UO‘K 538.975:621.793.7

NI/SIO₂/n-SI<P> METALL-OKSID-YARIMO‘TKAZGICH STRUKTURALARINI SHAKLLANTIRISH TEXNOLOGIYASI VA UNING EKSPERIMENTAL-FIZIK ASOSLARI

Sharafova To‘lg‘anoy Sunnat qizi,
Sharof Rashidov nomidagi
Samarqand davlat universiteti
tulganoysharafova@gmail.com

Annotatsiya. *Ushbu maqolada Ni/SiO₂/n-Si<P> metall-oksid-yarimo‘tkazgich (MOY) strukturalarini shakllantirishning to‘liq texnologik jarayoni va uning eksperimental-fizik asoslari bayon etilgan. Kremniy taglik yuzasi ko‘p bosqichli kimyoviy tozalashdan (erituvchida tozalash, RCA-1 va HF botirish) o‘tkazilgach, tunnel-shaffof SiO₂ dielektrik qatlami azot kislotasida oksidlash (NAOS) usulida hosil qilingan, so‘ngra oksidlangan yuzaga Ni qatlami DC magnetron changlatish usulida, orqa tomondagi kontakt maydonchasiga esa Al termik bug’latish usulida cho‘ktirilgan. Hosil bo‘lgan qatlamli tuzilma spektroskopik ellipsometriya (SiO₂ qalinligi – 3,74 nm, Cauchy modeli) va skanerlovchi elektron mikroskopiya (SEM, 125 000× kattalashtirish) yordamida tasdiqlangan, tuzilmaning yarimo‘tkazgichlik xossasi esa voltamper xarakteristikasi (VAX) asosida aniqlangan Shottki to‘siq balandligi (φ_B = 0,388–0,417 eV, [110] yo‘nalish) bilan isbotlangan. Olingan natijalar tavsiflangan texnologik jarayonning takrorlanuvchan va fizik jihatdan asoslanganligini ko‘rsatadi.*

Kalit so‘zlar. *Metall-oksid-yarimo‘tkazgich struktura, Ni/SiO₂/Si, ko‘p bosqichli kimyoviy tozalash, NAOS oksidlash, DC magnetron changlatish, spektroskopik ellipsometriya, SEM, Shottki to‘sig‘i, VAX.*

ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛ–ОКСИД –ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР Ni/SiO₂/n-Si<P> И ИХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Аннотация. *В данной статье представлена полная технологическая последовательность формирования металл–окисел–полупроводниковых (МОП) структур Ni/SiO₂/n-Si<P> и рассмотрены их экспериментально-физические основы. После многостадийной химической очистки поверхности кремниевой подложки (очистка в растворителе, обработка RCA-1 и травление в растворе HF) методом окисления в азотной кислоте (NAOS) был сформирован туннельно-прозрачный диэлектрический слой SiO₂. Затем на окисленную поверхность методом DC-магнетронного распыления был нанесён слой Ni, а на тыльную сторону подложки методом термического испарения был сформирован контактный слой Al. Полученная слоистая структура была подтверждена методами спектроскопической эллипсометрии (толщина слоя SiO₂ – 3,74 нм, в рамках модели Коши) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, увеличение 125 000×). Полупроводниковые свойства структуры были подтверждены на основе вольт-амперных характеристик (ВАХ) посредством определения высоты барьера Шоттки (φ = 0,388–0,417 эВ, направление [110]). Полученные результаты показывают, что разработанный технологический процесс формирования структуры является воспроизводимым и имеет физически обоснованный характер.*

Ключевые слова. *Металл – окисел – полупроводниковая структура, Ni/SiO₂/Si, многостадийная химическая очистка, окисление NAOS, DC-магнетронное распыление, спектроскопическая эллипсометрия, СЭМ, барьер Шоттки, вольт-амперная характеристика.*

TECHNOLOGY OF FABRICATION OF Ni/SiO₂/n-Si<P> METAL–OXIDE–SEMICONDUCTOR STRUCTURES AND THEIR EXPERIMENTAL–PHYSICAL FOUNDATIONS

