

# SiO<sub>2</sub>誘電体ターゲットの高周波マグネトロンスパッタリングにおける2重円環状侵食パターンの形成および均一性の検討\*

須崎 嘉文\*\* 宮川 勇人\*\*\* 江島 正毅\*\*\*

Formation of a Double Circular Erosion Pattern on SiO<sub>2</sub> Dielectric Target and Its Effect to Utilization Rate in RF Magnetron Sputtering

Yoshifumi SUZAKI, Hayato MIYAGAWA and Seiki EJIMA

A circular erosion pattern is formed on the surface of a circular metal conductor target with permanent magnets on its back in rf magnetron sputtering. In this case, the theory behind the erosion pattern has been established. On the other hand, in the case of a dielectric target, a double circular erosion pattern is formed. This pattern is widely known qualitatively and experimentally; however, it has not yet been studied theoretically. In this study, we performed a magnetron sputtering experiment with a SiO<sub>2</sub> dielectric target, and were able to confirm the formation of a double circular erosion pattern, which agrees with qualitative theory. Moreover, insulation resistance varied with the thickness of the SiO<sub>2</sub> target; thus the dimensions of the double circular erosion pattern varied. Furthermore, we confirmed that a double circular erosion pattern changed by making a gap between the SiO<sub>2</sub> target and guard ring. We discussed about utilization rate of the target.

**Key words:** double circular erosion pattern, SiO<sub>2</sub> dielectric target, combination target

## 1. 結 言

現在は、スパッタリングにおいてマグネロン法が一般に利用されている。その膜厚分布はターゲットと基板の距離によって変化するため、膜厚分布を均一にするための研究が今もなされている。また、ターゲットの背面に永久磁石を配置するため、スパッタリングによるターゲットの侵食は均一ではなく、その磁界に沿って侵食の深さが異なることが報告されている<sup>1)</sup>。これにより、ターゲットを有効利用できないという問題が生じることから、現在もいかに無駄なくターゲットを利用するかという研究がなされている<sup>2)3)</sup>。

高周波マグネトロンスパッタリング装置におけるターゲット侵食パターンにおいては、金属の導電体ターゲットの場合、その侵食パターンはターゲット背面の永久磁石の影響により円環状となる。また、その侵食パターンの理論は確立されている<sup>4)5)</sup>。一方、絶縁物誘電体ターゲットの場合、その侵食パターンは2重の円環状となることが知られている<sup>6)</sup>。この現象は、各種の実験などで経験的に知られているのみであり、それについての研究はほとんどない。また、誘電体ターゲットの厚さにより、その絶縁状態が異なるため、侵食パターンも異なってくると考えられる。

本論文においては、この絶縁物誘電体ターゲットとして SiO<sub>2</sub> を用いて、その2重円環状侵食パターンを確認し、定性的な理論との一致をみることを目的とした。また実験過程において、図1のようにターゲットとガードリングとの間のギャップを変化させた場合、ターゲット侵食パターンの測定結果に違いが生じた。これは、ガードリングが接地されているため、ターゲットとの間のギャップを広げることによって、その間に電子が逃げ込み、その結果、ターゲットの侵食パターンに違いが出るものと推測される。この状態についても観測することを目的とし

