Untersuchungen an hochfrequenten Dünnschicht-Schwingern für zukünftige Phased-Array-Sensoren

T. HERZOG, H. HILLMANN, S. WALTER, H. HEUER Fraunhofer Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren, IZFP-D, Dresden Thomas.Herzog@izfp-d.fraunhofer.de

Kurzfassung. Für die zukünftige Entwicklung von hochfrequenten Phased-Array-Ultraschallsensoren mit Frequenzen oberhalb von 50 MHz sind die konventionellen PZT-Keramiken nur schwierig zu verarbeiten. Insbesondere die Herstellung von sehr homogenen PZT-Schichten mit Dicken von ca. 20 µm lässt sich mit den klassischen Dickschichtdruckverfahren sowie Sol-Gel-Technologien kaum realisieren. Wenn ein kompletter Sensor auf Basis mikrosystemtechnischer Technologien hergestellt werden soll, ist das bleihaltige PZT zusätzlich nicht einfach in den Prozessfluss zu integrieren. Das Aluminiumnitrid besitzt zwar gegenüber den PZT-Keramiken einen um mindestens eine Zehnerpotenz geringeren piezoelektrischen Koeffizienten, ist aber aufgrund seiner CMOS- Kompatibilität und dem bei höheren Frequenzen geringerem Verlustfaktor ein vielversprechendes piezoelektrisches Material.

Aus diesem Grunde wurden Untersuchungen zur Schichtabscheidung von AlN auf Siliziumsubstraten durchgeführt und mittels mechanischer sowie elektroakustischer Messungen optimale Prozessparameter ermittelt. Für die Bewertung der piezoelektrischen Dünnschichten wurde ein einfaches Testlayout entworfen und ein spezieller Messplatz zur akustischen Untersuchung im Impuls-Echo-Modus aufgebaut. Die Mikrostrukturanalyse und XRD-Messungen betätigen den Zusammenhang zwischen Kristallausrichtung und gemessenen Amplituden im Impuls-Echo-Verfahren sowie mit einem Berlincourt-Meter bestimmter d₃₃-Werte. AlN konnte erfolgreich bis 10µm abgeschieden werden und es wurde nachgewiesen, dass die d33-Messung für eine schnelle Beurteilung des Abscheidungsprozesses geeignet ist.

1. Einführung

Neue 3-dimensional integrierte elektronische Baugruppen, die nächsten Generationen von strukturierten Leichtbaumaterialien wie kohlefaserverstärkte Kunststoffe (CFK) und andere komplexe mehrschichtige Komponenten erfordern neue Ansätze für die zerstörungsfreien Prüftechniken. Ultraschall-Mikroskope werden häufig wegen ihrer Vielseitigkeit und Effizienz zur zerstörungsfreien Prüfung mikrotechnischer Komponenten und Strukturen verwendet. Die Effizienz der herkömmlichen Mikroskope könnte durch eine Kombination mit Hochfrequenz-Phasen-Array (PA)-Techniken verbessert werden. Mit der Verwendung von segmentierten Wandlern (~ in Pixel aufgeteilt Sensoren) ist es möglich, die gesamte Volumen der Probe in drei Dimensionen zu bewerten. Der Vorteil besteht darin, dass der Ultraschall-Wandler nicht mechanisch durch einen Scanner manipuliert werden müsste. Die Form und die Schallstrahl-Richtung kann in großem Umfang gesteuert werden, da jedes der Array-Elemente mit entsprechenden Zeitverzögerungen angeregt werden kann. Derzeitige



PA-Ultraschall-Sensoren arbeiten in der zfP mit Frequenzen bis 20 MHz, aber Frequenzen über 50 MHz sind für die Anwendungen, die eine hohe Auflösung erfordern, notwendig.

