

Markku Schwarz

Darstellung der Forschungsaktivitäten

Ziel dieses Projektes ist es, die magnetischen Eigenschaften niedrigdimensionaler Elektronensysteme zu untersuchen. Im speziellen handelt es sich dabei um zunächst zweidimensionale Elektronensysteme (2DES) wie sie in AlGaAs/GaAs-Heterostrukturen in hoher Qualität durch MBE realisiert werden. Die 2DES werden mittels herkömmlicher optischer oder holographischer Lithographie lateral mikro- bzw. nanostrukturiert. Im Zentrum des Interesses steht bei den Experimenten der de Haas-van Alphen(dHvA)-Effekt der freien Elektronen. Dieser wurde in der Vergangenheit bei 3D-Metallen erfolgreich zur Bestimmung der Topologie von Fermiflächen eingesetzt. Im Falle niedrigdimensionaler Elektronensysteme erhält man, da im Falle von $T = 0$ die Magnetisierung M über $M = -\partial U/\partial B$ direkt mit der inneren Energie U verknüpft ist, einen Einblick in den elektronischen Grundzustand dieser Systeme.

Die im Experiment zu erwartenden Signalstärken liegen im Bereich weniger Bohrscher Magnetonen μ_B pro Elektron, was den Einsatz von hochempfindlichen Magnetometern erforderlich macht. Im Rahmen dieser Arbeit werden mikromechanische Cantilever-Magnetometer (MCM) aus GaAs eingesetzt (Abb. 1). Gemessen wird hierbei das im Magnetfeld auf ein magnetisches Moment \vec{m} wirkende Drehmoment $\vec{\tau} = \vec{m} \times \vec{B}$. Die durch das Drehmoment herbeigeführte Verbiegung des Cantilevers wird kapazitiv ausgelesen. Ein großer Vorteil dieser Technik ist, daß hierbei das zu untersuchende Elektronensystem in den Sensor integriert werden kann. Die hierzu benötigten speziellen Schichtsysteme werden in der MBE des Instituts für Angewandte Physik, Universität Hamburg gewachsen. Die weitere Präparation von MCM mit integriertem Elektronensystem erfolgt dann im Reinraum des Zentrums für Mikrostrukturforschung. Es kommen dabei Photolithographie und speziell für die Herstellung der MCM optimierte naßchemische Ätzprozesse zum Einsatz.

Die im bisherigen Verlauf der Arbeit hergestellten Sensoren erreichten eine Empfindlichkeit im Bereich von 10^{-15} J/T bei einem Feld von 10 T. Die zur Verfügung stehende Probenfläche beträgt dabei ca. 1 mm^2 . Die MCM werden in verschiedenen experimentellen Aufbauten verwendet, so daß Temperaturen im Bereich von 0.02 K (im ^3He - ^4He -Mischungskryostaten) bis etwa 20 K (im Vacuum-loading ^3He -Kryostaten) zur Verfügung stehen. Die im Experiment verwendeten Magnetfelder betragen bis zu 16 T.

Es wurden bislang Untersuchungen sowohl an ausgedehnten 2DES als auch an einem Array von auf $4 \times 4 \mu\text{m}^2$ mikrostrukturierten 2DES durchgeführt. Im Falle der ausgedehnten 2DES zeigten sich starke Signaturen, die sich in Abhängigkeit von der Ramprichtung des Magnetfeldes umkehren. Es handelt sich dabei um Nichtgleichgewichtsströme, die bei Magnetfeldern induziert werden für die im Magnetotransport $R_{xx} = 0$ beobachtet wird. Diese quasi-persistenten Ströme treten erst bei Temperaturen $T < 4 \text{ K}$ auf und weisen Zerfallszeiten von bis zu 20 Minuten auf. Im allgemeinen ist die Stärke der Signale unabhängig von der

