



Doctoral Thesis

MBE growth of ultrahigh-mobility 2DEGs in GaAs/AlGaAs

Author(s):

Reichl, Christian

Publication Date:

2014

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010346766> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. 22343

*MBE growth of ultrahigh-mobility
2DEGs in GaAs/AlGaAs*

A dissertation submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

Christian Reichl

Dipl. Phys. (Universität Regensburg)

born 13.03.1980

citizen of Germany

accepted on the recommendation of:
Prof. Dr. Werner Wegscheider, examiner
Prof. Dr. Klaus Ensslin, co-examiner
Dr. Vladimir Umansky, co-examiner

2014

Abstract

Over the last three decades there are few fields in semiconductor physics that have attained more attention than high mobility electron systems in reduced dimensions. Two-dimensional electron systems in semiconductors are one foundation of integrated circuits and therefore of any computer technology.

While the “digital age” is for the most part based on cost-efficient and reliable silicon structures, the performance of MBE-grown 2DEGs realized in the GaAs/AlGaAs material system outclasses silicon devices by several orders of magnitude, when investigated at very low temperatures $< 4\text{ K}$. Therefore GaAs/AlGaAs based 2DEG structures are a crucial prerequisite for many fields of modern semiconductor physics. A prominent example is the extremely fragile fractional quantum Hall state (FQHS) at filling factor $\nu = 5/2$, which could play an important role for the realization of fault-tolerant quantum computing.

To synthesize such 2DEG structures of extraordinary quality, the technique of molecular beam epitaxy is the method of choice. The goal of this work was to develop and prepare 2DEG samples of excellent quality, with a great freedom in desired parameters like electron density, depth of the conducting layer below the surface, incorporated gate layers or illumination behaviour. A special emphasis was laid onto the production of 2DEGs showing a stable $\nu = 5/2$ FQHS without the need to further process or manipulate the sample (e.g. by illumination).

In the first part of this thesis, we will review history and technical points of MBE-growth itself (chapter 2), followed by a short overview on the GaAs/AlGaAs material system and the design and historical development of GaAs/AlGaAs 2DEGs (which is closely connected to the history of MBE growth itself, covered in chapter 3).

After that, we will introduce the theoretical basics of the standard benchmark of 2DEG quality, the electron mobility: The Drude model, the classical Hall effect and the Van der Pauw characterization method. Then we will turn to the integer quantum Hall and the fractional quantum Hall effects (chapter 4). These considerations are important to understand the possible origin and physics of the still enigmatic FQHS at $\nu = 5/2$, whose characteristics are still not fully understood and which is one of the current “hot topics” of modern solid state physics (chapter 5).

As we aim to provide the research foundation for investigation of the $\nu = 5/2$ (and a variety of other, still not fully understood) FQHSs, we will then describe in detail the high-mobility MBE system we set up in our laboratory at ETH Zürich (chapter 6). To determine success or failure of our growth experiments, we implement low-temperature magnetotransport characterization. The different characterization setups that were implemented are described in chapter 7. The theoretical part is concluded with an overview of the “natural enemies” of an MBE grower trying to create high-quality samples: The different scattering mechanisms limiting the performance of 2DEGs (chapter 8).

In the second part we present our results in terms of increasing the quality of our structures to improve and enable investigations in a variety of projects. First of all, if one aims to improve the respective structures, one requires a high level of reproducibility and reliability both in actual growth operations and the following sample characterization. We developed techniques to significantly improve both, which allows us to judge the success or failure of a growth experiment with much higher precision. Also, we present a mapping of the magnetotransport characteristics of a full wafer, for the cases of rotated and unrotated growth respectively. This information greatly reduces the insecurity of the actual 2DEG characteristics in subsequent experiments, which are naturally performed on samples from different locations of a given substrate (chapter 9).