Abstract. *This paper presents the complete technological process for the fabrication of Ni/SiO₂/n-Si<P> metal–oxide–semiconductor (MOS) structures and describes their experimental and physical foundations. After multistage chemical cleaning of the silicon substrate surface (solvent cleaning, RCA-1 treatment, and HF dipping), a tunnel-transparent SiO₂ dielectric layer was formed by nitric acid oxidation (NAOS) method. Subsequently, a Ni layer was deposited onto the oxidized surface using the DC magnetron sputtering technique, while an Al contact pad was formed on the backside by thermal evaporation. The fabricated multilayer structure was characterized by spectroscopic ellipsometry (SiO₂ thickness of 3.74 nm using the Cauchy model) and scanning electron microscopy (SEM, magnification of 125,000×). The semiconductor properties of the structure were confirmed based on current–voltage characteristics (I–V*

characteristics) through the determination of the Schottky barrier height (φ_B = 0.388–0.417 eV, along the [110] crystallographic direction). The obtained results demonstrate that the developed fabrication process is reproducible and physically justified.

Keywords. *Metal–oxide–semiconductor structure, Ni/SiO₂/Si, multistage chemical cleaning, NAOS oxidation, DC magnetron sputtering, spectroscopic ellipsometry, SEM, Schottky barrier, current–voltage characteristics.*

Kirish. Planar texnologiyaning rivojlanishi metall-oksid-yarimo‘tkazgich (MOY) tizimlariga asoslangan yarimo‘tkazgich strukturalarining, shuningdek ular negizida qator diskret va integral qurilmalarning yaratilishiga olib keldi. Hozirgi kunda mikro- va nanoelektron sxemalarda, shuningdek diskret qurilmalarda oksid-yarimo'tkazgich (IY), metall-oksid-yarimo‘tkazgich (MOY) va metall-oksid-yarimo‘tkazgich (MOY) strukturalari keng qo‘llaniladi. Bunday strukturalarning nomuvozanat va fotoelektrik xossalari, xususan, yuqori chastotalarda ishlash qobiliyati, tashqi elektr maydon ta’sirida sirtda o‘ziga xos p-n o‘tish hosil bo‘lishi hisobiga turli nurlanish turlariga sezgirligi — alohida qiziqish uyg‘otadi va pozitsion-sezgir planar fotodetektorlar, yuqori tezlikli dinamik kondensatorlar hamda boshqa funksional elementlar yaratish imkonini beradi.

Monokristall kremniy asosidagi turli strukturalar, jumladan, $NiSi_2$/p-Si, Ni/n-Si, NiSi, Ni/SiO_2/n-Si, Ni/SiO_2/p-Si kabilar zamonaviy mikro - va nanoelektronika uchun faol elementlar sifatida ko‘rib chiqilmoqda. Xususan, o‘z-o‘zidan siljigan Ni/n-Si Shottki strukturalaridagi yuqori energiyali (issiq) zaryad tashuvchilar fotoemissiyasiga asoslangan infraqizil fotodetektorlar [1], impedans spektroskopiyasi yordamida Ni/n-Si Shottki to‘siqlarida elektron transporti xarakteristikalarini o‘rganish [2], hamda NiSi/n-Si asosidagi, xona haroratida ishlaydigan yaqin infraqizil detektorlar [3] bo‘yicha xalqaro tadqiqotlar olib borilgan. Shuningdek, elektron-nurli cho‘ktirish jarayonida Ni/SiO_2/Si tizimidagi sirt xossalarining haroratga bog‘liqligi [4], tashqi siljish kuchlanishi ostidagi Ni-SiO_2-Si strukturalaridagi lateral fotoelektrik effekt [5], p- va n-tur MOY strukturalarining lateral fotoeffekt bo‘yicha qiyosiy tahlili [6], hamda Ni/SiO_2/Si asosidagi vodorod sensorlarining elektr xossalari [7] kabi ishlar e’lon qilingan.

