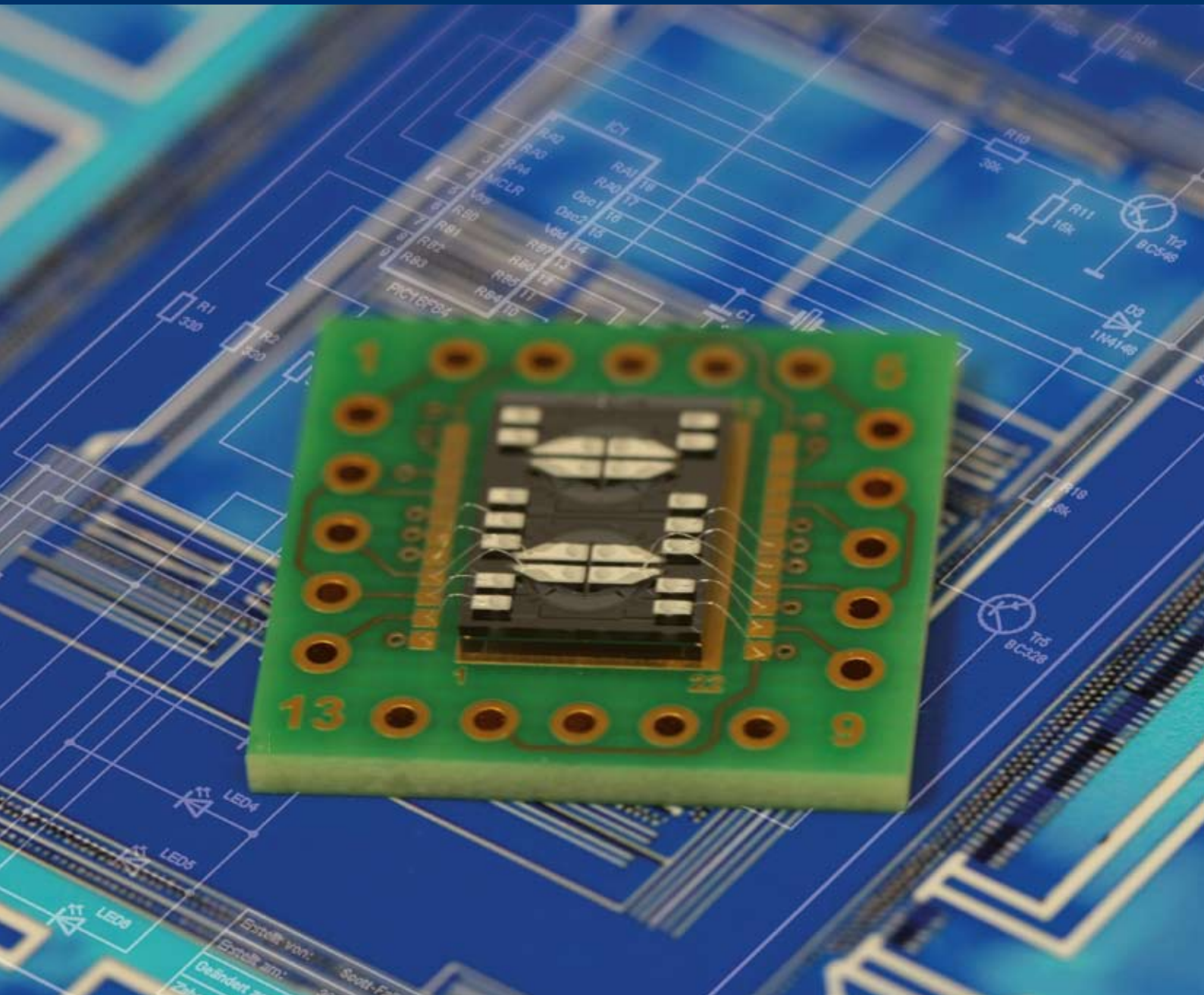
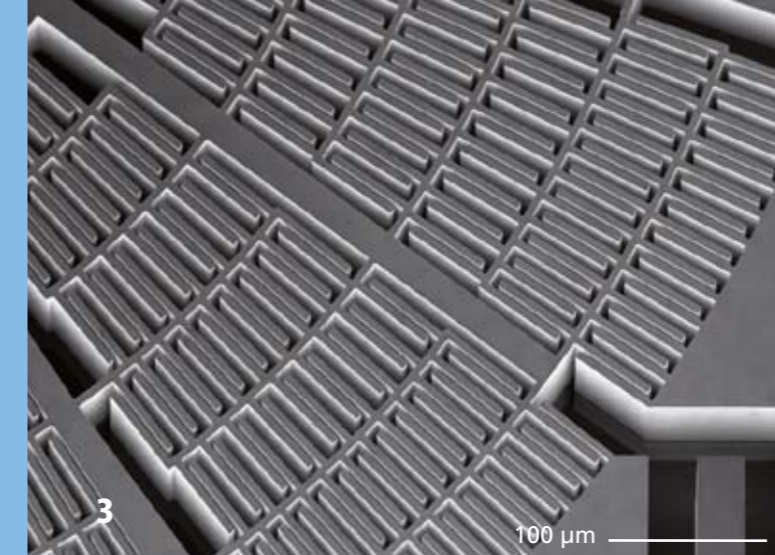
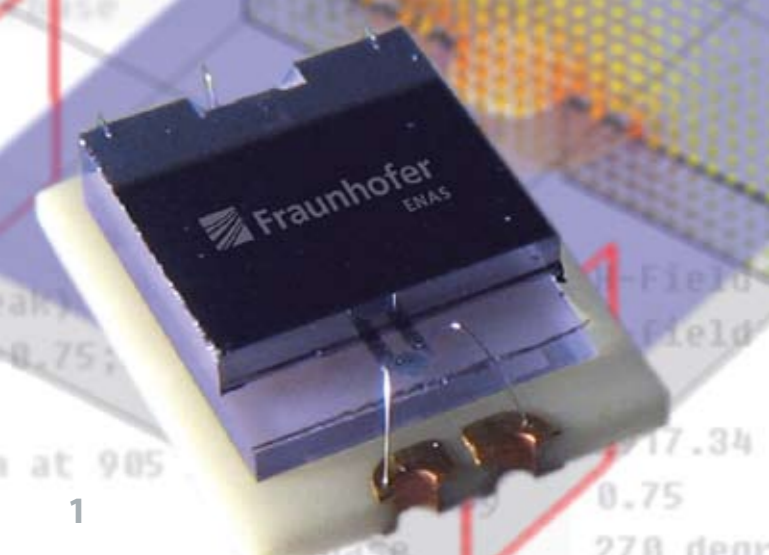


