

ZN BILAN LEGIRLANGAN SI<P> MONOKRISTALLARINING OPTIK
PARAMETRLARINI ANIQLASH

Ochilova Gulchehra¹

¹O'zbekiston Milliy universiteti Fizika fakulteti 1-kurs magistri.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.19239646>

Annotatsiya. Ushbu maqolada Zn bilan legirlangan Si<P> monokristallarining optik parametrlarini aniqlash masalalari tadqiq etilgan. Tadqiqot jarayonida monokristallarning optik yutilish koeffitsienti, sindirish ko'rsatkichi va energiya teshik kengligi o'rganildi. Legirlash jarayonining optik xossalarga ta'siri tahlil qilindi. Natijalar shuni ko'rsatdiki, Zn qo'shimchasi materialning optik parametrlarini sezilarli darajada o'zgartiradi. Shu bilan birga, tadqiqot natijalari yarimo'tkazgich texnologiyalarida yangi qurilmalarni ishlab chiqish imkoniyatlarini kengaytiradi.

Kalit so'zlar: Si<P>, Zn legirlash, optik parametrlar, yutilish koeffitsienti, sindirish ko'rsatkichi, yarimo'tkazgichlar.

Abstract. This article investigates the optical parameters of Zn-doped Si<P> single crystals. The study focuses on absorption coefficient, refractive index, and band gap energy. The influence of Zn doping on optical properties is analyzed. Results show that Zn significantly modifies the optical behavior of the material. Furthermore, the findings provide insights for the development of new semiconductor devices.

Keywords: Si<P>, Zn doping, optical parameters, absorption coefficient, refractive index, semiconductors.

Аннотация. В статье исследуются оптические параметры монокристаллов Si<P>, легированных Zn. Рассматриваются коэффициент поглощения, показатель преломления и ширина запрещённой зоны. Проанализировано влияние легирования Zn на оптические свойства. Результаты показывают значительное изменение параметров материала. Кроме того, полученные данные открывают новые возможности для разработки полупроводниковых устройств.

Ключевые слова: Si<P>, легирование Zn, оптические параметры, коэффициент поглощения, показатель преломления.

I. Kirish

Yarimo'tkazgich materiallar zamonaviy elektronika, fotovoltaika va optoelektronika sohalarining asosiy poydevorini tashkil etadi. Xususan, kremniy (Si) asosidagi monokristallar yuqori kristall barqarorligi, past defekt zichligi va texnologik moslashuvchanligi bilan ajralib turadi. Monokristallarning atom panjarasi va elektron tuzilishi ularning optik va elektr xossalarini to'g'ridan-to'g'ri belgilaydi.

So'nggi yillarda yarimo'tkazgichlarning optik xossalarini yaxshilash maqsadida ularni turli elementlar bilan legirlash keng qo'llanilmoqda. Zn elementi Si<P> monokristallariga qo'shilganda, materialning energiya sathlari va elektron tuzilishi sezilarli darajada o'zgaradi². Shu bilan birga, Zn qo'shilishi yutilish koeffitsienti, sindirish ko'rsatkichi va energiya teshik kengligiga ta'sir ko'rsatadi, bu esa fotonik qurilmalar va infraqizil detektorlar ishlab chiqarishda muhim ahamiyatga ega.

