# NIKEL BILAN MODIFIKATSIYALANGAN G'OVAKLI KREMNIYNING STRUKTURAVIY, OPTIK VA ELEKTR XOSSALARI.TADQIQOTLAR TAHLILI

**Boynazarova Nilufar**
Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy Universiteti
Yarimo'tkazgichlar fizikasi 1-kurs magistranti
E-mail: boynazarovanilufar2002@gmail.com
https://orcid.org/0009-0008-5426-5617

***Annotatsiya***:*Ushbu sharh maqolasida nikel bilan modifikatsiyalangan g'ovakli kremniyning strukturaviy, optik va elektr xususiyatlariga oid ilmiy tadqiqotlar tahlil qilinadi. G'ovakli kremniyni olish usullari, xususan, elektrokimyoviy usul hamda unga nikel kiritish jarayonlarining material fizik xususiyatlariga ta'siri ko'rib chiqiladi. Mavjud ilmiy manbalarda keltirilgan tajriba natijalari o'zaro taqqoslanib, nikelning kristall tuzilish, sirt morfologiyasi, optik yutilish va elektr o'tkazuvchanlikka ta'siri umumlashtiriladi. Sharhning maqsadi ushbu yo'nalishda erishilgan ilmiy natijalarni tizimlashtirish, mavjud muammolarni aniqlash va kelgusidagi tadqiqotlar uchun istiqbolli yo'nalishlarni belgilashdan iborat. Natijada nikel bilan modifikatsiyalangan g'ovakli kremniyning fizik xususiyatlarini boshqarish imkoniyatlari haqida ilmiy xulosalar shakllantirilishi hamda yangi funksional yarimo'tkazgich materiallarni yaratish uchun nazariy va amaliy asoslar ishlab chiqilishi kutiladi.*

***Kalit so'zlar:*** *g'ovakli kremniy, nikel, modifikatsiyalash, legirlash, elektrokimyoviy usul, strukturaviy xususiyatlar, optik xossalar, elektr o'tkazuvchanlik.*

# STRUCTURAL, OPTICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF NICKEL-MODIFIED POROUS SILICON.A REVIEW

***Abstract***: *This review article analyzes scientific studies on the structural, optical, and electrical properties of nickel-modified porous silicon. The methods of porous silicon fabrication, particularly electrochemical etching, as well as the influence of nickel incorporation on the physical properties of the material, are discussed. Experimental results reported in the scientific literature are compared to summarize the effects of nickel on crystal structure, surface morphology, optical absorption, and electrical conductivity. The aim of this review is to systematize scientific findings in this research field, identify existing challenges, and determine promising directions for future studies. The review is expected to provide scientific conclusions regarding the possibilities of controlling the physical properties of nickel-modified porous silicon and to establish a theoretical and practical basis for the development of new functional semiconductor materials.*

***Keywords:*** *porous silicon, nickel, modification, doping, electrochemical etching, structural properties, optical properties, electrical conductivity.*

## СТРУКТУРНЫЕ, ОПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ, МОДИФИЦИРОВАННОГО НИКЕЛЕМ: АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ

***Аннотация:*** *В данной обзорной статье анализируются научные исследования структурных, оптических и электрических свойств пористого кремния, модифицированного никелем. Рассматриваются методы получения пористого кремния, в частности электрохимическое травление, а также влияние введения никеля на физические свойства материала. Сопоставляются экспериментальные результаты, представленные в научной литературе, обобщается влияние никеля на кристаллическую структуру, морфологию поверхности, оптическое поглощение и электропроводность материала. Цель обзора заключается в систематизации научных результатов в данной области, выявлении существующих проблем и определении перспективных направлений дальнейших исследований. Ожидается, что результаты обзора позволят сформулировать научные выводы о возможностях управления физическими свойствами пористого кремния, модифицированного никелем, и послужат теоретической и практической основой для разработки новых функциональных полупроводниковых материалов.*

***Ключевые слова:*** *пористый кремний, никель, модификация, легирование, электрохимическое травление, структурные свойства, оптические свойства, электропроводность.*

### KIRISH.

Zamonaviy yarimo‘tkazgichlar fizikasi va materialshunoslikning muhim yo‘nalishlaridan biri yangi funksional materiallarni yaratish hamda ularning fizik xususiyatlarini boshqarishdan iborat. Ayniqsa, nanostrukturali yarimo‘tkazgich materiallar elektronika, optoelektronika, quyosh energetikasi va sensor texnologiyalarida qo‘llanish imkoniyatlari bilan katta ilmiy qiziqish uyg‘otmoqda. Bunday materiallar orasida g‘ovakli kremniy o‘zining o‘ziga xos strukturasi, katta solishtirma sirt yuzasi va boshqariladigan optik-elektr xususiyatlari bilan alohida o‘rin egallaydi.

