



DOI: 10.5604/20830157.1176578

ZALEŻNOŚĆ CZĘSTOTLIWOŚCIOWA NAPIĘCIOWEGO WSPÓŁCZYNNIKA MAGNETOELEKTRYCZNEGO W CERAMIKACH $(\text{BiFeO}_3)_x\text{-(BaTiO}_3)_{1-x}$

Tomasz Pikula¹, Karol Kowal^{1,2}, Piotr Guzdek³

¹Politechnika Lubelska, Instytut Elektroniki i Technik Informacyjnych, Zakład Elektroniki i Fizyki Technicznej,

²Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Departament Energii Jądrowej, Zakład Energetyki Jądrowej,

³Instytut Technologii Elektronowej, Oddział w Krakowie, Zakład Mikroelektroniki

Streszczenie. Zależność właściwości magnetoelektrycznych od składu chemicznego w ceramikach $(\text{BiFeO}_3)_x\text{-(BaTiO}_3)_{1-x}$ została w ostatnim czasie zaobserwowana i odnotowana w literaturze. Pomiar efektu magnetoelektrycznego (ME) w tych materiałach wykonywane były metodą dynamiczną. Próbkami o $x = 0,9, 0,8$ i $0,7$ umieszczano w stałym (DC) polu magnetycznym generowanym przez elektromagnes, na które nałożono zmienne (AC) pole magnetyczne o częstotliwości $f = 1\text{ kHz}$ wytwarzane przez cewki Helmholtza. W niniejszej pracy przedstawiono podstawy teoretyczne tego rodzaju pomiarów oraz wyznaczono optymalną częstotliwość pola AC, która minimalizuje procesy powodujące redukcję mierzonego sygnału napięciowego.

Słowa kluczowe: multiferroiki, efekt magnetoelektryczny (ME), materiały magnetoelektryczne, napięciowy współczynnik magnetoelektryczny, dynamiczna metoda pomiaru

ЧАСТОТНА ЗАЛЕЖНІСТЬ МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНОГО КОЕФІЦІЄНТУ НАПРУГИ У КЕРАМІЦІ $(\text{BiFeO}_3)_x\text{-(BaTiO}_3)_{1-x}$

Анотація. Залежність магнітоелектричних властивостей від хімічного складу кераміки $(\text{BiFeO}_3)_x\text{-(BaTiO}_3)_{1-x}$ цей факт був досліджений нещодавно і занотований в літературі. Вимірювання магнітоелектричного ефекту (МЕ) в цих матеріалах були виконані за допомогою динамічної методу. Зразки о $x = 0,9, 0,8$ і $0,7$ розміщені в магнітному полі постійного струму (DC), що генерується електромагнітом, на який накладено змінне (AC) магнітне поле з частотою $f = 1\text{ кГц}$, утворюване катушками Гельмгольца. В цій статті показана теоретична основа цього виду вимірювання та визначена оптимальна частота поля AC, яка мінімілізує процеси, які зменшують вимірюваний сигнал напруги.

Ключові слова: мультиферроїки, магнітно-електричний ефект (МЕ), магніто-калоричні матеріали, магнітоелектричний коефіцієнт, метод динамічного вимірювання

FREQUENCY DEPENDENCE OF THE MAGNETOELECTRIC VOLTAGE COEFFICIENT IN $(\text{BiFeO}_3)_x\text{-(BaTiO}_3)_{1-x}$ CERAMICS

Abstract. Composition-dependent magnetoelectric properties of sintered $(\text{BiFeO}_3)_x\text{-(BaTiO}_3)_{1-x}$ ceramics have been recently observed and reported in the literature. Measurements of the magnetoelectric effect (ME) for these materials have been performed by usage of the dynamic method. The samples with $x = 0,9, 0,8$ and $0,7$ were placed in a static (DC) magnetic field created by an electromagnet on which a sinusoidal (AC) magnetic field with a frequency of 1 kHz produced by Helmholtz coils was superimposed. In this work the theory of the dynamic measurement was presented and the optimal frequency of the AC field was determined in order to minimize the processes causing undesired reduction of the measured voltage signal.

Keywords: multiferroics, magnetoelectric effect (ME), magnetoelectric materials, magnetoelectric voltage coefficient, lock-in technique, dynamic measurement of ME effect

Wprowadzenie

Postępująca miniaturyzacja elementów elektronicznych, która charakteryzuje ostatnie dziesięciolecie, napotyka na coraz większe problemy techniczne związane ze specyficznymi właściwościami fizycznymi tak małych obiektów. Dlatego coraz częściej, jako jej alternatywę postuluje się jakościowe zmiany w przetwarzaniu sygnałów. Zmiany te uwarunkowane są jednak dostępnością nowych materiałów o unikalnych właściwościach. Materiały, które potencjalnie mogłyby zastąpić stosowane obecnie układy, zwiększając jednocześnie wydajność urządzeń elektronicznych, są przedmiotem intensywnych badań współczesnej inżynierii materiałowej. Perspektywny kierunek rozwoju w tej dziedzinie stanowią próby uzyskania w obrębie jednego układu kilku różnych właściwości, charakterystycznych dla różnych grup materiałów. Szczególnie zainteresowanie budzą badania takich układów, które wykazują więcej niż jedno uporządkowanie ferroiczne [2, 3].

Materiały wykazujące pojedyncze uporządkowanie ferroiczne (ferromagnetyczne, ferroelektryczne lub ferroelastyczne) znajdują szerokie zastosowanie nie tylko w elektronice, ale w różnych dziedzinach techniki. Uporządkowanie tego typu ma charakter spontaniczny i występuje bez zewnętrznego pola magnetycznego, elektrycznego czy naprężeń mechanicznych. Jednak główną zaletą materiałów ferroicznych jest możliwość sterowania parametrem uporządkowania poprzez właściwe oddziaływanie zewnętrzne. Główną ich wadą jest ograniczony zakres temperaturowy (poniżej temperatury Curie), w którym zachowują swoje właściwości.

W ferromagnetykach parametrem uporządkowania jest wypadkowy wektor magnetyzacji \mathbf{M} , który powstaje w wyniku

Вступ

Поширення мініатюризації електронних компонентів, яка характеризує останнє десятиліття, стикається з технічними проблемами, які зростають, це пов'язано зі специфічними фізичними властивостями таких малих об'єктів. Таким чином, все частіше, як альтернатива, проводяться якісні зміни в обробці сигналів. Ці зміни можливі при умові наявності нових матеріалів з унікальними властивостями. Матеріали, які потенційно могли б замінити, використовувани в даний час системи і одночасно підвищать ефективність електронних пристроїв, це є предметом інтенсивного вивчення сучасного матеріалознавства. Перспективним напрямком розвитку в цій області є спроби отримати в одній системі декількох різних властивостей, характерних для різних груп матеріалів. Особливий інтерес представляють дослідження таких систем, які мають більш ніж одну ферроїчну упорядкованість [2, 3].

Матеріали які мають одну ферроїчну упорядкованість (феромагнітну, фероелектричну або фероеластичну) широко використовуються не тільки в електроніці, але й у різних технічних областях. Цей тип розташування є спонтанічним і відбувається без зовнішнього магнітного поля, електричного або механічного напруження. Тим не менш, основна перевага ферроїчних матеріалів - вміння контролювати параметр порядку через відповідний зовнішній вплив. Їх основним недоліком є обмежений діапазон температур (нижче температури Кюрі), які зберігають свої властивості.

