

Piezoelektrische, mikromechanische Ultraschallwandler mit adaptiver akustischer Kanalgeometrie und Chipgröße

Chris Stoeckel^{1,2}, Shubham Mulay^{1,3}, Katja Meinel^{1,2}, Jan Seiler^{1,2}, Dirk Ullmann¹ und Danny Reuter^{1,2}

¹Fraunhofer-Institut für elektronische Nanosysteme, Chemnitz, Deutschland

²Zentrum für Mikrotechnologien, TU Chemnitz, Chemnitz, Deutschland

³Thera Medical, München, Deutschland

Kontakt: chris.stoeckel@zfm.tu-chemnitz.de

Einleitung

Die Autoren zeigen miniaturisierte, piezoelektrische Ultraschallwandler, entwickelt mit einer patentierten Herstellungstechnologie für adaptive akustische Kanalgeometrien und Chipgrößen [1].

Mikromechanische Ultraschallwandler sind im Vergleich zu Bulk-Wandlern klein, sensitiv, RoHS-kompatibel, breitbandig und skalierbar zu fertigen.

Herkömmliche Fertigungsansätze zur Entwicklung von mikromechanischen Ultraschallwandlern haben durch die Nutzung von fotolithografischen Ebenen den Nachteil, dass die Elektrodengeometrien und die Größe des Chips in der Entwurfsphase festgelegt sind. Die Anzahl und Geometrie der akustischen Kanäle lassen sich nach der Fertigung nicht oder nur sehr eingeschränkt ändern. Gleiches gilt für die Chipgeometrie. Dies führt dazu, dass für die Fertigstellung neuer Designs und kundenspezifischer Anpassungen neue Fertigungsdurchgänge notwendig sind. Diese benötigen in der Regel mehrere Monate und die Kosten entsprechen den Kosten einer kompletten Waferfertigung. In Folge sind die Entwicklungszyklen für neue MUTs lang und kostenintensiv. Für die Evaluation werden in Forschungs- und Entwicklungsprojekten, je nach Anwendung und Forschungsfrage, zumeist nur wenige Prototypen benötigt. Die Kosten für solche Prototypen sind entsprechend hoch. Insbesondere für kleinere und mittlere Unternehmen, KMUs, ist die Technologie damit bisher nicht attraktiv. Ebenso sind die Entwicklungszyklen in akademischen Forschungsprojekten zu lang, um mit der Technologie rasch auf sich verändernde Forschungsfragen zu reagieren.

Mit den in dieser Veröffentlichung präsentierten piezoelektrischen, mikromechanischen Ultraschallwandlern (piezoelectric micromachined Ultrasonic transducer - PMUT) wird eine Technologie präsentiert, die die Verfügbarkeit von applikationsspezifischen MUTs wesentlich vereinfacht.

Hierzu werden die Wandlerelemente in voneinander unabhängige Einheitszellen unterteilt und auf dem Wafer rasterförmig, symmetrisch angeordnet. Diese Einheitszellen werden durch Technologien der Mikrotechnik hergestellt und liegen nach der Fertigung als Wafer vor. Je nach benötigten Chipgröße werden die Bauelemente nach der Fertigung kundenspezifisch vereinzelt. Im Anschluss kann durch automatisches Drahtbonds eine elektrische Verbindung zwischen

den Einheitszellen hergestellt werden. Hier ist es möglich die Kanalgeometrie frei zu definieren. Mit dieser Methode zeigen die Autoren eine Möglichkeit PMUTs mit wenigen Arbeitsschritten und minimalem Ressourceneinsatz zu adaptieren. Aufgrund der versatilen Nutzbarkeit der Technologie werden die Bauelemente als „Universal PMUTs“ bezeichnet.

Methoden und Materialien

PMUTs bestehen aus dünnen, mechanisch beweglichen Membranen. Auf diesen Membranen befindet sich ein piezoelektrisches Material zwischen zwei Elektroden. Wird das piezoelektrische Material elektrisch angeregt, dann verformt es sich, die Membran wird verwölbt und ein Schallsignal emittiert. Mit dem reziproken Prinzip kann ein Schallsignal gemessen werden.