MULTI DEVICE INTEGRATION





Die gegenwärtigen Entwicklungen der Mikro- und Nanotechnologie sind faszinierend. Unbestritten spielen sie heutzutage eine Schlüsselrolle bei Produktentwicklungen und dem technischen Fortschritt. Mit einer großen Auswahl verschiedener Komponenten, vielfältiger Technologien und Materialien ermöglichen sie die Integration von mechanischen, elektrischen, optischen, chemischen, biologischen und anderen Funktionen in ein einziges System auf kleinstem Raum.

Das Fraunhofer-Institut für Elektronische Nanosysteme ENAS in Chemnitz ist spezialisiert auf Forschung und Entwicklung im Bereich Smart Systems Integration unter Nutzung von Mikro- und Nanotechnologie gemeinsam mit Partnern aus Deutschland, Europa und weltweit. Abgeleitet von zukünftigem Bedarf der Industrie bietet das Fraunhofer ENAS Dienstleistungen in folgenden Bereichen:

- ▶ Entwicklung, Design und Test von MEMS und NEMS (mikro- und nano-elektro-mechanischen Systemen)
- ▶ Packaging von MEMS und NEMS auf Wafer Ebene
- ▶ Metallisierungs- und Interconnectsysteme für Mikro- und Nanoelektronik sowie 3-D-Integration
- ▶ Neue Sensor- und Systemkonzepte unter Einsatz innovativer Materialsysteme
- ▶ Integration von gedruckten Funktionalitäten in Systemen
- ▶ Zuverlässigkeit und Sicherheit von Mikro- und Nanosystemen.

