

Untersuchung des Temperaturkoeffizienten und anderer
Materialeigenschaften von Laser-ausgeheilten amorphen Silizium- und
Silizium-Germanium-Schichten

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften der
Abteilung Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität Duisburg-Essen

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation

von

Herrn Dipl.-Ing. Jan Förster

aus

Köln

1. Gutachter: Prof. Dr. Holger Vogt
2. Gutachter: Prof. Dr. Roland Schmechel

Tag der mündlichen Prüfung: 11.03.2013

Berichte aus der Halbleitertechnik

Jan Förster

**Untersuchung des Temperaturkoeffizienten und
anderer Materialeigenschaften von Laser-angewandten
amorphen Silizium- und Silizium-Germanium-Schichten**

Shaker Verlag
Aachen 2013

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.: Duisburg-Essen, Univ., Diss., 2013

Copyright Shaker Verlag 2013

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1985-8

ISSN 0945-0785

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 im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Elektronische Bauelemente und Schaltungen (EBS) der Fakultät für Ingenieurwissenschaften an der Universität Duisburg-Essen, Campus Duisburg. Der experimentelle Teil der Arbeit wurde überwiegend im Fachgebiet EBS durchgeführt, einige Messungen erfolgten jedoch im Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme (IMS) Duisburg.

Zunächst möchte ich Herrn Prof. Dr. A. Grabmaier danken, der mir als Leiter des Fachgebietes und des Fraunhofer-IMS die erfolgreiche Durchführung dieser Arbeit ermöglicht hat.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. H. Vogt für die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr. R. Schmechel danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Des Weiteren möchte ich den Mitarbeitern des Fachgebietes EBS und des Fraunhofer IMS für die freundliche und kollegiale Zusammenarbeit danken. Insbesondere danke ich den Mitarbeitern des Fraunhofer IMS Herrn Dr. M. Ruß, Herrn Dr. Q. Wang und Herrn P. Yang für die Unterstützung bei der Herstellung der Untersuchungsproben sowie Herrn Dr. J. Bauer für die Hilfestellung bei den Untersuchungen mittels Rasterkraftmikroskops.

Frau Marina Wirtz gilt mein Dank für die Unterstützung bei der Untersuchung verschiedener Proben mittels Rasterkraftmikroskops im Fraunhofer IMS.

Schließlich möchte ich auch meiner Frau, Dr. Janine van Eymeren, danken, die mich während meines Studiums und meiner Promotion immer wieder ermutigt und stets unterstützt hat.

Jan Förster

Zusammenfassung

Die Entwicklung der Mikroelektronik der letzten Jahre ermöglicht eine zunehmende monolithische Integration von mikroelektronischen und optoelektronischen bzw. mikromechanischen Bauelementen auf einem Chip. Dabei ist der Integrationsgrad allerdings durch die minimal erlaubten Geometriegrößen der optoelektronischen und mikromechanischen Bauelemente begrenzt. Ein neuer technologischer Ansatz zur Steigerung des Integrationsgrades solcher Schaltungen ist das sogenannte Above-IC Processing, bei dem oberhalb einer vollständigen CMOS-Struktur eine zusätzliche Ebene eingeführt wird, in der die optoelektronischen bzw. mikromechanischen Bauelemente realisiert werden können. Zur Ausheilung der Halbleitermaterialien dieser zusätzlichen Ebene können jedoch bedingt durch die vorhandenen CMOS-Strukturen keine üblichen thermischen Verfahren eingesetzt werden. Stattdessen muss auf ein neues Verfahren zurückgegriffen werden.

