

背景

室温 300K
鉄スラブ 約1100-1300K
溶鉄 約1900K
パワー半導体 約500K

黒体放射 (プランクの法則)
2000K, 500K, 300K

波長 (μm): 3000, 300, 30, 3.0, 0.3
周波数 (THz): 0.1, 1.0, 10, 100, 1000

スペクトル放射 (a.u.)

熱輻射自身が有する電場と磁場を利用して
空間に放射された熱輻射をナノスケールのメタアトムでスペクトル学的に制御できるか?
熱輻射は等方的な指向性なので
コリメート・集光したい

目的

一旦放射された熱輻射を後から指向性制御できる人工構造材料の概念の実証と社会展開

既存の輻射経路に自由に導入できる極限屈折率材料
[9, 12, 13, 日本特許6596748, 米国特許10,686,255B2, 特願2019-159868, 国際公開番号 WO 2021045022]

透過波 ↑
入射波 ↑ ↓ 反射波
電場 E, 磁場 H, 波数 k

ε_r の制御
μ_r の制御

独自材料では熱輻射の電場だけでなく磁場も共振(探索を機械学習で自動化)

成果

電子ビーム露光による作製レシピの構築

- Si地板 (両面研磨済み)を用意
- Si地板の表面にレジストを塗布
- 電子ビームでSi地板の表面のレジストを露光
- 現像によりSi地板の表面にレジストパターンを作製
- Si地板の表面にAu, SiO₂, Auの順番に成膜 (Auの接着層としてCrを使用)
- リフトオフによりSi地板の表面にAu, SiO₂, Auの3層の正方形パッチを作製

メタサーフェス
p, t, d, s, l

	l	s	d	t	p
設計値	340nm	150nm	50nm	20nm	5nm

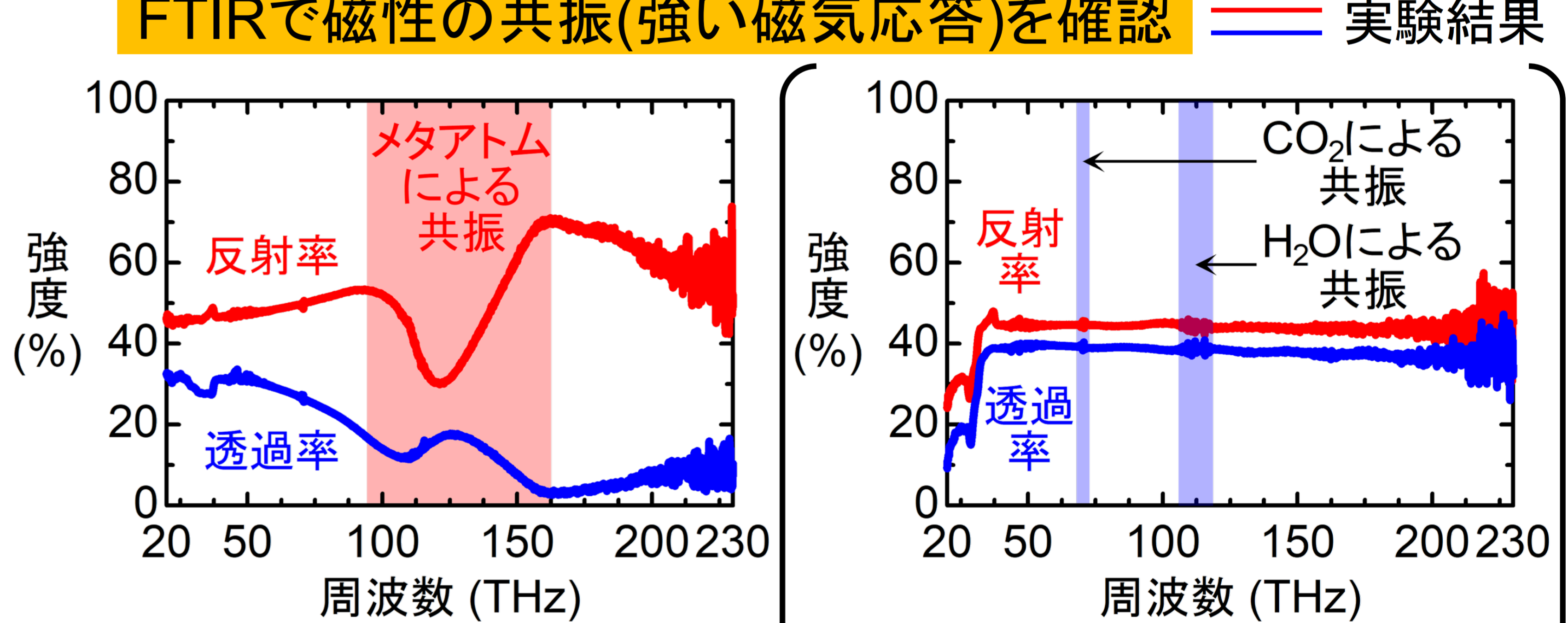
Si地板に1辺340nmのAu, SiO₂, Auの3層の正方形パッチを150nm間隔で周期的に約5100×5100個作製

材料の選定と作製レシピの条件出し(1)(2)(3)

