UO‘K 539.23:621.793.18

NIKEL OKSIDI (NiO) YUPQA QATLAMLARINI VAKUUMDA TERMAL YOTQIZISH USULIDA SINTEZ QILISH

Kabulov Rustam Rashidovich,
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi
Fizika-Texnika instituti katta ilmiy xodimi, f-m. f.n.
Xojabayev Bolat Kaldibayevich,
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi
Fizika-Texnika instituti stajyor tadqiqotchisi
xojabaevbolat@gmail.com

Annotatsiya. *Ushbu maqola vakuumli termal bug‘lanish usuli yordamida nikel oksidi yupqa qatlamlarini olish texnologiyasiga bag‘ishlangan. Jarayonning fizik asoslari, vakuum sharoitining roli, hamda yupqa qatlamning hosil bo‘lish mexanizmi tahlil qilindi. Nikel oksidi yupqa qatlamlari yuqori kimyoviy barqarorligi, optik shaffofligi va yarim o‘tkazgichli xususiyatlari sababli zamonaviy elektronika, gaz sensorlari va fotoelektr qurilmalarida keng ko‘lamda qo‘llanilib kelinmoqda. Vakuumli termal bug‘lanish usulining texnologik jarayonlari yuqori tozalik shart-sharoitlarini ta’minlanganligi sababli, bu usul yordamida yuqori sifatli, bir jinsli va zarur bo‘lgan qalinlikdagi Nikel oksidi yupqa qatlamlarini olish imkoniyati mavjud.*

Kalit so‘zlar: *nikel(II) oksidi, vakuumli bug‘lanish, yupqa qatlam, fizik bug‘lantirish, yarim o‘tkazgich materiallar, nanoqoplamalar, optik shaffoflik.*

СИНТЕЗ ТОНКИХ ПЛЁНОК ОКСИДА НИКЕЛЯ (NiO) МЕТОДОМ ВАКУУМНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ

Аннотация. *Данная статья посвящена технологии получения тонких плёнок оксида никеля методом вакуумного термического испарения. Проанализированы физические основы процесса, роль вакуумных условий, а также механизм формирования тонкой плёнки. Тонкие плёнки оксида никеля благодаря своей высокой химической стабильности, оптической прозрачности и полупроводниковым свойствам широко применяются в современной электронике, газовых сенсорах и фотоэлектрических устройствах. Поскольку технологические процессы вакуумного термического испарения обеспечивают условия высокой чистоты, данный метод позволяет получать высококачественные, однородные тонкие плёнки оксида никеля требуемой толщины.*

Ключевые слова: *оксид никеля(II), вакуумное испарение, тонкая плёнка, физическое осаждение, полупроводниковые материалы, нанопокрытия, оптическая прозрачность.*

SYNTHESIS OF NICKEL OXIDE (NiO) THIN FILMS BY VACUUM THERMAL EVAPORATION

Abstract. *This article is devoted to the technology of obtaining nickel oxide thin films by vacuum thermal evaporation. The physical foundations of the process, the role of vacuum conditions, and the mechanism of thin film formation were analyzed. Due to their high chemical stability, optical transparency, and semiconductor properties, nickel oxide thin films are widely used in modern electronics, gas sensors, and photoelectric devices. Since the technological processes of vacuum thermal evaporation ensure high purity conditions, this method makes it possible to obtain high-quality, homogeneous nickel oxide thin films of the required thickness.*

