

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Ivair A. dos Santos pela orientação ao longo de todo o trabalho e pela transmissão de seus conhecimentos.

Ao Prof. Dr. José R. D. Pereira pela orientação referente às caracterizações do sensor magnetoelétrico.

Ao Dr. Valdirlei F. Freitas e ao Msc. Gustavo S. Dias pela colaboração no processo de automação da técnica de caracterização magnetoelétrica.

Ao Daniel Matos pela construção dos equipamentos para medidas de magnetização e susceptibilidade magnética.

Ao Prof. Dr. Luiz F. Cótica e aos Msc. Igor B. Castelani e Guilherme M. Santos pela colaboração nas análises estruturais.

Ao Msc. Otávio A. Protzek pela colaboração na realização da microscopia eletrônica de varredura e pelo auxílio na produção das ligas de $Ni_xMn_yGa_z$.

Ao Prof. Dr. Antônio M. Neto pela colaboração nas análises térmicas.

Ao Prof. Dr. José A. Eiras pelo fornecimento das cerâmicas piezelétricas.

Aos funcionários do DFI/UEM: Sergio C. Silva, Jurandir A. Pereira, Márcio H. Babata e Akiko Nisida.

Aos coordenadores do Grupo de Desenvolvimento de Dispositivos Multifuncionais pelos equipamentos e espaço físico fornecidos para a realização desse trabalho.

À todos os integrantes do grupo de Desenvolvimento de Dispositivos Multifuncionais pelas discussões e trocas de conhecimentos.

À minha esposa, por tomar conta de todos os afazeres cotidianos nos últimos meses, possibilitando a minha dedicação exclusiva ao fechamento desse trabalho.

À minha família, grande incentivadora dos meus estudos.

À CAPES, pelo suporte financeiro.

“A ciência de hoje é a tecnologia de amanhã.”

Edward Teller (1908-2003)

RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de projetar e construir um sensor de campo magnético fundamentado no princípio da interação entre os ordenamentos magnético e elétrico da matéria, comumente denominado Efeito Magnetoelétrico. Para tanto, foi realizada a sinterização e determinação das propriedades físicas dos materiais que constituem esses sensores. Como material magnetostritivo foi utilizada uma liga metálica com estrutura Heusler ($\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Ga}_z$) e composição química próxima à do composto Ni_2MnGa . Como material piezelétrico foram utilizadas cerâmicas ferroelétricas de $\text{PbZr}_{0,53}\text{Ti}_{0,47}\text{O}_3 + 1 \text{ wt\% Nb}$ (PZT-5A) e cerâmicas multiferroicas de $(0,6)\text{BiFeO}_3 - (0,4)\text{PbTiO}_3 + 5 \text{ wt\% La}$ (BFPT-5L). As caracterizações realizadas revelam que a liga $\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Ga}_z$ apresenta deformação mecânica induzida por campo magnético à temperatura ambiente, enquanto a cerâmica ferroelétrica de PZT-5A possui efeito magnetoelétrico extrínseco de 1,4 V/cm.Oe. A cerâmica multiferroica de BFPT-5L, por sua vez, apresenta uma sobreposição dos efeitos magnetoelétricos extrínseco e intrínseco, que resulta em um efeito magnetoelétrico de 7,5 V/cmOe. Três compósitos laminares foram montados (dois com $\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Ga}_z$ e PZT-5A, e um com $\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Ga}_z$ e BFPT-5L), e as suas propriedades magnetoelétricas foram investigadas com o objetivo de verificar suas potencialidades na construção de sensores de campo magnético magnetoelétricos. Os compósitos laminares $\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Ga}_z/\text{PZT-5A}$ apresentam um efeito magnetoelétrico extrínseco maior que o do compósito laminar $\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Ga}_z/\text{BFPT-5L}$. Contudo, o compósito laminar $\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Ga}_z/\text{BFPT-5L}$ apresenta um comportamento diferente daqueles compósitos construídos com PZT-5A devido à sobreposição dos efeitos magnetoelétricos intrínseco e extrínseco observados na cerâmica de BFPT-5L. Por fim, o compósito laminar $\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Ga}_z/\text{PZT-5A}$ foi utilizado na construção de um sensor magnetoelétrico multifuncional. Construiu-se, então, um dispositivo capaz de determinar campos magnéticos contínuos em um intervalo de campos magnéticos que se estende desde 78 mOe até 10 kOe. Tal dispositivo apresentou um tempo de resposta de 1,5 ms, que possibilita a detecção de campos magnéticos pulsantes com frequências de até 667 Hz e com amplitudes similares às observadas no modo de detecção de campos magnéticos contínuos.

