



Gulmira ALLAYAROVA,
Qarshi davlat universiteti dotsenti
Nilufar ODILOVA,
Qarshi davlat universiteti dotsenti v.b
Qarshi davlat universiteti Qarshi, 180117, O'zbekiston
E-mail: allayarova5030@mail.ru

O'zbekiston Milliy universiteti professori Y. Ergashov taqrizi asosida

Si⁺ IONLARINI IMPLANTATSIYA QILISH NATIJASIDA Mo DA HOSIL QILINGAN YUPQA MoSi₂ PLYONKALARINING TARKIBI, TUZILISHI VA XOSSALARI

Аннотация

Birinchi marta Mo ga Si⁺ ionlarini 1 keV dan 5 keV gacha energiya bilan joylashtirish usuli yordamida qalinligi 25-100Å oraliqda bir hil MoSi₂ plyonkalari olindi. Ushbu plyonkalarining tarkibi, elektron va kristall tuzilishi o'rganildi. Polikristalli MoSi₂ plyonkasi E_g = 0,75 eV tarmoqli bo'shlig'iga ega bo'lgan n-tipli yarim o'tkazgich ekanligi aniqlandi. MoSi₂ ning valent zonasi uchta cho'qqini ko'rsatadi. ~90–100Å qalinlikdagi MoSi₂ plyonkasi 1200K gacha bo'lgan haroratlarda O₂ ning Mo ga kirishiga deyarli to'sqinlik qiladi.

Kalit so'zlar: elektron va kristall tuzilishi, valent zona, o'zgaruvchanligi, taqiqlangan zona kengligi.

СОСТАВ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК MoSi₂, ОБРАЗОВАННЫХ ПУТЕМ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ Si⁺ В Мо

Аннотация

Впервые методом имплантации ионов Si⁺ в Мо с энергиями от 1 кэВ до 5 кэВ получены однородные пленки MoSi₂ с варьируемой толщиной в пределах 25-100Å. Изучены состав, электронная и кристаллическая структура этих пленок. Установлено, что поликристаллическая пленка MoSi₂ является полупроводником n-типа с шириной запрещенной зоны E_g=0.75 эВ. В валентной зоне MoSi₂ имеются три максимума. Пленка MoSi₂ толщиной ~90 - 100Å практически полностью предотвращает проникновение O₂ в Мо до температуры 1200K.

Ключевые слова: электронная и кристаллическая структура, валентная полоса, изменчивость, ширина запрещенной зоны.

COMPOSITION, STRUCTURE AND PROPERTIES OF MoSi₂ THIN FILMS FORMED BY IMPLANTATION OF Si⁺ IONS INTO Mo

Annotation

For the first time, homogeneous MoSi₂ films with variable thickness in the range of 25-100Å were obtained using the method of implanting Si⁺ ions into Mo with energies from 1 keV to 5 keV. The composition, electronic, and crystal structure of these films were studied. It was established that the polycrystalline MoSi₂ film is an n-type semiconductor with a band gap of E_g = 0.75 eV. The valence band of MoSi₂ exhibits three peaks. A MoSi₂ film of thickness ~90–100Å almost completely prevents O₂ penetration into Mo up to a temperature of 1200K.

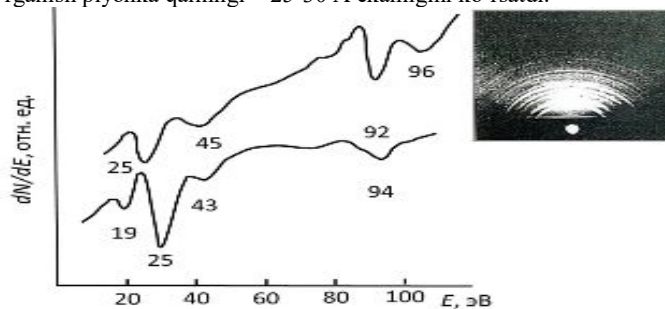
Keywords: electronic and crystal structure, valence band, variability, band gap width.

Kirish. Hozirgi vaqtda MoSi₂ Mo ni va unga asoslangan tuzilmalarni oksidlanishdan saqlash, MYD tranzistorlari va integral mikrosxemalar yaratish (o'zaro bog'lanishlar uchun elektrodlari sifatida) [1-3] uchun foydalaniladi va yangi opto- va nanoelektronik qurilmalarni ishlab chiqishda salohiyatga ega [4-8]. Shuni ta'kidlash kerakki, issiqlikka bardoshli metallarning yupqa plyonkalari oksidlovchi muhitda yuqori harorat ta'siriga chidamli emas, lekin ularning silitsidlari (xususan, MoSi₂) bu ta'sirlarga juda chidamli va ular Si o'rni bosuvchi MYD tranzistorlarida keng qo'llaniladi. Shuning uchun turli usullar bilan olingan silitsidlari va Mo oksidlarning tarkibi, tuzilishi va xossalari ko'plab ishlarda o'rganilgan [4-14].