Ushbu adabiyotlar tahlili shuni ko‘rsatadiki, Ni/SiO_2/n-Si MIY strukturalarining elektrofizik xossalari haqida talaygina ma’lumot to‘plangan bo‘lsa-da, ularni shakllantirishning to‘liq texnologik jarayoni, xususan, kimyoviy sirt tayyorlash, tunnel-shaffof dielektrik qatlam hosil qilish va metall qatlamlarni cho‘ktirish bosqichlari – hamda bu jarayonning har bir bosqichi natijasini mustaqil fizik-analitik usullar (ellipsometriya, SEM) bilan tasdiqlash masalasi alohida va batafsil yoritilmagan. Ushbu maqolaning maqsadi Ni/SiO_2/n-Si<P> MOY strukturalarini shakllantirishning to‘liq texnologik zanjirini tavsiflash va uning har bir bosqichini mos fizik tahlil usullari bilan asoslashdan iborat bo‘lib, bu monokristall kremniy asosidagi metall-oksid-yarimo‘tkazgich tuzilmalarining elektrofizik va impedans xarakteristikalarini keyingi bosqichda tadqiq qilish uchun ishonchli texnologik negiz yaratadi.

Tajriba metodikasi.

A) Boshlang‘ich n-Si<P> tagligini tayyorlash

Tadqiqot uchun diametri 100 mm, qalinligi 300 mkm bo‘lgan, [110] kristallografik yo‘nalishga ega n-Si<P> monokristall plastinkalaridan lazerli kesish moslamasi yordamida 0,3×5×10 mm o‘lchamli parallelepiped shaklidagi namunalar tayyorlandi. Namunalarning fosfor bilan legirlash konsentratsiyasi $1{,}12\cdot10^{13}$ dan $7{,}99\cdot10^{16}$ sm^{-3} gacha oralig‘ida bo‘lib, ularning boshlang‘ich elektrofizik parametrlari (solishtirma qarshilik ρ, harakatchanlik μ, tashuvchilar konsentratsiyasi n) Van der Pau usulida T = 300 K haroratda o‘lchandi. Natijalar 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval. n-Si<P> taglik namunalarining T = 300 K dagi elektrofizik parametrlari

№	ρ, Ω·sm	Kristallografik yo‘nalish	μ, $sm^2/(V\cdot s)$	n, sm^{-3}
1	0,0593	[110]	1319	$7{,}99\cdot10^{16}$
2	1,25	[110]	1150	$4{,}35\cdot10^{15}$
3	68,9	[110]	1185	$8{,}15\cdot10^{13}$
4	460	[110]	1236	$1{,}22\cdot10^{13}$
5	4970	[110]	1256	$1{,}12\cdot10^{13}$

B) Sirtni ko‘p bosqichli kimyoviy tozalash

Namunalar sirtini dielektrik va metall qatlamlar cho‘ktirishga tayyorlash uch bosqichli kimyoviy tozalash jarayoni orqali amalga oshirildi.

Birinchi bosqichda namunalar erituvchilar yordamida tozalandi: dastlab aseton hammomi 55 °C dan oshmagan haroratgacha qizdirilib, plastinkalar unda 10 daqiqa saqlandi, so‘ngra metanolga 2–5 daqiqaga

ko‘chirildi. Bu ikki bosqichli erituvchi ishlov berish sirtdagi moy va organik iflosliklarni, shuningdek atsetonning o‘z qoldig‘ini bartaraf etish uchun zarur bo‘ldi.

Ikkinchi bosqichda RCA-1 eritmasidan foydalanildi: deionlangan suv, 27% li ammiak gidroksidi va 30% li vodorod peroksidi 5:1:1 hajmiy nisbatda (mos ravishda 325, 65 va 65 ml) aralashtirilib, aralashma 70±5 °C gacha qizdirildi, so‘ng namunalar unda 15 daqiqa ushlab turildi. Bu bosqichda organik va zarrali ifloslanishlar oksidlanib, kremniy sirtidan ajratib olindi.

Uchinchi, yakuniy bosqichda namunalar 2% li HF eritmasida (480 ml suv + 20 ml 49% li HF) 2 daqiqa davomida botirib turildi — bu tabiiy oksid qatlamini olib tashlash maqsadida amalga oshirildi. Har bir bosqichdan so‘ng namunalar bir necha marta deionlangan suvda chayilib, jarayon nazorati sifatida sirtning gidrofoblik darajasi (namlanish sinovi) tekshirildi: suv tomchilarining sirtdan sirg‘alib tushishi – oksidsiz, toza kremniy yuzasi hosil bo‘lganligidan dalolat berdi. Yakunda namunalar quruq azot oqimida quritildi.

