UO‘K 621.315.592

YARIMO‘TKAZGICH MATERIALLARNING ELEKTR VA OPTIK XOSSALARIGA HARORAT TA’SIRINI O‘RGANISH

Azimova Nazokat Yoqubjon qizi,
Namangan davlat texnika universiteti
2-son akademik litseyi fizika fani o‘qituvchisi
nazokatazimova07@gmail.com

Annotatsiya. *Yarimo‘tkazgich materiallarning elektr va optik xossalari haroratga kuchli bog‘liq. Harorat o‘zgarishi kristall panjara tebranishlari, energetik zonalar, zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi va harakatchanligiga ta’sir qiladi. Ushbu maqolada kremniy (Si), germaniy (Ge) va galliy arsenid (GaAs) misolida haroratning yarimo‘tkazgich xossalariga ta’siri nazariy jihatdan tahlil qilindi. Varshni tenglamasi asosidagi hisoblashlar 77–400 K oralig‘ida harorat oshishi bilan taqiqlangan energetik soha kengligi kamayishini va optik yutilish chegarasi uzunroq to‘lqinlar tomon siljishini ko‘rsatdi. Shu bilan birga, harorat oshganda zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi ortadi, biroq fononlar bilan sochilish tufayli ularning harakatchanligi pasayadi. Natijalar yarimo‘tkazgichli datchiklar, fotodetektorlar, quyosh elementlari va optoelektron qurilmalarni loyihalashda harorat omilini hisobga olish muhimligini ko‘rsatadi.*

Kalit so‘zlar*: yarimo‘tkazgich, kremniy, germaniy, galliy arsenid, harorat, elektr o‘tkazuvchanlik, optik yutilish, fotoo‘tkazuvchanlik, Varshni tenglamasi.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. *Электрические и оптические свойства полупроводниковых материалов в значительной степени зависят от температуры. Изменение температуры влияет на колебания кристаллической решётки, энергетическую зонную структуру, концентрацию и подвижность носителей заряда. В данной статье теоретически проанализировано влияние температуры на свойства полупроводников на примере кремния (Si), германия (Ge) и арсенида галлия (GaAs). Расчёты, выполненные на основе уравнения Варшни, показали, что при повышении температуры в диапазоне 77–400 K ширина запрещённой зоны уменьшается, а край оптического поглощения смещается в область более длинных волн. Одновременно с повышением температуры концентрация носителей заряда увеличивается, однако их подвижность снижается вследствие усиления рассеяния на фононах. Полученные результаты подтверждают необходимость учёта температурного фактора при проектировании полупроводниковых датчиков, фотодетекторов, солнечных элементов и оптоэлектронных устройств.*

Ключевые слова*: полупроводник, кремний, германий, арсенид галлия, температура, электропроводность, оптическое поглощение, фотопроводимость, уравнение Варшни.*

STUDY OF THE EFFECT OF TEMPERATURE ON THE ELECTRICAL AND OPTICAL PROPERTIES OF SEMICONDUCTOR MATERIALS

Abstract. *The electrical and optical properties of semiconductor materials are strongly dependent on temperature. Variations in temperature affect crystal lattice vibrations, energy band structure, charge carrier concentration, and carrier mobility. This article theoretically analyzes the effect of temperature on semiconductor properties using silicon (Si), germanium (Ge), and gallium arsenide (GaAs) as representative materials. Calculations based on the Varshni equation showed that, within the temperature range of 77–400 K, an increase in temperature leads to a decrease in the band gap energy and shifts the optical absorption edge toward longer wavelengths. At the same time, the concentration of charge carriers increases with temperature, whereas their mobility decreases due to enhanced phonon scattering. The obtained results demonstrate the importance of considering temperature effects in the design of semiconductor sensors, photodetectors, solar cells, and optoelectronic devices.*

Keywords*: semiconductor, silicon, germanium, gallium arsenide, temperature, electrical conductivity, optical absorption, photoconductivity, Varshni equation.*

Kirish. Zamonaviy elektronika, mikroelektronika va optoelektronikaning rivojlanishini yarimo‘tkazgich materiallarsiz tasavvur qilish qiyin. Kremniy asosidagi integral mikrosxemalar, quyosh elementlari, turli sensorlar, galliy arsenid asosidagi yorug‘lik chiqaruvchi va yuqori chastotali qurilmalar, germaniy va uning birikmalari asosidagi infraqizil fotodetektorlar bugungi texnologik tizimlarning muhim qismini tashkil etadi. Bu qurilmalarning ishonchli ishlashi esa ular tayyorlangan materialning fizik parametrlarini aniq bilishni talab qiladi.

