



Aufgabenblatt #2 Auswertung der Versuche im Reinraum

ZUSAMMENFASSUNG Neben der Aufführung theoretischer Aspekte der Technologien die in der Halbleiterfertigung eingesetzt werden, werden in diesem Bericht die einzelnen Schritte bei der Fertigung von Oberflächenwellenfiltern auf einem piezoelektrischen LiNbO₃ Substrat berichtet. Zunächst wird eine kurze Beschreibung der Herstellung der Keramikträger, auf welche die fertigen OFW-Dies gebondet werden gegeben. Die Herstellungsschritte der Filter auf dem Wafer beginnen mit der Abscheidung des aus Aluminium bestehenden Filtermaterials. Diese Schicht wird mittels der Lithographie und des Ätzens strukturiert. Bei der anschließenden Vermessung der fertigen Strukturen zeigen sich Diskrepanzen vom ursprünglich erwarteten Ergebnis. Diese Abweichungen werden mit zu Hilfenahme der aufgeführten Theorie diskutiert.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Kurze Einleitung	1
2	Herstellungsverfahren	1
2.1	Strukturierung des Keramikträgers	1
2.2	Czochralsky-Verfahren	3
2.3	Thermisches Verdampfen	3
2.4	Lithographie	5
2.5	Ätztechnik	7
3	Messungen	9
3.1	Reflektometer	9
3.2	Profilometer	9
3.3	Mikroskop	10
3.4	Zusammenfassung der Messergebnisse	11

1 KURZE EINLEITUNG

Oberflächenwellenfilter (OFW) sind wesentliche Komponenten in der modernen Elektronik. Sie verwenden piezoelektrische Materialien, um elektrische Signale in akustische Wellen umzuwandeln und umgekehrt, was die Filterung bestimmter Frequenzbänder mit bemerkenswerter Genauigkeit ermöglicht. OFW-Filter sind in zahlreichen Anwendungen unverzichtbar, von Mobiltelefonen und Fernsehgeräten bis hin zu Navigationssystemen und drahtlosen Netzen. Sie ermöglichen eine effiziente Verwaltung von Signalen und tragen zur Weiterentwicklung leistungsstarker Kommunikationstechnologien bei. Dieser Bericht befasst sich mit der Anfertigung

von OFW-Filtern, die in der kontrollierten Umgebung eines Reinraums an der Hochschule München erfolgt. Reinräume, die in der Halbleiterfertigung eingesetzt werden, sind so konzipiert, dass sie eine extrem niedrige Konzentration von Partikeln wie Staub, Mikroben in der Luft, Aerosolpartikeln und chemischen Dämpfen gewährleisten. Dies ist notwendig, denn selbst kleinste Partikel können Defekte in den winzigen Strukturen integrierter Schaltkreise verursachen. Unter Aufführung theoretischer Grundlagen wird der Herstellungsprozess erläutert, der von der Substratvorbereitung über die Fotolithografie bis hin zu den Abscheidungs- und Ätztechniken reicht. Die so entstandenen Filter werden nach dem Herstellungsprozess mit dem Mikroskop begutachtet.

2 HERSTELLUNGSVERFAHREN

2.1 STRUKTURIERUNG DES KERAMIKTRÄGERS

Im vorliegenden Fall handelt es sich bei den Leiterplatten auf der die anzufertigenden Oberflächenwellenfilter gebondet und später vermessen werden, um Keramikträger, die mittels des sog. Siebdrucks einer Methode der Dickschicht-Hybridtechnik strukturiert werden. Das Siebdrucken ist eine Methode, bei der das über einen Rahmen gespannte Gewebe so strukturiert wird, dass es den Durchgang einer sog. Paste, das Material der anzufertigenden Struktur (z.B. Leiterbahnen, Widerstände) nur an den Stellen ermöglicht, die dem erwünschten Muster entsprechen. Beim Druckvorgang wird die Paste auf das Sieb aufgetragen und mit einem Rakel auf das darunter liegende Substrat gedrückt, das Sieb wirkt dabei wie eine Schablone.

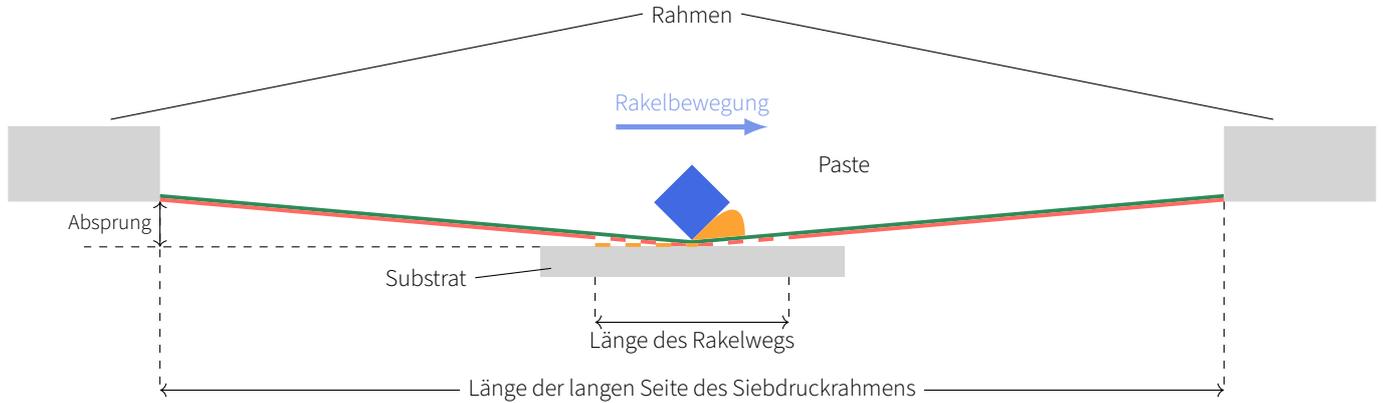


Abb. 1 | Schematische Darstellung des Bedruckens des Keramiksubstrats einer Siebdruckmaschine.

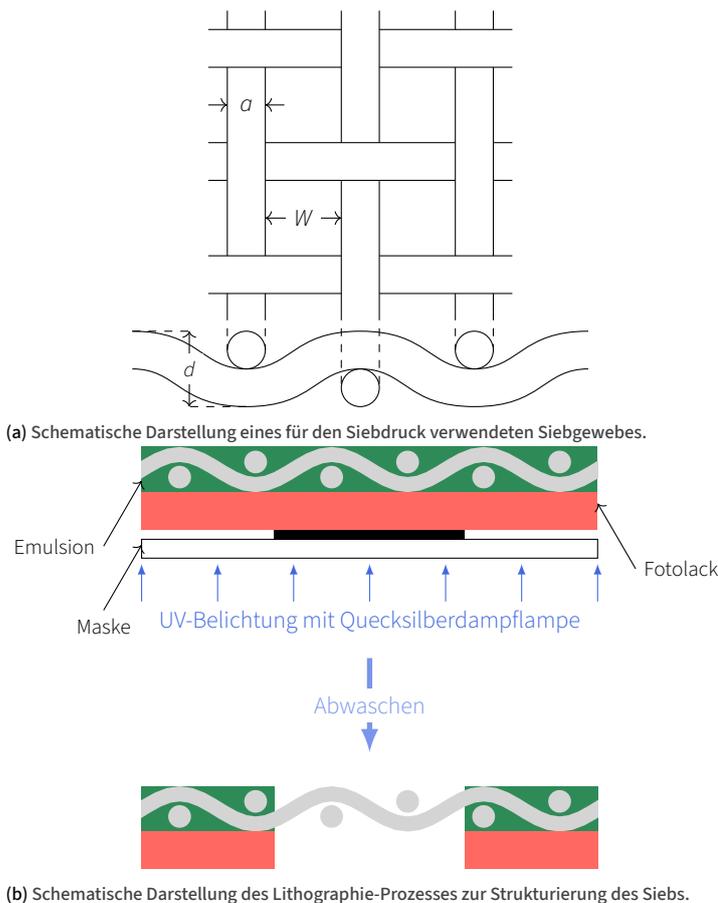


Abb. 2 | Strukturierung des Siebs.

Wichtige Eckdaten Bei der Strukturierung eines Siebs für den Druck eines spezifischen Musters auf ein Substrat, muss vorab sichergestellt werden, dass der Sieb bestimmte Eigenschaften erfüllt. Zunächst sollte überall auf dem Gewebe des Siebs eine Oberflächenspannung von mindestens 20N/m messbar sein. Es sollte außerdem darauf geachtet werden, dass die Länge des Siebs mindestens 3 mal der Länge des Rakelwegs auf dem Substrat beträgt und die Breite mindestens 2 mal der Substratbreite entspricht. Eine solche Dimensionierung des Siebs gewährleistet eine lange Aufrechterhaltung einer guten Druckqualität und Standzeit des Siebs. Das bei uns verwendete Druckbild ist von der Größe 50,4mm×50,4mm und wird mit Hilfe eines Siebs mit Rahmendimensionen 25cm×25cm auf ein Aluminiumoxid-Keramiksubstrat (Al₂O₃) gedruckt. Die Maschenweite W und der Drahtdurchmesser a des Siebgewebes (vgl. Abb. 2a) sind wichtige Parameter mit denen sich die Dicke der ge-

druckten Schicht bestimmen lässt. Dazu muss zunächst die offene Siebfläche bestimmt werden, sie ist gegeben durch:

$$O = \frac{W^2}{(W + a)^2} 100\% \quad (1)$$

Auf der Unterseite des Siebs befindet sich ein Fotofilm der für die Strukturierung des Siebs benötigt wird (vgl. Abb. 2b). Die gedruckte Schicht ist dann gegeben durch dessen Dicke d_{UV} und der Dicke der Paste die sich innerhalb der offenen Siebfläche befindet und sich nach abheben des Siebs homogen darüber verteilt:

$$d = d_{UV} + \frac{O}{100\%} 2a \quad (2)$$

Für den vollständigen Druck einer Struktur werden mindestens drei offene Siebmaschen benötigt. Das bei uns verwendete Sieb hat ein Gewebe mit Fadenwinkel 45° und eine sog. Mesh-Zahl von 325mesh, die Anzahl der Gewebe pro Zoll (25,4mm). Der Drahtdurchmesser beträgt 30µm. Die kleinsten Druckbaren Strukturen des Siebs liegen daher bei ca 200µm. Aus der Mesh-Zahl lässt sich die offene Oberfläche berechnen durch

$$W + a = \frac{25,4\text{mm}}{325\text{mesh}} = 78\mu\text{m}$$

$$W = 78\mu\text{m} - 30\mu\text{m} = 48\mu\text{m}$$

$$O = 38\%$$

womit sich die zu erwartende Schichtdicke zu 37,8µm berechnet.