Bei dem Entwurf von mechanisch beweglichen Membranen mit piezoelektrischen Wandlern ist zu beachten, dass die Richtung des elektrischen Felds im Wandler und die Dehnung, beziehungsweise Stauchung, miteinander durch die Eigenschaften des piezoelektrischen Kristalls verknüpft sind. Da eine sich vorwölbende Membran an ihrer Oberfläche sowohl Dehnung, als auch Stauchung aufweist, wird ein PMUT mit einer inneren und/oder äußeren Elektrode betrieben. Zur Reduktion der Komplexität in Herstellung und elektrischer Ansteuerung wird nachfolgend ein Design aufgezeigt, bei dem ausschließlich eine äußere Elektrode genutzt wird.

Die Membranen stellen die mechanische Struktureinheit des Systems dar. Durch deren Geometrie wird die Resonanzfrequenz festgelegt. Die Höhe der einzelnen Schichten ist durch die Technologie fixiert und wird nachfolgend nicht geändert. Die Anpassung der Resonanzfrequenz erfolgt somit über die Definition der Durchmesser der Membranen. In dieser Veröffentlichung werden Membranen mit 50 µm bis 200 µm Durchmesser verglichen. Die Durchmesser der Membranen sind je Wafer konstant, um die Reproduzierbarkeit der Bauelemente zu erhöhen. Die Resonanzfrequenz der Strukturen kann nachträglich nicht geändert werden. Die Durchmesser sind so gewählt, dass sich die Frequenzbänder bei Anwendungen in Flüssigkeiten mit hoher Bandbreite ergänzen und somit ein möglichst breites Frequenzspektrum abgedeckt werden kann. In Abbildung 1 ist eine schematische Darstellung der Frequenzbänder illustriert.

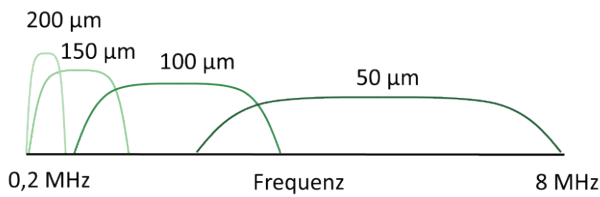


Abb. 1: Schematische Darstellung der Frequenzbänder je nach Durchmesser der Membranen.

Die Membranen werden in einer Einheitszelle von $1 \times 1 \text{ mm}^2$ angeordnet. Je nach Membrandurchmesser ergibt sich eine andere Anzahl von Wandlern pro Einheitszelle. Jede dieser Zellen hat eine obere und untere Elektrode, um das piezoelektrische Material zu kontaktieren.

Die Fertigung der Membrandurchmesser ab $100 \mu\text{m}$ erfolgt auf Voll-Siliziumsubstraten. Die Fertigung der Membranen mit $50 \mu\text{m}$ Durchmesser ist mittels Cavity-SOI-Wafersubstraten erfolgt, bei denen die Membranen in vergrabenen Kavitäten vor der Abscheidung der Funktionsmaterialien hergestellt wird. Auf den Substraten werden Isolatoren und Dünnschichten zur Anpassung des intrinsischen Stresses abgeschieden. Hierfür wird Siliziumnitrid und -oxid verwendet. Anschließend wird Ti/Pt für die untere Elektrode und AlN als piezoelektrisches Wandlermaterial abgeschieden. Das Platin dient hierbei als Saatschicht für ein C-achsenorientiertes Wachstum des AlN. Das AlN wird lokal entfernt, um später einen elektrischen Kontakt zum Pt herstellen zu können. Als obere Elektrode wird Aluminium verwendet. Bei den Wafern mit Vollsiliziumsubstraten wird rückseitig das Silizium entfernt um die Membranen freizustellen. Die Fertigung der Wandler auf Waferlevel ist abgeschlossen. Eine beispielhafte Darstellung der PMUTs zu diesem Fertigungsstadium ist in Abbildung 2 gegeben. Die Einheitszellen haben eine Größe von $1 \times 1 \text{ mm}^2$. Innerhalb der Zelle sind die Membranen durch ringförmige Aussparungen in der Aluminium-Ebene erkennbar. An den Rändern der Einheitszellen sind je vier Kontakte zur unteren Elektrode vorgesehen.

