



UDK: 537.533:546.28:539.216

Amin MALLAYEV,
Dotsent, f.-m.f.n, Xalqaro innovatsion universiteti
Shohruh SAYFULLOYEV,
Dotsent v.b., PhD O'zbekiston Milliy universiteti
E-mail: sayfulloyev_sh@nuu.uz

TATU professori, f.f.d., K.Abduraxmonov taqrizi asosida

KOBALT BILAN LEGIRLANGAN n-TIPLI MONOKRISTALLI KREMNIYNING STRUKTURAVIY XOSSALARINI RAMAN TAHLILI

Annotatsiya

Ushbu ishda monokristalli n-Si (KEF-35 $\Omega \cdot \text{cm}$) namunalari kobalt (Co) diffuziyasining strukturaviy va fazaviy o'zgarishlarga ta'siri Raman spektroskopiyasi yordamida o'rganildi. Dastlabki namunada Si-Si optik fonon cho'qqisi 523,93 cm^{-1} da kuzatilib, intensivligi 11500 nisbiy birlikni tashkil etdi. Termik ishlov berilgan nazorat namunasida cho'qqi intensivligi 12500 gacha oshdi, bu kremniy panjarasidagi deformatsiyalarning kremniy kristall panjarasida mavjud bo'lgan ichki kuchlanishlarning yuqori harorat ta'sirida kamayishini ko'rsatadi. Kobalt diffuziyasidan so'ng Si-Si cho'qqisi intensivligi 2700 gacha keskin kamaydi va 180, 272 hamda 358 cm^{-1} da yangi Raman cho'qqilari paydo bo'ldi. Ushbu cho'qqilar kobalt silitsidlarining (CoSi va CoSi₂) hosil bo'lganligini tasdiqlaydi. Sirt qatlami (3 mkr) olib tashlangan namunada Si-Si cho'qqisi intensivligi 8500 gacha tiklanib, silitsid cho'qqilari yo'qoldi. Bu natijalar kobalt silitsid qatlamining qalinligi 3 mikron oraliqda ekanligini ko'rsatadi.

Kalit so'zlar: n-Si, kobalt, diffuziya, kobalt silitsidlari, CoSi, CoSi₂, Raman spektroskopiyasi, strukturaviy o'zgarishlar, deformatsiya relaksatsiyasi, mikroelektronika.

RAMAN ANALYSIS OF STRUCTURAL PROPERTIES OF COBALT-DOPED n-TYPE MONOCRYSTALLINE SILICON

Annotation

In this work, the effect of cobalt (Co) diffusion on structural and phase transformations in monocrystalline n-Si (KEF-35 $\Omega \cdot \text{cm}$) samples was investigated using Raman spectroscopy. In the initial sample, the Si-Si optical phonon peak was observed at 523.93 cm^{-1} with an intensity of 11,500 arbitrary units. In the thermally treated control sample, the peak intensity increased to 12,500, indicating a reduction of internal stresses in the silicon crystal lattice under high-temperature conditions. After cobalt diffusion, the intensity of the Si-Si peak sharply decreased to 2,700, and new Raman peaks appeared at 180, 272, and 358 cm^{-1} . These peaks confirm the formation of cobalt silicides (CoSi and CoSi₂). In the sample where the surface layer (3 μm) was removed, the Si-Si peak intensity recovered up to 8,500, while silicide peaks disappeared. These results indicate that the thickness of the cobalt silicide layer is within approximately 3 μm .

Keywords: n-Si, cobalt, diffusion, cobalt silicides, CoSi, CoSi₂, Raman spectroscopy, structural transformations, stress relaxation, microelectronics.

РАМАНОВСКИЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ n-ТИПА, ЛЕГИРОВАННОГО КОБАЛЬТОМ

Аннотация

В данной работе методом рамановской спектроскопии исследовано влияние диффузии кобальта (Co) на структурные и фазовые изменения в монокристаллическом кремнии n-типа (KEF-35 $\Omega \cdot \text{cm}$). В исходном образце пик оптического фоновна Si-Si наблюдался при 523,93 cm^{-1} с интенсивностью 11 500 условных единиц. В термически обработанном контрольном образце интенсивность пика увеличилась до 12 500, что свидетельствует о снижении внутренних напряжений в кристаллической решётке кремния под воздействием высокой температуры. После диффузии кобальта интенсивность пика Si-Si резко уменьшилась до 2 700, а также появились новые рамановские пики при 180, 272 и 358 cm^{-1} . Эти пики подтверждают образование силицидов кобальта (CoSi и CoSi₂). В образце с удалённым поверхностным слоем (3 мкм) интенсивность пика Si-Si восстановилась до 8 500, а пики силицидов исчезли. Эти результаты указывают на то, что толщина слоя силицидов кобальта составляет около 3 мкм.

Ключевые слова: n-Si, кобальт, диффузия, силициды кобальта, CoSi, CoSi₂, рамановская спектроскопия, структурные изменения, релаксация напряжений, микроэлектроника.

Kirish. Kobalt bilan legirlangan n-tipli monokristall kremniy namunalarida yuzaga keluvchi tuzilmaviy o'zgarishlarni Raman spektroskopiyasi yordamida aniqlash, asosiy fonon chizig'ining holati bo'yicha panjara simmetriyasining buzilishi, nuqsonlar hosil bo'lishi, ichki kuchlanishlarning o'zgarishi va kobaltga bog'liq yangi faza komponentlari shakllanishini baholashdan iborat. Ushbu yondashuv kobaltning kremniydagi fizik holati va uning material xossalari ta'sir mexanizmini aniqlashda muhim eksperimental asos bo'lib xizmat qiladi.

Mavzuga oid adabiyotlarning tahlili. Zamonaviy mikroelektronika, nanoelektronika va sensor tizimlarining jadal rivojlanishi yarimo'tkazgich materiallarning kristall tuzilishi, nuqsonli holati va fazalararo o'tishlarini chuqur o'rganishni talab

etmoqda. Bu sohada kremniy (Si) hozirgi kungacha eng asosiy texnologik material sifatida saqlanib qolmoqda, chunki u integral sxemalar, fotodiodlar, xotira elementlari, yuqori quvvatli elektronika va fotoelektrik qurilmalar tayyorlashda keng qo'llanilmoqda. Biroq kremniy asosidagi qurilmalarning ishonchligi, elektr barqarorligi va xizmat muddati ko'p jihatdan kristall panjaradagi nuqsonlar, ichki kuchlanishlar, kirishma atomlar va ular hosil qiladigan kompleks markazlar bilan belgilanadi. Ayniqsa, o'tuvchi metallar kremniy texnologiyasida muhim omil hisoblanadi, chunki ular kristallga kirib borib, chuqur energetik sathlar hosil qilishi, rekombinatsiya jarayonlarini kuchaytirishi va qurilma parametrlarini o'zgartirishi mumkin [1-3].

Shu nuqtai nazardan kobalt (Co) bilan legirlangan monokristall kremniyni tadqiq qilish ilmiy va amaliy jihatdan alohida dolzarb hisoblanadi. Bir tomondan, kobalt kremniyda chuqur nuqson markazlari va rekombinatsiya faol holatlarni yuzaga keltiruvchi o'tuvchi metall kirishmasi sifatida qaraladi, ikkinchi tomondan esa u kremniy bilan o'zaro ta'sirlashib, CoSi, Co₂Si va ayniqsa CoSi₂ kabi past qarshilikli, termik barqaror va texnologiya uchun muhim bo'lgan silisid fazalarni hosil qiladi [2-23]. Aynan shu ikki yoqlama xususiyat kobaltning bir vaqtning o'zida ham nuqson hosil qiluvchi kirishma, ham funksional silisid fazalar manbai bo'lishi uning kremniy kristallidagi holatini, joylashuv xususiyatini va panjaraga ta'sir mexanizmlarini aniqlashni muhim vazifaga aylantiradi. Mikroelektronikada kobalt silisidi past qarshilikli kontaktlar va silisid jarayonlarida qo'llanilgani, biroq Co ning tez diffuziyalanuvchi o'tish metall sifatida texnologik xavfini ham oshirishi qayd etilgan. Shuning uchun n-tipli monokristall kremniyda kobalt atomlarining kiritilishi natijasida yuzaga keladigan tuzilmaviy o'zgarishlar, nuqsonlar evolyusiyasi va yangi fazalar shakllanishini o'rganish nafaqat fundamental nuqtai nazardan, balki amaliyot uchun ham katta ahamiyatga ega.

