

スパッタリングによる薄膜

北 島 真・和 佐 清 孝

松下電器産業株式会社中央研究所 〒570 大阪府守口市八雲中町 3-15

(1984 年 8 月 31 日 受理)

Thin Films Prepared by Sputterings

Makoto KITABATAKE and Kiyotaka WASA

Central Research Laboratories, Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.
3-15 Yagumonaka-machi Moriguchi-shi Osaka 570

(Received August 31, 1984)

Some properties of films deposited by sputtering are discussed. (Chap.2); The construction of the sputtering systems are explained. (Chap. 3); Sputtering yield, sputtered particles, mean free path, sputtering atmosphere, and sputtered film are discussed in detail on the basis of sputtering. The energy of the sputtered particles is considered to be the most essential factor. (Chap.4); The c-axis oriented ZnO film and the amorphous PbTiO₃ film were studied as examples of thin films prepared by sputtering.

1. 序 論

加速されたイオンや中性原子等の粒子が固体（ターゲット）表面に照射されターゲット表面の構成原子と衝突した結果、運動量の交換によってターゲット表面の原子・分子が空間に飛び出す現象をスパッタリングという。これらの空間に飛び出した原子・分子はスパッタ粒子と呼ばれ、大きな運動エネルギーを有しており、これらの高速粒子を基板上に凝縮させて薄膜を形成することをスパッタ蒸着という。

スパッタ蒸着による薄膜の形成の歴史は、Bunsen と Grove がグロー放電により薄膜を形成した 1852 年にさかのぼるが、工業的に広く用いられてきたのは真空蒸着よりはるかに新しく 1970 年代に入ってからである。通常 $10^{-1} \sim 10^{-5}$ Torr の減圧雰囲気中で、正イオンを発生させ、この正イオンを薄膜材料からなるターゲットに照射する。現在広く用いられているスパッタプロセスは、正イオンを発生する方法、使用する電源の種類、電極の構造等により、

- 直流 ダイオードスパッタ
- マグネトロンスパッタ
- 高周波ダイオードスパッタ
- マグネトロンスパッタ
- イオンビームスパッタ

等に分類される。

気相状態の高速蒸発粒子が基板上で凝縮する薄膜形成過程は、熱平衡状態での成長による通常の結晶成長等とは異なり、非熱平衡状態での成長であり、スパッタ薄膜はそれ固有の特異な構造あるいは性質を示す。一般の真空蒸着 (MBE も含む) においては、凝縮して膜を形成する蒸発粒子が大きな運動エネルギーを持つことはなく、スパッタリングによる薄膜形成においての一番の特徴はスパッタ粒子の持つ大きな運動エネルギーにある。この大きなエネルギーを有する粒子の凝縮時の速いクエンチングが膜形成に与える影響は非常に複雑であり解明されていない部分が多いが、反面、新材料・Exotic Material の形成等、将来への夢を与えるものである。

2. スパッタ蒸着装置

2.1 直流スパッタ装置

Fig. 1 に直流スパッタ装置の構成を示す。一對の陰極と陽極からなる 2 極冷陰極グロー放電管構造で、陰極はターゲット、陽極は基板ホルダの役目を兼ねる。通常スパッタに用いるグロー放電は、真空槽内を 10^{-1} Torr 程度のアルゴン雰囲気として電極間に数 kV の直流電圧を印加すると発生する。グロー放電の放電様相を Fig. 2 に示す。放電電圧の大部分は陰極暗部にかかっており、この陰極直前の電位降下 V_c を陰極電位降下と称する。

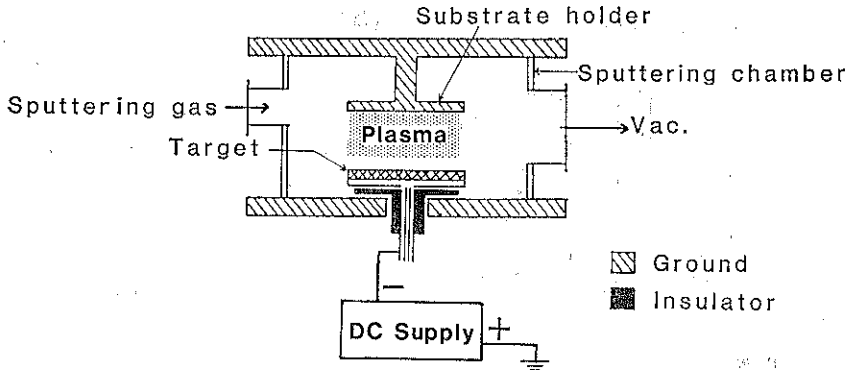


Fig. 1 Construction of the DC-sputtering apparatus.

