

遮熱応用に向けた透明酸化物半導体のナノ粒子間界面と熱輸送制御

Nanoparticle interfaces and thermal transport in oxide semiconductors

東京大工 °松井 裕章, 田畑 仁

The Univ. of Tokyo °Hiroaki Matsui, Hitoshi Tabata

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

ナノマテリアルエンジニアリングは様々な応用分野において着目され、ナノ粒子材料を基盤とした光学・電子デバイスは、ナノ粒子表面の化学的・物理的性質や粒子界面等の局所構造がデバイスの動作性能に重要な影響を与える。特に、ハイブリッドナノ粒子(無機・有機コアシェル構造)の集合体であるナノ粒子薄膜は、興味ある物理的特性を発現する[1,2]。本講演者は之までに、透明酸化物半導体である Sn 添加 In_2O_3 (ITO) ナノ粒子間界面の光学制御(プラズモニックメタサーフェイス)を通じて、赤外域で選択的な高反射性能や高い機械的性質(ウエラブル)を達成し、新しいナノ光技術を用いた透明反射遮熱フィルムを実現した[3, 4]。更に、ナノ粒子間界面の高い電気的絶縁性は、マイクロ波帯域での高い電波透過性に寄与し、ウインドウを通した情報通信を可能にする[5]。社会実装に向けて、ウインドウへの遮熱フィルムの付与は、光熱変換等に伴う熱生成に伴うガラス割れを引き起こす課題がある。本講演は、ITO ナノ粒子薄膜の基礎的な熱伝導特性に着目し、ナノ粒子間界面と熱輸送特性の関係を議論する。

図 1(a)は、時間領域サーモリフレクタンス (TDTR:RF モード)法で測定した ITO 薄膜(連続膜)の時間応答シグナルを示す測定試料は、Pt/ITO film /Pt の 3 層構造を採用した。ITO 薄膜の熱拡散率(α)は、 2.47×10^{-6} [m^2/s]を示し、体積比熱容量を考慮して結果、 4.0 [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$]の有効熱伝導率(λ)を与えた。この結果は、有限要素法(FEM)と3次元非定常熱伝導解析に基づく理論計算と一致した。一方、ITO ナノ粒子薄膜の熱拡散率は 2.42×10^{-7} [m^2/s]を与え、ITO 薄膜よりも一桁小さい値を持ち、 0.28 [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$]の低い有効熱伝導率を有する。それは、理論的考察からも実証された。ITO ナノ粒子は金属伝導性を示し、熱輸送特性には自由電子と格子伝導の 2 種類が関与する。格子及び自由電子の物理的な拡散長は、それぞれ 1 nm と 10 nm 程度であり、 20 nm の ITO ナノ粒子内の熱輸送は拡散的な熱伝導が支配的となる。故に、ITO ナノ粒子薄膜の熱伝導性の低下は、明らかにナノ粒子間界面のフォノン散乱が重要な役割を果たす。それは、Maxwell-Garnett 理論による有効熱伝導解析からも同様に示された。そして、粒子径サイズと熱拡散率の系統的な調査から、 0.18 [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$]程度まで低い有効熱伝導率が達成された。

それは、理論的考察からも実証された。ITO ナノ粒子は金属伝導性を示し、熱輸送特性には自由電子と格子伝導の 2 種類が関与する。格子及び自由電子の物理的な拡散長は、それぞれ 1 nm と 10 nm 程度であり、 20 nm の ITO ナノ粒子内の熱輸送は拡散的な熱伝導が支配的となる。故に、ITO ナノ粒子薄膜の熱伝導性の低下は、明らかにナノ粒子間界面のフォノン散乱が重要な役割を果たす。それは、Maxwell-Garnett 理論による有効熱伝導解析からも同様に示された。そして、粒子径サイズと熱拡散率の系統的な調査から、 0.18 [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$]程度まで低い有効熱伝導率が達成された。

参考文献

- [1] *Appl. Phys. Lett.* **104**, 211903 (2014). [2] *Appl. Phys. Lett.* **105**, 041903 (2014).
 [3] *ACS Appl. Mater. Inter.* **8**, 11749 (2016). [4] *ACS Appl. Nano Mater.* **1**, 1853 (2018)
 [5] *ACS Appl. Nano Mater.* **2**, 2846 (2019).

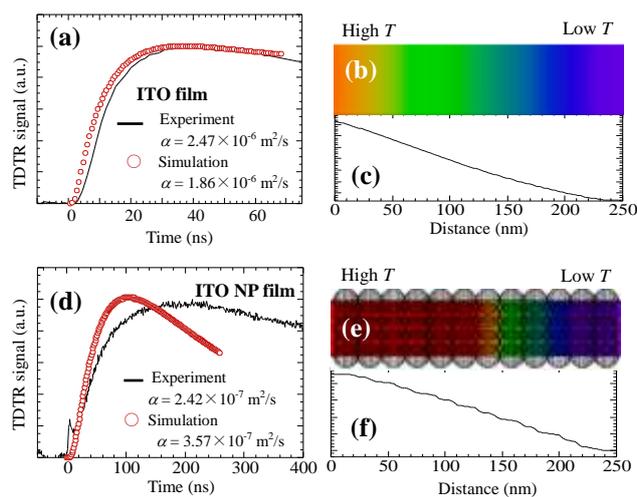


Fig. 1 (a) Experimental and simulated TDTR signals of ITO films. (b) Thermal diffusion image and (c) its cross-section of ITO film at 8 ns. (d) Experimental and simulated TDTR signals of ITO-NP films at 40 ns. (e) Thermal diffusion image and (f) its cross-section of ITO-NP film.