

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

Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden Resonatoren aus Silizium für den Einsatz als Frequenznormale in der Uhrentechnik untersucht. Diese Resonatoren könnten anstelle des derzeit verwendeten Quarzbauelementes in der Zeitmeßtechnik eingesetzt werden. Die Siliziumresonatoren werden mit Hilfe von mikrotechnischen Prozessen, wie sie in der Siliziummikromechanik typisch sind, hergestellt. Dazu werden verschiedene Herstellungstechnologien angewandt, wobei sowohl die Volumenmikromechanik als auch die Oberflächenmikromechanik zum Einsatz kommen. Bei der Herstellungstechnologie der Volumenmikromechanik wird eine neuartige Prozeßführung zur naßchemischen Fertigung von Balkenstrukturen in (110)-Siliziumwafern ohne Unterätzung vorgestellt. Die Resonatoren mit Oberflächenmikromechanik können CMOS-kompatibel hergestellt werden, d.h. diese Resonatoren können monolithisch in Siliziumchips integriert werden. Das Silizium der verschiedenen Resonatorvarianten ist je nach Herstellungsverfahren mono- oder polykristallin.

Als Resonator designs werden bevorzugt Stimmgabeln verwendet. Da Silizium nicht wie Quarz piezoelektrische Eigenschaften aufweist, werden die hier untersuchten Resonatoren elektrostatisch zu Schwingungen angeregt. Die Auslese der Schwingung wird hierbei kapazitiv durchgeführt. Um eine hohe Schwingungsgüte zu erzielen, wird das Dämpfungsverhalten der Resonatoren genauer betrachtet. Dabei wird die Summe der periodischen Dehnungen von Volumeneinheiten im Resonator je Schwingungsperiode in Relation zur dissipativen Energie und somit der Güte des Resonators gesetzt. Damit lassen sich durch geeignete Wahl der Resonatorgeometrien hohe Güten erzielen. Aus diesen Erkenntnissen wird als Ergänzung zu den Stimmgabeln ein Ringresonator entwickelt, der als polykristalliner Schwinger die höchste Güte aufweist. Im Hochvakuum haben die Stimmgabelschwinger Güten im Bereich von 1.000 bis 100.000, wogegen der Ringresonator Güten bis zu 170.000 erzielt.

Bei der experimentellen Untersuchung der Resonatorvarianten werden Charakteristiken der jeweiligen Typen verglichen, die für die Anwendung in der Zeitmeßtechnik von Bedeutung sind. Dazu zählen die Güte, die Temperatur-, Druck- und Spannungsabhängigkeit der Frequenz, sowie die Leistungsaufnahme der Schwinger.

Bei der Temperaturabhängigkeit der Resonatoren, die im Temperaturbereich 10 .. 60 °C als linear betrachtet werden kann und hauptsächlich durch den Temperaturkoeffizienten des Elastizitätsmoduls gegeben ist, wird eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung dieser Koeffizienten gefunden.

Zur Temperaturkompensation von Siliziumschwingern in Uhrenoszillatoren werden verschiedene Lösungsansätze diskutiert. Hierbei werden neuartige Methoden zur Temperaturkompensation aufgezeigt, wobei in einem Fall zwei Siliziumresonatoren verwendet werden und im anderen Fall ein Siliziumschwinger eingesetzt wird, wobei zwei Moden verwendet werden. Die dabei berechneten Ganggenauigkeiten entsprechen denen von gewöhnlichen Quarzuhren.

Schließlich wird demonstriert, dass mit einem Siliziumresonator und einen Quarz-Uherschaltkreis ein stabiler Oszillator als Frequenznormal für Uhrenanwendungen realisiert werden kann.

Abstract

In this work resonators made of silicon for the application as frequency control devices in the horology are examined. These resonators could be used in place of the quartz element used in the horology at present. The silicon resonators are manufactured by micro-technological processes, how they are typically used in silicon micro mechanics. In addition different production technologies are applied, whereby the bulk-micromachining, and the surface-micromachining are used. With the production technology of bulk-micromachining a new processing technology is presented, in which the wet chemical manufacturing of straight bar patterns in (110)-silicon wafers without underetching is possible. The resonators with surface-micromachining can be manufactured CMOS-compatible, i.e. these resonators can be integrated monolithically onto silicon chips, which contain the electronic circuit, i.e. the signal processing. For the different resonators mono- or polycrystalline silicon has been investigated. As resonator designs tuning forks are predominantly used.

Since silicon does not indicate piezoelectrical characteristics like quartz, the resonators discussed here are driven electrostatically. Their oscillation is measured capacitively. High quality factors can be obtained by suitable selection of the resonator geometry. From these results as supplement of the tuning forks a ring resonator is developed, which indicates the highest quality factor. In high vacuum the tuning fork oscillators have Q-factors up to 100,000, whereas the ring resonator obtains Q-factors up to 170,000.

The quality factor, the temperature-, pressure- and voltage-dependence of the frequency, as well as the power consumption of the oscillators have been investigated. With the temperature dependence of the resonator frequency, that can be regarded as linear in the temperature range 10 .. 60 °C and mainly is given by the temperature coefficients of the elastic modulus, a good agreement between measurement and theoretical calculation of the coefficients has been found.

For the temperature compensation of silicon oscillators in clock systems different solutions are discussed. Here two silicon resonators can be used or a single silicon oscillator is used, where two different modes are read out. Thereby, the estimated time measurement accuracies corresponds to those of commercial quartz clocks. Finally, it is demonstrated that with a silicon resonator and a quartz clock circuit an oscillator can be implemented for frequency control applications.