G‘ovakli kremniy (Porous Silicon) kremniy materialining sirtida yoki hajmida mikroskopik va nanometr o‘lchamdagi g‘ovaklar hosil bo‘lishi natijasida shakllanadigan nanostrukturali yarimo‘tkazgich hisoblanadi. Uning fizik xususiyatlari g‘ovaklarning

o'lchami, shakli, joylashishi, g'ovaklik darajasi va kremniy kristall skeletining tuzilishiga bog'liq. G'ovakli kremniyni olishning elektrokimyoviy anodlash usuli keng qo'llaniladi. Ushbu usul yordamida tok zichligi, elektrolit tarkibi va ishlov berish davomiyligini o'zgartirish orqali materialning g'ovakli tuzilishini boshqarish mumkin[1].

G'ovakli kremniyning ilmiy ahamiyati uning oddiy kristall kremniydan farqli fizik xususiyatlarga ega bo'lishi bilan belgilanadi. Xususan, g'ovakli strukturaning shakllanishi materialning optik yutilishi, fotolyuminessensiyasi, sirt faolligi va elektr xususiyatlariga ta'sir ko'rsatadi. Shu sababli uning fizik parametrlarini o'zgartirish, barqarorligini oshirish va yangi funksional xususiyatlarga ega materiallar olish maqsadida turli modifikatsiyalash usullari tadqiq etilmoqda [2].

G'ovakli kremniyning xususiyatlarini boshqarishning istiqbolli yo'nalishlaridan biri uning tarkibiga metall elementlarini kiritish yoki sirtini metall qatlamlari bilan modifikatsiyalash hisoblanadi. Bunda metallning turi, miqdori, materialga kiritilish usuli va uning g'ovakli struktura bilan o'zaro ta'siri muhim ahamiyat kasb etadi. Metall modifikatsiyasi natijasida materialning sirt morfologiyasi, fazaviy tarkibi, optik va elektr xususiyatlarida o'zgarishlar yuzaga kelishi mumkin.

Mazkur yo'nalishda nikel (Ni) alohida ilmiy qiziqish uyg'otadi. Nikelning kremniy bilan o'zaro ta'siri, sirtida metall qatlamlar yoki nikel silitsid fazalarining shakllanishi materialning strukturaviy va elektr xususiyatlariga ta'sir qilishi mumkin. Masalan, J. Kanungo va hammualliflar tomonidan 2006-yilda Semiconductor Science and Technology jurnalida chop etilgan tadqiqotda g'ovakli kremniy sirtiga kimyoviy usulda nikel qoplash orqali past qarshilikli elektr kontaktlar hosil qilish imkoniyati o'rganilgan. Tadqiqotda rentgen difraksiyasi (XRD), elektron mikroskopiya (SEM) va atom-kuch mikroskopiyasi (AFM) usullaridan foydalanilgan [3]. Ushbu ish nikel va g'ovakli kremniy o'rtasidagi o'zaro ta'sirni o'rganishda muhim ilmiy manbalardan biri hisoblanadi.

Bundan tashqari, g'ovakli kremniyning elektrokimyoviy olinishi, metall yordamida modifikatsiyalanishi va funksional xususiyatlarini boshqarish masalalari so'nggi yillardagi ilmiy sharhlarda ham keng yoritilmoqda. O. Kuntyi va hammualliflarning 2022-yildagi tadqiqotida elektrokimyoviy usulda g'ovakli kremniy hosil bo'lishiga ta'sir qiluvchi omillar hamda metall nanostrukturalarining ushbu jarayondagi roli tahlil qilingan [1]. Y. Wang va D. Wangning 2026-yilda chop etilgan sharh maqolasida esa g'ovakli kremniyning olinishi, sirtini modifikatsiyalash va zamonaviy texnologiyalardagi qo'llanilishi umumlashtirilgan [2].

Shunga qaramay, nikel bilan modifikatsiyalangan g'ovakli kremniyning strukturaviy, optik va elektr xususiyatlarini o'zaro bog'liq holda tahlil qilish, nikelning

material tarkibida joylashish holati hamda uning fizik parametrlarga ta'sirini aniqlash dolzarb ilmiy masala bo'lib qolmoqda. Ayniqsa, nikelning kremniy sirtida metall qatlam, zarracha yoki kimyoviy birikma shaklida mavjud bo'lishi o'rtasidagi farqlarni hisobga olish muhimdir.

Shu munosabat bilan ushbu sharh maqolasining maqsadi nikel bilan modifikatsiyalangan g'ovakli kremniyning strukturaviy, optik va elektr xususiyatlariga oid mavjud ilmiy tadqiqotlarni tizimli tahlil qilish, olingan natijalarni o'zaro taqqoslash, nikelning material fizik xususiyatlariga ta'sirini umumlashtirish hamda kelgusidagi ilmiy tadqiqotlar uchun istiqbolli yo'nalishlarni belgilashdan iborat.

G'ovakli kremniyning olinishi va fizik xususiyatlari

G'ovakli kremniy kremniy plastinkasiga kimyoviy yoki elektrokimyoviy ishlov berish natijasida hosil qilinadigan nanostrukturali material hisoblanadi. Uni olishning keng tarqalgan usullaridan biri elektrokimyoviy anodlash bo'lib, ushbu jarayonda kremniy plastinkasi elektrolit muhitida anod sifatida ishlatiladi. Jarayon davomida kremniy sirtining ma'lum qismlari erishi natijasida g'ovakli qatlam shakllanadi. G'ovaklarning o'lchami va shakli kremniyning turi, elektrolit tarkibi, tok zichligi, anodlash davomiyligi va harorat kabi omillarga bog'liq.

