
Spinelektronik

Vorlesungsskript zur Vorlesung im SS 2004

Prof. Dr. Rudolf Gross

und

Dr. Achim Marx

Walther-Meissner-Institut

Lehrstuhl für Technische Physik (E23)

Walther-Meissner-Strasse 8

D-85748 Garching

Rudolf.Gross@wmi.badw.de

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	9
Einleitung	1
I Grundlagen	9
1 Grundbegriffe und Messmethoden	11
1.1 Grundbegriffe des Magnetismus	12
1.2 Messmethoden	13
2 Spinabhängiger Transport	15
2.1 Magnetoresistive Effekte – ein phänomenologischer Überblick	16
2.1.1 Der positive Magnetwiderstand	16
2.1.2 Der negative Magnetwiderstand – Streuung an Spinunordnung	17
2.1.3 Der anisotrope Magnetwiderstand – AMR	18
2.1.4 Der Riesenmagnetwiderstand – GMR	19
2.1.5 Der Tunnelmagnetwiderstand – TMR	22
2.1.6 Der kolossale Magnetwiderstand – CMR	24
2.2 Elektrischer Transport in unmagnetischen Metallen	28
2.2.1 Boltzmann-Gleichung und Relaxationszeit	28
2.2.2 Elektrische Leitfähigkeit	33
2.2.3 Magnetwiderstand und Hall-Effekt im Einbandmodell	36
2.2.4 Vertiefungsthema: Magnetwiderstand und Hall-Effekt im Zweibandmodell	38
2.2.5 Streuprozesse	42
2.2.6 Streuprozesse in dünnen metallischen Schichten	48
2.3 Elektrischer Transport in magnetischen Metallen	52

2.3.1	Experimentelle Beobachtungen	52
2.3.2	Das Zwei-Spinkanal-Modell	54
2.3.3	Streuung in magnetischen Systemen	57
2.3.4	Streuung von Leitungselektronen an lokalisierten magnetischen Momenten	61
2.3.5	Vertiefungsthema: Der Kondo-Effekt	67
2.3.6	Vertiefungsthema: Einfluss der Leitungselektronen auf lokale magnetische Momente	69
2.3.7	Vertiefungsthema: Der Kondo-Widerstand	73
2.3.8	Hall-Effekt in ferromagnetischen Metallen	75
II	Magnetoresistive Effekte	83
3	AMR-Effekt	85
3.1	Experimentelle Beobachtungen	86
3.2	Anschauliche Erklärung des AMR	88
3.3	Widerstandstensor und AMR-Effekt	91
3.3.1	Anwendungsaspekte	92
3.4	Außergewöhnlicher Hall-Effekt	94
4	CMR-Effekt	95
4.1	Experimentelle Beobachtungen	97
4.2	Kristallstruktur	99
4.2.1	Toleranzfaktor	99
4.2.2	Vertiefungsthema: Ruddlesden-Popper-Serie	102
4.3	Elektronische Struktur	103
4.3.1	Das Kristallfeld	103
4.3.2	Jahn-Teller-Effekt	108
4.4	Grundlagen zur magnetischen Struktur	113
4.4.1	Experimentelle Beobachtungen	113
4.4.2	Der Superaustausch	114
4.4.3	Vertiefungsthema: Ladungstransfer- und Mott-Hubbard-Isolatoren	117
4.4.4	Die Goodenough-Kanamori-Anderson Regeln	120

4.4.5	Der Doppelaustausch	124
4.5	Elektrische Transporteigenschaften	132
4.5.1	Temperatur- und Magnetfeldabhängigkeit des spezifischen Widerstands .	132
4.5.2	Skalenverhalten des CMR-Effektes	134
5	GMR-Effekt	137
5.1	Zwischenschicht-Austauschkopplung	139
5.1.1	Experimentelle Beobachtungen	139
5.1.2	Kopplungsarten	140
5.1.3	Phänomenologische Beschreibung der Zwischenschichtkopplung	143
5.1.4	Mikroskopisches Modell der Zwischenschichtkopplung	144
5.1.5	RKKY-Wechselwirkung	152
5.2	Der Riesenmagnetwiderstand	154
5.2.1	Einfache Modellvorstellungen	154
5.2.2	Intrinsischer GMR	157
5.2.3	Extrinsischer GMR	160
5.3	Skalenverhalten des GMR	165
5.3.1	Anwendungsaspekte	166
6	Spinventile	169
6.1	Austausch-Anisotropie	171
6.1.1	Phänomenologische Beschreibung der Austausch-Anisotropie	171
6.1.2	Theoretische Modelle zur Austausch-Anisotropie	176
6.2	Realisierung von Spinventilen	187
6.2.1	Optimierung des magnetoresistiven Effekts von Spinventilen	188
6.2.2	Wahl des Antiferromagneten	190
7	TMR-Effekt	195
7.1	Theoretische Behandlung des Tunnelns von Elektronen	198
7.1.1	Elastisches Tunneln durch eine eindimensionale rechteckförmige Barriere – zeitunabhängiger Ansatz	198
7.1.2	Elastisches Tunneln durch eine eindimensionale rechteckförmige Barriere – zeitabhängiger Ansatz	202
7.1.3	Elastisches Tunneln durch eine eindimensionale Barriere beliebiger Form – WKB-Näherung	203
7.1.4	Elastisches Tunneln in planaren Metall/Isolator/Metall-Kontakten	204

