

Рішення
разової спеціалізованої вченої ради
про присудження ступеня доктора філософії

Разова спеціалізована вчена рада Інституту магнетизму Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України (ІМаг НАН України та МОН України) прийняла рішення про присудження *Боринському Владиславу Юрійовичу* наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 10 – Природничі науки, за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали на підставі прилюдного захисту дисертації *«Магнітні та резонансні властивості багат шарових наноструктур з антиферромагнітними компонентами»*.

«6» грудня 2023 року.

Боринський Владислав Юрійович, 1995 року народження, громадянин України.

Освіта вища: у 2019 році завершив навчання у Київському національному університеті імені Тараса Шевченка за спеціальністю «Прикладна фізика та наноматеріали», де отримав диплом магістра з відзнакою.

Впродовж 2019-2023 років навчався за освітньо-науковою програмою підготовки здобувачів третього рівня вищої освіти за спеціальністю «Прикладна фізика та наноматеріали» в Інституті магнетизму Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України, де і виконував дисертаційну роботу. Під час навчання неодноразово брав участь у міжнародних наукових школах за напрямками прикладної фізики, а також протягом 2020-2022 років отримував стипендію Національної академії наук України для молодих вчених.

Науковий керівник – Товстолиткін Олександр Іванович, доктор фізико-математичних наук, професор.

Здобувач має 17 наукових публікацій за темою дисертації, з яких 1 монографія у співавторстві, 4 статті опубліковані у фахових наукових

закордонних виданнях, 2 статті опубліковані у фахових наукових виданнях України, а також 10 тез доповідей на наукових міжнародних конференціях.

Список публікацій додається:

– монографії:

1) Магнітна та термоіндукована динаміка у нанoeлементax синтетичних антиферромагнетиків / Р.В. Верба, Ю.І. Джежеря, **В.Ю. Боринський**, Д.М. Поліщук, А.Ф. Кравець. – Харків: «Діса плюс», 2023. – 164 с. ISBN 978-617-8122-54-6

– публікації у фахових наукових журналах:

2) **Borynskyi V.Yu.**, Polishchuk D.M., Savina Yu.O., Pashchenko V.O., Kravets A.F., Tovstolytkin A.I., Korenivski V. / Thermomagnetic transition in nanoscale synthetic antiferromagnets Py/NiCu/Py // Low Temperature Physics. – 2023. – V. 49. – P. 863-869. DOI 10.1063/10.0019699 (Q3, SJR)

3) **Borynskyi V.Yu.**, Polishchuk D.M., Sharai I.V., Melnyk A.K., Kravets A.F., Tovstolytkin A.I., Korenivski V. / Spin-wave Resonance in Arrays of Nanoscale Synthetic-antiferromagnets // Proceedings of the 2022 IEEE 12th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties. – 2022. – P. NMM0701. DOI 10.1109/NAP55339.2022.9934337 (без квартилю, SJR)

4) **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 // Applied Physics Letters. – 2021. – V. 119. – P. 192402. DOI 10.1063/5.0068111 (Q1, SJR)

5) 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 // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2021. – V. 54. – P. 305003. DOI 10.1088/1361-6463/abfe39 (Q1, SJR)

6) Polishchuk D.M., Polek T.I., **Borynskyi V.Yu.**, Kravets A.F., Tovstolytkin A.I., Pogorily A.M., Korenivski V. / Spin-current dissipation in a thin-film bilayer ferromagnet/antiferromagnet // Low Temperature Physics. – 2020. – V. 46. – P. 813-819. DOI 10.1063/10.0001547 (Q3, SJR)

7) Polishchuk D.M., Tykhonenko-Polishchuk Yu.O., Borynskyi V.Yu., Kravets A.F., Tovstolytkin A.I., Korenivski V. / Magnetic Hysteresis in Nanostructures with Thermally Controlled RKKY Coupling // Nanoscale Research Letters. – 2018. – V. 13. – P. 1-7. DOI 10.1186/s11671-018-2669-0 (Q1, SJR)

У науковій дискусії взяли участь голова та члени спеціалізованої вченої ради:

Лось Віктор Федорович – д-р фіз.-мат. наук (01.04.02 – теоретична фізика), професор, головний науковий співробітник відділу фізики плівок ІМаг НАН України та МОН України. Оцінка позитивна без зауважень.

