

Mikromechanische Ultraschallwandler für die medizinische Diagnostik

Georg Schmitz

Medizintechnik, RheinAhrCampus, Südallee 2, 53424 Remagen; Email: schmitz@rheinahrcampus.de

Einleitung

In der medizinischen Ultraschalldiagnostik werden derzeit dreidimensionale Abbildungsverfahren entwickelt, die zweidimensionale Ultraschallwandlerarrays benötigen, um den Schallstrahl in beliebige Richtungen zu schwenken. Der Entwicklung derartiger Arrays mit einigen Tausenden stehen technologische Probleme im Weg, die zum Teil durch den Einsatz neuer Wandlertechnologien gelöst werden könnten. Hierbei sind besonders mikromechanische Wandlerarrays von Interesse, die durch Halbleiterfertigungstechniken realisiert werden können und so Kontaktierungs- und Ansteuerungsprobleme durch integrierte Verbindungen und Elektronik vermeiden helfen.

Im folgenden sollen die aktuellen Probleme der konventionellen Technik dargestellt werden. Anschließend werden die beiden aktuellen mikromechanischen Wandlertypen und ihre Eigenschaften gegenübergestellt: der kapazitive (capacitive micromachined ultrasound transducer, CMUT) und der piezoelektrische Wandler (piezoelectrical micromachined ultrasound transducer, PMUT). Für beide werden die Beiträge zur Problemlösung kurz herausgestellt.

Konventionelle Technik

Für eine gute Bildqualität müssen Elementabstand und -größe im Bereich einer halben bis einer Wellenlänge liegen, bei einer über die Abbildungsqualität festgelegten Gesamtaperturgröße. So haben zweidimensionale Wandlerarrays Größen von z.B. 64x64 Elementen mit Elementen von 100-200µm Kantenlänge. Zur Schwenkung des Schallstrahls in eine beliebige Richtung muß jedes Element mit dem Hauptsystem über ein Koaxialkabel verbunden werden. Konventionelle Wandlerarrays werden durch die Verbindung einer kontaktierten Piezoplatte mit einem dämpfenden Backingmaterial und anschließendes Sägen mit Diamantsägen hergestellt. Es ergeben sich folgende Probleme:

Kontaktierung

Die Kontaktierung der Elemente muß durch das Backing erfolgen. Hierzu existieren bereits zahlreiche Ansätze, z.B. durch anisotrop leitfähige Backingmaterialien, die nur in einer Raumrichtung den Strom leiten, oder durch Einbettung von Flexverbindern. Problematischer ist die Kontaktierung der Vorderseite der Elemente. Eine durchgehende Elektrode aufzubringen, birgt technologische Probleme und erlaubt es nicht die Elemente vollkommen entkoppelt zu betreiben. Einfacher ist die Kontaktierung der Elemente von der Seite. Hierbei können alle Verbindungen durch das Backing abgeführt werden. Zwei benachbarte Elemente sind jeweils zusammengeschaltet. Allerdings wird so die weniger effektive k_{31} -Kopplung des Piezomaterials verwendet, so dass der Wandler von vornherein weniger sensitiv ist.

Elementimpedanz

Die geringe Elementgröße führt zu hohen elektrischen Impedanzen der einzelnen Elemente. Die Wandlerelemente haben Kapazitäten von unter 1pF, was bei üblichen Frequenzen zu Impedanzen im

MΩ-Bereich führt. Diese sind einerseits schwierig anzusteuern, andererseits ist der elektromechanische Kopplungsfaktor k eines Wandlers durch das Verhältnis der gespeicherten mechanischen Energie zur gesamten elektrisch und mechanisch gespeicherten Energie gemäß Gl. 1 gegeben:

$$k^2 = \frac{E_{mech}}{E_{total}} = \frac{1}{1 + \frac{E_{el}}{E_{mech}}} \quad \text{Gl. 1}$$

Üblich ist für herkömmliche Wandler in etwa $E_{el} = E_{mech}$. Aufgrund der geringen Kapazität des Wandlers sind gespeicherte elektrische und akustische Energie im Wandler selber sehr gering, parasitäre Kapazitäten der Anschlußleitungen im pF-Bereich verschlechtern den Gesamtkopplungsfaktor bereits extrem. Lösungsansätze hierzu sind die Zusammenschaltung mehrerer Wandler auf eine Ansteuerleitung sowie Schichtwandler in denen mehrere Elemente akustisch in Reihe und elektrisch parallel geschaltet sind¹.

