
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	Magneto-resistive 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	118
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	Vertiefungsthema: Elastisches Tunneln durch eine eindimensionale rechteckförmige Barriere – zeitabhängiger Ansatz	202
7.1.3	Vertiefungsthema: 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	Vertiefungsthema: Tunneln unter Berücksichtigung des Bildpotenzials	209
7.1.6	Bandstruktureffekte beim elastischen Tunneln	210
7.1.7	Vertiefungsthema: Resonantes Tunneln	211
7.2	NIN- und NIS-Kontakte	214
7.3	Ferromagnet/Isolator/Supraleiter-Kontakte	218
7.3.1	Zeemann-Aufspaltung der Quasiteilchen-Zustandsdichte in Supraleitern	218
7.3.2	Zustandsdichte und Spinpolarisation in Ferromagneten	221
7.4	Ferromagnet/Supraleiter-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
8.1	Der ballistische Magnetwiderstand	282
8.1.1	Punktkontakte	282
8.1.2	Ballistischer Magnetwiderstandseffekt in Nanokontakten	284
8.1.3	BMR-Effekt: Artefakte	287

III	Spininjektion und Spintransport	289
IV	Materialien für die Spinelektronik	291
V	Anwendungen	293
9	XMR-Effekte – Anwendungen	295
9.1	Sensoren	298
9.1.1	GMR Sensoren	301
9.1.2	Anwendungen von GMR-Sensoren	307
9.2	Magnetoresistive Leseköpfe	312
9.2.1	Design von Lese- und Schreibköpfen	314
9.3	Magnetic Random Access Memory – MRAM	319
9.3.1	Geschichtlicher Hintergrund	319
9.3.2	MRAM basierend auf AMR und GMR	322
9.3.3	MRAM basierend auf Spinventilen	324
9.3.4	MRAM basierend auf magnetischen Tunnelkontakten	324
9.3.5	Ansteuerkonzepte für MRAMs	326
VI	Quanten-Spinelektronik	331
VII	Appendix	333
A	Literatur	335
B	SI-Einheiten	336
B.1	Geschichte des SI Systems	336
B.2	Die SI Basiseinheiten	338
B.3	Einige von den SI Einheiten abgeleitete Einheiten	339
B.4	Vorsätze	341
B.5	Abgeleitete Einheiten und Umrechnungsfaktoren	342
C	Physikalische Konstanten	346

Vorwort

Das vorliegende Skript ist eine Zusammenstellung des Stoffes zum Themengebiet Spinelektrotechnik und richtet sich an Studierende der Physik und der Elektrotechnik nach dem Vordiplom.

Das Skript entstand aus einer Vorlesung an der Universität zu Köln im WS 1999/2000 für Studierende der Physik und Mathematik und einer ab dem WS 2000/2001 an der Technischen Universität München angebotenen Spezialvorlesung. Die vorliegende Stoffzusammenstellung soll sowohl eine Einführung in die physikalischen Grundlagen zu dem sehr aktuellen Forschungsgebiet "*Spinelektrotechnik*" geben als auch die Funktionsprinzipien von spin- oder magnetoelektronischen Bauelementen, Herstellungsverfahren und aktuelle Anwendungen vorstellen.

Wir danken Dr. Dieter Kölle, Universität zu Köln, Dr. Patrick Wagner, Katholieke Universiteit Leuven und Dr. Hermann Kohlstedt, Forschungszentrum Jülich, für ihre Mitarbeit bei der ersten Vorlesung im WS 1999/2000 an der Universität zu Köln. Wir danken ferner Dr. Daniel Bürgler, Prof. Peter Grünberg, Dr. Dirk Grundler, Dipl.Phys. Christian Waldenmaier, Dr. Joachim Wecker und Dr. Sven Uhlenbruck für nützliche Diskussionen, Hinweise und zur Verfügung gestelltes Material.

Das Vorlesungsskript wurde im Laufe der Vorlesung des Wintersemesters 2000/2001 und des Sommersemesters 2001 vervollständigt und seither ständig weiterentwickelt. Es enthält in der jetzigen Form aber ohne Zweifel noch einige Fehler. Die Autoren sind für Hinweise auf solche Fehler dankbar (e-mail: Rudolf.Gross@wmi.badw.de).

Garching, April 2004

R. Gross und A. Marx

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

