

**WIELOFUNKCYJNE  
MATERIAŁY CERAMICZNE  
NA OSNOWIE  
TYTANIANU BIZMUTU**

Agata Lisińska-Czekaj

**WIELOFUNKCYJNE  
MATERIAŁY CERAMICZNE  
NA OSNOWIE  
TYTANIANU BIZMUTU**



Uniwersytet Śląski



Wydawnictwo Gnome

Katowice 2012

Recenzent  
Dr hab. CZESŁAW KUŚ, prof. UP

Publikacja sfinansowana ze środków  
UNIwersytetu Śląskiego

Set in Times and Trebuchet MS

ISBN 978-83-63268-08-4

GNOME – Wydawnictwa Naukowe i Artystyczne  
Katowice, ul. Drzymały 18/6, wydawnictwognome@gmail.com

Przedmowa.....	7
Wykaz ważniejszych oznaczeń.....	11
1. WSTĘP .....	13
2. ANALIZA STANU WIEDZY W ZAKRESIE TEMATU PRACY .....	15
2.1. Materiały funkcjonalne .....	15
2.1.1. Etapy rozwoju ewolucyjnego materiałów wielofunkcyjnych .....	15
2.1.2. Ferroelektryki o strukturze typu Aurivilliusa .....	17
2.2. Metody wytwarzania ceramiki funkcjonalnej.....	21
2.2.1. Wybrane sposoby przygotowania proszków ceramicznych.....	21
2.2.2. Formowanie.....	24
2.2.3. Sposoby spiekania ceramiki .....	25
2.3. Charakterystyka granicznych materiałów układu $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12} - \text{BiFeO}_3$ .....	28
2.3.1. Charakterystyka podstawowych właściwości $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ .....	28
2.3.2. Charakterystyka wybranych właściwości $\text{BiFeO}_3$ .....	39
3. TEZA I CEL PRACY .....	48
4. ZASTOSOWANA TECHNOLOGIA I METODYKA BADAŃ.....	49
4.1. Metoda syntezy z mieszaniny proszków .....	49
4.2. Analiza termiczna proszków.....	49
4.3. Badanie mikrostruktury i składu chemicznego ceramiki BFTO .....	51
4.4. Badanie struktury krystalicznej ceramiki.....	53
4.5. Badanie właściwości ceramiki BFTO metodą spektroskopii Ramana.....	54
4.6. Charakterystyka właściwości dielektrycznych ceramiki BFTO.....	57
4.6.1. Konstrukcja kondensatora pomiarowego .....	57
4.6.2. Równania elektrostatyki i podstawowe pojęcia.....	58
4.6.3. Układ z kondensatorem wypełnionym dielektrykiem stratnym .....	59
4.6.4. Pomiar przenikalności elektrycznej i tangensa kąta strat dielektrycznych.....	60
4.7. Zastosowanie spektroskopii impedancyjnej.....	62
4.7.1. Zasady pomiaru metodą spektroskopii impedancyjnej .....	62
4.7.2. Metodyka analizy widm impedancyjnych.....	63
4.7.3. Sposoby przedstawienia widm impedancyjnych.....	69
4.8. Badanie właściwości magnetycznych .....	73
4.8.1. Spektroskopia efektu Mössbauera .....	73
4.8.2. Pomiar namagnesowania i pętli histerezy magnetycznej związków BFTO .....	73

<b>5. PROJEKTOWANIE I WŁAŚCIWOŚCI CERAMIKI BFTO .....</b>	<b>74</b>
<b>5.1. Wytwarzanie ceramiki BFTO.....</b>	<b>74</b>
5.1.1. Etapy procesu technologicznego .....	74
5.1.2. Analiza termiczna proszków .....	75
<b>5.2. Analiza mikrostruktury powierzchni i składu chemicznego ceramiki BFTO .....</b>	<b>79</b>
<b>5.3. Analiza rentgenowska ceramiki <math>\text{Bi}_{m+1}\text{Fe}_{m-3}\text{Ti}_3\text{O}_{3m+3}</math>.....</b>	<b>85</b>
5.3.1. Rentgenowska analiza fazowa proszków ceramiki BFTO .....	86
5.3.2. Rentgenowska analiza strukturalna ceramiki BFTO .....	87
<b>5.4. Wyniki badań spektroskopii Ramana ceramiki BFTO.....</b>	<b>92</b>
<b>5.5. Analiza właściwości dielektrycznych ceramiki BFTO.....</b>	<b>96</b>
5.5.1. Przenikalność elektryczna i straty dielektryczne ceramiki BFTO.....	96
5.5.2. Wpływ zawartości $\text{BiFeO}_3$ na właściwości dielektryczne ceramiki BFTO .....	100
5.5.3. Spektroskopia impedancyjna w badaniach ceramiki BFTO.....	102
<b>5.6. Wyniki pomiarów właściwości magnetycznych .....</b>	<b>117</b>
5.6.1. Oddziaływania nadsubtelne w ceramice BFTO .....	117
5.6.2. Właściwości magnetyczne ceramiki BFTO .....	119
<b>5.7. Zastosowanie ceramiki BFTO do budowy przetworników energii.....</b>	<b>124</b>
<b>6. WNIOSKI .....</b>	<b>127</b>
<b>7. LITERATURA .....</b>	<b>129</b>
<b>STRESZCZENIE .....</b>	<b>141</b>
<b>SUMMARY.....</b>	<b>142</b>
<b>PE3IOME.....</b>	<b>143</b>