- 研磨済
- PMMA 500nm厚の断面が垂直に切れる露光条件を条件出し
- SiO₂を成膜したSi地板

実験評価でSi地板表面での光の散乱を防ぐために両面研磨済みのSi地板を選定

ε_rとμ_rを同周波数で高い値かつ同じ値にすることで
屈折率 $n = \sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r} \rightarrow$ 高
反射率 $R \rightarrow 0$ (比インピーダンス $Z_r = \sqrt{\mu_r / \epsilon_r} \rightarrow 1$)
正方形パッチのパラメータを設計することで
ε_rとμ_rを様々な値に制御→指向性制御に応用可
実現した人工構造材料の独創性とインパクト



メタサーフェスの実験結果

発表年	周波数 (THz)	メタアトムの構造	作製の有/無し	屈折率nの実部	屈折率nの虚部	性能指数 (屈折率nの実部/虚部)	比誘電率 ε _r	比透磁率 μ _r	反射率 R (%)	透過率 T (%)	参考文献
2011	0.52	構造金属パッチ	有り	24.3 (実験値)	約2.0° (実験値)	>100(0.23THz)	約400° (実験値)	約1.0° (実験値)	-	-	[1]
2013	0.48	構造金属パッチ	有り	18.4 (実験値)	約19° (実験値)	約0.9° (実験値)	-	-	<10° (実験値)	<10° (実験値)	[2]
2015	2.1	構造金属パッチ	無し	67.9 (実験値)	約28° (実験値)	約2.4° (実験値)	-	-	>90° (実験値)	<10° (実験値)	[3]
2015	0.32	Z構造金属パッチ	有り	14.4 (実験値)	約6.2° (実験値)	約2.3° (実験値)	約90° (実験値)	約0.74° (実験値)	>90° (実験値)	<10° (実験値)	[4]
2016	0.75	交差構造金属パッチ	無し	約80° (実験値)	約24° (実験値)	約3.4° (実験値)	約240° (実験値)	約4.5° (実験値)	>90° (実験値)	<10° (実験値)	[5]
2017	0.84	窓型金属パッチ	無し	約45° (実験値)	約21° (実験値)	約2° (実験値)	約43° (実験値)	約4.3° (実験値)	>90° (実験値)	<10° (実験値)	[6]
2018	0.44	一層金属リング	無し	91.3 (実験値)	約52° (実験値)	約1.8° (実験値)	2623 (実験値)	-	-	-	[7]
2020	1.1	両面金属リング	無し	約30° (実験値)	約24° (実験値)	約1.3° (実験値)	約51° (実験値)	約5.3° (実験値)	約88° (実験値)	<10° (実験値)	[8]
2017	0.31	両面ベアカット金属ワイヤー	有り	6.7 (実験値)	0.12 (実験値)	54 (実験値)	7.0 (実験値)	6.1 (実験値)	1.2 (実験値)	91.8 (実験値)	[9]
2017	0.83	両面窓型金属パッチ	有り	約6.8° (実験値)	約0.29° (実験値)	約24° (実験値)	約8.1° (実験値)	9.8 (実験値)	約5° (実験値)	約42° (実験値)	[10]
2018	1.2	両面ベアカット金属ワイヤー	無し	15.4 (実験値)	約1.9° (実験値)	約8.0° (実験値)	約15° (実験値)	約3.5° (実験値)	約20° (実験値)	約67° (実験値)	[11]
2021	2.97	両面ベアカット金属ワイヤー	有り	5.9 (実験値)	1.6 (実験値)	3.8 (実験値)	6.7 (実験値)	5.0 (実験値)	1.3 (実験値)	35.7 (実験値)	[12]
2021	48.5	両面正方形金属パッチ	有り	5.9 (実験値)	2.4 (実験値)	2.5 (実験値)	11.7 (実験値)	3.0 (実験値)	16.7 (実験値)	26.9 (実験値)	[13]
2022	191	3層正方形金属パッチ	有り	4.5 (実験値)	1.9 (実験値)	2.3 (実験値)	5.1 (実験値)	1.99 (実験値)	20.4 (実験値)	28.9 (実験値)	[本発表]

121THzでメタサーフェスの反射率30%, 透過率17% Si地板の反射率44%, 透過率38%

Visions for 2050

サイバー空間, 宇宙間通信, ドローン, 超高速無線通信, 自動運転, インフラ, 工場, ウェアラブル端末, 都市, 高温サーマルマネジメント, 住宅, PC・タブレット・スマートフォン, 低遅延サーマルマネジメント

熱輻射の指向性制御を可能にする機能性材料へ展開し、熱輻射のパワー密度を高め、既存技術[14-16]で到達できない発電効率を達成したい

まとめ
謝辞

100THzを超える赤外域での高屈折率低反射メタサーフェスを作製した。フーリエ変換赤外分光法による実験で、120THz帯で反射と透過の共振を確認した。作製したメタサーフェスにより、電場と磁場の両方を制御し、誘電率と透磁率の両方を制御できている可能性がある。今後、反射と透過の実験結果から、屈折率、誘電率、透磁率などの光学特性の導出を試みる。本研究の一部は、科学技術振興機構さがけ(JPMIPR1815), JSPS科研費基盤研究(B)(21H01839), JSPS科研費挑戦的研究(萌芽)(21K18712)の助成を受けたものである。本稿の素子は、文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業(F-21-T-029)、マテリアル先端リサーチインフラ事業(221T0005)の支援を受けて、東京工業大学微細加工プラットフォームで作製したものです。東京工業大学梅本高明先生、山口武先生、宮本恭幸先生に深く感謝を申し上げます。