

MEMS Mikrofone

Veranstaltung: Tonseminar

Dozent: Oliver Curdt

Studiengang: AM7

Hochschule der Medien

Vorgelegt von: Henni Lotta Scheitz

Matrikelnummer: 38715

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Einführung MEMS..... | 3 |
| Geschichte der MEMS-Technologie | 3 |
| Herstellung MEMS-Chips..... | 4 |
| Herstellung Silizium Wafer | 4 |
| Front-End + Back-End..... | 5 |
| Grundlagen Ätzverfahren | 5 |
| Siliziumplantar Technologie | 6 |
| Funktionsweise MEMS-Mikrofone | 7 |
| Mikrofon Konstruktion | 7 |
| Funktionsweise..... | 8 |
| Pulsdichtenmodulation | 8 |
| Beam Steering | 8 |
| Vorteile und Nachteile des Einsatzes von MEMS-Technologie bei Mikrofonen | 9 |
| Fazit | 11 |
| Quellen u. Abbildungen..... | 12 |

Einführung MEMS

MEMS steht für Micro Electro Mechanical System, was auf Deutsch "mikro-elektromechanisches System" bedeutet. Es handelt sich um mechanische Systeme mit Bauteilen, deren Komponenten kleinste Abmessungen im Bereich von 1 Mikrometer haben. MEMS finden vor allem Verwendung in der Sensortechnologie, wie beispielsweise Drucksensoren, Beschleunigungssensoren, Feuchtigkeits- und Temperatursensoren.

Die Idee hinter MEMS-Technologie ist, mechanische Funktionen, die normalerweise in makroskopischen Systemen zu finden sind, auf mikroskopische Maßstäbe zu verkleinern und auf einem einzigen Chip zu integrieren.

Ein häufiger Einsatzbereich der MEMS-Technologie sind unter anderem MEMS-Mikrofone. Diese werden in der SMD-Technik direkt auf elektronische Platinen aufgebracht.

SMD steht hierbei für „Surface-Mounted-Device“ und beschreibt die Verarbeitungsform, in der im Gegensatz zur THT-Technik Bauteile nicht per Steckverbindungen, also mit Kabeln verbunden werden, sondern direkt auf Anschluss-flächen/ -beinchen gelötet werden.

MEMS-Mikrofone sind eine bedeutende Innovation in der Audiotechnologie und haben in einigen Einsatzgebieten traditionelle elektromagnetische oder elektrodynamische Mikrofone abgelöst, die größer und komplexer waren.

Geschichte der MEMS-Technologie

Die Entwicklung der MEMS-Technologie ist eng mit der der Elektrotechnik verbunden.

Meilensteine wie die Erfindung des Transistors in 1948 durch William Shockley bei den Bell Labs und die Entdeckung des Piezo-Effekts in sowohl Germanium als auch in Silizium in 1954 durch C.S. Smith haben die Grundlage für die MEMS-Entwicklung gelegt.

1958/1959 wurde die Miniaturisierung von elektronischen Bauteilen mit der Einführung von integrierten Schaltkreisen (ICs) durch J.S. Kilby und Robert Noyce ermöglicht. Bisher war die Verkleinerung von Transistoren zum Stillstand gekommen. Durch das Zusammenfassen von Transistoren, Koppellementen und Widerständen konnte die Größe der Bauteile, die bei ihrer Erfindung immerhin fast 4cm groß waren, erheblich reduziert werden, was zu einer Revolution in der Elektronik führte.

Mit der Einführung der integrierten Schaltkreise (ICs) nahm auch die Anzahl der Transistoren pro Quadratzentimetern rapide zu – die Erkenntnis von Richard Feynman im Jahr 1959, dass Technologie daher immer kleiner werden muss, gab den Anstoß für die Miniaturisierung von Komponenten.

Dies ebnete den Weg für die Entwicklung von MEMS. Die darauf folgenden Erfindungen, wie die der Mikroprozessoren, verschiedener Sensoren,... waren allesamt weitere wichtige Meilensteine.

