

RF スパッタ成膜中の基板温度の解析

菅原 智明, 田谷 嘉浩, 下野 功

Analysis of Substrate Temperature with RF Sputtering

Tomoaki Sugawara, Yoshihiro Taya
and Isao Shimono

要 旨

スパッタ成膜中の石英ガラス基板の温度を熱電対を用いて測定した。成膜条件は RF 電力を 25~150W, Ar 圧力を 1~32mTorr と変化させた。その結果, 基板温度は RF 電力が大きいほど高く, 150W では 200°C 以上となった。また, Ar 圧力が小さいほど基板温度は高くなることも分かった。基板温度の時間変化から熱伝達係数や基板への熱流束を計算すると, RF 電力の増加に伴う基板温度上昇はプラズマからの熱流束が増加したためであることが知られた。一方, Ar 圧力の減少による基板温度上昇は熱伝達係数が増加したためであることが分かった。これは, 気体分子の平均自由行程が長くなり, プラズマの位置が基板に近づいたためと考えられる。

近年, 電子部品に対する軽薄短小化の要望が益々強まる中, 我々は安価で汎用性の高い RF スパッタ法を用いた機能性薄膜の作製に関する研究開発を行っている。スパッタプロセスでは, 成膜中にプラズマによって基板が加熱され, 温度上昇することが知られている。デバイスへのダメージを極力低減するためには低温基板への薄膜作製技術が要望されている。成膜中の基板温度上昇を正確に把握することは, 膜の構造や特性の解析, さらにスパッタプロセスを理解する上で大変重要であると考えられる。そこで本研究ではスパッタ成膜条件として RF 電力と Ar 圧力を変化させ, 基板表面の温度を熱電対で測定し, 種々の解析を行った。

ターゲットには純度が 99.99% で 4 インチの ZnS ターゲットを, 基板には 10×20×厚さ 0.6mm の石英ガラスを用いた。基板温度を測定するために, クロメル-アルメル熱電対をセラミック接着剤で基板表面に接着した。熱電対は, プラズマから保護するためにガラス製の絶縁管に通した。基板は, 全体を Al 箔で覆ったガラス製ステージに,

銀ペーストを用いて固定した。

成膜には RF スパッタ装置 (日本真空技術(株)製 SH-350C) を用いた。基板とターゲットとの距離は約 50mm とした。成膜前に, チャンバー内を 5×10^{-6} Torr まで排気した後, 99.999% の高純度 Ar をチャンバー内にフローし, 所定の圧力になるようにメインバルブでコンダクタンスを調節した。成膜は, RF 電力を 25~150W, Ar 圧力を 1~32 mTorr まで種々変化させ, 50~100min スパッタした。スパッタ中は高周波電場の影響, あるいはイオンや電子といった荷電粒子が基板と熱電対に衝突する影響のためにノイズが大きくなり, 温度測定はできなかった。そのため, 測定中は一時的に RF 電力を切ることにした。温度計測には, デジタルマルチメータ (岩崎通信機(株)製 VOAC7412) を用いた。成膜中の基板温度上昇カーブと成膜終了後の基板温度下降カーブから熱伝達係数や熱流束を調べ, プラズマによる基板温度の上昇について解析を行った。

