



UDK: 539.23:621.793.182

Asilbek QODIROV,

Tayanch doktorant, QarDU Nazariy va eksperimental fizika kafedrası

E-mail: asilbekqodirov980@gmail.com, ORCID: 0009-0005-9669-1567

Muradulla NORMURADOV,

Fizika-matematika fanlari doktori (DSc), professor

Quvondiq DOVRANOV,

Fizika-matematika fanlari falsafa doktori (PhD), dotsent v.b

Moxina JOVLIYEVA,

Magistrant, SamDU Qattiq jismlar fizikasi kafedrası

Yulduz ESHONQULOVA,

Talaba, Qarshi davlat universiteti

MAGNETRON CHANGLATISH ORQALI HOSIL QILINGAN Nb YUPQA PLYONKALARINING STRUKTURAVIY VA KOMPOZITSION XUSUSIYATLARI

Annotsatsiya

Niobiy yupqa plyonkalari turli taglik harorat sharoitlarida DC va RF magnetronli purkash yordamida Si tagliklariga yotqizildi. Plyonkalarining morfologik va kompozitsion xususiyatlari atom kuch mikroskopiyasi (AFM) hamda to'lqin uzunligi dispersiyali rentgen floresans spektroskopiyasi (WDXRF) yordamida o'rganildi. AFM natijalari shuni ko'rsatdiki, taglikning qizdirilishi kristallitlarning birlashishiga va sirt g'adir-budirligining oshishiga olib keladi. WDXRF tahlili dominant Nb *K α* emissiya cho'qqisiga ega bo'lgan changlatib o'stirilgan Nb qatlamlarining yuqori sofligini tasdiqladi. Olingan natijalar shuni ko'rsatadiki, cho'ktirish rejimi va taglik harorati Nb yupqa plyonkalarining mikrotuzilishi va sirt morfologiyasini boshqarishda hal qiluvchi rol o'ynaydi, bu esa ularning nanoelektronika va o'ta o'tkazuvchan qurilmalarda qo'llanilishi uchun muhimdir.

Kalit so'zlar: Niobiy yupqa plyonkalari, magnetronli chayqalish, sirt morfologiyasi, Rentgen difraksiyasi, yupqa plyonka mikrotuzilmasi, nanotuzilmali materiallar.

STRUCTURAL AND COMPOSITION PROPERTIES OF Nb THIN FILMS PRODUCED BY MAGNETRON SPRAYING

Annotation

Niobium thin films were deposited on Si substrates using DC and RF magnetron sputtering at different substrate temperatures. The morphological and compositional properties of the films were studied using atomic force microscopy (AFM) and wavelength-dispersive *X-ray* fluorescence spectroscopy (WDXRF). AFM results showed that heating the substrate led to the coalescence of crystallites and an increase in surface roughness. WDXRF analysis confirmed the high purity of the sputter-grown Nb layers with a dominant Nb *K α* emission peak. The obtained results indicate that the deposition mode and substrate temperature play a crucial role in controlling the microstructure and surface morphology of Nb thin films, which is important for their applications in nanoelectronics and superconducting devices.

Keywords: Niobium thin films, magnetron sputtering, surface morphology, *X-ray* diffraction, thin film microstructure, nanostructured materials.

СТРУКТУРНЫЕ И СОСТАВНЫЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК Nb, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Аннотация

Тонкие пленки ниобия были осаждены на кремниевые подложки с использованием магнетронного распыления постоянного и высокого напряжения при различных температурах подложки. Морфологические и композиционные свойства пленок изучались с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ) и рентгенофлуоресцентной спектроскопии с дисперсией по длинам волн (РДФС). Результаты АСМ показали, что нагрев подложки приводит к коалесценции кристаллитов и увеличению шероховатости поверхности. Анализ РДФС подтвердил высокую чистоту выращенных методом распыления слоев ниобия с доминирующим пиком излучения Nb *K α* . Полученные результаты указывают на то, что способ осаждения и температура подложки играют решающую роль в контроле микроструктуры и морфологии поверхности тонких пленок ниобия, что важно для их применения в нанoeлектронике и сверхпроводящих устройствах.

