

テラヘルツ波高機能制御のための メタマテリアルによる光学素子・アンテナの研究



茨城大学 工学部 電気電子工学科 鈴木 健仁
<http://suzuki-lab.ee.ibaraki.ac.jp/>
takehito@mx.ibaraki.ac.jp

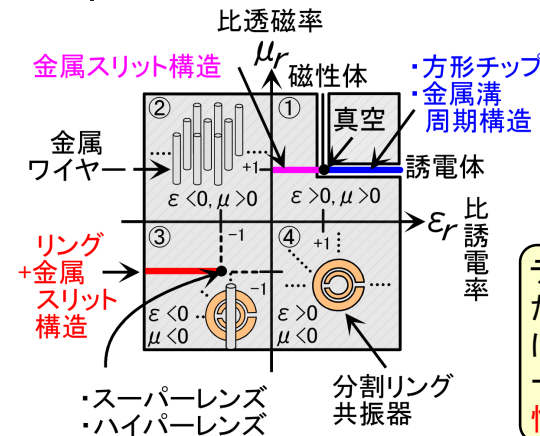
本発表の構成

1. 背景・目的
2. テラヘルツ波帯電磁メタマテリアルレンズの解析→設計→試作→測定
3. 各種光学素子
4. まとめ

本発表の構成

1. 背景・目的
2. テラヘルツ波帯電磁メタマテリアルレンズの解析→設計→試作→測定
3. 各種光学素子
4. まとめ

背景と目的



目的
 積層薄フィルム構造による
 テラヘルツ波帯
 電磁メタマテリアルレンズ

- ・ Tsurupica $n = 1.52$
- ・ ポリエチレン $n = 2.3$
- ・ シリコン $n = 3.4$

テラヘルツ波帯では電気特性
 だけでなく**材料特性、試作法**
 についてマイクロ波、ミリ波より
 一層注意深い検討と**試作実現**
性の検討が必要

- 損失との
 闘い
- ・ 誘電体損
 - ・ シクロオレフィンポリマー: **小**
 - ・ 導体損
 - ・ メチルペンテンポリマー: **小**
 - ・ 高導電率:
 - ・ ポリイミド: **大**
 - ・ PET: **大**
 - ・ Cu, Al, Au, Ag

①~④ テラヘルツ波人工誘電体レンズ

① 金属方形チップ周期構造 $n > 1 (n < -1)$

② 金属溝周期構造 $n > 1$

③ 金属スリット構造 $0 < n < 1$

④ リング+金属スリット構造 $n < 0$

積層薄フィルム(板)構造

金属平板

反射波

入射波

透過波

スプリットリング共振器

⑤ テラヘルツ波帯ワイヤーグリッド

Transmission power

Extinction ratio

Frequency (THz)

約 75 %

10^{-5}

>約 90 %

現在、作製中

10^{-6}

Transmission power (%)

Extinction ratio

Frequency (THz)

※散乱波による解析

実験結果

解析結果

銅

シクロオレフィン

ポリマーフィルム

スペーサー

TMモード

TEモード

フィルム構造

中空構造 (現在作製中)

従来のワイヤーグリッド

ワイヤー

従来ワイヤーグリッド

高消光比 (10^{-6} 以下) ・高透過特性 (透過電力約90%以上)

高い堅牢性 ・低コスト化

大阪大学 永井准教授にご測定いただいた

特願2013-179151

日刊工業新聞 (2013/9/6)

⑥ テラヘルツ波帯アンテナ

シクロオレフィン

ポリイミドポリマーフィルム

ガリウムヒ素基板

ダイポールアンテナ

反射器

ビームチルト

積層薄フィルム構造による

八木・宇田型光伝導アレーアンテナ

目的

印刷技術の

応用による

フレキシブルな

アンテナの開発

パターンめっき・転写法(日立化成株式会社)

・安価に作製

・高価な低温成長ヒ素化ガリウム基板の

再利用の検討

初回の作製で

現在ギャップ部が 今後検討を進め改善

通電

⑦ テラヘルツ波伝送線路

金属線路

誘電体

フェムト秒レーザーパルス

給電部

金属線路

ダイポールギャップ

ガリウムヒ素基板 断面図

目的

ダイポールアレー構造において

表面波を用いた高効率な

テラヘルツ波伝送線路の設計

平面でオンチップ化可能な

伝送線路

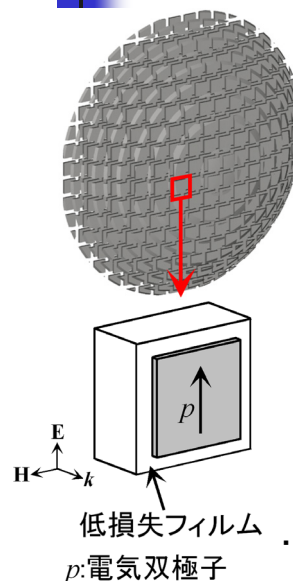
誘電体

- 給電部 → GaAs (フェムト秒レーザー照射により光伝導電流を発生)
- 伝送線路 → シクロオレフィンポリマーフィルム (低損失)

本発表の構成

1. 背景・目的
2. テラヘルツ波帯電磁メタマテリアルレンズの解析→設計→試作→測定
3. 各種光学素子
4. まとめ

① 金属方形チップ周期構造によるレンズ



全構造	単位構造
・波長より大規模	・波長より微細で周期
3.01 mm	120 μm
5.0λ@0.5 THz	0.2λ@0.5 THz

高屈折率
負屈折率 → 高解像度

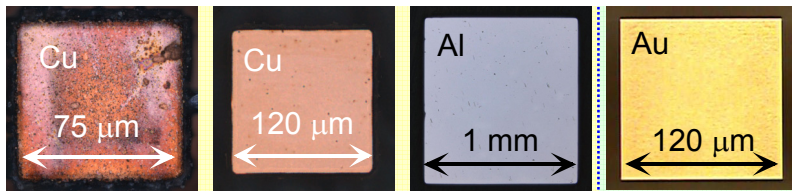
テラヘルツ波帯では材料特性、作製法についてマイクロ波帯、ミリ波帯より注意深い検討が必要

レーザー加工
エッチング加工
マスク蒸着 > 数 μm~
数10 μm > リフトオフ

低損失フィルム
p:電気双極子

- ・シクロオレフィンポリマー:小
- ・メチルペンテンポリマー:小
- ・ポリイミド:大
- ・PET:大
- ・誘電体損
- ・高導電率: Cu, Al, Au, Ag

金属方形チップ周期構造の試作



	レーザー加工	エッチング加工	マスク蒸着	リフトオフ
バッファ層 (接着部)	クロム(10 nm)	なし	なし	クロム(10 nm)
作製精度	5 μm	5~10 μm	5~10 μm	1 μm
加工範囲	A4	6インチ	6インチ	6インチ
金属膜厚	0.35 μm	0.5 μm	0.5 μm	0.05 μm

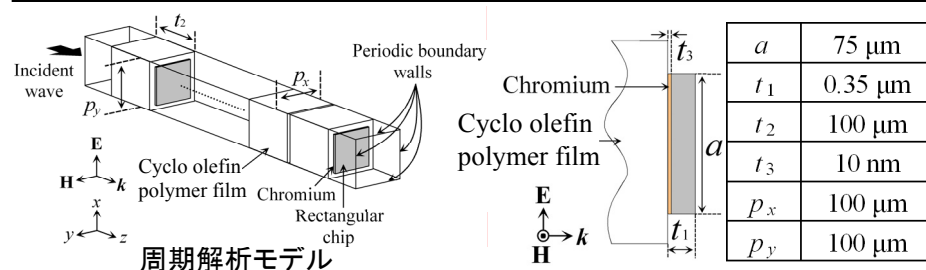
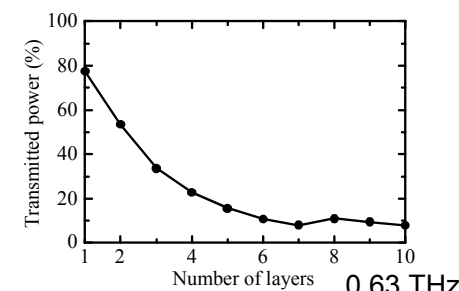
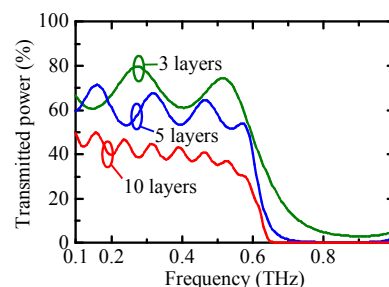
Y. Takebayashi, et al., META 2013, 5A1-META, pp. 99-100, Mar. 2013.

