

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

Volume 3, Number 307 (2016), 99 – 105

UDC 538.953

**ULTRASONIC ABSORPTION IN $\text{CO}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$, $\text{SiO}_2\text{NiFe (d) Ta}$,
 $\text{SiO}_2\text{NiFe (d) Ru}$ THIN-FILM NANO-COMPOSITE MATERIALS****S. Omarov¹, S. Baishan², S. Nysanbayeva¹, M. Tukibaeva¹, G. Turlybekova¹**¹ Kazakh National Research Technical University named after K.I.Satpaev, Almaty²Xinjiang University, 14 Shengli Road, Urumqi, PRCGulzhan1980@mail.ru

Keywords: nano-composite materials, phonon, ultrasonic absorption, coefficient of ultrasonic absorption, phonon-phonon interactions, acoustic spectrometer, magnon-phonon interactions.

Abstract. In the proposed publication the results of research of magnetic-acoustic properties of thin-film nano-composite materials such as $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$, $\text{SiO}_2\text{NiFe (d) Ta}$, $\text{SiO}_2\text{NiFe (d) Ru}$ are demonstrated. It was established that the ultrasonic absorption in these materials depends on interactions between heat phonons of crystal lattice and acoustic phonons, thermal phenomena between heat phonons, as well as at the magnon-phonon interactions in rapidly varying external magnetic fields. These curves differ from similar dependencies in single-crystal bodies by that in multi-film nano-composite must be considered the ultrasonic absorption for each layer separately. The research results show that the type and thickness of the layers of composites, including their protecting layer affect on acoustic properties of such thin-film materials. Calculation of total coefficient of ultrasonic absorption cannot be done without considering the model of thermal phonons transfer in silicon thin films.

УДК 538.953

**УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ В ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ
НАНОКОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$, $\text{SiO}_2\text{NiFe (d) Ta}$,
 $\text{SiO}_2\text{NiFe (d) Ru}$** **С.С. Омаров¹, С.К. Бейсен², С.К. Нысанбаева¹, М.А. Тукибаева¹, Г.К. Турлыбекова¹**¹НАО КазННТУ им. К.И. Сатпаева, г. Алматы;²Синьцзянский университет, Урумчи, КНР.

Ключевые слова: нанокompозитные материалы, фонон, ультразвуковое поглощение, коэффициент ультразвукового поглощения, фонон, фонон – фононные взаимодействия, акустический спектрометр, магнон-фононные взаимодействия.

Аннотация. В предлагаемой публикации приведены результаты исследования магнитоакустических свойств тонкопленочных нанокompозитных материалов $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$, $\text{SiO}_2\text{NiFe (d) Ta}$, $\text{SiO}_2\text{NiFe (d) Ru}$. Установлено, что ультразвуковое поглощение в данных материалах зависит от взаимодействий между тепловыми фононами кристаллической решетки и акустическими фононами, температурными явлениями между тепловыми фононами, а также при магнон-фононными взаимодействиями во внешних быстропеременных магнитных полях. Указанные зависимости отличаются от аналогичных зависимостей в монокристаллических телах тем, что в многопленочном нанокompозите необходимо рассматривать ультразвуковое поглощение для каждого слоя в отдельности. Результаты исследования показывают, что на акустические свойства рассматриваемых тонкопленочных материалов влияние оказывают тип и толщина слоев композитов, включая и их защитный слой. Расчет суммарного коэффициента ультразвукового поглощения невозможно выполнить также без учета модели переноса тепловых фононов в тонких слоях кремния.

