

雙層微懸臂樑之動態有限元素分析與實驗比較

Dynamic FEA and Measurement of Bilayer MEMS Test Cantilever

何展效¹、江文旺¹、張文陽²

¹ 研究員，工業技術研究院量測中心，300 新竹市光復路二段 321 號 16 館

² 副研究員，工業技術研究院電子工業研究所

電話：03-573-2247

Fax：03-572-6445

E-mail：JohnnyHo@itri.org.tw

摘要

近年來，MEMS 研發工程師多以間接方式求得相關機械性質，比如可以先在 Wafer 上建造懸臂樑結構，以外加驅動方式使其振動，再量測其共振頻率，即可以公式推導出該微懸臂樑結構之楊氏係數。本文使用光學方法來量測雙層微懸臂樑(下層為厚度 $0.7\mu\text{m}$ 的 Silicon Oxide，上層為厚度 $1.87\mu\text{m}$ 的 Silicon Nitride)之共振頻率，並反推其楊式係數。並且使用 ANSYS 軟體，進行動態有限元素模擬分析，得到之微懸臂樑自然頻率與實驗結果比較。針對雙層微結構進行有限元素分析時，探討如何搭配實驗來決定材料性質、雙層結構簡化為單層結構分析之評估，是本文重點所在。

關鍵字：微結構(Microstructure)，楊式係數(Young's Modulus)，有限元素分析(FEA)、自然頻率(Natural Frequency)，

一、前言

當技術進入微奈米階段，元件的尺寸愈來愈小，相對地 MEMS/NEMS 量測的複雜性及困難度也增加。MEMS 元件以 CMOS 製程製作，其材料為多層薄膜。傳統儀器在決定薄膜機械性質上有很大的限制。以楊氏係數(Young's Modulus)參數為例，傳統上利用拉伸試驗機進行拉伸試驗，需將待測物兩端以夾具夾住，再將其拉伸至斷裂為止。此方法顯然無法適用於數十微米厚度的薄膜，近年來，MEMS 研發工程師多以間接方式求得相關機械性質，比如可以先在 Wafer 上建造懸臂樑結構，以外加驅動方式使其振動，再量測其共振頻率，即可以公式推導出該微懸臂樑結構之楊氏係數。本文使用光學方法來量測雙層微懸臂樑(下層為厚度 $0.7\mu\text{m}$ 的 Silicon Oxide，上層為厚度 $1.87\mu\text{m}$ 的 Silicon Nitride)之共振頻率，並反推其楊式係數。並且使用 ANSYS 軟體，針對進行動態有限元素模擬分析，得到之微懸臂樑自然頻率與實驗結果比較。因為不同製程參數下所製的微結構，其材料機械性質差異甚大，所以給定材料性質是困難的。針對雙層微結構進行有限元素分析時，探討如何搭配實驗來決定材料性質、雙層結構簡化為單層結構分析之評估，是本文重點所在。

二、方法

2.1 解析解

樑結構的模態分析解析解可從尤拉方程式 (Euler's equation) [1]推導出來：

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

對於懸臂樑的狀況，式(1)搭配邊界條件，其自然頻率可由下列式子求得

$$f_i = \frac{\lambda_i^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{mL^4}} \quad (2)$$

其中，

- E：楊氏係數
- f_i ：第 i 模態的自然頻率
- L：懸臂樑的長度
- h：懸臂樑的厚度
- m：單位長度的質量
- I：慣性矩
- ρ ：懸臂樑的密度
- λ_i ：第 i 模態的特徵值