Ключевые слова: тонкие пленки ниобия, магнетронное распыление, морфология поверхности, рентгеновская дифракция, микроструктура тонких пленок, наноструктурированные материалы.

Kirish. Yupqa plyonkali materiallar zamonaviy materialshunoslik va qurilma texnologiyasidagi eng muhim tadqiqot yo'nalishlaridan birini ifodalaydi. Bunday materiallar mikroelektronika, optoelektronika, sensor texnologiyalari va energiya bilan bog'liq qo'llanmalarda keng qo'llaniladi. Ularning funksional xususiyatlari asosan ularning strukturaviy holati, fazaviy tarkibi va ishlab chiqarish texnologiyasi bilan belgilanadi [1–3]. Xususan, metall yupqa plyonkalar va ularning termik ishlov berilgan hosilalari yuqori texnologik moslashuvchanlik va keng potensial qo'llanilish doirasi bilan ajralib turadi. Avvalgi tadqiqotlarga ko'ra, Nb yupqa plyonkalari magnetron purkash [4–6], atom qatlamini cho'ktirish [7] va elektron nurlarini bug'lantirish [8] kabi

turli xil cho'ktirish texnikalari yordamida tayyorlanishi mumkin. Tadqiqotlarda Nb plyonkalari qizdirilgan tagliklarga changlatilgan ammo, changlatish sharoitlari va keyingi yuqori haroratli qizdirish jarayonlari o'rtasidagi bog'liqlik yetarlicha o'rganilmagan. Ushbu tadqiqotda Nb yupqa plyonkalari nafaqat xona haroratida, hamda 400 °C gacha qizdirilgan tagliklarga magnetron purkash orqali changlatib o'stirilgan. Changlatib o'stirilgan plyonkalar keyinchalik 400 °C da tavlangan va termik ishlov berishning plyonka tuzilishiga, sirt/interfeys xususiyatlariga va fazaviy o'zgarishlarga ta'siri o'rganilgan. Ushbu ishning asosiy yangiligi changlatib o'stirish paytida taglik haroratining Nb yupqa plyonkalarining shakllanishi va dinamikasiga ta'sirini birgalikda tahlil qilishdan iborat. Olingan natijalar niobiy asosidagi yupqa plyonkalarni boshqariladigan ishlab chiqarish va ularning ilg'or elektron qurilmalarda qo'llanilishi uchun muhim ilmiy asos yaratadi.

2.1 Tagliklarni tayyorlash va plyonkani cho'ktirish. Nb yupqa plyonkalari monokristalli kremniy tagliklariga (p-turdagi Si (100)) magnetronli purkash tizimi (EPOS PVD Desk Pro, Rossiya-Germaniya) yordamida cho'ktirildi. Cho'ktirishdan oldin Si tagliklari izopropil spirti yordamida ultratovushli vannada tozalandi va keyin quritildi [9, 10]. Purkash uchun 99,95% tozalik va 76,2 mm diametrli niobiy misheni ishlatilgan. Cho'ktirishdan oldin vakuum kamerasida 5×10^{-6} Torr asos bosimiga qadar vakuum hosil qilindi. Purkash jarayonida ishchi gaz sifatida yuqori tozalikdagi argon gazi (99,999%) ishlatilgan.

2.2 Cho'ktirish parametrlari. Nb yupqa plyonkalari xona haroratida va 400 °C gacha qizdirilgan tagliklarga cho'ktirildi. Cho'ktirish paytida massa oqimini boshqaruvchi yordamida argon gazining oqim tezligi 60 sccm da saqlandi. Ish bosimi $2,5 \times 10^{-3}$ Torr da saqlandi va mishen bilan taglik orasidagi masofa taxminan 100 mm edi. Plyonkalar doimiy va RF magnetronli purkash rejimlari yordamida yotqizildi. Doimiy tok quvvat manbai 0,15 A doimiy tokda ishladi, RF purkash uchun esa RF quvvat manbai ishlatildi. Cho'ktirish tezligi doimiy tok rejimida taxminan 7 Å/s va RF rejimida 8 Å/s ni tashkil etdi.