Mavzuga oid adabiyotlar tahlili Mo asosidagi silitsid qoplamalarini yaratishning ko'plab usullari mavjud. Sintez usullari ma'lum bir silitsidni qo'llash talablariga, yaratilgan mahsulotlarning geometrik o'lchamlari, kristall tuzilmalari va parametrlariga bog'liq. Molibden mahsulotlariga qo'yiladigan asosiy talablardan biri ularni oksidlanishdan saqlash (himoya qilish)dir. Shu maqsadda eng ko'p qo'llaniladigan usullar to'siq qatlamlarini va kompozit ko'p qatlamli qoplamalarni yaratishdir [10]. Biroq, bu usullar bilan olingan plyonkalar katta qalinliklarga ega (>100Å), bu nuqsonlarning ko'payishiga va dislokatsiyalar paydo bo'lishiga olib keladi, bu esa ularning xizmat qilish muddatini keskin qisqartiradi. So'nggi yillarda metall, yarimo'tkazgich va dielektrik plyonkalarda noyob xossalarga ega yangi nanostrukturalarni sintez qilish uchun kam energiyali ion implantatsiyasi usuli muvaffaqiyatli qo'llanilmoqda [15-20]. Xususan, [15,16] da O₂⁺ ionlarini Mo ga implantatsiya qilish orqali bir kristalli Mo yuzasida MoO₂ va MoO₃ ning bir hil nanoplyonkalari olingan. Bu ishda birinchi marta qizdirilgan Mo ga Si⁺ ionlarini joylashtirish usuli yordamida MoSi₂ nanoplyonkalari olindi va ularning tarkibi, strukturasi va energiya tasmasi parametrlari hamda bu qatlamning Mo dagi kislorod diffuziyasiga ta'siri o'rganildi.

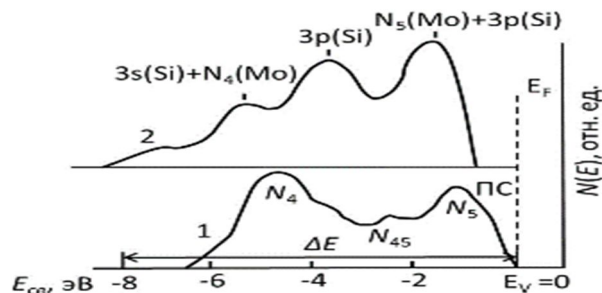
Tadqiqot metodologiyasi. Tadqiqot obyektlari sifatida $\sim 10 \times 10 \times 0,3$ mm o'lchamdagi Mo(111) monokristalli namunalari tanlangan. Tadqiqot uchun namunalari [16] da tasvirlangan usul yordamida tayyorlangan. Ushbu namunalari USU-2 tipidagi o'ta yuqori vakuumli qurilmaga o'rnatildi. Haroratni isitish, ion implantatsiyasi va tarkibi va elektron tuzilishini o'rganish xuddi shu qurilmada 10^{-7} Pa vakuum ostida amalga oshirildi. Mo(111) ni tozalash avval $T=1800$ K da 20 soatdan ortiq qizdirib, keyin $T=2200$ K da qisqa muddatli qizdirish yo'li bilan tozalandi. Si^+ ionlarini Mo ga joylashtirish $T=1020$ K da 1 dan 5 keV gacha energiya bilan to'yinganlik dozasi D_n da amalga oshirildi. To'yinganlik dozasi D_n - uning keyingi ortishi ionli qatlamlarning tarkibi, tuzilishi va xususiyatlarining o'zgarishiga olib kelmaydigan dozadir. Energiyasi $E_0=1$ keV da D_n ning qiymati $\sim 8 \cdot 10^{16}$ sm^{-2} , $E_0=3$ keV da 10^{17} sm^{-2} , $E_0=5$ keV da $2 \cdot 10^{17}$ sm^{-2} bo'lgan. Si^+ ionlari Si bug'ini elektronlar bilan bombardimon qilish orqali olinadi. Si bug'i Si ni $E_0=1,5$ keV bo'lgan elektronlar bilan bombardimon qilish orqali ham olinadi. Oje elektron spektroskopiyasi (OES) yordamida atomlarning sirt tarkibi va konsentratsiyasi o'rganildi; MoSi₂ plyonkasining elektron tuzilishi ultrabinafsha fotoelektron spektroskopiyasi (UBFS) yordamida o'rganildi. Oje va fotoelektronlarni ro'yxatga olish uchun Toshkent davlat texnika universiteti ilmiy laboratoriyasida yig'ilgan sekinlashtiruvchi polimeriga ega 4 to'rtli kvazsferik analizatoridan foydalandik. Oje spektrlari $E_p = 1800$ eV energiyada qayd etilgan. Foton manbai sifatida Sankt-Peterburgdagi GOYA laboratoriyasida ishlab chiqarilgan vodorod gazrasyadli lampasi ishlatilgan. Atomlarning chuqurlik taqsimot profilini OES usulida sirt normasiga nisbatan $75-80^\circ$ burchak ostida energiya $E_0=1,5$ keV bo'lgan Ar^+ ionlari bilan sirtni qirqish bilan birgalikda aniqlandi. O'lchov xatosi $2-3 \text{ \AA}$ dan oshmadi va $3-4 \text{ \AA}$ xato bilan aniqlandi. Sirtning kristall tuzilishi EMR-2 qurilmasida yuqori energiyali elektron difraksiyasi (TED) yordamida o'rganildi.