Die eigentliche MEMS-Boom-Phase begann in den 2000er Jahren, als die Technologie vermehrt in Konsumgütern, insbesondere in tragbaren Geräten, eingesetzt wurde. Der steigende Bedarf an kleinen, leichten und energieeffizienten Sensoren, insbesondere in mobilen Geräten, führte zu einem starken Aufschwung der MEMS-Technologie.

Herstellung MEMS-Chips

Herstellung Silizium Wafer

Der Prozess beginnt mit der Herstellung von einkristallinem Silizium in Form von dünnen Scheiben, den sogenannten Wafern.

Alles beginnt mit dem Rohmaterial Siliziumoxid, das durch verschiedene Verfahren in unterschiedliche Stoffe umgewandelt wird.

Zunächst wird dem Siliziumoxid der Sauerstoff entzogen, wodurch Rohsilizium mit einer Reinheit von etwa 98% entsteht.

Dieses reagiert dann mit Chlorwasserstoff und wird chemisch gereinigt, wodurch Trichorsilan gewonnen wird. Durch die Reaktion mit Wasserstoff entsteht schließlich Polysilizium mit einer Reinheit von 99,99%. Dieses Polysilizium wird dann auf dünne Stäbe aus Reinsilizium abgeschieden, wodurch polykristallines Silizium entsteht.

Die eigentliche Herstellung des einkristallinen Siliziums aus dem polykristallinen Silizium erfolgt durch spezielle Verfahren wie dem Tiegelziehverfahren nach Czochralsky (CZ-Verfahren) und dem tiegelfreien Zonenziehverfahren (FZ-Verfahren, auch Float-Zone-Verfahren genannt). Dabei wird das polykristalline Silizium in unterschiedlicher Art-und-Weise geschmolzen und langsam auskristallisiert, um einen einkristallinen Siliziumstab zu erhalten.

Zum Schluss werden aus diesen einkristallinen Siliziumstäben die Wafer hergestellt, indem sie in dünne Scheiben geschnitten werden.

Die Silizium-Wafer sind die Grundlage für die Weiterverarbeitung von MEMS-Mikrofonen und bilden das Substrat, aus dem mittels Silizium Planar Technologie die mikromechanischen Strukturen hergestellt werden.

Front-End + Back-End

Grundlagen Ätzverfahren

Die Silizium-Wafer durchlaufen dann die Front-End-Fertigung, bei der sie strukturiert und dotiert werden. Die Strukturierung erfolgt durch Ätzprozesse, bei denen die gewünschten Mikrostrukturen in das Silizium eingebracht werden.

Die Ätzprozesse können nass- oder trockenbasiert sein. Beim Nassätzen wird eine chemische Lösung verwendet, um das Silizium selektiv zu ätzen. Beim Trockenätzen erfolgt der Materialabtrag durch Beschuss mit beschleunigten Teilchen oder durch chemische Reaktionen mit Gasen. Verschiedene Ätzlösungen und Prozesse tragen das Silizium unterschiedlich schnell ab.

Diese Ätzverfahren bilden die Grundlage für weiterführende Verfahren zur Herstellung komplexer, mehrdimensionaler Strukturen.

Es gibt mehrere Ansätze der Mikromechanik, die sich auf die Herstellung und Integration mechanischer Strukturen im Mikrometerbereich konzentrieren. Dabei sind besonders die beiden Hauptansätze hervorzuheben: die Volumenmikromechanik und die Oberflächenmikromechanik.

Die Volumenmikromechanik umfasst dabei Nassätzprozesse, bei denen Maskier-Schichten unterätzt werden, sodass freistehende dreidimensionale Strukturen direkt in das Substrat eingebracht werden. Sie ist besonders geeignet für Bauteile, die eine hohe Strukturfestigkeit erfordern.

