

1. 研究の目的

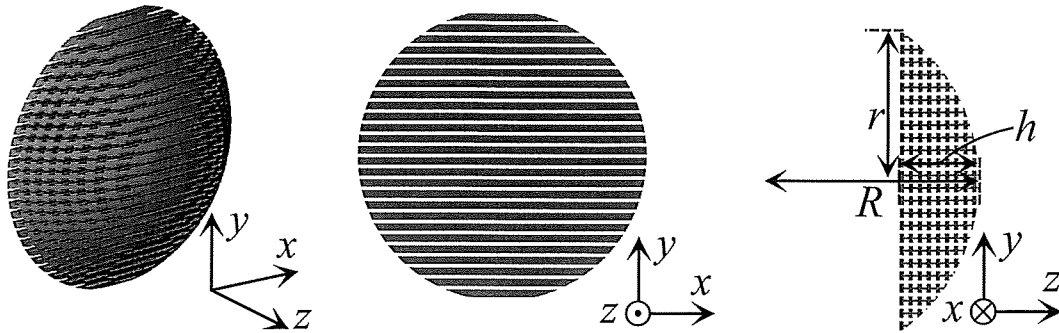


図1 金属溝周期構造を有するテラヘルツ波帯人工誘電体レンズ

現在、0.1~10 THz 付近のテラヘルツ波帯では、光源や検出器とともに、光学素子が発展途中であり、充実が求められている。代表的なテラヘルツ波帯のレンズとしては、屈折率 $n=1.52$ の高密度ポリマーレンズ、 $n=1.56$ の Tsurupica レンズ、 $n=3.41$ のシリコンレンズが挙げられる。これらのレンズの屈折率を補間するよう、屈折率を電磁メタマテリアルにより制御できれば、産業応用の面で見ただけに設計の自由度を増大できる。

マイクロ波帯では電磁メタマテリアルによる人工誘電体レンズ[1][2]が既に提案されている。テラヘルツ波帯では高屈折率構造[3]、反射防止構造[4]、3次元構造[5]などが報告されている。

本研究課題では、我々の研究グループが提案した金属溝周期構造(コルゲーション)[6]による遅波構造を用いたレンズ[5.3の[1]]について、解析でテラヘルツ波帯での集光効果と金属溝周期構造の深さによる焦点距離の変化を確認した。

また、テラヘルツ波帯では作製法についてマイクロ波帯、ミリ波帯より注意深い検討と試作実現性の検討が必要となる。そこで、作製法の評価のためバイトを用いた超精密微細加工による検討を行い、レンズを試作した。

2. 研究の内容(手法、経過、評価など。)

2-1 周期モデルによる解析

図2に図1の全構造モデルから1本抜き出した周期モデルを示す。位相遅れは図2の周期モデルを解析することで求められる。図3に周期モデルでの位相遅れの解析結果を示す。金属溝がそんなに解析は有限要素法電磁界シミュレータ Ansoft 社 HFSS Ver.13.0.2 を用いた。

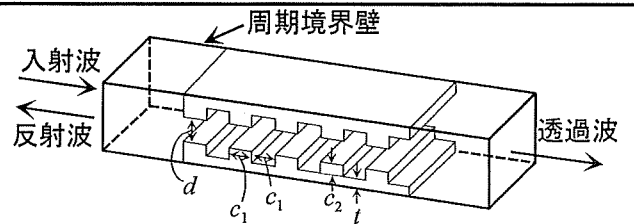


図2 周期境界モデル

表1 基準モデルパラメータ

t	20 μm (0.033 λ)
d	30 μm (0.050 λ)
c_1	40 μm (0.067 λ)
c_2	30 μm (0.050 λ)
N	24

パターン A では、金属溝周期構造の配置された板の間隔 d を基準モデルの $d=30 \mu\text{m}$ (0.050 λ)、 $50 \mu\text{m}$ (0.083 λ)、 $70 \mu\text{m}$ (0.12 λ) と増加させている。基準モデルのパラメータは表1の通りである。図3(a)の通り、板の間隔 d が増加するにつれ、位相遅れが減少している。9周期目での位相遅れはそれぞれ、基準モデルでは-148.9度、パターン A-1 では-88.8度、パターン A-2 では-66.1度となった。

