էին 100x100 *մմ*, իսկ հաստությունը՝ 350 *մկմ*:

Հարթակները ենթարկվել են 45 *րոպե* տևողությամբ բարձրջերմաստիճանային (1200°C) թրծման մաքրված ազոտի միջավայրում՝ կառուցվածքային արատների սաղմերի ներմուծման նպատակով: Այնուհետև հարթակները կտրատվել բաժանվել են 10x10 *մմ*² չափսերով առանձին թեստային և հսկիչ նմուշների, որից հետո 10 *րոպե* մաքրվել են երկմեթիլ ֆորմամիդի և ացետոնի լուծույթով, լվացվել իոնազրկված ջրով:

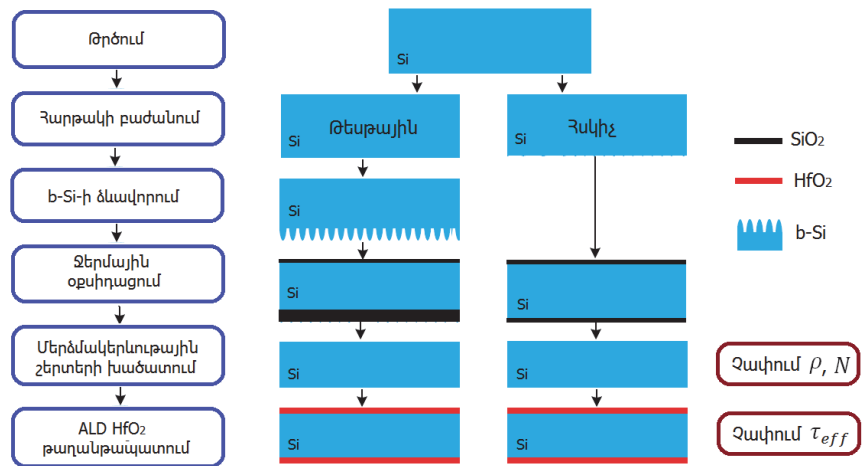
Մերձմակերևութային b-Si-ի շերտի ձևավորումն իրականացվել է իոնապլազմային մշակման սարքավորումում ռեակտիվ իոնային խաճատման մեթոդով SF₆-ի և O₂-ի գազային խառնուրդի միջավայրում թեստային նմուշների կողմերից մեկում: Խաճատման սարքավորումը և ռեժիմները նկարագրված են [9] աշխատանքում: Սև սիլիցիումի շերտի հաստությունը կազմում էր 0,9 *մկմ*:

Թեստային և հսկիչ նմուշներն օքսիդացվել են 850, 950 կամ 1100 °C ջերմաստիճաններում, 80 *րոպե* տևողությամբ չոր թթվածնի միջավայրում: Առաջացած օքսիդի երկկողմանի թաղանթները, այդ թվում՝ թեստային նմուշների b-Si-ի գրեթե ամբողջովին օքսիդացված շերտը, հեռացվել են նոսր HF-ի լուծույթում, որից հետո հարթակները 3 *րոպե* տևողությամբ ընկղմվել են KOH-ի լուծույթում: Արդյունքում հարթակների երկու կողմից էլ խաճատվել են մոտավորապես 4 *մկմ*

հաստությամբ մերձակերկության շերտեր: Վերջում նմուշներն ատոմաշերտային նստեցման (atomic layer deposition - ALD) մեթոդով երկկողմանի թաղանթապատվել են HfO_2 -ի մեկուսացնող բարակ ծածկույթներով [10]:

Հետերացման արդյունավետությունը գնահատելու համար հետազոտվել են նմուշների ρ տեսակարար դիմադրությունը (հպակային քառամիտցային մեթոդ, IYC-3 սարք), կառուցվածքային արատների N խտությունը (ընտրողական խաճատման և օպտիկական մանրադիտակով տեսազննման մեթոդ, Սիրտլի $\text{HF}:\text{CrO}_3:\text{H}_2\text{O}$ խաճատիչ և MII-4 մանրադիտակ) և ոչ հիմնական լիցքակիրների τ_{eff} արդյուարար կյանքի տևողությունը (քվադիստացիոնար ֆոտոհաղորդականության մեթոդ, WCT-120 սարք):

