

**Einfluss von selbstkonsistenten  
Umverteilungen und  
Elektron-Phonon-Wechselwirkung auf  
kollektive Anregungen in  
niedrig-dimensionalen  
Elektronensystemen**

Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
des Fachbereichs Physik  
der Universität Hamburg



vorgelegt von  
**Karsten Bittkau**  
aus Hamburg

Hamburg  
2004

Gutachter der Dissertation:	Prof. Dr. D. Heitmann Prof. Dr. D. Pfannkuche
Gutachter der Disputation:	Prof. Dr. D. Heitmann Prof. Dr. W. Hansen
Datum der Disputation:	13.04.2004
Vorsitzender des Prüfungsausschusses:	Dr. D. Grundler
Vorsitzender des Promotionsausschusses:	Prof. Dr. R. Wiesendanger
Dekan des Fachbereichs Physik:	Prof. Dr. G. Huber

Berichte aus der Physik

**Karsten Bittkau**

**Einfluss von selbstkonsistenten Umverteilungen  
und Elektron-Phonon-Wechselwirkung  
auf kollektive Anregungen in  
niedrig-dimensionalen Elektronensystemen**

Shaker Verlag  
Aachen 2004

**Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek**

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

Zugl.: Hamburg, Univ., Diss., 2004

Copyright Shaker Verlag 2004

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-2785-7

ISSN 0945-0963

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • eMail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Inhaltsangabe

Für das Verständnis von niedrig-dimensionalen Elektronensystemen sind die Auswirkungen von Vielteilchen-Effekten auf die kollektiven, optischen Anregungen von Bedeutung.

Die Intersubbandresonanz in einem tunnelgekoppelten, doppelagigen, zwei-dimensionalen Elektronengas in GaAs zeigt bei einer asymmetrischen Potenzialform durch Variation des äußeren Magnetfeldes Oszillationen. Um dieses Verhalten zu studieren, wurden in dieser Arbeit im Rahmen von Vielteilchen-Rechnungen die Schrödinger-Gleichung und die Poisson-Gleichung iterativ gelöst. Dadurch konnte gezeigt werden, dass die Oszillationen durch selbstkonsistente Umverteilungseffekte erklärt werden können.

Basierend auf InAs/InGaAs/InAlAs-Heterostrukturen kann die Dimensionalität des Elektronengases von 2D bis zu 0D reduziert werden. Hierzu wurden mithilfe der holografischen Lithografie *Arrays* aus Quantenpunkten und Quanten-Antipunkten hergestellt. An diesen Strukturen wurden die Ferninfrarot-(FIR-)Transmissions- und Photoleitungsspektroskopie durchgeführt. In den von solchen Systemen bekannten, kollektiven Anregungen konnten Auswirkungen von Vielteilchen-Effekten beobachtet werden.

Hierbei wurde insbesondere die Elektron-Phonon-Wechselwirkung studiert. Durch ein äußeres Magnetfeld konnten die kollektiven Anregungen durch den Bereich der optischen Phononen gestimmt werden. In der Umgebung der transversal optischen (TO) und longitudinal optischen (LO) Phononen wurden in den Spektren Aufspaltungen beobachtet. Diese konnten durch die Kombination von dielektrischen Absorptionsrechnungen mithilfe der Transfer-Matrix-Methode und der mikroskopischen Kopplung der elektronischen Anregungen mit den LO-Phononen erklärt werden.

Des Weiteren wurden strom- und temperaturabhängige Photoleitungsmessungen durchgeführt. Hierdurch konnte gezeigt werden, dass sich die Intensität des Messsignals unterhalb des Bereiches der Elektron-Phonon-Wechselwirkung durch das bolometrische Modell beschreiben lässt. Im Phonon-Regime wurden deutliche Abweichungen festgestellt.

# Abstract

The influence of many-particle effects on collective optical excitations is important for the understanding of the physics of low-dimensional electron systems.

In a tunneling coupled bilayer system in GaAs, it can be observed that the intersubband transition energy shows an oscillation depending on the applied magnetic field for an asymmetric potential shape. To study this behaviour, many-particle calculations are performed in this thesis by solving both the Schrödinger and the Poisson equation iteratively. It is found that the oscillation can be explained by self-consistent redistribution effects.