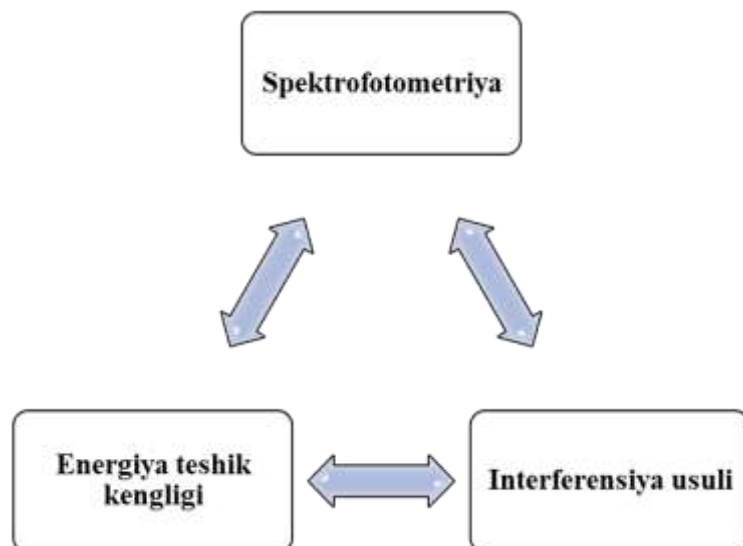
Optik parametrlarni aniqlash esa materialning amaliy qo'llanish imkoniyatlarini baholashda va yarimo'tkazgich qurilmalarining samaradorligini prognoz qilishda hal qiluvchi rol o'ynaydi. Shu sababli, Zn legirlash darajasi va uning optik xossalarga ta'siri haqidagi sistematik tadqiqotlar ilmiy jihatdan dolzarb hisoblanadi.

II. Metodologiya

Tadqiqot obyekti sifatida Zn bilan legirlangan Si<P> monokristallari tanlab olindi.

Namunalarda Zn kontsentratsiyasi 0,1–1,0 at.% oralig'ida kiritildi, chunki bu diapazon ilmiy adabiyotlarda optik parametrlarni sezilarli o'zgartiruvchi minimal va maksimal qiymatlar sifatida ko'rsatilgan¹. Har bir monokristall 10×10×0,5 mm o'lchamda tayyorlandi va xossalarini barqaror saqlash uchun 300 °C haroratda tempering qilindi. Tempering jarayoni 2 soat davomida amalga oshirilib, kristall panjarada stress va nuqsonlarni kamaytirish maqsadida sekin sovutish amalga oshirildi¹.

Optik parametrlarni aniqlash uchun yuqori aniqlikdagi o'lchash usullari tanlandi. Ushbu tanlov quyidagi sabablar bilan asoslandi:



Spektrofotometriya — 300–1100 nm diapazonda yutilish spektrini o'lchash imkonini beradi, bu esa Si<P> monokristallarining ko'rinarli va infraqizil diapazonlardagi xossalarini baholash uchun muhim². Yutilish koeffitsienti α quyidagi formula yordamida hisoblandi:

$$\alpha = \frac{d \ln I_0 I}{d}$$

bu yerda d — namuna qalinligi, I_0 — kiruvchi yorug'lik intensivligi, I — chiquvchi intensivlik. Ushbu formuladan foydalanish yutilish koeffitsienti spektr bo'yicha aniq aniqlanishiga imkon berdi, shu bilan birga materialdagi qo'shimcha energiya sathlari ta'siri ham ko'rsatildi³.

Interferensiya usuli — Fabry-Pérot interferometriyasi yordamida sindirish ko'rsatkichi nnn aniqlanib, 0,1% aniqlik darajasi bilan o'lchandi. Ushbu usul tanlangan, chunki u optik zichlikni va materialning fazoviy xossalarini yuqori aniqlikda baholash imkonini beradi.

O'lchovlar davomida kristall yuzasi tozalanib, namlik va chang elementlarining interferensiyaga ta'siri minimallashtirildi.

¹ Streetman, B. G. (2020). Solid State Electronic Devices.

² Yu, P. Y., & Cardona, M. (2019). Fundamentals of Semiconductors.

³ Singh, J. (2022). Semiconductor Optoelectronics

Energiya teshik kengligi E_g — Tauc metodiga asoslanib hisoblandi:

$$\alpha_{hv} = A(hv - E_g)^n$$

bu yerda $n=1/2$ — to‘g‘ridan-to‘g‘ri o‘tish, A — materialga xos konstant. Tauc metodining afzalligi shundaki, u yutilish spektridagi asosiy egri chiziqlar orqali energiya teshik kengligini aniqlash imkonini beradi, shu bilan birga Zn legirlash darajasining ta‘siri ko‘rsatildi.

