

Optimierung dünner Quarzresonatoren zur Anwendung in thermischen Infrarotsensoren

Agnes Eydam¹, Volkmar Norkus¹, Gerald Gerlach¹

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

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird die Herstellung von ultradünnen Quarzresonatoren mit einer Dicke von 5 μm mit verschiedenen Sensorlayouts beschrieben. Die Temperaturabhängigkeit ihrer Resonanzfrequenz soll für thermische Infrarotsensoren genutzt werden. Das Schwingungsverhalten wird durch Impedanzmessungen untersucht und mittels FEM wird eine gekoppelte elektromechanische Simulation durchgeführt. Das Layout soll für eine Hauptresonanz mit hoher Schwingungsamplitude optimiert werden, wobei keine Nebenresonanzen auftreten sollen.

Keywords: Quarzresonator, Impedanzspektrum, gekoppelte harmonische Simulation.

Einleitung

Thermische Infrarotsensoren absorbieren Infrarotstrahlung, die zu einer Temperaturänderung im Sensorelement führt. Die daraus resultierende Änderung physikalischer Größen, wie z.B. Widerstand oder Polarisierung, wird in der Regel in eine Signalspannung umgewandelt. Demgegenüber nutzen Quarzresonatoren die Temperaturabhängigkeit ihrer Resonanzfrequenz. Schwingquarze im Y-Schnitt und mit einer Dicke von 7 μm erreichten eine spezifische Detektivität mit dem Wert $D^* = 9 \cdot 10^7 \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ [1].

Das Signal-Rausch-Verhältnis dieser Sensoren verbessert sich mit kleiner werdender Quarzdicke, durch eine gute thermische Isolation des Sensorelements gegenüber seiner Umgebung und einen hohen Absorptionskoeffizienten. Wir haben vor kurzem erfolgreich 5 μm dünne Quarzresonatoren hergestellt [2]. Das Schwingungsverhalten wurde mit Hilfe von Impedanzmessungen untersucht. Um eine Hauptresonanz mit hoher Schwingungsamplitude ohne Nebenresonanzen zu erreichen, muss das Sensorlayout optimiert werden. Im Folgenden werden die zunächst die grundlegenden Layouts und ihre Ergebnisse zusammengefasst. Anschließend werden Optimierungen und eine FEM-Analyse des Schwingungsverhaltens der Quarzchips vorgestellt.

Herstellungstechnologie

Quarzwafer im Y-Schnitt mit einer Größe von (20 x 20) mm^2 und einer Dicke von 500 μm (Quarztechnik Daun GmbH, Daun) werden durch Läppen und Polieren auf 20 μm abgedünnt. Das weitere Abdünnen auf 5 μm erfolgt

durch Ionenstrahlätzen (ISÄ). Der technologische Prozess ist in [2] detailliert beschrieben.

Abb. 1 zeigt die beiden grundlegenden Sensorlayouts. Der Bereich, in dem sich die Front- und Rückelektrode überlappen ist 5 μm dick und bildet das empfindliche Element. Es hat entweder die Form einer Schüssel oder einer Zunge. In beiden Fällen wird die dünne Quarzmembran durch einen 20 μm dicken Trägerrahmen stabilisiert. Der Graben um die Zunge erhöht die thermische Isolation.

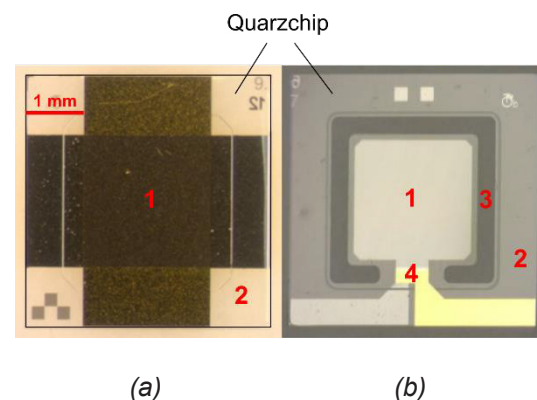


Abb. 1: Sensorlayouts mit empfindlichem Element als (a) Schüssel und (b) Zunge.

