Entwicklung von dreidimensionalen taktilen Sensoren aus SU-8-Fotoresist

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

zur Erlangung der Würde
einer Doktor-Ingenieurin (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von
Dipl.-Ing. Alexa Oerke, geb. Jordan
aus Hamm

eingereicht am: 31.07.2014

mündliche Prüfung am: 09.12.2014

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

Prof. Dr.-Ing. R. Tutsch

2014

Berichte aus der Mikro- und Feinwerktechnik

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

Band 36

Alexa Oerke

Entwicklung von dreidimensionalen taktilen Sensoren aus SU-8-Fotoresist

Shaker Verlag
Aachen 2015

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., 2014

Copyright Shaker Verlag 2015
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3331-1
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

„*Das Können, nicht das Wissen, durch die Wissenschaft geübt.* -
Der Wert davon, daß man zeitweilig eine strenge Wissenschaft
streng betrieben hat, beruht nicht gerade auf deren Ergebnissen:
denn diese werden, im Verhältnis zum Meere des Wissenswerten,
ein verschwindend kleiner Tropfen sein.
Aber es ergibt einen Zuwachs an Energie, an Schlußvermögen,
an Zähigkeit der Ausdauer; man hat gelernt, einen Zweck
zweckmäßig zu erreichen. Insofern ist es sehr schätzbar,
in Hinsicht auf alles, was man später treibt, einmal ein
wissenschaftlicher Mensch gewesen zu sein."

Friedrich Nietzsche, 1878-1880
(Menschliches, Allzumenschliches - Kapitel 7. 256.)

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2010 bis 2014 im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Mikrotechnik (IMT) der Technischen Universität Braunschweig.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. rer. nat. Stephanus Büttgenbach für die vertrauensvolle Betreuung und wohlwollende Unterstützung in dieser Zeit. Von Beginn an ermöglichte er mir unter hervorragenden Arbeitsbedingungen die nötigen Freiräume für ein eigenverantwortliches Arbeiten, um das dieser Arbeit zu Grunde liegende Forschungsprojekt zu verwirklichen.

Mein herzlicher Dank gilt ebenso Herrn Prof. Dr.-Ing. Rainer Tutsch für das Interesse an dieser Arbeit und für die Übernahme des Koreferats und Herrn Prof. Dr. rer. nat. Andreas Dietzel für die freundliche Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission.

Das realisierte Projekt „*Kombination von SU-8 und diamantähnlichen Kohlenstoffschichten (DLC) für neuartige hochempfindliche piezoresistive Sensoren*“, gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), wurde zusammen mit dem Institut für Oberflächentechnik (IOT) der Technischen Universität Braunschweig und in Kooperation mit dem Fraunhofer Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST durchgeführt. Hier bedanke ich mich im Besonderen bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. Claus-Peter Klages, Herrn Dr.-Ing. Ralf Bandorf sowie Frau Dipl.-Ing. Mirjana Petersen für die hervorragende Zusammenarbeit im Projekt, sowie für die Herstellung zahlreicher DLC-Schichten und Messungen von k-Faktoren und TCR.

Ferner möchte ich allen Mitarbeitern des IMT, die zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen haben, meinen Dank aussprechen für das angenehme Arbeitsklima sowie die kollegiale Zusammenarbeit in Forschung und Lehre. Allen technischen Mitarbeitern und den Azubis gilt mein Dank für Ihren steten Einsatz und die kontinuierliche Wartung der Reinraumtechnik und Anlagen. Den von mir betreuten Studenten und

HiWis gilt mein Dank für die Unterstützung meiner Forschungsarbeit in Form von studentischen Arbeiten und HiWi-Tätigkeiten.

Ein besonderes Wort des Dankes möchte ich an Frau Dipl.-Ing. Claudia Richter und Frau Dr.-Ing. Anne Balck für die vielen konstruktiven und hilfsbereiten Gespräche und wertvollen Ratschläge sowie für die gute Zeit am Institut und darüber hinaus richten.

