

徳島大学[院] ○林 祐輔 徳島大学[工] 米倉大介 村上理一

1 緒 言

近年、電磁波の有効利用は他分野に渡っており、特に高周波数帯域における利用が高い期待を集めている。その反面、不要電磁波によるシステムへの誤作動、人体への悪影響などが懸念されている。そのため、透明導電膜や電磁波吸収体に対する社会のニーズが高くなり、高い可視光透過率で低抵抗率の電磁波遮蔽材を薄膜として被覆させる研究が多く進められている¹⁾。

本研究では、電磁波遮蔽材として実用的な ITO 薄膜をスパッタ法により透明ガラス上に形成し、この高周波帯域 (40~60GHz 帯域) における電磁波遮蔽効果と同帯域の斜入射 (30~60 度) 電磁波に対する電磁波吸収効果を中心に調べた。

2 供試材

供試材としては、50mm×150mm×2mm の透明ガラス基板上に DC 傾斜対向マグネトロンスパッタ法により作製した ITO 薄膜を用いた。この方法はターゲット背後にマグネットを配置することによって、真空チャンバー内のターゲット表面近傍に高密度のプラズマを拘束し、高速成膜を可能にしたスパッタ法である。なお、本研究で供試材として扱う ITO 薄膜のターゲットには、 In_2O_3 と SnO_2 (9:1) の焼結体を用いた。この ITO 薄膜の四探針法によって評価した電気抵抗率は、 $5.90 \times 10^{-4} [\Omega \cdot \text{cm}]$ であり、可視光透過率は波長 550nm で約 60% であった。

3 実験方法

高周波帯域の電磁波に対する評価は、GHz 帯電磁波評価装置 (スペクトラムアナライザ) を用い、試料に対して開かれた空間で電磁波を照射し、その特性について検討する自由空間法を採用した。

電磁波遮蔽効果の評価 SE は通常、単位にデシベルを用い、基準電磁波エネルギー $P_0 [\text{mW}]$ と試料を透過させた状態の透過電磁波エネルギー $P_t [\text{mW}]$ を用いて、次のように表される。

$$SE [\text{dB}] = 10 \log (P_0 / P_t) \quad \cdots (1)$$

また、電磁波吸収効果の評価法は、図 1 に示す反射電力法を採用した²⁾。この方法はエネルギー保存則に従った方法である。試料の設置部分を中心に入射波と反射波の角度が等しいことを利用して、送信・受信アンテナを等間隔に設置し、完全反射体を介して受信した電磁波エネルギー $P_{0,\theta} [\text{mW}]$ を測定する。測定に際しては空気による減衰、反射損失などを含めた測定値を基準値として利用した。試料は完全反射体の前に設置し、同様の測定を行った。ここで試料による吸収分を $P_{a,\theta} [\text{mW}]$ 、反射分を $P_{r,\theta} [\text{mW}]$ とすれば、受信するエネルギーは完全反射体からの反射した分 $P_{0,\theta}' [\text{mW}]$ と試料表

面で反射した分 $P_{r,\theta} [\text{mW}]$ の和になる。エネルギー保存則に従い、

$$P_{0,\theta} [\text{mW}] = (P_{0,\theta}' + P_{r,\theta}) + P_{a,\theta} \quad \cdots (2)$$

$$A [\text{dB}] = 10 \log ((P_{0,\theta}' + P_{r,\theta}) / P_{0,\theta}) \quad \cdots (3)$$

