



Doctoral Thesis

Integrated $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ hall effect devices for highly sensitive magnetic field sensors

Author(s):

Kyburz, Rainer

Publication Date:

1993

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000934344> →

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](#).

Integrated $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ Hall Effect Devices for Highly Sensitive Magnetic Field Sensors

A dissertation submitted to the

SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by

Rainer Kyburz
dipl. Phys. ETH
born on November 17th, 1960
citizen of Luzern LU, Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. H. Melchior, examiner
Prof. Dr. R. S. Popovic, co-examiner

1993

Abstract

Recently III-V-semiconductors, which play an important role in optoelectronics and high speed electronics research, have also attracted interest for realizing novel Hall magnetic field sensors. Due to the high electron mobilities of GaAs and $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, higher sensitivities at lower operating power levels, improved signal-to-noise ratios even at low frequencies and smaller equivalent offset fields are expected compared to the established silicon sensors. In addition these materials offer the possibility of growing heterostructures, thereby opening new options in sensors design. Whereas several Hall devices of the GaAs/AlGaAs material system have been reported up to now, almost no work on InP based Hall sensors has been published.

In this thesis we report on the design, fabrication and characterization of lattice matched InP/InGaAs Hall devices with high sensitivities for precise magnetic field measurements. Emphasis is on the experimental investigation of the relevant physical properties of the materials and on novel high-performance device structures grown by MOVPE (Metal Organic Vapor Phase Epitaxy).

As a first device structure we have fabricated Hall elements consisting of n-type InGaAs layers grown on semi-insulating InP. High current related sensitivities up to 760 V/AT at sheet resistances below 840 Ω /square were obtained. Due to the isolation of the active layer by semi-insulating InP, which prevents channel pinch-off, one of the highest absolute sensitivities reported up to now for integrated semiconductor Hall sensors of 12.5 V/T was achieved. Unfortunately sensitivity drifts were observed for these sensors. They were clearly referred to iron traps, which had diffused out of the directly adjacent Fe doped semi-insulating InP during epitaxial growth. Further it was found, that also without outdiffusion instabilities associated with semi-insulating layers have to be expected for this device structure.

To circumvent instability problems, we therefore avoided semi-insulating layers close to the active layer in further designs. To screen the channel against the influences of substrate traps and surface states, the active layer was in addition embedded between p-type front- and back-gate layers. With this concept of a buried active layer we have realized two device types, one with a doped channel and another with a two-dimensional electron gas (2DEG) as active layer. The designs of both device types were optimized by means of a computer program, which we have developed to calculate the energy bands of semiconductor heterostructures. The disadvantage of the screening gate layers, that channel

pinch-off occurs at relatively low bias voltages, was overcome by novel layer structures with InP spacer layers.

For both device types no instabilities were observed within the reproducibility of the measurement setup of 0.1%. In addition no traces of trap related generation-recombination noise were found in the Hall voltage low frequency noise spectrum. This shows the benefits of the concept chosen.

For both device types similar figures of merit were measured. Very high bias current related sensitivities up to 1000 V/AT for active layers with moderate sheet resistances around 900 Ω /square were obtained. Due to the optimized layer structures absolute sensitivities as high as 1.0 V/T were achieved for supply voltages below 5 V. Under optimized biasing conditions the temperature dependence of the magnetic sensitivity was below 20 ppm/K at 300 K. This is the lowest value reported up to now for integrated semiconductor Hall sensors without external compensation. Contrary to the doped channel devices, where carrier freeze-out occurred at temperatures below 150 K, the sensitivity of the 2DEG devices remained fairly constant even down to 20 K. This makes these sensors useful for cryogenic applications. For both device types high signal-to-noise ratios corresponding to minimal detectable fields of 40 nT/Hz^{1/2} and 100 nT/Hz^{1/2} respectively were measured at 1 kHz and 100 Hz. These resolutions correspond to an improvement of factor five compared to typical values for silicon Hall devices and are the best ones reported for InP based Hall sensors.

Based on these results a novel Hall sensor is proposed. This device combines the advantages of the structure without channel pinch-off with the screening effects of highly doped gate layers. It consists of an active channel sandwiched between front- and back-gate layers. But instead of holding the gate potentials constant, the gates are contacted such, that a current flows in the gates parallel to the channel. By appropriate choice of the voltages at the gate contacts, the potential differences between channel and front- respectively back-gate are constant along the channel and no pinch-off occurs. With this concept, stable Hall sensors with very high absolute sensitivities are expected to be feasible.

Zusammenfassung

III-V-Verbindungshalbleiter, welche eine wichtige Rolle in der Optoelektronik- und Hochfrequenzelektronik-Forschung spielen, sind auch interessant für die Realisierung von Magnetfeld-Sensoren nach dem Hall-Effekt-Prinzip. Dank der hohen Elektronen-Beweglichkeiten wird die Verbesserung verschiedener Sensoreigenschaften, wie Sensitivität, Leistungsaufnahme, Signal-Rausch-Verhältnis und Nullpunktsverschiebung, erwartet. Weiter lassen sich in diesem Materialsystem gitterangepasste Heterostrukturen herstellen, was neue Möglichkeiten des Sensoraufbaus eröffnet. In den letzten Jahren wurde bereits über verschiedene Hall-Sensoren des GaAs/AlGaAs-Systems berichtet, während über InP-basierende Elemente fast nichts publiziert wurde.