図 1 に, Ar 圧力が 16mTorr でスパッタを 20 min 行ったときの基板温度の RF 電力依存性を示

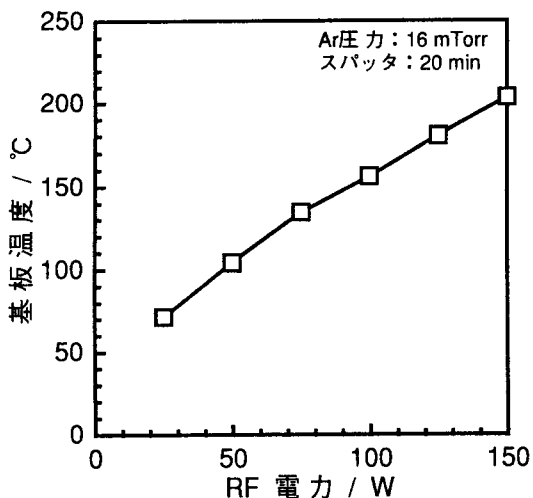


図1 RF スパッタにおける基板温度の電力依存性

す。RF 電力が大きくなるに伴い、基板温度は高くなる事が分かる。

次に基板温度の時間的变化を調べた。図2に、RF 電力を投入してプラズマを発生させ、50min 間スパッタ成膜した後に RF 電力を切った場合の基板温度の時間的变化を示す。スパッタ条件は Ar 圧力が16mTorr、RF 電力が50Wである。RF 電力投入直後から基板温度は急激に上昇するが、20min 以降は緩やかな上昇カーブとなり、温度変化率は僅かとなる。一方、成膜後の基板温度は指数関数的に低下することが分かる。

基板温度の上昇と基板に出入する熱量との関係から、時間 t 後のプラズマによる基板温度上昇 ΔT は次式となる¹⁾。

$$\Delta T = \Delta T_{max} \{1 - \exp(-t/\tau)\} \dots\dots (1)$$

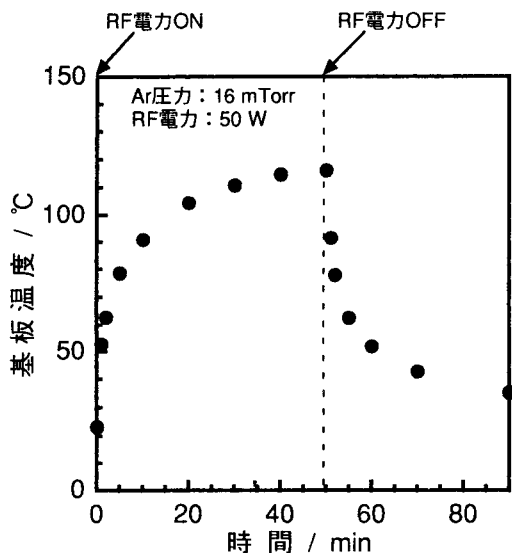


図2 RF スパッタにおける基板温度の時間的变化

また、RF 電力カット後時間 t における基板温度変化は次式で表される。

$$\Delta T = \Delta T_0 \cdot \exp(-t/\tau) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 ΔT_{max} は平衡状態に達したときの基板温度上昇分、 ΔT_0 は放熱後の基板温度減少分、 τ は時定数である。式(1)と(2)において、 τ と ΔT_{max} は次式で表される。

$$\tau = \rho \cdot c \cdot d/h \dots\dots\dots (3)$$

$$\Delta T_{max} = Q/hS \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 ρ は基板の密度、 c は基板の比熱、 d は基板の厚さ、 h は基板の熱伝達係数、 Q は基板への熱流束、 S は基板の面積である。

基板温度の時間的变化の実験データを用い、式(1),(2)によるカーブフィッティングを行い、 τ 、 h 、 Q の算出および評価を試みた。解析にあたり、石英ガラス製基板の定数として、 $\rho = 2.22 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 $c = 0.84 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ 、 $d = 0.6 \text{ mm}$ 、 $S = 2 \text{ cm}^2$ を用いた。Ar 圧力を16mTorrとし、RF 電力を変えた場合の基板温度上昇の測定結果とフィッティングの結果を図3に示す。測定結果は式(1)にほぼ従うことが分かる。これらのカーブから求めた τ 、 h 、 ΔT_{max} 、 Q を表1に示す。 τ は約300 s であり、RF 電力を変化させても大きな違いは認められない。 h は τ に反比例するために RF 電力による変化は