Die Oberflächenmikromechanik basiert auf der Opferschichttechnik. Dabei wird eine sogenannte Opferschicht aus Siliziumdioxid auf das Substrat abgeschieden und anschließend strukturiert. Eine Funktionsschicht aus polykristallinem Silizium wird auf die Opferschicht abgeschieden und ebenfalls strukturiert. Anschließend wird die Opferschicht wieder weggeätzt, um die gewünschten Strukturen zu formen. Diese Technik ist besonders zur Herstellung von dünnen, flexiblen Strukturen geeignet.

Siliziumplantar Technologie

Der Prozess fängt damit an, dass eine Maskierschicht auf den Wafer abgeschieden wird. Anschließend wird ein Fotoresist aufgetragen, welches durch Belichtung über eine Maske an den beleuchteten Stellen seine Struktur verändert. Das belichtete Fotoresist wird abgetragen, das übrig gebliebene Fotoresist dient im folgenden Ätzprozess als Schutzschicht für die Maskierschicht. Nach dem Entfernen des Fotoresists wird ein neuer Ätzprozess durchgeführt, bei der die Struktur der veränderten Maskierschicht auf den Wafer übertragen wird. Danach wird die Maskierschicht entfernt. Diese Schritte werden sofort wiederholt, bis der Wafer seine gewünschte Struktur erreicht hat.

Im Verlauf dieses Prozesses, kann das Silizium unter anderem auch mit Fremdatomen dotiert werden, um elektrische Leitfähigkeit oder Halbleitereigenschaften zu erzeugen.

Im letzten Schritt, werden die Mikrostrukturen aus der Platte getrennt.

Die Chips sind nun bereit für die Weiterverarbeitung und können in ihre Gehäuse eingebaut werden (Back-End-Fertigung).

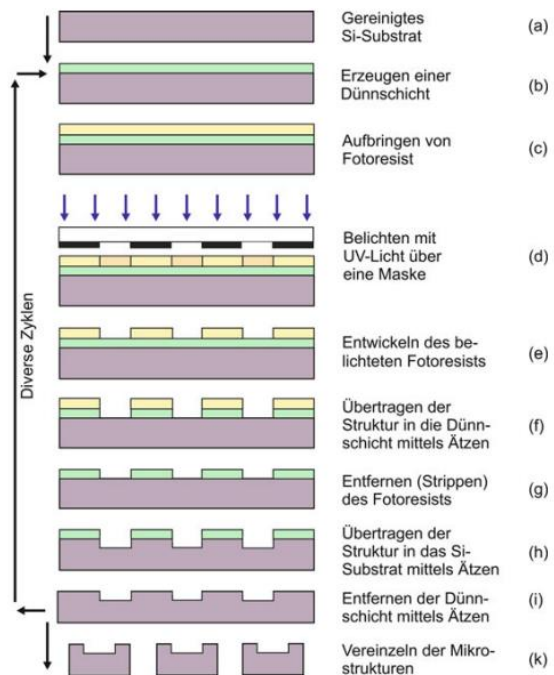


Abb. 2.2 Grundsätzlicher Fertigungsablauf: Strukturierung einer abgeschiedenen Schicht; Ätzen des Silizium-Substrats

Funktionsweise MEMS-Mikrofone

Mikrofon Konstruktion

Die Grundkonstruktion eines MEMS-Mikrofons auf einer Platine besteht aus einem Drucksensor, welcher als elektrostatischer Wandler fungiert. Die Membran ist hierbei meist aus einem dünnen Material wie Polykristallinem Silizium (s.o.) gefertigt und bildet den beweglichen Komponenten des Mikrofons.

Das feste Substrat enthält oft die integrierten Schaltkreise, auch Application Specific Integrated Circuits (ASICs) genannt, inklusive der Elektronik für die Signalverarbeitung, wie Impedanzwandler, Vorverstärkung und Spannungsversorgung.

Bei der Bauweise von MEMS-Mikrofonen gibt es eine Unterscheidung bezüglich der Öffnung im Gehäuse, die sich auf die Position der Schalleinlassöffnung bezieht.

