

Onarkulov Karimberdi Egamberdiyevich

Farg‘ona davlat universiteti, fizika-matematika fanlari doktori, professor

Yusupova Dilfuza Aminovna

Farg‘ona davlat universiteti fizika-matematika fanlari nomzodi, dotsent

E-mail: dilfuza.physic@mail.ru;

Sirojiddinova Sarvinoz Zafarjon qizi

Farg‘ona davlat universiteti tayanch doktoranti,

E-mail: s.sirojiddinova@pf.fdu.uz.

**NODIR YER ELEMENTLARI BILAN LEGIRLANGAN Bi_2Te_3
QATTIQ QOTISHMASINING ELEKTROFIZIK VA TERMoeLEKTRIK
XOSSALARI**

Annotatsiya: Mazkur maqolada bismut telluridi (Bi_2Te_3) qattiq qotishmasining nodir yer elementlari (Ce, La, Sm, Y, Gd, Dy, Eu, Er, Tm, Yb, Lu, Tb) bilan legirlanishi natijasida uning elektrofizik va termoelektrik xossalarida yuz beradigan o‘zgarishlar tahlil qilindi. Turli sintez usullari – gidrotermal, solvotermal, issiq press va uchqunli plazma sintezlash (SPS) orqali olingan namunalar misolida Seebek koeffitsiyenti, elektr o‘tkazuvchanlik, issiqlik o‘tkazuvchanlik va yakuniy ZT ko‘rsatkichlari o‘rganilgan. Tadqiqotlar shuni ko‘rsatdiki, nodir yer elementlaridan Lu (≈ 5 at.%), Ce (≈ 10 at.%) va Y (≈ 10 at.%) eng samarali legirlovchi kirishmalar bo‘lib, mos ravishda ZT $\approx 1,7$ (373 K), $\approx 1,29$ (398 K) va $\approx 1,23$ (410 K) qiymatlarga erishilgan. Bunday natijalar panjaraviy issiqlik o‘tkazuvchanlikning kamayishi, rezonans sathlar hosil bo‘lishi hamda elektron tashuvchilar konsentratsiyasining optimallasuvi bilan izohlanadi. Olingan xulosalar Bi_2Te_3 asosidagi past haroratli sovutgich modullar va termoelektrik generatorlar uchun istiqbolli material tanlashda muhim ahamiyat kasb etadi.

Kalit so‘zlar: Bi_2Te_3 ; nodir yer elementlari; legirlash; termoelektrik xossalar; Seebek koeffitsiyenti; issiqlik o‘tkazuvchanlik; ZT ko‘rsatkichi

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЁРДОГО СПЛАВА Bi_2Te_3 , ЛЕГИРОВАННОГО РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ.

Аннотация: В данной статье рассмотрено влияние легирования твердого сплава (Bi_2Te_3) редкоземельными элементами (Ce, La, Sm, Y, Gd, Dy, Eu, Er, Tm, Yb, Lu, Tb) на его электрофизические и термоэлектрические свойства. На примере образцов, полученных различными методами синтеза — гидротермальным, сольвотермальным, горячим прессованием и искровым плазменным спеканием (SPS), исследованы коэффициент Зеебека, электрическая и теплопроводность, а также результирующий показатель эффективности ZT . Установлено, что наиболее эффективными легирующими примесями являются Lu (≈ 5 ат.%), Ce (≈ 10 ат.%) и Y (≈ 10 ат. %), при которых достигаются значения $ZT \approx 1,7$ (373 K), $\approx 1,29$ (398 K) и $\approx 1,23$ (410 K) соответственно. Такой эффект объясняется снижением решёточной теплопроводности, формированием резонансных уровней и оптимизацией концентрации носителей заряда. Полученные результаты имеют важное значение при выборе перспективных материалов для низкотемпературных охлаждающих модулей и термоэлектрических генераторов на основе Bi_2Te_3 .

Ключевые слова: Bi_2Te_3 ; редкоземельные элементы; легирование; термоэлектрические свойства; коэффициент Зеебека; теплопроводность; показатель эффективности ZT

ELECTROPHYSICAL AND THERMOELECTRIC PROPERTIES OF RARE-EARTH-DOPED Bi_2Te_3 SOLID SOLUTION

Abstract: This paper investigates the effect of rare-earth element doping (Ce, La, Sm, Y, Gd, Dy, Eu, Er, Tm, Yb, Lu, Tb) on the electrophysical and thermoelectric properties of bismuth telluride (Bi_2Te_3). Using samples synthesized

by hydrothermal, solvothermal, hot pressing, and spark plasma sintering (SPS) techniques, the Seebeck coefficient, electrical conductivity, thermal conductivity, and the resulting figure of merit (ZT) were analyzed. The results show that Lu (≈ 5 at.%), Ce (≈ 10 at.%), and Y (≈ 10 at.%) are the most effective dopants, achieving ZT values of ≈ 1.7 (373 K), ≈ 1.29 (398 K), and ≈ 1.23 (410 K), respectively. These enhancements are attributed to reduced lattice thermal conductivity, the formation of resonance energy levels, and optimized carrier concentration. The findings provide valuable insights for selecting promising materials for Bi_2Te_3 -based low-temperature cooling modules and thermoelectric generators.