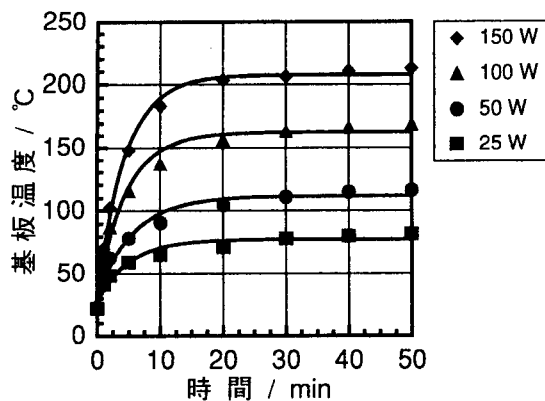


図3 RF スパッタにおける基板温度上昇のカーブフィッティング結果

表1 基板温度上昇から計算した τ 、 h 、 ΔT_{max} 、 Q の RF 電力による違い

RF 電力 (W)	25	50	100	150
τ (s)	299	340	283	261
h ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1}$)	3.75	3.29	3.95	4.29
ΔT_{max} ($^{\circ}\text{C}$)	50.1	78.9	129.3	178.1
Q (mW)	37.5	51.9	102.2	152.9

なく、ほぼ同じ値となる。hの値は境界層の状態によっても異なり、例えばガラスから空気へ熱が伝達するときは $3 \sim 30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$ となる²⁾。本実験ではhが約 $4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$ であり、この値は実験装置の差異を考慮すると妥当な値と思われる。一方、 ΔT_{max} とQについてはRF電力による変化が大きい。QはRF電力に比例して増加している。これより、RF電力を大きくするとプラズマ密度が高くなり、熱流束が増加するものと考えられる。さらにhに変化はなく、Qに変化が見られることから、RF電力による ΔT_{max} の増加は基板に流入する熱流束が増加したためと考えられた。

図4に、RF電力を切った後の基板温度の時間的変化とカーブフィッティング結果を示す。これより、測定結果が式(2)に従うことが分かる。このカーブフィッティングから τ 、hを求めた結果を表2に示す。 τ はRF電力が増加すると大きくなる。また、hは τ に反比例するために減少する。前述の結果から、RF電力を切るまでの間、プラズマから基板へ流入する熱流束はRF電力に比例して大きいことが明らかとなった。しかし、熱流束は基板を設置したステージへも流入すると考えられる。したがって、この場合はRF電力が大きいほど測定開始のステージ温度は高く、基板からステージへの熱伝達は遅くなるために τ が大きく、hが小さくなったと説明することができる。しか

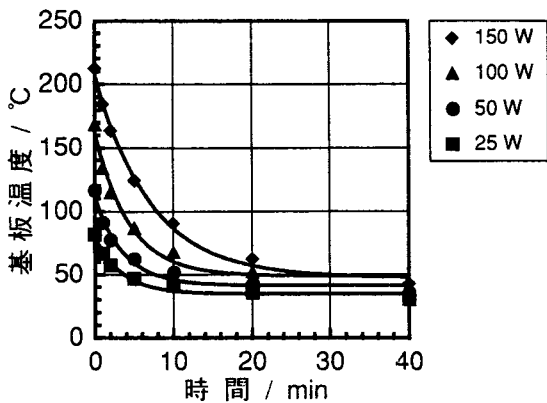


図4 RFスパッタにおける基板温度下降のカーブフィッティング結果

表2 基板温度下降から計算した τ 、h、 ΔT_{max} 、QのRF電力による違い

RF電力 (W)	25	50	100	150
τ (s)	207	220	265	430
h ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$)	5.39	5.09	4.22	2.60

し、詳細についてはステージの温度分布なども調べる必要があり、さらなる測定と解析が必要である。

次に、RF電力を25WとしてAr圧力を変化させた場合の基板温度について調べた。図5に、50min間成膜したときの基板温度を示す。基板温度は、Ar圧力が小さいほど高くなることが分かる。

この原因を調べるため、基板温度の時間的変化を測定した。図6に、50minプラズマをつけた後にRF電力を切った場合の基板温度の測定結果を示す。この測定結果も式(1)と(2)に従うと判断される。RF電力を切った後の放熱カーブからは、Ar圧力が変わっても熱伝達係数は同程度となることが知られた。このことから基板からの放熱は、気体分子よりもステージを通じて行われたものと考えられる。一方、プラズマによる基板温度の上昇を式(1)によってカーブフィッティングして、 τ 、