直流グロー放電スパッタにおいては、グロー放電によりアルゴンプラズマが形成され、プラズマ中のアルゴンイオンが陰極電位降下で加速されターゲット陰極表面に衝突し、ターゲット表面をスパッタ蒸発させる。このスパッタ粒子が対向して置かれた基板上に凝縮して薄膜が形成される。ここで陰極暗部の長さは放電ガス中での平均自由行程に等しく、ターゲットへの入射イオンのエネルギー

ギーは陰極電位降下で加速されたエネルギーに等しい。上記プラズマに磁界を印加するとプラズマの集中が起こりスパッタ室のガス圧を下げるができる。このような構成のスパッタ装置をマグネトロンスパッタと呼ぶ。

2.2 高周波スパッタ装置

Fig. 3 に高周波スパッタ装置の構成を示す。通常のスパッタではグロー放電は 10^{-2} Torr 程度のアルゴン雰囲気とし、ターゲット電極とアースされたスパッタ室壁・基板ホルダー間に数 kV の高周波 (13.56 MHz) を印加して発生させる。高周波放電においては、電子が高周波により電極間を往復運動するため衝突電離が効果的となり、直流スパッタに比べて1桁程度低いガス圧でもスパッタ可能である。マグネロン型にすればさらに1桁ガス圧を下げるができる。

高周波スパッタにおいては、ターゲット電極に直流的負電位を外から与えなくともセルフバイアス効果でターゲットが負電位となりスパッタが起こる。グロー放電で発生したプラズマ中の電子とアルゴンイオンは、高周波電圧によりターゲット及びスパッタ室壁・基板の両電極

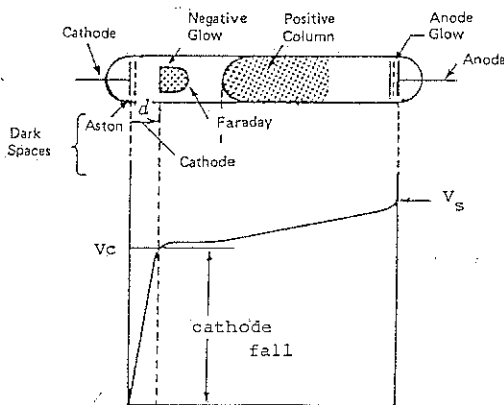


Fig. 2 General feature of glow discharge.

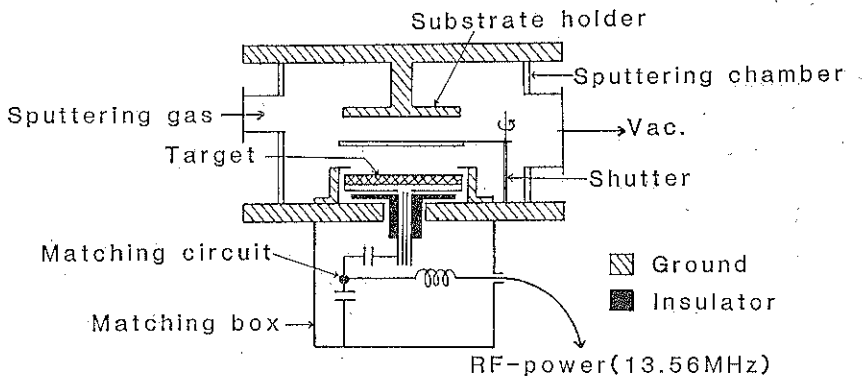


Fig. 3 Construction of the RF-sputtering apparatus.

