Graduiertenkolleg 1103

Embedded Microsystems



Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Selbstdiagnose und -kalibration von eingebetteten Mikrosystemen

Statusbericht

Martin Cornils

Betreuer: Prof. Dr. Oliver Paul Lehrstuhl: Materialien der Mikrosystemtechnik

Freiburg, im September 2008





1 Aktueller Stand der Promotion

Meine Promotion befindet sich zurzeit (Juli 2008) im dritten Jahr, neun Monate vor dem Abgabetermin, den ich auch einhalten werde. Umfangreiche Arbeiten bezüglich der Entwicklung von Methoden zur Selbstkalibrierung von Mikrosystemen sind durchgeführt und in mehreren Journal-Publikationen und Beiträgen auf Fachkonferenzen international vorgestellt und verteidigt worden. Gegenwärtig wird an einem Messaufbau zur abschliessenden experimentellen Validierung der letzten theoretischen Erkenntnisse gearbeitet.

2 Zusammenfassung der Dissertation

Meine Promotion befasst sich mit der Entwicklung von Methoden zur Selbst-Kalibrierung und Überwachung von Mikrosystemen. Die zentrale Fragestellung ist dabei, ob die Sensitivität eines Mikrosensors oder Mikrosystems alleine durch Nutzung innerer Effekte, d.h. ohne externe Eingangssignale bestimmt werden kann.

2.1 Selbstkalibrierung von Hall-Sensoren ohne Magnetfelder

Die Kalibrierung von Mikrosensoren ist eine der wichtigsten aber auch teuersten Aufgaben des Produktionsprozesses von Mikrosystemen. Dies gilt insbesondere für Magnetfeldsensoren, deren Funktionsprinzip auf dem Hall-Effekt beruht, und die in grossen Stückzahlen hergestellt werden [7]. Gewöhnlich werden solche Hall-Sensoren als planare Bauteile mit vier Kontakten implementiert (Abbildung 1 (a)): betreibt man ein derartiges Bauteil zwischen zwei gegenüberliegenden Kontakten mit einem Strom I_0 , so kann die Stärke eines senkrecht zur Sensorfläche ausgerichteten Magnetfeldes B_{\perp} aus dem Spannungsabfall $V_{\rm H} (B_{\perp}) = R_{\rm H} G I_0 B_{\perp} / t$ zwischen den beiden anderen Kontakten bestimmt werden, wobei $R_{\rm H}$, t und G den materialabhängigen Hall-Widerstand, die Dicke des Bauteils sowie den Geometriefaktor, der das Verhältnis der Hall-Spannung des Bauteils gegenüber einem standardisierten Bauteil mit punktförmigen Kontakten darstellt, beschreiben.

Angesichts der linearen Abhängigkeit der Hall-Spannung bezüglich B_{\perp} erfordert die Kalibrierung eines Hall-Sensors einerseits die Bestimmung der Offset-Spannung $V_{\text{off}} = V_{\text{H}} (B_{\perp} = 0)$ und andererseits die Bestimmung der Sensitivität $S = \partial V_{\rm H} / \partial B_{\perp}$, ebenfalls ausgewertet für $B_{\perp} = 0$. Die Offset-Spannung kann durch eine einfache Messung in Abwesenheit von Magnetfeldern gewonnen werden. Darüber hinaus ist eine Vielzahl von Möglichkeiten bekannt, den Einfluss des Offsets schaltungstechnisch zu kompensieren [8, 4]. Im Gegensatz dazu erfordert die Bestimmung der Sensitivität in der Regel komplexe Messaufbauten, mit deren Hilfe die Sensoren wohldefinierten Magnetfeldern ausgesetzt werden. Diese Tatsache erschwert die in-situ Kalibrierung von Hall-Sensoren massiv. Aus diesem Grund wurde im Rahmen des Projektes B.2 eine Methode entwickelt, die es erlaubt, Sensitivitätsparameter von Hall-Sensoren aus einfachen Widerstandsmessungen in Abwesenheit von Magnetfeldern zu extrahieren. Durch analytische Betrachtungen konnte zunächst gezeigt werden, dass die Sensitivitätskenngrösse $s = S/\mu_{\rm H}$, wobei $\mu_{\rm H}$ die Hall-Mobilität darstellt, für kleine Magnetfelder nur von der Geometrie des Bauteils und vom Schichtwiderstand R_{sq} abhängt und daher als Funktion dieser Parameter berechnet werden kann. Anschließend wurden in umfangreichen Untersuchungen mehrere Methoden entwickelt, die die Bestimmung der Geometrie und des Schichtwiderstandes von beliebig geformten planaren Hall-Sensoren aus unabhängigen Widerstandsmessungen ermöglichen. Beide Erkenntnisse zusammengenommen beschreiben somit ein Verfahren, mit dem die auf das Eingangssignal normierten Sensitivitätsparameter $s_{\rm V} = s/V_0$ und $s_{\rm I} = s/I_0$ direkt mit Hilfe von einfachen Widerstandsmes-