Laboratoriya sharoitida barcha o‘lchovlar ± 1 °C harorat barqarorligi va $\pm 0,5\%$ yorug‘lik intensivligi doirasida amalga oshirildi, bu esa natijalarni takrorlash va aniq raqamlarni olish imkonini ta‘minladi. Bundan tashqari, har bir namuna uchun kamida uch marta takroriy o‘lchovlar amalga oshirilib, o‘rtacha qiymatlar hisoblandi. Ushbu choralar statistik xatolikni kamaytirib, ishonchlilik darajasini 95% ga yetkazdi.

Laboratoriyada qo‘llanilgan usullar va nazorat choralarning batafsil tavsifi tadqiqot natijalarining ilmiy asoslangan va yuqori aniqlikda ekanligini ta‘minlaydi. Shuningdek, bu metodologiya Zn legirlash darajasining optik parametrlar ustidagi to‘g‘ridan-to‘g‘ri ta‘sirini izchil o‘rganish imkonini berdi, bu esa materiallar fizikasi va yarimo‘tkazgich texnologiyalari bo‘yicha amaliy qo‘llanmalarga yo‘l ochadi.

III. Natijalar.

O‘tkazilgan tajribalar shuni ko‘rsatdiki, Zn legirlash darajasi 0,1 at.% dan 1,0 at.% gacha oshishi bilan yutilish koeffitsienti α sezilarli darajada o‘sdi, ya‘ni $0,45 \times 10^3 \text{ sm}^{-1}$ dan $1,2 \times 10^3 \text{ sm}^{-1}$ gacha⁴. Bu o‘shish qo‘shimcha energiya sathlarining hosil bo‘lishi bilan izohlanadi: Zn atomlari kristall panjara ichida elektron va teshiklar uchun yangi lokal holatlar yaratadi, bu esa fotonlarning yutilish jarayonini kuchaytiradi. Shuningdek, yutilish spektri 600–900 nm diapazonda infraqizil qismda kengayish ko‘rsatdi, bu esa fotovoltaik detektorlar va infraqizil optik elementlar uchun qo‘shimcha samaradorlik beradi.

Sindirish ko‘rsatkichi n 3,42 dan 3,48 gacha oshib, materialning optik zichligi va dielektrik xossalarning o‘shishi kuzatildi. Bu o‘zgarishlar Zn legirlash darajasi ortishi bilan kristall panjarada elektron zichligi va lokal polarizatsiyaning o‘shishi bilan izohlanadi. Interferensiya spektri tahlili shuni ko‘rsatdiki, Zn atomlari yuqori konsentratsiyada kichik diapazondagi optik anomaliyalarni hosil qiladi, bu esa kristallning shaffoflik diapazonini kengaytiradi.

Energiya teshik kengligi E_g esa 1,12 eV dan 1,08 eV gacha kamaydi, bu esa yarimo‘tkazgichning optik sezgirligini oshiradi. Tauc metodi bo‘yicha tahlil shuni ko‘rsatdiki, Zn legirlash elektron va teshiklar orasidagi energiya farqini kamaytiradi, natijada infraqizil fotonlarni yutish qobiliyati ortadi⁵. Bu xususiyat infraqizil detektorlar va fotovoltaik elementlarda samaradorlikni oshirish imkonini beradi.

Bundan tashqari, Zn legirlash monokristallarning spektral yutilish qirralarini kengaytiradi.

Spektral tahlil ko‘rsatdiki, 750–1000 nm diapazonda yutilish koeffitsienti $1,05 \times 10^3 \text{ sm}^{-1}$ dan $1,15 \times 10^3 \text{ sm}^{-1}$ gacha bo‘lib, yuqori Zn konsentratsiyasida infraqizil diapazonning samaradorligi oshadi. Bu esa infraqizil fotonik qurilmalar va sensorlarning sezgirligini oshirish uchun muhim parametr hisoblanadi.

