

外観デザインと調和する透明アンテナ

Transparent antennas matching with the surrounding appearance and design

越地 福朗, 安田 洋司, 山田 勝実, 内田 孝幸

Fukuro Koshiji, Yoji Yasuda, Katsumi, Yamada Katsumi and Takayuki Uchida

東京工芸大学、243-0297 神奈川県厚木市飯山南5-45-1

概要

本研究では、ITO/Ag/ITO積層複合透明導電膜を用いるモノポールアンテナの提案・検討を行った。その結果、成膜したITO (300 nm)/Ag (5 nm)/ITO (30 nm)を用いたモノポールアンテナにおいて、76.7 %の光学的透過率と81.4 %の放射効率が得られ、高い放射効率と高い光学的透明性を両立できることを示した。特に、試作アンテナによって得られた80%以上の放射効率は、携帯機器やウェアラブル機器に内蔵される小形アンテナと同等であり実用的であるといえる。

1. はじめに

近年、スマートシティの実現に向けて、Internet of Things (IoT)や第5世代移動通信システム(5G)に関する研究開発が進められている。これらの通信システムにおいては、通信特性向上のために、アレーアンテナが利用される。また、アンテナの放射特性を確保する観点から、アンテナ設置場所は機器筐体内部よりも筐体表面が望まれる。こうした背景から、透明導電膜を利用する透明アンテナが検討されている[1]。これまでに透明導電膜として、Indium Tin Oxide (ITO)などの透明導電材料が検討されているが、ITOなどの単一材料で構成された透過率80%程度の透明導電膜を用いたアンテナの放射効率は30%~50%程度であり、高い放射効率が得られない。一方で、金や銀などの導電率の高い金属薄膜をITOなどの誘電体薄膜でサンドイッチするような、誘電体-金属-誘電体 (Dielectric-Metal-Dielectric; DMD) 構造の積層膜によって、光学的透明性と高導電率を両立できることが報告されている。しかしながら、DMD膜をアンテナとして応用する研究はほとんど見当たらない。本研究では、DMD構造を導入したモノポールアンテナを提案・検討する[2]。

2. ITO/Ag/ITO透明導電膜の成膜

本研究では、DMD膜として、0.7 mm の無アルカリガラス基板に、ITO膜300 nm, Ag膜5 nm, およびITO膜30 nmを成膜する。ITO膜およびAg膜は、対向ターゲット式スパッタ装置を用いて堆積する。基板温度は室温、スパッタガス圧は4 mTorrで、Arガス流量20 sccm, Ar + 10%O₂ガス6 sccmをマスフローコントローラで制御し堆積槽に導入する。スパッタ電流は500 mA一定であり、ITOおよびAgの堆積速度はそれぞれ、80 nm/min, 60 nm/minであった。

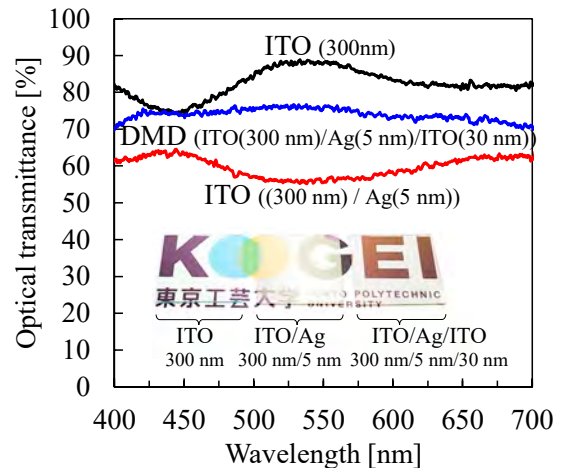


Fig. 1 Optical transmittance

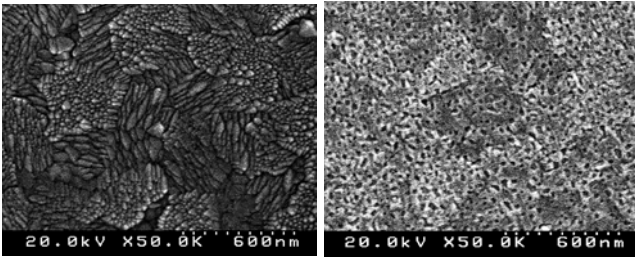
Table 1 Monopole antenna model

	ITO	ITO/Ag	DMD (ITO/Ag/ITO)
Sheet resistance R_s [Ω /sq]	5.2	4.7	3.4
Conductivity σ [S/m]	6.4×10^5	7.0×10^5	8.8×10^5

図1は、成膜した透明導電膜の可視光領域を含む400 nm~700 nmの波長における透過率を示したものである。図1からわかるとおり、単層の300 nmのITO膜においては、82.3%の平均透過率が得られる。この単層ITO膜の上に、5 nmのAgを堆積した二層のITO/Ag膜では、Ag粒子による遮蔽のみならず、金属光沢にともなう反射が顕著となり、平均透過率は59.7%に落ち込む。一方で、ITO/Ag膜の上に、さらにITO膜を堆積した3層のDMD (ITO/Ag/ITO) 膜では、ITO膜が反射防止 (AR) 層として機能し平均透過率は大幅に改善する。このとき、最大透過率および平均透過率は、それぞれ76.7%、74.0%である。