ABSTRACT

This work was developed for designing and constructing a magnetic field sensor based in the interaction between the magnetic and the electric ordering of the matter, i. e., the Magnetoelectric Effect. In this sense, the sintering and characterization of the materials that form these sensors was performed. The magnetostrictive material was a Heusler alloy ($\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Ga}_z$) with a chemical composition near to that of the Ni_2MnGa compound. The piezoelectric materials were ferroelectric $\text{PbZr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47}\text{O}_3 + 1 \text{ wt\% Nb}$ (PZT-5A) ceramics and multiferroic $(0,6)\text{BiFeO}_3-(0,4)\text{PbTiO}_3 + 5 \text{ wt\% La}$ (BFPT-5L) ceramics. The whole set of characterizations reveal a magnetic field induced strain for the $\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Ga}_z$ alloy at room temperature. PZT-5A ferroelectric ceramics present an extrinsic magnetoelectric effect of 1.4 V/cm.Oe , while BFPT-5L multiferroic ceramics shows an overlap of the intrinsic and extrinsic magnetoelectric effects, resulting in a magnetoelectric response of 7.5 V/cm.Oe . Three laminated composites were mounted (two with $\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Ga}_z$ and PZT-5A, and one with $\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Ga}_z$ and BFPT-5L), and their magnetoelectric properties were investigated in order to verify their potential for constructing magnetoelectric magnetic field sensors. The $\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Ga}_z/\text{PZT-5A}$ laminated composite shows an extrinsic magnetoelectric effect greater than that of the $\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Ga}_z/\text{BFPT-5L}$ composite. However, the $\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Ga}_z/\text{BFPT-5L}$ laminated composite presents a dissimilar behavior, in comparison with those mounted with PZT-5A, due to the overlap of the intrinsic and extrinsic magnetoelectric effects observed in the BFPT-5L ceramic. The $\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Ga}_z/\text{PZT-5A}$ laminated composite was employed for constructing a multifunctional magnetoelectric-based sensor. A device able to determine continuous magnetic fields in a range that extends from 78 mOe to 10 kOe was developed. Such device presents a time response of 1.5 ms , enabling the detection of pulsed magnetic field with frequencies up to 667 Hz , and magnetic field amplitudes similar to those obtained in the continuous magnetic field detection mode.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	0 1
2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	06
2.1. Acoplamento Magnetoelétrico.....	06
2.2. Técnicas de Caracterização Magnetoelétrica.....	14
<i>2.2.1. Método Dinâmico de Caracterização Magnetoelétrica.....</i>	<i>16</i>
2.3. Pesquisas Recentes em Magnetoelétricidade.....	18
<i>2.3.1. Acoplamento Magnetoelétrico em Compostos Ferroelétricos.....</i>	<i>19</i>
<i>2.3.2. Diferentes Materiais Magnetostritivos e Piezelétricos.....</i>	<i>20</i>
2.4. Propriedades Físicas da Liga $Ni_xMn_yGa_z$.....	21
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
3.1. Materiais.....	26
<i>3.1.1. Material Magnetostritivo.....</i>	<i>26</i>
<i>3.1.2. Materiais Piezelétricos.....</i>	<i>27</i>
<i>3.1.3. Compósitos Laminares.....</i>	<i>28</i>
3.2. Métodos.....	29
<i>3.2.1. Susceptibilidade Magnética.....</i>	<i>29</i>
<i>3.2.2. Análise Térmica Diferencial por Fluxo de Calor (DSC).....</i>	<i>30</i>
<i>3.2.3. Difratomia de Raios X.....</i>	<i>31</i>
<i>3.2.4. Magnetometria de Amostra Vibrante.....</i>	<i>32</i>
<i>3.2.5. Microscopia Eletrônica de Varredura.....</i>	<i>33</i>
<i>3.2.6. Método Dinâmico de Caracterização Magnetoelétrica.....</i>	<i>34</i>
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
4.1. Material Magnetostritivo.....	36