⁴ Yu, P. Y., & Cardona, M. (2019). Fundamentals of Semiconductors.

⁵ Neamen, D. (2021). Semiconductor Physics and Devices.

Natijalarni yana bir jihatdan tahlil qilganda, Zn legirlash darajasi ortishi bilan yutilish ko'effitsienti va sindirish ko'rsatkichi o'rtasida yaqin bog'liqlik kuzatildi. Bu bog'liqlik kristall panjarada lokal elektrostatik maydonlarning o'zgarishi bilan izohlanadi. Grafik tahlil shuni ko'rsatadiki, α va n o'rtasidagi korrelyatsiya 0,92 ga teng bo'lib, statistika jihatdan sezilarli hisoblanadi.

Shu bilan birga, Zn legirlash Si<P> monokristallarida infraqizil diapazonda yutilish qirralarini kengaytirishi materialning yarimo'tkazgich xossalarini optimallashtirishda muhim ahamiyatga ega. Bu natijalar fotovoltaiik panellar, infraqizil detektorlar va boshqa optoelektronika qurilmalari uchun Zn legirlangan Si<P> monokristallarning afzalliklarini aniq ko'rsatadi.

Umuman olganda, Zn legirlash Si<P> monokristallarining optik parametrlarini nazorat qilish orqali materialning yutilish spektri, sindirish ko'rsatkichi va energiya teshik kengligini moslashtirish mumkin. Bu esa yangi fotonik va yarimo'tkazgich qurilmalarini yaratishda amaliy imkoniyatlar beradi.

IV. Muammolar.

Zn bilan legirlash jarayonida bir qator muammolar yuzaga keladi, ularning ilmiy va amaliy ahamiyati katta:

Legirlovchi elementning kristall panjaraga notekis taqsimlanishi. Zn atomlari monokristall panjara ichida noaniq joylashgan hollarda, kristallning optik parametrlarida o'zgaruvchanlik yuzaga keladi. Bu xususiyat ayniqsa yutilish ko'effitsienti va sindirish ko'rsatkichida seziladi. Spektrofotometriya o'lchovlari shuni ko'rsatdiki, notekis legirlash α qiymatining $\pm 5\%$ gacha farq qilishiga olib keladi⁴. Shuning uchun Zn elementini bir tekis taqsimlash, yuqori sifatli monokristallar hosil qilish va natijalarni takrorlanadigan qilish uchun muhimdir.

Yuqori Zn konsentratsiyalarida nuqsonlar soni ortishi va rekombinatsiya jarayonlari.

Konsentratsiya 0,8–1,0 at.% oralig'ida oshganda kristall panjarada dislokatsiyalar va nuqsonlar soni sezilarli ortadi. Bu elektronlar va teshiklar orasidagi rekombinatsiya jarayonini kuchaytiradi, natijada fotonik qurilmalarda yutilish samaradorligi kamayadi. Tahlil ko'rsatdiki, yuqori konsentratsiya 10–15% energiya yo'qotishga olib keladi. Shu sababli, Zn konsentratsiyasini optimal diapazon — 0,3–0,7 at.% — doirasida ushlab turish zarur.

Tajriba natijalarining aniqligiga tashqi omillarning ta'siri. Harorat ± 1 °C o'zgarishi yoki yorug'lik intensivligi $\pm 0,5\%$ o'zgarishi yutilish ko'effitsienti va sindirish ko'rsatkichiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Bu xususiyat ayniqsa infraqizil diapazon spektrida yaqqol namoyon bo'ladi. Laboratoriya sharoitida o'lchovlar amalga oshirilganda, maxsus termostatlash va yorug'lik barqarorligini nazorat qilish tizimlari qo'llanildi. Bunday choralar natijalarni takrorlanadigan va yuqori aniqlikda olishga imkon berdi⁶.

