

Untersuchungen zum piezoresistiven Effekt in MOS-Transistoren für die Anwendung in integrierten MEMS-Sensoren

Sven Haas¹; Michael Schramm²; Steffen Heinz², Kay-Uwe Loebel², Danny Reuter^{1,3}, Andreas Bertz¹, Thomas Geßner^{1,3}, John Thomas Horstmann²

¹TU Chemnitz, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Zentrum für Mikrotechnologien, 09126 Chemnitz, sven.haas@zfm.tu-chemnitz.de

² TU Chemnitz, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Professur Elektronische Bauelemente der Mikro- und Nanotechnik, 09126 Chemnitz, michael.schramm@etit.tu-chemnitz.de

³ Fraunhofer-Institut für Elektronische Nanosysteme, Am Technologiecampus 3, 09126 Chemnitz

Kurzfassung

Für die Umsetzung einer direkten On-Chip Integration des mechanischen Wandlerelementes und der Primärelektronik von MEMS-Sensoren, soll die Änderung der Ladungsträgerbeweglichkeit im Kanalgebiet von MOS-Transistoren, infolge von mechanischen Verspannungen im Siliziumkristall genutzt werden. Dazu wurden als Drucksensor wirkende Siliziummembranen mittels FEM simuliert und hinsichtlich der Maximierung der wirksamen mechanischen Spannungen im Kanalgebiet der Transistoren optimiert. Daneben erfolgte die Implementierung des piezoresistiven Modells in die IC-Designsoftware. Neben der Dimensionierung der Bauelemente lag hier ein besonderes Augenmerk in der Simulation des Einflusses der mechanischen Spannung auf die Eigenschaften der MOS-Transistoren wie Transferkennlinie und Ausgangskennlinienfeld.

1 Einleitung

Piezoresistive Widerstände (PRR) aus Silizium sind in der Signalwandlung u.a. bei Drucksensoren kommerziell im Einsatz [1]. Dabei ist zu beachten, dass die Wandlung von einer mechanischen Dehnung in eine Widerstandesänderung einige Nachteile birgt. So wird aufgrund des geringen Schichtwiderstandes von dotiertem Silizium eine große Fläche benötigt, um einen geeigneten Grundwiderstand zu realisieren. Folglich ist die Wandlung nicht lokalisiert, was von Nachteil ist, wenn dieses Prinzip mit mikromechanischen Balkenstrukturen kombiniert wird [2].

PRRs basieren auf dem Prinzip, dass sich die Ladungsträgerbeweglichkeit in Abhängigkeit der mechanischen Spannung verändert. Dieser Effekt lässt sich direkt in das Kanalgebiet eines Transistors integrieren [3]. In immer weiter miniaturisierten mikromechanischen Systemen wird die Verwendung von Transistoren als elektromechanischer Wandler zunehmend interessanter, da das Sensorsignal im Gegensatz zu induktiven bzw. kapazitiven Wandlern, nicht mit dem Volumen, respektive mit der Fläche skaliert. Nutzt man Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistoren (MOSFET) als piezoresistives Wandlerelement kann die aktive Sensorfläche auf wenige Mikrometer bis Nanometer beschränkt wer-

den. Dadurch lässt sich das piezoresistive Wandlerelement bei mikromechanischen Systemen nutzen, um mechanische Spannungen im Mikrometer- und sub-Mikrometerbereich lokalisiert zu messen. Dies ermöglicht die weitere Miniaturisierung von Sensoren und Systemen, wie z. B. Balken- und Zungenstrukturen mit Dimensionen kleiner als 100 µm bis in den Bereich weniger Mikrometer, die z. B. zur Detektion von organischen Molekülen, wie Anthrax eingesetzt werden können [4]. Weiterhin bietet der Einsatz von MOSFETs den Vorteil, dass die nachfolgenden Verstärker- und Signalauswerteschaltkreise räumlich nah am Wandlerelement angeordnet sind. Der Vorteil dieser direkten monolithischen Integration ist, dass neben einer weiteren Verkleinerung des gesamten Sensors auch Störgrößen, wie z. B. Widerstände durch Bondverbindungen, Kapazitäten durch lange Leitungen oder Temperaturunterschiede zwischen Wandler und Auswerteelektronik reduziert werden können. Des Weiteren eignet sich dieses Wandlerprinzip aufgrund der geringen Dimensionen für einen Einsatz in Arraystrukturen.