スパッタ成膜

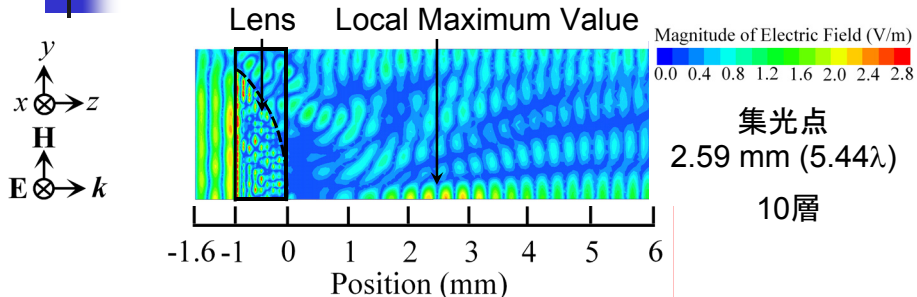
・シクロオレフィンポリマー : 損失小 (ポリイミド: 損失大)

・銅膜厚(0.5 THz) → $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = 93 \text{ nm} \times 2\sim3 \text{ 倍以上}$

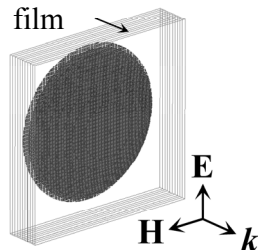
損失の見積もり



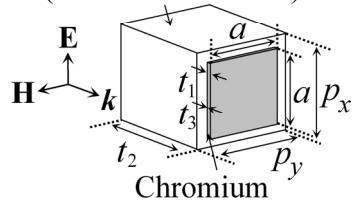
パターンA (0.63 THz)



Cyclo olefin polymer film

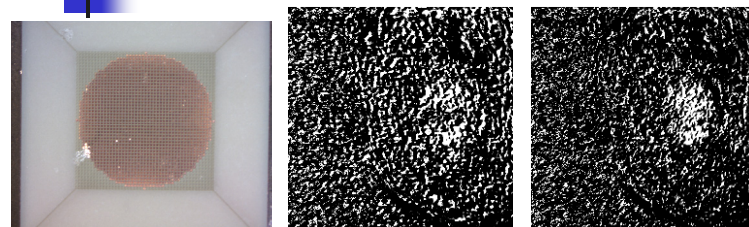


Cyclo olefin polymer film (Refractive index n)



a	75 μm
p_x	100 μm
p_y	100 μm
t_1	0.35 μm
t_2	100 μm
t_3	10 nm

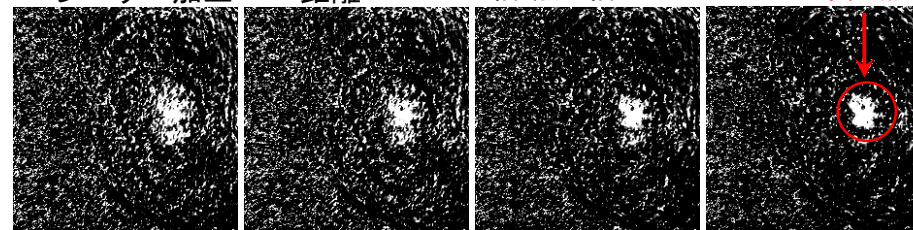
パターンA (0.63 THz)



M1 竹林君

北原英明博士
高野恵介博士
秋行正憲教授
との共同研究

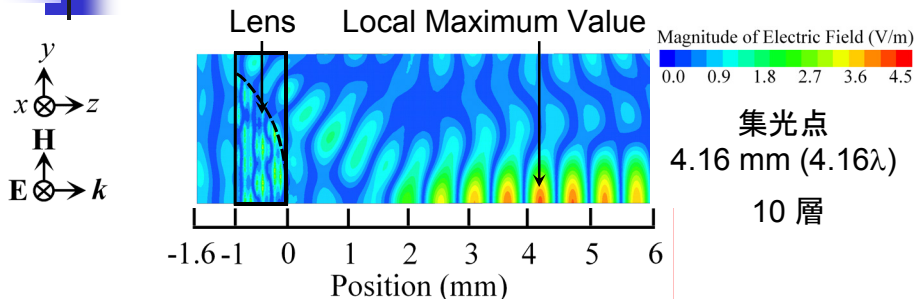
積層構造 レンズからの1.73 mm 2.23 mm
レーザー加工 距離 白:4倍 黒:1倍



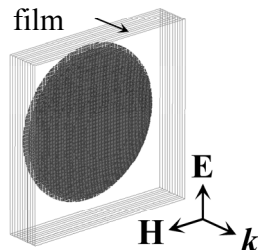
2.73 mm 3.23 mm 3.73 mm 4.23 mm
Y. Takebayashi, et al., META 2013, 5A1-META, pp. 99-100, Mar. 2013. テラヘルツ近接場顕微鏡

集光点

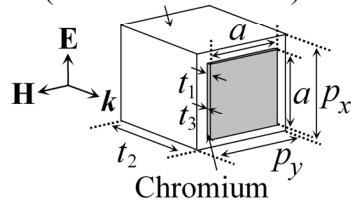
パターンA (0.63 THz)



Cyclo olefin polymer film

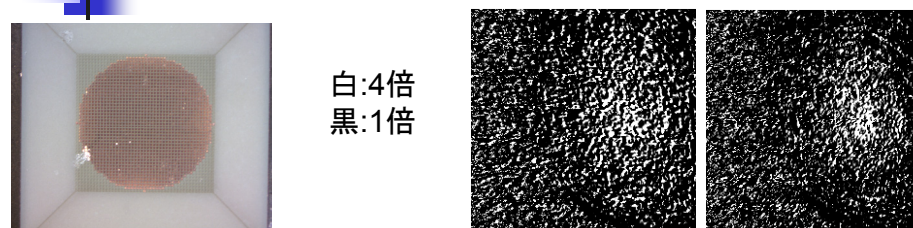


Cyclo olefin polymer film (Refractive index n)



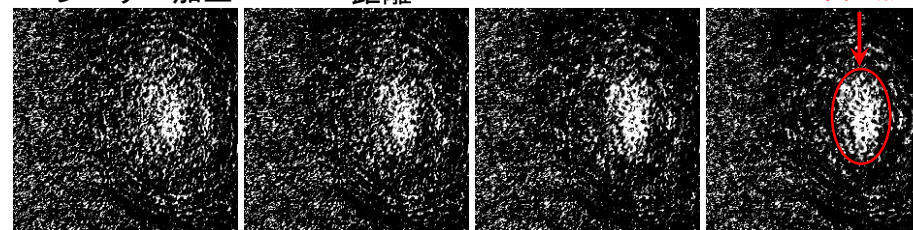
a	75 μm
p_x	100 μm
p_y	100 μm
t_1	0.35 μm
t_2	100 μm
t_3	10 nm

パターンA (0.30 THz)



白:4倍
黒:1倍

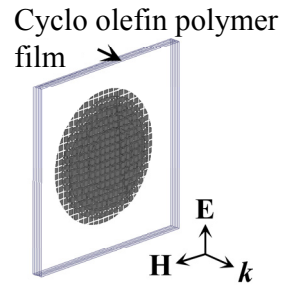
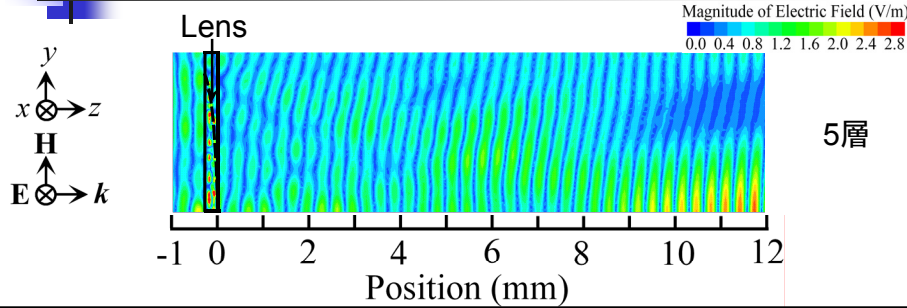
積層構造 レンズからの1.73 mm 2.23 mm
レーザー加工 距離