Ziel dieser Arbeit ist es, das Potential von Excimer-Laser-Annealing als diesen neuen thermischen Ausheilungsschritt im Rahmen des Above-IC Processing zu bewerten. Dafür wurden mittels PECVD amorphe Silizium- bzw. Silizium-Germanium-Schichten mit dem Ansatz des Above-IC Processing entsprechenden Dotierungen und Schichtdicken hergestellt. Einige der Proben wurden strukturiert und gehäust. Ferner wurde ein Versuchsaufbau entwickelt, mit dem das Excimer-Laser-Annealing an diesen amorphen Schichten in unterschiedlichsten Konfigurationen durchgeführt werden kann. So war es möglich, die Energiedichte des Lasers, die Anzahl der verwendeten Laserpulse und deren Wiederholrate und die Proben temperatur während des Excimer-Laser-Annealings gezielt zu variieren. Dadurch konnten umfangreiche Erkenntnisse über den Einfluss des Excimer-Laser-Annealings auf wichtige Eigenschaften der amorphen Schichten gewonnen werden. Bei diesen Eigenschaften handelt es sich im Einzelnen um die Oberflächenrauheit, die Rekristallisation, den elektrischen Widerstand und dessen Temperaturabhängigkeit sowie das niederfrequente Rauschen.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass das Excimer-Laser-Annealing je nach Konfiguration einen erheblichen Einfluss auf alle diese Eigenschaften hat. Unter anderem reduzierte das Excimer-Laser-Annealing bei ausreichender Energiedichte den elektrischen Widerstand um bis zu sechs Größenordnungen. Zugleich konnte durch das Excimer-Laser-Annealing mit moderater Energiedichte die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands verringert werden. Weiterhin wurde beobachtet, dass das Excimer-Laser-Annealing bei hohen Energiedichten zu einer großen Zunahme der Oberflächenrauheit führte. Es konnte ebenfalls gezeigt werden, dass eine Dehydrogenisierung der Proben durch langsame Steigerung der Energiedichte zu geringeren Defektdichten in den Proben führte.

Anhand der Ergebnisse konnten Konfigurationen des Excimer-Laser-Annealings identifiziert werden, die einerseits die größtmögliche, reproduzierbare Veränderung der amorphen Schichten erlauben und andererseits alle Voraussetzungen für eine Integration des Excimer-Laser-Annealings in bestehende CMOS-Prozesse erfüllen. Somit konnte im Rahmen dieser Arbeit gezeigt werden, dass das Excimer-Laser-Annealing eine geeignete Methode zur Ausheilung der Halbleitermaterialien der zusätzlichen Ebene des Above-IC Processing ist und es, besonders im Hinblick auf die Fertigung von optoelektronischen oder passiven mikroelektronischen Elementen in der zusätzlichen Ebene, ein hohes Potential birgt.

Abstract

The recent development in microelectronics allows an increasing monolithic integration of microelectronic and optoelectronic or micromechanical components on the same chip. However, the integration scale is limited by the minimal allowed geometrical sizes of the optoelectronic and micromechanical components. A new approach to increase the integration scale is the so-called Above-IC Processing. In this approach an additional semiconductor layer is introduced above the complete CMOS structures, which contains the optoelectronic or micromechanical components. Unfortunately, the annealing of the semiconductor materials of this additional layer cannot be performed by the common thermal annealing techniques. Thus, there is a strong need for an alternative method.

The aim of this work is to analyse the potential of Excimer-Laser-Annealing as an alternative annealing technique in the context of the Above-IC Processing. Therefore, samples of amorphous silicon and silicon-germanium with doping concentrations and layer thicknesses compatible to Above-IC Processing have been prepared by PECVD. Some of the samples have also been structured and housed. In addition, an experimental setup has been developed, which allows conducting the Excimer-Laser-Annealing with several configurations. Thereby, it was possible to vary the energy density of the laser, the number of laser pulses and their repetition rate as well as the sample temperature during the Excimer-Laser-Annealing. Thus, substantial findings on the influence of the Excimer-Laser-Annealing on important characteristics of the amorphous layers could be gained. These characteristics include surface roughness, recrystallization, electrical resistance and its temperature dependence as well as low-frequency noise.