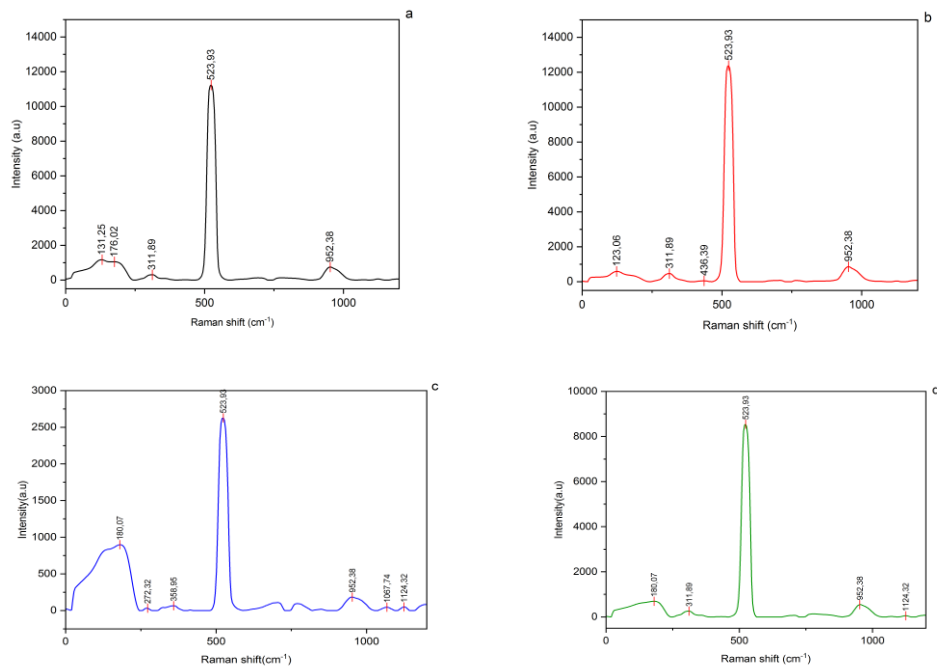
Tadqiqot metodologiyasi. Tajribani bajarish KEF-35 Ω·cm (n-Si) qarshilikka ega bo'lgan monokristalli kremniy namunalari tanlangan. So'ngra 7-bosqichda to'liq kimyoviy tozalash bosqichidan o'tkazildi[4].

Tozalashdan so'ng, kremniy yuzasiga yuqori toza (99,999%) kobalt atomlar bug'lantirildi. Tayyorlangan namunalari toza kvarts ampulalariga joylashtirildi. Dastlab ampula ichida vakuum (10⁻⁴ Torr) hosil qilindi va 12 soat davomida 1200°C haroratda diffuziya qilindi.

Tahlil va natijalar. Kobalt diffuziyasining kremniy strukturasi ta'sirini va hosil bo'lgan silisid fazalarini aniqlash maqsadida barcha namunalar 785 nm to'lqin uzunlikdagi lazer bilan jihozlangan Raman spektrometrida o'rganildi. 1-rasmda to'rtta namunaning spektrlari keltirilgan.