Keywords: Bi_2Te_3 ; rare-earth elements; doping; thermoelectric properties; Seebeck coefficient; thermal conductivity; figure of merit (ZT)

Kirish

Bismut telluridi (Bi_2Te_3) past harorat oralig'ida eng samarali termoelektrik materiallardan biri bo'lib, sovutgich modullar va kichik quvvatli generatorlarda keng qo'llaniladi. Termoelektrik samaradorlik ZT ko'rsatkichi orqali baholanadi, bu kattalik

$$ZT = \frac{S^2 \sigma T}{\kappa}$$

formulasi bilan aniqlanadi. Bu yerda S – Seebek koeffitsiyenti, σ – elektr o'tkazuvchanlik, κ – umumiy issiqlik o'tkazuvchanlik va T – absolut haroratdir. Bi_2Te_3 materiali xona temperaturasida yuqori Seebek koeffitsiyenti va past issiqlik o'tkazuvchanlikka ega bo'lsa-da, uning ZT qiymati odatda $\sim 0,5$ – 1 atrofida cheklanadi [1,2].

So'nggi yillarda Bi_2Te_3 ning termoelektrik xususiyatlarini yaxshilash maqsadida turli legirlash uslublari o'rganildi. Xususan, nodir yer elementlari – Ce, La, Sm, Y, Gd, Dy, Eu, Er, Tm, Yb, Lu, Tb – bilan legirlash orqali Bi_2Te_3 ning elektr

o'tkazuvchanligi, Seebek koeffitsiyenti, issiqlik o'tkazuvchanligi va yakuniy ZT ko'rsatkichiga ta'sir ko'rsatish bo'yicha ko'plab tadqiqotlar olib borildi [2,3].

Ushbu maqolada so'nggi yillarda chop etilgan ilmiy adabiyotlar sharhi keltirilib, Bi_2Te_3 ga yuqorida sanab o'tilgan nodir yer elementlarini qo'shish natijasida uning termoelektrik parametrlari qanday o'zgargani, eng yuqori erishilgan ko'rsatkichlar va bunga sabab bo'lgan fizik mexanizmlar tahlil qilinadi.

Nodir yer elementlari elektron tuzilishi va atom massasi jihatidan Bi bilan keskin farqlanadi, shuning uchun ularni Bi_2Te_3 kristall panjarasiga kiritish elektron va fonon tashuviga sezilarli ta'sir ko'rsatishi mumkin [4]. Masalan, ba'zi nodir yer kirishmalari rezonansli energetik sathlar hosil qilib, Seebek koeffitsiyentini oshiradi [5], boshqa tomondan, og'ir atomlarning kiritilishi fononlarni kuchli sochib panjaraviy issiqlik o'tkazuvchanlikni pasaytiradi [6]. Shu bilan birga, legirlash natijasida elektron zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi va ularning harakatchanligi o'zgarishi tufayli elektr o'tkazuvchanlik ham o'zgaradi [3,7]. Quyida biz Bi_2Te_3 ning har bir nodir yer elementi bilan legirlanganda kuzatilgan o'zgarishlarni jamlab, ilmiy ishlardagi eng muhim natijalarni tahlil qilamiz.

