様式Ｃ－１９

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成２４年５月１８日現在

機関番号：10101
研究種目：挑戦的萌芽研究
研究期間：2009～2012
課題番号：21651026
研究課題名（和文）
表面微細周期構造を用いた地球温暖化防止技術の研究
研究課題名（英文）
Technology for Preventing Global Warming using Periodic Micro-structure
研究代表者
戸谷　剛（TOTANI　TSUYOSHI）
北海道大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：00301937

研究成果の概要（和文）：UV ナノインプリント法で表面微細周期構造を作り、スパッタ法で金属膜を付加する方法で放射率特性を変化させることに成功した。スパッタ源と正対する平面に 200 nm の厚みの Au 金属膜ができる時間スパッタした場合、波長 10 μm 付近における放射率を最大 0.6 程度に増加することができた。大気の窓を通して、地表付近の熱を温室効果ガスに吸収されることなく、宇宙へ直接放熱するラジエータの基盤技術を獲得することができた。
研究成果の概要（英文）：A periodic microstructure is built on a ultra violet curable resin by the UV nanoimprint method. A gold film is sputtered on the periodic microstructure. Assuming Kirchhoff’s law, the maximum normal emissivity of the periodic microstructure is 0.6 near 10 μm in the case of the gold film 200 nm thick the surface facing a sputter source. The periodic microstructure with the gold film contributes to the prevention of global warming.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合　計
2009 年度	1,700,000	0	1,700,000
2010 年度	500,000	0	500,000
2011 年度	1,100,000	330,000	1,430.000
年度			
年度			
総　計	3,300,000	330,000	3,630,000

研究分野：複合新領域、伝熱工学
科研費の分科・細目：環境学・環境技術・環境材料
キーワード：表面微細周期構造、波長選択性、ラジエータ

１．研究開始当初の背景

太陽光発電、風力発電、バイオ燃料、電気自動車等は、温室効果ガスの排出を削減することで注目されている。一方、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）の第４次報告書によると、温室効果ガスの排出量が最も少ない「循環型社会」が実現しても 2100 年の平均気温は1990年レベルから1.8℃の気温が上昇することが予測されている。この予測は、温室効果ガスを排出削減する技術だけでは地球温暖化を防止できないことを意味する。

２．研究の目的

温室効果ガスの削減によらない地球温暖化防止技術の開発である。大気による透過率の高い電磁波長帯、すなわち大気の窓のみを通して放射排熱をすることで、大気に熱を吸収させ温度上昇に与することなく地表の熱を宇宙空間に放射することを目標と

している。そのための放射波長制御に表面微細周期構造を利用する。本研究では表面微細周期構造を UV ナノインプリントによって作成し、その表面に金属薄膜を成膜することで波長制御を行う。

３．研究の方法

地表から宇宙空間への放射に注目しているので、地表平均温度程度（約 300 K）からの放射を考える。プランクの法則より、300 Kの黒体放射は 10 µmに放射輝度のピークを持ち、大気の窓は 8 µmから 12 µmに存在している。したがって大気の窓にできるだけ多くのエネルギを振り分けられる 10 µmに合わせた表面微細周期構造を設計すると好都合である。本研究では立方体型の矩形表面微細周期構造を使用した。矩形表面微細周期構造の理論的に導かれる共振波長は、立方体の一辺の長さをLとして、

$$\lambda_{mns} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{L}\right)^2 + \left(\frac{n}{L}\right)^2 + \left(\frac{2s+1}{L}\right)^2}} \quad (1)$$

と表される。λ_{mns}を 10 µm とするため、表面微細周期構造の一辺の長さ L を 6 µm として UV ナノインプリント用モールドを製作した。

モールドを使用し、UV硬化樹脂表面上に一辺 6 µmの矩形表面微細周期構造を作成する。UV硬化樹脂は導電性ではないため、構造による共振を発生させることができない。そこで、表面微細周期構造上にスパッタを用いて金薄膜を成膜する。作成されたサンプルを図１に示す。FT-IRと積分球を用いて作成されたサンプルの表面光学特性（半球透過率及び半球反射率）を取得する。使用した機器を表１に示す。

Table 1 Details of experimental equipments.

