

NAMANGAN DAVLAT
UNIVERSITETI
ILMIY AXBOROTNOMASI, [2026-9]
ISSN:2181-1458
ISSN:2181-0427



01.00.00-FIZIKA-MATEMATIKA
journal.namdu.uz
PHYSICS AND MATHEMATICS

UDK 539.216:539.26:539.1.074

VSi₂ INTERMETALL QOTISHMASINING FTIR VA RAMAN SPEKTROSKOPIYASI ASOSIDA VIBRATSION TAVSIFI

Eshquvvatov Habibullo Mansur o' g' li

Termiz davlat universiteti tayanch doktoranti

ORCID: 0009-0009-4863-3599

eshquvvatovhabibullo4@gmail.com

Turopov Ilhom Himmataliyevich

Toshkent renessans universiteti tabiiy fanlar kafedrasini mudiri, (PhD) dotsent.

ORCID: 0000-0002-3251-9742

turapov_19_86@mail.ru

Igamov Baxrom Djurayevich

O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasining Konstruktorlik byurosi va tajriba-sinov ishlab chiqarish ilmiy-texnik markazida yetakchi ilmiy xodim, PhD.

ORCID: 0009-0005-6465-1384

igamov_bd@mail.ru

Алексей Камардин

O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasining Konstruktorlik byurosi va tajriba-sinov ishlab chiqarish ilmiy-texnik markazida katta ilmiy xodim, f-m.f.n

ORCID: 0000-0002-7972-9798

kadmon@bk.ru

Qosimov Isroil Odinayevich

O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi O.S.Sodiqovnomidagi Bioorganik kimyo instituti kichik ilmiy xodim, DcS.

ORCID: 0000-0002-3463-2861

isroilkosimov@list.ru

Abilfayziyev Shokir Narmuratovich

Termiz davlat muhandislik va agrotexnologiyalar universiteti Aniq va tabiiy fanlar kafedrasini mudiri, dots.

ORCID: 0009-0006-4355-5526

abilfayziyev@inbox.ru

Annotatsiya: Ushbu ishda Spark Plasma Sintering (SPS) usuli yordamida 1415 °C harorat va 50 MPa bosim ostida sintez qilingan VSi₂ intermetall qotishmasining strukturaviy, morfologik, topografik, kimyoviy va vibratsion xususiyatlari kompleks ravishda o'rganildi. Vibratsion tavsiflash Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) va Raman spektroskopiyasi yordamida amalga oshirildi. FTIR spektrlarida V-Si va Si-O bog'lanishlariga xos vibratsion modalar aniqlangan bo'lsa, Raman spektrlarida geksagonal VSi₂ fazasiga tegishli Raman-aktiv cho'qqilar kuzatildi. Olingan natijalar SPS texnologiyasi yuqori kristallanish darajasi, past porozlik, yaxshi strukturaviy yaxlitlik va yuqori kimyoviy bir jinslilikka ega VSi₂ intermetall qotishmalarini olish uchun samarali sintez usuli ekanligini tasdiqlaydi.

Kalit so'zlar: VSi₂, Spark Plasma Sintering (SPS), FTIR, Raman spektroskopiyasi, strukturaviy va morfologik tahlil, kimyoviy bir jinslilik.

ВИБРАЦИОННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ VSi₂ НА ОСНОВЕ FTIR И РАМАН-СПЕКТРОСКОПИИ

Аннотация: В данной работе комплексно исследованы структурные, морфологические, топографические, химические и вибрационные свойства интерметаллического соединения VSi₂, синтезированного методом Spark Plasma Sintering (SPS) при температуре 1415 °C и давлении 50 МПа. Вибрационная характеристика образцов выполнена методами инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (FTIR) и спектроскопии комбинационного рассеяния (Раман-спектроскопии). В FTIR-спектрах обнаружены вибрационные моды, характерные для связей V-Si и Si-O, тогда как в

рамановских спектрах зарегистрированы раман-активные пики, соответствующие гексагональной фазе VSi_2 . Полученные результаты подтверждают, что технология SPS является эффективным методом синтеза интерметаллических соединений VSi_2 с высокой степенью кристалличности, низкой пористостью, хорошей структурной целостностью и высокой химической однородностью.

Ключевые слова: VSi_2 , Spark Plasma Sintering (SPS), FTIR, Раман-спектроскопия, структурный и морфологический анализ, химическая однородность.