В данной работе приведены результаты исследования акустических свойств (ультразвуковое поглощение) многослойных тонкопленочных нанокompозитных материалов и монокристаллов, входящих в их структурный состав. Результаты исследования показали, что, в монокристаллических телах, приведенных в работе [1], ультразвуковое поглощение зависит от типа и упругости кристаллической решетки монокристаллов, температуры и частоты ультразвука. Дальнейшие исследования ультразвукового поглощения в тонкопленочных нанокompозитных материалах позволили установить, что оно зависит также от их структурного состава и толщины. Актуальный интерес представляло звукопоглощение в кремниевых подложках и защитных слоях нанокompозитов. Для экспериментального и теоретического исследования были рассмотрены нанокompозитные материалы $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$, SiO_2NiFe (d) Ta, SiO_2NiFe (d) Ru, толщина которых, в целом, не превышает 4-7 нм. Исследования ультразвукового поглощения проводились как для всей многослойной конструкции композита, так и для каждого его слоя. В работе [1,2] на основе трехфононной теории Ландау и Руммера рассчитывался коэффициент ультразвукового поглощения для кристаллических решеток диэлектриков и металлов. Результаты расчетов показали, что наибольшее звукопоглощение имеет кристаллическая решетка кремния. Следовательно, наиболее эффективной подложкой с точки зрения ультразвукопоглощения для многослойной пленки из нанокompозитного материала будет подложка на кремнии, который является одним из основных материалов в различных типах транзисторов и других элементов вычислительной техники. Таким образом, звукопоглощающие свойства будут зависеть от механизма транспортировки фононов в тонких и толстых слоях кремния. В таком случае исследование теплопроводности в тонком слое кремния приобретает актуальное значение [3,4].

Рассматриваемая авторами данной работы модель переноса фононов в тонких слоях кремния предполагает, что тепловое движение в кристаллических решетках твердого тела можно имеет виде газа квазичастиц – фононов или так называемого фононного газа. Звуковая волна с частотой Ω действует на равновесную термодинамическую систему (матрицу кристалла). В результате такого воздействия система тепловых фононов выводится из состояния равновесия и стремится к этому состоянию за счет столкновений между тепловыми и акустическими фононами или между тепловыми фононами, т.е. действует механизм релаксации. Как при всяком релаксационном процессе, сопровождающем распространение звука, возникает поглощение звука и его дисперсия. В случае, когда $\Omega\tau \ll 1$ ($\Omega > 10^9$ – гиперчастоты и низкие температуры, τ – время релаксации), поглощение рассматривается как результат непосредственного взаимодействия звукового и теплового фононов. В случае, когда $\Omega\tau \gg 1$ происходит взаимодействие звукового фонона со всем ансамблем тепловых фононов, взаимодействующих между собой, уменьшая термодинамическое отклонение равновесия.

Коэффициент звукопоглощения зависит от скорости убывания фононов звуковой моды в результате столкновения звукового и теплового фононов. При подобном взаимодействии звуковой фонон исчезает и образуется третий фонон, поглотивший акустический фонон. Если считать количество акустических фононов имеющих частоту Ω , как m , а первоначальное число тепловых фононов до взаимодействия, имеющих частоту ω_1 , как, n_1 , то число тепловых фононов после взаимодействия колеблющихся с частотой ω_2 будет n_2 . Таким образом, количество тепловых фононов будет зависеть n_2 от наличия как акустических m , так и от наличия тепловых фононов матрицы решетки n_1 по схеме: $m + n_1 = n_2$

Таким образом, ультразвуковое поглощение связано с теплопроводностью кристаллической решетки. Сравнение расчетной (смоделированной) теплопроводности с экспериментальными данными показано на рис. 1

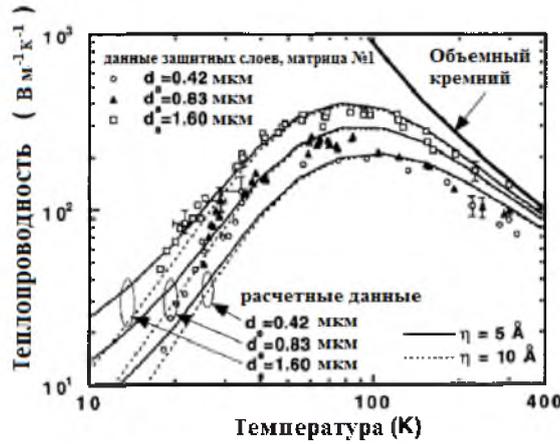


Рисунок 1 – Сравнение расчетной (смоделированной) теплопроводности с экспериментальными данными [2].

Результаты расчета, представленные на рис.1 показывают хорошее согласие экспериментальных результатов [2,3,4,5] с результатами модели для диффузного рассеяния фононов на границе.