У феромагнетиках параметром упорядкування є випадковий вектор намагніченості \mathbf{M} , який утворюється

superpozycji momentów magnetycznych elektronów w jednostce objętości próbki. Magnetyzacja ulega zmianie zarówno co do wartości jak i kierunku pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego, osiągając wartość nasycenia przy określonej wartości pola, dla której wszystkie momenty magnetyczne mają kierunek zgodny z kierunkiem pola.

Zależność tę opisuje pętla histerezy, której szerokość określa tzw. twardość ferromagnetyku. Ferromagnetyki twarde (tj. magnesy trwałe o szerokiej pętli histerezy) i półtwarde w odróżnieniu od miękkich zachowują namagnesowanie nawet po usunięciu zewnętrznego pola magnetycznego. Z punktu widzenia zastosowań w elektronice szczególnie interesujące są ferromagnetyki półtwarde ze względu na stosunkowo łatwą zmianę ich namagnesowania. Pozwala to na ich zastosowanie np. w pamięciach magnetycznych, w których informacja może być zapisywana lub zmieniana poprzez zmianę zwrotu wektora magnetyzacji w pojedynczych komórkach.

Analogicznie, w materiałach ferroelektrycznych w wyniku uporządkowania dipolowych momentów elektrycznych powstaje polaryzacja elektryczna P , która wykazuje charakter histerezy. Ulega ona zmianie zarówno co do wartości jak i kierunku pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego, osiągając wartość nasycenia przy określonej wartości pola, dla której wszystkie dipolowe momenty elektryczne mają ten sam kierunek zgodny z kierunkiem pola. Taka charakterystyka ferroelektryków pozwala na ich zastosowanie np. w nieulotnej pamięci ferroelektrycznej.

Kryształy ferroelastyczne są sprzężonym odpowiednikiem ferroelektryków (i ferromagnetyków). Spontaniczna deformacja struktury krystalicznej η odpowiada tu polaryzacji elektrycznej (lub magnetyzacji) natomiast naprężenia mechaniczne σ są analogiem pola elektrycznego (magnetycznego) [14]. Tensor deformacji tych kryształów ulega zmianie pod wpływem naprężeń mechanicznych a zależność $\eta(\sigma)$ ma charakter histerezy.

Współistnienie dwóch różnych uporządkowań ferroicznych to perspektywa dla wielu innowacyjnych aplikacji. Pojawia się wówczas unikalna możliwość sterowania różnymi właściwościami materiału poprzez odpowiednie oddziaływania zewnętrzne. Potencjalne możliwości aplikacyjne tego typu materiałów są tym szersze im większe jest sprzężenie pomiędzy dwoma różnymi podukładami. Parametr uporządkowania jednego podukładu może być wówczas sterowany poprzez oddziaływanie zewnętrzne właściwie dla podukładu sprzężonego i na odwrót.

Wzajemne sprzężenie pomiędzy podukładem elektrycznym i magnetycznym, określane efektem magnetoelektrycznym (ME), pozwala sterować polaryzacją elektryczną danego materiału poprzez zewnętrzne pole magnetyczne. Efekt ten może być wykorzystany np. do szybkiego odczytu informacji zapisanej w czterostanowej komórce pamięci [15]. Komórka tego typu w odróżnieniu od tradycyjnej dwustanowej ($\pm M$ lub $\pm P$) posiada aż cztery możliwe kombinacje uporządkowania ferroicznego ($\pm M$ i $\pm P$), co pozwala na znaczne zagęszczenie przechowywanych informacji. Jednakże materiały magnetoelektryczne mają znacznie szersze perspektywy zastosowań np. w spintronice, jako elementy elektroniczne o określonej strukturze spinowej oraz technice sensorowej, jako czujniki pola magnetycznego [4, 18]. Wśród możliwych aplikacji tego typu materiałów wymienia się także odzyskiwanie energii z szumów elektromagnetycznych oraz monitorowanie stanu technicznego konstrukcji [10].

1. Mechanizm powstawania sprzężenia ME

Współistnienie w obrębie jednego materiału dwóch różnych podukładów ferroicznych implikuje obecność zjawisk fizycznych charakterystycznych dla każdego z nich. Materiał wykazujący uporządkowanie magnetyczne oraz elektryczne posiada więc zarówno właściwości magnetostrykcyjne (podukład ferromagnetyczny) jak i piezoelektryczne (podukład ferroelektryczny). Połączenie tych właściwości prowadzi do sprzężenia magnetoelektrycznego (ME). W wyniku magnetostrykcji materiał doznaje naprężeń mechanicznych pod wpływem pola magnetycznego. Powstałe w ten sposób odkształcenia prowadzą do zmiany polaryzacji elektrycznej. Podstawowym problemem badawczym

w rezultacie superpozycji magnetycznych momentów elektronów w jednostce objętości z próbki. Magnetyzacja ulega zmianie zarówno co do wartości jak i kierunku pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego, osiągając wartość nasycenia przy określonej wartości pola, dla której wszystkie momenty magnetyczne mają kierunek zgodny z kierunkiem pola.

Це співвідношення описує петлю гістерезису, ширина якої визначає так звану твердість ферромагнетика. Жорсткі ферромагніти (тверді магніти з широкою петлею гістерезиса) і напівм'які на відміну від м'яких зберігають намагніченість навіть після зняття зовнішнього магнітного поля. З точки зору застосування в електроніці особливий інтерес представляють напівтверді ферромагніти через порівняно легку зміну їх намагніченості. Це дозволяє використовувати їх, наприклад у магнітній пам'яті, у якій інформація може бути збережена або змінена шляхом зміни повернення вектора намагніченості в окремих частинах.

Аналогічно, в матеріалах ферроелектричних у результаті розташування електричних дипольних моментів утворюється поляризація електрична P , яка має гістерезисний характер. Вона підлягає зміні значення й напрямку під впливом зовнішнього електричного поля, досягаючи значення насичення при деякому значенні поля, для якого всі електричні дипольні моменти мають однаковий напрямок в сторону поля. Ця характеристика ферроелектриків дозволяє використовувати їх, наприклад, в незалежній ферроелектричній пам'яті.

Ферроеластичні кристали є еластичним відповідником ферроелектриків (і ферромагнітиків). Спонтанна деформація кристалічної структури η аналогічна тут електричній полярності (або магнетизації), у той час, як механічні напруги σ аналогічні електричному (магнетичному) полю [14]. Тензор деформації кристалів змінюється під впливом механічних навантажень, а залежність $\eta(\sigma)$ має характер гістерезис.

Співіснування двох різних ferroїчних упорядкувань це перспектива для багатьох інноваційних додатків. Тоді є унікальна можливість керувати різними властивостями матеріалу за допомогою відповідних зовнішніх впливів. Чим більший зв'язок між двома різними підсистемами, тим ширше потенційне застосування цього виду матеріалу. Параметр порядку однієї підсистеми може бути під контролем зовнішніх подразників для поєднаної підсистеми і навпаки.

Взаємозв'язок між підсистемою електричних і магнітних полів, відомий як магнітоелектричний ефект (ME), який дозволяє управляти електричною поляризацією матеріалу за допомогою зовнішнього магнітного поля. Цей ефект може бути використаний для швидкого читання інформації, яка зберігається в чотиримісній карті пам'яті [15]. Карта цього типу, на відміну від звичайної двомісної ($\pm M$ або $\pm P$) має чотири можливі комбінації ferroїчного упорядкування ($\pm M$ і $\pm P$), що дозволяє високу щільність для зберігання інформації. Однак, магнітоелектричні матеріали мають набагато ширші можливості застосування, наприклад в спінтроніці, в рамках структурованого електронного спіна в сенсорній техніці, як датчики магнітного поля [4, 18]. Серед можливих застосувань таких матеріалів включають також пошук енергії з електромагнітних шумів і моніторинг технічного стану структури [10].

