

УДК 536.2, 538.9, 53.06

ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОПРОВІДНИХ КОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ НАНО- ТА МІКРОПОРОШКІВ ЦИНК ОКСИДУ

**В. Б. Капустяник¹, Б. І. Турко¹, Л. Р. Топоровська¹, Р. Я. Серкіз¹, О. Б. Перевізник¹,
А. П. Васьків¹, Ю. В. Рудик¹**

¹*Львівський національний університет імені Івана Франка, вул. Драгоманова, 50, Львів,
Україна, 79005*

E-mail: tyrko_borys@ukr.net

Надійшла до редакції 10.01.2018

Методом радіального теплового потоку виміряні значення коефіцієнтів теплопровідності термопасти КПТ-8 та композитних матеріалів на основі мікро- та нанопорошків оксиду цинку і поліметилсилоксану. Коефіцієнти теплопровідності виявилися відповідно рівними 0,7 Вт/(м·К), 0,9 Вт/(м·К) і 2,4 Вт/(м·К). При тестуванні теплопровідних властивостей композитів на основі нано- та мікропорошків оксиду цинку в комп'ютерній техніці виявлено прояв розмірного ефекту. Зростання величини діелектричної проникності та зменшення питомого об'ємного електричного опору при зменшенні розмірів зерен порошків ZnO в композитах пов'язано зі зростанням кількості адсорбованої води на поверхні порошків ZnO у процесі синтезу.

Ключові слова: оксид цинку, композити, теплоперенесення, діелектрична проникність, питомий електроопір.

ELECTROPHYSICAL PROPERTIES AND PROSPECTIVE OF APPLICATION OF THE THERMAL CONDUCTIVE COMPOSITES ON THE BASIS OF NANO- AND MICROPOWDERS OF ZINC OXIDE

**Volodymyr Kapustianyk¹, Borys Turko¹, Liliia Toporovska¹, Roman Serkiz¹,
Orest Pereviznyk¹, Andriy Vaskiv¹, Yuriy Rudyk¹**

¹*Ivan Franko National University of Lviv, 50 Drahomanov Str., Lviv, Ukraine, 79005*

The values of thermal conductivity coefficients of KPT-8 thermal paste and composite materials based on micro- and nanopowders of zinc oxide and polymethylsiloxane were measured by the radial heat flux method. The coefficients of thermal conductivity were found to be respectively 0.7 W/(m·K), 0.9 W/(m·K) and 2.4 W/(m·K). Testing of the thermal conductive properties of composites based on nano- and micropowders of zinc oxide in the computer technique reveals manifestation of the size effect. The observed increase of the dielectric constant and reduction of the specific volume electrical resistance with decreasing of grain sizes of ZnO powders in composites is associated with the quantity of water adsorbed on the surface of ZnO powders during the synthesis.

Keywords: zinc oxide, composites, heat transfer, dielectric constant, specific electrical resistance.

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДЯЩИХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ НАНО- И МИКРОПОРОШКОВ ЦИНК ОКСИДА

**В. Б. Капустяник¹, Б. И. Турко¹, Л. Р. Топоровская¹, Р. Я. Серкиз¹, О. Б. Перевизнык¹,
А. П. Васькив¹, Ю. В. Рудык¹**

¹*Львовский национальный университет имени Ивана Франко, ул. Драгоманова, 50, Львов,
Украина, 79005*

Методом радиального теплового потока измерены значения коэффициентов теплопроводности термопасты КПТ-8, а также композитных материалов на основе микро- и нанопорошков оксида цинка и полиметилсилоксана. Коэффициенты теплопроводности оказались соответственно равными 0,7 Вт/(м·К), 0,9 Вт/(м·К) и

2,4 Вт/(м·К). При тестуванні теплопровідних властивостей композитів на основі нано- і мікропорошків оксида цинку в комп'ютерній техніці виявлено проявлення розмірного ефекта. Ріст величини діелектричної проникності та зменшення удільного об'ємного електричного опору при зменшенні розмірів зерен порошків ZnO в композитах пов'язано з збільшенням кількості адсорбованої води на поверхні порошків ZnO в процесі синтезу.

Ключевые слова: оксид цинку, композити, теплоперенос, діелектрична проникність, удільне електроопору.