となり、(3)式から電磁波吸収効果 A を評価できる。

この評価結果の電磁波の入射角度、周波数、および ITO 薄膜の膜厚との関係を調べた。膜厚の変化はスパッタ時の放電時間を操作することで行った。

さらに、1~18[GHz]帯における試料の電磁波吸収効果についてもネットワークアナライザを用いた自由空間法で評価を行った。

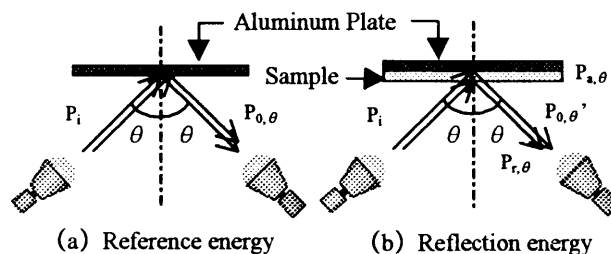


Fig.1. Measurement of absorption effectiveness

4 実験結果と考察

4.1 電磁波遮蔽効果 作製した ITO 薄膜の 40~60GHz 帯域における垂直入射の電磁波遮蔽効果は、全周波数帯域に渡って約 15~20dB であり、良好な遮蔽効果を有すると言える。また、図 2 は試料に対する斜入射における電磁波遮蔽効果を表している。この結果から入射角度が 10 度大きくなるごとに、電磁波遮蔽効果はわずかに 1~2dB 程ずつ高くなっていることがわかる。

この入射角度の増加に伴う電磁波遮蔽効果の増加の原因としては、反射分が増加した可能性と、薄膜内部に滞在する距離が長くなることで電磁波の持つエネルギーが減衰した可能性の 2 つが考えられる。実際にはこの両者が起因したと考えられるが、角度に従い、ほ

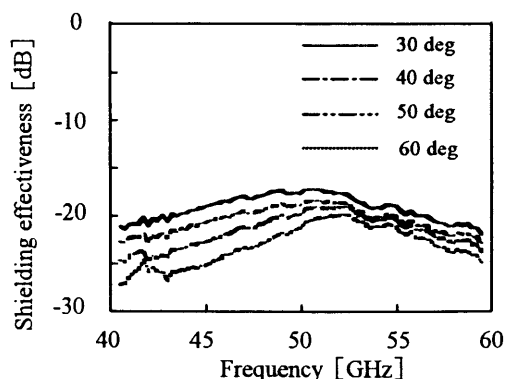


Fig.2. Shielding effectiveness of ITO films for various kind of irradiation angle

一定の割合でグラフが上下に変動している点や 30 度と 60 度とで 5dB もの差が出ていることから考えて、前者による原因が主であると思われる

4.2 電磁波吸収効果 入射角度 45 度での ITO 薄膜の 1~18GHz 帯と 40~60GHz 帯における電磁波吸収効果の評価を行った。1~18GHz 帯においては、TE 波、TM 波ともに 14GHz 付近で電磁波吸収効果のピークが表れ、その効果は 12~16dB 程であった。それに対して、40~60GHz 帯における吸収効果は、平均して 1~4dB 程の低い値であり、周波数の増加に伴い、わずかに電磁波吸収効果が向上する変動が見られた。

一般に電磁波遮蔽材の電磁波吸収効果は、ある特定周波数でピークを示し、その点以外の周波数での吸収効果はほとんどない。したがって前述の電磁波遮蔽効果の結果は、本研究で利用した ITO 薄膜の 40~60GHz 帯での良好な電磁波遮蔽効果の結果は、反射による効果が主な要因であると考えられる。また、14GHz 付近における電磁波吸収効果は、電磁波エネルギーの減衰によるものではなく、高周波帯域特有の誘電体の分極に伴う熱エネルギーへの変換が行われたためと思われる。