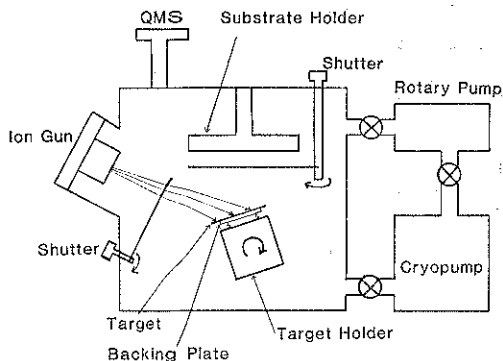


Fig. 4 Construction of the ion-beam-sputtering apparatus.

に交互に衝突する。電子はアルゴンイオンよりも移動度が大きいので、電極表面に電子が過剰に衝突し電極表面をプラズマに対して直流的に負電位とする。ターゲットが絶縁体の場合、又、ターゲットが金属でありブロッキングキャパシタを介して高周波電圧が印加された場合には、回路は直流的にオープンとなり、プラズマに接している両電極の大きさに関係して、両電極にかかるプラズマに対する負電位の大きさに差が生ずる。それぞれの電極の面積 S_1 , S_2 とプラズマ電位との電位差の直流成分 V_1 , V_2 との関係は

$$\left(\frac{V_1}{V_2}\right) = \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^\alpha$$

と表わされる。ここで $\alpha=4$ となるモデルも提案されているが確立されたものではない。ここでいえることは、小さな面積の電極の方が大きな負電位を示し、アルゴンイオンをより引き付けることである。つまり、小さな電極の側をターゲットとすればスパッタ蒸着が可能となる。直流スパッタによる絶縁物のスパッタは不可能であるが、高周波スパッタは任意のターゲットに対して有効である。

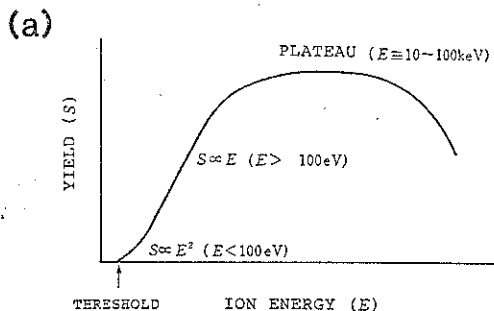
2.3 イオンビームスパッタ装置

Fig. 4 にイオンビームスパッタ装置の構成を示す。イオンビームスパッタにおいては、スパッタ室とプラズマ領域（ターゲットに照射される正イオンを形成する）が分離しており、スパッタ室を $10^{-4} \sim 10^{-5}$ Torr 程度の高真空中に保ちスパッタできる。さらに、入射イオンのエネルギー及び密度を任意の値に設定でき、スパッタ蒸着膜へのプラズマの関与も除くことができ、より制御された膜形成が可能である。

3. スパッタリングの基礎

3.1 スパッタ率

入射イオン1個についてのターゲットからのスパッタ



(b)

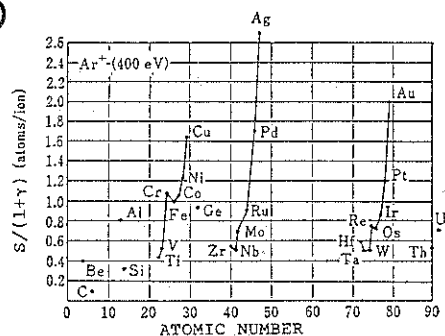


Fig. 5 Sputtering yield vs (a) ion energy.
(b) atomic number.

蒸発原子数をスパッタ率と定義する。スパッタ率に関与するパラメータで重要なもの3つについてその関係を説明する。

(1) 入射イオンのエネルギー

Fig. 5(a) 入射イオンエネルギーとスパッタ率の関係を示す。入射イオンエネルギーにはスパッタの起こるしきい値が存在し、その大きさは通常スパッタガスとして用いられる Hg^+ , Ne^+ , Ar^+ の入射イオンと金属ターゲットについて $15 \text{ eV} \sim 30 \text{ eV}$ 程度である。入射イオンエネルギーが増加するとスパッタ率は増加するが、エネルギーが非常に高くなると入射イオンがターゲット内部に深く打ち込まれることとなり、エネルギーがターゲット内部の多くの原子に散逸してしまいスパッタ率が減少すると考えられる。