Bei der Top-Port-Bauweise befindet sich die Schalleinlassöffnung oben im Deckel des Mikrofons. Dies ermöglicht eine einfachere Herstellung des Mikrofons. Allerdings führt das kleine Luftvolumen in der Rückkammer zu einer Verschlechterung der Membranbewegung und der Signal-Rausch-Verhältnisses (SNR). Zudem senkt das kleine Luftvolumen in der Vorkammer die Resonanzfrequenz und beeinträchtigt damit die Empfindlichkeit für höhere Frequenzen.

Im Gegensatz dazu befindet sich bei der Bottom-Port-Bauweise die Schalleinlassöffnung an der Unterseite des Mikrofons in der Nähe der Lötflächen. Dies erfordert zusätzliche Öffnungen auf der Leiterplatte. Die Bottom-Port-Bauweise hat den Vorteil, dass eine größere Rückkammer vorhanden ist, was die SNR verbessert und zu einem flacheren Frequenzverlauf führt.

Ein weiterer Aspekt bei der Bottom-Port-Bauweise ist die Wechselwirkung der Luft im Schalleinlass und der Vorkammer. Dies kann die Resonanzfrequenz beeinflussen, die höher wird, je kleiner der verfügbare Raum ist. Durch die größere Rückkammer wird die Membranbewegung erleichtert, was die Empfindlichkeit verbessert und somit auch das SNR erhöht.

Insgesamt bieten beide Bauweisen Vor- und Nachteile. Die Auswahl der geeigneten Bauweise hängt von den spezifischen Anforderungen des Mikrofons und der gewünschten Leistung ab.

Funktionsweise

MEMS-Mikrofone nutzen verschiedene Wandler Prinzipien, um Schall in elektrische Signale umzuwandeln. Die grundlegende Funktionsweise basiert jedoch auf der Kapazitätsänderung durch die Schallwellen. Diese Kapazitätsänderungen müssen in ein digitales Signal umgewandelt werden. Dafür kommt in der MEMS-Mikrofon-Technologie die Pulsdichtenmodulation zum Einsatz.

Pulsdichtenmodulation

Die Pulsdichtenmodulation ist eine Methode zur Digitalisierung des Audiosignals direkt auf dem MEMS-Mikrofon. Dabei wird das analoge Signal des MEMS-Mikrofons in eine Abfolge von digitalen Pulsen umgewandelt.

Dafür werden zuerst eine Abtastfrequenz und ein Wertebereich festgelegt. In jedem Intervall wird der momentane Wert des analogen Signals gemessen.

Anstatt das analoge Signal in diskrete Werte zu quantisieren, wird die Pulsdauer variiert, um die Amplitude zu einem bestimmten Zeitpunkt darzustellen.

Das Verhältnis von Pulsdauer und Periodenweite ergibt dabei den Tastgrad, mit dem anschließend die Effektivspannung des Signals ausgerechnet werden kann. Beispielsweise entspricht ein Tastgrad von 50 Prozent einer Pulsweite, die die Hälfte der Periodendauer ausmacht.

Die PDM bietet den Vorteil, dass sie effizienter und rauscharmer ist als traditionelle Analog-Digital-Wandler. Dies macht sie besonders attraktiv für Anwendungen, bei denen ein hoher SNR (Signal-Rausch-Verhältnis) erforderlich ist, wie z.B. in Smartphones und anderen tragbaren Geräten.

Beam Steering

Durch ihre Bauweise nehmen MEMS-Mikrofone zunächst Schall aus allen Richtungen gleichmäßig (omnidirektional) auf, was in manchen Anwendungsbereichen, insbesondere wenn es um Sprachverständlichkeit oder eine gezielte Schallaufnahme geht, nicht optimal ist. Hier kommt das Konzept des Beam Steering zum Einsatz, das eine richtungsabhängige Schallaufnahme ermöglicht.

Beam Steering beruht auf der Verwendung eines Mikrofonarrays, bei dem mehrere Mikrofone in einer bestimmten Anordnung miteinander kombiniert werden. Durch gezielte Laufzeit- und Lautstärkeunterschiede kann das System die einzelnen Signale gewichtet konstruktiv verstärken oder destruktiv auslöschen. Dadurch entsteht eine Richtcharakteristik, die es ermöglicht, den Schall aus einer gewünschten Richtung verstärkt aufzunehmen und gleichzeitig störende Hintergrundgeräusche zu minimieren.

