

PAPER

MIS BILAN LEGIRLANGAN MONOKRISTAL KREMNIYDA STRUKTURAVIY O'ZGARISHLARNING (111) VA (333) REFLEKSIYALAR ASOSIDAGI RENTGEN-DIFRAKSION TAHLILI

Nuriddin Yunisali o'gli Yunisaliyev^{1,*}, Fayzullo Akramjon o'gli Abdulkhaev¹,
Moxirabonu Murodil qizi Arabboyeva¹, G'aybullo G'iyosiddin o'gli Tojiboyev¹

¹ Andijon davlat universiteti

* yunusaliyev1997@gmail.com

Abstract

Ushbu ishda termodiffuziya usuli bilan mis kiritilgan yakka kristall n-Si namunalarining strukturaviy holati rentgen-difraksion usul yordamida (111) va (333) refleksiylar profilari asosida tahlil qilindi. Tadqiqot natijalari legirlangan namunalarda difraksion maksimumlar shakli, intensivligi va ajralish xususiyatlarida sezilarli o'zgarishlar yuzaga kelishini ko'rsatdi. (111) refleksiyaning profilida kengayish, assimetriya va qisman ajralish belgilari kuzatildi, bu esa kristall panjarada lokal elastik kuchlanishlar hamda mikrodeformatsiyalar mavjudligini ko'rsatadi. (333) refleksiya sohasida esa pikning yanada aniq ajralishi va qo'shimcha komponentning namoyon bo'lishi yuqori tartibli refleksiylarning strukturaviy buzilishlarga sezgirlikni tasdiqlaydi. Olingan natijalar mis diffuziyasi natijasida kristall panjarada bir jinsli bo'lmagan deformatsion holat shakllanishi mumkinligini va bunday o'zgarishlar, ayniqsa, sirtga yaqin qatlamlarda kuchliroq namoyon bo'lishini ko'rsatadi. Mazkur tahlil mis bilan legirlangan kremniyda diffuziya bilan bog'liq strukturaviy o'zgarishlarni baholashda (111) va (333) refleksiylarning muhim diagnostik ahamiyatga ega ekanini ko'rsatadi.

Key words: mis bilan legirlangan kremniy, yakka kristall n-Si, termodiffuziya, rentgen-difraksion tahlil, (111) refleksiya, (333) refleksiya, strukturaviy o'zgarishlar, elastik kuchlanishlar, mikrodeformatsiyalar, panjara buzilishlari.

KIRISH

Kremniy asosidagi yarimo'tkazgich materiallar zamonaviy mikroelektronika, optoelektronika

Compiled on: April 15, 2026.

Copyright: ©2026 by the authors. Submitted to *Advances in Science and Environment* for possible open access publication under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution \(CC BY\) 4.0 license](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

va funksional qurilmalar texnologiyasida eng muhim konstruksion hamda aktiv materiallardan biri hisoblanadi. Kremniyning elektr, mexanik va strukturaviy xossalari uning kristall panjarasi mukammalligi, kirishmalar tarkibi, nuqsonlar holati va termik ishlovga bog'liq bo'ladi. Shu sababli kremniy monokristallarida yuzaga keladigan strukturaviy o'zgarishlarni aniqlash va ularni fizik jihatdan talqin qilish materialshunoslik hamda yarimo'tkazgich texnologiyasi uchun dolzarb ilmiy masalalardan biri hisoblanadi. Yarimo'tkazgichlarning xossalarini boshqarishning asosiy usullaridan biri legirlash hisoblanadi. Kristall panjaraga kiritilgan kirishma atomlari, ayniqsa diffuziya yo'li bilan kiritilgan metall atomlari, panjara parametrlariga, ichki kuchlanish holatiga, nuqsonlar taqsimotiga hamda lokal strukturaviy muvozanatga sezilarli ta'sir ko'rsatishi mumkin[1]. Bunday ta'sir natijasida kristall panjarada mikrodeformatsiyalar, elastik kuchlanishlar, atom tekisliklari orasidagi masofalarning lokal o'zgarishi, shuningdek difraksion chiziqlarda turli buzilishlar yuzaga keladi. Aynan shunday nozik o'zgarishlarni aniqlash va baholash yuqori eksperimental usullardan foydalanishni talab etadi. Metall kirishmalar ichida mis kremniydagi yuqori diffuziya harakatchanligi bilan alohida ajralib turadi. Yuqori haroratda mis atomlari kristall hajmi bo'ylab faol tarqalishi, energetik jihatdan qulay yoki nuqsonlarga boy sohalarda to'planishi mumkin. Mis bilan legirlangan kremniy nafaqat amaliy, balki fundamental nuqtai nazardan ham qiziqish uyg'otadi. Ayniqsa, Czochralski usulida o'stirilgan kremniyda kislorod bilan bog'liq ichki tuzilma elementlarining mavjudligi diffuziya jarayonlari va strukturaviy qayta tashkil topishlarning xarakteriga qo'shimcha ta'sir ko'rsatishi mumkin[2]. Kremniy monokristallarida legirlash yoki termik ishlovdan keyin yuzaga keladigan strukturaviy holatni o'rganishda rentgen-difraksion tahlil usuli eng eng samarali usullardan biri hisoblanadi. Mazkur usul difraksion maksimumlarning burchak holati, intensivligi, kengligi va shaklining o'zgarishi orqali kristall panjaradagi deformatsion holat, nuqsonlanish darajasi va strukturaviy notekisliklar haqida muhim ma'lumot beradi. Refleksiyalarning kengayishi mikrodeformatsiyalar va sochilish sohalari mavjudligini, assimetriya esa panjaradagi bir jinsli bo'lmagan kuchlanishlar yoki qatlamlar