(2) 入射イオンとターゲット材料

入射イオンについては不活性ガス (Ne , Ar , Kr , Xe) が他のイオンに比べて高いスパッタ率を示す。これは不活性ガスがターゲット物質との反応を起こしにくく、ターゲットに付着する確率が極めて少ないことと対応していると考えられる。通常アルゴンガスが用いられるのはこのためである。ターゲット物質については Ar 入射イオンについてのスパッタ率が Fig. 5(b) のごとく原子番号によって周期が認められる。この周期性はターゲット

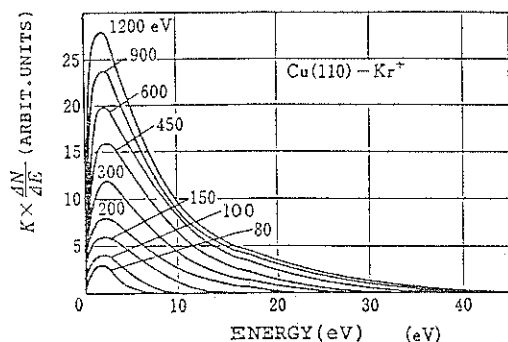


Fig. 6 Energy distribution of atoms sputtered at various bombarding ion energy.

物質の d 殻が電子で満され、結合エネルギーが減少するに従ってスパッタ率が高くなる傾向にある。

(3) 入射イオンの入射角

入射イオンの入射角によってスパッタ率は変化し、一般に $30 \sim 40^\circ$ 程度の入射角において最大となる。比較的低エネルギーの入射イオンを斜入射するとスパッタ粒子は斜に飛び出す。この事実は、スパッタ機構が入射イオンからスパッタ粒子への運動量の受け渡しによっていることを示している。

3.2 スパッタ粒子

入射イオン衝突により、ターゲットからスパッタ蒸発してくる粒子をスパッタ粒子と呼ぶ。通常のスパッタ蒸着では、入射イオンは数 $100 \sim$ 数 keV 程度のエネルギーを有しており、スパッタ粒子はほとんどターゲット物質の中性の単原子であるが、2原子分子を数%, 3原子分子をさらにその $1/100$ 程度含んでいる。入射エネルギーが上昇すると多原子分子の比率が増え3原子以上も認められる。

スパッタ粒子の平均エネルギーは真空中での熱蒸発原子のエネルギーより $1 \sim 2$ 桁高く、この高エネルギーが薄膜の性質を特徴付ける。Fig. 6 に銅ターゲット (110) 面に Kr イオンを面に垂直に入射させスパッタした場合のスパッタ粒子のエネルギー分布を示す。入射イオンのエネルギーが変化してもほぼ同じエネルギーで分布の最大を示し、入射イオンエネルギーの上昇に伴って全エネルギーにわたってスパッタ粒子の数が増す。平均のスパッタ粒子のエネルギーは $4 \sim 10 \text{ eV}$ 程度であり、わずかであるが数 10 eV 程度の高エネルギーのスパッタ粒子も存在する。スパッタ時にイオン化されたスパッタ粒子はターゲットの周りの電界によってターゲット表面に逆流し大部分は捕獲されるが、一部の高エネルギーのイオン化したスパッタ粒子は基板に到達する。これらの高エネルギーのスパッタ粒子は全スパッタ粒子の数%以下と

考えられるが、蒸着された薄膜への影響は無視できないものと考えられる。

3.3 平均自由行程

スパッタ粒子は放電空間 (直流・高周波スパッタにおいて) を通って基板まで到達し凝縮して膜を形成するが、その途中で放電ガス分子との衝突が起こる。放電ガス雰囲気中での平均自由行程は、放電ガス分子が低エネルギー (室温程度) で、スパッタ粒子が高エネルギー ($10^4 \sim 10^5 \text{ K}$ の温度に対応) なのを考慮すると

$$\lambda_1 \simeq \frac{1}{\pi(r_1+r_2)^2 n_2} \sim \frac{10^{-2}}{P_r(\text{Torr})} (\text{cm})$$

r_1 : スパッタ粒子の半径

r_2 : 放電ガス “

n_2 : 放電ガス粒子の密度

となる。

ここでターゲットから基板までの距離を数 cm とすると、 10^{-2} Torr 程度の放電ガス圧下ではスパッタ粒子は基板に凝縮するまでに数回放電ガス分子と衝突しエネルギーが減少する。平均のスパッタ粒子のエネルギーは基板上で室温程度となると考えられるが、Fig. 6 で示したエネルギー分布より、少量の高エネルギーのスパッタ粒子が依然として存在していると考えられる。 10^{-3} Torr 以上の高真空においては、衝突の確率は非常に小さくなってゆき高エネルギーのスパッタ粒子がそのまま基板に到達する。

