

論文の内容の要旨

論文題目 スプリットリング共振器の距離依存性を用いたMEMS可変メタマテリアル

氏 名 磯崎 瑛宏

1. 序論

本研究の目的は、微小な構造変化に対して敏感に透過特性が変化するテラヘルツ帯(THz)の可変メタマテリアルを実現することである。メタマテリアルとは、メタ原子と呼ばれる人工的に設計された波長より小さな構造の集まった人工材料である。メタ原子は自然界の物質には見られない光学応答を示す特徴がある。メタ原子間距離を近づけると相互作用して、メタマテリアルの透過特性を変化させることができる。従って、メタ原子間距離を制御することは、メタマテリアルの透過特性を制御することに繋がる。その相互作用は、メタ原子間距離を近づければ近づけるほど大きくなることが知られている。しかしながらこれまでのメタ原子を動かす構造は、可動面とメタ原子間ギャップの方向が一致しており(Fig. 1(a)), ギャップを小さくすると2つのメタ原子の接触・吸着が避けられないという課題があった。そこで本研究では、可動面とメタ原子間ギャップの方向を直交させることを考えた(Fig. 1 (b)). このような構造により、これまで実現が難しかったサブミクロンのギャップを実現し、メタ原子間相互作用の距離依存性が大きな範囲を有効に利用にする。具体的には、Fig. 2に示すようなMEMS(Micro Electro Mechanical Systems)構造を提案する。すなわち、基板垂直方向の変位のみを許す片持ち梁上に、典型的なメタ原子であるスプリットリング共振器(SRR)を配置する。さらにそのSRRと200 nmのギャップを介した位置に固定されたSRRを配置する。片持ち梁を空気圧により駆動することでそれら2つのSRR間距離を制御し、透過特性可変なメタマテリアルを実現する。

2. メタマテリアルの電磁気応答理論

提案するSRRに対して有限要素法による電磁界シミュレーションを行い、カップリング現象と呼ばれるSRR間相互作用に関して考察を行った。シミュレータの制約上、片持ち梁全体を数値解析することが難しいので、本論文では、SRRが空気中に浮いた構造で解析モデル(Fig. 3)を構築して検討を行った。1 THz付近に共振周波数を持つ構造として、典型的なSRRの長さを40 μm とした。SRRの角度 α を1度から16度まで変化させ、透過特性を調べた。Fig. 4(a)はx軸方向の、Fig. 4(b)はy軸方向の偏光を入射したときの透過スペクトルである。共に角度 α が大きくなるに従い、共振周波数が高周波側にシフトしていることが分かる。Fig. 5にSRR間距離が(a)(b)0.2 μm および(c)(d)12.8 μm のときの電場分布を示した。なお、これらの電場分布は観察が容易になるように2つの

SRRが同一平面上に配置されたモデルで計算している．この電場分布から，SRR間距離が $0.2\text{ }\mu\text{m}$ の時，SRR間に非常に強い電場が発生していることが分かる．その電場強度は入射電場の200倍であった．一方でSRR間距離が $12.8\text{ }\mu\text{m}$ のとき，SRR間の電場強度は入射電場と同程度であった．この結果は，カップリング現象とSRR間の電場強度に強い関係があることを示唆している．

3. MEMS 構造の機械特性

可変メタマテリアルの機械特性について，有限要素法を用いて解析を行った．Fig. 6にSRRを含めた片持ち梁構造の設計を示す．片持ち梁構造の根本は，柔らかさを確保するためにジグザグ構造を採用した．面内に均一に圧力が加わっていると仮定して，片持ち梁構造先端の変位量を計算した結果をFig. 7(a)に示す．印加圧力に対して線形に片持ち梁構造が変形していること， 100 Pa を加えると約 $8\text{ }\mu\text{m}$ 変形することが確認できる．Fig. 7(b)は 100 Pa 印加時の変形イメージである．MEMS構造の典型的な駆動方法は静電駆動であるが，静電駆動では $100\text{ }\mu\text{m}$ 離れた構造に 100 V 加えても約 4.4 Pa しか印加できない．従って，本研究で提案する片持ち梁構造に対しては不向きであると判断し，空気圧駆動を選択した．空気圧駆動とは，片持ち梁の上下に圧力差を設けることで駆動する方法を指している．このとき，片持ち梁周辺のギャップから空気が漏れて圧力差が保たれないことが懸念されるため，空気の漏れ量と圧力差の2次元分布を流体シミュレーションにより調べた．解析モデルをFig. 8(a)に，片持ち梁の上下に 125 Pa の圧力差を設けた時の流速分布および圧力分布をFig. 8(b)及び(c)に示す．ギャップ中央に約 2 m/s の空気流れが存在しているものの，片持ち梁上下の圧力差は保たれていることが確認できた．この結果は，本研究で提案する片持ち梁構造を空気圧によって駆動できることを示唆している．