Герасимчук Ігор Вікторович – д-р фіз.-мат. наук (01.04.02 – теоретична фізика), провідний науковий співробітник лабораторії нанокристалічних структур ІМаг НАН України та МОН України. До роботи рецензентом були висунуті наступні зауваження та побажання:

1. У пункті 5.1.2 шляхом апроксимації значення константи анізотропії у FeMn визначаються параметр міжшарового обміну і намагніченість як функції температури. Чи відомі автору інші, альтернативні підходи до визначення властивостей обмінної взаємодії на інтерфейсах в системах такого типу?
2. У підрозділі 4.2 представлені результати досліджень магнітометрії для масивів нанoeлементів САФ Ru/NiCu(20 нм)/Ru, для яких визначена температура переходу між феромагнітним та антиферомагнітним станами становить приблизно 150 К. Разом з тим, у підрозділі 6.2 вивчаються особливості спін-хвильових процесів у близьких за структурою нанoeлементах Ru/NiCu(10 нм)/Ru, але точка переходу для них виявляється помітно вищою і складає 220 К. На жаль, в тексті роботи не коментуються можливі причини такої різниці температури перемикавання.
3. У тексті дисертації присутня певна кількість граматичних помилок.

На всі зауваження та побажання здобувачем було надано ґрунтовні відповіді, які були схвалені рецензентом. Зауваження не вплинули на оцінку роботи. Враховуючи високий рівень наукових публікацій здобувача, актуальності

та новизни даної роботи, володіння здобувача відповідними знаннями, загальна оцінка роботи є позитивною.

Дереча Дмитро Олександрович – канд. фіз.-мат. наук (01.04.11 – магнетизм), завідувач лабораторії нанокристалічних структур ІМаг НАН України та МОН України. До роботи рецензентом були висунуті наступні зауваження та побажання:

1. У підрозділі 3.3, як і в інших розділах дисертації, розглядається концепція чисельного методу мікромагнітних моделювань, але надається лише стислий опис принципу розрахунків просторових мап коливань магнітних моментів з посиланнями на відповідні літературні джерела. Зважаючи на те, що значна частина фізичних інтерпретацій та пояснень досліджуваних у роботі спін хвильових процесів ґрунтується на аналізі саме просторових мап коливань, було б доцільним дещо деталізувати методику проведення моделювань з наведенням відповідних формул.
2. У підрозділі 4.1, зокрема на рис. 4.1, наведено дані магнітометрії структур САФ для значень атомарного складу заліза у сплаві $\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x}$ композитних спейсерів $S_{1,2}$ 35 ат.% та 17,5 ат.%, відповідно, які автор вважає за оптимальні. Виникає питання, чи впливає концентрація заліза на ширину температурного інтервалу перемикання? Водночас, область перемикання стану САФ для інших значень концентрації заліза залишається поза температурним діапазоном, в межах якого були проведені дослідження. Відповідно, характер цього перемикання складно пояснити, виходячи лише з температурних залежностей магнітометрії, наведених на рис. 4.1.
3. Згідно з проведенням автором аналізом у розділі 4, значну роль у результуючій гістерезисній поведінці гетероструктур САФ, окрім міжшарової взаємодії, відіграють анізотропні властивості феромагнітних шарів Fe у складі цих структур. Однак, опису, яким чином визначалася різниця ефективних полів анізотропії між верхнім та нижнім шарами, детально наведено не було. На мій погляд, варто було б продемонструвати дані контрольних зразків та навести відповідні коментарі. Також виникає

питання, чи враховувалася магнітокристалічна анізотропія шарів FeCr композитного спейсера?

4. У підрозділі 6.2 автором в якості причини розщеплення граничної спин-хвильової моди пропонується подібність форми нанодисків САФ до форми купола, однак не надається уточнюючих даних щодо наслідків її впливу на міжшаровий дипольний зв'язок. Не зазначено, яким чином під час мікромагнітних моделювань враховувалася ця особливість форми елементів. Чи є вказана конкретна форма принциповою для спостереження ефекту, або ж розщеплення також відбуватиметься, якщо нанодиски матимуть, наприклад, конічну форму?
5. В дисертації зустрічаються одруківки, некоректні терміни. Наприклад: речення на стор. 30 «ефективно закріплює його магнітний момент у певному виділеному напрямку, роблячи його стійким до полів перемикання вільного» несподівано переривається; стор. 41 «по-етапної» замість «поетапної»; стор. 51 стоїть кома перед «тощо». Також англійська версія анотації містить ряд граматичних та стилістичних помилок.

На всі зауваження та побажання здобувачем було надано ґрунтовні відповіді, які були схвалені рецензентом. Зауваження не вплинули на оцінку роботи. Враховуючи високий рівень наукових публікацій здобувача, актуальності та новизни даної роботи, володіння здобувача відповідними знаннями, загальна оцінка роботи є позитивною.