ORCID IDs

Volodymyr Kapustianyk: <https://orcid.org/0000-0001-7830-5670>

Borys Turko: <https://orcid.org/0000-0001-9684-6630>

Lilia Toporovska: <https://orcid.org/0000-0002-0196-1749>

Roman Serkiz: <https://orcid.org/0000-0003-2977-4213>

Orest Pereviznyk: <https://orcid.org/0000-0002-6164-1966>

Andriy Vaskiv: <https://orcid.org/0000-0002-2296-8931>

Yuriy Rudyk: <https://orcid.org/0000-0002-8732-3464>

ВСТУП

Як відомо, для відводу тепла від теплоутворюючих робочих елементів електронних пристроїв, зокрема процесорів, чіпсетів, відеоприскорювачів комп'ютерів тощо, використовують теплопровідні пасти. Переважно, усі термопасти містять полімер (наприклад, силіконове масло) та різноманітні наповнювачі-загущувачі (наприклад, нітрид алюмінію, нітрид бору, срібло, оксид алюмінію, оксид цинку, графіт) [1].

Вже багато років ZnO у формі мікропорошку успішно і широко використовують як основний компонент, зазвичай, дешевих комерційних термопаст (наприклад, КПТ-8). Величина коефіцієнта теплопровідності цих термопаст переважно знаходиться у діапазоні від 0,6 до 1,5 Вт/(м·К).

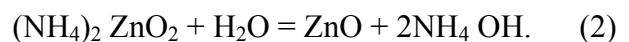
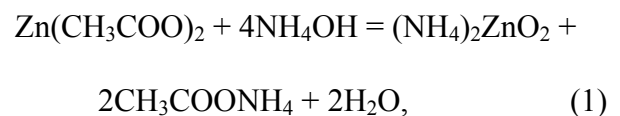
На сьогоднішній день число публікацій щодо теплопровідності наноструктурованих матеріалів на основі ZnO є дуже незначним [2, 3]. Переважна більшість робіт у цьому напрямі присвячена дослідженням матеріалів у вигляді монокристалів [4, 5], кераміки [2] чи плівок [6, 7]. В попередній роботі [8] нами було продемонстровано, що при використанні наночастинок ZnO замість мікропорошку ZnO, можна суттєво (більш, аніж утричі) підвищити коефіцієнт теплопровідності композиту. У цій роботі наведено дані досліджень електрофізичних параметрів, таких як питомий об'ємний електроопір і діелектрична проникність, а також результати тестування теплопровідних властивостей композитів на основі нано- та мікропорошків оксида цинку в комп'ютерній техніці.

ЕКСПЕРИМЕНТ

Композитні матеріали отримували шляхом диспергування експериментально виготовлених порошків ZnO в поліметилсілоксані ПМС 1000. Силіконове масло (інша назва поліметилсілоксану) та наповнювачі-загущувачі (порошки ZnO) брались в об'ємному співвідношенні 3:7.

Нанопорошок ZnO синтезували методами «мокрої» хімії у водному розчині 0,016 моль цинку ацетату дигідрату і 0,095 моль гідроксиду аміаку при температурі 95°C [8]. Час вирощування становив 10 хв. Після цього розчин зневоднювався на повітрі.

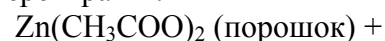
Процес утворення наноструктур оксиду цинку можна описати такими реакціями [8]:

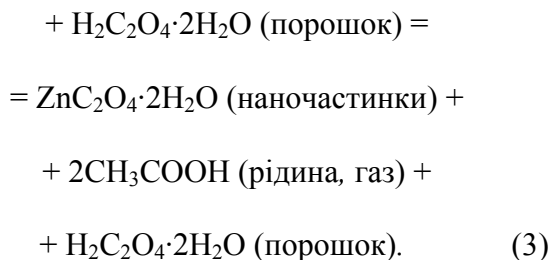


Також мікропорошок ZnO синтезували механохімічними реакціями [9]. Для цього суміш 0,1 моль $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ та 0,12 моль $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ протягом 30 хв. за кімнатної температури перетирали в агатовій ступці та відпалювали на повітрі при температурі 450°C ще 30 хв. Після відпалу отриманий порошок 10 хв. повторно перетирали в агатовій ступці.

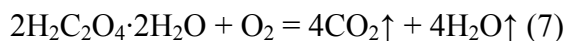
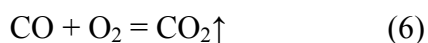
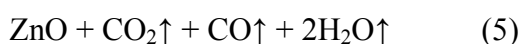
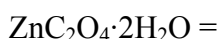
Процес утворення частинок оксиду цинку можна описати такими реакціями.