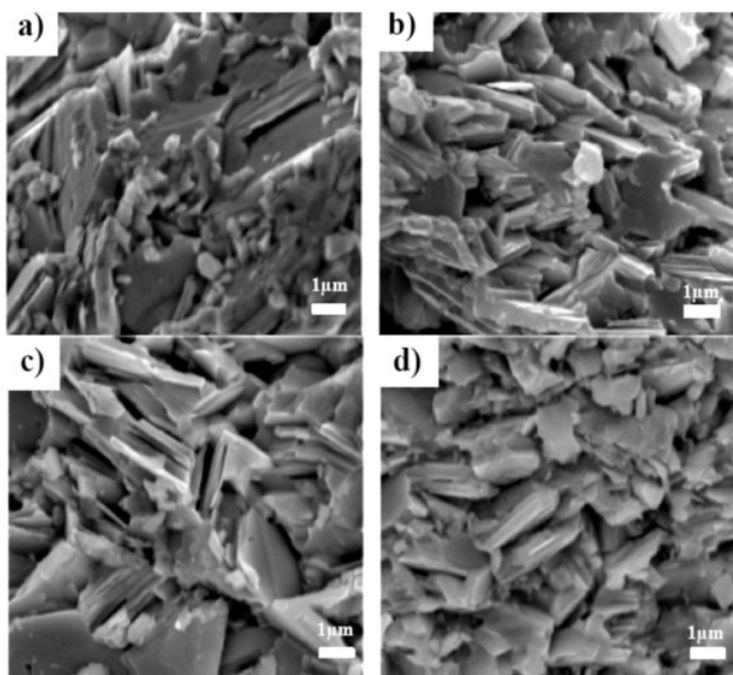
Adabiyotlar tahlili

Bi_2Te_3 ning nodir yer elementlari bilan legirlanishi uchun turli sintez usullari qo'llaniladi. Ko'pincha gidrotermal sintez va solvotermal usul kabi nam kimyoviy usullar orqali nanozarrachali legirlangan kukunlar tayyorlangan [2,3]. Masalan, Wu va hamkorlari Bi_2Te_3 ga Ce, Y, Sm qo'shib, gidrotermal usulda nanochanglar hosil qilgan va ularni issiq presslash yordamida zichlashtirganlar[3]. Ba'zi tadqiqotlar eritimali legirlash hamda mexanik qorishtirib-sintezlash (shar tegirmoni va uchqunli plazma sintezlash, SPS) texnikalarini qo'llagan.

Misol uchun, Yang va boshq. Lu bilan legirlangan Bi_2Te_3 ni dastlab gulchelak shaklli nanozarrachalar tarzida olgan, so'ng ularni SPS bilan siqib polikristall namunalar tayyorlaganlar[3]. Ko'pchilik hollarda Bi_2Te_3 da nodir yer

elementlari Bi kristall panjarasi tuguniga joylashadi deb taxmin qilinadi [8]. Shu manbaga asosan $\text{Bi}_{2-x}\text{R}_x\text{Te}_3$ ko'rinishida yozish mumkin. Legirlash darajasi odatda $x = 0,05-0,20$ (5–10 at.%) oralig'ida o'rganilgan, chunki kirishmani ortiqcha kiritish ikkilamchi fazalar ajralib chiqishiga va termoelement xossalari yomonlashishiga olib kelishi mumkin[9,10]. Masalan, Dy bilan haddan tashqari (25%) legirlanganda Bi_2Te_3 tarkibida Dy_2Te_3 kabi ortiqcha fazalar paydo bo'lishi kuzatilgan va elektr xossalari yomonlashgan [11].

Legirlangan namunalarning termoelektrik xususiyatlari standart usullar bilan o'lchangan. Elektr o'tkazuvchanlik σ va Holl efekti 4-zondli sxemalarda o'lchanib, zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi va harakatchanligi baholangan [7]. Seebek koefitsiyenti α ni o'lchash uchun namunalar qizdirilib, ularning uchi bo'ylab harorat gradiyenti hosil qilingan va termoEYuK ΔU o'lchangan ($\alpha = -\Delta U/\Delta T$) [4]. Issiqlik o'tkazuvchanlik κ pastga yo'naltirilgan issiqlik oqimi sensori yordamida topilgan, undan panjaraviy va elektron hissalariga ajratilgan [12]. Bu kattaliklar asosida harorat funksiyasi sifatida $ZT(T)$ hisoblab chiqilgan. Shuningdek, namunalar tuzilishi rentgen difraksiyasi (XRD) va elektron mikroskopiya (SEM, TEM) bilan tahlil qilinib, legirlash natijasida kristall panjarada defektlar va faza o'zgarishlari kuzatilgan [3].



1-rasm. SEM tasvirlari (issiq presslangan namunalar): (a) Bi_2Te_3 , (b) $\text{Ce}_{0.2}\text{Bi}_{1.8}\text{Te}_3$, (c) $\text{Y}_{0.2}\text{Bi}_{1.8}\text{Te}_3$ va (d) $\text{Sm}_{0.2}\text{Bi}_{1.8}\text{Te}_3$ [3]

Masalan, SEM tasvirlari Ce, Y, Sm legirlangan Bi_2Te_3 namunalarida odatdagidan ancha mayda va tartibsiz nanochiziqlar hosil bo'lishini ko'rsatgan (1-rasm) [3], bu esa fononlarning chegaralarda sochilishini kuchaytiradi.

Tadqiqot metodologiyasi

Nodir yer elementlari bilan legirlash natijasida Bi_2Te_3 ning termoelektrik parametrlari sezilarli darajada o'zgaradi. 1-jadvalda Bi_2Te_3 ning turli kirishmalar bilan ma'lum konsentratsiyada legirlanganda erishilgan maksimal ZT qiymatlari va ularning haroratlari keltirilgan. Kuzatilishicha, ba'zi kirishmalar (masalan, Ce, Y, Lu) nisbatan kichik konsentratsiyadayoq ZT ni keskin oshirgan, boshqalari esa (masalan, La, Gd) nisbatan kamroq samara bergan. Quyida har bir element bo'yicha kuzatilgan natijalar batafsil yoritiladi.

