

Entwicklung piezoresistiver taktiler Sensoren für die Charakterisierung von Mikrokomponenten

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte

Dissertation

von
Dipl.-Ing. Anurak Phataralaocha
aus Bangkok

eingereicht am: 30. 03. 2009

mündliche Prüfung am: 16. 07. 2009

Referenten: Prof. Dr. rer. nat. S. Büttgenbach

Prof. Dr.-Ing. R. Tutsch

2009

Berichte aus der Mikro- und Feinwerktechnik

herausgegeben von Prof. Dr. rer. nat. S. Büttgenbach

Band 25

Anurak Phataralaoha

**Entwicklung piezoresistiver taktiler Sensoren für
die Charakterisierung von Mikrokomponenten**

Shaker Verlag
Aachen 2009

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2009

Copyright Shaker Verlag 2009

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-8444-2

ISSN 1433-1438

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mikrotechnik der Technischen Universität Braunschweig. Sie wurde im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 516 „Konstruktion und Fertigung aktiver Mikrosysteme“ von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert.

Mein besonderer Dank gilt vor allem meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. rer. nat. S. Büttgenbach. Er ermöglichte mir ein selbständiges und eigenverantwortliches Arbeiten unter hervorragenden technischen Bedingungen. Seine vertrauensvolle Betreuung und kontinuierliche Unterstützung trug wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit bei. Ferner danke ich dem Vorsitzenden der Prüfungskommission, Herrn Prof. Dr. rer. nat. G. Bräuer, und dem Koreferenten, Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Tutsch, für das entgegengebrachte Interesse an meiner Arbeit.

Weiterhin danke ich auch allen Mitarbeitern am Institut für Mikrotechnik für die fachliche Unterstützung und das angenehme Arbeitsklima. Insbesondere möchte ich Frau Dr.-Ing. A. Tibrewala und Herrn Dipl.-Ing. T. Krah für viele Diskussionen und die Zusammenarbeit bei der Entwicklung des Tasters, Herrn Dr.-Ing. U. Triltsch für die Erarbeitung der Maskengenerierung der Tasterkonstruktion und Frau Dr.-Ing. M. Leester-Schädel für das Korrekturlesen meiner Arbeit meinen Dank aussprechen.

Des Weiteren danke ich Herrn Dr.-Ing. R. Bandorf und Herrn Dipl.-Phys. D. Paulkowski vom Fraunhofer Institut für Schicht- und Oberflächentechnik für die Zusammenarbeit im Teilprojekt C2 des Sonderforschungsbereichs 516 und für die Präparation der reibarmen Schichten, Herrn Dipl.-Ing. N. Hoffmann vom Institut für Prozessmess- und Sensortechnik, TU Ilmenau, für die Charakterisierung des Tasters an der Nanokoordinatenmessmaschine.

Außerdem möchte ich Herrn S. Shahzad Anwer für die Durchführung unzähliger Versuche am Kraftmessaufbau danken, welche wichtige Beiträge zu dieser Arbeit geleistet haben.

Abschließend danke ich meiner Familie, die durch ihre liebevolle und unermüdliche Unterstützung zum Abschluss dieser Arbeit beigetragen hat.

Kurzfassung

Kernpunkte dieser Arbeit sind die Entwicklung, Herstellung und Charakterisierung dreidimensionaler taktiler Sensoren, welche auf Siliziumbossmembranen und piezoresistiven Signalwandlern basieren. Unterschiedliche Membrankonstruktionen, wie Voll- und Kreuzmembran mit verschiedenen Balkenbreiten und die Fünf-Boss-Struktur, wurden als Federkörper der Tasterprototypen verwendet. Als Grundlagen für Konstruktionsanalysen der Bossmembran wurden mathematische Modelle sowohl mittels analytischer als auch numerischer Verfahren eingesetzt. Die Modelle dienen zum einen für die Betrachtung der Einflüsse der geometrischen Kenngrößen auf die mechanischen Eigenschaften und zum anderen für Berechnungen von mechanischen Spannungen und Membranauslenkungen und den daraus resultierenden Sensorempfindlichkeiten.

Optimierungen der Herstellungsprozesse wie Diffusion und Kontaktierung, sowie der Anordnung der Piezowiderstände wurden durchgeführt. Die optimierten Technologien ermöglichen die Herstellung verschiedener Membrankonstruktionen mit hohen Empfindlichkeiten. Hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften des Tastsensors, wie Biegesteifigkeiten, Antastkräfte und dynamisches Verhalten, wurden unterschiedliche Membrankonstruktionen realisiert. Ferner wurden verschiedene Brückenlayouts bezüglich der transversalen und longitudinalen Piezokoeffizienten entworfen. Anschließend wurden die Sensoren bezüglich ihrer Eigenschaften wie die Bruchfestigkeit, Biegesteifigkeiten, Empfindlichkeiten und dynamisches Verhalten charakterisiert.

Einige mögliche Einsätze der Taster in unterschiedlichen Bereichen werden in dieser Arbeit vorgestellt. Für Anwendungen als taktiler 3D-Kraftsensor wurde der Taster an einem Prüfstand für Untersuchungen tribologischer Eigenschaften von Mikrobauteilen eingesetzt. Außerdem bietet der Taster in diesem Prüfstand die Möglichkeit, die von Mikroaktoren erzeugten Kräfte direkt zu vermessen. Für geometrische Messungen

Kurzfassung

wurde der Taster an einer Nanomessmaschine erprobt. Es wurden sowohl statische als auch dynamische Antastversuche durchgeführt, wobei eine Antastpunktgenauigkeit von 1,7 nm ermittelt wurde. Ein weiteres Einsatzgebiet des Sensorchips mit einer vollflächigen Bossmembran liegt im Bereich der Differenzdruckmessung. Dazu wurde der Sensor auf einer Trägerplatine befestigt, auf deren Rückseite eine Einlassdüse montiert ist. Die Druckdifferenz zwischen dem Druck an der Einlassdüse und dem Umgebungsdruck kann somit erfasst werden.

