

Entwicklung einer kontaktlosen Magnetkraftmikroskopie- Messtechnik für Gleich- und Wechselströme in integrierten mikroelektronischen Schaltungen

Vom Fachbereich Elektrotechnik der
Gerhard-Mercator-Universität-Gesamthochschule Duisburg
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Rainer Weber

aus

Swisttal Morenhoven

Referent: Prof. Dr.-Ing. Erich Kubalek
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Edmund Gerhard

Tag der mündlichen Prüfung: 10. Dezember 2002

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde von mir während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Angestellter im Fachgebiet Werkstoffe der Elektrotechnik der Gerhard-Mercator-Universität Duisburg angefertigt.

An dieser Stelle möchte ich ganz besonders dem Leiter des Fachgebiets, Herrn Prof. Dr.-Ing. Erich Kubalek dafür danken, dass er mir die Möglichkeit gab, diese Arbeit in seinem Fachgebiet durchzuführen. Die fachlichen und persönlichen Anregungen, aber auch die kompetente Unterstützung bei Problemlösungen und die häufigen Diskussionen haben maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Edmund Gerhard, Leiter des Fachgebiets Elektromechanische Konstruktion der Gerhard-Mercator-Universität Duisburg, danke ich herzlich für die Übernahme des Korreferates.

Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Mertin danke ich ganz besonders für die hilfreichen konstruktiven Diskussionen und Hinweise zu dieser Arbeit.

Die Beiträge von Studien- und Diplomarbeiten haben es ermöglicht, diese Arbeit im hier vorliegenden Umfang zu realisieren. Ich möchte mich ganz herzlich bei den Studenten, Dipl.-Ing. Christian Ney, Dipl.-Ing. Claus Hartmann, cand.ing Frank Seifert, cand.ing Markus Neinhüs, cand.ing Niht Ilerie, cand.ing Holger Leutfeld, cand.ing Michael Urlich für ihren Einsatz bedanken.

Frau Dipl.-Phys. Anne-Dorothea Müller von der Firma Anfatec, Chemnitz, und ihrem Mann Falk Müller von der Universität Chemnitz danke ich sowohl für die hilfreichen Diskussionen bei der Neukonstruktion, als auch für die vielen hilfreichen Anregungen. Außerdem bedanke ich mich für die Sonderanfertigungen der Messsonden, wie die multifunktionalen Messsonden oder die Spezialbedampfungen der Messsonden.

Bei Dipl.-Ing. Ulf Behnke und Dipl.-Ing. Song Bae bedanke ich mich für die Einweisung in die Technik der am Lehrstuhl vorhandenen Rasterkraftmikroskope, sowie für die konstruktive Kritik und Anregung.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Helmut Lebeau, der aufgrund seiner umfangreichen praktischen Erfahrungen entscheidend den Aufbau des neukonstruierten Testsystems prägte.

Vor allem bedanke ich mich für die hilfreiche Unterstützung bei der Entwicklung der Elektronik, aber auch bei der Lösung vieler Detailprobleme in deren Umfeld.

Herrn Ruppig und seinen Kollegen aus der mechanischen Werkstatt danke ich für die Metallarbeiten und die guten Verbesserungsvorschläge.

Herrn Udo Doerk und Herrn Horst Watzel möchte ich für den Aufbau und das Bonden der Testchips danken. Dem Fraunhofer Institut Duisburg danke ich für die Bereitstellung von Dil-Gehäusen.

Bedanken möchte ich mich auch bei allen Teilnehmern des BMBF Projektes „Neue Methoden zur Mikrocharakterisierung von Halbleiterbauelementen“ der Universitäten in Hamburg und Wuppertal. Vor allem jedoch gilt mein Dank Herrn Dipl.-Phys. Gunnar Zimmermann von der Firma Infineon AG, München, für die Bereitstellung von Proben und deren Präparation.

Bei Kerstin Fehr möchte ich mich für die hervorragenden Fotoarbeiten, sowie die Unterstützung bei der Probenpräparation bedanken. Mein Dank gebührt auch Herrn Udo Rau für die zahlreichen Elektronenmikroskopieaufnahmen von Proben und Messsonden.

Weiterhin möchte ich mich noch bei allen Kollegen des Fachgebiets für die konstruktiven fachlichen und außerfachlichen Diskussionen, sowie die kollegiale Zusammenarbeit und Unterstützung bedanken.

Besonderen Dank schulde ich meiner Freundin Andrea Ebach, die durch ihren Beistand und ihre Mithilfe einen großen Anteil am Gelingen dieser Arbeit hat.