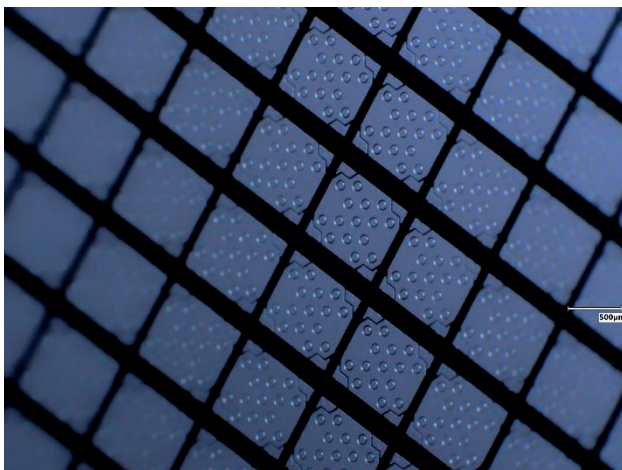


Abb. 2: PMUTs auf Waferlevel mit einem Membrandurchmesser von $150 \mu\text{m}$.

In der Fertigung folgt nun die Vereinzelung der Chips. Hierbei können die Sägestraßen zwischen den Elektroden verwendet werden.

Im Anschluss erfolgt die elektrische Verdrahtung der Einheitszellen. Hierfür wird ein automatischer Drahtbonder genutzt. Dieses Werkzeug erlaubt es ein Raster für die Erstellung der Bonds vorzugeben und einen Chip nach Justage automatisiert zu verdrahten. In Abbildung 3 ist ein Chip mit Membranen von $100 \mu\text{m}$ Durchmesser gezeigt, bei dem die Aufgabe war einen PMUT mit zehn akustischen Kanälen herzustellen, wobei Kanal 1 eine Fläche von rund $1 \times 1 \text{ mm}^2$ haben soll. Kanal 1 und Kanal 2 zusammen sollen eine Fläche von $2 \times 2 \text{ mm}^2$ abdecken. Die Summe der Kanäle 1 bis 3 soll eine Fläche von $3 \times 3 \text{ mm}^2$ abdecken. Dieses System wurde bis zu einer Fläche von $10 \times 10 \text{ mm}^2$ angewandt. Diese Funktionalität wird durch die elektrische Verbindung der jeweiligen Zeile und Spalte des Kanals erreicht. Die Einheitszellen an den Rändern des Chips erhalten einen zusätzlichen Drahtbond, um den elektrischen Kontakt zur Leiterplatte herzustellen.

Ein weiteres Beispiel für eine mögliche Verdrahtung ist in Abbildung 4 gezeigt. Hier ist der Chip auf Leiterplatte mit den entsprechenden geschirmten Anschlüssen zu sehen. Die Aufgabe hier war es PMUTs für eine Anwendung der Ultraschallbildgebung mit einer Pixelgröße von $1 \times 10 \text{ mm}^2$ bereitzustellen. Es wurden die Einheitszellen linear in einer Reihe miteinander verbunden. Das System stellt einen Ultraschallwandler mit 10 akustischen Kanälen dar.

Die beiden Beispiele zeigen die Versatilität der Technologie bei Verwendung identischer Vorprodukte. Die Umverdrahtung ist automatisiert, wodurch eine Bereitstellung applikationsspezifischer Lösungen in kürzester Zeit und mit minimalem Ressourceneinsatz erfolgen kann. Je nach Frequenzband müssen hierfür unterschiedliche Vorprodukte vorgehalten werden. Die Größe der Einheitszelle bildet die kleinste Chipgröße und Kanalgeometrie ab.

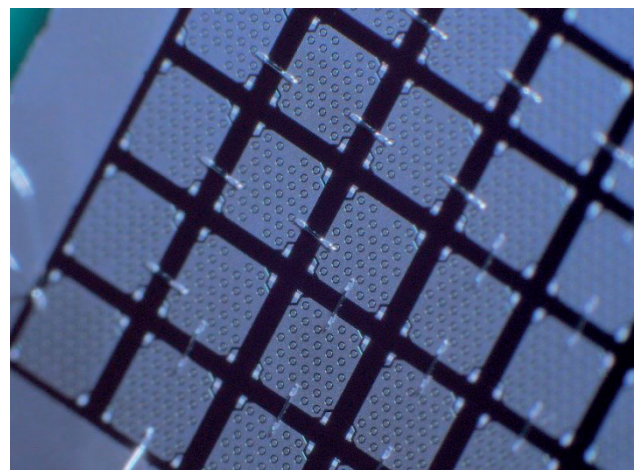


Abb. 3: PMUTs auf Chiplevel mit einem Membrandurchmesser von $100 \mu\text{m}$ und einer on-chip-Umverdrahtung.