Die Verwendung von Transistoren statt PRRs hat neben dem geringeren Platzbedarf und der Änderung der Ladungsträgerdichte den Vorteil, dass eine höhere Empfindlichkeit erreicht wird [5]. Während im PRR Majoritätsladungsträger vorherrschen, basiert das

sensitive Kanalgebiet des MOSFET auf Minoritätsladungsträgern. Aufgrund dieses Umstandes ist auch die Ladungsträgerkonzentration nicht konstant. Ein zusätzlicher Vorteil ist, dass Transistoren im Abschnürbereich als Stromquelle fungieren. Dadurch können Schwankungen in der Betriebsspannung und parasitäre Serienwiderstände kompensiert werden. In dieser Arbeit wird neben der Spannungsoptimierung der Membran für MOSFETs das Hauptaugenmerk auf die Simulation der MOSFET- Eigenschaften gelegt.

2 Theoretische Betrachtung

Der piezoresistive Effekt im Silizium basiert auf einer Änderung der Ladungsträgerbeweglichkeit durch eine mechanische Spannung σ [6]:

$$\frac{\Delta\mu_{ij}}{\mu_0} = -\sum_{kl} \pi_{ijkl} * \sigma_{kl} . \quad (1)$$

Dabei ist π_{ijkl} der Tensor der Piezokoeffizienten und σ_{kl} der Spannungstensor. Umgestellt nach $\mu_{eff} = \mu_0 + \Delta\mu_{ij}$ ergibt sich Gleichung 2:

$$\mu_{eff,ij} = \mu_0 * (1 - \sum_{kl} \pi_{ijkl} * \sigma_{kl}) . \quad (2)$$

Setzt man diese Gleichung in Gleichung 3 ein, welche die effektive Ladungsträgerbeweglichkeit μ_{eff} im Inversionsfall des BSIM3.3-Modells [7] beschreibt, so erhält man Gleichung 4:

$$\mu_{eff} = \frac{U0}{1 + (UA + UC * V_{BS}) * \frac{V_{GS} + V_T}{T_{OX}} + UB * \left(\frac{V_{GS} + V_T}{T_{OX}}\right)^2} \quad (3)$$

$$\mu_{eff} = \frac{U0 * (1 - \sum_{kl} \pi_{ijkl} * \sigma_{kl})}{1 + (UA + UC * V_{BS}) * \frac{V_{GS} + V_T}{T_{OX}} + UB * \left(\frac{V_{GS} + V_T}{T_{OX}}\right)^2} \quad (4)$$

Dabei ist $U0$ die intrinsische Beweglichkeit, die bei Beginn der Inversion vorherrscht. UA und UB sind Korrekturparameter, welche die Abnahme von μ_{eff} durch das vertikale elektrische Feld beschreiben. UC ist ein Parameter zur Berücksichtigung der angelegten Substrat-Source-Spannung V_{BS} . V_T ist die Schwellspannung des MOSFET und T_{OX} die Gateoxiddicke. Einen ähnlichen Ansatz hat Wacker in [8] veröffentlicht.

3 Entwurf und Simulation

Eine Membran wird durch eine äußere Krafteinwirkung ausgelenkt und deformiert, wobei in den gedehnten Gebieten Zugspannungen und in den

gestauchten Gebieten Druckspannungen wirken. Die äußere Krafteinwirkung kann z. B. durch einen Druckunterschied zwischen Vorder- und Rückseite, oder durch einen Indenter erfolgen. Bei einer elastischen Verformung ist die Änderung der mechanischen Spannung proportional zum angelegten Druckunterschied [9], was beispielsweise bei piezoresistiven Drucksensoren genutzt wird. Aufgrund der Komplexität von quadratischen Membranen aus verschiedenen Schichten wurden für die in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen die Spannungsgebiete durch eine Finite Elemente-Methode (FEM) hinsichtlich der auftretenden mechanischen Spannungen simuliert. Aus dem Verlauf der mechanischen Spannungen an der Grenzfläche zwischen einkristallinen Silizium und (Gate-) Oxid sind die optimalen Positionen für die MOSFETs zu ermittelt (Abb. 1). Als Teststruktur