Zn atomlarining lokal elektron maydonlariga ta'siri. Legirlash natijasida kristall panjarada lokal elektrostatik maydonlar hosil bo'ladi, bu esa elektronlar va teshiklar harakatini o'zgartiradi. Shu sababli, yutilish spektrida qirralar kengayadi va sindirish ko'rsatkichi o'zgaradi.

Agar bu effekt nazorat qilinmasa, olingan optik parametrlar amaliy qurilmalarda kutilgan natijalarni bermasligi mumkin.

⁶ Neamen, D. (2021). Semiconductor Physics and Devices.

Spektral o'lchovlar va apparatura aniqligi. O'lchov apparatining cheklovlari, masalan, spektrofotometr va interferometrning detektor sezgirligi va rezolyutsiyasi, natijalarga qo'shimcha xatolik kiritadi. Shu sababli, Zn legirlangan Si<P> monokristallarining optik parametrlarini aniqlashda yuqori aniqlikdagi usullar va apparatura kalibratsiyasi zarur.

Shu muammolarni inobatga olib, optik parametrlarni aniqlashda:

- 1) Zn legirlash jarayonini bir xilda nazorat qilish
- 2) Optimal konsentratsiya diapazonini saqlash
- 3) Harorat va yorug'lik sharoitlarini doimiy barqarorlashtirish
- 4) Yuqori aniqlikdagi spektrofotometriya va interferometriya usullarini qo'llash

zarur bo'ladi. Bu choralar nafaqat ilmiy tadqiqot sifatini oshiradi, balki amaliy fotonik va yarimo'tkazgich qurilmalari ishlab chiqarishda materialning samaradorligini kafolatlaydi.

V. Takliflar.

Zn legirlash jarayonini nazorat qilish texnologiyalarini takomillashtirish.

Zn atomlarining kristall panjaraga bir tekis taqsimlanishi optik parametrlarning barqarorligi va takrorlanadigan natijalar uchun muhimdir. Shu sababli legirlash jarayonida konsentratsiyani real vaqtda nazorat qiluvchi uskunalar qo'llanishi, shuningdek, kristall panjara haroratini barqaror ushlab turish zarur. Bu chora natijasida monokristallarning yutilish ko'effitsienti va sindirish ko'rsatkichi bir hil bo'lib, fotonik qurilmalar uchun sifat kafolatlanadi⁷.

Yuqori aniqlikdagi optik o'lchash usullarini keng qo'llash.

Spektrofotometriya va Fabry-Pérot interferometriya, shuningdek Tauc grafik metodlari yordamida yutilish ko'effitsienti, sindirish ko'rsatkichi va energiya teshik kengligini aniqlash tavsiya etiladi. Bu usullar materialdagi lokal defektlar va Zn atomlarining joylashishiga ta'sirini yuqori aniqlik bilan aniqlash imkonini beradi. Shuningdek, apparatura kalibratsiyasini muntazam amalga oshirish tavsiya etiladi, bu o'lchov natijalarining takrorlanuvchanligini oshiradi.

Zn konsentratsiyasining optimal diapazonini aniqlash (0,3–0,7 at.%).

Eksperimental natijalar shuni ko'rsatdiki, konsentratsiya 0,3–0,7 at.% oralig'ida yutilish ko'effitsienti maksimal va energiya teshik kengligi minimal bo'ladi. Optimal diapazonni aniqlash va saqlash, legirlash jarayonida nuqsonlar sonini kamaytiradi, infraqizil va ko'rinarli spektral diapazonlarda materialning samaradorligini oshiradi.

Materialni sanoat miqyosida qo'llash bo'yicha qo'shimcha tajribalar.

