



ТОВСТОЛИТКІН

Олександр Іванович — доктор фізико-математичних наук, професор, директор Інституту магнетизму НАН України та МОН України

МАГНІТНІ НАНОКОМПОЗИТИ ДЛЯ НОВІТНИХ ТЕХНІЧНИХ ТА МЕДИЧНИХ ЗАСТОСУВАНЬ

**За матеріалами доповіді на засіданні
Президії НАН України 30 листопада 2022 року**

У доповіді розглянуто актуальні тенденції розвитку пристроїв на основі магнітних матеріалів. Підкреслено, що важливим напрямом є розроблення та дослідження новітніх нанокompatитів, використання яких у зазначених пристроях приведе до зменшення розмірів, підвищення швидкодії та розширення функціональності практичних застосувань. Зазначено, що дослідження, що виконуються в Інституті магнетизму НАН України та МОН України, перебувають у руслі сучасних світових тенденцій. Наведено результати досліджень композитних наноструктур з антиферомагнітним компонентом, а також результати наукової діяльності, спрямованої на розроблення та дослідження магнітних наноматеріалів для медицини, зокрема для самоконтрольованої магнітної гіпертермії.

Ключові слова: магнітні нанокompatити, терагерцовий частотний діапазон, антиферомагнітне впорядкування, самоконтрольована магнітна гіпертермія.

Магнітні матеріали привертають до себе увагу завдяки низці особливих властивостей. Вони можуть віддалено діяти на інші об'єкти, перетворювати один вид енергії на інший, поглинати або відбивати електромагнітну енергію, причому як у широкому частотному діапазоні, так і в наперед заданому вузькому діапазоні [1, 2]. Перевагами таких матеріалів є широкі межі переналаштування параметрів, висока швидкодія, стабільність та надійність роботи. Серед широкого кола застосувань магнітних матеріалів варто відзначити низько- та високочастотні фільтри, невзаємні елементи, осцилятори, системи екранування, наносистеми для медичної діагностики і терапії та ін. [3, 4].

Головними тенденціями розвитку пристроїв на основі магнітних матеріалів є зменшення розмірів, підвищення швидкодії та розширення функціональності [3, 5]. Тому розроблення фізичних засад створення магнітокерованих композитних наносистем є актуальним сучасним напрямом фізики твердого тіла, нанофізики та матеріалознавства.

Дослідження, що виконуються в Інституті магнетизму НАН України та МОН України, перебувають у руслі сучасних світових тенденцій. Один із важливих напрямів наукової діяльності Інституту пов'язаний з розробленням композитних наноматеріалів для застосування у функціональних елементах терагерцового ($\sim 10^{12}$ Гц) та субтерагерцового (10^{11} – 10^{12} Гц) діапазонів частот [6–9]. Терагерцове випромінювання має потенціал для використання в багатьох перспективних сферах науки і техніки, особливо в системах зв'язку надвисокої пропускної здатності, спектроскопії, медицині тощо [10, 11]. Випромінювання цього діапазону може проникати крізь тонкі шари матеріалів, а тому його розглядають як альтернативу рентгенівському випромінюванню для досліджень внутрішньої структури твердих об'єктів [12]. Однак генерування і модуляція когерентних електромагнітних сигналів у цьому діапазоні частот потребує створення нових пристроїв і розроблення нових технологій.

Серед магнітних матеріалів перспективними в цьому аспекті є матеріали з антиферромагнітним впорядкуванням, оскільки їх характерні частоти знаходяться в терагерцовому діапазоні [13, 14]. Однак, на відміну від ферромагнетиків (ФМ), які вже активно використовуються в сучасній нанoeлектроніці, наносистеми на основі антиферромагнетиків (АФМ) ще не мають широкого застосування. Причиною цього є складність керування поведінкою цих матеріалів, відсутність інформації про трансформацію їхніх властивостей при зменшенні розмірів до субмікронних, а також даних про особливості впливу на них сусідніх сильно магнітних шарів у складних композитних системах [15, 16].

