



Doctoral Thesis

Nano-scale patterning of aluminium films by water and light

Author(s):

Häfliger, Daniel

Publication Date:

2003

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004624792> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH No. 15144

Nano-scale patterning of aluminium films by water and light

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by

DANIEL HÄFLIGER

Dipl. Masch.-Ing. ETH
born 20.02.1974
citizen of Triengen (LU), Switzerland

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Andreas Stemmer, examiner
Prof. Dr. Anja Boisen, co-examiner
Prof. Dr. Dimos Poulikakos, co-examiner

Zurich, 2003

Abstract

Inexpensive patterning of metallic thin films on the micro- and nano-scale is of great importance for the fabrication of microelectromechanical systems. These metal films are commonly structured by an elaborated and time-consuming multi-step "lift-off" process requiring expensive clean-room facilities. Here, a novel, one-step lithography process for aluminium thin films based on low-power, laser-thermal corrosion in pure water is presented. Aluminium forms a thin passivating oxide layer when immersed into neutral water at room temperature. Heating of the metal film close to 100 °C due to absorption of the laser light provokes breakdown of this passivation. The aluminium corrodes and the reactants are washed away by the water. Crucial to this laser machining process is the confinement of heat production to a small volume in the metal film. This is achieved by, (i) using laser light of 488 nm or 532 nm wavelength, which is only absorbed by the metal film and not by the water, and, (ii) concentrating the light to a spot of limited spatial extent. The patterning set-up operates in common laboratory conditions and avoids the use of any acids or lyes that may damage other materials on the substrate.

In a first step, electrodes on planar substrates were fabricated by scanning a focused laser beam over an aluminium film and removing the metal by corrosion. Features sizing in the range of 270 nm to several micrometers in width were achieved in aluminium films on glass. The experimental results were successfully verified by a computational heat transfer analysis. The process required a power of only several milliwatts. This low-power property enabled the structuring of aluminium films on heat-sensitive materials such as polymers. Interdigitated microelectrode arrays have been fabricated on polydimethylsiloxane and SU-8 resist. By taking advantage of the inherent 3D device manufacturing capability of laser machining and SU-8 multilayered electrode structures were realised. Interconnections between the metal layers were fabricated by drilling holes through the SU-8 by laser ablation and subsequent metallization. Rapid prototyping and successful operation of a novel, asymmetric, two-phase electrohydrodynamic pump was demonstrated.

In a further step, subwavelength-sized patterning of aluminium films on pointed probes was realised by fabricating aperture probes for hybrid scanning nearfield optical and atomic force microscopy (SNOM/AFM) with high reproducibility. Aluminium corrosion on the scale below 100 nm was achieved by exposing the tip of an aluminium-coated AFM probe

IV

made of silicon nitride directly to an optical evanescent field created at a glass-water interface by total internal reflection of a laser beam. Due to the irradiance decaying exponentially with increasing distance from the interface, only the aluminium at the front-most part of the probe tip was heated and corroded away. The tip was freed from the metal cladding up to a point where the nearfield radiation intensity fell below a certain threshold to induce corrosion. This self-terminating process yielded apertures of 38-115 nm diameter with silicon nitride tips protruding up to 72 nm. The height of these tips exhibited high reproducibility. Nearfield optical resolution in transmission mode of 85 nm was achieved on a high-contrast "topography-free" test sample.

Finally, aluminium films on planar glass substrates were structured in all three dimensions below the diffraction limit of light. A totally internally reflected laser beam at the glass-metal-water interface created an evanescent field on the aluminium film, which was locally enhanced by the tip of a scanning probe microscope. This intense nearfield below the probe tip enabled the patterning of 20-nm-thick aluminium films with holes of 40 nm diameter (aspect ratio of 1:2) and lines of 20-130 nm width.

In addition to the aluminium, the application of the laser-thermal oxidation process to other metals such as tungsten, silver, chromium, tantalum and titanium was investigated. Tungsten was successfully corroded, while the other materials allowed for surface oxidation.