Tahlil va natijalar. Ionlar dozasi $D_n = 8 \cdot 10^{16}$ sm^{-2} dozada energiya $E_0 = 1$ keV bo'lgan Si ionlari bilan implantatsiya qilingan yaxshi tozalangan Mo(111) va Mo ning Oje spektrlarining boshlang'ich qismlari 1-rasmda ko'rsatilgan. Implantatsiya 1020 K haroratida amalga oshirildi. Keltirilgan 1-rasmdan ko'rinib turibdiki, ion implantatsiyasidan so'ng Mo ning $E = 43$ eV bo'lgan Oje cho'qqisi butunlay yo'qoladi va $E = 94$ eV tepalik o'rniga $E = 92$ va 96 eV da Mo + Si ga xos bo'lgan qo'sh cho'qqi paydo bo'ladi. Tez elektronlar defraksiyasi (TED) namunasi (1-rasm, ichki qism) polikristalli tuzilishga xos bo'lgan yorqin konsentrik halqalardan iborat. Bundan tashqari, Si^+ ionlari implantatsiyasidan so'ng NiN_2V (19 eV) va N_3VV (25 eV) tipidagi Oje o'tishlari bilan bog'liq Mo cho'qqilarining holati va shakli sezilarli darajada o'zgaradi, bu Mo va Si atomlari o'rtasida kimyoviy bog'lanish hosil bo'lishi sababli yangi valentlik zonasining shakllanishi bilan bog'liq. Oje elektronlarining to'liq spektrini tahlil qilish va $c_x = \frac{I_x/S_x}{\sum I_o/S_o}$ formulasi yordamida Mo va Si atomlari konsentratsiyasini hisoblash sirtida MoSi₂ tipidagi plyonka hosil bo'lishini ko'rsatdi. Bu erda I Augerning eng yuqori intensivligi va S - Oje sezuvchanlik koeffitsienti. Mo chuqurligi bo'ylab Si atomining tarqalish profilini o'rganish plyonka qalinligi $\sim 25-30 \text{ \AA}$ ekanligini ko'rsatdi.



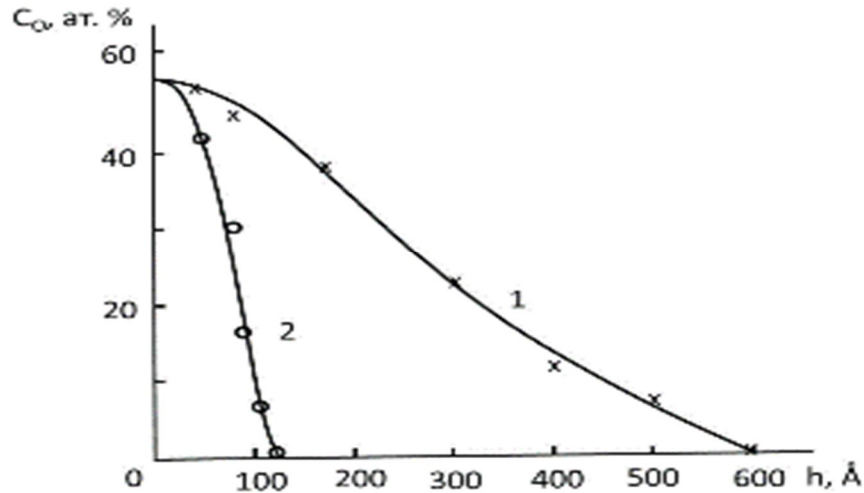
1-rasm Oje spektrlari: 1-sof Mo (111) 2- Mo (111) MoSi₂ plyonkasi bilan d=25-30Å. MoSi₂/Mo ning TED tasviri