При перетиранні:





При відпалюванні:



Значення діелектричної проникності та питомого об'ємного електричного опору за кімнатної температури та різної частоти отримували вимірювачем імітансу E7-20 (ВАТ «МНІПІ», м. Мінськ, Білорусь).

При тестуванні теплопровідних композитів використовували безкоштовне програмне забезпечення «RealTemp» та «CPU Burn-in v1.0». «RealTemp» – це програма моніторингу температури ядер процесорів ЕОМ.

Призначена для процесорів Intel Single Core, Dual Core, Quad Core та Core i7. Кожне ядро на цих процесорах має цифровий термодатчик. «CPU Burn-in v1.0» – це програма, що «нагріває» будь-який процесор з архітектурою «x86» до максимально можливої робочої температури, досяжної за допомогою звичайного програмного забезпечення.

Визначення коефіцієнтів теплопровідності композитів здійснювали методом радіального теплового потоку [8].

Для оцінки розмірів зерен порошків ZnO, синтезованих механохімічними реакціями і методом «мокрої» хімії, на їхній основі виготовляли спиртову суспензію. Її наносили на скляні підкладки, вкриті прозорою електропровідною плівкою з оксидів індію та олова

(ІТО). Після цього зразки осушували на повітрі та досліджували за допомогою растрового електронного мікроскопа РЕММА-102-02 виробництва ВАТ «SELMІ» (Україна).

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХНЄ ОБГОВОРЕННЯ

Отримані на растровому електронному мікроскопі (РЕМ) мікрофотографії порошків ZnO, синтезованих методом «мокрої» хімії та механохімічними реакціями, наведені в однаковому масштабі на рис. 1 та на рис. 2, відповідно. Технічні характеристики РЕМ не дали змоги отримати чітке зображення зерен порошку, синтезованого методом «мокрої» хімії. Знаючи, що роздільна здатність РЕМ при його роботі в режимі вторинних електронів, згідно з паспортом не перевищує 5 нм, можна припустити, що їхній розмір складає порядку декількох нанометрів. Натомість розмір зерен порошку, синтезованого механохімічними реакціями, виявився в межах 1–3 мкм.

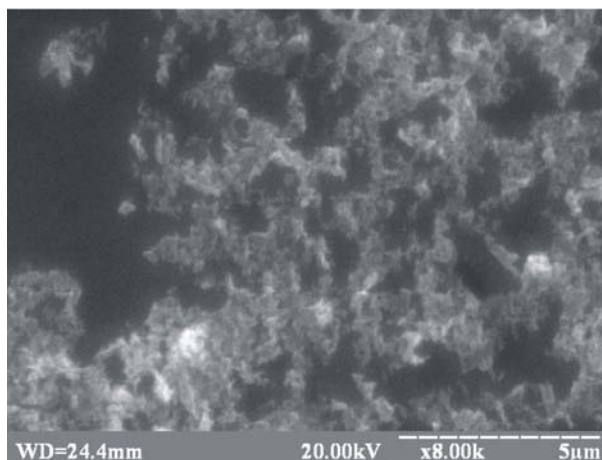


Рис. 1. Мікрофотографія синтезованого методом «мокрої» хімії нанопорошку ZnO

На рис. 3 наведено чотири залежності робочої температури процесора комп'ютера при сталому навантаженні від часу роботи комп'ютера, з використанням для відводу тепла мідного радіатора, як з шаром теплопровідного матеріалу між поверхнями процесора та радіатора, так і без нього. Дотримання однакових початкових умов забезпечувалося тим, що тестування розпочиналися за однакові проміжки часу після увімкнення ЕОМ. За добу отримувалися експеримента-

льні дані лише для однієї залежності. Після завершення тестування комп'ютер вимикався.