Strukturierung des Siebs Die Strukturierung des Siebs erfolgt mit einer Fotoemulsion und einem Fotofilm. Es handelt sich dabei um die sog. direkt/indirekte Methode, sie unterscheidet sich von der sog. direkten Methode, bei der nur die lichtempfindliche Emulsion verwendet wird, und der sog. indirekten Methode, bei der nur ein nasser Fotofilm benutzt wird. Zu Beginn des Verfahrens wird das die untere Seite des Siebs mittig über den fotoempfindlichen Film gelegt. Der Fotofilm hat eine Trägerschicht welche üblicherweise glänzend ist, es ist daher zu beachten, dass diese Seite nach unten zeigt. Die Trägerschicht wird in einem späteren Schritt entfernt. Im nächsten Schritt wird die Emulsion mit einer Spachtel auf die obere Seite des Siebs aufgetragen. Mit einer Rakel wird mit möglichst gleichmäßigem Druck die Emulsion über die Fläche unterdessen sich der Film befindet gleichmäßig verteilt. Der Film haftet nun durch den Kontakt mit der Emulsion am Sieb. Bevor der Sieb weiter verarbeitet werden kann muss die Emulsion auf dem Sieb in einem Ofen bei 50°C für ca. eine Stunde ausgeheizt werden. Die Trägerfolie des Films kann anschließend abgezogen

werden. Eine mit einem Fotoplotter erstellte Maske wird dann mit der strukturierten Seiten in direkten Kontakt mit dem Fotofilm gebracht und mit einer Belichtungsmaschine belichtet (vgl. Abb. 2b oben). An den belichteten Stellen werden lange Polymerketten in den fotoempfindlichen Materialien gebildet, welche sich vernetzen und dadurch nicht mehr wasserlöslich sind. Das Sieb wird daraufhin entwickelt, indem es ausgewaschen wird, wobei sich der Film und die Emulsion an den unbelichteten Stellen vom Sieb abscheidet (vgl. Abb. 2b unten). Nachdem das Sieb getrocknet wurde, wird die Fläche außerhalb der vom Film bedeckte Stelle mit einem Siebfüller bestrichen.

Bedrucken des Substrats Das zuvor angefertigte Sieb wird dazu verwendet, eine keramische Leiterplatte zu strukturieren. Keramische Träger werden dann verwendet, wenn man mit den wesentlich günstigeren organischen Leiterplatten nicht die gewünschten Anforderungen erfüllen kann. Hauptvorteile von Keramikträgern sind eine gute Stabilität bei höheren Temperaturen und eine gute Wärmeleitfähigkeit. Für den Druck wird eine Siebdruckmaschine und Leiterbahnpaste benötigt. Das Sieb wird zunächst an ein Adapterrahmen spezifisch für die Druckmaschine festgeschraubt und in die Maschine verbaut. Die Siebdruckmaschine ist so konstruiert, dass man nach Auftragen der Druckpaste mehrere Druckvorgänge hintereinander durchführen kann. Dabei benutzt die Maschine zwei verschiedene Rakel, eine Druckrakel, welche die Paste relativ zum Substrat vorwärts bewegt und auf diese Weise durch die Öffnungen im Sieb auf das Substrat gelangen, und eine zusätzliche Rakel, welche die Paste nach jedem Druck wieder in die Ausgangsposition befördert. Der Druckvorgang ist in Abb. 1 schematisch dargestellt. Um eine gute Druckqualität zu erreichen, muss darauf geachtet werden, dass der sog. Absprung, die Distanz von Drucksieb und Substrat so gewählt wird, dass die entstehende Spannung im Gewebe groß genug ist, dass es sich von der gedruckten Struktur lösen kann. Andererseits darf der Absprung nicht zu groß gewählt werden, sodass die entstehenden Spannungen zu Verzerrungen des Druckbildes oder gar der Zerstörung des Siebs führen. Es ist darauf zu achten, dass das Substrat unter dem Sieb möglichst genau ausgerichtet ist. Nach dem Druckvorgang wird das Substrat mit der noch feuchten Druckpaste auf einer Trockenstrecke ausgeheizt. Zum Schluss wird die auf dem Substrat gedruckte Struktur in einem Ofen eingebrannt.

2.2 CZOCHRALSKY-VERFAHREN

Die Czochralski-Methode ist die heutzutage verbreitetste Züchtungsmethode von Einkristallen bei der Herstellung von großen, hochreinen, einkristallinen Wafern. Mit dem Verfahren können Größe und Ausrichtung des Kristalls gut kontrolliert werden. Abgesehen von Halbleitern können mit dem Czochralski-Verfahren auch metallische Einkristalle wie z. B. Palladium, Platin, Silber, Gold hergestellt werden. Die Methode wurde 1916 von dem polnischen Wissenschaftler Jan Czochralski entwickelt.

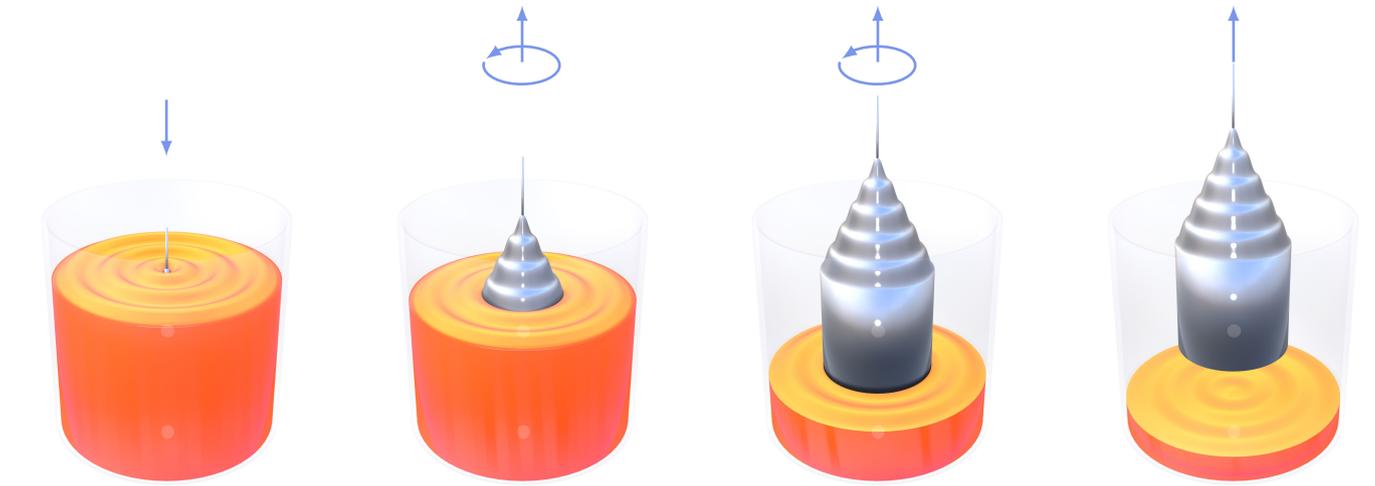
Zu Beginn des Verfahrens wird das Material, aus dem der Einkristall bestehen soll in seiner polykristallinen Form in einem Tegel bei einer Temperatur knapp über dem Schmelzpunkt zum Schmelzen gebracht. Je Bedarf können an dieser Stelle auch Dotierungsatome zugesetzt werden. Bei Verbindungen ist dabei zu achten, dass die Schmelze kongruent ist, dh. die Zusammensetzung der geschmolzenen Verbindung dieselbe ist, die sie in der festen Phase bildet. Danach befestigt man einen kleinen monokristallinen Keimkristall auch Impfkristall genannt mit einer genau definierten Kristallori-

entierung an das untere Ende eines Stabes und taucht ihn unter die Oberfläche der Schmelze. Der Impfkristall wird vorsichtig und mit kontrollierter Geschwindigkeit aus der Schmelze herausgezogen und dabei gedreht. Beim langsamen Herausziehen geht die Schmelze, unter Einwirkung der Schwerkraft, auf dem Impfkristall in einer geordneten kristallinen Form in die feste Phase über. Am Ende erhält man einen zylindrischen Block aus einkristallinem Material. In Abb. 3 ist dieser Prozess veranschaulicht. Die Länge des Barrens für beispielsweise einen 300-mm-Wafer kann mehrere Meter betragen. Der Manteldurchmesser dieses zylindrischen Barrens ist nicht homogen und muss daher bearbeitet werden z.B. durch Schleifen, bevor er in Scheiben geschnitten werden kann [1].

Lithiumniobatkristalle Lithiumniobatkristalle (LiNbO_3) werden üblicherweise mit der Czochralski-Methode gezüchtet. Die Verwendung von LiNbO_3 ist besonders verbreitet in photoakustischen Anwendungen aufgrund seiner piezoelektrischen sowie nicht-linearen optischen Eigenschaften. Die Qualität dieser Eigenschaften hängt neben der Reinheit vom verwendeten LiNbO_3 stark von ihrer Li/Nb Zusammensetzung ab. Bei der Herstellung von LiNbO_3 mit dem Czochralski-Verfahren werden typischerweise Temperaturen verwendet, bei denen der Dampfdruck von Li_2O einen sehr großen Wert erreicht und zu einer Verdampfung von Li führt. Durch die Kontrolle der Atmosphäre in der Wachstumskammer kann dieser Effekt minimiert werden, praktisch kann die Verarmung von Li im Kristall jedoch nur schwer zu 100 Prozent vermieden werden. Li-Gehalte zwischen 47 bis 50 Mol-Prozent eignen sich in Anwendungen mit hohen Anforderungen an das Li/Nb-Verhältnis. Die Züchtung großer Kristalle ist ebenfalls schwierig, da eine Vergrößerung des Durchmessers und der Länge leicht zu Rissen in den Kristallen führen kann. Mit der Entwicklung neuer drahtloser Kommunikationstechnologien ist es notwendig, große, qualitativ hochwertige LiNbO_3 -Kristalle zu züchten, um den rasch steigenden Bedarf an SAW-Filtern zu decken, was heutzutage immer noch eine Herausforderung darstellt [2, 3, 4].

2.3 THERMISCHES VERDAMPFEN

Das thermische Verdampfen fällt unter die Kategorie der physikalischen Gasphasenabscheidung (engl. *physical vapor deposition* PVD). Bei der thermischen Verdampfung handelt es sich um eine der ältesten Methoden zur Abscheidung dünner Schichten auf viele verschiedenen Substratmaterialien, darunter Polymere, Metalle und Gläser. Die Schichten können dabei aus Metallen, Isolatoren und Halbleitern bestehen. Grundprinzip der Methode ist die Verdampfung des Materials in einer erhitzten Quelle, das dann auf allen freiliegenden (kalten) Oberflächen innerhalb der mittleren freien Weglänge der Gasphase kondensiert. Die Quelle kann die Form eines Glühdrahts oder eines elektrisch beheizten Tiegels haben, der das zu verdampfende Material enthält. Die Verdampfungsrate wird durch den Dampfdruck des Ausgangsmaterials bei der Verdampfungstemperatur bestimmt und kann unter Verwendung von Wolfram- oder Molybdän-Tiegeln, bei denen Temperaturen von bis zu 2800K erreicht werden können, einen hohen Wert erreichen. Noch höhere Temperaturen können erreicht werden, indem das abzuschneidende Material durch einen fokussierten Elektronenstrahl erhitzt wird, wodurch ebenfalls eine Verunreinigung durch den Tiegel vermieden wird. Der Prozess wird in einer Verdampfungskammer unter Hochvakuum ($<10^{-2}\text{Pa}$) bis Ultrahochvakuum ($<10^{-6}\text{Pa}$) durchgeführt. Die Qualität und Reinheit der Abscheidung ist umso höher, je besser die Evakuierung der



Eintauchen des Impfkristalls in die Schmelze

Beginn des Kristallwachstums

Ziehen des Barrens

Einkristalliner Barren als Ergebnis

Abb. 3 | Veranschaulichung des Czochralski Verfahrens. Das Czochralski-Verfahren ist ein Verfahren der Werkstofftechnik zur Herstellung von einkristallinen Werkstoffen (Kristallzüchtung). Der Vorgang findet innerhalb einer evakuierten Wachstumskammer statt.