將式(2) 簡化得到第一模態的自然頻率

$$f_1 = 0.162 \frac{h}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3)$$

若已知懸臂樑的長度、厚度、密度及楊氏係數則可求得自然頻率，若自然頻率量測出來則可反推出其楊氏係數。

2.2 雙層結構 MEMS 懸臂樑

考慮如圖 3 所示之雙層結構之微懸臂樑，下層為 Silicon Oxide 其(楊氏係數、厚度、密度為 E_o, h_o, ρ_o)，上層為 Silicon Nitride (楊氏係數、厚度、密度為 E_N, h_N, ρ_N)。若個別的楊氏係數已知，則雙層懸臂樑之等效楊氏係數可用下式來近似

$$E_c = (E_o h_o + E_N h_N) / (h_o + h_N) \quad (4)$$

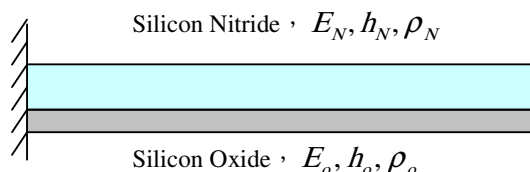


圖 1 雙層結構之微懸臂樑

2.3 雙層結構 MEMS 懸臂樑之自然頻率量測

MEMS 元件以 CMOS 製程製作，其材料為多層薄膜。傳統儀器在決定薄膜機械性質上有很大的限制。以 Young's Modulus 參數為例，傳統上利用拉伸試驗機進行拉伸試驗，需將待測物兩端以夾具夾住，再將其拉伸至斷裂為止。此方法顯然無法適用於數十微米厚度的薄膜，近年來，MEMS 研發工程師多以間接方式求得相關機械性質，比如可以先在 Wafer 上建造 Cantilever beam 結構，以外加驅動方式使其振動，再量測其共振頻率，即可以公式推導出該 Cantilever beam 結構之 Young's Modulus[2]。量測儀器有工業技術研究院量測技術發展中心開發之雙波混合於光折變晶體干涉儀 (Two-wave Mixing Interferometry ; TWMI) [3]、德國 Polytec 公司製的 vibrometer (Laser Doppler Vibrometer)[4]。微懸臂樑自然頻率量測之詳細流程可參見文獻[3、4]所述。

三、結果與討論

3.1 自然頻率量測結果

不同尺寸的微懸臂樑 (如圖 2 所示) 其自然頻率實驗結果如表 1 所示。我們將實驗得到的自然頻率代入公式 1 反推出微懸臂樑的楊氏係數。在相同的基板上，以相同的製程製作出的微懸臂樑，其材料性質應該一樣，不會因尺寸不同而不同。我們比較表 1 反推出的微懸臂樑楊氏係數，除了編號 N1 與 N2 的懸臂樑外，其餘四支懸臂樑的楊氏係數值很接近，平均為 152 GPa。影響懸臂樑楊氏係數準確度的可能因素如下：

- 微懸臂樑的厚度。我們以設計時的厚度來分析，實際試片做出來後，微懸臂樑的厚度無法量測出。
- 我們懷疑 N1 與 N2 懸臂樑製作上是不是有些誤差，可能蝕刻沒有乾淨，導致懸臂樑有效長度變短，造成自然頻率升高。
- N1 與 N2 懸臂樑相對來說長度較長，實驗時懸臂樑的振幅較大，碰到下方 Substrate。

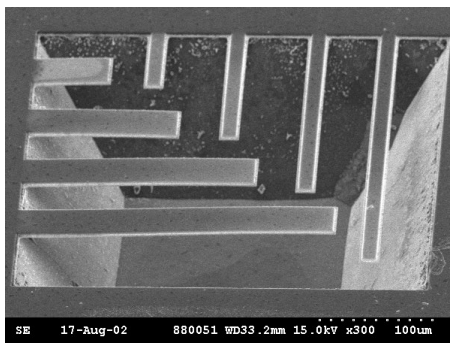


圖 2 雙層結構之微懸臂樑 SEM 照片

表 1 微懸臂樑自然頻率實驗結果

懸臂樑編號	尺寸(長x寬) ($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	自然頻率實驗結果 kHz	實驗反推楊氏係數 (GPa)
W1	276x35	39.7	150.6
W2	203x35	74.5	155.2
W3	131x35	174	146.8
N1	305x15	37.4	199.7
N2	209x15	74.1	172.2
N3	139x15	158	153.4