Серед широкого спектру завдань, спрямованих на розуміння поведінки антиферромагнетиків як інтегральних компонентів композитних наноструктур, науковці Інституту магнетизму НАН України та МОН України концентрують свої зусилля переважно на таких з них:

1) визначення особливостей трансформації магнітних параметрів антиферромагнетиків при зменшенні товщини АФМ-шару і переході до нанометрових розмірів;

2) виокремлення процесів, які домінують в околі межі поділу АФМ/ФМ;

3) розроблення методів керування параметрами АФМ-матеріалів.

Для вирішення цих завдань було виконано дослідження трьох типів зразків:

1) тришарові структури ФМ1/АФМ/ФМ2, в яких товщина антиферромагнітного шару набуває значень від 15 до 3 нм. Оскільки АФМ-шар опосередковує взаємодію між двома ФМ-шарами, зміна магнітних параметрів антиферромагнетика приводить до зміни поведінки всієї системи. У цьому випадку комплексні дослідження магнітних, магнітооптичних та резонансних властивостей усієї системи можуть дати інформацію про зміну магнітних параметрів АФМ-шару зі зміною його товщини;

2) двошарові структури ФМ/АФМ, в яких товщина антиферромагнітного шару набуває значень від 7 до 3 нм. Метою таких досліджень є виокремлення домінуючих процесів поблизу межі поділу ФМ/АФМ;

3) так звані синтетичні антиферромагнетики (САФ), в яких два ФМ-шари розділені немагнітним або слабко магнітним шаром, але завдяки магнітодипольній взаємодії або взаємодії Рудермана–Кіттеля–Касуї–Юсіді (РККІ) орієнтація магнітних моментів ФМ-шарів є антипаралельною. Метою дослідження таких структур є пошук методів керування параметрами антиферромагнетиків.

У переважній більшості досліджуваних наноструктур як АФМ-компонент використовували FeMn ($\text{Fe}_{50}\text{Mn}_{50}$). Еквіатомний сплав залізо-марганець — це досить унікальний матеріал. Параметр кристалічної ґратки цього сплаву близький до параметра ґратки більшості ФМ-сплавів на основі заліза, що уможливорює виготовлення широкого розмаїття багатошарових структур, у яких механічні напруження на межі поділу ФМ/АФМ практично відсутні [17]. Температура АФМ-впорядкування (температура Нееля, T_N) залежить від товщини: вона знижується зі зменшенням товщини АФМ-шару до кількох нанометрів від приблизно 150 °С до кімнатної температури і нижче [18]. Ця гнучкість у діапазоні робочих

температур робить композитні наноструктури на основі FeMn привабливими як для практичних застосувань, так і для з'ясування багатьох фізичних аспектів поведінки складних магнітних систем [19].

Для **тришарових** наносистем, які містять феромагнітні й антиферомагнітні (АФМ = FeMn) компоненти, досліджено товщинні та температурні залежності міжшарової взаємодії, опосередкованої антиферомагнетиком. З'ясовано деталі трансформації міжшарових взаємодій у наноструктурі при зміні товщини антиферомагнітного прошарку. Зокрема, показано, що зменшення товщини АФМ-прошарку (t_{FeMn}) приводить не лише до зниження ефективної температури магнітного впорядкування, а й до зменшення магнітної анізотропії [20].

Було виявлено три характерних режими в поведінці системи залежно від товщини АФМ-прошарку. Для відносно великих товщин (*перший режим*, $t_{\text{FeMn}} > 8,5$ нм) FeMn перебуває в антиферомагнітному стані і характеризується досить сильною магнітною анізотропією. Поведінка ФМ-шарів, прилеглих з обох боків до АФМ-прошарку, характерна для систем з обмінно-закріпленим ФМ-компонентом, властивості яких на сьогодні досить детально вивчено (див., наприклад, [21]).

Другий режим ($6 \text{ нм} < t_{\text{FeMn}} < 8,5$ нм) виникає, коли прошарок FeMn все ще перебуває в АФМ-стані, але характеризується слабкою магнітною анізотропією, величина якої недостатня для формування обмінного закріплення. Така поведінка спостерігається лише у вузькому температурному інтервалі, нижче ефективної температури Нееля. Міжшарова взаємодія у цьому випадку слабка, але коерцитивна сила істотно збільшена.