## Przedmowa

Ogromne potrzeby rynku elektroenergetycznego i elektronicznego, a zwłaszcza radiokomunikacji stymulują rozwój inżynierii materiałowej w zakresie wysokowydajnych, wielofunkcyjnych materiałów dla elektroniki. Przed materiałoznawstwem stawiane są coraz większe wymagania, dotyczące możliwości projektowania i wytwarzania materiałów o pożądanych właściwościach.

Niniejsza książka ma charakter monografii habilitacyjnej. Zawarto w niej materiał, będący wynikiem prac badawczych prowadzonych przez Autorkę w Katedrze Materiałoznawstwa, Wydział Informatyki i Nauki o Materiałach Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach i poświęconych technologii wytwarzania materiałów ceramicznych oraz charakterystyce ich właściwości. W monografii przedstawiono wyniki badań związane głównie z syntezą i wytwarzaniem materiałów ceramicznych na podstawie tytanianu bizmutu ( $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ), charakterystyki ich struktury, wybranych właściwości elektrycznych i magnetycznych oraz możliwości ich praktycznego zastosowania.

W rozdziale pierwszym przedstawiono motywacje oraz uzasadniono celowość i aktualność podjętej tematyki. W rozdziale drugim omówiono aktualny stan wiedzy, zwracając szczególną uwagę na wielofunkcyjność ceramiki o warstwowej strukturze perowskitopodobnej. W rozdziale trzecim sformułowano główną tezę pracy habilitacyjnej, a także określono ogólny i szczegółowe cele pracy, które sprowadzają się do zbadania wzajemnych relacji między warunkami technologicznymi, składem chemicznym, strukturą krystaliczną, mikrostrukturą właściwościami dielektrycznymi i magnetycznymi oraz możliwościami zastosowań ceramiki na osnowie tytanianu bizmutu w charakterze przetworników energii. Rozdział czwarty poświęcono dokładnemu omówieniu zastosowanego w toku pracy procesu technologicznego wytwarzania ceramiki o składzie chemicznym opisywanym ogólnym wzorem  $\text{Bi}_{m+1}\text{Fe}_{m-3}\text{Ti}_3\text{O}_{3m+3}$  (BFTO) dla  $m = 4, 5, 6, 7$  i 8 oraz opisowi metod charakterystyki jej struktury, właściwości elektrycznych i magnetycznych. Natomiast w rozdziale piątym zaprezentowano kompleksową charakterystykę materiałową wytworzonej ceramiki BFTO o strukturze Aurivilliusa. Wnioski wynikające z przeprowadzonej pracy zamieszczono w rozdziale szóstym.

## Podziękowania

W trakcie prowadzenia pracy naukowej spotkałam na swej drodze szereg osób, które swoim doświadczeniem i wiedzą wspomagały, motywowały i zachęcały mnie do podejmowania coraz to nowych wyzwań naukowych. Niejednokrotnie umożliwiały mi dostęp do unikalnej aparatury badawczej czy też okazywały pomoc techniczną. Dlatego też, wymieniając nazwiska tych osób chciałabym im serdecznie podziękować za okazane wsparcie, pomoc i życzliwość. Niech mi będzie wolno wymienić dr hab. Czesława Kusia, prof. AP z Akademii Pedagogicznej w Krakowie, dr hab. Elżbietę Jartych, prof. PL z Politechniki Lubelskiej w Lublinie, dr hab. inż. Juliana Płewę z Fachhochschule Munster, Munster, Niemcy, prof. Marię de Jesus de Matos Gomes z Uniwersytetu Minho, Braga, Portugalia oraz dr Elenę Buixaderas z Instytutu Fizyki, ASCR, Praga, Czechy. Serdeczne podziękowania kieruję także w stronę moich Kolegów z Zakładu Elektroceramiki Funkcjonalnej.

