

Strukturierung dünner Silizium-Membranen mit reaktivem Ionenätzen

Matthias Küchler, Ramon Hahn, Andreas Bertz, Thomas Geßner
Technische Universität Chemnitz, Chemnitz, BRD

Zur Herstellung mikromechanischer Spiegel-Arrays für hohe Ablenkfrequenzen müssen die Abmessungen der Einzelspiegel möglichst klein sein. Daher sind solche Arrays vorteilhaft in oberflächennaher Siliziummikromechanik zu realisieren. Die Mikrospiegel werden dabei aus einer 10 - 20 μm dicken einkristallinen Siliziummembran gefertigt, die von beiden Seiten von Siliziumoxid bedeckt ist, wobei das oberliegende Oxid strukturiert ist und so als Maske für die Strukturierung der Membran dient. Bei der Ätzung in die Membran auf die darunter liegende Oxidschicht wurde eine annähernd konstante Ätzrate beobachtet. Das Zusammenwirken von einseitigem Abtrag der Oxidschicht und resultierenden Schichtspannungen wird diskutiert.

Fabrication of micromechanical mirror arrays suitable for high deflection frequencies requires dimensions of the single mirror to be as small as possible. Therefore it is convenient to realize such arrays using surface micromachining. The micro mirrors are fabricated of a 10 to 20 μm thick single crystal silicon membrane covered on both sides by silicon oxide films. The top oxide layer is structured and serves as mask for structuring the membrane. During etching into the membrane the etch rate was approximately constant. Interaction of one sided removal of oxide film and resulting film strain is to be discussed.

Einleitung

Für lichtoptische Projektionsverfahren für Bewegtbilder mit hohem Kontrast- und Farbumfang auf der Basis von Systemen mit Strahlablenkung werden drehbare Spiegel mit möglichst großer reflektierender Fläche und schneller Ablenkbewegung benötigt. Diese große Spiegelfläche steht wegen ihrer großen Masse und daher geringen Resonanzfrequenz im Gegensatz zur Forderung nach schneller Ablenkbarkeit. Daher werden Spiegel-Felder benötigt, da sie die Möglichkeit bieten, durch viele kleine Einzelspiegel mit geringen Abmessungen und daraus resultierender hoher Resonanzfrequenz eine große Gesamtspiegelfläche mit hoher Ablenkfrequenz realisieren zu können.

Problemstellung

Gegenstand der Untersuchung ist die Fertigung von Mikrospiegelarrays aus 10 bis 15 μm dünnen Membranen. Eine Übersicht über die Gesamttechnologie gibt Abbildung 1 [1]. Wegen der notwendig kleinen Abmessungen können bei dieser Dicke der Siliziummembran keine isotropen Ätzverfahren zur Strukturierung benutzt werden. Durch den Einsatz eines anisotropen Trockenätzverfahrens werden zudem Einschränkungen beim Layout vermieden. Den Schichtaufbau bei der Membranstrukturierung zeigt Abbildung 2. Gegenüber dem Ätzen in Bulksilizium können beim anisotropen Siliziumätzen in Membranen, besonders beim Durchätzen derselben, zusätzliche Herausforderungen auftreten:

- i. Der normalerweise annähernd homogene Stromfluß durch den Wafer wird durch die teilweise Ausbildung des Wafers als wesentlich dünnere Membran deutlich inhomogener. Unterschiede in der Ausbildung des Plasmaschildes über den