Yarimo‘tkazgichlarning metallardan asosiy farqlaridan biri ularning elektr xossalari tashqi sharoitga juda sezgir ekanidir. Harorat, yorug‘lik, elektr va magnit maydon, bosim hamda ionlashtiruvchi nurlanish ta’sirida yarimo‘tkazgichning elektr o‘tkazuvchanligi bir necha tartibga o‘zgarishi mumkin. O‘zbek olimlari M.K. Baxodirxonov, N.F. Zikrillayev va X.M. Iliyev tomonidan yaratilgan “Yarimo‘tkazgichlar fizikasi” darsligida ham yarimo‘tkazgich materiallarining elektrofizik parametrlari tashqi ta’sirlar, xususan, harorat o‘zgarishi natijasida keskin o‘zgarishi qayd etilgan. Aynan shu xususiyat yarimo‘tkazgichlardan termodatchik va boshqa sezgir qurilmalar yaratishda foydalanish imkonini beradi.

Haroratning ta’siri birgina elektr o‘tkazuvchanlik bilan cheklanmaydi. Kristall harorati oshganda panjara atomlarining tebranish amplitudasi ortadi. Bu jarayon elektronlarning kristall panjara bilan o‘zaro ta’sirini kuchaytiradi va energetik zonalarning holatini o‘zgartiradi. Odatda harorat ortishi bilan ko‘pchilik klassik yarimo‘tkazgichlarda taqiqlangan energetik soha kengligi (E_g) kamayadi. Ushbu hodisa optik yutilish chegarasi, fotolyuminessensiya maksimumi, fotosezgirlik va yarimo‘tkazgichli lazerlarning nurlanish to‘lqin uzunligiga bevosita ta’sir ko‘rsatadi. Varshni tomonidan 1967-yilda taklif qilingan yarim empirik tenglama Si, Ge, GaAs, InP, InAs va boshqa qator yarimo‘tkazgichlarda taqiqlangan soha kengligining haroratga bog‘lanishini ifodalashda keng qo‘llanadi.

Yarimo‘tkazgichlarda elektr o‘tkazuvchanlikning haroratga bog‘liqligi yanada murakkabdir. Elektr o‘tkazuvchanlik

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p)$$

munosabat bilan ifodalanadi. Bu yerda (q) — elementar zaryad, (n) va (p) — elektron hamda kovaklar konsentratsiyasi, (\mu_n) va (\mu_p) esa ularning harakatchanligi. Demak, haroratning elektr o‘tkazuvchanlikka ta’sirini baholashda zaryad tashuvchilar soni bilan bir qatorda ularning kristalldagi harakat sharoitini ham hisobga olish zarur.

Harorat ortishi ko‘pincha zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining ortishiga sabab bo‘ladi. Donor yoki akseptor qo‘shimchali yarimo‘tkazgichlarda past haroratlarda kirishma atomlarining hammasi ham ionlashgan bo‘lmaydi. Harorat oshgani sari ular ionlashib, erkin zaryad tashuvchilar soni ortadi. O‘zbek tilidagi zamonaviy “Yarimo‘tkazgichlar fizikasi” darsligida donorli yarimo‘tkazgichlarda elektron konsentratsiyasi harorat ortishi bilan dastlab eksponensial ko‘payishi, donorlar to‘liq ionlashgandan so‘ng ma’lum harorat oralig‘ida deyarli o‘zgarmasligi va yanada yuqori haroratda xususiy o‘tkazuvchanlik ustunlik qila boshlashi ko‘rsatilgan.

Biroq zaryad tashuvchilarning harakatchanligi ham haroratga bog‘liq. Harorat ko‘tarilganda kristall panjaradagi fononlar soni va panjara tebranishlarining intensivligi ortadi. Natijada elektron va kovaklarning fononlarda sochilish ehtimoli oshib, ularning harakatchanligi kamayadi. Kremniy uchun Arora, Hauser va Roulston tomonidan ishlab chiqilgan model elektron va kovaklar harakatchanligini 250–500 K harorat oralig‘ida ham temperatura, ham legirlash konsentratsiyasiga bog‘liq holda tavsiflaydi. GaAsda esa yuqoriroq haroratlarda elektronlarning qutbiy optik fononlar bilan sochilishi muhim rol o‘ynashi aniqlangan.

