

フレキシブルメタサーフェスを用いた周波数可変テラヘルツフィルタの開発

代表研究者

猪股 直生

東北大学大学院工学研究科 准教授

1 背景

6G 通信は、現在の 5G 通信に続く次世代通信技術として、2030 年頃の社会実装が期待されている。5G 通信では最大 100 GHz 程度までのミリ波帯が主に用いられているが、6G 通信では 0.1~10 THz 程度のテラヘルツ (THz) 帯域の利用が想定されている。THz 帯域を用いることで、5G 通信を超える超高速通信、低遅延、大規模デバイス接続が可能になると期待されている。これにより、リモート手術、無人運転、産業ロボットの遠隔制御、拡張現実 (AR) や仮想現実 (VR) など、高度な通信基盤を必要とする新たな社会サービスへの展開が見込まれる。

一方で、THz 波は空間中での減衰が大きく、長距離伝送が難しいという課題がある。そのため、THz 通信システムでは、多数の中継器を設置し、通信距離を補償することが有効な解決策の一つと考えられる。しかし、中継器を多数配置するためには、アンテナ、指向性制御素子、周波数選択素子などの構成要素を小型化・集積化する必要がある。特に、周波数フィルタは、使用する周波数帯域を選択し、不要な周波数成分やノイズを低減するために重要な要素技術である。さらに、6G 通信や THz 分光・イメージングでは、使用する周波数を状況に応じて切り替えられる周波数可変フィルタが有用である。

本研究では、従来の透過型フィルタのように特定周波数のみを通過させる方式ではなく、特定周波数の THz 波を空間的に集光し、検出位置における信号強度を選択的に高めることで、周波数選択機能を実現する集光型 THz フィルタを提案する。この方式では、動作周波数において焦点位置のパワー密度が高くなるため、固定された検出位置における信号強度を指標として、周波数選択的な応答を得ることができる。

この集光型フィルタを実現するために、本研究ではメタサーフェスに着目した。メタサーフェスは、屈折率の異なる材料からなる周期的なマイクロ・ナノ構造体アレイによって、電磁波の位相や伝搬方向を制御する二次元的な人工光学構造である。メタサーフェスをレンズとして機能させるメタレンズでは、面内の各位置に配置する微小構造体の寸法や間隔を調整することで、有効屈折率分布を設計し、入射波を任意の位置に集光できる。一般的なレンズと異なり、メタレンズは球面形状を必要とせず、薄型化が可能であるため、THz 通信デバイスの小型化に適している。

一方で、通常のメタレンズでは、作製後に構造寸法が固定されるため、集光が得られる周波数も基本的に固定される。そこで本研究では、メタサーフェスをフレキシブル基板上に形成し、基板を機械的に伸張させることで、メタサーフェスの周期構造と各ユニットセルの有効屈折率を同時に変化させる方式を採用した。これにより、焦点位置において信号強度が最大となる周波数を可変化し、周波数可変 THz フィルタとして機能させることを目的とした。

2 実験と結果

2-1 周波数可変 THz フィルタの動作原理

本研究で提案する周波数可変 THz フィルタは、シリコン (Si) と空気からなるメタサーフェス構造を用いて実現する。Si は THz 帯域において空気との屈折率差が大きく、THz 用メタサーフェスの構成材料として適している。メタサーフェスでは、Si 構造体と空気の体積比、すなわち空隙率を変えることで、見かけ上の有効屈折率を調整できる。メタサーフェスの中心部に高い有効屈折率を、外側に低い有効屈折率を与えることで、入射した THz 波を一点に集光することができる。

本研究では、この集光特性を周波数選択機能として利用する。すなわち、固定した検出位置において、ある周波数の THz 波が強く集光される場合、その周波数で検出信号が増大する。したがって、焦点位置におけるオン軸信号強度を測定することで、集光型フィルタとしての周波数応答を評価できる。

