

アーキングに対するスパッタターゲット中の微小酸化物の影響 (酸化物依存性とアーキングのモデル化)

川 畑 貴 裕
稲 生 俊 雄

Influence of Oxide Inclusion Embedded in a Sputtering Target on Arcing Phenomenon

Takahiro KAWABATA
Toshio INASE

Anomalous electric discharge (arcing) during sputter deposition is the main cause of defect in the manufacture of electronic devices and therefore the reduction of arcing is strongly needed. The arcing is considered to be induced by the inclusion in a sputtering target, but no systematic study has been performed yet to elucidate the relation between the property of inclusion and the arcing.

We have devised a convenient method to evaluate the arcing property of various oxide embedded in a small amount into a sputtering target. In the present study, we found that the arcing was closely related to a surface charge of the oxide inclusion and built an arcing model on the basis of the critical charge density at which electric arcing starts. With this model in hand, we were successful in calculating a critical oxide inclusion size within which the arcing does not start.

1. 緒 言

スパッタリングは大面積かつ、均一に薄膜形成が可能な方法であり、半導体やLCDの製造に広く使用されている。本方法における最大の課題は、成膜中に発生する異常放電（アーキング現象）である。アーキングが発生すると、ターゲット表面が溶融、飛散することにより粒子欠陥が発生し、その結果、製品歩留まりを低下させる。今後、デバイスの微細化や生産性向上に伴い、アーキング低減の重要性が増加すると考えられる。

アーキングはターゲット母材中に存在する異相によって引き起こされると考えられている。東ソーSMDではAlターゲット中の異相の影響について調べているが、異相として Al_2O_3 のみを使用した議論に留まっている¹⁾³⁾。また、旭硝子から、ターゲット表面に堆積した酸化物薄膜の影響についての報告があるが、ターゲット中の酸化物には言及していない⁴⁾。

以上のように、アーキング現象に関して、ターゲット中の酸化物種に対する系統的な基礎研究は未だ行なわれていない。そこで、種々の酸化物を異相としてターゲットに埋め込み、系統的なアーキング評価を行なうことにより、ターゲット母材中の異相物性とアーキングとの関連性を探求し、アーキングのモデル化を試みることを目的に本研究を実施した。

具体的には、Alターゲット中に種々の酸化物を埋め込み、以下の各種関連性について調べた。

酸化物種とアーキング

酸化物サイズとアーキング

上記の実験結果とシミュレーションからアーキングのモデル化を行なったので報告する。

2. 実験方法

[1] 評価用ターゲットの製造

アーキングを測定するにあたり、ターゲット中に精

密に酸化物を埋め込む技術が必要不可欠となる。今回、ホットプレスを使用し、正確に加工された酸化物を異相としてターゲットに埋め込む技術を確立した。

評価用ターゲットの製造工程をFig.1に示す。ターゲットへ埋め込む酸化物の形状は角柱型とし、そのサイズは主として1.41、0.71、0.35mm角×3mmの3種類を使用した。酸化物の埋め込み位置は、予め装置で測定したターゲットのエロージョン中心部とした。上記プロセスでAlターゲット中に埋め込んだ Al_2O_3 の顕微鏡写真をFig.2に示す。本方法により、異相として微小サイズの酸化物をターゲット中に正確に埋め込むことを可能とした。

[2] アーキングカウントシステム

本研究を進めるにあたり、高スパッタパワー条件で

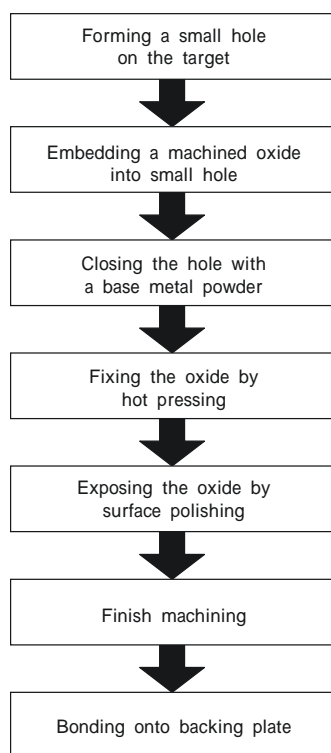


Fig. 1 Manufacturing process of an oxide inclusion embedded target.