Optik xossalarda ham shunga o‘xshash murakkab holat kuzatiladi. Yarimo‘tkazgichda fotonning yutilishi elektronning valent zonadan o‘tkazuvchanlik zonasiga o‘tishi bilan bog‘liq. O‘zbek fizik adabiyotlarida GaAs kabi materiallar to‘g‘ri zonali, Si va Ge esa bilvosita zonali yarimo‘tkazgichlar sifatida qaraladi. To‘g‘ri zonali materialda elektronning optik o‘tishi foton orqali nisbatan bevosita yuz bersa, kremniy va germaniyda impuls saqlanishi uchun fonon ishtiroki ham zarur bo‘ladi. Shu sababli materialning zona tuzilishi optik yutilish va nurlanish samaradorligiga katta ta’sir ko‘rsatadi.

Mazkur ishning maqsadi Si, Ge va GaAs misolida yarimo‘tkazgichlarning elektr hamda optik xossalariga harorat ta’sirining fizik mexanizmlarini tahlil qilish, taqiqlangan soha kengligidagi o‘zgarishni sonli baholash va olingan natijalarning yarimo‘tkazgichli qurilmalar ishlashidagi ahamiyatini ochib berishdan iborat.

Material va metodlar. Tadqiqot nazariy-tahliliy xarakterga ega bo‘lib, unda yangi eksperimental o‘lchovlar o‘tkazilmadi. Asosiy materiallar sifatida yarimo‘tkazgichlar fizikasi bo‘yicha O‘zbekistonda chop etilgan oliy ta’lim darslik va o‘quv qo‘llanmalari, shuningdek xalqaro ilmiy jurnallarda nashr etilgan klassik va zamonaviy tadqiqotlardan foydalanildi.

Milliy manbalardan M.K. Baxodirxonov, N.F. Zikrillayev va X.M. Iliyevning 2020-yilda “Tafakkur” nashriyotida chop etilgan “Yarimo‘tkazgichlar fizikasi” darsligi asosiy manbalardan biri sifatida olindi. Ushbu darslik texnika oliy o‘quv yurtlari talabalari, doktorantlar va pedagoglar uchun mo‘ljallangan bo‘lib, unda yarimo‘tkazgichlarning kristall tuzilishi, energetik zonalari, zaryad tashuvchilar statistikasi, elektr o‘tkazuvchanlik, fotoelektrik hodisalar va yarimo‘tkazgichli asboblarning fizik asoslari yoritilgan.

Shuningdek, A. Teshaboyev, S. Zaynobidinov, S. Vlasov, I. Karimov va V. Abduazimovning “Yarimo‘tkazgichlar sirti fizikasi” o‘quv qo‘llanmasidan foydalanildi. Mazkur manba O‘zbekiston Respublikasi Oliy va o‘rta maxsus ta’lim vazirligi tomonidan oliy o‘quv yurtlari uchun tavsiya etilgan bo‘lib, yarimo‘tkazgich sirtidagi fizik-kimyoviy jarayonlar va tashqi omillar ta’sirini yoritadi. A. Teshaboyev, S. Zaynobidinov va E.A. Musayevning “Yarimo‘tkazgichlar va yarimo‘tkazgichli asboblar texnologiyasi” o‘quv qo‘llanmasi ham mavzuning texnologik jihatlarini tahlil qilishda asosiy milliy manbalardan biri bo‘ldi.

Taqiqlangan energetik sohaning haroratga bog‘liqligini hisoblashda Varshni tenglamasi qo‘llanildi:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T+\beta}$$

Bu yerda (E_g(0)) — absolyut nol haroratdagi taqiqlangan zona kengligi, (T) — absolyut harorat, (\alpha) va (\beta) esa muayyan material uchun tajribadan aniqlangan koeffitsiyentlardir. Varshni ushbu ifodaning Si, Ge, GaAs va boshqa yarimo‘tkazgichlarning eksperimental natijalarini qoniqarli darajada ifodalashini ko‘rsatgan.

