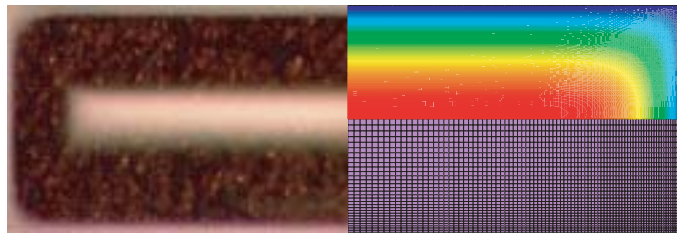


Diploma Thesis

Characterization of rectangular thin film membranes and extraction of mechanical parameters

Matthias Burg



Abstract

This diploma thesis describes the extraction of the mechanical material parameters Young's modulus E , prestrain ε_0 and Poisson's ratio ν from thin film membranes under tensile prestress. The membranes are mechanically deflected by a differential pressure in the so called *bulge test*. Simulations with the finite element method (FEM) and the energy minimization method (EMM) are performed to analyze the experimentally obtained load-deflection curves. In this thesis a model for quadratic membranes was successfully extended to describe rectangular structures of different aspect ratios.

Rectangular PECVD silicon nitride membranes with a thickness of $1\ \mu\text{m}$ and aspect ratio of the side lengths between 1:1 and 1:22 were deflected in a bulge test. The pressure dependent load-deflection curves were measured with a laser profilometer. The numerical calculations were performed with the commercial FE software ANSYS 6.1 and the EM method which was implemented in Mathematica 4.1. The bending stiffness and the work performed against the membrane were taken into account. Membranes with aspect ratios between 1:1 and 1:5 with tensile prestress ε_0 between 0 and 10^{-3} , Poisson's ratios ν between 0.05 and 0.45 and differential pressures p between 0 Pa and 100 kPa were simulated. Moreover, FE and EM calculations of the critical prestrain were performed, below which the membranes start to buckle without the application of a differential pressure.

A practical model for membranes with aspect ratios between 1:1 to 1:5 was extracted from the simulation results enabling the determination of the mechanical parameters such as prestress σ_0 , prestrain ε_0 and Young's modulus E . For aspect ratios ranging approximately from 1:4 and higher, the model indicates a behavior similar to that of quasi-infinite membranes. The load-deflection curves obtained from bulge test experiments and the theoretical model were in good agreement. The extracted values of Young's modulus E for the silicon nitride membranes with different aspect ratios between 1:2 and 1:10 were between 120.6 GPa and 123.0 GPa. Values for the prestress σ_0 range from 1.0 MPa to 11.7 MPa for different chips on the same wafer. This strong variation of the prestress is due to the fabrication process. The mean value of the prestress

across the wafer was $\sigma_0 = (6 \pm 25)$ MPa as determined by the wafer curvature method. For membranes with aspect ratios of 1:6 and 1:10, comparisons of the extracted mechanical parameters between the developed model and the analytical model for quasi-infinite membranes exhibited only a slight variation.

Zusammenfassung

Die vorliegende Diplomarbeit beschreibt die Extraktion der mechanischen Materialparameter Elastizitätsmodul E , Vorspannung ε_0 und Querkontraktionszahl ν von tensil vorgespannten Dünnschichtmembranen mit Hilfe des *Bulgetests*. Zur Analyse des experimentell ermittelten Last-Durchbiegungs-Verhaltens der Membranen wurden Simulationen mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) und mit Hilfe der Energie-Minimierungs-Methode (EMM) durchgeführt. Dabei wurde das für quadratische Membranen bekannte Modell erfolgreich auf rechteckige Strukturen mit verschiedenen Seitenverhältnissen erweitert.

Membranen aus PECVD-Siliziumnitrid mit einer Dicke von 1 μm und einem Verhältnissen der Seitenlängen zwischen 1:1 und 1:22 wurden im Bulgetest mit Druck beaufschlagt und das druckabhängige Auslenkungsprofil mit Hilfe eines Laserprofilometers vermessen. Numerische Berechnungen erfolgten mit der FE-Software ANSYS 6.1 und der EM-Methode, die in Mathematica 4.1 implementiert wurde. Hierbei wurde auch die Biegesteifigkeit der Membran sowie die Arbeit des Drucks gegen die Membran berücksichtigt. Die Simulationen wurden für Membranen mit Seitenverhältnissen bis 1:5 bei einer tensilen Vorverzerrung ε_0 zwischen 0 und 10^{-3} , Querkontraktionszahlen ν zwischen 0,05 und 0,45 des Membranmaterials und Werte für den Differenzdruck p zwischen 0 Pa und 100 kPa durchgeführt. Daneben wurden FE- und EM-Simulationen zur Berechnung der kritischen Vorspannung durchgeführt, ab der Membranen ohne angelegten Differenzdruck in einen ausgebeulten Zustand übergehen.

Aus den Simulationsergebnissen wurde ein praktikables Modell für Membranen mit einem Seitenverhältnis zwischen 1:1 und 1:5 extrahiert, das die Ermittlung der mechanischen Parameter Vorspannung σ_0 , Vorverzerrung ε_0 und Elastizitätsmodul E aus experimentell ermittelten Last-Durchbiegungs-Kurven gestattet. Dabei zeigt das Modell, dass bereits ab Seitenverhältnissen größer 1:4 ein Auslenkungsverhalten der Membranen ähnlich dem einer unendlichen Membran vorliegt. Der Bulgetest konnte mit dem theoretischen Modell gut beschrieben werden. Die extrahierten Werte für den Elastizitätsmodul E der Siliziumnitridmembranen lagen für verschiedene Seitenverhältnisse von 1:2 bis 1:10 zwischen 120,6 GPa und 123,0 GPa. Für die Vorspannung σ_0 wurden Werte zwischen 1,0 MPa und 11,7 MPa auf verschiedenen Chips eines Wafers ermittelt. Die Genauigkeit der Auswertemethode lässt den Schluss zu, dass die starke Variation der Vorspannung durch den Fabrikationsprozess bedingt ist. Der über den Wafer gemittelte Wert der Vorspannung, der mit Hilfe der Waferkrümmungsmethode bestimmt wurde, lag bei $\sigma_0 = (6 \pm 25)$ MPa. Für Membranen mit Seitenverhältnissen von 1:6 und 1:10 wurden die mechanischen Parameter sowohl mit dem in dieser Arbeit entwickelten Modell als auch mit einem analytischen Modell für unendlich lange Membranen extrahiert. Dabei zeigten sich im Vergleich nur geringfügige Abweichungen zwischen den beiden Modellen.

For further information, please contact:

Prof. Dr. Oliver Paul
Institute for Microsystem Technology IMTEK
Microsystem Materials Laboratory MML
Georges-Koehler-Allee 103
79110 Freiburg, Germany
phone ++49/761-203-7190
fax ++49/761-203-7192
e-mail paul@imtek.de