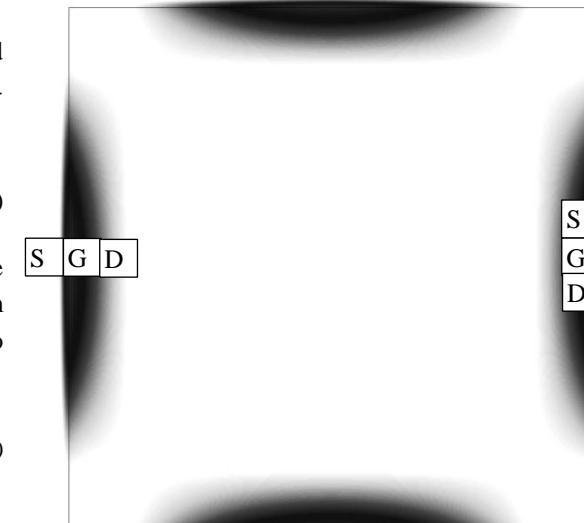


Abbildung 1: Ergebnis einer FEM Simulation zur Dimensionierung und Layoutgestaltung der Transistoren und der Membrangeometrie; die Membranfläche beträgt 1x1 mm² bei einer angenommenen Drucklast von 100 kPa.

wurden ausschließlich quadratische Membranen entworfen, da sie einerseits vier gleichartige Spannungsbereiche besitzen und somit einen direkten Vergleich zwischen verschiedenen Varianten ermöglichen, und zum anderen durch eine Brückenschaltung der Messtransistoren eine Vergrößerung der Empfindlichkeit bei gleichzeitiger Verbesserung des Temperaturverhaltens (Kompensation) bieten. Dabei ist besonders die mechanische Spannung unterhalb des Gateoxids ausschlaggebend, da sich dort das piezoresistive Wandlerelement befindet, wie in Abbildung 2 dargestellt.

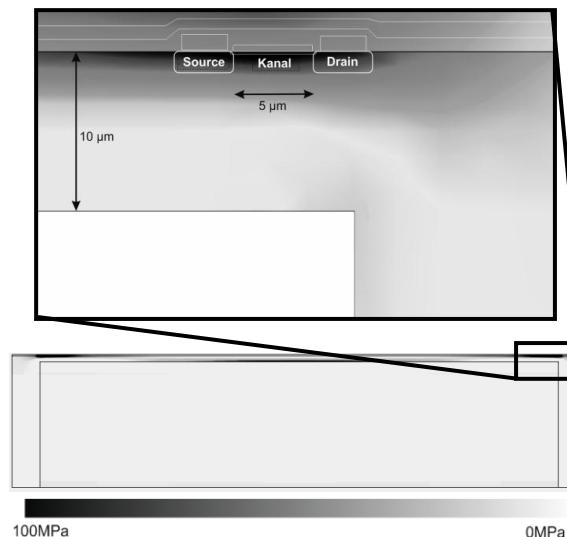


Abbildung 2: Simulationsergebnis für eine Membranfläche von $1 \times 1 \text{ mm}^2$ in Querschnittsdarstellung mit abstrahierten Transistorgebieten

Ein Unterschied zwischen MOSFETs und PRRs ist, dass MOSFETs funktionsbedingt über dem Kanalgebiet noch weitere Schichten, wie z. B. das Gateoxid, das Gate und weitere Deckschichten, besitzen. Bei PRRs hingegen ist das dotierte Gebiet auf der Oberfläche. Durch diese zusätzlichen Schichten ist eine Mindestdicke der Membran notwendig, damit sich das Kanalgebiet nicht in die neutrale Faser verlagert. Mit zunehmender Membrandicke wird die mechanische Spannung geringer, so dass ein Optimum gefunden werden muss. Dazu wurde die mechanische Spannung in Abhängigkeit der Membrandicke bei einem konstanten Druck von 1 bar simuliert und in Abbildung 3

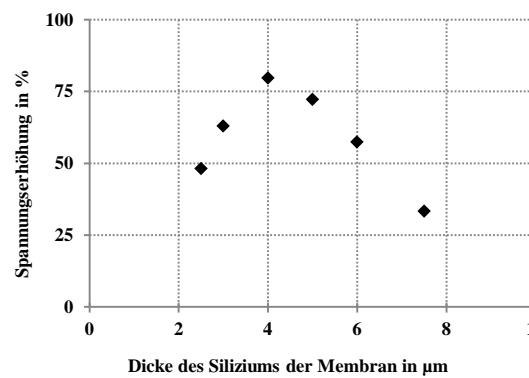


Abbildung 3: Erhöhung der mechanischen Spannung im Kanalgebiet bezogen auf die Ausgangsspannung bei der von der Technologie genutzten Membrandicke von $10 \mu\text{m}$.

dargestellt. Für diese Simulation wurde eine $1 \mu\text{m}$ MOSFET Technologie und eine $1 \times 1 \text{ mm}^2$ große Membran betrachtet. Aus der Simulation geht hervor, dass mit den angenommenen Partametern die Idealdicke der Membran $4 \mu\text{m}$ beträgt.