の測定が可能な独自のアーキング評価システムを構築した。本システムの概要をFig.3に示す。ターゲット電源ケーブルにコイルを形成し、アーキング発生時の過電流による誘導起電力によりアーキングを検出する。アーキングカウンターのデータをパソコンに取り込み、アーキングの集計を行なう。本方法による検出器、及び、アーキングカウンターは市販品が無いので、今回、独自に設計、作製し、アーキング測定システムを構築した。

[3] 酸化物の選定

一般にアーキングとは局所的な大電流の発生現象であることが知られている。そこで、ターゲット母材中の異相として埋め込まれた酸化物の電気的物性である誘電率、及び、抵抗率がアーキングに対して影響が大きいという仮説を立て、酸化物20種類以上をリストアップし、誘電率、抵抗率が系統的に異なる6種類の酸化物(Al_2O_3 、 SiO_2 、 TiO_2 、 Cr_2O_3 、 Nb_2O_5 、 SnO_2)を選定し、アーキング評価に使用した。

誘電率、抵抗率の値は酸化物の純度、密度により異なるため、ターゲット内に埋め込む酸化物と同一の焼結体から加工したサンプルを使用し、同一条件下で独自に測定した。

[4] アーキング評価条件

アーキングカウント時のスパッタ条件をTable 1に

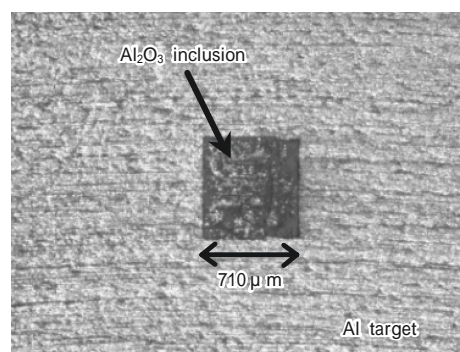


Fig. 2 Optical microscope image of an Al_2O_3 inclusion embedded in Al target.

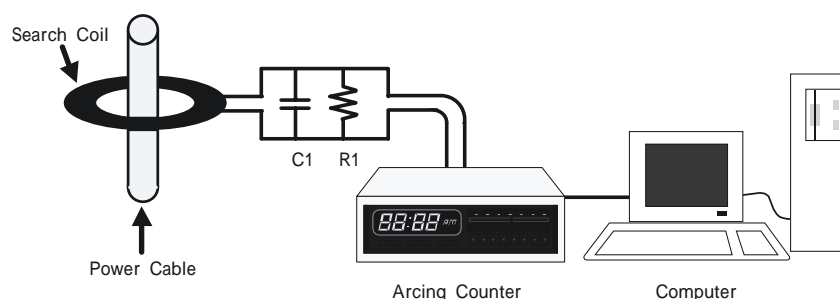


Fig. 3 Arcing measuring system used in this study.

Table 1 Arcing evaluation conditions

Sputtering power	[W]	400、600、800
Sputtering gas pressure	[Pa]	0.7
Pre-sputtering time	[min]	5
Arcing count time	[min]	3
Target-substrate distance	[cm]	7
Magnetic field intensity	[T]	0.04

示す。一般に、酸化物は金属に比べスパッタレートが遅いことから、スパッタ放電を長時間行なうと埋め込み微小酸化物が突起状に残留する。この突起への電界集中によってもアーキングが発生すると考えられる。今回の実験では、形状変化による影響を除去するため、スパッタ放電初期のみのデータを集計し解析を行なった。具体的には、評価用ターゲットの交換後、プレスパッタを5分間行ない、各スパッタパワー条件において、3分間のアーキング総数をカウントし、アーキングレート（1秒間当たりのアーキング発生数）を算出した。

3. アーキング評価結果

[1] 酸化物種とアーキングレートの関係

各種酸化物を埋め込んだターゲットのアーキングレート（投入電力：800W、サイズ：0.71mm）のまとめをTable 2に示す。当初、アーキングに対して誘電率（ ϵ_r ）、抵抗率（ ρ ）の影響が大きいと考えたが、単にあるいはのみに依存するのではなく、誘電率と抵抗率の積（ $\epsilon_r \rho$ ）の増加に伴い、アーキングレートが増加することが判明した。一般に、 $\epsilon_r \rho$ は時定数を表し、この増加は酸化物表面へ電荷が蓄積しやすくなることを意味していることから、本結果は、酸化物表面に蓄積される電荷とアーキングに深い関連性があることを示唆するものである。