Abteilung Multi Device Integration

Im Mittelpunkt der Abteilung Multi Device Integration (MDI) steht die Integration von MEMS und NEMS in funktionale Module sowie die Entwicklung von MEMS und NEMS auf Basis von Silizium und Nicht-Silizium-Materialien (Nanokomposite, Keramiken und Polymere).

Im Bereich der Smart Systems Integration kombiniert die Abteilung MDI insbesondere die Aktivitäten auf folgenden Gebieten:

- ▶ MEMS/NEMS-Design
- ▶ Elektronikentwicklung
- ▶ Mikrooptik
- ▶ Fluidische Integration
- ▶ Nanokomposite
- ▶ RF-MEMS
- ▶ Inertialsensorik
- ▶ Messtechnik, Test und Charakterisierung
- ▶ Systemintegration.

Ziel der Forschung ist es, ganzheitliche Technologien unter Auswahl vielfältiger Materialien und Komponenten zu entwickeln und anzuwenden, um Produkte anbieten zu können, die durch intelligente Systemintegration die Ansprüche des Anwenders unter verschiedensten Anforderungen erfüllen.

MEMS/NEMS-Design

Moderne Modellierungs- und Simulationsmethoden sind die Basis für die Entwicklung innovativer MEMS/NEMS-Komponenten. Die Vorausberechnung dieser Systeme setzt das Verständnis über verschiedene physikalische Zusammenhänge voraus. Berechnungsmodelle und gekoppelte Simulationen ermöglichen eine Vorhersage des Komponentenverhaltens sowie eine Optimierung des Designs. Durch Variation von Geometrieparametern in den Wertebereichen zu erwartender Technologietoleranzen kann die Schwankungsbreite der funktionalen Parameter durch Simulation prognostiziert werden. Diese Ergebnisse können genutzt werden, um gegenüber Technologietoleranzen robuste Designvarianten zu identifizieren.

In einer anschließenden Entwicklungsphase werden Modellparameter aus Messergebnissen durch Parameteridentifikation ermittelt und für ein Re-Design bereitgestellt. Das Identifikationsverfahren selbst baut auf den in der Entwicklungsphase erstellten Komponentenmodellen auf. Somit entstehen iterativ verbesserte Modelle, die eine weitere Optimierung des Komponenten- und Systemverhaltens ermöglichen.

Komponentenmodelle werden in Systemmodelle eingebunden, um eine Optimierung des Gesamtsystems durchzuführen. Dabei werden vor allem die Auswirkungen des nichtlinearen mechanischen Komponentenverhaltens und nichtlinearen elektromechanischen Wandlereffekts auf die Elektronik, Regelkreise und Kennlinien untersucht und optimiert.

MEMS/NEMS-Kernkompetenzen:

- ▶ Modellierung und Simulation elektromechanischer Systeme mit konzentrierten Parametern und FEM
- ▶ Entwicklung von MEMS/NEMS-Komponenten und Systemen aus Silizium und Polymermaterialien
- ▶ Prototypentwicklung
- ▶ Entwicklung von Simulationsmethoden für die Multi-skalenmodellierung von NEMS
- ▶ RF-MEMS-Design
- ▶ Maskendesign, Layout und Technologie-Support
- ▶ Design von MOEMS, optisches Design

Die wichtigsten Anwendungsgebiete sind hierbei:

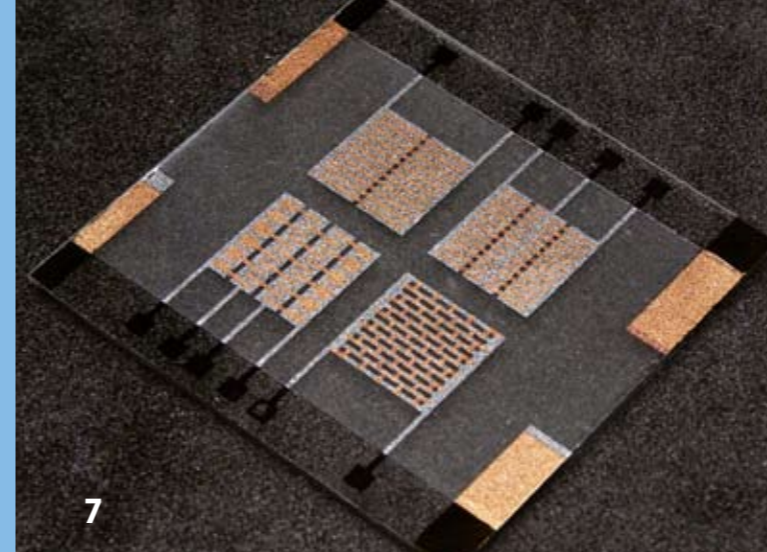
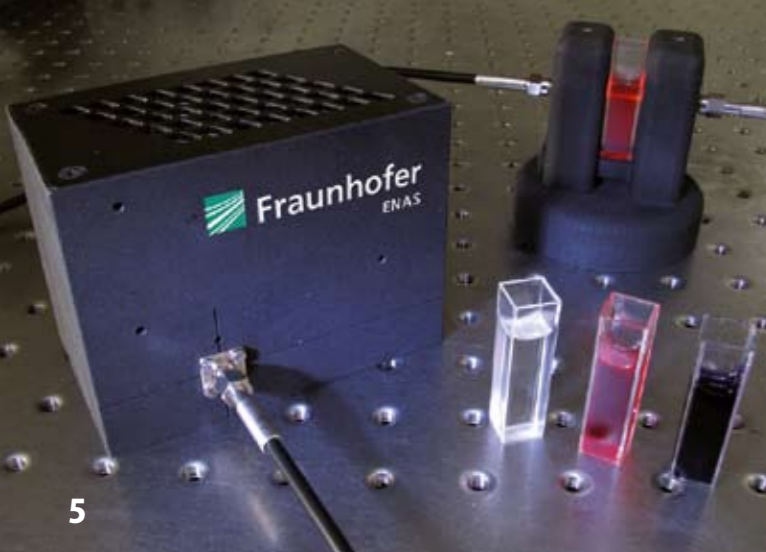
- ▶ Strukturanalysen
- ▶ Gekoppelte elektromechanische Analysen
- ▶ Fluid-Struktur Kopplungen
- ▶ Mikrofluidik
- ▶ Akustik
- ▶ Thermomechanische Spannungen im Package
- ▶ Niederfrequente elektromechanische Analysen
- ▶ Hochfrequente elektromechanische Analysen für RF-MEMS Komponenten

Abb. 1: Bild eines Varaktor-Chips

Abb. 2: Mikrofluidik-Bio-Chip

Abb. 3: Beschleunigungssensor mit 50 μm starken Einkristall-Kammstrukturen

Abb. 4: Design und Simulation im MEMS/NEMS-Labor



Elektronikentwicklung

Elektronik spielt im Betrieb von Sensoren und Aktoren eine wesentliche Rolle. Erst das abgestimmte Zusammenspiel macht aus den einzelnen Elementen ein optimal funktionierendes Gesamtsystem. Die Schwerpunkte der Elektronikentwicklung liegen in den folgenden Gebieten:

- ▶ Analoge und digitale Schaltungstechnik sowie Mixed-Signal
- ▶ Leiterplatten-Layout
- ▶ Softwareprogrammierung.