bo'yicha turlicha strukturaviy holatni ko'rsatishi mumkin. Piklarning qisman ajralishi esa kristall ichida bir-biridan farqlanuvchi deformatsion sohalar mavjudligini bilvosita ko'rsatadigan muhim belgilardan biri sifatida qaraladi. Shu nuqtai nazardan kremniyning asosiy va yuqori tartibli difraksion refleksiyalarini qiyosiy tahlil qilish alohida ahamiyatga ega[3]. Ayniqsa, (111) refleksiya kremniy panjarasining umumiy strukturaviy holatini tavsiflashda muhim bo'lsa, (333) kabi yuqori tartibli refleksiya kichik strukturaviy buzilishlar va lokal deformatsion o'zgarishlarga nisbatan sezgirroq bo'lishi mumkin. Demak, ushbu ikkala refleksiyani birgalikda tahlil qilish mis diffuziyasidan keyin kristall panjarada yuzaga kelgan o'zgarishlarni nisbatan ishonchliroq baholash imkonini beradi. Bunda asosiy e'tibor refleksiyalar profilining simmetriyadan chetlanishi, kengayish darajasi, ajralish xususiyati va nisbiy intensivliklar o'zgarishiga qaratilishi maqsadga muvofiqdir. Birinchidan, ular monokristall kremniyning strukturaviy holatini ifodalovchi sezgir difraksion chiziqlar hisoblanadi. Ikkinchidan, bu refleksiyalar profillaridagi o'zgarishlar orqali panjara mukammalligi, lokal elastik kuchlanishlar hamda mikrodeformatsiyalar to'g'risida bilvosita xulosa chiqarish mumkin. Uchinchidan, yuqori tartibli refleksiyalarning qo'shimcha sezgirliги diffuziya natijasida yuzaga kelgan nozik strukturaviy o'zgarishlarni aniqlashda muhim diagnostik imkoniyat yaratadi. Shu bois mazkur ishda to'liq fazaviy identifikatsiyadan ko'ra, asosan refleksiya profillarining strukturaviy diagnostik imkoniyatlariga urg'u berildi.

Adabiyotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, misning kremniydagi harakati ko'proq uning elektr faol markazlar hosil qilishi, rekombinatsiya jarayonlariga ta'siri yoki nuqsonlar bilan o'zaro ta'siri nuqtai nazaridan o'rganilgan[4]. Biroq mis bilan legirlangan kremniyda aynan difraksion chiziqlari o'zgarishini, (111) va (333) refleksiyalar asosida strukturaviy buzilishlar xarakterini qiyosiy baholash masalasi yetarli darajada yoritilmagan. Shu bois ushbu yo'nalishda o'tkaziladigan rentgen-difraksion tadqiqotlar kremniy panjarasidagi deformatsion holatni aniqlashtirish va diffuziya bilan bog'liq strukturaviy jarayonlarni chuqurroq tushunishga xizmat qiladi. Tadqiqotda asosiy e'tibor (111) va (333) refleksiyalar profillarini