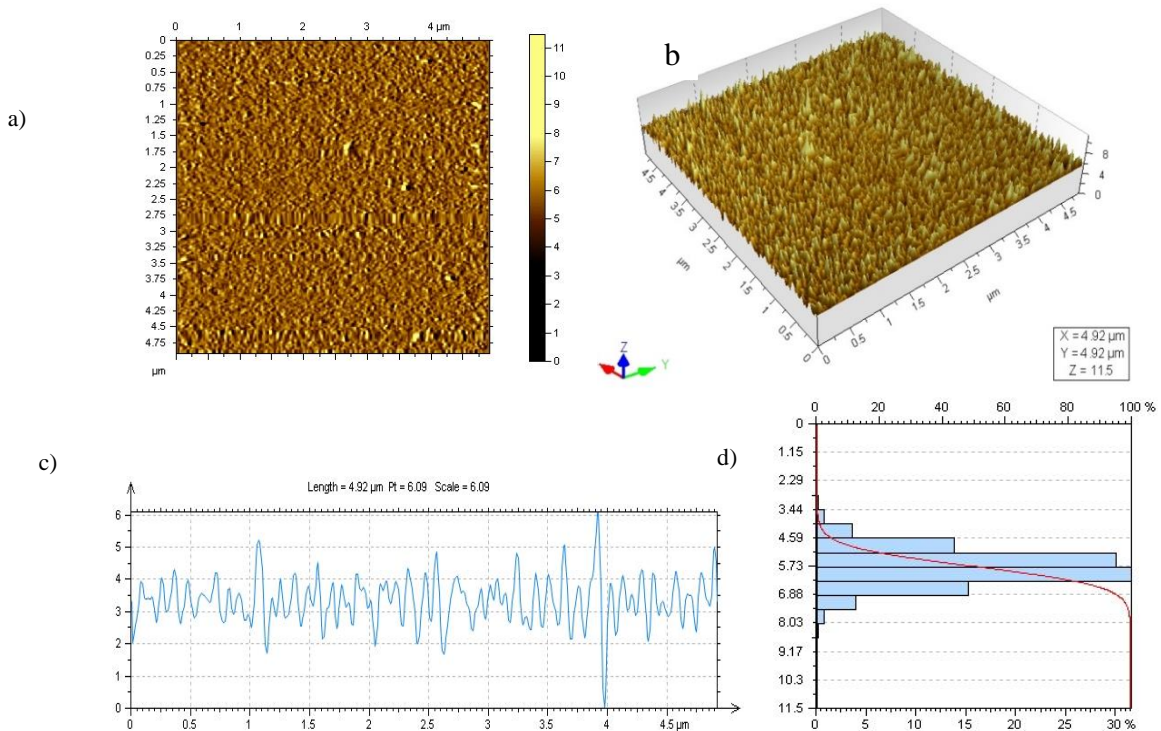
2.3 Xarakteristika texnikasi

Nb yupqa plyonkalarining sirt topografiyasi va g'adir-budirliги uch o'lchovli skanerlash rejimida ishlaydigan atom kuch mikroskopi (Agilent Technologies AFM 5500) yordamida tekshirildi. O'lchovlar o'rtacha sirt g'adir-budirliги (Ra) va o'rtacha kvadrat sirt notekisliги (RMS) qiymatlarini aniqlash uchun ishlatilgan. Nb yupqa plyonkalarining element tarkibi va stexiometriyasi Rigaku Supermini 200 spektrometri (Yaponiya) yordamida to'lqin uzunliги dispersiyali rentgen floresans spektroskopiyasi (WDXRF) yordamida tahlil qilindi.

