

Feromagnetické sklom potiahnuté mikrodrôty a ich aplikácie v senzorovej technike

RNDr. Eva Komová, PhD.

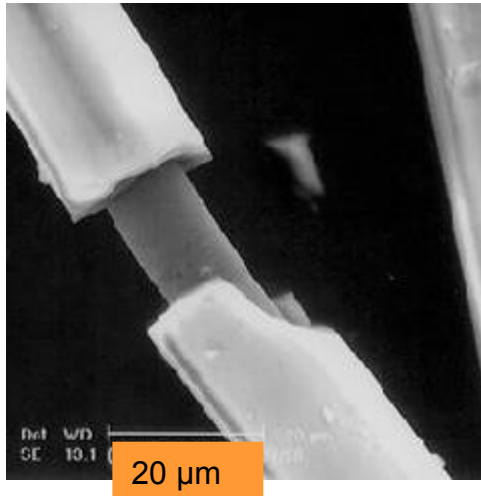
- Obs a h:**
1. Úvod
 2. Charakteristika mikrodrôtov
 3. Využitie magnetických vlastností mikrodrôtov pri konštrukcii senzorov
 4. Záver

1. Úvod

Feromagnetické sklo potiahnuté mikrodrôty – kompozitné materiály:

Kovové jadro priemeru 1-20 μm

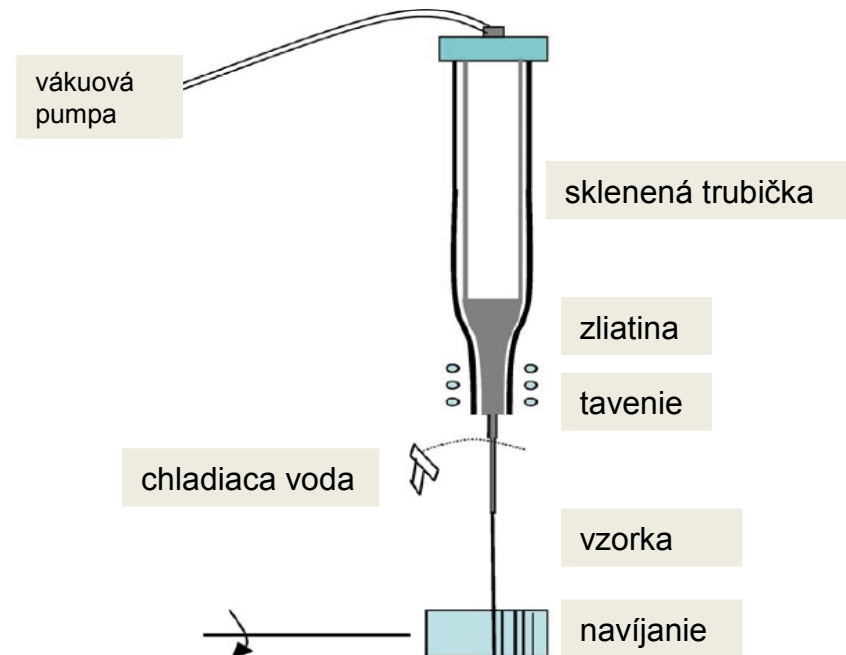
Sklenený obal hrúbky 2-20 μm



20 μm

G. Herzer et al.: JMMM **294** (2005) 252-266

Výroba: Taylorova – Ulitovského metóda
v jednom kroku z 0,25 g zliatiny 10 km drôtu



2. *Charakteristika mikrodrôto v*

Fyzikálne vlastnosti magnetických mikrodrôtov ovplyvňuje:

1. Chemické **zloženie** materiálu jadra (magneticky tvrdé resp. magneticky mäkké)
2. Distribúcia mechanických **napätí** v mikrodrôte
3. **Štruktúra** materiálu (amorfná, resp. nanokryštalická, kryštalická):
 - a) amorfné – nízka anizotropia
 - b) nanokryštalické – anizotropia vzrastie, klesá magnetostrikcia
4. **Geometria:** **a)** tvarová anizotropia:

$$\frac{\text{priemer drôtu}}{\text{dĺžka}} \approx \frac{\mu m}{mm} \implies \text{pomer demagnetizačných faktorov v rôznych význačných smeroch drôtu:}$$

axiálny smer - demagnetizačný faktor najmenší

- b)** vzájomný pomer hrúbky skleneného obalu drôtu a jadra

Magnetické vlastnosti: určené magnetoelastickou a tvarovou anizotropiou

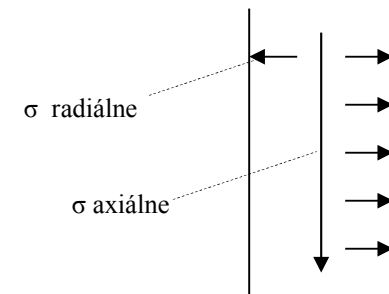
magnetoelastická anizotropia \Rightarrow z magnetoelastickej interakcie magnetických momentov s mechanickými napätiami

Distribúcia mechanických napätí v mikrodrôte:

Axiálne

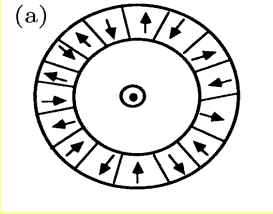
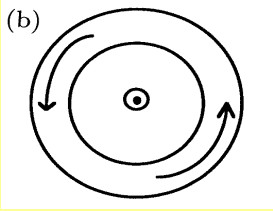
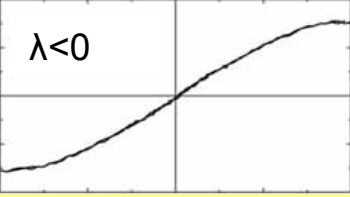
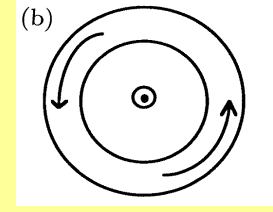
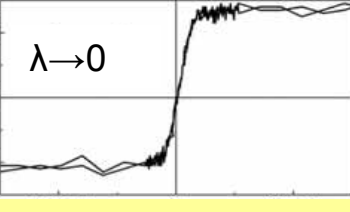
Radiálne

indukované ťahaním a prudkým chladením + dôsledok rôznych teplotných koeficientov rozťažnosti kovového jadra a skleneného obalu