When optimizing growth parameters/sample characteristics, it is logical to start at the beginning. In our case, this is the beginning of a growth run, the base layers of any 2DEG structure. This base may contain a heavily doped layer acting as a backgate to tune the 2DEGs electron density. We present our technique to create large-area backgates with high tuning capabilities and moderate loss in sample quality. Additionally, we investigated the possibility of incorporating arbitrarily shaped backgates underneath our 2DEGs. While in principle successful, we find that our chemical preparation process requires further optimization (chapter 10).

Other than grown backgates, the application of (structured) metallic topgates onto a 2DEG structure is a standard procedure, suffers however from leakage currents that are transmitted by surface defects. In chapter 11, we investigate growth techniques to reduce the defect density on a 2DEG sample's surface by an order of magnitude, while keeping the inevitable loss of electron mobility at bay. Also, the influence of the applied crucible type for gallium is discussed.

In modern, high-quality 2DEG samples, the electron mobility is limited by the amount of residual particles in the UHV chamber, that are incorporated as a background of impurities during growth operations. In chapter 12, we concentrate on the contribution of source materials, effusion cells and substrate heating to the total impurity level (and therefore mobility limitation) in our setup. We present solutions to reduce these impurity levels without restricting the variability of growth parameters.

As electron mobility generally scales with the electron density of a 2DEG, ultra-high mobility samples are usually located in a rectangular quantum well, which is flanked by two layers of dopants and thus gains a cumulative electron density from these two layers. We discuss the implications of rectangular quantum well widths, as well as the role of the highly reactive aluminium residing at both boundaries of the quantum well. We provide an analysis of ideal quantum well widths and present a number of techniques to increase 2DEG mobility by reducing the aluminium content in the vicinity of the 2DEG (chapter 13).

The quality of a 2DEG structure is limited not only by background impurities, but also by the irregular coulomb potential stemming from ionized donor atoms. The effect of this process can be minimized by increasing the setback distance between donors and 2DEG. However, as increasing the setback also reduces the electron density of a given structure, we investigated the trade-off between these two effects, evaluating the optimum setback distance (in terms of total mobility achieved) for different types of structures (chapter 14).

Another approach to reduce the mobility limitation by ionized remote donors is to employ a screening layer of electrons or to induce a spatial correlation among ionized donors, both of which are capable of levelling the irregular coulomb potential. In chapter

15, we discuss the efficiency of the different techniques. Also, we give a quantitative estimation of the actual mobility limits caused by the three main scattering mechanisms – background impurities, remote ionized donors and interface roughness – in our top samples.

In chapter 16, we turn to the characterization and optimization of our high-quality structures with respect to the activation energy of the $\nu = 5/2$ FQHS, $\Delta_{5/2}$. Our focus lied hereby on increasing $\Delta_{5/2}$ for “as grown” samples, i.e. 2DEG structures without the need for processing that might inhibit their use for further research projects. We employed the same techniques as for our mobility optimizations, for example investigating the effects of growth temperature, general background impurity level and aluminium content in the vicinity of the 2DEG. Impressive results were achieved by minimizing the influence of remote ionized donors (as this mechanism is commonly accepted to govern the stability of $\Delta_{5/2}$), as we managed to increase the gap energy by a factor of four by increasing setback distance and applying “built-in” screening mechanisms. Finally, we suggest sample characteristics that may be used to establish a correlation between them and $\Delta_{5/2}$. This aims to provide reliable predictions on sample quality with respect to $\Delta_{5/2}$ from easier-to-access features, thus making future optimizations much more efficient.

Zusammenfassung

In den vergangenen drei Jahrzehnten haben nur wenige Bereiche in der Halbleiterphysik mehr Aufmerksamkeit erfahren und mehr an Wissen und Verständnis gebracht als hochbewegliche Elektronensysteme in reduzierten Dimensionen. Solche zwei-dimensionalen Elektronensysteme in Halbleitern sind die Grundlage integrierter Schaltkreise und somit der gesamten Computertechnologie.