VIBRATIONAL CHARACTERIZATION OF VSi_2 INTERMETALLIC COMPOUND BASED ON FTIR AND RAMAN SPECTROSCOPY

Abstract: In this study, the structural, morphological, topographical, chemical, and vibrational properties of a VSi_2 intermetallic compound synthesized by Spark Plasma Sintering (SPS) at 1415 °C under a pressure of 50 MPa were comprehensively investigated. Vibrational characterization was performed using Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) and Raman spectroscopy. The FTIR spectra revealed vibrational modes associated with V–Si and Si–O bonds, while the Raman spectra exhibited Raman-active peaks corresponding to the hexagonal VSi_2 phase. The obtained results confirm that SPS is an effective synthesis technique for producing VSi_2 intermetallic compounds with a high degree of crystallinity, low porosity, good structural integrity, and high chemical homogeneity.

Keywords: VSi_2 , Spark Plasma Sintering (SPS), FTIR; Raman spectroscopy, structural and morphological analysis, chemical homogeneity.

1. Kirish

Energetika, aerokosmik sanoat va yuqori texnologiyali ishlab chiqarish tarmoqlarida ekstremal harorat sharoitida barqaror ishlaydigan materiallarga bo'lgan ehtiyoj yuqori erish harorati, past zichlik va yuqori kimyoviy barqarorlikka ega intermetall birikmalarga qiziqishni sezilarli darajada oshirdi [1]. Xususan, $MoSi_2$, $TiSi_2$, $CoSi_2$ va VSi_2 kabi o'tga chidamli metall silitsidlari yuqori haroratli energetika, mikroelektronika, termoelektrik qurilmalar va himoya qoplamalari uchun istiqbolli materiallar sifatida keng o'rganilmoqda [2]. Vanadiy silitsidlari orasida VSi_2 intermetall birikmasi yuqori erish harorati (≈ 2030 °C), nisbatan past zichligi, yuqori qattiqligi va termik barqarorligi bilan ajralib turadi [3]. Elektr va issiqlik xossalari qulay uyg'unligi tufayli u yuqori harorat sensorlari, diffuzion to'siq qatlamlari va termoelektrik elementlar uchun istiqbolli material hisoblanadi [4-5]. VSi_2 ning funksional xossalari uning kristall tuzilishi, mikrostrukturasi va kimyoviy bir jinsliligiga bevosita bog'liq.

V–Si tizimida V_3Si , V_5Si_3 va VSi_2 kabi bir nechta intermetall fazalar mavjud bo'lib, ularning shakllanishi sintez sharoitlariga kuchli darajada bog'liq [16]. Shu sababli VSi_2 asosidagi materiallarning fazaviy shakllanishi, kristallanish mexanizmi va mikrostrukturaviy evolyutsiyasini o'rganishga qaratilgan tadqiqotlar jadal rivojlanmoqda [6].

Intermetall qotishmalarining xossalari kristallit o'lchami, dona morfologiyasi, sirt topografiyasi va elementlarning fazoviy taqsimlanishi bilan chambarchas bog'liq [7-8]. Shuning uchun FTIR va Raman spektroskopiyasi usullaridan kompleks foydalanish materialning strukturaviy hamda kimyoviy bog'lanish xususiyatlarini ishonchli tavsiflash imkonini beradi.

An'anaviy vakuum sinterlash va issiq presslash usullari yuqori energiya sarfi hamda donalarning ortiqcha o'sishi bilan tavsiflanadi [9]. Bunga nisbatan Spark Plasma Sintering (SPS) texnologiyasi impulsli elektr toki va mexanik bosimning sinergetik ta'siri hisobiga qisqa vaqt ichida yuqori zichlikka ega intermetall materiallarni olish imkonini beradi [10].

Mazkur ishning maqsadi 1415 °C harorat va 50 MPa bosim ostida SPS usuli yordamida sintez qilingan VSi_2 intermetall qotishmasining fazaviy tarkibi, kristall tuzilishi, mikrostrukturasi, sirt topografiyasi, kimyoviy tarkibi va vibratsion xususiyatlarini FTIR va Raman spektroskopiyasi yordamida kompleks tavsiflash hamda ushbu parametrlar o'rtasidagi bog'liqlikni aniqlashdan iborat.