パターン B では、基準モデルの金属溝の幅 $c_1=40 \mu\text{m}$ (0.067 λ) を中心に $c_1=20 \mu\text{m}$ (0.033 λ)、 $c_1=60 \mu\text{m}$

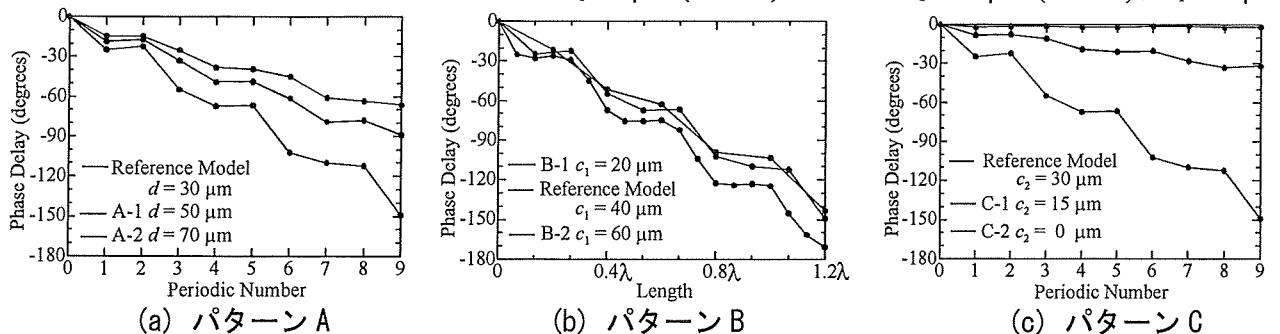


図3 周期モデルによる位相変化

2. 研究の内容(続き)(書ききれない場合には、同一形態のページを追加しても結構です。)

(0.10λ)と変化させた。図 3(b)の通り、金属溝の幅 c_1 が増加するにつれ、位相遅れが減少している。経路長 1.2λ の点での位相遅延は、それぞれパターン B-1 で -170.7 度、基準モデルでは -148.9 度、パターン B-2 では 143.4 度となった。

パターン C では、金属溝の深さ c_2 を基準モデルの $c_2=30\ \mu\text{m}$ (0.050λ) から $c_2=15\ \mu\text{m}$ (0.025λ)、 $c_2=0\ \mu\text{m}$ と減少させている。図 3(c)の通り、金属溝の幅 c_2 が減少するにつれ、位相遅れが減少している。位相遅れの減少は等価屈折率の減少を意味し、焦点距離は増加する。9 周期目での位相遅れはそれぞれ、基準モデルでは -148.9 度、パターン C-1 では -31.9 度、パターン C-2 では -1.6 度となった。

以上より、以下の 3 点が確認できる。板の間隔が大きくなるほど焦点距離は遠くなる。金属溝の幅が大きくなるほど焦点距離は遠くなる。金属溝の深さが浅くなるほど焦点距離が遠くなり、金属溝がない場合には集光しない。

2-2 全構造解析

全構造解析の解析モデルの実寸は動作確認ため、解析可能なサイズとしている。また、イメージの原理により $1/4$ モデルを解析すればよい。解析には有限要素法電磁界シミュレータ ANSYS 社 HFSS を用いた。基準モデルの解析結果を図 4 に示す。このときのレンズ通過後の入力に対する強度の極大値は、レンズの頂点部分から $2.31\ \text{mm}$ (3.85λ) の点で 2.5 倍となっており、遅波効果による集光が確認できる。