Mikrooptische Systeme

Das Fraunhofer ENAS entwickelt opto-mechanische Systeme und Geräte auf der Basis von Mikrosystemen. Dies beinhaltet die Modellierung und Simulation der Gesamtsysteme sowie die Entwicklung geeigneter mechanischer Aufbauten und Funktionsgehäuse mittels parametrisierter Konstruktion, einschließlich deren thermische und mechanische Simulation. Ferner ist die Entwicklung besonders rauscharmer Signalver-

arbeitungselektronik Gegenstand dieser Forschungen. Weitere Schwerpunkte sind Test und Qualifizierung, sowohl komponentenbezogen als auch auf Systemebene.

Nahinfrarot-Spektroskopie (NIR/MIR)

Exemplarisch für die Aktivitäten im Bereich der Mikrooptik ist die Entwicklung und Validierung von Infrarot-MEMS-Spektrometern. Solche Systeme können für unterschiedliche Frequenzbereiche konfiguriert werden und so in diversen Anwendungen zum Einsatz kommen. Lebensmitteluntersuchungen, Umweltkontrollen, medizinische Diagnostik, die physikalische Messtechnik oder forensische Analysen zählen zu den vielfältigen Einsatzfeldern.

Temperaturscanner

Ein neuartiges Prinzip eines Infrarot-Zeilenscanners für die genaue und schnelle Erfassung der Temperaturverteilung im Bereich von 350 °C bis 2000 °C basiert auf Silizium-Mikromechanik. Herzstück ist eine mikromechanische Ablenkeinheit, welche die einfallende Wärmestrahlung auf einen Detektor lenkt.

Durchstimmbares Infrarot-Filter (Fabry-Perot Interferometer)

Das Fabry-Perot Interferometer (FPI) basiert auf Viertel-Lambda-Schichten auf Silizium-Trägern, die als Spiegel genutzt werden. Eine speziell entwickelte Parallelführung des beweglichen Spiegels sowie die Herstellung sehr ebener und paralleler Spiegel ermöglichen eine potenziell hohe Wellenlängenauflösung und hohe Transmissionsraten.

Abb. 5: Gesamtsystem zur Transmissionsmessung: Mikro-Spektrometer mit Küvetten

Abb. 6: Mikrofluidische Kartusche mit integrierten, gelbasierten low-cost Pumpen für die In-vitro Diagnostik

Abb. 7: Komposit-basierter Feuchtesensor

Abb. 8: Optische Charakterisierung von Quantenpunkten mittels Einbettung in verschiedene Matrizen für die Komposition

Fluidische Integration und System-Technologie

Mikrofluidik hat sich zu einem wichtigen Instrument für viele Anwendungen, unter anderem in den Bereichen des Gesundheitswesens, der chemischen Verarbeitung und der Konsumgüter, etabliert. Mikrofluidische Systeme ermöglichen schnellere Analysen, geringere Proben- und Reagenzenvolumina, neuartige Detektions- und Kühlmechanismen sowie den kontrollierten Ablauf von makroskopisch nur schwer beherrschbaren chemischen Reaktionen. Durch die Integration zusätzlicher Funktionalitäten in diese mikrofluidischen Systeme erhält man intelligente, autonome Geräte, reduziert fluidische Schnittstellen zur Außenwelt und verringert die Komplexität der benötigten Kontroll- und Auswertegeräte.

Die Abteilung besitzt im Bereich der fluidischen Integration folgende Kompetenzen:

- ▶ Mikrofluidische Modellierung und Systemdesign
- ▶ Herstellung mikrofluidischer Komponenten aus verschiedenen Materialien, wie Polymeren, Glas und Silizium
- ▶ Integration von Funktionalitäten, wie Pumpen, Ventile, Temperaturregelung und Sensoren in mikrofluidische Systeme
- ▶ Sensoren und Aktoren für die aktive Strömungsbeeinflussung
- ▶ Mikrofluidische und thermische Charakterisierung.