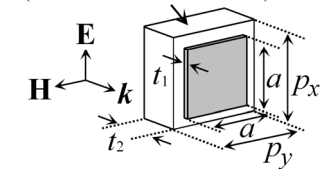
2.73 mm 3.23 mm 3.73 mm 4.23 mm
Y. Takebayashi, et al., META 2013, 5A1-META, pp. 99-100, Mar. 2013. テラヘルツ近接場顕微鏡

集光点

パターンB (0.48 THz)

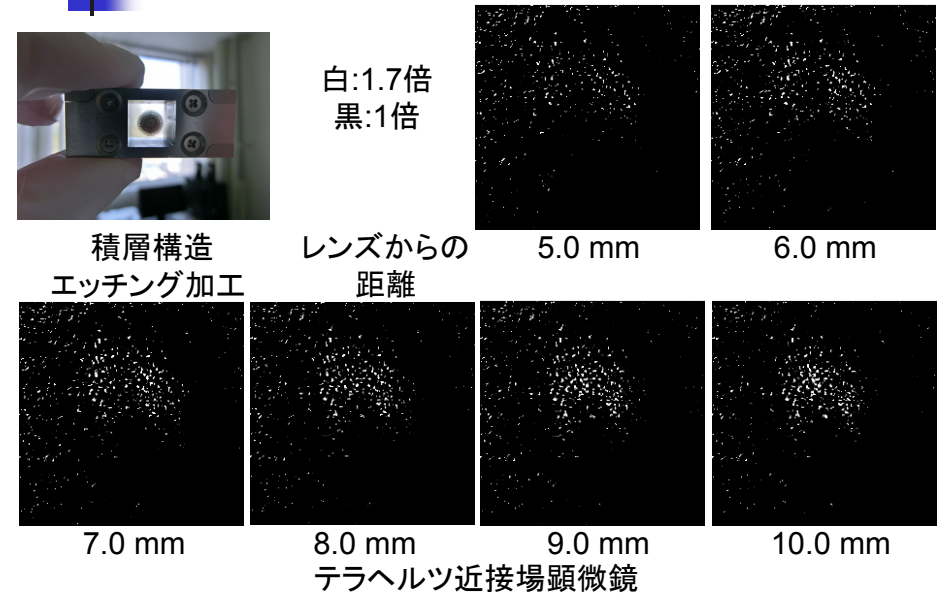


Cyclo olefin polymer film
(Refractive index n)

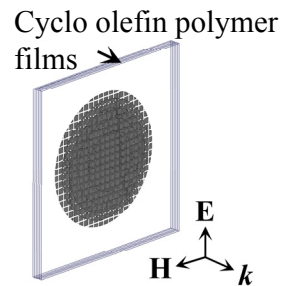
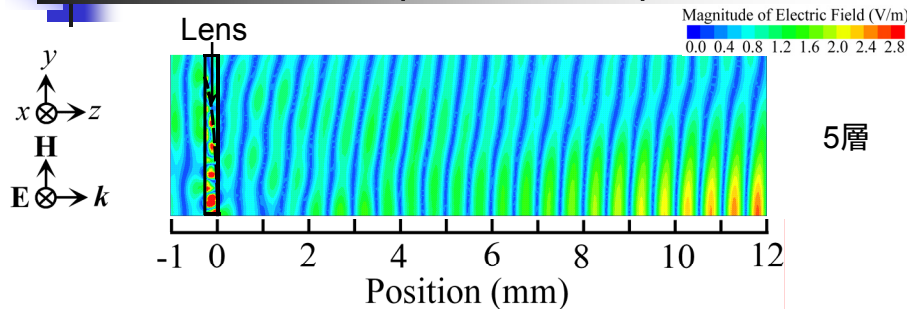


a	120 μm
p_x	160 μm
p_y	160 μm
t_1	0.5 μm
t_2	50 μm

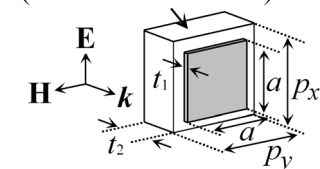
パターンB (0.48 THz)



パターンB (0.30 THz)

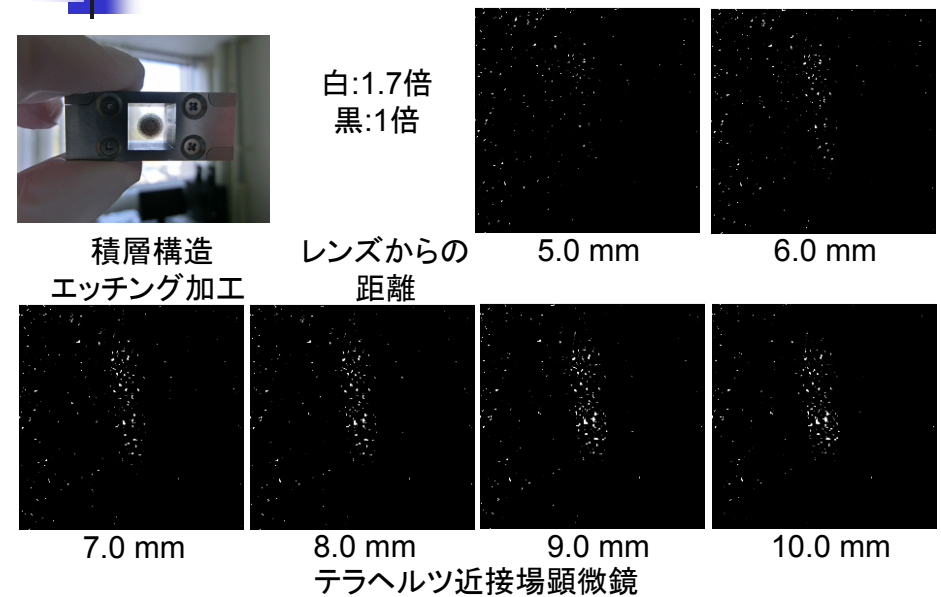


Cyclo olefin polymer film
(Refractive index n)



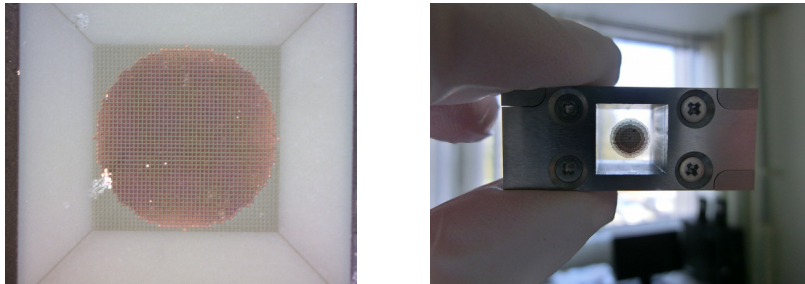
a	120 μm
p_x	160 μm
p_y	160 μm
t_1	0.5 μm
t_2	50 μm

パターンB (0.30 THz)



まとめ

1. 方形チップ周期構造を有するテラヘルツ波帯人工誘電体レンズをレーザー加工、及びエッチング加工により試作した。
2. テラヘルツ近接場顕微鏡により集光効果を確認した。



Y. Takebayashi, et al., META 2013, 5A1-META, pp. 99-100, Mar. 2013.

本発表の構成

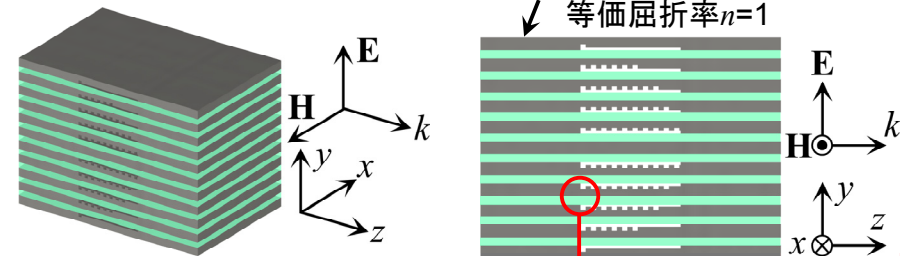
1. 背景・目的
2. テラヘルツ波帯電磁メタマテリアルレンズの解析→設計→試作→測定
3. 各種光学素子
4. まとめ

本発表の構成

1. 背景・目的
2. テラヘルツ波帯電磁メタマテリアルレンズの解析→設計→試作→測定
3. 各種光学素子
 - ② 金属溝周期構造 ($n > 1$)
4. まとめ

