

DISS. ETH No. 12746

CMOS Magnetotransistor and Fluxgate Vector Sensors

A thesis submitted to the

SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of

Doctor of Natural Sciences

presented by

Michael Schneider

Dipl. Phys. University of Constance

Born July 6, 1965

Citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. H. Baltes, supervisor

Prof. Dr. M. G. Allen, co-examiner

1999

ABSTRACT

Numerous products of the automotive and consumer industry demand for magnetic angular position detectors which combine high measurement accuracy at minimum cost with advanced features, such as bus-compatibility and self-test. Integrated CMOS magnetic vector probe microsystems meet these requirements.

In a comparison of potential sensors for magnetic field angle measurement, two candidates detecting the components of magnetic induction parallel to the chip plane turn out to be favorable for further development. The *lateral magnetotransistor* is a conventional CMOS device exploiting galvanomagnetic effects in silicon. The *planar microfluxgate* requires an a.c. excited ferromagnetic thin film core for operation. Core deposition is done in a CMOS compatible post-processing technology on top of the CMOS passivation layers. Both sensors can be integrated together with driving and signal processing electronics for inexpensive realization of single chip microsystems for magnetic field angle measurement. The sensors cover together a measurement range from nT to several hundreds of mT.

The *lateral magnetotransistor* enables two-dimensional field detection and features a compact size of less than $100 \times 100 \mu\text{m}^2$, excellent signal linearity and sensitivity matching, as well as small cross sensitivities. The main challenge in order to achieve a high measurement accuracy is the minimization of signal offset and thermal offset drift. Different methods for magnetotransistor offset reduction are investigated. By micromachining, thermal decoupling of a magnetotransistor from ambient can be achieved which enables temperature stabilized device operation at low power. This reduces the thermal offset drift by a factor of 5 over a temperature range from -10 to 60°C . Differential arrangement of neighboring magnetotransistors and spatial signal Fourier analysis allow only a small offset reduction. By offset calibration at three different temperatures and parabolic offset interpolation, the maximum equivalent offset in the above temperature range is reduced by a factor of 500 to 1 mT. This offset is stable with time and enables an angle measurement accuracy of 3 degrees in a 30 mT-field.

The developed *post-processing technology* allows simple and inexpensive batch fabrication of metallic microstructures with soft ferromagnetic properties. The structures of permalloy (nickel-iron) and supermalloy (nickel-iron-molybdenum) are electroplated on top of fully processed CMOS chips or wafers. Two process sequences allow structure thicknesses of either up to 1 μm or up to 50 μm . Using this technology, the CMOS integration of ferromagnetic sensors, actuators and passive elements becomes possible. The electroplated materials exhibit a minimum coercivity of 0.1 Oe. By introduction of a magnetic anisotropy in the film plane, the d.c. permeability of the NiFeMo films along the easy axis becomes as large as 20,000 while the a.c. permeability along the hard axis is stabilized at 3,000 for frequencies up to 7 MHz. As an example, nickel-iron microfluxconcentrators integrated on chip increase the sensitivity of a CMOS magnetotransistor by a factor of 15.

By exploiting the post-processing technology, a *planar microfluxgate* is integrated in a standard CMOS process. This sensor is based on supermalloy thin film cores and has a size of only 1.3 x 0.7 mm². For magnetic inductions below 50 μT , the microfluxgate signal shows an excellent linearity and a cosine-shaped angular response. With an excitation power as low as 5 mW, the microfluxgate exhibits a sensitivity of 5 V/T. A maximum sensitivity of 33 V/T is achieved by high frequency excitation at 7 MHz at a larger power. In combination with an extremely low signal noise of 2.4 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ at 10 Hz, the microfluxgate performance allows the measurement of earth's magnetic field with high signal-to-noise ratio at nT resolution.

For demonstration, two *CMOS magnetic vector probe microsystems* were integrated on single chips, each containing the sensors together with the complete electronics for sensor operation, signal conditioning and A/D conversion. In a *contactless rotary switch*, a two-dimensional magnetotransistor detects the angular position of a permanent magnet. The system is very robust against mechanical tolerances and exhibits an angular resolution of one degree. In an *electronic compass*, two orthogonal oriented microfluxgates allow the sequential readout of two components of magnetic induction.

ZUSAMMENFASSUNG

Zahlreiche Produkte in der Automobil- und Verbrauchsgüterindustrie verlangen nach magnetischen Winkelpositionsdetektoren, die hohe Messgenauigkeit bei minimalen Kosten mit innovativen Eigenschaften wie Bus-Kompatibilität und Selbsttest verbinden. Integrierte magnetische CMOS Vektorsonden-Mikrosysteme erfüllen diese Anforderungen.

