

Masterarbeit

Fluktuationsspektroskopie an
zweidimensionalen Elektronensystemen
in GaAs/AlGaAs-Heterostrukturen

Berit Körbitzer

Oktober 2012

Physikalisches Institut
Johann Wolfgang Goethe-Universität
Frankfurt am Main

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	3
1. Elektronische Fluktuationen in Halbleitern	6
1.1. Halbleiterphysik	6
1.1.1. Eigenschaften von Halbleitern	6
1.1.2. Elektronischer Transport	8
1.1.3. Zweidimensionales Elektronengas (2DEG)	11
1.1.4. Zweidimensionales Elektronengas im Magnetfeld	13
1.1.5. DX-Zentren	17
1.2. Elektronische Fluktuationen in Festkörpern	19
1.2.1. Mathematische Beschreibung	19
1.2.2. Rauscharten	21
1.2.3. Modelle für $1/f$ -Rauschen	24
1.3. $1/f$ -Rauschen in Halbleitern	27
1.3.1. Fluktuationsmessungen an 2DEG	27
2. Probenpräparation	29
2.1. Strukturierung	30
2.1.1. Vorbereitung	31
2.1.2. Rotationsbeschichtung	32
2.1.3. Photolithographie	33
2.1.4. Entwicklung	34
2.1.5. Nasschemisches Ätzen	34
2.1.6. Entfernen des Photolacks	35
2.2. Kontaktierung des 2DEG	36
2.3. Herstellung des Gates	36
2.4. Aufbringen der Probe auf den Probenhalter	37
3. Experiment	38
3.1. Elektronische Transportmessungen	38

3.2. Fluktuationsspektroskopie	39
3.2.1. 5-Punkt-Messung	43
3.2.2. 6-Punkt-Messung	45
3.2.3. Cross-Spektrum	46
3.3. Kryostate	46
4. Messungen und Ergebnisse	49
4.1. Probe PL200509a, GEN224	49
4.1.1. Charakterisierung	49
4.1.2. Widerstandsrauschen	51
4.2. Probe PL080212-4, GEN221	56
4.2.1. Charakterisierung	56
4.2.2. Widerstands- und Hall-Rauschen	58
4.2.3. Gate-Abhängigkeit des Hall-Rauschens	69
Zusammenfassung	72
A. Anhang	74
A.1. AlAs-Quantentopf	74
A.2. Rauschen im Quanten-Hall-Effekt	77
Literaturverzeichnis	79

Einleitung

In dieser Arbeit werden GaAs/AlGaAs-Heterostrukturen, die ein zweidimensionales Elektronengas ausbilden, mittels Fluktuationsspektroskopie untersucht. Die Methode der Fluktuationsspektroskopie erlaubt es, die Dynamik der Elektronen bei niedrigen Frequenzen zu studieren. Dies ermöglicht einen Rückschluss auf intrinsische Eigenschaften der Leitfähigkeit wie zum Beispiel die Wechselwirkungen der Elektronen mit Defekten. Die verwendeten Heterostrukturen weisen eine hohe Elektronenmobilität auf und werden auch als Sensoren für die Mikro-Hall-Magnetometrie verwendet [1].

Halbleitertechnologie ist die Grundlage eines Großteils der heutigen Elektronik und damit ein unverzichtbarer Bestandteil unseres Lebens. Dementsprechend gut sind die physikalischen Eigenschaften von vielen Halbleitern erforscht und die Prozesse zum Herstellen von Halbleiterbauelementen bekannt. Seit der Entdeckung des Germanium-Transistors im Jahr 1947 [2], ist die Entwicklung rasant vorangeschritten. Ein weiterer Meilenstein war 1979 die erste Realisierung eines zweidimensionalen Elektronengases (2DEG) in einer GaAs/AlGaAs-Heterostruktur [3].

Sowohl für die Grundlagenforschung als auch für elektronische Anwendungen sind zweidimensionale Elektronengase von anhaltendem Interesse. Sie können mittels Molekularstrahlepitaxie in fast beliebiger Schichtzusammensetzung hergestellt werden und zeigen interessante Eigenschaften, wie eine hohe Ladungsträgermobilität bei gleichzeitig hoher Ladungsträgerkonzentration. An ihnen wurden Effekte gefunden, wie zum Beispiel der ganzzahlige und der fraktionale Quanten-Hall-Effekt, und sie eignen sich für die Umsetzung von Festkörper-Quantenbits, hochgeschwindigkeits-modulationsdotierten Feldeffekt-Transistoren und hochsensitiven Hall-Magnetometern.