Meinen Eltern danke ich für ihre Unterstützung und für ihr wohlwollendes Interesse an meinem Studium und meiner Promotion.

Zum Schluss möchte ich noch all denjenigen danken, die mich im Verlauf der Arbeit mit Ratschlägen, Geräten, Reparaturen oder anderen Dingen unterstützt haben und hier nicht explizit aufgeführt sind.

Inhaltsangabe

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen	VII
Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen	VIII
1 Einleitung und Problemstellung	1
2 Grundlagen und Stand der Technik der Stromkontrastmessung	8
2.1 Betriebsarten des Rasterkraftmikroskops	13
2.2 Einführung in die Magnetkraftmikroskopie	17
2.3 Strommessung mit dem Magnetkraftmikroskop (MKM)	20
2.3.1 Allgemeine Betrachtung	20
2.3.2 Messungen von Gleichströmen	24
2.3.3 Messungen von Wechselströmen	26
2.4 Apparative Grundlagen eines Magnetkraftmikroskops	27
2.4.1 Prinzipieller Aufbau eines Magnetkraftmikroskops	27
2.4.2 Messsonden	28
2.4.3 Detektionseinheiten	31
2.4.4 Rastersystem für das Rasterkraftmikroskop	37
2.5 Stand der Technik bei der Strommesstechnik mit dem MKM	40
3 Realisierung einer Strommesstechnik	42
3.1 Aufbau des Testsystems	42
3.2 Verwendete Teststrukturen	50
3.2.1 ITG-Teststruktur	51
3.2.2 Leiterbahnen mit 75-1000 nm Breite (Fraunhoferstruktur)	52
3.2.3 Hochfrequenz-Koplanarleitungen	52
4 Evaluation geeigneter Messsonden	54
4.1 Messsonden	54
4.2 Versuchsdurchführung und Ergebnisse	58
4.3 Zusammenfassung	62

5	Realisierung einer neuen Gleichstrommesstechnik	64
	5.1 Grundlagen und Messaufbau	64
	5.2 Zusammenfassung	67
6	Realisierung einer hochfrequenten Strommesstechnik	68
	6.1 Grundlagen und Messaufbau	70
	6.2 Zusammenfassung	73
7	Untersuchung von Einflüssen auf die Strommessung	74
	7.1 Einfluss der Hebelarmlänge	74
	7.2 Einfluss der Rasterhöhe	76
	7.3 Abhängigkeit der Messergebnisse von der Stromstärke	79
	7.4 Einfluss der Spannung	80
	7.5 Einfluss des Hebelarms	93
	7.6 Anforderungen an eine optimale Strommesssonde	105
8	Demonstration der Leistungsfähigkeit der Messtechnik und des Testsystems	106
	8.1 Stromnachweisgrenze und Messdauer	106
	8.2 Ortsauflösung	109
	8.2.1 Eine beschaltete Leiterbahn	109
	8.2.2 Zwei nebeneinander liegende Leiterbahnen	110
	8.2.3 Unterschiedliche Verdrahtungsebenen	112
	8.3 Zeitauflösung und Bandbreite	112
	8.3.1 Gleichstrom	112
	8.3.2 Hochfrequenzmessungen	113
	8.4 Zusammenfassung	114
9	Praktischer Einsatz der neuentwickelten Testtechnik an einem IC der Firma Infineon	116
	9.1 IC Präparation	117
	9.2 Fehleranalyse	119
	9.3 Weiterführende Messungen	123
	9.4 Strommessungen an einem passivierten IC	125

9.5 Zusammenfassung	126
10 Ausblick	127
11 Zusammenfassung	131
12 Literaturverzeichnis	134

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

Al ₂ O ₃	Aluminiumoxid-Keramik
Co	Kobalt
DMS	Dehnungsmessstreifen
EKM	Elektrisches Kraftmikroskop
FIB	eng. Focused Ion Beam
IC	Integrierte Schaltung
ITG	Informationstechnische Gesellschaft
MKM	Magnetkraftmikroskop
MP	Messpunkt
NdFeB	Neodym-Eisen-Bor Legierung
NF	Niederfrequent
Ni	Nickel
OBIRCH	eng. Optical Beam Induced Resistance Change
PC	Personalcomputer
RKM	Rasterkraftmikroskop
SNOM	eng. Scanning Near-Field Optical Microscope
SQUID	eng. Scanning Quantum Interference Device
VDE	Verein Deutscher Ingenieure
XMR	auf einem magnetoresistiven Effekt basierender Sensor