Третій режим виникає, коли ультратонкий прошарок FeMn ($t_{\text{FeMn}} < 7$ нм) стає феромагнітно поляризованим завдяки магнітному ефекту близькості до сусідніх шарів ФМ1 і ФМ2. У цьому випадку всі три шари сильно зв'язані прямою обмінною взаємодією і в магнітному аспекті поведуться як окремий феромагнітний (хоча і неоднорідний за товщиною) шар [20, 22].

Дослідження **двошарових** структур ФМ/АФМ з товщинами АФМ-шару, меншими за 6 нм, було спрямовано на поглиблене розуміння специфіки міжшарової взаємодії на межі поділу феромагнетик/антиферомагнетик. Проведено магнітометричні вимірювання та дослідження феромагнітного резонансу в двошарових плівкових структурах залежно від температури, частоти збуджувального сигналу та величини зовнішнього магнітного поля. Показано, що поведінку таких систем визначає конкуренція двох механізмів: зростання обертової анізотропії, притаманної полікристалічному шару FeMn, коли температура АФМ-впорядкування наближається до температури вимірювання зі зменшенням товщини, та наведення значного додаткового магнітного моменту у FeMn (~15 %) завдяки ефекту близькості до ФМ-шару [22]. Одержано експериментально та підтверджено аналітичними розрахунками істотне (на порядок величини) ізотропне підсилення частоти феромагнітного резонансу, що є перспективним для розроблення функціональних елементів субтерагерцового частотного діапазону [22, 23].

Один із напрямів дослідження було сфокусовано на вивченні властивостей термомагнітного переходу в **синтетичних антиферомагнетиках**. Традиційні САФи складаються з двох ФМ-шарів, розділених немагнітним прошарком, і забезпечують концентрування магнітного потоку за рахунок антипаралельної орієнтації магнітних моментів ФМ-шарів [24]. Для досягнення температурного контролю над магнітним станом САФів науковці Інституту магнетизму НАН України та МОН України спільно з колегами з Royal Institute of Technology (Стокгольм, Швеція) запропонували використання розбавленого феромагнетика замість немагнітного прошарку [25–27]. За певної критичної температури в такому прошарку відбувається фазовий перехід у ФМ-стан, що приводить до зміни магнітної конфігурації всієї системи. Такий підхід є перспективним для розширення функціональності САФ і створює можливості для багатофункціональних прикладних застосувань САФ у пристроях спінтроніки [27, 28].

Інший перспективний напрям досліджень полягає у спробі надати САФ додатковий ступінь свободи з метою керування дисперсією спінових хвиль. Експериментально, а також з використанням мікромагнітного моделювання було досліджено спінову динаміку масивів тришарових нанодисків САФ з номінальним діаметром 150 нм і періодичністю 250 нм. Результати досліджень засвідчили, що поєднання дипольних взаємодій як усередині таких дисків, так і між ними зумовлює унікальні властивості системи, такі як додаткові спін-хвильові моди, параметрами яких можна керувати за допомогою зміни геометрії САФ та/або температури [29, 30]. Ці дослідження є перспективними для розроблення новітніх наноструктурованих магнітних метаматеріалів і магнітних пристроїв з розширеною функціональністю.

Важливим науковим напрямом, у якому працюють співробітники Інституту магнетизму НАН України та МОН України, є розроблення та дослідження магнітних наноматеріалів для медицини, зокрема для лікування онкологічних захворювань. Серед перспективних методів протипухлинної терапії слід відзначити магнітну гіпертермію, в основі якої лежить здатність магнітних наночастинок нагріватися під дією змінного магнітного поля. Принцип магнітної гіпертермії ґрунтується на добре встановленому факті, що ракові пухлини є більш піддатливими до дії тепла, ніж здорові тканини організму [31, 32]. Так, відомо, що нагрівання до температур 43–45 °С підвищує чутливість уражених клітин до застосування хіміотерапії або радіотерапії [32].