This work shows that Excimer-Laser-Annealing has a strong influence on all of these characteristics. The Excimer-Laser-Annealing reduced the electrical resistance by up to six orders of magnitude if the energy density reached a sufficiently high value. At the same time, the Excimer-Laser-Annealing could minimize the temperature dependence of the electrical resistance if using moderate energy densities. Furthermore, the Excimer-Laser-Annealing at high energy densities caused a drastic increase of the surface roughness. In addition, it was shown that dehydrogenization of the samples by performing the Excimer-Laser-Annealing with slowly increasing energy densities led to the lowest defect density in the samples.

In conclusion it was possible to identify the best configurations of the Excimer-Laser-Annealing on the basis of the results. These configurations allow huge, repeatable modifications of the amorphous semiconductor materials while they fulfil the needs for an integration of the Excimer-Laser-Annealing in an existing CMOS process at the same time. Thus, this work demonstrates that Excimer-Laser-Annealing is a suitable annealing technique in the context of Above-IC Processing and that it holds vast potential especially for the production of optoelectronic or passive microelectronic components.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
Zusammenfassung	V
Abstract	VII
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XIII
Abkürzungen und Formelzeichen	XV
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Gliederung	4
2 Grundlagen des Laser-Annealings	7
2.1 Grundlegende optische Eigenschaften	7
2.2 Absorption von Laserlicht in Materialien	12
2.3 Laser-Annealing	15
2.4 Excimer-Laser	20
3 Eigenschaften amorpher und kristalliner Halbleiter	25
3.1 Unterschiede in der Atomstruktur amorpher und kristalliner Halbleiter	26
3.2 Herstellung amorpher Halbleiter	29
3.3 Die elektrische Leitfähigkeit amorpher und kristalliner Halbleiter	33
3.4 Rauschen in Halbleitern	37
3.5 Optische Eigenschaften amorpher und kristalliner Halbleiter	40
4 Versuchsaufbauten und Untersuchungsproben	45
4.1 Grundlegender Versuchsaufbau	46
4.2 Reflexionsmessung	48
4.3 Rekristallisationsnachweis mittels Rasterelektronenmikroskopie	50
4.4 Bestimmung der Oberflächenrauheit mittels Rasterkraftmikroskopie	50
4.5 Zeitaufgelöste Reflexionsmessung	51
4.6 Bestimmung des TCR	53
4.7 Charakterisierung des niederfrequenten Rauschens	55
4.8 Durchführung des Excimer-Laser-Annealings	56
4.9 Herstellung der verwendeten Untersuchungsproben	58
4.10 Untersuchungsmethoden	63

5	Modell des ELA von amorphem Silizium	65
5.1	Mathematische Gleichungen des Modells	66
5.2	Umsetzung des Modells in COMSOL Multiphysics	69
6	Einfluss des ELA auf die Probeneigenschaften	75
6.1	Energiedichtenabhängige Untersuchungsergebnisse	75
6.1.1	Oberflächenreflektivität	75
6.1.2	Rekristallisation	82
6.1.3	Oberflächenrauheit	84
6.1.4	Elektrischer Widerstand	93
6.1.5	Temperaturkoeffizienten des elektrischen Widerstands	104
6.1.6	Niederfrequentes Rauschen	112
6.2	Zeitaufgelöste Untersuchungsergebnisse	113
6.2.1	Schmelzdauer beim ELA	114
6.2.2	Verzögerungszeit bis zum Einsetzen des Schmelzens	117
6.3	Weitere Phänomene beim ELA	120
6.3.1	Ablation der amorphen Schicht	120
6.3.2	Blasenbildung in der amorphen Schicht	122
6.3.3	Überlagerung von Laserspots	123
6.3.4	Excimer-Laser-Annealing an strukturierten Proben	124
6.4	Ergebnisse des ELA-Modells	126
6.4.1	Schmelzdauer, Verzögerungszeit und Schmelztiefe	127
6.4.2	Temperaturverteilung in den Untersuchungsproben	131
7	Diskussion	135
7.1	Schmelzen und Rekristallisation des amorphen Materials	135
7.2	Wasserstoff im amorphen Material	136
7.3	Dotierung und Defekte	138
7.4	Auswertung der Modell-Ergebnisse	142
7.5	Limitationen des ELA	143
8	Fazit und Ausblick	147
	Literaturverzeichnis	151
	Anhang:	
A	Eigenschaften des ELA-Systems	163
B	Technische Zeichnungen	167
C	Oberflächentopologien der Untersuchungsproben	191