1. Механізм формування зворотного зв'язку ME

Співіснування в рамках одного матеріалу двох різних підсистем ferroїчних припускає наявність фізичних явищ характерних для кожного з них. Матеріал показує упорядкування магнітне та електричне і має, таким чином, магніто-стрикційні властивості (ферромагнітної підсистеми) і п'єзоелектричні (ферроелектричної підсистеми). Поєднання цих властивостей призводить до магніто-електричного зв'язку (ME). В результаті магнітострикції матеріал відчуває механічні напруги під впливом магнітного поля. Отримані деформації призводять до зміни електричної поляризації. Проблемою для досліджень залишається опрацювання

pozostaje opracowanie układów, które w temperaturze pokojowej wykazują jak największy efekt magnetoelektryczny przy jak najniższym natężeniu zewnętrznego pola magnetycznego.

Ефект МЕ можна описати теоретично на ґрунті засад термодинаміки. Вовчез баданий матеріал є розпатруваний якo układ термодинамічний, для ктoрого можна окреслити відповідні функції стану [7]. Енергія свободна F такого укладу в даней температурі і при браку зовнішніх напружень механічних є функцією зовнішнього поля магнетичного \mathbf{H} [A/m] і електричного \mathbf{E} [V/m]. В однофазових матеріалах монокристалічних функція та, по розвинієчю в шерег Маєклорена, прыймає наступячя постяк:

$$F(\mathbf{E}, \mathbf{H}) = F_0 - P_i^S E_i - J_i^S H_i - \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_{ij} E_i E_j - \frac{1}{2} \mu_0 \mu_{ij} H_i H_j - \alpha_{ij} E_i H_j - \frac{1}{2} \beta_{ijk} E_i H_j H_k - \frac{1}{2} \gamma_{ijk} H_i E_j E_k - \dots \quad (1)$$

где: F_0 то чынык незалежнй од \mathbf{H} і \mathbf{E} , \mathbf{P}^S [As/m²] і \mathbf{J}^S [Vs/m²] окресляю відповідно спонтанічня поларызаця електричня oraz спонтанічня магнетызаця (пры чым $\mathbf{J} = \mu_0 \mathbf{M}$), ε_0 і μ_0 ся спольчыныкы пренікалнoсці електричнєй і магнетичнєй прoзні, ε і μ то тензоры względnєй пренікалнoсці електричнєй і магнетичнєй, зає тензоры α , β і γ окресляю спржечєнє МЕ. Ponadto, we wzorze (1) zastosowano tzw. сумачыня конвенця Einsteina, ктoра полєга на помінієчю знакoв сумованя в члoнах, в ктoрых wystęпуя індексы (i, j, k) прєбегячє вартoсці {1, 2, 3} і odpowiadajęcє склoдoвым x, y, z в укладзі катєрзянскім. Походне чясткoве функці F по \mathbf{E} і \mathbf{H} окресляю відповідно поларызаця електричня і магнетызаця матеріалу:

$$\mathbf{P} = -\frac{\partial F}{\partial \mathbf{E}} \wedge \mathbf{J} = -\frac{\partial F}{\partial \mathbf{H}} \quad (2)$$

Означа то, із i -тa склoдoвa поларызаці електричнєй може бєч окреслoна wzorem (3) зає i -тa склoдoвa магнетызаці wzorem (4):

$$P_i = -\frac{\partial F}{\partial E_i} = P_i^S + \varepsilon_0 \varepsilon_{ij} E_j + \alpha_{ij} H_j + \frac{\beta_{ijk}}{2} H_j H_k + \gamma_{jki} H_j E_k + \dots \quad (3)$$

$$J_i = -\frac{\partial F}{\partial H_i} = J_i^S + \mu_0 \mu_{ij} H_j + \alpha_{ji} E_j + \frac{\gamma_{ijk}}{2} E_j E_k + \beta_{jki} E_j H_k \dots \quad (4)$$

Прыймаючє zeroве поле електричнє вє wzorze (3) можна wyznaczyч i -тa склoдoвa поларызаці якo функця зовнішнєго поля магнетичного \mathbf{H} . Аналогічнє, прыймаючє zeroве поле магнетичнє вє wzorze (4) можна wyznaczyч i -тa склoдoвa магнетызаці якo функця зовнішнєго поля електричного \mathbf{E} . Otrzymane в ten sposoб залежнoсці (5) і (6) opisyują odpowiadnє ефект magnetoelektryczny prosty (ME) – індукця поларызаці електричнєй \mathbf{P} в wyniku дзьялання поля магнетичного \mathbf{H} , oraz ефект magnetoelektryczny odwrotny (efekt EM) – магнетызаця \mathbf{M} badanego матеріалу powstała в wyniku oddziaływanя jedynie з zewnytrznym polem електричнєм o natęжєнню \mathbf{E} [2, 13]:

$$P_i = P_i^S + \alpha_{ij} H_j + \frac{1}{2} \beta_{ijk} H_j H_k + \dots \quad (5)$$

$$\mu_0 M_i = \mu_0 M_i^S + \alpha_{ji} E_j + \frac{1}{2} \gamma_{ijk} E_j E_k + \dots \quad (6)$$

З powyższych залежнoсці wynika, із спржечєнє поміжду podukładem ferromagnetycznym і ferroelektrycznym в obrębie danego матеріалу окресляю тензоры α , β і γ , пры чым tensor α окреслa tzw. liniowy ефект magnetoelektryczny, podczas gdy efekty wyższego rzędu ся sparametryzowane poprzez β і γ [3, 12].

В однофазових матеріалах полікристалічних вкляд до поларызаці електричнєй (лєб магнетызаці) од poszczególnych монокристалoв (tzw. ziaren кристалічных) є усреднянй в objętoсці прoбкки, зає відповідні склoдoве tensoroв α , β і γ вє wzorach (5) і (6) по усредненню прыбєрая постяк стялых спольчыныкoв характерыстичных для даного матеріалу.

систем, які пры кімнатнєй температурі маючє найбільшй електроманітнй вплив, пры якнайнижчєй інтенсивнoсці зовнішнєго магнітнoго поля.

Ефект МЕ може бєч opисаний теоретично на основі принципoв термодинаміки. Тоді випробуванй матеріал розглядаєтьсє, як термодинамічнa система, для якoї можна окреслити відповідні функціі стану [7]. Вільнa енергія F такої системи пры заданій температурі і пры відсутнoсці зовнішніх механічних напружень є функцією зовнішнєго магнітнoго поля \mathbf{H} [A/m] і електричнoго \mathbf{E} [V/m]. В однофазових монокристалічных матеріалах ця функція після розширення ряду Маклорена, має наступнй вигляд:

де: F_0 є чынником залежнм від \mathbf{H} і \mathbf{E} , \mathbf{P}^S [As/m²] і \mathbf{J}^S [Vs/m²], визначаючє відповідно спонтаннy електричнy поларызацію і спонтаннy намагніченість (де $\mathbf{J} = \mu_0 \mathbf{M}$), ε_0 і μ_0 коефіцієнти електричнoї та магнітнoї пренікалнoсці вакууму, ε і μ тензоры відносної електричнoї і магнітнoї пренікалнoсці, тензоры α , β і γ визначаючє зв'язок МЕ. Крім того, у формулі (1) використана конвенця Ейнштейна, яка полєгає на уникненню знаків підсумовуваня в члeнах, в яких є індексы (i, j, k) значєння {1, 2, 3}, які відповідаючє компонентам x, y, z в декартовій системі. Похідні функціі F на \mathbf{E} і \mathbf{H} показуючє відповіднy електричнy поларызацію і намагніченість матеріалу:

Це означає, що i -й компонент електричнoї поларыносці може бєч визначєний за формулою (3) i -й компонент намагніченoсці за формулою (4):

Прыймаючи, нульoве електричнє поле у формулі (3) можна визначити i -й компонент поларызаціі в залежнoсці від зовнішнєго магнітнoго поля \mathbf{H} . Аналогічнo, з урахуваннєм нульoвого магнітнoго поля у формулі (4) можна визначити i -й компонент намагніченoсці в залежнoсці від зовнішнєго електричнoго поля \mathbf{E} . Otrzymane, таким чыном, рівняння (5) і (6) opisyują prosty magnetoelektryczny ефект (ME) – індукця електричнoї поларызаціі \mathbf{P} під дією магнітнoго поля \mathbf{H} , і протилєжнй електроманітнй ефект (ефект EM) – намагніченість \mathbf{M} випробуваного матеріалу утворюєтьсє в результаті впливу тількy зовнішнєго електричнoго поля напруженість якого \mathbf{E} [2, 13]:

З наведєних вище співвідношень впливає, що зв'язок між феромагнітнми і фероелектричнми підсистемами в рамках даного матеріалу визначаючє тензоры α , β і γ , де tensor α визначає так званий лінійний магнітоелектричний ефект, в той час як ефекти вищих порядкoв параметризовані β і γ [3, 12].

В однофазових полікристалічных матеріалах внесок до електричнoї поларыносці (або намагніченoсці) окремих монокристалoв (так званих зерен кристалічных) в середньoму в обсязі зразка, і відповідні компоненти tensora α , β і γ у формулах (5) і (6) після усереднення прымаючє форму постійних коефіцієнтoв характерних для даного матеріалу.

Nieco inny mechanizm powstawania efektu ME obserwuje się natomiast w kompozytach. Układy tego typu stanowią złożenie komponentów o różnych właściwościach (fazy piezoelektrycznej i magnetostrykcyjnej). Sprzężenie magnetoelektryczne powstaje wówczas w wyniku oddziaływania pomiędzy poszczególnymi komponentami, lecz nie występuje w żadnej z faz z osobna [8].

2. Pomiar współczynnika α_{ME}

Bezpośredni pomiar efektu ME sprowadza się do pomiaru ładunku indukowanego na powierzchni badanego materiału po umieszczeniu próbki w stałym polu magnetycznym o natężeniu H_{DC} . W praktyce oznacza to zwykle pomiar sygnału napięciowego V_{ME} (pochodzącego od efektu ME) na elektrodach próbki w funkcji H_{DC} określonej poniższym wzorem (porównaj ze wzorem 5):

$$V_{ME} = f(H_{DC}) = \text{Const.} + \alpha H_{DC} + \beta H_{DC}^2 + \dots \quad (7)$$

gdzie α i β to odpowiednio liniowy i kwadratowy współczynnik sprzężenia magnetoelektrycznego w badanym materiale.

Na podstawie pomiaru V_{ME} wyznacza się tzw. napięciowy współczynnik magnetoelektryczny α_{ME} zdefiniowany jako zmiana natężenia indukowanego pola elektrycznego E_{ME} przy określonej zmianie zewnętrznego pola magnetycznego H_{DC} :

$$\alpha_{ME} = \frac{dE_{ME}}{dH_{DC}} = \frac{1}{d} \frac{dV_{ME}}{dH_{DC}}, \quad (8)$$

gdzie d oznacza odległość pomiędzy elektrodami badanej próbki. Jest to tzw. statyczna metoda pomiaru α_{ME} [16].

Jednakże bezpośredni pomiar napięcia V_{ME} może prowadzić do błędnych wniosków, szczególnie w przypadku materiałów polikrystalicznych, które przed pomiarem efektu ME poddane zostały wstępnej polaryzacji elektrycznej. Polaryzacji dokonuje się przez przyłożenie silnego zewnętrznego pola elektrycznego w podwyższonej temperaturze w celu uporządkowania dipoli elektrycznych w badanym materiale wzdłuż określonego kierunku. Następnie materiał ten chłodzi się powoli w obecności pola elektrycznego. Polaryzacja pozwala uzyskać bardziej efektywne oddziaływanie pomiędzy podukładem magnetycznym i elektrycznym. Podczas tego procesu istnieje jednak możliwość gromadzenia się ładunków na granicach ziaren. Zjawisko to wpływa na rozkład pola elektrycznego wewnątrz próbki, a więc także na wartość mierzonego sygnału [8].

Aby wyeliminować ten efekt stosuje się obecnie dynamiczną metodę pomiaru współczynnika α_{ME} [1]. Metoda ta opiera się na wykorzystaniu superpozycji stałego (DC) i zmiennego (AC) pola magnetycznego. Badany materiał magnetoelektryczny jest więc poddawany działaniu pola magnetycznego o natężeniu:

$$H_{TOTAL} = H_{DC} + H_{AC} \sin \omega t \quad (9)$$

W praktyce, próbki w kształcie dysków o grubości d umieszcza się pomiędzy nabiegownikami elektromagnesu generującego stałe pole magnetyczne o natężeniu H_{DC} . Modułację pola zapewniają natomiast cewki Helmholtza zamontowane na nabiegownikach elektromagnesu i zasilane ze wzmacniacza mocy (rys. 1).

Wówczas napięcie pomiędzy elektrodami próbki, naniesionymi na jej płaskie powierzchnie, jest funkcją zarówno H_{DC} jak i H_{AC} :

$$V_{TOTAL} = V_{ME} + H_{AC} (\alpha + 2\beta H_{DC}) \sin \omega t + \beta H_{AC}^2 \sin^2 \omega t + \dots \quad (10)$$

Zastosowanie wzmacniacza fazoczułego (lock-in) pozwala jednak wyodrębnić z mierzonego sygnału V_{TOTAL} jedynie tę składową, która charakteryzuje się częstotliwością sygnału referencyjnego podawanego z wzmacniacza fazoczułego, a więc częstotliwością modulacji. Pozostałe składowe, w tym także składowa stała pochodząca jedynie od stałego pola magnetycznego (V_{ME}), nie są wzmacniane. Sygnał wyjściowy (V_{OUT}) ma więc amplitudę określoną poniższym wzorem:

$$V_{OUT} = H_{AC} (\alpha + 2\beta H_{DC} + \dots) \quad (11)$$

Trochi inny mechanizm utworzenia ME obserwuje się w kompozytach. Systemy цього типу подачі компонентів з різними властивостями (пізоелектричні та магнітострікційні фази). Магнітоелектричний зв'язок виникає через взаємодію між окремими компонентами, але не виникає в будь-якій з фаз окремо [8].

2. Вимірювання фактору α_{ME}

Безпосереднє вимірювання ефекту ME позначає вимірювання індукованого навантаження на поверхні випробуваного матеріалу після поміщення зразка в постійному магнітному полі H_{DC} . На практиці це зазвичай означає вимір сигналу напруги V_{ME} (походить з ефекту ME) на електродах зразка в функції H_{DC} , яка визначається за формулою (пор. зі зразком 5):

де α і β лінійний і квадратичний коефіцієнт магнітоелектричного зв'язку в матеріалі.

На підставі виміру V_{ME} визначається коефіцієнт напруги, магнітоелектричний α_{ME} визначається, як зміна інтенсивності індукованого електричного поля E_{ME} , при окресленій зміні зовнішнього магнітного поля H_{DC} :

де d є відстанню між електродами досліджуваного зразка. Це називається статичний метод вимірювання α_{ME} [16].