Kammer ist. Der wichtigste Prozessparameter für die thermische Verdampfung ist die Substrattemperatur, durch dessen Änderung Schichteigenschaften wie Porosität, Haftung, Oberflächenrauheit und Kristallinität steuern lassen. In Abb. 4b ist der Vorgang der thermischen Verdampfung schematisch dargestellt.

Hauptvorteile des thermischen Verdampfens sind eine hohe Abscheidungsrate und große Dicke der erzeugbaren Schicht. Ein wesentlicher Nachteil ist, dass zwar flache Oberflächen effektiv beschichten werden können, aber möglicherweise nicht die Seiten und Böden tieferer oder komplexerer Strukturen ausreichend bedeckt werden können oder gar nicht erreicht werden. Eine andere weit verbreitete Methode der physikalischen Gasphasenabscheidung, das Sputtern bietet eine Alternative zum thermischen Verdampfen. Dabei wird mit energiereichen Teilchen, in der Regel Ionen aus einem Inertgasplasma, das abzuscheidende Material beschossen, wodurch Atome oder Moleküle herausgeschleudert werden, durch ein Vakuum wandern und sich auf dem Substrat ablagern. Beide Methoden sind in Tab. 1, entnommen aus [5] gegenübergestellt.

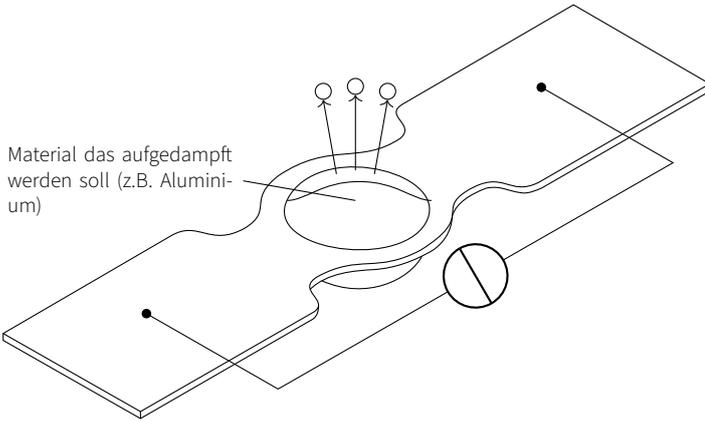
Weitere Methoden die unter die pyhisikalische Dampfabcheidung gezählt werden sind z.B. die sog. Kathodische-Arc Deposition (industriell weit verbreitet), Ion Plating, Laser Beam Ablation und Thermisches Sprühen. Neben der PVD gibt es eine Vielzahl von weiteren Beschichtungsmethoden. Darunter zählen beispielsweise chemische Aufdampfmethode (*engl. chemical vapor deposition CVD*) oder das epitaktische Schichtwachsen. Die Wahl der Methode kann stark auf die verwendeten Materialien abhängen. Andererseits sollten immer Anforderungen (z.B. Schichtdicke, Gleichmäßigkeit, Reinheit) und Kosten gegenübergestellt werden [5, 6, 7].

Reinraumversuch Im vorliegenden Fall werden Interdigitalwandler (IDT) aus Aluminium auf einem piezoelektrischem LiNbO₃-Wafer hergestellt. Dazu wird eine Aluminiumschicht thermisch auf die Waferoberfläche aufgedampft und anschließend mit Hilfe der Lithographie strukturiert. Der Aufbau des Versuchs ist in Abb. 4b schematisch dargestellt. Zu Beginn wird der Wafer mit der zu Beschichtenden Oberfläche vertikal nach unten zeigend in eine ringförmige Halterung im oberen Bereich der Vakuumkammer gelegt. Der Wafer wird daher nach der Beschichtung einen unbeschichteten Rand der Größe der Halterung aufweisen. Im Unteren

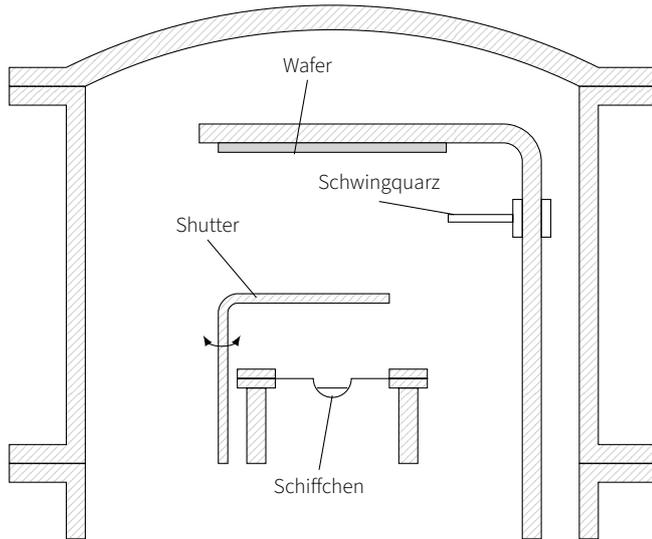
	Verdampfung	Sputtern
Ablagerungsrate	bis zu $\mu\text{m/s}$	<1nm/s
Materialwahl	begrenzt	fast unbegrenzt
Reinheit	Sehr gut bei hohem Vakuum	Unreinheiten
Aufheizung des Substrats	wenig	könnte hoch sein
Stöchiometrie	schwer (auch mit mehreren Quellen)	leichter
Wechseln des Schichtmaterials	leicht	teuer
Zersetzung des Materials	hoch	niedrig
Skalierung	gut (außer mit Elektronenstrahl)	gut
Anlage Kosten	niedrig	teuer
In situ Dickestesteuerung	leicht	schwer
Lift-Off Masking	leicht	schwer
Stufenablagern	schlecht	gut, könnte kontrolliert werden

Tab. 1 | Gegenüberstellung thermisches Verdampfung und Sputtern.

Bereich der Vakuumkammer befinden sich 2 sog. Schiffchen (sehr kleine Tiegel) bestehend aus Wolfram (vgl. Abb. 4a), das einen deutlich höheren Schmelzpunkt hat als Aluminium. In ihnen wird das Aluminium, das in Form von sog. Pellets (ca. 3 pro Schiffchen), verdampft, indem die Schiffchen durch zwei elektrische Kontakte mit einem elektrischen Strom (im Ampère Bereich) durchflossen werden. Die Schiffchen befinden sich nicht exakt unter der Waferoberfläche, weshalb eine leicht inhomogene Oberflächendicke zu erwarten ist. Zwischen Wafer und Schiffchen befinden sich Shutter, mit denen sich Startpunkt und Endpunkt der des Aufdampfprozesses steuern lassen. Innerhalb der Vakuumkammer befindet sich außerdem eine Elektrode mit der vor dem Aufdampfen die Oberfläche mit Plasma beglimmt wird um sie von Unreinheiten zu säubern. Die Aufdampftrate wird insitu mit einem Schwingquarz gemessen. Sobald die Vakuumkammer geschlossen ist, wird mit Hilfe von Pumpen und einer Steuerungseinheit die Kammer evakuiert. Wenn der Zieldruck von ca 5^{-6} mBar erreicht ist, wird der Strom eingeschaltet und die Schiffchen erhitzt. Der Schwing-



(a) Schiffchen. Typischerweise bestehen diese Schiffchen aus Wolfram.



(b) Schematischer Versuchsaufbau der thermischen Verdampfung.

Abb. 4 | Thermisches Verdampfen.

quarz, dessen Oberfläche ebenfalls beschichtet wird, ändert mit wachsender Schichtdicke seine Resonanzfrequenz, was durch die Steuerungseinheit in eine Aufdampfrate umgerechnet wird. Diese kann durch gute Kalibrierung genau bestimmt werden. Bei Erreichung der gewünschten Aufdampfrate (in unserem Fall ca. $5 \text{ \AA}/\text{s}$) werden die Shutter geöffnet bis die Schichtdicke auf dem Wafer zwischen 200 und 400nm beträgt. Prinzipiell kann die Schichtdicke geringer gewählt werden, in unserem Fall jedoch werden die IDTs in einem späteren Schritt mit Bonddrähten kontaktiert, was bei einer zu dünnen Schicht zu Beschädigungen der Strukturen kommen kann. Um die Aufdampfrate konstant zu halten, wird der Strom aufgrund des Massenverlusts in den Schiffchen durch die Steuereinheit herunter geregelt um die Temperatur konstant zu halten. Der Aufdampfprozess wird gestoppt indem die Shutter wieder geschlossen werden und der Strom abgeschaltet wird. Die Kammer wird anschließend langsam wieder belüftet, woraufhin sie geöffnet werden kann und der mit Aluminium beschichtete Wafer entnommen werden kann. Beim Öffnen der Kammer ist darauf zu achten, dass der Druck nicht abrupt innerhalb der Kammer steigt, was zu Beschädigung der Pumpen führen könnte.

2.4 LITHOGRAPHIE

Die Lithographie wird bei der Herstellung von Halbleiterbauelementen benutzt um eine Vielzahl von Mustern gleichzeitig auf der

Oberfläche des Substrat-Wafers zu erzeugen. Dies geschieht mit Hilfe von ultraviolettem Licht, einer Maske und einem Photolack. Die Masken bestehen üblicherweise aus hochreinem Quarzglas. Deren Herstellung ist sehr aufwendig und verglichen mit dem tatsächlichen Lithographie-Prozess äußerst zeitintensiv. Sie erfolgt in der Regel mit einem Elektronenstrahl-Schreibgerät, mit dem die abzubildenden Strukturen auf die Maske geschrieben werden. Es gibt zwei Hauptkategorien von Fotomasken die verwendet werden können, die sog. binäre und die sog. Phase-Shift-Maske. Bei der binären Maske gibt es, wie der Name impliziert zwei verschiedene Bereiche, einen für das belichtende Licht transparenten und einen undurchdringlichen Bereich. Der Aufbau einer Phase-Shift-Maske (PSM) ist wesentlich komplexer. Diese sind so konstruiert, dass das durchdringende Licht in bestimmten Bereichen, einen Phasenunterschied bezüglich Lichtstrahlen aus benachbarten Bereichen erfährt, und somit durch die entstehenden Interferenzeffekte höhere Auflösungen erreichbar sind. Sog. Halftone und Alternating PSMs (vgl. Abb. 5) sind gängige Ausführungen, wobei die Alternating PSM heutzutage am häufigsten verwendet wird. Diese Art von Masken sind durch ihre Komplexität in der Herstellung wesentlich teurer als binäre Masken und können zusätzliche Ausrichtungsschritte während des Lithografieprozesses erfordern. Bei dem Fotolack handelt es sich in der Regel um ein lichtempfindliches, chemisch resistentes Polymer. Es wird zwischen positivem und negativem Photolack unterschieden, wobei der positive Lack bei Belichtung freigelegt wird, während diese Bereiche beim negativen Lack stehen bleiben.