Mein herzlicher Dank gilt Frau Dr.-Ing. Monika Nicolaus für die viele schöne Zeit, die in Gespräche und Mentoring-Treffen geflossen ist, und für den daraus entstandenen anregenden Austausch.

Auf privater Seite bedanke ich mich bei meiner großartigen Familie, insbesondere gilt mein herzlicher Dank meinen lieben Eltern. Ihr habt mich stets auf meinen Wegen begleitet, all meine Entscheidungen getragen und all dies erst möglich gemacht.

Besondere Wertschätzung gilt meinem Mann Jan-Michael für die liebevolle Unterstützung, seine Geduld und seinen konsequenten Zuspruch in dieser Zeit.

Braunschweig, im Juli 2014 Alexa Oerke

Abstract

The dimensional measurement of microsystems with tactile sensors requires high precision measuring systems with high sensitivity along with low probing forces. Existing tactile-electric three-dimensional sensors have so far been built mainly from metals or semiconductors as base materials. The use of polymeric materials with a comparably low Young´s modulus provides the ability to influence the behavior of such sensors in a positive way at this point.

The present work deals with the development of three-dimensional piezoresistive tactile sensors based on the photoresist SU-8. Two main designs consisting of a stiffened membrane structure were realized, following the existing concept of silicon-based sensors. In parallel, a suitable micro-scale production process for self-supporting SU-8 structures was developed. This process includes a double-sided patterning by replication of a negative master (primary structure). In addition, the photoresist was evaluated with respect to the mechanical properties, the production-related influences on the residual stress of the material and its aging. Different thin film materials were considered in combination with a determination of the strain sensitivity and the temperature coefficient of electrical resistance. A detailed description of the piezoresistive effect for metals, semiconductors, composites, and amorphous carbon films (diamond-like carbon, DLC) forms the basis for the evaluation of these materials. Finally, the SU-8 tactile sensors were tested and characterized in terms of stiffness, contact forces, breaking points and maximum deflection of the probing element in comparison with silicon tactile sensors of similar dimensions. As a result, the contact forces during the tactile probing due to the decreased stiffness of the sensors will be significantly reduced.

Kurzfassung

Die dimensionelle Messung von Mikrosystemen mit taktilen Sensoren erfordert hochpräzise Messsysteme mit hoher Empfindlichkeit bei gleichzeitig geringen Antastkräften. Bestehende taktil-elektrische dreidimensionale Tastsensoren werden bislang vorwiegend aus Metallen oder Halbleitern als Basismaterialien aufgebaut. Der Einsatz polymerer Werkstoffe mit niedrigem Elastizitätsmodul bietet an dieser Stelle die Möglichkeit, das Verhalten derartiger Sensoren positiv zu beeinflussen.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Entwicklung piezoresistiver dreidimensionaler Tastsensoren auf der Basis von SU-8-Fotoresist. In Anlehnung an ein bestehendes Grundkonzept Silizium-basierter Sensoren werden Designs, bestehend aus einer versteiften Membrankonstruktion, entworfen. Parallel wird ein geeigneter mikrotechnischer Herstellungsprozess für die frei tragenden SU-8-Strukturen entwickelt. Dieser beinhaltet eine doppelseitige Strukturierung durch die Replikation von Primärstrukturen auf einem Master. Zusätzlich wird der Fotoresist bezüglich der mechanischen Eigenschaften, der herstellungsbedingten Einflüsse auf die Eigenspannungen des Materials sowie anhand von Alterungserscheinungen beurteilt. Für eine integrierte piezoresistive Sensorik werden insbesondere Dünnschichtmaterialien betrachtet und anhand der Dehnungsempfindlichkeit sowie des Temperaturkoeffizienten des elektrischen Widerstandes beschrieben. Grundlage für die Bewertung der Materialien bildet eine differenzierte Betrachtung des piezoresistiven Effekts für Metalle, Halbleiter, Verbundwerkstoffe und amorphe Kohlenstoffschichten (DLC). Abschließend werden Versuche zur Charakterisierung der SU-8-Tastsensoren durchgeführt und ein Vergleich mit Silizium-Tastsensoren ähnlicher Abmessungen hinsichtlich der Steifigkeiten, Antastkräfte, Bruchgrenzen und maximaler Auslenkung der Antastelemente gezogen. Im Ergebnis lassen sich die Antastkräfte bei der taktilen Antastung aufgrund der reduzierten Steifigkeiten der Sensoren deutlich reduzieren.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort und Danksagung