tahlil qilishga qaratilib, ular asosida panjara deformatsiyasi, mikrodeformatsiyalar, refleksiya assimetriyasi va strukturaviy notekisliklar bilan bog'liq belgilarni aniqlash ko'zda tutiladi. Ishda refleksiyalar shakli va xususiyatlari asosida mis diffuziyasi natijasida kristall panjarada yuzaga kelgan o'zgarishlar baholanadi hamda mazkur refleksiyalarning strukturaviy diagnostika nuqtai nazaridan imkoniyatlari ko'rib chiqiladi. Olingan natijalar mis bilan legirlangan kremniyda diffuziya bilan bog'liq strukturaviy o'zgarishlarni tushunish va keyingi tadqiqotlar uchun muhim ahamiyatga ega.

MATERIALLAR VA USULLAR

Tadqiqot obyekti sifatida Czochralski usulida o'stirilgan n-tipli yakka kristall kremniy namunalari tanlandi. Misni kremniy panjarasiga kiritish yuqori haroratli termodiffuziya usuli yordamida amalga oshirildi. Buning uchun namunalar 1423 K haroratda issiqlik ishlovidan o'tkazildi va keyinchalik belgilangan sovitish rejimi bo'yicha sovitildi. Ushbu yondashuv diffuziya jarayonidan so'ng kremniy kristall panjarasida yuzaga kelgan strukturaviy holatni rentgen-difraksion usul bilan tahlil qilish imkonini berdi[5]. Namunalarning strukturaviy holatini o'rganish rentgen difraksion tahlil usuli yordamida bajarildi. O'lchovlar yuqori aniqlikdagi optik sxemaga ega rentgen difraktometrda amalga oshirildi. Difraksion spektrlarni qayd etishda kristall panjara holatiga sezgir bo'lgan refleksiyalar tanlandi. Asosiy strukturaviy chiziqli bo'lgan (111) refleksiya hamda yuqori tartibli (333) refleksiya alohida tahlil qilindi. Mazkur refleksiyalarni tanlashdan maqsad diffuziya jarayonidan keyin refleksiya profilida yuzaga keladigan nozik o'zgarishlarni o'rganishdan iborat bo'ldi. Difraksion ma'lumotlarni tahlil qilishda refleksiyalarning burchak holati, intensivligi va profil shakli asosiy mezon sifatida qabul qilindi. Tahlil jarayonida maksimumlarning kengayishi, assimetriyasi va ajralish darajasiga alohida e'tibor qaratildi, chunki bunday belgilar kristall panjaradagi deformatsion holat haqida muhim ma'lumot beradi. Pik holatining o'zgarishi tekisliklararo masofalardagi ehtimoliy siljishlarni baholash uchun, profil shaklining o'zgarishi esa lokal kuchlanishlar va strukturaviy notekisliklar bilan bog'liq xususiyatlarni aniqlash uchun

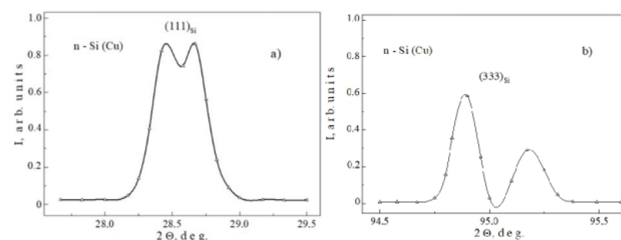
qo'llanildi. (111) va (333) refleksiyalar profillarining o'zaro qiyosiy tahlili termodiffuziyadan keyingi strukturaviy holatni tavsiflashning asosiy metodik bosqichi sifatida tanlandi[6]. Olingan rentgen-difraksion natijalar legirlangan namunalardagi refleksiya monokristall kremniyga xos difraksion ko'rinish asosida tahlil qilindi. Bunda asosiy e'tibor refleksiyalarning simmetriyadan chetlanishi, chiziqli profilining murakkablashishi va yuqori tartibli refleksiyalarda o'zgarishlarning ifodalanish darajasiga qaratildi. Mazkur yondashuv mis diffuziyasidan keyin kristall panjarada yuzaga kelgan strukturaviy o'zgarishlarni aniqlash va ularni keyingi fizik talqin uchun ishonchli eksperimental asos bilan ta'minlashga xizmat qildi.

