

Title	Ultrabroadband absorber based on embedded metal-dielectric-metal structure and application of passive cooling
Author(s)	劉, 天際
Citation	大阪大学, 2017, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/67134
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉 大阪大学の博士論文について 〈/a〉 をご参照ください。

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

Abstract of Thesis

Name (劉天際 Tianji Liu)	
Title	Ultrabroadband absorber based on embedded metal-dielectric-metal structure and application of passive cooling (埋め込まれた金属 - 誘電体 - 金属構造超広帯域吸収体および放射冷却の応用)
<p>Abstract of Thesis</p> <p>Energy is crucial for development of human society. Energy shortage or crisis has severe influence on every aspect of daily life especially in developing countries. Among numerous heavy demands of energy, one of indispensable utilization is space cooling in the building. In order to solve this problem by employing passive radiative cooling, a novel structure noted embedded metal-dielectric-metal (EMDM) structure that is appropriate for ultrabroadband absorption is proposed and systematically analyzed in this dissertation. The valid and intuitive framework are constructed, which mainly includes modified Fabry-Pérot (F-P) model and single mode matching (SMM) method. In design of conventional broadband metamaterial or metasurface perfect absorbers (MPA), a common strategy is to combine multi-resonant structures into one unitcell, i.e. multilayer and multisized structures, which increases the complexity of design and fabrication. In contrast, physically, periodic EMDM structure is distinct with aforementioned MPA, which is based on coupling between localized and propagating modes. Performed by finite difference time domain (FDTD) calculation, the ultrabroadband single-sized EMDM absorber is numerically demonstrated, which perfectly fulfills the requirement of high performance passive radiative cooling.</p> <p>As the results of this dissertation, with respect to an individual resonator, the EMDM resonator exhibits a 1.9 times broader full width at half maximum (FWHM) relative to that of the MDM resonator, and this results from the match between EMDM and dielectric-loaded metal waveguide (DLMW) modes and the coupling of frequency-dependent free space wave. Periodic single-sized resonators have an FWHM that is 3.8 times broader than that of the MDM resonator, resulting from a novel mode noted hybrid mode. The hybrid mode is a special example of guided mode. The existence of a hybrid mode enables EMDM resonators to significantly expand the absorption band. In addition, a strong coupling effect and Fano resonance can be confirmed between localized EMDM and hybrid modes. In order to improve average absorptivity of aforementioned periodic EMDM resonator, I propose lossy dielectric material based EMDM resonators. In the application of a periodic 3D EMDM resonator an average absorptivity of 0.85 could be achieved in the entire atmospheric window (8–13 μm) by lossy-dielectric single-sized ultra-thin EMDM resonators, corresponding to the net cooling power of 119 W/m^2 at 300 K. The pertinent wide angular responses are also confirmed, it demonstrates the EMDM structure can preserve high performance of absorber in wide angular range. It is noteworthy the expansion of absorption band is feasible by splitting of hybrid modes at high angle. The proposed EMDM ultrabroadband absorber is also demonstrated by experiment, the experimental results show the average absorptivity of 0.68, corresponding to the net cooling power of 93 W/m^2 at 300 K. Results of this dissertation suggest that these types of periodic 3D EMDM structures are extremely promising candidates for radiative cooling devices and other ultrabroadband absorbers.</p> <p>Additionally, EMDM structures are not only limited in application of passive cooling, practically, I propose a novel physical mechanism to obtain broadband absorption or scattering, which is distinct from the conventional strategy of broadband resonators (i.e. multi-sized and multi-layer). Therefore, it is promising to apply this mechanism to other research topic, such as light-trapping (in this dissertation, I utilize semiconductor materials as a-Si and Ge, which are frequently used in light trapping and photovoltaics), plasmonic color palette (it is promising to obtain single-sized resonator based structure, which means ultimate resolution of printing technology), and thermophotovoltaics.</p>	

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (Tianji Liu / 劉天際)		
論文審査担当者	(職)	氏 名
	主 査	教授 高原 淳一
	副 査	教授 小林 慶裕
	副 査	教授 井上 康志
	副 査	教授 原口 雅宣 (徳島大学 大学院社会産業理工学研究部 理工学域 光応用系)

論文審査の結果の要旨

本論文は Tianji Liu 氏が大阪大学大学院工学研究科に在籍中に行った研究の成果をまとめたものである。

本論文はイントロダクションと6つの章および結論から構成されている。イントロダクションでは本研究の背景と目的に続いて本論文の構成が述べられる。1章では電磁波に対する完全吸収体の原理について述べた後、メタマテリアルを用いた完全吸収体のこれまでの研究とその応用例を紹介している。続いて、「大気窓」を用いた受動放射冷却の必要性和原理が述べられる。2章では本論文で用いられる理論のフレームワークが示される。金属-誘電体-金属 (MDM) 構造をプラズモニック導波路とみなし、モード結合理論の手法を用いた解析により単一の導波路端面における複素反射係数 (反射率と位相) を調べている。3章では2章の理論を用いて MDM 構造を用いた単一のファブリ・ペロー (F-P) 共振器の共振スペクトルを計算している。共振器の周囲を高屈折率の誘電体で埋めることにより複素反射係数を制御し、共振スペクトルを広帯域化できることを示し、これを埋め込まれた MDM (EMDM) 構造と名付けている。これは本論文のキーとなるアイデアといえる。4章では EMDM 構造を MDM プラズモニック導波路と誘電体ロード型プラズモニック導波路との結合系ととらえて、広帯域化の原理を解明している。5章では周期的に配列した EMDM 構造の特性を理論的に調べている。特に F-P 共振器と誘電体ロード型プラズモニック導波路の伝搬モード間の結合によるラビ分裂により広帯域化を制御できることを見出している。また、誘電体に損失を入れた場合の効果についても調べている。6章ではデバイス作製と実験結果について述べている。結論では、これらの成果をまとめている。

MDM 構造はプラズモニクスにおける最も基本的構造の一つであり、過去に多数の研究が行われてきた。MDM 構造を光共振器として用いるとギャップ中に表面プラズモンポラリトンの定在波が形成され、狭帯域かつ吸収率の高い光アンテナとなる。しかし、これを広帯域化することは原理的に困難と考えられてきた。申請者は EMDM 構造と名付けられた新しいメタサーフェス構造を提案し、本構造が埋め込みを行わない真空の場合と比較して共振スペクトルを広帯域化できることを理論的に見出している。さらに、申請者は本構造をベースとしたシミュレーションにより、従来の複数サイズの構造を組み合わせたと比較して、極めて簡単な構造で吸収スペクトルを広帯域化できることを示し、実際にデバイスを作製することにより、広帯域化の実証に成功している。デバイス作製の過程において申請者は、膜厚と周期構造の最適化を図って性能を劣化させないなどの実験上の様々な工夫を行っている。得られたデバイスの光学測定結果から、これまで報告されたデバイスを凌駕する冷却性能が得られると期待される。

本成果は広帯域メタサーフェスの設計原理を提案し、これを用いて大気窓に最適化された広帯域熱輻射エミッターを作製し、その特性を実証したものと見え、プラズモニクスおよびメタマテリアルの発展に大きく貢献している。将来は電力を消費しない受動冷却デバイスとしての応用が期待される。本成果は応用物理学、特にメタマテリアルの新しい応用の可能性を切り開いた点で高く評価される。よって本論文は、博士論文として価値あるものと認める。