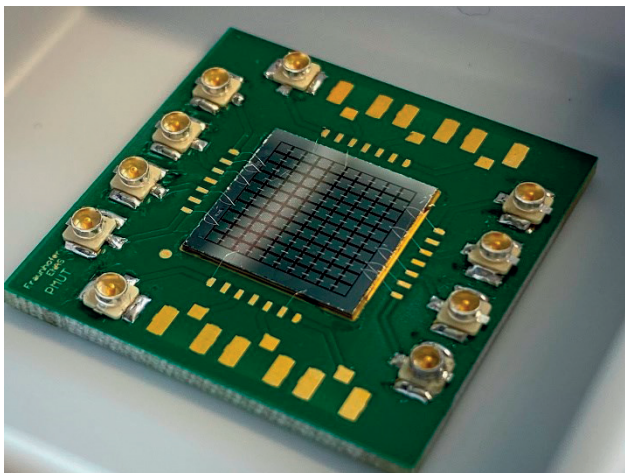


Abb. 4: Aufnahme gefertigter PMUTs mit einem Membrandurchmesser von 100 μm und einer linearen on-chip-Umverdrahtung auf Leiterplatte

Die Systeme werden anschließend in einem personalisierten Gehäuse verbaut, elektrisch kontaktiert und mit einer akustischen Anpassschicht versehen. In Abbildung 5 ist ein PMUT mit einem Silikon als Anpassschicht abgebildet, welches für die Verwendung in Wasser optimiert wurde. Die elektrische Verbindung ist eine geschirmte Leitung mit SMA / BNC Konnektor. Diese Systeme sind in der Regel kompatibel zu Elektroniken für Bulk-Ultraschallwandler mit vergleichbarem Frequenzbereich und ähnlicher elektrischer Last. Hierbei ist zu beachten, dass AIN im Gegensatz zu PZT keinen induktiven Anteil in der Impedanz aufweist und hier als rein kapazitive Last arbeitet. Eine Optimierung der Eingangsimpedanz an kommerziell verfügbaren Send- und Empfangselektroniken ist daher möglich.

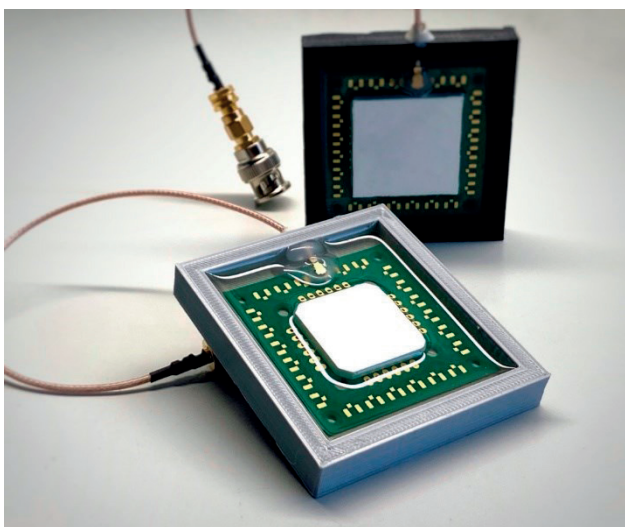


Abb. 5: System aus einem Einkanal-PMUT auf Leiterplatte mit einem 3D-gedrucktem Gehäuse und einer geschirmten Leitung.

Ergebnisse

In Tabelle 1 sind die Resonanzfrequenzen der PMUTs und die Auslenkung pro Volt in Luft für die erste Eigenfrequenz dargestellt. Erwartungsgemäß sinkt die Auslenkung pro Volt bei steigender Steifigkeit der Strukturen. Die Tabelle zeigt die Mittelwerte der Messungen über den jeweiligen Wafer. Chips mit hohen Auslenkungen erreichen Mittelwerte von beispielsweise 40 nm/V bei einem Membrandurchmesser von 100 μm .

