



# Extrem vielseitig

## Der Micro System Analyzer im MEMS Laboratory der japanischen Tohoku University

In diesem Labor und in vielen anderen Laboratorien der Welt sind die Polytec Micro System Analyzer unverzichtbare Werkzeuge für die mechanische Charakterisierung von MEMS-Bausteinen. Dieser Artikel behandelt drei typische Beispiele für die Messung und Bewertung von MEMS durch Polytec Messtechnik.

### HOCHFREQUENZ-„DISK“-TYP- MEMS-RESONATOREN

Mechanische Resonanz ist eine der fundamentalen dynamischen Eigenschaften von MEMS. Sie wird für Gyroskope, Massensensoren, optische Scanner, Clock-Oszillatoren, etc. genutzt. Ein Forschungsschwerpunkt bei MEMS-Resonatoren ist das Erreichen höherer Resonanzfrequenzen, um dadurch neue Anwendungen zu ermöglichen bzw. zu entwickeln. Elektrostatische und piezoelektrische Wandlung sind zwei wichtige Antriebsprinzipien, wobei der Forschungsschwerpunkt anfänglich auf elektrostatischen MEMS-Resonatoren

lag. Allerdings stellt die relativ schwache elektromechanische Kopplung für viele Anwendungen des elektrostatischen Antriebsprinzips ein großes Problem dar. Deshalb entschied man sich für Resonatoren mit piezoelektrischem Antriebsprinzip vom „Disk“-Typ, die sich schon in vorangegangenen Studien bewährten.

Bild 1 zeigt eine Anordnung von zwei piezoelektrischen „Disk“-Typ-Resonatoren, die mechanisch über ein zentrales kreisförmiges Silizium-Element verbunden sind [1]. Aufgesputtertes Aluminiumnitrid (AlN) bildet einen piezoelektrischen Dünnschichtfilm. Bild 2 zeigt die Fre-

quenzcharakteristik im Bereich bis 400 MHz. Jeder Peak entspricht einer spezifischen Resonanzmode, dabei ist die (2, 4) Mode bei 292,8 MHz die benötigte „Haupt“-Mode. Die Modenform kann mittels der Finite Elemente Methode (FEM) bestimmt werden, siehe Bild 3. Allerdings ist es aufgrund der kleinen Größe der Struktur und der hohen Frequenz nicht einfach die tatsächliche Modenform zu messen.

In dieser Untersuchung wurde ein Polytec UHF-120 zur Beobachtung der tatsächlichen Schwingformen von „Disk-Typ“-Resonatoren eingesetzt [2]. Das Polytec UHF-120 ist ein Hochfrequenz Laser-Doppler-Vibrometer, das Schwingwege bis zu Frequenzen von 1.200 MHz erfasst. Das Rauschen beträgt lediglich 10 pm. Bild 4 zeigt die gemessenen (2, 3) und (2, 4) Schwingungsmoden. Die tatsächlich gemessenen Schwingungsmoden weichen von den berechneten Moden, die in Bild 3 dargestellt sind, ab. Zusätzlich gibt es eine lokale starke Amplitudenüberhöhung im Bereich „links-oben“, die möglicherweise auf eine Fehlalrichtung bei der lithographischen Strukturierung zurückzuführen ist. Leider stellte man fest, dass sich dieser MEMS-Resonator-Typ für kommerzielle Frequenz-Steuerungsanwendungen praktisch nicht eignet, deshalb wandte man sich als Ergebnis dieser Studie anderen akustischen Resonator-Typen zu. Es wurde jedoch deutlich, ►

