

Titannitrid- und Titan-Schichten für die Nano-Elektromechanik

Von der Fakultät Maschinenbau der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktors der
Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Marcus Pritschow

aus Stuttgart

Hauptberichter:	Prof. Dr. rer. nat. B. Höfflinger
Mitberichter:	Prof. Dr. rer. nat. H. Kück
Tag der mündlichen Prüfung:	29. März 2007

Institut für Mikroelektronik Stuttgart

2007

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	5
Abstract	6
1 Einleitung	7
2 Stand der Technik	10
3 Materialeigenschaften und Herstellung	17
3.1 Das Material	17
3.1.1 Titan	17
3.1.2 Titannitrid	17
3.2 Physical Vapour Deposition	20
3.2.1 Sputtern	21
3.2.2 Reaktives Sputtern	24
3.2.3 Hysterese-Effekt	25
3.2.4 Von Titan zu Titannitrid	27
4 Materialgefüge und Schichtspannung	29
4.1 Schichtwachstum	29
4.1.1 Strukturzonenmodelle	31
4.1.2 Texturentwicklung von polykristallinem TiN	34
4.1.3 Effekt der Ioneneinstrahlung	38
4.2 Oxidationsverhalten von Titannitrid	38
4.3 Schichtspannungen	42
4.4 Methoden zur Spannungsmessung	45
4.4.1 Substratkrümmung	45
4.4.2 Biegebalken	48
4.4.3 Knickbalken	50
4.4.4 Balkendehnungsanzeigen	51
4.4.5 Darstellung von Spannungswerten	52

5	Ergebnisse mit vollflächigen Schichten	54
5.1	Bestimmung der Prozessparameter	55
5.2	TiN-Matrix	60
5.2.1	Texturunterschiede	60
5.2.2	Einfluss der Substrattemperatur	64
5.2.3	Einfluss der Schichtdicke	67
5.2.4	Alterung in O ₂ - und N ₂ -Atmosphären	71
5.2.5	Reflexionsvermögen	78
5.3	Doppelschichtsysteme	81
6	Ergebnisse mit freistehenden Mikrobalken	85
6.1	Herstellung mikromechanischer Teststrukturen	85
6.1.1	Lithographie	85
6.1.2	Anisotropes TiN-Ätzen	86
6.1.3	Isotropes Siliziumätzen	95
6.2	Balkenbiegung	98
6.2.1	Einfluss der Schichtdicke	99
6.2.2	Doppelschicht-Mikrobalken	102
6.3	Technische Bauformen für TiN-Nanoschalter	107
6.4	Abschlussbemerkungen und Ausblick	109
7	Zusammenfassung	110
	Abkürzungsverzeichnis	112
	Literaturverzeichnis	115
	Danksagung	129
	Lebenslauf	130

Kurzfassung

Auf dem Gebiet der mikro- und besonders der nanoelektromechanischen Systeme (MEMS/NEMS) gibt es viele neue Entwicklungen. In Kombination mit metallischen Funktionsschichten, die monolithisch in die Metallisierungsebenen von CMOS-Schaltkreisen integriert werden, haben sie großes Potenzial für neue Anwendungen. Entscheidend für diese Integration sind Materialien, die kompatibel zu den CMOS-Fertigungsprozessen sind und gute mechanische und elektrische Eigenschaften besitzen. Aus diesem Grund sind Titan und speziell Titannitrid (TiN) attraktive Werkstoffe. Sie werden hauptsächlich als Diffusionsbarriere in der Aluminium- und Kupfermetallisierung oder als Antireflexionsschicht in der optischen Lithographie eingesetzt. Über die Wechselwirkung unterschiedlicher Herstellbedingungen auf die Materialeigenschaften in mikro- und nanomechanischen Anwendungen ist aber bisher wenig veröffentlicht.