Table 2 Arcing evaluation for oxide inclusions

Oxide	Arcing rate [Count/s]	Relative dielectric constant (ϵ_r) [-]	Resistivity (ρ) [$\Omega \cdot m$]	$\epsilon_r \rho$ [s]
Al ₂ O ₃	13.00	10.8	5.8×10^{14}	5.5×10^2
SiO ₂	1.40	3.4	7.7×10^{14}	2.3×10^2
TiO ₂	0.02	44.1	2.4×10^{11}	5.5×10^{-1}
Cr ₂ O ₃	0.01	21.5	2.8×10^9	5.3×10^{-3}
Nb ₂ O ₅	0.00	74.6	8.0×10^0	5.3×10^{-11}
SnO ₂	0.00	75.7	4.0×10^{-2}	2.7×10^{-13}

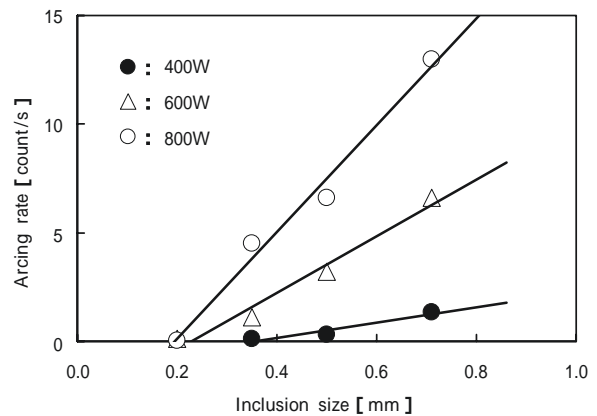


Fig. 4 Relation between arcing rate and size of Al₂O₃ inclusion.

[2] 酸化物サイズとアーキングレートの関係

Al₂O₃を埋め込んだ場合のアーキングレートの酸化物サイズ依存性をFig.4に示す。酸化物サイズが小さくなるにつれて、アーキングレートは低下し、アーキングが発生しない臨界酸化物サイズ（Lo）が存在することが判明した。

また、SiO₂を埋め込んだ場合のアーキングレートの酸化物サイズ依存性をFig.5に示す。SiO₂の場合のLoはAl₂O₃の場合のLoより大きく、臨界酸化物サイズは

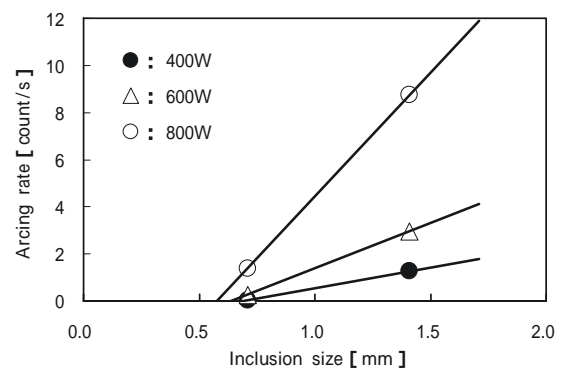


Fig. 5 Relation between arcing rate and size of SiO₂ inclusion.

酸化物の種類により異なる値となることが判明した。

本結果についてはアーキングのモデル化を行ない、考察を行なったので後述する。

4. シミュレーション結果

アーキングを解析するにあたり、酸化物近傍での物理現象を明確にするために、電気的なパラメータである酸化物近傍の電位、及び、電子密度分布のシミュレーションを行なうことが重要であると考え、電位分布シミュレーションを東ソー分析センターで、また、電子密度分布のシミュレーションを東北大学の流体科学研究所との共同研究で実施した。

[1] 電位分布シミュレーション

ターゲットに埋め込まれた酸化物直上の電位分布シミュレーションを東ソー分析センターで行なった。シミュレーションのモデルの概要をFig.6に示す。本シミュレーションでは、酸化物の比誘電率を10、直径を2mm、厚さを1mmとし、印加電圧を1000Vとした。シミュレーション結果をFig.7に示す。Fig.7は酸化物近傍のターゲット断面を表し、(a)は酸化物表面に電荷が無い場合、(b)は電荷が蓄積した場合（電荷密度 $=2 \times 10^{-5} \text{ C/cm}^2$ ）の電位分布であり、各カラーは等