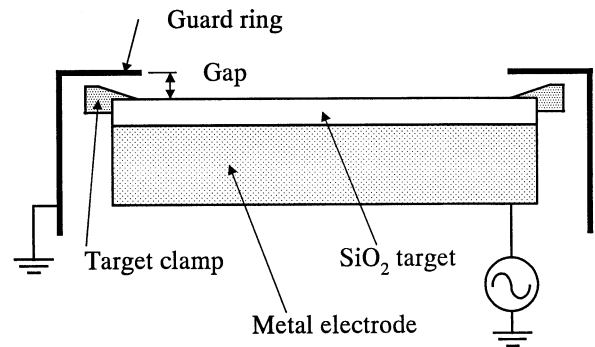


Fig.1 Gap between target and guard ring

た。さらに、ターゲットの侵食の均一性について検討した。

## 2. 実 験 方 法

本実験では、SiO<sub>2</sub>とCuターゲットを組み合わせることで、ターゲットの厚さを変え、2重円環状侵食パターンがどのようにできるかを測定した。ターゲットの配置は図2の通りである。SiO<sub>2</sub>ターゲットとCuターゲットを組み合わせることで、2重円環状侵食パターンがどのように変化するかを計測する。組み合わせ方は表1のようにした。ここで表中において、SはSiO<sub>2</sub>ターゲット、CはCuターゲット、Gは、図2中に示したギャップである。ガードリングまで約5mmあるため、1枚1mm厚のターゲットを組み合わせることで侵食の違いを計測すると共に、ギャップを変化した場合、侵食パターンがどのように変化するかを計測した。なお、SiO<sub>2</sub>ターゲットの純度は99.99%、直径は70mm、金属電極の裏側に、中心がN極、半径30mmの位置にS極が位置するように永久磁石を配置した。

ターゲット侵食パターンの測定には、非接触3次元測定装置(三鷹光器製、NH-3N)を用いた。ターゲットの中心を通る直径に沿って3方向の測定を行うことで、侵食パターンの半径の平均値を求めた。

\* 原稿受付 平成21年4月30日

\*\* 正 会 員 香川大学工学部(高松市林町2217-20)

\*\*\* 香川大学工学部

Table 1 Combination of the targets; Cu and SiO<sub>2</sub>

Sign	SiO <sub>2</sub>	Cu	Gap
S1G4	1	0	4
S1C1G3	1	1	3
S2G3	2	0	3
S1C2G2	1	2	2
S2C1G2	2	1	2
S3G2	3	0	2
S1C3G1	1	3	1
S2C2G1	2	2	1
S3C1G1	3	1	1
S4G1	4	0	1
S1C4	1	4	0
S2C3	2	3	0
S3C2	3	2	0
S4C1	4	1	0
S5	5	0	0

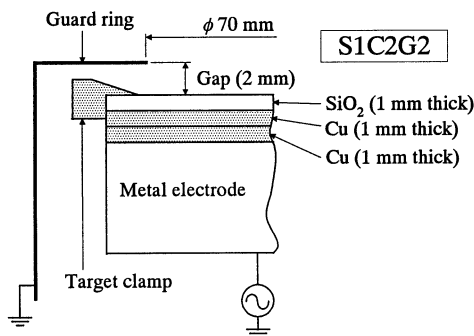
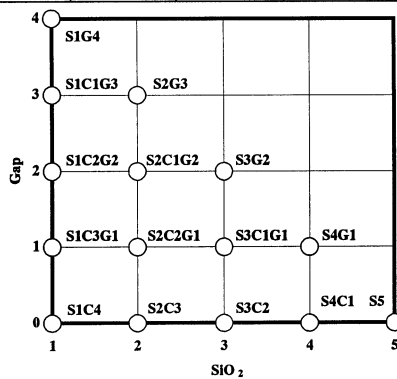


Fig.2 Typical arrangement of the targets; SiO<sub>2</sub> and Cu

### 3. ターゲット侵食パターンの測定結果

SiO<sub>2</sub> 誘電体ターゲットにおけるスパッタリング条件は、スパッタガス：Ar、スパッタ圧力：1.3 Pa、高周波電力：200 W、反射電力：1 % 以下、放電時間：2 時間とした。ターゲット設置部は内部より冷却されていて、一方、真空槽内は高周波電力が大きいほど高温となる。そのため、温度差によりターゲットが破損してしまう恐れがある。したがって、印加する高周波電力は急激に高くしてはならない。また本実験では、基板に付着した薄膜に関しては測定しないので、ターゲットの破損が可能な限りないように、ターゲットと基板の間は一番遠くなるように 15

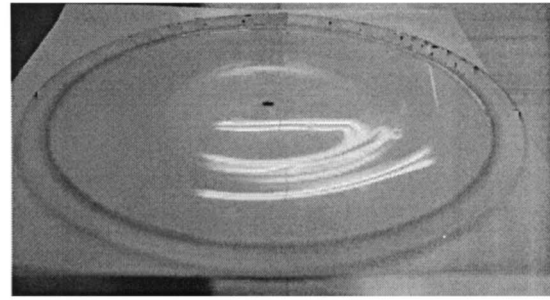


Fig.3 Typical photo of the double circular ring of erosion on the SiO<sub>2</sub>