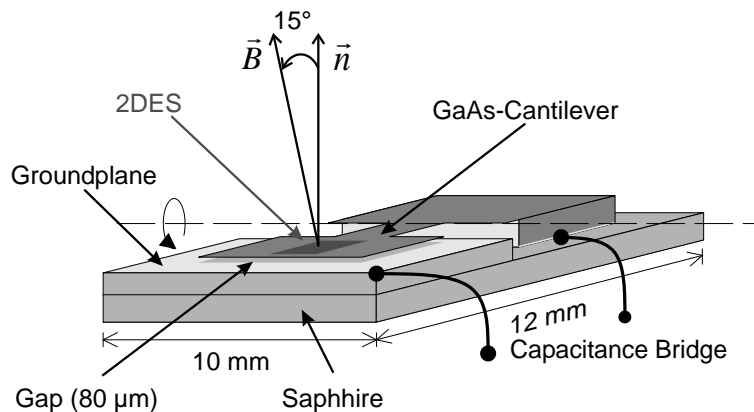


Abbildung 1: Schematische Darstellung des mikromechanischen Cantilever-Magnetometers. Der Cantilever ist von der Rückseite mit Gold beschichtet und bildet zusammen mit dem metallisierten Saphirsubstrat eine Kapazität, welche sich bei Verbiegung des Cantilevers gemäß $\Delta d/d = \Delta C/C$ ändert. Der Abstand zwischen Cantilever und Gegenelektrode beträgt $d \approx 80 \mu\text{m}$. Die Ebene des 2DES ist um 15° gegenüber der Achse des Magnetfelds verkippt.

Rate $\partial B/\partial t$, mit der das Magnetfeld geändert wird. Dieses Verhalten wird dann verständlich, wenn man annimmt, daß die quasi-persistenten Ströme mit absoluten Stärken von einigen $100 \mu\text{A}$ zum strominduzierten Zusammenbruch des Quantenhalfeffekts führen [C.L. Jones und A. Usher, *Solid St. Com.* **95**, 409 (1995); **97**, 763 (1996)].

Die Gleichgewichtsmagnetisierung, also der dhvA-Effekt, wird durch das Auftreten dieser um bis Faktor 1000 größeren Signalen praktisch unbeobachtbar. Es hat sich bislang bewährt, die Nichtgleichgewichtsströme durch kurzzeitiges starkes Beleuchten der Probe mit einer LED dauerhaft zu "quenchen" [1], [S.A.J. Wieggers, M. Specht, L.P. Lévy, M.Y. Simmons, D.A. Ritchie, A. Cavanna, B. Etienne, G. Martinez und P. Wyder, *PRL* **79**, 3238 (1997)]. Gleichzeitig wird durch den persistenten Photoeffekt die Ladungsträgerdichte n_s im 2DES um ca. Faktor 2 erhöht. Ähnliche Erfahrungen wurden bei Transportuntersuchungen zum Zusammenbruch des QHE in der Gruppe von S. Komiyama in Tokio gemacht. Ein Zusammenbruch des QHE bei deutlich kleineren Strömen nach starker Beleuchtung kann demnach mit einer verstärkten Streuung am steileren Randpotential erklärt werden.

Um die Stärke der induzierten Ströme drastisch zu reduzieren, wurden mikrostrukturierte 2DES präpariert. In dem Array aus $4 \times 4 \mu\text{m}^2$ großen Mesas ist die gemäß $U_i = A \partial B/\partial t$ induzierte Spannung um Faktor 4×10^{-6} gegenüber einem 2DES mit einer Fläche A von $2 \times 2 \text{mm}^2$ reduziert. Induzierte Nichtgleichgewichtsströme werden somit effektiv unterdrückt.