Die benötigten hohen Frequenzen erfordern eine sehr geringe Wandlerdicke und kann nicht mit herkömmlichen Materialien wie piezoelektrische PZT-Keramik, Piezo 1-3-Kompositen oder Polymeren wie Polyvinylidenfluorid (PVDF) realisiert werden. Eine vielversprechende Alternative bietet das piezoelektrische Material Aluminiumnitrit (AlN). Aluminiumnitrid ist ein piezoelektrisches aber nicht ferroelektrisches Material mit einer Wurtzit-Kristallstruktur. In der Literatur wird die Herstellung von piezoelektrischen Elementen für den Einsatz als mikromechanisches bzw. mikrooptomechanisches Element auf Basis von AlN beschrieben. Auch zum Einsatz als Filter- oder Resonatorbauelement im GHz-Bereich sind mehrere Veröffentlichungen bekannt. [4,5]



Abbildung 1: AlN-Schicht von 10 µm Dicke auf Siliziumträgermit deutlicher c-Achsenorientierung

Im Vergleich zu den weit verbreiteten ferroelektrischen

Materialien wie PZT. braucht AlN nicht elektrisch gepolt werden. Bei derartigen Dünnschichten mit polykristalliner allerdings Struktur ist eine ausgeprägte Kristallorientierung notwendig, um eine messbare piezoelektrische Aktivität $\mathbf{Z}\mathbf{H}$ erreichen. AIN Dünnschichten weisen einen ausgeprägten piezoelektrischen Effekt in Dickenrichtung auf wenn die spezifische Kristallorientierung eine deutliche

c-Achsenorientierung aufweist, also die Kristalle möglichst senkrecht auf der Substratoberfläche aufwachsen (Abbildung 1). Das AlN in diesem Zustand weist mehrere attraktive Eigenschaften auf, die in verschiedenen Publikationen und in eigenen experimentellen Arbeiten überprüft wurden:

- Piezoelektrischer Kopplungskoeffizient von 20 %
- Piezoelektrische Konstante d₃₃ von etwa 8 pm / V
- Piezoelektrische Konstante g₃₃ von etwa 100 MVm / N
- Hohe Schallgeschwindigkeit für Longitudinalwellen 10700 m / s
- Hohe Spannungsfestigkeit von bis zu 20 MV / cm
- Niedrige Dielektrizitätskonstante von 8,6
- Hoher elektrischer Widerstand von mehr als $10^{11} \Omega$ cm
- Hohe Temperaturbeständigkeit (bis 1000 ° C).

Durch den Einsatz von piezoelektrischen Dünnschichten, die eine hervorragende Kompatibilität zu den Halbleiter- und Mikroelektroniktechnologien aufweisen, ist ein Mikrostrukturhvbrider Sensoraufbau möglich. Die verschiedenen und Trockenätzverfahren können optimal mit den Wafer-Level-Packaging-Technologien verknüpft Auf diese die Herstellung hochintegrierter werden. Weise ist Mehrelementsensoren für Frequenzen oberhalb 50 MHz möglich. Bei Verfügbarkeit hochfrequenter Ultraschallsensorsysteme derartiger könnten die Vorteile von Ultraschallmikroskopie und Gruppenstrahlertechnik verknüpft werden.

2. Experimente und Konzeption einer Teststruktur

Die bekannten Beschichtungsverfahren haben den Nachteil, dass die maximalen Beschichtungsraten bei ca. 10 nm/min für HF-Energieeinspeisung liegen [1, 2]. Für die Herstellung von 10 μ m – 20 μ m dicken Schichten, wie sie für die hochfrequenten Ultraschallwandler benötigt werden, sind diese Verfahren nicht effektiv genug. Gleichzeitig ist darauf zu achten, dass die inneren Spannungen der abgeschiedenen Schichten nicht zu groß werden, um eine gute Haftung auf dem Elektrodenmaterial bzw. dem Substrat zu erreichen. Mit dem am Fraunhofer FEP entwickelten Sputtern mit einem Doppelring-Magnetron ist dafür eine vielversprechende Lösung [7]. Durch eine gezielte Variation der Abscheidungsparameter und Analyse der Kristallorientierung mittels XRD sowie durch die elektromechanische Charakterisierung sollten die Schichteigenschaften optimiert werden. Dafür wurde zunächst ein einfaches Testlayout als Einelementschwinger entwickelt, mit dem eine Untersuchung der folgenden Punkte möglich war:

- Charakterisierung des elektrischen und elektromechanischen Verhaltens der Sensoren

- Optimierung Abscheidungsparameter
- Ermittlung der maximal möglichen Schichtdicke
- Beurteilung Haftfestigkeit
- Beurteilung der Größe und Beeinflussbarkeit der Schichtspannungen