In der vorliegenden Arbeit wurde das DC-Magnetron-Sputtern von dünnen Titan- und TiN-Schichten systematisch untersucht. Ein Schwerpunkt war die Fragestellung, wie die Schichtspannung und der spezifische Widerstand über einen weiten Bereich mit den Sputterparametern kontrolliert werden kann. Allgemein wurde festgestellt, dass ein Kompromiss zwischen geforderter Schichtspannung und elektrischem Widerstand der gesputterten Materialien geschlossen werden muss. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein zweistufiger Abscheideprozess entwickelt, der sich als vielversprechend für die Einstellung und Kontrolle der Materialspannungen erwiesen hat. Dieser Prozess wurde zur Fertigung von strukturierten Mikrobalken mit verschiedenen Kombinationen aus Titan und Titannitrid eingesetzt und getestet. Die Möglichkeit, Zugspannungen in reinem Titan zu erzeugen, stellte ein zuverlässiges Mittel zur Kompensation der Druckspannungen des Titannitrids dar. Je nach Verhältnis der Schichtdicken im Zweischichtsystem konnten damit die resultierenden Spannungen zwischen Zug und Druck eingestellt werden. Das ermöglicht Mikroaktuatoren mit maßgeschneiderten elektromechanischen Eigenschaften. Als Beispiel wurden elektrostatische Schalter aus Mikrobalken mit einer Dicke von 100 nm und einer Breite von 500 nm hergestellt, die Grundelemente hochintegrierter elektromechanischer Nanorelais sein können.

Abstract

There have been many recent developments in microelectromechanical and especially nanoelectromechanical systems (MEMS/NEMS). They have shown great potential for new applications when combined with the monolithic integration of metallic functional layers in CMOS backend metallisation schemes. To achieve this integration, materials that are compatible with the CMOS backend processing and possessing good mechanical and electrical properties are critical. Titanium and in particular titanium nitride (TiN) are attractive for these reasons. These materials are currently known as a diffusion barrier in the aluminium and copper metallisation schemes and as an antireflective coating in optical lithography. Little work has been reported investigating the interaction of the process fabrication conditions on the properties of these materials in micro- and nanomechanical applications.

In this thesis the DC magnetron sputtering of thin titanium and titanium nitride films has been studied systematically. The main characterisation was to establish how the film stress and resistivity could be controlled over a wide range of sputtering parameters. Overall, it was found that, a compromise has to be made between the required film stress and the desired electrical resistivity of the sputtered materials. In the course of the work, a two-step deposition process was developed and shown to be promising for the adjustment and control of the deposited material stresses. This deposition process has been applied to the fabrication of structured microbeams with various combinations of titanium and titanium nitride layers. The ability to create a tensile stress in pure titanium was shown to provide a means of compensating the compressive stress of the titanium nitride. Depending on the thickness ratio the resultant stresses could be adjusted between tensile and compressive in the two-layer system. This leads to microactuators with tailor-made electromechanical properties. As an example electrostatic switches with 100 nm thick and 500 nm wide microbeams were fabricated. These structures could form the basis of mechanical elements in highly integrated electromechanical nanorelays.

Kapitel 1

Einleitung

Im Jahre 1959 hielt der Physiker Richard Feynman einen visionären Vortrag mit dem Titel „There’s Plenty of Room at the Bottom“ [1]. Er legte damit nicht nur den Grundstein für die Nanotechnologie, sondern erkannte auch das enorme Potenzial der Mikrofertigung. Er nahm darin ein Spektrum wissenschaftlicher und technischer Gebiete vorweg, die heute voll etabliert sind, wie z. B. Elektronen- und Ionenstrahlverfahren, Molekularstrahlepitaxie, Nanoimprint-Lithographie, Elektronenmikroskopie, Manipulation einzelner Atome, Quantenelektronik und die Mikrosystemtechnik (engl: Microelectromechanical Systems, MEMS).