C) NAOS usulida SiO_2 dielektrik qatlamini shakllantirish

Tozalangan va gidrofob holatga keltirilgan kremniy yuzasida tunnel-shaffof dielektrik qatlam hosil qilish uchun azot kislotasida oksidlash (Nitric Acid Oxidation of Silicon – NAOS) usuli qo‘llanildi [8]. Ushbu usulda namunalar 120 °C gacha qizdirilgan konsentrlangan azot kislotasi (HNO_3) muhitida 20 daqiqa davomida ushlab turildi. Natijada kremniy yuzasida bir necha nanometr qalinlikdagi, tuzilishi bir jinsli SiO_2 qatlami hosil bo‘ldi.

D) Ni qatlamini magnetron changlatish usulida va Al kontaktini shakllantirish

SiO_2 qatlami hosil qilingan namunalar DXZD-400 vakuum-magnetron changlatish tizimining ishchi kamerasiga joylashtirildi, unda qoldiq bosim 10^{-5} mm sim.ust. darajasiga yetkazildi. Namunaning SiO_2 tomoniga yupqa nikel (Ni) qatlami DC magnetron changlatish usulida quyidagi rejimda cho‘ktirildi: argon gazi sarfi – 80 sccm, ishchi bosim – 4 Pa, magnetron quvvati – 100 Vt, nishon (target) kuchlanishi – 276 V, tok kuchi – 363 mA, cho‘ktirish tezligi – 0,17 Å/s. Kremniy tagligining qarama-qarshi (oksidlanmagan) tomonida esa, butun yuza emas, balki faqat omik kontakt hosil qilish uchun mo‘ljallangan kichik lokal maydoncha termik bug‘latish usulida yupqa alyuminiy (Al) qatlami bilan qoplandi. Ni qatlamining qalinligi cho‘ktirish rejimi (vaqt × tezlik) asosida nazorat qilinib, so‘ngra spektroskopik ellipsometriya usulida eksperimental tasdiqlandi (natijalar quyida, “Natijalar va muhokama” bo‘limida keltirilgan).

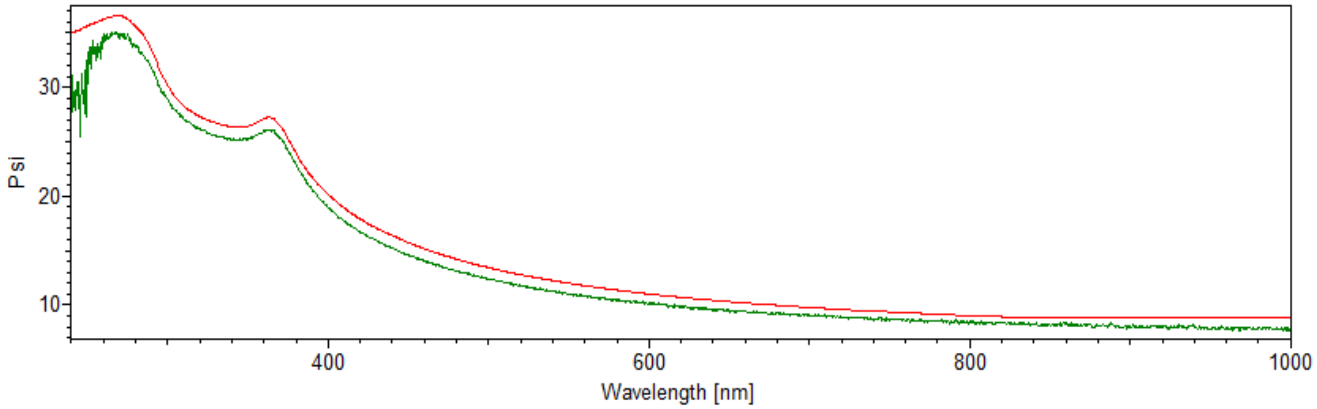
E) Omik kontaktlarni shakllantirish

Elektr o‘lchovlari uchun zarur sifatli omik kontaktlar hosil qilish maqsadida, Ni qatlami tushirilgan old yuzaga hamda orqa tomondagi Al kontakt maydonchasiga diametri taxminan 1 mm bo‘lgan ikkita simmetrik (ekvipotensial) doiraviy kontakt kumush pastasi yordamida tushirildi. Kontakt ustiga diametri ~50 mkm bo‘lgan mis sim joylashtirilib, ustidan yana kumush pastasi qo‘llanildi. Kontaktlar quruq havoda 6 soat davomida quritildi, natijada mexanik jihatdan barqaror omik kontaktlar hosil bo‘ldi.