3.2 有限元素分析

使用 ANSYS 5.6 進行編號 W1 懸臂樑之模態分析，使用不同元素種類種類分析結果如表 2 所示。結果顯示使用 Shell 99(Linear Layer)或 Shell 93(Elastic 8 node)元素種類的分析結果與理論值幾乎相同，使用 Shell 63(Elastic 4 node) 分析結果較差。接著固定使用 Shell 99 元素來分析編號 W2、W3、N3 等支懸臂樑，結果如表 3 所示。以上節所述知實驗反推得到之平均楊氏係數 152 Gpa 當作此製程下微懸臂樑之等效楊氏係數(E_e)，並將之代入公式(3) 以及使用 Shell 99 元素種類作分析，結果都與實驗結果近似。若以參考文獻[5]之數據 $E_N = 380$ GPa， $E_o = 75$ GPa，使用 Shell 99 元素種類作分析得到的結果與實驗差距較大，這是因為不同製程參數下的微結構，其材料機械性質差異甚大。以 Silicon Nitride 的楊氏係數為例，從 104 GPa 到 380 GPa 都曾出現在不同文獻上[6、7]。由於材料楊氏係數可能的值範圍太大，所以我們無法用文獻上的楊氏係數數據代入自然頻率的公式或使用 FEM 來事先預測微結構的自然頻率。

若個別的楊氏係數已知，則雙層懸臂樑之楊氏係數可用公式(4) 得到之近似楊氏係數(E_c)。為了解使用近似公式與直接使用兩層楊氏係數數據分析之差異，我們用 W1 懸臂樑的幾何尺寸來模擬，假設 E_N 固定為 200 GPa，讓 E_o 從 50 GPa ~ 250 GPa。ANSYS 模態分析結果如表 4、圖 3 所示。結果顯示，當厚層材料的楊氏係數較大時，則使用上述之近似公式所求得的自然頻率會偏高，反之，當厚層材料的楊氏係數較小時，所求得的自然頻率會偏低。

表 2 ANSYS 模態分析比較

Case	自然頻率(kHz)
1.自然頻率實驗結果	39.7
2.以等效楊氏係數 $E_e=152$ GPa 代入公式(3)	39.88
3.ANSYS 分析：使用 Shell 99 元素(Linear Layer)， $E_o = E_N = 152$ GPa	39.87
4.ANSYS 分析：使用 Shell 93(Elastic 8 node)元素， $E=152$ GPa	39.87
5.ANSYS 分析：使用 Shell 63(Elastic 4 node)元素， $E=152$ GPa	40.01

表 3 微懸臂樑 ANSYS 模態分析結果

懸臂樑編號	自然頻率實驗結果 kHz	以等效楊氏係數 $E_e=152$ GPa代入公式(3)	ANSYS分析：使用 Shell 99元素， $E_o = E_N = 152$ GPa	雙層ANSYS分析： 使用Shell 99元素， $E_N = 380$ GPa $E_o = 75$ GPa
W1	39.7	39.88	39.87	41.90
W2	74.5	73.72	73.79	77.54
W3	174	177.03	177.55	186.58
N3	158	157.23	157.00	165.00

表 4 微懸臂樑 ANSYS 模態分析結果(E_N 固定為 200 GPa, E_o 從 50 GPa ~ 250 GPa)

h_o (μm)	h_N (μm)	E_o (GPa)	E_N (GPa)	E_C (GPa)	$f_1(E_C)$ (Hz)	$f_1(E_o, E_N)$ (Hz)
0.7	1.87	50	200	159.1	40793	34747
0.7	1.87	75	200	166.0	41668	37202
0.7	1.87	100	200	172.8	42513	39332
0.7	1.87	125	200	179.6	43341	41208
0.7	1.87	150	200	186.4	44154	42878
0.7	1.87	175	200	193.2	44952	44379
0.7	1.87	225	200	206.8	46509	46973
0.7	1.87	250	200	213.6	47268	48106