R. Varga: Habilitačná práca
PF UPJŠ Košice (2009)

Vzájomné pôsobenie mechanických a magnetických stavov – **magnetostrikcia** λ_s

Magnetostrikcia λ_s (Typické zloženie)	Najvýhodnejšia orientácia magnetických momentov	Magnetická anizotropia	Doménová štruktúra	Hysterézná slučka
VELKÁ KLADNÁ ($\text{Fe}_{75}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$)	v smere prevládajúcich napätí	axiálna		
VELKÁ ZÁPORNÁ ($\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$)	kolmo na mechanické (axiálne + radiálne) napätie	cirkulárna		
MALÁ ($\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Si}_{7.5}\text{B}_{12.5}$)		extrémne nízka		

vysoká citlivosť amorfného feromagnetického materiálu jadra na externé podnety



využitie v senzorovej technike

Magnetické javy využiteľné na konštrukciu senzorov

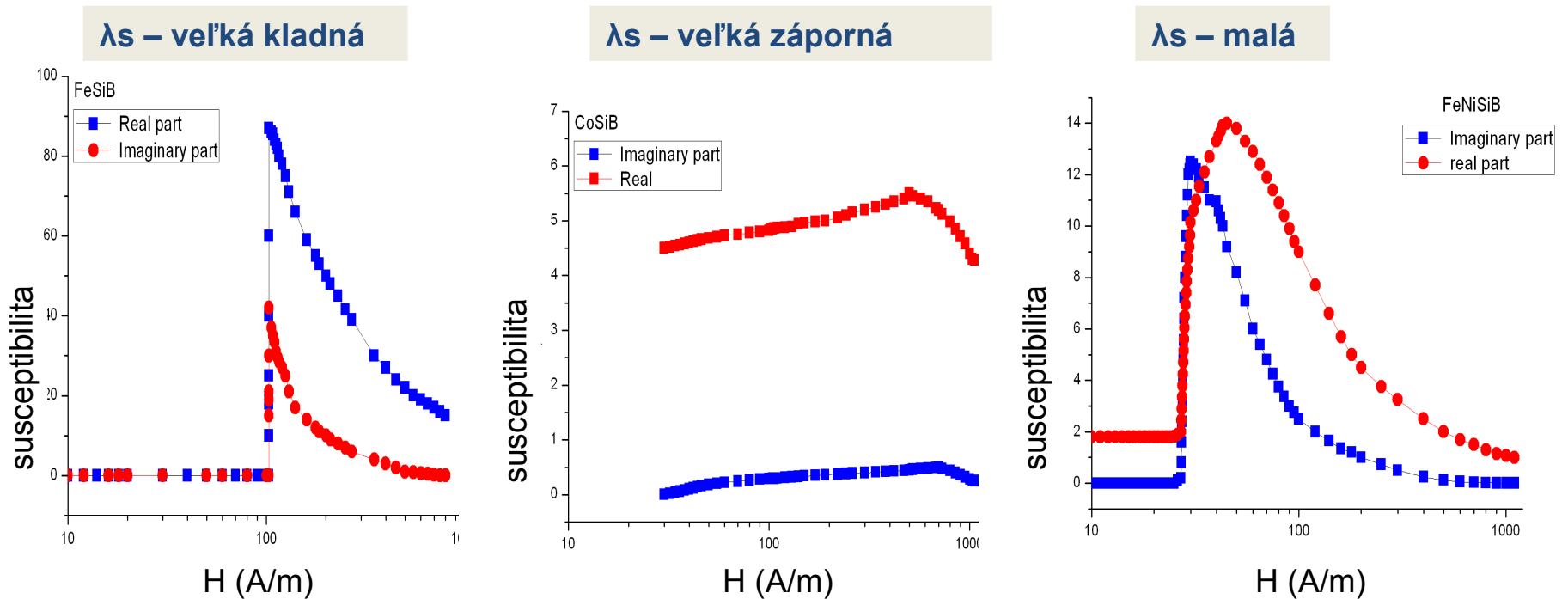
1. Zmeny magnetickej susceptibility vplyvom externého magnetického poľa, teploty a mechanického napätia
2. Závislosť kritického poľa (premagnetizačného) od externých parametrov
3. GMI efekt

3. Využitie magnetických vlastností mikrodrôto v príkonštrukcii senzorov

Senzory na báze zmien magnetickej susceptibility

$$\chi = \frac{\Delta M}{\Delta H}$$

citlivosť materiálu na externé magnetické pole H

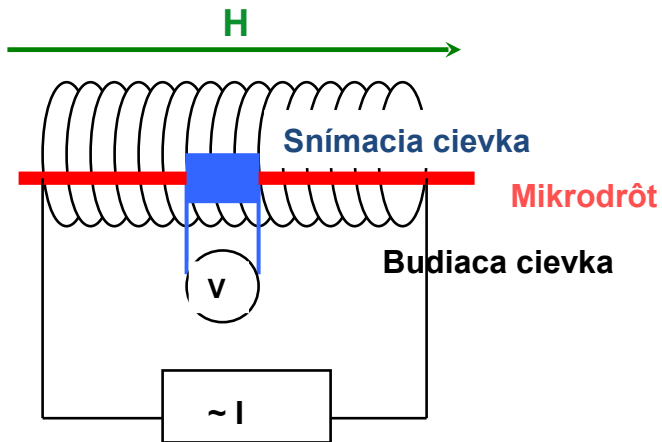


M. Ipatov, R. Varga et al.: Journal Noncrystal. Solids 353 (2007)

3. Využitie magnetických vlastností mikrodrôto v príkonštrukcii senzora

Senzory na báze zmien magnetickej susceptibility v závislosti od externého magnetického poľa

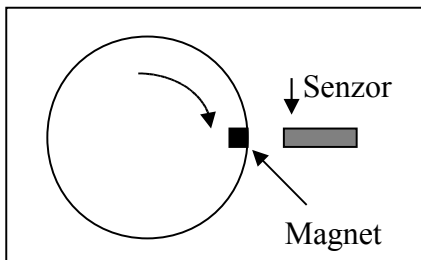
1. Schematické zobrazenie konštrukcie senzora magnetického poľa



- 1. Senzory statické:** mikrodrôt upevnený v konštrukcii senzora sníma zmenu magnetického poľa
 - detekcia externého magnetického poľa
 - prekročenie kritického magnetického poľa
 - po pripojení výstupu z voltmetra na čítač frekvencie (udalostí)-počítanie súčiastok z feromagnetického materiálu
 - meranie otáčok
 - snímanie polohy otvorených dverí (s magnetom)
 - snímanie obsadenia parkovacieho miesta

- 2. Senzory dynamické:** magnetické pole je presne definované a mení sa poloha mikrodrôtu v ňom