通常の Si ユニットセルをフレキシブル基板上に形成した場合、基板を伸張しても Si 構造体自体はほとんど変形せず、主にユニットセルの配列周期のみが変化する。この場合、有効屈折率の変化は限定的であり、周波数可変性も小さい。これに対して、本研究では、Si ユニットセルの内部に十字型の空隙を設け、1 つの

ユニットセルを4分割した構造を採用した．フレキシブル基板を伸張すると，ユニットセル間の周期が広がり，同時に，ユニットセル内部の十字型ギャップも広がる．その結果，ユニットセル内の空隙率が増加し，有効屈折率が低下する．

このように，本構造では，機械的伸張によってメタサーフェスの格子周期と有効屈折率が同時に変調される．この二重の変調により，固定焦点位置において最大強度が得られる周波数を変化させることができる(図1)．本研究では，この原理に基づき，伸張量に応じて選択周波数を切り替えられる集光型 THz フィルタを設計・作製した．

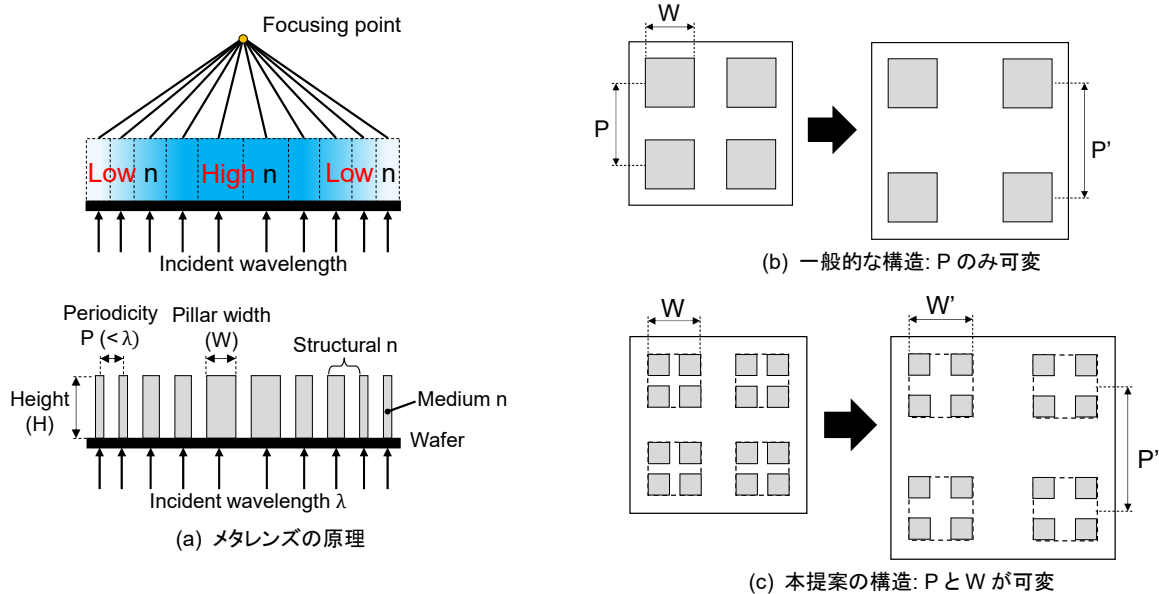


図 1. 集光型周波数可変 THz フィルタの動作原理.

2-2 周波数可変 THz フィルタの設計

本デバイスの設計には，メタレンズ逆設計ソフトウェア(MetaOptic Designer, Synopsys)を用いた．MetaOptic Designer では，所望の入力条件と出力条件を指定することで，その条件を実現するメタサーフェスレイアウトを自動的に生成できる．本研究では，中心動作周波数 0.6 THz，波長 500 μm ，焦点距離 50 mm，レンズ直径 18.6 mm を設計条件とした．また，Si ピラー幅を 30～70 μm ，ピラー高さを 300 μm ，ユニット周期を 200 μm として，メタサーフェスレイアウトを生成した．