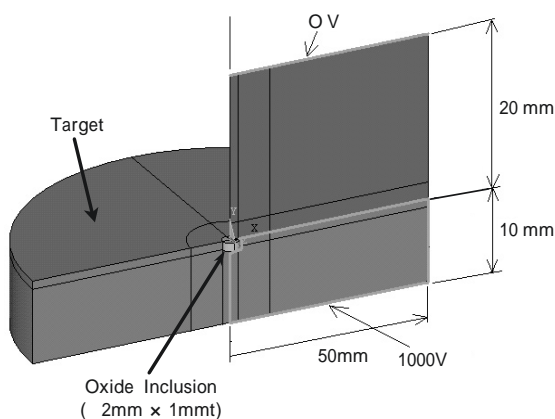


Fig. 6 Simulation model for electrical potential.

電位線を示す。本結果より、ターゲット中に酸化物を埋め込むと、酸化物表面の電位が僅かに変化し、さらに、酸化物表面に電荷が蓄積することにより、電位の引き込みが増大し、電位が大きく上昇することが判明した。

[2] 電子密度分布シミュレーション

電子密度分布シミュレーションは東北大学の流体科学研究所でスーパーコンピューターを使用し、粒子モデルシミュレーションの一つとして用いられる Particle-in-Cell/Monte Carlo 法を用いて行なった。本シミュレーションはFig.8に示すように、レーストラック型マグネトロンスパッタ装置の一部分を計算領域として行ない、磁場強度は0.02T、ガス圧は0.7Pa、ターゲット基板間距離は20mmとした。

シミュレーション結果をFig.9に示す。(a)はターゲット中に酸化物が存在しない場合、(b)は中心($x=0, y=0$)に酸化物が存在する場合の電子密度分布を表している。酸化物が存在しない場合、電子密度分布はほぼ一様となっているのに対して、酸化物が存在すると酸化物直上の電子密度が大きく増加することが明らかとなった。

[3] 想定されるアーキング発生プロセス

以上の電位、及び、電子密度分布シミュレーションから、Fig.10に示すプロセスによりアーキングが発生すると考えられる。本プロセスでは、酸化物表面に一定の電荷密度が蓄積するとアーキングが発生するが、この時の電荷密度を臨界電荷密度 (Q_c) と呼ぶことにする。

5. アーキングのモデル化

[1] 基本モデル

前述の実験結果、及び、シミュレーションから、アーキングに酸化物表面の電荷が深く影響することが判明した。このことから、一定電荷が蓄積することで、アーキングが発生するというモデルを作成した。

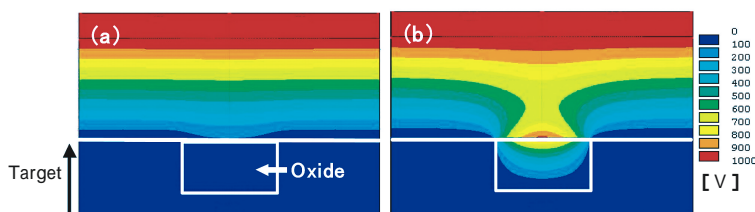


Fig. 7 An electrical potential distribution near the oxide inclusion.

(a) Surface charge density = 0

(b) Surface charge density = $2 \times 10^{-5} \text{ C/cm}^2$

Fig.11に示すようなターゲット中に埋め込まれた酸化物のモデルを設定し、表面電荷密度の時間変化を考える。酸化物表面の電荷密度 (Q) の時間変化は、スパッタ放電のプラズマ中から酸化物の表面に流れる電流密度と酸化物からターゲットへリークする電流密度を使用し、以下の (1) 式のように表される。

$$\frac{dQ}{dt} = j_o - j_b - j_s \quad (1)$$

Q : 酸化物表面の電荷密度 (C/cm^2)
 j_o : ターゲット表面への電流密度 (A/cm^2)
 j_b : 底面及び側面リーク電流密度 (A/cm^2)
 j_s : 表面リーク電流密度 (A/cm^2)