NATIJALAR VA MUHOKAMA

Mis bilan legirlangan yakka kristall n-Si namunalarning rentgen-difraksion tahlili termodiffuziya jarayonidan so'ng kristall panjarada ma'lum strukturaviy o'zgarishlar yuzaga kelganini ko'rsatdi. Tadqiqotda asosiy e'tibor strukturaviy holatga sezgir bo'lgan (111) va (333) refleksiyalar profillarini qiyosiy tahlil qilishga qaratildi. Olingan natijalar legirlangan namunada difraksion maksimumlarning shakli, intensivligi va ajralish xususiyatlari dastlabki monokristall kremniy holatiga nisbatan o'zgarganini ko'rsatadi. (111) refleksiyaning intensivligi ortgani va unga mos tekisliklararo masofada kichik siljish kuzatilgani qayd etildi. Bu holat kristall panjaraning ideal holatida ma'lum darajada o'zgarish yuz berganini va mis diffuziyasi natijasida panjarada bir jinsli bo'lmagan deformatsion holat shakllanishi mumkinligini ko'rsatadi. Shu bilan birga, (333) refleksiya intensivligining kamayishi hamda uning profilidagi o'zgarishlar yuqori tartibli refleksiyaning strukturaviy buzilishlarga sezgirroq ekanini ko'rsatadi[7]. Umuman, (111) va (333) refleksiyalarining qiyosiy tahlili mis kiritilgandan keyin kristallning turli qatlamlarida strukturaviy holat bir xil bo'lmashligi mumkinligini anglatadi. (111) refleksiya sohasida kuzatilgan natijalar alohida e'tiborga loyiqdir. Mazkur refleksiya yuqori intensivlikka ega bo'lib, namunada monokristall holat to'liq yo'qolmaganini, ya'ni kristall panjaraning umumiy tartiblilik saqlanib qolganini bildiradi. Biroq refleksiya profilining ideal simmetrik maksimumdan ma'lum darajada

chetlanishi, cho'qqining kengayishi va qisman ajralishga moyilligi panjarada lokal elastik kuchlanishlar hamda mikrodeformatsiyalar mavjud bo'lishi mumkinligini ko'rsatadi. Bunday o'zgarishlar mis atomlarining kristall hajmi bo'ylab mutlaqo bir tekis taqsimlanmaganligi, ayniqsa sirtga yaqin qatlamlarda deformatsion ta'sir kuchliroq namoyon bo'lishi bilan izohlanishi mumkin. Shunday qilib, (111) refleksiya nafaqat kristall mukammalligining saqlanish darajasini, balki diffuziya natijasida yuzaga kelgan lokal strukturaviy siljishlarni ham aks ettiruvchi muhim diagnostik ko'rsatkich sifatida namoyon bo'ladi. (333) refleksiya sohasida kuzatilgan o'zgarishlar esa strukturaviy holatni yanada chuqurroq baholash imkonini beradi. Yuqori tartibli refleksiya sifatida bu chiziq panjaradagi kichik buzilishlarga nisbatan sezgirroq bo'lgani sababli, uning profilidagi ajralish, intensivlikning kamayishi va qo'shimcha komponentning paydo bo'lishi legirlangan namunadagi nozik strukturaviy o'zgarishlarning muhim belgisi sifatida qaraladi. Ayniqsa, asosiy maksimum yonida qo'shimcha hissaning kuzatilishi kristall ichida strukturaviy holati bir-biridan farqlanuvchi lokal sohalar mavjud bo'lishi mumkinligini ko'rsatadi[8]. Bu esa termodiffuziya jarayonidan keyin kristall panjarada bir jinsli bo'lmagan deformatsion muhit shakllanganini taxmin qilish imkonini beradi. Shu ma'noda, (333) refleksiya profili (111) refleksiya bilan birgalikda qaralganda mis bilan legirlangan kremniyda diffuziya ta'siri ostida yuzaga keladigan strukturaviy o'zgarishlarni yanada ishonchliroq talqin qilishga yordam beradi. (111) va (333) refleksiyalar asosida olingan natijalar mis diffuziyasi yakka kristall n-Si panjarasining ideal holatiga ma'lum darajada ta'sir ko'rsatishini, bu ta'sir esa refleksiya profillarining shakli, intensivligi va ajralish darajasidagi o'zgarishlarda namoyon bo'lishini ko'rsatadi. Kuzatilgan xususiyatlar kristall panjarada lokal elastik kuchlanishlar, mikrodeformatsiyalar va qatlamlar bo'yicha farqlanuvchi strukturaviy holat shakllanishi mumkinligini anglatadi[9]. Shunday qilib, (111) va (333) refleksiyalarining rentgen-difraksion tahlili mis bilan legirlangan kremniyda diffuziya bilan bog'liq strukturaviy o'zgarishlarni baholashda muhim usul sifatida xizmat qiladi.