Die Implementierung der Richtcharakteristik hängt von den spezifischen Anforderungen des jeweiligen Anwendungsgebiets ab. Beam Steering eröffnet vielfältige Möglichkeiten, um die Audioerfassung und -verarbeitung für unterschiedliche Einsatzgebiete zu optimieren und eine präzise Schallrichtungserfassung zu realisieren.

Vorteile und Nachteile des Einsatzes von MEMS-Technologie bei Mikrofonen

Der Einsatz von MEMS-Mikrofonen in bestimmten Anwendungsbereichen wird durch ihre vorteilhaften Eigenschaften gerechtfertigt. Ihre geringe Größe und der niedrige Stromverbrauch machen sie besonders geeignet für den Einsatz in tragbaren Geräten. Darüber hinaus ermöglicht ihre einfache industrielle Verarbeitung eine kostengünstige Massenproduktion. Ein entscheidender Vorteil gegenüber herkömmlichen kleinen Mikrofonen, wie beispielsweise Elektret Mikrofonen, liegt in ihrer Robustheit gegenüber hohen Temperaturen. Elektret Mikrofone können oft schon beim Löten beschädigt werden und dadurch an Empfindlichkeit verlieren. Im Gegensatz dazu können MEMS-Mikrofone Temperaturen von -40°C bis zu 70°C , sowie Stößen und starken Vibrationen standhalten. Diese Eigenschaften machen sie zu einer bevorzugten Wahl für vielfältige Anwendungen.

Zu den Einschränkungen von MEMS-Mikrofonen gehören eine begrenzte Frequenzbandbreite und ein begrenzter Dynamikbereich. Diese beiden Faktoren können die Audioqualität beeinflussen und die Fähigkeit des Mikrofons einschränken, sowohl sehr hohe als auch sehr niedrige Frequenzen sowie laute und leise Töne präzise zu erfassen.

Außerdem gibt es Herausforderung in der Herstellung von MEMS-Mikrofonen. Aufgrund ihrer winzigen Bauteile stellt die Qualitätssicherung einen zusätzlichen Kostenpunkt dar, da sichergestellt werden muss, dass alle Komponenten ordnungsgemäß funktionieren und keine Schäden oder Defekte vorliegen. Dies erfordert präzise und umfassende Testverfahren, um die hohe Funktionalität und Zuverlässigkeit der Mikrofone zu gewährleisten.

Anwendung von MEMS-Mikrofonen

MEMS-Mikrofone finden in zahlreichen Anwendungsgebieten breite Verwendung und haben sich als entscheidende Technologie in verschiedenen Branchen etabliert.

In der Automobilindustrie werden MEMS-Mikrofone vielfältig eingesetzt. Sie dienen als wichtige Komponenten in Freisprechanlagen, bei der sie ein Schlüssel-Komponente in der Noise-Cancelling-Technologie bilden und die Kommunikation während der Fahrt ermöglichen. Außerdem erfassen sie Fahrtgeräusche und dienen der Gefahrenerkennung innerhalb und außerhalb des Autos, indem sie Sirenen, schlechten Straßenbedingungen und Einbrecher erfassen können.

In der Unterhaltungsindustrie sind MEMS-Mikrofone ebenfalls weit verbreitet. In Smartphones haben sie in den 2000er Jahren begonnen, traditionelle Elektret-Kondensator-Mikrofone und Piezoelektrische Mikrofone zu verdrängen. Auch bei Kopfhörern bilden sie einen entscheidenden Komponenten bei der Noise-Cancelling-Technologie.

In der Medizintechnik werden MEMS-Mikrofone unter anderem in Hörgeräten und Implantaten eingesetzt. Hier werden Audiosignale verstärkt, um eine bessere Hörleistung zu erzielen.