Za nieustające wsparcie, wyrozumiałość oraz efektywną motywację do pracy naukowej chciałabym podziękować również mojemu mężowi, Dionizemu.

Niezwykle istotnym w pracy naukowej jest finansowe wsparcie, które uzyskałam realizując projekty badawcze finansowane przez J.M.Rektora UŚ w ramach badań własnych (projekt nr BW/KM/320/2009 pt. *Synteza proszków ceramicznych multiferroików układu  $Bi_4Ti_3O_{12} - BiFeO_3$*  oraz projekt nr BW/KM/320/2008 pt. *Multiferroiczne tworzywa ceramiczne na bazie żelazianu (III) bizmutu (III)*), a także projektu własnego, którego byłam kierownikiem, pt. *Czujniki magnetostrykcyjno-piezoelektryczne na bazie elektroceramiki multiferroicznej*, finansowanego przez MNiSW ze środków na naukę w latach 2008–2011 jako grant nr N N507 446934.

# 1. WSTĘP

W wielu czołowych ośrodkach naukowych świata, w ciągu ostatnich lat prowadzone są badania skierowane na opracowanie technologii wytwarzania materiałów ferroelektrycznych nowej generacji. Uzyskanie w jednym materiale różnorodnych właściwości fizycznych, znacznie zwiększających funkcjonalność materiału jest, obok technologii materiałów z gradientem właściwości funkcjonalnych, bardzo perspektywicznym sposobem wytwarzania nowoczesnych, wysoko wydajnych materiałów.

Dlatego też materiały multiferroiczne – materiały, które odznaczają się jednocześnie właściwościami ferromagnetycznymi i ferroelektrycznymi, a często również właściwościami ferrosprężystymi lub ferrotoroidalnymi – wzbudzają szerokie zainteresowanie ze względu na fizyczną istotę zjawiska oraz obiecujące zastosowania praktyczne w zakresie obróbki oraz przechowywania informacji. Szczególnie interesujące perspektywy zastosowania materiałów multiferroicznych polegają na wykorzystaniu tych materiałów do budowy przyrządów magnetoelektrycznych (*spintronic*), dla których konieczne jest występowanie sprzężenia polaryzacji i magnetyzacji [1, 2].

Z punktu widzenia fizyki, multiferroiki są niezwykle interesującą klasą zarówno materiałów, jak i problemów naukowych. Pierwsze ze wspomnianych problemów dotyczą tzw. ograniczeń mikroskopowych, które określają możliwość wytworzenia w jednym materiale jednocześnie właściwości magnetycznych i ferroelektrycznych. Zagadnienie to staje się nietrywialne, gdy zdamy sobie sprawę z faktu, że w zwykłych układach te dwa zjawiska nawzajem się wykluczają [3].

Typowy dla ferroelektryków perowskitowych ( $\text{BaTiO}_3$ ,  $\text{KNbO}_3$ ) mechanizm powstawania polaryzacji, polegający na przesunięciu jonu tytanu z położenia równowagi w kierunku rogu komórki elementarnej, jest niezgodny z warunkami powstawania spontanicznego momentu magnetycznego [4, 5]. Jednakże, pomimo złej zgodności magnetyzmu i ferroelektryczności w obecnej chwili znamy wiele układów, w których te zjawiska współistnieją.

Przykładem takich materiałów są związki układów tytanian baru – żelazian bizmutu ( $\text{BaTiO}_3 - \text{BiFeO}_3$ ) czy też tytanian bizmutu – żelazian bizmutu ( $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12} - \text{BiFeO}_3$ ), które łączą w sobie właściwości ferroelektryczne, półprzewodnikowe i ferromagnetyczne. Stanowi to o ich niezwyklej przydatności do wytwarzania zaawansowanych materiałów elektroceramicznych.