(333) refleksiya sohasidagi natijalar strukturaviy



1-rasm. Yakka kristall n-Si (Cu) ning (111) va (333) refleksiya spektrlari

o'zgarishlarni chuqurroq talqin qilish imkonini berdi. Ushbu refleksiyaning deyarli to'liq ajralishi va intensivliklarning K_{α} dubletiga xos nisbatda namoyon bo'lishi namunaning chuqurroq qatlamlarida kremniy panjarasi nisbatan yaxshiroq saqlanganini ko'rsatadi. Demak, asosiy deformatsion o'zgarishlar asosan sirtga yaqin sohalarida jamlangan. Biroq, aynan (333) refleksiya sohasida asosiy maksimumning o'ng qanotida qo'shimcha selektiv refleksiyaning paydo bo'lishi kristall matritsasi tashqari yangi fazaviy hissa mavjudligini ko'rsatadi. Maqola talqiniga ko'ra, ushbu refleksiya Cu_2O nanokristallari bilan bog'liq bo'lib, ularning xarakterli o'lchami taxminan 17 nm ga teng. Eksperimental ravishda aniqlangan panjara parametri standart qiymatdan biroz katta bo'lgani sababli, hosil bo'lgan nanofaza kremniy matritsasining ichki kuchlanishlari ta'sirida shakllangani xulosa qilinadi[10].

O'rta burchaklar sohasida kuzatilgan diffuz sochilish va uning fonida qayd etilgan uchta qo'shimcha selektiv refleksiya ham yangi faza hosil bo'lishining muhim dalili hisoblanadi. Ularning tahlili maqolada CuO monoklinik nanokristallariga tegishli deb ko'rsatilgan. Ushbu CuO fazaning o'rtacha o'lchami 14–14.5 nm atrofida ekani, eksperimental panjara parametrlari esa ma'lumotnoma qiymatlaridan bir oz farq qilishi aniqlangan. Bu farq yangi fazaning erkin holatda emas, balki kremniy matritsasi ichida, ichki kuchlanishlar ta'sirida shakllanayotganini anglatadi. Shunday qilib, rentgen-difraksion natijalar mis diffuziyasi faqat panjara deformatsiyasiga emas, balki oksid tipidagi nanofazalar shakllanishiga ham olib kelganini ko'rsatadi. SiO_2 ga tegishli refleksiyaning saqlanib qolishi va uning intensivligining kamayishi ham muhim natija hisoblanadi. Bu holat namunada kislorodli cho'kmalar mavjudligini tasdiqlaydi. Maqolada aynan shu cho'kmalar atrofida lokal elastik maydonlar hosil bo'lib, ular tez

diffuziyanuvchi mis atomlarini o'ziga tortishi va natijada CuO hamda Cu₂O tipidagi nanofazalarning yadrolanishiga qulay sharoit yaratishi ko'rsatilgan. Demak, kislorodli cho'kmalar bu tizimda passiv fon emas, balki diffuziya va fazaviy ajralish jarayonining faol strukturaviy markazlari sifatida namoyon bo'ladi. Umuman olganda, olingan natijalar mis bilan legirlangan kremniyda bir vaqtning o'zida ikki asosiy jarayon kechishini ko'rsatadi: birinchisi, sirt qatlamlarida elastik kuchlanishlar va lokal deformatsiyalar paydo bo'lishi; ikkinchisi, kislorodli cho'kmalar ishtirokida CuO va Cu₂O nanokristallarining shakllanishi. (111) refleksiyaning intensivligi va tekisliklararo masofasidagi o'zgarishlar panjara siljishini ko'rsatsa, (222) va (333) refleksiya intensivligining kamayishi hamda yangi selektiv chiziqlarning paydo bo'lishi chuqurroq strukturaviy qayta tashkil topishlar mavjudligini ko'rsatadi. Shunday qilib, termodiffuziya natijasida mis atomlari kremniy kristallida notekis taqsimlanib, yangi oksid nanofazalar bilan murakkab strukturaviy tizim hosil qiladi.