1-jadval

Bi_2Te_3 ning turli nodir yer elementlari bilan legirlanganda erishilgan maksimal ZT qiymatlari [4,5]. (*) – agar qo'shimcha usul qo'llangan bo'lsa (nano/nanotuzilma, teksturlash)

Kirishma (at.%)	ZT_max (T, K)	Izohlar
Ce (10%)	1,29 (398 K)[3]	α va σ oz o'zgarib, κ keskin pasaygan.
La (5%)	0,58 (480 K)[2]	Mo'tadil samara, fonon sochilishi o'rtacha.
Sm (10%)	~0,9 (400 K) [3]	Ce ga qaraganda pastroq samara[3].
Y (10%)	1,23 (410 K)[2]	σ va α muvozanati yaxshi, κ pasaygan[2].
*Gd (5%)	0,75 (420 K)[14]	SPS teksturlangan namuna,

Kirishma (at.%)	ZT _{max} (T, K)	Izohlar
		<i>anisotropiya muhim.</i>
Dy (10%)	~0,85 (350 K)[11]	Oraliq legirlashda eng yuqori; 25% li legirlashda pasaygan.
Eu (~5%)	~0,6–0,7 (300 K)	σ keskin kamaygan (harakatchanlik pasaygan)[6].
Er (2%)	~0,5–0,6 (300–350 K)	T _m ga yaqin, lekin uncha samarali emas[6].
Tm (5%)	0,7 (450 K)[5]	Rezonansli sathlar α ni oshirgan.
Yb (2%)	~0,6–0,8 (400 K)	Og‘ir atom ta’siri, o‘rtacha samara
Lu (5%)	1,7 (373 K)[3]	Eng yuqori ZT; rezonans va κ kamayishi[3,4].
Tb (~3%)	~0,5 (300 K)	σ sezilarli pasaygan (magnit tarqatish) [6].

Izoh: yuqoridagi qiymatlar tegishli adabiyotlarda ma’lum sharoitlarda olingan; ular kirishma konsentratsiyasi va namuna tayyorlash usuliga bog‘liq.

Natijalar va ularning tahlili

Ce – Bi₂Te₃ uchun eng samarali kirishmalardan biri hisoblanadi. Wu va boshqalarning ishlarida, atigi 10 at.% Ce qo‘shilganda Bi₂Te₃ ning ZT qiymati ~0,5 dan 1,29 gacha oshgan (398 K da) [3]. Bu natija Ce legirlash natijasida issiqlik o‘tkazuvchanlik keskin pasayishi bilan bog‘liq: Ce atomlari kristall panjarada fonon tarqalishini kuchaytirib, κ ni kamaytirgan.

E’tiborlisi, Ce qo‘shish elektr o‘tkazuvchanlik σ va Seebek koeffitsiyenti α ga katta ta’sir qilmagan – ya’ni σ va α deyarli Bi₂Te₃ dagidek saqlangan. Shunday qilib, κ ni pasayishi hisobiga quvvat faktori ($\alpha^2\sigma$) saqlanib, ZT oshgan. Maksimal ZT=1,29 ga 398 K da erishilgan bo‘lib, bu an’anaviy zonali eritma usulida olingan Bi₂Te₃ quymalari ZT qiymatidan ancha yuqoridir [3]. Ce legirlanishi struktura

jihatidan Bi_2Te_3 tarkibidagi o'z-o'zini legirlaydigan tugun almashuvi nuqsonlar – masalan, Te panjarasida Bi atomlari bo'lishi – sonini kamaytiradi. Natijada, keraksiz ortiqcha elektronlar konsentratsiyasi normallasadi va elektronlar tarqalish masofasi uzayadi. Ce legirlangan namunalarda SEM tasvirlari nanogul shaklidagi donachalar hosil bo'lishini ko'rsatgan, bu esa fononlarning chegara sochilishini kuchaytirgan va issiqlik o'tkazuvchanlik κ ni tushirgan [3].

Lantan (La) bilan legirlaganda Bi_2Te_3 ning termoelektrik ko'rsatkichi ozroq oshgan. Ilmiy manbalarda 5–10 at.% La qo'shilganda $ZT \sim 0,5$ dan $\sim 0,6$ gacha oshgani keltiriladi. Masalan, Zhang va boshq. 5% La qo'shib guldasta shaklidagi nanoklasterlar hosil qilgan holda Bi_2Te_3 olgan va 480 K da $ZT \approx 0,58$ ni qayd etgan [2]. La kirishmasi Bi ga nisbatan ancha katta radiusga ega bo'lib, kristall panjarani buzadi, lekin uning massasi ham Bi ga yaqinroq ($\text{La} \approx 139$, $\text{Bi} \approx 209$ a.m.b.), shuning uchun fonon sochilishi o'rtacha darajada bo'ladi [3].

