Czech Technical University in Prague
Faculty of Electrical Engineering
Department of Measurement

Novel Magnetic Materials for Sensor Application

Dissertation thesis

Diana Hrakova

Ph.D. program: P0714D060003 Electrical Engineering and Communications
Branch of study: Electronics a measuring techniques
Supervisor: prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
Specialist supervisor: doc. Ing. Mattia Butta, Ph.D.

Prague, May 2024

The dissertation thesis was written during full-time doctoral study at the Department of Measurement, Faculty of Electrical Engineering of the Czech Technical University in Prague.

Ph.D. candidate: Diana Hrakova
Supervisor: Pavel Ripka
Supervisor-Specialist: Mattia Butta

Department of Measurements
Faculty of Electrical Engineering
Czech Technical University in Prague
Technická 2, 166 27 Prague 6

Declaration

I hereby declare I have written this doctoral thesis independently and quoted all the sources of information used in accordance with methodological instructions on ethical principles for writing an academic thesis. Moreover, I state that this thesis has neither been submitted nor accepted for any other degree.

In Prague, May 2024

....
Diana Hrakova

Abstract

This work is dedicated to studies of non-conventional magnetic materials, comparing their performance with traditional materials in various magnetic sensor types, in fluxgate and GMI particularly. The challenge lies in tailoring magnetic materials with specific properties for sensor applications, a task as complex as the sensor hardware design itself.

The category of traditional materials includes such widely used and well-known materials like permalloy and the trend of last decades – Co-based amorphous alloys. The non-conventional materials that I studied are the following: 1) FINEMET microwires annealed under different conditions with flash-current; 2) Nickel-Iron alloys electrodeposited into silicon and alumina pores resulting in nano- and micro- wires; 3) inkjet printed core of the sensor using ink containing magnetic Mn-Zn ferrite nanoparticles.

The second goal of the study was to use these materials in various types of fluxgate sensors and a GMI sensor. The fluxgate sensor was chosen for its simplicity of working principles that allow us to characterise materials and test different theories in a short time. The performance of the GMI sensor is also sensitive to the change in the core microstructure. Our findings indicate significant enhancements in sensor performance using non-conventional materials. Specifically, a fluxgate sensor with a nanocrystalline core demonstrated reduced noise and maintained sensitivity compared to its amorphous core counterparts.

GMI sensors using non-conventional material showed interesting results such as the possibility of using this sensor as a multi-modal sensor – to measure the magnetic field and tensile stress simultaneously. Also, experiments with GMI with annealed FINEMET wire as a core showed how processing the same material in different ways can let us get sensors operating in different magnetic field ranges.

Other experiments on miniaturisation of the fluxgate sensor showed the prospective in nanowires grown in nanomembranes as a core in a fluxgate sensor and printing a magnetic core on a flexible polymer using an inkjet printer and ink containing ferrimagnetic nanoparticles. However, further research is necessary to reveal the true potential of this idea.

Overall, these promising results not only validate the potential of non-conventional materials in magnetic sensor applications but also open avenues for the development of multifunctional sensors and miniaturisation techniques.

Keywords: Magnetic materials, nanocrystalline cores, amorphous cores, fluxgate sensors, GMI sensors, nanoparticles, nanowires, microwires.

Tato práce je věnována studiu netradičních magnetických materiálů a porovnávání jejich výkonnosti s tradičními materiály v různých typech magnetických senzorů, zejména ve fluxgate a GMI senzorech. Výzvou je přizpůsobení magnetických materiálů s konkrétními vlastnostmi pro aplikace senzorů, což je úkol stejně složitý jako návrh hardwaru senzoru samotného.

