

Ultradünne Lithiumtantalat-Chips mit Absorptionsschicht für hochempfindliche pyroelektrische Infrarotsensoren

Agnes Eydam¹, Gerald Gerlach¹

¹Technische Universität Dresden, Institut für Festkörperelektronik, 01062 Dresden, Deutschland

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird die Herstellung ultradünner Lithiumtantalat-Chips mit einer Dicke von ca. 1 µm beschrieben. Die Abdünnung erfolgt in mehreren Schritten mittels Ionenstrahlätzen, wobei die Inhomogenität des Ausgangswafers als auch des Ätzprozesses berücksichtigt werden müssen. Dabei wird ein Kompromiss zwischen Ausbeute und Bearbeitungszeit gefunden. Neben der Dickentoleranz wird auch der dielektrische Verlustfaktor des Ausgangsmaterials bestimmt, der möglichst gering sein soll. Mittels Schrägwinkelbedampfung wird eine Absorptionsschicht aus Aluminium auf den Chips abgeschieden. Eine Gradientenschicht erreicht dabei Absorptionsgrade von (80 ... 90) % für Wellenlängen von (2 ... 14) µm.

Keywords: Infrarotsensoren, Lithiumtantalat, Ionenstrahlätzen, GLAD-Verfahren, Absorptionsschicht.

Einleitung

Pyroelektrische Infrarotsensoren aus Lithiumtantalat (LiTaO₃) sind weit verbreitete Strahlungssensoren, die in vielen Bereichen wie der Gasanalytik, der Spektroskopie und der Pyrometrie eingesetzt werden. Bestimmte Anwendungsgebiete, z.B. der Nachweis sehr geringer Gaskonzentrationen in der Umwelt- und Prozessmesstechnik, erfordern immer empfindlichere Detektoren. Ziel dieser Arbeit ist deshalb die Entwicklung von pyroelektrischen Sensoren mit einem extrem hohen Signal/Rausch-Verhältnis. In [1] war gezeigt worden, dass die spezifische Detektivität von pyroelektrischen LiTaO₃-Sensoren mit sinkender Elementdicke steigt. Deshalb ist der erste Lösungsansatz eine Technologie zur reproduzierbaren Fertigung von ultradünnen Sensorchips mit einer Dicke des empfindlichen Elements von etwa 1 µm. Der zweite Ansatz besteht in der Entwicklung einer an solche extrem dünnen Chips angepassten Absorptionsschicht aus Aluminium.

Stand der Technik

Da LiTaO₃ aufgrund seiner Zusammensetzung und seines Aufbaus chemisch nahezu inert ist, lassen sich entsprechende Wafer praktisch nicht sinnvoll durch chemische Ätzverfahren abdünnen. Deshalb liegt der Schwerpunkt der Arbeiten zur Schaffung von extrem dünnen Sensorelementen mit Dicken im Bereich einiger µm nicht auf solchen subtraktiven Verfahren, sondern auf additiven Abscheidungsverfahren von LiTaO₃-Dünnschichten auf Substraten wie z.B. das

Sol-Gel-Verfahren, Sputtern und epitaktisches Aufwachsen [2]. Diese Schichten weisen jedoch aufgrund ihrer polykristallinen Struktur einen höheren dielektrischen Verlustfaktor und einen geringeren pyroelektrischen Koeffizienten auf als einkristallines LiTaO₃. Ein weiteres Verfahren ist die Ion-Cut-Technologie, mit der eine Schichtdicke von 770 nm erreicht wurde [3]. Das Rauschen ist bei diesem Verfahren jedoch vergleichsweise hoch und die spezifische Detektivität entsprechend gering.

Der in dieser Arbeit verwendete Ansatz basiert hingegen auf der Abdünnung von einkristallinen LiTaO₃-Wafers durch Ionenstrahlätzen (Ion Beam Etching - IBE), wodurch sich dünne, freitragende Sensorelemente mit einer Dicke im Bereich bis zu 1 µm fertigen lassen [4]. Unser Schwerpunkt lag dabei neben der möglichst großen Detektivität auch auf einer hohen Ausbeute und Reproduzierbarkeit, die für eine industrielle Fertigung unabdingbar sind.