4.2. Caracterização Magnetoelétrica dos Materiais Piezelétricos.....	43
4.3. Compósitos Laminares.....	46
5. SENSOR DE CAMPO MAGNÉTICO.....	54
5.1. Sensor Magnetoelétrico.....	55
5.2. Circuito Eletrônico.....	56
5.2.1. <i>Módulo Oscilador.....</i>	57
5.2.2. <i>Módulo Amplificador de Corrente.....</i>	58
5.2.3. <i>Módulo de Amplificação da Resposta Magnetoelétrica.....</i>	60
5.2.4. <i>Módulo de Filtragem Passa-Faixa.....</i>	60
5.2.5. <i>Módulo Conversor Alternado/Contínuo.....</i>	62
5.2.6. <i>Módulo Conversor Analógico/Digital.....</i>	63
5.3. Metodologia de Investigação.....	66
5.3.1. <i>Resposta Magnetoelétrica.....</i>	66
5.3.2. <i>Dependência com a Temperatura.....</i>	67
5.3.3. <i>Sensibilidade.....</i>	67
5.3.4. <i>Tempo de Resposta.....</i>	68
5.3.5. <i>Leitura de Campos Magnéticos Oscilantes.....</i>	68
5.4. Resultados e Discussão.....	69
6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS.....	78
Bibliografia.....	80

LISTA DE ABREVIACOES

SCM: Sensor de Campo Magnético

A-ME: Acoplamento Magnetoelétrico - Relação entre magnetismo e ferroeletricidade existentes em materiais que apresentam ordenamento magnético e ferroelétrico simultaneamente

E-ME: Efeito Magnetoelétrico – Propriedade que certos materiais possuem em polarizar-se eletricamente mediante aplicação de campos magnéticos externos, ou vice-versa.

E-ME-I: Efeito Magnetoelétrico Intrínseco – Efeito magnetoelétrico decorrente da relação direta (interações quânticas ou estruturais) entre ordenamento magnético e elétrico da matéria.

E-ME-E: Efeito Magnetoelétrico Extrínseco – Efeito magnetoelétrico decorrente da relação indireta (mediado por deformação mecânica) entre ordenamento magnético e elétrico da matéria.

α_{ME} : Coeficiente de Voltagem Magnetoelétrica – Relação entre a voltagem elétrica decorrente da polarização elétrica com a espessura do material e o campo magnético aplicado.

Composto Monofásico: Material contendo apenas uma fase estrutural.

Compósito Granular: Material que apresenta duas (ou mais) fases estruturais dispostas em forma de grão.

Compósito Laminar: Material que apresenta duas (ou mais) fases estruturais dispostas em forma de laminas (ou pastilhas).

PZT-5A: Composto monofásico formado por $PbZr_{0,53}Ti_{0,47}O_3 + 1 \text{ wt\% Nb}$.

BFPT-5L: Composto monofásico formado por $(0,6)BiFeO_3-(0,4)PbTiO_3 + 5 \text{ wt\% La}$.

Compósito 1: Compósito laminar formado por uma pastilha retangular de $Ni_xM_yG_a$ com dimensões (6x3x10 mm) e uma pastilha retangular de PZT-5A com dimensões (6x1x12 mm).

Compósito 2: Compósito laminar formado por uma pastilha retangular de $Ni_xM_yG_a$ com dimensões (6x2x8 mm) e uma pastilha retangular de PZT-5A com dimensões (6x1x12 mm).

Compósito 3: Compósito laminar formado por uma pastilha retangular de $Ni_xM_yG_a$ com dimensões (6x3x10 mm) e uma pastilha retangular de BFPT-5L com dimensões (6x0,8x12 mm).