ノート

サブ波長構造を実現するための光学シミュレーションと凝集金属マスクの生成条件

宮口　孝司*　菅野　明宏*　山田　敏浩*　小林　泰則*　佐藤　健**

Opticlal Simulation and Fabrication of Metal Agglomeration Masks for Making Subwavelength Structure

MIYAGUCHI Takashi*, KANNO Akihiro*, YAMADA Toshihiro*,
KOBAYASHI Yasunori* and SATO Takeshi**

1. 緒　　言

誘電体表面に等価屈折率を連続的に変化させるようなある種のサブ波長構造を形成すると，幅広い波長に渡って反射率を劇的に低下させることができる。これまで，液晶ディスプレイやフェイスシールドなどの平面に連続してサブ波長構造を形成する試みなどが行われてきた。

それらの方法の一つに，任意の 3 次元形状の金型表面に金属微粒子をマスクにしてドライエッチングすることによってサブ波長構造を形成する方法がある [1]。この方法を実現できれば，簡便に広い面積に渡ってサブ波長構造を形成することができるが，金属微粒子の詳細な生成条件については明らかにされていない。

本研究では，金型表面にサブ波長構造を形成するための金属マスクを生成する条件を検討した。金属マスクは，金属薄膜が高温下で自己組織的に凝集する現象を応用した。

また，実験に先立ち，反射率を大きく低減するために必要なサブ波長構造を構成するものとしてナノ突起の形状を仮定し，必要な構造的特徴を電磁光学シミュレーションによって探索した。

2. 光学シミュレーション

目標とする突起形状を設計・解析するために，RSoft Design Group 社の DiffractMod を使用し，RCWA （Rigorous Coupled Wave Analysis）法によってサブ波長構造の回折効率を解析した。ここで計算される回析効率は反射率に相当する。

図 1 に光学シミュレーションに用いた形状と各パラメーターの規定値を示す。基本形状は円錐台であり，P を 3 水準 400nm, 500nm, 600nm とし，D_1 を 200～693nm まで変化させた場合の回折効率を計算した。

円錐台の屈折率は 1.5，真空の屈折率を 1 とした。円錐台はそれと同じ屈折率の平板に接している。計算は，図示した円錐台の配置を単位胞とする周期的境界条件で実施した。

光は突起の無限上方から底面が接する平面に垂直に入射し，そこから反射する光の入射光に対する強度比を回折効率として可視波長域（400～800nm） に渡って求めた。

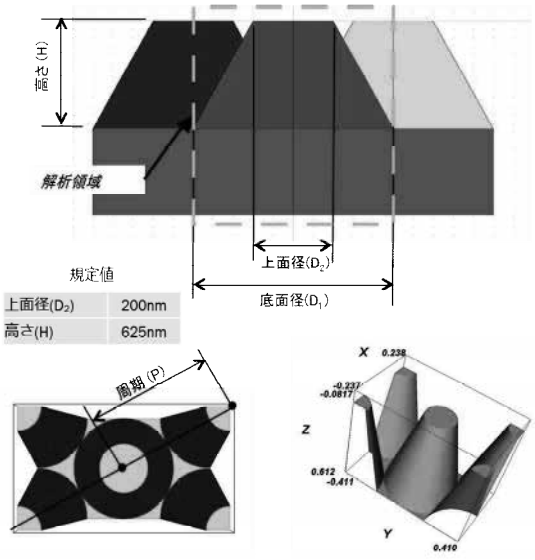

図 1　光学シミュレーションに用いた形状と規定値

* 研究開発センター
　レーザー・ナノテク研究室
** 下越技術支援センター

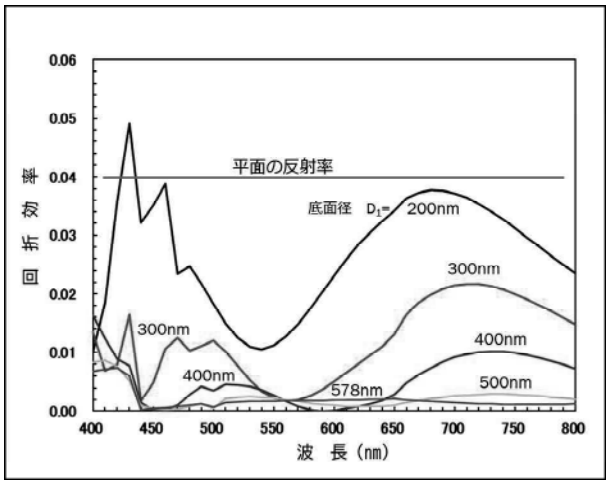

図 2　光学シミュレーション結果の一例
P=500nm

図 2 に光学シミュレーション結果の一例として P=500nm の結果を示す。D_1 の最大値は各 P の値において，円錐台が底面を埋め尽くす最小の径である。因みに平面の反射率は 0.04 である。

