

## 薄膜応力測定装置

キーワード：薄膜応力測定装置、薄膜応力評価、基板反り測定、製膜条件最適化

### 薄膜応力とは

スパッタリングや真空蒸着によって作製された薄膜には、膜構造に起因する内部応力や基板との熱膨張係数の差に起因する熱応力などが蓄積されています。このような応力は圧縮応力と引張応力に分類され、それぞれ、図 1 に示すような力を基板へ及ぼします。過剰な応力は、薄膜の本来の機能性を低下させる原因となります。例えば、半導体デバイスにおいては、薄膜の内部応力がトランジスタの動作に悪影響を及ぼし、製品全体の信号伝達性能や耐久性が損なわれることがあります。また、応力の蓄積しやすい多層膜コーティングでは、耐久性や光学特性へ悪影響を及ぼします。応力が一定値を超えると、膜の浮きや割れ、さらには剥離に至るため、製品の信頼性が著しく低下します。

### 薄膜応力測定装置とは

薄膜の内部応力を制御するためには、製膜プロセスを最適化することが非常に重要です。とくに膜形成時における粒子エネルギーや真空度、基板温度などは応力を決定する重要なパラメータとなります(裏面の分析使用例をご参考ください)。本稿でご紹介する薄膜応力測定装置は、厚さが数百 nm から数  $\mu\text{m}$  程度の薄膜の応力値を測定する装置です。この装置を使用することで、非破壊かつ高速、さらに定量的に薄膜の応力値を取得することが可能です。多数のプロセスパラメータの中から、主要な因子を特定し、さらにそれを最適な値へ調整する

ためには、本装置のような高精度な薄膜応力測定装置が必須となります。

### 装置の特徴と応力測定原理

薄膜応力測定装置の外観写真を図 2(左)に、本装置における応力測定原理を図 2(右)に示します。外観写真のように本装置は測定器本体と測定結果の表示、分析を行う PC から構成されています。

本装置は、薄膜の堆積に伴って基板に生じる変形量をレーザーによって高精度に測定することを基本原理としています。薄膜形成前後の基板の変形量を高精度に測定することで、薄膜の応力を定量的に評価することができます。具体的には、以下の Stoney の式を用います<sup>[1]</sup>。

$$\sigma_f = \frac{E_s t_s^2}{(1 - \nu_s) 6 t_f} \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_0} \right)$$

ここで、 $\sigma_f$ は薄膜の応力値、 $E_s$ は基板の弾性率、 $t_s, t_f$ はそれぞれ基板、薄膜の厚み、 $\nu_s$ は基板のポアソン比、 $R_0, R_1$ はそれぞれ製膜前、後の基板の曲率半径です。式の通り、算定には薄膜の堆積前後の基板の曲率半径を測定する必要があります。(なお、製膜前の基板はそれぞれ固有の反りを有しているため、曲率半径の事前測定が必須となります。)

本装置は、半導体レーザーを一軸方向、あるいは基板全面をマッピング状に走査することで、精密に曲率半径を測定することができるレーザー光学系を装備しており、これによって高精度な応力値評価が可能となります。

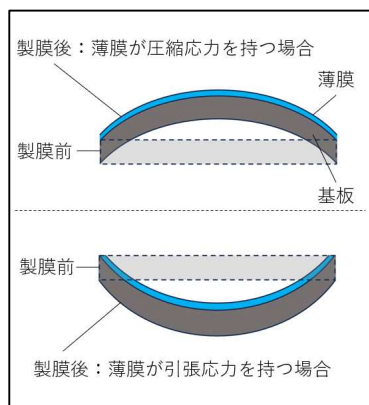


図 1 薄膜応力の種類

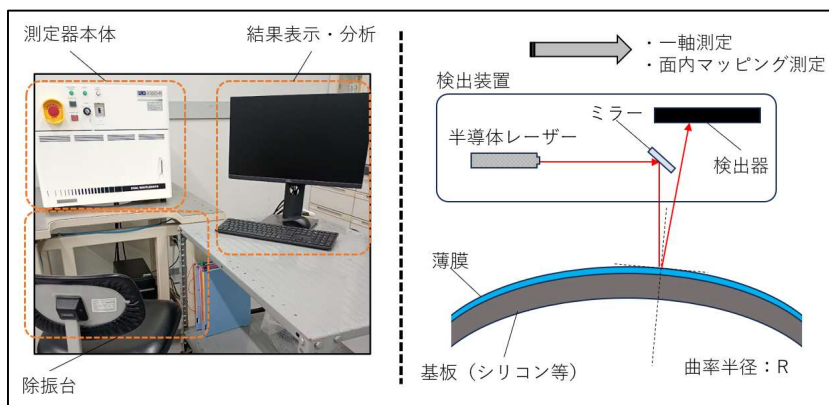


図 2 左：装置外観写真 右：本装置の応力測定原理

表 1 装置の主な仕様

装置仕様	
型番	東明テクノロジー株式会社製 FLX-2320-R
基板サイズ	3~8 インチ
応力範囲	1~4,000 MPa ※1
測定再現性	±1.3 MPa ※2
昇温機能	なし(常温測定のみ)
レーザー使用 波長	670 nm / 780 nm
ロケータ ※3	・3, 4, 5 インチウエハ用 ・70×70 mm□基板用