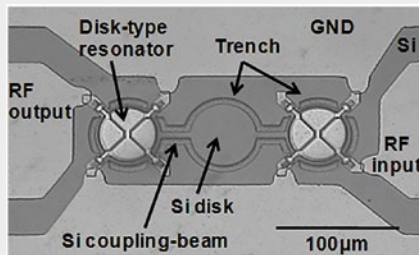


Bild 1: Mechanisch gekoppelte piezoelektrische „Disk“-Typ-MEMS-Resonatoren

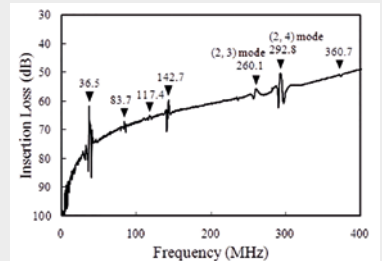


Bild 2: Frequenzcharakteristik von „Disk“-Typ-MEMS-Resonatoren aus Bild 1

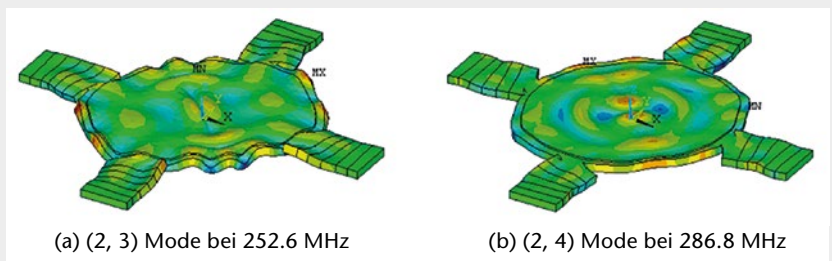


Bild 3: Modenformen berechnet mittels FEM

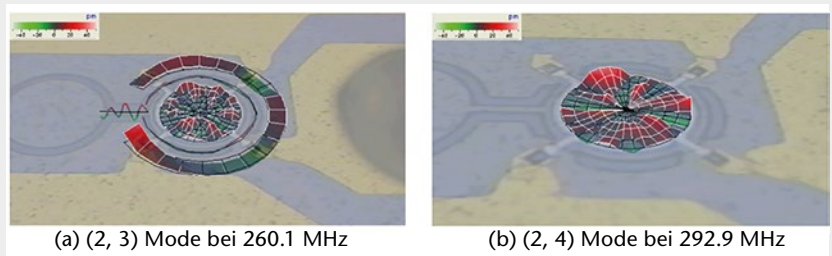


Bild 4: Mittels Scanning-Laservibrometrie (Polytec UHF-120) bestimmte Modenformen

dass das Polytec UHF-120 Vibrometer ideal für die Untersuchung derart hochfrequent schwingender MEMS-Resonatoren ist.

### SEITWÄRTS BETRIEBENER PZT<sup>1</sup>-AKTUATOR

Aktuatoren spielen oft eine limitierende Rolle bei der MEMS-Entwicklung. Natürlich wünscht sich jeder auch von einem kleinen Aktuator große Kräfte und Stellwege, was für MEMS-Aktuatoren häufig (noch) zu viel verlangt ist. Auf der anderen Seite erwartet man ständig neue MEMS-Aktuatoren mit höherer Leistung und/oder neuen Funktionen, die das Anwendungsspektrum von MEMS erweitern. Bild 5 zeigt einen kürzlich entwickelten neuartigen PZT-MEMS-Aktuator [3]. Normalerweise bewegen sich PZT-MEMS-Aktuatoren senkrecht zur Bauteilebene (Out-of-Plane), da die Vorzugsrichtung durch die Biegebewegung eines PZT Dünnsfilms vorgegeben ist. Der neue Aktuator hingegen bewegt sich in der In-Plane-Richtung, d.h. seitlich. Bild 6 erläutert das Funktionsprinzip des seitwärts angetriebenen PZT-Aktuators. Der Kantilever besteht aus einer seitwärts gestapelten PZT/Silizium/PZT-Struktur, die durch das Auffüllen von 2 µm-breiten

<sup>1</sup>PZT: Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) ist ein Stoffverbund aus Blei (Pb), Sauerstoff (O) und Titan (Ti) oder Zirkonium (Zr) und gehört zu der Familie der Ferroelektrika. Es eines der weltweit am häufigsten genutzten piezoelektrischen Materialien.