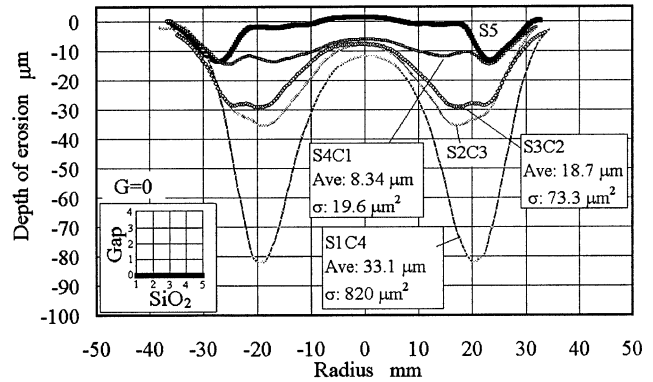


Fig.4 Variation of erosion depth profile with thickness of SiO<sub>2</sub> (G=0)

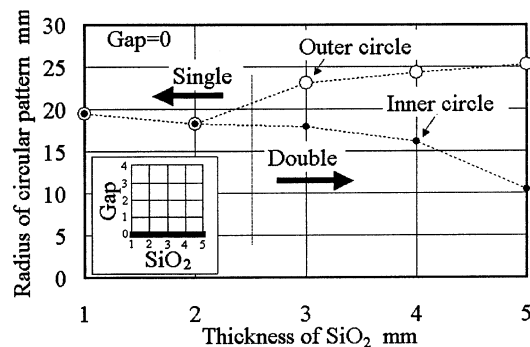


Fig.5 Variation in radius of the erosion with thickness of SiO<sub>2</sub> (G=0)

cm とした。図 3 に、実験で得られた SiO<sub>2</sub> ターゲット表面の典型的な 2 重円環状侵食パターンの概観を示す。このパターンについてプロファイル測定を行った。以下、測定したターゲットの侵食パターンプロファイルを条件によってまとめて示す。

図 4 は、ギャップについて G=0 で一定にし、S (C) を変化した場合の侵食パターンプロファイルである。プラズマ密度が高い円環状の部分に深い侵食がみられた。この侵食深さは、S が小さくなるほど深いことがわかった。また、S1, S2 においては 2 重円環状侵食パターンがみられなかったが、S3, S4, S5 において 2 重円環状侵食パターンが確認できた。また図中に、侵食深さの平均、および、分散を示した。1 重円環状侵食パターンである S1C4 の場合、平均値は 33.1 μm、分散は 820 μm<sup>2</sup> であるのに対して、2 重円環状侵食パターンである S3C2, S4C1 ではそれぞれ、18.7 および 8.34 μm、73.3 および 19.6 μm<sup>2</sup> であった。2 重円環状侵食パターンのほうがいずれの値も小さくなることがわかった。図 5 は、S と 2 重円環状侵食パターンの半径との関係を示している。S が大きくなるほど、内側の円環状

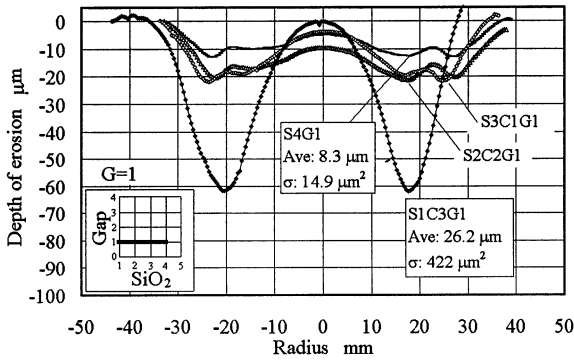


Fig. 6 Variation in erosion depth profile with thickness of SiO<sub>2</sub> (G=1 mm)