※1:8 インチシリコンウエハ上の1 $\mu$ m厚の薄膜サンプルを測定した場合※2:8インチ応力スタンダードウエハを10回連続測定した場合※3:基板位置補正用具

### 装置仕様

表 1 に本装置の主な仕様を示します。弊所では 3, 4, 5 インチウエハと 70×70 mm□基板の測定が可能です。なお、本装置は、レーザー光の反射測定により基板の反りを求めるため、薄膜表面は低散乱・低吸収で一定の反射率が必要です。また、光学干渉による反射率低下と測定精度低下を抑えるため、二波長のレーザー光源を備え、多様な屈折率の薄膜や基板に対応しています。

### 分析使用例 (スパッタ Ta 薄膜応力評価)

弊所保有のマグネトロンスパッタ装置(テクニカルシート No.21-04)を用いて作製した Ta 薄膜の応力評価例を示します。スパッタターゲットには Ta(純度 4N)を使用し、直流マグネトロンスパッタ法によってシリコン基板(4 インチ)上へ 300 nm の Ta 薄膜を作製しました。結晶化による応力変動要因を排除するため、基板は非加熱(室温近傍)としました。表 2 に示すように、比較する製膜時圧力とスパッタ電力はそれぞれ 3 水準としました。全てのシリコン基

表 2 Ta 薄膜作製時のスパッタ条件

I. 製膜時圧力調整実験条件	
スパッタ電力	DC 250 W
製膜ガス	Ar ガス 40, 50, 60 sccm
製膜時圧力	0.1, 0.5, 1.0 Pa
II. スパッタ電力調整実験条件	
スパッタ電力	DC 200, 250, 300 W
製膜ガス	Ar ガス 50 sccm
製膜時圧力	0.5 Pa

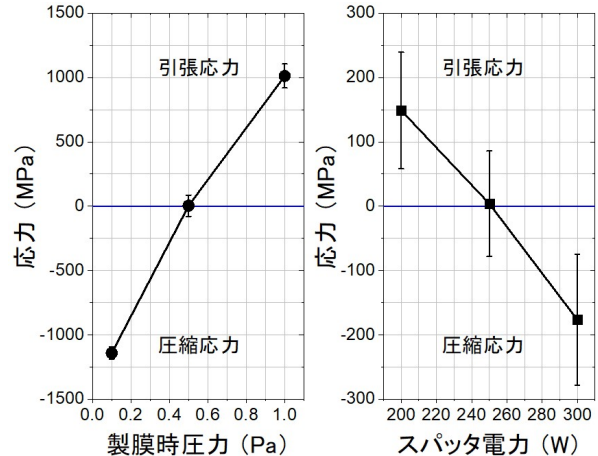


図 3 スパッタ製膜条件による応力値の変化  
左：製膜時圧力依存性 右：スパッタ電力依存性

板で製膜前の反り測定を行った後、各条件で製膜を実施し、製膜前後の基板の反りの変化量から応力値を算出しました。

結果を図 3 に示します。Ta 薄膜は、製膜時の圧力上昇に伴い、圧縮応力(-1,200 MPa)から引張応力(+1,000 MPa)へ、スパッタ電力上昇に伴い、引張応力(+150 MPa)から圧縮応力(-180 MPa)へ変化する様子が明瞭に観測できます。

両者の結果は、スパッタ粒子の運動エネルギーの向上による膜の緻密化が、強い圧縮応力発生の要因となっていることを示唆しています。さらに、製膜時真空度の影響が大きいことから、雰囲気中の Ar や残留ガス分子との衝突がスパッタ粒子エネルギーを大きく増減させ、膜応力を決定する主要因となっていることがわかります。

このような測定を行うことで応力の絶対値が小さい(すなわち、基板の変形や膜剥離のリスクが低い)薄膜を作製するための製膜条件(本分析例では、製膜時真空度 0.5 Pa やスパッタ電力 250 W)を定量的に決定することが可能になります。

### おわりに

本稿の分析例以外にも酸化膜や化合物材料など、真空製膜時の応力抑制が課題となるケースは薄膜産業に多く見受けられます。本装置は、依頼試験と装置使用の両方に対応しておりますので、製品開発に幅広くご活用ください。

また、薄膜作製や薄膜評価に関する技術的な課題についても、技術相談を承っております。お気軽にお問い合わせください。

### 参考文献

[1] G. G. Stoney, Proc. R. Soc. London Ser. A **82** 172-175. (1909).