	Manufacture	Detail
Mold	TOPPAN PRINTING	Cube: 6*6*6 μm^3
Curable resin	TOYO GOSEI	PAK-01
Sputter	ULVAC	MPS-4000 C1/CH1
FT-IR	VARIAN	VARIAN 660-IR

４．研究成果

FT-IR と積分球より得られた表面光学特性（半球透過率と半球反射率）およびキルヒホッフの法則より、垂直放射率を計算する。Au スパッタ源と正対する平面に 100 nm の膜厚ができる時間スパッタした表面微細周期構造の垂直放射率を図２に示す。

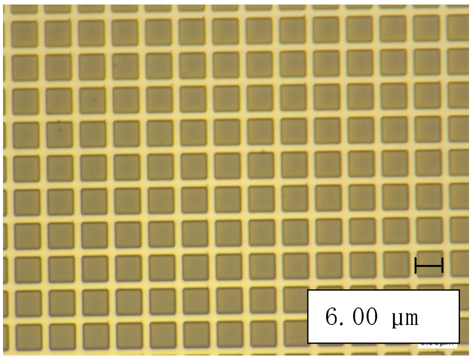

Fig.1 Sample of periodic microstructure. (KEYENCE VHX-2000 VH-Z500W)

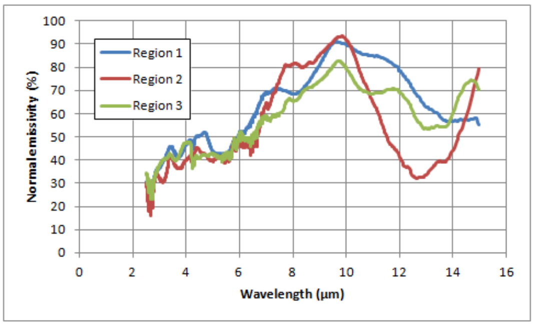

Fig.2 Diagram of normal emissivity (film thickness: 100 nm)

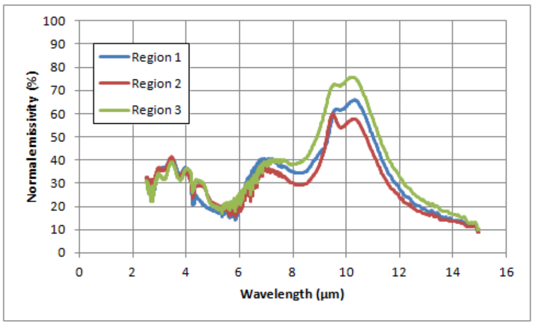

Fig.3 Diagram of normal emissivity (film thickness: 200 nm)

図２より、10 µm に垂直放射率のピークが表れ、10 µm から離れるに従って放射率が低下していることから、10 µm での放射波長制御に成功していると言える。ところが、12 µm 以上の波長帯において放射率が上昇している。12 µm 以上の波長帯では大気による吸収が起こり、利用価値の下がる点である。本研究で用いた表面微細周期構造のカットオフ波長は最長である TE_{10} 波においても 12 µm である。12 µm 以上での放射率上昇は、構造側面へ成膜された金膜が薄すぎたために隣接する微小構造同士へ電磁波が逃げ、２つの微小構造で干渉を起こしていると考えられる。そこで、表面微細周期構造上に成膜する金膜の膜厚を 100 nm から 200 nm に増加させ、同じ方法にて表面光学特性を測定

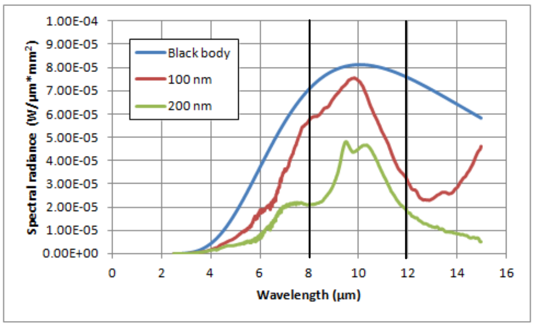

Fig.4 Comparison of black body sampleof 100 nm, 200 nm.

