

1. 評価対象研究課題

- (1) 研究課題名：ナノ構造デザインによる赤外輻射スペクトル制御
- (2) 研究代表者：一般財団法人ファインセラミックスセンター 奥原 芳樹
- (3) 研究期間：令和2年度～令和4年度

2. 終了評価の実施概要

日時：令和5年10月27日  
場所：TKP東京駅大手町カンファレンスセンター  
評価委員：未来工学研究所 理事長、上席研究員／東京大学 名誉教授  
平澤 洽（委員長）  
東京工業大学 工学院 電気電子系 教授  
梶川 浩太郎  
東京農工大学 名誉教授  
佐藤 勝昭  
東京工業大学 名誉教授  
谷岡 明彦  
科学技術振興機構 研究開発戦略センター 企画運営室長、  
フェロー  
中山 智弘  
理化学研究所 光量子工学研究センター センター長  
緑川 克美  
量子科学技術研究開発機構 量子技術基盤研究部門  
研究企画部長  
八巻 徹也  
情報通信研究機構 電磁波研究所 リモートセンシング研究室  
主任研究員（兼務）経営企画部 プランニングマネージャー  
山本 真之

（委員長以外は五十音順・敬称略）

3. 研究と成果の概要

研究の概要

赤外域の光物性を制御する上で、その波長域での「高い屈折率  $n$  および低い消衰係数  $k$ 」が光学設計の自由度を向上させて新たな光機能の創出に繋がる基盤的な素材となる。本研究では、表面プラズモン（自由電子群が光と相互作用する共鳴振動）の顕著な発現によって赤外光物性をコントロールする新規な薄膜材料を開発し、消

衰係数をゼロ付近に抑えつつ世界最高レベルの赤外屈折率の達成を目指した。その表面プラズモンの効果を最大化させるべく、高屈折率な半導体マトリックス中に金属ナノ粒子を高濃度分散させ、その自由電子群のプラズモン共鳴を制御することで屈折率の向上を図った。さらに、その赤外高屈折率膜を活用した積層構造にて任意の赤外波長帯の輻射率を高めるスペクトル分布の設計・実証へ展開し、高温 *in situ* での輻射ピークの実証を目指した。

#### 成果の概要

赤外屈折率の高い半導体シリサイド  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> をベース母材として選択し、そのマトリックス中に自由電子密度の高い Ag ナノ粒子を高濃度で均一分散させる成膜・熱処理プロセスを開発した。 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> / Ag 多層積層体において層数・各膜厚を最適化するとともに、それに最適な熱処理温度（約 750°C）を与えることで、数十 nm の微細な Ag ナノ粒子の均一分散組織を実現でき、波長 1,500 nm 付近に極めて大きなプラズモン共鳴を発現させることに成功した。 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> マトリックスの Si/Fe 比が Ag ナノ粒子分散組織に大きく影響することを見出し、Si 欠損によって生じる  $\epsilon$ -FeSi 金属相は Ag を  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 粒界に偏析させ、Si 過剰では Si 相が Ag を  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 粒内に凝集させ、いずれも不均一な粗大 Ag 粒子を生んでプラズモン共鳴を低減させた。その結果、化学量論組成の  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 相が Ag ナノ粒子の微細化・均一分布に有効であることを見出し、このナノ組織制御によって発現させた顕著なプラズモン共鳴により、世界最高レベルの赤外屈折率  $n \geq 8$ 、消衰係数  $k \leq 1$  を達成した。さらに、その赤外高屈折率膜をもとに、狙った波長帯に輻射率 95%以上のピークをもつ積層構造を光学設計・成膜し、高温 *in situ* で放射される熱輻射スペクトルの実証に成功した。

#### 4. 終了評価の評点

AA 想定以上の成果をあげた。
-----------------

#### 5. 総合コメント

マイクロ構造と積層構造を工夫して赤外領域の高輻射材料開発の原理的方式を考案し、そこに至る研究内容の説明も明確である。研究当初に設定した研究目標を十分に達成しており、材料の研究としては十分な内容で、この材料を使った学術面・応用面で今後が期待できる成果である。

応用物理学会などの現在の所属以外の学会や展示会など、学際間のコミュニケーションを行い、幅広いニーズや適用の視点を踏まえた新たな利用や、機能デバイスの実用化などの大きな挑戦を期待する。

#### 6. 主な個別コメント

- 赤外領域の高放射材料の開発に関し、マイクロ構造と積層構造を工夫して素晴らしい機能を発揮する材料を開発した。
- 高放射材料の原理的なエネルギー構造を発見したので、新たな材料開発の指針が得られた。
- 研究目標である高い赤外放射性能を持った材料を探索し、**FeSi<sub>2</sub>:Ag** マトリクス構造で達成した。
- 計画時には考えていなかったプラズモン共鳴による大きな屈折率を見出し、太陽電池など受光素子への応用も視野に入ってきた。
- ナノ粒子の分散に関して計画時に想定していなかった成果が見られる。
- トポロジカル絶縁体に対する優位性を示す、**FeSi<sub>2</sub>**に対する組成の知見など、優れた副次的成果が得られている。
- 検討結果に丁寧な考察がなされており、他の研究課題にも生かせるノウハウや経験が蓄積されたのではないかと。
- 今後はこの材料を使った応用や展開を考えていくとよい。
- 研究の芽を出した感じ。ここから次のフェーズに行くためには、いろいろなところへの適用の視点も必要。
- 今後、新たな利用、機能デバイス化への展開が重要である。
- 材料探索が **FeSi<sub>2</sub>:Ag** に限られているので、もう少し材料探索の範囲を広げるとよいのではないかと。
- 学術面、応用面の発展性は高いと期待されるので、他分野・業界とのコミュニケーションをしっかりとってほしい。
- 特許は出願しており、論文発表も投稿済みなので、一定の成果がえられている。
- 適切な研究実施体制とマネジメントにより、研究目標を十分に達成した。