1 empfindliches Element, 2 Rahmen, 3 Graben, 4 Brücke.

Die Montage war an das Layout angepasst, um eine möglichst freie Schwingung der dünnen Quarzmembran zu ermöglichen.

Experimentelle Methoden

Die Grundfrequenz der Resonanz eines Quarzkristalls im Modus der Dickenschering beträgt

$$f_r = \frac{1}{2d} \sqrt{\frac{c}{\rho}}, \quad (1)$$

wobei d die Dicke der Quarzmembran, c die elastische Steifigkeit und ρ die Dichte sind [3]. Die Materialparameter von Quarz im Y-Schnitt sind $c = 40$ GPa und $\rho = 2.65$ g/cm³ [1].

Die Resonanzfrequenz des Quarzresonators kann bestimmt werden, indem seine komplexe Impedanz Z als Funktion der Frequenz gemessen wird. Im Fall der Serienresonanz ist der Betrag minimal und die Phase null, bei Parallelresonanz erreicht der Betrag ein Maximum und die Phase springt zwischen +90° und -90°.

Für eine 5 µm dünne Quarzmembran beträgt die Resonanzfrequenz nach Gl. (1) 388 MHz. In diesem Frequenzbereich werden die sogenannten Streuparameter (S-Parameter) des Quarzes mit einem Vektor-Netzwerkanalysator gemessen. Aus den S-Parametern wird die Impedanz berechnet. Die Messungen wurden mit einem R&S ZNB8 (Rohde & Schwarz, München) mit einem Frequenzbereich von 9 kHz bis 8,5 GHz durchgeführt.

In Tab. 1 sind die in dieser Arbeit untersuchten Quarzresonator-Sensoren und ihre Eigenschaften zusammengefasst. Die aufgeführten Änderungen am Layout werden im nächsten Abschnitt erläutert.

Tab. 1: Quarzresonatoren und ihre Eigenschaften (f_r berechnet mit Gl. (1)).

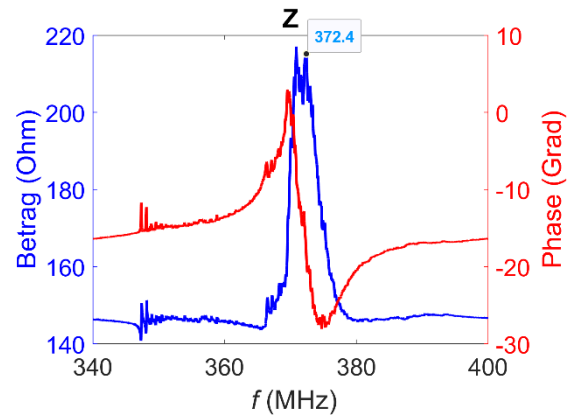
| Nr. | Layout | d (µm) | f_r (MHz) |
|-----------------|---------------------------|-------------|----------------|
| #1 (SQ80427) | Schüssel (quadratisch) | 5,1 | 380,9 |
| #2 (SQ28) | Zunge | 5,3 | 366,5 |
| #3 (SQ42) | Zunge, 1 Zusatzsteg | 4,5 | 431,8 |
| #4 (SQ43) | Zunge, 2 Zusatzstege | 5,7 | 340,9 |
| #5 (SQ65) | Schüssel (rund) | 5,2 | 373,7 |