1. Senzor merania otáčok



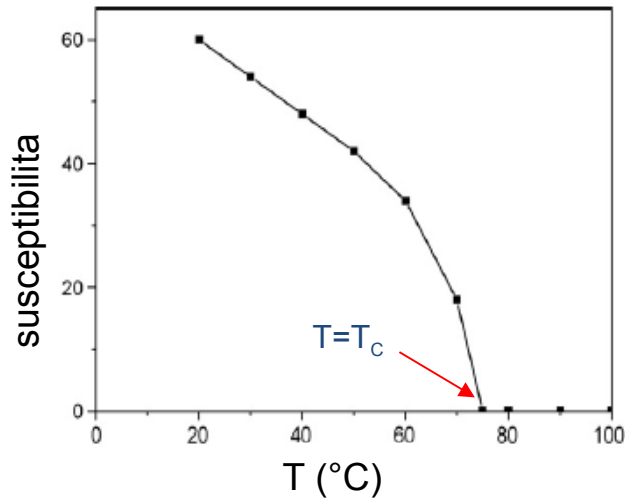
2. Dynamický lineárny senzor polohy

3. Využitie magnetických vlastností mikrodrôto v príkonštrukcií senzorov

Senzory na báze zmien magnetickej susceptibility v závislosti od teploty

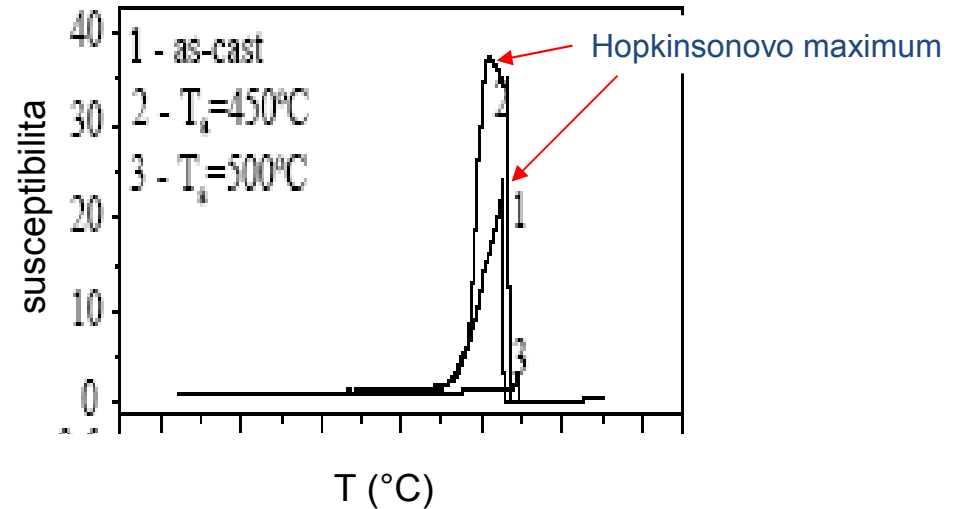
Závislosť susceptibility od teploty

λ_s – malá

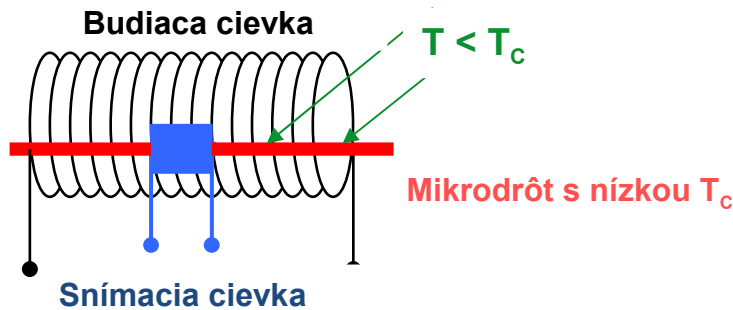


A. Zhukov et al.: PIERS Proceedings, Hangzhou, China (2008)

λ_s – veľká kladná



R. Varga et al.: JMMM (2002)

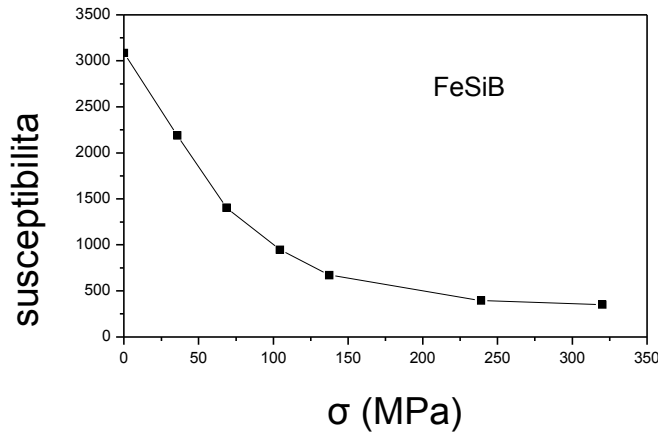


Aplikácie:
Senzory teploty
Senzory kritickej teploty

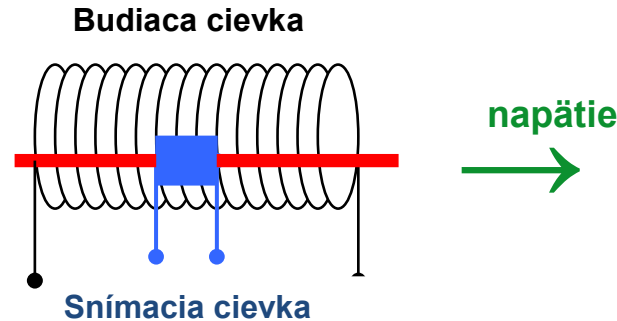
3. Využitie magnetických vlastností mikrodrôto v prikonštrukcii senzorov

Senzory na báze zmien magnetickej susceptibility

Závislosť susceptibility od napätia



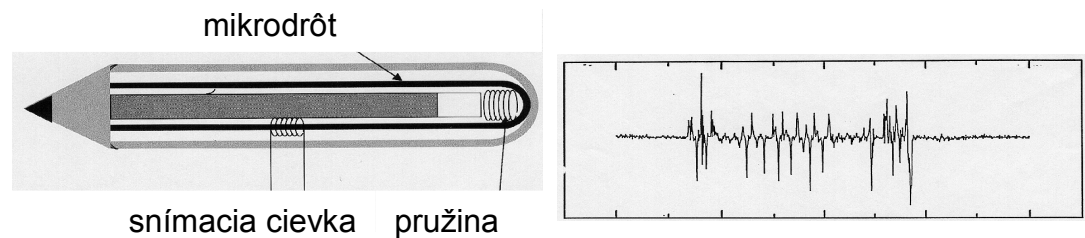
$$K_{\sigma} \approx \lambda_s \cdot \sigma \Rightarrow \chi \approx \frac{1}{\sigma}$$



Aplikácie:

- Senzory napätia
- Senzory malých hmotností
- Meranie výchylky periodického pohybu