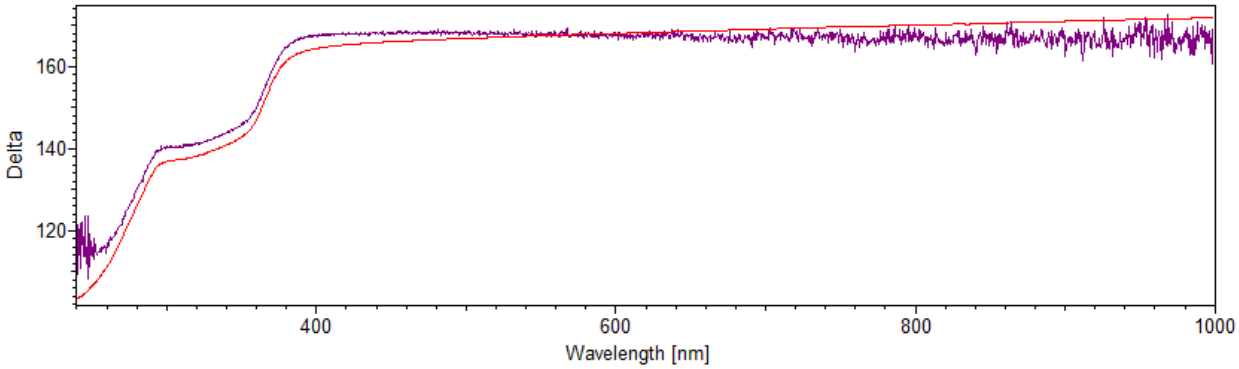
Asosiy natijalar.

1. Ellipsometrik o‘lchov natijalari

Hosil qilingan SiO_2 dielektrik qatlamining qalinligi spektroskopik ellipsometriya usulida, 632,8 nm to‘lqin uzunligida o‘lchandi. Psi (Ψ) va Delta (Δ) spektrlarining Cauchy modeli asosida moslashtirilishi (1- va 2-rasmlar) natijasida SiO_2 qatlamining qalinligi 3,74 nm deb aniqlandi (sindirish ko‘rsatkichi n = 1,4610), kremniy tagligi esa Jellison modeliga muvofiq n = 3,8661, k = 0,01579 parametrlari bilan tavsiflandi. Olingan qiymat NAOS usulida hosil bo‘ladigan tunnel-shaffof oksid qatlamlari uchun adabiyotda keltirilgan diapazonga mos keladi [8].



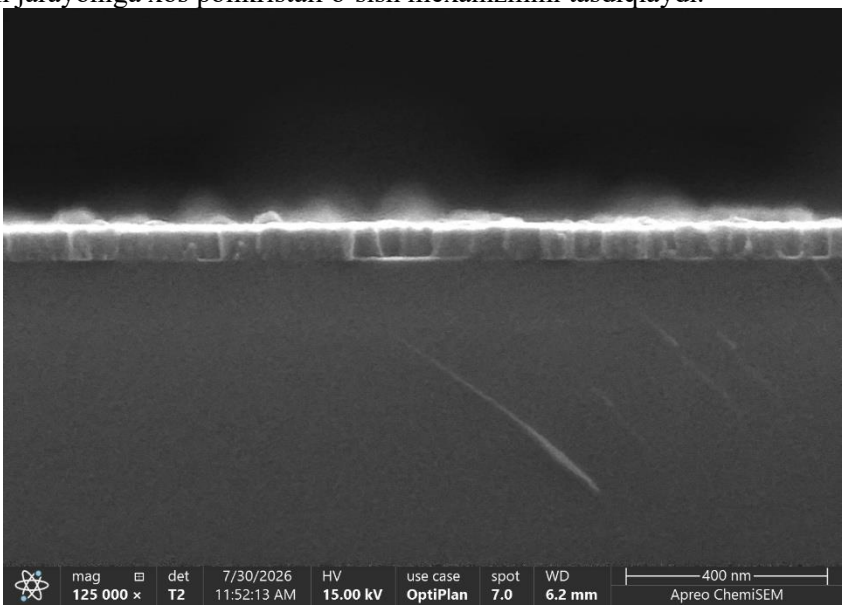
1-rasm. SiO_2/n-Si<P> namunasining ellipsometrik Psi (Ψ) spektri (qizil chiziq — Cauchy modeli, yashil chiziq – eksperimental egri chiziq)