(1) 式の右辺第1項はプラズマ中から酸化物表面へ到達する電流密度、第2項は酸化物の底面及び側面からターゲットへリークする電流密度、第3項は酸化物の表面からターゲットへリークする電流密度を表す。オームの法則を用いて j_b は (2) 式で表される。

$$j_b = \frac{VF}{RS} \quad (2)$$

V : 酸化物の底面と表面の電位差 (V)
 R : 酸化物の抵抗 (Ω)
 S : 酸化物上面の面積 (cm^2)
 F : 形状修正因子

ここで、形状修正因子 (F) は、酸化物底面から電荷が全てリークしたと仮定した場合の補正係数である。

一方、静電理論から下記の (3) 式が成り立つ。

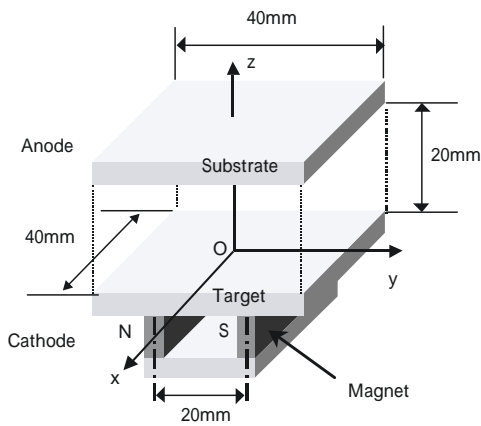


Fig. 8 Simulation model for electrons density distribution.

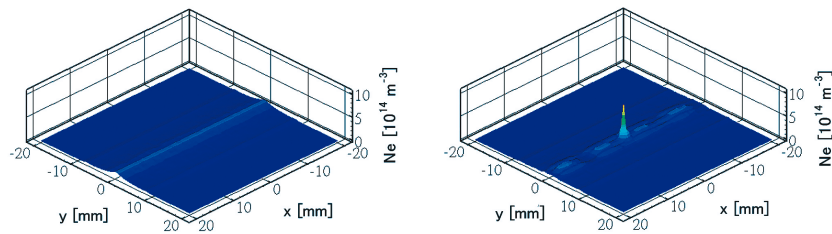


Fig. 9 A distribution of electron number density just above the target surface.
 (a) In case of no inclusion (b) In the presence of a inclusion

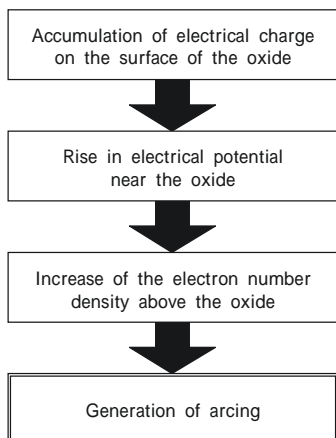


Fig.10 Presumed arcing generation process.

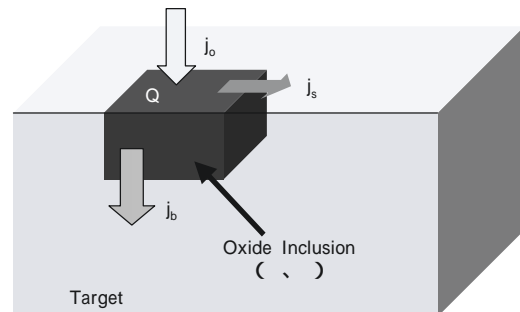


Fig.11 Schematic image of an embedded oxide inclusion model.

$$V = \frac{Q}{C} S, C = \frac{S}{d}, R = \frac{d}{S} \quad (3)$$

C : 酸化物の静電容量 (C/V)
 : 酸化物の誘電率 (C/Vcm)
 d : 酸化物の厚み (cm)
 : 酸化物の抵抗率 (cm)

(2) 式、及び、(3) 式を (1) 式に代入すると下記の (4) 式となる。

$$\frac{dQ}{dt} = j_o - \frac{QF}{S} - j_s \quad (4)$$

ここで、第3項の j_s がどのような形になるか不明である。そこで、 $j_s = 0$ とし (4) 式を解いた結果と実験結果との比較から、 j_s を求め、最終的に (4) 式を解くこととした。

(4) 式において、 $j_s = 0$ として、 Q について解くと (5) 式となる。

$$Q = j_o - \frac{F}{S} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{tF}{S}\right) \right\} \quad (5)$$

[2] j_s の算出方法

表面リーク電流密度 (j_s) は表面リーク電荷密度 (Q) の時間微分で表される。

$$j_s = \frac{dQ_\ell}{dt} \quad (6)$$

今、 Q を (7) 式のように表すこととする。

$$Q_c = Q_a - Q_\ell \quad (7)$$

ここで、 Q_a はアーキング発生時までに酸化物表面に注入される総電荷密度、 Q_c は前述したようにアーキング発生に必要な臨界電荷密度を表す。つまり、アーキング発生に必要な臨界電荷密度は、注入される総電荷密度からリーク電荷密度を差し引いたもので表されるとする。