Magnetoelastické pero

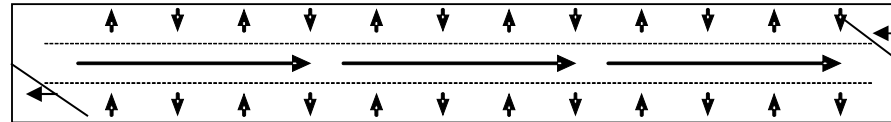


M. Vázquez: Giant Magnetoimpedance and Applications (2004)

3. Využitie magnetických vlastností mikrodrôto v príkonštrukcii senzorov

Senzory na báze zmien kritického poľa H_{sw}

λ_s – veľká kladná



doménová štruktúra mikrodrôtov s $\lambda_s > 0$

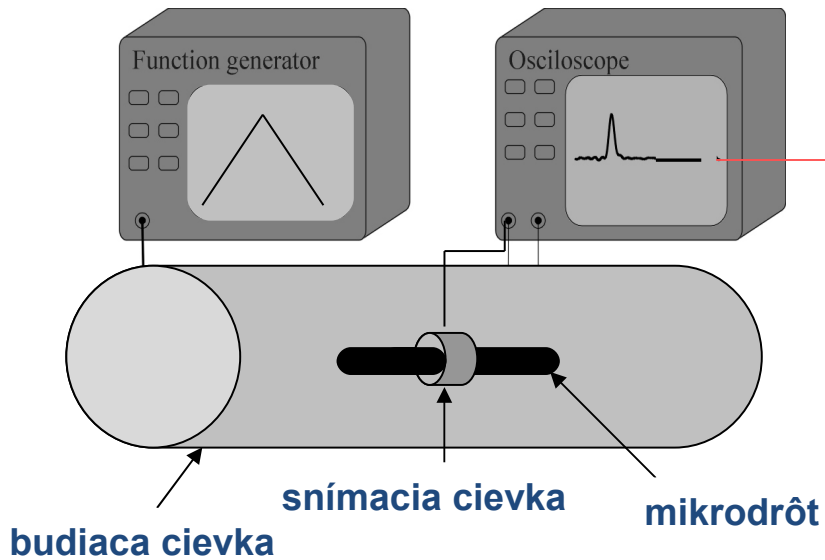
magnetizácia 2 hodnoty $+M_s$ a $-M_s$...zmena stavu po aplikácii **kritického poľa H_{sw}**

- premagnetizačný proces jedným Barkhausenovým skokom jedinej uzatváracej axiálnej domény
- navonok sa prejavuje **bistabilným magnetickým správaním**
- perfektne **pravouhlá hysterezná slučka**

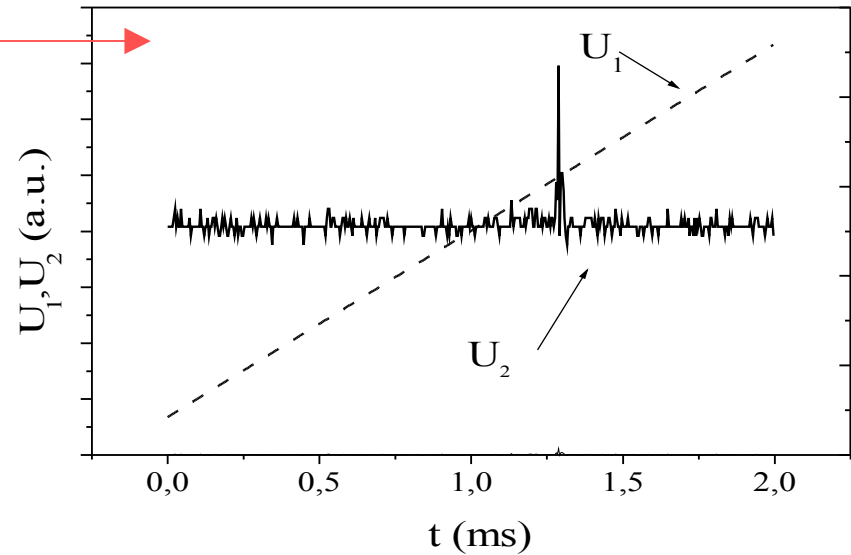
aplikovateľnosť nielen pre senzoriku, ale i v oblasti spintroniky, informačných a pamäťových technológií, ktoré vyžadujú zvýšenie rýchlosti prenosu a kapacity informácií, zvýšenie citlivosti a zníženie energetických strát a geometrických rozmerov

3. Využitie magnetických vlastností mikrodrôto v prikonštrukcii senzorov

Senzory na báze zmien kritického poľa



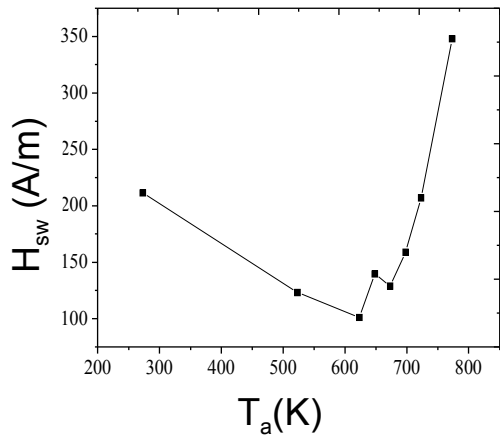
Časové priebehy napätí v budiacej a v snímačej cievke



3. Využitie magnetických vlastností mikrodrôto v príkonštrukcii senzorov

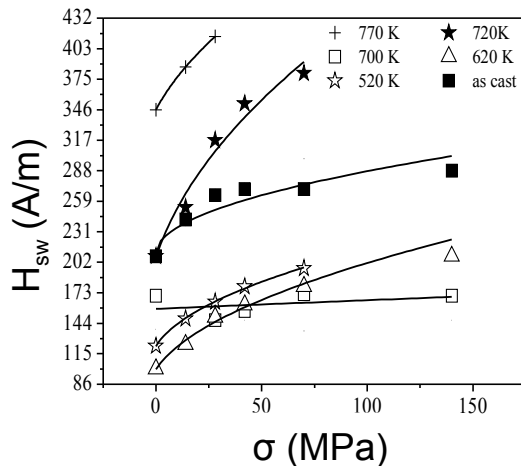
Senzory na báze zmien kritického poľa

1. Závislosť H_{sw} od teploty



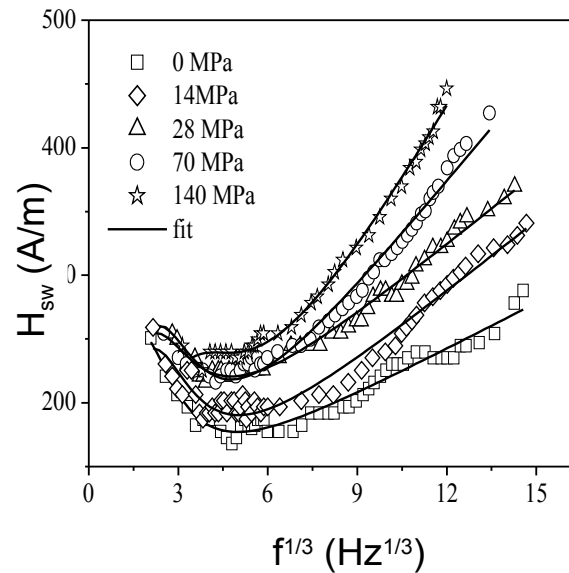
$H_{sw} = f(T_a)$
senzor teploty,
kritickej teploty