Kurzfassung

Die Mikro- und Nanosystemtechnik weist einen hohen Bedarf an kostengünstigen und einfachen Strukturierungsverfahren für metallische Dünnschichten auf. Diese Metallfilme werden üblicherweise mittels eines material- und zeitaufwändigen, mehrstufigen "Lift-off"-Verfahrens im Reinraum hergestellt. In der vorliegenden Arbeit wird ein neuer, einstufiger Lithographie-Prozess für Aluminium-Dünnschichten vorgestellt, welcher auf laser-thermisch induzierter Korrosion in reinem Wasser basiert. Aluminium bildet bei Raumtemperatur und in neutralem Wasser eine passivierende Oxidschicht, welche sich jedoch bei Erhitzung des Metalls durch Absorption von Laserlicht bei nahezu 100 °C auflöst und das darunterliegende Aluminium der Korrosion aussetzt. Das Metall wird oxidiert und die Reaktionsprodukte im Wasser weggeschwemmt. Für die Strukturierung des Metallfilms im Mikro- und Nanobereich ist die räumliche Eingrenzung der Erhitzung von entscheidender Wichtigkeit. Dies wurde wie folgt erreicht: (i) Durch Verwendung von Laserlicht mit 488 nm oder 532 nm Wellenlänge, dessen Strahlung ungehindert das Wasser passieren kann und lediglich von der Aluminiumschicht absorbiert wird, und (ii), durch Konzentration des Laserlichtes auf ein sehr kleines Volumen. Der hier beschriebene Lithographie-Prozess arbeitet unter üblichen Laborbedingungen und vermeidet Zusätze von Säuren oder Laugen, welche andere Materialien auf dem Substrat beschädigen könnten.

In einem ersten Schritt wurden Elektroden auf ebenen Substraten hergestellt. Dabei wurde mittels eines fokussierten Laserstrahls, der über die Oberfläche bewegt wurde, die Aluminiumschicht lokal durch Korrosion entfernt. In Aluminiumfilmen, welche auf Glassubstraten aufgedampft wurden, sind Strukturen von 270 nm bis zu einigen Mikrometern Breite erzielt worden. Die experimentellen Resultate konnten erfolgreich mittels rechnergestützter, thermodynamischer Finite-Elemente-Analyse überprüft werden. Der Prozess benötigte lediglich einige Milliwatt Laserleistung. Das materialschonende Bearbeitungsverfahren ermöglichte deshalb die Herstellung von Mikroelektroden auf hitzeempfindlichen Polymeren wie Polydimethylsiloxan und SU-8. Unter Ausnützung der inhärenten dreidimensionalen Fertigungsmöglichkeiten von Laserbearbeitungsverfahren und SU-8 wurden mehrschichtige Elektrodenstrukturen hergestellt. Die einzelnen Schichten wurden mit Durchgangslöchern verbunden, die mittels Laserverdampfung an Luft und anschließender Metallisierung in das Polymer eingebracht wurden. Das flexible Verfahren

wurde zudem zur schnellen Prototypenherstellung (Rapid Prototyping) einer neuartigen, asymmetrischen elektrohydrodynamischen Pumpe verwendet. Die mikrotechnische Struktur konnte erfolgreich getestet werden.

In einem weiteren Schritt wurde die Herstellung von Aperturen mit Dimensionen unterhalb der Beugungslimite des Lichtes an der Spitze von Aluminium-beschichteten Sonden aus Siliziumnitrid für hybride optische Nahfeld- und Rasterkraftmikroskope gezeigt. Zu diesem Zweck wurde die Sondenspitze einem optischen evaneszenten Feld ausgesetzt, welches mittels Totalreflexion eines Laserstrahls an einer Glas-Wasser Grenzschicht erzeugt wurde. Durch den exponentiellen Abfall der Lichtintensität mit zunehmender Distanz von der Grenzfläche wurde die Aluminiumbeschichtung nur an der äussersten Spitze genügend erhitzt, um sie durch Korrosion zu entfernen. Dieser selbst-terminierende Prozess lieferte Aperturen von 38-115 nm Durchmesser mit freigelegten Spitzen aus Siliziumnitrid, die bis zu 72 nm aus der Aluminiumbeschichtung ragten. Die Höhe dieser Spitzen wies eine hohe Reproduzierbarkeit aus. Mit den fabrizierten Sonden wurde eine nahfeld-optische Auflösung von 85 nm in Transmission auf einer "Topographie-freien" Testprobe erzielt.

Schlussendlich gelang in dieser Arbeit die Strukturierung von Aluminiumfilmen auf ebenen Glassubstraten unterhalb des Beugungslimits in allen drei Dimensionen. Ein totalreflektierter Laserstrahl an einer Glas-Aluminium-Wasser Grenzfläche erzeugte ein optisches evaneszentes Feld über der Metalloberfläche, welches durch die Spitze einer Rasterkraftsonde lokal verstärkt wurde. Mit dieser intensiven Nahfeld-Lichtquelle unterhalb der Spitze der Rastersonde konnten in eine 20 nm dicke Aluminiumschicht Löcher von 40 nm Durchmesser (Aspektverhältnis 1:2) und Linien von 20-130 nm Breite korrodiert werden.

Neben Aluminium wurde das laserinduzierte Oxidationsverfahren auch für Metalle wie Wolfram, Silber, Chrom, Tantal und Titan untersucht. Wolfram liess sich erfolgreich korrodieren, während bei den anderen Materialien die Oberfläche lokal oxidiert werden konnte.