Zu Beginn des Lithographie-Verfahrens wird der Wafer in einer sog. Lackschleuder zur Rotation gebracht und dabei mit einer kleinen Menge Fotolack betropft (manchmal besprüht), wodurch ein gleichmäßiger dünner Film auf der Oberfläche entsteht. Um die Haftung zwischen dem Fotolack und der Oberfläche des Wafers zu verbessern, wird in der Regel vor dem Auftragen des Lacks eine Schicht Haftvermittler aufgetragen. Nach dem Schleudern wird der beschichtete Wafer auf einer Heizplatte ausgetrocknet, wodurch die meisten Lösungsmittel aus dem Fotolack ausgetrieben werden, was die Haftung verbessert. Anschließend wird die Maske mit den gewünschten Strukturen über dem Wafer ausgerichtet und

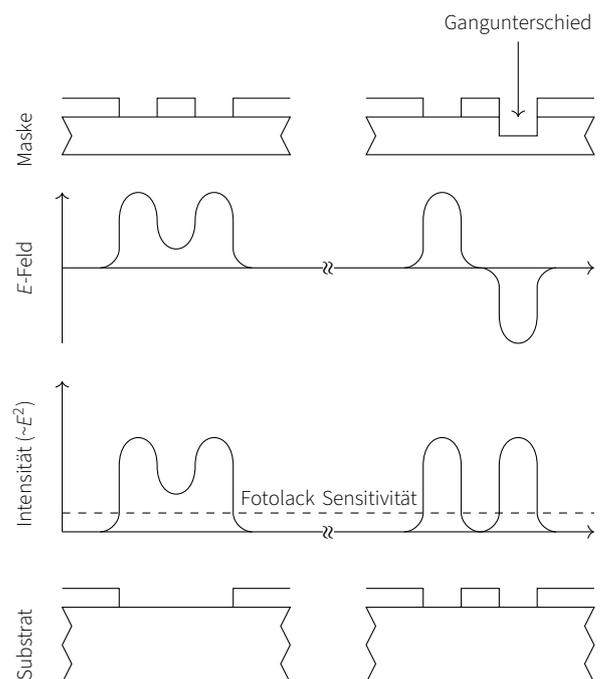


Abb. 5 | Funktionsprinzip einer Alternating Phase-Shift-Maske.

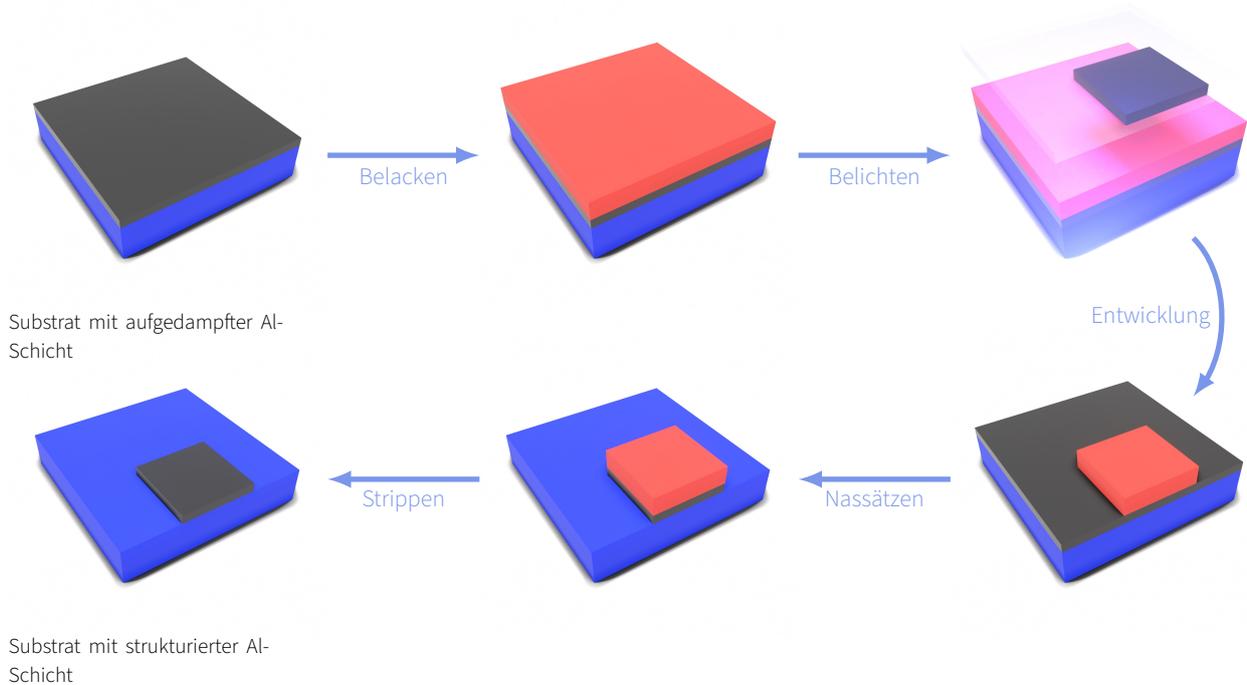


Abb. 6 | Die einzelnen Prozessschritte bei der Strukturierung der Aluminiumschicht auf dem LiNbO₃-Wafer (Lithographie und Ätzen).

dann mit Licht (üblicherweise ultraviolettes Licht) bestrahlt, das durch die transparenten Bereiche der Maske dringt und die chemische Struktur des Fotolacks in diesen Bereichen verändert. Bei der Belichtung des Fotolacks kann zwischen drei verschiedenen Methoden, Kontakt-, Proximity- und Projektionsfotolithographie unterschieden werden.

Kontakt-Lithographie Bei der Kontaktlithographie wird die Fotomaske in direkten Kontakt mit dem mit Fotolack beschichteten Wafer gebracht. Während der Belichtung strahlt ultraviolettes Licht durch die Maske und überträgt das Muster direkt auf den Fotolack. Dadurch wird eine hohe Auflösung erreicht, denn der Abstand zwischen Maske und Fotolack ist minimal, was Beugungs- und Streueffekte des Lichts unterbindet. Ein Nachteil dieser Methode besteht jedoch darin, dass aufgrund des direkten Kontakts die Maske beschädigt werden kann und außerdem Defekte der Schaltungen aufgrund von Ablagerungen von Partikeln auftreten können.

Proximity-Lithographie Die Proximity-Lithographie ähnelt der Kontaktlithographie, jedoch berührt die Maske die Oberfläche des Wafers nicht. Es befindet sich daher ein kleiner Spalt (bis zu einigen zehn Mikrometern) zwischen der Maske und Fotolack. Beschädigungen der Maske und Schaltungsdefekte durch den Kontakt mit dem Wafer werden mit dieser Methode vorgebeugt, allerdings auf Kosten der Strukturauflösung, denn aufgrund des Spalts zwischen Maske und Fotolack sind Lichtbeugung und Streuung stärker ausgeprägt.

Projektions-Lithographie Bei der Projektions-Lithographie handelt es sich um die heutzutage am häufigsten verwendete Methode. Bei dieser Methode befindet sich ein optisches Linsensystem zwischen Maske und Wafer, welches das Bild der Maske üblicherweise um einen Faktor 5 bis 10 mal verkleinert auf den Fotolack projiziert. Anders als bei den bisher genannten Methoden wird hier der Wafer in Teilen nacheinander belichtet, das heißt nach der Belichtung eines Teils des Wafers wird das Substrat um eine bestimmte Strecke bewegt, um einen neuen unbelichteten Bereich abzubilden. Dieser sog. Step- und Repeat-Prozess wird so lange wiederholt, bis der gesamte Wafer mit dem Maskenbild strukturiert

ist. Das Gerät, welches dabei eingesetzt wird, kann entweder ein sog. Stepper oder ein sog. Scanner sein. Ein Stepper erzeugt ein rechteckiges Bild auf dem Wafer. Aufgrund des großen genutzten Bildfeldes verringern Linsenfehler die Auflösung von kleinen Strukturen. Ein Scanner hingegen belichtet nur einen Streifen des Bildes auf den Wafer. Der Wafer und die Maske müssen also „gescannt“ werden. Da ein viel kleineres Bildfeld verwendet wird, werden Linsenfehler (die am Rand des Linsensystems auftreten) stark reduziert. Scanner sind der Standard für Technologien im tiefen Submikrometerbereich. Diese Methoden setzen die Verwendung von monochromatischem Licht voraus, es sind dabei wesentlich höhere Auflösungen als bei den zuvor genannten Methoden erreichbar, was die Herstellung wesentlich komplexerer und kleinerer Bauteile ermöglicht. Allerdings ist diese Methode auch teurer und man erhält grundsätzlich weniger Chipstrukturen pro Wafer. Die Auflösung die bei der Projektions-Lithographie erreichbar ist, ist durch das Auflösungsvermögen optischer Systeme nach Abbe gegeben.

$$d = \frac{\kappa_1 \lambda}{NA}$$

Hierbei ist $NA = n \sin \theta$ die numerische Apertur der Projektionslinse und λ die Wellenlänge des verwendeten Lichts. Bei κ_1 handelt es sich um eine bezüglich der Projektionslithographie sehr wichtige Größe. Dieser Faktor ist durch die Qualität der verwendeten Optik, des Fotolacks und der Maske bestimmt. Sein Wert ist durch den Beugungseffekt von Licht limitiert und kann im besten Fall 0,25 betragen. Die Strukturgrößen die heutzutage mit dieser Methode hergestellt werden befinden sich in Bruchteilen der verwendeten Wellenlänge, weshalb auch bei dieser Methode die Wellennatur des Lichtes berücksichtigt werden muss. Dafür werden spezielle Belichtungsstrukturen und komplexe Rechenmodelle entwickelt, um dennoch hohe Auflösungen zu erreichen.

Nach der Belichtung wird das Substrat in eine Entwicklerlösung getaucht, die selektiv die Bereiche des Fotolacks entfernt, die entweder belichtet oder nicht belichtet wurden (je nachdem, ob ein positiver oder negativer Fotolack verwendet wurde), sodass die gemusterte Oberfläche durch die Lücken sichtbar wird, in denen

der Fotolack abgewaschen wurde. Bei der Strukturierung von Metallschichten kann der Lithographie-Prozess entweder nachdem die Oberfläche des Wafers mit dem Metall beschichtet wurde oder bevor sie beschichtet wird angewendet werden. Im letzteren Fall, werden die Strukturen per des sog. Lift-Off-Verfahrens erzeugt. Dabei wird die Metallschicht auf der ganzen Oberfläche abgeschieden und der verbleibende Fotolack entfernt, indem das überschüssige abgeschiedene Material mit abgehoben wird. Dies geschieht in der Regel durch Eintauchen des Substrats in ein Lösungsmittel, das den Fotolack auflöst, die abgeschiedene Dünnschicht aber nicht angreift. Falls die Oberfläche schon zuvor mit dem Metall beschichtet wurde werden die Strukturen durch Ätzung erzeugt. Der verbleibende Fotolack dient dabei als Maske zum Schutz von Bereichen, in denen das Metall nicht weggeätzt werden soll. [1, 8, 6, 9, 10].