2-rasm. Xuddi shu namunaning Delta (Δ) spektri (qizil chiziq – model, binafsha chiziq – eksperiment)

2. SEM tahlili natijalari

Shakllangan tuzilmaning qatlamli tuzilishi Thermo Fisher Scientific Apreo ChemiSEM skanerlovchi elektron mikroskopida (T2 detektori, tezlashtiruvchi kuchlanish HV = 15,00 kV, ishchi masofa WD = 6,2 mm) 125 000× kattalashtirishda olingan ko‘ndalang kesim tasviri orqali tasdiqlandi (3-rasm). Tasvirda vakuum/bo‘shliq zonasi ostida yorqin, notekis relyefli yupqa qatlam cho‘ktirilgan Ni metall plyonkasi va uning tagida bir jinsli, tekis kremniy taglik aniq farqlanadi. Ni qatlamining donador (granulyar) tuzilishi DC magnetron changlatish jarayoniga xos polikristall o‘sish mexanizmini tasdiqlaydi.



3-rasm. Ni/SiO_2/n-Si<P> strukturasining ko‘ndalang kesimi SEM tasviri (125 000×, HV = 15,00 kV, WD = 6,2 mm, Apreo ChemiSEM)

3. VAX asosida hisoblangan Shottki to‘siq parametrlari

Sintez qilingan Ni/SiO_2/n-Si<P> strukturalarining volt-amper xarakteristikalari (VAX) asosida, Cheung-Cheung usuli [9] yordamida Shottki to‘siq balandligi (φ_B), ideallik koeffitsiyenti (n) va diodning ketma-ket qarshiligi (R_K) hisoblandi [110]. Kristallografik yo‘nalishdagi besh namuna uchun olingan natijalar 2-jadvalda keltirilgan.

2-jadval. [110] yo‘nalishdagi Ni/SiO_2/n-Si<P> namunalarining VAX asosida hisoblangan asosiy parametrlari

№	ρ, Ω·sm	φ_B, eV	n	R_K, Ω
1	0,0593	0,417	9,20	29,31
2	1,25	0,409	9,53	30,37
3	68,9	0,400	8,40	26,76
4	460	0,395	4,05	12,90
5	4970	0,388	9,24	29,45

Muhokama. 2-jadvaldan ko‘rinib turibdiki, tekshirilgan barcha namunalarda ishonchli potensial to‘siq shakllangan. Taglikning solishtirma qarshiligi ortishi bilan φ_B qiymati sezilarli darajada kamayadi (0,417 eV dan 0,388 eV gacha) bu legirlash darajasining pasayishi natijasida Fermi sathining o‘tkazuvchanlik zonasi chekkasidan uzoqlashishi bilan izohlanadi. Olingan φ_B qiymatlari nikelning o‘rtacha chiqish ishi (4,76 eV) va kremniyning elektron affinligi (4,05 eV) asosida nazariy kutilgan qiymatlarga, shuningdek SiO_2/Si chegara holatlari zichligini hisobga olgan holda adabiyotda keltirilgan natijalarga [10] yaqin keladi.

Shunday qilib, ellipsometrik o‘lchovlar (SiO_2 qalinligi 3,74 nm), SEM tasviri (Ni qatlamining uzluksiz va bir jinsli shakllanganligi) hamda VAX asosidagi Shottki to‘siq tahlili (φ_B = 0,388–0,417 eV) birgalikda – tavsiflangan texnologik jarayon natijasida sifatli Ni/SiO_2/n-Si<P> MIY strukturasi shakllanganligining ishonchli, o‘zaro mustaqil fizik dalili bo‘lib xizmat qiladi.