Do kategorie tradičních materiálů patří široce používané a dobře známé materiály, jako je permalloy a trend posledních desetiletí – amorfní slitiny na bázi kobaltu. Netradiční materiály, které jsem studoval, zahrnují: 1) FINEMET mikrodráty žíhané za různých podmínek bleskovým proudem; 2) slitiny niklu a železa elektrolyticky usazované do pórů křemíku a hliníku, což vede k nano- a mikrodrátům; 3) inkoustový tisk jádra senzoru pomocí inkoustu obsahujícího magnetické Mn-Zn feritové nanopartikle.

Druhým cílem studie bylo použití těchto materiálů v různých typech fluxgate senzorů a senzoru GMI. Fluxgate senzor byl vybrán pro jednoduchost jeho pracovních principů, které nám umožňují charakterizovat materiály a testovat různé teorie v krátkém čase. Výkon senzoru GMI je také citlivý na změny v mikrostruktuře jádra. Naše zjištění ukazují významná zlepšení ve výkonu senzorů při použití netradičních materiálů. Konkrétně fluxgate senzor s nanokrystalickým jádrem prokázal snížení šumu a zachování citlivosti ve srovnání s jeho protějšky s amorfním jádrem.

GMI senzory s netradičním materiálem ukázaly zajímavé výsledky, jako je možnost použití tohoto senzoru jako multimodálního senzoru – pro měření magnetického pole a zároveň tahového napětí. Experimenty s GMI s žíhaným drátem FINEMET jako jádrem také ukázaly, jak zpracování stejného materiálu různými způsoby nám umožní získat senzory pracující v různých rozsazích magnetických polí.

Další experimenty na miniaturizaci fluxgate senzoru ukázaly perspektivu v nanodrátech rostoucích v nanomembránách jako jádru fluxgate senzoru a tisku magnetického jádra na flexibilní polymer pomocí inkoustové tiskárny a inkoustu obsahujícího ferimagnetické nanopartikle. Avšak další výzkum je nezbytný, aby odhalil skutečný potenciál této myšlenky.

Celkově tyto slibné výsledky nejen potvrzují potenciál netradičních materiálů v aplikacích magnetických senzorů, ale také otevírají cesty pro vývoj multifunkčních senzorů a technik miniaturizace.

Klíčová slova: Magnetické materiály, nanokrystalická jádra, amorfní jádra, fluxgate senzory, GMI senzory, nanopartikle, nanodráty, mikrodráty.

Acknowledgments

This dissertation would not have been possible without the support and collaboration of many individuals and organisations, to whom I owe my heartfelt gratitude.

First and foremost, I extend my deepest appreciation to Prof. Pavel Ripka for his invaluable supervision, guidance, and encouragement throughout this research. His expertise and insights have been crucial to the success of this work. And most importantly, I'm grateful for his patience with me.

I am grateful for the financial support provided by the Student Grant Competition (SGS) and the Grant Agency of the Czech Republic (GACR), which were instrumental in funding the research presented in this dissertation.

The opportunity to collaborate with G2Elab in Grenoble has been a remarkable experience. I would like to express my special thanks to Afef Kedous-Lebouc and Aktham Asfour for their supervision and support during my time in the lab.

My sincere thanks also go to the Academy of Sciences of the Czech Republic, particularly to Ondrej Kaman and Tomáš Kmjec from the Laboratory of Electron Microscopy. Their collaboration and expertise significantly contributed to the advancement of my research.

I am also thankful for the collaboration with the BioMEMS Lab at the Faculty of Engineering, Technische Hochschule Aschaffenburg. The exchange of ideas and knowledge has been enriching and invaluable.

Furthermore, I would like to acknowledge the Department of Microelectronics at FEL, CTU, especially Alexandr Laposa, for their collaboration and contribution to this project. Their insights and expertise were instrumental in shaping many aspects of my work.