Keltirilgan 2-rasmda MoSi₂ plyonkasi bilan sof Mo va Mo uchun $h\nu = 10,8$ eV da olingan fotoelektron spektrlari keltirilgan. Sof Mo bo'lsa, spektr $-1,4$ bog'lanish energiyasida 3 ta maksimalni ko'rsatadi; $-2,2$; $-4,6$ eV, uning mavjudligini biz Mo ning valentlik zonasining zichlik holatlarining N_5 , N_4 va N_4 darajalaridan elektronlarning qo'zg'alishi bilan izohlaymiz. $0,6-0,7$ eV mintaqasidagi xususiyat molibdenning sirt holati bilan bog'liq. Fotoelektron spektrlaridan energiya polosalari parametrlarini aniqlash mumkin. Ev valentlik zonasining yuqori qismiga mos keladigan F fotoelektron ish funksiyasining qiymati $h\nu = F + \Delta E$ formulasi bilan aniqlanadi, bu erda ΔE - spektrning kengligi. Ko'rinib turibdiki, Mo uchun qiymat $F = E_v = 10,8 - 6,3 = 4,5$ eV. MoSi₂/Mo plyonkasining energiya taqsimoti egri chizig'i (EKT) tuzilishi sof molibden fotoelektronlarining EKT dan keskin farq qiladi. Spektrning energetik kengligi $E_b = -1,9$ da 3 ta cho'qqini ochib beradi; $-3,54$; $-5,2$ eV va $E_b \sim 7$ eV da katta. Ushbu cho'qqilarni shakllantirishning mumkin bo'lgan mexanizmlari berilgan egri chiziqni tahlil qilishdan kelib chiqadi 2. Olingan xususiyatlar, aftidan, L_{23} kislorod darajasidan elektronlarning qo'zg'alishi bilan bog'liq.



2-rasm. 1 - sof Mo(111) uchun $h\nu = 10,8$ eV da qayd etilgan fotoelektron spektrlari; 2 - MoSi₂ plyonkasi bilan Mo(111) qalinligi $25-30 \text{ \AA}$

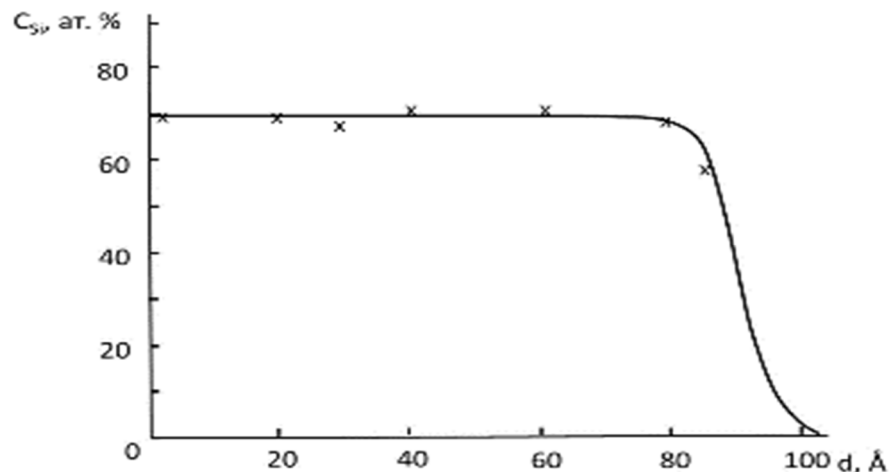
Ma'lumki, ikkita material aloqada bo'lganda, E_F darajalarining energiya pozitsiyalari bir xil to'g'ri chiziqda yotadi. Sof Mo holatida valentlik zonasining yuqori qismi E_v , E_c (o'tkazuvchanlik zonasining pastki qismi) va E_F holatlari bir-biriga to'g'ri keladi. Ko'rsatilgan 2-egri chiziqdan ko'rinib turibdiki, $MoSi_2$ holatida E_v (fotoelektron spektrlarining boshlanishi) holati quyi energiyalar tomon $\sim 0,75$ eV ga siljiydi, ya'ni $MoSi_2$ tarmoqli bo'shliq kengligi $E_g \approx 0,75$ eV bo'lgan n-tipli yarimo'tkazgichdir. $MoSi_2$ qatlamining kislorodning Mo ga kirib borish chuqurligiga ta'sirini aniqlashtirish uchun maqsad chuqurligi bo'ylab O_2 atomlarining tarqalish profillari o'rganildi. Buning uchun vakuum qurilmasiga 10^{-2} Pa bosimga O_2 kiritildi. Keltirilgan 3-rasmda qalinligi $d \approx 25-30 \text{ \AA}$ bo'lgan $MoSi_2$ plyonkasi bilan toza Mo(111) va Mo uchun O ning chuqur taqsimlanish profillari ko'rsatilgan. Barcha tadqiqotlar xona haroratida o'tkazildi.