Расчетные значения зависимости коэффициента поглощения в кремнии от температуры для различных гиперзвуковых частот представлены на рис.2

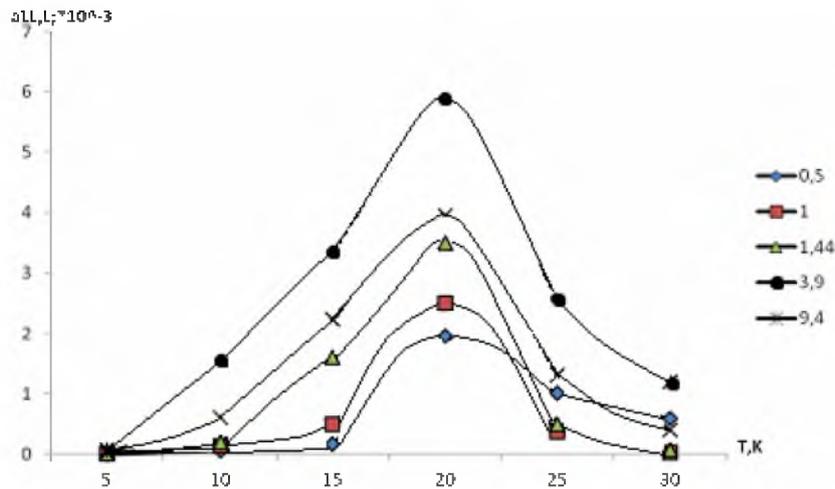


Рисунок 2 – Расчетные значения зависимости коэффициента поглощения продольных ультразвуковых волн α_{LL} в кремнии от температуры для различных звуковых частот $\Omega = (0,5; 1; 1,44; 3,9; 9,4)$ ГГц.

В нанокompозитных материалах SiO_2/NiFe (d) Ta, SiO_2/NiFe (d) Ru на ультразвуковое поглощение оказывает влияние также защитные слои Ta и Ru.

Конструкции исследуемых многослойных тонких пленок из нанокompозитного материала представлены на рис. 3.

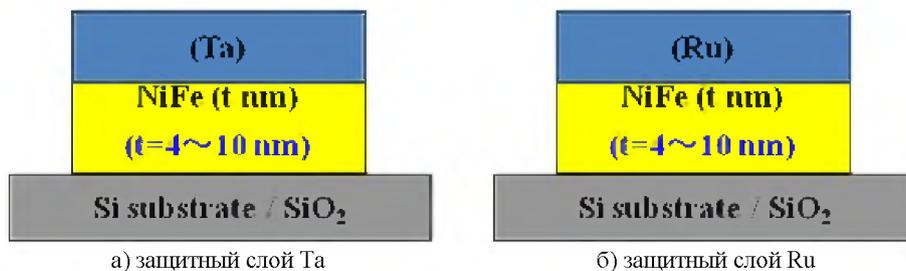


Рисунок 3 – Схема образца, многослойная тонкая пленка $\text{SiO}_2 / \text{NiFe} / \text{Ta}$ и $\text{SiO}_2 / \text{NiFe} / \text{Ru}$ с защитным слоем тантала (Ta) и рутения (Ru)

Дальнейшие исследования показали, что ультразвуковое поглощение в нанокompозитных материалах SiO₂NiFe (d) Ta, SiO₂NiFe (d) Ru зависит также от воздействия на них радиационного и внешнего быстропеременного слоя [6,7,8,9]. Влияние радиационных и внешних быстропеременных магнитных полей на магнитоакустические свойства особенно заметны для магнитных нанокompозитных материалов. В связи с этим становится актуальным исследование этих свойств для вышеуказанных условий, так как в таких полях могут изменяться не только физико-механические свойства рассматриваемых материалов, но и их акустические и магнитные свойства.