3.4 スパッタ雰囲気

イオンビームスパッタ以外のスパッタ装置においては、スパッタ室内にプラズマを形成するため、スパッタ雰囲気が重要である。放電を起こすためにはある程度のガス圧が必要であり、スパッタ室は、直流スパッタにおいて $10^{-1} \sim 10^{-2} \text{ Torr}$ 程度、高周波スパッタにおいて $10^{-2} \sim 10^{-3} \text{ Torr}$ 程度のアルゴンガスで満たされている。このアルゴンガスは絶えずスパッタ室壁及び基板に熱運動によって衝突している。この衝突する数は

$$J = 3.52 \times 10^{22} \frac{P(\text{Torr})}{\sqrt{MT}} (\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$$

M : 気体の分子量

T : 温度

P : 圧力

で表わされる。 10^{-6} Torr で、ほぼ表面原子数に匹敵する数のガス分子が1秒間のうちに衝突することになる。同じ数の金属のスパッタ粒子が基板に衝突し凝縮したすると1時間で $1 \mu\text{m}$ ほどの膜厚となる。このことより、通常のスパッタ蒸着においては、基板表面にスパッタ粒子よりも数桁多いアルゴンガスが衝突していることがわかる。しかし、アルゴンは反応性に乏しく、金属表

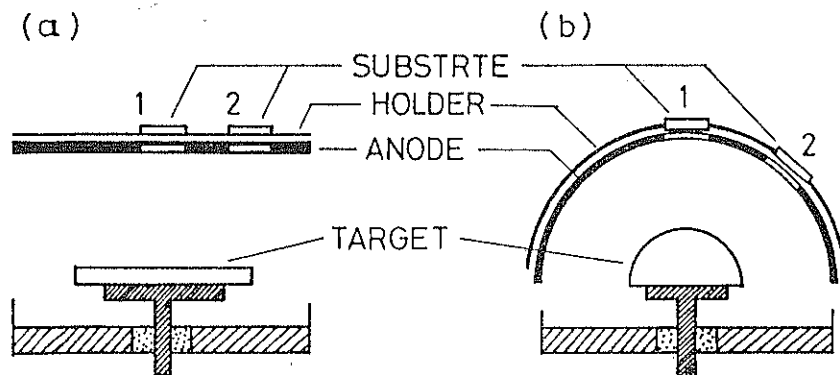


Fig. 7 Construction of the electrodes for the preparations of the ZnO films.
(a) planar (b) hemispherical

面への物理吸着エネルギーも $0.05 \sim 0.35 \text{ eV}$ と小さいため基板表面への滞在時間が短くほとんどが再蒸発して、膜中に含まれる確率は非常に小さい。(零ではないことに注意)

又、プラズマの膜形成に及ぼす影響も重要と考えられ、基板表面に、光子、電子、スパッタガス分子とそのイオン、不純物、及びこれらの化合物等が、色々のエネルギーを持って飛来する中で膜形成が行なわれる。

スパッタ雰囲気中に反応性ガスを混入することにより、反応性ガスとスパッタ粒子が化合した化合物薄膜を形成することを反応性スパッタという。反応性スパッタにおいては、プラズマ中での反応性ガスの励起等が起こり、非常に複雑な様相を呈し解明されていない部分も多いが、スパッタによる薄膜形成の中でも重要であり、工業的にも興味の大きな分野である。

3.5 スパッタ蒸着膜

これまでスパッタ蒸着プロセスにおける種々の特徴について述べてきた。ここではこれらの結果として形成されたスパッタ蒸着膜の特徴について列挙する。

- 高融点材料の蒸着が容易
- 化合物薄膜の形成が比較的容易
- 比較的低温プロセスによる結晶膜形成が可能
- 基板との付着が一般に優れている
- 内部応力が物質固有のものでなく、スパッタ条件に関係している
- 薄膜の生成の初期過程において、島の密度が大きく島の凝集による連続膜が早く形成される
- 繊維構造、柱状構造が比較的是っきり現われる