Vollintegrierte Kartuschen für die In-vitro Diagnostik

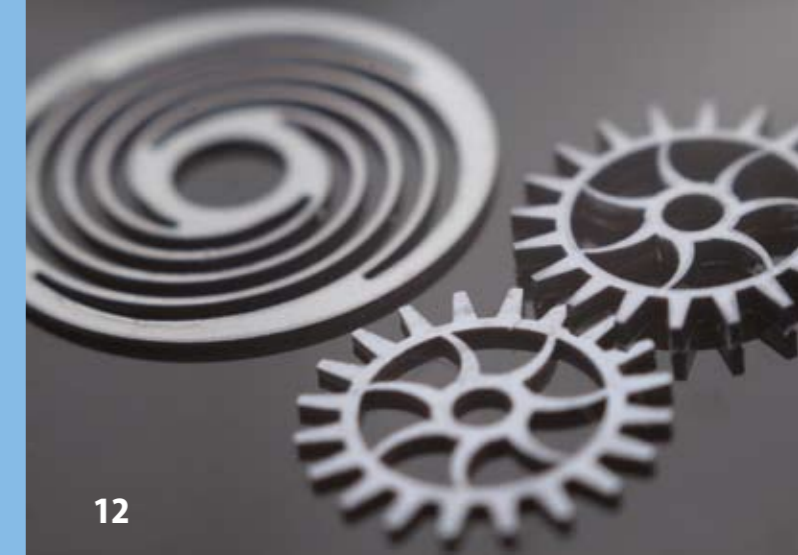
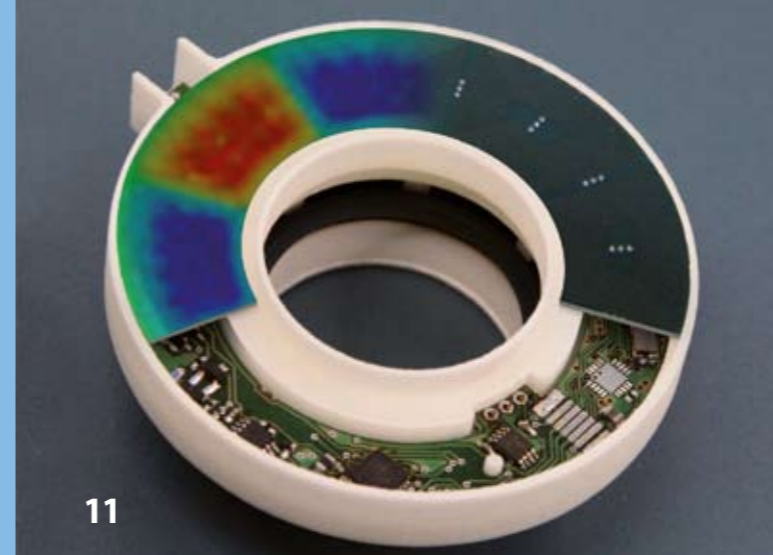
Das Fraunhofer ENAS entwickelte eine Technologie für komplette mikrofluidische Einweg-Kartuschen, welche Flüssigreagenzien und integrierte Mikropumpen enthält. Diese Kartusche ist in sich abgeschlossen und kann somit Bio-Assays vollständig automatisiert ablaufen lassen.

Nanokomposite

Als moderne Hybridmaterialien kombinieren die Nanokomposite polymere Matrizen mit nanoskaligen Einschlüssen wie Partikeln, Fasern oder Röhren. Unterschiedlichste Funktionalitäten werden durch verschiedene Nano-Füllstoffe realisiert, während die Matrizen die mechanische Stabilität gewährleisten oder die elektrische Anbindung an die Umgebung herstellen. In aktuellen Arbeiten beschäftigen wir uns mit der Entwicklung von Feuchtesensoren, piezoresistiven Kompositsensoren zur Detektion von Kräften sowie mit der Verwendung von Halbleiter-Nanokristallen für die Nanosensorik bzw. in lichtemittierenden Systemen.