Abbildung 2: Layout der Teststruktur eines einzelnen Schwingers und Querschnitt

Für dieses Testlayout wurde, wie schematisch in Abbildung 2 gezeigt, auf einem passivierten Siliziumwafer eine Elektrodenstruktur mit einem Durchmesser von 10 mm und einer Leiterbahn mit einem Pad späteren Kontaktierung zur aufgebracht. Dann folgten eine ebenfalls kreisförmige AlN-Struktur mit einem Durchmesser von 13 mm und eine weitere Elektrodenstruktur für die

Kontaktierung der Oberseite. Die Fläche des abgeschiedenen Sensors wurde im Durchmesser größer dimensioniert worden als die Elektroden selbst, da bei der Beschichtung Randeffekte auftreten, die die folgenden Messungen beeinträchtigen würden. Als Material für die Masken wurde 630 µm dickes Aluminiumoxid gewählt. Die auch auf der Maskenoberfläche abgeschiedenen Schichten erzeugen hohe mechanische Spannungen, die zu einer Verwölbung führen kann, daher müssen die Masken eine hohe Steifigkeit aufweisen.

Nach der Optimierung des Dünnschicht-Abscheideprozesses wurden zusätzliche Prüfkörper mit neuen Substratmaterialien, aber gleichen Geometrien, erzeugt. Verschiedene Trägermaterialien wie Aluminiumoxid, Glas, Quarz und Aluminium, die für den Sensoraufbau wichtig sind, wurden hergestellt. Aufgrund der unterschiedlichen mechanischen und akustischen Eigenschaften (Ausdehnungskoeffizienten, Oberflächenenergie, Steifigkeit, Poissonkonstante, Dämpfung, etc.) sollten diese auf ihre Verwendbarkeit geprüft und der Einfluss auf das Sensorverhalten untersucht werden.

Elektromechanische Charakterisierung im Impuls-Echo-Modus

Für piezoelektrische Keramiken wird die elektromechanische Charakterisierung anhand der elektrischen Impedanz-Messung durchgeführt. Aus dem Kurvenverlauf von Betrag und Phase kann direkt die Resonanzfrequenz abgelesen werden. Durch die hier gewählte Materialkombination erhält man für AlN-Schichten nur einen Impedanzverlauf, wie er für kapazitive Materialien typisch ist, die Resonanzfrequenz kann daran nicht abgelesen werden. Für eine Aussage zur Qualität des piezoelektrischen Effektes wurden aufgrund dessen ein Messplatz zur akustischen Untersuchung im Impuls-Echo-Modus aufgebaut. Beim Impuls-Echo-Verfahren dient der AlN-Einzelschwinger als Sender und Empfänger. Die bei Beaufschlagung mit einem elektrischen Spannungsimpuls ausgesendete Schallwelle breitet sich nahezu ungehindert im Silizium-Substrat aus, trifft dann an der Unterseite auf die Grenzfläche Silizium-Luft, an der die Schallwelle reflektiert wird und wieder zur AlN-Schicht gelangt (Abbildung 3). Dort wird dieser mechanische Impuls wieder in ein elektrisches Signal umgewandelt, das analysiert werden kann. Zur Ansteuerung des Sensors wurde der Pulser DPR 500 von JSR Ultrasonics verwendet und die empfangenen Signale mit der Agilent Digitizer Karte U1071A aufgenommen. Die Darstellung und Analyse erfolgte mit einem dazu entwickelten Labview Programm.



Abbildung 3: Messaufbau für die Impuls-Echo-Messungen

Zur Bewertung der Qualität der AlN-Dünnschicht in Abhängigkeit von den Abscheidungs-parametern wurden die maximalen Amplituden des empfangenen Spannungssignals ausgewertet. Abbildung 4 zeigt einen typischen Zeitverlauf mit mehreren Rückwandechos. Um einen Einfluss des Sendesignals zu vermeiden, wurde nicht das erste Rückwandecho sondern jeweils das vierte bewertet. Die gemessenen Spannungs-Werte wurden auf absolute Spannungswerte ohne Verstärkung für eine bessere Vergleichbarkeit umgerechnet



Messungen der piezoelektrischen d33-Konstante

Die piezoelektrische Ladungskonstante d₃₃ wurde mit einem konventionellen Berlincourt-Meter (*Piezotest PM300*) bestimmt. Die Proben wurden eingespannt und mit einer alternierenden Kraft belastet. Die dabei erzeugte elektrische Ladung wird mit der einer internen Referenzprobe verglichen und daraus der d₃₃-Wert berechnet. Die Messungen wurden bei Anlegen einer Wechselspannung Kraft von 0,25 N und einer Frequenz von 110 Hz durchgeführt, vgl. [7]. Die mechanische Spannung der Dünnschicht auf dem jeweiligem Substratmaterial als auch die Geometrie spielen ebenfalls eine wichtige Rolle. Die relativ großen Durchmesser der Dünnschichtsensoren im Vergleich zu den dünnen Schichtdicken haben einen Einfluss auf die d33-Messung mit dieser Methode.