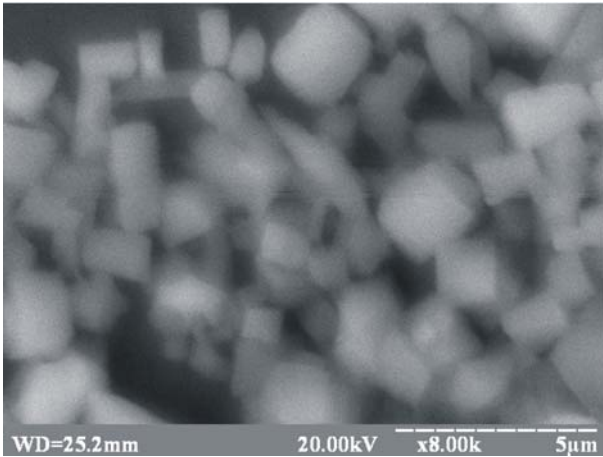


Рис. 2. Мікрофотографія створеного механохімічними реакціями мікропорошку ZnO

Згідно з отриманими результатами, найкраще відводилося тепло за використання композиту на основі порошку ZnO, синтезованого методами «мокрої» хімії. Спостерігався розмірний ефект. При зменшенні розмірів зерен порошків ZnO в теплопровідних композитах відбувається зменшення контактного теплового опору (опору Капіци) між поверхнями процесора та радіатора [8]. Використання як наповнювача в композиті нанопорошку замість мікропорошку ZnO забезпечує кращий контакт між сусідніми шорсткими поверхнями процесора та радіатора.

Як відомо, кремнійорганічна теплопровідна паста КПТ-8 [10] складається з поліметилсилоксану – силіконового масла з коефіцієнтом теплопровідності $\alpha = 0,167$ Вт/(м·К) при кімнатній температурі [8] і наповнювачів-загущувачів – аеросилу SiO₂, з коефіцієнтом теплопровідності $\alpha \approx 3 \cdot 10^{-3}$ Вт/(м·К) при $T=27^\circ\text{C}$ марки А-380 та цинкових білил ZnO марок БЦ0 і БЦ1. Коефіцієнт теплопровідності монокристалів ZnO знаходиться в діапазоні від 100 Вт/(м·К) до 120 Вт/(м·К) та залежить від технології виробництва і оброблення зразків [8]. Частилки аеросилу розміром 5–15 нм адсорбуються на поверхні частинок ZnO розміром 50–60 мкм і запобігають їхньому укрупненню за рахунок електростатичного відштовхування заряджених функ-

ціональних груп, а також за рахунок створення просторових перепон для агломерації.

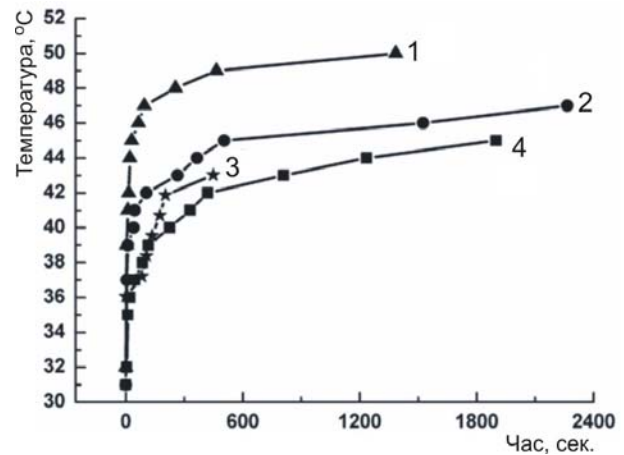


Рис. 3. Графіки залежності робочої температури процесора комп'ютера при сталому навантаженні, з використанням для відводу теплоти мідного радіатора, від часу роботи комп'ютера: 1 – без шару термопасти між поверхнями процесора та радіатора, 2 – з шаром термопасти КПТ-8 між поверхнями процесора та радіатора, 3 – з шаром теплопровідної пасти з порошку ZnO, синтезованого механохімічними реакціями, між поверхнями процесора та радіатора, 4 – з шаром теплопровідної пасти з порошку ZnO, синтезованого методами «мокрої» хімії, між поверхнями процесора та радіатора.

Отримані значення діелектричної проникності та питомого об'ємного електричного опору за кімнатної температури за частот електричного струму 50 Гц та 1 МГц для термопасти КПТ-8 та двох виготовлених різними методами теплопровідних композитів наведено у табл. 1. Менші значення питомого об'ємного електричного опору та вищі значення діелектричної проникності синтезованих композитів порівняно з параметрами термопасти КПТ-8, на нашу думку, можуть свідчити про наявність у їхньому складі деякої кількості води.