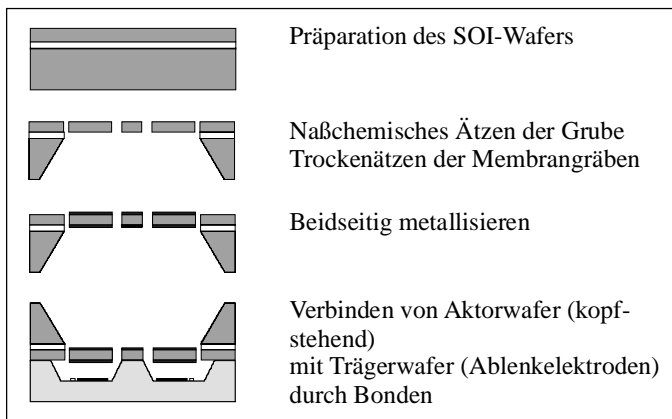


Abbildung 1: Technologieübersicht

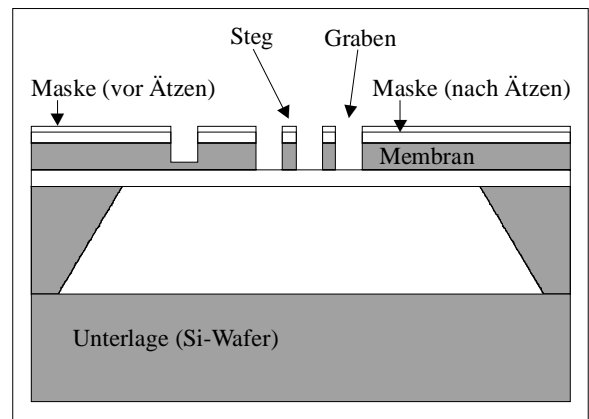


Abbildung 2: Schichtaufbau beim anisotropen Silizium-Trockenätzen

Membranen und über dem unverändert dicken Wafer konnten bei NF-Anregung (ca. 200 kHz) visuell beobachtet werden.

- ii. Das einseitige Ätzen von Gräben in eine von Schichten bedeckte Membran erzeugt besonders an den geätzten Stellen Schichtspannungen, die sich in ihrer Wirkung nicht mehr kompensieren. Es kommt zu einer Verwölbung der gesamten Membran.
- iii. Bei Erreichen des Ätzgrundes erfolgt ein Wechsel des dem Ätzangriff ausgesetzten Materials. Daher kann es im Bereich des Ätzgrundes zu Rate- und Profiländerungen kommen.
- iv. Bei kompletter Durchätzung der Membran inklusive untenliegender Schicht wird die Waferelektrode dem Ätzangriff ausgesetzt und kann abgetragen werden.
- v. Bei Waferelektroden mit Rückseitenkühlung wirkt auf die dünnen Membranen der Druck des Kühlmediums.

Auf Grund der vorliegenden Erfahrungen mit einem Trockenätzprozeß zur Herstellung tiefer schmaler Gräben in einkristallinem Silizium [2] wurden die Membranen mit einem auf Chlor als reaktivem Medium und ionenunterstütztem chemischen Abtrag basierenden Plasmaprozeß strukturiert. Zum Schutz der Waferelektrode, auf die der zu bearbeitende Wafer abgelegt wird, wurden die Untersuchungen stets mit einer zusätzlichen Unterlage durchgeführt, um iii. zu umgehen. Durch das Kühlprinzip der verwendeten Anlage entfällt das unter v. skizzierte Problem.

Beim Durchätzen der Siliziumschicht und Freilegen des darunter liegenden Oxids kann es zu unerwünschter lateraler Unterätzung kommen [3]. Durch eine stets vorhandene Inhomogenität würde dieser Effekt verstärkt werden.

Da die Membranen aus einkristallinem Silizium bestehen, das praktisch ermüdungsfrei ist, sollte es grundsätzlich möglich sein, trotz der starken Schichtspannungen, die während der Bearbeitungsschritte auftreten, eine bruchfreie Präparation zu erzielen. Allerdings dürfen dafür elektrostatische Kräfte, die durch Aufladung des Maskenoxids entstehen können, das Silizium nicht über seine Bruchfestigkeit hinaus belasten. Durch Veränderung der Bias-Spannung über die ins Plasma eingekoppelte Leistung läßt sich die Aufladung beeinflussen.

Obwohl das Aspektverhältnis der 10 µm breiten Gräben mit 1 bis 1,5 relativ gering ist, muß doch wegen der teilweise geringen Federbreite von 5 µm (Aspektverhältnis des Stegs von 2 bis 3) das Graben- bzw. Stegprofil mit beachtet werden, da dies die Funktion der Aktoren wesentlich beeinflusst. Eine Anpassung des Prozesses kann durch Variation von eingekoppelter Leistung und Zusammensetzung des Gasgemisches erreicht werden.