② 金属溝周期構造レンズ

金属スリット部に対して垂直な偏波の場合
等価屈折率 $n=1$

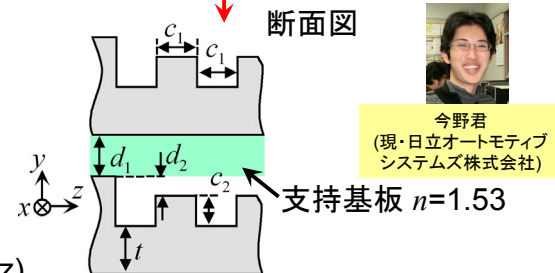


鳥瞰図

断面図

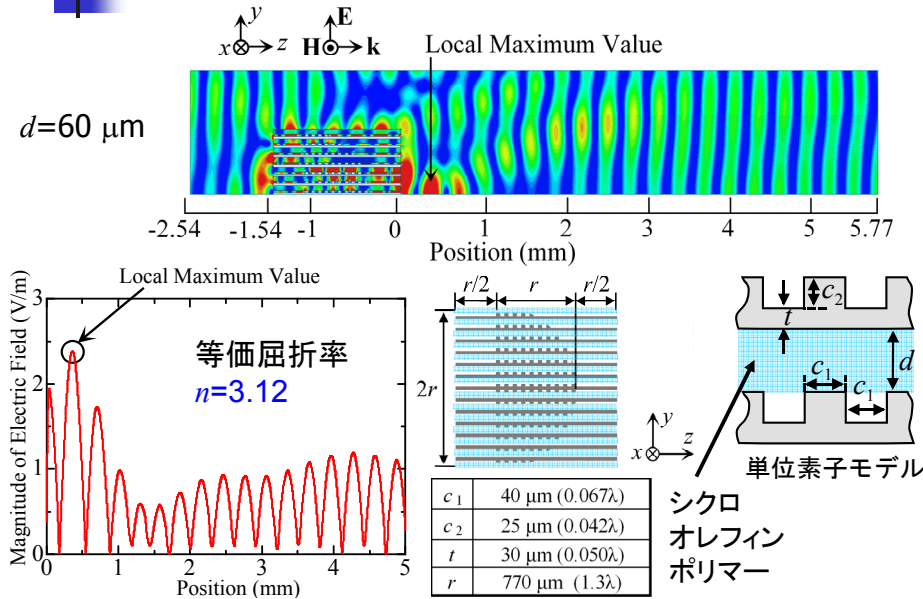
c_1	40 μm (0.067 λ)
c_2	25 μm (0.042 λ)
t	55 μm (0.092 λ)
d_1	60 μm (0.10 λ)
d_2	20 μm (0.033 λ)

($\lambda = 600 \mu\text{m} @ 0.5 \text{ THz}$)



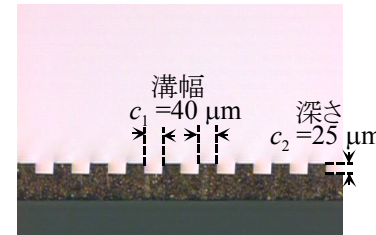
今野君
(現・日立オートモティブシステムズ株式会社)

② 金属溝周期構造レンズ

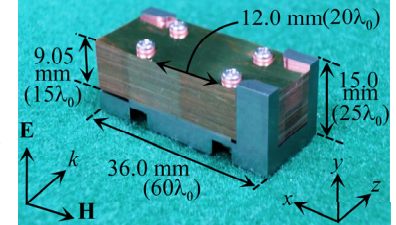


② 金属溝周期構造レンズ

超微細バイト加工

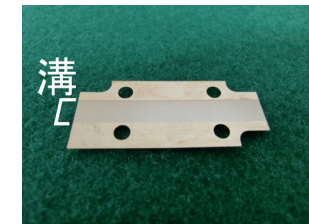


マイクロメートル精度の土台



実験での
評価・
検討中

金属溝周期構造レンズ

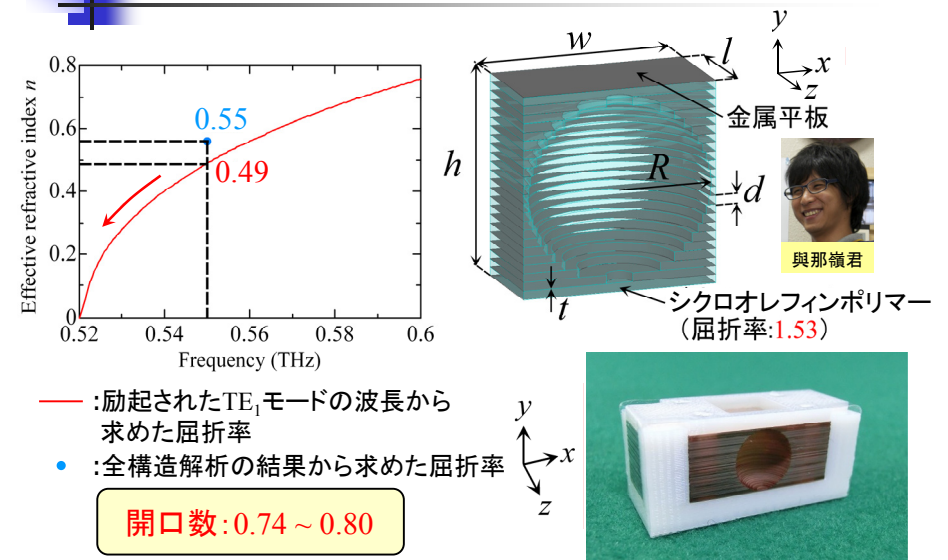


溝 63本

本発表の構成

1. 背景・目的
2. テラヘルツ波帯電磁メタマテリアルレンズの解析→設計→試作→測定
3. 各種光学素子
 - ③ 金属スリット構造 ($0 < n < 1$)
4. まとめ

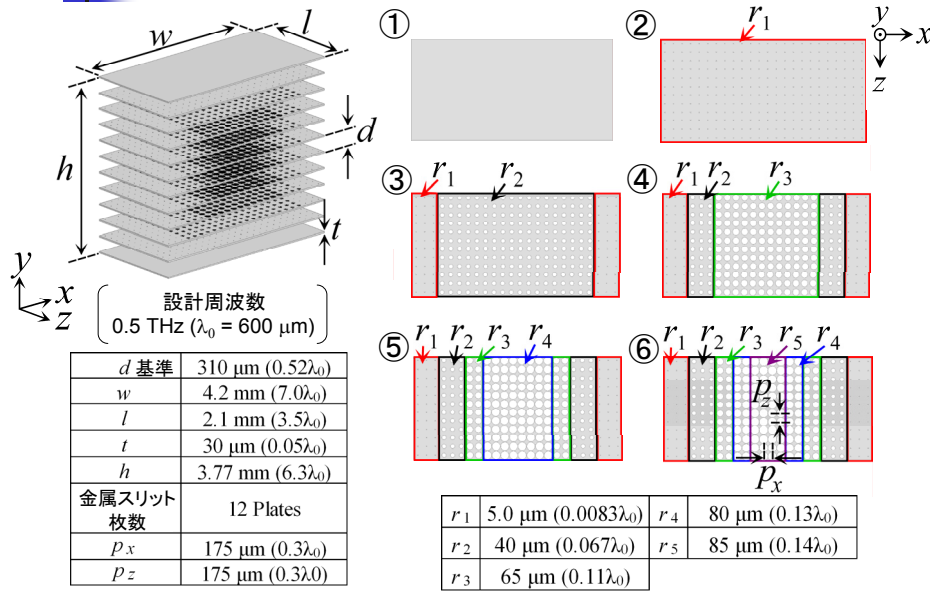
③ 金属スリット構造1



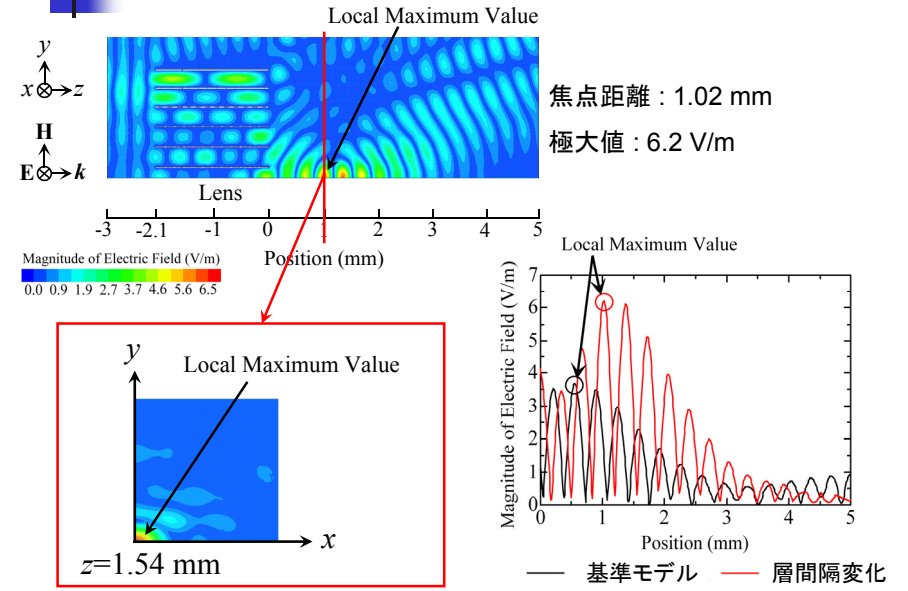
T. Suzuki, et al., META 2013, 2P1-META P6, pp. 101-102, Mar. 2013.