Damit die Infrarotstrahlung möglichst vollständig und wellenlängenunabhängig vom LiTaO₃-Chip absorbiert wird, muss zusätzlich eine geeignete Absorptionsschicht aufgebracht werden. In der Vergangenheit wurden durch Schrägwinkelbedampfung (Glancing Angle Deposition – GLAD) nanostrukturierte Nickel-Chrom (NiCr)-Schichten mit einem Absorptionsgrad von 90 % für den Wellenlängenbereich von (1 ... 15) µm entwickelt [5]. Neuere Entwicklungen nehmen carbonbasierte Absorptionsschichten in den

Fokus, die ähnliche Eigenschaften aufweisen [6].

In dieser Arbeit werden auf Basis des GLAD-Verfahrens dünne Absorptionsschichten aus Aluminium entwickelt, die im Vergleich zu den vorher genannten Lösungen eine deutlich reduzierte Wärmekapazität aufweisen, was deutliche Vorteile für ultradünne Chips und den nutzbaren Frequenzbereich bietet.

Charakterisierung des Ausgangsmaterials

Ausgangspunkt der technologischen Untersuchungen war die Charakterisierung des verwendeten Ausgangsmaterials. Ultradünne LiTaO₃-Wafer sind kommerziell mit Dicken von 20 µm oder 25 µm und Durchmessern von (2,5 ... 3) Zoll erhältlich. Für die Nutzung von Ätzverfahren zur Abdünnung der Sensorelemente ist die eingeschränkte Planparallelität der Ausgangswafer problematisch, da dies bei gleichmäßiger Ätzrate über dem Gesamtwufer zum Durchätzen von Chips führen kann. Deshalb wurde die Dickenverteilung der dünnen Wafer mit dem spektroskopischen Messgerät NanoCalc-2000-XR von Ocean Optics (im Folgenden NanoCalc genannt) bestimmt. Dazu wurden die Wafer in kleinere Teilwafer der Größe (22 x 22) mm² gesägt, aus denen sich 16 Chips der Größe (4 x 4) mm² ergeben. Tabelle 1 zeigt die mittlere Dicke und die Spannweite über die Teilwafer verschiedener Hersteller. Die Spannweite ist dabei als die Differenz zwischen maximaler und minimaler Dicke definiert.

Tab. 1: *Dickenverteilung über Teilwafer der Größe (22 x 22) mm² verschiedener Hersteller.*

Nr.	Mittelwert in µm	Spannweite in µm
1a	20,41	1,20
1b	20,06	2,30
1c	19,79	2,07
2	24,07	1,38
3	20,18	1,00
4	26,18	3,80

Wafer Nr. 3 hat mit 1 µm Spannweite die geringsten Dickenunterschiede, wohingegen Nr. 4 wesentlich inhomogener als die anderen Wafer ist. Nr. 1a bis 1c sind aus demselben Material, d.h. es kann Unterschiede bis zu 1 µm geben.

Neben der Dicke wurden wichtige Materialeigenschaften bestimmt. Der pyroelektrische Koeffizient p beschreibt die Änderung der spontanen Polarisation bei einer Temperaturänderung und bildet die Grundlage des pyroelektrischen Effekts. Er wird bestimmt, indem der Chip durch ein Peltier-Element harmonisch erwärmt und der Kurzschlussstrom gemessen wird. Die relative Permittivität bzw. Dielektrizitätszahl ϵ_r wird aus der Kapazität C des Chips berechnet. Die Messung erfolgte mit einem Impedanzanalysator Solartron SI1260 (Solartron Analytical) unter Anwendung des Vierleiterprinzips. Der dielektrische Verlustfaktor $\tan \delta$ wurde gemeinsam mit der Kapazität gemessen. Der pyroelektrische Chip stellt keine ideale Kapazität dar, sondern eine Parallelschaltung mit einem Wechselstromwiderstand. Dessen Größe wird durch $\tan \delta$ bestimmt und er ist eine wesentliche Rauschquelle in pyroelektrischen Sensoren. Die Messergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tab. 2: *Pyroelektrischer Koeffizient p (bei 20 °C), relative Permittivität ϵ_r und dielektrischer Verlustfaktor $\tan \delta$ (jeweils bei 1 kHz) der Teilwafer verschiedener Hersteller.*