Նմուշների պատրաստման և հետազոտման երթուղին պատկերված է նկ. 1-ում:

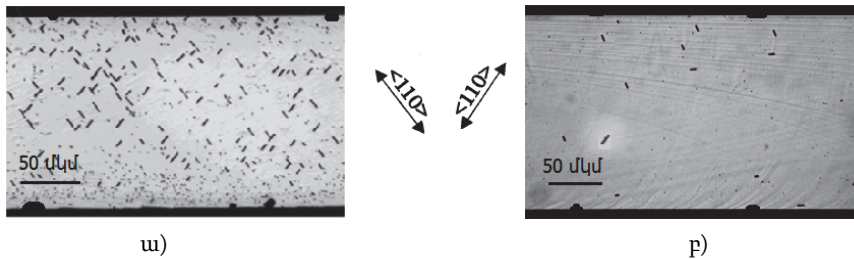


Նկ. 1. Նմուշների պատրաստման և հետազոտման գործընթացը

Հետազոտության արդյունքները: Նկ. 2-ում բերված են հսկիչ և թեստային հարթակների լայնական կտրվածքներին բնորոշ ֆոտոպատկերները ընտրողական խաճատումից հետո: Հստակ երևում են երկչափանի OISF-ների խաճատման հետքերը, որոնք ունեն մուգ գծիկների տեսք: Դրանք տեղաբաշխված են $\langle 110 \rangle$ բյուրեղագիտական ուղղություններով և միմյանց հետ կազմում են 60° անկյուն: OISF-ների հետ մեկտեղ ձևավորվում են նաև այլ տիպի արատներ, որոնց խաճատման հետքերն ունեն հարթ հատակով և տարբեր չափսերով մուգ փոսիկների տեսք: Վերջիններս SiO_x մետաղական տեղակալումներ (precipitations) և դիսլոկացիոն հանգույցներ են:

Նկ. 2-ից պարզորոշ հետևում է, որ b-Si-ի շերտի առկայությունը թեստային հարթակներում հանգեցնում է ներմուծված կառուցվածքային արատների խտու-

թյան մի քանի կարգով նվազմանը: Այսպես, 950°C ջերմաստիճանում օքսիդացումից հետո հսկիչ հարթակների մակերևույթին կառուցվածքային արատների խտությունը կազմում էր $(4...8) \times 10^5 \text{ սմ}^{-2}$, իսկ թեստային հարթակների դեպքում չէր գերազանցում 100 սմ^{-2} -ը:



Նկ. 2. Հսկիչ (ա) և թեստային (բ) հարթակների լայնական կտրվածքների ֆոտոպատկերները

Համաձայն պինդմարմնային բյուրեղագիտական տեսության՝ OISF-ները ներդրման արատներ են, որոնց առաջացումը պայմանավորված է օքսիդացման ընթացքում սիլիցիումի մակերևութային և ծավալային հավելյալ միջհանգուցային ատոմների վերակազմավորմամբ [11]: Տեղակալումների առաջացմանը նպաստում են հարթակներում առկա ոչ ցանկալի արագ դիֆուզիոն այնպիսի մետաղական խառնուրդներ, ինչպիսիք են Au-ն, Cu-ը, Fe-ը, Ni-ը և այլն: Կարելի է եզրակացնել, որ b-Si-ի շերտը, մեծ մակերևութային մակերեսի շնորհիվ, օքսիդացման ընթացքում ապահովում է նշված կառուցվածքային արատների առաջացման սաղմերի ներքաշում-կլանումը:

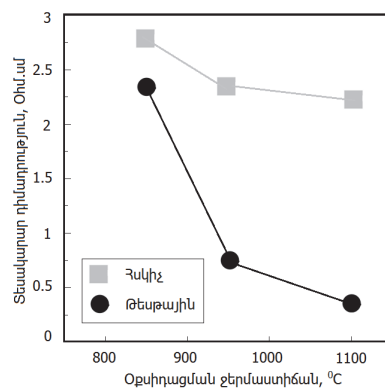
Նկ. 3-ում բերված են նմուշների տեսակարար դիմադրության արժեքները՝ կախված օքսիդացման ջերմաստիճանից: Ինչպես և ակնկալվում էր, կառուցվածքային արատների հետերացումը հանգեցնում է հսկիչ հարթակների համեմատ թեստային հարթակների տեսակարար դիմադրության առավել զգալի փոքրացմանը, քանի որ արատները փոքրացնում են կիսահաղորդիչների հաղորդականությունը [11]: Նմանատիպ արդյունքներ գրանցվել են նաև ծակոտկեն սիլիցիումի շերտով արատների հետերացման ժամանակ [12]:

Նկ. 4-ում բերված են նմուշների ոչ հիմնական լիցքակիրների արդյունաբար կյանքի տևողություն կախվածությունները լիցքակիրների խտությունից (գեներացիայի մակարդակից): Նմուշների օքսիդացման ջերմաստիճանը կազմում էր $T=950^{\circ}\text{C}$: Նկարում ցույց են տրված նաև թեստային հարթակների τ_{eff} -ի արժեքներն օքսիդացման ջերմաստիճանի $T=850^{\circ}\text{C}$, 1100°C արժեքների և լիցքակիրների խտության 10^{15} սմ^{-3} արժեքի դեպքում:

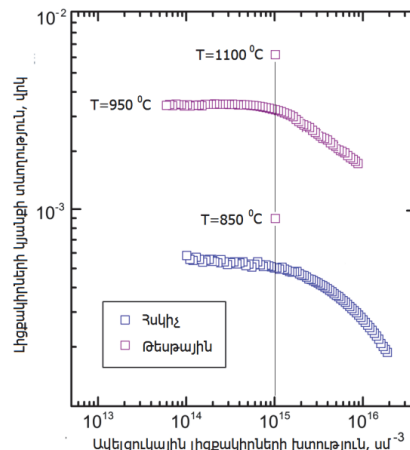
Ընդհանուր առմամբ ոչ հիմնական լիցքակիրների արդյունավետ կյանքի տևողությունը որոշվում է հետևյալ արտահայտությամբ [13].

$$\frac{1}{\tau_{eff}(\Delta n)} = \frac{(0,t)S_{front}(\Delta n)}{\Delta n_{av}(t)W} + \frac{1}{\Delta n_{av}(t)W} \int_0^W \frac{\Delta n(x,t)}{\tau_{bulk}(\Delta n)} dx + \frac{\Delta n(0,t)S_{rear}(\Delta n)}{\Delta n_{av}(t)W}, \quad (1)$$

որտեղ Δn -ն հավելյալ ոչ հիմնական լիցքակիրների խտությունն է, W -ն՝ հարթակի հաստությունը, S_{front} -ը և S_{rear} -ը՝ համապատասխանաբար հարթակի դիմային և թիկունքային մակերևույթների լիցքակիրների վերամիավորման արագությունները, τ_{bulk} -ն՝ ծավալային լիցքակիրների կյանքի տևողությունը, “ av ” ենթատողային ինդեքսով նշանակված է պարամետրի միջինացված արժեքը, t -ն բնութագրում է ժամանակը:



Նկ. 3. Հսկիչ և թեստային հարթակների տեսակարար դիմադրության արժեքները՝ կախված օքսիդացման ջերմաստիճանից



Նկ. 4. Հսկիչ և թեստային հարթակների ոչ հիմնական լիցքակիրների արդյունաբար կյանքի տևողությունը՝ կախված լիցքակիրների խտությունից

Ընդունելով, որ լիցքակիրների խտությունը հավասարաչափ է բաշխված հարթակի ծավալով,

$$\Delta n(x, t) \approx \Delta n_{av}(t) \text{ և } \Delta n(0, t) = \Delta n(W, t), \quad (1)$$

արտահայտությունից կստանանք.

$$\frac{1}{\tau_{eff}(\Delta n_{av})} = \frac{S_{front}(\Delta n_{av})}{W} + \frac{1}{\tau_{bulk}(\Delta n_{av})} + \frac{S_{rear}(\Delta n_{av})}{W}. \quad (2)$$