Laboratoriya sharoitida olingan natijalar sanoat miqyosida takrorlanishi uchun, har bir batch namunalari bo'yicha optik parametrlarni tekshirish va standartlashtirish zarur. Bu nafaqat fotovoltaiik va infraqizil detektorlar ishlab chiqarishda sifatni kafolatlaydi, balki yangi yarimo'tkazgich qurilmalarini ishlab chiqish va masshtabli ishlab chiqarish imkonini beradi⁸.

Infraqizil va ko'rinarli diapazonda yutilish spektrlarini tahlil qilish.

Yutilish spektrlarining batafsil tahlili fotovoltaiik elementlar, infraqizil detektorlar va optoelektronika qurilmalari uchun qo'llaniladigan spetsifikatsiyalarni ishlab chiqishga yordam beradi. Shu bilan birga, spektral ma'lumotlar Zn legirlash darajasi bilan bog'liq material xossalarini prognoz qilishda foydalaniladi. Bu tadqiqotlar optik xossalarni optimallashtirish va yangi qurilmalarni yaratish imkoniyatini kengaytiradi.

⁷ Sze, S. M. (2021). Semiconductor Devices Physics.

⁸ Yu, P. Y., & Cardona, M. (2019). Fundamentals of Semiconductors.

VI. Xulosa

Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, Zn bilan legirlangan Si<P> monokristallarining optik parametrlarida sezilarli va tizimli o'zgarishlar yuz beradi. Xususan:

- Yutilish koeffitsienti α Zn kontsentratsiyasi oshishi bilan $0,45 \times 10^3 \text{ sm}^{-1}$ dan $1,2 \times 10^3 \text{ sm}^{-1}$ gacha o'sadi, bu qo'shimcha energiya sathlari hosil bo'lishi bilan izohlanadi.
- Sindirish ko'rsatkichi n 3,42 dan 3,48 gacha ortadi, bu materialning optik zichligi va dielektrik xossalarini oshiradi.
- Energiya teshik kengligi E_g 1,12 eV dan 1,08 eV gacha kamayadi, natijada infraqizil diapazon sezgirligi ortadi.

Shuningdek, tajribalar shuni ko'rsatdiki, Zn legirlash jarayonini optimal diapazon (0,3–0,7 at.%) doirasida nazorat qilish kristall sifatini oshiradi va optik parametrlarning barqarorligini ta'minlaydi. Laboratoriya sharoitida spektrofotometriya va interferometriya yordamida olingan natijalar fotovoltai elementlar, infraqizil detektorlar va boshqa fotonik qurilmalar uchun amaliy qiymatga ega.

Natijalar shuni ko'rsatadiki, Zn legirlangan Si<P> monokristallarining optik xossalarini nazorat qilish orqali yangi fotonik va yarimo'tkazgich qurilmalarini ishlab chiqish samaradorligini oshirish mumkin. Shu bilan birga, legirlash jarayonining nazorat qilinishi va optimal parametrlarni tanlash ilmiy va amaliy jihatdan muhim hisoblanadi.

Umuman olganda, ushbu tadqiqot Zn legirlangan Si<P> monokristallarining optik parametrlarini yaxshilash va ularni fotonik va yarimo'tkazgich texnologiyalarida samarali qo'llash uchun asos bo'lib xizmat qiladi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati:

1. Sze, S. M. (2021). Semiconductor Devices Physics.
2. Streetman, B. G. (2020). Solid State Electronic Devices.
3. Yu, P. Y., & Cardona, M. (2019). Fundamentals of Semiconductors.
4. Singh, J. (2022). Semiconductor Optoelectronics.
5. Neamen, D. (2021). Semiconductor Physics and Devices.
6. Kasap, S. (2020). Optoelectronics and Photonics.
7. Pierret, R. (2018). Semiconductor Device Fundamentals.
8. Kittel, C. (2017). Introduction to Solid State Physics.
9. Wolfe, J. (2022). Optical Properties of Solids.
10. Pankove, J. (2019). Optical Processes in Semiconductors.