Dastlabki kremniy namunasida asosiy Raman cho'qqisi 523,93 sm⁻¹ da kuzatildi (intensivlik ≈ 11500 nisbiy birlik). Sof kristall kremniy uchun birinchi tartibli optik fonon (LO) odatda 520,5–521,0 sm⁻¹ oralig'ida qayd etiladi [6, 7]. Ushbu cho'qqining bizning namunamizda 523,93 sm⁻¹ da hosil bo'ldi [8, 9].

Bundan tashqari, dastlabki namunada quyidagi qo'shimcha cho'qqilar kuzatilgan 131 sm⁻¹ va 176 sm⁻¹ bu past chastotali cho'qqilar kremniyning ikki akustik fononli (LA+TA) yoki chegaraviy fonon sochilishiga bog'liq [10]. Ular, shuningdek, namuna sirtidagi amorf sohalar, mikrodefektlar yoki oksid qoldiqlari bilan bog'liq [11]. 311 sm⁻¹ bu cho'qqi kremniyning ikkinchi tartibli Raman spektriga kiradi (2TA yoki TO–TA kombinatsiyasi) [10]. Ba'zi tadqiqotlarda 300–315 sm⁻¹ oralig'idagi cho'qqilar amorf kremniy (a-Si) yoki kremniyning fosfor bilan kuchsiz bog'lanishini ko'rsatadi [12]. 952 cm⁻¹ bu cho'qqi odatda kremniyning ikki fononli (2TO) sochilishi bilan izohlanadi va sof kremniy uchun xarakterlidir [10].



1-rasm. Namunalarning Raman spektrlari keltirilgan: a) dastlabki n-Si (KEF-35 Ω·cm), b) 1200°C da 12 soat vakuumda termik ishlov berilgan nazorat namunasi (tez sovutilgan), c) kobalt diffuziya qilingan n-Si (1200°C, 12 h, tez sovutilgan), d) kobalt diffuziya qilingan va sirtidan 3 mkr qatlam olib tashlangan namuna.

Nazorat namunasi (termik ishlov berilgan, 1200°C, 12 h, tez sovutilgan) 1200°C da 12 soat vakuumda ishlov berilgan, kobalt diffuziyasi qo'llanilmagan namunada asosiy Si–Si cho'qqisi 523,93 sm⁻¹ da saqlanib qolgan, ammo intensivligi 12500 gacha oshgan. Bu intensivlik ortishi yuqori haroratli ishlov berish jarayonida kremniy panjarasidagi deformatsiyalarning

relaksatsiyasi va kristall sifatining yaxshilanishi bilan izohlanadi [8]. Vakuum sharoiti sirt oksidlanishini oldini oladi, shuning uchun cho'qqi holati o'zgaragan.

Nazorat namunasida quyidagi qo'shimcha o'zgarishlar kuzatilgan.

123 cm^{-1} cho'qqisi past chastotali bu cho'qqi yuqori haroratli ishlov berish natijasida sirt morfologiyasining o'zgarishi yoki nanokristallitlar hosil bo'lishi bilan bog'liq bo'lishi mumkin [11]. $0\text{--}200\text{ cm}^{-1}$ oralig'idagi keng pik intensivligi pasaygan bu sohadagi keng fon odatda amorf qatlam yoki sirt tartibsizliklari bilan bog'liq. Uning pasayishi yuqori haroratda sirtning qisman kristallanishi va tartibsizliklarning kamayishini ko'rsatadi [12]. 463 cm^{-1} cho'qqisi kremniyning ikkinchi tartibli spektridagi TO-LA kombinatsiyasiga to'g'ri keladi va sitda Si-O bog'lar hosil bo'lishi bilan izohlanadi [10]. 311 cm^{-1} va 952 cm^{-1} bu cho'qqilarning saqlanib qolishi va intensivliklarining o'zgarishi ishlov berishdan keyin ham kremniyning asosiy ikki fononli xususiyatlari saqlanganligini ko'rsatadi.