Մեր փորձերում լիցքակիրների արդյունաբար կյանքի տևողությունը չափելու փուլում դիմային և թիկունքային մակերևույթներն ամբողջովին նմանատիպ էին մշակված, հետևաբար՝

$$S_{front}(\Delta n_{av}) = S_{rear}(\Delta n_{av}) = S(\Delta n_{av}):$$

Բացի այդ, ինչպես ցույց է տրվել [14] աշխատանքում, ALD HfO_2 -ի ծածկույթն արդյունավետորեն մեկուսացնում է սիլիցիումային հարթակի մակերևույթները, հետևաբար՝ կարող ենք անտեսել մակերևութային վերամիավորման ներդրումը լիցքակիրների արդյունաբար կյանքի տևողության ընդհանուր արժեքի մեջ: Դա նշանակում է, որ $\tau_{eff}(\Delta n_{av})$ -ի չափումների արդյունքները մեծ ճշտությամբ արտահայտում են ծավալային լիցքակիրների կյանքի տևողությունը.

$$\tau_{eff}(\Delta n_{av}) \approx \tau_{bulk}(\Delta n_{av}): \quad (3)$$

Այսպիսով, հիմնվելով նկ. 4-ի տվյալների վրա, կարելի է փաստել, որ b-Si-ի շերտը խոչընդոտում է կառուցվածքային արատների առաջացմանը սիլիցիումային հարթակների ծավալում, որն էլ հանգեցնում է ծավալային լիցքակիրների կյանքի տևողության մեծացմանը: Հետերացման արդյունավետությունը մեծանում է օքսիդացման ջերմաստիճանի բարձրացմանը զուգընթաց:

Գործնական տեսակետից նախընտրելի է b-Si-ի շերտը որպես կլանիչ (հետեր) ձևավորելը հարթակների թիկունքային՝ ոչ աշխատանքային կողմում: Այդպիսի արտաքին հետերացումն անվանում են կողմնային (external lateral gettering - ELG), և դրա կիրառման առավելությունը EPG-ի համեմատ պայմանավորված է հետևյալ հանգամանքով: EPG-ի դեպքում կառուցվածքային արատների ներքաշման առավելագույն հետավորությունը կազմում է մի քանի μm [7], հետևաբար՝ հետերացումն արդյունավետ է միայն փոքր չափսեր ունեցող չիպերով ինտեգրալ միկրոսխեմաների դեպքում: Դիսկրետ կիսահաղորդչային սարքերի (օրինակ, ուժային տրանզիստորներ և դիոդներ, վարիկապներ) չափսերը կազմում են տասնյակ μm , հետևաբար՝ արատների ներքաշումը սարքերի ոչ եզրային տիրույթներից դառնում է անհնարին: Ասվածն առավել ևս վերաբերում է արևային էլեմենտներին, որոնց ներկայիս չափսերը կազմում են $150 \times 150 \mu\text{m}^2$ -ից մինչև $210 \times 210 \mu\text{m}^2$, իսկ հաստությունը չի գերազանցում 1 μm -ը: Այս դեպքերում նախընտրելի է կիրառել ELG՝ ձևավորելով հետերային մերձմակերևութային շերտը սիլիցիումային հարթակների թիկունքային կողմում:

Եզրակացություն: b-Si-ի շերտն օքսիդացման ընթացքում հանդես է գալիս որպես հավելյալ միջհանգուցային ատոմների և մետաղական խառնուրդների արդյունավետ կլանիչ, դրանով իսկ էականորեն նվազեցնելով կառուցվածքային արատների սաղմերի խտությունը: Արդյունքում որոշակիորեն փոքրանում է հարթակների տեսակարար դիմադրությունը, և նվազում է գեներացման-վերամիավորման կենտրոնների խտությունը սիլիցիումում: Դրա անմիջական վկայությունն է նաև լիցքակիրների կյանքի տևողության մեծացումը: Նախընտրելի է b-Si-ի շերտի՝ որպես կլանիչի ձևավորումը հարթակների թիկունքային՝ ոչ աշխատանքային կողմում:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Ayvazyan G.Y.** Crystalline, Porous and Black Silicon: Research and Application.- Yerevan: Chartaraget, 2020.- 240 p.
2. **Korotcenkov G.** Porous Silicon. From Formation to Application.- CRC Press, 2016.- 439 p. DOI: 10.1201/b19342.
3. **Omar K., Salman K.** Porous Silicon Solar Cell with Anti-reflection Coating Layer for Efficiency Improved // Pontr. – 2016. -V. 72, N. 5.- P. 190-208. DOI: 0.21506/j.ponte.2016.5.32.
4. **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, N 1. – P. 16-22. DOI: 10.3103/S106833722001003X.
5. **Lv J., Zhang T., Zhang P, Li S.** Review Application of Nanostructured Black Silicon // Nanoscale Res. Lett.- 2018.- V. 13.- P. 1-10. DOI: 10.1186/s11671-018-2523-4.
6. Black Silicon Photovoltaics / **M. Otto, M. Algasinger, H. Branz,** et al // Adv. Optical Mat. – 2015. – V. 3 (2). - P. 147-164. DOI: 10.1002/adom.201400395.
7. **Айвазян Г.Е.** Планарное геттерирование слоев пористого кремния // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.- 2001.- Т. LIV, № 3. - С. 471-474.
8. **Айвазян Г.Е., Скворцов А.М.** Эффективность геттерирования структурных дефектов полупроводниковых пластин слоем пористого кремния // Изв. вузов. Сер. Приборостроение.- 2002.- Т. 45, № 7.- С. 63-65.
9. **Ayvazyan G.Y., Barseghyan R.N., Minasyan S.A.** Optimization of Surface Reflectance for Silicon Solar Cells // Green Energy and Smart Grids. E3S Web of Conferences. – 2018. - V. 69, 01008. - P. 1-4. DOI: 10.1051/e3sconf/20186901008.
10. Passivation Properties of Atomic-Layer-Deposited Hafnium Oxide on Black Silicon Surface / **G.Y. Ayvazyan., M.V. Katkov, M.S. Lebedev,** et al // Proc. of the 32nd Int. Conf. on Microelectronics.- 2021.- P. 145-147. DOI: 10.1109/ICMEL.2000.840575.
11. **Seibt M., Kveder V.** Gettering Processes and the Role of Extended Defects //Advanced Silicon Materials for PV Applications. - John Wiley & Sons Ltd., India, 2012.- P. 127-188. DOI: 10.1002/9781118312193.ch1.
12. **Kuzma-Filipek I., Hariharsudan S.R.** Porous Silicon Gettering // Handbook of Porous Silicon.- Springer, 2018.- P. 1121-1132. DOI: 10.1007/978-3-319-71381-6.
13. Application of Quasi-steady-state Photoconductance Technique to Lifetime Measurements on Crystalline Germanium Substrates / **I. Martin, A. Alcañiz, G. Lopez,** et al // IEEE J. of Photovoltaics.- 2020.- V.10 (4).- P. 1068-1075. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2020.2981839.

14. 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, N 3. – P. 240-246. DOI: 10.3103/S1068337221030075.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 05.10.2021:

Г.Е. АЙВАЗЯН

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕТТЕРИРОВАНИЯ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ СЛОЕМ ЧЕРНОГО КРЕМНИЯ

Рассмотрена возможность геттерирования структурных дефектов кремниевых подложек с приповерхностным слоем черного кремния (b-Si). Эффективность геттерирования оценивалась по результатам исследования удельного сопротивления, плотности дефектов и эффективного времени жизни неосновных носителей заряда на тестовых и контрольных подложках. Показано, что в процессе термического окисления слой b-Si служит эффективным стоком для избыточных межузельных атомов и металлических примесей, тем самым значительно уменьшая плотность зародышей структурных дефектов в кремнии. В результате снижается удельное сопротивление подложек и увеличивается время жизни носителей заряда. Целесообразно в качестве геттера слой b-Si формировать на обратной нерабочей стороне подложек.

Ключевые слова: черный кремний, геттер, структурный дефект, удельное сопротивление, время жизни носителей заряда.

G.Ye. AYVAZYAN

EFFICIENCY OF GETTERING STRUCTURAL DEFECTS BY A BLACK SILICON LAYER

The possibility of gettering structural defects of silicon substrates with a near-surface layer of black silicon (b-Si) is considered. The gettering efficiency was estimated according to the results of studying the resistivity, defect density, and effective minority carrier lifetime on test and control substrates. It is shown that in the thermal oxidation process, the b-Si layer serves as an effective drain for excess interstitial atoms and metallic impurities, thereby significantly reducing the density of nuclei of structural defects in silicon. As a result, the resistivity of the substrates decreases, and the carrier lifetime increases. It is advisable to form a b-Si layer as a getter on the rear non-working side of the substrates.

Keywords: black silicon, getter, structural defect, resistivity, carrier lifetime.