Należy zauważyć, że ilość publikacji naukowych poświęconych fazom Aurivilliusa układu  $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12} - \text{BiFeO}_3$  (BFTO) ostatnio znacząco wzrosła, niemniej jednak większość z tych prac dotyczy zagadnień wytwarzania materiałów BFTO, charakterystyki struktury krystalicznej, a także wybranych, szczególnych właściwości związków BFTO. W tym kontekście należałoby wymienić prace (w tym również prace autorstwa lub współautorstwa Autorki niniejszej mo-

nografii) poświęcone ceramice  $\text{Bi}_5\text{FeTi}_3\text{O}_{15}$  [6 – ALC et al., 7 – ALC et al., 8],  $\text{Bi}_6\text{Fe}_2\text{Ti}_3\text{O}_{18}$  [9 – ALC et al., 10 – ALC et al., 11, 12],  $\text{Bi}_7\text{Fe}_3\text{Ti}_3\text{O}_{21}$  [6, 13],  $\text{Bi}_8\text{Fe}_4\text{Ti}_3\text{O}_{24}$  [6, 14] oraz ceramice  $\text{Bi}_9\text{Fe}_5\text{Ti}_3\text{O}_{27}$  [6, 15 – ALC et al. 16 – ALC et al., 17 – ALC et al., 18 – ALC et al].

Jednakże niezwykle ważnym jest prowadzenie systematycznych badań właściwości elektrycznych i magnetycznych wymienionych związków w powiązaniu z ich strukturą krystaliczną i właściwościami fizyko-chemicznymi faz Aurivilliusa układu  $\text{Bi}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_3$ . Dlatego też w niniejszej monografii habilitacyjnej Autorka przedstawiła wyniki własnych oryginalnych prac badawczych poświęconych opracowaniu technologii wytwarzania, charakterystyce struktury krystalicznej, właściwości elektrycznych i magnetycznych oraz możliwości praktycznego zastosowania materiałów ceramicznych układu  $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12} - \text{BiFeO}_3$  opisywanych ogólnym wzorem  $\text{Bi}_{m+1}\text{Fe}_{m-3}\text{Ti}_3\text{O}_{3m+3}$  (BFTO) dla  $m = 4, 5, 6, 7$  i  $8$ . Wybrane składy chemiczne BFTO syntezowano metodą reakcji w fazie stałej, natomiast ceramikę odznaczającą się stosunkiem molowym tytanianu bizmutu do żelazianu bizmutu 1:1, 1:2, 1:3, 1:4, 1:5 wytworzono metodą spiekania bezciśnieniowego (swobodnego).

Niniejsza książka ma charakter monografii habilitacyjnej. Zawarto w niej materiał, będący wynikiem prac badawczych prowadzonych przez Autorkę w Katedrze Materialoznawstwa, Wydział Informatyki i Nauki o Materiałach Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach i poświęconych technologii wytwarzania materiałów ceramicznych i charakterystyce ich właściwości. W monografii przedstawiono wyniki badań związane głównie z syntezą i wytwarzaniem materiałów ceramicznych na osnowie tytanianu bizmutu ( $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ), charakterystyki ich struktury, wybranych właściwości elektrycznych i magnetycznych oraz możliwości ich praktycznego zastosowania.

W rozdziale pierwszym przedstawiono motywacje oraz uzasadniono celowość i aktualność podjętej tematyki badawczej. Zwrócono uwagę na obiecujące podejście w technologii nowoczesnych, wysoko-wydajnych materiałów o bogatej funkcjonalności polegające na wytworzeniu w jednym materiale różnorodnych właściwości fizycznych. W rozdziale drugim omówiono aktualny stan wiedzy w zakresie tematyki zaprezentowanej w monografii. Zwrócono szczególną uwagę na wielofunkcyjność ceramiki o warstwowej strukturze perowskitopodobnej (strukturze typu Aurivilliusa), współczesne sposoby wytwarzania proszków ceramicznych, formowania wyrobów i spiekania ceramiki. Scharakteryzowano strukturę krystaliczną, mikrostrukturę oraz podstawowe właściwości dielektryczne granicznych materiałów badanego układu tytanian bizmutu ( $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ) – żelazian bizmutu(III) ( $\text{BiFeO}_3$ ), zwracając uwagę na osobliwości technologii prowadzącej do wytworzenia ceramiki o pożądanych właściwościach. W rozdziale trzecim sformułowano główną tezę pracy habilitacyjnej, a także określono ogólne i szczegółowe cele pracy, które sprowadzają się do zbadania wzajemnych relacji między warunkami technologicznymi, składem chemicznym, strukturą krystaliczną, mikrostrukturą właściwościami dielektrycznymi i magnetycznymi oraz możliwościami zastosowań ceramiki na osnowie tytanianu bizmutu w charakterze przetworników energii. Rozdział czwarty poświęcono dokładnemu omówieniu zastosowanego w toku pracy procesu technologicznego wytwarzania ceramiki o składzie chemicznym opisywanym ogólnym wzorem  $\text{Bi}_{m+1}\text{Fe}_{m-3}\text{Ti}_3\text{O}_{3m+3}$  (BFTO) dla  $m = 4, 5, 6, 7$  i  $8$ . Omówiono zastosowaną w pracy metodę syntezy oraz metody charakterystyki właściwości proszków ceramicznych obejmujące jednoczesną analizę termiczną i termogravimetryczną, dyfrakcyjną analizę rentgenowską, skaningową mikroskopię elektronową wraz z analizą składu chemicznego. Wytworzoną ceramikę BFTO poddano ponadto charakterystyce metodami spektroskopowymi, obejmującymi spektroskopię Ramana, spektroskopię impedancyjną oraz spektroskopię efektu Mössbauera. Właściwości dielektryczne w domenie temperatury i częstotliwości określono również metodami mostkowymi, natomiast właściwości magnetyczne – poprzez pomiary namagnesowania i pętli histerezy magnetycznej w szerokim zakresie temperatury.