Polymerbasierte optische Sensorik

Polymerbasierte Nanokompositsysteme eignen sich besonders für die materialintegrierte Sensorik zum Beispiel im Bereich der Zustandsüberwachung. Derzeit werden hier Schichtsysteme entwickelt, in denen Halbleiter-Nanokristalle gezielt in verschiedene Polymermatrizen eingebettet werden. Ziel ist es, Überbelastungen an mechanischen Bauteilen als Veränderung der Fluoreszenz der Nanokristalle zu detektieren. Aufgrund der flexiblen mechanischen Eigenschaften der Polymere wird eine Weiterentwicklung der Sensoren für gekrümmte oder strukturierte Oberflächen angestrebt.



RF-MEMS

Der Einsatz von MEMS in Mikrowellenschaltungen als Ersatz für herkömmliche Halbleiterbauelemente kann eine entscheidende Reduzierung der DC-Verlustleistung und der Signaldämpfung bewirken. Durch die elektrostatische Aktuierung der mechanischen Komponenten beträgt die DC-Leistungsaufnahme nahezu null. Für die Herstellung von RF-MEMS setzt ENAS einen hochentwickelten Fertigungsprozess (Air Gap Insulated Microstructure; AIM) ein. Die Verwendung einer niederohmigen Metallisierung und verlustarmer Substrate führt zu sehr guten Hochfrequenzeigenschaften. Die hohe Temperaturstabilität erlaubt die Nutzung verschiedenen Packaging-technologien. Die Qualität eines hermetisches Chip-Scale-Package für Frequenzen über 60 GHz wurde erfolgreich nachgewiesen.

Inertialsensorik

Inertialsensoren dienen zur Messung von Beschleunigung, Vibration, Neigung, Schock und Drehrate. Ein großer Vorteil mikromechanischer Inertialsensoren sind die wesentlich geringeren Herstellungskosten im Vergleich zu anderen mechanischen oder optischen Varianten. Anwendungsgebiete finden sich in der Industrieelektronik, im Fahrzeugbau, in der Luft- und Raumfahrt sowie in der Medizintechnik. Zu den Endprodukten zählen vor allem Navigationssysteme, stabilisierte Antennen, Systeme für die Zustandsüberwachung von Maschinen, Geräten und Fahrzeugen sowie medizinische Überwachungsgeräte. Für die Entwicklung hochpräziser Inertialsensoren werden verschiedene Herstellungstechnologien angeboten. Dabei wird auf ein großes Aspektverhältnis Wert gelegt, um einen ausgezeichneten elektromechanischen Wandlereffekt und geringste Querempfindlichkeit zu erzielen.

Messtechnik, Test und Charakterisierung

In den zurückliegenden Jahren wurde eine Methode zur schnellen Bestimmung von Maß- und Materialparametern, basierend auf einer Kombination der Finite-Elemente-Methode und der Messung von Eigenfrequenzen, für die Anwendung als extrem zeiteffizienter Wafer-Level-Test entwickelt und an verschiedene MEMS-Systeme angepasst. Dabei werden in der Herstellungsphase die Eigenfrequenzen durch elektrostatische Anregung der Proben über externe, optisch transparente Elektroden und gleichzeitige optische Schwingungsmessung und -analyse ermittelt. Die gesuchten Maß- und Materialparameter werden durch einen Regressionsalgorithmus bestimmt, der die aktuellen Messdaten und vorab berechnete Daten der Finite-Elemente-Analyse kombiniert.

Für messtechnische Analysen stehen unter anderem folgende Instrumente zur Verfügung:

- ▶ MEMS-Schwingungsmessplatz auf Basis eines Waferprobers und optischer Schwingungsmesstechnik zur Analyse von Bewegungen in-plane und out-of-plane
- ▶ miniaturisierte Vakuumkammern, LCR-Meter, Signalgenerator, elektrische Messtechnik
- ▶ Weißlicht-Interferometer mit stroboskopischer Beleuchtung zur Bestimmung der Topographie, der Rauheit und zur Messung dynamischer Deformation (bis 150 kHz)
- ▶ RF-MEMS-Messplatz mit Waferprober, Vektor-Netzwerk Analysator bis 110 GHz, Signalgeneratoren und Spektrumanalysatoren.