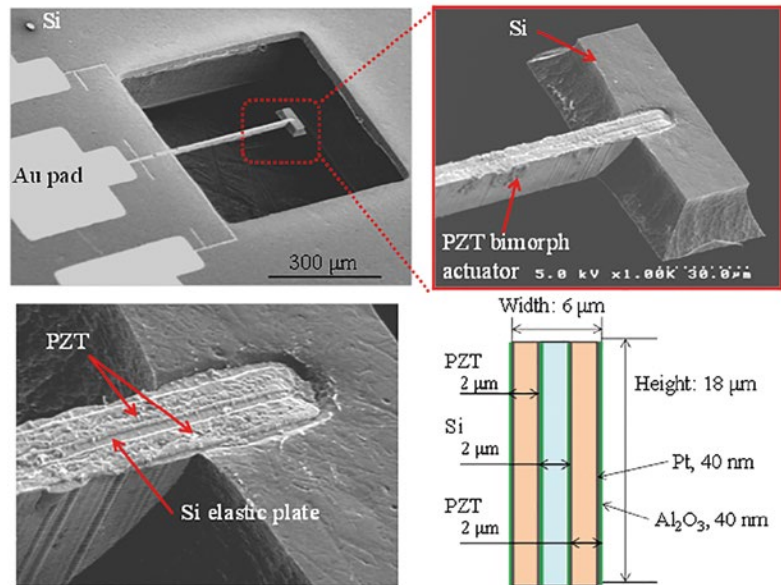


Bild 5: Seitwärts angetriebener MEMS-Aktuator auf Basis einer PZT/Si/PZT-Struktur mit großem Aspektverhältnis.