Nr.	p in nC/(cm ² K)	ϵ_r	$\tan \delta$
1a	21,3	46	$1,47 \cdot 10^{-3}$
1b	21,3	47	$1,54 \cdot 10^{-3}$
1c	21,4	47	$1,45 \cdot 10^{-3}$
2	21,8	47	$1,90 \cdot 10^{-3}$
3	21,0	47	$2,04 \cdot 10^{-3}$
4	nicht bestimmbar	46	$1,76 \cdot 10^{-3}$

Der pyroelektrische Koeffizient beträgt für alle Wafer (21 ... 22) nC/(cm²K). Von Wafer 4 konnte er bisher nicht sicher bestimmt werden, weil aufgrund von Unebenheiten auf der Chipoberfläche der elektrische Kontakt während der Messung unzuverlässig war. Die relative Permittivität ist mit einem Wert von etwa 47 ebenfalls für alle Hersteller gleich. Unterschiede gibt es beim dielektrischen Verlustfaktor, wobei das Material von Hersteller 1 mit ca. 0,0015 gegenüber den anderen einen etwas geringeren Wert aufweist. Es wird deshalb bevorzugt verwendet.

Herstellungstechnologie für ultradünne Chips

Normalerweise bilden drei Teilwafer eine Chipserie, die gleichzeitig bearbeitet wird. Von jedem Wafer wird vor Bearbeitungsbeginn die Dickenverteilung gemessen. Der Wafer wird fotolithografisch strukturiert, um Schichten entweder durch thermische Bedampfung abzuscheiden oder durch Ionenstrahlätzen abzutragen. Jeder Chip benötigt eine Front- und Rückelektrode, jeweils mit einem verstärkten Bereich zur Kontaktierung des Chips. Der sich überlappende Bereich beider Elektroden bildet das empfindliche Element, das durch IBE abgedünnt wird. Dadurch entsteht eine freitragende Membran in Form einer Schüssel, die durch einen 20 µm dicken Trägerrahmen mechanisch stabilisiert wird. Ein solcher Chip ist in Abbildung 1 dargestellt.

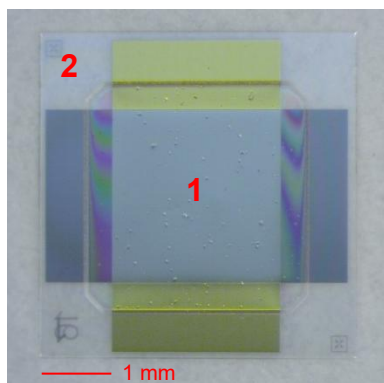


Abb. 1: Fotografie eines freitragenden LiTaO₃-Chips mit einer Dicke des empfindlichen Elements von 1,6 µm.

1 Schüssel, 2 Trägerrahmen.

Die Herausforderung besteht nun darin, bei Dickenunterschieden von 2 µm und mehr über einen Teilwafer und einer Zielenddicke von 1 µm eine relativ hohe Ausbeute zu erzielen. Zu der Inhomogenität des Wafers im Ausgangszustand kommt noch eine prozessbedingte Inhomogenität des IBE hinzu.

Die Wafer wurden in mehreren Teilschritten geätzt. Im ersten Schritt erfolgte immer eine Abdünnung auf (5 ± 1) µm, weil sich diese Dicke zuverlässig und reproduzierbar herstellen lässt. Anschließend wurden alle Chips wieder mit dem NanoCalc ausgemessen. Dann wurde in kleinen Schritten tiefer geätzt. Vor jedem Schritt wurden die Chips, die schon die gewünschte Enddicke erreicht hatten, manuell mit Fotoresist abgedeckt.

In der ersten Phase sollte zunächst eine Enddicke von 2 µm erreicht werden. Diese

wurde nach der Ätzung auf 5 µm in weiteren drei Schritten mit Ätztiefen von $(1 \dots 2)$ µm erzielt. Tabelle 3 zeigt beispielhaft die Dickenverteilung für einen Wafer, der einen sehr homogenen Ausgangszustand aufwies. Durch die Inhomogenität des Ätzprozesses vergrößerte sich die Spannweite jedoch wesentlich, d.h. die Ätzung hat einen großen Einfluss.

Tab. 3: Dickenverteilung von Wafer 1 der Chipserie I:

Ausg – Ausgangszustand,
1.Ätz – nach 1. Ätzung,
4.Ätz – nach 4. Ätzung.