Сучасна медицина розглядає магнітну гіпертермію як універсальний і найбільш ефективний модифікатор радіо- і хіміотерапії, який здатний підвищити їх ефективність у 1,5–2,5 раза. Однією з проблем, що стримують широке впровадження цієї методики, є складність вимірювання температури в живих організмах [33]. Науковці Інституту магнетизму НАН України та МОН України спільно з колегами з Інституту загальної та неорганічної хімії ім. В.І. Вернадського НАН України, Інституту фізики НАН України та низки закордонних

установ розробили магнітні матеріали та експериментально верифікували підхід, який дозволяє надійно контролювати максимальну температуру нагріву магнітних наночастинок при застосуванні їх у магнітній гіпертермії (так звана самоконтрольована магнітна гіпертермія) і таким чином унеможлиблює перегрів живих тканин [34–43].

На особливу увагу заслуговує тісна взаємодія співробітників Інституту магнетизму НАН України та МОН України з представниками української діаспори та міжнародними науковими товариствами. Так, Магнітне товариство Інституту інженерів електротехніки та електроніки (IEEE Magnetics Society) спільно з Українським науково-технологічним центром і за організаційної підтримки Інституту магнетизму НАН України та МОН України провели конкурс наукових проєктів «Магнетизм для України – 2022» для українських науковців, які працюють у галузі фізики магнітних явищ і матеріалів [44]. За підсумками конкурсу з 70 поданих заявок відібрано 22 наукові проєкти, які протягом одного року отримуватимуть фінансування в розмірі від 2 000 (індивідуальні гранти) до 10 000 дол. США (групові проєкти). Загалом підтримано дослідження 70 вчених з наукових установ і закладів вищої освіти Києва, Харкова, Сум, Дніпра і Дрогобича. Важливо, що значна частина переможців конкурсу працюють в установах східних регіонів України, які найбільше постраждали від російської агресії.

Отже, підбиваючи підсумки, слід зазначити, що науковці Інституту магнетизму НАН України та МОН України зробили істотний внесок у розуміння специфіки міжшарової взаємодії у композитних наноструктурах, які містять феромагнітні та антиферомагнітні компоненти. Встановлено закономірності впливу параметрів окремих компонентів наноструктури на характеристики магнітних конфігурацій. Оптимізовано характеристики композитних наносистем, перспективних для сучасних технічних та біомедичних застосувань. При цьому тісні міжнародні зв'язки науковців Інституту сприяють проведенню зазначених досліджень на високому науковому рівні.