O. Kuntyi va hammualliflarning 2022-yilda chop etilgan sharh tadqiqotida elektrokimyoviy anodlash orqali g'ovakli kremniy hosil bo'lish mexanizmlari va unga ta'sir qiluvchi asosiy texnologik omillar tahlil qilingan. Mualliflar tok zichligi, elektrolit tarkibi va jarayon davomiyligi g'ovaklarning shakllanishi hamda material morfologiyasini belgilovchi muhim parametrlar ekanligini ta'kidlagan [1].

H. Kim va N. Cho tomonidan 2012-yilda olib borilgan tadqiqotda elektrokimyoviy usulda olingan g'ovakli kremniyning morfologik, nanostrukturaviy va optik xususiyatlari o'rganilgan. Tadqiqot natijalarida kremniy nanokristallitlarining o'lchami 2,0–5,3 nm oralig'ida ekanligi va fotolyuminessensiya maksimumlari 615–722 nm diapazonda kuzatilgani ko'rsatilgan. Bu natijalar g'ovakli kremniyning optik xususiyatlari uning nanokristallitlari o'lchami va strukturaviy holatiga bog'liqligini ko'rsatadi [2]

Demak, g'ovakli kremniyning dastlabki strukturasi va fizik xususiyatlarini aniqlash keyingi modifikatsiyalash jarayonlarining ta'sirini baholash uchun muhim ilmiy asos hisoblanadi.

G'ovakli kremniyni nikel bilan modifikatsiyalash usullari

Yarimo'tkazgich materiallarning fizik xususiyatlarini o'zgartirishda ularning tarkibiga metall elementlarini kiritish yoki sirtini metall qatlamlari bilan qoplash usullaridan foydalaniladi. Bunday modifikatsiyalash materialning sirt tuzilishi, fazaviy

tarkibi va elektr kontakt xususiyatlariga ta'sir ko'rsatishi mumkin. Nikel ham kremniy asosidagi materiallarni modifikatsiyalashda o'rganilayotgan metallardan biridir. Nikelni g'ovakli kremniyga kiritishning turli yondashuvlari mavjud. Jumladan, kimyoviy cho'ktirish, elektrokimyoviy cho'ktirish va yupqa metall qatlam hosil qilish usullari qo'llaniladi. Ushbu usullar natijasida nikel g'ovaklar ichida, material sirtida yoki alohida metall faza ko'rinishida joylashishi mumkin.

J. Kanungo va hammualliflar 2006-yilda g'ovakli kremniy sirtiga kimyoviy usulda nikel cho'ktirish va keyinchalik mis bilan qalinlashtirish orqali elektr kontaktlar hosil qilishni tadqiq qilgan. Tadqiqotda nikel qoplamasining material sirtiga ta'siri hamda elektr kontakt xususiyatlari o'rganilgan [3].

Nikelni kiritish usulini tanlashda uning materialda qanday joylashishi va qanday fazalar hosil qilishi muhim hisoblanadi. Shu sababli modifikatsiyalash jarayonidan keyin materialning tarkibi va tuzilishini instrumental usullar yordamida tekshirish zarur.

Nikelning g'ovakli kremniyning strukturaviy xususiyatlariga ta'siri G'ovakli kremniyning strukturaviy xususiyatlari materialning kristall tuzilishi, fazaviy tarkibi, g'ovaklar o'lchami va sirt morfologiyasi bilan tavsiflanadi. Nikel bilan modifikatsiyalash jarayonida ushbu parametrlarning o'zgarishi nikelning material sirtida yoki g'ovaklar ichida joylashishiga, shuningdek, ishlov berish sharoitlariga bog'liq.

Strukturaviy xususiyatlarni o'rganishda rentgen difraksiyasi (XRD), skanerlovchi elektron mikroskopiya (SEM) va atom-kuch mikroskopiyasi (AFM) usullari muhim ahamiyatga ega. XRD yordamida kristall tuzilish va fazaviy tarkib, SEM orqali sirt morfologiyasi hamda g'ovaklarning shakli, AFM yordamida esa sirt relyefi va g'adir-budurligi aniqlanadi.

Kanungo va hammualliflarning tadqiqotida nikel-mis qoplamasi hosil qilingandan keyin g'ovakli kremniy sirtining morfologiyasi FESEM yordamida o'rganilgan. Natijalarda qoplash jarayonidan keyin g'ovakli qatlamning umumiy morfologiyasi saqlanib qolishi, AFM tahlilida esa sirt g'adir-budurligining yaxshilanishi qayd etilgan [3].

Shu bilan birga, nikelning kremniy kristall panjarasiga kirishi, alohida metall zarrachalari yoki nikel silitsid fazalarini hosil qilishi bir-biridan farqli strukturaviy holatlardir. Ularni XRD va boshqa tarkibiy tahlil usullari yordamida aniqlash nikel bilan modifikatsiyalangan g'ovakli kremniyning strukturaviy xususiyatlarini to'g'ri baholash imkonini beradi.