Dicke in µm	Mittelwert	Max.	Min.	Spannweite
Ausg	18,7	19,2	18,3	0,8
1.Ätz	4,3	4,7	3,6	1,1
4.Ätz	2,0	2,6	0,9	1,7

In dieser Phase wurden keine Chips durchgeätzt, allerdings wurde dafür eine große Zahl von Ätzschritten gebraucht. Für eine industrielle Fertigung muss ein Kompromiss zwischen Ausbeute und Bearbeitungszeit gefunden werden.

In der zweiten Phase wurde deshalb die maximale Zahl der Ätzschritte auf vier begrenzt, um eine Zielenddicke von 1 µm zu erreichen. Die Ausbeute betrug mehr als 50 %. Tabelle 4 zeigt beispielhaft die Dickenverteilung einer Chipserie im Ausgangs- und Endzustand. Die im Ausgangszustand vorhandene Inhomogenität verringerte sich meistens nur wenig. In einigen Fällen vergrößerte sie sich sogar.

Tab. 4: Dickenverteilung der Chipserie II mit drei Wafern im Ausgangs- und Endzustand.

	Ausgangszustand		Endzustand	
Dicke in µm	Mittelwert	Spannweite	Mittelwert	Spannweite
W1	25,0	2,6	0,8	2,0
W2	26,2	1,6	1,1	1,9
W3	26,1	2,7	1,3	2,5

Die Dickenverteilung über die Wafer nach der ersten langen Ätzung verdeutlichte, dass die Ätzrate in der Mitte des Ionenstrahls höher ist

als am Rand. Die Bearbeitungsronen mit den Wafern wurden auf einen runden Träger geschraubt. Der Teil auf der Innenseite des Trägers war normalerweise tiefer geätzt. Für eine Sollätztiefe von ca. 15 µm lag die Spannweite der Ätztiefe dabei meistens bei (2 ... 3) µm. Die Inhomogenität der ersten Ätzung wurde in den folgenden Ätzschritten größtenteils beibehalten.

In der dritten Phase wurde der erste Ätzschritt deshalb in zwei Schritte geteilt, wobei der Wafer nach der halben Ätztiefe um 180° gedreht wurde, um die Inhomogenität auszugleichen. Ein späteres Drehen in den kurzen Ätzungen brachte aufgrund der geringen Ätzzeit keinen Ausgleich. Tabelle 5b zeigt, dass sich die Spannweite nach der zweiten Ätzung, d.h. nach der Drehung, verringert hat. Das ist hauptsächlich für Wafer 1 vorteilhaft, dessen Inhomogenität sich durch die erste Ätzung wesentlich verschlechtert hatte. Aufgrund der guten Homogenität genügte dann zwei weitere kurze Ätzschritte, um die Enddicke von 1 µm mit einer sehr guten Ausbeute zu erreichen. Für solch geringe Ätztiefen von (1 ... 2) µm ist die Spannweite der Ätzung meist kleiner als 0,5 µm. Generell verringert sich die Inhomogenität des IBE mit der Ätzdauer.

Tab. 5: *Dickenverteilung der Chipserie III mit drei Wafern: (a) Mittelwerte und (b) Spannweiten.*

*Ausg – Ausgangszustand,
1.Ätz – nach 1. Ätzung,
2.Ätz – nach 2. Ätzung,
End – Endzustand.*

(a)

Dicke in µm	Ausg	1.Ätz	2.Ätz	End
W1	19,1	11,4	4,8	1,2
W2	18,7	11,0	4,6	1,0
W3	20,0	12,0	5,5	1,1

(b)

Dicke in µm	Ausg	1.Ätz	2.Ätz	End
W1	1,0	1,7	1,1	0,9
W2	1,6	1,4	1,1	1,2
W3	2,2	2,1	1,9	0,7

Die Ätzrate lag dabei bei (27 ... 28) nm/min. Sie sollte möglichst stabil sein, da die Ätzdauer aus der gewünschten Ätztiefe und der Rate berechnet wird. Bevor die eigentliche Ätzung beginnt, läuft die Ionenstrahlquelle nach der Plasmazündung zunächst warm. Nach Einschalten der Strahl- und Beschleunigungsspannung wird der Shutter nicht sofort geöffnet, damit sich der Ionenstrahl zunächst stabilisieren kann und eventuelle Kontaminationen verschwinden. Die kurzen Ätzschritte führten zu reproduzierbareren Ätzraten, nachdem diese Zeiten verlängert wurden.

