

Bild 2: Funktionsprinzip mikromechanischer Beschleunigungssensoren

Bild 1: Barometrischer Drucksensor in Volumen-Mikromechanik (Bulk)

MEMS-Sensoren im Überblick

Erst durch den Einsatz von mikromechanischen **SENSOREN** wurden viele Innovationen im Automobil wie ABS, ESP oder Fahrwerksregelung tauglich **FÜR DEN MASSENMARKT**. **AUTOMOBIL ELEKTRONIK** hat sich beim Weltmarktführer nach dem Stand der Dinge erkundigt.

Bosch gehört auf dem Gebiet der Sensoren zu den Unternehmen mit der größten Erfahrung in Entwicklung und Herstellung. Das Unternehmen ist nicht nur Weltmarktführer im Teilmarkt der MEMS-Sensoren, sondern es verfügt als Automobilzulieferer und Halbleiterhersteller über ein umfangreiches Portfolio an Sensorlösungen, die alle relevanten physikalischen und chemischen Messgrößen umfassen: in allen Messbereichen und unter allen Umfeldbedingungen.

Sensoren messen im Automobil Drücke, Drehraten, Beschleunigungen oder den Luftdurchsatz. Sie ermöglichen eine genauere, sichere, schnellere und sparsamere Regelung oder können den Autofahrer mit Informationen unterstützen, das Fahren erleichtern und den Fahrkomfort erhöhen.

Intelligente Sensoren vereinen eine elektrisch-mechanische Signalwandlung und die elektronische Auswerteschaltung oft in einem Chip. Sie wandeln physikalische oder chemische Messgrößen in

elektrische Signale um und stellen diese Informationen elektronischen Systemen im Fahrzeug bereit. Sensoren machen das Autofahren sauberer, sicherer, sparsamer und komfortabler.

Mikromechanik

Mikromechanik ist eine Schlüsseltechnologie für viele heutzutage übliche Sensoren. Sie wird häufig auch als Mikrosystemtechnik (MST) oder englisch als MEMS (MicroElectroMechanical Systems) bezeichnet. Mikrosysteme ersetzen Produkte, die bisher aus mehreren Bauteilen aufgebaut waren. Sie vereinen zwei oder mehr Funktionen der Mikroelektronik, Mikromechanik oder Mikrooptik.

Wichtigstes Basismaterial in der Mikromechanik ist, wie in der gesamten Halbleiter- und Elektronikwelt, das Silizium. Die Siliziumtechnologie ermöglicht es, kleine Sensoren von wenigen Quadratmillimetern Größe und mit hoher Zuverlässigkeit kostengünstig herzustellen. Die verschiedenen mechanischen

Strukturen wie Federn, Balken, Gewichte oder Membranen haben Abmessungen in der Größenordnung von tausendstel Millimetern. Sie übernehmen heute Aufgaben, die früher von mehrere Millimeter oder Zentimeter großen Strukturen wahrgenommen wurden.

Die Fertigungsmethoden der Siliziumtechnologie sind mit der Mikroelektronik stark verwandt. In der Herstellung haben sich zwei Fertigungsverfahren etabliert: Die Volumen-Mikromechanik (Bulk) und die Oberflächen-Mikromechanik. Damit lassen sich je nach Anforderung viele unterschiedliche Strukturen auf beziehungsweise in dem Wafer erzeugen und kleine sowie leichte und robuste Sensoren wirtschaftlich herstellen. Der Sensor-Chip wird dabei mit den nur wenige hundert Mikrometer großen beweglichen Messstrukturen direkt aus einem Silizium-Substrat geformt. Bei der Bulk-Mikromechanik werden beispielsweise für die Herstellung von Membranen die Strukturen aus dem vollen Material herausgeätzt.

Mikromechanische Sensoren stellt Bosch aufgrund der Batchfertigung in großen Stückzahlen her. Sie erfüllen die Anforderungen an Baugröße, Gewicht und Kosten, die aufgrund der zunehmenden Anzahl von Sensoren im Automobil zum entscheidenden Erfolgsfaktor geworden sind.

Inertialsensorik

Unter Inertialsensoren werden Beschleunigungs- und Drehratensensoren zusammengefasst. Wichtigstes Einsatzgebiet mikromechanischer Beschleunigungssensoren ist heute die Crash-Erkennung in Airbag-Systemen. Weitere Anwendungen sind in Fahrwerk- und Fahrdynamik-Regelsystemen zu finden.

Die geringe Baugröße der Beschleunigungssensoren ermöglicht den Einbau beispielsweise in der B-Säule an der Seite des Fahrzeugs. Von hier aus kann der Sensor einen Seitencrash schnell und sicher detektieren sowie das Signal zur Seitenairbag-Auslösung weitergeben.

