ピラーアレイ構造表面による近接場光の波長制御に関する研究 Spectral Control of Near-Field Radiation through Pillar Array Structure

ウォンサオスブ ナパトソン (東工大) 学 芦田 友祐 (東工大)
正 平島 大輔 (データフォーシーズ) ○正 花村 克悟 (東工大)
Vongsoasup Naphatsorn, Yusuke Ashida, Daisuke Hirashima and Katsunori Hanamura
Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 O-okayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550

Spectral control of near-field radiation was achieved through pillar array surface structures. Electromagnetic field around the pillar array structures which were set up face to face was clarified by solving Maxwell's equation numerically. Normalized radiative flux was estimated for the case of nickel and tungsten emitters and the case of nickel and GaSb emitters. It was disclosed that even if the emitters was made of different materials, near-field radiative flux was enhanced for a specified band of frequency by tuning the height of pillar and/or the width between pillars. In the case of nickel and GaSb emitters, the radiative flux with a range of frequency from 10 to 20×10^{14} rad/s was increased by a factor of three compared with the case of smooth surfaces.

Key Words: Near-Field Radiation, Spectral Control, Pillar Array Structure

1. はじめに

周期的ピラー構造を有する金属表面では、ピラー、隙間、ピラーといった構造に MIM (Metal-Insulator-Metal) や IMI 構造と同様の表面プラズモンポラリトンが誘起され、それらが干渉することで近接場ふく射輸送の波長制御が可能となる。このピラー側面に励起される表面プラズモンポラリトンは、半無限平板間で励起される表面プラズモンポラリトンとほとんど一致することが分かっている。すなわち、ピラー幅、溝幅、ピラー高さを制御し、表面プラズモンポラリトンの共鳴条件をチューニングすることにより、異種の材料間においても、ピラー構造による近接場ふく射輸送の波長制御が実現可能であると考えられる。

そこで、本研究では異種の材料間において、溝幅やピラー高さを変化させながら、ふく射輸送の評価を行った。数値計算は、まず物性が周知されており、FDTD 法に容易に適用することができるニッケルとタングステンを用い、その後、TPV 発電の系に近い金属 (ニッケル) と半導体 (ガリウムアンチモン) を用いて、ふく射輸送の評価を行った。

2. 計算手法

図 1 に向かい合うピラーアレイ構造表面の模式図を示す。表面間距離を d 、ピラー構造のピッチを p 、ピラー高さを h 、ピラー間隙間を w 、ピラートップ面を $a \times a$ とする。本研究ではマクスウェル方程式を、FDTD 法を用いて電磁場解析を行い、揺動電磁気学によりふく射輸送を評価した⁽¹⁾。本研究では、複数の周波数成分を持つ正弦波ガウシアン変調パルスを放射させることにより、1 回の計算で複数の周波数成分の対応関係を求めた。さらに、一度に周期性を考慮した放射体の最小単位 V すべての位置に放射源を配置し、位相差を乱数で与えることにより、それぞれの放射源の相互作用を減らした。この計算は位相差に乱数を用いているため、1 回の計算による結果は変動が大きくなってしまう。そこで約 100 回計算を行い、それらの結果の平均値をとることにより、収束させた。

3. 計算結果

3.1 ニッケル放射体-タングステン受光体

ニッケル側のピラー構造を溝幅 $w = 40$ nm、ピラー高さ $h = 200$ nm で固定し、タングステン側のピラー構造を溝幅

$w = 80$ nm とし、ピラー高さを 100 ~ 300 nm まで 50 nm 刻みで変化させ、タングステン、ニッケル間のふく射流束を計算した。その結果を Fig.2 に示す。この結果から、ニッケルの溝幅 40 nm、ピラー高さ 200 nm の場合のピーク周波数とほぼ一致していた、タングステンの溝幅 80 nm、ピラー高さ 150, 200, 250 nm の場合において、ふく射流束はそれ以外のピラー高さに比べて促進されていることが分かる。