した。図３に膜厚 200 nm の Au 膜ができる時間スパッタしたの表面微細周期構造の垂直放射率を示す。

図３より、10 µm に放射率ピークを残しつつ 5 µm や 8 µm での放射率が下がり、結果として 10 µm の放射率のピークがより尖った形となっている。そして、波長 12 µm 以上における放射率の上昇が解消されていることがわかる。膜厚の増加により波長 12 µm 以上の放射率の上昇がなくなったことから、金膜の膜厚不足がカットオフ波長以上での放射率上昇の原因であったと考えられる。12 µm 以上での放射率の上昇がなくなったため、大気が吸収してしまう波長での放射は少なくなった一方、10 µm での放射率も 60 %程度に低下してしまっている。そのため、膜厚 100 nm のサンプルと比べて大気に吸収される放射を少なくできたが、大気に吸収されない放射も少なくなっている。図４に黒体放射、膜厚 100 nm と 200 nm のサンプルにおけるそれぞれの 300 K における分光放射輝度を示す。図４において 0 ～ 8 µm、8 ～ 12 µm、12 µm 以上における積算放射熱流束をそれぞれ比較すると表２のようになり、大気の窓にあたる 8 ～ 12 µm の放射熱流束をそれ以外の波長帯より高くすることに成功していることがわかる。

Table 2 Comparison of emissive heat flux.

Wave range	Black body	100 nm	200 nm
0 - 8 µm	100 %	53 %	27 %
8 - 12 µm	100 %	78 %	43 %
12 - 15 µm	100 %	43 %	16 %

得られた表面光学特性と理論的に導かれる表面微細周期構造の共振波長を比較してみる。理論的に導かれる共振波長は式(1)で表され、一辺 L = 6 µm での理論共振波長は、λ_{100} = 10.7 µm となる。ところが、図２、図３より、実際に光学特性の変化が観測されたのは 10 µm より若干短波長側である。表面微細周期構造にレーザによるスキャニングを行ったところ、図５のようになった。図５から微小構造の最上部と最底部までの距離が 5.5 µm であることがわかる。当初 6×6×6 µm³ として想定した立方構造は、UV ナノインプリントの製造、金膜のスパッタ等の過程を経て約 10 %ほど深さが浅くなっていることがわかった。また、微小構造の開口端は若干の丸みを帯びている。微小構造の底部では壁面近傍が 1 µm ほど低くなっていることなどが理論式のモデルからのずれを蓄積させ、結果として共振波長がずれたものと考えられる。

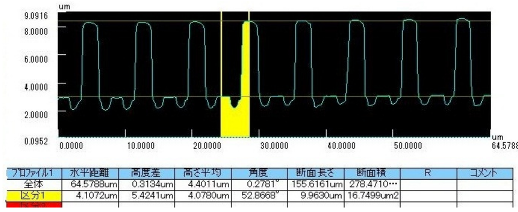

Fig.5 Diagram of cross section of microstructure.

今後の課題：

表面微細周期構造の側面についた金属膜が薄いことが原因と推測される現象が確認された。本実験で使用したヘリコンスパッタ装置（ULVAC MPS-4000 C1/CH1）は、ターゲットからたたき出された原子の直進性が高く、表面微細周期構造の側面に金属膜を形成しにくい。表面微細周期構造の側面にも金属膜を形成できるスパッタ装置を用いるとともに、膜厚と透過率の関係を取得し、最適な金属膜の厚みでスパッタする予定である。また、金属膜を金から他の金属に変えて、放射率特性の変化を取得する予定である。

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計０件）

〔学会発表〕（計５件）

①石川直幸、表面微細周期構造を用いた波長選択性ラジエータ、第 32 回日本熱物性シンポジウム、2011 年 11 月 22 日、慶應義塾大学日吉キャンパス（横浜市）.

②*戸谷　剛、表面微細周期構造を持つラジエータについての概念検討、日本熱物性学会「宇宙材料の熱物性とシステムデザイン」研究会　第 11 回研究会、2011 年 9 月 6 日、キャンパスイノベーションセンター東京（東京都港区）.（招待講演）

③石川直幸、金属膜を持つ表面微細周期構造の分光特性、第 48 回日本伝熱シンポジウム、2011 年 6 月 3 日、岡山コンベンションセンター（岡山市）.

④石川直幸，紫外線硬化樹脂に金属膜を設けた表面微細周期構造の光学特性，第 31 回日本熱物性シンポジウム，2010 年 11 月 11 日､九州大学伊都キャンパス(福岡市).

⑤*戸谷　剛，石川直幸，脇田督司，永田晴紀，UV ナノインプリント法による表面微細周期構造の熱光学特性，第 47 回日本伝熱シンポジウム、2010 年 5 月 28 日、札幌コンベンションセンター（札幌市).

〔図書〕（計０件）

〔産業財産権〕
○出願状況（計０件）
○取得状況（計０件）

〔その他〕

６．研究組織

(1)研究代表者

戸谷　剛（TOTANI TSUYOSHI）
北海道大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：00301937