Akustische Impedanz

Aufgrund der akustischen Impedanz des keramischen Piezomaterials (PZT) von etwa 30 MRayls ergibt sich eine Fehlanpassung an die akustische Impedanz von Wasser von 1,5 MRayls. Dies gilt für alle Wandler, die als Dickenschwinger betrieben werden, nicht nur für zweidimensionale Arrays. Die Anpassung erfolgt über eine oder mehrere 1/4 - Anpassungsschichten, die jedoch Bandpaßcharakter haben und so die Bandbreite des resultierenden Wandlers reduzieren. Bandbreite und Sensitivität des Wandlers lassen sich wiederum gegeneinander eintauschen, so dass die Anpassungsschicht auch als Reduktion der Sensitivität betrachtet werden kann.

Mikromechanische Wandler

Kapazitiver Wandler (CMUT)

Kapazitive mikromechanische Wandler bestehen aus metallisierten Membranen, die über einer leitenden Gegenelektrode angebracht sind. Bei Anlegen einer Gleichspannung ziehen die Elektroden sich an. Die elastische Verformung der Membran bewirkt eine Rückstellkraft, die die Membran im Gleichgewicht hält. In einem einfachen Modell kann diese als linear mit der Auslenkung betrachtet werden. Die elektrische Kraft nimmt vereinfacht jedoch mit der Auslenkung quadratisch zu, so dass bei Überschreiten der sogenannten Kollapsspannung, die Membran bis zur Berührung der Gegenelektrode durchbiegt. Je näher der Gleichgewichtspunkt in der Nähe des Kollapspunktes liegt, um so höher ist der Kopplungsfaktor, des mit einer kleinen Wechselspannung betriebenen Wandlers.

Ein Wandlerelement wird in der Regel durch mehrere elektrisch parallelgeschaltete Membranen realisiert. Der Membranabstand zum Boden kann sehr gering sein und so höhere Kapazitäten ermöglichen, allerdings befindet sich im Gegensatz zum piezoelektrischen Wandler kein gutes Dielektrikum zwischen den Platten. Eine

Variante des Herstellungsprozesses eines solchen Wandlers ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt.

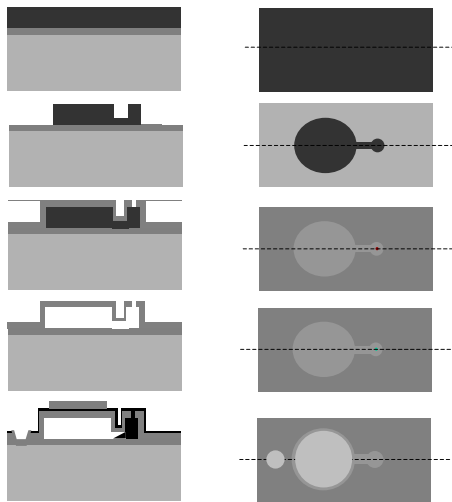


Abbildung 1: Herstellungsprozess eines CMUT

Auf ein hochleitendes Silizium wird eine isolierende Schicht aufgebracht, z.B. SiO. Darauf wiederum eine Opferschicht aus Polysilizium. Diese wird strukturiert und anschließend mit dem Membranmaterial beschichtet, zum Beispiel Siliziumnitrid, das für das Entfernen der Opferschicht punktuell geöffnet wird. Um die Membranen nicht beim Schließen dieser Löcher zu verändern erfolgt dies oft durch Seitenkanäle, die zweckmäßig mäanderförmige Strukturen haben können². Nach dem Entfernen der Opferschicht werden die Löcher mit einer weiteren Schicht, z.B. Siliziumnitrid, versiegelt, die Bodenelektrode freigelegt und die Metallisierung aufgebracht. Abbildung 2 zeigt Fotografien zweier Prozessschritte.

Die elektrische Impedanz kapazitiver Wandler stellt durch Zusammenschaltung kein wesentliches Problem dar, allerdings müssen parasitäre Kapazitäten des Wandlers so gering wie möglich gehalten werden, um den Kopplungsfaktor hoch zu halten. So ist die Metallbelegung der Membran zu optimieren, da die Kapazitäten in Randnähe keine wesentliche Kraftwirkung verursachen. Weiterhin kann durch Einbringen einer Strukturierung der Bodenelektrode – z.B. Gräben im Randbereich – der Kopplungsfaktor weiter erhöht werden. Ein großer Vorteil des Membranwandlerkonzeptes ist die geringe mechanische Impedanz der Membran, die in weiten Bereichen durch Prozeßparameter eingestellt werden und so an die akustische Impedanz von Gewebe angepasst werden kann. Hierdurch sind die Wandler sehr breitbandig. Das Übertragungsverhalten der entstehenden Arrays wird allerdings durch eine Vielzahl von Effekten bestimmt und ist nicht endgültig optimiert: Neben Membranresonanzen treten Hohlraumresonanzen auf; das Siliziumsubstrat wird angeregt und es breiten sich Schallwellen im Festkörper aus, die auf andere Elemente übersprechen. Sind diese Effekte jedoch verstanden und das Design optimiert, bieten CMUTs die Möglichkeit, Wandler mit integrierter Elektronik zu entwerfen, die über Flip-Chip-Bonding mit Teilen der Strahlformung – z.B. Multiplexern – direkt verbunden sein können.

