大電力用高周波窓でのマルチパクタ現象*

道園真一郎**・斉藤 芳男**・穴見 昌三**・金原 繁***

(受理1994年1月7日, 掲載決定1994年3月5日)

Multipactor Phenomenon Observed at High-Power rf Windows

Shinichiro MICHIZONO**, Yoshio SAITO**,
Shozo ANAMI** and Akira KINBARA***

**(National Laboratory for High Energy Physics, Tsukuba, Ibaraki)

*** (Faculty of Engineering, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo)

(Received January 7, 1993, Accepted March 5, 1994)

1. 序 論

加速器等で用いられている高周波窓では, 通過高周波の大電力化にともない, マルチパクタによる劣化・破壊が問題になっている。マルチパクタとは, 誘電体窓材料(アルミナセラミック)表面が大きい二次電子放出係数(γ)を持つために, 端部で生じた一次電子等により, 二次電子が放出され, 高周波電界により加速されて表面に再入射することで, 入射電子が雪崩状に増殖していく現象であり, アルミナの発光(ルミネセンス)を伴う。二次電子放出係数(γ)の小さい薄膜(TiN等)をコーティングした場合は, アルミナ表面での発光強度の減少が観察されている。従ってコーティングは, 表面での二次電子の発生を減少させてマルチパクタ抑制に有効とされている¹⁾。しかし, アルミナセラミックからの発光が薄膜で遮蔽される場合もあり, 薄膜によるマルチパクタ抑制効果を発光強度を基準にして評価するのが必ずしも充分でない可能性もある。

今回は, 表面での γ と発光強度及びマルチパクタの関係を明らかにすることを目的とした。そのために1枚の高周波窓材料に γ の大きなMgO薄膜と γ の小さなTiN薄膜をコーティングし, 高周波通過時に生じる発光を観察する。薄膜での光の遮蔽(吸収), 表面の二次電子放出係数(γ)のマルチパクタへの影響について考

察し, TiN薄膜のマルチパクタ抑制効果を評価する。

2. 実 験

2.1 薄膜コーティング

使用した高周波窓材料は, 高エネルギー物理学研究所線形加速器のビルボックス型高周波窓に使用されているアルミナセラミックのディスク(日本特殊陶業製UHA-99; 直径92 mm 厚さ3.5 mm)である。試験するディスクは, まず表面の1/2にTiNを約1.5 nmコーティングし, 次に, TiNコーティング面と1/4が重なる様に表面の1/2にMgOを10 nmコーティングした(Fig. 1参照)。

TiN薄膜は, 到達圧力 10^{-8} Paの超高真空装置を用い²⁾, Tiをターゲット材として, Ar, N₂を導入する反応性DCマグネトロンスパッタ法で作成した。

MgO薄膜の成膜には, MgOをターゲット材として, Arを導入するrfマグネトロンスパッタ法を用いた。使用した蒸着装置の到達圧力は 10^{-5} Pa程度であった。

2.2 薄膜の光の透過率, 高周波損失の測定

マルチパクタ時の薄膜での光の遮蔽効果を知るために透過率を測定した。光の透過率は分光光度計を用いて, ガラス基板上に成膜した薄膜について測定を行った。膜厚は, TiNの場合1.5 nm, MgOは, 10 nmである。結果をTable 1にまとめる。TiNは, 膜厚1.5 nmの場合でも20%程度の吸収がある。MgOの場合は, 測定領域(300 nm~1000 nm)で光の吸収は無視できる程度である。

* 平成5年10月28日第34回真空に関する連合講演会で講演

** 高エネルギー物理学研究所(〒305 茨城県つくば市大穂1-1)

*** 東京大学工学部(〒113 東京都文京区本郷7-3-1)

Fig. 1 Schematic of the film coatings.

薄膜での発熱を抑えるために、高周波損失は充分小さい必要がある。高周波損失を、薄膜 (MgO は10 nm, TiN は1.5 nm) コーティングしたセラミック (UHA-99) の実効誘電正接 ($\tan \delta'$) によって評価した。 $\tan \delta'$ は、空洞共振器に薄膜コーティングしたセラミックを挿入した時の Q 値から求める (空洞共振器法)。Table 2 に示すように、MgO 薄膜をコーティングしたときの損失は、セラミック単体の場合とほぼ同じで MgO での高周波損失は無視できる程度である事がわかった。また、TiN をコーティングした場合、薄膜上でセラミック単体の場合の 5 倍程度の高周波損失が生じるが、この $\tan \delta'$ の値では、200 MW 程度の高周波を通過させても TiN は蒸発しない事が確かめられている¹⁾。

2.3 二次電子放出係数 (γ)

二次電子放出係数 (γ) の大小とマルチパクタの関係を調べるために、走査型電子顕微鏡 (SEM) を使って γ を測定した。絶縁体表面での帯電を避けるためにパルスビーム (1 ms, 100 pA) を用いた²⁾。