Q_a は表面電荷のリークを0とした (5) 式から求め、また、 Q_c についてはアーキング発生間隔を0に外挿した Q_a を Q_c と設定し求めた。

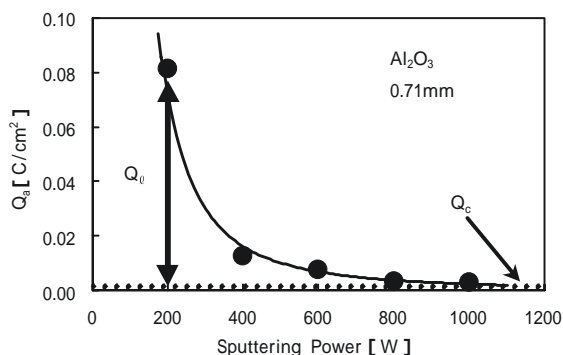


Fig.12 Relation between Q_a and sputtering power.

[3] Q_a 及び Q_c の算出

Al_2O_3 の実験結果から得られた平均のアーキング発生間隔 (t_a) を (5) 式に代入し、各投入電力においてアーキング発生時までに蓄積される総電荷密度 (Q_a) を算出した。この結果を Fig.12 に示す。Fig.12 から高投入電力で、 Q_a が一定の電荷密度に漸近することがわかる。投入電力が増大するほどアーキングは多く発生するので、この漸近値はアーキング発生間隔が0での Q_a と考えることができる。そこで、この漸近値を臨界電荷密度 (Q_c) と設定した。 Al_2O_3 では、 $Q_c = 2.5 \times 10^{-3} C/cm^2$ となることが判明した。また、 Q_c と Q_a の差を Q として算出した。

[4] j_s の算出

Al_2O_3 の場合における Q と時間の関係を Fig.13 に示す。Fig.13 からサイズが小さい方が、傾きが大きく、つまり、リーク電荷密度が大きいことが判明した。ここで、 Q は単位表面積当たりの周長が長いほど増加し、 \times が増加するほど減少すると考えた。つまり、適当な比例係数 k を使用して、 Q は (8) 式で表すことができる。(8) 式において、 L は酸化物上面の一辺の長さを表す。

$$Q_\ell = k \times \frac{L}{S} \times \frac{1}{L} t = \frac{kt}{L} \quad (8)$$

Al_2O_3 の実験結果から、 k の値を求めると、Table 3 に示すように一定の値となる。(平均値： $k = 0.33$) このことは、 Q が (8) 式で表される妥当性を示すものと考えている。

j_s は Q の時間微分で表されるので、(9) 式の形とすることが判明した。

$$j_s = \frac{dQ_\ell}{dt} = \frac{0.33}{L} \quad (9)$$

(9) 式を (1) 式に代入し、 Q について解くと (10) 式となる。

$$Q = \frac{F}{S} \left(j_o - \frac{0.33}{L} \right) \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{tF}{S}\right) \right\} \quad (10)$$

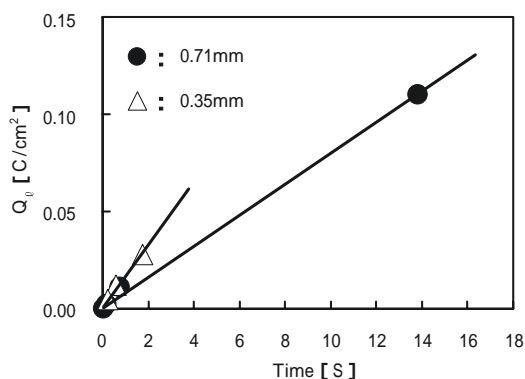


Fig.13 Time dependence of Q_ℓ .

Table 3 The value of k for Al₂O₃ inclusion

Oxide size	k
0.71 [mm]	0.34
0.35 [mm]	0.32

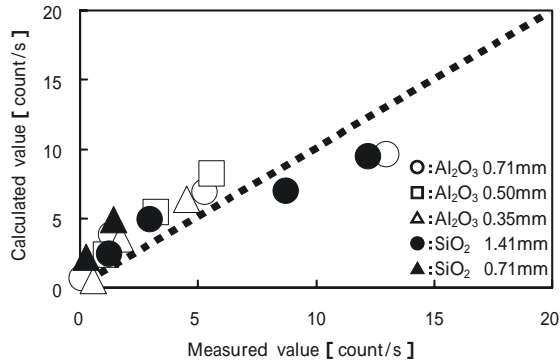


Fig.14 Comparison of calculated and measured arcing rates.