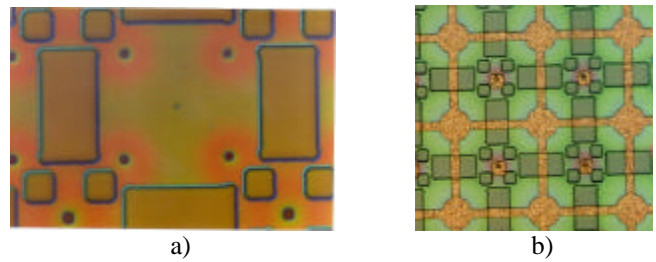


Abbildung 2: a) CMUT vor dem Schließen der Ätzlöcher (Mitte). Die Bodenkontaktierungen sind bereits geöffnet (Rand). b) und nach Aufbringung der Kontakte. (Bilder mit freundl. Unterstützung: Prof. Manuel Dominguez Pumar, Universitat Politècnica de Catalunya)

Piezoelektrischer Wandler (PMUT)

Piezoelektrische Wandler sind ähnlich aufgebaut wie CMUTs, biegen die Membran jedoch über eine piezoelektrische Schicht, die auf einer elastischen Membran aufgebracht ist. Ändert die Piezoschicht ihre Länge, so biegt die Membran. Zusätzlich zu den üblichen mikromechanischen Herstellungsschritten, muß diese Schicht z.B. als Dünnschicht von einigen μm über einen Sol-Gel Prozeß aufgebracht und gepolt werden³, was mit einer kritischen Temperaturerhöhung verbunden ist, und sie erreicht dann in der Regel nicht den Kopplungsfaktor herkömmlicher Piezokeramiken. Die elektrische Impedanz hängt von der Kontaktierung der Piezoschicht ab: Wird die Piezoschicht mit seitlichen Kontakten betrieben, wird die effektivere k_{33} Kopplung genutzt, allerdings die Impedanz extrem hoch. Wird die Dünnschicht oben und unten kontaktiert, wird die weniger effektive k_{31} Kopplung genutzt, es kann aber eine deutlich günstigere Impedanz realisiert werden. Dabei haben PMUTs alle Vorteile der CMUTs bzgl. akustischer Impedanz und Integrierbarkeit. Zusätzlich entfällt die Offsetgleichspannung, was die Ansteuerelektronik vereinfacht. Das Design guter PMUTs ist insgesamt aufwendiger und steht oder fällt mit der Qualität der Piezoschichten. Eine endgültige Entscheidung für den einen oder anderen Wandlertyp kann derzeit noch nicht getroffen werden.

Zusammenfassung

Mikromechanische Wandler bieten bei weiterer Designoptimierung voraussichtlich ausreichende Sensitivität für die medizinische Bildgebung bei gleichzeitig besserer Kontaktier- und Integrierbarkeit. Weitere Vorteile liegen in der einfacheren akustischen und elektrischen Impedananzanpassung. Gemeinsamer Nachteil von PMUTs und CMUTs ist derzeit noch das Übersprechen zwischen Arrayelementen über das Substrat wegen des fehlenden Backings, das jedoch kein prinzipielles Problem ist. Welcher Wandlertyp sich durchsetzen wird, ist derzeit allerdings noch nicht abzusehen.

¹ Sano S., Ohsawa T., Tamano S., Sato Y., Ishihara S., Nakamura M., Miwa Y., Azuma T.: A convex-convex shaped two-dimensional array probe using multilayer PZT transducers. In Halliwell and Wells ed.: *Acoustical Imaging, Volume 25*, 151-156 Kluwer Academic, 2000.

² Ladabaum I., Xuecheng J., Soh H.T., Atalar A., Khuri-Yakub B.T.: Surface micromachined capacitive ultrasonic transducers. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr.*, vol. 45, pp.678-690, 1998.

³ Baborowski J., Ledermann L., Murali P.: Piezoelectric micromachined transducers (PMUT's) based on PZT thin films. *Proc. IEEE Ultrasonics Symp.* 2002, Munich.