Zwar basiert das "digitale Zeitalter" zum allergrößten Teil auf der bewährten und kostengünstigen Siliziumtechnologie, die Leistungsdaten von 2DEGs im GaAs/AlGaAs Materialsystem übertreffen die Siliziumtechnik jedoch um mehrere Größenordnungen, zumindest im Bereich tiefer Temperaturen $< 4K$. Daher stellen GaAs/AlGaAs basierte 2DEG-Strukturen eine der Grundlagen für zahlreiche Forschungsgebiete der aktuellen Halbleiterphysik dar. Ein prominentes Beispiel ist der äußerst empfindliche fraktionale Quanten-Hall Zustand, der bei einem Füllfaktor von $\nu = 5/2$ beobachtet werden kann. Er stellt einen vielversprechenden Kandidaten für die angestrebte Realisierung fehlertoleranten Quantencomputings dar.

Zur Erzeugung solcher 2DEGs von außerordentlich hoher Qualität ist das epitaktische Wachstum mittels Molekularstrahlepitaxie das einzig geeignete Mittel. Ziel dieser Arbeit ist es, 2DEG Proben zu entwickeln und zu präparieren, die bei exzellenter Qualität ein hohes Maß an Freiheit in der Wahl verschiedener Parameter bieten, wie zum Beispiel die Elektronendichte, Tiefe der leitenden Schicht unter der Probenoberfläche, Einbau elektrischer Gates oder Verhalten nach Beleuchtung. Besonderes Augenmerk liegt auf der Herstellung von Strukturen, die einen stabilen $\nu = 5/2$ Zustand aufweisen, und dies im "gewachsenen" Zustand, also ohne die Notwendigkeit, die Probe durch weitere Prozessschritte (etwa Beleuchten) vorzubereiten.

Im ersten Teil dieser Arbeit stellen wir Prinzip, Entwicklung und technische Einzelheiten des MBE-Wachstums von GaAs/AlGaAs vor (Kapitel 2). Es folgt ein Überblick über das Materialsystem selbst sowie über Design und historische Entwicklung hochbeweglicher 2DEG-Strukturen (dargestellt in Kapitel 3 und eng verbunden mit der Geschichte des MBE-Wachstums selbst).

Anschließend werden die theoretischen Grundlagen der Elektronenbeweglichkeit als Standardmaß für die Qualität einer 2DEG Struktur eingeführt: Das Drude-Modell für Beweglichkeit, der klassische Hall-Effekt und die Van der Pauw-Methode. Danach widmen wir uns der theoretischen Betrachtung des ganzzahligen und des gebrochenzahligen Quanten-Hall-Effekts (Kapitel 4). Diese sind wichtige Voraussetzungen für die Betrachtung des gebrochenzahligen Quanten-Hall-Effekts beim Füllfaktor $\nu = 5/2$, dessen Ursprung und physikalische Eigenschaften noch immer nicht vollständig verstanden sind (Kapitel 5). Daher zählt der $5/2$ FQHS zu den interessantesten Phänomenen der aktuellen Festkörperphysik.

Da diese Arbeit sich auf Herstellung und Optimierung der experimentellen Grundlagen zur Erforschung dieses (und einer Reihe anderer, ebenso rätselhafter) Quantenzustände konzentriert, geben wir eine detaillierte Beschreibung unserer Molekularstrahlepitaxieanlage, die wir an der ETH Zürich aufgebaut haben (Kapitel 6).

Um Erfolg oder Misserfolg dieser Bemühungen zu ermitteln, verwenden wir eine Reihe verschiedener Messaufbauten zur Charakterisierung der Magnetotransporteigenschaften unserer 2DEG-Strukturen. Diese Aufbauten werden in Kapitel 7 beschrieben. Der theoretische Teil dieser Arbeit schließt mit einer Übersicht über die “natürlichen Feinde” eines Wissenschaftlers, der sich der Herstellung hochwertiger 2DEG-Strukturen mittels MBE widmet: Den verschiedenen Streuprozessen, welche die elektrischen/magnetischen Eigenschaften (insbesondere Beweglichkeit) solcher Strukturen limitieren (Kapitel 8).