Reinraumversuch —Belacken Die zuvor auf den LiNbO₃ Wafer aufgedampfte Aluminiumschicht soll mit Hilfe eines Ätzverfahrens in die gewünschten IDT-Muster strukturiert werden. Im vorliegenden Fall ist das Ziel der Lithographie daher eine Maske die für den darauf folgenden Ätzvorgang. In Abb. 6 ist der Verlauf des Prozesses schematisch dargestellt. Dafür muss zunächst die Fotolackschicht, das Material der Ätzmaske, auf die gesamte Aluminiumschicht aufgetragen werden. Um eine gute Haftung des Lacks auf dem Aluminium zu ermöglichen wird zunächst eine sehr dünne Schicht Haftvermittler auf die Waferoberfläche aufgetragen. Dieser Schritt ist notwendig, das sich der Fotolack sonst nicht auf die Oberfläche des LiNbO₃-Wafers auftragen lässt. Anders als bei beispielsweise einer SiO₂-Oberfläche wechselwirken die LiNbO₃-Oberfläche und der Fotolack auf die gleiche Weise wie eine hydrophobe Oberfläche mit Wasser. Der Vorgang geschieht mit einer sog. Lackschleuder, eine Vorrichtung in der der Wafer durch ein Vakuum an eine elektrisch drehbare Scheibe, dessen Drehzahl gesteuert werden kann, befestigt wird. In unserem Fall wird bei zunächst 500U/min innerhalb der ersten 10 Sekunden 1ml Haftvermittler vertikal über dem Zentrum des Wafers mit Hilfe einer Pipette aufgetragen. Daraufhin wird die Drehzahl auf 5000U/min erhöht und für ca. 30 Sekunden konstant gehalten, während sich das durch die Zentrifugalkraft nach außen beschleunigte Material auf der gesamten Oberfläche verteilt. Die Menge des aufgetropften Materials und die Drehzahl bestimmen die Dicke der Schicht, in diesem Fall befindet sie sich im unteren Nanometerbereich und wird somit den Lithographieprozess nicht beeinflussen. Der Wafer wird anschließend aus der Lackschleuder genommen und auf einer Heizplatte bei zunächst schrittweiser Temperaturerhöhung ausgeheizt. Wenn die eine Temperatur von 120°C auf der Heizplatte erreicht wird, wird die Temperatur konstant gehalten und der Wafer nach ca. einer Minute von der Heizplatte entfernt. Die schrittweise Temperaturerhöhung ist deshalb notwendig, da das Substratmaterial piezoelektrisch ist und bei abrupten Temperaturänderungen es innerhalb des Materials zu großen mechanischen und elektrischen Spannungen kommt, die sich in Form von Funken bemerkbar machen können. Es kann dabei zu Veränderungen der elektrischen Eigenschaften führen, die die Leistung des Wafers beeinträchtigen könnten. Nachdem der Wafer für ca. eine Minute ausgekühlt wurde, wird 1.5 mL Fotolack mit den gleichen Parametern wie der zuvor aufgetragene Lackvermittler (erste 10s 500U/min, dann für 30s 5000U/min) aufgetragen. Der Wafer wird in gleicher Weise wie zuvor ausgeheizt, die Tempertur wird jedoch bei Erreichen von 100°C konstant gehalten, denn bei zu hohen Temperaturen wird der Lack spröde, was zu Veränderungen der Belichtungsparameter und bei Entfernung des Fotolack (Entwicklung und Ätzprozess) zu Problemen führen kann.

Reinraumversuch —Belichtung Nachdem der Fotolack auf der Waferoberfläche ausgehärtet wurde, kann er mit Hilfe einer Belichtungsmaschine und der zuvor gefertigten Fotomaske belichtet werden. Es wird mit positiven Lack gearbeitet, deshalb sind die IDT-Strukturen auf der Maske die lichtundurchlässigen Bereiche. Die Maske muss so in die Halterung der Maschine eingebaut werden, dass die OFW-Strukturen in eine Richtung ausgerichtet sind, bei der die Ausbreitungsrichtung der Oberflächenwellen senkrecht zum Flat des Wafers verläuft. Somit wird sichergestellt, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit der OFW für welche, die Filter designt wurden übereinstimmt. Durch eine Lichtschanke, die den Waferflat identifizieren kann wird der Wafer automatisch so weit rotiert bis der Flat nach unten zeigt, womit Maske und Wafer genau ausgerichtet sind. Bei der Belichtung werden Maske und Wafer in direktem Kontakt gebracht, es handelt sich daher um die zuvor erwähnte Kontakt-Lithographie. Da die Strukturgrößen sich im unteren μm -Bereich befinden, können wir eine hohe Auflösung der Fotolack-Strukturen erwarten. Die Belichtungszeit beträgt in diesem Fall 10s. Bei der Lampe handelt es sich um eine Quecksilberdampfampe, dessen Linien bei denen der Fotolack besonders empfindlich ist bei 365nm, 405nm, 435nm liegen. Nachdem der Wafer aus der Maschine entnommen wurde, bleibt er vorerst optisch unverändert, denn um den in diesem Fall belichteten (positiven) Fotolack zu entfernen muss er noch entwickelt werden.

Reinraumversuch —Entwicklung Der Wafer wird zuerst, mit der belichteten Fotolackschicht nach oben zeigend, in ein Becherglas gelegt. Dadurch wird vermieden, dass der Wafer auf der Entwicklerlösung schwimmt. Nachdem die Menge der Entwicklerlösung, die speziell für die Schichtdicke dieses Fotolacks bestimmt ist, sorgfältig abgemessen wurde wird sie in das Becherglas gegossen. Es ist darauf zu achten, dass genügend Entwicklerlösung benutzt wird um alle belichteten Bereiche zu lösen. In unserem Fall beträgt die Menge 40ml. Während der Entwicklung, die ca. 40 Sekunden andauert muss sollte die Lösung ständig in Bewegung gehalten werden, um vor allem den gelösten Fotolack von der Oberfläche abzutransportieren aber auch Luftblasen, die den chemischen Prozess unterbinden loszuwerden. Der Wafer sollte rechtzeitig aus dem Becherglas entnommen werden und zügig mit deionisiertem Wasser abgespült werden, um einen sog. Dunkelabtrag, einen Angriff auf unbelichtete Bereiche zu vermeiden. Zum Schluss wird der Wafer in einer Schleuder getrocknet.

2.5 ÄTZTECHNIK

Nachdem der Fotolack auf der Substratoberfläche strukturiert wurde, wird eine Ätztechnik erfordert, um die vom Lack unbedeckte Beschichtung zu entfernen. Allgemein unterscheidet man bei der Ätztechnik zwischen einem Trockenätzverfahren und einem Nassätzverfahren, wobei bei letzterer Methode die Verwendung des Fotolacks als Schutzschicht (Ätzmaske) auf flaches Ätzen beschränkt ist.

Nassätzen Nassätzen basiert auf einer chemischen Redox-Reaktion, die auf der Oberfläche des zu Ätzenden Materials stattfindet. Dabei wird der Wafer in ein Bad mit einem chemischen Ätzmittel getaucht, woraufhin das Ätzmittel auf der Oberfläche reduziert, während das Oberflächenmaterial oxidiert, was zur Bildung löslicher Ionen, die das Oberflächenmaterial enthalten führt, die dann von der Reaktionsoberfläche wegdiffundieren. Mit der richtigen Wahl des Ätzmittels können alle in der Praxis verwendeten Materialien geätzt werden. Das Nassätzen ist isotrop, wenn die che-

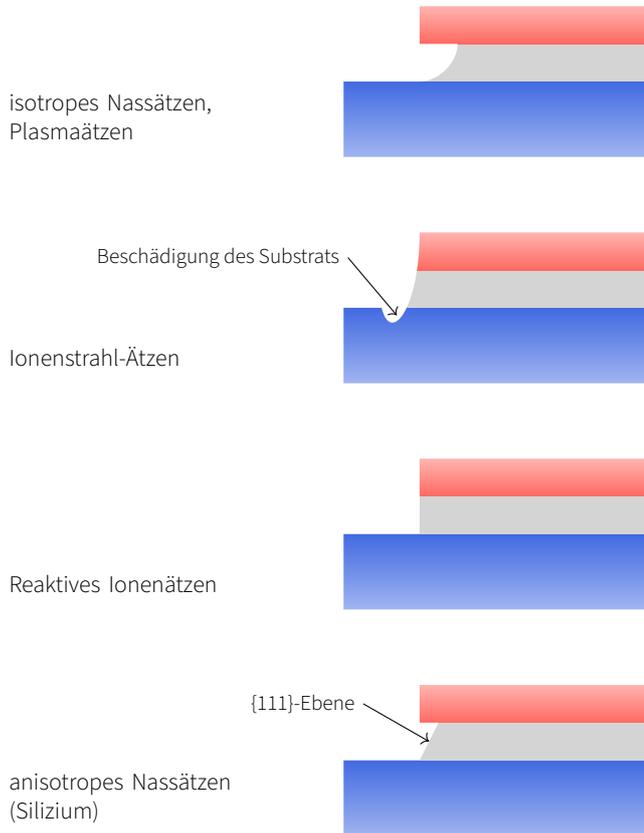


Abb. 7 | Ätzprofile der verschiedenen Ätzmethoden.

mischen Reaktionen sich in alle Richtungen innerhalb des Materials mit der gleichen Geschwindigkeit ausbreiten. In diesem Fall beobachtet man daher immer einen Unterschnitt unter dem Fotolack sowie abgerundete Kanten. Der Ätzvorgang wird in der Regel zeitlich gesteuert. Alternativ kann der Vorgang gestoppt werden sobald die unter der zu Abtragenden Schicht sichtbar wird, sofern sich diese von der geätzten Schicht unterscheidet. Das Unterätzen und Abrundungen sind umso ausgeprägter, je länger der Ätzvorgang andauert, deshalb muss dabei sehr präzise gearbeitet werden. Isotropes Ätzen kann bei der Herstellung sehr feiner und präziser Muster eine Einschränkung darstellen, eignet sich aber für viele Anwendungen, bei denen diese Merkmale akzeptabel sind. Für das anisotrope Nassätzen von beispielsweise Silizium wird üblicherweise eine Mischung aus Flußsäure (HF), Salpetersäure (HNO₃) und Essigsäure (CH₃COOH) verwendet. Dies führt dazu, dass die Ätzrate in der {100}- und {110}-Richtung viel schneller als in der {111}-Richtung. Grund dafür ist, dass die Si-Atome der verschiedenen Kristallebenen unterschiedliche Aktivierungsenergien für die Ätzreaktion haben. Das Nassätzen wird häufig wegen seiner Einfachheit, der relativ geringen Kosten und der hohen Ätzrate bevorzugt.