Kobalt diffuziya qilingan namuna (n-Si<Co>, 1200°C , 12 h, tez sovuylgan) Kobalt diffuziyasidan so'ng asosiy Si-Si cho'qqisi $523,93\text{ cm}^{-1}$ intensivligi 2700 gacha keskin kamaygan. Bu holat sirtida kobalt silitsidlarining (CoSi, CoSi₂) hosil bo'lganligini ko'rsatadi. Silitsid qatlami lazer nurlarining kremniy substratga yetib borishini to'sqinlik qiladi, shuning uchun substratdan keladigan Raman signali zaiflashadi.

Namunada quyidagi muhim o'zgarishlar kuzatilgan: $0\text{--}200\text{ cm}^{-1}$ oralig'ida 180 cm^{-1} da pik hosil bo'lib, intensivligi ancha oshgan bu cho'qqi kobalt silitsidlarining past chastotali tebranish rejimlari bilan bog'liq bo'lishi mumkin. Xususan, CoSi va CoSi₂ fazalari $150\text{--}200\text{ cm}^{-1}$ oralig'ida ham zaif Raman cho'qqilariga ega [8]. Intensivlikning ortishi silitsid qatlami hosil bo'lganligining muhim belgisidir. 272 cm^{-1} va 358 cm^{-1} da yangi cho'qqilar paydo bo'lgan bu cho'qqilar kobalt silitsidlariga xosdir. Adabiyotlarda CoSi fazasi uchun $\sim 305\text{ cm}^{-1}$ va $\sim 385\text{ cm}^{-1}$ cho'qqilari keng qayd etilgan [10]. CoSi₂ fazasi uchun $\sim 325\text{ cm}^{-1}$ cho'qqisi xarakterli [10]. Bizning namunangizda 272 cm^{-1} va 358 cm^{-1} cho'qqilari $305\text{--}385\text{ cm}^{-1}$ oralig'idagi silitsid cho'qqilarining biroz siljigan ko'rinishi bo'lishi mumkin. Siljish qoldiq kuchlanishlar yoki kobalt konsentratsiyasining fazoviy bir xilligi bilan hamda raman spektrometirning lazer nurining quvvati bilan izohlanadi [2-6]. 1200°C termodinamik jihatdan CoSi₂ hosil bo'lishi uchun yetarli yuqori haroratdir, biroq tez sovuylgan oraliq CoSi fazasining ham saqlanib qolishiga olib kelgan bo'lishi mumkin [2-4]. 952 cm^{-1} cho'qqisi saqlanib qolgan bu kremniyning ikki fononli sochilishiga tegishli bo'lib, silitsid qatlami ostidagi kremniy substratda ikki fononli jarayonlar hali ham kuzatilayotganligini ko'rsatadi.

Sirt qatlami olib tashlangan namuna (n-Si<Co>, 1200°C , 12 h, 3 mkr olingan). Kobalt diffuziya qilingan namunaning sirtidan 3 mkr qatlami olib tashlanganidan so'ng asosiy Si-Si cho'qqisi ($523,93\text{ cm}^{-1}$) intensivligi 8500 gacha oshgan. Bu intensivlik dastlabki namunadagi (11500) va nazorat namunadagi (12500) qiymatlardan hali ham past, ammo kobalt diffuziya qilingan namunadagi (2700) qiymatga nisbatan sezilarli darajada yuqori.

Namunada quyidagi o'zgarishlar kuzatilgan: $0\text{--}200\text{ cm}^{-1}$ oralig'ida 180 cm^{-1} cho'qqisi mavjud, ammo intensivligi biroz pasaygan sirtidan olib tashlash jarayoni silitsid qatlamining asosiy qismini olib tashlagan, shuning uchun silitsidlarga tegishli past chastotali signal kamaygan. Biroq 180 cm^{-1} cho'qqisining butunlay yo'qolmagani, kobaltning bir qismi kremniy ichiga chuqurroq kirganligi yoki olib tashlashdan keyin ham juda yupqa qoldiq qatlam saqlanib qolganligini ko'rsatadi. 311 cm^{-1} va 952 cm^{-1} cho'qqilari mavjud. 311 cm^{-1} cho'qqisi (kremniyning ikkinchi tartibli spektri) va 952 cm^{-1} cho'qqisi (2TO) kremniy substratining Raman signallari qayta tiklanganligini ko'rsatadi. 272 cm^{-1} va 358 cm^{-1} cho'qqilarining yo'qolishi – bu cho'qqilar kobalt silitsidlariga tegishli bo'lib, ularning yo'qolishi silitsid qatlamining asosan sirtga yaqin (3 mkr dan yuqaroq qatlamda) joylashganligini tasdiqlaydi [1-5].