Im zweiten Teil präsentieren wir unsere Ergebnisse zur Verbesserung der Qualität unserer Halbleiterstrukturen, die eine Reihe von Forschungsprojekten unterstützen bzw. überhaupt erst ermöglicht haben. Versucht man eine 2DEG-Struktur zu optimieren, stellt sich zunächst die Frage nach Genauigkeit und Zuverlässigkeit sowohl des Wachstumsprozesses wie auch der anschließenden Charakterisierung. Hierzu wurden Techniken entwickelt, die beides wesentlich verbessern, so dass Erfolg oder Misserfolg eines Wachstumsexperiments mit weit höherer Präzision bestimmt werden kann. Darüber hinaus haben wir einen kompletten Wafer hinsichtlich seiner Magnetotransporteigenschaften charakterisiert, und zwar für den Fall des rotierten und des unrotierten Wachstums. Diese Information erleichtert die Auswahl geeigneter Proben für weiter gehende Experimente, da jene natürlicherweise aus verschiedenen Bereichen eines gegebenen Wafers entnommen werden, und daher in ihren Charakteristika voneinander abweichen (Kapitel 9).

Versucht man sich an der Optimierung von Wachstumsparametern/Probencharakteristika, ist es nur folgerichtig, am Anfang zu beginnen: Bei der Basis der hochbeweglichen 2DEG-Strukturen. Die Basisschichten können beispielsweise eine Lage stark dotiertes GaAs enthalten, welche dann als Backgate verwendet wird, um die Elektronendichte des 2DEGs zu manipulieren. Es ist uns gelungen, Backgates mit großem nutzbarem Spannungsbereich zu entwickeln, deren Präsenz die Beweglichkeit des darüberliegenden 2DEGs nur unwesentlich beeinflusst. Außerdem untersuchen wir die Möglichkeit strukturierter Backgates, z.B in der Form einer Hallbar oder für die Verwendung als pinch-off gate. Prinzipiell waren unsere Versuche erfolgreich, jedoch bedarf der erforderliche chemische Reinigungsprozess zwischen den einzelnen Wachstumsschritten noch weiterer Verbesserungen, um die Ausbeute brauchbarer Proben zu erhöhen (Kapitel 10).

Anders als bei (strukturierten) Backgates ist der Einsatz metallischer Topgates eine Standardprozedur. Diese Technik leidet allerdings unter Leckströmen zwischen Gate und 2DEG, die durch tiefreichende Kristalldefekte an der Probenoberfläche verursacht oder begünstigt werden. In Kapitel 11 entwickeln wir Methoden des MBE-Wachstums, mit der die Dichte solcher Defekte um eine Größenordnung reduziert werden, während sich die unvermeidlichen Verluste an Beweglichkeit in Grenzen halten. Die Untersuchung umfasst auch den Einfluss der Gallium-Effusionszellen auf Defektdichte und Beweglichkeit.

In modernen hochbeweglichen 2DEGs wird die Beweglichkeit hauptsächlich durch geladene Hintergrundverunreinigungen begrenzt. Dabei handelt es sich um Restgasatome in der UHV-Kammer, die während des Wachstumsprozesses zwangsläufig in den Halbleiterkristall eingebaut werden. In Kapitel 12 widmen wir uns daher der Reduzierung dieser Hintergrundverunreinigungen, die von verschiedenen Quellen herrühren: Den Wachstumsmaterialien, Effusionszellen und der Substratheizung. Wir präsentieren Lösungen zur

Verbesserung der Probenqualität, ohne dabei die große Bandbreite einstellbarer Parameter (Elektronendichte, Tiefe des 2DEG unter der Oberfläche etc.) einzuschränken.