Diese Mikro-Hall-Sensoren arbeiten zuverlässig in einem weiten Temperatur- und Magnetfeldbereich und sind geeignet, um nichtinvasive und hochempfindliche magnetische Messungen im Nanometerbereich durchzuführen (zum Beispiel [1, 4] und weiterführende Referenzen). Sogar über die Anwendung als Biosensoren wird geforscht [5].

Die Empfindlichkeit der Sensoren ist unter anderem durch das Signal-Rausch-Verhältnis beschränkt. Es ist daher interessant ihr Rauschverhalten zu kennen. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit die Charakterisierung des Rauschverhaltens über einen

großen Temperaturbereich an 2DEG Halbleiter-Heterostrukturen vorgenommen, die auch als Mikro-Hall-Magnetometer eingesetzt werden. Dazu wird die Fluktuationsspektroskopie eingesetzt. Ebenfalls interessant für diese Anwendung ist die Unterdrückung des Rauschens in einigen- μm -großen Strukturen durch eine moderate Gate-Spannung [6], was in dieser Arbeit bestätigt werden soll.

Ein Vorteil der Fluktuationsspektroskopie ist die energieaufgelöste Untersuchung von Leitfähigkeitsschwankungen. Darin sind oft Informationen enthalten, die über den Mittelwert des Widerstands nicht zugänglich sind. So lassen sich die intrinsischen Eigenschaften der Leitfähigkeit untersuchen und eventuell Rückschlüsse auf die Ursachen des Rauschens ziehen. Eine in der Literatur oft diskutierte Frage ist, ob das Rauschen von Fluktuationen der Ladungsträgeranzahl oder der Ladungsträgermobilität hervorgerufen wird [7, 8, 9]. Darüber hinaus lassen sich in Halbleitern bestimmte Defekte, wie zum Beispiel DX-Zentren, durch Rausch-Messungen identifizieren und ihre energetischen Eigenschaften untersuchen.

Der Inhalt dieser Arbeit gliedert sich wie folgt: Im ersten Kapitel werden die Grundlagen der Halbleiterphysik in Bezug auf zweidimensionale Elektronengase in Halbleiter-Heterostrukturen dargestellt, und es wird eine theoretische Einführung in die elektronischen Fluktuationen in Festkörpern gegeben. Abschließend werden einige Ergebnisse der Fluktuationsspektroskopie an Halbleiter-Heterostrukturen vorgestellt. Das zweite Kapitel beschäftigt sich mit der Probenpräparation. Hier wird die Herstellung der Proben mittels Photolithographie und nasschemischen Ätzens, sowie die Kontaktierung des 2DEG beschrieben. Im dritten Kapitel werden die Messmethoden und -techniken erläutert. Besonderes Augenmerk liegt hier auf der Methode der Fluktuationsspektroskopie. Das vierte Kapitel schließt sich mit der Darstellung und Diskussion der Messergebnisse an. Hier werden die Eigenschaften der untersuchten Proben beschrieben und die Ergebnisse gegenübergestellt. Zum Abschluss werden die Ergebnisse zusammengefasst und es wird ein Ausblick auf mögliche Fortsetzungen der Untersuchungen gegeben.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die elektronische Transporteigenschaften von Halbleiter-Heterostrukturen untersucht. Der Fokus lag dabei auf zwei Proben mit leicht unterschiedlichen GaAs/Al_{0,3}Ga_{0,7}As-Heterostrukturen, die mit verschiedenen großen photolithographisch hergestellten Hall-Kreuz-Strukturen und einem Gate zur Modulation der Ladungsträgerdichte präpariert wurden.

Die erste Probe (PL200509a) mit $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ großer Struktur wurde bei Temperaturen von 15 K bis 110 K gemessen, die zweite (PL080212-4) mit $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ großen Hall-Kreuzen von 600 mK bis 300 K. Die temperaturabhängig bestimmten Größen sind Ladungsträgerkonzentration n , Hall-Mobilität μ sowie die normierte spektrale Leistungsdichte S_R/R^2 und der Frequenzexponent α der Widerstandsfluktuationen. An der Probe mit der kleineren Struktur wurden zusätzlich noch die Fluktuationen des Hall-Widerstands sowie dessen Gate-Abhängigkeit gemessen und der Hooge-Koeffizient bestimmt.