Abbildungsverzeichnis

1.1	Ansatz des Above-IC Processing	2
2.1	Zusammenhang von Energie und Irradianz	8
2.2	Bänderdiagramme eines direkten und indirekten Halbleiters	11
2.3	Elektronenenergien in einem Laser-beleuchteten Halbleiter	14
2.4	Zeitliche Entwicklung der Elektronen- und Löcherverteilung	15
2.5	Energiezustände und Termschema eines Excimer-Lasers	21
2.6	Aufbau und Strahlprofil eines Excimer-Lasers	22
2.7	Pulsform eines Excimer-Lasers	23
3.1	Übergang vom amorphen zum poly- und monokristallinen Halbleiter	25
3.2	Atomstruktur von c-Si und a-Si	27
3.3	Bandlücke eines amorphen Halbleiters	28
3.4	Atomstruktur von a-Si:H	29
3.5	Dotiereffizienz in der Gasphase bei der PECVD	32
3.6	Temperaturabhängigkeit der Konzentration delokalisierte Ladungsträger	34
3.7	Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit	35
3.8	Spektrale Leistungsdichten verschiedener Rauschmechanismen	38
3.9	Optische Parameter von c-Si und a-Si	41
4.1	Grundlegender Versuchsaufbau für das ELA	46
4.2	Versuchsaufbau für die Messung der Probenoberflächenreflektivität	49
4.3	Beispiel des Fotodiodensignal bei zeitaufgelöster Reflexionsmessung	52
4.4	Versuchsaufbau für die zeitaufgelöste Reflexionsmessung	53
4.5	Bestimmung des Temperaturkoeffizienten des elektrischen Widerstands	54
4.6	Versuchsaufbau für die Messung des Rauschens	55
4.7	Flussdiagramm der beiden Laser-Annealing-Methoden	57
4.8	Schematische Darstellung des Probenaufbaus	59
4.9	Schematische Darstellung der Probengeometrie	62
5.1	Mathematische Näherung des Laserpulses	68
5.2	Aufbau der Untersuchungsproben im ELA-Modell	70
6.1	Oberfläche der Untersuchungsprobe V5370#07 nach dem ELA	76
6.2	Oberflächenreflektivität als Funktion der Energiedichte	77
6.3	Einfluss der initialen Proben temperatur auf die Oberflächenreflektivität	79
6.4	Einfluss der Laserpulsanzahl auf die Oberflächenreflektivität	81
6.5	REM-Aufnahmen der Untersuchungsproben V5455#11 und V5347#08	83
6.6	Oberflächentopografie der Untersuchungsprobe V5370#07	85
6.7	Oberflächenrauheit als Funktion der Energiedichte (V5370#07, V5525#16)	86
6.8	Einfluss der verwendeten LAM auf die Oberflächenrauheit	88