Abbildung 5: Prinzip des Berlincourt-Meters

3. Ergebnisse

Ergebnisse der Charakterisierung der Dünnschichten

Mittels mikroanalytischer Verfahren und anhand der XRD-Messungen sind für die verschiedenen Abscheidungsparameter die jeweiligen Einzelschwinger charakterisiert worden. Wie in Abbildung 6 ersichtlich ist, kann man an bei der XRD-Messung an den gemessenen Peaks erkennen, in welcher Orientierung das AlN auf dem Silizium abgeschieden wurde.



Abbildung 6: Rasterelektronenbild (links) und XRD-Messung (rechts) einer AlN Schicht mit sehr guten piezoelektrischen Eigenschaften, die sich durch eine dichte feinkristalline Struktur mit hoher c-Achsenorientierung auszeichnet

Es konnte ein Zusammenhang zwischen der Kristallstruktur, den XRD-Messungen und den piezoelektrischen Eigenschaften der AlN-Schichten nachgewiesen werden. Eine säulenartige Struktur, die senkrecht zur Substratoberfläche ausgerichtet ist und eine ebene Oberflächenbeschaffenheit weisen auf eine hohe c-Achsenorientierung sowie gute piezoelektrische Eigenschaften hin. Zum Vergleich dazu zeigt Abbildung 7 eine poröse Schicht mit eher geringer c-Achsenorientierung.



Abbildung 7: Rasterelektronenbild (links) und XRD-Messung (rechts) einer AlN Schicht mit vergleichweise schlechten piezoelektrischen Eigenschaften, die sich durch eine poröse Struktur mit geringerer c-Achsenorientierung auszeichnet

Ergebnisse der Optimierung der Abscheidungsparameter

Es wurden die AlN-Einelementschwinger an einen Pulsgenerator angeschlossen und mit einem Nadelimpuls angeregt. Der Receiver wurde auf eine Empfangsverstärkung von 36 dB sowie einem Hochpassfilter zwischen 30 MHz und 500 MHz eingestellt. Der Pulsgenerator liefert ein Signal mit hoher Amplitude (-230 V) sowie kurzer Impulsweite (1,5 ns). Man erkennt im Impuls-Echo-Modus deutlich die Rückwandechos (Abbildung 4) von der Siliziumunterseite, die in ihrem zeitlichen Abstand der Dicke des Siliziums bezogen auf die Schallgeschwindigkeit entspricht. Auch die sehr geringe akustische Dämpfung von Silizium ist aus dem langsamen Abfall der Impulshöhen ersichtlich. Da die Schalleigenschaften und Dicken der einzelnen Silizium-Wafer annähernd konstant sind, kann man diese Echosignale auswerten, um die gesendete Schallintensität der verschiedenen Schwingerelemente zu vergleichen. Die unterschiedlichen Sende- und



Abbildung 8: Vergleich der gemessenen Signalverläufe des Rückwandechos vom Silizium für Schwinger mit optimierten und nicht optimierten Beschichtungsparametern

Empfangseigenschaften der Schwinger, resultieren aus unterschiedlichen Eigenschaften der AlN-Schichten, folglich aus den verschiedenen Abscheidungsparametern mit ansonsten konstanten geometrischen Abmaßen. Die Variation der Beschichtungsparameter wurden am Fraunhofer FEP durchgeführt und die entstandenen Sensoren am Fraunhofer IZFP charakterisiert. Die gemessenen Amplituden wurden mit der Strukturanalyse sowie den XRD-Messungen vergleichen.