Die Probe PL200509a zeigt bei Temperaturen unterhalb von 90 K mit einem Lorentz-Spektrum überlagerte $1/f$ -Spektren. In diesem Temperaturbereich verschiebt die Eckfrequenz, wobei sie aber nicht einem Arrhenius-Gesetz genügt. Folglich handelt es sich nicht um ein einfaches thermisch aktiviertes Verhalten. Alle weiteren Messgrößen sind wegen des kleinen Temperaturbereichs nur bedingt aussagekräftig; eine Untersuchung zu höheren Temperaturen hin wäre sinnvoll.

Die zweite Probe zeigt ebenfalls Lorentz-artige Spektren sowohl im Widerstandsrauschen als auch im Hall-Rauschen. Hier treten sie aber in einem anderen und kleineren Temperaturintervall (165 K bis 210 K) auf und ein Spektrum setzt sich zusätzlich zu dem $1/f$ -Spektrum aus bis zu drei einzelnen Lorentz-Anteilen zusammen. Aus der Arrhenius-Auftragung der Eckfrequenzen erhält man die Anregungsenergien der zugrunde liegenden Fluktuatoren. Sie sind alle recht ähnlich und liegen im Bereich von 140 meV bis 180 meV. Ebenso erhält man die Anschlagfrequenzen, die einige GHz betragen, und damit im Bereich von sehr kleinen Phononenfrequenzen liegen. Bei zwei weiteren Temperaturen werden sogar $1/f^2$ -Spektren beobachtet. Zur weiteren Analyse des $1/f$ -Anteils wird das DDH-Modell verwendet, welches den Temperaturverlauf des Frequenzexponen-

ten recht gut reproduziert. Daher sind die Annahmen des Modells hier gerechtfertigt, und es kann die Verteilung der Aktivierungsenergien bestimmt werden. Aus diesen Berechnungen erhält man Anregungsenergien im Bereich von 330 meV bis 490 meV sowohl aus den Widerstands- als auch den Hall-Widerstandsfluktuationen. Diese Energien werden in der Literatur mit DX-Zentren in Verbindung gebracht [20, 45]. Da sie aus dem Anteil des $1/f$ -Rauschens bestimmt wurden, handelt es sich um eine Überlagerung vieler unabhängiger Prozesse, die aufgrund der Energiesignatur auf DX-Zentren zurückgehen. In $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ mit $x \geq 0,2$ sind DX-Zentren die dominierenden Elektronenfallen. Das $1/f$ -Rauschen wird also durch DX-Zentren in der n- $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ -Schicht der Heterostruktur verursacht. Aufgrund der räumlichen Trennung koppelt das 2DEG nur schwach an diese Fluktuationen. Das sieht man auch daran, dass der Hooge-Koeffizient sehr klein ist.

Die Einzelprozesse hingegen haben kleinere Aktivierungsenergien von 140 meV bis 180 meV. In dem Temperaturbereich, in dem sie auftreten, ist der Hooge-Koeffizient deutlich erhöht. Dies und die Tatsache, dass einzelne Prozesse auflösbar sind, legt den Schluss nahe, dass die hierfür verantwortlichen Fluktatoren räumlich näher an dem 2DEG liegen und damit stärker daran koppeln. Energien in diesem Bereich werden in der Literatur Multiphononen-Einfang-Prozessen zugeordnet [20]. Dies ist ein in III-V Verbindungshalbleitern häufig auftretender Elektroneneinfang-Prozess.

Für die Anwendung dieser Heterostrukturen als Mikro-Hall-Magnetometer ist es interessant, dass die DX-Zentren nur in einem kleinen Temperaturbereich zum Rauschen beitragen. In diesem Bereich ist das Rauschniveau stark erhöht. Unterhalb von 100 K und oberhalb von 200 K ist das Rauschen aber niedrig und die Proben eignen sich hier gut als Sensoren für die Mikro-Hall-Magnetometrie.

Die beiden Proben können nur in einem kleinen Temperaturintervall miteinander verglichen werden. Zukünftige Untersuchungen sollten die Messungen von PL200509a bis zur Raumtemperatur vervollständigen. Da das Rauschniveau der Probe generell klein ist, dauert die Aufnahme eines auswertbaren Spektrums lange. Durch Automatisierung der Messungen (soweit möglich) und durch Verwendung einer schnellen Datenerfassungskarte und des entsprechenden Auswertungsprotokolls kann hier Zeit gespart beziehungsweise die Punktdichte erhöht werden. Für die weitergehende Interpretation der Ergebnisse ist eine Bandstrukturrechnung unerlässlich.