

審査の結果の要旨

氏名 立川 冴子

半導体デバイスの発展やカーボンニュートラルに貢献する環境熱発電への期待などから、ナノスケールで観測される特殊な熱伝導の物理の基礎的な理解が重要性を増している。従来、非金属固体における熱輸送はフォノンによる寄与が支配的であるが、誘電体ナノ薄膜では表面フォノンポラリトンと呼ばれる、電磁波と光学フォノンのハイブリッド状態が熱輸送に大きく寄与することが知られている。ナノ薄膜における表面フォノンポラリトン熱輸送の定量的評価は難しく、薄膜中の伝搬およびエッジからの熱放射に関して未解明な部分が多い。

本論文は、「Investigations on surface phonon-polariton thermal transport in dielectric multilayers (誘電体多層膜における表面フォノンポラリトンの熱輸送に関する研究)」と題して、英文で書かれている。機械強度の高い誘電多層膜構造において、表面フォノンポラリトンが生成・伝搬される系を理論計算に基づいて設計し、伝搬モードを明らかにした。また、実際にデバイスを作製し、表面フォノンポラリトンがデバイスから強い指向性をもって放射され、Planck 放射を超える熱放射 (Super-Planckian 熱放射) が実現していることを報告しており、全6章で構成されている。

第1章は、「Introduction」と題し、マイクロ・ナノスケールの熱輸送と表面フォノンポラリトンについて述べている。また、放射熱輸送とその応用についても述べており、最後に本研究の目的と本論文の構成を述べている。

第2章は、「Theoretical studies on SPhP thermal transfer in SiO₂/Si layered systems」と題し、本研究と関連する過去の研究について説明し、フォノンポラリトンに関する詳細な説明と、研究対象となった SiO₂/Si/SiO₂ 多層膜における表面フォノンポラリトンの分散関係の理論計算や波数ベクトル解析、表面フォノンポラリトンの熱伝導率についての理論解析結果を述べている。

第3章は、「Experimental measurement setup」と題し、作製した試料における放射熱輸送計測に用いた手法である 3 ω 法の原理を紹介し、装置構成と測定データの解析法について述べている。

第4章は、「Sample fabrication」と題し、SiO₂/Si/SiO₂ 多層膜構造の形成プロセスと使用した装置および形成した構造について述べている。

第5章は、「Results and discussions」と題し、Si 薄膜と SiO₂/Si/SiO₂ 多層膜で比

較しながら、2枚の薄膜が真空ギャップを挟んで面内方向に並んだ構造間における熱コンダクタンス（ギャップ熱コンダクタンス）を 300 K から 400 K の温度領域で測定した結果を示し、導波モード分布解析などを行って測定結果を説明する現象についての考察を述べている。SiO₂ の膜厚が異なる 3 種類の多層膜についてギャップ熱コンダクタンスを測定しており、いずれも SiO₂ 膜のない同程度の厚みを有する Si 膜間のギャップ熱コンダクタンスと比較して、2 倍程度高いことを報告している。そのメカニズムを調べるため、Planck 放射と近接場熱放射および表面フォノンポラリトンによる熱輸送について、それぞれギャップ熱コンダクタンスを計算している。加えて、理論計算によって、表面フォノンポラリトンの主たる導波モードについての面内方向のポインティングベクトルの強度分布を計算し、電磁界シミュレーションによって、構造端からの熱放射に関する知見を得ている。これらの結果から、SiO₂/Si 界面近傍で発生した表面フォノンポラリトンが、主に Si 膜内に強度分布を持ちながら面内方向に極めて少ない損失で伝搬することで長距離伝搬が可能となり、構造のエッジから高い指向性をもって放射されるとの結論を得ている。定量的な熱コンダクタンス解析により、観測されたギャップ間の放射熱輸送は、表面フォノンポラリトンの導波モードの実現によって、Super-Planckian 熱放射を実現していると結論している。

第 6 章は、“General conclusions and prospects” と題し、本論文で述べた研究成果を総括し、今後の展望について述べている。

以上、これを要するに、本論文は SiO₂/Si/SiO₂ 多層膜を適切に設計することで、表面フォノンポラリトンに対する導波モードを低損失な Si 膜内に形成し、長距離伝搬が実現できるだけでなく、導波された表面フォノンポラリトンが高い指向性をもって構造端から放射されることを理論的に示し、2 枚の SiO₂/Si/SiO₂ 多層膜が真空ギャップを挟んで面内方向に並んだ構造を作製してギャップ間熱輸送計測を行うことにより、Super-Planckian 熱放射の発現を実証したものであり、電子工学に貢献するところが少なくない。

よって、本論文を博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。