実験での評価・検討中

③ 金属スリット構造2



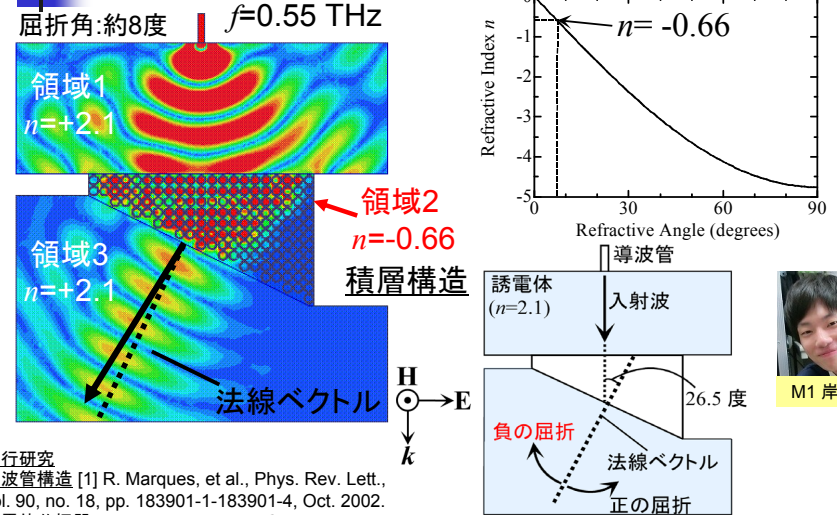
③ 金属スリット構造2



本発表の構成

1. 背景・目的
2. テラヘルツ波帯電磁メタマテリアルレンズの解析→設計→試作→測定
3. 各種光学素子
 - ④ リング+金属スリット構造 ($n < 0$)
4. まとめ

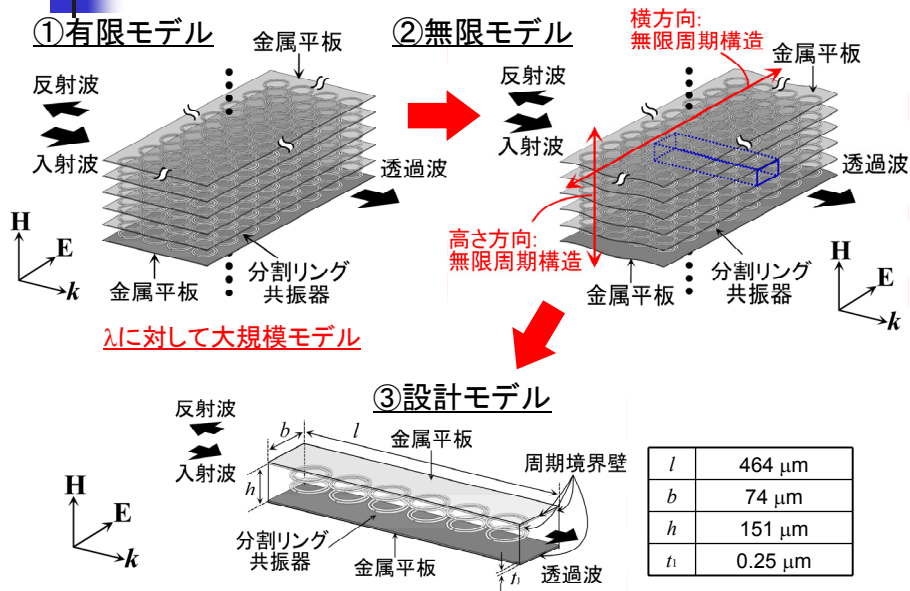
④ 分割リング+金属スリット構造



先行研究
導波管構造 [1] R. Marques, et al., Phys. Rev. Lett., vol. 90, no. 18, pp. 183901-1-183901-4, Oct. 2002.
誘電体共振器 [2] T. Ueda, et al., IEICE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 55, no. 6, pp. 1280-1287, June 2007.

金属スリット構造単体
→ 10^{-10} 以下の高消光比ワイヤーグリッド

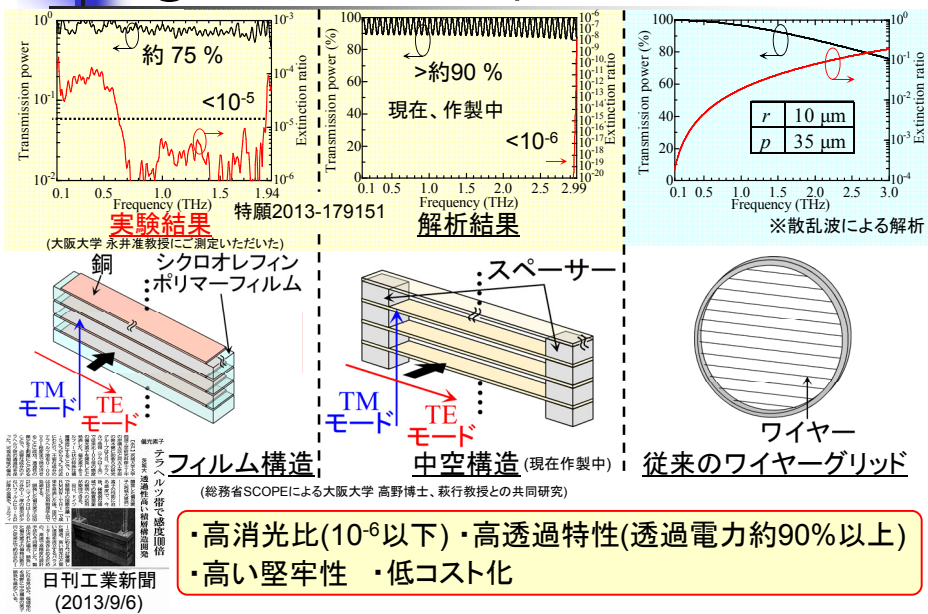
④ 分割リング+金属スリット構造



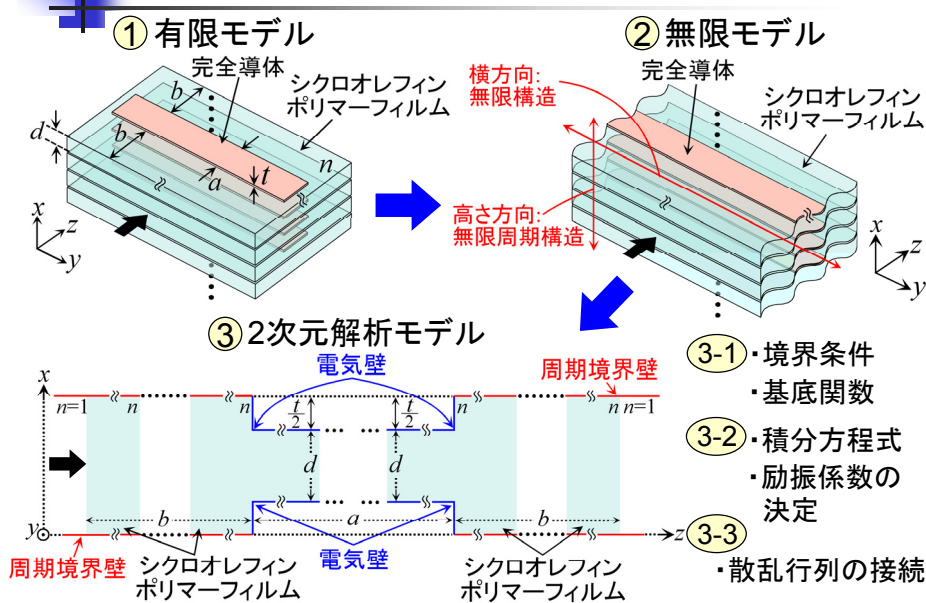
本発表の構成

1. 背景・目的
2. テラヘルツ波帯電磁メタマテリアルレンズの解析→設計→試作→測定
3. 各種光学素子
 - ⑤ 高消光比・高透過率・高堅牢・低コストなテラヘルツ波帯ワイヤーグリッド
4. まとめ