Tab. 1: Resonanzfrequenzen und Auslenkungen der Universal-PMUTs in Luft.

Durchmesser in μm	Resonanzfrequenz in MHz	Auslenkung in nm/V
200	0,7	115
150	1,5	55
100	3,5	35
50	9,5	25

Des Weiteren wurden die PMUTs verkapselt und Schallfeldmessungen durchgeführt, entsprechend des Aufbaus in Abbildung 5. Nachfolgend werden PMUTs mit 100 μm Durchmesser verwendet und die quadratische akustische Fläche mit einer Kantenlänge von 2, 3 und 4 mm durch die on-Chip-Umverdrahtung realisiert. Das Verdrahtungsschema entspricht dem technischen Prinzip aus Abbildung 3. Die Schalldrücke werden mit einem Hydrophone in einem Abstand von 15 mm zentral über der akustisch aktiven Fläche des Chips gemessen. Die Mittenfrequenz sinkt von 3,5 MHz in Luft auf rund 1,7 MHz in Wasser. Die PMUTs wurden mit 5 V, 10 V und 20 V angeregt, siehe Tabelle 2. Zwischen Kantenlänge des Chips und Anregespannung besteht ein näherungsweise lineares Verhalten zu dem gemessenen Schalldruck (siehe Abbildung 6). Die Bandbreite des Systems beträgt rund 100 %. Im Empfangsmodus können die Wandler, je nach verwendeter Elektronik und Signalauswertung einen Schalldruck im Sub-Pa-Bereich auflösen. Das spezifische Signal-Rausch-Verhältnis ist von der jeweiligen Anwendung abhängig. Die Kapazität je Einheitszelle liegt bei rund 35 pF. Für eine Sensorfläche von 10x10mm² ist eine Kapazität von 3,5 nF zu erwarten.

Tab. 2: Schalldruck je Anregung und Chipgröße in einem Abstand von 15 mm.

Chiplänge in mm	Schalldruck in kPa		
	@ 5 V	@ 10 V	@ 20 V
2	2,3	4,4	8,2
3	4,0	7,5	14,4
4	5,3	10,4	20,4

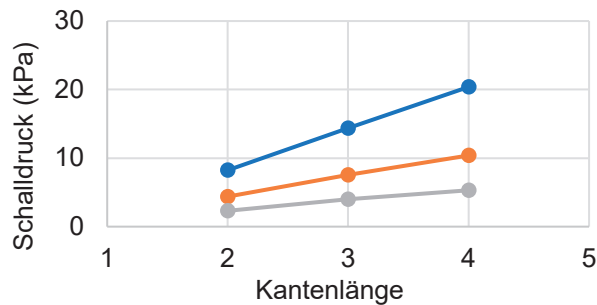


Abb. 6: Schalldruck in Abhängigkeit von Chipgröße und Anregespannung 5 V (grau), 10 V (orange), 20 V (blau).

Diskussion

Die neue Technologie für die Herstellung von Universal PMUT erlaubt eine schnelle und ressourcenschonende Adaption von mikromechanischen Ultraschallwandlern an kundenspezifische Applikationen ohne wiederholte Fertigung auf Waferlevel. Durch die Nutzung verschiedener Membrandurchmesser können große Frequenzbänder abgedeckt werden. Die Messergebnisse zeigen hohe Auslenkungen und Schalldrücke für die Wandler. Eine Funktionalität der Bauelemente mit der Drahtbondtechnologie konnte nachgewiesen werden.

Die Wandler zeigen in 15 mm Abstand einen Schalldruck von bis zu 1 kPa / V für 4 mm Kantenlänge. Normiert auf einen Abstand von 10 mm und eine Kantenlänge von 1 mm wird ein Schalldruck von rund 0,5 kPa extrapoliert. Dieser Schalldruck kann mit anderen Literaturwerten verglichen werden, bei denen Bulk-Wandler (1,4 kPa/V) bei ähnlicher Kanalgröße und Mittenfrequenz verwendet wurden [2].

