

Cu スパッタ製膜における成膜速度のターゲット-基板間距離依存性

中野武雄*¹, 馬場 茂*²

Dependence of deposition rate on target-substrate distance
during the sputter deposition of copper films

Takeo NAKANO*¹ and Shigeru BABA*²

ABSTRACT: In sputter deposition process, atoms ejected from the target fly in a rarefied atmosphere and collide with ambient gas atoms. It makes the deposition rate not to vary in a simple manner spatially. In this study, a quartz crystal oscillator thickness monitor was designed to mount on a movable stage in the sputtering chamber, and the deposition rate of copper has been measured as a function of the target-substrate (T-S) distance. The dependence on the gas pressure and the discharge power was studied. We found that the deposition rate decays exponentially by increasing the T-S distance, for all discharge conditions. The higher the gas pressure and/or the discharge power are, the longer the characteristic length of this exponential decay is.

KEYWORDS: Sputter deposition, Target-Substrate distance, Deposition rate, Atomic transport process

(Received June 23, 2003)

1. はじめに

スパッタ法は現代の産業で非常に広汎に用いられている製膜手法であるが、この手法では成膜速度や膜厚分布を予測することが難しく、これらはガス圧力やターゲット-基板間距離 (T-S 距離) によって複雑に変化する。これは、ターゲットからスパッタ過程で飛び出した原子が、当初数 eV 程度の大きな運動エネルギーを持っていること、また基板への輸送中に容器内のガス原子に衝突し、散乱・減速されていくことの 2 点が主な理由である。後者のため、スパッタ製膜では真空蒸着の場合のように立体角を重ね合わせた幾何学的な計算で膜厚分布を求めることができないし、また前者のためにスパッタ粒子の輸送過程を単純な拡散モデルで取り扱うこともできない。基板へ入射する粒子のエネルギー・角度分布もガス圧力や T-S 距離などの実験パラメータによって変化し、これは作製される膜の物性に強い影響を与える (例えば [1,2]

など)。

これまで我々は、モンテカルロ法を用いたスパッタ製膜過程の計算機シミュレーションを開発し、これによって膜厚分布の圧力依存性や化合物薄膜の組成が圧力によって変化する現象を説明することに成功してきた [3]。しかし今後さらに精密なモデルを開発して実験との比較を行ったり、雰囲気ガスの加熱効果 [4] によるガスの密度分布の効果について定量的な議論を行うには、実験パラメータを広い範囲で変えながら効率的にデータを収集する機構が必要であると考えている。そこで本研究では水晶振動子法による膜厚モニタを備えたホルダを試作し、実際のスパッタ製膜チャンバーに導入した。T-S 距離を変化させたときの成膜速度をこの膜厚モニタにより測定し、圧力・電力に対する依存性を調べることで、原子の輸送過程について考察した。

2. 実験

ターゲットを Cu, 放電ガスを Ar として、DC マグネトロンスパッタリングを行った。製膜チャンバーは、内径が直径 210 mm, 高さ 247 mm の円筒形で、図 1 に示すターゲ

*¹ 物理情報工学科助手 (Research Associate, Department of Applied Physics), nakano@apm.seikei.ac.jp

*² 物理情報工学科教授 (Professor, Department of Applied Physics)

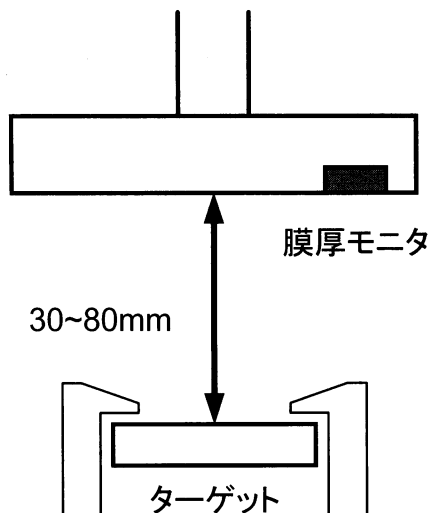


図1 膜厚モニタの配置

ットと膜厚モニタホルダとが、このチャンバーの回転対称軸上に配置されている。ターゲット面と容器上端との距離は156 mmである。

ターゲットは純度99.99%、直径50 mmのCu円板である。膜の堆積量と成膜速度は水晶振動子法によって測定した。膜厚モニタは基板ホルダを模した直径80 mm、厚さ19 mmの円板で、中心から27 mm離れた位置に水晶振動子が埋め込まれている。水晶振動子の電極信号を同軸ケー