Experimentelles

Einzelheiten zum angewendeten Trockenätzprozeß sind in Tabelle 1 aufgeführt. Bei den Untersuchungen zum anisotropen Siliziumätzen ergab sich die Schwierigkeit, daß der zu ätzende Wafer während des Schleusens seine Lage veränderte und so nicht gleichmäßig Kontakt zur Waferelektrode bekam. Die Ursache dafür ist das zwischen Unterlage und Wafer liegende Luftpolster. Daraus resultierte ein stark inhomogener Abtrag während des Prozesses. Zur Vermeidung solcher Inhomogenitäten wurden daher Wafer und Unterlage mit Fotolack gegeneinander fixiert.

Verschiedentlich kam es während des Ätzprozesses, aber auch während des Ausschleusens zum Bruch der Membranen. Daher wurde die eingekoppelte Leistung in das Plasma reduziert, was zu einer Erhöhung der Ausbeute führte.

Um akzeptable Ätzzeiten zu erreichen, wurde der Chloranteil im Gasgemisch im Laufe der Untersuchungen verdoppelt.

Parameter	Prozeß 1	Prozeß 2
Cl ₂ -Fluß	25 sccm	50 sccm
N ₂ -Fluß	50 sccm	
Ar-Fluß	50 sccm	
Prozeßdruck	150 Pa	
eingekoppelte Leistung	200 W	
Anregungsfrequenz	ca. 200 kHz	
Anlage	XPL 251	
Hersteller	Secon, Österreich	

Tabelle 1: Prozeßparameter

Resultat

Durch das einseitige Ätzen der Gruben in den Siliziumwafer werden die so erzeugten Membranen bereits verwölbt. Die Abweichung gegenüber einer ideal ebenen Membran erreicht für die von den Spiegelstrukturen benötigte Fläche Werte um 200 nm. Danach wird beidseitig eine ca. 2 µm dicke Oxidschicht abgeschieden. Während des dann folgenden anisotropen Siliziumätzens wird das Oxid einseitig stark abgetragen, so daß die Verwölbung wesentlich größere Werte annimmt. In diesem Zustand sind die Membranen mechanisch sehr empfindlich und können leicht zerbrechen. Nach der beidseitigen Entfernung des Oxids wird die ursprüngliche Verwölbung von ca. 200 nm wieder erreicht (Abbildung 3).

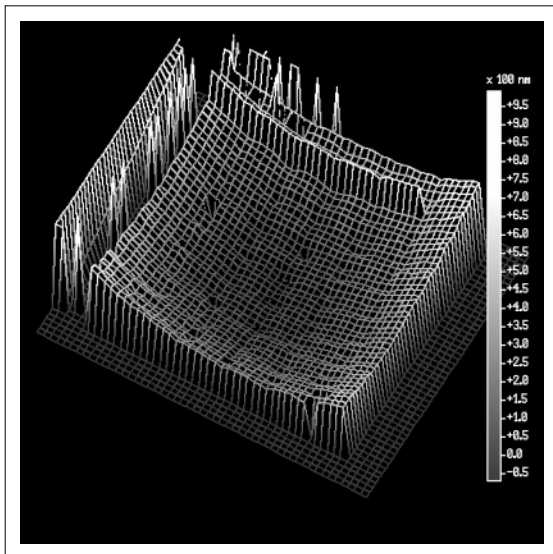


Abbildung 3: Verwölbung der gesamten Membran nach den Prozeßschritten

Stegquerschnitts von spitz zulaufend zu annähernd rechteckig mit Verjüngung in halber Tiefe erreicht (Abbildung 4 und 5). Die Änderung des Stegquerschnitts entspricht einer abnehmenden Ausbeulung des Grabenprofils mit zunehmenden Gasfluß. Dies wurde bei Ätzung in Siliziumwafer konstanter Dicke (ohne Membran) bislang nicht beobachtet.