2-2-1 Pattern A

パターン A-1 では板の間隔 d と枚数 N をそれぞれ $d=50\ \mu\text{m}$ (0.083λ)、 $N=20$ とした。その結果を図 5(a) に示す。このときのレンズ通過後の入力に対する強度の極大値は、レンズの頂点部分から $2.36\ \text{mm}$ (3.93λ) の点で 2.1 倍となる。また、Pattern A-2 では $d=70\ \mu\text{m}$ (0.12λ)、 $N=18$ とした。その結果を図 5(b) に示す。このときのレンズ通過後の入力に対する強度の極大値は、レンズの頂点部分から $2.69\ \text{mm}$ (4.49λ) の点で 1.9 倍となる。

図 3(a)では、基準モデルはパターン A-1 に比べ、9 周期目で位相が 60.1 度遅れているが焦点の位置の変化は $0.05\ \text{mm}$ (0.083λ) のみであった。一方、パターン A-2 はパターン A-1 に比べ 9 周期目で位相が 22.7 度だけ遅れているが焦点の位置の変化は $0.33\ \text{mm}$ (0.55λ) 変化した。しかし、板の間隔 d が増加するにつれ、焦点距離が遠ざかっているため、周期モデル解析による図 3(a)の結果の傾向と定性的には一致している。板の間隔 d が増加するにつれ、等価屈折率が減少する。

2-2-2 Pattern B

Pattern B-1 ではコルゲーションの幅 c_1 を $c_1=20\ \mu\text{m}$ (0.033λ) とした。その結果を図 6(a) に示す。このときのレンズ通過後の入力に対する強度の極大値は、レンズの頂点部分から $1.97\ \text{mm}$ (3.29λ) の点で 2.7 倍となる。また、Pattern B-2 では $c_1=60\ \mu\text{m}$ (0.10λ) とした。その結果を図 6(b) に示す。このときのレンズ通過後の入力に対する強度の極大値は図 6(b) より、レンズの頂点部分から $2.32\ \text{mm}$ (3.86λ) の点で 2.4 倍となる。

パターン B-1 は基準モデルに比べ焦点距離が遠ざかる。パターン B-2 では基準モデルに比べ焦点距離に大きな変化はみられない。これは図 3(b)の結果の傾向とも一致している。基準モデルとパターン B-1 から金属溝の幅 c_1 が増加すると、等価屈折率が減少することは確認できる。

2-2-2 Pattern C

Pattern C-1 ではコルゲーションの深さ c_2 と板の間隔 d をそれぞれ $c_2=15\ \mu\text{m}$ (0.025λ)、 $d=60\ \mu\text{m}$ (0.10λ) とした。その結果を図 7(a) に示す。このときの極大値は、レンズの頂点部分から $4.30\ \text{mm}$ 以上となり解析領域より外に出てしまっている。また、Pattern C-2 ではコルゲーションをなくし板の間隔 $d=90\ \mu\text{m}$ (0.15λ) の縦壁として解析を行った。その結果を図 7(b) に示す。この場合はレンズ通過後も集光することはなく、極大値は存在しない。

基準モデルとパターン C-1 を比較すると、金属溝の深さ c_2 が減少するにつれ、焦点距離が遠ざかっている。図 3(c)の結果の傾向と一致し、パターン C-2 ではほとんど位相遅れが生じていない。そのため集光せずレンズとして機能しない。以上より、金属溝の深さ c_2 が減少するにつれ、等価屈折率が減少する。

以上より、全構造解析からも以下の 3 点が確認できた。板の間隔が大きくなるほど焦点距離は遠くなる。金属溝の幅が大きくなるほど焦点距離は遠くなる。金属溝の深さが浅くなるほど焦点距離が遠くなり、金属溝がない場合には集光しない。さらに、実寸の波長に対して大規模なレンズ形状の繰り