Abbildung 1: (a) Symmetrischer Hall-Sensor und (b) äquivalentes kreisförmiges Bauteil mit Kontaktöffnungswinkel α unter konformer Abbildung. (c) Widerstände R_a und R_b sowie deren Verhältnis R_a/R_b als Funktion von α . (d) Sensitivitätsparameter s_V und s_I/R_{sq} als Funktion des Widerstandsverhältnisses R_a/R_b .

sungen und insbesondere ohne die Notwendigkeit, Magnetfelder applizieren zu müssen, bestimmt werden können.

Alle theoretischen Erkenntnisse wurden mit Hilfe von Finite-Elemente-Simulationen überprüft und experimentell anhand von praktischen Messungen an Test-Strukturen, die eigens in CMOSund CVD-Technologie gefertigt wurden, bestätigt.

2.1.1 Symmetrische Hall-Sensoren

Symmetrische Bauteile mit vier Kontakten lassen sich stets konform auf eine äquivalente Einheitskreisscheibe abbilden und durch den zugehörigen Kontaktöffnungswinkel α beschreiben (Abbildung 1 (b)) [1]. Wir konnten zeigen, dass ein solches Bauteil neben dem Schichtwiderstand R_{sq} somit nur einen weiteren (geometrischen) Freiheitsgrad besitzt. Folglich werden lediglich zwei unabhängige Widerstandsmessungen benötigt, um sowohl R_{sq} als auch α der äquivalenten Einheitskreisscheibe zu bestimmen.

Mit Hilfe geeigneter konformer Abbildungen ist es möglich, analytische Ausdrücke für s_V und s_I , sowie für zwei beliebige unanbhängige Widerstände R_a und R_b als Funktion von α und R_{sq} anzugeben: $s_V = g_V(\alpha, R_{sq})$, $s_I = g_I(\alpha, R_{sq})$, $R_a = R_{sq}g_a(\alpha)$ und $R_b = R_{sq}g_b(\alpha)$ [3, 6]. Betrachtet man den Quotienten R_a/R_b , so ist dieser lediglich von α abhängig (Abbildung 1 (c)). Folglich kann die Geometrie α_0 der äquivalenten Einheitskreisscheibe des Bauteils aus zwei gemessenen Widerständen $R_{a,meas.}$ und $R_{b,meas.}$ extrahiert werden. Ist nun die Geometrie des Bauteils bekannt, so kann auch der zugehörige Schichtwiderstand $R_{sq,0}$ mittels $R_{a,meas.}/g_a(\alpha_0)$, bzw. $R_{b,meas.}/g_b(\alpha_0)$ bestimmt werden. Schliesslich lassen sich auch die Sensitivitätsparameter $s_V = g_V(\alpha_0, R_{sq,0})$, $s_I = g_I(\alpha_0, R_{sq,0})$ berechnen. Zudem können s_V und s_I/R_{sq} direkt als Funktion des Widerstandsverhälnisses R_a/R_b angegeben werden (Abbildung 1 (d)) [3].

Diese theoretischen Erkenntnisse bieten die Grundlage für eine Reihe praktischer Konsequenzen: beispielsweise konnte direkt abgeleitet werden, dass ein kreisförmiger Sensor mit $\alpha = 45^{\circ}$ maximale Sensitivität $s_{\rm V}$ besitzt und dass folglich ein beliebig geformter Hall-Sensor genau dann maximale Sensitivität $s_{\rm V}$ besitzt, wenn er durch konforme Abbildung auf eine äquivalente Kreisscheibe mit $\alpha = 45^{\circ}$ abgebildet werden kann. Ausserdem können nun numerische Simulationen der Sensitivitäten von Hall-Sensoren durch einfache Lösungen von Potentialproblemen ohne magnetischen Einfluss ersetzt werden [3].