Abstract

Kurzfassung

Inhaltsverzeichnis I

Formelzeichen und Akronyme V

1 Einleitung 1

2 Stand der Technik 5

2.1 Sensoren in der dimensionellen Messtechnik 5

2.1.1 Berührungslose Sensoren 6

2.1.2 Taktile Sensoren 9

2.2 Sensoren aus SU-8 12

2.3 Einordnung der wissenschaftlichen Arbeit 14

3 Grundlagen 15

3.1 Die taktile Messmethode 15

3.2 Der piezoresistive Effekt 19

3.2.1 In Metallen 21

3.2.2 In Halbleitern 22

3.2.3 In Verbundwerkstoffen 24

3.2.4 In amorphen Kohlenstoffschichten 25

3.3 SU-8 als Strukturmaterial 28

4 Technologien 39

4.1 Beschichtungsverfahren 39

4.2 Strukturübertragung 42

4.3 UV-Tiefenlithografie 48

4.4 Messverfahren und Charakterisierungsmethoden 51

4.4.1 Tastschnittmessung 52

4.4.2 Nanoindentation 54

4.4.3 k-Faktor-Messung 57

4.4.4 Tastsensor-Charakterisierung 59

5 Fertigung dreidimensionaler mikrostrukturierter Sensoren 65

5.1 Entwurf und Simulation 65

5.2 Fertigungsablauf SU-8-Tastsensor 71

5.2.1 SU-8-Mastermold 73

5.2.2 Release Layer 78

5.2.3 SU-8-Tastsensoren 80

5.2.4 Release und AVT 82

5.3 Fertigungsablauf Si-Tastsensor 87

6 Experimente 93

6.1 Charakterisierung der Sensormaterialien 93

6.1.1 SU-8 – Einfluss des Herstellungsprozesses 94

6.1.2 SU-8 – Labortechnische Alterung 96

6.1.3 Piezoresistive Materialien 99

6.2 Charakterisierung der Sensoren 101

7 Ergebnisse 103

7.1 Piezoresistive Materialien 103

7.2 SU-8-Eigenschaften 106

7.3 Sensoreigenschaften 115

7.4 Diskussion 120

8 Zusammenfassung und Ausblick 123

9 Literaturverzeichnis 127

9.1 Publikationsverzeichnis 127

9.1.1 Fachzeitschriften 127

9.1.2 Wissenschaftliche Konferenzen 127

9.2 Weiterführende Literatur 129

9.3 Betreute Abschlussarbeiten und studentische Arbeiten 140

A Appendix i

A.1 Material und Chemikalien ii

A.2 Prozesse und Medien iv

A.3 Anlagen und Geräte v

A.4 Fertigungsabläufe vii

A.4.1 Detaillierter Fertigungsablauf „SU-8-Mastermold“ viii

A.4.2 Detaillierter Fertigungsablauf „SU-8-Tastsensor“ vii

A.4.3 Detaillierter Fertigungsablauf „Silizium-Tastsensor“ xv

Formelzeichen und Akronyme

Formelzeichen

A	Fläche [m^2]
A_p	projizierte Kontaktfläche bei der Kontakttiefe [m^2]
A_S	Kontaktfläche [m^2]
b	Breite [m]
C	Kontaktnachgiebigkeit [m/N]
d	Durchmesser [m]
D	Defektdichte [m^{-2}]
e	Elementarladung [C]
E	Elastizitätsmodul (E-Modul) [N/m^2 = Pa]
E_{IT}	Eindringmodul einer Probe [N/m^2]
Er	reduzierter E-Modul [N/m^2]
F	Kraft [N]
h	Höhe, Tiefe [m]
H	Bestrahlungsdosis [J/m^2]
H^+	katalytisches Proton
HM_S	Martenshärte [Pa]
I	Intensität, Bestrahlungsstärke [W/m^2]
k	k-Faktor
l	Länge [m]
L	laterale Auflösung [m]