Расчеты, эксперимент и обсуждение

Акустическое измерение импеданса для разных частотных диапазонов проводилось методом транс-функции двумя микрофонами. метод измерения коэффициента поглощения. (Международный стандарт ISO 10534-2: 1998 [11] и Американское общество по испытанию материалов в Ассоциации ASTM E1050-12 [12] стандарта. В качестве опытного образца использовалась многослойная тонкая пленка SiO₂ / NiFe / Ta с SiO₂ / NiFe / Ru с защитным слоем тантала (Ta) и рутения (Ru). Магнитный материал имел различную толщину в SiO₂ / NiFe (d = 4 нм, 7 нм до 10 нм) / Ta и SiO₂ / NiFe (d = 4 нм, 7 нм, 10 нм) / Ru. Влияние магнитного слоя NiFe измерялось по рентгеновской дифракции (XRD) представлено на рис.4. магнитном вибрационном магнитометра рис.4. (VSM).

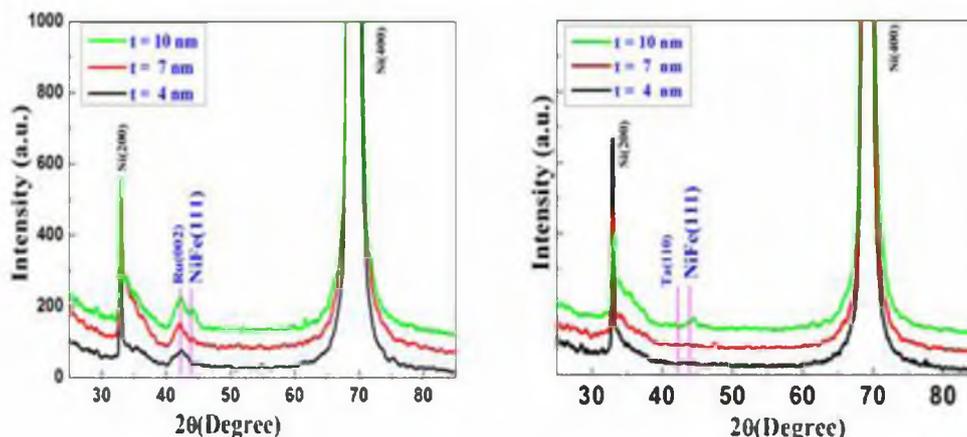


Рисунок 4 – XRD многослойных тонких пленок SiO₂ /NiFe/ Ta и SiO₂ / NiFe/ Ru с защитным слоем тантала (Ta) и рутения (Ru).

Измерение акустического импеданса исследуемых магнитных нанокompозитных материалов проводилось на акустическом спектрометре. Диапазон используемых частот 250-3500 Гц. Для обработки данных использовалось программное обеспечение MATLAB программное обеспечение. Коэффициент звукопоглощения определялся по следующей формуле:

$$\alpha = 1 - |r^2| = 1 - \text{abs}\left(\frac{P_2 - H_I P_1}{P_1 H_R - P_2} e^{2jk_0 x_1}\right)^2$$

где, r - коэффициент отражения звуковой волны:

$$r = \frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}} e^{2jk_0 x_1} = \frac{P_2 - H_I P_1}{P_1 H_R - P_2} e^{2jk_0 x_1}$$

Для температуры 20° С, нормальном атмосферном давлении, для одних и тех же одночастотных условиях коэффициент звукопоглощения приведен в табл.1.

В таблице 2 приведена зависимость коэффициента звукопоглощения от разных акустических частот, воздействующих на тонкую пленку в зависимости от входящих на нее компонентов. Толщина материала 4 нм, 7 нм и 10 нм для многослойной пленки SiO₂ /NiFe (r)/ Ru и SiO₂ /NiFe (r)/ Ta с защитным слоем из Ru и Ta.

Таблица 1 – Сравнительная таблица данных коэффициента звукопоглощения

Частота (Гц)	Коэффициент звукопоглощения на интерферометре	Коэффициент звукопоглощения Расчет	Ошибки в результатах
350	0.242	0.223	0.019
500	0.1911	0.181	0.0101
620	0.173	0.165	0.008
800	0.162	0.153	0.009
1000	0.107	0.115	-0.008
1400	0.0749	0.084	-0.0091
1800	0.091	0.085	0.006
2000	0.075	0.069	0.006
2300	0.075	0.072	0.003