3. Natijalar va muhokama

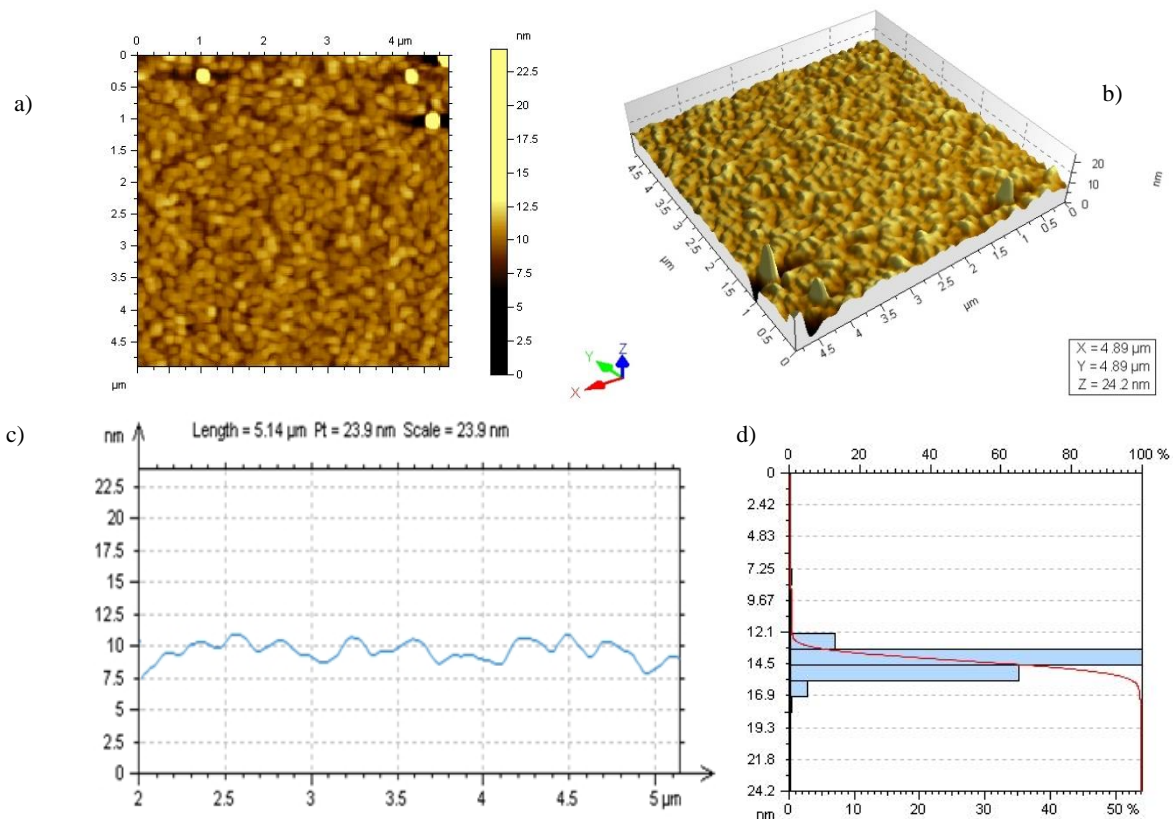
3.1 Sirt morfologiyasining AFM tahlili. Si tagliklariga changlatib o'stirilgan Nb yupqa plyonkalarining sirt morfologiyasi 1 va 2-rasmlarda ko'rsatilganidek, atom kuch mikroskopiyasi (AFM) yordamida o'rganildi.

Qizdirilmagan taglikga changlatib o'stirilgan Nb yupqa plyonkasining AFM 2D tasviri nisbatan bir xil va mayda donador sirt morfologiyasini ko'rsatadi (1a-rasm).



1-rasm. a) Xona haroratida Si tagligiga changlatib o'stirilgan Nb yupqa plyonkasining AFM 3D va 2D sirt topografiyasi. b) Xona haroratida hosil qilingan Nb yupqa plyonkasining AFM chiziqli profili. c) Xona haroratida hosil qilingan Nb yupqa plyonkasining balandlik taqsimoti gistogrammasi.