返し補正による設計は非常に困難である。そのため、周期モデルによる評価はレンズ設計の際に有効となる。

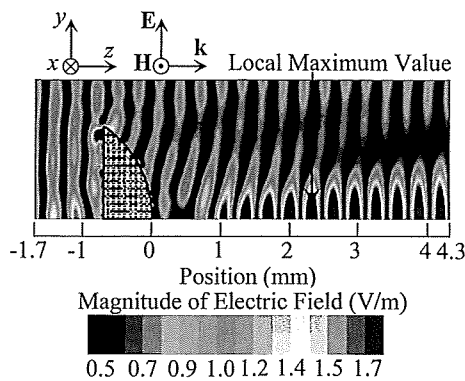


図4 基準モデル

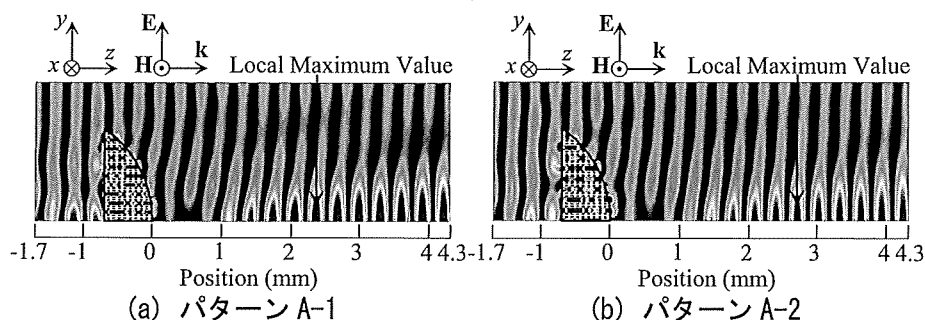


図5 パターンA

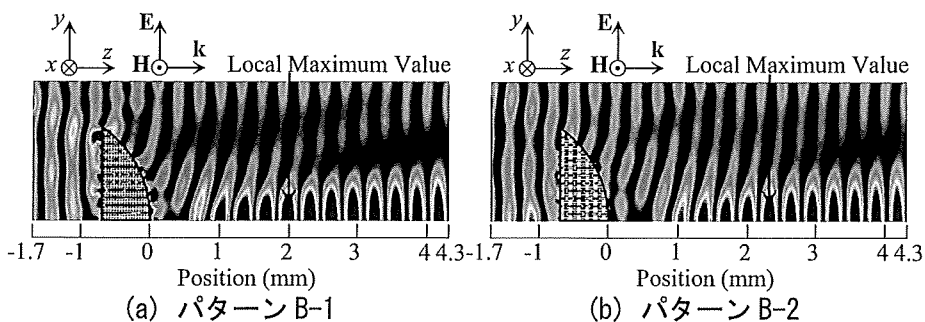


図6 パターンB

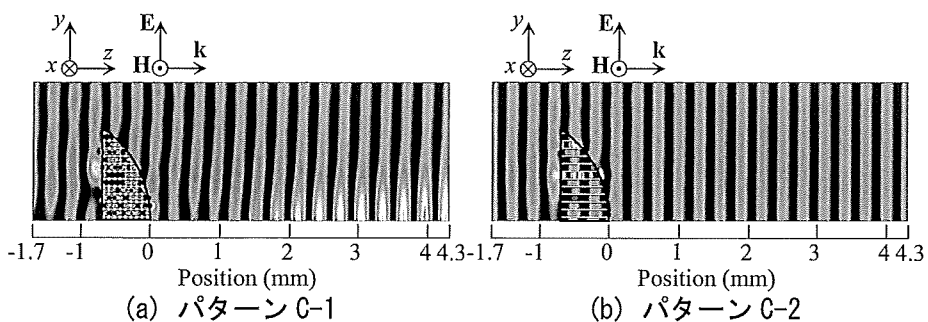


図7 パターンC

参考文献

- [1] E. Kock, Bell Syst. Tech. J., vol. 27, no. 1, pp. 58-82, Jan. 1948.
- [2] S. S. D. Jones et al., Nature, vol. 163, pp. 324-325, Feb. 1949.
- [3] M. Choi, et al., Nature, vol. 470, pp. 369-374, Feb. 2011
- [4] H.-T. Chen, et al., Phys. Rev. Lett. vol. 105, pp. 073901-1-073901-4, Aug. 2010.
- [5] F. Miyamaru, et al., Appl. Phys. Lett., vol. 96, pp. 081105-1-081105-3, Mar. 2010.
- [6] K. Sato, et al., IEICE Electronics Express, vol. 3, pp. 424-428, Aug. 2006.

3. 研究の結論、今後の課題