Діелектрична проникність води ϵ за кімнатної температури становить приблизно 80 одиниць [11, 12]. Вона є значно більшою за діелектричні проникності аеросилу ($\epsilon = 1,5$) [13], силіконового масла ($\epsilon = 2,5$) [14] чи цинк оксиду ($\epsilon = 8,5$) [15], тому навіть невелика кількість води в композиті може значно вплинути на його діелектричні характеристики. Вода могла адсорбуватися на поверхню порошків ZnO в процесі виготовлення

композитів. Як відомо, при зменшенні розмірів сферичних частинок від 30 нм до 5 нм відбувається зростання частки поверхневих атомів з приблизно 5% до 40% [16]. Тому композит на основі нанопорошку порівняно з композитом на основі мікропорошку цинк оксиду міститиме більшу кількість адсорбованої води, що й підтверджується результатами електрофізичних досліджень їхніх властивостей.

Таблиця 1

Електрофізичні параметри досліджуваних матеріалів

| Назва параметра | КПТ-8 | Композит на основі порошку ZnO синтезованого методом «мокрої хімії» | Композит на основі порошку ZnO синтезованого механохімічними реакціями |
|---|-------------------|---|--|
| Питомий об'ємний електричний опір за кімнатної температури і частоти 50 Гц, Ом·см | $6 \cdot 10^{14}$ | $2 \cdot 10^{10}$ | 10^{11} |
| Діелектрична проникність за кімнатної температури: | | | |
| за частоти 50 Гц | 6 | 8 | 7 |
| за частоти 1 МГц | 4 | 6 | 5 |

Діелектрична проникність води ϵ за кімнатної температури становить приблизно 80 одиниць [11, 12]. Вона є значно більшою за діелектричні проникності аеросилу ($\epsilon = 1,5$) [13], силіконового масла ($\epsilon = 2,5$) [14] чи цинк оксиду ($\epsilon = 8,5$) [15], тому навіть невелика кількість води в композиті може значно вплинути на його діелектричні характеристики. Вода могла адсорбуватися на поверхню порошків ZnO в процесі виготовлення композитів. Як відомо, при зменшенні розмірів сферичних частинок від 30 нм до 5 нм

відбувається зростання частки поверхневих атомів з приблизно 5% до 40% [16]. Тому композит на основі нанопорошку порівняно з композитом на основі мікропорошку цинк оксиду міститиме більшу кількість адсорбованої води, що й підтверджується результатами електрофізичних досліджень їхніх властивостей.

Розраховані за методом радіального теплового потоку значення коефіцієнтів теплопровідності термопасти КПТ-8 та композитних матеріалів на основі синтезованих механохімічними реакціями і методом «мокрої» хімії порошків ZnO виявилися рівними відповідно 0,7 Вт/(м·К), 0,9 Вт/(м·К) і 2,4 Вт/(м·К).

Таким чином можна констатувати, що композити на основі мікро- та нанопорошків ZnO володіють вищими значеннями коефіцієнтів теплопровідності порівняно з термопастою КПТ-8, що очевидно пов'язано з відсутністю у їхньому складі аеросилу. Водночас, коефіцієнт теплопровідності композиту при використанні нанопорошку ZnO є істотно вищим, аніж у випадку мікропорошку.

ВИСНОВОК

Методом радіального теплового потоку визначені коефіцієнти теплопровідності композитних матеріалів на основі nano- та мікропорошків оксиду цинку. Порошки ZnO синтезовано методом «мокрої» хімії та механохімічними реакціями. Вищі значення коефіцієнтів теплопровідності композитів на основі мікро- та нанопорошків ZnO порівняно з величиною коефіцієнта теплопровідності термопасти КПТ-8 пов'язані з відсутністю у їхньому складі аеросилу. Підвищення величини коефіцієнта теплопровідності композиту при використанні nano- замість мікропорошку ZnO очевидно зумовлене балістичною теплопровідністю, зростанням екситонної теплопровідності та зменшенням контактного теплового опору. При тестуванні теплопровідних властивостей композитів на основі nano- та мікропорошків оксиду цинку в комп'ютерній техніці виявлено прояв розмірного ефекту, зумовленого тим, що при зменшенні розмірів зерен порошків ZnO в теплопровідних композитах відбувається змен-

шення контактного теплового опору (опору Капіци) між поверхнями процесора ЕОМ та радіатора. Менші значення питомого об'ємного електричного опору та вищі значення діелектричної проникності синтезованих композитів порівняно з параметрами термопасти КПТ-8 можуть свідчити про наявність у їхньому складі деякої кількості води, що може адсорбуватися на поверхню порошків ZnO в процесі їхнього виготовлення.