Владимирський Ігор Анатолійович – д-р фіз.-мат. наук (01.04.07 – фізика твердого тіла), директор Навчально-наукового інституту матеріалознавства та зварювання імені Є.О. Патона Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського. До роботи офіційним опонентом були висунуті наступні зауваження та побажання:

1. На стор. 54 дисертації зазначено: «Нижній Ta(5) слугував в якості буферного шару для кращого узгодження параметрів ґраток термічно окисленої підкладинки Si/SiO₂ та Ru, зменшуючи рівень напружень та збільшуючи стійкість напорошених матеріалів». Шар SiO₂, як правило,

формується аморфним – щодо якої в такому випадку узгодженості параметрів ґраток йде мова?

2. В методичному розділі надано детальний опис методу феромагнітного резонансу і мікромагнітного моделювання, в той час як методика визначення польових залежностей намагніченості наведена лише поверхнево – чому?
3. Якщо автор з метою виявлення різниці у намагніченості між верхнім та нижнім шарами пермалою у тришарових синтетичних антиферомагнетиках Ru/NiCu/Ru досліджував контрольні тонкі шари пермалою, розміщені під та над шаром Cu , то постає питання, чому ці контрольні зразки містили саме шар Cu , а не сплав NiCu ?
4. Яким би очікувався результат дослідження не масивів синтетичних антиферомагнетиків Ru/NiCu/Ru , а відповідних суцільних тришарових плівок? Можливо саме таке дослідження дозволило б підтвердити припущення щодо впливу куполоподібності структури на її намагніченість?
5. Технічне зауваження – розділ «Вступ» не варто було включати до загальної нумерації, відповідно першим розділом мав би бути огляд літературних джерел.

На всі зауваження та побажання здобувачем було надано ґрунтовні відповіді, які були схвалені офіційним опонентом. Зауваження не вплинули на оцінку роботи. Враховуючи високий рівень наукових публікацій здобувача, актуальності та новизни даної роботи, володіння здобувача відповідними знаннями, загальна оцінка роботи є позитивною.

Прокопенко Олександр Володимирович – д-р фіз.-мат. наук (01.04.03 – радіофізика), професор, завідувач кафедри нанофізики та наноелектроніки Навчально-наукового інституту високих технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка. До роботи офіційним опонентом були висунуті наступні зауваження та побажання:

1. У підрозділі 4.1 демонструється кероване температурою перемикання магнітних моментів у структурі $\text{Fe}[\text{Cr/FeCr/Cr}]_2/\text{Fe}$ з антипаралельної до

паралельної (феромагнітної) конфігурації. Автор відзначає, що моменти шарів Fe за температур вище точки Кюрі прошарків FeCr є вільними, оскільки сумарна товщина спейсера є більшою від критичної відстані РККІ взаємодії. З тексту роботи можна здогадатись, що перехід до паралельної конфігурації досягався шляхом прикладання до зразка зовнішнього магнітного поля, але деталі цього експерименту варто було б описати.

2. Центральною думкою розділу 4 дисертаційної роботи є знаходження закономірностей зміни магнітного гістерезису та характеру міжшарових взаємодій у структурах САФ при переході від геометрії тонких плівок до латерально обмежених наноструктур. Однак, ефект гістерезису та міжшарова взаємодія у таких структурах суттєво залежать від вибору матеріалів окремих шарів. У першій частині розділу розглядаються плівкові САФ, виготовлені на базі Fe та Cr, а у другій частині – структури з використанням сплавів Ru та NiCu. Однак пояснення або мотивації щодо саме такого вибору матеріалів шарів у роботі не наведено. Доцільно було б також провести безпосереднє порівняння, наприклад, плівкових Ru/NiCu/Ru структур з відповідними нанодисками.
3. У розділі 5, з одного боку, досліджуються процеси релаксації динаміки намагніченості у структурах з двошаровою підсистемою Ru/FeMn, а з іншого – демонструється ізотропне зростання частоти феромагнітного резонансу шару Ru за рахунок формування «обертової» анізотропії у цій двошаровій структурі. Як відомо, антиферомагнетикам притаманні більші значення коефіцієнта згасання, ніж для феромагнетиків. Тому для більш наочної демонстрації резонансних характеристик двошарової системи Ru/FeMn та практичних переваг використання наведеної «обертової» анізотропії, доцільно було б провести аналіз резонансних характеристик наноструктури з урахуванням як зміни частоти (пришвидшення магнітної динаміки), так і зміни добротності магнітних коливань (збільшення коефіцієнта згасання для шару Ru).
4. У тексті дисертації часто згадується магніtodипольна взаємодія між шарами нанорозмірних САФ, зокрема, велика увага цьому приділяється у

підрозділі 4.2 та розділі 6, де автор наголошує на тому, що ця взаємодія відіграє ключову роль у процесах утворення антиферомагнітного стану нанодисків. Як відомо, магніtodипольна взаємодія за своєю природою тісно пов'язана з явищем розмагнічування і визначається полями розсіяння, які утворюються певним розподілом магнітних моментів феромагнетика. Але з тексту дисертації не зовсім зрозуміло, чи проводились аналітичні розрахунки тензора розмагнічуючих елементів для досліджуваних нанооб'єктів. Як під час проведення мікромагнітного моделювання враховувалась магніtodипольна взаємодія між елементами масивів наноструктур? Чи може ця взаємодія враховувалась лише виключно при розгляді шарів всередині окремих нанодисків?