2.1.2 Beliebig geformte Hall-Sensoren

Ferner konnten wir zeigen, dass Hall-Sensoren beliebiger Geometrie im Gegensatz zu symmetrischen Bauteilen fünf geometrische Freiheitsgrade aufweisen. Folglich werden in diesem Fall sechs unabhängige Widerstandsmessungen benötigt, um sowohl die Geometrie als auch den Schichtwiderstand der äquivalenten Einheitskreisscheibe eines solchen Bauteils zu bestimmen [2]. Mit Hilfe geeigneter konformer Abbildungen ist es auch hier möglich, analytische Ausdrücke für s_V und s_I sowie für beliebige Widerstände als Funktion der Geometrie und des Schichtwiderstandes anzugeben. Die Extraktion der Geometrie und des Schichtwiderstandes anzugeben. Die Extraktion der Geometrie und des Schichtwiderstandes anzugeben. Die Berechnung der Sensitivitätsparameter s_V und s_I erfolgt wieder analog zu den symmetrischen Bauteilen.

2.2 Bestimmung des Schichtwiderstandes von leitfähigen Schichten

Bei der Bestimmung von Sensitivitätsparametern aus Widerstandsmessungen spielt u.a. die Extraktion des Schichtwiderstandes R_{sq} eine wichtige Rolle. In diesem Zusammenhang stellt die van der Pauw Methode [9] das Standardverfahren der Technologieentwicklung und Qualitätssicherung in der Halbleiterindustrie und Mikrosystemtechnik dar. Sie ermöglicht die Bestimmung des Schichtwiderstandes eines dünnen leitfähigen Gebietes beliebiger Geometrie mit vier Kontakten durch zwei Widerstandsmessungen. Allerdings unterliegen die Kontakte dabei einer wesentlichen geometrischen Einschränkung: sie müssen punktförmig sein. Da diese Randbedingung von den meisten Halbleitersensoren und damit auch von Hall-Sensoren nicht erfüllt wird werden in der Praxis spezielle Teststrukturen mit optimierten Geometrien zur Bestimmung von Schichtwiderständen verwendet und neben den eigentlichen Sensoren auf den Wafern realisiert. Dieser traditionelle Ansatz hat zwei wesentliche Nachteile: zum einen belegen die zusätzlichen Teststrukturen wertvolle Waferfläche; zum anderen ist es weder möglich, R_{sq} direkt auf dem Sensor zu bestimmen noch diesen Wert nach der Vereinzelung und Vergehäusung der Sensoren zu kontrollieren. Beide Nachteile können allerdings beseitigt werden, indem man den Sensor selbst als Teststruktur zur R_{sq} -Bestimmung verwendet.

Aus diesem Grund wurden im Rahmen dieses Projektes eine Reihe von Erweiterungen der van der Pauw Methode entwickelt, die es erlauben, den Schichtwiderstand für symmetrische Bauteile mit ausgedehnten Kontakten, für beliebig geformte Bauteile mit einem, zwei und sogar mit vier ausgedehnten Kontakten durch einfache Widerstandsmessungen zu bestimmen.

2.2.1 Symmetrische Bauteile

Neben der exakten Methode zur Bestimmung von R_{sq} (vgl. 2.1) an symmetrischen Bauteilen [6] wurde auch ein approximatives Verfahren erarbeitet. Es konnte eine Interpolationsformel aufgestellt werden, die in Analogie zu van der Pauw die Verknüpfung des gesuchten Schichtwiderstan-



Abbildung 2: (a) Allgemeines Bauteil mit vier ausgedehnten Kontakten, (b) durch konforme Abbildung gewonnene Hilfsgeometrie, und (c) mit Hilfe der Theorie der Spiegelladungen ergänzte obere Halbebene.

des mit zwei Widerstandsmessungen beschreibt. Diese Relation ist für Bauteile mit Kontaktöffnungswinkeln $\alpha = 0^{\circ}$, $\alpha = 45^{\circ}$ und $\alpha = 90^{\circ}$ exakt erfüllt und stellt für Bauteile mit beliebigen Kontaktöffnungswinkeln eine sehr gute Näherung dar. Der maximale relative Fehler bei der Bestimmung von R_{sq} für beliebige α liegt bei 0.025% [1].

2.2.2 Beliebig geformte Bauteile

In einem ersten Schritt wurden Bauteile mit drei punktförmigen Kontakten und einem beliebig ausgedehnten Kontakt untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass ein solches Bauteil im Gegensatz zu symmetrischen Bauteilen, deren Geometrie alleine durch den Kontaktöffnungswinkel beschrieben werden kann, zwei geometrische Freiheitsgrade besitzt. Daher sind hier bereits drei unabhängige Widerstandsmessungen notwendig, um den Schichtwiderstand extrahieren zu können. In Analogie zu van der Pauw konnte das Bauteil durch eine konforme Abbildung in Verbindung mit der Methode der Spiegelladungen auf die obere Halbebene überführt werden. Diese Anordnung ermöglicht die Lösung des jeweiligen Potentialproblems, d.h. die Bestimmung analytischer Ausdrücke für die drei Widerstände als Funktion der Geometrie und des Schichtwiderstandes. Schliesslich konnte durch Nutzung geometrischer Identitäten eine Relation gefunden werden, die den Zusammenhang zwischen dem Schichtwiderstand und den drei Widerstandsmessungen beschreibt [5].