Hisoblashlarda kremniy uchun (E_g(0)=1.166) eV, (\alpha=4.73\times10^{-4}) eV/K va (\beta=636) K; germaniy uchun (E_g(0)=0.7437) eV, (\alpha=4.77\times10^{-4}) eV/K va (\beta=235) K; GaAs uchun esa (E_g(0)\approx1.519) eV, (\alpha\approx5.405\times10^{-4}) eV/K va (\beta=204) K qiymatlaridan foydalanildi. GaAs uchun ushbu parametrlar ilmiy adabiyotlarda keng qo‘llanadi.

Optik yutilish chegarasining taxminiy to‘lqin uzunligi

$$\lambda_g \approx \frac{1240}{E_g}$$

munosabat orqali hisoblandi. Bu yerda (E_g) elektronvoltlarda, (\lambda_g) esa nanometrlarda ifodalanadi. Hisoblashlar 77 K, 300 K va 400 K haroratlar uchun bajarildi. Natijalar haqiqiy namunadagi kirishmalar, nuqsonlar, deformatsiya va boshqa omillarni hisobga olmaydigan idealizatsiyalangan baholash sifatida talqin qilindi.

Natijalar. Hisoblash natijalari birinchi navbatda haroratning energetik zonalar tuzilishiga sezilarli ta’sirini ko‘rsatdi. Kremniy uchun 77 K haroratda taqiqlangan soha kengligi taxminan 1.162 eV ga teng bo‘lsa, 300 K da 1.121 eV, 400 K da esa 1.093 eV gacha kamayadi. Demak, 77 K dan 400 K gacha bo‘lgan harorat oralig‘ida kremniyning taqiqlangan energetik sohasi qariyb 0.069 eV ga torayadi.

Germaniyda harorat ta’siri nisbatan kuchliroq namoyon bo‘ladi. Hisoblashga ko‘ra, uning fundamental taqiqlangan soha kengligi 77 K da 0.735 eV atrofida bo‘lsa, 300 K da 0.663 eV va 400 K da 0.624 eV gacha kamayadi. Bunday o‘zgarish germaniyning infraqizil diapazondagi optik xususiyatlariga sezilarli ta’sir ko‘rsatadi.

GaAs uchun ham xuddi shunday qonuniyat kuzatiladi. 77 K da hisoblangan (E_g) qiymati 1.508 eV, 300 K da 1.422 eV, 400 K da esa 1.376 eV ni tashkil etdi. Xona haroratidagi hisoblangan qiymat GaAs uchun tajribada keng qabul qilingan taxminan 1.42 eV qiymat bilan yaxshi mos keladi. Zamonaviy temperatura-bog‘liq fotolyuminessensiya tadqiqotlarida ham GaAs uchun xona haroratida taxminan 1.422 eV va past haroratda 1.52 eV ga yaqin qiymatlar kuzatilgan.

Bu natijaning fizik sababi, avvalo, harorat ortishi bilan kristall panjaraning issiqlik kengayishi va elektron–fonon o‘zaro ta’sirining kuchayishidir. Panjara atomlarining muvozanat holati atrofidagi tebranish amplitudasi ortgani sari elektron energetik holatlarining o‘rtacha energiyasi ham o‘zgaradi. Natijada valent va o‘tkazuvchanlik zonalarining chetlari o‘zaro yaqinlashib, (E_g) kamayadi. Varshni tenglamasi ushbu jarayonni empirik shaklda juda qulay ifodalasa-da, uning parametrlarini fundamental fizik doimiylar sifatida emas, muayyan harorat intervaliga moslashtirilgan parametrlar sifatida talqin qilish to‘g‘riroqdir. Elektron–fonon o‘zaro ta’siriga asoslangan tadqiqotlarda ham Varshni modelining ayrim sharoitlarda yaqinlashuv ekanligi ko‘rsatilgan.

Taqiqlangan soha torayishi optik yutilish chegarasining uzun to‘lqinlar tomon siljishiga olib keladi. Kremniy uchun 77 K da hisoblangan yutilish chegarasi taxminan 1067 nm bo‘lsa, 300 K da 1107 nm, 400 K da esa 1135 nm ga yaqinlashadi. Germaniyda mos ravishda taxminan 1688, 1869 va 1989 nm qiymatlar olinadi. GaAsda esa yutilish chegarasi 77 K da 823 nm atrofida bo‘lib, xona haroratida 872 nm va 400 K da taxminan 901 nm tomon siljiydi.