Nikelning g'ovakli kremniyning optik xususiyatlariga ta'siri.

G‘ovakli kremniyning optik xususiyatlari uning nanostrukturasi, g‘ovaklik darajasi, sirt holati va yorug‘lik bilan o‘zaro ta’siriga bog‘liq. Ushbu xususiyatlarni o‘rganishda optik yutilish, qaytarish koeffitsiyenti, o‘tkazish va fotolyuminessensiya spektrlari muhim ko‘rsatkichlar hisoblanadi.

2025-yilda D. R. Huanca tomonidan Optical Materials jurnalida chop etilgan tadqiqotda bir o‘lchamli g‘ovakli kremniy fotonik kristallarining sirti yupqa nikel qatlami bilan modifikatsiyalangan. Tadqiqotda nikel qatlami qoplanganidan keyin fotonik taqiqlangan zona (PBG) susayishi va optik yutilishning ortishi kuzatilgan. Shuningdek, nikelning materialning yuqori qatlamlariga tarqalishi optik qaytarish xususiyatlariga ta’sir qilishi aniqlangan [4].

Mazkur natijalar nikel qatlami g‘ovakli kremniyning optik javobini o‘zgartirishi mumkinligini ko‘rsatadi. Biroq ushbu tadqiqot yupqa nikel qatlami bilan qoplangan fotonik kristallga tegishli bo‘lib, uning natijalarini barcha turdagi nikel bilan legirlangan g‘ovakli kremniyga to‘g‘ridan-to‘g‘ri tatbiq etish mumkin emas. Shu sababli nikelning optik xususiyatlarga ta’sirini baholashda modifikatsiyalash usuli, nikel miqdori, g‘ovakli qatlam tuzilishi va optik o‘lchash sharoitlarini hisobga olish zarur.

Nikelning g‘ovakli kremniyning elektr xususiyatlariga ta’siri.

G‘ovakli kremniyning elektr xususiyatlari elektr qarshiligi, solishtirma elektr o‘tkazuvchanligi, tok-kuchlanish xarakteristikasi va elektr kontakt qarshiligi kabi parametrlar orqali baholanadi. Ushbu parametrlar materialning kristall tuzilishi, nuqsonlari, sirt holati va zaryad tashuvchilar transportiga bog‘liq.

Nikel bilan modifikatsiyalash natijasida g‘ovakli kremniy va metall o‘rtasidagi kontakt xususiyatlari o‘zgarishi mumkin. Kanungo va hammualliflar tomonidan olib borilgan tadqiqotda nikel-mis bilan qoplangan g‘ovakli kremniy kontaktlarining tok-kuchlanish xarakteristikasi o‘rganilgan. Natijada ma’lum kuchlanish oralig‘ida kontaktning J–V xarakteristikasi chiziqli bo‘lishi va nikel kontaktining solishtirma kontakt qarshiligi boshqa ayrim metall kontaktlarga nisbatan past bo‘lishi aniqlangan [3].

Bu natijalar nikelning g‘ovakli kremniyda elektr kontakt hosil qilishdagi ahamiyatini ko‘rsatadi. Biroq kontakt qarshiligining kamayishi materialning hajmiy elektr o‘tkazuvchanligi ham albatta ortganini anglatmaydi. Shu sababli elektr kontakt xususiyatlari va materialning ichki elektr transport xususiyatlarini alohida baholash lozim.

Ilmiy tadqiqotlar natijalarining taqqoslanishi va mavjud muammolar

Mavjud ilmiy tadqiqotlar tahlili g‘ovakli kremniyning fizik xususiyatlari uning hosil bo‘lish sharoitlari, nanostrukturasi va sirt holatiga bog‘liqligini ko‘rsatadi.

Elektrokimyoviy anodlash usuli orqali g‘ovaklarning tuzilishini boshqarish mumkinligi, nikel bilan modifikatsiyalash esa materialning strukturaviy, optik va elektr xususiyatlariga ta’sir ko‘rsatishi aniqlangan.

O‘rganilgan manbalarda nikelning g‘ovakli kremniy sirtiga cho‘ktirilishi natijasida elektr kontakt xususiyatlari yaxshilanishi, yupqa nikel qatlami bilan qoplangan fotonik kristallarda esa optik qaytarish va yutilish xususiyatlari o‘zgarishi ko‘rsatilgan. Shu bilan birga, nikelning material tarkibida joylashish holati, uning miqdori va modifikatsiyalash sharoitlarining fizik xususiyatlarga kompleks ta’siri bo‘yicha qo‘shimcha tadqiqotlarga ehtiyoj mavjud.

Ayniqsa, nikel bilan modifikatsiyalashdan oldingi va keyingi namunalarni bir xil sharoitlarda strukturaviy, optik va elektr jihatdan taqqoslash muhimdir. Bunday yondashuv nikelning material xususiyatlariga ta’sirini aniqroq baholash, o‘zgarishlarning sabablarini tushuntirish va istiqbolli qo‘llanish sohalarini belgilash imkonini beradi.