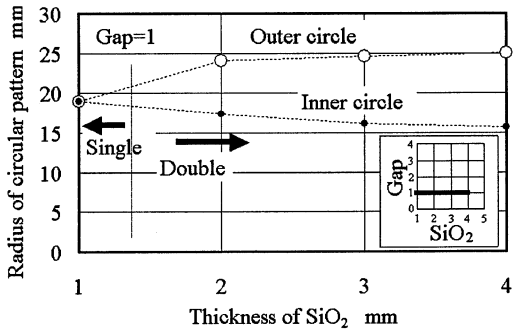


Fig. 7 Variation in radius of the erosion with thickness of the SiO<sub>2</sub> (G=1 mm)

侵食パターンの半径は小さく、外側の円環状侵食パターンの半径は大きくなるのがわかった。すなわち、2重円環状侵食パターンにおける2つの半径の差が大きくなるのがわかった。

図6は、ギャップについてG=1で一定にし、S(C)を変化させた場合のターゲット侵食パターンプロファイルである。S=1の場合、他の場合に比べ侵食深さは極端に大きくなっている。一方S=2~4の場合は、Sの増加に伴い、線形に侵食深さが小さくなっている。図中にS=1およびS=4の場合の侵食深さの平均および分散を示した。1重円環状侵食パターンであるS1C3G1においては平均が26.2 μm、分散が422 μm<sup>2</sup>であるのに対して、2重円環状侵食パターンであるS4G1においては平均が8.3 μm、分散が422 μm<sup>2</sup>であり、いずれも小さい値をとることがわかった。図7はSと2重円環状侵食パターンの半径との関係である。S=1の場合を除いて、2重円環状侵食パターンとなった。G=0の場合と比較すると、G=0の場合、S=3から2重円環状侵食パターンとなったのに対し、G=1の場合、S=2から2重円環状侵食パターンとなった。この違いには、Gの大きさが影響していることが予測される。そこで、Sを一定とし、Gを変化させた条件についてまとめると次のようになる。

図8は、Gを変化させた場合の侵食パターンプロファイルである。この図よりG=0の場合侵食深さは大きく、G=1~3の場合はほぼ一定となり、G=4の場合は極端に小さくなった。この結果から、Gがあるかないかでは影響を及ぼすが、Gの大きさそのものは影響を及ぼさないということが予測される。G=4の場合に侵食深さが小さくなったのは、Gの大きさに対し、Sの大きさが極端に小さかったために、ガードリング寄りに大きくイオンが逸れたのではないかと推測される。図中に、G=0および4の場合の侵食深さの平均および分散を示した。S1G4における侵食深さの平均は11.2 mm、分散は18.5 mmであり、2重円環状侵食パターンであるS1G4の方がS1C4よりもいずれの

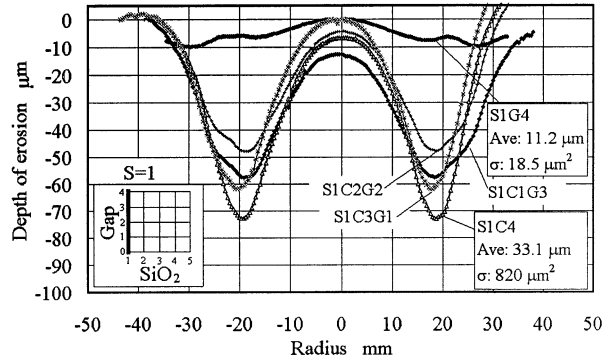


Fig. 8 Variation in erosion depth profile with gap (S=1 mm)

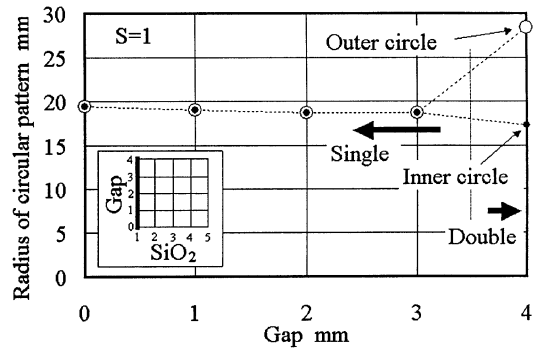


Fig. 9 Variation in radius of the erosion with gap (S=1 mm)