Bu hodisa optoelektronikada “qizil siljish” sifatida amaliy ahamiyat kasb etadi. Masalan, yarimo‘tkazgichli yorug‘lik manbai yoki lazerning ishchi harorati ortganda uning nurlanish maksimumi

koʻpincha kattaroq toʻlqin uzunligi tomon siljiydi. Fotodetektorda esa sezgirlik spektrining chegarasi ham harorat bilan oʻzgaradi. Demak, yuqori aniqlik talab qilinadigan optik tizimlarda nafaqat elektr parametrlarni, balki spektral xarakteristikalarni ham temperaturaviy stabilizatsiya qilish zarur.

Kirishmali yarimoʻtkazgichlarda elektr xossalarining temperatura boʻyicha oʻzgarishini shartli ravishda bir necha fizik rejimlar orqali tushuntirish mumkin. Juda past haroratda donor va akseptorlarning bir qismi ionlashmagan holatda boʻladi va erkin tashuvchilar soni kam boʻladi. Harorat oshganda kirishmalar ionlasha boshlaydi va oʻtkazuvchanlik tez ortadi. Keyingi harorat oraligʻida donor yoki akseptorlar deyarli toʻliq ionlashib boʻlganligi sababli asosiy zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi nisbatan barqaror boʻladi. Shu vaqtda panjara sochilishi kuchaygani uchun harakatchanlikning kamayishi oʻtkazuvchanlik oʻzgarishida muhim rol oʻynay boshlaydi. Nihoyat, yuqori haroratda xususiy elektron–kovak juftlari generatsiyasi keskin kuchayib, xususiy oʻtkazuvchanlik ustunlashadi. Bu holat Oʻzbekiston oliy ta’limida foydalaniladigan “Yarimoʻtkazgichlar fizikasi” darsligida ham zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi va Fermi sathining haroratga bogʻliqligi orqali batafsil tushuntirilgan.

Harorat optik yutilish jarayoniga faqat (E_g) ning oʻzgarishi orqali emas, balki fononlarning roli orqali ham ta’sir koʻrsatadi. Bu ayniqsa Si va Ge kabi bilvosita zonali yarimoʻtkazgichlar uchun muhim. Bunday materiallarda optik oʻtish vaqtida elektron impulsi oʻzgarishi kerakligi sababli fonon yutilishi yoki chiqarilishi jarayonda qatnashadi. Harorat oshganda fononlarning statistik taqsimoti oʻzgaradi, shuning uchun bilvosita optik oʻtishlar ehtimoli va yutilish spektrining shakli ham temperaturaga bogʻliq boʻladi.

GaAsda esa oʻtkazuvchanlik zonasining minimumi va valent zonaning maksimumi bir xil (k) qiymatiga mos kelgani sababli toʻgʻri optik oʻtishlar ustun. Oʻzbek darsligida GaAs toʻgʻri zonali, Si va Ge esa bilvosita zonali materiallar sifatida koʻrsatilgan. Shu sababli GaAs yorugʻlik chiqaruvchi diod va yarimoʻtkazgichli lazerlar uchun Si ga qaraganda ancha qulay materialdir. Biroq harorat oshishi bilan GaAsda ham nurlanish energiyasining pasayishi, spektrning kengayishi va ayrim hollarda fotolyuminessensiya intensivligining kamayishi kuzatiladi. Soʻnggi temperatura-bogʻliq GaAs tadqiqotlarida yuqori haroratda nurlanish intensivligining termik soʻnishi nurlanmaydigan rekombinatsiya markazlari faollashishi bilan bogʻlangan.

Fotooʻtkazuvchanlik ham haroratga kuchli bogʻliq. Bunda bir tomondan fotonlar yaratadigan qoʻshimcha elektron–kovak juftlari, ikkinchi tomondan ularning yashash vaqti va rekombinatsiya tezligi muhim. Harorat ayrim tuzoq va rekombinatsiya markazlarini faollashtirishi mumkin. Natijada fototokning qiymati harorat bilan monoton ravishda oshishi shart emas. Oʻzbek olimlari kompensatsiyalangan kremniyda fotooʻtkazuvchanlikning harorat ta’sirida soʻnish hodisasidan past haroratli termodatchiklar yaratishda foydalanish mumkinligini ham koʻrsatganlar.