Таблица 2

Частота, Гц	266	355	474	620	800	1000	1400	1800	2100	2300	2500	2700
Темір (0)	0.0342	0.0744	0.1747	0.1817	0.1686	0.0709	0.1391	0.1088	0.1946	0.1367	0.1731	0.1324
Ta (4nm)	0.0763	0.1222	0.2215	0.285	0.3149	0.1125	0.1572	0.1343	0.2997	0.2812	0.2866	0.2083
Ta (7nm)	0.0739	0.121	0.2092	0.2517	0.3299	0.1592	0.1715	0.2044	0.3108	0.3447	0.3354	0.2283
Ta (10nm)	0.0749	0.115	0.2292	0.2517	0.3199	0.1692	0.2415	0.2644	0.3508	0.3347	0.3454	0.2346
Ru (4nm)	0.0503	0.0945	0.1853	0.2495	0.3256	0.1743	0.2072	0.1742	0.3982	0.3012	0.2234	0.2167
Ru (7nm)	0.0525	0.0922	0.1893	0.254	0.3257	0.1846	0.275	0.2193	0.3891	0.3402	0.2351	0.2325
Ru (10nm)	0.0784	0.1199	0.2134	0.2551	0.331	0.1967	0.3115	0.2284	0.4046	0.2869	0.2315	0.2416

Результаты измерений показывают, что на звукопоглощение оказывает влияние выбор и толщина защитного слоя. Звукопоглощение в Ru выше, чем в Ta. С ростом толщины материала звукопоглощение также растет. Результаты полученных графиков также показывают рост значений коэффициента звукопоглощения с частотой (средние значения), с толщиной образца. Результаты графиков также показывают, что звукопоглощение защитным слоем из Ru в области (800 – 2500) Гц выше, чем у материала с защитным слоем у Ta.

Помещение исследуемого тонкопленочного нанокompозитного материала во внешнее быстропеременное поле приводит к увеличению звукопоглощения в нем. Результаты измерения для скорости продольной акустической волны в $\text{Co}_x \text{Ni}_{1-x} \text{Fe}_2 \text{O}_4$ представлены в таблице 3. При расчете ультразвукового поглощения оказалось, что оно возрастает со скоростью и частотой объемно акустической волны. Измерения проводились для наночастиц с размером $x = 0,6$. Взаимодействие акустической волны с кристаллическими решетками конденсированных сред зависит от ряда причин, среди которых можно указать тип кристаллической решетки, температуру Дебая и температуру конденсированной среды, а также частоту Дебая и частоту ультразвука.

Таблица 3

Образец	Частота ОАВ, Ω , кГц	Скорость ОАВ, v , м/с	Звукопоглощение, α , дБ/м
$\text{Co}_x \text{Ni}_{1-x} \text{Fe}_2 \text{O}_4$	30	350	470
	60	380	780
	100	450	1100
	500	600	1230
	1000	800	1440

Частота и температура Дебая определяют упругость кристаллической решетки и, следовательно, ее звукопоглощающие свойства. Для измерения и расчета коэффициента ультразвукового поглощения необходимо оценить взаимодействие акустических фононов с тепловыми фононами и электронами исследуемого кристаллического материала. Наложение внешнего магнитного поля на данный нанокompозитный материал приводит к появлению магновов, которые, взаимодействуя с кристаллической решеткой, количественно увеличивают соотношение акустический фонон-тепловой фонон, и, соответственно, звукопоглощение. Экспериментальные результаты, полученные в работе, совпадают с концепцией авторов о магнон-фононном взаимодействии [6,7]. Результаты зависимости звукопоглощения от частоты объемно акустической волны представлены в таблице 3.

Выводы

Таким образом, результаты данных исследований показывают, что:

а) ультразвуковое поглощение в рассматриваемых нанокompозитных материалах зависит от акустических и магнитных свойств их кристаллических решеток в отдельных композитов исследуемого материала; б) при расчете полного коэффициента ультразвукового поглощения должны учитываться теплопроводность и температура кристаллической решетки нанокompозита; в) ультразвуковое поглощение в рассматриваемых нанокompозитных материалах зависит от толщины кремниевой подложки; г) толщина и тип защитного слоя нанокompозита существенно влияет на ультразвуковое поглощение; е) увеличение ультразвукового поглощения рассматриваемых нанокompозитных материалов во внешнем быстропеременном поле обусловлено – магнон-фононным взаимодействием.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Omarov S., Begimov T., Tukibaeva M., Maylina Kh., Bedelbaeva G. Phonon Interaction of Ultrasound Waves in Condensed Media. Advanced Research Vol. 983 (2014) pp328 – 337. (c) (2014) Trans Tech Publications, Switzerland.