Wesentliche Treiber für den Erfolg mikromechanischer Beschleunigungssensoren sind reduzierte Kosten, kleine Baugröße und erhöhte Funktionalität. Der hohe Kostendruck hat dazu geführt, dass sich oberflächenmikromechanische Beschleunigungssensoren durchsetzen.

Beschleunigungssensorik

Inertialsensoren werden in Oberflächen-Mikromechanik hergestellt. Hierbei werden auf der Waferoberfläche bewegliche Strukturen in abgeschiedenen Polysilizium-Schichten herausgebildet.

Bei oberflächenmikromechanischen Beschleunigungssensoren werden frei bewegliche Kammstrukturen auf einer Waferseite in das abgeschiedene Polysilizium geätzt und teilweise vom Substrat losgelöst, also beweglich gemacht. Diese Kammstrukturen bilden zusammen mit fest verankerten Kammstrukturen einen Kondensator, der bei Beschleunigung durch Auslenkung der beweglichen Struktur seine elektrische Kapazität ändert, wobei die Kapazitätsänderung mit dem Beschleunigungssignal korreliert.

MEMS-Drehratensensoren

Die Erfolgsgeschichte hochentwickelter MEMS-Drehratensensoren im Kraftfahrzeug begann in den 90er Jahren mit der Markteinführung von ESP-Systemen. Bereits im Jahr 2003 lag die Installationsrate in Neufahrzeugen in Deutschland bei über 50 Prozent, im Jahr 2006 bereits bei 75 Prozent. Drehratensensoren sind nicht nur die Grundlage für ESP Systeme, sondern sie werden darüber hinaus auch

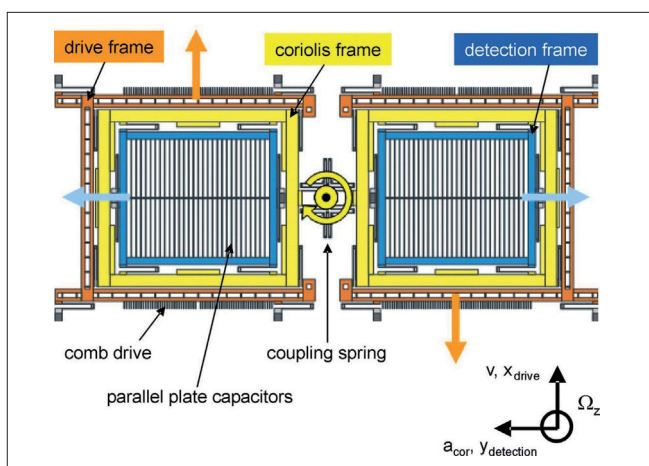


Bild 3: Funktionsprinzip des mikro-mechanischen Drehratensensors MM3

in anderen Fahrdynamik-Systemen sowie zur Überroll-Sensierung für Insassenschutz-Systeme oder als Stützsignal für Navigationssysteme genutzt.

Aktuelle Bosch-Drehratensensoren für Automobilanwendungen sind weniger störanfällig als analoge Sensoren. Für eine erhöhte Zuverlässigkeit sorgt auch die ständig aktive interne Fehlerüberwachung, inklusive Fehleridentifikation und aktivem Selbsttest.

Bei Bosch gibt es grundsätzlich unterschiedliche Ansätze zur Realisierung von Drehratensensoren. Alle Generationen der MEMS-Drehratensensoren von Bosch sind Coriolis-Drehratensensoren, denn sie nutzen den Coriolis-Kraft-Effekt, um die Drehrate zu detektieren. Das Design allerdings hat sich von Generation zu Generation wesentlich verändert.

MM1: erste Generation

Der erste, 1998 von Bosch eingeführte, mikromechanische Drehratensensor MM1 nutzt ein Funktionsprinzip ähnlich

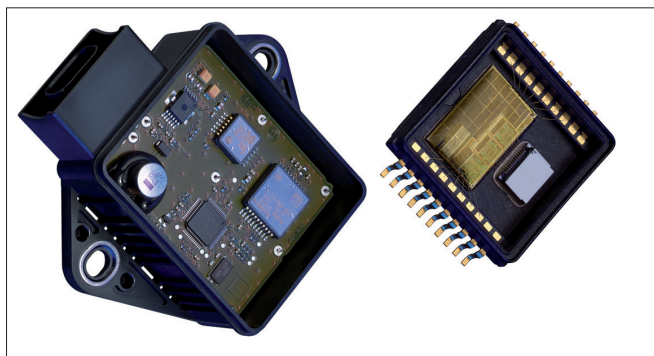
einer Stimmgabel. Hierbei handelt es sich um eine Kombination aus Oberflächen-Mikromechanik und Volumen-Mikromechanik (Bulk). Der Sensor hat eine Struktur aus zwei oszillierenden seismischen Massen – hergestellt in Volumen-Mikromechanik (Bulk) – sowie aus zwei darauf abgeschiedenen kapazitiven Beschleunigungssensoren, die in Oberflächen-Mikromechanik hergestellt sind. Zusätzlich enthält der Sensor ein ASIC zur Signalverarbeitung und einige weitere Komponenten.