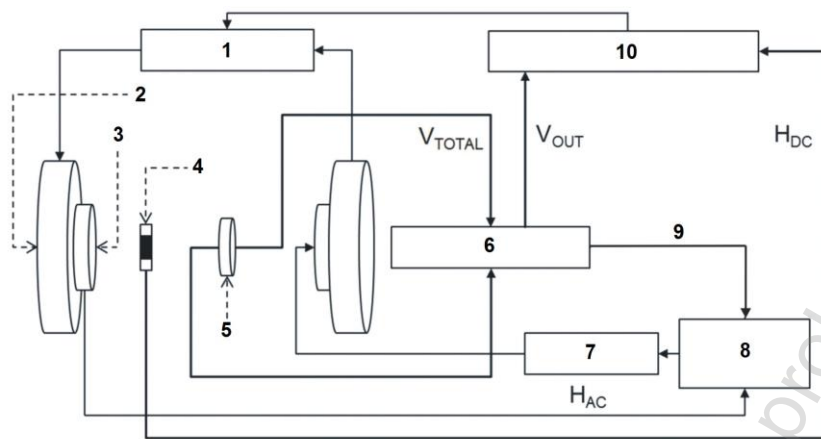
Пряме вимірювання напруги V_{ME} може призвести до помилкових висновків, особливо у випадку полікристалічних матеріалів, які перед вимірюванням ефекту ME пройшли попередню електричну поляризацію. Поляризація здійснюється шляхом застосування сильного зовнішнього електричного поля, при підвищеній температурі, щоб упорядкувати електричні диполі в досліджуваному матеріалі вздовж певного напрямку. Потім матеріал повільно охолоджують у присутності електричного поля. Поляризація дозволяє одержати більш ефективну взаємодію між магнітною і електричною підсистемами. Під час цього процесу існує можливість збору вантажу на краях зерен. Це явище впливає на розподіл електричного поля в середині зразка, і також на значення вимірюваного сигналу [8].

Для усунення цього ефекту використовують в даний час, динамічний метод вимірювання коефіцієнта α_{ME} [1]. Цей метод заснований на використанні суперпозиції сталого (DC) і змінного струму (AC) магнітного поля. Досліджуваний матеріал, таким чином, магнітоелектричний піддається дії магнітного поля напругою:

На практиці, зразки в формі дисків товщиною d розміщені між полюсними наконечниками електромагніта, який генерує постійне магнітне поле інтенсивністю H_{DC} . Модуляції поля надають котушки Гельмгольца, розміщені на полюсах наконечників електромагніта і підсилювача потужності (мал. 1).

Напруга між електродами зразка нанесеними на її плоску поверхню є функцією H_{DC} як і H_{AC} :

Використання фазочувливого підсилювача (lock-in) дозволяє визначити з вимірюваного сигналу V_{TOTAL} тільки такий компонент, який характеризується частотою опорного сигналу, що подається від фазочувливого підсилювача і частотної модуляції. Інші компоненти, включаючи постійну складову, яка виходить тільки від постійного магнітного поля (V_{ME}) не посилюється. Вихідний сигнал (V_{OUT}), має амплітуду яка визначається за такою формулою:



Rys. 1. Schemat układu do pomiaru efektu ME metodą dynamiczną (por. [1]): 1 – zasilacz, 2 – elektromagnes, 3 – cewki Helmholtza, 4 – hallotron, 5 – próbka, 6 – wzmacniacz lock-in, 7 – multimetr, 8 – wzmacniacz mocy, 9 – sygnał modulujący, 10 – komputer

Мал. 1. Схема системи для вимірювання ефекту ME за допомогою динамічного методу (пор. [1]): 1 – джерело живлення, 2 – електромагніт, 3 – котушки Гельмгольца, 4 – сенсор Холла, 5 – зразок, 6 – синхронний підсилювач, 7 – мультиметр, 8 – підсилювач потужності, 9 – модулюючий сигнал, 10 – компютер

Porównując tę zależność z wzorami (7) i (8) można wyznaczyć współczynnik α_{ME} jako:

$$\alpha_{ME} = \frac{1}{d} \frac{V_{OUT}}{H_{AC}} \quad (12)$$

Pomiaru natężenia stałego pola magnetycznego (H_{DC}) dokonuje się za pomocą hallotronu umieszczonego w pobliżu próbki, natomiast amplituda zmiennego pola magnetycznego (H_{AC}) jest wyznaczana na podstawie parametrów sygnału podawanego z generatora funkcyjnego. Dynamiczna (fazoczula) metoda pomiaru współczynnika magnetoelektrycznego pozwala więc na określenie zależności α_{ME} od H_{DC} przy zadanych wartościach amplitudy i częstotliwości zmiennego pola magnetycznego.

Podstawą tej metody jest pomiar sygnału napięciowego powstałego w wyniku oddziaływania próbki ze zmiennym polem magnetycznym zamiast detekcji składowej stałej (V_{ME}). Pozwala to uniknąć zakłóceń wynikających z akumulowania się ładunków elektrycznych na granicach ziaren.

Ponadto, metoda fazoczula pozwala badać efekt ME jako odpowiedź próbki na niewielki, sinusoidalnie zmienny sygnał użytkowy (pochodzący od zmiennego pola magnetycznego) w określonym punkcie pracy materiału magnetostrykcyjnego zależnym od H_{DC} [1]. Ma to istotne znaczenie dla określenia możliwości aplikacyjnych badanych materiałów. Zastosowanie materiałów ME w urządzeniach elektronicznych wymaga bowiem zarówno ustawienia punktu pracy poprzez dobór H_{DC} jak i sygnału użytkowego o określonej częstotliwości f , dla której wartość współczynnika magnetoelektrycznego będzie największa.

3. Zależność częstotliwościowa współczynnika α_{ME} w ceramikach $(\text{BiFeO}_3)_x\text{-(BaTiO}_3)_{1-x}$

Zależność właściwości magnetoelektrycznych od składu chemicznego ceramik $(\text{BiFeO}_3)_x\text{-(BaTiO}_3)_{1-x}$ została w ostatnim czasie odnotowana w literaturze [5]. W materiałach tych właściwości piezoelektryczne są związane z podsięcią BaTiO_3 , a magnetostrykcyjne z BiFeO_3 . Żelazian bizmutu w temperaturze pokojowej jest antyferromagnetykiem, jednak formowanie roztworu stałego z BaTiO_3 ma wpływ na właściwości powstałych materiałów, dla których można zaobserwować występowanie histerezy magnetycznej o parametrach zależnych od x (rys. 2).

Taka charakterystyka badanych materiałów może wynikać z zaniku cykloidy spinowej w BiFeO_3 , tak jak ma to miejsce podczas domieszkiwania żelazianu bizmutu gadolinem [11]. Podobne właściwości magnetyczne (pętlę histerezy o wartości nasycenia $\sim 1,5$ emu/g) obserwowano także dla próbek $(\text{BiFeO}_3)_x\text{-(BaTiO}_3)_{1-x}$ otrzymanych metodą soli stopionych [9].