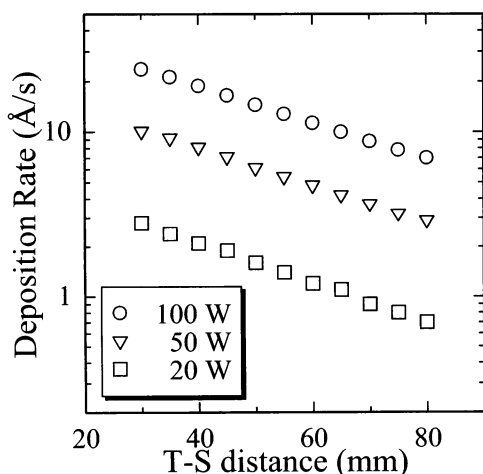


図2: Ar ガス圧力 3.3 Pa における成膜速度の T-S 距離依存性

ブルでチャンバー側面より外部に取り出し、振動子モニタ (Inficon 社: XTC deposition monitor) によって膜の堆積量と成膜速度とを計測した。この膜厚モニタのホルダは直線導入機によって上下に可動となっている。本実験ではターゲットとホルダとの距離が30~80mmの範囲で成膜速度を測定した。

放電に用いた Ar ガスの純度は99.999%で、フローコントローラを用いて流量を10 sccm 一定に制御した。その上で排気バルブのコンダクタンスを調整し、チャンバー内の Ar ガス圧力を0.7~14 Paの範囲で変化させた。ガス圧力の測定はシュルツ型真空計によって行った。圧力は真空計の表示値を Ar の感度係数1.25で割って決定した。放電電力はスパッタ用直流電源(Advanced Energy 社 MDX-1.5k)によって印加し、電力一定モードで放電を行った。放電電力は各圧力で100, 50, 20 Wとした。

3. 結果および考察

図2は圧力3.3 Paにおける成膜速度のターゲットー基板間距離依存性である。いずれの圧力においても、成膜速度はこのように距離に対して指数関数的に減衰した。この減衰長(成膜速度が1/eになる長さ)をそれぞれの圧力・電力で求めたのが図3である。ガス圧力が高いほど減衰長は短く、また同じ圧力では放電電力が小さいほど減衰長は短かった。後者については、ターゲット近傍のガスが熱せられて密度が下がる("Sputtering Wind"とし

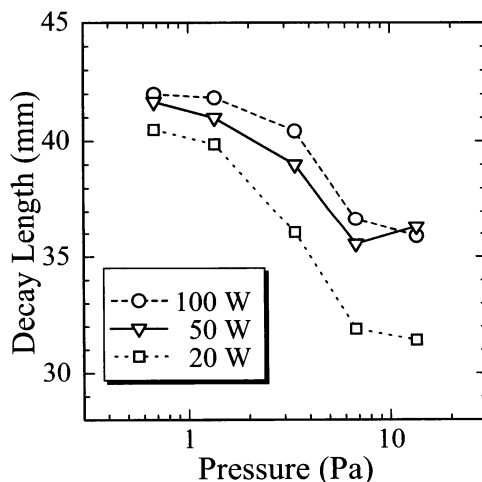


図3: 成膜速度の T-S 距離依存性における減衰長の圧力による変化

て知られている)現象により、実効的に圧力が低くなったのと同じ効果が生じていたものと考えている。

製膜装置を1次元系とみなせる場合には、成膜速度の T-S 距離依存性は Keller と Simmons によるモデル[5]によって良く説明できると言われている [6,7]。Keller-Simmons のモデルは、高エネルギーのスパッタ原子が Poisson 分布に従って熱中性化し、熱中性化後は拡散によってターゲット方向および基板方向に移動して付着するとしたモデルである。彼らのモデルによると、ターゲットから放出される原子フラックスを Γ_0 としたとき、ターゲットから距離 D だけ離れた基板に入射する原子フラックス Γ_i は

$$\Gamma_i = \frac{3\Gamma_0\lambda}{2D} \left[1 - \exp\left(-\frac{2D}{3\lambda}\right) \right] \quad (1)$$