In dieser Arbeit berichten wir über Design, Herstellung und Charakterisierung von hochempfindlichen Hall-Sensoren für Präzisions-Magnetfeldmessungen, welche auf gitterangepassten InP/InGaAs-Strukturen basieren. Die Schwerpunkte liegen dabei auf der experimentellen Untersuchung der relevanten physikalischen Eigenschaften dieses Materialsystems und neuartiger Sensorstrukturen.

Als erstes wurden Hall-Elemente realisiert, welche aus n-dotierten InGaAs-Schichten bestehen, die auf semi-isolierendes InP aufgewachsen wurden. Es wurden hohe speisestrombezogene Magnetfeld-Empfindlichkeiten bis zu 760 V/AT bei Schichtwiderständen unter 840Ω gemessen. Da die aktive Schicht durch semi-isolierendes InP isoliert ist, tritt keine Kanalabschnürung auf. Darum wurde mit 12.5 V/T eine der höchsten bis jetzt publizierten absoluten Empfindlichkeiten für integrierte Halbleiter-Hall-Sensoren erreicht. Leider wurde bei diesen Sensoren Sensitivitäts-Drifts festgestellt. Diese Effekte konnten tiefen Störstellen zugeordnet werden, welche aus dem semi-isolierenden InP ausdiffundiert sind. Weiter wurde festgestellt, dass auch ohne Ausdiffusion für diese Schichtstruktur Stabilitätsprobleme, welche mit der semi-isolierenden Schicht zusammenhängen, zu erwarten sind.

Um Stabilitätsprobleme zu verhindern wurde in den folgenden Sensorstrukturen die aktive Schicht zwischen hochdotierten Gate-Schichten eingebettet. Diese schirmen den Kanal gegen die Einflüsse von tiefen Störstellen im Substrat und an der Oberfläche ab. Mit diesem Konzept einer vergrabenen aktiven Schicht wurden Hall-Elemente mit dotiertem Kanal und solche mit einer aktiven Schicht aus einem zwei-dimensionalen Elektronengas (2DEG) hergestellt. Der Aufbau beider Elemente wurde mit einem Computer-Programm, das wir zur Berechnung

der Energiebänder von Halbleiter-Heterostrukturen entwickelt haben, optimiert. Der Nachteil der Gate-Schichten, dass der Kanal für relativ keine Speisespannungen abgeschnürt wird, wurde durch die Einführung von undotierten InP-Zwischenschichten behoben.

Für beide Typen von Hall-Elementen wurden im Rahmen der Reproduzierbarkeit der Messapparatur von 0.1 % keine Instabilitäten festgestellt. Auch in den Rauschmessungen wurden keine Hinweise auf tiefe Störstellen gefunden. Dies bestätigt die Nützlichkeit des gewählten Konzepts.

Für beide Sensor-Typen wurden ähnliche Eigenschaften gefunden. Sehr hohe speisestrombezogene Empfindlichkeiten bis zu 1000 V/AT bei niedrigen Schichtwiderständen um 900 Ω wurden gemessen. Dank des optimierten Schichtaufbaus wurden auch hohe absolute Empfindlichkeiten von bis zu 1.0 V/T für Speisespannungen unter 5 V erreicht. Für optimierte Speisebedingungen beträgt die Temperaturabhängigkeit der Empfindlichkeit weniger als 20 ppm/K bei 300 K. Dies ist der kleinste bis jetzt publizierte Wert für integrierte Halbleiter-Hall-Sensoren ohne externe Kompensation. Für die Elemente mit einem 2DEG-Kanal bleibt die Empfindlichkeit sogar fast konstant bis hinab zu 20 K, während bei den Elementen mit dotiertem Kanal die Ladungsträger unterhalb ca. 150 K ausfrieren. Dies macht die 2DEG-Elemente interessant für Tieftemperatur-Anwendungen. Für beide Sensor-Typen wurden ausgezeichnete Signal-Rausch-Verhältnisse, welche Auflösungen von 100 nT/Hz^{1/2} und 40 nT/Hz^{1/2} für 100 Hz und 1 kHz entsprechen, gemessen. Diese Auflösungen stellen gegenüber den typischen Werten für Silizium-Sensoren eine Verbesserung um Faktor 5 dar und sind die besten bis jetzt publizierten Werte für InP-basierende Elemente.

Schliesslich wird ein neuartiger Hall-Sensor vorgeschlagen, welcher die Vorteile hoher Speiseströme mit der Abschirmung von Störstellen durch Gate-Schichten kombiniert. Er besteht aus einer aktiven Schicht, welche zwischen einer vorderen und einer hinteren Gate-Schicht eingebettet ist. Anstatt das Potential dieser Gate-Schichten konstant zu halten wie in den bisher präsentierten Elementen, werden sie derart mit Kontakten versehen, dass parallel zur aktiven Schicht in den Gate-Schichten ein Strom fließen kann. Bei einer geeigneten Wahl der Speisespannungen an Kanal- und Gate-Kontakten kann erreicht werden, dass die Potentialdifferenz zwischen Gates und Kanal entlang des Kanals konstant ist; es entsteht keine Kanal-Abschnürung. Es wird erwartet, dass mit diesem Konzept stabile Sensoren mit sehr hohen absoluten Empfindlichkeiten realisiert werden können.