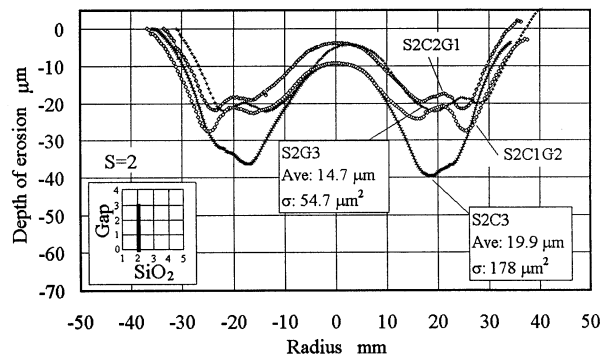


Fig. 10 Variation in erosion depth profile with gap (S=2 mm)

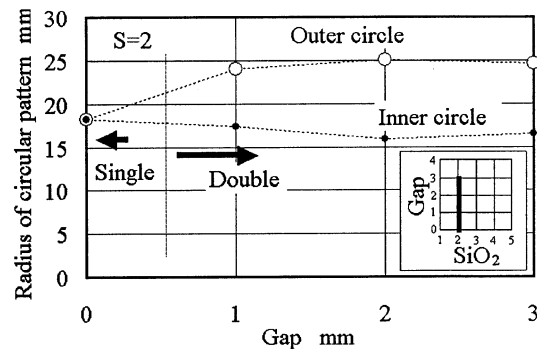


Fig. 11 Variation in radius of the erosion with gap (S=2 mm).

値も小さくなるのがわかった。図9は、Gと2重円環状侵食パターンの半径の関係である。図8よりG=4の場合は、2重円環状侵食パターンになっているのが確認できるが、G=0の場合、金属導電体ターゲットのように1重円環状に侵食され、2重円環状侵食パターンになっていない。G=1~3の場合は、不規則

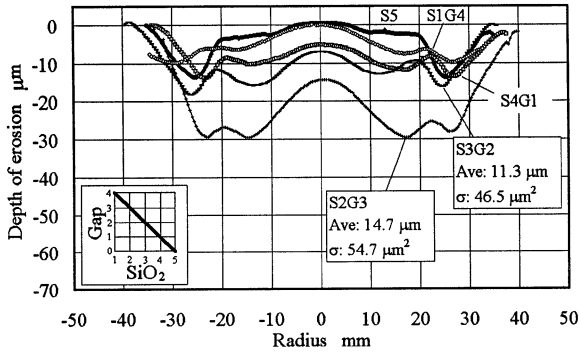


Fig.12 Variation in erosion depth profile with S and G (C=0)

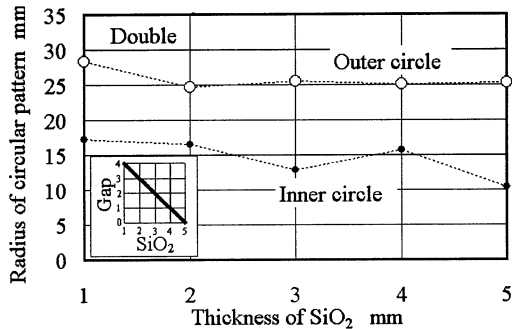


Fig.13 Variation in radius of the erosion with S and G (C=0)

に侵食されているのがわかるが、2重円環状侵食パターンに侵食されているとは確認できなかった。

図10は、SiO<sub>2</sub>の厚さをS=2で一定にし、G(C)を変化させた場合の、ターゲット侵食パターンプロファイルである。図よりG=0の場合、大きく侵食されている。G=1~3の場合、その侵食はG=0の場合に比べ小さいといえる。図中に、S2G3およびS2C3の場合の侵食深さの平均と分散とを示した。G=0からG=3とすることによって、侵食パターンは2重円環状になる。このとき、平均は19.9 μmから14.7 μmに約25%減少したのに対して、分散は178 μm<sup>2</sup>から54.7 μm<sup>2</sup>に約70%減少した。この結果は、2重円環状侵食パターンを得ることが侵食深さの均一化に役立つことを示唆している。図11は、G(C)と2重円環状侵食パターンの半径の関係である。G=0の場合のみ、1重円環状侵食パターンとなったが、G=1~3の場合、2重円環状侵食パターンになっている。内側の円環状侵食パターン半径は一定であるが、Gが大きくなるほど、外側の円環状侵食パターンの半径は大き