(10) 式で表されるQが表面リーク電流密度を考慮した電荷密度を表す。

[5] アーキングレートの計算値と実測値の比較

(10) 式を用いて算出したアーキングレートと実測値の比較をFig.14に示す。本モデルはAl₂O₃の実験結果をベースとして構築したものであるが、Fig.14からAl₂O₃だけではなく、SiO₂についても計算値が実測値と良く一致し、Al₂O₃以外の酸化物やサイズにも適用可能であることを確認した。

[6] 臨界酸化物サイズ (L₀) の算出

前述したように、今回の評価結果からアーキングが発生しない臨界酸化物サイズ (L₀) が存在することが判明した。

今回のモデルで、アーキングが発生しない条件は、t = において、Q = 0と考えることができる。この条件を(10)式に適用すると(11)式となる。

$$0 = \frac{1}{F} \left(j_0 - \frac{0.33}{L} \right) \quad (11)$$

すなわち、L₀は(12)式で表されることになる。

$$L_0 = \frac{0.33}{j_0} \quad (12)$$

(12) 式から算出した計算値と実測値の比較をFig.15に示す。Fig.15から、本モデルから算出したL₀が実測値と良く一致することが判明し、本モデルを用いて、臨界酸化物サイズを算出することが可能となった。

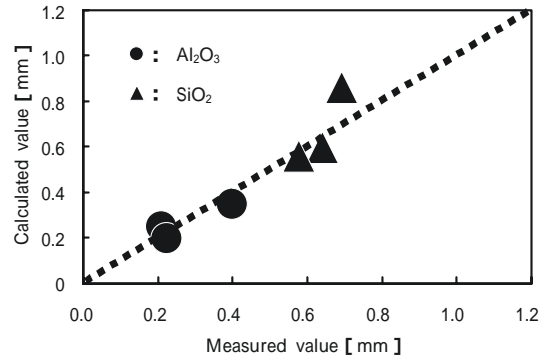


Fig.15 Comparison of calculated and measured critical inclusion sizes.

6. まとめ

種々の酸化物を使用したアーキング評価から酸化物の誘電率と抵抗率の積の増加により、アーキングレートが増加することが判明し、アーキングが表面電荷と深く関係していることを見出した。また、アーキングが発生しない臨界酸化物サイズが存在することが判明した。

シミュレーションからターゲット中に酸化物が存在する場合、電位が上昇し、酸化物直上の電子密度が増加することが判明した。

上記の結果から、アーキング発生に要する臨界電荷密度をベースとしたモデルを設定し、種々の酸化物に適用可能であることを確認した。また、アーキングが発生しない臨界酸化物サイズ (L₀) を計算可能とした。

今後、各デバイスメーカーは生産性向上の観点からより厳しい成膜条件を工程に取り入れることが予測される。このような状況下においても、本モデルから、各種酸化物の臨界サイズを計算することにより、これら酸化物に対する製造管理基準を独自に設定することが可能となる。この結果、低アーキングスパッタリングターゲットを迅速、かつ、安定に市場に提供することが可能となる。

References

- 1) C.E.Wickersham, Jr., J.E.Poole, A.Leybovich, and L. Zhu, *J. Vac. Sci. Technol.*, A19(6), 2767 (2001)
- 2) C.E.Wickersham, Jr., J.E.Poole, and J. S. Fan, *J. Vac. Sci. Technol.*, A20(3), 833 (2002)
- 3) C.E.Wickersham, Jr., R.Bailey, and Alex

Leybovich, *SEMICON China 2000 Technical Symposium*, A-1 (2000)

- 4) T.Oyama, *International Symposium on Advanced Technology of Coatings on Glass and Plastic Materials Proceeding*, 114 (2005)

著 者

氏名 川 畑 貴 裕
Takahiro KAWABATA

入社 平成15年4月1日

所属 東京研究所
新材料・無機分野
副主任研究員

著 者

氏名 稲 生 俊 雄
Toshio INASE

入社 昭和61年4月1日

所属 東京研究所
新材料・無機分野
主席研究員