Ergebnisse und Optimierung

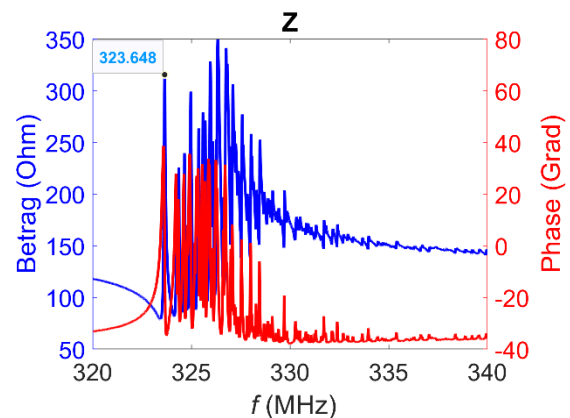
Die Schwingung der Quarzresonatoren konnte durch die im Impedanzspektrum sichtbaren Resonanzen für beide grundlegenden Sensorlayouts nachgewiesen werden. Die Sensoren mit der Schüsselform zeigen eine Hauptresonanz, jedoch mit einer vergleichsweise geringen Schwingungsamplitude (Abb. 2a). Die zungen-

förmige Quarzmembran schwingt mit einer größeren Amplitude, aber vielen Nebenresonanzen (Abb. 2b).

Die Sensormontage hat nachweislich keinen Einfluss auf die Nebenresonanzen [2]. Deshalb konzentriert sich diese Arbeit auf die Unterdrückung dieser Nebenresonanzen durch Modifikationen des Sensorlayouts.



(a)



(b)

Abb. 2: Betrag und Phase der komplexen Impedanz Z von (a) Sensor #1 und (b) Sensor #2 gemäß Tab. 1. Die Resonanzfrequenz ist markiert (bei Sensor #2 ist die Hauptresonanz nicht eindeutig).

Ein Ansatz besteht darin, die freitragende Quarzmembran der Zunge durch mehrere Stege mit dem Rahmen zu verbinden anstatt nur mit einem einzelnen. Die zusätzlichen Stege sollen die Zunge stabilisieren. Es wurden zunächst Zusatzstege provisorisch angebracht, indem der Fotolack manuell aufgetragen wurde, so dass diese Bereiche nicht geätzt wurden. Auf diese Weise wurden Quarzchips mit bis zu drei zusätzlichen Stegen hergestellt (Abb. 3).

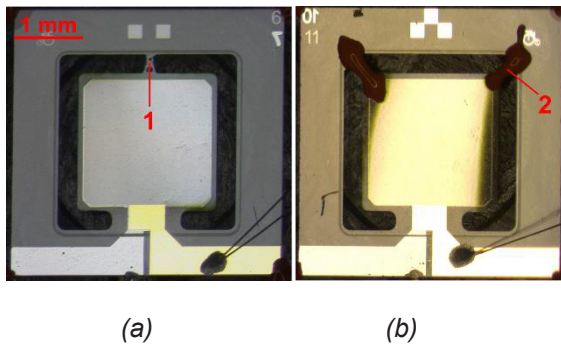
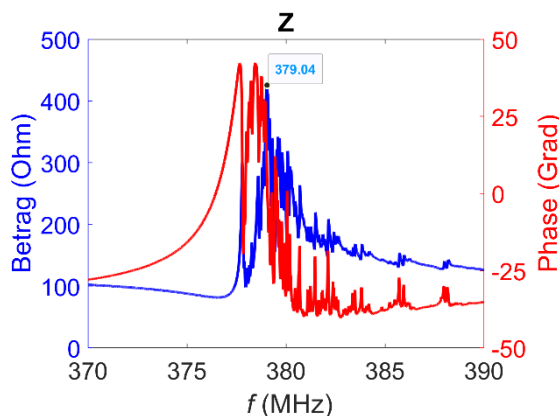
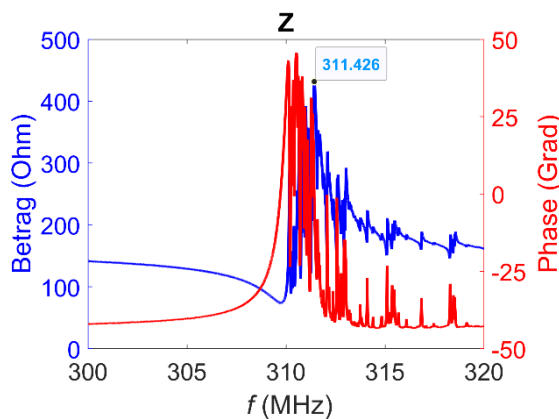


Abb. 3: Sensorlayouts mit empfindlichem Element als Zunge mit (a) einem und (b) zwei Zusatzstegen.