Wyniki kompleksowej charakterystyki materiałowej wytworzonej ceramiki BFTO o strukturze Aurivilliusa zaprezentowano w rozdziale piątym. Określono wpływ technologii i składu chemicznego na strukturę i właściwości optyczne ceramiki BFTO, wpływ zawartości  $\text{BiFeO}_3$  na właściwości dielektryczne ceramiki w domenie temperatury oraz na charakterystyki impedancyjne w domenie częstotliwości. Zaproponowano adekwatne równoważne modele elektryczne odpowiedzi impedancyjnej ceramiki BFTO w zakresie częstotliwości pomiarowej  $\nu = 10\text{Hz} - 1\text{MHz}$ . Scharakteryzowano oddziaływania nadsubtelne występujące w ceramice BFTO oraz zaobserwowano, po raz pierwszy w ceramice BFTO, zachowanie typowe dla antyferromagnetycznego szkła spinowego. Wnioski wynikające z przeprowadzonej pracy zamieszczono w rozdziale szóstym. Stwierdzono, że wytworzona ceramika BFTO odznacza się właściwościami sprzyjającymi do zastosowania w przetwornikach energii.



The present book is a habilitation monograph. It contains results of a scientific work carried out by an Author at the Department of Materials Science, Faculty of Computer and Materials Science, University of Silesia in Katowice and devoted to the technology of ceramic materials and characterization of their properties. The monograph includes results of studies on synthesis and fabrication of ceramic materials based on bismuth titanate ( $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ), characterization of their crystal structure, particular electric and magnetic properties as well as possibilities of their practical application.

The first chapter shows motivations as well as proves the need and topicality of the research work undertaken. It has been noticed that one of the best approaches to obtain high performance multi-functional materials is to combine, in one material, different physical properties. Chapter two of the present monograph, on the base of the scientific publications, reflects the current state of technology. In particular, the multifunctionality of the bismuth layer perovskite-type ceramics (Aurivillius phases) is discussed as well as contemporary methods of ceramic powders fabrication, formation and sintering of ceramics are described. The crystal structure, microstructure and basic dielectric properties of the end materials of the system under study i.e. bismuth titanate ( $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ) – bismuth ferrite ( $\text{BiFeO}_3$ ) have been characterized and particular attention was paid to processing technology leading to fabrication of ceramics exhibiting desirable properties. In the third chapter the scientific statements were formulated as well as the general and particular aims were determined. They have been focused on the study of mutual relations between processing conditions, chemical composition, crystalline structure and microstructure as well as dielectric and magnetic properties and possibilities of practical application of bismuth titanate based ceramics for energy conversion transducers fabrication. The fourth chapter has been devoted to the detailed description of the processing method used in the present study for fabrication of  $\text{Bi}_{m+1}\text{Fe}_{m-3}\text{Ti}_3\text{O}_{3m+3}$  (BFTO) for  $m = 4, 5, 6, 7$  and  $8$  ceramics. The mixed oxide method used for synthesis of the ceramic compounds has been described as well as the methods utilized for powders and ceramics characterization including simultaneous thermal analysis, X-ray diffraction, scanning electron microscopy with chemical microanalysis. Fabricated BFTO ceramics were subjected to spectroscopic characterization methods including Raman spectroscopy, impedance spectroscopy and Mössbauer spectroscopy. Dielectric properties in the temperature and frequency domain were determined also with a bridge technique whereas magnetic properties – by vibrating sample magnetometry within the wide temperature range.