メタサーフェスとして有効媒質的に機能させるためには，1 ユニットのサイズが対象波長よりも十分に小さい必要がある．本研究では，0.6 THz に対応する波長 500 μm に対して，ユニット周期を 200 μm 以下とすることで，サブ波長構造として動作するように設計した．また，4 分割 Si ユニットにおける 1 本のピラー幅とギャップ幅の比は 2:1 を基本とした．例えば，ピラー幅 30 μm の場合，ギャップ幅は 15 μm とし，4 分割ユニット全体が 75 μm 角となるようにした．

メタサーフェスの厚さは，THz 波が通過する光路長を確保し，十分な位相変調を得るためには大きい方が望ましい．一方で，Si を深掘りエッチングする際には，ピラー間ギャップの最小幅に対して加工限界が存在する．そこで本研究では，集光特性と微細加工限界の両方を考慮し，Si 構造体の高さを 300 μm とした．

設計周波数である 0.6 THz は，THz 分光や THz イメージング，特に生体組織イメージングなどで有用な帯域であり，今後の応用が期待される．また，本研究で用いる THz 周波数領域分光システム(TeraScan 1550, TOPTICA Photonics)の測定帯域にも適している．焦点距離 50 mm は，同測定系で実験的に評価可能な焦点距離として設定した．デバイス全体のサイズは，後述する伸張機構への取り付けを考慮して 25 mm 角とし，その中に直径約 20 mm のメタサーフェス領域を形成した．

各ユニットセルの有効屈折率は，DiffraMOD を用いて計算した．入射波長は 200～1600 μm の範囲で設定し，ピラー幅は 30～70 μm の範囲で 1 μm ごとに変化させた．また，ピラー幅とギャップ幅の比を 2:1 とした基本構造に対して，ギャップ幅が 110%，120%，130%に増加した場合の有効屈折率を算出した．得られた有効

屈折率データをデータベース化し、MetaOptic Designer に転用することで、伸張に伴う集光特性の変化を解析した。

さらに、入射周波数 0.4, 0.5, 0.6 THz において、基板サイズの伸張倍率を 100%, 110%, 120%とした場合の XY 断面における電場分布を解析した。焦点距離 50 mm における電場強度を比較したところ、周波数および伸張倍率に応じて焦点強度が変化することが確認された(表 1)。この結果から、本構造では、機械的伸張により焦点位置で高い信号強度が得られる周波数を変化させられることが示唆された。

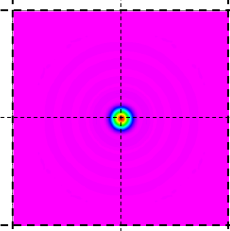
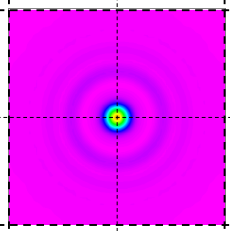
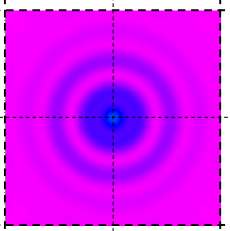
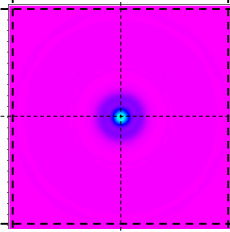
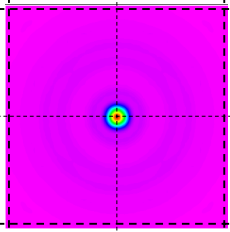
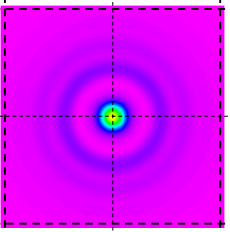
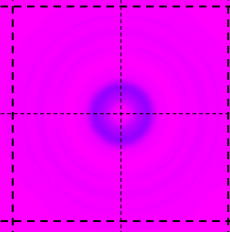
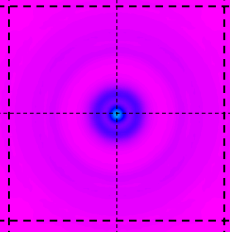
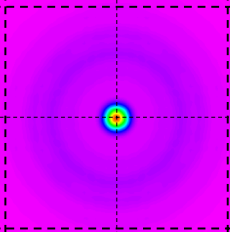
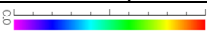
2-3 周波数可変 THz フィルタの作製