La legirlanganda α biroz oshgani va σ kichik kirishmalarda biroz yaxshilangani qayd etilgan. Ayniqsa, vakuumda issiq press qilingan La-legirlangan Bi_2Te_3 namunalarda α legirlanmagan Bi_2Te_3 ga qaraganda yuqoriroq bo'lib, oz miqdordagi La σ ni ham bir oz oshirganligi ma'lum [14]. Bu shuni ko'rsatadiki, La kichik konsentratsiyada donor nuqsonlar hosil qilib, tashuvchilarni optimal miqdorda oshiradi (shuning hisobiga σ o'sadi), ayni paytda panjaraviy tartibsizlik tufayli α ham pasaymaydi. Ammo La ning samarasi Ce yoki Y kabi emas – uning rezonansli energetik sath hosil qilish xususiyati kuzatilmagan, shuning uchun ZT oshishi mo'tadil. La-legirlangan namunalarni issiqlik o'tkazuvchanligi taxminan $0,9 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ bo'lib, Bi_2Te_3 dagi $1,4 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ga nisbatan $\sim 35\%$ pastdir [2].

Samariy (Sm) ham uch valentli element bo'lib, Bi joyini egallaydi. Wu va hamkorlarining xabar berishicha, 10 at.% Sm qo'shilganda Bi_2Te_3 ning ZT qiymati oshgan bo'lsa-da, Ce bilan solishtirganda biroz pastroq bo'lgan [3]. Aniqroq aytganda, Sm legirlangan namunada $\sim 0,8$ – $0,9$ atrofida ZT ga erishilgan (taxminan

400 K da), bu Ce legirlangan analog (1,29) dan pastdir. Buning sabablaridan biri Sm atomining rezonans sath hosil qilish qobiliyati pastligi va uning ta'siri asosan fonon sochilishini kuchaytirish bilan cheklanishidir. Haqiqatan ham, Sm legirlanganda issiqlik o'tkazuvchanlik Bi_2Te_3 dagiga nisbatan pasaygan va mikrostrukturada Sm-telluridi ikkilamchi cho'kindi fazalar paydo bo'lishi kuzatilgan [3]. Bu ikkilamchi mikrofazalar fononlarni tarqatadi, lekin ular elektron transportiga kuchli halal bermagan. Shu bois Sm legirlangan Bi_2Te_3 da α va σ qiymatlari deyarli o'zgarmagan holda κ pasayishi hisobiga ZT oshgan. Biroq, Sm Bi_2Te_3 tarkibida juda katta eruvchanlikka ega emas; 10% dan ortiq Sm qo'shilganda Sm_2Te_3 fazasi ajralib chiqishi mumkinligi va ortiqcha Sm elektr o'tkazuvchanlikni kamaytirishi adabiyotlarda ta'kidlanadi [13,6]. Shunday ekan, Sm kirishmasining optimal darajasi taxminan 5–10% oralig'idadir.

Ittriy (Y) – nodir yer elementlaridan yana biri bo'lib, Bi_2Te_3 da juda muvaffaqiyatli kirishma sifatida e'tirof etilgan. Y atomi Bi ga nisbatan yengilroq (≈ 89 a.m.b.) va uch valentli bo'lgani sababli, Bi panjarasiga kiritilganda muvozanatli ta'sir ko'rsatadi. Shi va boshqalar Y legirlangan Bi_2Te_3 gullar hosil qiluvchi nanochanglarni gidrotermal usulda olishdi va ularni issiq pressda zichlashtirishdi [2]. Natijada 10 at.% Y qo'shilgan namunada $ZT = 1,23$ ga 410 K da erishildi, bu shu davrgacha n-tip Bi_2Te_3 uchun eng yuqori ko'rsatkichlardan biri edi [2]. Y kirishmasining ijobiy ta'siri bir necha omil bilan bog'liq.

Y kiritilishi Bi_2Te_3 tarkibidagi o'rin almashgan atom nuqsonlarini kamaytirib, elektron tashuvchilar konsentratsiyasini optimal darajaga tushiradi, natijada ortiqcha tashuvchilar hosil bo'lmaydi [3]. Shu bilan birga, Y atomlari fononlarning tarqalishini kuchaytirib, panjaraviy issiqlik o'tkazuvchanlikni $\sim 0,85$ W/m·K gacha kamaytiradi, bu esa legirlanmagan Bi_2Te_3 dagi 1,4 W/m·K qiymatidan sezilarli darajada pastdir [2].