2. Závislosť H_{sw} od napätia



$H_{sw} = f(\sigma)$
senzor napätia,
sily, hmotnosti

3. Závislosť H_{sw} od frekvencie



$H_{sw} = f(f)$
senzor frekvencie

Komova et al.: J. Physics: Condensed Matter (2007)

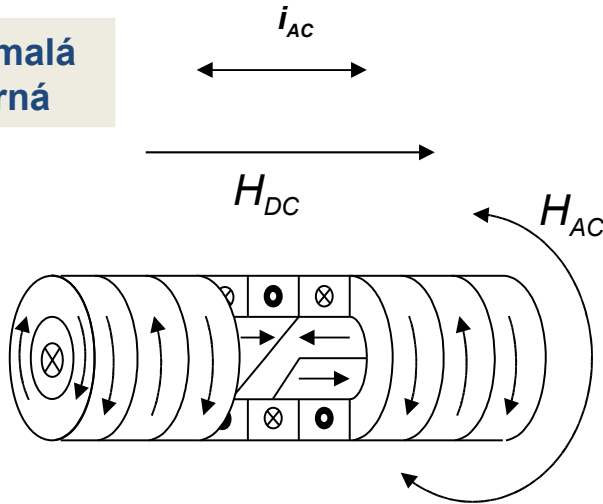
Ďalšie aplikácie senzory magnetického poľa
senzor elektrického prúdu
senzor uhla natočenia
dynamický senzor kmitov

3. Využitie magnetických vlastností mikrodrôto v príkonštrukciisenzorov

Senzory na báze GMI efektu (Giant MagnetImpedance effect)

GMI efekt prudký pokles impedancie magnetického vodiča v axiálnom magnetickom poli

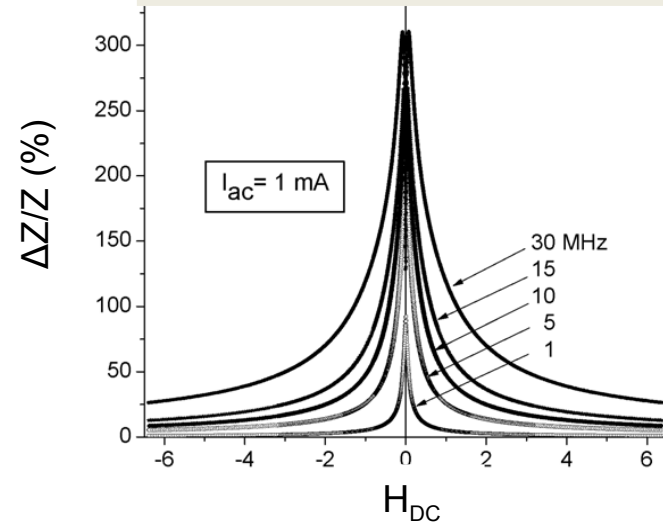
λ_s – malá
záporná



doménová štruktúra mikrodrôto

- i_{AC}striedavý elektrický prúd
- H_{AC}indukované cirkulárne magnetické pole
- H_{DC}stacionárne axiálne magnetické pole

Závislosť $\Delta Z/Z$ od H_{DC} a od f



H.K. Lachowicz et al.: Sensors and Actuators A 119 (2005)

Skin efekt

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \phi}}$$

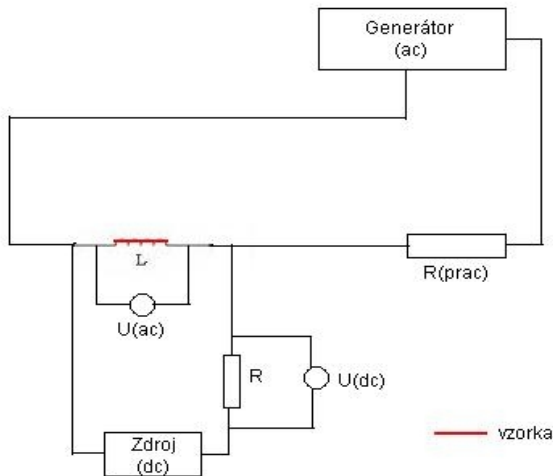
zmena hĺbky prieniku skin efektu v magnetickom vodiči - následok aplikovaného magnetického poľa veľmi vysokej frekvencie

3. Využitie magnetických vlastností mikrodrôto v príkonštrukciisenzorov

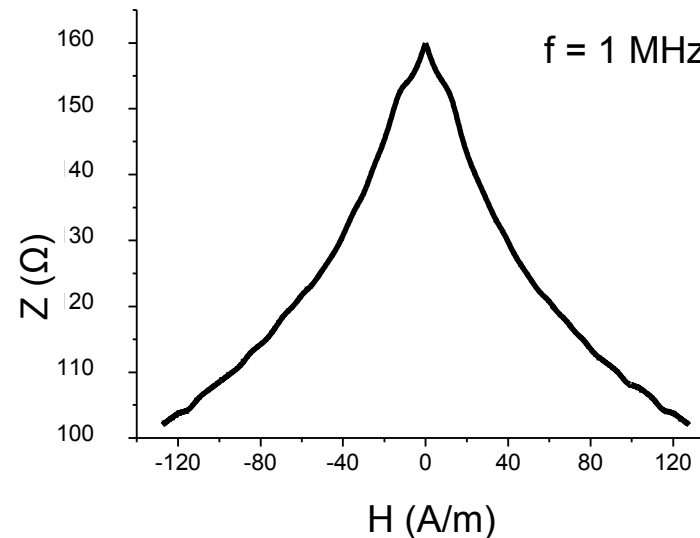
Senzory na báze GMI efektu - experiment

Mikrodrôt s veľmi malou zápornou magnetostrikciou → zliatina $(\text{Fe}_{0,06}\text{Co}_{0,94})_{72,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$

Schéma meracieho obvodu



Závislosť impedancie Z od intenzity externého magnetického poľa H



D. Balga: Bakalárska práca LF TU Košice (2010)

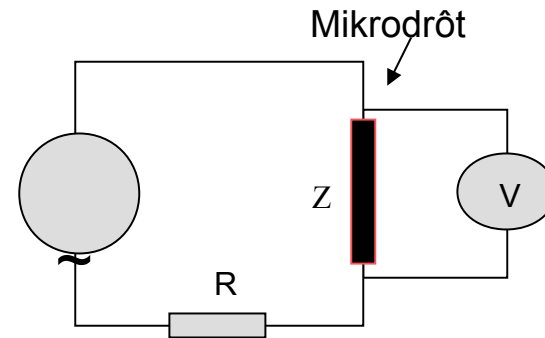
Prudká zmena impedancie je nepriamo úmerná aplikovanému magnetickému poľu
 $\Delta Z/Z$ (max) = 60 %