Innerhalb weniger Jahrzehnte hat sich die Mikrosystemtechnik (MST) zu einer Schlüsseltechnologie entwickelt. Ein Mikrosystem besteht aus Sensoren, Aktuatoren und Komponenten zur Ansteuerung bzw. Signalverarbeitung, deren funktionsbestimmende Elemente Dimensionen von weniger als 1 mm bis hinab zu 1 μm haben [2]. Die Mikroaktuatoren und -sensoren werden vorzugsweise mit Strukturierungstechniken hergestellt, die aus der Fertigung mikroelektronischer Bauelemente in der Silizium-Planartechnologie bekannt sind und eine wirtschaftliche Fertigung im Scheibenverbund erlauben, wie z. B. die CMOS-Technologie (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor). Bei monolithisch integrierten Mikrosystemen muss die Trennung der Prozessmodule von integrierter Schaltung (engl: Integrated Circuit, IC) und Mikromechanik aufgehoben werden. Das ermöglicht Mikrosysteme, die im Vergleich zu konventionellen Systemen extrem geringe Abmessungen, höhere Zuverlässigkeit und erweiterte bzw. neuartige Funktionen haben. Als Voraussetzung dafür müssen die Fertigungsprozesse, Materialien und Versorgungsspannungen der Aktuatoren und Sensoren CMOS-kompatibel sein. Für die Integration von Mechanik und Elektronik gibt es verschiedene Strategien, die sich dadurch unterscheiden, an welcher Stelle des CMOS-Prozesses die Mikromechanikkomponenten gefertigt werden [3]. Die Integrationsstrategie ergibt sich aus der Forderung nach sinkenden Herstellungskosten sowie reduzierter Komplexität des Gesamtprozesses, um preiswerte und wettbewerbsfähige Mikrosysteme auf den Markt zu bringen.

Elektrostatisch angetriebene Aktuatoren benötigen relativ hohe Ansteuerspannungen, aber nur wenig elektrische Leistung. Mikroschalter bzw. Mikrorelais sind typische Beispiele für elektrostatische Aktuatoren. Je nach Größe sind zum Schalten einige zehn bis mehrere Hundert Volt notwendig [4]. Diese Spannungen liegen deutlich über den typischerweise in integrierten Schaltungen verfügbaren Versorgungsspannungen. Durch eine Verkleinerung des Mikroschalters kann eine Verringerung der Schaltspannung erreicht werden. Die Schaltspannung U_{pi} ergibt sich aus der Federkonstante k des beweglichen Balkenelements, der Kontaktfläche A der sich berührenden Elektroden, dem Elektrodenabstand z und der Dielektrizitätskonstante ϵ des umgebenden Mediums [5]:

$$U_{pi} \propto \frac{k \cdot z^3}{A \cdot \epsilon} \quad \text{mit} \quad k = \frac{E \cdot b \cdot d^3}{4l^3}. \quad (1.1)$$

Die Federkonstante k hängt ab vom Elastizitätsmodul E des Materials, der Dicke d , der Breite b und der Länge l des Balkens. Wie aus Gleichung 1.1 ersichtlich wird, kann die Schaltspannung durch Verkleinerung von Elektrodenabstand und Federkonstante des Balkenelements und damit durch Verkleinerung der Abmessungen verringert werden. Ausgehend von diesen Überlegungen lassen sich elektrostatische Mikroschalter und Mikrorelais mit den nötigen minimalen Abmessungen dimensionieren, damit sie bei den verfügbaren Spannungen funktionieren.