1 Steg aus LiTaO_3 , 2 Steg aus Silikon



(a)



(b)

Abb. 4: Betrag und Phase der komplexen Impedanz Z von (a) Sensor #3 mit einem Zusatzsteg und (b) Sensor #4 mit zwei Zusatzstegen (siehe Abb. 3). Die Resonanzfrequenz ist markiert.

Die S-Parameter der mit diesen Chips aufgebauten Sensoren wurden gemessen und ausgewertet. Die Sensoren mit nur einem Zusatzsteg zeigen teilweise Verbesserungen in ihrem Schwingungsverhalten. Im Vergleich zu den Sensoren ohne Zusatzsteg treten weniger Nebenresonanzen auf (Abb. 4a). Bei der Variante mit zwei zusätzlichen Stegen verringern sich die Sekundärresonanzen ebenfalls (Abb. 4b). Die Schwingungsamplitude der Hauptschwingung liegt in der gleichen Größenordnung wie bisher. Allerdings sind diese Ergebnisse nicht für alle vermessenen Sensoren reproduzierbar.

Weiterhin wurde untersucht, ob sich bei kreisförmigen Elementen in Schüsselform im Vergleich zu quadratischen Elementen Verbesserungen hinsichtlich der Schwingungsamplitude erreichen lassen. Kreisförmige Resonatoren wurden in [4] erfolgreich eingesetzt. Das entsprechende Sensorlayout ist in Abb. 5 dargestellt. Im Vergleich zu der quadratischen Schüssel wird jedoch keine Verbesserung erreicht. Einige dieser Sensoren erreichen eine ähnliche Schwingungsamplitude wie bisher (Abb. 6), die meisten jedoch schwingen schlechter.

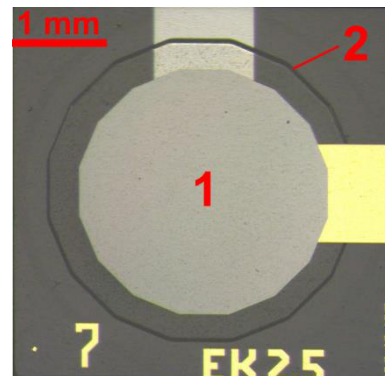


Abb. 5: Sensorlayout mit empfindlichem Element als Schüssel in Kreisform.

1 empfindliches Element, 2 Schüssel (schwarze Linie kennzeichnet ihren Rand)

Mit den bisherigen Änderungen des Sensorlayouts konnte das Schwingungsverhalten somit noch nicht entscheidend verbessert werden. In der Zukunft soll ein Zungenlayout mit einem runden empfindlichen Element und einem oder mehreren Zusatzstegen untersucht werden.

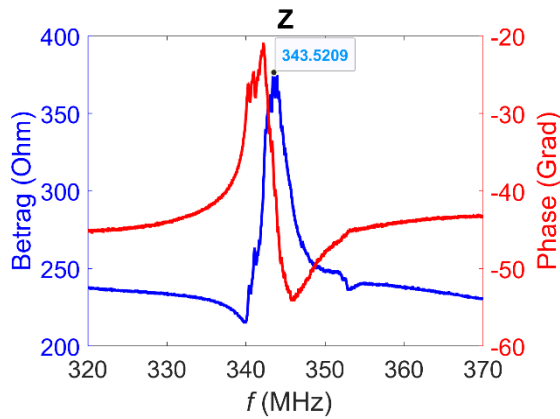


Abb. 6: Betrag und Phase der komplexen Impedanz Z von Sensor #5 mit kreisförmiger Schüssel. Die Resonanzfrequenz ist markiert.