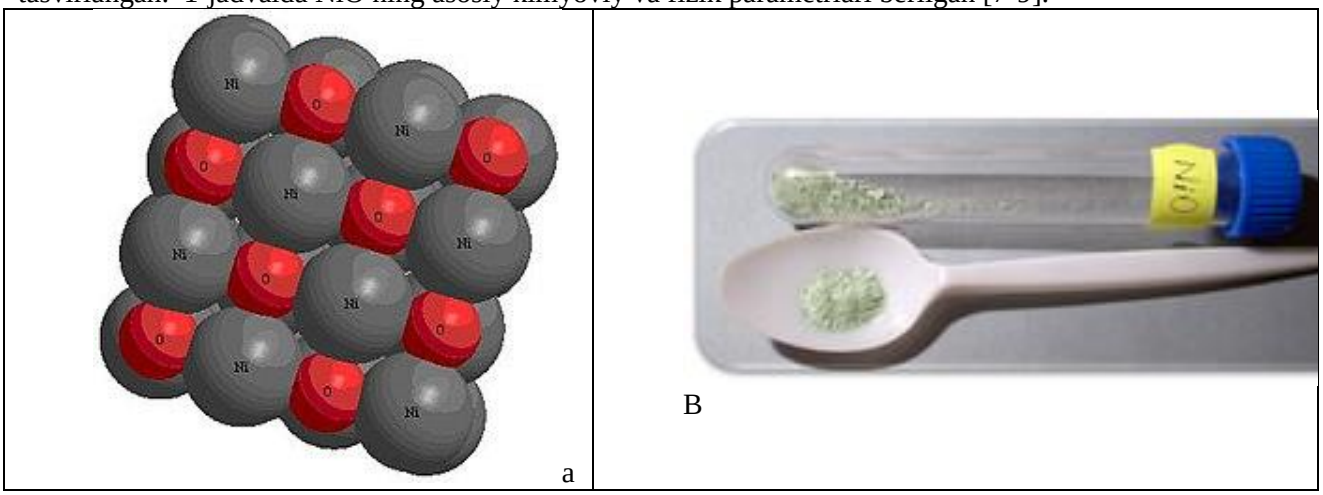
Keywords: *nickel(II) oxide, vacuum evaporation, thin film, physical vapor deposition, semiconductor materials, nanocoatings, optical transparency.*

Kirish. So‘nggi yillarda nanoo‘lchamli materiallar va yupqa qatlamli yarimo‘tkazgichlar texnologiyasi materialshunoslik va mikroelektronika sohalarida muhim ilmiy yo‘nalishlardan biriga aylandi. Bunday materiallar orasida Nikel oksidi (NiO) o‘zining noyob fizik-kimyoviy xususiyatlari bilan ajralib turadi [1,2]. NiO keng ta’qiqlangan energetik sohaga (E_g) ega bo‘lgan kovakli (p - tip) o‘tkazuvchanli yarimo‘tkazgich bo‘lib, uning E_g si 3.6 – 4.0 eV oralig‘ida bo‘ladi [3-6].

Nikel oksidi Ni va O atomlaridan tashkil topgan kimyoviy birikma. U nikel metalining asosiy oksidi hisoblanadi. Nikel(II) oksidi (NiO) — nikelning kislorod bilan hosil qilgan asosiy birikmalaridan biri bo‘lib, kimyoviy jihatdan barqaror noorganik moddadir.

Tashqi ko‘rinishi: Olinish sharoitiga qarab rangi o‘zgaradi. Past haroratlarda olingan stehiometrik toza NiO och yashil rangda bo‘ladi. Yuqori haroratda yoki kislorod ortiqchaligida olingan (noktastik) turlari esa qora yoki qora-kulrang kukun ko‘rinishida bo‘ladi.

Har yili bir necha million kilogramm turli xil, asosan nikel qotishmalarini ishlab chiqarishda NiO oraliq mahsulot sifatida sintez qilinadi. Rasm-1 da NiO ning molekullyar tuzilishi va tashqi ko‘rinishi tasvirlangan. 1-jadvalda NiO ning asosiy kimyoviy va fizik parametrlari berilgan [7-9].



1-rasm. NiO ning molekulyar tuzilishi (a) va tashqi ko‘rinishi (b).

1–jadval.