Trockenätzen Beim Trockenätzen werden keine chemische Lösungen verwendet. Stattdessen wird die Oberfläche mit (reaktiven) Gasen behandelt. Dabei kann Plasma, eine Mischung aus Radikalen und Ionen, innerhalb einer Vakuumkammer mit der Oberfläche des Materials in Verbindung gebracht werden. Wenn das Plasma auf die Oberfläche trifft, kommt es zu einem Materialabtrag durch chemische Reaktion und teils physikalische Zerstäubung. Wenn der Mechanismus der Abtragung nur auf chemischen Reaktionen beruht, handelt es sich um das sog. Plasmaätzen. Die verbreitetste Ätzmethode ist das sog. reaktive Ionenätzen (*engl. reactive ion etching, RIE*), bei der die Abscheidung zusätzlich durch den physischen Zusammenstoß der Ionen auf der Oberfläche aus-

genutzt wird. Das Plasma wird dabei durch eine Spannung in Richtung Substrat beschleunigt. Ein Verfahren, das hauptsächlich auf der physikalischen Zerstäubung durch Ionenstöße beruht, ist das sog. Ionenstrahl-Ätzen (*engl. Ion beam etching, IBE*), bei dem ein auf das Substrat gerichteter fokussierter Ionenstrahl das Material abspaltet. Die Isotropie der Ätzung kann durch Änderung des Druck innerhalb der Kammer angepasst werden. Niedriger Druck führt zu hoher Anisotropie, wodurch Unterätzen vermieden werden kann, jedoch auf Kosten der Selektivität. Es kann daher zu ungewollten Abtragungen kommen (Beschädigung des Substrats). Um die Selektivität zu verbessern können weitere Parameter beispielsweise die Wahl des Plasmas und Temperatur verändert werden. Das reaktive Ionenätzen kann in Verbindung mit dem sog. Bosch-Verfahren angewendet werden, um sehr tiefe hoch anisotrope Ätzprofile zu erzeugen. Dabei wird das Substrat abwechselnd geätzt und eine Passivierungsschicht an den Wänden des Ätzprofils angebracht, wodurch beim nächsten Ätzschritt nur in die Tiefe geätzt wird. Beim Trockenätzverfahren entstehen flüchtige Nebenprodukte, wenn das Material von der Oberfläche entfernt wird. Im Idealfall werden diese Nebenprodukte durch das Vakuumsystem aus der Ätzkammer abgesaugt. In der Praxis entweichen nicht alle Nebenprodukte aus der Kammer und ein Teil lagert sich erneut auf Teilen der Oberfläche wie beispielsweise an den Seitenwänden der geätzten Strukturen ab. Dieser unerwünschte Vorgang kann zu Verzerrungen der Ätzprofile führen und muss daher immer im Auge behalten werden. Durch die Herstellung immer kleinerer Strukturen ist das Trockenätzen, durch eine bessere Kontrolle über den Ätzprozess, eine höhere Auflösung bei der Strukturierung und die Möglichkeit, durch dünne Schichten mit hohem Seitenverhältnis zu ätzen, gegenüber dem Nassätzen die bevorzugte Methode geworden. Tab. 2 gibt eine grobe Gegenüberstellung beider Methoden.

	Nassätzen	Trockenätzen
hohe vertikale Wände	nicht möglich	gut möglich
Strukturen mit hohem Seitenverhältnis	begrenzt	fast unbegrenzt
Strukturgröße	sehr begrenzt	klein
Ätzrate	sehr hoch	eher niedrig
Wiederablagerung	keine	vorhanden
Beschädigung des Substrats	keine	möglich
Unterätzen	ausgeprägt	kann kontrolliert werden
Kosten	gering	könnten hoch sein

Tab. 2 | Gegenüberstellung von Nassätzen und Trockenätzen.

Nach Abschluss des Ätzvorgangs wird der Wafer aus dem Ätzbad genommen und der verbleibende Fotolack mit einem Lösungsmittel oder einer anderen chemischen Lösung abgezogen. Danach wird der Wafer gründlich mit entionisiertem Wasser gespült, um alle Chemikalienreste zu entfernen, und anschließend getrocknet [11, 12, 13, 14].

Reinraumversuch — Nassätzen und Strippen Die freiliegende Aluminiumschicht auf dem LiNbO₃ Wafer wird im vorliegenden Fall durch einen Nassätzvorgang entfernt. Dies geschieht, wie häufig üblich, mit einer Lösung basierend auf Phosphorsäure bei einer Temperatur von 40°C. Die Temperatur beeinflusst die Ätzgeschwindigkeit und die Gleichmäßigkeit des Prozesses. Findet der Ätzvorgang bei zu hohen Temperaturen statt, kann es sein, dass der Fotolack ebenfalls geätzt wird. Bei der chemischen Reaktion auf der Aluminium-Oberfläche entsteht unter anderem Alumi-

umphosphat und Wasserstoffgas. Um die entstehenden Produkte von der Oberfläche abzutransportieren, wird die Lösung über der Waferoberfläche in ständiger Bewegung gehalten. Dabei kann eine Ätzrate von 300-500 nm/min erreicht werden. Bevor der Ätzvorgang in einem mit der Ätzlösung vorgeheiztem Becherglas gestartet wird, wird ein weiteres Becherglas mit deionisiertem Wasser (DI-Wasser) bereitgestellt, damit der Ätzvorgang zügig gestoppt werden kann. Es wird in unserem Fall nach Sicht geätzt, d.h. sobald die LiNbO₃-Oberfläche sichtbar ist – das geschieht innerhalb weniger 10 Sekunden bei einer Schichtdicke von ca. 200nm, wird der Vorgang gestoppt indem der Wafer im DI-Wasser gebadet wird. Dieser Ätz-prozess ist isotrop, sodass ein Unterätzen nicht vermeidbar ist, jedoch muss darauf geachtet werden, dass der Unterschnitt umso größer ist, je länger der Ätzvorgang andauert. Im Besten Fall ist der Unterschnitt gleich der Ätztiefe. Wir können daher erwarten, dass die Strukturen um mindestens 200nm auf allen Seiten der ursprünglich geplanten Geometrie schrumpfen. Nachdem der Wafer in einer Schleuder getrocknet wurde, kann der bisher auf der Oberfläche verbliebene Fotolack in einer Lack-schleuder unter Auftragung von Aceton und Isopropanol getrippt werden. Dabei entfernt Aceton den Lack wobei Isopropanol die Oberfläche vom Aceton bereinigt [15].

3 MESSUNGEN

3.1 REFLEKTOMETER

Zur Messung der Schichtdicke des aufgetragenen Fotolacks wird ein Reflektometer verwendet. Ein Reflektometer richtet einen Lichtstrahl auf die Oberfläche einer Probe und misst die Intensität des reflektierten Lichtes. Die Funktionsweise ist in Abb. 8 skizziert. Wenn das Licht auf die auf den Wafer aufgetragene Schicht trifft, wird ein Teil des Lichts von der Oberfläche reflektiert, und ein Teil des Lichts dringt durch die Folie hindurch und wird an der Grenzfläche zwischen der Folie und dem darunter liegenden Substrat reflektiert. Die von der Oberfläche und der Grenzfläche reflektierten Lichtstrahlen interferieren miteinander und sorgen abhängig der Schichtdicke zu unterschiedlichen gemessenen Intensitäten, was sich in eine Schichtdicke umrechnen lässt.

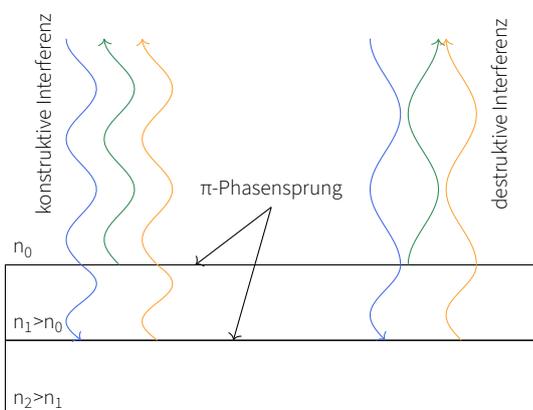
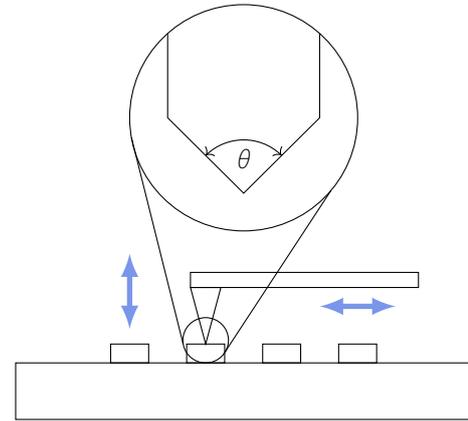
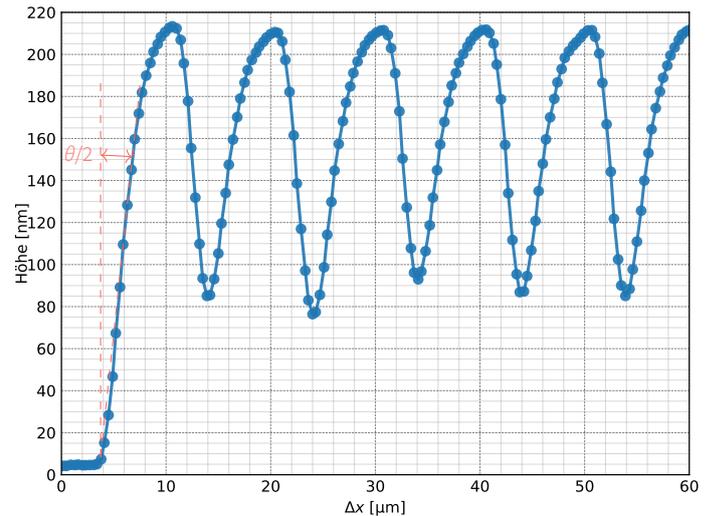


Abb. 8 | Funktionsprinzip eines Reflektometers.

Im vorliegenden Fall befindet sich ein Schicht aus Aluminium unter der aufgetragenen Fotolackschicht. Licht wird daher um ein vielfaches stärker an der Aluminiumgrenzfläche als auf der Fotolackoberfläche reflektiert, wodurch die Messung erschwert wird. Daher wird nicht die Fotolackschicht auf dem LiNbO₃-Wafer ver-



(a) Funktionsprinzip eines Profilometers.



(b) Messdaten des Profilometers über die Fingerstrukturen eines IDTs.

Abb. 9 | Profilometer

messen, sondern eine Fotolackschicht die auf der exakt gleiche Weise auf die SiO₂-Oberfläche eines Silizium-Wafers aufgetragen wurde. Um eine korrekte Schichtdicke zu erhalten muss zunächst eine Referenzmessung gemacht werden und die Brechungsindizes der relevanten Schichten, in unserem Fall Si ($n=3,8714$), SiO₂ ($n=1,4571$), Lack ($n=1,6233$) im Messsystem hinterlegt werden. Es wird eine Schichtdicke von 1850nm gemessen.

