

# Spis treści

<b>1. Wstęp</b> .....	9
<i>Tomasz Stobiecki</i>	
<b>2. Podstawy fizyczne zjawisk magnetorezystancyjnych w cienkich warstwach</b> .....	12
<i>Tomasz Stobiecki, Maciej Czapkiewicz, Jarosław Kanak</i>	
2.1. Proces przemagnesowywania cienkiej warstwy ferromagnetycznej z anizotropią jednoosiową .....	12
2.2. Fenomenologia zjawisk galwanomagnetycznych .....	13
2.3. Anizotropowy efekt magnetorezystancyjny .....	16
2.3.1. Kątowa zależność magnetorezystancji .....	17
2.3.2. Polowa zależność magnetorezystancji .....	19
2.4. Anomalny efekt Halla .....	21
2.4.1. Polowa zależność napięcia Halla .....	23
2.5. Układy warstw magnetycznie sprzężonych .....	26
2.5.1. Oscylacyjne sprzężenie wymienne .....	26
2.5.2. Procesy przemagnesowywania w układach warstw magnetycznie sprzężonych .....	28
2.6. Gigantyczna magnetorezystancja GMR .....	31
2.6.1. Oscylacje w układzie wielowarstwowym NiFe/Cu .....	33
2.7. Układ warstw magnetycznie sprzężonych z jednoosiową anizotropią jednowrotową typu zawór spinowy .....	36
2.7.1. Zawór spinowy typu GMR .....	40
2.8. Magnetyczne złącze tunelowe .....	43
2.8.1. Złącze tunelowe typu zawór spinowy .....	45
2.8.2. Sprzężenia magnetyczne w złączu tunelowym .....	47
2.8.3. Sprzężenie międzywarstwowe warstwa swobodna/przekładka/warstwa zamocowana .....	48
2.8.4. Sprzężenie kontaktowe antyferromagnetyk/ferromagnetyk .....	50

<b>3. Aparatura technologiczna i wytwarzanie nanostruktur .....</b>	<b>52</b>
<i>Tomasz Stobiecki, Jarosław Kanak, Witold Skowroński, Jerzy Wrona</i>	
3.1. Nanoszenie warstw metodą rozpylania jonowego .....	52
3.1.1. Aparatura .....	52
3.1.2. Rozpylanie katodowe .....	55
3.2. Utlenianie bariery .....	56
3.3. Wygrzewanie .....	56
3.4. Litografia optyczna .....	57
3.4.1. Wytrawianie jonowe .....	58
3.5. Litografia elektronowa .....	59
<b>4. Metody charakteryzacji strukturalnej przed procesem nanostrukturyzacji .....</b>	<b>62</b>
<i>Tomasz Stobiecki, Jarosław Kanak</i>	
4.1. Dyfrakcja rentgenowska na cienkich warstwach .....	62
4.2. Dyfraktometr X'Pert MPD .....	62
4.3. Geometrie pomiarów .....	64
4.3.1. Pomiary w geometrii Bragga-Brentana .....	64
4.3.2. Pomiary w geometrii wiązki równoległej .....	64
4.4. Układy szczelin formujące wiązkę pierwotną i wtórną .....	65
4.5. Rodzaje pomiarów dyfrakcyjnych w badaniach cienkich warstw .....	67
4.5.1. Pomiar $\theta$ - $2\theta$ .....	67
4.5.2. Pomiar $2\theta$ .....	69
4.5.3. Pomiar $\omega$ .....	70
4.5.4. Figury biegunowe .....	71
4.5.5. Reflektometria .....	71
4.6. Wpływ warstw buforowych na mikrostrukturę i własności złącz tunelowych z barierą Al-O .....	72
4.6.1. Pomiary $\theta$ - $2\theta$ .....	73
4.6.2. Pomiary $\omega$ i figur biegunowych .....	74
4.7. Szorstkość interfejsów .....	75
4.7.1. Reflektometria .....	75
4.7.2. Szorstkości topologiczne – AFM .....	77
4.7.3. Wpływ szorstkości na parametry złącza tunelowego: $H_{Néel}$ i TMR .....	78
4.8. Złącze tunelowe z barierą MgO .....	80
<b>5. Aparatura do pomiarów charakterystyk magnetycznych i elektrycznych .....</b>	<b>86</b>
<i>Tomasz Stobiecki, Jerzy Wrona</i>	
5.1. Magnetometr R-VSM .....	86
5.2. Magnetometr efektu Kerra .....	89

5.3. Pomiar magnetorezystancyjnej pętli histerezy i charakterystyk prąd-napięcie .....	92
<b>6. Symulacje numeryczne .....</b>	<b>95</b>
<i>Tomasz Stobiecki, Maciej Czapkiewicz</i>	
6.1. Model jednodomenowy .....	95
6.1.1. Stan układu jako lokalne minimum energii .....	95
6.1.2. Gęstość energii w warstwie ferromagnetycznej – prosty model jednodomenowy .....	95
6.1.3. Przykładowe zastosowania modelu jednodomenowego .....	97
6.2. Modele mikromagnetyczne .....	100
6.2.1. Domeny w ferromagnetyku .....	100
6.2.2. Model mikromagnetyczny .....	101
6.2.3. OOMMF .....	102
6.2.4. MagPar .....	105
<b>7. Zapis magnetyczny .....</b>	<b>106</b>
<i>Tomasz Stobiecki</i>	
7.1. Analogowy zapis magnetyczny .....	106
7.2. Twardy dysk .....	109
7.2.1. Zapis podłużny i prostopadły .....	113
7.2.2. Dyski przyszłości .....	115
7.3. Głowice dyskowe .....	117
7.3.1. Głowica – zawór spinowy GMR .....	119
<b>8. Pamięci magnetyczne .....</b>	<b>123</b>
<i>Tomasz Stobiecki, Witold Skowroński</i>	
8.1. Pamięć MRAM .....	123
8.2. Reprogramowalne spinowe układy logiczne .....	124
<b>Literatura .....</b>	<b>127</b>
<b>Skowowidz .....</b>	<b>129</b>