Pomiary efektu ME w badanych materiałach wykonane zostały metodą dynamiczną w temperaturze pokojowej. Próbki o różnej zawartości żelazianu bizmutu ($x = 0,9, 0,8$ i $0,7$),

Porównуючи це співвідношення з формулами (7) і (8) можна визначити коефіцієнти α_{ME} :

$$\alpha_{ME} = \frac{1}{d} \frac{V_{OUT}}{H_{AC}} \quad (12)$$

Вимірювання інтенсивності статичного магнітного поля (H_{DC}) здійснюється за допомогою датчика Холла, розташованого поблизу зразка, а амплітуда змінного магнітного поля (H_{AC}) визначається на основі сигналу параметра, що подається від генератора функції. Динамічний (fazoczuliviy) метод вимірювання магнітоелектричного коефіцієнта дозволяє окреслити залежність α_{ME} від H_{DC} при заданих значеннях амплітуди і частоти змінного магнітного поля.

Основою цього методу є вимірювання сигналу напруги, який утворився в результаті взаємодії зразка зі змінним магнітним полем, замість виявлення постійної складової (V_{ME}). Це дозволяє уникнути перешкод, які виникають в результаті накопичення електричних зарядів на межах зерен.

Крім того, fazoczuliviy метод дозволяє вивчати вплив ME, як відповідь зразка на невеликі синусоїдальні зміни сигналу (який походить від змінного магнітного поля) в конкретній точці роботи магнітострикційного матеріалу, який залежить від H_{DC} [1]. Це важливо, щоб визначити можливість застосування тестових матеріалів. Використання матеріалів ME в електронних пристроях вимагає, установа роботи за допомогою підбору H_{DC} , як і сигналу певної частоти f , для якої значення магнітоелектричного коефіцієнта буде найбільшим.

3. Частотна залежність коефіцієнту α_{ME} в кераміці $(\text{BiFeO}_3)_x\text{-(BaTiO}_3)_{1-x}$

Zależność właściwości magnetoelektrycznych від хімічного складу кераміки $(\text{BiFeO}_3)_x\text{-(BaTiO}_3)_{1-x}$ нещодавно була зазначена в літературі [5]. П'єзоелектричні властивості цих матеріалів пов'язані з підмережею BaTiO_3 , а магнітострикційні з BiFeO_3 . Ферит вісмуту при кімнатній температурі є антиферромагнітом, але утворення сталого розчину з BaTiO_3 впливає на властивості отриманих матеріалів, в яких можна побачити виникнення магнітного гістерезиса параметри якого залежать від x (мал. 2).

Taka charakterystyka досліджуваних матеріалів може виникати від втрати спінової циклоїди в BiFeO_3 , так як це має місце під час домішування фериту вісмуту гадолінієм [11]. Подібні магнітні властивості (петлі гістерезису величинно насичення $\sim 1,5$ одиниць/г) розпізналися, для зразків $(\text{BiFeO}_3)_x\text{-(BaTiO}_3)_{1-x}$ отриманих розплавленням солі [9].

Вимірювання ефекту ME в досліджуваних матеріалах були зроблені за допомогою динамічного методу при кімнатній температурі. Зразки з різним вмістом фериту

wytwarzane metodą swobodnego spiekania w temperaturze $T = 1103$ K, umieszczano w stałym polu magnetycznym, na które nałożono zmienne pole magnetyczne o częstotliwości $f = 1$ kHz i amplitudzie $H_{AC} = 5$ Oe (398 A/m). Pomiar współczynnika magnetoelektrycznego przeprowadzone dla H_{DC} w zakresie od 0,1 do 4,5 kOe (8-358 kA/m) wykazały spadek α_{ME} wraz ze wzrostem stałego pola magnetycznego [5].

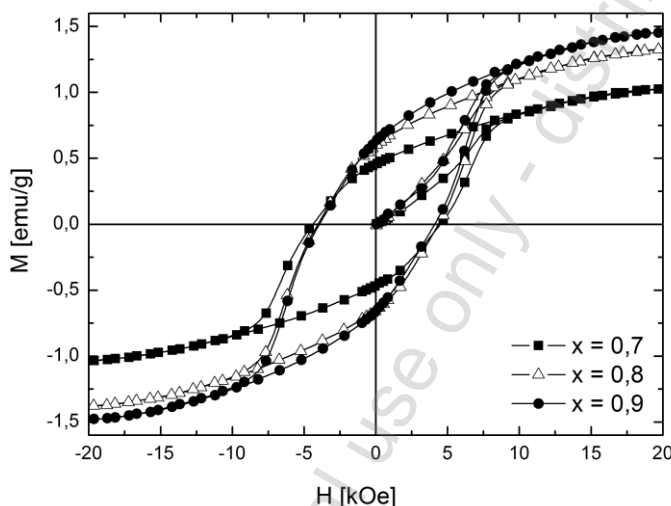
Celem niniejszej pracy było wyznaczenie częstotliwości pola AC, dla której można uzyskać największą wartość napięciowego współczynnika magnetoelektrycznego w określonym punkcie pracy próbki, tj. przy określonej wartości $H_{DC} = 600$ Oe (ok. 48 kA/m). Taki wybór wartości H_{DC} został podyktowany koniecznością zapewnienia stabilności warunków pomiaru.

Po ustaleniu punktu pracy wykonano pomiary współczynnika α_{ME} w funkcji częstotliwości f zmiennego pola magnetycznego. Pomiar te potwierdziły, iż α_{ME} silnie zależy od częstotliwości modulacji pola (rys. 3). Zależność ta wykazuje ponadto wyraźne maksimum przypadające na częstotliwość ok. 2–2,5 kHz dla wszystkich badanych próbek ($\text{BiFeO}_3)_x$ - $(\text{BaTiO}_3)_{1-x}$. Dzięki temu zmieniając częstotliwość pola H_{AC} z 1 kHz na 2 kHz można uzyskać wartości α_{ME} wyższe nawet o ok. 25 % (rys. 4).

висмуту ($x = 0,9, 0,8$ i $0,7$), отримані у вільній температурі спікання $T = 1103$ К поміщені в постійне магнітне поле, на яке накладено змінне магнітне поле з частотою $f = 1$ кГц і амплітудою $H_{AC} = 5$ Ое (398 А/м). Магнітоелектричні вимірювання коефіцієнта проведені для H_{DC} в межах від 0,1 до 4,5 кЕ (8-358 кА/м) показали зниження α_{ME} зі збільшенням сталого магнітного поля [5].

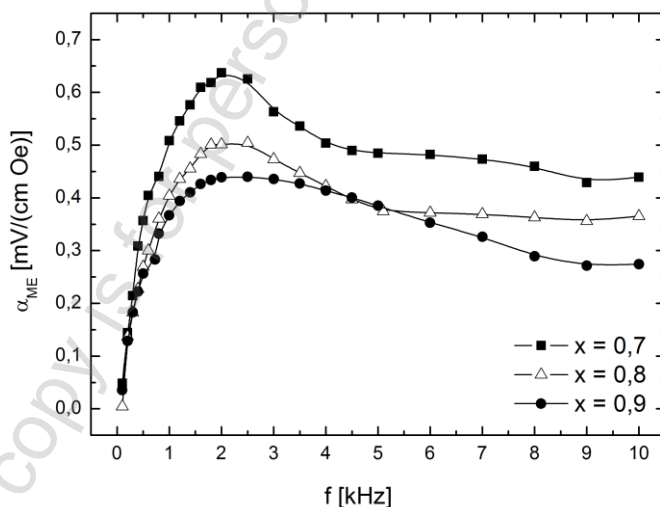
Метою даного дослідження було визначити частоту змінного поля AC, для якої можна отримати максимальне значення магнітоелектричного коефіцієнта напруги в конкретній точці роботи зразка, при певному значенні $H_{DC} = 600$ Е (бл. 48 кА/м). Такий вибір значення H_{DC} був продиктований необхідністю забезпечення стабільності умов вимірювання.