Der Schwinger wird elektromagnetisch angetrieben. Er wird von einer Metallkappe mit einem Permanentmagneten bedeckt, der für die elektromagnetische Anregung mit Auslenkungen von 50 µm sorgt. Die Frequenz lag zunächst bei 2 kHz. Diese geringe Eigenfrequenz erforderte einen externen Dämpfer, welcher am Gehäuse angebracht ist und die Übertragung von Fahrzeugschwingungen auf den Sensor auch unter extrem schlechten Straßenverhältnis-

MEMS-Drehratensensoren

	MM1	MM2	MM3
Einsatz	ESP	Rollover-Erkennung, Navigation	ESP
Sensorachse	Ω_z	Ω_y	Ω_z
Gehäuse	Hybrid, Metallgehäuse	Mold	Premold
Funktionsprinzip	Stimmgabel	Drehschwinger	Inverse Stimmgabel
MEMS-Technologie	Kombination aus Oberflächen- und Volumen-Mikromechanik	Oberflächen-Mikromechanik	Oberflächen-Mikromechanik
Druck	~ 1 bar	< 5 mbar	< 5 mbar
Anregung	Elektromagnetisch	Elektrostatisch (Kammstrukturen)	Elektrostatisch (Kammstrukturen)
Detektionsschema	Geschlossener Regelkreis	Offener Regelkreis	Geschlossener Regelkreis
Rauschen [$^{\circ}/s/Hz^{1/2}$] (typisch)	0,02	0,15	0,004
Produktionsstart	1998	2001	2005

Bild 4: ESP-Sensorcluster DRS MM3 (links) mit zugehörigem Drehratensensor in Oberflächen-Mikromechanik (rechts)



sen verhindert. Um die Schockempfindlichkeit des Sensors zu verbessern, wurde die Eigenfrequenz auf 6 kHz erhöht. Dadurch kann auf den externen Dämpfer verzichtet werden, was die Montagekosten erheblich reduziert.

Die Messachse des Beschleunigungssensors liegt orthogonal zur Schwingungsrichtung der seismischen Masse. Eine Drehbewegung um die dritte orthogonale Achse (z-Achse) übt eine Coriolis-Kraft auf die kapazitiven Beschleunigungssensoren aus. Der Unterschied zwischen den zwei Beschleunigungssensoren ergibt die lineare Beschleunigung und verdoppelt das Coriolis-Signal. Die synchrone Demodulation unter Verwendung der Geschwindigkeit des mechanischen Oszillators erzeugt ein Signal, das proportional zur Drehrate ist.

Die Trennung von Oszillator und Beschleunigungssensor ermöglicht eine unabhängige Optimierung von Antriebsmodus und Detektionsmodus sowie eine Reduktion von mechanischem Übersprechen (Quadratfehler). Weitere Vorteile des Sensors liegen in der Nullpunkt-Stabilität, Genauigkeit und Zuverlässigkeit.

MM2: 2. Generation

Bei der nächsten Generation des mikro-mechanischen Drehratensensors, dem MM2, wählte Bosch einen völlig neuen Ansatz, der auf einen modifizierten mikro-mechanischen Fertigungsprozess zurückgreift. Im Gegensatz zum MM1 wird der MM2 ausschließlich in Silizium-Oberflächen-Mikromechanik hergestellt, ohne die Rückseite des Wafers zu strukturieren.

Das MEMS-Element des MM2 ist ein runder Schwinger aus Silizium, der an wenigen Siliziumstegen im Zentrum des Schwingers beweglich aufgehängt ist. Die Schwingerstruktur besteht aus 10 Mikrometer dickem Silizium und hat einen Durchmesser von 1,6 Millimetern. Während des Betriebs wird dieser Schwinger periodisch mit einer Frequenz von 1,5 kHz angeregt. Die Anregung erfolgt elek-

trostatisch über Kammstrukturen. Bei waagrecht Einbau in das Kraftfahrzeug können damit Drehraten um die Fahrzeuglängsachse detektiert werden.