6.9	Einfluss der initialen Proben­temperatur auf die Oberflächenrauheit (V5370#07)	89
6.10	Einfluss der Laserpulsanzahl auf die Oberflächenrauheit (V5370#07)	90
6.11	Elektrischer Widerstand als Funktion der Energiedichte (V5466#08)	93
6.12	Elektrischer Widerstand als Funktion der Energiedichte des Lasers	94
6.13	Elektrischer Widerstand bei unterschiedlichen init. Proben­temperaturen	96
6.14	Einfluss der LAM auf den elektrischen Widerstand	98
6.15	Einfluss der Laserpulsanzahl auf den elektrischen Widerstand	101
6.16	Einfluss der LAM und der Laserpulsanzahl auf den elektrischen Widerstand	102
6.17	Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstands (V5466#08)	105
6.18	Grundlegender Einfluss des ELA auf den TCR einiger Untersuchungsproben	107
6.19	Einfluss der initialen Proben­temperatur auf den TCR (V5455#11)	109
6.20	Einfluss der verwendeten LAM auf den TCR (V5466#08)	110
6.21	Einfluss der Laserpulsanzahl auf den TCR	111
6.22	Rauschmessung an Proben V5349#14 und V5349#15	113
6.23	Oszilloskop-Aufnahme der Reflexion des HeNe-Lasers (V5466#08)	114
6.24	Schmelzdauer der Untersuchungsproben	115
6.25	Einfluss der init. Proben­temperatur auf die Schmelzdauer (V5455#10)	117
6.26	Verzögerungszeit bis zum Schmelzen der Untersuchungsproben	118
6.27	Einfluss der init. Proben­temperatur auf die Verzögerungszeit	119
6.28	Ablation der amorphen Schicht der Untersuchungsproben	121
6.29	Blasenbildung in der amorphen Schicht (V5525#16)	122
6.30	Überlagerung mehrerer Laserspots (V5466#08)	123
6.31	Oberflächenprofil der überlagerten Laserspots	124
6.32	Strukturierte Untersuchungsproben nach dem ELA	125
6.33	Berechneter zeitlicher Verlauf der Proben­temperatur	127
6.34	Berechnete Schmelzdauer der a-Si-Proben	128
6.35	Berechnete und gemessene Schmelzdauer der Untersuchungsproben	128
6.36	Temperaturabhängigkeit des Schmelz­schwellwertes	129
6.37	Berechnete und gemessene Verzögerungszeit	130
6.38	Berechnete und gemessene Schmelztiefe	130
6.39	Zeitlicher Verlauf der Proben­temperatur vs. Tiefe	131
6.40	Proben­temperatur vs. Energiedichte vs. Tiefe	133

Tabellenverzeichnis

2.1	Schmelzschwellwert E_{th} einiger Materialien	19
4.1	PECVD-Rezepte zur Probenherstellung	60
4.2	Übersicht über die Untersuchungsmethoden	64
5.1	Materialeigenschaften des a-Si:H im ELA-Modell	72
6.1	Änderung der Oberflächenreflektivität aufgrund des ELA	78
6.2	Einfluss der init. Proben­temperatur auf die Oberflächenreflektivität	80
6.3	Oberflächenrauheit als Funktion der Energiedichte	87
6.4	Abhängigkeit der Oberflächenrauheit von der Laserpulsanzahl	92
6.5	Übersicht über die Änderung des elektr. Widerstand aufgrund des ELA	95
6.6	Temperaturabhängigkeit des Schmelzschwellwerts	97
6.7	Unterschied im elektrischen Widerstand aufgrund der LAM	99
6.8	Einfluss der Laserpulsanzahl auf d. elektr. Widerstand	103
6.9	Übersicht über die Änderung des TCR aufgrund des ELA	106
6.10	Unterschied im TCR aufgrund der LAM	110
6.11	Schmelzdauer der Untersuchungsproben mit a-Si:H Schicht	116
6.12	Ablation der amorphen Schicht diverser Untersuchungsproben	121