## ADABIYOTLAR TAHLILI VA METODLAR.

G‘ovakli kremniy (Porous Silicon — PSi) o‘zining yuqori solishtirma sirt yuzasi, rivojlangan g‘ovakli strukturasi va o‘ziga xos fizik xususiyatlari bilan zamonaviy yarimo‘tkazgich materiallari orasida muhim o‘rin egallaydi. Uning strukturaviy, optik va elektr xususiyatlari g‘ovaklarning o‘lchami, shakli, g‘ovaklilik darajasi, kristall tuzilishi hamda sirt holatiga bog‘liq. G‘ovakli kremniyni metall atomlari yoki nanozarrachalari bilan modifikatsiyalash orqali uning fizik xususiyatlarini boshqarish imkoniyati mavjud. Xususan, nikel (Ni) bilan modifikatsiyalash g‘ovakli kremniyning funksional xususiyatlarini o‘zgartirishning istiqbolli yo‘nalishlaridan biri hisoblanadi. Dolgiy va hammualliflari (2012) mezog‘ovakli kremniy tarkibiga elektrokimyoviy cho‘ktirish usuli orqali nikel kiritish jarayonini tadqiq qilganlar. Mualliflar nikelning g‘ovaklar ichida joylashishi, hosil bo‘lgan nanostrukturalarning o‘lchami va kristall xususiyatlarini o‘rganganlar. Tadqiqot natijalarida g‘ovaklarni nikel bilan to‘ldirish darajasi 67 % gacha yetgani va nikel nanostrukturalarining diametri taxminan 100–120 nm bo‘lgani qayd etilgan. Ushbu tadqiqot nikelni g‘ovakli kremniyga elektrokimyoviy usulda kiritish imkoniyatlarini asoslab beradi.

Kanungo va hammualliflari (2006) g‘ovakli kremniy yuzasida nikel asosidagi elektr kontaktlarni shakllantirish va ularning xususiyatlarini o‘rganganlar. Tadqiqotda kimyoviy cho‘ktirish usuli qo‘llanilib, materialning sirt morfologiyasi XRD, FESEM va AFM yordamida, elektr xususiyatlari esa tok-kuchlanish tavsifi orqali baholangan. Ushbu ish nikelning g‘ovakli kremniy bilan elektr kontakt hosil qilishdagi ahamiyatini ko‘rsatadi.

Granitzer va hammualliflari (2019) tomonidan olib borilgan Magnetic Characteristics of Ni-Filled Luminescent Porous Silicon tadqiqotida nikel bilan to‘ldirilgan g‘ovakli kremniyning optik va magnit xususiyatlari o‘rganilgan. Mualliflar nikelni impulsli elektrokimyoviy cho‘ktirish usulida kiritib, fotolyuminessensiya spektrlarini tahlil qilganlar. Tadqiqotda dastlabki g‘ovakli kremniyning fotolyuminessensiya maksimumi taxminan 620 nm bo‘lgan bo‘lsa, nikel kiritilgan namunada 580 nm atrofida qayd etilgan. Bu natija nikel modifikatsiyasi materialning optik javobiga ta’sir qilishini ko‘rsatadi.

Huanca (2025) tomonidan olib borilgan tadqiqotda bir o‘lchamli g‘ovakli kremniy fotonik kristallari yuzasiga yupqa nikel qatlami joylashtirilishining optik xususiyatlarga ta’siri o‘rganilgan. Tadqiqotda nikel qoplamasi natijasida optik qaytish spektri va fotonik taqiqlangan zonada o‘zgarishlar kuzatilgan. Ushbu ish nikel modifikatsiyasining optik xususiyatlarga ta’sirini o‘rganish uchun muhim ilmiy asos hisoblanadi. Biroq unda nikelni g‘ovaklar ichiga elektrokimyoviy kiritish emas, balki yupqa sirt qoplamasi qo‘llangan