Systemintegration

Die Integration von Funktionalitäten spielt für die Realisierung der Smart Systems Vision eine wichtige Rolle. Ein intelligentes System sollte eine Funktion nicht lediglich monoton ausführen, sondern auch mit seiner Umwelt interagieren und auf diese reagieren können. Die Anwendungsfelder der Sensorintegration sind vielfältig:

Zustandsüberwachung von Dichtringen

Die Zustandsüberwachung wartungsintensiver Komponenten, wie die Dichtungsringe an rotierenden Teilen, nutzt den Verschleiß eines aufgetragenen Dünnschichtwiderstandes. Permanente Teileüberwachung kann:

- ▶ unnötige Ausfallzeiten und Personalkosten für Instandhaltungsprüfungen verhindern,
- ▶ Anlagenausfälle aufgrund unvorhergesehenen Komponentenversagens minimieren und
- ▶ unnötige Ausgaben für den präventiven Komponentenaustausch verhindern und somit Instandhaltungskosten und Folgekosten für unerwartete Ausfälle verringern oder vermeiden.

Analog zur Zustandsüberwachung von Lagern, zum Beispiel mit Hilfe von Vibrationssensoren, ist die Überwachung entsprechend relevanter Daten an speziellen Dichtringen, sogenannten Wellendichtungen, von Bedeutung. Je nach Einsatzbereich können unterschiedliche Informationen von Bedeutung sein, wie zum Beispiel Dichtheit des Rings, Temperatur an der Dichtlippe oder das Erreichen einer Verschleißgrenze. Gemeinsam

mit der Freudenberg Dichtungs- und Schwingungstechnik GmbH & Co. KG in Weinheim werden Entwicklungen in der drahtlosen Übertragung vorangetrieben.

Microstruktur Vario Laser

Mikrolaserbearbeitung ist ein leistungsfähiges Werkzeug. Es ermöglicht eine schnelle Umsetzung neuer Designs durch direktes Beschreiben (keine Masken nötig) und Verarbeiten computergenerierter Dateien. Besonders die Pikosekunden-Impuls-Laserbearbeitung ermöglicht hohe Präzision und kurze Bearbeitungszeiten bei gleichzeitig bester Qualität für nahezu jedes Material. Die Anlage besitzt einen 10 W-Pikosekunden-Laser mit vier verschiedenen Wellenlängen (1064 nm, 532 nm, 355 nm und 266 nm), zusätzlich zu einem CW-Thulium-Faser-Laser (1908 nm). Durch das Einwirken auf verschiedene Parameter, wie Leistung, Pulsfrequenz, Zeichengeschwindigkeit, Brennfleckdurchmesser etc., kann ein optimales Ergebnis erzielt werden.

Abb. 9: Mikrospulenkomponenten

Abb. 10: On-Wafer-Messtechnik mit RF-Sonde

Abb. 11: System zur Zustandsüberwachung eines Dichtrings

Abb. 12: Mittels Ultra-Kurzimpuls-Laserbearbeitung hergestellte Siliziumkomponente

Kontakt:

Fraunhofer-Institut für Elektronische Nanosysteme ENAS
Abteilung Multi Device Integration

Technologie-Campus 3
09126 Chemnitz

Leiter der Abteilung Multi Device Integration
Prof. Dr. Thomas Otto
Telefon: +49 371 45001-221
Fax: +49 371 45001-321

E-Mail: thomas.otto@enas.fraunhofer.de
Internet: <http://www.enas.fraunhofer.de>

Titelseite:
Hochpräziser MEMS-Inertialsensor

Bilder: Fraunhofer ENAS
Andreas Morschhauser, Hendrik Specht, Roman Forke, Mathias Lipowski