In der Luft- und Raumfahrtindustrie sind MEMS-Mikrofone ebenfalls im Einsatz. Sie werden verwendet, um Druckschwankungen und Wandschubspannungen in Passagierflugzeugen aufzunehmen.

Fazit

MEMS-Mikrofone ermöglichen die Nutzung kleinerer, effizienterer und leistungsfähigerer Mikrofone für eine Vielzahl von Anwendungen. Die Miniaturisierung und Integration von MEMS-Mikrofonen haben sie zu unverzichtbaren Komponenten in der Unterhaltungselektronik, Medizintechnik, Automobilindustrie und Luft- und Raumfahrtindustrie gemacht.

Die MEMS-Mikrofontechnologie bleibt außerdem ein sich stetig weiter entwickelndes Feld. Fortschritte in Halbleitertechnologie, der Materialwissenschaft und der Fertigungsprozesse führen zu immer leistungsfähigeren und effizienteren und kleineren MEMS-Mikrofonen.

Die Nachfrage bleibt hoch, insbesondere in mobilen Geräten wie Smartphones, Tablets und Wearables. Die Unterhaltungselektronikbranche wird weiterhin ein wichtiger Treiber für die Verwendung von MEMS-Mikrofonen sein, insbesondere mit zunehmender Verbreitung von Sprachsteuerung und Noise-Cancelling-Funktionen. Auch in der Automobilindustrie wird der Einsatz von MEMS-Mikrofonen für fortschrittliche Fahrzeugassistenzsysteme und verbesserte Kommunikationstools voraussichtlich weiter wachsen.

Quellen u. Abbildungen

<https://www.memsjournal.com/2015/07/mems-microphones-emerging-technology-and-application-trends.html>

https://nanohub.org/resources/26535/download/App_Intro_PK10_PG.pdf

<https://www.halbleiter.org/nasschemie/nassaetzen/>

<https://www.infineon.com/cms/en/product/sensor/mems-microphones/mems-microphones-for-automotive/>

<https://www.knowles.com/sisonic-automotive-microphones>

<https://www.eenewseurope.com/en/mems-microphone-qualified-for-automotive/>

<https://pubs.aip.org/books/monograph/63/chapter/20655330/Introduction-to-MEMS-in-Biology-and-Healthcare>

<https://cordis.europa.eu/project/id/101007958/de>

<https://www.elektroniknet.de/messen-testen/sensorik/klein-und-trotzdem-gut.120402.html>

<https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/mems-microphones-market>

<https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/Microphone-Array-Beamforming.pdf>

<https://www.produktion.de/technik/alles-was-sie-ueber-mems-wissen-muessen-287.html>

<https://www.youtube.com/watch?v=uNfMjsulQu4&t=183s>

Büttgenbach, S. (2005), Mikrosystemtechnik – Vom Transistor zum Biochip. Springer.

Büttgenbach, S. (2005), Mikrosystemtechnik – Vom Transistor zum Biochip (S. 76, Abb. 2.2). Springer.

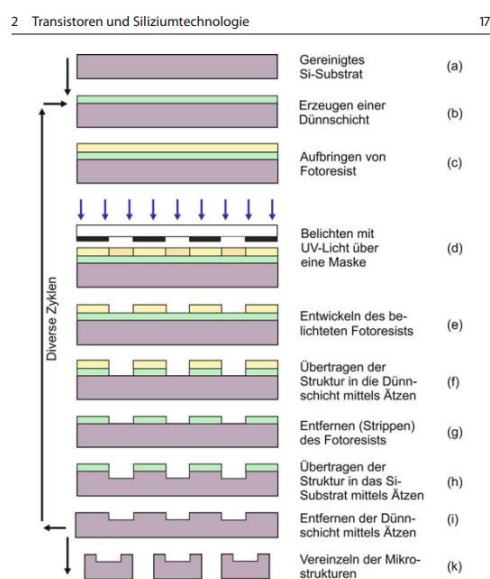


Abb. 2.2 Grundsätzlicher Fertigungsablauf: Strukturierung einer abgeschiedenen Schicht; Ätzen des Silizium-Substrats