
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	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 Tunnelek- troden	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

C Physikalische Konstanten

Fundamentalkonstanten treten im Netz der physikalischen Theorien als quantitative Verknüpfungspunkte dieser Theorien auf. So ist beispielsweise die Theorie der Hohlraumstrahlung über die Planck-Konstante h mit der Quantentheorie sowie über die Vakuumlichtgeschwindigkeit mit der Elektrodynamik und über die Boltzmann-Konstante k mit der Statistischen Mechanik verknüpft. Die Konstanten werden durch die Theorien nicht festgelegt, sie sind vielmehr experimentell so genau wie überhaupt nur möglich zu ermitteln. Denn die quantitativen Aussagen der Theorien können nur so genau sein, wie die Konstanten bekannt sind. Die möglichst genaue Kenntnis der Fundamentalkonstanten setzt aber eine möglichst genaue experimentelle Darstellung der im Internationalen Einheitensystem (SI) definierten physikalischen Einheiten voraus. Dieser Sachverhalt bindet die Ermittlung der Werte der Fundamentalkonstanten eng an die Metrologie, die Wissenschaft vom genauen Messen, deren vornehmste und wichtigste Aufgabe die bestmögliche experimentelle Realisierung der definierten Einheiten ist.

Umgekehrt aber sind die Fundamentalkonstanten deshalb von besonderem Interesse für die Metrologie, weil sie selbst als ideale Einheiten dienen oder die ideale Basis für Einheiten bilden können. Schon heute werden sie zur Darstellung der SI-Einheiten herangezogen. Experimente zur Bestimmung einer Fundamentalkonstanten werden häufig direkt an metrologischen Instituten wie der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt oder zumindest in enger Zusammenarbeit mit solchen Instituten ausgeführt.

Im Jahre 1999 hat die Task Group on Fundamental Constants des *Committee on Data for Science and Technology* (CODATA) des International Council of Scientific Unions (ICSU) einen neuen Satz von Fundamentalkonstanten erstellt und ihn zur einheitlichen Verwendung in Wissenschaft und Technik empfohlen. Dessen Werte sind das Ergebnis einer multivariaten Ausgleichsrechnung und beruhen auf Daten, die bis zum 31. Dezember 1998 publiziert vorlagen. Es ist geplant, zukünftig regelmäßig alle vier Jahre eine neue Ausgleichsrechnung unter Hinzuziehung neuer Daten vorzunehmen.

Eine Auswahl der wichtigsten Fundamentalkonstanten sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst. Quelle: Peter J. Mohr und Barry N. Taylor, *CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants 1998*, *Journal of Physical and Chemical Reference Data* **28**, No. 6, (1999) und *Reviews of Modern Physics* **72**, No. 2, (2000).

Physikalische Konstante	Symbol	Wert	Einheit	rel. Fehler
universelle Konstanten				
Lichtgeschwindigkeit	c	299 792 458	m/s	exakt
Plancksche Konstante	h	$6.626\,068\,76(52) \times 10^{-34}$	Js	7.8×10^{-8}
$h/2\pi$	\hbar	$1.054\,571\,596(82) \times 10^{-34}$	Js	7.8×10^{-8}
		$6.582\,118\,89(26) \times 10^{-16}$	eVs	3.9×10^{-8}
Gravitationskonstante	G	$6.673(10) \times 10^{-11}$	$\text{m}^3/\text{kg s}^2$	
Induktionskonstante, magnetische Feldkonstante	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$	N/A^2	exakt

Fortsetzung auf nächster Seite

Fortsetzung von letzter Seite

Physikalische Konstante	Symbol	Wert	Einheit	rel. Fehler
Influenzkonstante, elektrische Feldkonstante, $1/\mu_0 c^2$	ϵ_0	$8.854\,187\,817 \dots \times 10^{-12}$	F/m	exakt
	$1/4\pi\epsilon_0$	$8.987\,551 \dots \times 10^9$	Nm ² /C ²	exakt
Vakuumimpedanz $1/\mu_0 c^2$	Z_0	376.730 313 461 ...	Ω	exakt
Planck-Masse $\sqrt{\hbar c/G}$	m_P	$2.1767(16) \times 10^{-8}$	kg	7.5×10^{-4}
elektromagnetische Konstanten				
Elementarladung	e	$1.602\,176\,462(63) \times 10^{-19}$	C	3.9×10^{-8}
Magnetisches Flussquant $h/2e$	Φ_0	$2.067\,833\,636(81) \times 10^{-15}$	Vs	3.9×10^{-8}
von Klitzing Konstante h/e^2	R_K	25 812.807 572(95)	Ω	3.7×10^{-9}
Leitfähigkeitsquant $2e^2/h$	G_0	$7.748\,091\,696(28) \times 10^{-5}$	S	3.7×10^{-9}
Josephson-Konstante $2e/h$	K_J	483 597.898(19)	Hz/V	3.9×10^{-8}
Bohrsches Magneton $e\hbar/2m_e$	μ_B	$9.274\,008\,99(37) \times 10^{-24}$	J/T	4.0×10^{-8}
		$5.788\,381\,749(43) \times 10^{-5}$	eV/T	7.3×10^{-9}
Kernmagneton	μ_K	$1.399\,624\,624(56) \times 10^{10}$	Hz/T	4.0×10^{-8}
		$5.050\,783\,17(20) \times 10^{-27}$	J/T	4.0×10^{-8}
		$3.152\,451\,238(24) \times 10^{-8}$	eV/T	7.6×10^{-9}
		$7.622\,593\,96(31) \times 10^6$	Hz/T	4.0×10^{-8}
atomare und nukleare Konstanten				
Feinstrukturkonstante $e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c$	α	$7.297\,352\,533(27) \times 10^{-3}$		3.7×10^{-9}
	$1/\alpha$	137.036 999 76(83)		3.7×10^{-9}
Ruhemasse des Elektrons	m_e	$9.109\,381\,88(72) \times 10^{-31}$	kg	7.9×10^{-8}
		$5.485\,799\,110(12) \times 10^{-4}$	u	2.1×10^{-9}
Ruheenergie des Elektrons	$m_e c^2$	$5.109\,989\,02(21) \times 10^5$	eV	4.0×10^{-8}
Ruhemasse des Protons	m_p	$1.672\,621\,58(13) \times 10^{-27}$	kg	7.9×10^{-8}
		1.007 276 466 88(13)	u	1.3×10^{-10}
Ruheenergie des Protons	$m_p c^2$	$9.382\,719\,98(38) \times 10^8$	eV	4.0×10^{-8}
Ruhemasse des Neutrons	m_n	$1.674\,927\,16(13) \times 10^{-27}$	kg	7.9×10^{-8}
		1.008 664 915 78(55)	u	5.4×10^{-10}
Ruheenergie des Neutrons	$m_n c^2$	$9.395\,653\,30(38) \times 10^8$	eV	4.0×10^{-8}
Magnetisches Moment des Elektrons	μ_e	$9.284\,763\,62(37) \times 10^{-24}$	J/T	4.0×10^{-8}
		μ_e/μ_B	1.001 159 652 1869(41)	4.1×10^{-12}