Результати тестування засвідчують перспективність застосування композитів на основі нанопорошків для відведення тепла в комп'ютерах та інших електронних пристроях. Водночас, властивості зазначених матеріалів можуть бути оптимізовані за рахунок цілеспрямованих змін в технології їхнього виготовлення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Теплопровідна паста: Пат. 102258 Україна, МПК С09К 5/00. / Б.І. Турко, Ю.Ю. Бучко, М.Р. Панасюк, В.Б. Капустяник (Україна). – № u201503434; Заявлено 14.04.15; Опубл. 26.10.15, Бюл. № 20. – 4 с. іл.
2. Olorunyolemi T., Birnboim A., Carmel Y., Wilson O., Knowlton I. Thermal Conductivity of Zinc Oxide: From Green to Sintered State // *J. Am. Ceram. Soc.* – 2002. – Vol. 85. – P. 1249-1253.
3. Игамбердиев Х. Т., Юлдашев Ш. У., Cho H. D., Kang T. W., Рахимова Ш. М. Тепловогой транспорт в наноккомпозитах ZnO/PMMA // *Физика твердого тела.* – 2012. – Т. 54, вып. 7. – С. 1424-1426.
4. Ozgur U., Gu X., Chevchenko S., Spradlin J., Cho S.-J., Morkoc H., Pollak F. H., Everitt H. O., Nemeth B., Nause J. E. Thermal Conductivity of Bulk ZnO after Different Thermal Treatments // *J. of Electronic Materials.* – 2006. – Vol. 35, № 4. – P. 550-555.
5. Florescu D. I., Mourikh L. G., Pollak F. H. High Spatial Resolution Thermal Conductivity of Bulk ZnO (0001) // *J. of Applied Physics.* – 2002. – Vol. 91. – P. 890-892.
6. Huang Z. X., Tang Z. A., Yu J., Bai S. Thermal Conductivity of Nanoscale Polycrystalline ZnO Thin Films // *Physica B: Condensed Matter.* – 2011. – Vol. 406. – P. 818-823.
7. Xu Y., Goto M., Kato R., Tanaka Y., Kagawa Y. Thermal Conductivity of ZnO Thin Film Pro-

- duced by Reactive Sputtering // *J. Appl. Phys.* – 2012. – Vol. 111. – P. 084320.
8. Turko B. I., Kapustianyk V. B., Rudyk V. P., Rudyk Y. V. Thermal Conductivity of Zinc Oxide Micro- and Nanocomposites // *J. Nano- Electron. Phys.* 2016. – Vol. 8. – P. 02004.
9. Shen L., Bao N., Yanagisawa K., K. Domen, A. Gupta, Grimes C. Direct Synthesis of ZnO Nanoparticles by a Solution-Free Mechanochemical Reaction // *Nanotechnology.* – 2006. – Vol. 17. – P. 5117-5123.
10. ГОСТ 19783-74. Паста кремнийорганическая теплопроводная. Технические условия. – Введ. 1975-01-01. – М.: Изд.-во стандартов, 1996. – 11 с.
11. Бовсуновський А.П. Електротехнічні матеріали: Корот. довідник – К.: НУХТ, 2012. – 36 с.
12. Криворучко Я. С., Лерман Л. Б. Визначення ефективної діелектричної проникності, коефіцієнтів відбиття та прозорості електромагнітного випромінювання армованими полімерами // *Вісник Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника. Серія «Хімія».* – 2012. – № 16. – С. 4-8.
13. Grechko L. G., Zarko V. I., Kozub G. M., Motrich V. V., Chuiko A. A. Dielectric Properties of Pyrogenic Silicon Dioxide // *Theoretical and Experimental Chemistry.* – 1989. – Vol. 24. – P. 593-596.
14. Майофис И.М. Химия диэлектриков. Учебное пособие для студентов энергетических специальностей вузов. – М.: Высшая школа, 1970. – 332 с.
15. Ozgur U., Alivov Y., Liu C., Teke A., Reshchikov M., Dogan S., Avrutin V., Cho S., Morkoc H. A Comprehensive Review of ZnO Materials and Devices // *J. Appl. Phys.* – 2005. – Vol. 98. – P. 041301-1-041301-103.
16. Витязь П. А., Свидуневич Н. А., Куис Д. В. Наноматериаловедение: учеб. пособие. – Минск: Вышэйшая школа, 2015. – 511 с.