m	Masse [kg]
n	Anzahl [-], Ladungsträgerdichte [m^{-3}]
n_i	Schleuderdrehzahl [s^{-1}]
p	Druck [N/m^2 = Pa = $1{,}3332 \cdot 10^2$ Torr]
P	Leistung [W]
r	Radius [m]
R	elektrischer Widerstand [Ω]
R_a	arithmetischer Mittenwert des Rauheitsprofils [m]
s	proximity gap (Abstand) [m]
S	Steigung [var.]
t	Zeit [s]
T	Temperatur [°C]
U	elektrische Spannung [V]
v	Geschwindigkeit [m/s]
$\dot{V}_{norm}$	Volumenstrom [sccm]
w	Breite [m]
x-, y-, z-	Koordinaten
Y	Ausbeute (Yield)
z	Durchbiegung [m]
α	linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient [K^{-1}]
γ	Flächenwinkel [°]
Δ	Delta (Differenz)
Δα	Mittelpunktswinkel (Zentriwinkel) [rad]
ε	Dehnung (axial)
ϑ	Temperatur [°C]
κ	Steifigkeit [N/m]

λ	Wellenlänge [m]
λ_C	Grenzwellenlänge (cut-off) [m]
ν	kinematische Viskosität [1St = 10^{-4} m^2/s] auch: Querkontraktionszahl
π	mathematische Konstante (Kreiszahl), auch: Bindungsart Orbital
π_{ik}	piezoresistive Koeffizienten
ρ	spezifischer elektrischer Widerstand [Ωm]
ϱ	Krümmungsradius [m]
σ	mechanische Spannung (Normalspannung) [Pa = N/m^2] auch: elektrische Leitfähigkeit [1/Ωm], Bindungsart Orbital
τ	Zeit [s]
φ	Flankenwinkel [°]

Akronyme

3D	dreidimensional (analog: 1D, 2D)
a-C	wasserstofffreie amorphe Kohlenstoffschicht
a-C:H	wasserstoffhaltige amorphe Kohlenstoffschicht
a-C:H:Me	metallhaltige wasserstoffhaltige amorphe Kohlenstoffschicht
AVT	Aufbau- und Verbindungstechnik
CAD	computer-aided design
CAS	chemical abstracts service
CB	Rußpartikel (carbon black)
CCD	charge-coupled device
CP	Cyclopentanon
CT	Computertomografie
CVD	chemical vapor deposition
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft

DI	de-ionisiert
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLC	diamond-like carbon
DVS	Deutscher Verband für Schweißtechnik
FC	flip chip
FEM	Finite-Elemente-Methode
GBL	Gamma-Butyrolacton
HMDS	Hexamethyldisilazan
IBM	International Business Machines Corporation
IMT	Institut für Mikrotechnik der TU Braunschweig
IOT	Institut für Oberflächentechnik der TU Braunschweig
IR	image-reversal
IST	Fraunhofer Institut für Schicht und Oberflächentechnik IST
METAS	Eidgenössisches Institut für Metrologie, Schweiz
n	negativ
NMM	Nanomessmaschine
NPL	National Physical Laboratory, UK
NPM	Nanopositioniermaschine
p	positiv
PAG	Fotoinitiator (photo acid generator)
PCB	printed circuit board
PEB	post-exposure bake
PE-CVD	plasma-enhanced chemical vapor deposition
PGMEA	propylene glycol monomethyl ether acetate
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
PVD	physical vapor deposition
QDR	quick-dump-rinser

REM	Rasterelektronenmikroskop
RT	Raumtemperatur
SOI	silicon on insulator
ta-C	tetraedische wasserstofffreie amorphe Kohlenstoffschicht
ta-C:H	tetraedische wasserstoffhaltige amorphe Kohlenstoffschicht
TCR	Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes
US	Ultraschall
UV	ultraviolett
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VIS	sichtbare Strahlung, Licht