D_1 が大きくなると，全体的に回折効率は低下することが分かる。

また，D_1 が大きくなるとピークは長波長側にシフトする。

D_1 が大きくなると回折効率は全体的に低下するが，特定の波長 λ_{lim} より低波長側では，回折効率が比較的高い領域が残る。P=500，600nm では，それぞれ λ_{lim}=440, 520nm であり，P=400nm では λ_{lim} は認められない。

3. 金属薄膜の凝集による微細化

3.1　実験方法

金属薄膜はマグネトロンスパッタリング装置（芝浦メカトロニクス CFS-4EP-LL）によって成膜した。ターゲット金属の直径は ϕ76mm である。基板には，厚さ 0.525mm の Si ウェハを □15mm に切断したものを用い，アセトンとコットンワイパで表面の汚れを拭き取った。成膜時，基板の固定にはポリイミドテープを用いた。金属薄膜は Ag と Ni であり，膜厚は 30，50，70nm とした。

試料は大気中と真空中で加熱を行い，冷却後，走査型電子顕微鏡で観察した。大気中加熱はマッフル炉で目標温度まで 30 分で加熱し 5 分保持したのち炉冷した。試料は合成石英製の底が平らなルツボに入れ塵が入らないように，合成石英製のふたをした。目標温度は，Ag は 600℃（膜厚 50nm のみ 500℃及び 600℃）であり，Ni は 600℃及び 900℃であった。

真空中加熱は熱インプリント装置で目標温度までフルパワーで上昇させ，目標温度到達後，直ちに上下のアンビル部に圧縮空気を送り冷却した。加熱時の上下アンビル間の距離は 3mm であり，試料は ϕ100mm, 厚さ 0.525mm の Si ウェハ上に置いた。目標温度は 600℃であり，昇温時間は約 10 分，圧力は 5～10Pa であった。

3.2　実験結果

図 3 に加熱した Ag 薄膜（50nm） の走査型電子顕微鏡像を示す。下段は凝集の均一性を確認するため，俯瞰的に観察したものである。

Ag 薄膜は，厚さ 70nm を除いていずれの条件でも凝集した。大気中 500℃では比較的大きさの揃った直径 300nm 程度の粒子に直径 100nm 以下の粒子が混在する。大気中 600℃も同様の傾向が認められるが，100nm 以下の粒子の割合は少ない。膜厚 30nm では 100nm 以下の粒子割合が多かった。粒子は観察した数十 μm の範囲に渡って均一に分布している。凝集面の

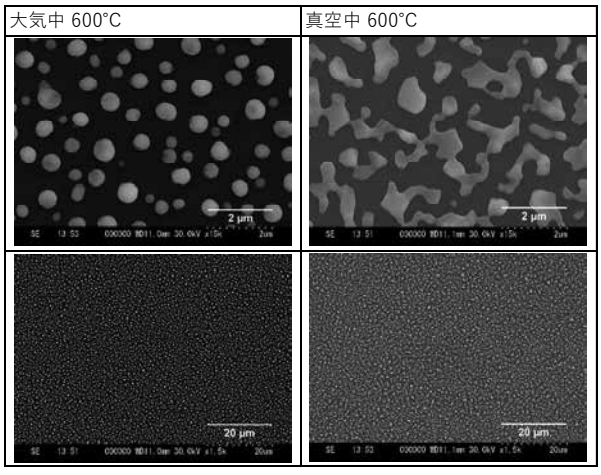

図 3　加熱した Ag 薄膜（膜厚 50nm）

目視による観察では，つやのない灰色の膜で覆われているように見える。

真空中加熱では球状化せず，アメーバ状に凝集した。この条件では定温処理時間がなかったことから，球状に凝集する前の過渡的な状態で凝固した可能性がある。

Ni はいずれの条件でも凝集せず，結晶粒の成長のみが認められた。

また条件によっては 100nm 以下の孔が生じた。結晶粒は大気中の 900℃加熱のとき顕著で，真空中加熱では孔の形成が顕著であった。

また，膜厚 70nm の場合，金属薄膜に亀裂が生じた。

今後，生成条件を詳細に検討するためには，画像処理による凝集粒子の直径や粒子間距離の計測が必要である。

4. 結　　言

(1) サブ波長構造の基本形状とした円錐台について，光学シミュレーションの結果，周期 P，高さ H および上面径 D_2 を固定した場合，底面径 D_1 が大きくなると回折効率は低下し，ピークは長波長側にシフトする。

(2) 光学シミュレーションによれば，回折効率は，λ_{lim} より低波長側で比較的高くなり，P=500, 600nm では，それぞれ λ_{lim}=440, 520nm であり， P=400nm では λ_{lim} は認められなかった。

(3) Ni は本実験の条件範囲内では凝集することはなく，結晶粒の成長のみが認められ，条件によっては 100nm 以下の孔が形成された。

(4) 膜厚 30, 50nm の Ag は，それぞれ 500, 600℃で凝集した。凝集は大気中，真空中のいずれでも生起したが，真空中では球状にならなかった。

謝　　辞

本研究は（公財）金型技術振興財団の「研究開発助成」によって実施した研究の一部です。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

1) 特許第 5317141 号