Die gezeigte Technologie führt aber auch dazu, dass die theoretisch mögliche Leistungsdichte nicht vollumfänglich ausgenutzt wird. Bei den PMUTs mit 100 μm Durchmesser befinden sich 36 Membranen auf einer Fläche von 0,8x0,8 mm² mit einem Pitch von 1 mm². Der Fill-Factor beträgt demzufolge nur 28 %. In vorherigen Veröffentlichungen konnten PMUTs mit Fill-Faktoren von größer 40 % gezeigt werden [3]. Darüber hinaus ist aktuell auf die Verwendung einer inneren Elektrode verzichtet worden, wodurch die PMUTs die Hälfte ihrer theoretischen Sende- und Empfangsleistung einbüßen. Ebenso kann durch die Verwendung von AlScN, anstatt AlN, die elektromechanische Kopplung verbessert werden [4]. Eine theoretische Steigerung des piezoelektrischen Koeffizienten um das Fünffache ist in der Literatur gezeigt worden. Bei der Verwendung von PMUTs als ToF-System (time of flight), z.B. in der Bildgebung, wirken sich diese Faktoren doppelt auf das Signal-Rausch-Verhältnis aus. Das liegt daran, dass im Sendebetrieb weniger Schalldruck erzeugt und im Empfangsbetrieb weniger Amplitude als elektrisches Signal generiert wird. Hier ist demnach eine Steigerung der Signale um einen Faktor von 2,8 durch Optimierung des Fill-Factors, einen Faktor 4 durch die Verwendung einer inneren Elektrode und einem Faktor 10 durch

bessere piezoelektrische Wandler möglich. Somit kann eine Steigerung der Sende- oder Empfangsleistung um einen Faktor 50 angestrebt und damit das Signal-Rausch-Verhältnis bei Sende-/Empfangsapplikationen zukünftig möglicherweise um einem Faktor 114 verbessert werden. Ebenso wird die Anpassung der auf Bulk-Systeme optimierten Elektronik hin zu der elektrischen Impedanz von PMUTs als eine Methode gesehen, um die Systeme darüber hinaus mit einem Faktor 2-10 in der Leistungsfähigkeit zu erhöhen.

Gründe für die hohe Performance von piezoelektrischen, mikromechanischen Ultraschallwandlern im Vergleich zu anderen Technologien werden in der sehr guten akustischen Impedanz und den hohen elektrischen Feldern bei geringen Anregespannungen in den piezoelektrischen Dünnschichten, kombiniert mit hoher Durchbruchfeldstärke gesehen. Darüber hinaus ist das piezoelektrische Wandlerprinzip hochgradig linear. Da die Wandler für den Betrieb keinen DC benötigen haben Elektroniken in der Regel eine geringe Komplexität und die PMUTs sind oftmals Plug-&Play-kompatibel mit Elektroniken für Bulk-Ultraschallwandler.

Die Universal-MUTs sind nicht als höchst performante Wandler anzusehen, sondern als eine Möglichkeit MUTs für Forschungs- und Entwicklungsprojekte rasch zu adaptieren und First-Principle-Tests durchzuführen. Im Anschluss diese First-Principle-Tests mit den Universal-MUTs steht daher zumeist eine Entwicklung von applikationsspezifischen MUTs.

Literatur

- [1] Chris Stoeckel, Katia Meinel, Marcel Melzer, Verfahren zur Herstellung eines mikromechanischen Ultraschallwandlers und Ultraschallwandler, TU Chemnitz, 2024, patent pending, Nr. 20 2023 102 447 (Gebrauchsmuster)
- [2] Jeffrey Elloian, Jakub Jadwyszczak, Volkan Arslan et al., Flexible ultrasound transceiver array for non-invasive surface-conformable imaging enabled by geometric phase correction. *Sci Rep* 12, 16184 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20721-7>
- [3] Chris Stoeckel, Marcel Melzer, Katja Meinel, et al., Design and technology for uniform aluminum nitride piezoelectric micromachined ultrasonic transducers with radial array. In 2021 Smart Systems Integration (SSI), pages 1–4. IEEE, 2021
- [4] Cyril Karuthedath, Abhilash Sebastian, Panu Helistö et al., "Development of ScAlN PMUTs for Medical Applications," in *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 32, no. 5, pp. 505-512, Oct. 2023, doi: 10.1109/JMEMS.2023.3296159