
Grundlagen der Halbleiterphysik II

Jürgen Smoliner

Grundlagen der Halbleiterphysik II

Nanostrukturen und
niedrigdimensionale
Elektronensysteme



Springer Spektrum

Jürgen Smoliner
Inst. für Festkörperelektronik
Technische Universität Wien
Wien, Österreich

ISBN 978-3-662-57681-6

ISBN 978-3-662-57682-3 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-662-57682-3>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Spektrum

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Verantwortlich im Verlag: Margit Maly

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Spektrum ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort

Das Buch Grundlagen der Halbleiterphysik II schließt nahtlos an das Buch Grundlagen der Halbleiterphysik an, und widmet sich den elektronischen Eigenschaften und der schönen Physik von niedrigdimensionalen Elektronensystemen. Und besser, ich sage es gleich: Dieses Buch ist für Studierende der Elektrotechnik im dritten Semester denkbar ungeeignet. Gut geeignet ist es hingegen für Studierende, die kurz vor ihrer Diplomarbeit eine Halbleiterphysik-Vorlesung besuchen müssen, geeignet ist es aber auch als praktische Einsteigerliteratur für Diplomanden und Doktoranden auf dem Gebiet der niedrigdimensionalen Halbleiterphysik. Der große Vorteil dieses Buches ist, dass es ihnen einen kompakten Überblick über die elektronischen Eigenschaften von Nanostrukturen in deutscher Sprache bietet. Alle derzeit verfügbaren Bücher über Nanostrukturen sind, soweit ich weiß, in englischer Sprache verfasst, und noch dazu hochgradig spezialisiert. Einige Bücher, die ich verwende, finden sie dann in der Literaturliste. Dem angehenden Diplomanden nützen diese Bücher aber wenig, ganz im Gegenteil, es drohen ihm im Angesicht der Unmenge von völlig unbekanntem Spezialausdrücken Haar- und Bartausfall, der dann nur noch mit genügend Bier bekämpft werden kann. Diplomandinnen scheinen eher Schokolade als Antidepressivum zu bevorzugen, hatte ich jedenfalls den Eindruck. Mein Vorschlag: Verschaffen Sie sich erst einmal einen Überblick mit Hilfe dieses Buches; die Übersetzungen der wichtigsten Spezialausdrücke finden Sie verstreut im Text. Anschließend sollte es Ihnen hoffentlich leichter fallen, die Spezialliteratur für Ihr persönliches Fachgebiet zu verstehen.

Schöne physikalische Effekte finden sich jedenfalls nur eher selten im Betriebsbereich der Haushaltselektronik. Wundern Sie sich also nicht, wenn von nun ab von flüssigem Helium geredet wird, über Temperaturen im Bereich von $T = 4\text{ K}$ oder darunter, und von Magnetfeldern im Bereich von $B = 10\text{ T}$ oder mehr. Falls Sie Probleme haben, sich diese Betriebsbedingungen vorzustellen: Wenn Sie einen Gummischlauch oder eine Blume auf Stickstofftemperatur ($T = 77\text{ K}$) abkühlen (ein beliebter Versuch in der Schule) und dann fallen lassen, zersplittert das wie Glas. Flüssiges Helium ist einfach nur noch kälter und daher massiv teurer als flüssiger Stickstoff. Für den Gummischlauch wäre das Abkühlen auf $T = 4\text{ K}$ Geldverschwendung, für niedrigdimensionale Elektronensysteme kommt man lei-

der nicht darum herum, wenn man etwas Vernünftiges messen will. Was passiert nun bei $B = 10 \text{ T}$? Wir haben einen Magneten, der bei Raumtemperatur ein Feld von $B = 0.5 \text{ T}$ liefert. Sollten sie zufällig mit Ihrer mechanischen Armbanduhr am Handgelenk in diesem Magnetfeld herumhantieren, brauchen Sie anschließend eine Neue. Rein elektronische Armbanduhren werden wohl die Zeit nicht mehr ganz richtig anzeigen. Ein Schraubenschlüssel wird Ihnen bei dem Magnetfeld einfach aus der Hand gerissen und aus dem laufenden Magneten bekommen Sie den dann auch nicht mehr so einfach heraus. Bei einem Feld von $B = 10 \text{ T}$ im supraleitenden Magneten ist das Streufeld so groß, dass damals, gegen Ende des letzten Jahrtausends, auf den alten Röhrenmonitoren im Nachbarlabor das Bild um mindestens 30° gedreht war, und zusätzlich schöne, oft auch irreversible Farbeffekte am Monitor beobachtet werden konnten. Das war aber bei den Kollegen im Nachbarlabor eher unbeliebt, kann ich ihnen schriftlich versichern.

Langer Rede, kurzer Sinn: Schöne Physik findet man in der Halbleitertechnik nur unter eher extremen Betriebsbedingungen, und die zugehörigen Berechnungen sind dann auch nicht mehr für einen simplen Taschenrechner geeignet. Da das alles nichts mehr mit Populärwissenschaften zu tun hat, welche man bei Wikipedia nachlesen kann, musste der Inhalt der folgenden Kapitel mühsam aus Originalarbeiten und entsprechenden Übersichtsartikeln zusammengetragen werden. Die Quellen finden Sie im Literaturverzeichnis.