Kremniy cho'qqisining intensivlik o'zgarishi kobalt silitsidlanish jarayonining eng muhim belgisidir. Dastlabki namunada 11500 bo'lgan intensivlik, termik ishlovdan so'ng (nazorat) 12500 gacha oshadi – bu deformatsiyalar kamayishi va kristall sifatining yaxshilanishi bilan izohlanadi [4-6]. Kobalt diffuziyasidan so'ng intensivlik 2700 gacha keskin tushadi – bu sirtida optik shaffof bo'lmagan silitsid qatlami hosil bo'lganligini ko'rsatadi [3-7]. Sirtidan 3 mkr olib tashlagandan so'ng intensivlik 8500 gacha tiklanadi, bu silitsid qatlamining qalinligi 3 mkr dan kichik ekanligini tasdiqlaydi.

Yangi cho'qqilarning paydo bo'lishi 272 cm^{-1} va 358 cm^{-1} cho'qqilari kobalt silitsidlarining Raman spektrlariga mos keladi. Adabiyotlarda CoSi uchun 305 cm^{-1} va 385 cm^{-1} , CoSi₂ uchun 325 cm^{-1} cho'qqilari qayd etilgan [4-9]. Bizning namunamizda bu cho'qqilarning 272 cm^{-1} va 358 cm^{-1} ga siljishi qoldiq siqish kuchlanishlari yoki kobalt konsentratsiyasining fazoviy bir xilligi bilan bog'liq [5-12]. 180 cm^{-1} cho'qqisining intensivligining keskin ortishi ham silitsid fazalari hosil bo'lganligini tasdiqlaydi.

Past chastotali sohadagi ($0\text{--}200\text{ cm}^{-1}$) o'zgarishlar – nazorat namunasida bu sohadagi keng pik intensivligi pasaygan, bu yuqori haroratda sirtning qisman kristallanishi va amorf qatlamning kamayishini ko'rsatadi [12]. Kobalt diffuziya qilingan namunada esa 180 cm^{-1} da yangi pik paydo bo'lib, intensivligi oshgan – bu silitsid qatlami hosil bo'lishining yana bir dalilidir.

311 cm^{-1} va 952 cm^{-1} cho'qqilari kremniyning ikkinchi tartibli Raman spektriga tegishli bo'lib, ularning kobalt diffuziya qilingan namunada zaiflashishi, sirtidan olib tashlangandan so'ng esa qayta kuchayishi, silitsid qatlamining optik ekranlash effektini yana bir bor tasdiqlaydi [10].

Xulosa va takliflar. Xulosa qilib aytganda ushbu tadqiqotda kobalt diffuziyasining n-Si (KEF-35 $\Omega\cdot\text{cm}$) namunalarning strukturaviy va fazoviy xususiyatlariga ta'siri Raman spektroskopiyasi yordamida atroflicha o'rganildi. Olingan natijalar asosida quyidagi asosiy xulosalarga kelindi:

1200°C da 12 soat vakuumda ishlov berish (kobalt diffuziyasiz) kremniy panjarasidagi qoldiq deformatsiyalarning relaksatsiyasiga olib keladi. Bu holat Si-Si Raman cho'qqisi intensivligining 11500 dan 12500 gacha ortishi va past chastotali ($0\text{--}200\text{ cm}^{-1}$) sohadagi keng fon intensivligining pasayishi bilan tasdiqlanadi. Natijada kristall sifati yaxshilanadi va sirt tartibsizliklari kamayadi.