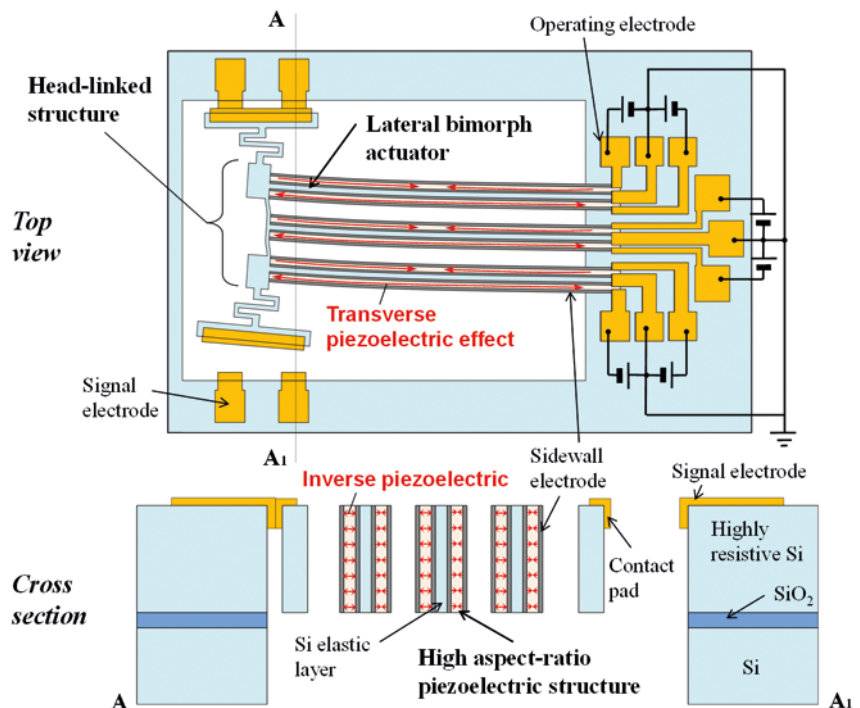


Bild 6: Funktionsprinzip des seitwärts angetriebenen PZT-Aktuators

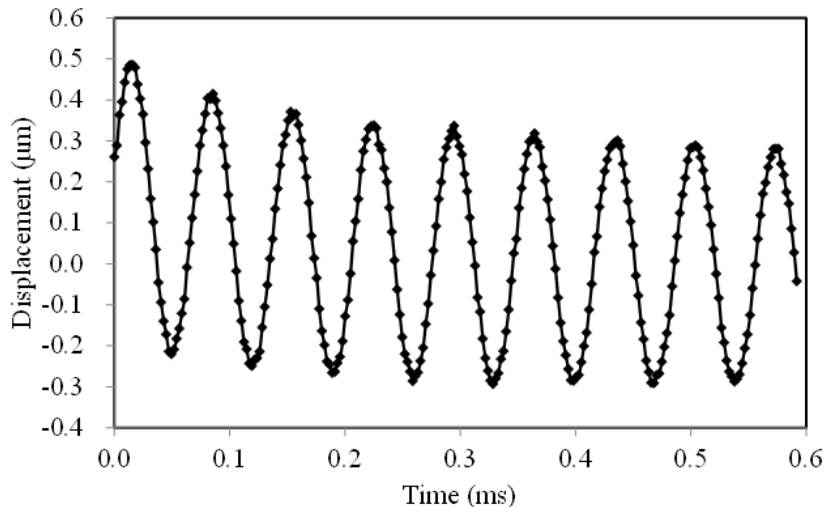


Bild 7: Abklingende Schwingung des seitwärts angetriebenen PZT-Aktuators gemessen mittels stroboskopischer Video-Mikroskopie (Polytec MSA-500)

Silizium-Kanälen mit Sol-Gel-basierten PZT-Nano-Komposit-Material entstehen. Auf beiden Seitenwänden jedes PZT-Balkens wurden dünne Platin-Schichten als Antriebselektroden mittels Atomic Layer Deposition (ALD) aufgebracht. Der neue Kantenlever biegt sich so mittels eines Bimorph-Mechanismus und ist deshalb viel kleiner als konventionelle elektrostatische Kamm-Antriebe. Der in Bild 5 dargestellte Aktuator wurde mit dem Standard-MEMS-Evaluierungstool, dem Polytec MSA-500 charakterisiert. Das MSA-500 umfasst ein Scanning Laser-Doppler-Vibrometer, ein Weißlichtinterferometer für die Erfassung der Topografie und ein stroboskopisches Video-Mikroskop. Das letztere dient zur Messung der lateralen Bewegung von MEMS-Aktuatoren.

Bild 7 zeigt eine abklingende Schwingung eines Kantenlever, gemessen mit dem MSA-500 In-Plane-Messverfahren. Mittels Fourier-Transformation der Daten aus Bild 7, wurde die fundamentale Resonanzfrequenz ( $f_0$ ) mit 14,26 kHz bestimmt. Zusätzlich wurde die Dichte  $\rho_{\text{PZT}}$  des PZT aus der Gewichts-differenz nach selektivem Nass-Ätzen des PZT-Materials bestimmt. Aus  $f_0$  und  $\rho_{\text{PZT}}$  wurde dann das Elastizitätsmodul des PZT-Materials bestimmt. Die statische Auslenkung der Kantenlever-Spitze betrug 5 µm und 10 µm bei einer jeweiligen Antriebsspannung von 25/0 V (unimorpher Antrieb) beziehungsweise 25/-5 V (bimorpher Antrieb). Schließlich bestimmte man noch die piezoelektrische Konstante  $d_{31}$  des Materials bei 36 pC/N.