3. Využitie magnetických vlastností mikrodrôto v prikonštrukcii senzorov

Senzory na báze GMI efektu - aplikácie

Princíp konštrukcie

štvorbodová metóda merania impedancie



Efekt GMI závisí hlavne od zmeny cirkulárnej magnetickej permeability $\mu = f(H, T, \sigma, f)$
→ konštrukcia senzorov na báze GMI s využitím závislostí permeability

$Z = f(H)$ → senzor magnetického poľa

$Z = f(T)$ → senzor teploty

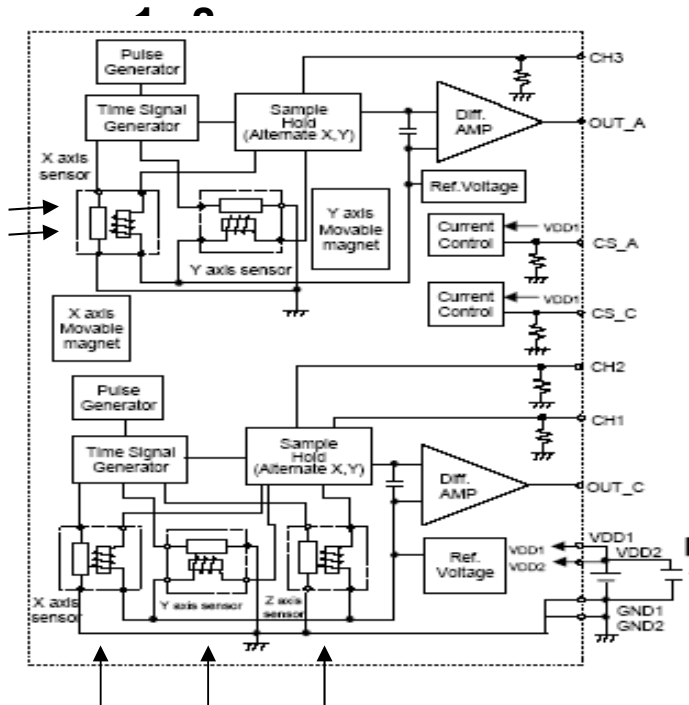
$Z = f(\sigma)$ → senzor mechanického napätia, hmotnosti

$Z = f(f)$ → senzor frekvencie budiaceho napätia

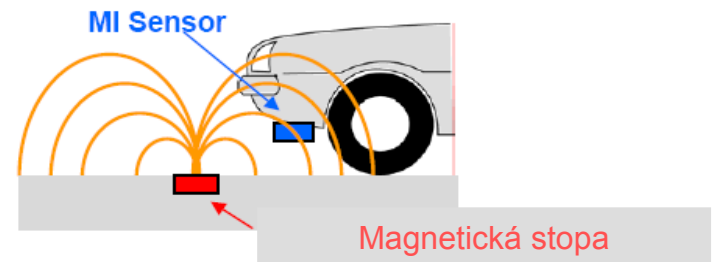
3. Využitie magnetických vlastností mikrodrôto v príkonštrukcií senzoro v

Senzory na báze GMI efektu - aplikácie

Senzory magnetického poľa H



1. meranie zemského magnetického poľa (2-3 rozmerné kompas)
2. meranie akcelerácie
3. detekcia prítomnosti feromagnetických predmetov



Aichi Micro Intelligent Corporation

4. meranie otáčania

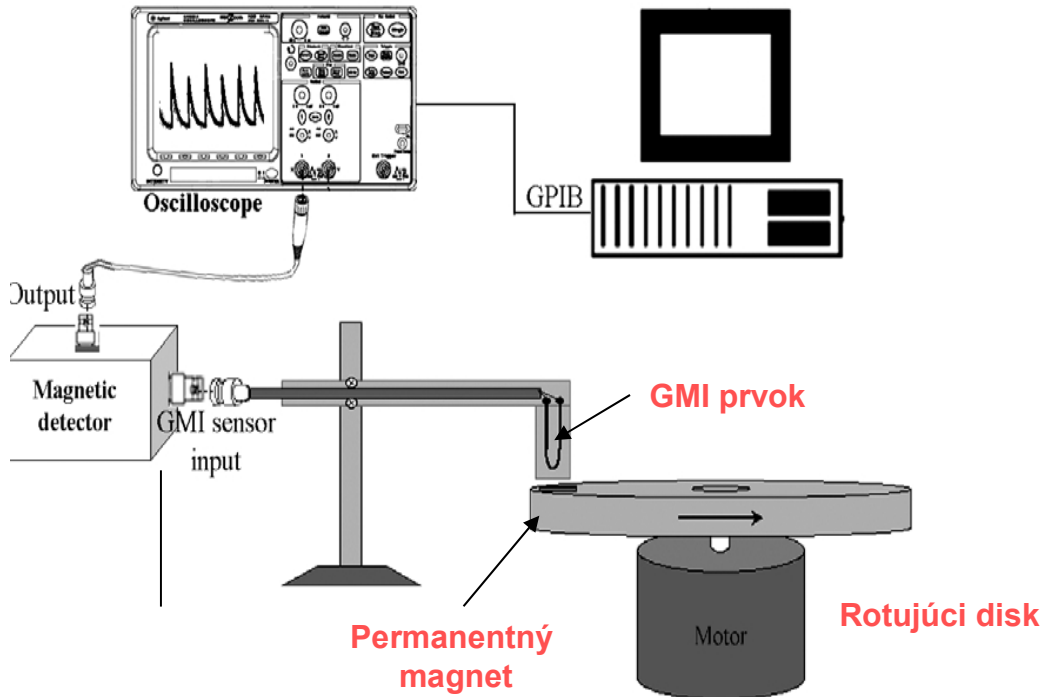
Elektrická schéma 5-rozmerného senzoru AMI 501 na meranie magnetického poľa a akcelerácie od firmy Aichi Micro Intelligent Corporation

Aichi Micro Intelligent Corporation

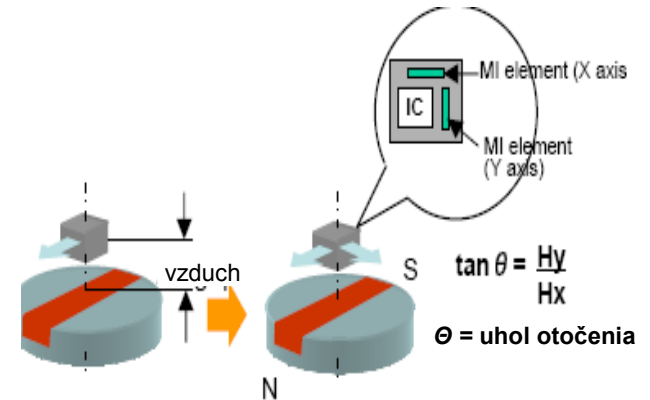
3. Využitie magnetických vlastností mikrodrôto v prikonštrukcii senzorov