Genau wie im ersten Buch, wird auch hier nicht einmal der Versuch unternommen, das Gebiet der niedrigdimensionalen Elektronensysteme auch nur annähernd komplett abzudecken. Das Buch soll nur einen ausreichend guten Einstieg in die Materie bieten, so dass ein selbständiges Studium tieferer Probleme möglich ist. Vorschläge für Verbesserungen und Ergänzungen, sowie Hinweise auf Fehler und werden natürlich dankend angenommen und selbstverständlich auf der Liste der Helden von Haegrula (siehe weiter hinten) namentlich verewigt.

Wien 2018

Jürgen Smoliner

Dank

Alle Kapitel im Teil II dieses Buches stammen aus der Urzeit des Vorlesungsskriptums „Halbleiterelektronik“ (intern als Haegrula-Saga bekannt) und wurden von den Dinosauriern dieses Projekts korrigiert. Das Buch wäre in dieser Qualität ohne den selbstlosen und heldenhaften Einsatz der hier aufgelisteten Studenten und Studentinnen niemals entstanden. Hier ist die Liste der Heldinnen und Helden von Haegrula-II und deren Heldentaten im Detail:

- Michael Eberhardt, Sebastian Kral, Martin Kriz und Paul Marko waren meine LATEX-Ghostwriter der ersten Stunden und entzifferten im Jahre 2010 mit endloser Geduld mein handgeschmiertes Originalskriptum. Sie legten den Grundstock für das vorliegende Buch.
- Hilfe hatten sie dabei von Thomas Hartmann bekommen, der sich schon 2009 bemüht hatte, das Originalskriptum in ein MS-Word-2007 Dokument zu verwandeln. Leider war dieses Dokument nicht sehr kompatibel mit anderen Plattformen, und so dauerte es bis zum Jahr 2010, ehe die darin enthaltenen Formeln mittels Mathtype 6.0 und LATEX recycelt werden konnten.
- Weitere Unterkapitel aus den frühen Anfangszeiten dieser Vorlesung wurden beigesteuert von Clemens Novak und Andreas Worliczek.
- Das Originalskriptum in den Versionen 1.x.x korrigierten Tobias Flöry, Martin Janits, Gerhard Rzepa, und Stefan Wagesreither.
- Um das Skriptum in den Versionen 2.x.x bemühten sich Manuel Messner, Christian Hölzel, Peter Gruber, Thomas Kadziela, Günther Mader, Elisabeth Wistrela, Rüdiger Sonderfeld, Lukas Dobusch und Nikolaus Lehner.
- Ein neuer Abschnitt zum Thema Wellenpakete entstand aus den Anregungen von David Feilacher. Diskussionen mit Sana Zunic führten zu wichtigen Ergänzungen und Korrekturen zum Thema Unschärferelation.
- Korrekturen und Vorschläge zur Verbesserung des Skriptums in den Versionen 3.3.x wurden beigesteuert von den Studenten Sebastian Glassner, Markus Kampl, Christian Hartl, Jürgen Meier, Dominic Waldhör, Gernot Fleckl, und Marko Stübbeger.

- Korrekturen und Vorschläge zur Verbesserung des Skriptums in den Versionen 3.4.x, besonders im Kapitel „Unschärferelation“, verdanke ich Theresia Knobloch, Michael Stückler und meinem Kollegen Hans Kosina.
- Wir schreiben inzwischen das Jahr 2017, und es werden erste Anstrengungen unternommen, die Kapitel über die niedrigdimensionalen Elektronensysteme so zu modernisieren, dass sie in Buchform erscheinen können. Zu diesem Zweck wurden zuerst ein paar angeschimmelte Abbildungen entfernt und durch neue ersetzt. Schöne Originalbilder rückt aber auch nicht jeder heraus. Mein ausdrücklicher Dank geht daher an Herrn Dr. Hans Werner Schumacher, Department 2.5, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Deutschland, für die Bilder im Abschnitt über die Elektronenpumpen.
- Der erste Held des Skriptums in der Version 5.x.x ist Michael Hauser. Während der Prüfungsvorbereitung rechnete er vieles nach und fand auf diese Weise 32 größere Probleme im Skriptum, welche ich dann etwas mühselig beseitigen durfte.
- Gegen Ende 2017 wird das Buchprojekt konkreter. Das Gesamtkunstwerk ist nun in die Haegrula Sage I+II aufgespalten. Patrick Fleischanderl las endlich einmal gründlich die Kapitel über die niedrigdimensionalen Elektronensysteme und entdeckte dort noch viele Fehler. Alle hat er aber bei weitem nicht gefunden, denn Marie Ertl fand noch immer eine große Anzahl von Peinlichkeiten in den hinteren Kapiteln. Simon Howind fand weitere kleinere Irrtümer.
- Im Frühjahr 2018 ist es offiziell: Die Kapitel über die niedrigdimensionalen Elektronensysteme werden in Buchform mit dem Titel „Grundlagen der Halbleiterphysik II“ erscheinen. Edwin Willegger ist der erste Held der Buchausgabe dieses Skriptums.
- Lukas Wind bewahrte meine Ehre. Dank Ihm gibt es jetzt 41 peinliche Fehler weniger im Text. Inkonsistenzen beim Formelwerk im Abschnitt über BEEM wurden dank seiner Hinweise ebenfalls beseitigt.
- Ich liebe diesen Deal, der schon seit Jahren lautet: Jeder gefundene inhaltliche Fehler im Buch erspart dir eine Prüfungsfrage. Manuel Reichenpfader machte auf diese Weise ca. vier Prüfungen in Halbleiterelektronik auf einmal und ging mit der Note „sehr gut“ zufrieden nach Hause. Ich ging auch zufrieden nach Hause, denn Sie müssen sich jetzt nicht mehr über ca. 20 unnötige Fehler im Buch und über meine sonstigen Schlampereien ärgern.
- Zum Schluss ergeht mein ganz besonderer Dank nochmals an unseren Institutsvorstand Prof. Dr. Emmerich Bertagnolli für seine endlose Toleranz gegenüber den diversen Interessenkonflikten während der Erstellung des zweiten Teils dieses Buches.