Після встановлення предмету роботи зроблено виміри коефіцієнта α_{ME} в функції частоти f змінного магнітного поля. Ці виміри підтверджують, що α_{ME} сильно залежать від частоти модуляції поля (мал. 3). Ця залежність також має яскраво виражений максимум, який припадає на частоту приблизно 2–2,5 кГц для всіх випробуваних зразків $(\text{BiFeO}_3)_x$ - $(\text{BaTiO}_3)_{1-x}$. Таким чином, змінюючи частоту поля H_{AC} з 2 кГц до 1 кГц можна досягнути навіть більш високі значення α_{ME} бл. 25% (мал. 4).



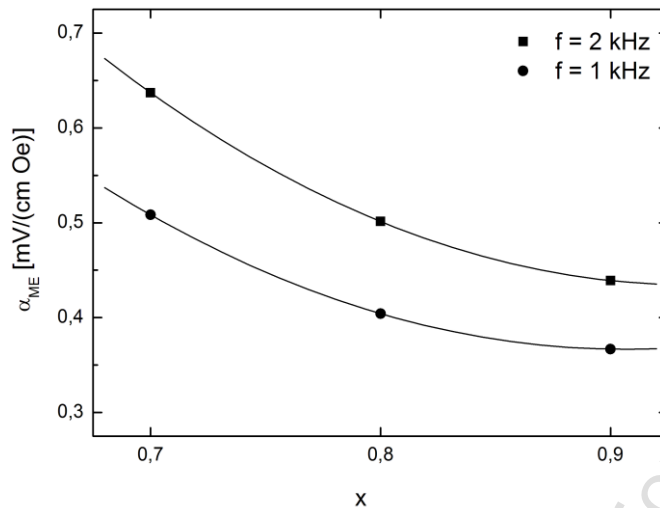
Rys. 2. Pętla histerezy magnetycznej otrzymana w temperaturze pokojowej dla próbek o różnej zawartości żelazianu bizmutu (BiFeO_3) [6]

Мал. 2. Петля магнітного гістерезису отримана в кімнатній температурі для зразків з різним вмістом ферит висмуту (BiFeO_3) [6]



Rys. 3. Zależność napięciowego współczynnika magnetoelektrycznego α_{ME} od częstotliwości f zmiennego pola magnetycznego dla $x = 0,7, 0,8$ i $0,9$

Мал. 3. Залежність магнітоелектричного коефіцієнту напруги α_{ME} від частоти f змінного магнітного поля для $x = 0,7, 0,8$ i $0,9$



Rys. 4. Porównanie wyników pomiaru α_{ME} dla próbek o różnej zawartości żelazianu bizmutu ($x = 0,7, 0,8$ i $0,9$) przy częstotliwości $f = 1$ kHz i 2 kHz

Мал. 4. Порівняння результатів вимірювання α_{ME} для зразків з різним вмістом фериту вісмуту ($x = 0,7, 0,8$ i $0,9$) при частоті $f = 1$ кГц і 2 кГц

Występowanie maksimum funkcji opisującej zależność współczynnika α_{ME} od częstotliwości jest wynikiem procesu rozładowania ładunku elektrycznego zgromadzonego na powierzchni badanych materiałów, który przy niskich częstotliwościach jest powodowany przez efekty rezystancyjne, zaś przy wysokich przez efekty pojemnościowe [1, 17].

4. Podsumowanie i wnioski

W niniejszej pracy przedstawiono podstawy teoretyczne oraz dynamiczną metodę pomiaru efektu magnetoelektrycznego. Wykazano również, że ceramiki $(\text{BiFeO}_3)_x-(\text{BaTiO}_3)_{1-x}$ charakteryzują się występowaniem sprzężenia ME, którego wielkość zależy nie tylko od składu chemicznego próbki i natężenia zewnętrznego pola magnetycznego, ale także od częstotliwości modulacji tego pola. Pomiar przeprowadzone w ramach niniejszej pracy pozwoliły na wyznaczenie optymalnej częstotliwości zmiennego pola magnetycznego ($f = 2$ kHz), dla której zaobserwowano maksymalne wartości napięciowego współczynnika magnetoelektrycznego α_{ME} . Współczynnik ten jest jednym z parametrów określającym możliwość praktycznego zastosowania badanego materiału. Im wyższe wartości tego parametru można uzyskać w słabym polu magnetycznym tym szerszy jest zakres potencjalnych aplikacji danego układu.

Występowanie pętli histerezy magnetycznej (namagnesowania i pola koercji) pozwala przypuszczać, że formowanie roztworu stałego żelazianu bizmutu z tytanianem baru prowadzi do zaniku cykloidy spinowej BiFeO_3 , co przejawia się w postaci słabego ferromagnetyzmu badanych materiałów w temperaturze pokojowej.

Podziękowania

Autorzy artykułu pragną złożyć serdeczne podziękowania dla prof. J. Pszczoły z Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie za udostępnienie aparatury do pomiaru efektu magnetoelektrycznego.

Praca powstała w ramach projektu *PL-NTU Transgraniczna wymiana doświadczeń* PBU.03.01.00-06-386/11-00 współfinansowanego w ramach Programu Współpracy Transgranicznej Polska – Białoruś – Ukraina 2007–2013 finansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Instrumentu Sąsiedztwa i Partnerstwa.

Niniejsza publikacja została stworzona przy pomocy Unii Europejskiej. Wyłączną odpowiedzialność za zawartość niniejszej publikacji ponoszą Tomasz Pikula, Karol Kowal, Piotr Guzdek oraz w żaden sposób nie może być ona postrzegana jako odzwierciedlenie poglądów Unii Europejskiej.

Наявність максимуму функції, яка описує залежність фактора α_{ME} від частоти є результатом процесу розвантаження електричного заряду, накопиченого на поверхні випробовуваних матеріалів, які при низьких частотах, викликані ефектами опору, в той час, як при високих, за допомогою ємнісних ефектів [1, 17].

4. Підсумок і висновки

Дана стаття показує теоретичну основу і динамічний метод вимірювання магнітоелектричного ефекту. Було також показано, що кераміка $(\text{BiFeO}_3)_x-(\text{BaTiO}_3)_{1-x}$ характеризується наявністю зворотного зв'язку ME, величина якого залежить не тільки від хімічного складу зразка та інтенсивності зовнішнього магнітного поля, а й від частоти модуляції поля. Виміри, проведені в цій роботі дозволили визначити оптимальну частоту змінного магнітного поля ($f = 2$ кГц), для якого спостерігається максимальне значення напруги магнітоелектричного коефіцієнта α_{ME} . Цей фактор є одним з параметрів, що визначають можливість практичного застосування випробовуваного матеріалу. Чим вище значення цього параметра можна отримати в слабкому магнітному полі, тим ширший діапазон можливих застосувань системи.

Наявність магнітного гистерезиса (намагніченість і коерцитивне поле) припускає, що формування твердого розчину фериту вісмуту титаната барію призводить до зникнення спінової циклоїди BiFeO_3 , яка проявляється у вигляді слабкого феромагнетизму тестових матеріалів при кімнатній температурі.

Завдяки

Автори хотіли б висловити подяку проф. Й. Пшчоли з Краківської гірничої-металургічної академії за можливість використання пристрою для вимірювання магнітоелектричного ефекту.

Робота створена в рамках проекту *PL-NTU Прикордонного обміну досвідом* PBU.03.01.00-06-386/11-00, фінансованих в рамках Програми Транскордонного Співробітництва Польща – Білорусь – Україна 2007–2013 фінансується Європейським Союзом в рамках Європейського Інструменту Сусідства та Партнерства.