Y elementining qisman donor sifatidagi roli elektr o'tkazuvchanlikni oshirgan, biroq elektronlarning effektiv massasi ortishi hisobiga Seebeck ko'effitsiyenti $-150 \mu\text{V/K}$ atrofida saqlangan yoki hatto oshgan [2]. Bu holat odatda Pisarenko egri chizig'i ($\alpha(n)$ munosabati) bilan taqqoslanganda kuzatiladi: ya'ni, Y bilan legirlangan Bi_2Te_3 namunalarida Seebeck ko'effitsiyenti nazariy kutilgandan yuqoriroq qiymatga ega bo'lgan [1].

Bi_2Te_3 ning Seebeck ko'effitsiyenti tashuvchilar konsentratsiyasiga bog'liqligi odatda Pisarenko munosabati orqali tushuntiriladi. U quyidagi formula bilan ifodalanadi:

$$\alpha = \frac{8\pi^2 k_B^2}{3eh^2} m^* T \left(\frac{\pi}{3n} \right)^{\frac{2}{3}}$$

bu yerda k_B – Boltsman doimiysi, e – elektron zaryadi, h – Plank doimiysi, m^* – tashuvchilarning effektiv massasi, T – absolut harorat, n – tashuvchilar konsentratsiyasi.

Ushbu munosabatga ko'ra, tashuvchilar konsentratsiyasi oshganda Seebeck ko'effitsiyenti kamayadi (n-tip Bi_2Te_3 uchun manfiy qiymatlar ortadi). Sof Bi_2Te_3 uchun Pisarenko grafigi tajribaviy qiymatlar bilan yaxshi mos keladi. Ammo Ce va Y legirlovchi kirishmalari bilan legirlangan namunalarda o'lchangan α qiymatlari nazariy egri chiziqdan yuqoriroq joylashdi. Bu hodisa ikki asosiy mexanizm bilan bog'liq: birinchidan rezonans sathlar hosil bo'lib, elektronlarning energiya bo'yicha tanlab tashilishini kuchaytiradi va α kutilganidan yuqoriroq qiymat oladi; boshqa tomondan tugun almashuvi nuqsonlarning kamayishi tashuvchilar konsentratsiyasini optimal darajaga keltiradi.

Wu va hamkorlarining ma'lumotlariga ko'ra, $\text{Y}_{0.2}\text{Bi}_{1.8}\text{Te}_3$ namunasining quvvat omili $\alpha^2\sigma \approx 1,2 \text{ mV}^2/(\text{K}^2 \cdot \text{m})$ bo'lib, bu legirlanmagan Bi_2Te_3 ga nisbatan ikki baravar yuqori qiymatdir [3]. Demak, Y kirishmasi Bi_2Te_3 da elektron tarmoqqa rezonansli ta'sir ko'rsatib, α va σ ni bir vaqtda optimallashtirishga

erishadi. Y legirlangan nanonamunalarda ZT 300–450 K diapazonda 1 dan yuqori bo‘lib, bu ularni amaliy termoelektrik qurilmalarda qo‘llash uchun yuqori darajada istiqbolli va amaliy ahamiyatga ega materiallarga aylantiradi.

Gadoliniy (Gd) – og‘ir (≈ 157 a.m.b.) va magnit xossali (S^{72}) element bo‘lib, u bilan legirlaganda bir vaqtning o‘zida fonon va elektron tizimga ta’sir ko‘rsatadi. Faiza Arif va boshqalar Bi_2Te_3 ni sol-gel usulida 5% Gd bilan legirladilar va materialning faqat xona haroratdagi xossalarini o‘lchadilar [14].