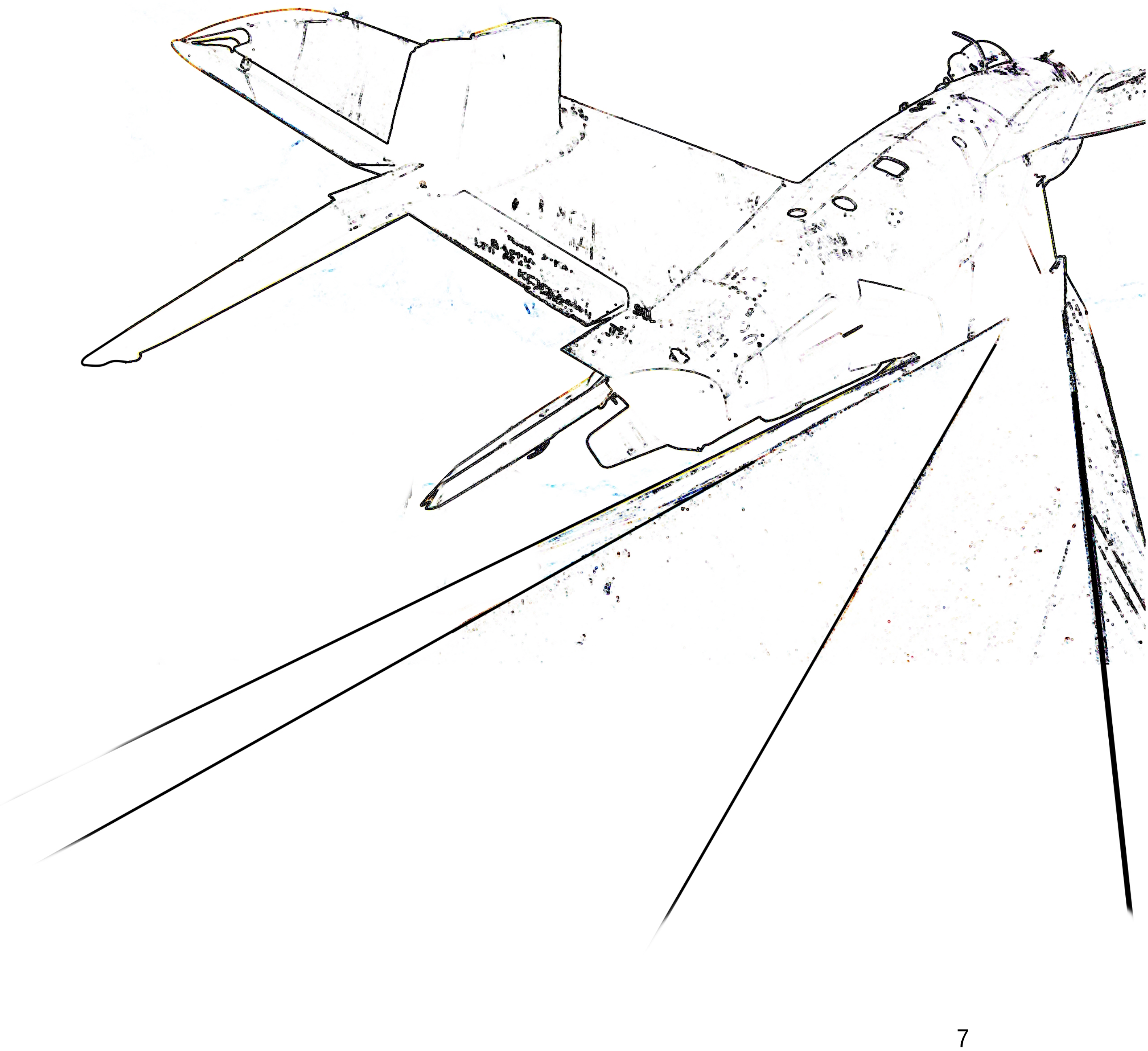
Lastly, I am grateful to my colleagues at the Measurement Department for their support, especially to Dr. Grim and Dr. Mirzaei.

I am deeply thankful to everyone who has been a part of this journey.

Dedication

I dedicate this work to my mother, my family and my country.

Вірю в одне: час іде, надія не вмирає. І. Ф.



Contents