これらの特徴は工業的に有利と思われるものも多く、応用が活発になってきている。

4. スパッタリングによる薄膜

4.1 ZnO スパッタ膜

ZnO は大きな圧電性を有しており、誘電率が強誘電性圧電結晶に比べて小さいため高周波領域でも使用可能な圧電体として利用される。ZnO のバルク単結晶は水熱合成法によって得られるが最大でも数 cm^3 程度のものであり実用上充分な大きさの単結晶を作製することは困難である。ここで ZnO の薄膜の形成が検討され、スパッタ法による形成が実際に工業化され、弾性表面波フィルタ等が市販されている。この ZnO スパッタ膜について説明する。

ガラス板のような非晶質の基板を用い、酸素を導入した反応性高周波スパッタによって ZnO ターゲットをスパッタすることにより、C-軸配向した多結晶 ZnO スパッタ膜が得られる。この場合の基板温度は、形成速度が $1 \mu\text{m/hr}$ 以下の場合には $100 \sim 200^\circ\text{C}$ 程度が最適である。同様の膜を CVD 法で形成しようとする、基板温度は 800°C 程度の高温を必要とし、スパッタにおいては低温で結晶性薄膜が得られることがわかる。ZnO スパッタ膜の C-軸配向性には基板位置の効果も大きく関与する。基板を Fig. 7(a) の 1 の位置に配置すると、スパッタ膜の C-膜配向性がしばしば乱れる。これは、アノード中央部はターゲットからの輻射による基板表面の温度上昇、高速 2 次電子、中性粒子等の衝撃が大きいためと考えられる。これらの衝撃を避けて、アノード中央でなく Fig. 7(a) の 2 の位置に基板を配置したり、Fig. 7(b) に示すような同心球電極構造にすると再現性良く C-軸配向膜が形成される。

基板温度の上昇は、基板表面でのスパッタ粒子の拡散運動を活発にし、基板表面での方向性を持った結晶成長を阻害すると考えられる。理想的な結晶成長を行うためにはスパッタ粒子に基板表面で適当な拡散運動をさせることが必要であり、基板温度、基板への入射粒子のエネルギー、薄膜形成速度は重要なパラメータでありこれらの制御が大切である。

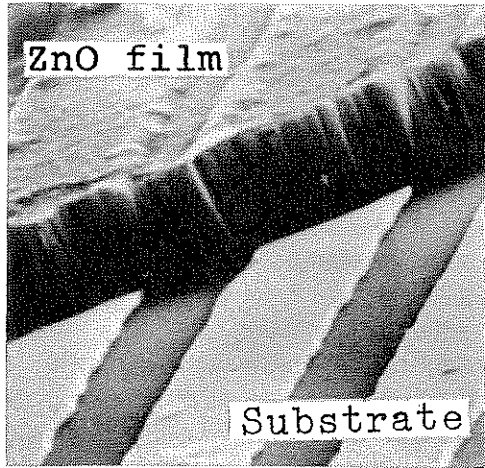


Fig. 8 Fiber structure of the ZnO film.

Fig. 8 に ZnO スパッタ膜の断面の SEM 写真を示す。ガラス基板上に垂直に ZnO 結晶が成長したいわゆる繊維構造が認められる。この繊維構造の形成はスパッタ膜の特徴の1つであり、ここで詳しく解説する。

通常のスパッタ膜の形成過程は、核を中心に成長し、初期段階においては島状の構造となっている。基板が非晶質の場合にはそれぞれの島は形成物質の結晶面の最稠密面が基板面と平行になるような結晶構造を通常とる。島が成長して互いに接するようになると、そこに粒界が形成され、さらに島が成長し基板面に垂直な繊維構造が形成される。この場合、スパッタ粒子は運動エネルギーを持っているため島の影になる島と島との部分にはあまり入り込まず、島の山の部分がますます成長し、粒界の部分がそのまま縦に成長することとなり、繊維構造となる。この粒界の様子は、基板温度つまりスパッタ粒子の基板上での拡散によって変化し、高温基板上へのス