Anschliessend wurde die gleiche Vorgehensweise auf Bauteile mit zwei ausgedehnten Kontakten und letztlich auch auf ganz allgemeine Bauteile mit vier beliebig ausgedehnten Kontakten übertragen (Abbildung 2). Es konnte gezeigt werden, dass solche Bauteile drei, bzw. fünf geometrische Freiheitsgrade besitzen und dass folglich vier, bzw. sechs unabhängige Widerstandsmessungen benötigt werden, um den Schichtwiderstand extrahieren zu können. Im Falle von Bauteilen mit zwei ausgedehnten Kontakten konnte ebenfalls ein expliziter Zusammenhang zwischen den vier Widerständen und R_{sq} gefunden werden [5], im Falle allgemeiner Bauteile mit vier ausgedehnten Kontakten konnte ein Gleichungssystem mit sechs Unbekannten aufgestellt werden, dessen Lösung u.a. den gesuchten Schichtwiderstand beinhaltet [2].

2.3 Ausblick

Um die experimentelle Validierung der theoretischen Erkenntnisse weiter zu verbessern und zu vervollständigen wurden über 100 spezielle Teststrukturen in CMOS-Technologie implementiert und von X-FAB in Erfurt gefertigt. Alle Strukturen stellen planare Hall-Sensoren dar und wurden sowohl als einfache Widerstände als auch als Feldeffekt-Transistoren ausgelegt, um die Schicht-

dicke über die Gate-Spannung variieren zu können. Derzeit wird an einem automatisierten Messaufbau gearbeitet, mit dem auf Waferebene eine große Anzahl von Messungen durchgeführt werden soll. Eine besondere Herausforderung stellt dabei die Konzipierung und Realisierung einer speziellen Vorrichtung dar, die es erlaubt, die Teststrukturen wohldefinierten Magnetfeldern auszusetzen.

Literatur

- M. Cornils, M. Doelle, and O. Paul. "Sheet resistance determination using symmetric structures with contacts of finite size". *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 54, no. 10, pp. 2756–2761, October 2007.
- [2] M. Cornils and O. Paul. "Beyond van der Pauw: Sheet resistance determination from arbitrarily shaped planar four-terminal devices with extended contacts". In *Proceedings of the 21st IEEE International Conference on Microelectronic Test Structures (ICMTS 2008)*. Edinburgh, United Kingdom, 2008, pp. 23–28.
- [3] M. Cornils and O. Paul. "The magnetic calibration and optimization of symmetric hall plates may be accomplished even in the absence of a magnetic field". In *Technical Digest of the 21st IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2008)*. Tucson, AZ, USA, 2008, pp. 940–943.
- [4] M. Cornils and O. Paul. "Reverse-magnetic-field reciprocity in conductive samples with extended contacts". *Journal of Applied Physics*, vol. 104, no. 2, pp. 024 505/1–024 505/7, 2008.
- [5] M. Cornils and O. Paul. "Sensor calibration of planar four-contact devices with up to two extended contacts". In Technical Digest of the 6th IEEE Conference on Sensors (Sensors 2007). Atlanta, GA, USA, 2007, pp. 1259–1262.
- [6] M. Cornils and O. Paul. "Sheet resistance determination of electrically symmetric planar four-terminal devices with extended contacts". *Journal of Applied Physics*, vol. 104, no. 2, pp. 024 503/1–024 503/10, 2008.
- [7] R. S. Popovic. "Hall-effect devices". Sensors and Actuators, vol. 17, no. 1, pp. 39-53, 1989.
- [8] R. Steiner, A. Haeberli, F.-P. Steiner, C. Maier, and H. Baltes. "Offset reduction in hall devices by continuous spinning current". *Sensors and Actuators A*, vol. 66, no. 1-3, pp. 167–172, 1998.
- [9] L. J. van der Pauw. "A method of measuring specific resistivity and hall effect of discs of arbitrary shape". *Philips Research Reports*, vol. 13, no. 1, pp. 1–9, 1958.