本デバイスは、25 mm 角のフレキシブルフィルム基板上に Si マイクロピラーアレイを形成することで作製した(図 2)。まず、厚さ 300 μm の Si 基板の裏面に、接着層として約 12 μm 厚の感光性接着レジスト(TMMRTM S2000 2000cp, 東京応化工業株式会社)をフォトリソグラフィによりパターンニングした。

次に、Si 基板表面に対して、一般的なフォトレジスト(OFPR-800LB 200cp, 東京応化工業株式会社)を約 3 μm の厚さで形成し、裏面の接着層パターンと位置合わせして、同じパターンを作製した。その後、両面にパターンニングを施した Si 基板を、フレキシブルフィルム(BEYOLEX, Panasonic)に加熱圧着した。加熱圧着条件は、100 $^{\circ}\text{C}$, 0.24 MPa, 5 min とした。

続いて、Si 基板表面のフォトレジストパターンをエッチングマスクとして、ICP-RIE を用いて Si 基板を貫通エッチングした。これにより、フレキシブル基板上に高さ 300 μm の Si マイクロピラーアレイを形成した。作製後、光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて構造を観察した(図 3)。その結果、25 mm 角のフレキシブル基板上に、直径約 20 mm の円形メタサーフェス領域が形成されていることを確認した。また、十字型ギャップを有する 4 分割 Si ユニットセルが周期的に配列されていることを確認した。

表 1 周波数可変 THz フィルタの伸長長さと焦点強度のシミュレーション値

Device size	0.6 THz	0.5 THz	0.4 THz
100% (No stretching)			
	76.65 V/ μm	31.82 V/ μm	5.441 V/ μm
110%			
	736.54 V/ μm	35.74 V/ μm	17.22 V/ μm
120%			
	6.516 V/ μm	12.56 V/ μm	20.34 V/ μm
Color bar (V/ μm)			

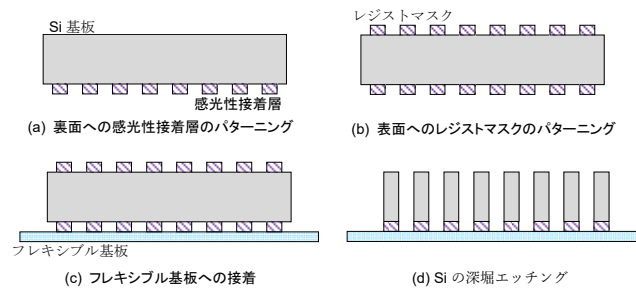


図 2. 周波数可変 THz フィルタの作製過程.