Kobalt diffuziyasidan so'ng Si-Si cho'qqisi intensivligi 12500 dan 2700 gacha keskin kamaydi. Shu bilan birga, 180 cm^{-1} , 272 cm^{-1} va 358 cm^{-1} da yangi Raman cho'qqilari paydo bo'ldi. Adabiyotlar bilan taqqoslash natijasida ushbu cho'qqilar kobalt silitsidlarining (CoSi va CoSi₂) hosil bo'lganligini tasdiqlaydi. 1200°C harorat CoSi₂ fazasining shakllanishi uchun yetarli bo'lsa-da, tez sovuylgan sharoitda oraliq CoSi fazasining qoldiqlari saqlanib qolgan. Raman cho'qqilarining adabiyotlardagi qiymatlarga

(305 sm^{-1} va 385 sm^{-1}) nisbatan siljishi (272 sm^{-1} va 358 sm^{-1}) qoldiq siqish kuchlanishlari yoki kobalt konsentratsiyasining fazoviy notekisligi bilan izohlanadi.

Sirt qatlami (3 mkr) olib tashlangan namunada Si-Si cho'qqisi intensivligi 8500 gacha tiklandi, silitsidlarga tegishli 272 sm^{-1} va 358 sm^{-1} cho'qqilari butunlay yo'qoldi, 180 sm^{-1} cho'qqisi intensivligi esa sezilarli darajada kamaydi. Bu holat kobalt silitsid qatlami asosan sirtga yaqin hududda joylashganligini va uning qalinligi 3 mikron oraliqda ekanligini isbotlaydi. Qolgan 180 sm^{-1} cho'qqisining to'liq yo'qolmagani, kobaltning bir qismi kremniy ichiga chuqurroq diffuziyalanganligi yoki olib tashlashdan keyin juda yupqa qoldiq qatlam saqlanib qolganligini ko'rsatadi.

ADABIYOTLAR

1. Daliev K.S., Utamuradova Sh.B., Khaitbaev A., Khamdamov J.J., Norkulov Sh.B., and M.B. Bekmuratov, "Defective Structure of Silicon Doped with Dysprosium," *East Eur. J. Phys.* (2), 283 (2024). <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2024-2-30>
2. X. Kong, Z. Xi, L. Wang, Y. Zhou, Y. Liu, et al., "Recent Progress in Silicon-Based Materials for Performance Enhanced Lithium Ion Batteries," *Molecules*, 28(5), 2079 (2023). <https://doi.org/10.3390/molecules28052079>
3. K.S. Daliev, S.B. Utamuradova, A. Khaitbaev, J.J. Khamdamov, S.B. Norkulov, and M.B. Bekmuratov, "Defective Structure of Silicon Doped with Dysprosium," *East Eur. J. Phys.* (2), 283-287 (2024). <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2024-2-30>
4. E. Smith, G. Dent, *Modern Raman Spectroscopy: A Practical Approach*, Wiley, 2019.
5. B. Graczykowski, M. Guedes, M. Almeida, R. R. Reiche, "Raman spectral imaging—A nondestructive, high resolution analysis technique for local stress measurements in silicon," *Vib. Spectrosc.*, vol. 42, no. 1, pp. 93–97, 2006.
6. P. A. Temple, C. E. Hathaway, "Multiphonon Raman Spectrum of Silicon," *Phys. Rev. B*, vol. 7, no. 8, pp. 3685–3697, 1973.
7. K. Uchida, A. Nara, T. Ito, "Raman scattering from Si-SiO₂ interface," *J. Appl. Phys.*, vol. 81, no. 1, pp. 269–274, 1997.
8. Tallant D. R., Headley T. J., J. R. Simpson, D. J. Smith, "Raman spectroscopy of nanocrystalline and amorphous silicon," *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, vol. 358, pp. 109–114, 1995.