NiO ning asosiy fizik parametrlari [7-9]

№	Kimyoviy formula	NiO
1	Molyar massa	74.6928 g/mol
2	Tashqi ko‘rinishi	yashil kristalli qattiq modda
3	Zichligi	6.67 g/sm^3
4	Erish Temperaturasi	1 955 °C; 2 228 K
5	Magnit sezgirlik (χ)	$+660.0\cdot10^{-6}$ sm^3/mol
6	Sindirish ko‘rsatkichi (n_D)	2.1818

NiO ning yuqori termik barqarorligi, kimyoviy inertligi va yaxshi elktro va optik xususiyatlari uni zamonaviy asbobsozlikning turli sohalarida, jumladan:

- gaz sensorlarida;
- fotovoltaik ernegetika qurilmalarida;
- elektrokimyoviy energiya saqlash tizimlarida;
- optoelektronikaning turli sohalarida istiqbolli material sifatida ishlatilib kelinmoqda.

NiO yupqa qatlamlarini olish uchun turli texnologiyalar mavjud bo‘lib, ular qatoriga sol–gel sintezi, kimyoviy cho‘ktirish, magnetronli shanglatish usuli, hamda fizik bug‘lantirish usullari kiradi. Ushbu usullar orasida vakuumli termal bug‘lanish usuli yuqori toza va bir tekis strukturalarga ega qatlamlar olish imkoniyati bilan alohida ahamiyatga ega.

Vakuumli termal bug‘lanish usulining fizik asoslari

Vakuumli termal bug‘lanish usuli fizik bug‘lantirish (PVD – Physical Vapor Deposition) texnologiyalari qatoriga kiradi. Ushbu usulning asosiy mohiyati moddani yuqori harorat ta’sirida bug‘lantirish va hosil bo‘lgan bug‘ zarrachalarini taglik yuzasida kondensatsiyalanishiga asoslanadi. Jarayon vakuum muhitida olib boriladi va uning asosiy vazifalari quyidagilardan iborat [8-9]:

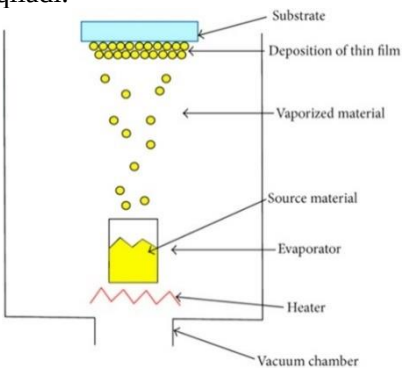
- bug‘ zarrachalarining erkin harakatini ta’minlash;
- vakuumda qoldiq gaz molekulalari bilan to‘qnashuv ehtimolini kamaytirish;
- hosil bo‘ladigan qatlamlarning yuqori tozaligini ta’minlash.

Odatda jarayon 10^{-5} – 10^{-6} Torr bosimda amalga oshiriladi.

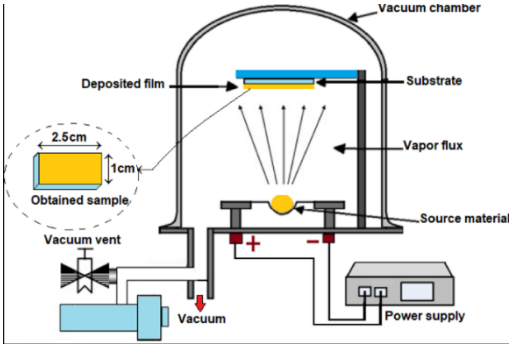
Rasm -2 da vakuumli termal bug‘lanish qurilmalarining ishlash prinsipi (a) va ikki xil vertikal turdagi (b va c) qurilmalar ko‘rinishi berilgan. Bu qurilmalarda yupqa qatlamlarni olish jarayon quyidagicha amalga oshadi:

1. Manba materiali (NiO kukuni) qizdiriladi.

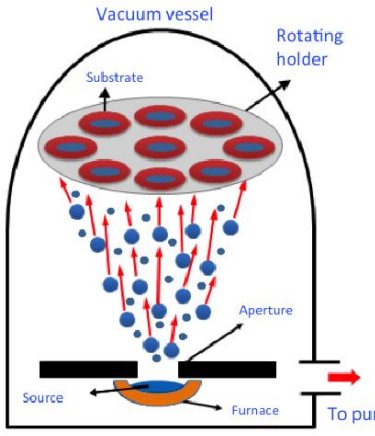
2. Material bug‘ holatiga o‘tqaziladi.
3. Bug‘ vakuum muhitida yuqoriga harakatlanadi.
4. Bug‘ manbaiga nisbatan yuqorida joylashgan va temperaturasi past bo‘lgan taglik yuzasida bug‘ kondensatsiyalanib yupqa qatlam hosil qiladi.