Für die Simulation des elektrischen Verhaltens der Messtransistoren sowie der dedizierten Frontendelektronik fand der Schaltungssimulator ELDO von Mentor Graphics® Verwendung. Bei der Simulation wird die durch die verwendete Halbleitertechnologie definierte intrinsische Beweglichkeit U_0 durch eine modifizierte spannungsabhängige Beweglichkeit U_{0m} ersetzt, wie in Gleichung 5 dargestellt.

$$U_{0m} = U_0 * (1 - \sum_{kl} \pi_{ijkl} * \sigma_{kl}) \quad (5)$$

Dabei wird der Piezokoeffizient durch die Richtung des Kanals und die Richtung der mechanischen Spannung im Siliziumkristall bestimmt. Die simulierte Technologie wird auf $\{100\}$ -Wafern prozessiert, wobei die Seitenkanten der Membran in $\{110\}$ -Richtung ausgerichtet sind. Dadurch ergeben sich als geeignete Gegenrichtungen für die Anordnung des Transistors senkrecht und parallel zur Membrankante ebenfalls die $\{110\}$ -Orientierungen. Ist der MOSFET so angeordnet, dass Kanal und Membrankante orthogonal zueinander stehen, so ist die Stromfluss- und Spannungsrichtung identisch. Der sich ergebende longitudinale Piezokoeffizient wird mit π_{\parallel} bezeichnet. Bei einer Positionierung des MOSFETs, so dass der Kanal parallel zur Membrankante verläuft, wirken Stromfluss- und mechanische Spannungsrichtung senkrecht zueinander. Diesen Fall beschreibt der transversale Piezokoeffizient π_{\perp} . In Tabelle 1 sind die für die simulierten Positionen interessanten Piezokoeffizienten aufgelistet [10].

Tabelle 1: Transversale und longitudinale (Transistorkanal parallel π_{\perp} und senkrecht π_{\parallel} zur Membrankante) Piezokoeffizienten [10]

Transistor-typ	$\pi_{\parallel} 10^{-11}\text{Pa}^{-1}$	$\pi_{\perp} 10^{-11}\text{Pa}^{-1}$	$\pi_{\text{out of plane}} 10^{-11}\text{Pa}^{-1}$
p-Kanal-MOSFET	-66,3	71,8	-1,1
n-Kanal-MOSFET	-17,6	-31,2	54,4

Aus Tabelle 1 geht hervor, dass sich der p-Kanal-MOSFET besser für eine Brückenschaltung eignet, da man ihn sowohl mit positivem als auch mit negativem Piezokoeffizienten positionieren kann. Der Einfluss der senkrecht zur Waferoberfläche gerichteten Spannung kann beim p-Kanal-MOSFET vernachlässigt werden, da der Piezokoeffizient dieser Spannungs-

richtung gegenüber den Spannungsrichtungen in der Waferebene um den Faktor 60 bzw. 65 mal kleiner ist und somit die Änderung der Ladungsträgerbeweglichkeit in dieser Richtung vernachlässigt werden kann. Daraus ergibt sich folgende Gleichung:

$$U0_m = U0 * (1 - \pi_{\parallel} * \sigma_{\parallel} - \pi_{\perp} * \sigma_{\perp}) \quad (6)$$

Betrachtet man die mechanischen Spannungen an der Membrankante in Abhängigkeit von deren Auslenkung, so stellt man fest, dass sich die Spannung in Richtung der Membrankante nicht ändert. Demnach ist es ausreichend genau den einachsigen Spannungszustand zu betrachten:

$$U0_m = U0 * (1 - \pi * \sigma) \quad (7)$$

Für qualitative Untersuchungen des Wandlereffektes wurden die Transferkennlinie, das Ausgangskennlinienfeld und der Einfluss des Kurzkanaleffektes für eine mechanische Spannung von 1 GPa simuliert.