REFERENCES

1. Teploprovodna pasta: Pat. 102258 Україна. МПК S09K 5/00. / B.I. Turko. Yu.Yu. Buchko. M.R. Panasyuk. V.B. Kapustyanik (Ukraine). – № u201503434; Zayavleno 14.04.15; Opubl. 26.10.15. Byul. № 20. – 4 s. il.
2. Olorunyolemi T., Birnboim A., Carmel Y., Wilson O., Knowlton I. Thermal Conductivity of Zinc Oxide: From Green to Sintered State // *J. Am. Ceram. Soc.* – 2002. – Vol. 85. – P. 1249-1253.

3. Igamberdiyev Kh. T., Yuldashev Sh. U., Cho H. D., Kang T. W., Rakhimova Sh. M. Teplovooy transport v nanokompozitakh ZnO/PMMA // Fizika tverdogo tela. – 2012. – T. 54. vyp. 7. – S. 1424-1426.
4. Ozgur U., Gu X., Chevtchenko S., Spradlin J., Cho S.-J., Morkoç H., Pollak F. H., Everitt H. O., Nemeth B., Nause J. E. Thermal Conductivity of Bulk ZnO after Different Thermal Treatments // J. of Electronic Materials. – 2006. – Vol. 35, № 4. – P. 550-555.
5. Florescu D. I., Mourikh L. G., Pollak F. H. High Spatial Resolution Thermal Conductivity of Bulk ZnO (0001) // J. of Applied Physics. – 2002. – Vol. 91. – P. 890-892.
6. Huang Z. X., Tang Z. A., Yu J., Bai S. Thermal Conductivity of Nanoscale Polycrystalline ZnO Thin Films // Physica B: Condensed Matter. – 2011. – Vol. 406. – P. 818-823.
7. Xu Y., Goto M., Kato R., Tanaka Y., Kagawa Y. Thermal Conductivity of ZnO Thin Film Produced by Reactive Sputtering // J. Appl. Phys. – 2012. – Vol. 111. – P. 084320.
8. Turko B. I., Kapustianyk V. B., Rudyk V. P., Rudyk Y. V. Thermal Conductivity of Zinc Oxide Micro- and Nanocomposites // J. Nano- Electron. Phys. 2016. – Vol. 8. – P. 02004.
9. Shen L., Bao N., Yanagisawa K., K. Domen, A. Gupta, Grimes C. Direct Synthesis of ZnO Nanoparticles by a Solution-Free Mechanochemical Reaction // Nanotechnology. – 2006. – Vol. 17. – P. 5117-5123.
10. GOST 19783-74. Pasta kremniyor-ganicheskaya teploprovodnaya. Tekhnicheskiye usloviya. – Vved. 1975–01–01. – M.: Izd.-vo standartov. – 1996. – 11 s.
11. Bovsunovskiy A. P. Elektrotekhnichni materiali: Korot. dovidnik – K.: NUKhT. 2012. – 36 s.
12. Krivoruchko Ya. S., Lerman L. B. Vznachennya efektyvnoï dielektrichnoï proniknosti. koeffitsientiv vidbittya ta prozorosti elektromagnitnogo viprominyu-vannya armovanimi polimerami // Visnik Priкарпатського національного університету імені Василя Стефаника. Серія «Хімія». – 2012. – № 16. – S. 48.
13. Grechko L. G., Zarko V. I., Kozub G. M., Motrich V. V., Chuiko A. A. Dielectric Properties of Pyrogenic Silicon Dioxide // Theoretical and Experimental Chemistry. – 1989. – Vol. 24. – P. 593-596.
14. Майофис И. М. Химия диэлектриков. Учебное пособие для студентов энергетических специальностей вузов. – М.: Высшая школа, 1970. – 332 с.
15. Ozgur U., Alivov Y., Liu C., Teke A., Reshchikov M., Dogan S., Avrutin V., Cho S., Morkoc H. A Comprehensive Review of ZnO Materials and Devices // J. Appl. Phys. – 2005. – Vol. 98. – P. 041301-1-041301-103.
16. Vityaz P. A., Svidunovich N. A., Kuis D. V. Nanomaterialovedeniye: ucheb. posobiye. – Minsk: Vysheyshaya shkola. 2015. – 511 s. of Electronic Materials. – 2006. – Vol. 35, № 4. – P. 550-555.