くなることが確認された。

図12は、S、Gをそれぞれ変化させた場合のターゲットパターンプロファイルである。全ての条件で2重円環状侵食パターンが確認できた。図よりSが大きくなる(Gが小さくなる)につれ、侵食深さも大きくなっている。図中にS2G3およびS3G2の場合の侵食深さの平均と分散を示した。平均は14.7および11.3 μm、分散は54.7および46.5 μm<sup>2</sup>であり、図4および図6に示した1重円環状侵食パターンの場合に比べて、分散の値がかなり小さいことがわかった。しかしながら、平均の値も小さいことから、大きいスパッタ率を必要とする場合には不利となることがわかる。図13は2重円環状侵食パターンができた場合の、Sと半径の関係である。2つの半径の間隔が比較的大きいことがわかる。

#### 4. 考 察

金属導電体ターゲットの場合、ターゲット侵食パターンは円環状にできる。これは、ターゲット背面にある永久磁石により、スパッタ放電がターゲット近傍に円環状に集中するためである。この現象は理論化されている。一方、絶縁物誘電体ターゲットにおいては2重円環状の侵食パターンが観察される(図3)。これは、ターゲットが誘電体である場合、表面が電気回路的に遮断され、Ar<sup>+</sup>イオンが消滅することなくターゲット表面に帯電し、その結果クローン反発によって帯電領域から逸れた軌跡をとるAr<sup>+</sup>イオンが発生し、2重円環状侵食パターンとなったと考えられる。この2重円環状侵食パターンは、誘電体ターゲットの厚さによって絶縁状態が異なってくるため、侵食パターンも異なってくる。本論文では、SiO<sub>2</sub>の厚さを1~5 mmで1 mmごとに変化させ、その違いを計測した。図4からSiO<sub>2</sub>の厚さを変化させた場合、SiO<sub>2</sub>の厚さが大きくなると、絶縁状態がよくなり、侵食深さが小さくなることがわかった。SiO<sub>2</sub>の厚さが1 mmの場合、2重円環状になる傾向が見られず、SiO<sub>2</sub>の厚さが2 mm以上から2重円環状の侵食パターンが観察された。また、図5より、SiO<sub>2</sub>の厚さが大きくなると、2つの円環状侵食の間隔が大きくなることがわかった。これは、誘電体ターゲットの厚さが大きくなることにより、絶縁状態がよくなり、その結果、より多くのAr<sup>+</sup>がターゲット表面に帯電したことが原因である。以上の結果より、SiO<sub>2</sub>の厚さを変えた場合のモデルを考えた。図14に示す。SiO<sub>2</sub>の厚さが小さい場合、帯電するAr<sup>+</sup>イオンの量が少ないため帯電領域が狭く、その結果2重円環状侵食パターンがはっきりとは現れない。また帯電領域が狭いことから、