## HERMETISCHE KAPSELUNG ANODISCH GEBONDETER LTCC-SUBSTRATE AUF WAFER-EBENE

Viele MEMS umfassen sehr kleine bewegliche und/oder frei aufgehängte Strukturen, die hermetisch gekapselt werden müssen. Dies geschieht einerseits aus Schutz vor Umwelteinflüssen wie Feuchtigkeit, Staub und anderen Kontaminationen, andererseits aus Gründen der Luftdämpfung und der thermischen Isolation, etc. Die Kapselung hat einen großen Einfluss auf Größe und Preis der MEMS, daher ist die Kapselung auf Wafer-Ebene entscheidend für eine erfolgreiche Kommerzialisierung von MEMS. Bis heute werden für die hermetische Kapselung auf Wafer-Ebene häufig Borsilikat-Glasdeckel anodisch an den Wafer gebondet. Das anodische Bonden selbst ist ein einfacher und zuverlässiger Prozess mit hoher Ausbeute, allerdings ist der elektrische Zugang zu den MEMS im hermetisch abgeschlossenen Hohlraum schwierig.

Zusammen mit der Firma Nikko (Ishikawa, Japan) entwickelte man Niedertemperatur-Einbrand-Keramik-Wafer (low temperature cofired ceramic, LTCC), die anodisch mit Silizium-Wafern zusammengebondet werden können [4]. Das LTCC-Material hat den gleichen thermischen Ausdehnungs-Koeffizienten wie Silizium und enthält Natrium-Ionen, die oberhalb von ▶

300°C eine Ionen-Leitfähigkeit ermöglichen, darüber hinaus verhält sich der anodische Bondprozess wie bei Borsilikat-Glas. Wie bei konventionellen LTCC-Wafern, werden auch die anodisch bondfähigen Wafer durch Aufeinanderlegen und Sintern sogenannter „green sheets“ produziert, die eine „Innenverdrahtung“ über gestanzte und metallisierte Lochkanäle ermöglichen (Bild 8).

Wie in [5, 6] dargestellt, können gleichzeitig mit dem Bondprozess die Metall-VIAs im LTCC-Wafer und die MEMS auf dem Silizium-Wafer mittels poröser Gold-Bumps elektrisch verbunden werden. Die Zuverlässigkeit des hermetischen Abschlusses wurde mit Hilfe von Silizium-Membranen getestet. Den LTCC-Wafer bondete man hierzu im Vakuum mit dem Membran-Test-Wafer anodisch zusammen. Anschließend wurde die Verformung der Membranen unter atmosphärischem Luftdruck mit Hilfe des MSA-500 Weißlichtinterferometers bestimmt. Wie in Bild 9 dargestellt, ist die Deformation der Membranen während eines thermischen Lasttests (40°C × 30 min/125°C × 30 min) vernachlässigbar. Die hohe Zuverlässigkeit der elektrischen Verbindungen über die porösen Gold-Bumps konnte über Widerstandsmessungen von in Reihe geschalteten Komponenten nachgewiesen werden.

Neben der generellen Zuverlässigkeit ist der Restdruck innerhalb des abgekapselten Hohlraums ein wichtiges Thema. Es ist bekannt, dass Sauerstoff während des anodischen Bondens elektrochemisch generiert wird. Dies führt dazu, dass der Druck innerhalb der Kavität oftmals höher ist als der Umgebungsdruck beim Bonden. Der Druck in der dicht abgeschlossenen Kavität wurde ebenfalls über die Membran mittels eines Null-Gleichgewichtsverfahrens in einer Vakuumkammer bestimmt. Der Verkapselungsdruck entspricht dem Kammerdruck, bei dem die Membran flach war. Das Messobjektiv des MSA-500 wurde hierzu mit einer Spezialoptik kombiniert, die den Einfluss des Kammerfensters kompensiert. Bild 10 zeigt beispielhafte Messdaten. Bei Einsatz eines nichtflüchtigen Dünnschicht-Getters (non-evaporable getter, NEG) liegt der Kapseldruck unterhalb der Nachweisgrenze (bei diesem Experiment 80 Pa). ■