Die Beweglichkeit skaliert nicht nur mit der Kristallqualität, sondern auch mit der Elektronendichte im 2DEG. Ein probates Mittel, diese zu erhöhen besteht darin, das Elektronengas in einem symmetrischen Quantenfilm zu erzeugen, der zu beiden Seiten von einer Dotierschicht flankiert wird. Auf diese Weise profitiert die Elektronendichte von zwei Dotierschichten. In Kapitel 13 diskutieren wir die Probleme, die bei der Verwendung solcher Quantenfilme auftreten, insbesondere am “unteren” Heteroübergang von AlGaAs zu GaAs. Außerdem widmen wir uns der Rolle des hoch reaktiven Aluminiums in der unmittelbaren Umgebung des Quantenfilms (und damit des 2DEGs). Wir analysieren die ideale Breite eines 2DEG-Quantenfilms und stellen mehrere Techniken vor, wie sich durch die Reduktion des Aluminiumanteils in seiner Umgebung die Beweglichkeit deutlich steigern lässt.

Als limitierender Faktor der Probenqualität treten aber nicht nur Hintergrundverunreinigungen auf, sondern auch das unregelmäßige Coulomb-Potential, das von entfernten ionisierten Störstellen (also Dotier-Atomen) in der Struktur verursacht wird. Wir zeigen, in welchem Maße der Effekt dieses Störprozesses durch Erhöhen des Abstands zwischen 2DEG und Dotierung abgeschächt werden kann. Allerdings geht eine solche Erhöhung des Abstandes auch immer mit einer Reduktion der Elektronendichte einher. Unsere Untersuchungen liefern den optimalen Kompromiss zwischen diesen beiden entgegengesetzten Effekten für verschiedene Arten von hochbeweglichen Strukturen (Kapitel 14).

Eine andere Möglichkeit, den schädlichen Einfluss entfernter ionisierter Donatoren abzumildern, besteht darin, ihn durch eine zusätzliche Schicht von Elektronen abzuschirmen, oder eine regelmäßige Anordnung der ionisierten Donatoren zu erzwingen. Die Anwendbarkeit und Effizienz dieser Techniken sind Gegenstand von Kapitel 15. Zusammen mit den Erkenntnissen aus dem vorigen Kapitel erlauben die dabei gewonnen Erkenntnisse eine quantitative Abschätzung der relativen Beiträge der drei wichtigsten Störprozesse: Geladene Hintergrundverunreinigungen, entfernte ionisierte Störstellen und Grenzflächenrauigkeit am (an den) Heteroübergang (-übergängen).

In Kapitel 16 wenden wir uns schließlich der Ausprägung und Stabilität des $5/2$ FQHSs in unseren hochbeweglichen Strukturen zu. Besonderes Augenmerk liegt dabei darauf, die Aktivierungsenergie des $5/2$ -Zustandes zu erhöhen, und zwar für Proben im “gewachsenen” Zustand, also ohne dass ihre Eigenschaften mittels Beleuchtung oder Gates optimiert werden (müssen). Vergleichbar zu unseren Bemühungen hinsichtlich der Elektronenbeweglichkeit untersuchen wir den Einfluss von Material-, Wachstums- und Strukturparametern. Besondere Erfolge wurden dabei durch die Reduktion des Einflusses entfernter ionisierter Donatoren erzielt. Anders als bei der Beweglichkeit, die von Hintergrundverunreinigungen dominiert wird, ist es dieser Prozess, der die $5/2$ -Aktivierungsenergien hauptsächlich limitiert. Durch die Anpassung des Abstandes zwischen 2DEG und Dotierung sowie die Verwendung “eingebauter” Abschirmtechniken erreichten wir eine Vervierfachung der Aktivierungsenergie. Abschließend schlagen wir einige Möglichkeiten vor, die Größe der Aktivierungsenergie an Hand anderer, leichter und schneller zugänglicher Eigenschaften des 2DEG vorauszusagen. Solch eine Korrelation würde die Entwicklungszeiten für einzelne Experimente drastisch verkürzen und somit die Fortsetzung unserer Optimierungsbemühungen wesentlich effizienter machen.