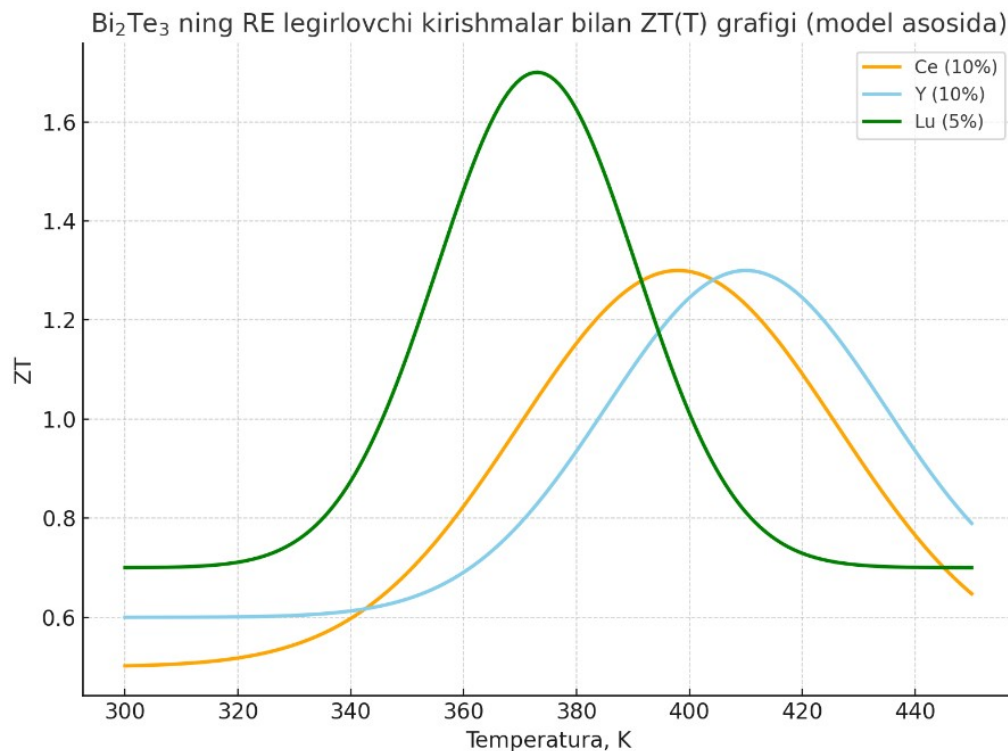
[6,14] adabiyotlarda keltirilishicha, gadoliniy kiritilishi Bi_2Te_3 ning o‘zgaruvchan tok rejimidagi elektr o‘tkazuvchanligini oshirgan va dielektrik doimiysini kamaytirgan bo‘lib, bu hodisa materialning ba’zi elektr xususiyatlariga sezilarli ta’sir ko‘rsatadi.

Doimiy tok rejimida esa gadoliniy legirlangan Bi_2Te_3 namunalarining elektr qarshiligi biroz ortgan (zaryad tashuvchilar harakatchanligi kamaygan) hamda Seebeck koeffitsiyenti xona haroratida kichik musbat qiymatga ega bo‘lib, p-tip xususiyat namoyon etgan. Bu holat ehtimol, kristall panjarada Gd^{3+} o‘rniga oz miqdorda Gd^{2+} ionlarining kiritilishi bilan bog‘liq bo‘lishi mumkin.

Gd legirlanishining issiqlik o‘tkazuvchanlikka ta’siri ham tadqiq etilib, κ ning ozgina pasaygani qayd etilgan (300 K da $\approx 1,3$ W/mK atrofida) [14]. Gd kirishmasining eng qiziqarli jihati – uning kuchli magnit momenti. Gd^{3+} (7 ta to‘ldirilmagan f-elektron) kristalda magnit qo‘shimcha tartibsizlik kiritadi va bu elektronlarning spini bilan bog‘liq qo‘shimcha tarqalish kanalini hosil qilishi mumkin.

Lyutetsiy (Lu) qo‘shilganda eng yuqori natijalar qayd etilgan: 5 at.% Lu legirlangan namunada 373 K da $ZT \approx 1,7$ ga erishilgan [4]. Bu yuqori qiymatning sababi Lu atomlarining katta massa kontrasti va panjaraga kiritilishi natijasida fonon sochilishining keskin kuchayishi, shuningdek, elektron tizimda rezonansli sathlarning shakllanishi bilan izohlanadi. Natijada panjaraviy issiqlik

o'tkazuvchanlik sezilarli kamayib, Seebeck ko'effitsiyenti Pisarenko munosabatiga nisbatan yuqoriroq qiymat olgan. Shu bois Lu legirlangan Bi_2Te_3 namunalarini past haroratli termoelektrik sovutgichlar va kichik quvvatli generatorlar uchun eng istiqbolli variantlardan biri deb hisoblash mumkin.. Bu holat 2-rasmda ko'rsatilgan.



2-rasm. Bi_2Te_3 ning Ce (10%), Y (10%) va Lu (5%) legirlovchi kirishmalar bilan ZT ning haroratga bog'liqligi (model asosida)

Grafikdan ko'rinib turibdiki, Lu (5%) ~ 373 K da eng yuqori $ZT \approx 1,7$ qiymatiga erishgan. Ce (10%) esa ~ 398 K da $ZT \approx 1,3$ ko'rsatgan, Y (10%) esa ~ 410 K da $ZT \approx 1,2$ qiymatga chiqqan.

Bu natijalar shuni ko'rsatadiki, turli nodir yer elementlari bilan legirlash Bi_2Te_3 ning termoelektrik samaradorligini sezilarli oshiradi. Ce va Y legirlanganda α va σ ni optimallashtirish hisobiga, Lu qo'shilganda esa κ ning katta miqdorda pasayishi hisobiga yuqori ZT qiymatlariga erishilgan.

