

Untersuchungen zu Siliziumresonatoren für die Uhrentechnik

Von der Fakultät Konstruktion und Fertigung der Universität Stuttgart zur Erlangung
der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

Metin Giousouf

aus Komotini (Griechenland)

Hauptberichter:

Prof. Dr. rer. nat. H. Kück

Mitberichter:

Prof. Dr. rer. nat. W. Mokwa

Tag der mündlichen Prüfung:

20.11.2002

Institut für Zeitmeßtechnik, Fein- und Mikrotechnik
Universität Stuttgart

2003

Berichte aus der Mikromechanik

Metin Giousouf

**Untersuchungen zu Siliziumresonatoren
für die Uhrentechnik**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Aachen 2003

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Giousouf, Metin:

Untersuchungen zu Siliziumresonatoren für die Uhrentechnik/Metin Giousouf.

Aachen : Shaker, 2003

(Berichte aus der Mikromechanik)

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2002

ISBN 3-8322-1234-5

Copyright Shaker Verlag 2003

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-1234-5

ISSN 0947-2398

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Inhalt

Variablendefinitionen	5
Abstract	9
Zusammenfassung	11
1. Einführung	13
1.1 Motivation der Arbeit	13
1.2 Stand der Technik bei Quarzuhren	19
1.3 Integrierte mikromechanische Siliziumresonatoren	21
1.4 Anregung der Siliziumresonatoren	21
1.4.1 Elektrostatischer Antrieb	22
1.4.2 Piezoelektrische Antriebe	22
1.4.3 Thermische Anregung	23
1.4.4 Optische Anregung	23
1.4.5 Magnetische Anregung	23
1.5 Schwingungsdetektion	23
1.5.1 Piezoelektrische Detektion	24
1.5.2 Piezoresistive Detektion	24
1.5.3 Kapazitive Detektion	24
1.6 Güten von Siliziumresonatoren	25
1.7 Die Silizium-Stimmgabel	27
1.8 In dieser Arbeit untersuchte Resonatoren	28
2. Theoretische Beschreibung der Resonatoren	31
2.1 Einleitung	31
2.2 Frequenzgleichungen der Stimmgabeln	31
2.3 Temperaturabhängigkeit der Resonatorfrequenz	33
2.4 Schwingungsmoden der Stimmgabeln	36
2.5 Dämpfungsmechanismen	40
2.6 Elektromechanisches Verhalten einer Parallelplattenanordnung	42
2.7 Kapazitive Detektion	45
2.8 Das Kammelektroden-Design	46

2.9 Elektromechanische Modellierung	48
2.9.1 Ersatzparameter der Resonatoren	48
2.9.2 Einfluß von C_0 und R auf die Bestimmung der Güte und Phase	50
2.9.3 Ersatzschaltbild der Stimmgabel	55
2.10 Der Ringresonator	57
2.11 Leistungsaufnahme der Resonatoren	63
2.12 U_p -Abhängigkeit der Resonanzfrequenz	63
2.13 Der „Levitation“-Effekt	64
3. Herstellung und Auslegung der Resonatoren	67
3.1 Einleitung	67
3.2 Herstellungsverfahren mit Volumenmikromechanik für Z-Typen	67
3.2.1 Herstellung der Stimmgabelgrundstruktur	68
3.2.2 Herstellung der Elektroden	71
3.2.3 Gehäusung der Z-Typen	74
3.2.4 Trimmen der Z-Typ Stimmgabel	75
3.3 Oberflächenmikromechanik mit SIMOX-Wafern für die S-Typen	76
3.3.1 Die Elektrodenstruktur	78
3.3.2 Auslegung der Stimmgabelgeometrien	78
3.4 Polysilizium-Oberflächenmikromechanik für die B-/R-Typen	83
3.4.1 Die Elektrodenstruktur und Design-Auslegung	83
3.4.2 Das Ringresonator-Design	86
3.5 Aufbau- und Verbindungstechnik der Siliziumresonatoren	90
4. Meßapparatur und Meßschaltung	91
4.1 Anforderungen an die Meßapparatur	91
4.2 Der Meßaufbau	91
4.3 Die Temperiervorrichtung	93
4.4 Elektrische Meßschaltung	95
4.4.1 Impedanz-Messung	95
4.4.2 Verstärkerschaltung	97
4.5 Optische Messung mit Laservibrometer	100
5. Meßergebnisse und Diskussion	101
5.1 Z-Typ-Stimmgabeln	101
5.1.1. Symmetrieabhängigkeit der Z-Typen	101
5.1.2 Druckabhängigkeit der Parameter	101

5.1.3 Temperaturabhängigkeit der Frequenz und Güte	102
5.2 S-Typ-Stimmgabel-Varianten	103
5.2.1 Druckabhängigkeit der Frequenz und Güte der S-Typen	105
5.2.2 Temperaturabhängigkeit der Frequenz und Güte der S-Typen	107
5.2.3 S-Typ-Stimmgabelfrequenzen als Funktion der Spannungen	109
5.3 B-Typ-Stimmgabel-Varianten	112
5.3.1 Druckabhängigkeit der Frequenz und Güte der B-Typen	114
5.3.2 Temperaturabhängigkeit der Frequenz und Güte der B-Typen	114
5.3.3 B-Typ-Stimmgabelfrequenzen als Funktion der Spannungen	114
5.4 Ergebnisse beim Ringresonator	118
5.4.1 Schwingungsmoden des R-Typs	118
5.4.2 Druckabhängigkeit der Frequenz und Güte des R-Typs	120
5.4.3 Temperaturabhängigkeit der Frequenz und Güte des R-Typs	120
5.4.4 Frequenz als Funktion der Spannungen	123
5.5 Bewertung der Ergebnisse	124
6. Der Siliziumoszillator	125
6.1 Einleitung	125
6.2 Aufbau des Oszillators	125
6.3 Temperaturkompensation von Siliziumresonatoren	129
6.3.1 Einsatz eines Temperatursensors	129
6.3.2 Einsatz von zwei Resonatoren	130
7. Literatur	135
8. Anhang	143
8.1 Siliziumkristall und Materialparameter	143
8.2 Bestimmung des Temperaturkoeffizienten vom Elastizitätsmodul	146
8.3 Herleitung des Temperaturkoeffizienten der Frequenz	147
8.4 Berechnung von M_{eff} und K_{eff}	148
8.5 U_p -Abhängigkeit von R , L , C_1 und C_0	149
8.6 Analytisch berechnete Parameter der Stimmgabel-Resonatoren	150
Danksagung	153