パッタ膜では繊維構造が現われにくい。また粒界には放電ガスがとり込まれやすく、放電ガス原子数が多い。

4.2 アモルファス PbTiO₃ スパッタ膜^{3), 4)}

融液を急冷することによってアモルファス物質が得られることは古くから知られているが、高エネルギーの粒子を基板上に凝縮させるスパッタプロセスにおいても、基板温度を低く保ち基板上でのスパッタ粒子の拡散を十分小さくするとアモルファス薄膜を得ることができる。スパッタ粒子の凝縮は融液の急冷に比べて非常に高速のクエンチングであり、さらに、膜形成の過程で飛来するスパッタ粒子のエネルギーが膜表面との衝突により絶えず膜に与えられることを考えると、スパッタ膜特有の構造のアモルファス薄膜が期待される。

液体窒素で冷却し十分低温に保たれた基板に、酸素を導入した反応性高周波スパッタで PbTiO₃ 粉末をターゲットとしてスパッタ蒸着すると、スパッタ膜特有の興味ある性質を有するアモルファス膜が得られた。Fig. 9 に得られたアモルファス PbTiO₃ スパッタ膜の X 線回折パターンを示す。このパターンは、アモルファスの示すハローパターン上に結晶が混在することを示すいくつかのピークが重畳している。パターンの下に示した線分は Pb (ASTM card 4-0686) の X 線回折パターンで、一致する回折ピークがみられる。他には PbTiO₃ (100) のピークと、基板の Si (111) のピークがみられる。この結果より、この膜はアモルファス状態の中に Pb と PbTiO₃ の結晶粒が混在していることがわかる。この場合、スパッタ蒸着時の基板の冷却が不十分となると上述の Pb の結晶粒が認められなくなり、Pb の結晶粒の生成は基板の冷却に起因していることが結論できる。

ここでこの Pb の結晶粒の生成について考察する。アモルファス PbTiO₃ スパッタ膜形成のプロセスにおい

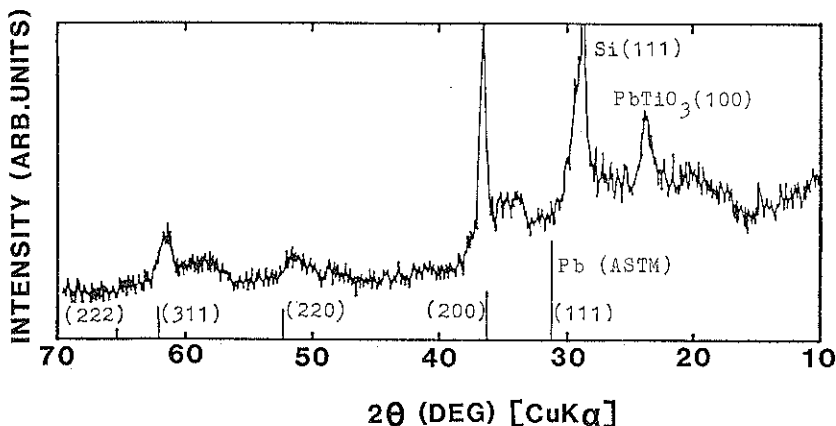


Fig. 9 X-ray diffraction pattern of the sputtered PbTiO₃ film on the cooled substrate.

て、基板上に飛来するスパッタ粒子はほとんどが Pb, Ti, O の単原子であると考えられる。つまりこれらの単原子が基板上で結合することにより膜が形成されるが、基板が十分に冷却されて基板上でのスパッタ粒子の拡散が小さいと、スパッタ粒子は最も安定な PbTiO_3 の構造を形成する前に凝縮されてしまい、他のもっと単原子状態にエネルギー的に近い構造を形成すると考えられる。Pb, Ti, O の組み合わせからなる固体物質のうちでもっとも昇華の潜熱の小さな物質は Pb 金属であり、Pb 金属は最も単原子状態にエネルギー的に近いと考えられる。このため、液体窒素で冷却し十分に低温に保たれた基板上へのスパッタ膜では膜中に Pb の結晶粒が生成されたと考えられる。