Results of the complex material characterization of fabricated BFTO ceramics exhibiting Aurivillius-type structure are given in the chapter five. The influence of processing parameters and chemical composition on crystal structure and optical properties of BFTO ceramics were determined, the influence of  $\text{BiFeO}_3$  content on dielectric properties in the temperature domain as well on impedance characteristics in the frequency domain were established. The equivalent electric circuits modeling the actual dielectric response of BFTO ceramics in the frequency range  $\nu = 10\text{Hz} - 1\text{MHz}$  were proposed. The hyperfine interactions present in BFTO ceramics were characterized as well as antiferromagnetic spin glass – like behavior was observed for the first time in BFTO compounds. Conclusions coming out from the performed studies are given in chapter six. It has been stated that BFTO ceramics, fabricated during the present studies, exhibited properties favorable for fabrication of energy transducers.

Настоящая работа является диссертацией на соискание ученой степени доктора технических наук. Она содержит результаты научных исследований, которые Автор проводила на Кафедре материаловедения Факультета информатики и материаловедения Силезского университета в г. Катовице. Исследования эти направленные на разработку технологии изготовления керамических материалов и характеристику их свойств. В диссертацию включены результаты исследований по синтезу и изготовлению керамики на основе титаната висмута ( $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ), характеристике её структуры, избранных электрических и магнитных свойств и возможности практического применения.

В первой главе представлена мотивировка, обусловлена целесообразность и актуальность темы диссертации, обращено внимание на многообещающий подход в технологии современных высокопроизводительных материалов с богатой функциональностью состоящий в создании в одном материале различных физических свойств. Во второй главе представлен литературный обзор относящийся к теме диссертации. Особое внимание уделено многофункциональной керамике отличающейся слоистой перовскитоподобной структурой (структурой типа Ауривиллиуса), современным методам изготовления керамических порошков, формирования изделий и спекания керамики. Представлено характеристику кристаллической структуры, микроструктуры и основных диэлектрических свойств граничных материалов исследованной системы т.е. титаната висмута ( $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ) – феррита висмута ( $\text{BiFeO}_3$ ), обращая внимание на особенности технологии позволяющей создать керамику с требуемых свойствах. В третьей главе представлены главные научные положения диссертации и определены цели и задачи сводящиеся к исследованию взаимных отношений между технологическими условиями, химическим составом, кристаллической структурой, диэлектрическими и магнитными свойствами, а также возможностью практического применения керамики на основе титаната висмута в качестве преобразователей энергии. Четвёртая глава содержит подробное описание применённого процесса изготовления керамики описываемой общей формулой  $\text{Bi}_{m+1}\text{Fe}_{m-3}\text{Ti}_3\text{O}_{3m+3}$  (BFTO) для  $m = 4, 5, 6, 7$  и  $8$ . Рассмотрен метод синтеза, а также методы характеристики свойств керамических порошков включающие одновременный термический и термогравиметрический анализ, рентгеновский структурный анализ, растровую электронную микроскопию с микроанализом химического состава. Произведённую керамику BFTO охарактеризовано спектральными методами включающие спектроскопию комбинационного рассеяния, спектроскопию импеданса, а также мессбауэровскую спектроскопию. Диэлектрические свойства в области как температуры так и частоты определено с использованием мостовых методов тогда как магнитные свойства – путём измерения намагничивания и петель магнитного гистерезиса в широком пределе температуры.

Результаты комплексной материаловедческой характеристики произведённой керамики BFTO со структурой типа Ауривиллиуса представлены в пятой главе. Определено влияние технологии и химического состава на структуру и оптические свойства керамики BFTO, влияние содержания  $\text{BiFeO}_3$  на диэлектрические свойства керамики в области температуры на импедансные свойства в области частоты. Предложены соответствующие эквивалентные электрические модели импедансного отклика керамики BFTO в области измерительной частоты  $\nu = 10\text{Hz} - 1\text{MHz}$ . Определены сверхтонкие взаимодействия в керамике BFTO, а также обнаружено, впервые в керамике BFTO, поведение типично для антиферромагнитного спинового стекла. Выводы по проделанной работе представлены в шестой главе. Указано, что созданная керамика BFTO отличается свойствами пригодными для её использования в качестве преобразователей энергии.