7.1.5	Tunneln unter Berücksichtigung des Bildpotenzials	208
7.1.6	Bandstruktureffekte beim elastischen Tunneln	209
7.1.7	Resonantes Tunneln	210
7.2	NIN- und NIS-Kontakte	213
7.3	Ferromagnet/Isolator/Supraleiter-Kontakte	217
7.3.1	Zeemann-Aufspaltung der Quasiteilchen-Zustandsdichte in Supraleitern	217
7.3.2	Zustandsdichte und Spinpolarisation in Ferromagneten	219
7.4	FM/S-Kontakte – Andreev-Reflexion	227
7.4.1	Andreev-Streuung an Metall/Supraleiter-Grenzflächen	227
7.4.2	Andreev-Streuung an Ferromagnet/Supraleiter-Grenzflächen	234
7.5	FM/I/FM-Tunnelkontakte	239
7.5.1	Jullière – Modell	241
7.5.2	Weiterentwicklungen des Jullière-Modells	242
7.6	Experimente zu FM/I/FM-Tunnelkontakten	249
7.6.1	Untersuchung und Verbesserung der Barriereneigenschaften	251
7.6.2	Temperatur- und Spannungsabhängigkeit des JMR	253
7.6.3	Dotierung der Tunnelbarriere	256
7.6.4	FM/I/FM Tunnelkontakte mit nichtmagnetischen Zwischenschichten . .	258
7.6.5	Grenzflächeneffekte und Vorzeichen der Spinpolarisation	259
7.6.6	Neue Materialsysteme	261
7.6.7	Rastertunnelmikroskopie	263
7.7	Inelastisches Tunneln	266
7.7.1	Inelastisches Tunneln mit Wechselwirkungsprozessen in der Barriere . . .	266
7.7.2	Inelastisches Tunneln mit Wechselwirkungsprozessen in den Tunnelelektroden	269
7.7.3	Tunneln über Zwischenzustände – Glazmann-Matveev Modell	269
7.8	Tunneln durch ferromagnetische Barrieren – Spinfilter	275
7.9	Austauscheffekte an Grenzflächen zu Ferromagneten	278
8	EMR- und BMR-Effekt	281

III	Spininjektion und Spintransport	283
IV	Materialien für die Spinelektronik	285
V	Anwendungen	287
9	XMR-Effekte – Anwendungen	289
9.1	Sensoren	292
9.1.1	GMR Sensoren	295
9.1.2	Anwendungen von GMR-Sensoren	301
9.2	Magnetoresistive Leseköpfe	306
9.2.1	Design von Lese- und Schreibköpfen	308
9.3	Magnetic Random Access Memory – MRAM	313
9.3.1	Geschichtlicher Hintergrund	313
9.3.2	MRAM basierend auf AMR und GMR	316
9.3.3	MRAM basierend auf Spinventilen	318
9.3.4	MRAM basierend auf magnetischen Tunnelkontakten	318
9.3.5	Ansteuerkonzepte für MRAMs	320
VI	Quanten-Spinelektronik	325
VII	Appendix	327
A	Literatur	329
B	SI-Einheiten	330
B.1	Geschichte des SI Systems	330
B.2	Die SI Basiseinheiten	332
B.3	Einige von den SI Einheiten abgeleitete Einheiten	333
B.4	Vorsätze	335
B.5	Abgeleitete Einheiten und Umrechnungsfaktoren	336
C	Physikalische Konstanten	340

Teil I

Grundlagen

Teil II

Magnetoresistive Effekte

Teil III

Spininjektion und Spintransport

Teil IV

Materialien für die Spinelektronik

Teil V

Anwendungen

Teil VI

Quanten-Spinelektronik

Teil VII

Appendix

A Literatur

1. *Introduction to Solid State Physics*, Charles Kittel, John Wiley & Sons, New York (1996).
2. *Solid State Physics*, N. W. Ashcroft, N. D. Mermin, CBS Publishing Asia Ltd. (1976)
3. *Fundamentals of the Theory of Metals*, A.A. Abrikosov, North-Holland, Amsterdam (1988).
4. *Electrons and Phonons*, edited by J. M. Ziman, Clarendon Press, London (1963).
5. *Prinzipien der Festkörpertheorie*, J. M. Ziman, Verlag Harry Deutsch, Zürich (1975).
6. *Festkörpertheorie*, O. Madelung, Springer Verlag, Berlin (1972).
7. *Magnetoresistance in Metals*, edited by A. B. Pippard, Cambridge University Press, Cambridge (1989).
8. *Electronic Properties of Metals and Alloys*, A. Dugdale, Edward Arnold Publishers, London (1982).
9. *Magnetische Schichtsysteme*, 30. Ferienkurs des Instituts für Festkörperforschung, FZ-Jülich GmbH, Schriften des Forschungszentrums Jülich (1999).
10. *Transport Properties of Ferromagnetic Metals*, Ferromagnets Materials Vol. 3, I. A. Campbell, A. Fert editors, North Holland Publishers (1982).
11. *Physics of Ferromagnetism*, S. Chikazumi, Clarendon Press, Oxford (1997).
12. *Ferromagnetic Materials*, E. P. Wohlfarth ed., North Holland Publ. Comp., Amsterdam (1980).
13. *Modern Magnetic Materials – Principles and Applications*, Robert C. O’Handley, John Wiley & Sons, Inc., New York (1999).
14. *Principles of Electron Tunneling Spectroscopy*, E. L. Wolf, Oxford Science Publications, Oxford University Press, New York (1989).
15. *Spin Electronis*, M. Ziese and M. J. Thornton eds., Springer Berlin (2001).
16. *Semiconductor Spintronics and Quantum Computation*, D.D. Awschalom, D. Loss, N. Samarth eds., Springer Verlag, Berlin (2002).
17. *Magnetic Multilayers and Giant Magnetoresistance*, U. Hartmann ed., Springer Berlin (2000).