Auch die Messungen des piezoelektrischen Koeffizienten d_{33} konnten mit den gemessenen Amplitudenhöhen korreliert werden. Der gemessene d_{33} -Wert ist nicht der tatsächlich d_{33} -Wert der AlN Dünnschicht, da dieser Wert aus der genannten Klemmung des Dünnschichtwandlers auf dem Substrat resultiert. Trotzdem gestattet das d_{33} -Messgerät eine Abschätzung der Dünnschichtqualität des AlN für eine sehr schnelle Prozesskontrolle.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass eine Parameteroptimierung zu einer erheblichen Verbesserung der Effektivität der Sensoren beiträgt (Abbildung 8), aber die Beschichtungsparameter keine direkten funktionellen Abhängigkeiten zur piezoelektrischen Aktivität des Materials aufweisen. Vielmehr wurden zwei Parametersätze für die Beschichtung ermittelt, die zu AlN-Schichten mit sehr guten piezoelektrischen Eigenschaften führen (**Tabelle 1**). Der größte Unterschied der beiden Parametersätze ist der Betriebsmodus der Doppelring-Magnetron-Sputteranlage. Es kann sowohl der unipolare als auch der bipolare Modus verwendet werden, je nach gewünschter oder möglicher Intensität der Bombardierung des Substrates mit den AlN-Ionen. Beim unipolaren Modus wird eine gepulste Gleichspannung jeweils zwischen zwei Targets und einer separaten abgeschirmten Anode geschalten. Beim bipolaren Modus werden zwei Targets verwendet und die Spannung mit wechselnder Polarität nur zwischen diesen geschaltet.

	Unipolar Modus	Bipolar Modus
Abscheiderate	3,5 nm/sec	2,5 nm/sec
Mech. Spannungen	-1 GPa	-2 GPa
Durchbruchfeldstärke	2.3 MV/cm	3.1 MV/cm
Kristallorientierung	002 (99,9 %)	002 (99,9 %)
Spezf. elektr. Widerstand	5.3 E+12 Ωcm	1.2 E+13 Ωcm
Dichte	3,16 g/cm3	3,20 g/cm3
d33	6,5 pm/V	7,2 pm/V
Schichtspannung	- 1 GPa	-2 GPa

Tabelle 1. Optimierte Beschichtungsparameter für c-Achsen orientiertes AlN (Quelle: FEP)

Ergebnisse der Variation der Substratmaterialien

Eine akzeptable piezoelektrische Aktivität könnte auf einer Vielzahl von Trägermaterialien die in der Elektronikfertigung üblich sind, in früheren Untersuchungen [7] geprüft werden.



Abbildung 9: d33-Werte für AlN Dünnschichten mit verschiedenen Substraten

Auch hier ist ein deutlicher Einfluss der Klemmung der Dünnschicht auf dem Substratmaterial zu beobachten. In jedem Fall wird eine zusätzliche Spannung in planarer Richtung induziert, aufgrund der Einspannung der Dünnschicht auf dem Substrat und aufgrund des sehr geringen Verhältnisses von Schichtdicke zum Durchmesser. Daher hängen die gemessenen d₃₃-Werte zusätzlich auch noch von der Poisson-Konstante des Substratmaterials ab. Die eher harten Materialien, die eine geringere Poisson-Konstante und einen geringeren Ausdehnungskoeffizienten (z.B. 2,0 für Silizium und 23,0 für Aluminium α in [10⁻⁶/K]) haben, zeigen auch niedrigere d₃₃-Messergebnisse.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden grundlegende Untersuchungen an der piezoelektrischen Dünnschicht Aluminiumnitrid (AlN) durchgeführt. Für die Bewertung der piezoelektrischen Dünnschichten wurde ein einfaches Testlayout entworfen und ein Messplatz zur akustischen Untersuchung im Impuls-Echo-Modus aufgebaut. Mittels mikroanalytischer der XRD-Messungen Verfahren und anhand sind für die verschiedenen Abscheidungsparameter die jeweiligen Einzelschwinger charakterisiert worden. Es konnte ein Zusammenhang zwischen der Kristallstruktur, den XRD-Messungen und den piezoelektrischen Eigenschaften der AlN-Schichten nachgewiesen werden. Beim Impuls-Echo-Verfahren wurde nachgewiesen, dass das unterschiedliche Sende- und Empfangsverhalten der Schwinger aus den unterschiedlichen piezoelektrischen Eigenschaften der AlN-Schichten, folglich aus den verschiedenen Abscheidungsparametern, resultiert. Die Schichten konnten bezüglich ihrer piezoelektrischen Eigenschaft über die Höhe der jeweiligen Impulsamplituden der Echos ausgewertet und verglichen werden. Auch die d₃₃-Messungen sind für eine qualitative Beurteilung der Schichtqualität verwendbar und eine optimale Lösung zur schnellen Prozesskontrolle.