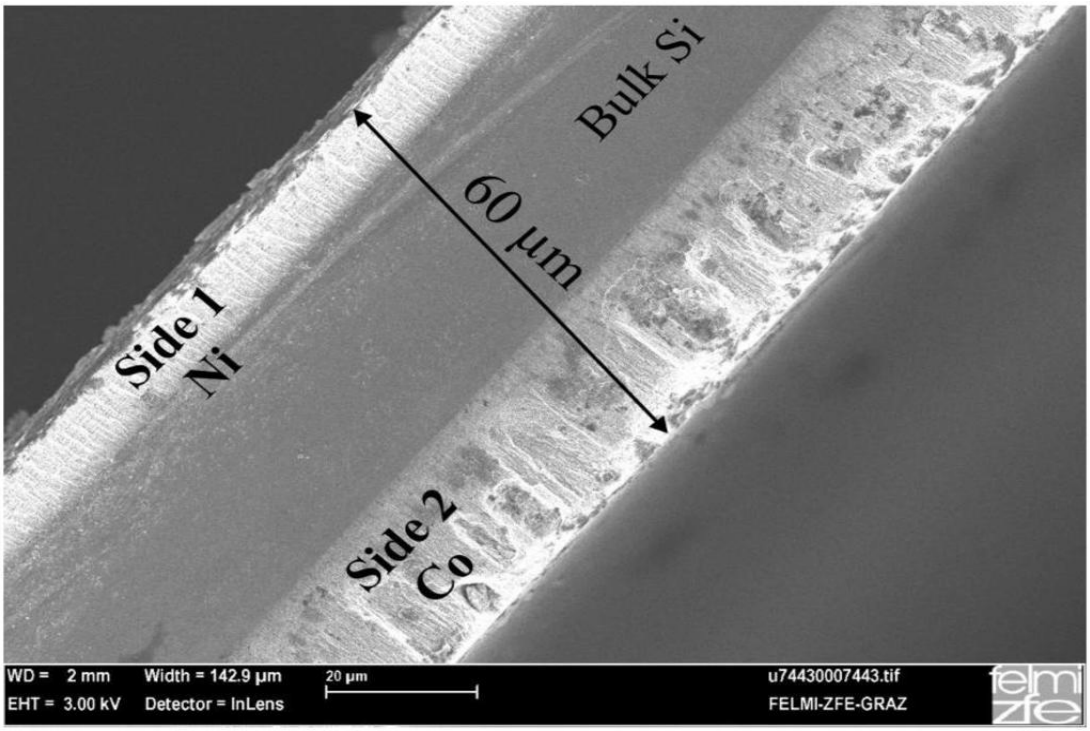
Mavjud ilmiy ishlar taqqoslanganda, nikelni g‘ovakli kremniyga kiritish usullari va olingan natijalar o‘rtasida muhim 1-jadvaldagi kabi faqlar mavjudligi aniqlanadi.

1-jadval.

**Olib borilgan ilmiy ishlar tahlili.**

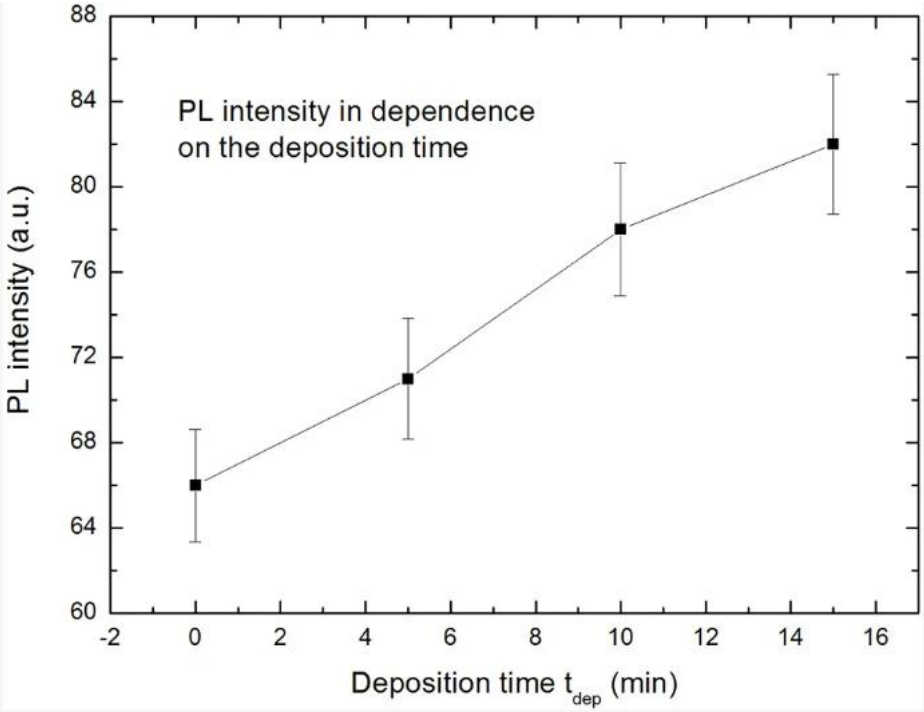
| Muallif va yili. | Modifikatsiyalash usuli | Tadqiqot yo‘nalishi | Asosiy natija |
|---|---|---|---|
| Kanungo, 2006. | Kimyoviy cho‘ktrish | Elektr . | Elektr kantakt xususiyatlari. |
| Dolgiy,2012. | Elektrokimyoviy cho‘ktrish | Struktraviy | Nikel nanostrukturasi |
| Granitzer,2019. | Impulsli elektrokimyoviy cho‘ktrish | Optik va magnit | Fotolyuminssensiya Maksumumi siljishi. |
| Haunca, 2025 | Yupqa nikel qatlami | Optik | Fotonik xususiyatlarning o‘zgarishi |

Taqqoslash natijalari shuni ko‘rsatadiki, avvalgi tadqiqotlarda nikelning g‘ovakli kremniyga kiritilishi, kristall strukturasi, elektr kontaktlari va optik xususiyatlari turli yo‘nalishlarda o‘rganilgan. Biroq strukturaviy, optik va elektr xususiyatlarning o‘zaro bog‘liqligini bir xil tajriba tizimida kompleks tahlil qilish muhim ilmiy vazifa bo‘lib qolmoqda.