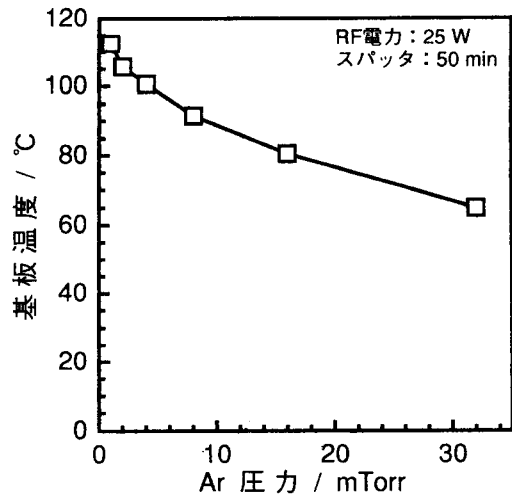


図5 RFスパッタにおける基板温度のAr圧力依存性

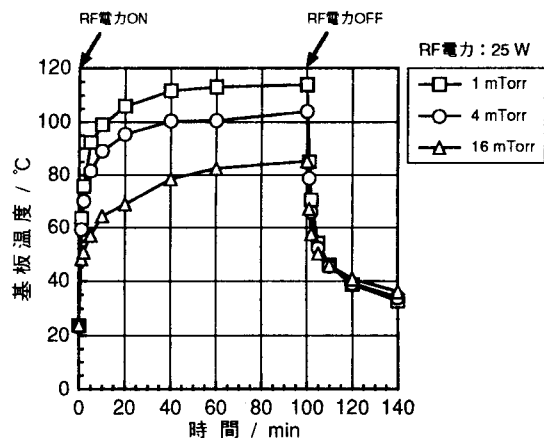


図6 RFスパッタにおける基板温度の上昇・下降特性

表3 基板温度上昇から計算した τ , h , ΔT_{max} , Q のAr圧力による違い

Ar 圧力 (mTorr)	1	4	16
τ (s)	134	132	299
h ($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$)	8.36	8.51	3.75
ΔT_{max} ($^\circ C$)	80.7	70.3	50.1
Q (mW)	135.0	119.5	37.5

h , ΔT_{max} , Q を求めた。表3に計算結果を示す。表3と表1のデータを比べると、Ar圧力が低い場合は τ が小さく、 h が大きいことが分かる。これはAr圧力が低くなると気体分子の平均自由行程が長くなるため、プラズマが基板側へ広がった結果、プラズマと基板との距離は短くなり、熱伝達が速くなったためと考えられる。また、Ar圧力が小さいと Q が大きくなっており、この値は表1のRF電力が100Wの値よりも大きい。基板への熱流束が大きい割に温度上昇が少ない理由については、次のように説明できる。Ar圧力の減少に伴い気体分子の平均自由行程が長くなることで、プラズマが基板側へと移動し、その一方で基板に平行方向のプラズマの長さは短くなると仮定する。Ar圧力の減少に伴いプラズマが基板に近づき基板への熱流束も増えるが、基板に平行方向のプラズマの長さが短くなるためにステージ全体

への熱流束は減少する。その結果ステージの温度はあまり上昇せず、基板からステージへの放熱が大きくなり、基板温度の上昇が抑えられたものと考えられる。

本研究ではスパッタ成膜中のプラズマによる基板温度の上昇について調べた。その結果、RF電力の増加に伴う基板温度の上昇はプラズマからの熱流束が増加したためであることが知られた。一方、Ar圧力の減少による基板温度の上昇は熱伝達係数が増加したためであることが分かった。これは、気体分子の平均自由行程が長くなり、プラズマが基板に近づいたためと考えられる。

謝 辞

本研究を推進するにあたり御指導御鞭撻下さいました室蘭工大教授野村 滋先生、助教授福田永先生、北海道職業能力開発短期大学校講師西野元一先生、吉野正樹先生に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 高木浩一, 佐山国央, 高橋 淳, 藤原民也, 永田雅克, 小野幹幸, Muaffaq Achmad Jani: 電気学会論文誌, Vol.117-A, No.11 (1997), p.1077~1083
- 2) 川下: 熱伝導論 (生産技術センター), (1975), p.21