Als Ätzgas wurde Argon eingesetzt und der Einfallswinkel des Ionenstrahls betrug 5°.

Zu beachten ist die Schädigung der Kristalloberfläche durch das IBE. Ionen dringen in den Oberflächenbereich des verbleibenden einkristallinen Materials ein und schädigen diesen, was den dielektrischen Verlustfaktor und damit das Sensorrauschen erhöht. Durch einen zusätzlichen Nachätzprozess mit angepassten Ätzparametern wurde die Kristallstruktur geschont. Außerdem wurden entstandene Schäden durch Temperung der fertigen Sensorchips ausgeheilt. Messungen des dielektrischen Verlustfaktors an den fertigen Chips sind geplant.

Absorptionsschicht

Für eine hohe und spektral gleichmäßige Empfindlichkeit der Sensoren im Wellenlängenbereich von (2 ... 14) µm wird auf dem empfindlichen Element eine Absorptionsschicht aufgebracht. Es handelt sich um Aluminiumschichten, die unter Nutzung des GLAD-Verfahrens in einem thermischen Verdampfer unter Hochvakuum abgeschieden werden. Bei dem GLAD-Verfahren entsteht eine poröse Schicht mit einem kolumnaren Schichtaufbau, indem die Schicht unter sehr hohem Einfallswinkel bei gleichzeitiger Substratrotation abgeschieden wird [7]. Durch den sich ergebenden graduellen Übergang des Brechungsindex an der Grenzfläche zu Luft verringert sich die Reflexion und die Absorption erhöht sich.

Für besonders dünne Chips ist es wichtig, dass die Wärmekapazität der Absorptionsschicht wesentlich geringer ist als die der LiTaO₃-Schicht. Aluminium (Al) ist aufgrund seiner geringen volumenbezogenen spezifischen Wärmekapazität von 2,4 J/(cm³K) besser dafür geeignet als das bisher verwendete NiCr mit 3,8 J/(cm³K).

Zur Bestimmung der Absorption wurde das Aluminium auf ein Siliziumsubstrat mit einer Goldschicht aufgedampft, dessen diffuse Reflexion mit einem FTIR-Spektrometer Spectrum 2000 (Perkin Elmer) gemessen wurde. Gold ist im interessierenden Wellenlängenbereich von (2 ... 14) μm ein nahezu idealer Reflektor, weshalb der Absorptionsgrad direkt aus dem Reflexionsgrad ermittelt werden kann.

Zunächst wurden bei einem Abscheidewinkel von 83° Schichten mit verschiedenen Dicken hergestellt. Mit 83° wurden bisher bei NiCr gute Ergebnisse erzielt. Auf der einen Seite ist eine gewisse Schichtdicke notwendig, weil die Transmission aufgrund der Porosität der Schicht sonst zu groß ist. Andererseits steigt jedoch die Wärmekapazität mit zunehmender Schichtdicke. Deshalb wurden Dicken von (1 ... 2) μm gewählt. Die gemessene Absorption ist in Abb. 2 dargestellt. Wie zu erwarten war, erzielte die dickste Schicht mit einem Absorptionsgrad größer als 80 % bis zu einer Wellenlänge von ca. 14 μm den höchsten Wert. Außerdem wird die Kurve glatter, je dicker die Schicht ist.

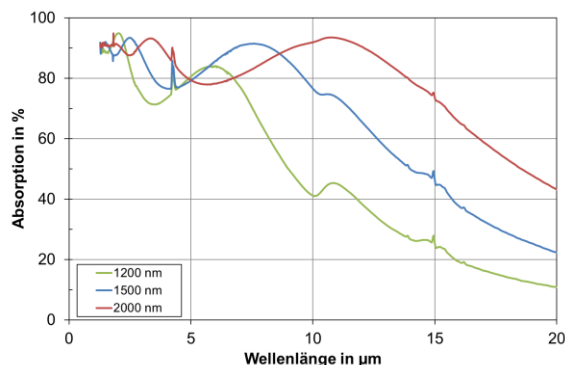


Abb. 2: Absorption von Al-Schichten mit einem Abscheidewinkel von 83° und verschiedenen Dicken.