2. Tadqiqot metodikasi

VSi_2 intermetall qotishmasi yuqori tozalikdagi V va Si kukunlaridan stexiometrik nisbatda tayyorlanib, Spark Plasma Sintering (SPS) usuli yordamida 1415 °C harorat va 50 MPa bosim ostida sintez qilindi. Sinterlash vakuum/inert atmosfera sharoitida amalga oshirildi va namuna tabiiy ravishda sovitildi.

Tadqiqotning asosiy qismi materialning vibratsion xususiyatlarini aniqlashga qaratildi. Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) yordamida V–Si va Si–O bog'lanishlariga xos vibratsion modalar identifikatsiya qilindi. Raman spektroskopiyasi esa kristall panjaraning fonon tebranishlarini tahlil qilish orqali geksagonal VSi_2 fazasiga tegishli Raman-aktiv cho'qqilarni aniqlash va kristallanish darajasini baholash uchun qo'llanildi. FTIR va Raman natijalari o'zaro solishtirilib, materialdagi atomlararo bog'lanishlar, fazaviy tarkib va kristall tuzilmaning vibratsion xususiyatlari o'rtasidagi bog'liqlik kompleks ravishda tahlil qilindi. Bu yondashuv SPS usulida sintez qilingan VSi_2 intermetall qotishmasining strukturaviy yaxlitligi va kimyoviy bir jinsliligini yuqori ishonchlilik bilan tavsiflash imkonini berdi.

3. Tadqiqot natijalari va ularning tahlili

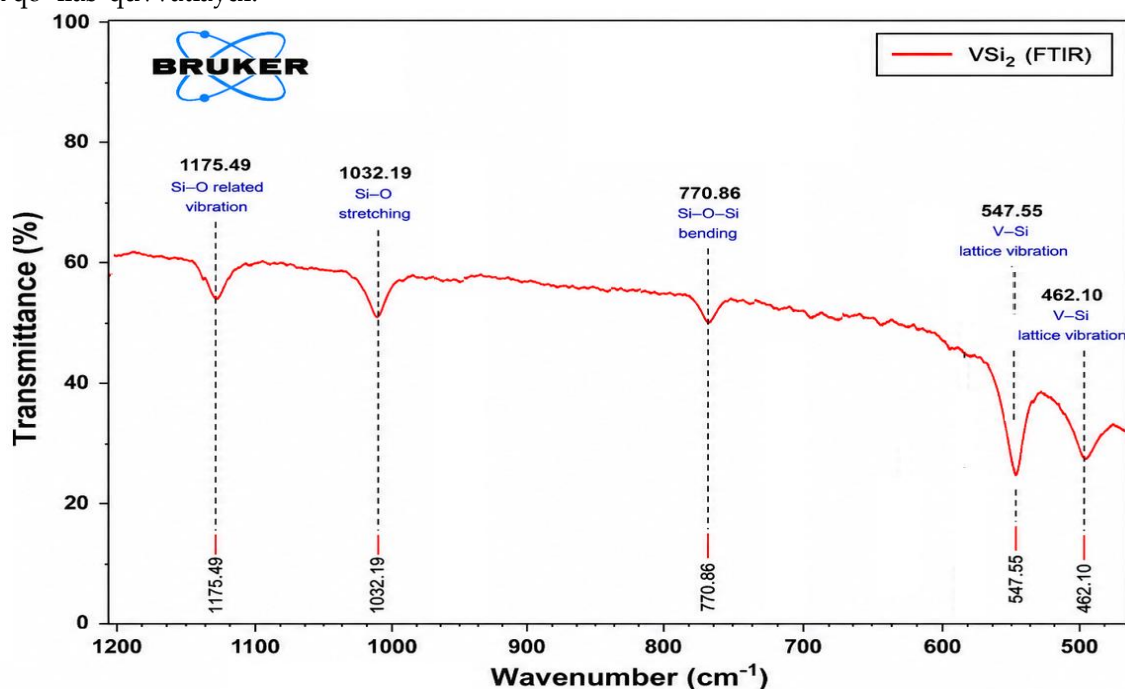
VSi_2 intermetall qotishmasining kimyoviy bog' lanishlari va sirt kimyoviy holatini baholash maqsadida Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) usulida tahlil amalga oshirildi (1-rasm). FTIR spektri 1200–500 cm^{-1} to' lqin sonlari oralig' ida qayd etildi. Mazkur diapazon asosan V–Si va Si–O bog' lanishlariga xos panjara hamda deformatsion vibratsion modalarni tavsiflaydi. Spekrtdagi yutilish zonalarining talqini XRD va EDS natijalari bilan kompleks ravishda amalga oshirildi.