Umuman, hisoblash va adabiyot tahlili shuni koʻrsatadiki, harorat yarimoʻtkazgichning elektr va optik xossalarini bitta parametr orqali emas, oʻzaro bogʻlangan bir qancha fizik mexanizmlar orqali oʻzgartiradi. Taqiqlangan soha kengligi, tashuvchilar konsentratsiyasi, harakatchanlik, rekombinatsiya tezligi va fononlar sonining bir vaqtda oʻzgarishi real qurilmaning yakuniy temperaturaviy xarakteristikasini belgilaydi.

Muhokama. Olingan natijalarni amaliy nuqtayi nazardan baholaganda harorat ta’sirini yarimoʻtkazgich qurilmalari uchun ham foydali, ham salbiy omil sifatida koʻrish mumkin. Haroratga yuqori sezgirlik termistor, termodatchik, bolometr va ayrim infraqizil detektorlarning ishlash prinsipining oʻzini tashkil etadi. Shu bilan birga, mikroprotsessor, kuch elektronikasidagi diod yoki tranzistor, quyosh elementi va lazerda ortiqcha qizish qurilma parametrlarining belgilangan qiymatdan chetga chiqishiga olib keladi.

Kremniy asosidagi elektron qurilmalarda ishchi harorat oshganda xususiy tashuvchilar konsentratsiyasining ortishi teskari toklarning kuchayishiga sabab boʻlishi mumkin. p–n oʻtishli qurilmalarda bu jarayon ayniqsa muhim, chunki teskari toʻyinish toki temperaturaga juda sezgir. Shu bilan bir vaqtda tashuvchilar harakatchanligining kamayishi tranzistor kanali yoki hajmiy yarimoʻtkazgich qarshiligiga ta’sir qiladi. Yuqori quvvatli qurilmada elektr energiyasining bir qismi issiqlikka aylanishi, harorat oshishi va natijada elektr parametrlarning yana oʻzgarishi issiqlik bilan bogʻliq qayta aloqa mexanizmini yuzaga keltirishi mumkin. Shu sababli zamonaviy yarimoʻtkazgichli tizimlarda issiqlikni olib chiqish muammosi material tanlash kabi muhim muhandislik vazifasidir.

Haroratning optik xossalarga ta’siri quyosh energetikasida ham muhim. Quyosh elementi qiziganida yarimoʻtkazgichning taqiqlangan sohasi kamayadi. Bu ma’lum darajada uzunroq toʻlqinli fotonlarni yutish imkonini kengaytirishi mumkin, biroq ochiq zanjir kuchlanishining pasayishi va rekombinatsiya jarayonlarining kuchayishi umumiy samaradorlikka salbiy ta’sir koʻrsatishi mumkin. Demak, quyosh batareyasining faqat yorugʻlik yutishi emas, uning ishchi temperaturasi va issiqlik almashinuvi ham hisobga olinishi zarur.

GaAs va boshqa III–V birikmalarda nurlanish toʻlqin uzunligining temperaturaga bogʻliqligi optik aloqa va lazer texnologiyasida alohida ahamiyat kasb etadi. Masalan, lazer diodi muayyan toʻlqin uzunligida

ishlashi kerak bo‘lgan optik tizimda kristall haroratining bir necha o‘n kelvinga o‘zgarishi nurlanish maksimumining siljishiga sabab bo‘lishi mumkin. Vurgaftman, Meyer va Ram-Mohan tomonidan III–V yarimo‘tkazgichlar parametrlarining keng qamrovli tahlilida ham zona parametrlarining haroratga bog‘lanishi optoelektronik tuzilmalarni hisoblash uchun muhim kattalik sifatida qaralgan.