In den Versuchen stellte sich heraus, dass für die Abscheidungsparameter nur ein relativ kleines Prozessfenster zur Herstellung von deutlich c-achsenorientierten Schichten mit sehr guten piezoelektrischen Eigenschaften vorhanden ist. Zwei Parametersätze wurden für die Beschichtung ermittelt, die zu AlN-Schichten mit sehr guten piezoelektrischen Eigenschaften führen. In weiterführenden Untersuchungen sollen die Einflüsse unterschiedlicher Elektrodengrößen und Schichtdicken der Schwinger ermittelt sowie Verfahren zur Schichtstrukturierung vergleichen werden. Somit sollen verschiedene Varianten eines Designs und unterschiedliche Anwendungsfelder der zukünftigen Phased-Array-Sensoren getestet werden.

DANKSAGUNG

Diese Arbeit wurde teilweise durch einen Grant-in-Aid für Technologie- Förderung durch den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) 2007-2013 und durch das Land Sachsen sowie durch die Fraunhofer-Gesellschaft unterstützt. Vielen Dank auch an Fraunhofer-Institut für Elektronenstrahl- und Plasmatechnik FEP in Dresden für die AlN-Abscheidung und Mikro-Analysen mittels REM und XRD.

Referenzen

- J.X. Zhang, Y.Z. Chen, H. Cheng, A. Uddin, Shu Yuana, K. Pita, T.G. Andersson, Thin Solid Films 471 (2005) 336-341.
- [2] F. Engelmark, G.F. Iriarte, I.V. Katardjiev, M. Ottosson, P. Muralt, S. Berg, J. Vac. Sci. Technol. A 19 (2001) 2664-2669.
- [3] Akiyama, M., Nagao, K., Ueno, N., Tateyama, H., Yamada, T., "Influence of Metal Electrodes on Crystal Orientation of Aluminum Nitride Thin Films", Vacuum, Vol. 47, 699-708 (2004)
- [4] Iborra, E., Clement, M., Olivares, J., González-Castilla, S., Sangrador, J., Rimmer, N., Rastogi, A., Ivira, B., Reinhardt, A., "BAW Resonators Based on AlN with Ir Electrodes for Digital Wireless Transmissions", 2008 IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings, 2189-2192 (2008)
- [5] Valbin, L., Sevely, L., "Piezoelectric Aluminum Nitride Thin Film for Ultrasonic Transducers", MEMS Components and Applications for Industry, Automobiles, Aerospace and Communication, Proceedings of SPIE, Vol. 4559, 95-102 (2001)
- [6] Martin, P..M., Good, M.S., Johnston, J.W., Posakony, G.J., Bond, L.J., Crawford, S.L., "Piezoelectric Films for 100 MHz Ultrasonic Transducers", Thin Solid Films, Vol. 379, 253-258 (2000)
- [7] Bartzsch, H, Gittner, M., Gloess, D., Frach, P., Herzog, T., Walter, S., Heuer, H., "Properties of piezoelectric AlN layers deposited by reactive pulse magnetron sputtering", Proceedings of the 2011 Technical Conference of the Society of Vacuum Coaters, 16-31 April 2011
- [8] S. Walter, T. Herzog, and H. Heuer. "Investigations on aluminum nitride thin film properties and design considerations for smart high frequency ultrasound sensors," The Second International Conference on Smart Sensor, Actuators and MEMS, Prague, Czech Republic, April 18-20, 2011.
- [9] T. Herzog, S. Walter and H. Heuer: "Investigations on aluminum nitride thin film properties and design considerations for smart high frequency ultrasound sensors", proceeding of the SENSORDEVICES 2011 August 21-27, 2011 - French Riviera, Nice/Saint Laurent du Var, France
- [10] T. Herzog, S. Walter, S. Hillmann, H. Heuer "Aluminum Nitride Thin Films for High Frequency Smart Ultrasonic Sensor Systems", 18th World Conference on Nondestructive Testing, 16-20 April 2012, Durban, South Africa