a



b



c

2-rasm. Vakuumli termal bug‘lanish qurilmalarining ishlash prinsipi (a) va ikki xil vertikal turdagi (b va c) qurilmalar

Materiallarni bug‘lantirish uchun maxsus qizdirgichlar — rezistiv qizdirgichlar yoki elektron nur manbalarini qo‘llash mumkin. Elektron nur manbalari yordamida juda yuqori erish temperaturali materiallarni ham bug‘lantirish mumkin.

NiO qatlamlarining hosil bo‘lish mexanizmi

Vakuumli bug‘lanish jarayonida manba materiali sifatida nikel metali yoki NiO kukuni ishlatiladi. Agar nikel metali bug‘lantirilsa, jarayon davomida vakuum kameraga kislorod kiritilib reaktiv bug‘lanish jarayoni amalga oshiriladi. Bu jarayon quyidagi kimyoviy reaksiya orqali ifodalanadi:

$$2Ni+O_2 \rightarrow 2NiO$$

Bu reaksiyaning amalga oshishi uchun kameradagi qisman kislorod bosimi (P_{O2}) va bug‘lantirish tezligi o‘rtasida optimal muvozanat bo‘lishi shart. Aks holda, qatlam to‘liq oksidlanmasdan metall faza saqlanib qolishi yoki aksincha, stexiometriya buzilishi mumkin.

Zarrachalarning vakuumda ko‘chishi:

Bug‘langan va reaktiv sintezlangan NiO molekulyar oqimi vakuum kamerasi bo‘ylab harakatlanadi. Erkin yugurish uzunligi vakuum darajasi yetarlicha yuqori bo‘lgani sababli (10^{-3} – 10^{-5}) Torr yoki undan yuqori), zarrachalarning qoldiq gaz molekulalari bilan to‘qnashuvi minimal darajada bo‘ladi. Bu esa NiO zarralarining o‘z energiyasini yo‘qotmasdan taglik yuzasiga to‘g‘ridan-to‘g‘ri yetib kelishini ta’minlaydi.

Taglik yuzasiga yetib kelgan NiO molekulalari yoki atomlar klasterlari darhol qotib qolmaydi, balki quyidagi kinetik bosqichlarni bosib o‘tadi:

Fizikaviy va kimyoviy adsorbsiya: Dastlab zarralar taglik yuzasiga zaf Van-Der-Vaals kuchlari orqali yopishadi. Keyinchalik sirt energiyasi va taglik harorati ta’sirida elektron almashinuvi yuzaga kelib, kuchli kimyoviy bog‘lanishga o‘tadi.

Sirtiy diffuziya: Adsorbsiyalangan zarrachalar taglik yuzasi bo‘ylab tartibsiz sakrab yurgandek harakat qiladi. Ular sirtning energetik jihatdan qulay nuqtalarini (kristall panjaradagi nuqsonlar, zinapoyasimon qirralar) qidirib topadi va shu yerda to‘planadi.

Yadrolanish va o‘sish mexanizmlari: Sirt bo‘ylab harakatlanayotgan zarralar o‘zaro to‘qnashib, ma’lum bir kritik o‘lchamga yetganda barqaror klasterlar — yadrolarni hosil qiladi. NiO qatlamining o‘sishi asosan quyidagi mexanizmlar bo‘yicha kechadi:

Volmer-Weber mexanizmi: NiO va ko‘pchilik tagliklar (masalan, shisha, kremniy yoki metallar) orasidagi sirt tarangligi farqi tufayli, dastlab alohida orolchalar shakllanadi. Vaqt o‘tishi bilan bu orolchalar kengayib, bir-biri bilan tutashadi va uzluksiz yupqa qatlam hosil qiladi.