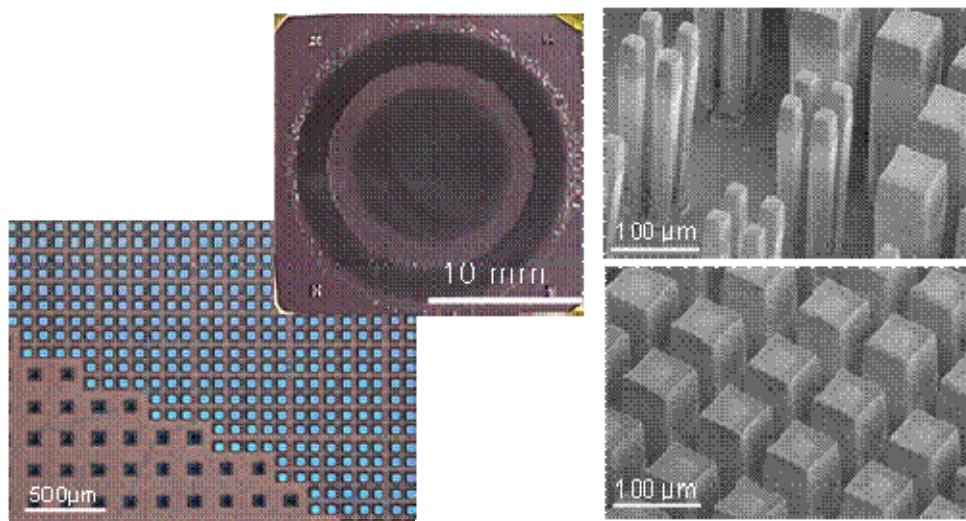


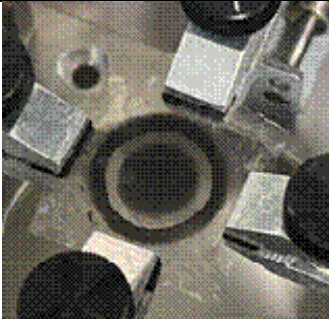
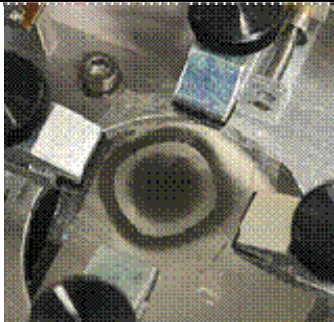
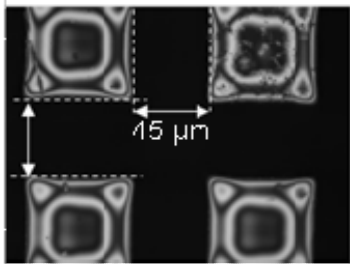
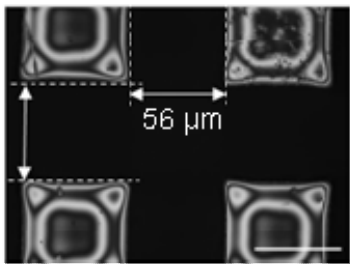
図 3. 作製したフレキシブル THz メタサーフェスフィルタ.

2-4 機械的変形の評価

作製したデバイスが、設計意図どおりに機械的変形するかを評価した。デバイスの伸張には、フレキシブル基板の対向する 2 辺を機械的にクランプし、一方を固定し、他方をステッピングモータに接続する伸張機構を用いた。ステッピングモータの変位をコンピュータ制御することで、デバイス全体の伸張長さを調整した。機械的変形の評価では、非伸張時と、レンズ有効径約 20 mm に対して 4 mm 伸張した場合、すなわち約 20%伸張時の構造を光学顕微鏡により観察した。特に、4 分割 Si ユニットセル内の十字型ギャップ幅に着目し、伸張に伴うギャップ幅の変化を測定した。

非伸張時における Si ピラー幅およびピラー間ギャップ幅は、設計値 70 μm :35 μm に対して、実測値では 60 μm :45 μm であった。このことから、作製プロセスにおいて、ピラー幅が設計値よりも小さく、ギャップ幅が設計値よりも大きくなる傾向が確認された。一方で、4 mm 伸張時には、ピラー間ギャップ幅は 45 μm から 56 μm へ増加した(表 2)。これは、レンズ有効径に対する伸張に概ね追従してギャップ幅が増加したことを示している。以上より、作製誤差により初期寸法は設計値からずれていたものの、フレキシブル基板の伸張によって十字型ギャップ幅が拡大し、ユニットセルの空隙率を機械的に変化させられることを確認した。この結果は、本デバイスが、機械的伸張によって有効屈折率を変調する周波数可変 THz フィルタとして動作し得ることを示している。