Hier ist anzumerken, dass die angegebenen Dicken die angestrebten Sollwerte darstellen. Während der Schichtabscheidung wurde die Dicke mit einem Schwingquarz gemessen. Die Messung erfolgte jedoch bei einem Einfallswinkel von 0° , weil der Quarz nicht geneigt ist. Die Schichtdicke auf dem Substrat ist aber vom tatsächlichen Abscheidewinkel abhängig. Deshalb wurden die Dicken näherungsweise mit einem Profilometer Dektak 8000 (Veeco) gemessen. Diese Werte sind jedoch auch nur Schätzungen, weil die Messnadel die weiche Absorptionsschicht leicht eindrückt. Der sogenannte Toolingfaktor beschreibt das Verhältnis aus der

tatsächlichen Schichtdicke und der vom Quarz gemessenen.

Im nächsten Schritt wurden Schichten mit einer gleichen Dicke von 2 μm unter verschiedenen Winkeln abgeschieden. Wie in Abb. 3 zu erkennen ist, erhöht sich die Absorption bis zu einem Winkel von 83° zunächst, weil die Schicht poröser wird und dadurch die Reflexion an der Oberfläche abnimmt. Bei 85° sinkt die Absorption jedoch wieder ab, weil aufgrund steigender Transmission jetzt zu viel Strahlung hindurch gelassen wird.

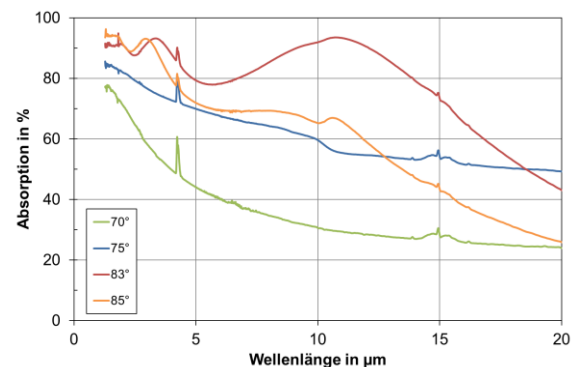


Abb. 3: Absorption von Al-Schichten mit einer Dicke von 2 μm und verschiedenen Abscheidewinkeln.

Um die Absorption weiter zu erhöhen und zu glätten, wurden im nächsten Schritt Gradientenschichten hergestellt, bei denen der Winkel während der Beschichtung variiert wird. Dadurch wird der graduelle Übergang des Brechungsindex an der Grenzfläche zu Luft noch verstärkt. Begonnen wird mit einer dünnen Schicht bei einem kleineren Winkel zwischen 60° und 70° . Darauf folgt dann die nächste dickere und porösere Schicht. In Abb. 4 ist der Absorptionsgrad von zwei Gradientenschichten dargestellt, die beide ähnliche Ergebnisse erzielen. Die erste Schicht besteht aus vier Lagen mit Winkeln von 60° bis 85° , die zweite aus nur 3 Lagen mit Winkeln zwischen 70° und 83° . Im Vergleich zu der bei 83° abgeschiedenen 2 μm dicken Monoschicht steigt die Absorption im Bereich von (5 ... 10) μm um ca. 5 % an.

Von den Gradientenschichten wurde zusätzlich die Transmission bestimmt, indem die Schicht auf ein lichtdurchlässiges Substrat aus Kaliumbromid (KBr) abgeschieden wurde. KBr hat einen Transmissionsgrad von ca. 90 % in einem großen Wellenlängenbereich von (2 ... > 20) μm . Die Messungen mit dem FTIR ergaben eine vernachlässigbare Transmission. Bei dünneren Schichten, die eine gewisse

Maß an Transmission aufweisen, muss das Gesamtsystem aus Absorber-Frontelektrode-LiTaO₃-Rückelektrode betrachtet werden. Mit Hilfe der Eigenabsorption des LiTaO₃-Chips kann die Schichtdicke dann verringert werden, ohne die Gesamtabsorption zu senken.