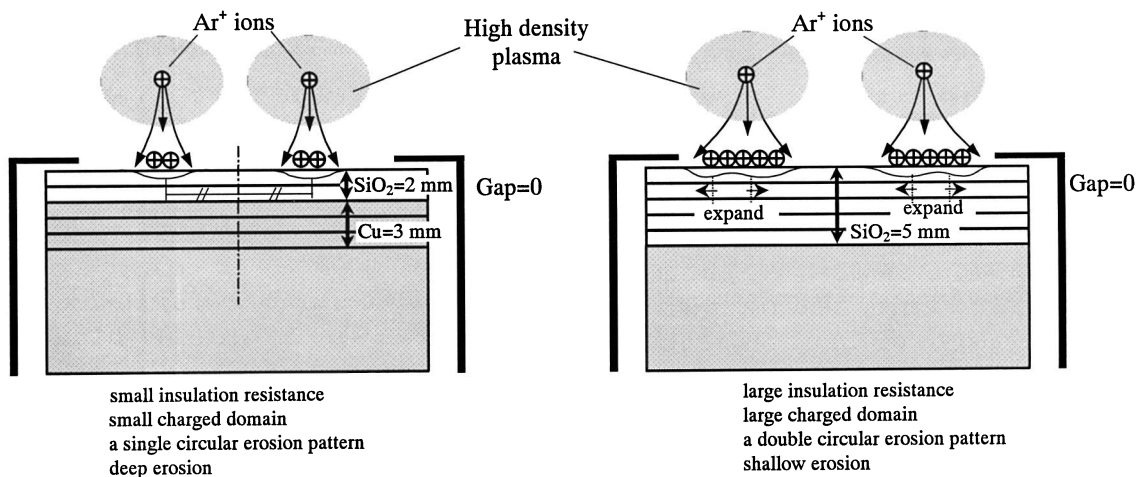


Fig.14 Schematic diagrams of the single and double circular rings of erosion with different thickness of SiO<sub>2</sub> (S=2 and 5 mm)

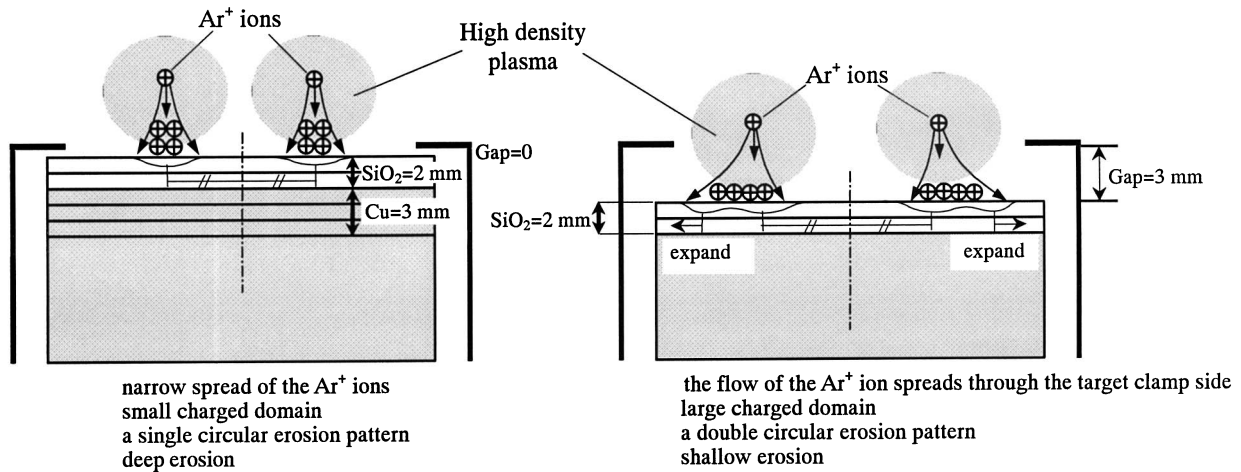


Fig.15 Schematic diagrams of single and double circular erosion patterns with different gaps (G=0 and 3 mm)

侵食深さは大きくなる。

また研究過程において、図2のようにターゲットとガードリングとの間にギャップを作った場合、侵食深さと2重円環状侵食パターンに違いができることが確認された。これは、ターゲットクランプが陰極にあたるため、ギャップができることにより、ガードリング側へ導かれる Ar<sup>+</sup>イオンが多くなったためと考えられる。

図6、7は、ギャップ (G) を 1 mm で固定し、SiO<sub>2</sub>の厚さを変化させたものである。図4と図6とを比較すると、ギャップがない場合、SiO<sub>2</sub>の厚さが3 mm 以上において2重円環状侵食パターンが観察されたのに対し、ギャップが1 mm の場合、SiO<sub>2</sub>の厚さが2 mm 以上において2重円環状になることを確認した。これはギャップを作ることにより、ガードリング寄りに Ar<sup>+</sup>イオンが逸れていくことを示している。

そこで SiO<sub>2</sub>の厚さを一定にし、ギャップを 0~4 mm 作った場合についてまとめると、条件によっては2重円環状侵食パターンがはっきりと現れない結果となった。SiO<sub>2</sub>の厚さが1 mm の場合、図8、9をみると、ギャップが大きくなるにしたがって侵食は浅くなり、それに加え、2重円環状パターンとなる傾向があることが確認できる。この結果は SiO<sub>2</sub>の厚さが1 mm の場合、絶縁状態が悪いため、ターゲット近傍に Ar<sup>+</sup>イオンがあまり蓄積されていないことを示している。ギャップが大きくなると、ガードリング側へ導かれる Ar<sup>+</sup>イオンが多くなり、その結果2重円環状侵食パターンになったと推測できる。