と与えられる。ここで λ は高エネルギー状態のスパッタ粒子が熱中性化するまでの平均長さに対応する。熱中性化とは、ターゲットから放出された高エネルギーのスパッタ原子(この場合 Cu)が、雰囲気ガスの Ar と衝突してエネルギーを失っていき、ガス温度に対応する熱速度にまで減速された状態を言う。単位長さあたりにスパッタ原子がガス原子と衝突する回数 ν は、スパッタ粒子の平均自由行程に反比例する。平均自由行程はガス圧力 p (より正確にはガス密度 n) に反比例するので、結局 ν は p に比例する。熱中性化するまでの衝突回数 $\nu\lambda$ はスパッタ原子とガス原子の種類によって一定であると考えられるから、結局 λ は圧力 p に反比例する。この積 λp は、throwing-distance と呼ばれる。

今回の実験における成膜速度は、図2に示すように T-S 距離とともに指数関数的に減衰し、Keller-Simmons の式には合致しなかった。今回の実験配置は一次元系とみなすことは困難なので、これは当然とも言える。また図3を見ると、減衰長は圧力に対して緩やかな変化しかしておらず、この減衰長を throwing-distance の λ と考えることも困難である。以前アルゴン雰囲気下で銅をスパッタした際には、基板距離 5 cm において、熱中性化の効果が顕著に現れるのは 2~3 Pa 程度であった [3]。よって本実験の圧力領域においては、熱中性化されたスパッタ粒子の3次元的(円筒対象なので2次元的と言っても良い)な拡散移動が製膜分布を支配しているものと考えている。圧力が高くなるとスパッタされた銅原子はターゲット近傍で早々に減速されて拡散的な移動に移行するため、高

圧力では減衰長が短くなっているのであろう。

なお現在、水晶振動子を複数個配置し、成膜速度のホルダ上での分布を測定できるような装置を製作中である。成膜速度 (=膜厚) の分布が T-S 距離によってどのように依存するかを測定し、またこの系に対して粒子輸送過程のモンテカルロ・シミュレーションを適用することによって、さらに粒子輸送の状態に関する知見が得られると期待している。スパッタ製膜における膜厚分布の均一化は産業的にも重要な要請であり、分布のスパッタ条件依存性に関する実験結果を蓄積することは、この点にも寄与するものと考えている。

4. まとめ

上下動できる水晶振動子モニタのホルダを試作し、Cu のスパッタ製膜における成膜速度の T-S 距離依存性を測定した。成膜速度は T-S 距離の増加とともに指数関数的に減少し、その減衰長は圧力が高く、放電電力が小さいほど短くなった。この結果は従来の Keller-Simmons による一次的なモデルでは説明できず、今後実験・理論の両面からより詳細な検討が必要である。

謝 辞

膜厚モニタの設計・開発においてご協力いただいたバキュームプロダクツ社の大橋哲二氏に感謝します。本研究は成蹊大学工学部特別研究費の援助を受けて行われました。

参考文献

- [1] D. M. Mattox, J. Vac. Sci. Technol. A **7** (1989) 1105.
- [2] S. M. Rossnagel and J. J. Cuomo, Thin Solid Films **171** (1989) 143.
- [3] 中野, 真空 第45巻 (2002) 699.
- [4] S. M. Rossnagel, J. Vac. Sci. Technol. A **6** (1988) 19.
- [5] J. H. Keller and R. G. Simmons, IBM J. Res. Develop., **23** (1979) 24.
- [6] T. P. Drüsedau, M. Löhmann and B. Garke, J. Vac. Sci. Technol. A **16** (1998) 2728.
- [7] T. P. Drüsedau, J. Vac. Sci. Technol. A **20** (2002) 459.