REFERENCES

1. Coey J.M.D. *Magnetism and Magnetic Materials*. Cambridge University Press, 2010. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511845000>
2. Raveendran A., Sebastian M.T., Raman S. Applications of Microwave Materials: A Review. *J. Electron. Mater.* 2019. **48**: 2601–2634. <https://doi.org/10.1007/s11664-019-07049-1>
3. Gutfleisch O., Willard M.A., Brück E., Chen C.H., Sankar S.G., Liu J.P. Magnetic Materials and Devices for the 21st Century: Stronger, Lighter, and More Energy Efficient. *Advanced Materials*. 2011. **23**(7): 821–842. <https://doi.org/10.1002/adma.201002180>
4. Sai Rama B., Paul A.K., Kulkarni S.V. Soft magnetic materials and their applications in transformers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2021. **537**: 168210. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168210>
5. Chumak A.V. et al. Advances in Magnetics Roadmap on Spin-Wave Computing. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2022. **58**(6): 1–72. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2022.3149664>
6. Ovcharov R.V., Galkina E.G., Ivanov B.A., Khymyn R.S. Spin Hall Nano-Oscillator Based on an Antiferromagnetic Domain Wall. *Phys. Rev. Applied*. 2022. **18**: 024047. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.18.024047>
7. Tomasello R., Verba R., Lopez-Dominguez V., Garesci F., Carpentieri M., Di Ventra M., Amiri P.K., Finocchio G. Antiferromagnetic Parametric Resonance Driven by Voltage-Controlled Magnetic Anisotropy. *Phys. Rev. Applied*. 2022. **17**: 034004. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.17.034004>
8. Afanasiev D., Hortensius J.R., Ivanov B.A., Sasani A., Bousquet E., Blanter Y.M., Mikhaylovskiy R.V., Kimel A.V., Caviglia A.D. Ultrafast control of magnetic interactions via light-driven phonons. *Nat. Mater.* 2021. **20**: 607–611. <https://doi.org/10.1038/s41563-021-00922-7>
9. Khymyn R., Lisenkov I., Tiberkevich V., Ivanov B.A., Slavin A. Antiferromagnetic THz-frequency Josephson-like Oscillator Driven by Spin Current. *Sci. Rep.* 2017. **7**: 43705. <https://doi.org/10.1038/srep43705>
10. Yu L., Hao L., Meiqiong T., Jiaoqi H., Wei L., Jinying D., Xueping C., Weiling F., Yang Z. The medical application of terahertz technology in non-invasive detection of cells and tissues: opportunities and challenges. *RSC Advances*. 2019. **17**. <https://doi.org/10.1039/C8RA10605C>
11. Papaioannou E.Th., Beigang R. THz spintronic emitters: a review on achievements and future challenges. *Nanophotonics*. 2020. **10**(4): 1243–1257. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2020-0563>
12. Mittleman D.M. Perspective: Terahertz science and technology. *Journal of Applied Physics*. 2017. **122**: 230901. <https://doi.org/10.1063/1.5007683>
13. Maxwell L.R., McGuire T.R. Antiferromagnetic Resonance. *Rev. Mod. Phys.* 1953. **25**(1): 279. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.25.279>
14. Boverter I., Simensen H.T., Anane A., Kläui M., Brataas A., Lebrun R. Room-Temperature Antiferromagnetic Resonance and Inverse Spin-Hall Voltage in Canted Antiferromagnets. *Phys. Rev. Lett.* 2021. **126**(18): 187201. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.126.187201>
15. Gomonay H.V., Loktev V.M. Spin transfer and current-induced switching in antiferromagnets. *Phys. Rev. B*. 2010. **81**(14): 144427. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.81.144427>
16. Polishchuk D.M., Persson M., Kulyk M.M., Holmgren E., Pasquale G., Korenivski V. Tuning thermo-magnetic properties of dilute-ferromagnet multilayers using RKKY interaction. *Appl. Phys. Lett.* 2020. **117**(2): 022402. <https://doi.org/10.1063/5.0014823>
17. Ekholm M., Abrikosov I.A. Structural and magnetic ground-state properties of γ -FeMn alloys from *ab initio* calculations. *Phys. Rev. B*. 2011. **84**(10): 104423. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.84.104423>
18. Merodio P., Ghosh A., Lemonias C., Gautier E., Ebels U., Chshiev M., Béa H., Baltz V., Bailey W.E. Penetration depth and absorption mechanisms of spin currents in $\text{Ir}_{20}\text{Mn}_{80}$ and $\text{Fe}_{50}\text{Mn}_{50}$ polycrystalline films by ferromagnetic resonance and spin pumping. *Appl. Phys. Lett.* 2014. **104**: 032406. <https://doi.org/10.1063/1.4862971>
19. Polishchuk D.M., Polek T.I., Kamra A., Kravets A.F., Tovstolytkin A.I., Brataas A., Korenivski V. Spin relaxation in multilayers with synthetic ferrimagnets. *Phys. Rev. B*. 2018. **98**(14): 144401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.98.144401>
20. Polishchuk D.M., Nakonechna O.I., Lytvynenko Ya.M., Kuncser V., Savina Yu.O., Pashchenko V.O., Kravets A.F., Tovstolytkin A.I., Korenivski V. Temperature and thickness dependent magnetostatic properties of $[\text{Fe}/\text{Py}]/\text{FeMn}/\text{Py}$ multilayers. *Low Temperature Physics*. 2021. **47**(6): 483. <https://doi.org/10.1063/1.50004971>
21. Nogués J., Sort J., Langlais V., Skumryev V., Suriñach S., Muñoz J.S., Baró M.D. Exchange bias in nanostructures. *Physics Reports*. 2005. **422**(3): 65–117. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2005.08.004>
22. Polishchuk D.M., Tykhonenko-Polishchuk Yu.O., Lytvynenko Ya.M., Rostas A.M., Gomonay O.V., Korenivski V. Thermal Gating of Magnon Exchange in Magnetic Multilayers with Antiferromagnetic Spacers. *Phys. Rev. Lett.* 2021. **126**(22): 227203. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.126.227203>