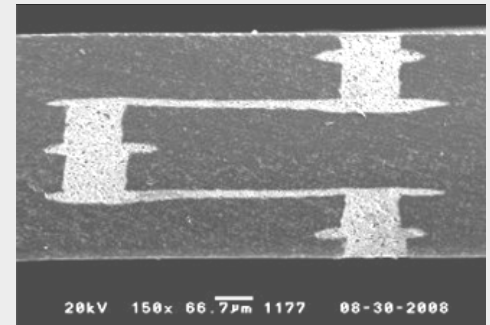


Bild 8: Querschnitt eines anodisch gebondeten LTCC-Wafer

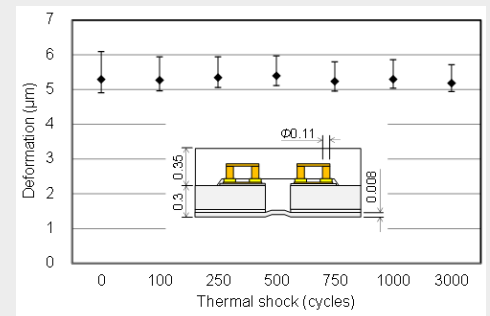


Bild 9: Zuverlässigkeit eines hermetisch gekapselten Wafers (Kapselung mittels anodisch gebondetem LTCC-Wafer)

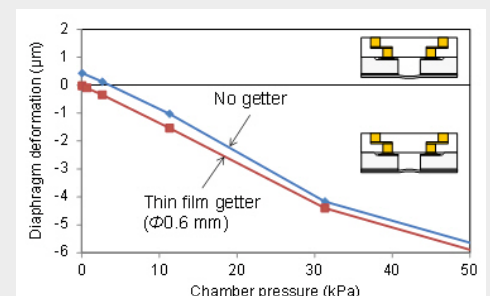


Bild 10: Dichtungsdruck-Messung mittels der Null-Gleichgewichtsmethode (Entgasen bei 400°C für 30 min → Anodisches Bonden bei 400°C und 600 V für 1 min, Hohlraumvolumen = 0,26 mm<sup>3</sup>)

## REFERENZEN

- [1] Takeshi Matsumura et al., Multi-band radio-frequency filters fabricated by using polyimide-based membrane transfer bonding technology, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 20 (2010) 095027
- [2] Takeshi Matsumura et al., Vibration Mode Observation of Piezoelectric Disk-Type Resonator by High-Frequency Laser Doppler Vibrometer, *Electronics and Communications in Japan*, 95 (2012) pp. 33–41
- [3] Shinya Yoshida et al., Fabrication and characterization of laterally-driven piezoelectric bimorph MEMS actuator with sol-gel-based high-aspect-ratio PZT structure, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 23 (2013) 065014
- [4] Shuji Tanaka et al., Wafer-Level Hermetic Packaging Technology for MEMS using Anodically-Bondable LTCC Wafer, 24th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, Cancun, Mexico, January 23–27, 2011 pp. 376–379
- [5] Shuji Tanaka et al., Versatile Wafer-Level Hermetic Packaging Technology using Anodically-Bondable LTCC Wafer with Compliant Porous Gold Bumps Spontaneously Formed in Wet-Etched Cavities, 25th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, Paris, France, January 29–February 2, 2012, pp. 369–372
- [6] Shuji Tanaka et al., Electrical Interconnection in Anodic Bonding of Silicon Wafer to LTCC Wafer Using Highly Compliant Porous Bumps Made from Submicron Gold Particles, *Sensors and Actuators A*, 188 (2012) pp. 198–202

### Danksagung

Abschließend möchte ich Dr. Takeshi Matsumura, Herrn Nan Wang und Herrn Mamoru Mohri für die Beispiele 1, 2, 3 danken. Die Beispiele 1 und 2 wurden gefördert durch das "Funding Program for World-Leading Innovative R&D on Science and Technology", und Beispiel 3 wurde teilgefördert durch das "Creation of Innovation Centers for Advanced Interdisciplinary Research Areas Program".

Zum Schluss gilt mein Dank Polytec für die Möglichkeit diesen Artikel zu publizieren.

### Kontakt

Professor Shuji Tanaka  
Department of Bioengineering and Robotics,  
Graduate School of Engineering  
Tohoku University