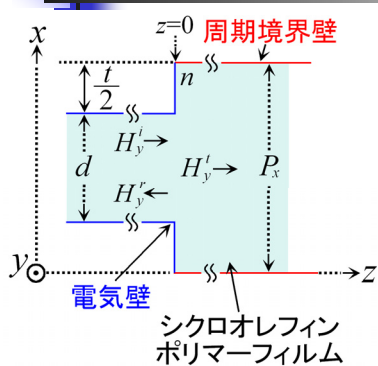
⑤ テラヘルツ波帯ワイヤーグリッド



モードマッチング法による解析



モードマッチング法による解析



3-1 境界条件

$$\begin{cases} H_y^i + H_y^r = H_y^t & (z=0) \\ E_x^i + E_x^r = E_x^t & (z=0) \end{cases}$$

$$H_y^i = e^{-jk_0 z}$$

$$H_y^r = \sum_{m=0}^{\infty} A_m \cos(m\pi x/d) e^{+jk_m z}$$

$$H_y^t = \sum_{m=1}^{\infty} B_n \sin(2n\pi x/p_x) e^{-jk_m z} + \sum_{m=0}^{\infty} C_l \cos(2l\pi x/p_x) e^{-jk_l z}$$

基底関数
重み付け

3-2 積分方程式

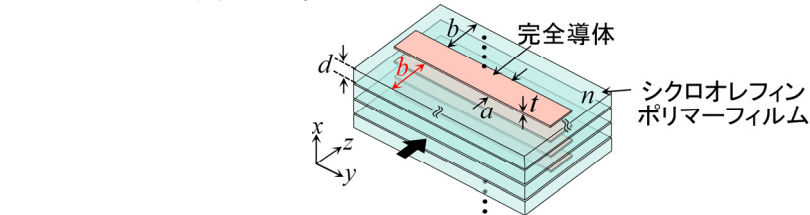
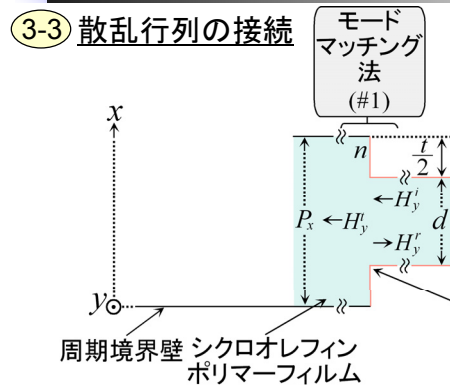
アドミタンス Y

$$\begin{bmatrix} [Y_{pm}] & [Y_{pn}] & [Y_{pl}] \\ [Y_{qm}] & [Y_{qn}] & [Y_{ql}] \\ [Y_{rm}] & [Y_{rn}] & [Y_{rl}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [A_m] \\ [B_n] \\ [C_l] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [I_p] \\ [I_q] \\ [I_r] \end{bmatrix}$$

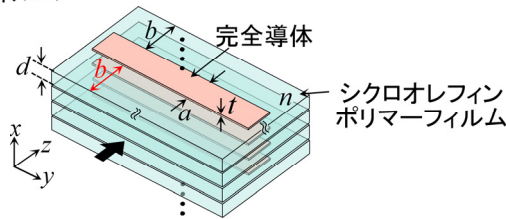
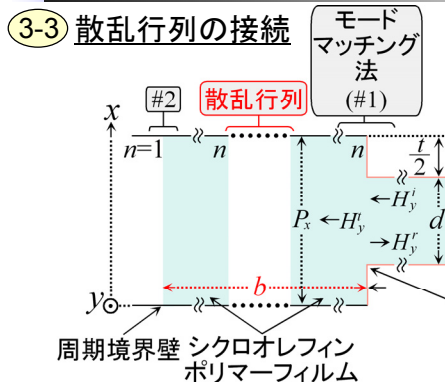
既知 未知 既知
励振係数の決定 → 散乱行列

- 入力波: TEM モード
- 反射波 } TEM モード
- 透過波 } TM モード

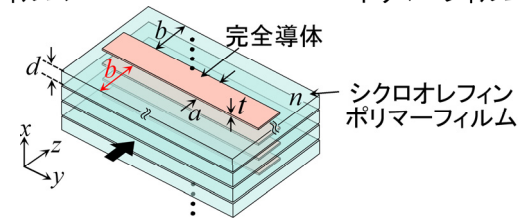
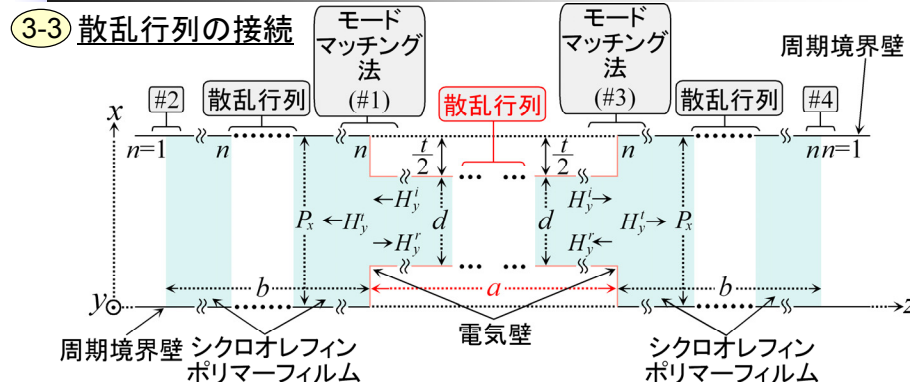
モードマッチング法による解析



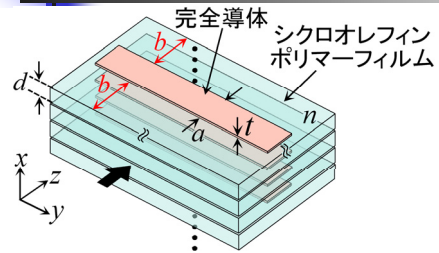
モードマッチング法による解析



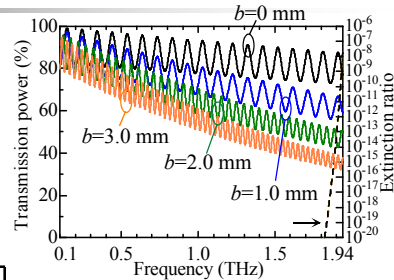
モードマッチング法による解析



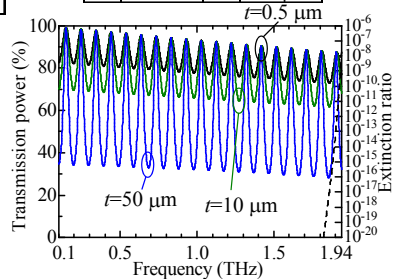
フィルム構造の解析結果



d	50 μm
n	1.53+j0.0011



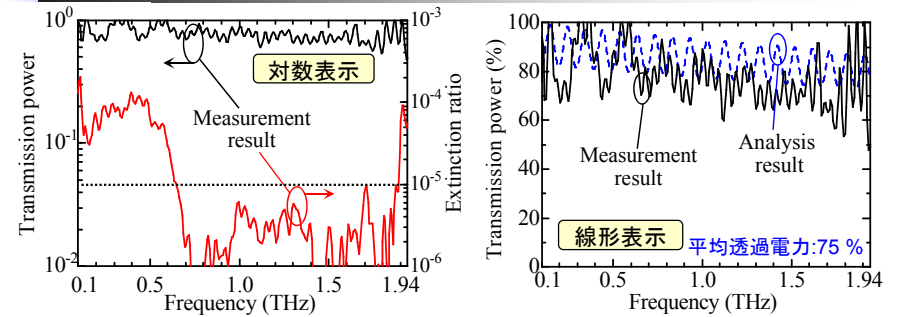
a	1.0 mm	t	0.5 μm
-----	--------	-----	-------------------