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

ADU	Analog-Digital-Umsetzter
a-Si	amorphes Silizium
a-Si:H	hydrogenisiertes amorphes Silizium
a-SiGe:H	hydrogenisiertes amorphes Silizium-Germanium
a-Ge:H	hydrogenisiertes amorphes Germanium
BSE	Rückgestreute Elektronen
c-Si	monokristallines Silizium
p-Si	polykristallines Silizium
EKM	Ein-Koordinaten-Methode
ELA	Excimer-Laser-Annealing
ELAS	Excimer-Laser-Annealing-System
FEM	Finite-Elemente-Methode
KVG	Kurvenverlaufs-Gruppe
LA	Laser-Annealing
LAM	Laser-Annealing-Methode
LB	Leitungsband
MEMS	Micro-Electro-Mechanical-System
MKM	Mehr-Koordinaten-Methode
MST	Mikrosystemtechnik
REM	Rasterelektronenmikroskop
RT	Raumtemperatur
RTA	Rapid Thermal Annealing
SRV	Signal zu Rausch Verhältnis
TCR	Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes
TEM	Transmissionselektronenmikroskop
TFT	Thin Film Transistor
UV	ultraviolett
VB	Valenzband
XRD	Röntgenbeugung

Formelzeichen

a	Länge
a_D	Vorfaktor der Dotiereffizienz
α	Optischer Absorptionskoeffizient
α_H	Materialspezifischer Faktor nach Hooge
α_{TCR}	Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstands
A	Fläche
b	Zählvariable
B	Bandbreite
c	Zählvariable
c_0	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
C_g	Gaskonzentration
C_p	Spezifische Wärme
γ	Winkel
d	Durchmesser
D	Flächendichte
Δ_λ	Optische Linienbreite
\mathbf{E}	Orts- und zeitabhängiges elektrisches Feld
E_0	Amplitude des elektrischen Feldes
E	Energie
$\langle E_a \rangle$	Austrittsenergie der Ladungsträger aus einem Material
E_g	Bandlücke eines Halbleiters bzw. eines Isolators
E_\square	Energiedichte
E_{th}	Schmelzschwellwert
η_g	Dotiereffizienz
f	Frequenz
G	Anregungs- bzw. Rekombinationsrate
G_{el}	Elektrischer Leitwert
h	Planksches Wirkungsquantum
h_{cl}	Wärmetransportkoeffizient
$h(T)$	Sprungfunktion zur Modellierung des Phasenübergangs im ELA-Modell
$h_w(t)$	Zeitfenster der Gültigkeit der Wärmequelle im ELA-Modell
\mathbf{H}	Orts- und zeitabhängiges magnetisches Feld
H_0	Amplitude des magnetischen Feldes
I	Irradianz
I_{el}	Elektrischer Strom
j	Imaginäre Einheit
k	Wellenzahl
k_B	Boltzmann Konstante

κ	Thermische Leitfähigkeit
λ	Wellenlänge
l	Schichtdicke
l_m	Schmelztiefe in der amorphen Schicht
L_m	Latente Wärme
m	Zählvariable
\dot{m}	Gasmassenfluss
μ	Ladungsträgerbeweglichkeit
\mathbf{n}	Flächennormalenvektor
n	komplexer Brechungsindex
n_R	Brechungsindex (Realteil des komplexen Brechungsindex)
n_I	Extinktionskoeffizient (Imaginärteil des komplexen Brechungsindex)
ν	Frequenz der optischen Strahlung
N	Konzentration bzw. Ladungsträgerzustandsdichte
ω	Kreisfrequenz
p	Druck
P	Leistung
Φ	Leistungsdichte
Q	Wärmequelle
q	elektrische Ladung
q_0	Wärmestromdichte
r	Atomabstand
R	Reflektivität
R_{el}	Elektrischer Widerstand
R_q	Oberflächenrauheit
ρ	Dichte
S	Spektrale Leistungsdichte
σ	Standardabweichung
σ_{el}	Elektrische Leitfähigkeit
t	Zeit
ϑ	Temperatur
τ	Zeitkonstante
T	Zeitdauer
U	Elektrische Spannung
x	Raumdimension
X	Stoffmengenanteil
y	Raumdimension
z	Raumdimension