このアモルファス PbTiO_3 スパッタ膜はさらに興味深い性質を持っており、スパッタ膜特有のものであると考えられる。つまり、膜の表面において膜の裏面に比べて4桁以上大きな電気伝導度を示す。前述の Pb の結晶粒の存在によって、本来絶縁性を考えられる PbTiO_3 膜が電気伝導性となり、膜の表面裏面での電気伝導度の差は Pb の結晶粒の密度の差に起因すると考えられる。

ここで、この表面に向かって増加する Pb 結晶粒の密度について考察する。スパッタ膜の成長において、スパッタ粒子は非常に高速でクエンチされる一方、スパッタ粒子の持っていたエネルギーは衝突によって基板又はすでに堆積しているスパッタ膜に局所的に与えられ、スパッタ膜中を拡散する。基板が十分に低温でスパッタ膜の成長表面でのスパッタ粒子の拡散が小さい場合には、この局所的に与えられるエネルギーは大きな意味を持ち、エネルギー拡散の過程でスパッタ膜が局所的に高エネルギーでアニールされることとなる。この局所的高エネルギーで Pb 結晶粒がアニールされた場合には、Pb 金属よりもエネルギー的に低いより安定な PbO や PbTiO_3 の構造に変化すると考えられ、この局所アニールはスパッタ蒸着中絶えず堆積したスパッタ膜中で起っている。このため、早く堆積した部分、つまりスパッタ膜の裏面の方が多くこの局所アニールの影響を受け、Pb の結晶粒の密度がより減少していると考えられる。表面に向かって増加する Pb 結晶粒の密度はこのように理解され、スパッタ膜特有の性質であると考えられる。

5. ま と め

スパッタプロセスによる薄膜形成において特に重要な因子は、スパッタ粒子のエネルギーと基板上でのスパッ

タ粒子の拡散である。この2因子に関係するスパッタ条件は、

- 基板温度
- 蒸着レート
- 入力電圧及び電流
- スパッタガスの種類及び圧力
- ターゲットと基板の距離
- ターゲットの種類及び形状
- 基板の位置及びバイアス電圧
- 基板の種類及び表面形状

等であり、これらのそれぞれの効果をすべて分離して理解することは非常に困難である。又、プラズマとの関係も複雑であり、スパッタプロセスの理解が十分に進んでいるとはいいがたい。しかし、昨今の素子の超薄短小化に向けて、スパッタは有力な手段の一つであると考えられる。基礎的な研究も含めて、今後一層活発な研究開発が期待される。

文 献

- 1) K. Wasa, K. Ohji, O. Yamazaki, and S. Hayakawa: Proc. 6th Internl. Vacuum Congr. 1974, Jpn. J. Appl. Phys. Suppl. 2, Pt. 1, p. 745.
- 2) K. Ohji, O. Yamazaki, K. Wasa, and S. Hayakawa: J. Vac. Sci. Tech. 15 (1978) 1601.
- 3) M. Kitabatake, T. Mitsuyu, and K. Wasa: J. Non-cryst. Solids 53 (1982) 1.
- 4) 北畠 真, 三露常男, 広地久美子, 和佐清孝: 日本化学会誌 6 (1983) 776.
他に有用と思われる主な本を紹介する。
- 5) K. L. Chopra: "Thin Film Phenomena", McGraw-Hill (1969).
- 6) L. I. Maissel, R. Glang ed: "Handbook of Thin Film Technology", McGraw-Hill (1970).
- 7) 麻蔭立男: 薄膜作成の基礎, 日刊工業 (1977).
- 8) 金原 榮, 藤原英夫: 薄膜, 裳華房 (1979).
- 9) 菅野卓雄編: 半導体プラズマプロセス技術, 産業図書 (1980).
- 10) 金原 榮: 薄膜の基本技術, 東京大学出版会 (1981).
- 11) B. Chapman: "Glow Discharge Processes", John Wiley & Sons (1980).
- 12) R. Behrisch ed: "Sputtering by Particle Bombardment I: Topics in Applied Physics Vol. 47", Springer-Verlag Berlin Heidelberg New-York (1981).
- 13) 早川 茂, 和佐清孝: 薄膜化技術, 共立出版 (1982).
- 14) 金原 榮: スパッタリング現象, 東京大学出版会 (1984).