3-rasm. Sof Mo(111) (1-egri) va $d = 25-30 \text{ \AA}$ (2-egri chiziq) bo'lgan $MoSi_2$ plyonkali Mo chuqurligi bo'yicha kislorod taqsimoti profili

Ko'rinib turibdiki, sof Mo holatida kislorodning kirib borish chuqurligi $h \sim 600 \text{ \AA}$, $MoSi_2$ plyonkasi bo'lgan Mo esa kirish chuqurligi $100-120 \text{ \AA}$ gacha kamayadi. Bundan kelib chiqadiki, O ning Mo ga kirib borishini (keskin kamayishini) va shunga mos ravishda Mo oksidlanishini oldini olish uchun $MoSi_2$ plyonkasi qalinligini $100-120 \text{ \AA}$ gacha oshirish kerak. Buning uchun [14] da taklif qilingan turli energiyali Si^+ ionlarini bosqichma-bosqich implantatsiya qilish usuli qo'llanildi. Keyingi 4-rasmda 1020 K maqsadli haroratda $5, 3$ va 1 keV energiyaga ega Si ionlari bilan implantatsiya qilingan Mo uchun Si atomlarining hosil bo'lgan chuqur taqsimot profili ko'rsatilgan. Ko'rinib turibdiki, $MoSi_2$ plyonkasi qalinligi $90-100 \text{ \AA}$ atrofida.

Shuni ta'kidlash kerakki, ushbu tizimlar uchun Si ning nishonga kirish chuqurligini kamaytirishdan tashqari, ular yuqori haroratli yuklarga bardosh berishi kerak. Keltirilgan 5-rasmda O konsentratsiyasining $MoSi_2/Mo$ tizimining turli substrat haroratidagi chuqurligiga bog'liqligi ko'rsatilgan.



4-rasm. Mo uchun chuqurlik bo'yicha Si taqsimotining konsentratsion profili, $D=Dn$ da energiyalari $5, 3$ va 1 keV bo'lgan Si ionlari asta-sekin implantatsiya qilinadi, so'ngra $T=1020 \text{ K}$ da qizdiriladi

Rasmdan ko'rinib turibdiki, kislorod 1200 K dan past haroratlarda Mo ga amalda kirmaydi. 1400 K da kislorod Mo ga $\sim 40-50 \text{ \AA}$ chuqurlikda, konsentratsiyasi $\% 10-15$ dan oshmaydi. 1600 K da kislorod Mo ga 300 \AA chuqurlikda kiradi. T ning yanada ortishi bilan $MoSi_2$ ning uning tarkibiy qismlariga parchalanishi sodir bo'ladi, ya'ni $MoSi_2$ plyonkasi tarkibi, tuzilishi va xususiyatlarining keskin o'zgarishi sodir bo'ladi.

Xulosa. $T=1020 \text{ K}$ da qizdirilgan Mo(111) ga Si^+ ionlarini joylashtirish usuli yordamida qalinligi ~ 25 dan 100 \AA gacha bo'lgan bir jinsli polikristal $MoSi_2$ plyonkalar olindi. $MoSi_2$ n-tipli yarimo'tkazgich bo'lib, tarmoqli oraligi $\sim 0,75 \text{ eV}$ bo'lganligi

ko'rsatilgan. MoSi2 nanofilmlarning valentlik zonasidagi elektronlar holatining zichligi baholandi. Yupqa MoSi2 plyonkalari O2 ning Mo ga tarqalishini 1200 - 1300 K haroratgacha keskin kamaytiradi (yoki oldini oladi).