Fig.1 Schematic diagram of pillar array structure

Fig.2 Normalized radiative flux between pillar array structures made of Nickel and Tungsten

3.2 ニッケル放射体-ガリウムアンチモン受光体

まずニッケル (1000 K) - ガリウムアンチモン (300 K) の半無限平板間のふく射輸送の解析解と数値解の結果を Fig.3 に示す。このとき、真空中間を 100 nm とし、縦軸はボーズ・アインシュタインのエネルギー分布関数で規格化したふく射流束である。数値計算結果は解析解とよく一致していることがわかる。さらにニッケル平板間に比べて、低周波数域においてふく射輸送量は抑制され、高周波数において促進されていることがわかる。低周波数におけるニッケル平板間のふく射輸送は s 偏光が支配的である。しかし、ニッケル-ガリウムアンチモン平板間においては Fig.4 に示すように、p 偏光に関してはニッケル平板間とほとんど変わらないものの、s 偏光に関しては大きく異なり、ニッケル-ガリウムアンチモン平板間では広い周波数域にわたって大きなふく射流束が分布している。次に s 偏光および p 偏光のふく射流束スペクトルを、ニッケル平板間と比較した結果を Fig.5 に示す。縦軸はボーズ・アインシュタインのエネルギー分布関数で規格化したふく射流束、横軸は角周波数である。この結果より、s 偏光は約 5×10^{14} rad/s 以下においてはニッケル平板間の方がふく射流束は大きい、それ以上の周波数域ではニッケル-ガリウムアンチモン平板間の方が大きくなっている。また p 偏光はすべての周波数域においてニッケル平板間の方がふく射流束は大きいことが分かる。これにより、ニッケル-ガリウムアンチモン平板間のふく射輸送が低周波数側において抑制されているのも高周波数側で促進されているのもすべて s 偏光に起因していると考えられる。

次に周期的ピラー構造を施したニッケル-ガリウムアンチモン間のふく射輸送について考察する。ピラー構造は、周期 $p = 400$ nm、溝幅 $w = 40$ nm、ピラー幅 $a = 360$ nm、ピラー高さ $h = 200$ nm とし、真空ギャップ $d = 100$ nm で計算を行った。今回はニッケル-ガリウムアンチモン間におけるピラー構造による近接場ふく射輸送促進機構の有無の確認を目的とするため、上ドピラー構造で同じ構造を用いた。その結果を Fig.6 に示す。縦軸は平板間のふく射流束で規格化したふく射流束である。比較のため周期的ピラー構造を施したニッケル間の結果も示す。この結果より、ニッケル平板間に比べるとふく射輸送の促進効果は小さいものの、ニッケル-ガリウムアンチモン間においてもピラー構造による促進効果は得られることが分かった。また低周波数域において、ふく射流束は平板間に比べてニッケル間においては抑制されているが、ニッケル-ガリウムアンチモン間においては促進されている。これは上述のようにニッケル平板間のふく射輸送においては低周波数域で s 偏光が支配的であったため、ピラー構造の付与による s 偏光の抑制効果が大きかったが、ニッケル-ガリウムアンチモン間のふく射輸送においては低周波数域でニッケル間に比べて s 偏光が顕著でないため、s 偏光の抑制効果が顕著に現れなかったと考えられる。

4. まとめ

異種の材質に対して、溝幅やピラー高さを調整し、ピラー側面に励起される表面プラズモンポラリトンの共鳴および干渉する周波数のチューニングを行うことにより、近接場ふく射輸送が促進される。

参考文献

(1)平島, 他, 機論, 77-782, (2011), 1978.

Fig.3 Comparison between analytical and numerical solutions between planes made of Nickel and GaSb

Fig.4 p and s polarized near-field radiative transfer between two semi-infinite plates made of Nickel and GaSb

Fig.5 Normalized spectral radiative flux between two semi-infinite plates made of nickel-nickel and nickel-GaSb

Fig.6 Normalized radiative flux between pillar array structures made of nickel and GaSb