Nisbatan past rang kontrasti sirt bo'ylab kichik balandlik o'zgarishlarini ko'rsatadi. Hech qanday o'tkir cho'qqilar yoki chuqur botiqliklar kuzatilmadi, bu esa uzluksiz va silliq yupqa plyonka hosil bo'lishini tasdiqlaydi. Bu hatti-harakatni past taglik haroratida Nb atomlarining cheklangan sirt tarqalishi bilan izohlash mumkin. Bunday sharoitda atomlar energetik jihatdan qulay pozitsiyalarni egallaydi, natijada kichik va zich joylashgan kristall strukturalarning hosil bo'lishi kuzatiladi. Bu natija shuni ko'rsatadiki, Nb atomlari cheklangan sirt diffuziyasini boshdan kechiradi va mayda kristallitli va nisbatan bir xil plyonka tuzilishini hosil qiladi. 1c-rasmda ko'rsatilgan balandlik taqsimoti gistogrammasi sirt balandliklarining tor taqsimotini ko'rsatadi, bu past sirt g'adir-budirliги va mayda kristallitli morfologiyaga mos keladi.



2-rasm. a) Qizdirilgan Si tagligiga changlatib o'stirilgan Nb yupqa plyonkasining AFM 3D va 2D sirt topografiyasi. b) 400 °C da qizdirilgan Nb yupqa plyonkasining AFM chiziqli profili. c) 400 °C da qizdirilgan Nb yupqa plyonkasining balandlik taqsimoti gistogrammasi.

Aksincha, qizdirilgan taglikga cho'ktirilgan Nb yupqa plyonkasining AFM 2D tasviri (2a-rasm) xona haroratida cho'ktirilgan plyonkaga nisbatan ancha yuqori rang kontrastini ko'rsatadi.

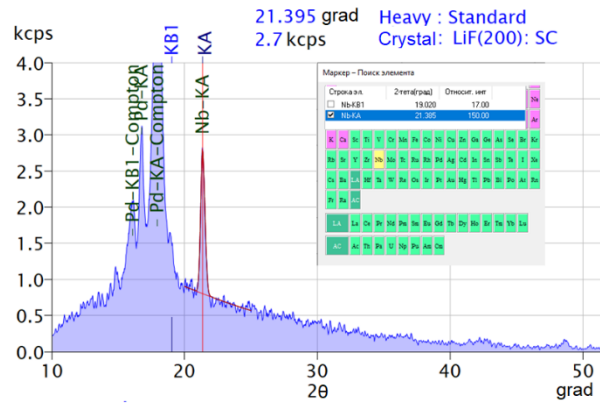
Bu sirt balandliklarining kengroq taqsimlanishini ko'rsatadi. Sirtida kattaroq kristallitlar va aniqroq kristall chegaralari kuzatilishi mumkin. Bu o'zgarishlar taglikning yuqori haroratida Nb atomlarining sirt diffuziyasining kuchayishi bilan bog'liq bo'lib, bu kristallitlar birlashishini va plyonkaning strukturaviy qayta tashkil topishga olib keladi. Qizdirilgan Nb plyonkasining AFM 3D tasviri yuqori amplituda xususiyatlari va kattaroq sirt bo'rtmalari (cho'qqilar) hosil bo'lishi bilan aniqroq sirt relyefini ochib beradi. Balandlikning oshishi sirt g'adir-budirligining sezilarli darajada kamayganligini ko'rsatadi.

2b-rasmida ko'rsatilgan qizdirilgan namunalarning balandlik profillari xona haroratidagi namunalarga nisbatan ancha kengroq amplituda taqsimotini ko'rsatadi. Kengroq taqsimot va gistogrammaning yuqori qiymatlarga siljishi RMS (Rq) sirt g'adir-budirligining sezilarli darajada oshganligini ko'rsatadi. Bu taglikning isishi Nb yupqa plyonkalarining sirt g'adir-budirligining ortishida muhim rol o'ynashini tasdiqlaydi. Kuzatilgan morfologik o'zgarishlarni Nb atomlarining sirt harakatchanligining kuchayishi bilan bog'lash mumkin, bu esa kristallitlarning birlashishiga va plyonkaning strukturaviy qayta tashkil etilishiga olib keladi. Qizdirilmagan va qizdirilgan tagliklarga qo'yilgan plyonkalarining AFM profillari va balandlik taqsimotlarini taqqoslash taglik haroratining sirt morfologiyasiga ta'sirini aniq ko'rsatadi.