Hosil bo‘lgan NiO bug‘lari taglik yuzasiga yetib borib kondensatsiyalanadi va natijada yupqa qatlam hosil bo‘ladi. Qatlam hosil bo‘lish jarayoni bir necha bosqichdan iborat:

1) bug‘ zarrachalarining taglik yuzasiga yetib borishi;
2) zarrachalarning taglikda adsorbsiyasi;
3) qatlam zarralarining yadrolanish jarayoninig boshlanishi;
4) kristall o‘sib borishi.

Natijada taglik yuzasida kristall tuzilishga ega NiO qatlami shakllanadi.

Jarayonga ta’sir etuvchi asosiy texnologik parametrlar:

NiO qatlamining sifati, kristal panjara tuzilishi va xossalari quyidagi parametrlarga bevosita bog‘liq: **Taglik harorati:** Taglikning qizdirilishi bug‘lanib keluvchi zarrachalarning sirt bo‘ylab erkin harakatlanishiga (migratsiyasiga) yordam beradi. Yuqori haroratlar yaxshi kristallangan, nuqsonsiz qatlamlar hosil bo‘lishini ta'minlaydi.

Kislorod qisman bosimi: Reaktiv bug‘lanish jarayonida kameradagi kislorod miqdori yetarli bo‘lishi shart. Agar kislorod miqdori kam bo‘lsa, qatlam to‘liq oksidlana olmay, metall nikel (Ni) fazasi saqlanib qolishi va qatlamning xossalari o‘zgarib ketishi mumkin.

Cho‘ktirish tezligi: Qatlamning o‘sish tezligi uning g‘ovakliligi, zichligi va sirt g‘adir-budurligini belgilaydi. O‘rtacha tezlikdagi o‘sish strukturaning bir xil chiqishini ta’minlaydi.

Eksperimental texnologik qurilma

Vakuumli bug‘lanish qurilmasi quyidagi asosiy elementlardan tashkil topgan:

- vakuum kamerasi;
- bug‘lantirish manbai;
- taglik ushlagichi;
- vakuum nasos tizimi;
- gaz berish tizimi;
- qatlam qalinligini nazorat qiluvchi qurulma.

Taglik sifatida odatda shisha, kremniy yoki maxsus keramika plastinkalari ishlatiladi. Taglik yuzasi jarayondan oldin kimyoviy va ultratovushli tozalash usullari bilan tozalanadi.

NiO qatlamlarining xossalari

Vakuumli termal bug‘lanish usuli yordamida olingan Nikel(II) oksidi yupqa qatlamlari quyidagi xususiyatlarga ega:

- yuqori kristallik darajasiga;
- optik shaffoflikga;
- asosan p-tip elektr o‘tkazuvchanlikga;
- yuqori kimyoviy barqarorlikga.

Vakuumli bug‘lantirish paytida qatlam bir nechta kichik kristall zonalardan tarkib topadi. “Yuqori kristallik darajasi” deganda shu kristallitlarning o‘lchami yetarlicha katta ekanligi va ular o‘zaro bir xil yo‘nalishda uyushib, yaxlit va barqaror struktura hosil qilgani tushuniladi. NiO keng taqiqlangan zonali yarimo‘tkazgich hisoblanadi. Uning taqiqlangan zona kengligi taxminan 3.4 - 3.8 eV oralig‘ida o‘zgaradi. P-tipli yarimo‘tkazgich bo‘lgan NiO da zaryad tashuvchilarning panjara bo‘ylab erkin va to‘siqsiz harakatlanishiga yordam beradi. Tartibsiz tuzilishda elektronlar yo‘l-yo‘lakay sochilib, energiya yo‘qotadi.Optik shaffoflik va barqarorligida nur tushganda uning tarqoqligi kamayadi, optik yo‘qotishlar kamayadi. Shuningdek, kimyoviy va termik ta’sirlarga nisbatan chidamlilik keskin ortadi.