コーティングしたアルミナセラミックでの二次電子放出係数 (γ) の測定結果を Fig. 2 に示す。30 MW の高周波電力通過時のマルチパクタ電子の入射エネルギーである 7 keV 程度では³⁾、 γ は、コーティング無しの場合が最も大きく、MgO/TiN 及び MgO コーティング、TiN コーティングの γ は、ほぼ同じであるため、 γ が最外層のコーティングに依存することがわかった。MgO の結晶の γ は、最大25程度にまでなるが薄膜の場合は成膜方法によっては3程度まで落ちることもある⁴⁾。今回 MgO の γ の最大値が4程度と低い値であったのは、蒸着装置の到達圧力が低く、薄膜に不純物が混入している可能性があることが第一に考えられる。

2.4 カソードルミネセンス (CL)

走査型電子顕微鏡 (SEM) を使って電子線 (5 keV,

Table I Transmissivity of the thin films.

wavelength (mm)	Transmissivity (%)		
	300	400	1000
MgO (10 nm)	93	96	94
TiN (1.5 nm)	68	78	86

Table II Effective loss tangents ($\tan \delta'$) of the thin films on the ceramics.

	$\tan \delta' (\times 10^{-5})$
Al ₂ O ₃ ceramic (UHA-99)	9.3
TiN (1.5 nm) on UHA-99	53
MgO (10 nm) on UHA-99	9.3

Fig. 2 Secondary electron emission (SEE) coefficient (γ) of the coatings.

20 nA) を照射した場合のルミネセンス (カソードルミネセンス (CL)) を測定した (Fig. 3)。この時の発光スペクトルがアルミナのルミネセンスのみであるため、電子が薄膜コーティングを通過しアルミナまで入射して発光を生じさせ、その光が薄膜を透過してくることがわかった。

発光強度は、コーティング無しの場合が最も大きく、ついで MgO 及び TiN をコーティングした場合が大きい。TiN の場合は、透過率が小さいためアルミナセラミックからの発光を遮蔽したと考えられる。MgO の場合は、絶縁体薄膜 (MgO) 表面でのチャージアップや、MgO 薄膜中での電子のエネルギー損失によって、アルミナセラミックへの入射エネルギーが小さくなった事が原因と考えられる。

2.5 大電力試験

大電力通過試験では、高周波通過時の発光強度と、 γ や CL 発光強度との関連、マルチパクタとの関係を評価

Fig. 3 Cathodoluminescence (CL) spectra measured by SEM (beam energy; 5 KeV, beam current 20 nA).

できる。γは異なるが一次電子電流に対するCL発光強度がほぼ同じであるMgOとTiNコーティングの部分の高周波通過時の発光強度を比較すれば、γのマルチパクタに与える影響が評価できる。γがほぼ同じであるMgOとMgO/TiNの発光強度の違いを観察すれば、薄膜によるマルチパクタ時のルミネセンス光の遮蔽効果が評価できる。

大電力試験にはレゾナントリングを用いた。レゾナントリングでは、s-bandパルスクライストロンから出力される高周波(2856 MHz, 2 μsパルス)を周回・重畳させることにより大電力(最大周回電力250 MW以上)での試験が可能である。今回は最大220 MWまでの試験を行った。

高周波窓の高周波通過時の発光パターンをFig. 4に示す。この時の発光スペクトルは、CLと同様にアルミナのルミネセンスのみであった。

CLの強度は同じでγの大きいMgOの部分とγの小さいTiN部分で、明確な発光の差が認められる。このため、γの小さいTiNコーティングの部分ではアルミナへ入射する電子の増殖がなくマルチパクタが発生しなかったと結論される。

γが同じだがCL強度の異なるMgO/TiNとMgOコーティングの部分では、発光強度はTiNに吸収される分だけMgO/TiNの方が小さくなったが、発光が観察された。

Fig. 4 Optical emission from the window at the transmission power of 27 MW.

従って、マルチパクタが発生した場合は薄膜での光吸収があっても透過光は充分観察できる程度の強度を保っていることがわかり、発光からマルチパクタが評価可能であると結論できた。

尚、高周波通過実験の最初のうちは、コーティングのないアルミナセラミックの部分の方がMgO薄膜コーティングの部分よりも発光強度は大きかった。しかし、時間がたつと発光強度が増加しFig. 4のようにMgO薄膜の部分の方が大きくなった。これは高周波通過によるエイジング効果でMgO薄膜に含まれていた不純物が脱離してMgO薄膜のγが大きくなったためと思われる。高周波通過実験後は、表面のチャージアップのためγは測定できなかった。

3. 結 論

これらの結果から、表面の二次電子放出係数(γ)が大きいとマルチパクタが生じ、電子が下地のアルミナに入射して発光を生じさせるという機構が確かめられた。また、最外層のコーティングがγに影響を与えるので、コーティング等でγを小さくしても表面に不純物が付着したりしてγが大きくならないよう品質管理が重要であることがわかった。ルミネセンス強度によってマルチパクタを評価でき、TiN薄膜がマルチパクタ抑制に有効なことも確認できた。

【文 献】

- 1) 道園真一郎, 他, 真空35 (1992) 381.
- 2) 松田七美男, 他, 真空29 (1986) 392.
- 3) S. Yamaguchi et al., IEEE Trans. on Nucl. Sci. 39 (1992) 278.
- 4) Y. Ushio et al., Thin Solid Films 167 (1988) 299.