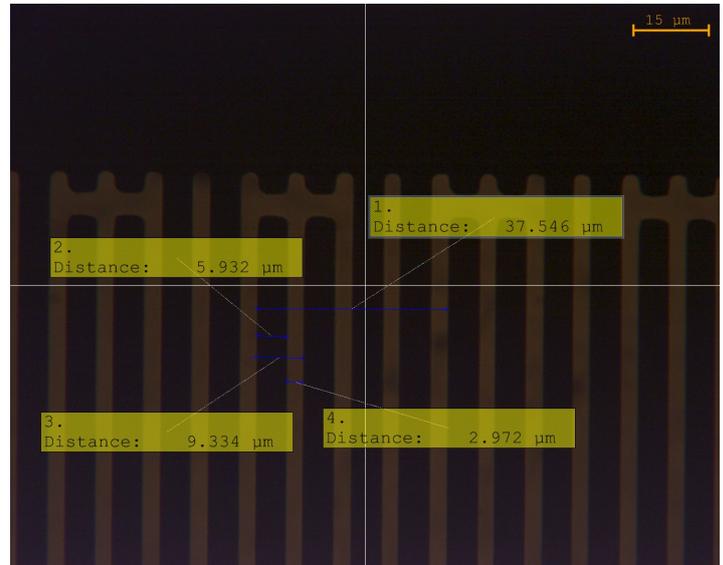
3.2 PROFILOMETER

Da Aluminium für sichtbares Licht undurchdringlich ist, kann die Aluminium-Schicht auf unserem Wafer nicht mittels Reflektometrie gemessen werden. Sie wird daher mit Hilfe eines Profilometers bestimmt. Ein Profilometer ist ein Instrument zur Messung des Oberflächenprofils, der Rauheit und der Dicke von dünnen Schichten und Strukturen auf einem Substrat. Dabei wird die Oberfläche mit einer an einem Arm befestigten Nadel berührt. Die Nadel bewegt sich in einer geraden Linie über die Oberfläche des Wafers. Trifft die Nadel Veränderungen in der Oberflächentopografie (z. B. an den Kanten und der Oberseite einer Struktur), bewegt sich der Arm mit der Nadel auf und ab (vgl. Abb. 9a). Die vertikale Bewegung wird aufgezeichnet, und aus den erfassten Daten ergibt sich ein Profil der Oberflächenmerkmale entlang der Messstrecke. Um die Dicke einer Struktur zu messen, kann das Profilometer den Abstand zwischen der Basisebene der Oberfläche

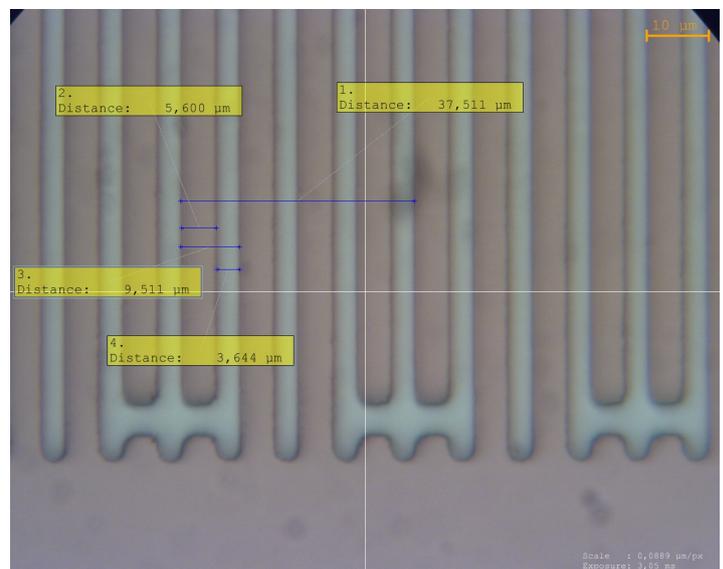
(Substrat) und der Oberseite der Struktur, die auf dem Substrat liegt, messen. Vermessen wird in unserem Fall ein willkürlicher IDT auf dem fertig prozessierten Wafer. Betrachtet man die aufgezeichnete Schichtdicke in Abb. 9b, kann man erkennen, dass die Zieldicke von 200nm sehr gut erreicht wurde. Der Messung zufolge beträgt die Höhe der Aluminiumschicht ca. 210nm. In den aufgezeichneten Daten ist außerdem zu erkennen, dass die erfasste Kante nicht vertikal ist. Wir können davon ausgehen, dass die Ausdehnung Nadel um ein vielfaches Größer ist als die vermessene Struktur, das ist daran zu erkennen, dass die Lücken zwischen den IDT-Fingern nicht genau erfasst wurden. An diesen Stellen, ist der Winkel der Nadelspitze zu groß um bis zur LiNbO₃-Substratoberfläche zu reichen. Wenn man die Abrundung der IDT-Kante durch den isotropen Ätzprozess in guter Näherung vernachlässigt, so stellt die aufgezeichnete Kante den Verlauf der Nadelspitze wieder. Mathematisch gesehen ist beschreibt die Aufzeichnung die Faltungsfunktion der beiden Geometrien. Prinzipiell könnte die Schichtdicke auch gleich nachdem Aufdampfprozess der Aluminiumschicht vorgenommen werden, wobei in diesem Fall die Stufe am Rand des Wafers, welche durch die Halterung in der Aufdampfkammer entsteht, zu messen ist. Man würde in diesem Fall annehmen, dass die Schichtdicke relativ wenig über der gesamten Oberfläche variiert. Ein Vorteil dieser Messmethode ist eine direkte Messung, denn es müssen grundsätzlich keine Informationen, über die anwesenden Materialien (z.B. Brechungsindex bei Reflektometrie) vorhanden sein. Ein Nachteil jedoch ist, dass durch diese Methode die Strukturen verkratzt werden, weshalb man für eine solche Messung oft Teststrukturen auf dem Wafer plaziert. Je nach Anwendung kann dieser (nicht verwendete) Platz auf dem Wafer einen Kostennachteil mit sich bringen.

3.3 MIKROSKOP

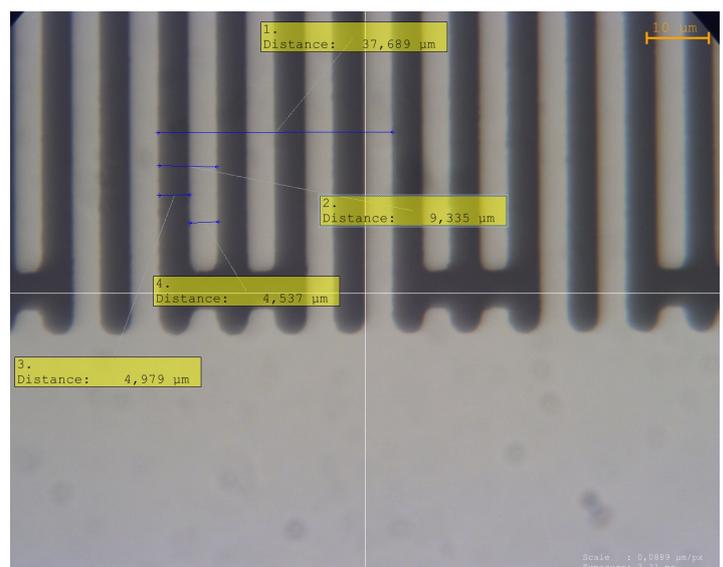
Messaufbau und Beobachtungen Mit einem Durchlichtmikroskop wird zunächst eine IDT-Struktur auf der für die Lithographie verwendeten Maske vermessen. In diesem Fall handelt es sich um einen IDT des Filters der Nummerierung "C31". Dieser wurde für eine Mittenfrequenz entsprechend einer Oberflächenwellenlänge von 37,6µm konstruiert. Die Messung erfolgt bei einer 100-fachen Vergrößerung, über eine Software auf einem PC, wobei das Bild live auf den Bildschirm übertragen wird. Das Messen einer Distanz erfolgt durch eine geeignete Platzierung einer Linie mit der Maus. Die Software rechnet dann die Strecke der Linie auf dem Bildschirm in die tatsächliche Distanz auf der Probe um. Die Messung ist in Abb. 10a dargestellt. Hier bei sind transparente Bereiche auf der Maske hell dargestellt, während die Chromstrukturen dunkel dargestellt werden. Es ist zunächst erkennbar, dass die Chromstrukturen deutlich breiter sind als die Abstände zwischen ihnen. Vermutlich wurden die Chromstrukturen absichtlich breiter gewählt um den beim Nassätzen entstehenden Unterschnitt zu kompensieren. Es ist außerdem erkennbar, dass rechten Winkel der Strukturen aus dem ursprünglichen Design hier abgerundet sind. Diese sind vermutlich durch den Elektronenstrahl des Maskenschreibgeräts entstanden, dessen Profil ein radialsymmetrisches Gaussprofil entspricht. Wenn der Elektronenstrahl auf eine Oberfläche (z.B. fotoempfindlicher Lack) trifft, hinterlässt er daher eine kreisförmige Struktur. Gerade Kanten können demnach durch eine geradlinige Bewegung bei konstanter Leistung genau nachgebildet werden, sobald der Strahl die Richtung wechselt oder abgeschaltet wird entsteht jedoch eine abgerundete Kante. Der Radius dieser Kante kann durch das Intensitätsprofil und der Fotolacksensitivi-



(a) Messbild der Maske.



(b) Messbild der Lackschicht.



(c) Messbild der Aluminiumstruktur.

Abb. 10 | Messbilder des Mikroskops

tät berechnet werden. Anschließend wird die gleiche Struktur auf

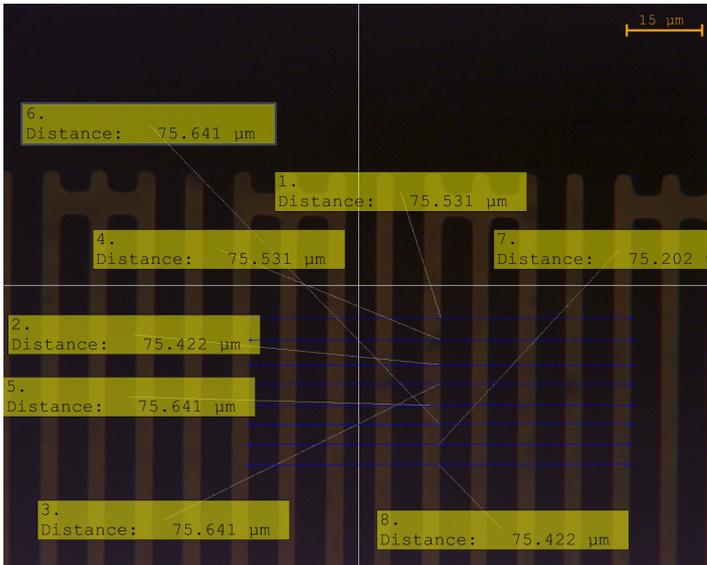


Abb. 11 | Referenzmessung zur Ermittlung der Genauigkeit des Messsystems.

einem Wafer mit einer entwickelten Fotolackstruktur sowie die auf dem fertigen Wafer vermessen. Dies geschieht mit Hilfe eines Auflichtmikroskops, wobei der Messvorgang wieder bei einer 100-fachen Vergrößerung mit der gleichen Software wie bei der Maske erfolgt. Die Messungen sind in Abb. 10b und Abb. 10c dargestellt. Anhand der Abbildung der Fotolackstruktur durch das Mikroskop ist zu erkennen, dass die Fingerstrukturen ähnlich wie bei der Maske erkennbar breiter sind als die Zwischenräume. Bei der fertigen Aluminiumstruktur hingegen fallen die Breiten beider Strukturen relativ ähnlich aus. Die Strukturen auf beiden Wafers zeigen wie auf der Maske abgerundete Ecken. Durch das Nassätzen werden in der Regel scharfe Ecken abgerundet, in diesem Fall jedoch befinden sich auf der Maske nur "weiche" Kanten, die sich genauso auf die Fotolackstruktur übertragen haben, sodass die Abmessungen auf der Aluminiumstruktur als Resultat des Nassätzens eher unwahrscheinlich ist.