1175.49 cm^{-1} da kuzatilgan yutilish zonasi Si–O bog' lanishlariga oid vibratsion modalar yoki sirt qatlamida mavjud bo' lgan kislorod tutuvchi guruhlarning tebranishlari bilan bog' liq bo' lishi mumkin. Ushbu cho' qqining nisbatan past intensivligi hamda EDS tahlilida kislorodning 1.0 at.% miqdorda aniqlanishi namuna yuzasida atmosfera ta'siri natijasida hosil bo' lgan juda yupqa oksid qatlami mavjud bo' lishi ehtimolini ko' rsatadi.

1032.19 cm^{-1} da qayd etilgan intensiv yutilish cho' qqisi Si–O bog' lanishlarining cho' zilish (stretching) tebranishlariga mos keladi. Ushbu yutilish odatda sirt oksidlanishi natijasida hosil bo' lgan SiO_2 qatlami bilan bog' liq bo' lib, EDS tahlilida aniqlangan kam miqdordagi kislorod bilan yaxshi uyg' unlik hosil qiladi. XRD difraktogrammasida oksid fazalariga tegishli aniq reflekslarning kuzatilmaganligi oksid qatlamining juda yupqa yoki uning miqdori XRD usulining aniqlash chegarasidan past bo' lishi mumkinligini ko' rsatadi.

770.86 cm^{-1} dagi yutilish zonasi Si–O–Si bog' lanishlarining deformatsion (bending) tebranishlariga mos keladi. Ushbu cho' qqining mavjudligi namuna yuzasida kislorod ishtirokidagi bog' lanishlar shakllanganligini ko' rsatsa-da, uning past intensivligi sirt oksidlanish darajasining cheklanganligini bildiradi.

Past to' lqin sonlari sohasida kuzatilgan 547.55 cm^{-1} va 462.10 cm^{-1} cho' qqilar V–Si bog' lanishlariga xos past chastotali panjara (lattice) vibratsiyalariga mos keladi. Ushbu vibratsion modalar XRD tahlili orqali aniqlangan geksagonal VSi_2 intermetall fazasi bilan yaxshi uyg' unlik hosil qiladi hamda metall–kremniy bog' lanishlarining shakllanganligini bilvosita qo' llab-quvvatlaydi.



1-rasm. SPS usulida sintez qilingan VSi_2 intermetall qotishmasining FTIR spektri.

Umuman olganda, FTIR natijalari XRD va EDS tahlillari bilan yaxshi mos keladi. 1175.49, 1032.19 va 770.86 cm^{-1} da kuzatilgan yutilish zonalari Si–O bog' lanishlariga oid vibratsion modalar bilan bog' liq bo' lib, ular EDS tahlilida aniqlangan 1.0 at.% kislorod hamda namuna sirtida atmosfera ta'siri natijasida hosil bo' lgan juda yupqa oksid qatlami mavjud bo' lishi ehtimolini ko' rsatadi. 547.55 va 462.10 cm^{-1} dagi past chastotali vibratsiyalar esa V–Si bog' lanishlariga xos panjara modalariga mos kelib, XRD tahlili bilan aniqlangan geksagonal VSi_2 intermetall fazasi bilan uyg' unlik hosil qiladi. Natijalarni kompleks baholash SPS usulida sintez qilingan namunaning asosiy qismini VSi_2 intermetall fazasi tashkil etishini, kislorodga oid yutilish zonalari esa asosan atmosfera ta'siri natijasida yuzaga kelgan sirt oksidlanishi bilan bog' liq ekanligini ko' rsatadi.

3.1. VSi_2 qotishmasining Raman tahlili

VSi_2 intermetall qotishmasining kristall tuzilishi va atomlararo bog' lanish holatini baholash maqsadida Raman spektroskopiyasi amalga oshirildi. Raman spektri 532 nm to' lqin uzunlikdagi lazer manbai yordamida qayd etildi va

ushbu bo'limda 100–1000 cm^{-1} oralig' idagi vibratsion modalar tahlil qilindi (2-rasm). Mazkur diapazon VSi_2 kristall panjarasining asosiy optik fonon tebranishlarini o'z ichiga oladi.