In einem Vergleich möglicher Sensoren zur magnetischen Winkelmessung stellen sich zwei Kandidaten heraus, die sensitiv zur magnetischen Induktion parallel zur Chipebene sind und Vorteile bieten zur weiteren Entwicklung. Der *laterale Magnetotransistor* ist ein konventionelles CMOS Bauteil dessen Funktion auf galvanomagnetischen Effekten in Silizium beruht. Das *planare Mikrofluxgate* benötigt zum Betrieb die magnetischen Wechselfeldanregung eines ferromagnetischen Kerns. Die Kerndeposition wird mit Hilfe einer CMOS kompatiblen Nachbehandlungstechnologie auf den CMOS Passivationschichten ausgeführt. Beide Sensoren können integriert werden zusammen mit Treiber- und Signalauswerteelektronik zur kostengünstigen Realisierung von Mikrosystemen zur magnetischen Winkelmessung. Gemeinsam decken die Sensoren einen grossen Messbereich ab von nT bis zu mehreren hundert mT.

Der *laterale Magnetotransistor* erlaubt eine zweidimensionale Felddetektion, hat eine geringe Grösse von weniger als $100 \times 100 \mu\text{m}^2$, exzellente Signallinearität und Sensitivitätsmatching sowie eine kleine Störfeldempfindlichkeit. Die entscheidende Herausforderung zur Erreichung einer hohen Messgenauigkeit ist die Minimierung von Signaloffset und thermischer Offsetdrift. Verschiedene Methoden zur Offsetreduktion werden untersucht. Mikromechanische Verfahren erlauben die thermische Entkopplung eines Magnetotransistors von seiner Umgebung zum temperaturstabilisierten Betrieb bei kleiner Heizleistung. Dies reduziert die thermische Offsetdrift um einen Faktor fünf über einen Temperaturbereich von -10°C bis 60°C . Differentielle Anordnung benachbarter Magnetotransistoren und räumliche Signal-Fourieranalyse erlauben nur eine geringe Offsetreduktion. Durch Offsetkalibration bei drei verschiedenen Temperaturen und parabolischer Interpolation wird der maximal verbleibende äquivalente Offset im obigen Tem-

peraturbereich um einen Faktor 500 auf weniger als 1 mT begrenzt. Dieser Offset ist zeitlich stabil und erlaubt eine Messgenauigkeit von 3° in einem 30 mT Feld.

Die entwickelte *Nachbehandlungstechnologie* erlaubt die einfache und kostengünstige Massenfertigung metallischer Mikrostrukturen mit weichmagnetischen Eigenschaften. Die Strukturen aus Permalloy (Nickel-Eisen) und Supermalloy (Nickel-Eisen-Molybdän) werden auf vollständig prozessierte CMOS Chips oder Wafer aufgalvanisiert. Zwei Prozessvarianten erlauben die Realisierung von Filmdicken entweder bis 1 μm oder bis 50 μm . Die Verwendung dieser Technologie ermöglicht die CMOS Integration ferromagnetischer Sensoren, Aktoren und passiver Elemente. Die galvanisierten Materialien haben eine minimale Koerzitivkraft von 0.1 Oe. Die Einführung einer magnetischen Vorzugsrichtung in der Filmebene maximiert die Permeabilität der Supermalloy Filme parallel zu dieser Richtung auf 20000 und stabilisiert die Permeabilität senkrecht dazu bei 3000 für Frequenzen bis 7 MHz. Als ein Anwendungsbeispiel werden Mikro-Flusskonzentratoren aus Permalloy integriert, die die Sensitivität eines CMOS Magnetotransistors um einen Faktor 15 erhöhen.

Unter Verwendung der Nachbehandlungstechnologie wird ein *planares Mikrofluxgate* in einem CMOS Standardprozess integriert. Dieser Sensor basiert auf Supermalloy Dünnschichtkernen und hat eine Grösse von nur $1.3 \times 0.7 \text{ mm}^2$. Für magnetische Induktionen bis 50 μT zeigt das Signal des Mikrofluxgates eine exzellente Linearität und eine cosinusförmige Winkelabhängigkeit. Mit nur 5 mW Leistung erreicht der Sensor eine Sensitivität von 5 V/T. Eine maximale Sensitivität von 33 V/T wird erreicht mit Hochfrequenzanregung bei 7 MHz und höherer Leistung. In Kombination mit einem extrem niedrigen äquivalenten Rauschen von nur 2.4 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ bei 10 Hz erlauben diese Eigenschaften eine Messung des Erdmagnetfeldes mit hohem Signal-Rausch-Verhältnis und nT Auflösung.

Zur Demonstration werden zwei magnetische Vektorsonden-Mikrosysteme auf einzelnen CMOS Chips integriert, die jeweils die Sensoren enthalten zusammen mit der kompletten Elektronik für Sensorbetrieb, Signalauswertung und analog-digital Wandlung. In einem *kontaktlosen Drehschalter* detektiert ein Magnetotransistor die Winkelstellung eines Permanentmagneten. Das System ist sehr robust gegen mechanische Toleranzen und erreicht eine Winkelauflösung von 1° . In einem *elektronischen Kompass* erlauben zwei orthogonale Mikrofluxgates die sequentielle Messung von zwei Magnetfeldkomponenten.