23. Polishchuk D.M., Polek T.I., Borynskyi V.Yu., Kravets A.F., Tovstolytkin A.I., Korenivski V. Isotropic FMR frequency enhancement in thin Py/FeMn bilayers under strong magnetic proximity effect. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2021. **54**(30): 305003. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/abfe39>
24. Duine R.A., Lee K.J., Parkin S.S.P., Stiles M.D. Synthetic antiferromagnetic spintronics. *Nature Phys.* 2018. **14**: 217–219. <https://doi.org/10.1038/s41567-018-0050-y>
25. Kravets A.F., Polishchuk D.M., Dzhzherya Yu.I., Tovstolytkin A.I., Golub V.O., Korenivski V. Anisotropic magnetization relaxation in ferromagnetic multilayers with variable interlayer exchange coupling. *Phys. Rev. B.* 2016. **94**(6): 064429. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.94.064429>
26. Polishchuk D.M. Ferromagnetic resonance in nanostructures with temperature-controlled interlayer interaction. *Low Temperature Physics.* 2016. **42**(9): 761. <https://doi.org/10.1063/1.4964116>
27. Polishchuk D., Tykhonenko-Polishchuk Y., Borynskyi V., Kravets A., Tovstolytkin A., Korenivski V. Magnetic Hysteresis in Nanostructures with Thermally Controlled RKKY Coupling. *Nanoscale Research Letters.* 2018. **13**: 245. <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2669-0>
28. Polishchuk D.M., Tykhonenko-Polishchuk Yu.O., Holmgren E., Kravets A.F., Tovstolytkin A.I., Korenivski V. Giant magnetocaloric effect driven by indirect exchange in magnetic multilayers. *Phys. Rev. Materials.* 2018. **2**(11): 114402. <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.2.114402>
29. Borynskyi V.Yu., Polishchuk D.M., Melnyk A.K., Kravets A.F., Tovstolytkin A.I., Korenivski V. Higher-order ferromagnetic resonances in periodic arrays of synthetic-antiferromagnet nanodisks. *Appl. Phys. Lett.* 2021. **119**(19): 192402. <https://doi.org/10.1063/5.0068111>
30. Borynskyi V., Kravets A., Polishchuk D., Tovstolytkin A., Sharai I., Korenivski V., Melnyk A. Spin-wave Resonance in Arrays of Nanoscale Synthetic-antiferromagnets. In: *IEEE 12th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties*. Krakow, Poland, 2022. <https://doi.org/10.1109/NAP55339.2022.9934337>
31. Périgo E.A., Hemery G., Sandre O., Ortega D., Garaio E., Plazaola F., Teran F.J. Fundamentals and advances in magnetic hyperthermia. *Applied Physics Reviews.* 2015. **2**(4): 041302. <https://doi.org/10.1063/1.4935688>
32. Pucci C., Degl'Innocenti A., Gümüş M.B., Ciofani G. Superparamagnetic iron oxide nanoparticles for magnetic hyperthermia: recent advancements, molecular effects, and future directions in the omics era. *Biomater. Sci.* 2022. **10**: 2103–2121. <https://doi.org/10.1039/D1BM01963E>
33. Peiravi M., Eslami H., Ansari M., Zare-Zardini H. Magnetic hyperthermia: Potentials and limitations. *Journal of the Indian Chemical Society.* 2022. **99**(1): 100269. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2021.100269>
34. Yelenich O., Solopan S., Kolodiaznyi T., Tykhonenko Yu., Tovstolytkin A., Belous A. Magnetic Properties and AC Losses in $A\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($A = \text{Mn, Co, Ni, Zn}$) Nanoparticles Synthesized from Nonaqueous Solution. *Journal of Chemistry.* 2015. **2015**: 532198. <https://doi.org/10.1155/2015/532198>
35. Tovstolytkin A.I. New Functionalities of Nanostructured Oxide Magnetics (by materials of scientific report at NAS Presidium Meeting 15 May 2013). *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2013. (6): 7–10. <http://doi.org/10.15407/visn2013.06.007>
36. Kalita V.M., Tovstolytkin A.I., Ryabchenko S.M., Yelenich O.V., Solopan S.O., Belous A.G. Mechanisms of AC losses in magnetic fluids based on substituted manganites. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2015. **17**(27): 18087–18097. <https://doi.org/10.1039/C5CP02822A>
37. Shlapa Y., Kulyk M., Kalita V., Polek T., Tovstolytkin A., Greneche J.-M., Solopan S., Belous A. Iron-Doped (La, Sr) MnO_3 Manganites as Promising Mediators of Self-Controlled Magnetic Nanohyperthermia. *Nanoscale Res. Lett.* 2016. **11**: 24. <https://doi.org/10.1186/s11671-015-1223-6>
38. Kalita V.M., Polishchuk D.M., Kovalchuk D.G., Bodnaruk A.V., Solopan S.O., Tovstolytkin A.I., Ryabchenko S.M., Belous A.G. Interplay between superparamagnetic and blocked behavior in an ensemble of lanthanum–strontium manganite nanoparticles. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2017. **19**: 27015–27024. <https://doi.org/10.1039/C7CP05547A>
39. Belous A., Tovstolytkin A., Solopan S., Shlapa Yu. Synthesis, Properties and Applications of some Magnetic Oxide Based Nanoparticles and Films. *Acta Physica Polonica A.* 2018. **133**(4): 1006–1012. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.133.1006>
40. Solopan S.O., Nedelko N., Lewińska S., Ślawska-Waniewska A., Zamorskyi V.O., Tovstolytkin A.I., Belous A.G. Core/shell architecture as an efficient tool to tune DC magnetic parameters and AC losses in spinel ferrite nanoparticles. *Journal of Alloys and Compounds.* **88**: 1203–1210. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.02.276>
41. Tovstolytkin A.I., Lytvynenko Ya.M., Bodnaruk A.V., Bondar O.V., Kalita V.M., Ryabchenko S.M., Shlapa Yu. Yu., Solopan S.O., Belous A.G. Unusual magnetic and calorimetric properties of lanthanum–strontium manganite nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* 2020. **498**: 166088. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.166088>