4. THz 透過特性計測

実際に可変メタマテリアルを作製し，機械特性及び透過特性の評価を行った．作製した可変メタマテリアル(Fig. 9)は，片持ち梁構造を 300 nm 厚の薄膜シリコン基板を用いて作製し，SRRを薄膜シリコン基板上に配置した構造となっている．電子顕微鏡により観察すると，片持ち梁構造上にSRRが配置された可変メタマテリアルが設計通りに形成されていることが確認できる(Fig. 10)．試作した可変メタマテリアルを空気圧駆動用チャンバに取り付けた(Fig. 11)．駆動用圧力は，チャンバに設けられた流路を介して導入される．なお，プロセスエラーにより壊れてしまった一部のメタマテリアルを，遮蔽金属で覆った．3次元画像が取得可能なマイクロスコプを用いて可変メタマテリアルを観察すると，初期状態(空気圧OFF)では2つのSRRが同一平面上に存在するのに対し(Fig. 12(a))，圧力印加時には片方のSRRが傾いている(Fig. 12(b))ことが確認できる．レーザー一段差系により取得したプロファイル像からも空気圧により片持ち梁構造が駆動できていることが確認できる(Fig. 13(a))．印加圧力と片持ち梁先端部の変位量の関係を計測すると，約 $6\text{ }\mu\text{m}$ まで駆動できることが確認できた(Fig. 13(b))．

次に試作した可変メタマテリアルのTHz透過特性を計測した．Fig. 14(a)はx軸方向に，Fig. 14(b)はy軸方向に偏光した光を入射したときの透過スペクトルである．SRR間距離(Gap)が増加すると共振周波数が高周波側にシフトしていることが確認できる．この結果はシミュレーションで得られた傾向と一致している．さらに詳しく共振周波数の変化を議論するために，Fig. 15(a)に示す3種類の解析モデルによるシミュレーションと実験値の比較を行った．1つ目は2つの空気中に浮かぶSRRが同一平面上に存在するモデル(Flat model without Si)，2つ目は2つのSRRが同一平面上かつ薄膜Si上に存在するモデル(Flat model with Si)，3つ目は第2章で用いた片方のSRRが傾いているモデル(Tilted model)である．これらのモデルを使用することにより，薄膜シリコンの影響やSRRの傾いた影響などが議論できるようになる．SRR間距離と共振周波数の関係をFig. 15(b)に示す．周波数帯として，Flat model without SiとTilted modelが近い値を示していることが確認できる．ただし， $2\text{ }\mu\text{m}$ 付近においてTilted modelが低周波側に共振周波数を持つ．このことは，SRRが傾くことによりSRR間のコンデンサ成分が比較的大きくなっていることを示唆している．実験値の共振周波数に近い値を示しているのは，Flat model with Siを用いたシミュレーション結果である．このことは薄膜シリコン構造が共振周波数に10%程度の影響を与えることを示している．また，SRR間距離が $2\text{ }\mu\text{m}$ のとき，実験値の共振周波数は低周波側に存在する．このことは，上述の議論と同様にSRRが傾くことによる影響として説明できる．実験値はSRR間距離が約 $4\text{ }\mu\text{m}$ 変化したときに約 0.8 THz の共振周波数変化が確認できる．すなわち，本研究で提案する可変メタマテリアルを用いて，ギャップを初期SRR間距離(200 nm)からSRR構造の大きさの10.3%にあたる $4.09\text{ }\mu\text{m}$ 変化させることで，10.9%の共振周波数変化を実現した．

5. 結論

本論文では、わずかな構造変化で透過特性が変化するTHz帯の可変メタマテリアルを実現するために、初期状態として2個のSRRの間の距離が200 nmとなるように設計したSRR間距離可変のメタマテリアルを提案した。接近した2個のSRRのカップリング現象はSRR間距離に依存し、SRR間距離が小さくなるほど距離依存性が強くなる。本論文では、一方のSRRを固定し、他方のSRRをSRR間のギャップ方向に対して垂直方向に可変となるMEMS片持ち梁構造上に配置することにより、SRR同士の衝突や吸着を避けることのできる構造を提案した。また、本研究では空気圧を用いた片持ち梁構造の駆動を提案し、流体シミュレーションによる実現可能性の検討と実験による駆動特性評価を行った。その結果、片持ち梁先端が6 μm まで駆動できることを確認した。以上を踏まえて、可変メタマテリアルを試作し、評価した。その結果は、シミュレーション結果とよく一致しており、SRRの代表長さの約10%の構造変化で約10%の共振周波数変化を実現し、本論文で提案する可変メタマテリアル構造の有用性を示した。