In heutigen integrierten Schaltkreisen entstehen in der Massenproduktion von Transistoren (90 nm-Technologie) minimale Strukturgrößen von 50 nm. Welche Auswirkungen hat aber die Miniaturisierung auf die mechanischen Elemente? Wenn ein System in allen Dimensionen gleichmäßig verkleinert (skaliert) wird, bleiben die physikalischen Gesetze erhalten. Die Verhältnisse der Wirkung verschiedener Effekte untereinander, die für die Gesamtfunktionalität verantwortlich sind, können sich aber grundlegend ändern. Bei makroskopischen Körpern werden die Eigenschaften des Körpers in der Regel durch die Vorgänge in seinem Inneren bestimmt. Mikro-/Nanosysteme sind jedoch so klein, dass diese Voraussetzung nicht mehr gilt. Durch die Zunahme des Oberflächen-Volumen-Verhältnisses spielen Oberflächeneffekte eine immer größere Rolle. Während im makroskopischen Maßstab Schwerkraft, Trägheit und Magnetismus dominieren, nehmen in kleineren Dimensionen Phänomene wie Elektrostatik, Reibung, Oberflächenspannung, Diffusion und van der Waals-Kräfte an Bedeutung zu [6]. Sobald sich mikroskopische Objekte berühren, neigen sie dazu, aneinander zu haften. Dieses als „Stiction“ bekannte Phänomen liegt an den molekularen Anziehungskräften, die die Rückstellkräfte mechanischer Elemente übersteigen [7]. Skalierungsbeispiele ausgewählter physikalischer Parameter sind in Tabelle 1.1 zusammenfasst.

Skaliert man Mikrosysteme so weit herunter, dass einzelne Komponenten Abmessungen im Sub-100 nm-Bereich haben [8], dann spricht man auch von Nanosystemen (engl: Nanoelectromechanical Systems, NEMS). Auf Grund der extrem kleinen Abmessungen

und Abstände zwischen freistehenden Strukturen können weitere physikalische Effekte auftreten, wie Squeeze-Film-Dämpfung [9], thermoelastische Dämpfung [10] oder die Casimir-Kraft [11,12].

Parameter	Skalierungsfaktor	Formel
Fläche	L^2	$A = l^2$
Volumen	L^3	$V = l^3$
Oberflächen-Volumen-Verhältnis	L^{-1}	$A/V = 1/l$
Masse	L^3	$m = \rho V$
Kapazität	L^1	$C = \epsilon A/z$
Elektrische Spannung	L^1	U
Federkonstante (E-Modul = konst)	L^1	$k = Ebd^3 / (4l^3)$
Resonanzfrequenz	L^{-1}	$\omega_r = \sqrt{k/m}$
Elektrostatische Kraft (E-Feld = konst)	L^2	$F_e = \epsilon E_e^2 A/2$
Elektrische Energie	L^3	$E_E = CU^2/2$
Schwerkraft	L^3	$G = mg$
Schichtwiderstand	L^{-1}	$R_s = (\kappa d)^{-1}$

Tabelle 1.1: Skalierung von ausgewählten physikalischen Parametern. Alle Längen skalieren mit dem Skalierungsfaktor L .

In dieser Arbeit wird ein alternatives Material für nanoelektromechanische Anwendungen untersucht. Es soll in einem flexiblen IC-kompatiblen oberflächenmikromechanischen Prozessmodul zusammen mit einer integrierten Schaltung eingesetzt werden. Titan und speziell Titannitrid als Material für die Funktionsschicht ergab sich aus der Forderung, mechanische Aktuatoren (z. B. Mikroschalter und Mikrorelais) monolithisch auf der Passivierungsschicht einer integrierten Schaltung aufzubauen. In CMOS-Linien stehen damit nur die im Back-End-Of-Line (BEOL) eingesetzten Materialien zur Verfügung. Des Weiteren erlaubt das Temperaturbudget nur eine maximale Prozesstemperatur von 450 °C, da man ansonsten bei Materialien wie z. B. Aluminium zu nahe an den Schmelzpunkt herankommt und die elektronische Schaltung beschädigt werden kann. Für die Ansteuerung der mechanischen Bauelemente soll die IC-Versorgungsspannung verwendet werden, die typischerweise 3,3 V bzw. 5 V beträgt. Dafür müssen Nanorelais für eine niedrige Schaltspannung mit Schichtdicken im Bereich von maximal 100 nm dimensioniert werden. Titan und Titannitrid vereinen sowohl gute elektrische als auch mechanische Eigenschaften, sind CMOS-kompatibel und damit ideale Kandidaten für diesen Einsatzzweck.