Senzory na báze GMI efektu - aplikácie

4. Konfigurácia merania uhlovej rýchlosti a frekvencie



5. Dvojrozmerný senzor merania uhla otáčania



Aichi Micro Intelligent Corporation

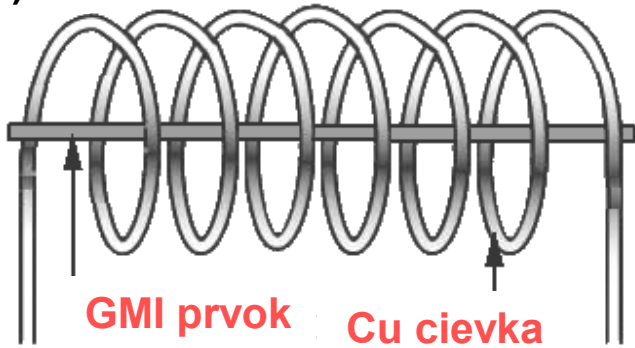
P. Jantaratana, Ch. Sirisathikul: *Sensors* 2008, 8, 1575-1584

3. Využitie magnetických vlastností mikrodrôto v príkonštrukcii senzorov

Senzory na báze GMI efektu - aplikácie

6. Konfigurácia senzorov elektrického prúdu

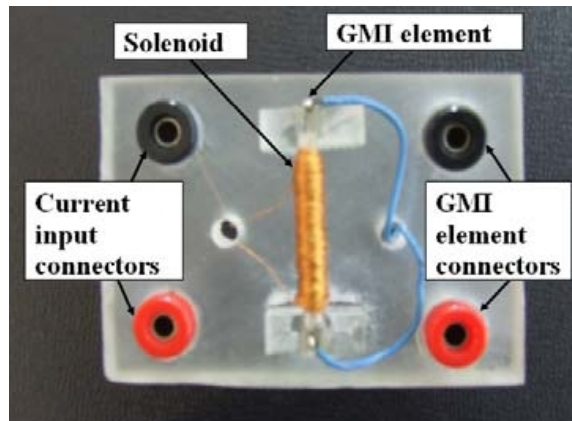
a)



b)

amorfný
drôt

medený
vodič



M. Vazquez, Physica B, 299 (2001), 302.

3. Využitie magnetických vlastností mikrodrôto v príkonštrukcii senzorov

Senzory na báze GMI efektu – aplikácie

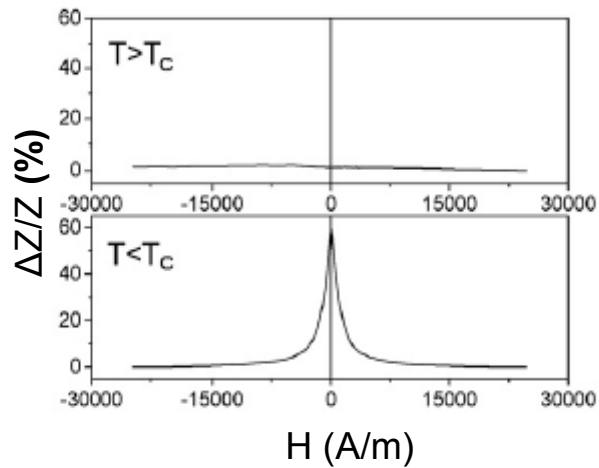
Senzory teploty T

1. Senzory kritickej teploty
2. Senzor teploty na báze merania indukčnosti

2. Senzor teploty

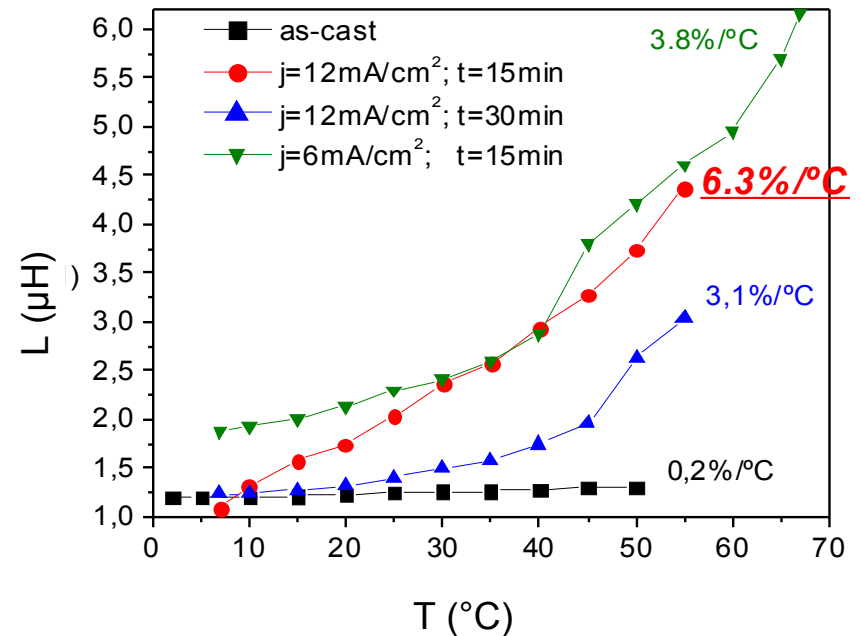
1. Senzor kritickej teploty

Závislosť impedancie mikrodrôtu nad a pod Curieho teplotou



A. Zhukov et al.:PIERS Proceedings, Hangzhou, China (2008)

Závislosť indukčnosti od teploty



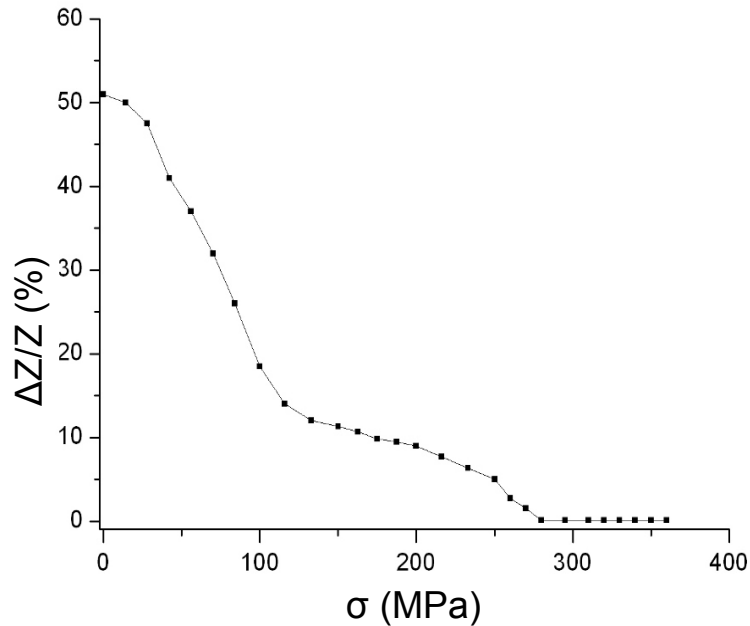
M. Vázquez et al.: International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 25 (2007)