図8に今回試作したレンズのモデル図を示す。金属溝周期構造を有する金属板を支持するため、テラヘルツ波帯で低損失なシクロオレフオンポリマーフィルムを間に挟んでいる。表2に試作モデルのパラメータを示す。図9はバイトを用いた超精密微細加工により作製した金属溝周期構造の写真である。 $c_1=40\ \mu\text{m}(0.067\lambda)$ 、 $c_2=25\ \mu\text{m}(0.042\lambda)$ を目標値としている。バイトを用いた超精密微細加工では、 $1\ \mu\text{m}$ 程度の作製誤差である。現在、図10の通り積層し、

テラヘルツ近接場顕微鏡による実験で評価、検討に取り組んでいる。

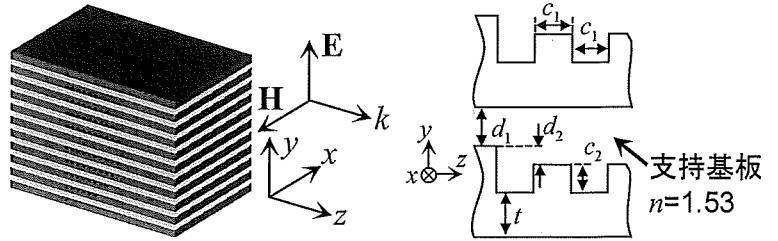


図8 試作モデル

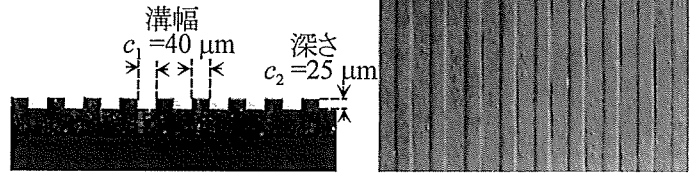


図9 試作した金属溝周期構造

表2 試作モデルのパラメータ

c_1	$40\ \mu\text{m} (0.067\lambda)$
c_2	$25\ \mu\text{m} (0.042\lambda)$
t	$55\ \mu\text{m} (0.092\lambda)$
d_1	$60\ \mu\text{m} (0.10\lambda)$
d_2	$20\ \text{mm} (0.033\lambda)$

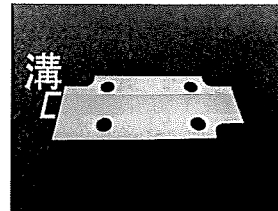
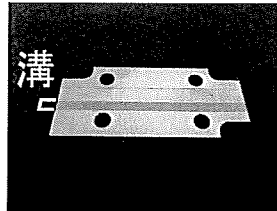
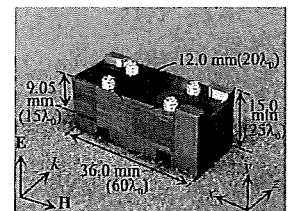


図10 試作レンズ



4 成果の価値(とくに判りやすく書いてください。)