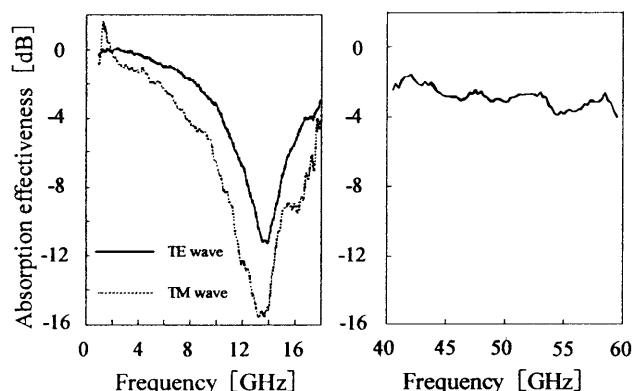


Fig.3. Absorption effectiveness against frequency for the ITO film

4.3 電磁波エネルギーの減衰 図 4 は、40~60GHz 帯域における ITO 薄膜の電磁波吸収効果と、電磁波の入射角度、周波数の変化との関係について検証した結果である。各グラフは周波数帯を 5GHz ごとに 4 つに区分し、それぞれの電磁波吸収効果の平均をもって評価している。

周波数特性としては、周波数が高いほど電磁波吸収効果は 1~2 dB 程度高くなる結果を示した。また、入射角度の変化に対しては入射角度の増加に伴い、電磁波吸収効果が高くなる微弱な傾向が見られる。

これらの原因としては、周波数が高いと電磁波の波長が短くなったことや、前述したように入射角度増加により、電磁波の薄膜内部に滞在する距離が長くなったことが起因して、吸収というよりも減衰という形で表れたものと考えられる。

同様に、電磁波エネルギーの減衰が原因と考えられる

吸収効果の向上の結果が、ITO 薄膜の膜厚変化と電磁波吸収効果の関係についても見られた (図 5)。57GHz 以上の周波数など部分的ではあるが、膜厚が大きくなるほどに電磁波吸収効果がわずかに 1 dB 向上していることがわかる。

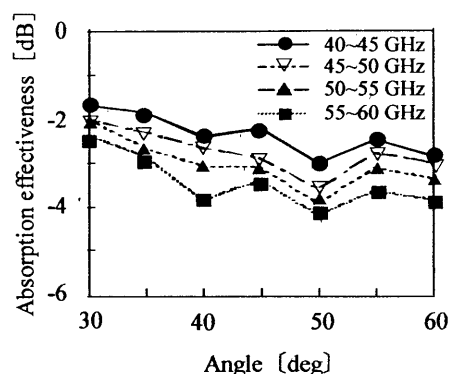


Fig.4. Absorption effectiveness of ITO films for various kind of irradiation angle

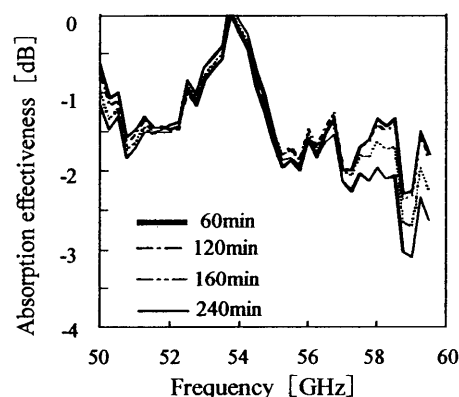


Fig.5. Absorption effectiveness of ITO films for various kind of film thickness

5 結言

- (1) 作製した ITO 薄膜の 40~60GHz 帯域における電磁波遮蔽効果は、約 15~20dB であり、電磁波の入射角度増加に伴い向上する。
- (2) 電磁波吸収効果は、14GHz 付近でピークが見られ、その効果は 12~16dB であった。40~60GHz 帯域での吸収効果は低い値を示した。
- (3) 以上から 40~60GHz 帯域の電磁波遮蔽効果は、その多くが反射効果に起因することがわかった。
- (4) 作製した ITO 薄膜の 40~60GHz 帯域における電磁波吸収効果は、14GHz 付近の誘電損失によるものとは異なり、電磁波エネルギーの減衰によるものであった。

参考文献

- 1) 日債銀総合研究所編 “電磁波障害と対策”
- 2) 花澤理宏, 橋本修, 江原英利, 電子情報通信学会論文誌 B, J83-B, p245 (2000)