1-rasm. G‘ovakli kremniyning SEM tasviri.

G‘ovakli qatlamning ko‘ndalang kesimi va morfologiyasini ko‘rsatadi.




Metall (Ni) cho'kish vaqtining oshishi bilan fotolyuminestsentsiya intensivligining ortishi kuzatiladi, bu emitent va cho'ktirilgan metall konstruktsiyasi o'rtasidagi bog'liqlik bilan bog'liq (Granitzer va boshqalar,2018 ).

2-rasm lyuminsentsiya va vaqt bog’liqligi.

PL-cho'qqisining ko'k siljishiga qo'shimcha ravishda, cho'ktirish vaqtining oshishi bilan lyuminestsentsiya intensivligining ortishi kuzatiladi, bu **2-rasmda** ko'rsatilgan Bu natija Ni plazmonlarining ishtirokini kuchli ko'rsatadi.

Ushbu tadqiqotda nikel bilan modifikatsiyalangan g‘ovakli kremniyning strukturaviy, optik va elektr xususiyatlarini o‘rganish uchun adabiyotlarni qiyosiy tahlil qilish va eksperimental tadqiqot metodlaridan foydalanish taklif etiladi.

Tadqiqotning birinchi bosqichida monokristall kremniy plastinkasi asosida elektrokimyoviy anodlash usuli orqali g‘ovakli kremniy qatlami hosil qilinadi. Keyingi bosqichda tayyorlangan g‘ovakli kremniyga elektrokimyoviy cho‘ktirish orqali nikel kiritiladi. Ushbu yondashuv Dolgiy va hammualliflarning (2012) mezog‘ovakli kremniyga nikel kiritish bo‘yicha tadqiqotiga hamda Granitzer va hammualliflarning (2019) impulsli elektrokimyoviy cho‘ktirish usuliga asoslanadi. Granitzer tadqiqotida nikel cho‘ktirish davomiyligi 5–15 daqiqa oralig‘ida o‘zgartirilgan va nikelning g‘ovaklar chuqurligigacha joylashishi EDX tahlili bilan tasdiqlangan.

Tadqiqotda dastlabki monokristall kremniy, modifikatsiyalanmagan g‘ovakli kremniy va nikel bilan modifikatsiyalangan g‘ovakli kremniy namunalari o‘zaro taqqoslanadi. Strukturaviy xususiyatlarni aniqlash uchun rentgen difraksiyasi (XRD), skanerlovchi elektron mikroskopiya (SEM) va atom-kuch mikroskopiyasi (AFM) metodlari qo‘llaniladi. XRD orqali kristall struktura va fazaviy tarkib, SEM yordamida g‘ovaklarning morfologiyasi, EDX orqali element tarkibi va nikelning taqsimlanishi, AFM yordamida esa sirt relyefi va g‘adir-budurligi o‘rganiladi. Bu metodlar Kanungo va hammualliflarning (2006) hamda Granitzer va hammualliflarning (2019)

Optik xususiyatlarni aniqlashda optik spektroskopiya va fotolyuminessensiya (PL) metodlaridan foydalaniladi. Bunda yorug‘likning yutilish va qaytish spektrlari, emissiya maksimumi, fotolyuminessensiya intensivligi hamda optik taqiqlangan zona energiyasi tahlil qilinadi. Elektr xususiyatlarini o‘rganishda esa namunalarning elektr qarshiligi va elektr o‘tkazuvchanligi aniqlanadi. Zarur hollarda tok-kuchlanish (I–V) tavsifi ham o‘rganiladi. Elektr o‘tkazuvchanlik quyidagi ifoda orqali hisoblanadi:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

Bu yerda

$\sigma$ -elektr o‘tkazuvchanlik,

$\rho$-solishtirma.elektr.qarshilik.

Olingan natijalar o‘zaro taqqoslanib, nikel miqdori, uning g‘ovaklar bo‘ylab taqsimlanishi va materialning fizik xususiyatlari orasidagi bog‘liqlik aniqlanadi. Shu

orqali strukturaviy o‘zgarishlarning optik va elektr xususiyatlarga ta’siri kompleks baholanadi.

**XULOSA.**

O‘tkazilgan ilmiy adabiyotlar tahlili shuni ko‘rsatadiki, nikel bilan modifikatsiyalangan g‘ovakli kremniy istiqbolli funksional yarimo‘tkazgich materiallardan biri hisoblanadi. G‘ovakli kremniyning yuqori solishtirma sirt yuzasi, g‘ovakli tuzilishi va o‘ziga xos elektron xususiyatlari uning fizik-kimyoviy xossalarini metall qo‘shimchalar yordamida boshqarish imkonini beradi. Xususan, nikel bilan modifikatsiyalash materialning strukturaviy, optik va elektr xususiyatlariga sezilarli ta’sir ko‘rsatishi mumkin.