Fortsetzung auf nächster Seite

 Fortsetzung von letzter Seite

Physikalische Konstante	Symbol	Wert	Einheit	rel. Fehler
Magnetisches Moment des Protons	μ_p	$1.410\,606\,633(58) \times 10^{-26}$	J/T	4.1×10^{-8}
	μ_p/μ_B	1.521 032 203(15)		1.0×10^{-8}
	μ_p/μ_N	2.792 847 337(29)		1.0×10^{-8}
Massenverhältnis Proton/Elektron	m_p/m_e	1836.152 6675(39)		2.1×10^{-9}
spezifische Ladung des Elektrons	e/m_e	$1.758\,820\,174(71) \times 10^{11}$	C/kg	4.0×10^{-8}
Rydberg-Konstante $\alpha^2 m_e c / 2h$	R_∞	10 973 731.568 549(83)	1/m	7.6×10^{-12}
		$2.179\,871\,90(17) \times 10^{-18}$	J	7.8×10^{-8}
		13.605 691 72(53)	eV	3.9×10^{-8}
Bohrscher Radius $\alpha/4\pi R_\infty = 4\pi\epsilon_0\hbar^2/m_e e^2$	a_B	$5.291\,772\,083(19) \times 10^{-11}$	m	3.7×10^{-9}
Klassischer Elektronenradius $\alpha^2 a_B$	r_e	$2.817\,940\,285(31) \times 10^{-15}$	m	1.1×10^{-8}
Compton Wellenlänge des Elektrons $h/m_e c$	λ_C	$2.426\,310\,215(18) \times 10^{-12}$	m	7.3×10^{-9}
physikalisch-chemische Konstanten				
Loschmidtsche Zahl, Avogadro Konstante	N_A	$6.022\,141\,99(47) \times 10^{23}$	1/mol	7.9×10^{-8}
Atomare Masseneinheit $\frac{1}{12} m(^{12}\text{C})$	u	$1.660\,538\,73(13) \times 10^{-27}$	kg	7.9×10^{-8}
Faradaysche Konstante $N_A e$	F	96 485.3415(39)	C/mol	4.0×10^{-8}
Gaskonstante	R	8.314 472(15)	J/mol K	1.7×10^{-6}
Boltzmann-Konstante	k_B	$1.380\,6503(24) \times 10^{-23}$	J/K	1.7×10^{-6}
Molvolumen eines idealen Gases RT/p (bei $T = 273.15$ K, $p = 101\,325$ Pa)	V_m	$22.413\,996(39) \times 10^3$	m ³ /mol	1.7×10^{-6}
Tripelpunkt des Wassers	T_t	273.15	K	
	T_0	272.16	K	
		0	°C	
Stefan-Boltzmannsche Strahlungskonstante $(\pi^2/60)k_B^4/\hbar^3 c^2$	σ	$5.670\,400(40) \times 10^{-8}$	W/m ² K ⁴	7.0×10^{-6}

 Fortsetzung auf nächster Seite

Fortsetzung von letzter Seite

Physikalische Konstante	Symbol	Wert	Einheit	rel. Fehler
Wiensche Verschiebungskonstante $b = \lambda_{\max} T$	b	$2.897\,7686(51) \times 10^{-3}$	m K	1.7×10^{-6}
fundamentale physikalische Konstanten – angenommene Werte				
Normaldruck	p_0	101 325	Pa	exakt
Standard Fallbeschleunigung	g	9.806 65	m/s ²	exakt
konventioneller Wert der Josephson-Konstante	K_{J-90}	483 597.9	Hz/V	exakt
konventioneller Wert der von Klitzing-Konstante	R_{K-90}	25 812.807	Ω	exakt