Simulation

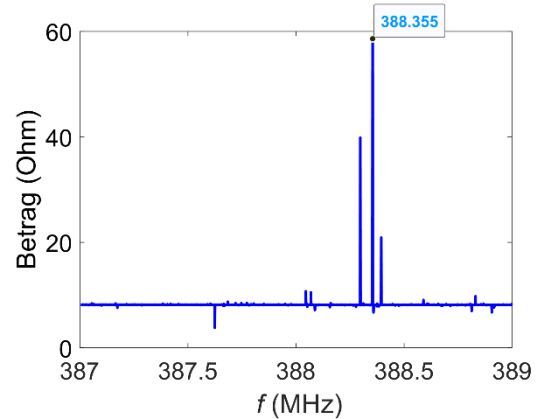
Um ein vorteilhaftes Sensorlayout zu finden, wurde eine gekoppelte elektromechanische Simulation mit der Finite-Elemente-Methode mittels Ansys Workbench 2023 durchgeführt. Mit einer Modalanalyse wurden die Eigenfrequenzen und Eigenschwingungen bestimmt. Um den Einfluss von Anregung und Dämpfung zu untersuchen, wurde eine harmonische Analyse durchgeführt. Als Materialeigenschaften müssen die Dichte und die Tensoren der elastischen Steifigkeit, der elektrischen Permittivität und der piezoelektrischen Ladungskonstante von Quarz angegeben werden. Für eine piezoelektrische Simulation werden als physikalische Domänen die Strukturmechanik und die elektrische Domäne ausgewählt. Wichtig ist die korrekte Definition der Polarisationsrichtung parallel zu den Elektrodenflächen für eine Dicken-scherung des Quarzes. In Ansys Workbench entspricht die z-Achse des Koordinatensystems der Elemente der Richtung der Polarisation. An die Elektroden wird eine Wechselspannung mit einer Amplitude von 1 V angelegt. Ergebnis der Simulation ist das Frequenzspektrum der Impedanz.

Es wurden die geometrischen Modelle eines Quarzchips mit der dünnen Membran als Schüssel und als Zunge erstellt. Dabei wurde nur der Chip modelliert, nicht der Sensoraufbau. Die Auflageflächen des Chips wurden durch entsprechende Randbedingungen fixiert. Die Elektrodenschichten wurden vernachlässigt, weil sie dünner als 100 nm sind. Die elektrische Spannung wurde im Modell direkt an den Quarz angelegt und zwar an den gesamten abgedünnten Bereich. In Wirklichkeit ist die Elektrode geringfügig kleiner. Das Netz der 5 μm dünnen

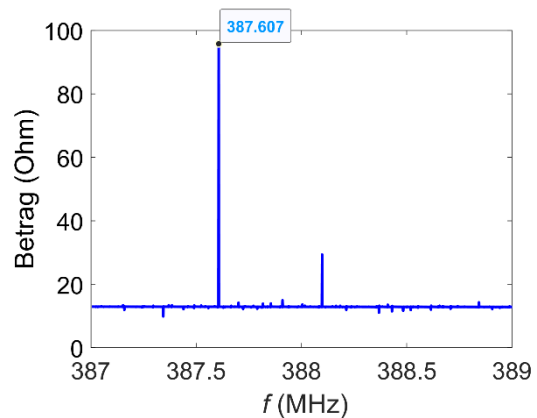
Membran wurde verfeinert, indem die Elementgröße verändert wurde. Für die hier gezeigten Ergebnisse betrug die Größe 40 μm .

In Abb. 7 ist der Betrag der simulierten Impedanz für einen Frequenzbereich von 387 bis 389 MHz dargestellt. Nach Gl. (1) beträgt die Grundresonanzfrequenz 388,078 MHz für $d = 5 \mu\text{m}$.