[2] Asheghi A., Touzelbaev M.N., Goodson K.E., Leung V.K., Wong S.S. Temperature-Dependent Thermal Conductivity of Silicon Layers in SOI Substrates. Gooson @vk.stanford. edu Mechanical Engineering Department, Elektrikal Engineering Department, Stanford University Stanford University, Stanford, CA 94305-3030. p.30-36/Vol.120. FEBRUARY.1998.

[3] Омаров С.С., Бегимов Т.Б., Тукибаева М.А., Рахматуллин Р.М. Оценка коэффициента звукопоглощения при взаимодействии ультразвуковых колебаний с кристаллическими веществами. ISSN 1680-9211, «Вестник КазНТУ», №1(95) 2013 с. 172-174.

[4] Омаров С.С., Тузельбаев Н.М., Майлина Х.Р., Тукибаева М.А. Исследования теплопроводности кристаллических структур в конденсированных средах. Международный научный симпозиум «Новые концепции в физике конденсированного состояния». КазНТУ. Алматы, РК, Стэнфордский университет, Калифорния, Лос-Анджелес, США. 2014. с.80-81.

[5] Тузельбаев Н.М., Омаров С.С., Тукибаева М.А., Нысанбаева С.К., Ауелбекова А. Моделирование переноса фононов в тонких слоях конденсированных сред. Вестник КазНТУ, № 3, 2015, С.97-100.

[6] Omarov S., Baishan S., Nysanbayeva S., Aldjambekova G., Nurahmetova K. and Turlybekova G. Influence of Radiation-Induced Defects on Magnetic Properties of $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ Nanomaterials. Selected, peer reviewed papers from the 2015 2nd International Conference on Mechanical Engineering, Industrial Materials and Electroics (MII 2015), March 14-15, London, UK

7. Omarov, S. Nysanbaeva S.K., Beysen S., K.R. Mailina and N.N. Zhumabekova. Research Article Influence of Magnon-phonon Interaction on Ultrasound Absorption in Nanocomposite Materials. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2015. Vol. 11 №6. p. 1-3, ISSN 2040-7459.

[8] Нысанбаева С.К., Омаров С.С., Есиркепов А. Магнон – фононные взаимодействия звука в магнитных наноматериалах. Вестник КазНТУ, №3. Алматы. 2015. ISSN 1680-92. С. 92-97.

[9] Нысанбаева С.К., Бейсен С., Омаров С.С., Майлина Х.Р., Абзалиева. Изменение акустических свойств конденсированных сред в магнитных и радиационных полях. ISSN 1680-9211. «Вестник КазНТУ», Алматы, РК, Сильнзьянский университет, Урумчи, КНР, № 3(103) 2014 с.54-59.

REFERENCES

[1] S. Omarov, T. Begimov, M. Tukibaeva, Kh. Maylina, G. Bedelbaeva. Phonon Interaction of Ultrasound Waves in Condensed Media. Advanced Research Vol. 983 (2014) pp328 – 337. (c) (2014) Trans Tech Publications, Switzerland.

[2] A. Asheghi, M.N. Touzelbaev, K.E. Goodson, V.K. Leung, S.S. Wong. Temperature-Dependent Thermal Conductivity of Silicon Layers in SOI Substrates. Gooson @vk.stanford.edu Mechanical Engineering Department, Elektrikal Engineering Department, Stanford University Stanford University, Stanford, CA 94305-3030. p.30-36/Vol.120. FEBRUARY.1998.

[3] S. Omarov, T. Begimov, M. Tukibaeva, R. Rahmatullaev. Estimation of absorption coefficient in the interaction of ultrasound with crystalline substances. ISSN 1680-9211. «KazNTU Bulletin», №1(95) 2013, p. 172-174.