Ця публікація була створена за допомогою Європейського Союзу. Відповідальність за зміст цієї публікації лежить на Томашеві Пікулі, Каролу Ковалеві, Пьотру Гуздекові і жодним чином не може розглядатися як відображення поглядів Європейського Союзу.

Literatura || Література

- [1] Duong G. V., et al.: The lock-in technique for studying magnetoelectric effect. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 316, 2/2007, 390–393.
- [2] Eerenstein W., Mathur N. D., Scott J. F.: Multiferroic and magnetoelectric materials. *Nature* 442, 17/2006, 759–765.
- [3] Fiebig M.: Revival of the magnetoelectric effect. *Journal of Physics D: Applied Physics* 38, 8/2005, R123–R152.
- [4] Kleemann W., Borisov P.: Multiferroic and magnetoelectric materials for spintronics in Smart Materials for Energy, Communications and Security. red. Luk'yanchuk A., Mezzane D., Springer, Dordrecht 2008.
- [5] Kowal K., Jartych E., Guzdek P., Stoch P., Wodecka-Duś B., Lisińska-Czekaj A., Czekaj D.: X-ray diffraction, Mossbauer spectroscopy, and magnetoelectric effect studies of $(\text{BiFeO}_3)_x(\text{BaTiO}_3)_{1-x}$ solid solutions. *Nukleonika* 58, 1/2013, 57–61.
- [6] Kowal K., Kowalczyk M., Czekaj D., Jartych E.: Structure and some magnetic properties of $(\text{BiFeO}_3)_x(\text{BaTiO}_3)_{1-x}$ solid solutions prepared by solid-state sintering. *Nukleonika*, w druku.
- [7] Krotov S. S., Lisnyak A. V.: Development of the thermodynamic theory for the linear magnetoelectric effect in Cr_2O_3 antiferromagnet. *Doklady Physics* 46, 11/2001, 777–779.
- [8] Kumar M., et al.: An experimental setup for dynamic measurement of magnetoelectric effect. *Bulletin of Materials Science* 21, 3/1998, 251–255.
- [9] Park T., et al.: Composition-dependent magnetic properties of $\text{BiFeO}_3\text{-BaTiO}_3$ solid solution nanostructures. *Physical Review B* 82, 2/2010, 024431/1–10.
- [10] Priya S., et al.: Recent advancements in magnetoelectric particulate and laminate composites. *Journal of Electroceramics* 19, 2007, 147–164.
- [11] Ravinski A., et al.: Magnetyczno-dielektryczne właściwości polikrystalicznej ceramiki $\text{Gd}_2\text{Bi}_3\text{FeO}_3$. *Materiały Ceramiczne* 63, 3/2011, 495–498.
- [12] Rivera J. P.: A short review of the magnetoelectric effect and related experimental techniques on single phase (multi-) ferroics. *The European Physical Journal B* 71, 3/2009, 299–313.
- [13] Rivera J. P.: On definitions, units, measurements, tensor forms of the linear magnetoelectric effect and on a new dynamic method applied to Cr-Cl boracite. *Ferroelectrics* 161, 1/1994, 165–180.
- [14] Salje E.: *Ferroelastic Materials. Annual Review of Materials Research* 42, 7/2012, 265–283.
- [15] Shi Z., Wang C., Liu X., Nan C.: A four-state memory cell based on magnetoelectric composite. *Chinese Science Bulletin* 53, 14/2008, 2135–2138.
- [16] Singh R. S., et al.: Dielectric and magnetoelectric properties of $\text{Bi}_5\text{FeTi}_3\text{O}_{15}$. *Solid State Communications* 91, 7/1994, 567–569.
- [17] Stoch A., et al.: Właściwości magnetyczno-dielektryczne roztworu stałego $0,5\text{Bi}_{0,95}\text{Dy}_{0,05}\text{FeO}_3\text{-}0,5\text{Pb}(\text{Fe}_{2/3}\text{W}_{1/3})\text{O}_3$. *Materiały Ceramiczne* 64, 4/2012, 443–446.
- [18] Zvezdin A. K., Logginov A. S., Meshkov G. A., Pyatakov A. P.: Multiferroics: promising materials for microelectronics, spintronics, and sensor technique. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics* 71, 11/2007, 1561–1562.

Dr Tomasz Pikula

e-mail: t.pikula@pollub.pl

Ukończył studia na Wydziale Matematyki Fizyki i Informatyki UMCS w Lublinie na kierunku fizyka. W 2012 r. w tej samej uczelni uzyskał stopień doktora nauk fizycznych. Wykładowca akademicki i współautor kilkunastu publikacji w renomowanych czasopismach naukowych o zasięgu międzynarodowym. Pracuje na stanowisku adiunkta w Instytucie Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Lubelskiej.

**К.ф.н. Томаш Пікула**

e-mail: t.pikula@pollub.pl

Закінчив факультет математики, фізики та інформатики в університеті МКС в Любліні за напрямком фізика. У 2012 році в цьому ж університеті отримав ступінь кандидата фізичних наук. Викладач університету і співавтор низки публікацій в авторитетних наукових журналах міжнародного масштабу. Викладає в Інституті електроніки та інформаційних Люблінської Політехніки.

Mgr inż. Karol Kowal

e-mail: k.kowal@ncbj.gov.pl

Absolwent Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej krakowskiej AGH, gdzie w roku 2008 ukończył studia magisterskie o specjalności Fizyka Jądrowa. W latach 2008-2009 odbył studia podyplomowe z Informatyki w Politechnice Rzeszowskiej. Od roku 2010 doktorant Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Od marca 2011 roku zajmuje stanowisko starszego specjalisty w Zakładzie Energetyki Jądrowej Narodowego Centrum Badań Jądrowych w Świerku.

**Магістр інж. Кароль Коваль**

e-mail: k.kowal@ncbj.gov.pl

Закінчив факультет фізики та прикладної інформатики AGH в Кракові, де в 2008 році закінчив магістратуру в галузі ядерної фізики. У 2008-2009 відбув післядипломне навчання з Інформатики в Жешувському університеті. З 2010 року аспірант факультету електротехніки та інформатики в Люблінській Політехніці. З березня 2011 року працює старшим спеціалістом у Департаменті атомної енергетики Національного науково-дослідного центру ядерних досліджень в Сверку. Стажувався в General Electric в США.

Dr inż. Piotr Guzdek

e-mail: pguzdek@ite.waw.pl

Stopień doktora nauk technicznych w specjalności fizyka uzyskał na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH w Krakowie w 2008 roku. Od roku 2008 pracownik Instytutu Technologii Elektronowej o. Kraków. Od 2013 roku mianowany na stanowisko Kierownika Zakładu Mikroelektroniki. Współautor 50 publikacji w prestiżowych czasopismach naukowych, kilkudziesięciu wystąpienia na konferencjach międzynarodowych oraz 3 zgłoszeń patentowych

**К.т.н. інж. Петро Гуздек**

e-mail: pguzdek@ite.waw.pl

Кандидаты наук зі спеціалізацією в галузі фізики, отримав на факультеті фізики та прикладної інформатики AGH в Кракові в 2008 році. З 2008 року працював в Інституті електронних технологій в Кракові. З 2013 року був призначений на посаду начальника відділу мікроелектроніки. Співавтор 50 публікацій у престижних наукових журналах, десятки разів виступав на міжнародних конференціях і має 3 заявки для патенту.

otrzymano/отримано/received: 11.03.2015

przyjęto do druku/принято до друку/accepted: 27.08.2015