Bewertung der Messgenauigkeit Um die Messwerte richtig beurteilen zu können wurde zunächst eine Referenzmessung zur Veranschaulichung der Genauigkeit des Messsystems gemacht. Diese Referenzmessung ist in Abb. 11 dargestellt. Dabei wurde die 8-fache Distanz der Länge einer Fingerbreite und einer Abstandsweite gemessen. Diese Messung wurde 8-mal durchgeführt. Der theoretisch erwartete Wert liegt bei $2 \times \lambda_0 = 75,2\mu\text{m}$. Bei den von der Software berechneten Werten fällt zunächst auf, dass sie von $75,202\mu\text{m}$ bis $75,641\mu\text{m}$ reichen. Andererseits ergeben 8 Messungen nur 4 unterschiedliche Werte. Man kann daher zunächst schlussfolgern, dass die zweite und dritte Stelle nach dem Komma nicht brauchbar sind. Wichtiger hingegen ist die Tatsache, dass der gemessene Wert in einem Intervall von ca. 400nm schwankt. Für jede Probe wurde in diesem Fall jedoch nur jeweils eine Messung der Fingerbreiten gemacht, weshalb die gemessenen Werte für unsere kleinen Strukturen nur schwer interpretierbar sind. Um bessere Aussagen über die gemessenen Werte treffen zu können müsste eine Messreihe gemacht werden oder am besten bei einer höheren Vergrößerung gemessen werden. Bei den vorliegenden Daten muss daher angenommen werden, dass die Werte im schlechtesten Fall um ca. 400nm vom echten Wert entfernt sein können. Diese Aussage kann aus der Tatsache bestätigt werden, dass die wiederholte Messungen der Fingerbreiten auf allen Proben immer um einige 100nm unterschiedliche Werte ergaben.

Interpretation der gemessenen Werte Als erstes werden die Messwerte auf der Maske und der Fotolackstruktur verglichen. Für die Fingerbreite wurde jeweils $5,932\mu\text{m}$ und $5,600\mu\text{m}$, für deren Abstand wurden jeweils $2,932\mu\text{m}$ und $3,644\mu\text{m}$ gemessen (vgl. Abb. 10a und 10b). Im Rahmen der Messgenauigkeit kann gesagt werden, dass die Dimensionen beider Strukturen annähernd übereinstimmen. Allerdings sieht man, dass der Wert für die Fingerbreite auf dem Fotolack geringer ist und daher der Abstand höher ist. Diese dennoch schwer zu quantifizierende Diskrepanz kann erwartet werden, wenn man berücksichtigt, dass für die Schichtdicke des Fotolacks ca. 1850nm gemessen wurden. Trotz der Tatsache, dass Maske und Fotolack während der Belichtung in Kontakt gebracht wurden (Kontakt-Lithographie), kann davon ausgegangen werden, dass das UV-Licht mit einer Wellenlänge im Bereich $300\text{--}500\text{nm}$ sehr kleine, jedoch möglicherweise nicht vernachlässigbare Beugungseffekte zeigt. Außerdem besteht die Möglichkeit, dass die Lichtstrahlen nicht exakt parallel auf die Lackoberfläche treffen, die vermessene Struktur befindet sich jedoch nahem dem Zentrum des Wafers, wodurch dieser Effekt geringer ausfallen sollte. Vergleicht man die gemessenen Werte auf dem fertigen Wafer mit der Fotolackstruktur, sind deutlich größere Unterschiede zu erkennen. Für die Fingerbreite und Abstand messen sich bei der Aluminiumstruktur jeweils $4,979\mu\text{m}$ und $4,537\mu\text{m}$ (vgl. Abb. 10c). Durch das Nassätzen des Aluminiums war zu erwarten, dass die Fingerbreite der Aluminiumstruktur gegenüber der Fotolackstruktur um mindestens 200nm auf allen Seiten schrumpft. Der gemessene Wert sollte daher um mindestens 400nm kleiner sein. Es wurde jedoch auf Sicht geätzt, weshalb der Wert größer als 400nm ausfallen sollte. Im Rahmen der Messgenauigkeit kann diese Erwartung bestätigt werden. Damit der OFW-Filter bei der erwarteten Mittenfrequenz funktioniert, spielt tatsächlich die Fingerbreite keine Rolle, denn solange ihre Kanten voneinander um $\lambda_0/4$ entfernt sind, wird der OFW-Filter wie geplant funktionieren. Dies wurde überprüft, indem diese Distanz auf allen Proben gemessen wurde. Um die Messgenauigkeit zu verbessern, wurde das 4-fache dieser Distanz (λ_0) gemessen und es ergeben sich die Werte $37,546\mu\text{m}$, $37,511\mu\text{m}$, $37,689\mu\text{m}$. Der erwartete Wert liegt bei $37,6\mu\text{m}$, weshalb man sagen kann, dass der Filter die zu erwartende Mittenfrequenz mit guter Genauigkeit treffen sollte. Es ist ersichtlich, dass nach allen Prozessschritten die Summe der gemessenen Distanzen (Fingerbreite und Fingerabstand) gleich bleiben sollte, denn wenn eine der beiden Größen um einen bestimmten Wert kleiner wird vergrößert sich die andere um den gleichen Wert.

3.4 ZUSAMMENFASSUNG DER MESSERGEBNISSE

Die Messergebnisse sind in Tab. 3 zusammengefasst.

LITERATUR

- [1] Y. Lian. *Semiconductor Microchips and Fabrication: A Practical Guide to Theory and Manufacturing*. Wiley, 2022. ISBN: 9781119867784.
- [2] K. Chow, H.G. McKnight und L.R. Rothrock. „The congruently melting composition of LiNbO_3 “. In: *Materials Research Bulletin* 9.8 (1974), S. 1067–1072. ISSN: 0025-5408. DOI: [https://doi.org/10.1016/0025-5408\(74\)90019-1](https://doi.org/10.1016/0025-5408(74)90019-1). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0025540874900191>.

Gemessene Größe	Wert mit Einheit
Schichtdicke Fotolack	ca. 1850nm
Schichtdicke Al-IDT-Struktur	zwischen 200nm und 220nm
Fingerbreite und Abstand ¹ auf Maske	5,9(4)µm und 3,0(4)µm
auf Fotolack	5,6(4)µm und 3,6(4)µm
der Al-Struktur	4,5(4)µm und 5,0(4)µm
λ_0 entsprechende Distanz ¹ auf Maske	37,5(4)µm
auf Fotolack	37,5(4)µm
der Al-Struktur	37,7(4)µm

¹Vermessene Struktur: "C31", $\lambda_0 = 37.6\mu\text{m}$

- S. 3–62. ISBN: 978-0-85709-697-5. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857097040.1.3>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857096975500013>.
- [15] „5 - Wet Cleaning for Removing Trace Metals after Etching Process“. In: *Developments in Surface Contamination and Cleaning*. Hrsg. von Rajiv Kohli und K.L. Mittal. Norwich, NY: William Andrew Publishing, 2015, S. 203–206. ISBN: 978-0-3232-9961-9.

Tab. 3 | Zusammenstellung der gemessenen Werte.

- [3] Shin-ji Kan u. a. „LiNbO₃ single crystal growth by the continuous charging Czochralski method with Li/Nb ratio control“. In: *Journal of Crystal Growth* 119.3 (1992), S. 215–220. ISSN: 0022-0248. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(92\)90673-7](https://doi.org/10.1016/0022-0248(92)90673-7). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022024892906737>.
- [4] Shuai Wang u. a. „The growth and characterization of six inch lithium niobate crystals with high homogeneity“. In: *CrystEngComm* 22 (4 2020), S. 794–801. DOI: 10.1039/C9CE01761E. URL: <http://dx.doi.org/10.1039/C9CE01761E>.
- [5] J. Koskinen. „4.02 - Cathodic-Arc and Thermal-Evaporation Deposition“. In: *Comprehensive Materials Processing*. Hrsg. von Saleem Hashmi u. a. Oxford: Elsevier, 2014. ISBN: 978-0-08-096533-8. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00409-X>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978008096532100409X>.
- [6] „CMOS Fabrication“. In: *CMOS: Circuit Design, Layout, and Simulation (IEEE Press Series on Microelectronic Systems, 22, Band 22)*. Wiley-IEEE Press, Juli 2019. Kap. 7, S. 161–212. ISBN: 978-1119481515.
- [7] Francis Lévy. „Film Growth and Epitaxy: Methods“. In: 2005. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:101423706>.
- [8] Holger Göbel. *Einführung in die Halbleiter-Schaltungstechnik*. Springer Vieweg Berlin, Heidelberg, Aug. 2014. ISBN: 978-3-642-53869-8. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-53869-8>.
- [9] RP Seisyan. „Nanolithography in microelectronics: A review“. In: *Technical Physics* 56 (2011), S. 1061–1073. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063784211080214>.
- [10] Mordechai Rothschild. „Projection optical lithography“. In: *Materials Today* 8.2 (2005), S. 18–24. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(05\)00698-X](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(05)00698-X). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136970210500698X>.
- [11] Aymen Ben Azouz, Mercedes Vazquez und Dermot Brabazon. „13.17 - Developments of Laser Fabrication Methods for Lab-on-a-Chip Microfluidic Multisensing Devices“. In: *Comprehensive Materials Processing*. Hrsg. von Saleem Hashmi u. a. Oxford: Elsevier, Mai 2014. ISBN: 978-0-08-096533-8. DOI: 10.1016/B978-0-08-096532-1.01317-0.
- [12] Mahmood Toofan und Jahansooz Toofan. „Chapter 5 - A Brief Review of the Cleaning Process for Electronic Device Fabrication“. In: *Developments in Surface Contamination and Cleaning*. Hrsg. von Rajiv Kohli und K.L. Mittal. Oxford: William Andrew Publishing, 2015, S. 185–212. ISBN: 978-0-323-29961-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-29961-9.00005-3>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323299619000053>.
- [13] Ciprian Iliescu u. a. „A practical guide for the fabrication of microfluidic devices using glass and silicon“. In: *Biomicrofluidics* 6 (März 2012), S. 16505–1650516. DOI: 10.1063/1.3689939.
- [14] W.I. Wu u. a. „1 - Materials and methods for the microfabrication of microfluidic biomedical devices“. In: *Microfluidic Devices for Biomedical Applications*. Hrsg. von Xiujun (James) Li und Yu Zhou. Woodhead Publishing Series in Biomaterials. Woodhead Publishing, 2013,