さらに SiO<sub>2</sub>が2 mm の場合、図10、11をみると、ギャップがない場合、侵食は深い2重円環状侵食パターンは確認できなかった。一方ギャップがある場合、ギャップがない場合と比べると、侵食深さは小さくなっているが、ギャップの大きさは侵食深さに影響がないことがわかる。また2重円環状侵食パターンについても、円環状侵食パターンの内側の半径に影響は見られなかったが、ギャップが大きくなるほど外側の半径は大きくなった。以上の結果より、SiO<sub>2</sub>の厚さを一定とし、ギャップを変更した場合のモデルを考えた。図15に示す。ギャップがない場合、Ar<sup>+</sup>イオンの広がりが小さくなるため、帯電領域が狭くなり、2重円環状侵食パターンとならない。また、侵食深さは大きくなる。ギャップがある場合、Ar<sup>+</sup>イオンがターゲットクランプ側に広がり、帯電領域も広がるため、2重円環状侵食パターンとなり、侵食深さは小さくなる。

## 5. 結 言

本論文では、高周波マグネトロンスパッタリングにおいて、SiO<sub>2</sub>誘電体ターゲットでは2重円環状侵食パターンになることを実験し、定性的理論との一致を確認した。また、実験過程において、ターゲットとガードリングの間にギャップを作ることによって、2重円環状侵食パターンに変化が起ることを確認した。以下に結果をまとめて列記する。

- (1) SiO<sub>2</sub>の厚さが大きいほど、またギャップが大きいほど、2重円環状侵食パターンが得られ、SiO<sub>2</sub>の厚さが小さいほど、またギャップが小さいほど1重円環状侵食パターンとなる。
- (2) SiO<sub>2</sub>の厚さが大きくなることにより、絶縁状態がよくなるため、侵食深さは小さくなる。また、ギャップが大きくなることによって、Ar<sup>+</sup>イオンがターゲットクランプ側に導かれるため、Ar<sup>+</sup>イオンの帯電領域が広くなり、その結果侵食深さが小さくなる。

2重円環状侵食パターンを得ることで侵食深さの分散の値は小さくなり、均一性が向上することがわかった。しかしながら、このとき全体としての侵食深さは減少する。侵食深さが大きく、かつ、2重円環状が鮮明なターゲット侵食パターンにするには、SiO<sub>2</sub>の厚さとギャップでバランスをとるとよいことがわかる。本論文の条件の場合、SiO<sub>2</sub>: 2 mm、ギャップ: 3 mm の場合であることが確認できた。本論文では、ターゲットの侵食を均一にする一つの指針を示すことはできたが、スパッタ率との間には背反的な関係があり、また、成膜された SiO<sub>2</sub>の膜厚分布にも影響を与える。さらに詳しい検討が必要である。

## 参 考 文 献

- 1) K.Kohler, J.W.Coburn, D.E.Horne, E.kay: Plasma Potentials of 13.56-MHz rf argon glow discharges in a planar system, *J. Appl. Phys.*, **57** (1985) 59.
- 2) T.Iseki, H.Maeda and T.Itoh, Vacuum, Improved wide erosion nickel magnetron sputtering using an eccentrically rotating tilted center magnet, **82** (2008) 1162.
- 3) T.Iseki, H.Maeda and T.Itoh, Wide erosion nickel magnetron sputtering using an eccentrically rotating center magnet, *Vacuum*, **83** (2008) 470.
- 4) K.Okazawa, E.Shidoji and T.Makabe, Prediction of the evolution of the erosion profile in a direct current magnetron discharge, *J. Appl. Phys.* **86** (1999) 2984.
- 5) K.Kusumoto and K.Iwata, Numerical study of the characteristics of erosion in magnetron sputtering, *Vacuum*, **74** (2004) 359.
- 6) Y.Suzaki, H.Miyagawa and S.Ejima, Double circular erosion patterns on dielectric target in magnetron sputtering, *Rev. Sci. Instr.*, **80** (2009) 104704.