5. Розділ 6 дисертаційної роботи цілком присвячений особливостям спін-хвильової динаміки нанорозмірних САФ. Структури САФ, у цьому сенсі, являють собою систему з двох зв'язаних магнітних осциляторів, кожен з яких пов'язаний з окремим феромагнітним шаром нанодиску. Для таких систем, завдяки зв'язку між осциляторами, характерним є зсув частоти коливань системи відносно власних частот феромагнітних шарів. Доцільним було б провести розрахунок коефіцієнту зв'язку та відповідного зсуву частот. Це підвищило б науково-технічну цінність отриманих результатів.
6. Дисертаційне дослідження має суттєву експериментальну складову, а отримані в роботі результати не тільки дають відповідь на ряд конкретних наукових запитань, але й демонструють принципові тенденції, важливі для розвитку антиферомагнітної спінтроники. Переважно ці результати одержані з використанням вітчизняного, часто не досить нового обладнання, а значить результати дисертаційної роботи, в принципі, можуть бути впроваджені у вітчизняне виробництво з використанням вже існуючої технологічної бази. З огляду на це, практичне значення роботи, наведене в дисертації, виглядає написаним занадто скромно і може бути суттєво розширене.
7. Оформлення дисертації має певні технічні вади:

- а) Інформація, наведена на деяких графіках в оригінальній частині роботи, наприклад, рис. 4.1, 4.6, 5.6, повністю не розшифрована у підписі до графіку.
- б) Іноді у формулах та поясненнях до них присутні дрібні описки, наприклад, відсутня квадратна дужка в (4.1). В тій же формулі (4.1) наводиться вираз для густини енергії, а в підписі до формули зазначається, що це енергія, а не густина енергії. Величина H , яка входить до (4.1) за розмірністю в системі СІ має бути індукцією поля, а символом H у дисертації позначено напруженість магнітного поля тощо.
- в) Дисертація написана сучасною українською мовою, з використанням загально вживаної термінології, але іноді зустрічається сленг, наприклад, «спейсер» замість «прошарок», замість «прискорення» магнітної динаміки краще, мабуть, писати «пришвидшення» динаміки тощо. Також у роботі присутня незначна кількість орфографічних і граматичних помилок.

На всі зауваження та побажання здобувачем було надано ґрунтовні відповіді, які були схвалені офіційним опонентом. Зауваження не вплинули на оцінку роботи. Враховуючи високий рівень наукових публікацій здобувача, актуальності та новизни даної роботи, володіння здобувача відповідними знаннями, загальна оцінка роботи є позитивною.

Результати відкритого голосування:

- | | |
|---------|------------------|
| «За» | – 5 членів ради; |
| «Проти» | – немає; |

**РАЗОВА СПЕЦІАЛІЗОВАНА ВЧЕНА РАДА
ІНСТИТУТУ МАГНЕТИЗМУ НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК
УКРАЇНИ ТА МІНІСТЕРСТВА ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

УХВАЛИЛА:

- 1) Дисертація Боринського Владислава Юрійовича на тему «**Магнітні та резонансні властивості багат шарових наноструктур з антиферромагнітними компонентами**», що подана на здобуття ступеня доктора філософії в галузі знань 10 – Природничі науки, за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали, є завершеним самостійним науковим дослідженням і відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 р. зі змінами, внесеними згідно з Постановою Кабінету Міністрів України № 341 від 21 березня 2022 р.
- 2) Присвоїти Боринському Владиславу Юрійовичу ступінь доктора філософії в галузі знань 10 – Природничі науки, за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали.
- 3) Рішення разової спеціалізованої вченої ради затвердити і передати до Вченого секретаря Інституту магнетизму Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України.
- 4) Вченому секретарю підготувати Наказ про видачу Боринському Владиславу Юрійовичу диплома доктора філософії та додатка до нього європейського зразка.

**Голова разової
спеціалізованої вченої ради
доктор фіз.-мат. наук, професор**



Віктор ЛОСЬ