Abstract

This work presents the development, fabrication and characterization of three dimensional tactile sensors based on silicon boss membranes and piezoresistive elements. Various membrane structures were implemented as a deflection plate, specifically full and cross membranes as well as five-boss-structures with different widths. Initially, analytical and numerical models were applied in order to analyze the membrane structure. These mathematical models were used primarily to analyze the influence of the membrane geometry on the mechanical properties and secondly to calculate mechanical stress, membrane structure deflection and to estimate sensitivities related to applied piezoresistors.

For the fabrication processes the diffusion and the semiconductor-metal-interface were investigated and optimized. The optimized technologies allow the fabrication of diverse sensor prototypes with high sensitivities. The various membrane constructions were used to investigate the effect of mechanical properties of the probe, e.g. stiffness, contact force and dynamic properties on the sensor characteristics. Furthermore, different layouts of bridge resistors, according to transversal and longitudinal piezo-coeffizients, were developed. Next, the different sensor designs properties were tested, such as the breaking strength, spring constant, sensitivity and resonance frequency.

Furthermore, this work shows various applications of the sensor prototypes in various fields of metrology. For force detection the sensor probe was used in an oscillating tribometer to measure applied normal force and resulting frictional force of micro guides. Additionally, the tactile probe can be used to measure force induced by micro actuators. For geometrical metrology the sensor probe was used on a nano coordinate measuring machine, in which a static and dynamic measuring mode was performed. The variation of contact point of 1.7 nm could be reached by the machine. A further application of the probe with a full membrane structure is measurement of pressure.

Abstract

For this purpose, the probe is glued to a base plate. An inlet is placed on its backside, so that a difference between the pressure at the inlet and the atmospheric pressure can be detected.

Inhaltverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Dreidimensionaler taktiler Sensor	5
2.1	Taktiler Messkopf	6
2.1.1	Antastelement	6
2.1.2	Federkörper	7
2.1.3	Wandlerelemente	9
2.2	Piezoresistiver dreidimensionaler taktiler Siliziumsensor	14
2.2.1	Aufbau und Funktionsprinzip des taktilen Sensors	14
2.2.2	Piezoresistiver Effekt von Siliziumwiderständen	18
2.3	Mechanische Eigenschaften des Mikrotasters	23
2.3.1	Biegesteifigkeit bei vertikaler Antastung	24
2.3.2	Biegesteifigkeit bei horizontaler Antastung	25
2.3.3	Biegesteifigkeit des Taststifts	26
2.3.4	Verformung der Antastkugel und des Messobjekts	29
2.4	FEM zur Berechnung von Membraneigenschaften	31
2.5	Ergebnisse der analytischen und FEM- Berechnungen	36

3	Schaltungsentwurf für den Mikrotaster.....	39
3.1	Dreibrückenschaltung	39
3.1.1	Schaltungen mit 24 Piezowiderständen	39
3.1.2	Schaltungen mit 12 Piezowiderständen	42
3.2	Vierbrückenschaltung	44
3.2.1	Longitudinale Anordnung	46
3.2.2	Transversale Anordnung	47
3.2.3	T-förmige Anordnung	48
3.2.4	Quadratische Anordnung	49
3.3	Theoretische Empfindlichkeiten des Tasters	50
3.4	Angleichung der Steifigkeiten des Mikrotasters.....	52
4	Technologien zur Herstellung des Mikrotasters.....	57
4.1	Diffusionsprozess	57
4.2	Eigenschaften diffundierter Widerstände.....	61
4.2.1	Oberflächenkonzentrationen	62
4.2.2	Dotierprofile.....	63
4.2.3	Die laterale Diffusion.....	65
4.2.4	Schichtwiderstand	66
4.2.5	Einfluss der Öffnungsform des Kontaktübergangs zwischen Piezowiderstand und Metallzuleitung.....	72
4.3	Prozessfolgen zur Herstellung des Tasters	73

5	Charakterisierungen der Mikrotasterprototypen.....	79
5.1	Kraftmesseinrichtung	79
5.2	Biegesteifigkeiten der Membranstrukturen.....	81
5.3	Bruchgrenze der Membranstrukturen.....	83
5.4	Eigenfrequenzen	85
5.5	Empfindlichkeiten	87
5.5.1	Empfindlichkeiten der Dreibrückendesigntaster.....	88
5.5.2	Empfindlichkeiten der Vierbrückendesigntaster.....	91
5.5.3	Empfindlichkeiten der Kreuzmembrantaster mit Fünf-Boss-Struktur....	95
5.6	Auflösungsgrenze des Tasters.....	96
5.7	Temperaturabhängigkeit der Brückenspannungen.....	99
5.8	Zusammenfassung.....	100
6	Anwendungen der Kraftsensoren	103
6.1	Reibkraftsensor.....	103
6.1.1	Konzeption	103
6.1.2	Reibuntersuchungen	105
6.2	Taktiler Sensor für geometrische Messungen.....	108
6.2.1	Tastkopf.....	108
6.2.2	Einsatz in der Nanomessmaschine	109
6.3	Drucksensor.....	111
7	Zusammenfassung und Ausblick	113

8	Literaturverzeichnis	119
Anhang		
A	Fertigungsabläufe	125