Miqdoriy AFM tahlili shuni aniq ko'rsatadiki, Nb yupqa plyonkalarining sirt g'adir - budirligi taglik harorati oshishi bilan ortadi. Aksincha, qizdirilgan tagliklarga qo'yilgan plyonkalar taxminan ikki baravar yuqori Z-diapazonini va sezilarli darajada katta g'adir-budirlilik parametrlarini ko'rsatadi. Sirt g'adir-budirligining bu oshishini termal faollashtirilgan adatom diffuziyasi va plyonka o'sishi paytida keyingi kristallitlarning birlashishi bilan bog'lash mumkin. AFM natijalari WDXRF kuzatuvlari bilan mos keladi va taglik harorati Nb yupqa plyonkalarining sirt morfologiyasini boshqaruvchi asosiy parametrlardan biri ekanligini tasdiqlaydi.

3.3. WDXRF Tarkibiy tahlili. Nb yupqa plyonkalarining elementar tarkibi to'liq uzunligi dispersiyali rentgen floresans (WDXRF) spektroskopiyasi yordamida qo'shimcha o'rganildi. Olingan spektr niobiya mos keladigan aniq xarakterli emissiya chizig'ini namoyish etadi, bu esa Nb ning taglikda muvaffaqiyatli cho'kishini tasdiqlaydi. Spekrda kuzatilgan eng intensiv cho'qqi niobiy atomlarining L va K qobiqlari orasidagi elektron o'tishlardan kelib chiqadigan Nb K α xarakterli chizig'iga mos keladi. Bu cho'qqining yuqori intensivligi niobiy cho'ktirilgan yupqa plyonkada dominant element ekanligini ko'rsatadi. Nb cho'qqisidan tashqari, Pd K α va Pd K β chiziqclariga mos keladigan bir nechta zaif cho'qqilar ham aniqlangan.

Bu cho'qqilar, namunaning o'zidan emas, balki WDXRF o'lchovi paytida ishlatiladigan instrumental komponentlardan yoki mos yozuvlar standartlaridan kelib chiqadi. Ularning Nb cho'qqisiga nisbatan nisbatan past intensivligi cho'ktirilgan qatlam asosan niobiyan iborat ekanligini tasdiqlaydi.



3-rasm. Magnetron chanlatish orqali hosil qilingan Nb yupqa plyonkasining WDXRF spektri xarakterli Nb $K\alpha$ emissiya chizig'ini ko'rsatadi, bu plyonkada niobiyning mavjudligi va yuqori sofligini tasdiqlaydi.

O'lchovlar o'rta va og'ir elementlar uchun yuqori spektral aniqlikni ta'minlaydigan LiF(200) tahlil kristalli yordamida amalga oshirildi (3-rasm). Nb $K\alpha$ liniyasi uchun taxminan 2,7 kcps qayd etilgan intensivlik kuchli lyuminescent javobni ko'rsatadi, bu esa yetarlicha qalin va bir hil Nb qatlamining hosil bo'lishini tasdiqlaydi. WDXRF natijalari yuqori elementar soflikka ega Nb yupqa plyonkalarining muvaffaqiyatli shakllanishini tasdiqlaydi. Nb emissiya chizig'ining ustunligi va sezilarli nopoklik cho'qqilarining yo'qligi magnetron purkash keyingi strukturaviy va fizik tadqiqotlar uchun mos bo'lgan yuqori sifatli Nb qoplamalarini cho'ktirish uchun ishonchli usulni taqdim etishini ko'rsatadi. Natijalar shuni ko'rsatadiki, cho'ktirish rejimi Nb yupqa plyonkalarining strukturaviy xususiyatlariga kuchli ta'sir qiladi. RF rejim ilg'or elektron va o'ta o'tkazuvchan materiallar uchun mos keladigan yuqori sifatli Nb yupqa plyonkalarini olish uchun qulayroq sharoitlarni yaratadi.