3. Využitie magnetických vlastností mikrodrôto v prikonštrukcii senzorov

Senzory na báze GMI efektu - aplikácie

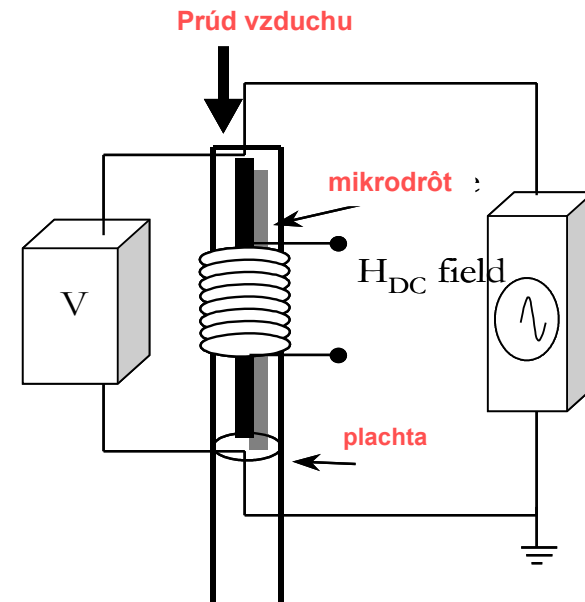
Senzory napätia, tlaku, hmotnosti, sily

Závislosť $\Delta Z/Z$ od mechanického napätia



A. Zhukov et al.:PIERS Proceedings, Hangzhou, China (2008)

Senzor tlaku prúdiaceho vzduchu

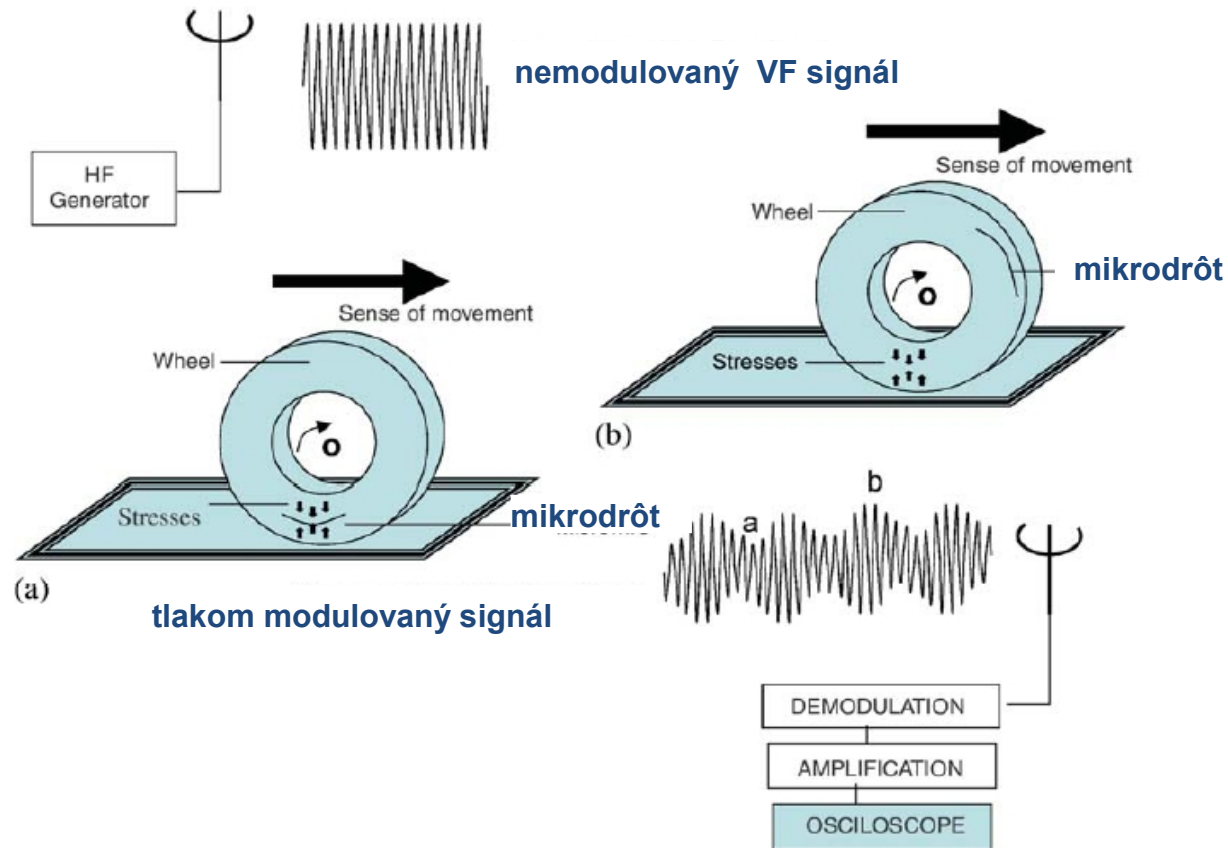


M. Vázquez et al.:International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 25 (2007)

3. Využitie magnetických vlastností mikrodrôto v prikonštrukcii senzora

Senzory na báze GMI efektu - aplikácie

Magnetoelastický senzor merania otáčok s magnetickým mikrodrôtom



Výhody mikrodrôtov

1. Nízka cena
2. Jednoduchá príprava
3. Veľmi malé rozmery
4. Symetria
5. Sklenená izolácia - odolnosť voči vonkajším vplyvom, korózii
6. Vysoká citlivosť
7. Ekonomická prevádzka – nízka energetická náročnosť
8. Jednoduchá modifikácia vlastností žíhaním, resp. mechanickým namáhaním

Očakávané trendy

1. Skvalitnenie vlastností mikrodrôtov (výskum mikrodrôtov s novým zložením, optimalizácia ďalšieho spracovania)
2. Zvyšovanie stability vlastností – nanokryštalické mikrodrôty
3. Nová skupina mikrodrôtov – viacplášťové mikrodrôty pre multifunkčné senzorové zariadenia

Ďa k u j e m z a p o z o r n o s ť !

K o n i e c