Xulosa

Olib borilgan tahlillardan ko‘rinib turibdiki, Bi_2Te_3 ni nodir yer elementlari bilan legirlash uning elektrofizik va termoelektrik xossalarini yaxshilashning samarali usuli hisoblanadi. Lu (≈ 5 at.%) eng yuqori samara berib, ~ 373 K da $ZT \approx 1,7$ qiymati qayd etilgan. Ce (≈ 10 at.%) va Y (≈ 10 at.%) barqaror yuqori qiymatlarni ta‘minlab, ZT ni 1,2–1,3 oralig‘ida ko‘rsatgan. Bu natijalar asosan panjaraviy issiqlik o‘tkazuvchanlikning keskin kamayishi, tugun almashuvi nuqsonlarining kamayishi va rezonans sathlarning hosil bo‘lishi bilan izohlanadi.

Shuningdek, legirlash darajasi juda muhim: 5–10 at.% diapazonida samarali bo‘lsa-da, bundan yuqori konsentratsiyalar ikkilamchi fazalar paydo bo‘lishi va elektr o‘tkazuvchanlik xossalarining yomonlashishiga olib keladi. Nano- va mikrostrukturani boshqarish (gidro/solvotermal sintez, SPS, issiq presslash) fonon sochilishini kuchaytirib, issiqlik o‘tkazuvchanlikni yanada kamaytiradi hamda termoelektrik samaradorlikni oshiradi. Boshqa kirishmalar (La, Sm, Gd, Dy va h.k.) ma‘lum darajada ijobiy ta‘sir ko‘rsatgan, ammo ularning samarasi nisbatan past bo‘lgan.

Umuman olganda, nodir yer elementlari bilan legirlangan Bi_2Te_3 past temperaturali sovutgich modullar va termoelektrik generatorlar uchun istiqbolli material sifatida tavsiya etiladi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Rowe DM. *Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano*. Boca Raton: CRC Press; 2006.
2. Goldsmid HJ. *Introduction to Thermoelectricity*. Berlin: Springer; 2010.

3. Wu Y, Zhu T, Zhao XB, et al. Effects of Ce, Y and Sm doping on the thermoelectric properties of Bi_2Te_3 alloys synthesized via hydrothermal method. *J Alloys Compd.* 2011;509(5):2316–2321.
4. Ji XH, Zhao XB, Zhang YH, Lu BH, Ni HL. Synthesis and properties of rare earth containing Bi_2Te_3 -based thermoelectric alloys. *J Alloys Compd.* 2005;387(1–2):282–286.
5. Snyder GJ, Toberer ES. Complex thermoelectric materials. *Nat Mater.* 2008;7(2):105–114.
6. Abdullayev NA, Jafarli KM, Aliguliyeva KhV, Aliyeva NA, Aliyev ZS, Kahramanov RM. Effect of doping with rare-earth elements (Eu, Tb, Dy) on the conductivity of Bi_2Te_3 layered single crystals. *Semiconductors.* 2017;51(7):942–946.
7. Ni HL, Zhu TJ, Zhao XB. Thermoelectric properties of hydrothermal synthesized Bi–Te–Se alloys. *J Funct Mater.* 2006;37(10):1561–1563. (in Chinese).
8. Ivanov O, Yaprntsev M, Lyubushkin R, Soklakova O. Enhancement of thermoelectric efficiency in Bi_2Te_3 via rare earth element doping. *Scr Mater.* 2018;148:91–94.
9. Yaprntsev M.N., Lyubushkin R.A., Soklakova O.N., Ivanov O.N. Effects of Lu and Tm doping on thermoelectric properties of Bi_2Te_3 compound. *J Electron Mater.* 2018;47(3):1362–1370.
10. Bell LE. Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems. *Science.* 2008;321(5895):1457–1461.
11. Kristiantoro T, Mada D, Fauzia V. The influence of Dy concentration on the thermoelectric properties of n-type Dy-doped Bi_2Te_3 pellets prepared by hydrothermal and carbon burial sintering. *J Phys Chem Solids.* 2021;158:110241.

12. Dresselhaus MS, Chen G, Tang MY, Yang RG, Lee H, Wang D, Ren Z, Fleurial JP, Gogna P. New directions for low-dimensional thermoelectric materials. *Adv Mater*. 2007;19(8):1043–1053.
13. Undoped and rare earth (RE) doped Bi_2Te_3 crystal structure [Figure]. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Undoped-and-rare-earth-RE-doped-Bi2Te3-crystal-structure-Bibblue-Tered-REgreen_fig1_330316416
14. Arif F, Farooq O, Fatima-Tuz-Zahra, Anis-Ur-Rehman M. Structural and thermoelectric properties of Gd doped Bi_2Te_3 . *Key Eng Mater*. 2018;778:189–194.