XULOSA

1423 K haroratda termodiffuziya usuli bilan mis kiritilgan monokristal n-Si namunalarning strukturaviy holati rentgen-difraksion usul yordamida o'rganildi. Tadqiqotda asosiy e'tibor (111) va (333) refleksiylarining profil xususiyatlarini tahlil qilishga qaratildi. Olingan natijalar mis diffuziyasi natijasida kremniy kristall panjarasida ma'lum strukturaviy o'zgarishlar yuzaga kelishini ko'rsatdi. Aniqlanishicha, legirlangan namunada (111) refleksiya intensivligining ortishi va unga mos tekisliklararo masofadagi kichik siljish kristall panjaraning ideal holatidan chetlanishini bildiradi. Shu bilan birga, (111) refleksiya profilida kuzatilgan kengayish, assimetriya va qisman ajralish belgilari kristall panjarada lokal elastik kuchlanishlar hamda mikrodeformatsiyalar mavjud bo'lishi mumkinligini ko'rsatadi. Bu holat, ayniqsa, sirtga yaqin qatlamlarda strukturaviy o'zgarishlar kuchliroq namoyon bo'lishi ehtimolini anglatadi. (333) refleksiya sohasida kuzatilgan intensivlik kamayishi, profilning aniqroq ajralishi va qo'shimcha komponentning paydo bo'lishi yuqori tartibli refleksiylarning strukturaviy buzilishlarga sezgirlikni tasdiqlaydi. (111) va (333)

refleksiylarining qiyosiy tahlili mis diffuziyasi natijasida kristall hajmi bo'ylab bir jinsli bo'lmagan deformatsion holat shakllanishi mumkinligini ko'rsatadi. Bu esa kristallning turli qatlamlarida strukturaviy holat bir xil emasligini anglatadi. Shunday qilib, mis bilan legirlangan yakka kristall n-Si namunalarda termodiffuziyadan so'ng refleksiya profilining shakli, intensivligi va ajralish xususiyatlarida kuzatilgan o'zgarishlar kristall panjarada lokal strukturaviy buzilishlar yuzaga kelganini ko'rsatadi. Olingan natijalar (111) va (333) refleksiylarining rentgen-difraksion tahlili mis bilan legirlangan kremniyda diffuziya bilan bog'liq strukturaviy o'zgarishlarni baholashda samarali yondashuv ekanini ko'rsatadi hamda bu yo'nalishdagi keyingi tadqiqotlar uchun muhim eksperimental asos bo'lib xizmat qiladi.

ADABIYOTLAR RO'YXATI

1. Das, G. (1973). Precipitation of copper in silicon. *Journal of Applied Physics*, 44(10), 4459–4467.
2. Sinno, T., Dornberger, E., von Ammon, W., Brown, R. A., & Dupret, F. (2000). Defect engineering of Czochralski single-crystal silicon. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 28(5–6), 149–198.
3. Heiser, T., Istratov, A. A., Flink, C., & Weber, E. R. (1999). Electrical characterization of copper related defect reactions in silicon. *Materials Science and Engineering: B*, 58(1–2), 149–154.
4. Estreicher, S. K. (2004). First-principles theory of copper in silicon. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 7(3), 101–111.
5. Bracht, H. (2004). Copper related diffusion phenomena in germanium and silicon. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 7(3), 113–124.
6. Xi, Z., Chen, J., Yang, D., Lawrenz, A., & Moeller, H. J. (2005). Copper precipitation in large-diameter Czochralski silicon. *Journal of Applied Physics*, 97(9), 094909.
7. Wang, W., Yang, D., Ma, X., & Que, D. (2008). Effect of silicon interstitials on Cu precipitation in n-type Czochralski silicon. *Journal of Applied Physics*, 103(9), 093534.

8. Wang, W., Yang, D., Ma, X., & Que, D. (2008). Copper precipitation in nitrogen-doped Czochralski silicon. *Journal of Applied Physics*, 104(1), 013508.
9. Xu, J., Wang, N., & Yang, D. (2012). Influence of oxygen precipitation on copper precipitation in Czochralski silicon. *Journal of Applied Physics*, 111(9), 094907.
10. Gaspar, G., Modanese, C., Bernardis, S., Enjalbert, N., Arnberg, L., Dubois, S., & Di Sabatino, M. (2022). Copper in compensated p- and n-type Czochralski silicon: Diffusivity, influence on the majority charge carrier density and mobility. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 248, 112024.