Natijalardan yana bir muhim xulosa kelib chiqadi: yarimo‘tkazgichning temperaturaviy xossasini faqat uning kimyoviy nomi bilan aniqlash yetarli emas. Bir xil kremniy materiali turli legirlash darajasida, turli nuqson konsentratsiyasida yoki turli kristall sifati sharoitida haroratga turlicha javob beradi. Past haroratda ionlashgan kirishmalar va nuqsonlarda sochilish ustun bo‘lishi mumkin, yuqori haroratda esa fononlar bilan sochilish asosiy mexanizmga aylanadi. GaAsda bir turdagi fonon, Si da boshqa fonon tarmoqlari transport jarayoniga katta hissa qo‘shishi mumkin. Birinchi prinsiplar asosidagi hisoblashlarda ham Si va GaAs uchun fonon-chegaralangan elektron va kovaklar harakatchanligining fizik mexanizmlari bir xil emasligi ko‘rsatilgan.

Optik o‘lchovlarda ham materialning to‘g‘ri yoki bilvosita zonali ekanini hisobga olish zarur. GaAsning yutilish chegarasini fotolyuminessensiya yoki yutilish spektri orqali kuzatish nisbatan sodda bo‘lsa, Si va Ge da fonon yordamidagi jarayonlar sababli spektrni talqin qilish murakkabroq bo‘lishi mumkin. Bundan tashqari, yuqori haroratda spektral chiziqlarning kengayishi band chetini aniq aniqlashga ta’sir qiladi. Germaniyning dielektrik funksiyasini 100–850 K oralig‘ida ellipsometrik o‘rgangan tadqiqotlarda ham kritik energiyalar temperaturaga bog‘liq ravishda siljishi va spektral kengayish parametrlarining o‘zgarishi kuzatilgan.

Mazkur ishda foydalanilgan Varshni modeli sodda va amaliy jihatdan qulay. Lekin uni universallashtirib yuborish maqsadga muvofiq emas. Juda past haroratlarda yoki Debye temperaturasi yuqori bo‘lgan materiallarda elektron–fonon o‘zaro ta’sirini fizik jihatdan aniqroq ifodalovchi Bose–Einstein tipidagi modellar yaxshiroq natija berishi mumkin. Ayrim tadqiqotlarda Varshni tenglamasi ma’lum diapazonda yaxshi yaqinlashuv berishi, biroq uning (\alpha) va (\beta) parametrlarini to‘g‘ridan-to‘g‘ri fundamental fizik ma’noga ega deb qabul qilish ehtiyotkorlikni talab qilishi ko‘rsatilgan.

Shunga qaramay, Si, Ge va GaAs uchun bajarilgan hisob-kitoblar asosiy fizik tendensiyani aniq ko‘rsatadi. Harorat oshishi bilan energetik soha torayadi, optik yutilish chegarasi uzun to‘lqin tomon siljiydi, xususiy tashuvchilar konsentratsiyasi ortadi va fononlar bilan sochilish kuchayadi. Qurilmaning yakuniy elektr yoki optik xususiyati aynan shu jarayonlarning o‘zaro nisbatiga bog‘liq bo‘ladi.

O‘zbekiston sharoitida bu masalaning amaliy ahamiyati yanada yuqori. Elektron va fotoelektrik qurilmalar yoz faslida yuqori atrof-muhit haroratida ishlashi mumkin, quyosh elementlarining sirt harorati esa havo haroratidan ham yuqoriga ko‘tariladi. Shu sababli mahalliy iqlim sharoitida ishlatiladigan yarimo‘tkazgich qurilmalarini yaratish yoki tanlashda pasportdagi xona haroratiga tegishli parametrlarning o‘zi bilan cheklanmasdan, ularning keng temperatura oralig‘idagi xususiyatlarini hisobga olish zarur.

Xulosa. Yarimo‘tkazgich materiallarning elektr va optik xossalariga haroratning ta’siri ularning fundamental fizik tabiatidan kelib chiqadi. Haroratning oshishi kristall panjara tebranishlarini kuchaytirib, elektron–fonon o‘zaro ta’siri va issiqlik kengayishi orqali energetik zonalar tuzilishiga ta’sir ko‘rsatadi. Si, Ge va GaAs uchun Varshni tenglamasi asosida bajarilgan hisoblashlar harorat 77 K dan 400 K gacha oshirilganda taqiqlangan soha kengligining barcha materiallarda kamayishini ko‘rsatdi.