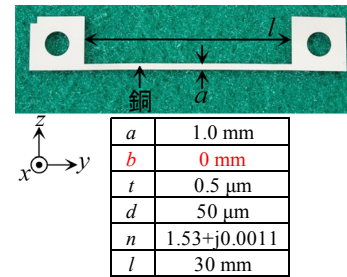
a	1.0 mm	b	0 mm
-----	--------	-----	------

モードマッチング法
 ・解析時間: 1分以内
 ・周波数範囲: 0.1~2.0 (THz)

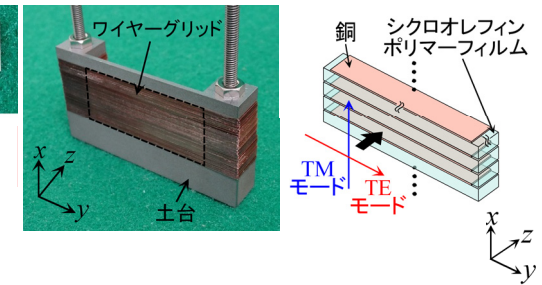
フィルム構造の実験結果



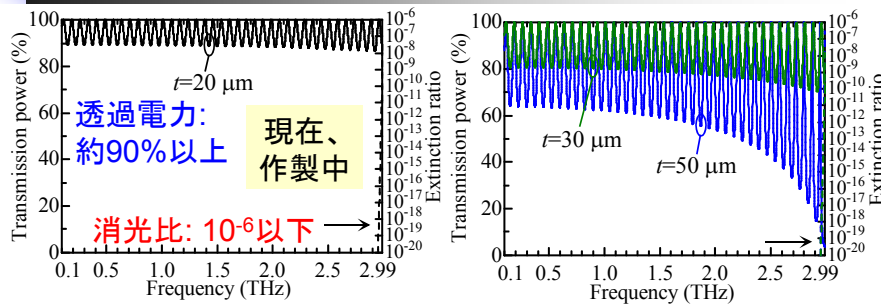
線形表示 平均透過電力: 75%



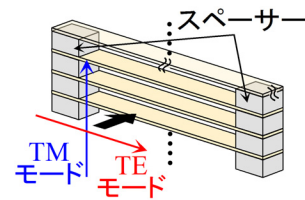
a	1.0 mm
b	0 mm
t	0.5 μm
d	50 μm
n	1.53+j0.0011
l	30 mm



中空構造の解析結果(誘電損失の除去)



a	2.0 mm	d	50 μm
-----	--------	-----	------------------

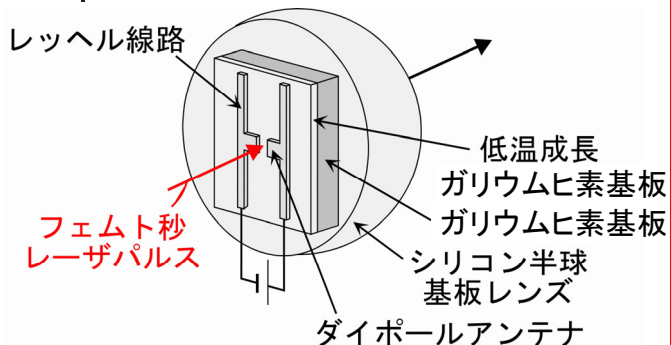


- ・高消光比(10^{-6} 以下)
- ・高透過特性(透過電力約90%以上)
- ・高い堅牢性
- ・低コスト化

本発表の構成

1. 背景・目的
2. テラヘルツ波帯電磁メタマテリアルレンズの解析→設計→試作→測定
3. 各種光学素子
 - ⑥ 積層薄フィルム構造による八木・宇田型光伝導アレーアンテナ
4. まとめ

⑥ 積層薄フィルムTHz八木・宇田アレーアンテナ



・光伝導電流による給電と受信アンテナを考慮したスペクトル解析と設計
 ・アレー化
 (大規模モデル 過渡波形)

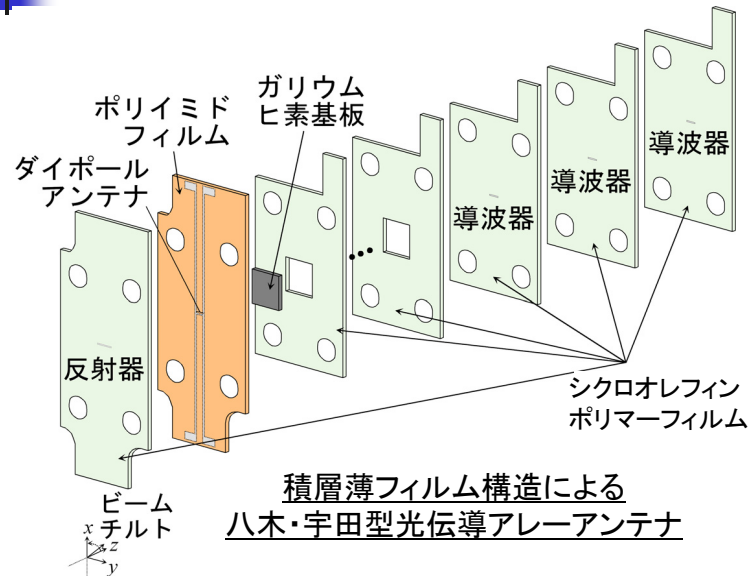
光伝導アンテナ

比較的高効率、広帯域

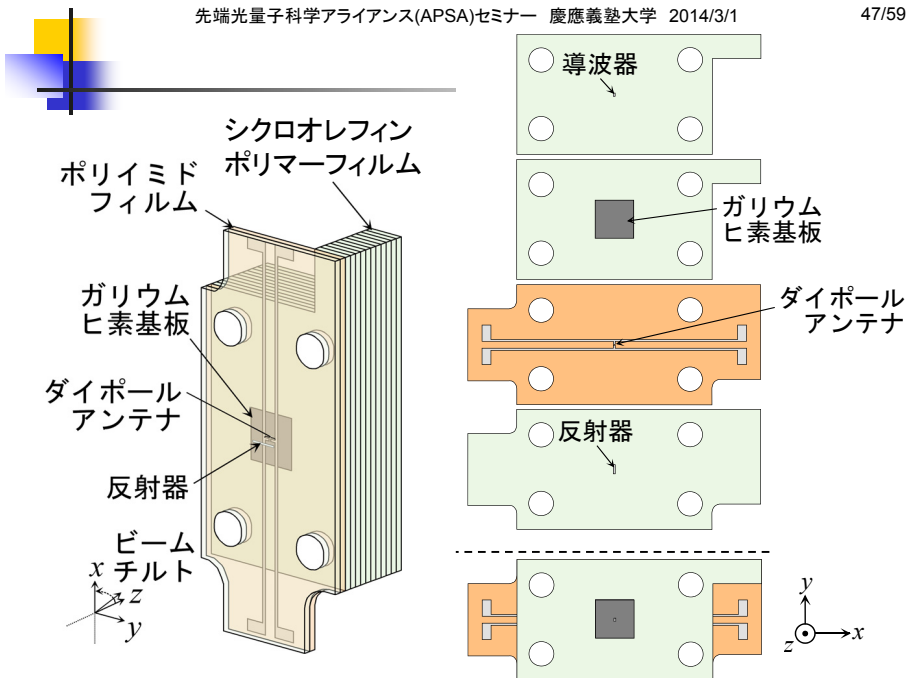
テラヘルツ波帯
 100 GHz ~ 1 THz ~ 30 THz
 (3 mm) (300 μm) (10 μm)