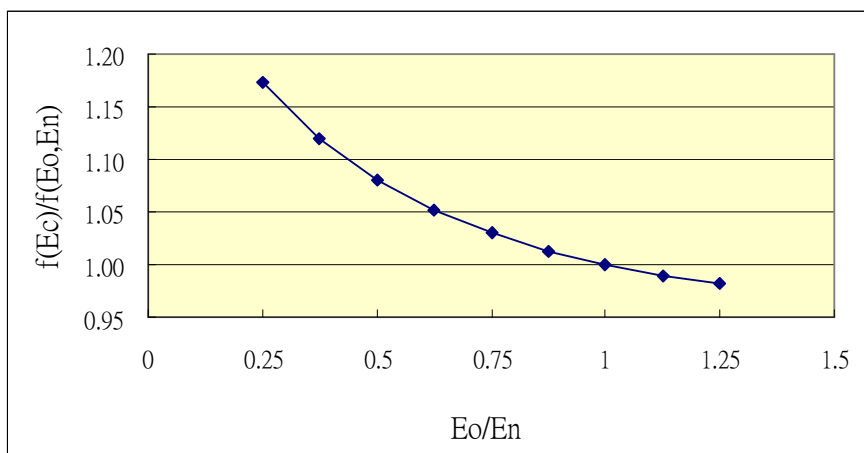


圖 3 $f(E_c)/f(E_c, E_n)$ v.s. E_o/E_n

四、結論

- 不同製程、不同製程參數下的微結構，其材料機械性質差異甚大，以 Silicon Nitride(Si₃N₄)的楊氏係數為例，104 GPa~380 GPa 出現在不同參考文獻上。由於材料楊氏係數可能的值範圍太大，所以我們無法用文獻上的楊氏係數數據代入自然頻率的公式或使用 FEM 來事先預測微結構的自然頻率。
- 由實驗的方法先求得雙層微懸臂樑結構之複合楊氏係數(等效楊氏係數)，對於相同製程參數下所製得之複雜形狀微結構，我們就可使用有限元素分析軟體 ANSYS 來事先預測微結構的自然頻率。使用 Shell 99(Linear Layer)或 Shell 93(Elastic 8 node)元素種類的分析結果與理論值幾乎相同，使用 Shell 63(Elastic 4 node) 分析結果較差。
- 若個別的楊氏係數已知 E_o 及 E_N ，則雙層懸臂樑之楊氏係數可用 $E_c = (E_o h_o + E_N h_N) / (h_o + h_N)$ 的公式來近似。當厚層材料的楊氏係數較大時，則使用上述之近似公式所求得的自然頻率會偏高，反之，當厚層材料的楊氏係數較小時，所求得的自然頻率會偏低。

誌謝

本研究承經濟部 前瞻科技專案計畫編號 ITRI-A321XS2330 經費補助，特此致謝。

參考文獻

- [1] Singiresu S. Rao. Mechanical vibrations. Third edition. P523-541.
- [2] “Application of Polytec Laser Doppler Vibrometer (LDV) for MEMS Structures”, Polytec GMBH.
- [3] 何展效，李朱育，施學兢，劉永慧，”雙波混合於光折變晶體干涉術應用於超音波量測之研究”，中華民國音響學會研討會，2002
- [4] Wen-Yang Chang, Hsin-Li Lee, Jing Hung Chiou and Cheng-Hong Lee， “Modal Analysis of Nano-Vibration Microstructure”，奈米工程研討會，2002
- [5]<http://www.memsnet.org/>
- [6] IEEE, Micro Electro Mechanical Systems Workshop, Feb 1990, Napa Vally, California, p.174
- [7] IEEE Transactions on electron devices, Vol.ED25, No.10, Oct 1978, p.1249