表1は、図1に示す各膜のシート抵抗、および導電率をまとめたものである。同表からわかるとおり、単層のITO膜では5.2 Ω /sq (6.4×10^5 S/m)であったシート抵抗が、ITO/Ag膜では4.7 Ω (7.0×10^5 S/m)に低減され、DMD膜では3.4 Ω /sq (8.8×10^5 S/m)へとさらに低減される。

図2は、(a)単層ITO膜、(b)2層ITO/Ag膜のField Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) 画像



(a) Single-layer (ITO) (b) Double-layer (ITO/Ag)
Fig. 2 FESEM image of Ag intermediate layer

を示したものである。同図(a)からわかるとおり、ドメインの分かれたITO特有の膜が観察される。同図(b)からわかるとおり、ITO膜上に、Ag粒子が、ランダムに多数の穴が空いた状態で、薄く堆積している。

3. 試作アンテナと放射特性

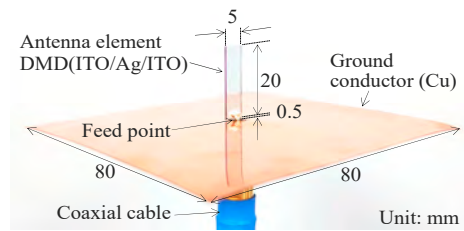
図3(a)は、DMDを用いて試作したアンテナの写真である。放射素子長 20 mm, 幅 5 mm, グラウンド導体幅 80 mm, 給電点の間隔0.5 mmとしている。透明導電膜の厚さは、図1で成膜したものと同様であり、単層ITOでは300 nm, 3層DMD (ITO/Ag/ITO)では335 nmである。図3(b)は、試作アンテナの反射特性 S_{11} である。同図からわかるとおり、試作アンテナは、3.2 GHzで共振し、アンテナとして動作していることがわかる。また、同図(c)は、試作アンテナの3.2 GHzにおける放射パターンである。同図からわかるとおり、xy面において水平面内無指向性、zx面においては8の字のモノポールアンテナ特有の放射パターンが得られており、良好な放射特性が得られているといえる。

表2は、試作アンテナの放射効率をWheeler法によって測定した結果を示したものである。同表からわかるように、単層ITO, 2層ITO/Ag膜, 3層DMD膜の放射効率は、それぞれ、68.0%, 75.5%, 81.4%であった。単層ITO膜の代わりに、DMD膜を用いることで、大幅に放射効率が向上する。この80%の放射効率は、携帯機器やウェアラブル機器に内蔵される小形アンテナの放射効率と同等以上であり、良好な放射効率が得られているといえる。

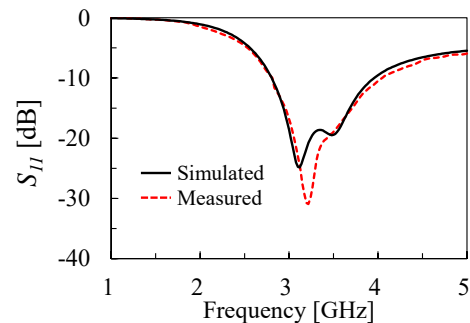
以上から、DMD透明導電膜を用いたアンテナは、従来課題であった透明性と放射効率を改善し、およそ80%の光学的透過率と放射効率を同時に実現できることが確認された。

4. まとめ

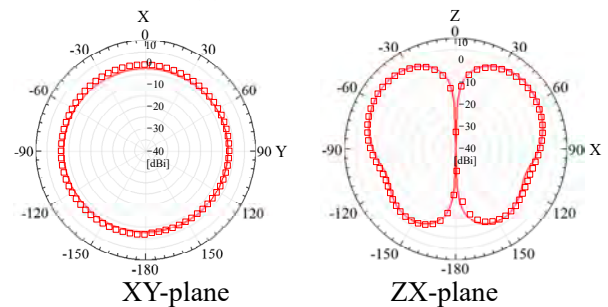
本研究では、ITO/Ag/ITO積層複合透明導電膜を用いるモノポールアンテナの提案・検討を行った。その結果、成膜したDMD膜、すなわち、ITO (300 nm)/Ag (5 nm)/ITO (30 nm)を用いたモノポールアンテナは、76.7%の光学的透過率と81.4%の放射効率が得られた。本研究で得られた81.4%の放射効率と76.7%の光学的透過率は、高い放射効率と高い光学的透明性を両立するアンテナの一例として有用である。特に、試作アンテナ



(a) Prototyped antenna made on an experimental basis



(b) S_{11} characteristics



(c) Radiation patterns

Table 1 Radiation efficiency

	ITO	ITO/Ag	DMD (ITO/Ag/ITO)
Simulated [%]	73.0	78.2	83.2
Measured [%]	68.0	75.5	81.4

テナによって得られた80%以上の放射効率は、携帯機器やウェアラブル機器に内蔵される小形アンテナと同等であり実用的であるといえる。

参考文献

[1] Y. Yamada, F. Koshiji, Y. Yasuda, T. Uchida, K. Yamada, and, et al., "Analysis of Reflection Characteristics and Radiation Efficiency on Thickness and Conductivity of Monopole Antenna Using Transparent Conductive Film", ICEP 2021, Online, Japan, May 2021.

[2] F. Koshiji, Y. Yasuda, Y. Yamada, K. Yamada, and T. Uchida, "Transparent antenna with high radiation efficiency and high optical transmittance using dielectric-metal-dielectric composite materials based on ITO/Ag/ITO multilayer film", Transactions of The Japan Institute of Electronics Packaging, Vol.15, pp.E22-001-1-7, July 2022.