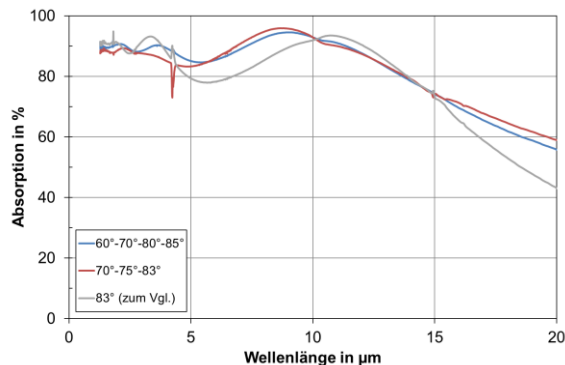


Abb. 4: Absorption von Al-Gradientenschichten mit einer Dicke von 2 µm. Die Monoschicht bei 83° mit derselben Dicke ist zum Vergleich dargestellt.

Schlussfolgerungen

Ultradünne LiTaO₃-Wafer mit Dicken von 20 µm oder 25 µm zeigen im Durchschnitt Dickenunterschiede von (1 ... 2) µm über eine Fläche von (22 x 22) mm². Durch Ionenstrahlätzen konnten 1 µm dünne Chips mit guter Ausbeute hergestellt werden, indem in mehreren Schritten geätzt wurde und Chips, die schon die gewünschte Enddicke erreicht hatten, manuell abgedeckt wurden. Die im Ausgangszustand vorhandene Inhomogenität verringerte sich dabei meistens nur wenig. Die zusätzliche Inhomogenität des Ätzprozesses konnte durch Drehen der Wafer nach halber Ätztiefe ausgeglichen werden.

Weiterhin wurden Materialeigenschaften der Ausgangswafer charakterisiert, wobei der dielektrische Verlustfaktor für das Sensorrauschen von großer Bedeutung ist. Der Einfluss des IBE auf den Verlustfaktor muss noch untersucht werden.

Die auf Basis des GLAD-Verfahrens entwickelte Absorptionsschicht aus Aluminium erreichte einen Absorptionsgrad von (80 ... 90) % für Wellenlängen von (2 ... 14) µm. Das beste Ergebnis erzielte eine 2 µm dicke Gradientenschicht. Im nächsten Schritt werden ultradünne Chips beschichtet, deren schwarze und spektrale Empfindlichkeit gemessen wird.

Danksagung

Die Forschungsarbeiten werden im Rahmen des SAB-Verbundprojekts „PyroGas“ (EFRE-Technologieförderung) mit Mitteln der Europäischen Union kofinanziert und durch Steuermittel auf Grundlage des vom Sächsischen Landtags beschlossenen Haushaltes mitfinanziert.

Literaturnachweis

- [1] M. Schossig, V. Norkus, G. Gerlach, Dielectric and pyroelectric properties of ultrathin, monocrystalline lithium tantalate, *Infrared Physics and Technology*, 63, 5-41 (2014); doi: 10.1016/j.infrared.2013.12.005
- [2] X. Xiao, S. Liang, J. Si, Q. Xu, H. Zhang, L. Ma, C. Yang, X. Zhang, Performance of LiTaO₃ crystals and thin Films and their application, *Crystals*, 13, 1233 (2023); doi: 10.3390/cryst13081233
- [3] J. Luo, W. Luo, K. Zhang, X. Sun, Y. Shuai, T. Wang, C. Wu, W. Zhang, High specific detectivity infrared detector using crystal ion slicing transferred LiTaO₃ single-crystal thin films, *Sensors and Actuators A: Physical*, 300, 111650 (2019); doi: 10.1016/j.sna.2019.111650
- [4] M. Schossig, Ultradünne, freitragende Lithiumtantalat-Elemente für hochdetektive Infrarotsensoren, *Dissertation, Technische Universität Dresden* (2012).
- [5] M. Schossig, V. Norkus und G. Gerlach, Infrared responsivity of pyroelectric detectors with nanostructured NiCr thin-film absorber, *IEEE Sensors Journal*, 10, 1564-1565 (2010); doi: 10.1109/JSEN.2010.2046162
- [6] L. Zhao, X. He, J. Li, X. Gao, J. Jia, Electrospayed carbon-based black coatings for pyroelectric detectors, *Sensors and Actuators A: Physical*, 196, 16-21 (2013); doi: 10.1016/j.sna.2013.03.030
- [7] M. Taschuk, M. Hawkeye und M. Brett, Glancing Angle Deposition. In: P. Martin (Hrsg.): *Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings*, 3. Aufl., Kapitel 13, William Andrew Publishing, S. 621-678 (2010).