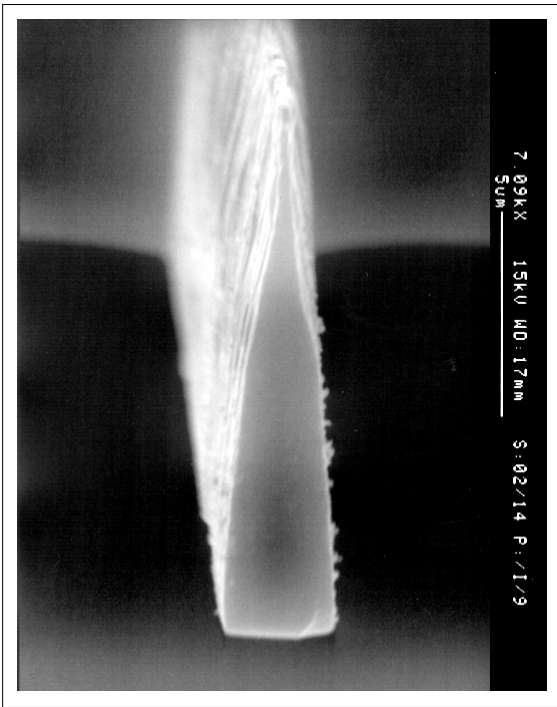


Abbildung 4: Prozeß 1, 25 sccm Chlor

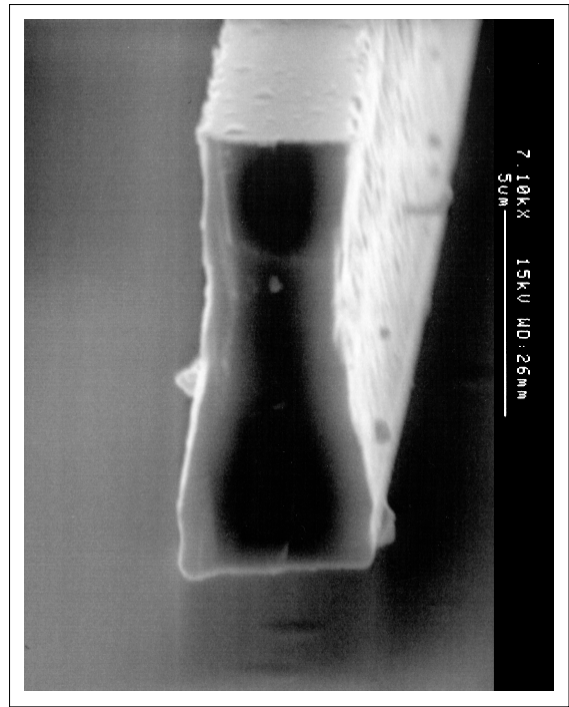


Abbildung 4: Prozeß 2, 50 sccm Chlor

Möglicherweise ist durch die geringere Ätzdauer bei hohem Chlorfluß die Wirkung der elektrischen Aufladung der unten liegenden Oxidschicht auf das Ätzprofil weniger stark.

Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, daß die Strukturierung dünner Siliziummembranen mit einem Trockenätzprozeß auf Chlor-Basis möglich ist. Hauptproblem dabei ist die geringe Ausbeute. Als Ursache dafür werden elektrostatische Kräfte, die sich durch die elektrische Aufladung der untenliegenden Oxidschicht ausbilden können, vermutet. Das durch die Ätzung entstehende Stegprofil läßt sich durch Parametervariation anpassen. Zur Verminderung der Bruchhäufigkeit ist eine geringere eingekoppelte Leistung günstig. Des weiteren sollte eine Angleichung der Oxidschichtdicken durch Aufteilung des anisotropen Siliziumätzprozesses und Einfügen eines Oxidätzschrittes für das untenliegende Oxid die Bruchwahrscheinlichkeit der Membranen drastisch reduzieren.

Literatur

- [1] Kehr, K.; Kaufmann, C.; Hahn, R.; Kurth, S.; Mehner, J.; Wollmann, U.; Dötzel, W.; Geßner, T.: Mikrospiegelarrays für Scan-Frequenzen bis 250 kHz, Tagungsband zur 1. Fachtagung Informations- und Mikrosystemtechnik (1998)
- [2] Küchler, M.; Markert, M.; Bertz, A.; Geßner, T.: Herstellung tiefer Siliziumgräben für die Oberflächenmikromechanik, Tagungsband zur Mikrosystemtechnik '95, (1995) S. 2 - 8
- [3] Kinoshita, T; Hane, M.; McVittie, J. P.: Notching as an example of charging in uniform high density plasmas, Journal of Vacuum Science and Technology, B 14 (1996), Nr. 1, S. 560 - 565