In einer solchen Probe konnte der dhvA-Effekt bereits im unbeleuchteten Fall beobachtet werden. Es wurde somit möglich, die Amplitude der Oszillationen als Funktion der Temperatur und der Ladungsträgerdichte n_s quantitativ zu untersuchen. n_s wurde dabei mittels des persistenten Photoeffekts in kleinen Schritten variiert. Es zeigt sich im Falle dieser Probe eine gute Übereinstimmung mit dem Verhalten, wie es sich aus der klassischen Theorie der Magnetooszillationen für nicht-wechselwirkende Elektronen ergibt [D. Shoenberg, *Magnetic Oscillations in Metals*, Cambridge University Press, (1984)]. Insbesondere die Magnetfeld- und Temperaturabhängigkeit der gemessenen Oszillationsamplituden konnte theoretisch beschrieben werden [2].

Ausblick

Aufgrund der hohen Empfindlichkeit der entwickelten Sensoren, wird neben weiterführenden Studien an Halbleiter-Heterostrukturen zukünftig die Untersuchung an einer Vielzahl von anderen Systemen möglich. So sollen auch ferromagnetische oder supraleitende Mikro- bzw. Nanostrukturen magnetisch charakterisiert werden. Eine einfache Abschätzung zeigt, daß aufgrund der höheren Permeabilität ein um den Faktor 10^7 größeres Signal entsteht, so daß auch im Bereich kleiner Felder die Empfindlichkeit ausreichen würde, um Signale einzelner Mikro- bzw. Nanostrukturen zu studieren. Strukturbreiten im Bereich einiger 100 nm sind problemlos mittels Elektronenstrahlolithographie zu realisieren und auf den Cantilever zu integrieren.

Publikationen

Angehörige und Gäste des Graduiertenkollegs sind unterstrichen

- [1] M. P. Schwarz, D. Grundler, I. Meinel, Ch. Heyn und D. Heitmann: *Micromechanical cantilever magnetometer with an integrated two-dimensional electron system*, Appl. Phys. Lett. **76**, 3564 (2000).
- [2] D. Grundler, H. Rolff, M.P. Schwarz, Ch. Heyn und D. Heitmann: Cantilever-magnetometry on microstructured two-dimensional electron systems, 2000.

Teilnahme an Tagungen

- 44th Annual Conference on Magnetism & Magnetic Materials
in San Jose, California, USA, November 1999
- 11. Internationale Winterschule des Fachausschusses Festkörperphysik der Österreichischen Physikalischen Gesellschaft
in Mauterndorf, Österreich, Februar 2000
- Frühjahrstagung des Arbeitskreises Festkörperphysik bei der DPG
in Regensburg, März 2000
- 50. Tagung der Nobelpreisträger
in Lindau, Juni 2000

Forschungsaufenthalte und eingeladene Vorträge

- "Cantilever-Magnetometrie an 2D-Elektronensystemen in AlGaAs/GaAs-Heterostrukturen"
Vortrag an der Universität Erlangen-Nürnberg
Einladung durch: Prof. P. Müller
in Erlangen, Juli 2000

- "Cantilever-Magnetometrie an 2D-Elektronensystemen"
Vortrag an der Universität Würzburg
Einladung durch: Prof. E. Batke
in Würzburg, Oktober 2000

Tagungsbeiträge als Mitautor

- "Magnetization Phenomena in 2D-Electron-Systems"
I. Meinel, M. P. Schwarz, J. Troeder, T. M. Hengstmann, Ch. Heyn,
D. Grundler, and D. Heitmann
11. Internationale Winterschule des Fachausschusses Festkörperphysik der
Österreichischen Physikalischen Gesellschaft
in Mauterndorf, Österreich, Februar 2000
- "High-Sensitive Cantilever-Magnetometry on 2D-Electron-Systems"
H. Rolff, M. P. Schwarz, D. Grundler, Ch. Heyn, and D. Heitmann
Frühjahrstagung des Arbeitskreises Festkörperphysik bei der DPG
in Regensburg, März 2000

Eigene Vorträge im Rahmen des Graduiertenkollegs

- "Magnetisierung niedrigdimensionaler Elektronengase"
GrK-Workshop 2000, in Schwerin, Oktober 2000