表 2 周波数可変 THz フィルタの機械的変形の評価

	Without stretching	4mm stretching
Over view		
Pillars		

2-5 THz 光学特性の評価

作製したデバイスの THz スペクトル特性を、THz 周波数領域分光システム (TeraScan 1550, TOPTICA Photonics) を用いて評価した。発振器から出射された THz ビームは、曲面レンズによってコリメートおよび集光され、直径 5 mm のピンホールを通して空間フィルタリングされた後、再びコリメートされてデバイスに入射した (図 4)。透過ビームは、開口径 25 mm の検出器によって検出した。

本研究では、デバイス位置を $z = 0$ mm と定義し、光源から離れる方向を正の z 方向とした。すべての光学部品は目盛付きレール上に設置し、検出器位置を光軸方向に沿って走査できるようにした。光学特性は、異なる検出器位置における信号強度を記録することで評価した。伸張制御には、2-4 節で述べたものと同じ機械的セットアップを用いた。

まず、非伸張状態において、0.6 THz での焦点条件を評価した。検出器を $z = 46$ mm から 70 mm まで 2 mm 刻みで走査したところ、最大強度は $z = 50$ mm で観測された。これは設計焦点距離と一致しており、作製したデバイスが設計どおりの焦点位置に THz 波を集光できることを示している。

次に、検出器位置を $z = 50$ mm に固定し、伸張長さを 0, 2, 4, 6 mm と変化させながら、0.30~0.65 THz の範囲でスペクトルを取得した。周波数掃引は、 $\Delta f = 0.1$ GHz の分解能で離散的な周波数点において行った。各伸張状態で得られたスペクトルは、デバイスなしで取得した参照スペクトルにより規格化し、強度比として評価した (図 5)。

本研究では、固定された検出器開口および測定ジオメトリの下で、 $z = 50$ mm における規格化強度比を、集光型フィルタとしての相対的な周波数選択性能の指標として用いた。したがって、ここで得られる強度比は絶対的な集光効率ではなく、固定検出位置においてどの周波数成分が相対的に強く検出されるかを示す指標である。

各伸張条件に対して、代表的な選択周波数は、 $z = 50$ mm における規格化強度比が全スペクトル中で最大値を示す周波数として定義した。同一の周波数サンプリング方法および抽出基準をすべての伸張条件に一貫して適用することで、異なる伸張状態間の比較を可能にした。その結果、代表的な選択周波数は、伸張長さ 0 mm で 0.62 THz、2 mm で 0.54 THz、4 mm で 0.42 THz、6 mm で 0.37 THz であった。

さらに、伸張に伴ってスペクトル応答がどのように変化するかを確認するため、目標動作周波数近傍の選択周波数である 0.62, 0.56, 0.42, 0.37 THz における規格化強度比を比較した (図 6)。これらの周波数は、伸張に伴うスペクトル応答の再分布を示すために選択したものであり、代表的な選択周波数そのものを定義

するために用いたものではない．代表的な選択周波数は，あくまで各伸張条件で取得した全スペクトルから一貫した基準により抽出した．

測定の結果，伸張長さの増加に伴って，代表的な選択周波数は 0.62 THz から 0.37 THz へ単調に低周波数側にシフトした．これは，機械的伸張により，メタサーフェスの格子周期とユニットセル内の空隙率が変化し，有効屈折率分布が変調されたためと考えられる．以上の結果から，本デバイスは，伸張量に応じて固定焦点位置で強く検出される周波数を切り替えられる周波数可変 THz フィルタとして動作することが実験的に示された．