Xulosa. Ushbu ishda Nb yupqa plyonkalari Si tagliklariga DC va RF magnetron purkash yordamida muvaffaqiyatli o'stirildi. Plyonkalarining morfologik va kompozitsion xususiyatlari tizimli ravishda o'rganildi. AFM natijalari shuni ko'rsatadiki, taglik haroratining oshishi adatom harakatchanligi va kristallitlarning birlashishi tufayli sirt g'adir-budirligini sezilarli darajada oshiradi. WDXRF tahlili cho'ktirilgan Nb plyonkalarining yuqori sofligini tasdiqladi. Umuman olganda, natijalar shuni ko'rsatadiki, cho'ktirish rejimi va taglik harorati Nb yupqa plyonkalarining mikro tuzilishi va sirt morfologiyasiga kuchli ta'sir qiladi, bu ularni nanoelektron va o'ta o'tkazuvchan qurilmalarda qo'llash uchun muhimdir.

ADABIYOTLAR

- Kim S., In J.-H., Kim S.H., Han K., Lim D., Hwang Y.S., Lee K.M., Choi J.H. Study of high transmittance of $\text{SiO}_2/\text{Nb}_2\text{O}_5$ multilayer thin films deposited by plasma-assisted reactive magnetron sputtering. *Applied Sciences*, 2023, 13(24), 13271. <https://doi.org/10.3390/app132413271>
- Dovranov K.T., Abrayeva S.T., Yorqulov R.M., Mustafoeva N.M., Buzrukov T.O., Jurayeva Sh.A., Aminov A.A. Formation and morphology of Cu nanofilms using DC and RF modes of a magnetron sputtering device. *Ukrainian Journal of Physics*, 2026, 71(1), 65. <https://doi.org/10.15407/ujpe71.1.65>
- Wu G., Valente A.M., Phillips H.L., Wang H., Wu A.T., Renk T.J., Provencio P. Studies of niobium thin film produced by energetic vacuum deposition. *Thin Solid Films*, 2005, 489(1–2), 56–62. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.04.099>
- Usha N., Sivakumar R., Sanjeeviraja C. Characterization of RF magnetron sputtered niobium pentoxide thin films. *AIP Conference Proceedings*, 2014, 1620, 339-343. <https://doi.org/10.1063/1.4898262>
- Dovranov K.T., Normuradov M.T., Davranov Kh.T., Bekpulatov I.R. Formation of $\text{Mn}_4\text{Si}_7/\text{Si}(111)$, $\text{CrSi}_2/\text{Si}(111)$, and $\text{CoSi}_2/\text{Si}(111)$ thin films and evaluation of their optically direct and indirect band gaps. *Ukrainian Journal of Physics*, 2024, 69(1), 20–25. <https://doi.org/10.1080/14328917.2024.2339001>
- Wang L., Zhong Y., Li J., Cao W., Zhong Q., Xueshen W., Li X. Effect of residual gas on structural, electrical and mechanical properties of niobium films deposited by magnetron sputtering. *Materials Research Express*, 2018. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aab8c1>
- Tan W., et al. Superiority of high power impulse magnetron sputtering in niobium films deposition on copper. *Materials Research Express*, 2018. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aaeeef>
- Cuomo J.J., Harper J.M.E., Guarnieri C.R., Yee D.S., Attanasio L.J., Angilello J., Wu C.T., Hammond R.H. Modification of niobium film stress by low-energy ion bombardment during deposition. *Journal of Vacuum Science & Technology*, 1982, 20, 349. <https://doi.org/10.1116/1.571462>
- Dovranov K.T., Abrayeva S.T., Yorqulov R.M., Mustafoeva N.M., Buzrukov T.O., Jurayeva Sh.A., Aminov A.A. Formation and morphology of Cu nanofilms using DC and RF modes of a magnetron sputtering device. *Ukrainian Journal of Physics*, 2026, 71(1), 65. <https://doi.org/10.15407/ujpe71.1.65>
- Dovranov K., Normuradov M., Davranov X., Husanov A., Shodiyev G., Ruziyeva G.T., Karimov E., Yorqulov R. Formation of $\text{Cu}_{15}\text{Si}_4/\text{Si}$ nanophase films on silicon surfaces. *East European Journal of Physics*, 2026, 1, 326. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2026-1-38>