

透明反射遮熱フィルムに向けた酸化物半導体ナノ粒子薄膜の赤外メタマテリアル制御

Control of infrared metamaterials on oxide semiconductor nanoparticle films for transparent thermal-shielding applications.

東大工¹、三菱マテリアル²、宇都宮大工³、科学技術研究所⁴

°松井裕章^{1*}、庄司美穂²、日向野怜子²、依田秀彦³、藤田明希⁴

Univ. of Tokyo¹, Mitsubishi Materials Co.², Utsunomiya Univ.³, Science & Technology Institute. Co.⁴

°H. Matsui^{1*}, M. Shoji, S. Higano, H. Yoda, A. Fujita

*E-mail: hiroaki@ee.t.u-tokyo.ac.jp

住宅内の快適な環境の実現(省エネ社会)に向けて、窓から侵入する熱線を効率よく遮蔽可能な遮熱断熱技術が要求され、太陽光からの熱線(近赤外線)を効果的に遮断することが必要である。特に、ガラス窓の応用に対して、近赤外光(熱線)を光吸収ではなく光反射によって遮蔽することが求められ、更に、5G(6G)等の高度通信技術の発達は電波透過性を持つ透明反射遮熱フィルムの開発を要求する。

本発表では、酸化物半導体(ITO)ナノ粒子の表面プラズモン共鳴を応用して、新しい透明反射遮熱フィルムの開発を紹介する。本研究では、赤外エリプソメトリ分光を用いた光学解析を行い、ITO ナノ粒子薄膜がメタマテリアル(人工物質)として機能化し、近赤外・中赤外域の光学応答(共鳴反射)を決定することを見出した。従来の金属メタマテリアルは、高度なリソグラフィ技術によるナノ・マイクロ構造体を用いて、負の屈折率や高誘電率の実現、及び光磁場応答を実現させた。近年、高誘電率を持つ光材料の創出に向けて、ナノ粒子積層薄膜によるメタマテリアル制御が期待されている。その場合、ナノ粒子を「メタ原子」として捉え、ナノ粒子薄膜を「メタ表面」として考える概念が報告されている。本発表では、新しい透明反射遮熱フィルムに向けて、酸化物半導体ナノ粒子薄膜のメタマテリアル制御と光学特性を報告する。更に、赤外域での高反射性能と遮熱特性に与える影響を考察する。

ITO ナノ粒子薄膜は赤外域で2種類の共鳴反射を示した。太陽熱に対する遮熱効果に関係する近赤外域の共鳴反射は、3次元電磁界FDTD解析を用いて実証された。更に、赤外エリプソ分光から見積もられた有効複素誘電率は、近赤外域で強いローレンツ共鳴が観測された。特に、長波長側の有効誘電率(実部)は既存の透明酸化物半導体では実現しえない高い誘電率を示し、ITO ナノ粒子薄膜がメタマテリアルとして光機能化した結果である。近赤外域の共鳴反射は金属の性質を由来に持ち、中赤外域の共鳴反射は光干渉効果を起源に持つ。それはFDTD解析に基づく光電場分布からも実証され、赤外域で観測された高い共鳴反射は、ナノ粒子間界面の光電場増強が重要な役割を果たす(図1)。

本研究では、ITO ナノ粒子薄膜の遮熱性能に対する実証試験を実施した。ナノ粒子薄膜を塗布したガラス窓を持つモデルハウス(断熱ボックス)を準備し、赤外線ランプ(2000K, 100W)を照射した。赤外線の照射に伴いボックス内の空気温度は上昇したが、ナノ粒子薄膜を塗布したガラス窓をもつモデルハウス内の空気温度の上昇は抑制された(図2)。酸化物半導体ナノ粒子薄膜の赤外メタマテリアル制御は、高い共鳴反射性能を発現させ、高い遮熱性能を示した。本課題は、可視・電波透過性を併せ持つ透明反射遮熱フィルムの新しい光熱制御に向けた酸化物半導体ナノ粒子材料の応用展開を示した。

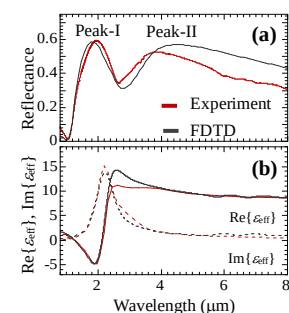


Fig. 1 (a) Reflectance spectra and (b) effective dielectric functions of the ITO NP film.

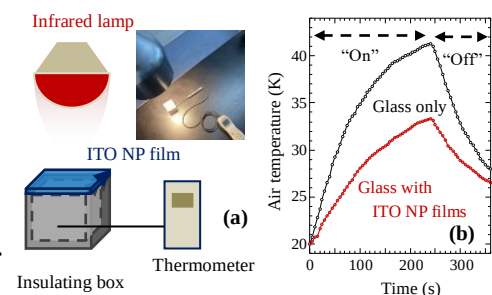


Fig.2. (a) Schematic illustration and photograph of the thermal shielding experiment. (b) Time dependence of the air temperature in the insulating box with glass covered by the ITO NP film.

References:

H. Matsui, M. Shoji, S. Higano et al., *ACS Appl. Mater. Inter.* (2022). "Infrared plasmonic metamaterials based on transparent nanoparticle films of $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ for solar-thermal shielding applications."