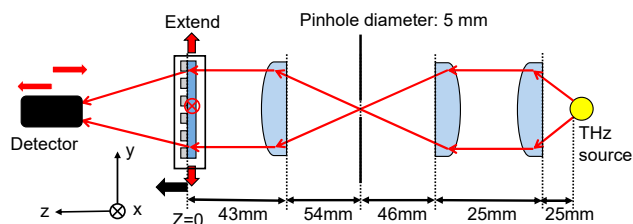


図 4. 周波数可変 THz フィルタの光学応答を評価するために用いた THz 周波数領域分光の実験セットアップ．

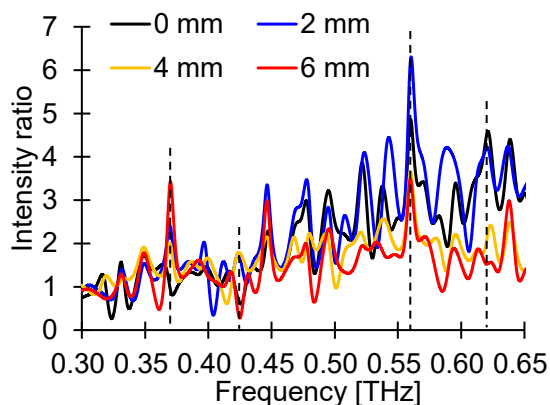


図 5. 設計焦点距離 ($z = 50$ mm) で測定した，強度比の伸張依存スペクトル．

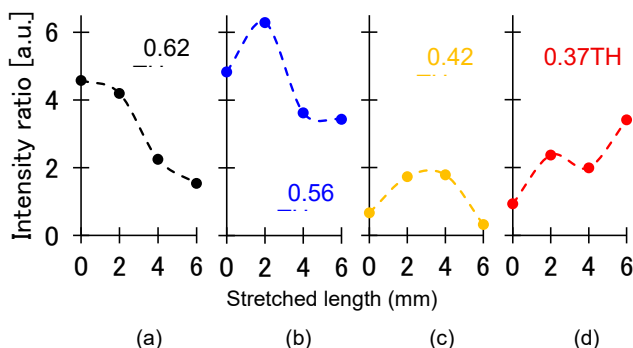


図 6. (a) 0.62, (b) 0.56, (c) 0.42, および(d) 0.37 THz における，伸張長さに対する強度比．

3 結言

本研究では、フレキシブルメタサーフェスを用いた周波数可変 THz フィルタを開発し、機械的伸張によって周波数選択特性を制御できることを実証した。本デバイスでは、内部に十字型空隙を有する Si ユニットセルをフレキシブル基板上に周期配置した。この構造により、機械的伸張によって格子周期が変化すると同時に、各ユニットセル内のギャップ幅が広がり、空隙率が増加する。その結果、メタサーフェスの有効屈折率が変化し、固定焦点位置において最大検出強度が得られる周波数がシフトした。

実験では、非伸張状態において、設計周波数近傍の 0.6 THz に対する最大強度が設計焦点距離である $z = 50$ mm において得られることを確認した。さらに、検出器位置を $z = 50$ mm に固定し、伸張長さを 0 mm から 6 mm まで変化させたところ、代表的な選択周波数は 0.62 THz から 0.37 THz へ単調に低周波数側へシフトした。この結果は、機械的伸張によって THz 帯域における周波数選択特性を可変化できることを示している。

測定された周波数シフトの傾向は、シミュレーションに基づく設計と整合していた。一方で、実測値と設計値の間には一定の周波数オフセットが見られた。これは、作製時に Si ピラー幅およびギャップ幅が設計値からずれたことにより、ユニットセルの有効屈折率が設計値と異なったためと考えられる。今後は、ピラーおよびギャップ寸法の高精度化、位相制御範囲の拡大、伸張時の変形均一性の改善、ならびに光学効率の向上が必要である。

以上より、本研究は、フレキシブル基板上のメタサーフェス構造を機械的に変形させることで、THz 帯域における周波数選択特性を制御できることを示した。本手法は、従来の透過型フィルタとは異なり、特定周波数の THz 波を固定検出位置に集光することで相対的に信号強度を高める集光型周波数可変フィルタである。この成果は、周波数掃引型サブ THz イメージング、THz 分光、および将来の 6G 通信デバイスに向けた小型・薄型・可変 THz 光学素子の実現に貢献するものである。

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
FREQUENCY-TUNABLE TERAHERTZ METALENS ON A FLEXIBLE FILM	The 39th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (IEEE MEMS 2026)	2026 年 1 月