[4] Omarov S., Touzelbaev M.N., Maylina Kh., Tukibaeva M. Studies of thermal conductivity of the crystal structures in condensed matter. International Scientific Symposium «New Concepts in Condensed Matter Physics». KazNTU. Almaty, RK, Stanford University, California, Los-Andzheles, USA. 2014. p. 80-81.

[5] Touzelbaev M.N., Omarov S., Tukibaeva M., Nysanbayeva S., Auelbekova A. Simulation of phonons in thin layers of condensed matter. «KazNTU Bulletin», №3, 2015, P.97-100.

[6] Omarov S., Baishan S., Nysanbayeva S., Aldjambekova G., Nurahmetova K. and Turlybekova G. Influence of Radiation-Induced Defects on Magnetic Properties of $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ Nanomaterials. Selected, peer reviewed papers from the 2015 2nd International Conference on Mechanical Engineering, Industrial Materials and Electronics (MII 2015), March 14-15, London, UK

[7] Omarov S., Nysanbaeva S., Beysen S., Mailina Kh. and Zhumabekova N. Research Article Influence of Magnon-phonon Interaction on Ultrasound Absorption in Nanocomposite Materials. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2015. Vol. 11 №6. p. 1-3, ISSN 2040-7459.

[8] Nysanbayeva S., Omarov S., Esirkepov A.. Magnon - phonon interaction of sound in magnetic nanomaterials. ISSN 1680-9211. «KazNTU Bulletin», №3. Almaty. 2015. p. 92-97.

[9] Nysanbayeva S., Beysen S., Omarov S., Maylina Kh., Abzalieva A. Change in the acoustic properties of condensed matter in magnetic and radiation fields. ISSN 1680-9211. «KazNTU Bulletin», № 3(103) 2014 p.54-59.

ЖҰҚА ҚАБЫРШАҚТЫ НАНОКОМПОЗИТТІ $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$, SiO_2NiFe (d) Ta, SiO_2NiFe (d) Ru МАТЕРИАЛДАРЫНДАҒЫ УЛЬТРАДЫБЫСТЫҚ ЖҰТЫЛУ

С.С. Омаров, С.К. Бейсен, С.Қ. Нысанбаева, М.А. Түкібаева, Г.Қ. Тұрлыбекова

Қ.И. Сәтбаев атындағы ҚазҰТЗУ КЕАҚ, Алматы қ.,
Синьязян университеті, Үрімші, ҚХР

Түйін сөздер: нанокөміршікті материалдар, фонон, ультрадыбыстық жұтылу, ультрадыбыстық жұтылу коэффициенті, фонон, фонон-фонондық өзара әсерлесу, акустикалық спектрометр, магнон-фонондық өзара әсерлесу.

Аннотация. Ұсынылып отырған мақалада жұқа қабыршақты нанокөміршікті $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$, SiO_2NiFe (d) Ta, SiO_2NiFe (d) Ru материалдарының магниттік-акустикалық қасиеттерін зерттеу нәтижелері келтірілген. Зерттеу нәтижесінде, аталған материалдардың ультрадыбыстық жұтылуы кристалдық торлардағы жылулық фонндар арасындағы өзара әсерлесуге, акустикалық фонндарға, жылулық фонндар арасындағы температуралық құбылыстарға, сондай-ақ, сыртқы жылдам айналымы магнит өрісіндегі магнон-фонондық өзара әсерлесуге тәуелді екендігі тағайындалған. Бұл айтылған тәуелділіктердің, монокристалдарлық денелердегі аналогтық тәуелділіктерден ерекшелігі, көп қабыршақты нанокөміршіктерде жеке-жеке әрбір қабаттың ультрадыбыстық жұтылуын қарастыру қажет. Зерттеу нәтижелері, қарастырылып отырған жұқа қабыршақты материалдардың акустикалық қасиеттеріне композиттердің түрі мен қалыңдығы және олардың қорғағыш қабаты әсер ететіндігін көрсетті. Сондай-ақ, кремнийдің жұқа қабатындағы жылулық фонндардың тасымалдау моделін ескермей ультрадыбыстық жұтылу коэффициентінің қосынды мәнін есептеу мүмкін.

Поступила 04.04.2016 г.