ADABIYOTLAR

1. High Temperature Structural Silicides// Proc.of the First High Temperature Structural Silicides Workshop, USA, 1991 – Elsevier Sci.Publ., Amsterdam, 1992.- 278 Pp
2. Е. П., Нечипоренко, А.П., Петриченко Ю.Б., Павленко// Защита металлов от коррозии.- Харьков: Вища школа,1985.- 112С
3. С.В. Литовченко , В.М. Береснев, А.А. Дробышевская, П.В. Турбин // Силицидные покрытия на молибдене: получение структура, свойства / Физическая инженерия поверхности. - 2012. - Т. 10, № 2. - С. 110–137. - Библиогр.: 65 назв. - рос.
4. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/98941>
5. Ю.А. Петухов., Н.Т. Квасов., В.В. Углов., В.М. Асташинский А. М. Кузьмицкий // Структура и фазовый состав системы молибден- кремний, обработанной компрессионными плазменными потоками / Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники 2011 № 1 (55) С. 31-37
6. <https://cyberleninka.ru/article/n/struktura-i-fazovyy-sostav-sistemy-molibden-kremniy-obrabotannoy-kompressionnymi-plazmennymi-potokam>
7. Ivanenko L.I., Shaposhnikov V.L., Filonov A.B., et al. // Thin solid films. 2004. Vol. 461. P. 141-147.
8. Galkin N.G., Chusovitin E.A., Goroshko D.L. et al. // Journal of Physics D: Applied Physics. 2007. Vol. 40, №17. P. 5319.
9. Esconjauregui S., Whelan C.M., Maex K. // Nanotechnology. 2007. Vol. 18. P. 015602.
10. Iriarte G.F. // Journal of Non-Crystalline Solids. 2010. Vol. 356. P. 1135-1144.
11. Legagneux P., Privat D, Nedellec Y. // US Patent 7491269. 2009.
12. Chen L.J. // JOM. 2004. Vol. 57, № 9. P. 24-31.
13. Qiuyu Chena , Shuhua Lianga,, Bingxue Lia , Zheng Chena,, Xiaoyan Songc, Longchao Zhuoa// Version of Record: 2021 published by Elsevier. This manuscript is made available under the Elsevier user license <https://www.elsevier.com/open-access/userlicense/1.0/>
14. Kong Yakang , Cheng Wang , Xiancong Chen, Yi Qu , Jiabo Yu, Haijuan Ju and Xiao Yilei // Submission received: 6 July 2023 / Revised: 25 July 2023 / Accepted: 26 July 2023 / Published: 7 August 2023
15. <https://doi.org/10.3390/ma16155495>
16. Mi Zhao, Wei Ye, Mengyuan Zhu, Yuteng Gui, Wei Guo, Shusen Wu and Youwei Yan// Submission received: 7 October 2022 / Revised: 4 November 2022 / Accepted: 11 December 2022 / Published: 20 December 2022
17. <https://doi.org/10.3390/ma16010003>
18. Lu Wang, Meng-Chao Li, Guo-Hua Zhang, and Zheng-Liang Xue// Published by De Gruyter November 30, 2020
19. <https://doi.org/10.1515/htmp-2020-0093>
20. Nikolai V. Alov// physica status solidi 09 February 2015 - Wiley Online Library
21. <https://doi.org/10.1002/pssc.201400108>
22. Allayarova, G. Kh.// Journal of Surface Investigation. 2020 Vol.14., Issue.6.,Page.,1179-1182
23. DOI:10.1134/S1027451020060026
24. Isakhanov Z. A., Mukhtarov Z. E., Umirzakov B. E., Ruzibaeva M. K. // Technical physics. Vol. 56, № 4, Page 546-549.
25. DOI: 10.1134/S1063784211040177. 2011,
26. Donaev S. B., Tashatov A. K., Umirzakov B. E. 2015, Vol. 9, № 2, Page 406- 409. DOI: 10.1134/S1027451015020263.
27. Umirzakov B.E., Imanova G.T., Bekpulatov I.R., Turapov I.K. Obtaining of thin films of manganese silicides on a Si surface by the method of solid-phase deposition and investigation of their electronic structure. Modern Physics Letters., 2023, 37(24), 2350078.
28. Allayarova G.Kh. Tashmukhamedova, DA; Yusupjanova, MB; Umirzakov, BE// Technical physics. 2020., Vol.46. Issue.10. Page. 972-975
29. DOI:10.1134/S1063785020100144