1. 社会的価値

現在、0.1~10 THz 付近のテラヘルツ波帯では、光源や検出器とともに、光学素子が発展途中であり、充実が求められている。屈折率 $n=1.52$ の高密度ポリマーレンズ、 $n=1.56$ の Tsurupica レンズ、 $n=3.41$ のシリコンレンズなどの屈折率を補間するよう、屈折率を電磁メタマテリアルにより制御できれば、産業応用の際に設計の自由度を増大できる。

さらに、テラヘルツ波帯の電磁メタマテリアルの単位構造素子の大きさは数 μm ~数 10 μm 程度で、半導体エッチングや金属加工などの中間値に位置し、作製法、材料特性、試作実現性についてマイクロ波、ミリ波帯より注意深い検討が必要となる。テラヘルツ電磁メタマテリアルの光学素子の開発により、今回のバイトを用いた超精密微細加工のように作製技術に関する新たな知見やノウハウを蓄積できる。支持基板として使用する材料特性についてもテラヘルツ波帯のノウハウを蓄積できる。

2. 学術的価値

マイクロ波帯では、球形アレー、円板アレー、方形アレー、ワイヤーアレーなどの電磁メタマテリアルで構成されたレンズが積極的に研究されてきた。テラヘルツ波帯では材料由来の光学素子は、他の周波数帯に比べて遅れているため、電磁メタマテリアルの概念を用いて、新規の実用素子が開発することで、産業応用へ前進しているテラヘルツ分野へ新たな視点を取り入れることができる。またテラヘルツ電磁メタマテリアルは、光領域の一步手前に位置し、光領域に向けたさきがけ的な研究の意味合いも持つ。今後、本研究により得られた知見を、屈折率ゼロ近傍や負の屈折率や有するテラヘルツ波帯レンズなどの研究へ積極的に活かしていきたい。

3. 成果論文(本研究で得られた論文等を年代順に書いてください。未発表のものは公表予定を書いてください。)

査読付き論文

- [1] Takuya Konno, Takahiro Suzuki, John C. Young, Mikio Saigusa, Keisuke Takano, Hideaki Kitahara, Masanori Hangyo, and Takehito Suzuki, "Proposal and Analysis of Artificial Dielectric Lens with Metallic Corrugated Structures for Terahertz Wave Band," Applied Physics A, Vol. 109, No. 4, pp.1103-1108, Nov. 2012.
- [2] Takehito Suzuki, Tomonari Suzuki, John C. Young, Keisuke Takano, Hideaki Kitahara, and Masanori Hangyo, "Analysis of artificial dielectric lens with metallic rectangular chips for terahertz wave band and physical explanation by periodic model," Applied Physics A, vol. 109, no. 4, pp.825-830, Nov. 2012.

国内学会

- [3] 今野 拓矢, 三枝 幹雄, 御田 護, 古澤 庄一, John . Young, 高野 恵介, 北原 英明, 萩行 正憲, 鈴木 健仁, "金属スリット配列による支持層を装加した金属溝周期構造を有するテラヘルツ波帯平面レンズの解析," 2012 年秋季 第 73 回 応用物理学関係連合講演会, 11p-B1-5, 愛媛大学・松山大学, Sep., 2012.
- [4] 與那嶺 広樹, 岸 湧大, 今野 拓矢, 高野 恵介, 萩行 正憲, 鈴木 健仁, "金属スリット構造によるテラヘルツ波帯 3 次元凹型レンズの基礎検討," 2012 年秋季 第 73 回 応用物理学関係連合講演会, 11p-B1-6, 愛媛大学・松山大学, Sep., 2012.
- [5] 岸 湧大, 高野 恵介, 萩行 正憲, 與那嶺 広樹, 今野 拓矢, 鈴木 健仁, "カットオフ周波数での分割リング共振器を装加した金属スリットアレーの周期構造解析," 2012 年秋季 第 73 回 応用物理学関係連合講演会, 11p-B1-1, 愛媛大学・松山大学, Sep., 2012.