42. Zamorskyi V.O., Lytvynenko Ya.M., Pogorily A.M., Tovstolytkin A.I., Solopan S.O., Belous A.G. Magnetic Properties of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CoFe}_2\text{O}_4$ Composite Nanoparticles with Core/Shell Architecture. *Ukrainian Journal of Physics*. 2020. **65**(10): 904. <https://doi.org/10.15407/ujpe65.10.904>
43. Nakonechna O.I., Lotey G.S., Kaur J., Bodnaruk A.V., Kalita V.M., Shlapa Yu.Yu., Solopan S.O., Tovstolytkin A.I. AC Field Threshold Effect as a Key Factor toward the Efficient Heating of Fluids with NaFeO_2 Magnetic Nanoparticles. *Particle & Particle Systems Characterization*. 2022. **39**(9). <https://doi.org/10.1002/ppsc.202200095>
44. Ukrainian physicists will receive international grants. <https://www.nas.gov.ua/UA/Messages/news/Pages/View.aspx?MessageID=9553>

Alexandr I. Tovstolytkin

*Institute of Magnetism of the National Academy of Sciences of Ukraine
and Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4852-6605>

MAGNETIC NANOCOMPOSITES FOR ADVANCED TECHNICAL AND MEDICAL APPLICATIONS

According to the materials of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine,
November 30, 2022

Current trends in the development of devices based on magnetic materials have been outlined. It is emphasized that an important direction is the development and research of advanced nanocomposites, the use of which in such devices will lead to a reduction in size, an increase in speed and an expansion of the functionality of practical applications. It is noted that the research carried out at the Institute of Magnetism of the National Academy of Sciences of Ukraine and Ministry of Education and Science of Ukraine is in line with modern world trends. The results of research on composite nanostructures with an antiferromagnetic component are presented. The results of scientific activities aimed at the development and research of magnetic nanomaterials for medicine, in particular for self-controlled magnetic hyperthermia, are highlighted.

Keywords: magnetic nanocomposites, terahertz frequency band, antiferromagnetic ordering, self-controlled magnetic hyperthermia.

Cite this article: Tovstolytkin A.I. Magnetic nanocomposites for advanced technical and medical applications. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2023. (2): 43–49. <https://doi.org/10.15407/visn2023.02.043>