Spektrda 174, 223, 239, 331, 376, 471 va 630 cm^{-1} da yettita aniq Raman-aktiv cho'qqi kuzatildi. Ushbu cho'qqilar VSi_2 intermetall fazasiga xos vibratsion modalar bilan mos keladi hamda Raman ma'lumotlar bazalarida (RRUFF va *The Raman Crystallography Project*) keltirilgan geksagonal VSi_2 fazasining spektral xususiyatlari bilan yaxshi uyg'unlik hosil qiladi.

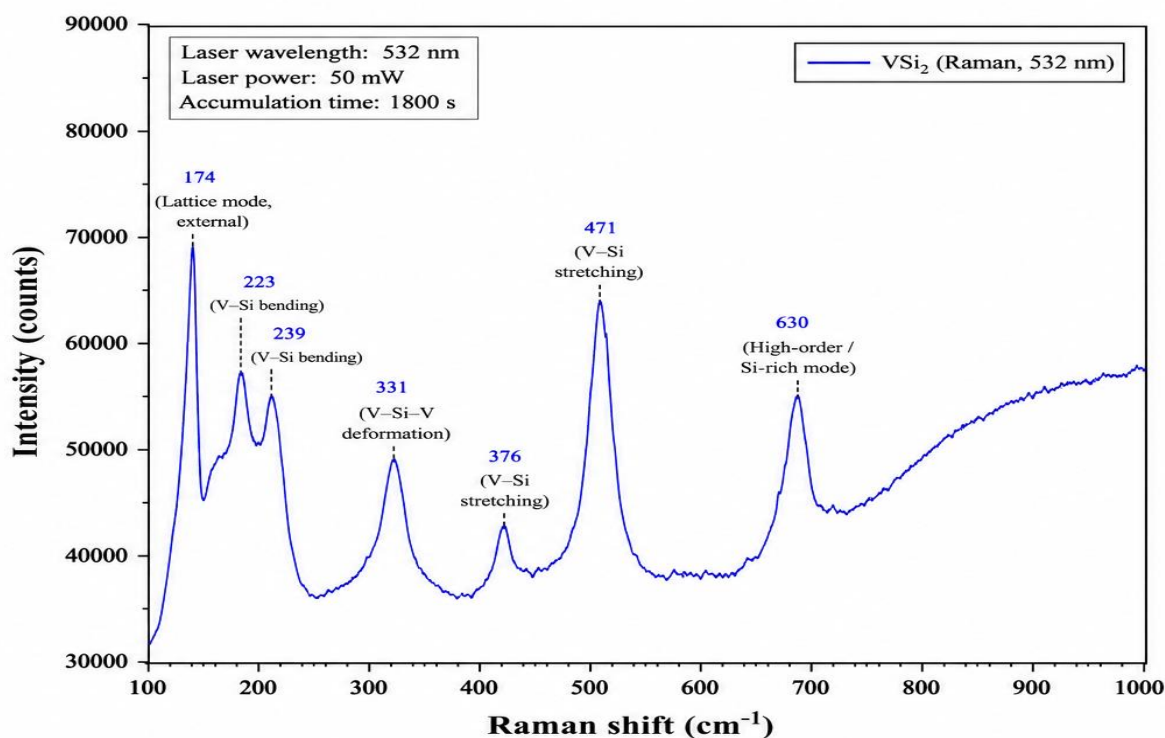
174 cm^{-1} dagi kuchli cho'qqi panjaraning tashqi akustik-optik (*external lattice*) tebranish modasiga mos keladi va eng past to'liq sonli asosiy vibratsion rejim sifatida namoyon bo'ladi. 223 va 239 cm^{-1} dagi cho'qqilar V–Si bog'lanishlarining bukilish (*bending*) vibratsiyalari bilan bog'liq bo'lib, vanadiy va kremniy atomlari orasidagi bog'lanish geometriyasiga sezgir modalarni ifodalaydi.

331 cm^{-1} dagi cho'qqi V–Si–V bog' tizimidagi deformatsion vibratsion harakatlarga mos keladi. 376 cm^{-1} da kuzatilgan cho'qqi esa V–Si bog'lanishlarining cho'zilish (*stretching*) modalaridan biri sifatida talqin qilinadi.