Based on InAs/InGaAs/InAlAs-heterostructures, the dimensionality of the electron gas can be reduced from 2D down to 0D by fabricating periodic arrays of quantum dots and quantum antidots with holographic lithography. Far-infrared (FIR) transmission and photoconductivity spectroscopy on these structures are performed. In the expected collective excitations of those systems influences of many-particle effects are observed.

In this thesis, the electron-phonon interaction is studied in particular. By applying a magnetic field, the collective excitations can be tuned through the regime of the optical phonons. In the vicinity of both the transversal optical (TO) and longitudinal optical (LO) phonons, anticrossings of the collective excitations are observed in the spectra. With the combination of dielectric absorption calculations by using the transfer-matrix method, and the microscopical coupling of the electronic excitation with the LO phonons, the experimentally observed splittings can be described.

Furthermore, both temperature and current dependent photoconductivity measurements are performed. According to the results, it is shown that the intensity of the signal below the phonon regime can be described by the bolometric model. In the vicinity of the optical phonons, strong deviations are found.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsangabe</b>	<b>I</b>
<b>Abstract</b>	<b>II</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>4</b>
2.1 2D-Elektronengas im Magnetfeld . . . . .	4
2.2 Selbstkonsistente Rechnung . . . . .	6
2.3 0D-Elektronengas im Magnetfeld . . . . .	9
2.3.1 Quantenpunkte . . . . .	9
2.3.2 Quanten-Antipunkte . . . . .	10
2.4 Elektron-Phonon-Wechselwirkung . . . . .	11
2.5 Dielektrische Rechnungen . . . . .	15
<b>3 Präparation</b>	<b>17</b>
3.1 HEMT-Struktur . . . . .	17
3.2 Laterale Strukturierung . . . . .	17
3.2.1 Holografische Lithografie . . . . .	17
3.2.2 Ätztechniken . . . . .	20
3.2.3 Präparation von Hallbars . . . . .	21
<b>4 Messmethoden</b>	<b>23</b>
4.1 Transmissionsspektroskopie . . . . .	24
4.2 Magnetotransportmessungen . . . . .	25
4.3 Photoleitfähigkeitsmessungen . . . . .	26
4.3.1 Spektral integrierte Photoleitung . . . . .	27
4.3.2 Photoleitungsspektroskopie . . . . .	28
<b>5 Selbstkonsistente Umverteilungseffekte</b>	<b>30</b>
5.1 Einführung . . . . .	30
5.2 Theoretische Beschreibung . . . . .	32

5.3	Ergebnisse . . . . .	33
<b>6</b>	<b>Kollektive Anregungen in 0D-Elektronensystemen</b>	<b>41</b>
6.1	Einführung . . . . .	41
6.2	Transmissionsmessungen an Quantenpunkt- <i>Arrays</i> . . . . .	43
6.3	Photoleitungsmessungen an InAs-Antidot- <i>Arrays</i> . . . . .	48
6.3.1	Photoleitungsspektroskopie . . . . .	50
6.3.2	Stromabhängigkeit . . . . .	53
6.3.3	Temperaturabhängigkeit . . . . .	55
<b>7</b>	<b>Elektron-Phonon-Wechselwirkung</b>	<b>60</b>
7.1	Einführung . . . . .	60
7.2	Experimentelle Ergebnisse . . . . .	63
7.3	Dielektrische Rechnungen . . . . .	66
7.4	Polaron-Kopplung . . . . .	75
7.5	Temperaturabhängigkeit . . . . .	80
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>83</b>
<b>A</b>	<b>Probenstrukturen</b>	<b>87</b>
<b>B</b>	<b>Programmparameter</b>	<b>89</b>
B.1	Selbstkonsistente Rechnungen . . . . .	89
B.2	Dielektrische Rechnungen . . . . .	91
	Literaturverzeichnis	92
	Tagungsbeiträge	99
	Veröffentlichungen	100
	Danksagung	101