Xulosa. Ushbu maqolada Ni/SiO_2/n-Si<P> MOY strukturalarini shakllantirishning to‘liq texnologik jarayoni – ko‘p bosqichli kimyoviy tozalash, NAOS usulida dielektrik qatlam hosil qilish va DC magnetron changlatish usulida Ni qatlamini cho‘ktirish bosqichma-bosqich tavsiflandi. Har bir texnologik bosqichning natijasi mustaqil fizik-analitik usullar bilan tasdiqlandi: SiO_2 qatlamining qalinligi spektroskopik ellipsometriya (3,74 nm) yordamida, qatlamlarning morfologik sifati SEM (125 000× kattalashtirish) yordamida, tuzilmaning yarimo‘tkazgichlik xossalari esa VAX asosida hisoblangan Shottki to‘siq balandligi (φ_B = 0,388–0,417 eV) yordamida aniqlandi. Olingan natijalar tavsiflangan texnologiyaning takrorlanuvchanligi va fizik jihatdan asoslanganligini tasdiqlaydi hamda monokristall kremniy asosidagi metall-oksid-yarimo‘tkazgich tuzilmalarining elektrofizik va impedans xarakteristikalarini tadqiq qilishga qaratilgan kelgusi ishlar uchun ishonchli texnologik negiz yaratadi.

ADABIYOTLAR:

1. D. Dudi, R. Prakash, S. Bhardwaj, K. Aïssa, B. Mitra. Ni/n–Si Schottky junction: Self-biased infrared photodetection via hot carrier photoemission. // Optik, 2024, 318, 172093. doi:10.1016/j.ijleo.2024.172093

2. G. Bhattacharya, N.V.P. Chaudhary, T. Adhikary, S. Aich, A. Venimadhav. Electron transport characteristics of FeGa, Ni/n–Si junctions by impedance spectroscopy. // Superlattices and Microstructures, 2021, 156, 106958. doi:10.1016/j.spmi.2021.106958

3. S. Roy, K. Midya, S. P. Duttagupta, D. Ramakrishnan. Nano-scale NiSi and n-type silicon based Schottky barrier diode as a near infra-red detector for room temperature operation. // Journal of Applied Physics, 2014, 116, 124507. doi:10.1063/1.4896365

4. A.A. Rakhimov, I. Kh. Khudaykulov, A.A. Ismatov, M.M. Adilov. Analysis of temperature dependent surface properties in the Ni/SiO2/Si system during electron beam deposition. // East European Journal of Physics, 2025, 3, 436–441. doi:10.26565/2312-4334-2025-3-47

5. L. Xiang, Z. Pengfei, Z. Kun, S. Pei, L. Xiong. Lateral photovoltaic effect in the Ni–SiO2–Si structure with bias. // Optoelectronics Letters, 2024, 20(5). doi:10.1007/s11801-024-3101-x

6. H. Xu, C. Mei, J. Hu, D. Zheng, Z. Gan, P. Zhou, H. Wang. Potential Superiority of p-Type Silicon-Based Metal–Oxide–Semiconductor Structures over n-Type for Lateral Photovoltaic Effects. // IEEE Electron Device Letters, 2016, 37, 1018–1021. doi:10.1109/LED.2016.2577700

7. G. Behzadi Pour. Electrical Properties of the MOS Capacitor Hydrogen Sensor Based on the Ni/SiO2/Si Structure. // Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics, 2017, 12(2), 130–135. doi:10.1166/jno.2017.1975

8. K. Imamura, S. Yokoyama, N. Hirashita, et al. Growth of ultrathin silicon oxide layers by nitric acid oxidation of silicon (NAOS) method. // Journal of Applied Physics, 2010, 107, 054503. doi:10.1063/1.3296395

9. S. K. Cheung, N. W. Cheung. Extraction of Schottky diode parameters from forward current–voltage characteristics. // Applied Physics Letters, 1986, 49(2), 85–87. doi:10.1063/1.97359

10. A. V. Sachenko, A. Ye. Belyayev, R. V. Konakova. On a New Mechanism for the Realization of Ohmic Contacts. // Semiconductors, 2018, 52, 131–135. doi:10.1134/S1063782618010190

11. E.U. Arzikulov, A.D. Nurimov, F.A. Salakhitdinov, U.A. Ashirov, T.S. Sharafova, A. Sh. Khujanov, R.M. Usanov. Lateral photoelectric effect in iron-silicon dioxide-compensated silicon hybrid structures. // East European Journal of Physics, 2023, 4, 159–166. doi:10.26565/2312-4334-2023-4-17