

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**



**Πτυχιακή εργασία**

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΙΚΡΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ  
ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΛΕΠΤΩΝ ΥΜΕΝΙΩΝ  
ΣΤΗ ΜΙΚΡΟ ΚΑΙ ΝΑΝΟ - ΚΑΙΜΑΚΑ**

**Αλέξανδρος Παυλίδης**

**Λεμεσός, Μάιος 2017**



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ  
ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΥΛΙΚΩΝ

Πτυχιακή εργασία

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΙΚΡΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΛΕΠΤΩΝ ΥΜΕΝΙΩΝ ΣΤΗ  
ΜΙΚΡΟ ΚΑΙ ΝΑΝΟ – ΚΛΙΜΑΚΑ

Όνομα Αλέξανδρος Παυλίδης

Επιβλέπων Καθηγητής

Δρ. Τάσος Γεωργιάδης

Λεμεσός, Μάιος 2017

## **Πνευματικά δικαιώματα**

Copyright © Αλέξανδρος Παυλίδης, 2017

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών και Επιστήμης και Μηχανικής Υλικών του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Με την ολοκλήρωση της πτυχιακής μου εργασίας στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών και Επιστήμης και Μηχανικής Υλικών του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τους ανθρώπους που στάθηκαν δίπλα μου.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέπον καθηγητή και ακαδημαϊκό σύμβουλο μου Δρ. Τάσο Γεωργιάδη για όλη τη βοήθεια που μου έδωσε, την συνεχή καθοδήγηση και επίβλεψη του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

Την μεταδιδακτορική συνεργάτη και καθηγήτρια Δρ. Δήμητρα Χατζηλοϊζή για την συνεχή στήριξη και τον τρόπο που πάντα με συμβούλευε και ενέπνεε, αλλά και για την ώθηση που μου έδωσε για επιλογή της πτυχιακής αυτής εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους και να αφιερώσω την παρούσα πτυχιακή εργασία στους γονείς, τα αδέρφια μου και θείες και θείους, αλλά και φυσικά στους φίλους μου για την απεριόριστη αγάπη και συμπαράσταση καθ' όλη τη διάρκεια, που ήταν για μένα ανεκτίμητης αξίας καθώς και στήριγμα για συνέχιση και ολοκλήρωση του πρώτου κύκλου σπουδών μου.

Αλέξανδρος Παυλίδης

Μάιος 2017

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι ιδιότητες των υλικών λεπτών υμενίων, όπως δομές MEMS που κατασκευάζονται με τη μέθοδο επιφανειακής μικροδιαμόρφωσης (surface micromachining), εξαρτώνται σε σημαντικό βαθμό από την τεχνική εναπόθεσης, τις φυσικοχημικές διεργασίες που χαρακτηρίζουν την ανάπτυξη των υμενίων και την θερμική επεξεργασία μετά την εναπόθεση (post-deposition thermal processing). Έτσι, παρόλο που οι ιδιότητες στην μακροκλίμακα είναι, σε γενικές γραμμές, γνωστές ή εύκολα μετρήσιμες, οι αντίστοιχες στην μικροκλίμακα δεν είναι επαρκώς προσδιορισμένες. Συνεπώς, ο πρώτος στόχος της πτυχιακής εργασίας είναι να εξεταστεί η πιθανότητα χρήσης των χαρακτηριστικών ταλάντωσης μικροδιαμορφωμένων πλακών για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων του υλικού κατασκευής τους.

Επιπλέον, είναι ευρέως γνωστό ότι οι μικροδιαμορφωμένες δομές υπόκεινται σε εντατική κατάσταση ένεκα των εναπομένουσων τάσεων. Οι τάσεις αυτές μπορούν να προκληθούν λόγω της διαφοράς του θερμικού συντελεστή διαστολής του υλικού ενός υμενίου από τον αντίστοιχο γειτονικού υμενίου, ή του υλικού ενός υμενίου και του υποστρώματος, της παρουσίας προσμείξεων, των τεχνικών εναπόθεσης, των φυσικών διεργασιών ανάπτυξης κλπ. Η μέτρηση και έλεγχος των εναπομένουσων τάσεων είναι εξαιρετικής σημασίας στην προσπάθεια βελτίωσης της αξιοπιστίας και της ωφέλιμης ζωής των προαναφερθέντων δομών. Έτσι, ο δεύτερος στόχος της πτυχιακής εργασίας αφορά στην μελέτη της επίδρασης των εναπομένουσων τάσεων στην ιδιοσυχνότητα (fundamental frequency) ορθογώνιας μικρομηχανικής πλάκας.

Για την ικανοποίηση των στόχων της παρούσας εργασίας, οι εξισώσεις της ιδιοσυχνότητας μίας πλάκας (με πακτωμένη περιφέρεια καθώς και δοκού με πάκτωση στα δύο άκρα) εξάγονται συναρτήσει των ιδιοτήτων του υλικού κατασκευής και των εναπομένουσων τάσεων. Ακολούθως οι εξισώσεις αυτές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του συντελεστή Young και του λόγου του Poisson, του υλικού της πλάκας και δοκού. Τέλος, οι μετρήσεις ιδιοσυχνότητας καταλήγουν σε σημαντικά αποτελέσματα αναφορικά με την μέση τιμή των εναπομένουσων τάσεων σε δομές MEMS κατασκευασμένες μέσω, για παράδειγμα, επιφανειακής μικροδιαμόρφωσης.

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας συνάδουν, σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό, με τα αντίστοιχα αποτελέσματα δημοσιευμένων προτύπων.

**Λέξεις κλειδιά:** MEMS, επιφανειακή μικροδιαμόρφωση, ιδιοσυχνότητα, εναπομένουσες τάσεις, συντελεστής Young, λόγος του Poisson.

## **ABSTRACT**

The material properties of thin films used in surface micromachined devices depend, to a large extent, on the deposition process, the physical and chemical processes characterizing film growth, and post-deposition thermal processing (annealing). Hence, although the properties of the bulk form of the material are well defined, the corresponding thin-film properties are not so well characterized. To this end, the first objective of this thesis is to examine the feasibility of using vibration characteristics of surface micromachined structures to determine the stiffness and Poisson's ratio of thin films in the form of clamped rectangular plates.

In addition, one must always bear in mind that a state of residual stress exists in all surface micro-machined structures. Residual stresses may be generated due to a variety of factors including a mismatch in the thermal expansion coefficients of a film and an adjacent one, or a film and the substrate, the presence of impurities, and chemical and physical processes accompanying film growth. A solid understanding of these stresses is important for improving the reliability and life-time of thin films. Appropriately, the second objective of this thesis is to study the effects of residual stresses on the natural frequencies of plates and beams and to examine how natural frequency measurements can lead to the determination of these residual stresses.

To meet these objectives, equations of the fundamental frequency of a rectangular plate clamped on all four sides as well as a beam clamped on both ends, in terms of the material properties and the residual stresses are derived. These equations are then used to determine closed-form expressions for the Young's Modulus and Poisson's Ratio of the material of the plates and beams. In addition, natural frequency measurements will lead to the determination of residual stresses present in the aforementioned structures.

The results of this work conform very well to their counterparts from various published models.

**Keywords:** MEMS, surface micromachining, natural frequency, residual stresses, Young's Modulus, Poisson's Ratio..