Tahlil qilingan tadqiqotlar asosida nikelning g‘ovakli kremniy tarkibiga kiritilishi kristall tuzilish, sirt morfologiyasi, g‘ovaklarning shakli va o‘lchamlarida o‘zgarishlarga olib kelishi mumkinligi aniqlandi. Bunday o‘zgarishlarni rentgen difraksiyasi (XRD) va skanerlovchi elektron mikroskopiya (SEM) usullari yordamida o‘rganish muhim hisoblanadi.

Optik xususiyatlar nuqtayi nazaridan nikel bilan modifikatsiyalash yorug‘lik yutilishi, qaytarilishi, fotolyuminessensiya intensivligi hamda optik taqiqlangan zona kengligiga ta’sir qilishi mumkin. Ushbu jarayonlar material tarkibidagi nuqsonlar, sirt holatlari va metall–yarimo‘tkazgich o‘zaro ta’siri bilan bog‘liq.

Elektr xususiyatlari esa nikelning konsentratsiyasi, uning materialda taqsimlanishi va hosil bo‘ladigan kontakt xususiyatlariga bog‘liq. Xususan, elektr qarshilik, solishtirma elektr o‘tkazuvchanlik va zaryad tashuvchilar transportidagi o‘zgarishlarni o‘rganish orqali modifikatsiyalashning elektron jarayonlarga ta’sirini baholash mumkin.

Umuman olganda, nikel bilan modifikatsiyalangan g‘ovakli kremniyning strukturaviy, optik va elektr xususiyatlarini kompleks o‘rganish materialning xossalari o‘rtasidagi o‘zaro bog‘liqlikni aniqlash uchun muhim ilmiy ahamiyatga ega. Shu bilan birga, nikel konsentratsiyasi, kiritish usuli va texnologik sharoitlarning material xususiyatlariga ta’sirini chuqur o‘rganish dolzarb ilmiy vazifa bo‘lib qolmoqda. Kelgusidagi tadqiqotlarda ushbu parametrlarni tizimli ravishda o‘rganish orqali nikel bilan modifikatsiyalangan g‘ovakli kremniyning istiqbolli qo‘llanilish sohalarini aniqlash mumkin.

**ADOBIYOTLAR ROYXATI.**

1. Dolgiy A., Redko S. V., Bandarenka H., Prischepa S. L., Yanushkevich K., Nenzi P., Balucani M., Bondarenko V. Electrochemical deposition and characterization of Ni in

mesoporous silicon. Journal of The Electrochemical Society, 2012, Vol. 159, No. 10, D623. DOI: https://doi.org/10.1149/2.050210jes

2. Granitzer P., Rumpf K., Poelt P., Reissner M. Magnetic Characteristics of Ni-Filled Luminescent Porous Silicon. Frontiers in Chemistry, 2019, Vol. 7, Article 41. DOI: https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00041

3. Kanungo J., Pramanik C., Bandopadhyay S., Gangopadhyay U., Das L., Saha H., Gettens R. T. T. Improved contacts on a porous silicon layer by electroless nickel plating and copper thickening. Semiconductor Science and Technology, 2006, Vol. 21, No. 7, pp. 964–970. DOI: https://doi.org/10.1088/0268-1242/21/7/023

4. Optical properties of one-dimensional porous silicon photonic crystals coated with a thin nickel film. Optical Materials, 2025, Vol. 163, Article 116991. DOI: https://doi.org/10.1016/j.optmat.2025.116991

5. Föll H., Christophersen M., Carstensen J., Hasse G. Formation and application of porous silicon. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2002, Vol. 39, No. 4, pp. 93–141. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0927-796X(02)00090-6](https://doi.org/10.1016/S0927-796X\(02\)00090-6utm_source=chatgpt.com)

6. Smith R. L., Collins S. D. Porous silicon formation mechanisms. Journal of Applied Physics, 1992, Vol. 71, No. 8, pp. R1–R22. DOI: https://doi.org/10.1063/1.350839

7. Bisi O., Ossicini S., Pavesi L. Porous silicon: a quantum sponge structure for silicon ptoelectronics. based oSurface Science Reports, 2000, Vol. 38, No. 1–3, pp. 1–126. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-5729(99)00012-6](https://doi.org/10.1016/S0167-5729\(99\)00012-6?utm_source=chatgpt.com)

8. Zhang X. G. Morphology and formation mechanisms of porous silicon. Journal of The Electrochemical Society, 2004, Vol. 151, No. 1, pp. C69–C80. DOI: https://doi.org/10.1149/1.1632477

9.Botir qizi, Boynazarova Nilufar. "NIKEL BILAN MODIFIKATSIYALANGAN G'OVOKLI YARIMO'TKAZGICHLARNING MAGNIT-OPTIK XUSUSIYATLARI." "Tabiiy fanlar integratsiyasida innovatsion ta'lim texnologiyalari: an'anaviylik va zamonaviylik" mavzusidagi Respublika ilmiy-amaliy anjumani, vol. 1, no. 1, 2026, pp. 238-242. https://smartquillpublishing.uz/uz/articles/nikel-bilan-modifikatsiyalangan-govokli-yarimotkazgichlarning-magnit-optik-xususiyatlari