Inhaltsverzeichnis

1	Quantenmechanik: Numerische Methoden	1
1.1	Ohne Numerik kommt man nicht weit	1
1.2	Numerische Berechnung von Energiezuständen in einer Dimension	2
1.3	Eigenzustände in zwei Dimensionen	5
1.4	Numerische Berechnung von Transmissionskoeffizienten	9
1.5	Transfer-Matrix-Formalismus und Wellenfunktionen	11
1.6	$k_{ }$ kann garstig sein: Brechung mit Elektronen	13
1.7	Transfer-Matrix-Formalismus mit Brechung	15
1.8	Anwendung: Tunnelströme	18
2	Zweidimensionale Elektronengase	23
2.1	Die Niederungen der niedrigdimensionalen Halbleiterphysik	23
2.2	2-D-Elektronengase im HEMT: Sterns Modell	24
2.3	2-D-Energiezustände und Selbstkonsistenz	28
2.3.1	Die Poisson-Gleichung für stückweise konstante Ladungsdichten	28
2.3.2	Die Poisson-Gleichung für beliebige Ladungsverteilungen	29
2.3.3	Selbstkonsistenz und die Schrödinger-Gleichung	31
2.4	Das 2-DEG im Magnetfeld	33
2.4.1	Die Zustandsdichte im Magnetfeld	35
2.4.2	Shubnikov-de-Haas-Effekt	37
2.4.3	Der Quanten-Hall-Effekt	41
3	Eindimensionale Elektronensysteme	47
3.1	Quantendrähte und Nanodrähte: Was bringen die?	47
3.2	Herstellung von Quantendrähten	48
3.3	Klassische Transporteffekte im schwachen Magnetfeld	53
3.4	Quantenmechanische 1-D-Effekte	57
3.4.1	1-D-Systeme im starken Magnetfeld	57
3.4.2	Magnetophononstreuung in Quantendrähten	64

3.5	1-D-Effekte in 2-D-Elektronensystemen	67
3.5.1	Ballistischer 1-D-Transport	67
3.5.2	Der Quanten Hall Effekt als 1-D-Phänomen	69
3.5.3	Graphen: Ein zweidimensionales 1-D-Material	75
3.6	Selbstorganisierte Quanten- und Nanodrähte	81
3.6.1	Kohlenstoff-Nanoröhrchen	81
3.6.2	Halbleiter-Nanodrähte	86
3.6.3	Ein piezoelektrisches Nanodraht-Array	88
3.6.4	Thermoelektrische Effekte	89
4	Nulldimensionale Elektronengase	95
4.1	Typische Anwendungen	95
4.2	Selbstorganisierte Nanokristalle und InAs-Quantenpunkte	96
4.2.1	Selbstorganisierte Nanokristalle	96
4.2.2	Selbstorganisierte InAs-Quantenpunkte	97
4.3	Strukturierte Quantenpunkte	100
4.3.1	Coulomb-Blockade	101
4.3.2	Der Single-Electron-Transistor	105
4.3.3	Elektronenpumpen als Stromnormal	111
4.3.4	Elektronenpumpen mit konstanten Barrieren	112
4.3.5	Elektronenpumpen mit steuerbaren Barrieren	113
4.3.6	SET-Präzisionspumpen	114
4.3.7	Das Metrology Triangle	116
4.4	Der Aharonov-Bohm-Effekt	117
4.5	Zelluläre Quantenautomaten	118
4.6	Quantencomputer: Braucht man die überhaupt?	122
4.6.1	Das RSA-Kryptosystem	124
4.6.2	Der Shor-Algorithmus	126
4.6.3	Das Mc Eliece-Kryptosystem	128
	Literatur	131
	Sachverzeichnis	135