Die simulierte Grundimpedanz von etwa 10 Ohm entspricht der statischen Kapazität der dünnen Quarzmembran. Die gemessene Impedanz ist höher aufgrund in der Realität auftretender resistiver Anteile, z.B. in Form des Kontaktwiderstands. Im Resonanzfall ist die Impedanz wie erwartet für die zungenförmige Struktur größer als für die schüsselförmige, allerdings ist der Unterschied kleiner als bei der Messung.



(a)



(b)

Abb. 7: Simuliertes Impedanzspektrum (Betrag) für (a) schüsselförmiges und (b) zungenförmiges Sensorelement.

Der Resonanzverlauf (Breite und Anzahl der Peaks) wird stark von der Dämpfung beein-

flusst. Er lässt sich mit der Realität schwer vergleichen, da die Dämpfung in der Simulation nicht berücksichtigt wurde. Dadurch sind die Resonanzpeaks extrem schmal (einige 100 Hz). Die Auflösung des Frequenzspektrums beträgt jedoch nur 1 kHz. Eine höhere Auflösung ist aufgrund von Rechenzeit und Speicherbedarf nur für einen sehr schmalen Frequenzbereich umsetzbar. Als Folge ist aber anzunehmen, dass nicht alle Resonanzen im Spektrum sichtbar sind.

Die Berücksichtigung der Dämpfung durch einen konstanten Dämpfungsfaktor führt jedoch dazu, dass die Schwingung komplett gedämpft wird und keine Resonanzen mehr auftreten. Das ist auch bei sehr geringen Dämpfungsfaktoren wie 0,01 % der Fall.

Dadurch war eine Optimierung des Sensorlayouts mit Hilfe der FEM-Simulation bisher nicht möglich. Weitere Untersuchungen sind vorgesehen.

Schlussfolgerungen

Quarzresonatoren mit einer Dicke von 5 µm wurden erfolgreich hergestellt. Dabei wurden unterschiedliche Geometrien verwirklicht: das empfindliche Sensorelement hatte die Form quadratischer und runder Schüsseln sowie einer Zunge mit ein bis drei Zusatzstegen. Das Schwingungsverhalten wurde durch Impedanzmessungen charakterisiert. Durch die Zusatzstege konnte das Auftreten von Nebenresonanzen verringert werden. Der nächste Schritt ist eine zungenförmige Struktur mit runden Elementen.

Die Ergebnisse einer gekoppelten harmonischen FEM-Analyse bestätigten eine höhere Schwingungsamplitude für zungenförmige Strukturen. Der Einfluss der Dämpfung muss noch weiter untersucht werden.

Danksagung

Die Forschungsarbeiten werden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Projekts GE 779/44-1 "Schwingquarzsensoren zur hochauflösenden Detektion von infraroter Strahlung" unterstützt.

Literaturnachweis

- [1] K. Ren, M. B. Pisani, P. Kao und S. Tadiadapa, Micromachined quartz resonator-based high performance thermal sensors, *Sensors*, 2010 *IEEE*, 2197-2201 (2010); doi: 10.1109/ICSENS.2010.5690612
- [2] A. Eydam, C. Hoyer, V. Norkus, F. Ellinger und G. Gerlach, Thin quartz resonators as detector element for thermal infrared sensors, *JSSS* (zur Veröffentlichung eingereicht)

- [3] J. Vig, R. Filler und Y. Kim, Uncooled IR imaging array based on quartz microresonators, *J Microelectromech Syst* 5, 131-137 (1996); doi: 10.1109/84.506201
- [4] M. Pisani, K. Ren, P. Kao und S. Tadiadapa, Application of micromachined Y-cut-quartz bulk acoustic wave resonator for infrared sensing, *J Microelectromech Syst* 20, 288-296 (2011); doi: 10.1109/JMEMS.2010.2100030