Spektrdagi eng intensiv Raman cho'qqilaridan biri 471 cm^{-1} da qayd etildi. Ushbu cho'qqi V–Si bog'lanishlarining simmetrik cho'zilish modalariga mos keladi va VSi_2 kristall panjarasida metall–kremniy bog'lanishlarining yaxshi shakllanganligini ko'rsatadi. 630 cm^{-1} dagi kengroq cho'qqi yuqori tartibli kombinatsion modalar yoki Si bilan boyigan lokal vibratsion muhit bilan bog'liq bo'lishi mumkin.

Raman spektridagi cho'qqilarning aniq kuzatilishi va ularning pozitsiyalari XRD tahlili orqali aniqlangan geksagonal VSi_2 fazasi bilan yaxshi mos keladi. Spektrda boshqa vanadiy silitsid fazalariga (V_3Si yoki V_5Si_3) xos qo'shimcha cho'qqilarning kuzatilmaganligi namunaning fazaviy jihatdan yuqori darajada bir jinsli ekanligini ko'rsatadi.

Umuman olganda, Raman tahlili SPS usulida sintez qilingan VSi_2 qotishmasida yaxshi kristallangan geksagonal intermetall faza shakllanganligini qo'llab-quvvatlaydi. Raman natijalari EDS tahlillari bilan uyg'unlik hosil qilib, namunaning yuqori kristallanish darajasi va strukturaviy yaxlitligini ko'rsatadi.



2-rasm. SPS usulida sintez qilingan VSi_2 intermetall qotishmasining Raman spektri.

FTIR va Raman natijalarining kompleks tahlili 1415 $^{\circ}\text{C}$ harorat va 50 MPa bosim ostida Spark Plasma Sintering (SPS) usuli yordamida sintez qilingan VSi_2 qotishmasida yuqori darajada konsolidatsiyalangan polikristall mikrostruktura shakllanganligini ko'rsatadi. EDS natijalari vanadiy va kremniyning namuna bo'ylab bir tekis taqsimlanganligini hamda qotishma tarkibining nazariy stexiometrik VSi_2 tarkibiga yaqin ekanligini tasdiqladi. FTIR spektrida Si–O bog'lanishlariga xos zaif yutilish zonalari hamda V–Si bog'lanishlariga tegishli past chastotali panjara vibratsiyalari kuzatildi. Ushbu natijalar namunaning asosiy qismini intermetall faza tashkil etishini, sirtida esa atmosfera ta'siri natijasida hosil bo'lgan juda yupqa oksid qatlami mavjud bo'lishi mumkinligini ko'rsatadi. Raman tahlili esa 174, 223, 239, 331, 376, 471 va 630 cm^{-1} da kuzatilgan Raman-aktiv modalar orqali geksagonal VSi_2 fazasining vibratsion xususiyatlarini tasdiqlab, boshqa silitsid fazalarining sezilarli miqdorda mavjud emasligini ko'rsatdi.

Olingan natijalar birgalikda baholanganda, SPS usuli yordamida yuqori kristallanish darajasi, past porozlik, uzluksiz donalararo kontaktlar va kimyoviy jihatdan bir jinsli VSi_2 intermetall qotishmasi shakllanganligi ko'rinadi. Bunday mikrostrukturaviy holat materialning strukturaviy barqarorligini oshirishga xizmat qilishi hamda elektr, issiqlik va termoelektrik xossalarning yaxshilanishi uchun qulay sharoit yaratishi mumkin. Biroq ushbu bog'liqlikni miqdoriy baholash elektr o'tkazuvchanlik, Hall effekti, Seebeck koeffitsienti va issiqlik o'tkazuvchanligi bo'yicha qo'shimcha eksperimental tadqiqotlarni talab etadi.

Xulosa

Ushbu ishda Spark Plasma Sintering (SPS) usuli yordamida 1415 °C harorat va 50 MPa bosim ostida sintez qilingan VSi_2 intermetall qotishmasining kimyoviy va vibratsion xususiyatlari EDS, FTIR va Raman spektroskopiyasi yordamida kompleks o'rganildi. EDS natijalari vanadiy va kremniyning namuna bo'ylab bir tekis taqsimlanganligini hamda tarkibning stexiometrik VSi_2 ga yaqin ekanligini ko'rsatdi (32.8 at.% V, 65.9 at.% Si, 1.0 at.% O, 0.3 at.% C).