4 Ergebnisse und Diskussionen

Die ermittelte Transferkennlinie eines p-Kanal-MOSFET ist in Abbildung 4 dargestellt. Unter Einwirkung einer mechanischen Spannung kommt es aufgrund der Erhöhung der Ladungsträgerbeweglichkeit zu einer Vergrößerung des Anstiegs $\frac{dI_D}{dU_{GS}}$ der Kennlinie um 66 %.

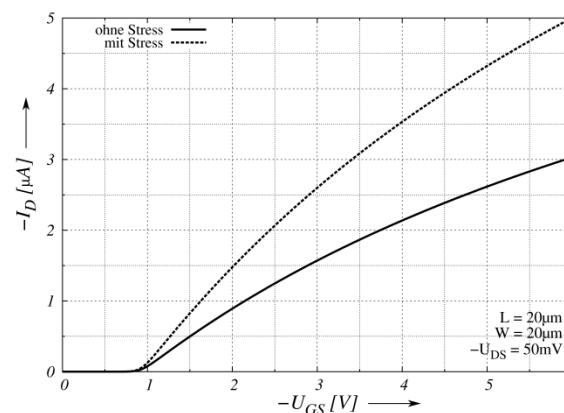


Abbildung 4: Transferkennlinie eines MOSFET im spannungsfreien Zustand und mit einer mechanischen Spannung von 1 GPa im Kanalgebiet

Das Ausgangskennlinienfeld des p-Kanal-MOSFETs zeigt, dass sich der Drainstrom unter mechanischer Spannungseinwirkung erhöht (siehe Abb. 5). Im abgeschrägten Bereich des Transistors lässt sich keine Abhängigkeit der Empfindlichkeit von der Drain-Source-Spannung feststellen. Des Weiteren ist die

prozentuale Erhöhung des Drainstroms unabhängig von der Gate-Source-Spannung. In dieser Simulation beträgt die Erhöhung des Drainstroms durch das Aufbringen einer mechanischen Spannung von 1 GPa ca. 66 %.

Ein weiteres wichtiges Kriterium für die Verwendung von MOSFETs als Sensoren ist der Einfluss der Kanallänge L sowie der Kanalweite W auf die Empfindlichkeit (Abb. 6). Es ist ersichtlich, dass eine Änderung der Kanalweite keine signifikante Variation der Empfindlichkeit zur Folge hat. Dies bedeutet, dass die Breite des Transistors ausschließlich durch die Halbleitertechnologie bestimmt wird.

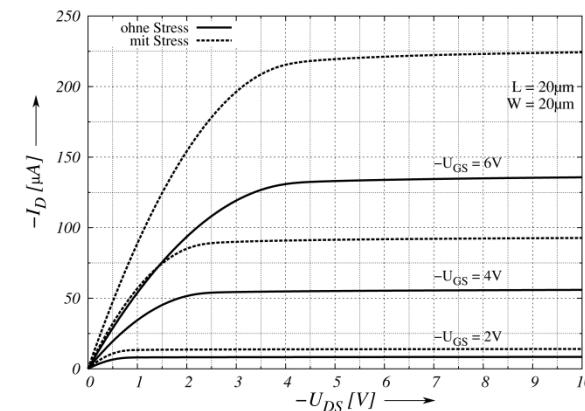


Abbildung 5: Ausgangskennlinienfeld eines FETs im spannungsfreien Zustand und mit einer mechanischen Spannung von 1 GPa im Kanalgebiet

Betrachtet man die Kanallänge, so stellt man fest, dass sich die Empfindlichkeit exponentiell einem Wert annähert. Bei einer 1 μm-Technologie sind bei einer Länge von 4 μm 90 % der Maximalempfindlichkeit (Empfindlichkeit bei einem unendlich langen Kanal) erreicht. Bei Verwendung einer kleineren Technologie kann man die Kanallänge noch weiter reduzieren, so ist z. B. bei einer 0,35 μm-Technologie

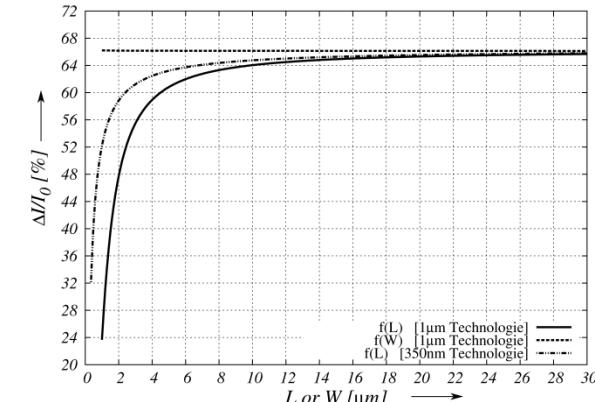


Abbildung 6: Empfindlichkeit in Abhängigkeit von der Kanallänge L und der Kanalweite W bei einer 1 μm- und einer 0,35 μm Technologie