Das Messelement des Drehratensensors arbeitet wiederum nach dem Coriolis-Prinzip, denn es nutzt die Trägheitskraft einer schwingenden Masse in einem rotierenden System. Ein Kippen des Fahrzeugs führt infolge der Coriolis-Kraft zu einer Ablenkung der runden Schwingungsstruktur aus ihrer Schwingungsebene. Dieses Verkippen kann durch eine Kapazitätsänderung der Schwingerstruktur gegen Elektroden gemessen werden, die in den Siliziumboden unter den Schwingern eingebracht wurden.

Die Vereinfachung des Wafer-Prozesses und die Vereinheitlichung mit Prozessabläufen aus der Beschleunigungssensorik sind entscheidend für die Reduktion von Chipgröße und Wafer-Kosten.

MM3: 3. Generation

Der MM3 wurde als Nachfolgeneration des MM1 für ESP- und Fahrdynamiksysteme entwickelt und ist in Silizium-Oberflächen-Mikromechanik ähnlich zur MM2-Technologie gefertigt. Die Oberflächen-Mikromechanik bietet klare Vorteile in Bezug auf Chipgröße und Kosten, hat aber den Nachteil der geringen Signal-Empfindlichkeit und führt dadurch üblicherweise zu geringeren Genauigkeiten und einem schlechteren Signal-/Rauschabstand. Aufgrund der reduzierten Größe der mechanischen Strukturen haben die Fertigungstoleranzen von Oberflächen-Mikromechanik-Prozessen einen erhöhten Einfluss auf die Leistung des Sensors. Es war daher eine große Herausforderung, einen Drehratensensor in Oberflächen-Mikromechanik zu entwickeln, der exzellente Leistung bezüglich Rauschen und Offset-Stabilität bietet.

Durch die Anwendung neuartiger Designkonzepte bei der Auslegung des Sensorelements und sorgfältige Kontrolle der Toleranzen im Fertigungsprozess konnten diese Anforderungen erfüllt werden, so

dass der Sensor im Vergleich zu ähnlichen Drehratensensoren, die in Oberflächen-Mikromechanik realisiert sind, eine herausragende funktionale Leistung bietet.

Das Sensierelement des Coriolis-Drehratensensors arbeitet kapazitiv und besteht aus zwei identischen Feder-Masse-Strukturen, die durch eine Koppelfeder mechanisch verbunden werden. Jede Hälfte besteht aus drei Rahmen (Antrieb, Coriolis und Detektion). Die Primärschwingung (Antrieb) umfasst die Bewegung von Antriebs- und Coriolis-Rahmen in x-Richtung, in einer antiparallelen Schwingungsform. Die Sekundärschwingung (Detektion) wird durch die Coriolis-Kraft hervorgerufen – und zwar als ein Ergebnis einer äußeren Drehrate um die z-Achse. Sie umfasst die Schwingung von Coriolis- und Detektions-Rahmen in y-Richtung (inverses Stimmgabelprinzip). Die Coriolis-Signale werden über Parallel-Plattenkondensator-Anordnungen innerhalb des Detektionsrahmens erfasst.

Das U-förmige Federdesign garantiert geringe mechanische Nichtlinearitäten. Die mechanische Kopplung und der antiparallele Betrieb der Feder-Masse-Strukturen führen gepaart mit einer hohen Resonanzfrequenz zu einer ausreichenden Unterdrückung externer Störeinflüsse und machen einen zusätzlichen Dämpfer überflüssig. Weitere Vorteile des Sensors sind reduziertes elektrisches und mechanisches Übersprechen, hohe Offset-Stabilität sowie hohe Robustheit und Zuverlässigkeit.

Ausblick

Bis heute stellen Automobilanwendungen den größten Markt für MEMS-Sensoren dar. Neue Anwendungen außerhalb des Automobils wachsen zunehmend.

Es ist absehbar, dass die weitere technologische Entwicklung von MEMS-Sensoren nicht nur, aber auch im Automobil ganz neue Anwendungsfelder erschließen wird. Die Weiterentwicklung der Mikromechanik zusammen mit immer leistungsfähigerer Elektronik wird neue mikro-mechanische Sensoren hervorbringen, die das Autofahren künftig noch umweltfreundlicher, verbrauchsgünstiger, sicherer und komfortabler machen. (av) ←

Dr. Jiri Marek ist Entwicklungsleiter Sensoren im Geschäftsbereich Automobilelektronik der Robert Bosch GmbH.

infoDIRECT www.all-electronics.de

weitere Infos:

301AEL0207