FTIR spektrida 1175.49, 1032.19 va 770.86 cm^{-1} da Si–O, 547.55 va 462.10 cm^{-1} da esa V–Si bog'lanishlariga xos vibratsion modalar aniqlandi. Raman spektrida 174, 223, 239, 331, 376, 471 va 630 cm^{-1} da kuzatilgan Raman-aktiv cho'qqilar geksagonal VSi_2 fazasining spektral xususiyatlari bilan mos kelib, boshqa vanadiy silitsid fazalarining sezilarli miqdorda mavjud emasligini tasdiqladi.

Natijalar SPS usuli yordamida yuqori fazaviy tozalik, yaxshi kristallangan polikristall tuzilma, past porozlik va kimyoviy jihatdan bir jinsli VSi_2 intermetall qotishmasi hosil bo'lganligini ko'rsatdi. FTIR va Raman natijalarining o'zaro mosligi materialning yuqori strukturaviy yaxlitligini tasdiqlaydi. Olingan natijalar SPS texnologiyasining yuqori sifatli VSi_2 intermetall qotishmalarini olish uchun samarali usul ekanligini ko'rsatib, ushbu materialning elektr, issiqlik va termoelektrik xossalarni chuqur o'rganish hamda yuqori haroratda ishlovchi funksional material sifatida qo'llash bo'yicha keyingi tadqiqotlar uchun ilmiy asos yaratadi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. G. Hasemann, C. Müller, D. Grüner, E. Wessel, M. Krüger, Room temperature plastic deformability in V-rich V–Si–B alloys, *Acta Mater.* 175 (2019) 140–147, <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.06.007>.
2. T. Muroga, T. Nagasaka, K. Abe, V.M. Chernov, H. Matsui, D.L. Smith, Z.Y. Xu, S.J. Zinkle, Vanadium alloys - overview and recent results, *J. Nucl. Mater.* 307–311(2002) 547–554, [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(02\)01253-9](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(02)01253-9).
3. H. Kudielka, H. Nowotny, G. Findeisen, Untersuchungen in den systemen: V–B, Nb–B, V–Si–B und Ta–B–Si, *Mh. Chem.* 88 (1957) 1048–1055.
4. W.G. Yang, R.S. Touzani, G. Hasemann, M. Yazlak, M. Ziegner, B. Gorr, R. Schwaiger, M. Krüger, V_8SiB_4 — A new ternary phase in the V–Si–B system, *Intermetallics* 151 (2022) 107691, <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2022.107691>.
5. B.D. Igamov, I.R. Bekpulatov, Investigation of the formation mechanisms, crystallographic evolution and microstructural characteristics of the ZrSi_2 phase on the Si(111) surface, *Next Materials* 9 (2025) 101331, <https://doi.org/10.1016/j.nxmater.2025.101331>.
6. B.D. Igamov, A.I. Kamardin, I.R. Bekpulatov, G.T. Imanova, Study of Mn_4Si_7 silicide crystals obtained by hot isostatic pressing and spark plasma sintering methods in an X-ray diffractometer // *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*, Vol. 20, pp.45.(2025). DOI: 10.1186/s40712-025-00265-0.
7. B.D. Igamov, I.R. Bekpulatov, Microstructural, phase and electrophysical properties of TiSi_2 alloy synthesized by Spark Plasma Sintering // *Journal of Alloys and Compounds* 1062 (2026) 187564, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2026.187564>.
8. K. Sakai, M. Satou, M. Fujiwara, K. Takanashi, A. Hasegawa, K. Abe, Mechanical properties and microstructures of high-chromium V–Cr–Ti type alloys, *J. Nucl. Mater.* 329–333 (2004) 457–461, <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2004.04.089>.
9. Z.D. Li, Microstructure and properties of V–5Cr–5Ti alloy after hot forging, *Fusion Eng. Des.* 127 (2018) 83–90, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.12.029>.
10. B.D. Igamov, Study of the physical nature of Mn_4Si_7 crystals formed by the diffusion method using an X-ray diffraction // *Journal of Crystal Growth* 649 (2025) 127932 <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2024.127932>.