90 % der Maxi-malempfindlichkeit schon nach 2 μm erreicht. Die Ursachen hierfür sind der Kurzkanaleffekt sowie der größer werdende Einfluss der parasitären Drain- und Source-Widerstände bei kürzeren Kanallängen [8].

5 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass MOS-Transistoren geeignet sind mechanische Spannungen im Kanalgebiet in ein elektrisches Signal zu wandeln und somit als Wandlerelement z. B. in Drucksensoren angewendet werden können. Wichtige Eingangsgrößen, wie die Gate-Source- und die Drain-Source-Spannung haben keinen oder nur einen sehr geringen Einfluss auf die Empfindlichkeit. Somit kann der Transistor optimal an die Auswerteschaltung angepasst werden, da der Drainstrom ohne eine signifikante Änderung der Empfindlichkeit eingestellt werden kann. Es konnte gezeigt werden, dass mit einer 1 μm MOSFET Technologie Wandlerelemente mit einer Kanallänge kleiner als 2 μm realisierbar sind. Bei Verwendung von Technologien mit kleineren minimalen Strukturbreiten können folglich sensitive Gebiete im Sub-Mikrometerbereich verwendet werden.

6 Danksagung

Die durchgeführten Arbeiten wurden im Teilprojekt 7 „MOS-Detektion für Nanoresonatoren“ der DFG-Forschergruppe 1713 „Sensorische Mikro- und Nanosysteme“ durchgeführt und von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanziert. Besonderer Dank gilt auch allen Beteiligten und hier nicht erwähnten Mitarbeitern des Zentrums für Mikrotechnologie und des Lehrstuhls für Elektronische Bauelemente der Mikro- und Nanotechnik.

7 Literaturangaben

- [1] Glück, M.: *MEMS in der Mikrosystemtechnik*. Wiesbaden, Teubner, 2005, S. 145
- [2] Sze, S. M. (Ed.): *Semiconductor Sensors*. New York, John Wiley & Sons, Inc, 1994, S. 153
- [3] Haronian, D.: *Direct integration of solid state stress sensors with single crystal microelectromechanical systems*. Electronics Letters 34(22), 1998, S.2171 -2173

- [4] Mostafa, S.; Lee, I.; Islam, S. K.; Eliza, S. A.; Shekhawat, G.; Dravid, V. P.; Tulip, F. S.: *Integrated MOSFET-Embedded-Cantilever-Based Biosensor Characteristic for Detection of Anthrax Simulant*. IEEE Electron Device Letters 32(3), 2011, S. 408-410
- [5] Jaeger, R. C.; Suhling, J. C.; Ramani, R.; Bradley, A. T.; Xu, J.: *CMOS Stress Sensors on (100) Silicon*. IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 35(1), 2000, S. 85-95
- [6] Seeger, K.: *Semiconductor Physics, An Introduction*. Berlin, Springer, 5. Auflage. 1991, S. 97-102
- [7] Lui, W.; Jin, X.; Xi, X.; Chen, J.; Jeng, M.-C.; Liu, Z.; Cheng, Y.; Chen, K.; Chan, M.; Hui, K.; Huang, J.; Tu, R.; Ko, P. K.; Hu, C.: *BSIM3v3.3 MOSFET Model, Users' Manual*. University of California. Berkeley, 2005
- [8] Wacker, N.; Richter, H.; Hassan, M.; Remp, H.; Burghartz, J. N.: *Compact modeling of CMOS transistor under variable uniaxial stress*. Solid-State Electronics 57, 2011, S. 52-60
- [9] Gerlach, G.; Dötzl, W.: *Grundlagen der Mikrosystemtechnik*. München, Hanser, 1997, S. 181
- [10] Gallon, C.; Reimbold, G.; Ghibaudo, G.; Bianchi, R. A.; Gwoziecki, R.: *Electrical analysis of external mechanical stress effects in short channel MOSFETs on (001) silicon*. Solid-State Electronics 48(4), 2004, S. 561–566