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen

a	Leiterbahndicke
a_L	Abstand zweier Leiterbahnen
A	Fläche
A_0	Ortsauflösung
$A_{0\min}$	Ortsauflösungsgrenze
A_{Str}	Fläche einer Teststruktur
b	Breite des Hebelarms
b_L	Leiterbahnbreite
b_S	Strukturbreite
c	Federrate
c_1, c_2	Konstante
c_0	Lichtgeschwindigkeit
C	Kapazität
d	Dicke des Hebelarms
d_B	Dicke eines Bonddrahtes
d_{mag}	Dicke der magnetischen Schicht
$d_{\text{mag, schutz}}$	Dicke der Schutzschicht
\vec{D}	Elektrische Erregung
E	Elastizitätsmodul
f	Frequenz
\vec{F}	Kraft auf die Messspitze
\vec{F}_{el}	Elektrische Kraft / Coulombkraft
$F_{\text{el,z}}$	Elektrische Kraft / Coulombkraft in z-Richtung

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen

F_{Hebel}	Kraft auf den Hebelarm
$F_{\text{mag},z}$	Magnetische Kraft in z-Richtung
\vec{F}_{res}	Resultierende Kraft auf die Messspitze
F_{Spitze}	Kraft auf die Messspitze
F_z	Kraft in z-Richtung
$F_{z,\text{res}}$	Resultierende Kraft in z-Richtung
$h; h_1; h_2$	Abstand der Messspitze von der Probenoberfläche / Rasterhöhe / Arbeitsabstand
h_L	Leiterbahnhöhe
h_{str}	Strukturhöhe
h_{sub}	Substratdicke
Δh	Hebelarmauslenkung, Amplitude
H	Betrag des magnetischen Feldes
\vec{H}	Magnetisches Feld
$H_x; H_y; H_z$	Komponenten des Magnetfeldes
\hat{i}_{NF}	Amplitude der niederfrequenten Stromstärke
\hat{i}_{T}	Amplitude der hochfrequenten Stromstärke
I	Stromstärke
I_{min}	Stromauflösungsgrenze
ΔI	Stromauflösung
I_{ges}	Gesamtstromstärke
I_{gleich}	Gleichstromstärke
I_{wechsel}	Wechselstromstärke
$K_{\text{ab}}; K_{\text{an}}; k_1; k_2; k_3$	Proportionalitätsfaktoren
l	Länge des Hebelarms
$l_{\text{Ü}}$	Länge des Hebelarmüberhangs

$\vec{m}; \vec{m}_0$	Magnetisches Dipolmoment
\tilde{m}	Modulationsgrad
m_0	Betrag des magnetischen Dipolmomentes
m_z	Betrag des magnetischen Dipolmomentes in z-Richtung
\vec{M}	Magnetisierung (der Messsonde)
N	Dipoldichte
Q	Mechanische Güte
P_{HF}	Leistung eines Hochfrequenzsignals
r	Radius der Leiterbahn
R_0	Radius des Messspitzenendes
\bar{s}	Weg
s_m	Messbereich
s, s_x, s_y, s_z	Verfahrweg
$s_r, s_{r,x}, s_{r,y}, s_{r,z}$	Rasterbereich
$s_w, s_{w,x}, s_{w,y}, s_{w,z}$	Wiederholgenauigkeit
Δs	Positioniergenauigkeit
\bar{S}	Stromdichte
t	Zeit
t_{int}	Integrationszeit
U	Spannung
U_0	Spannung zwischen Messspitze und Probenoberfläche
U_s	Spannung an der Messspitze
U_p	Spannung auf der Probenoberfläche
U_v	Versorgungsspannung
U_{\sim}	Modulationsspannung

v_R	Rastergeschwindigkeit
V_{Spitze}	Volumen der Messspitze
W	Energie
$W_{\text{pot,LJ}}$	Potenzielle Energie
x,y,z	Koordinaten des ausgezeichneten Koordinatensystems
z_h	Effektiver Abstand des Dipols zum Leiterbahnmittelpunkt
α	Proportionalitätsfaktor
α_{ML}	Winkel zwischen Leiterbahn und Messsonde
δ	Abstand des Dipols vom Ende der Messspitze
ε	Permittivität
λ	Wellenlänge
μ_0	Magnetische Feldkonstante
π	Kreiszahl
ρ	Dichte des Siliziums
φ	Phasenverschiebung zwischen Hebelarmschwingung und Referenzsignal
$\Delta\varphi$	Phasenverschiebung zwischen zwei Strömen
$\Delta\Phi$	Phasenänderung
χ_m	Magnetische Suszeptibilität
ω	Kreisfrequenz