Kremniyda (E_g) taxminan 1.162 eV dan 1.093 eV gacha, germaniyda 0.735 eV dan 0.624 eV gacha, GaAsda esa 1.508 eV dan 1.376 eV gacha kamayishi aniqlandi. Natijada optik yutilish chegarasi uzunroq to‘lqinlar tomon siljiydi. Bu hodisa fotodetektorlar, LED, yarimo‘tkazgichli lazerlar va boshqa optoelektron qurilmalar uchun katta amaliy ahamiyatga ega.

Elektr xossalari bo‘yicha esa haroratning ta’siri ikki asosiy jarayonning raqobati bilan belgilanadi. Harorat oshishi zaryad tashuvchilar konsentratsiyasini, ayniqsa, xususiy o‘tkazuvchanlik sohasida, keskin oshiradi. Biroq panjara fononlarida sochilishning kuchayishi elektron va kovaklarning harakatchanligini pasaytiradi. Shu sababli elektr o‘tkazuvchanlikning temperaturaviy bog‘lanishi material turi, legirlash darajasi va harorat intervaliga qarab turlicha bo‘lishi mumkin.

Tahlillar yarimo‘tkazgich qurilmalarni loyihalashda haroratni ikkinchi darajali tashqi omil sifatida emas, balki materialning asosiy fizik parametrlarini belgilovchi muhim omillardan biri sifatida qarash lozimligini ko‘rsatadi. Yarimo‘tkazgichlarning aynan shu yuqori temperaturaviy sezgirligi bir tomondan elektron qurilmalarda termik barqarorlik muammosini tug‘dirsa, ikkinchi tomondan yuqori sezgir termodatchik, fotodetektor va boshqa funksional qurilmalarni yaratish uchun fizik asos bo‘lib xizmat qiladi.

ADABIYOTLAR:

1. Baxodirxonov, M.K., Zikrillayev, N.F., Iliyev, X.M. Yarimo'tkazgichlar fizikasi. Toshkent: Tafakkur, 2020. 480 b. ISBN 978-9943-24-215-9.

2. Teshaboyev, A., Zaynobidinov, S., Vlasov, S., Karimov, I., Abduazimov, V. Yarimo'tkazgichlar sirti fizikasi. Toshkent: Ilm Ziyo, 2010. Oliy o'quv yurtlari uchun o'quv qo'llanma.

3. Teshaboyev, A., Zaynobidinov, S., Musayev, E.A. Yarimo'tkazgichlar va yarimo'tkazgichli asboblar texnologiyasi. Toshkent: Talqin, 2006. 336 b.

4. Nazirov, E.N., Nazirov, D.E., Teshaboyev, A.T. Yarimo'tkazgichlar fizikasi lug'ati. Qayta ishlangan va to'ldirilgan 2-nashr. Toshkent: Universitet, 2008.

5. Varshni, Y.P. Temperature dependence of the energy gap in semiconductors. Physica. 1967;34(1):149–154. DOI: 10.1016/0031-8914(67)90062-6.

6. Green, M.A. Intrinsic concentration, effective densities of states, and effective mass in silicon. Journal of Applied Physics. 1990;67(6):2944–2954. DOI: 10.1063/1.345414.

7. Arora, N.D., Hauser, J.R., Roulston, D.J. Electron and hole mobilities in silicon as a function of concentration and temperature. IEEE Transactions on Electron Devices. 1982;29(2):292–295. DOI: 10.1109/T-ED.1982.20698.

8. Vurgaftman, I., Meyer, J.R., Ram-Mohan, L.R. Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys. Journal of Applied Physics. 2001;89(11):5815–5875. DOI: 10.1063/1.1368156.

9. Ma, J., Nissimagoudar, A.S., Li, W. First-principles study of electron and hole mobilities of Si and GaAs. Physical Review B. 2018;97:045201. DOI: 10.1103/PhysRevB.97.045201.

10.El Allali, M., Sørensen, C.B., Veje, E., Tidemand-Petersson, P. Experimental determination of the GaAs and $Ga_{1-x}Al_xAs$ band-gap energy dependence on temperature and aluminum mole fraction in the direct band-gap region. Physical Review B. 1993;48:4398–4404. DOI: 10.1103/PhysRevB.48.4398.

11.Viña, L., Logothetidis, S., Cardona, M. Temperature dependence of the dielectric function of germanium. Physical Review B. 1984;30:1979–1991. DOI: 10.1103/PhysRevB.30.1979.