Qatlamlarning qalinligi quyidagi texnologik parametrlarga bog‘liq:

Asosan bug‘lanish tezligiga, taglik haroratiga va o‘sish texnologik jarayoni davomiyligiga bog‘liq holda 10 nm dan 500 nm gacha qalinlikda o‘stirilishi mumkin.

Xulosa. Xulosa qilib aytganda, vakuumli reaktiv bug‘lanish usuli yordamida nikel oksidi (NiO) yupqa qatlamlarini hosil qilish zamonaviy materialshunoslik va mikroelektronikaning eng muhim texnologiyalaridan biridir.

Mazkur jarayon va uning natijalari bo‘yicha quyidagi asosiy xulosalarni chiqarish mumkin: Boshqariluvchanlik va sifat: Kislorod qisman bosimi, taglik harorati va bug‘lanish tezligini aniq nazorat qilish orqali kerakli stexiometrik tarkibga va mukammal kristall tuzilishga ega qatlamlarni yaratish mumkin.

Bosqichma-bosqich o‘sish: Zarrachalarning taglikka yetib kelishi, adsorbsiyasi, yadrolanishi va kristallarning o‘sishi kabi mikroskopik bosqichlarning uzluksizligi yakuniy qatlamning zichligi va fiziko-kimyoviy xossalarini belgilaydi.

Amaliy ahamiyat: hosil qilingan NiO qatlamlarining noyob p-tipli yarimo‘tkazgich xususiyatlari va yuqori optik shaffofligi ularni gaz sensorlari, muqobil energiya manbalari (quyosh batareyalari) hamda elektroxrom qurilmalarda muvaffaqiyatli qo‘llash uchun asos bo‘lib xizmat qiladi.

Vakuumli termal bug‘lanish usuli Nikel(II) oksidi yupqa qatlamlarini olishning samarali texnologiyalaridan biri hisoblanadi. Ushbu usul yordamida yuqori darajada toza, yuza bo‘yicha bir jinsli va nazorat qilinadigan qalinlikdagi NiO qatlamlarini sintez qilinadi. Shu sababli bu texnologiya yordamida olingn shaffof va kerakli elektr o‘tkazuvchanlikka ega NiO qatlamlari zamonaviy elektronika, sensorika va energiya qurilmalarida keng qo‘llaniladi.

ADABIYOTLAR:

1. Kerfoot, Derek G. E. (2000). "Nickel". Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Weinheim: Wiley-VCH. doi:10.1002/14356007.a17_157. ISBN 3527306730.

2. "Handbook of Inorganic Chemicals", Pradniak, Pradyot; McGraw-Hill Publications, 2002.

3. Luis De Los Santos Valladares va boshqalar. Characterization of Ni thin films following thermal oxidation in air. Journal of Vacuum Science and Technology B, 2014.

4. Qing Cheng Liang, Man Zhao va boshqalar. Type Conversion of Undoped NiO Thin Films Fabricated by Electron Beam Evaporation Technique. Advanced Materials Research, 2014.

5. Su-Kyung Kim, Han-Ki Kim va boshqalar. Comparison of NiO_x Thin Film Deposited by Spin-Coating or Thermal Evaporation for Application as a Hole Transport Layer of Perovskite Solar Cells. RSC Advances, 2020.

6. Robert Karsthof va boshqalar. The Nickel Vacancy Acceptor in NiO: Doping Beyond Thermodynamic Equilibrium. 2020.

7. Mohammad Istiaque Hossain va Brahim Aissa. Electron-Beam-Evaporated Nickel Oxide Thin Films for Application as a Hole Transport Layer in Photovoltaics. Processes, 2024.

8. S. V. Averin va boshqalar. Nickel Oxide Epitaxial Films and Diode Structures Based on Them. Radiotekhnika i Elektronika, 2024.

9. Seongha Oh, Young-Kil Jun va Nam-Hoon Kim. Magnetron-Sputtered and Rapid-Thermally Annealed NiO:Cu Thin Films on 3D Porous Substrates for Supercapacitor Electrodes. Energies, 2025.