- ①フェムト秒レーザをダイポールのギャップ部に照射
- ②キャリアが励起され過渡電流が発生する
- ③裏面からテラヘルツ波が放射

⑥ 積層薄フィルムTHz八木・宇田アレーアンテナ



積層薄フィルム構造による八木・宇田型光伝導アレーアンテナ



⑥ 積層薄フィルムTHz八木・宇田アレーアンテナ

印刷技術の応用によるフレキシブルなアンテナの開発

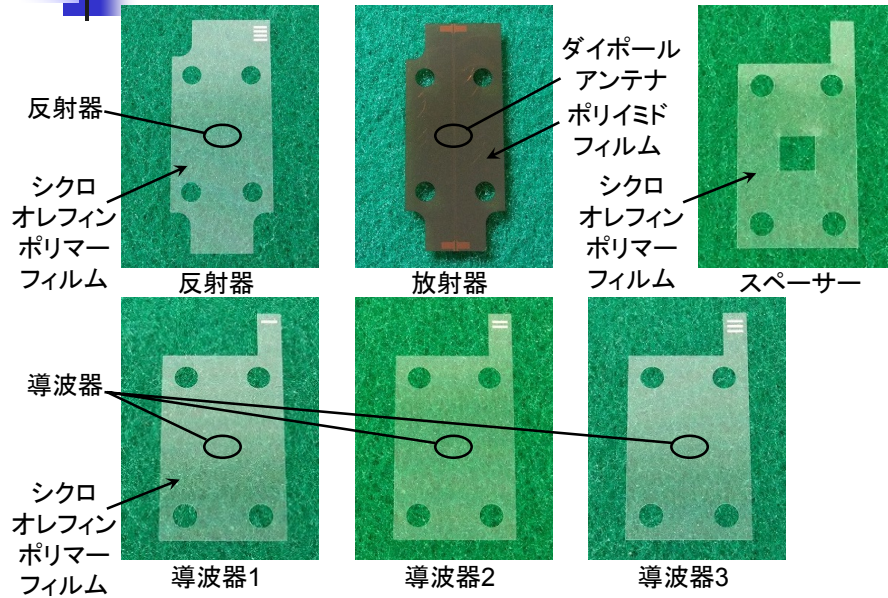
パターンめっき・転写法 (日立化成株式会社)

入江君 (現・茨城県庁)

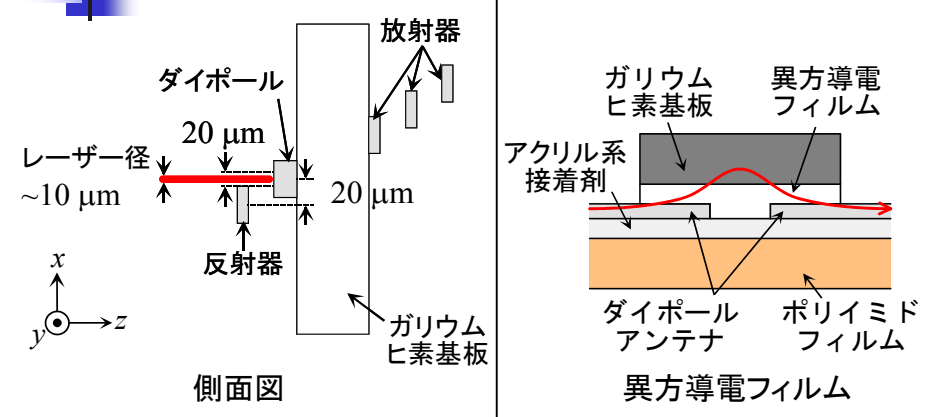
- ・安価に光伝導アンテナを作製
- ・高価な低温成長ガリウムヒ素基板の再利用の検討

初回の作製で 現在ギャップ部が通電 ➡ 今後検討を進め改善

⑥ 積層薄フィルムTHz八木・宇田アレーアンテナ



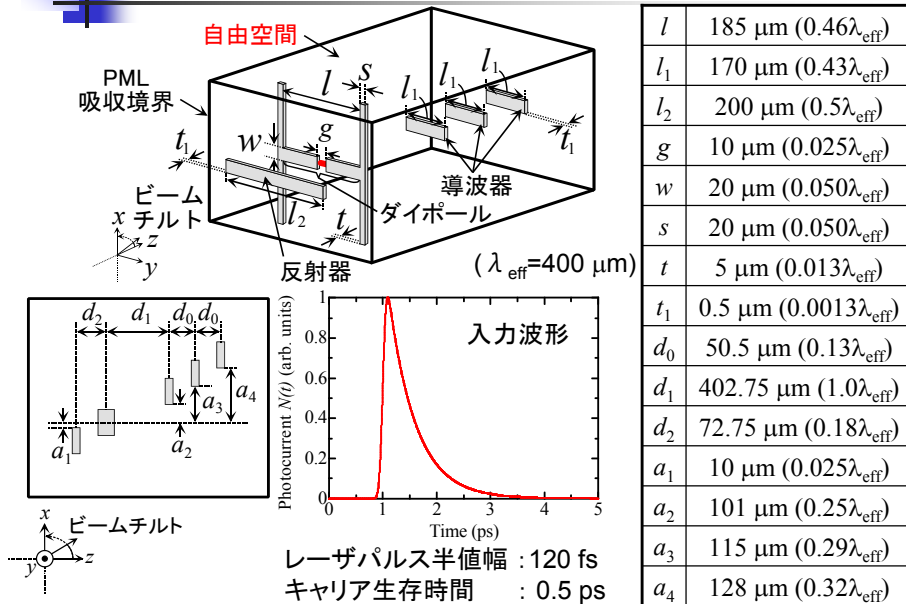
⑥ 積層薄フィルムTHz八木・宇田アレーアンテナ



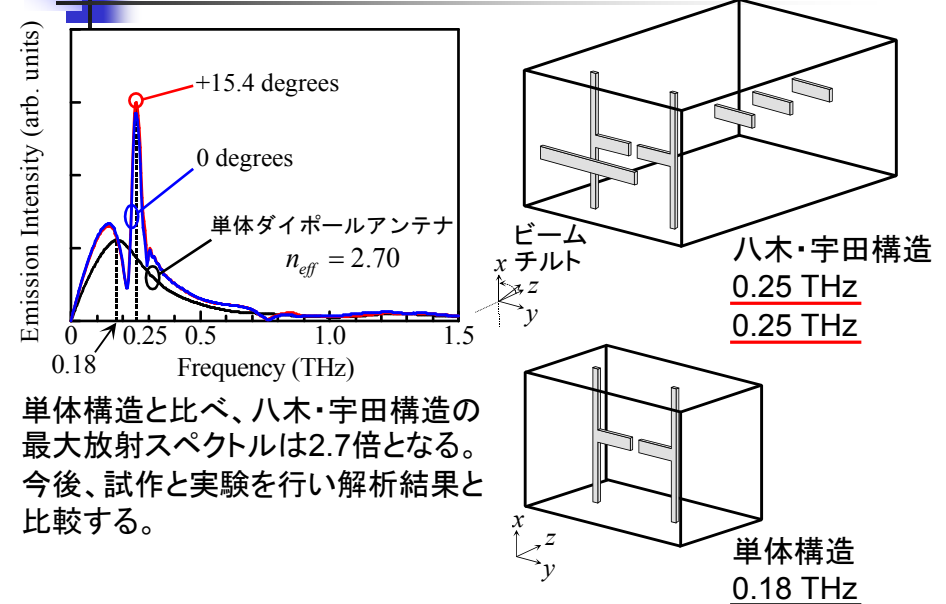
角度

$$\tan^{-1}\left(\frac{20}{72.75}\right) = 15.37$$
 (ダイポールと反射器の距離: 72.75 μm)

⑥ 積層薄フィルムTHz八木・宇田アレーアンテナ



⑥ 積層薄フィルムTHz八木・宇田アレーアンテナ

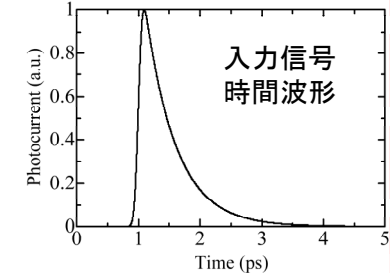
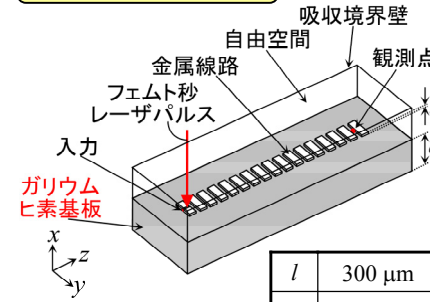


本発表の構成

1. 背景・目的
2. テラヘルツ波帯電磁メタマテリアルレンズの解析→設計→試作→測定
3. 各種光学素子
 - ⑦ 表面波を利用したテラヘルツ波帯伝送線路
4. まとめ

⑦ 表面波を利用したテラヘルツ波帯伝送線路

給電部(過渡波形)



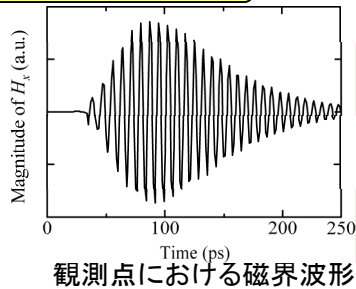
l	300 μm
w	110 μm
t	1 μm
g	3 μm
s	60 μm
d	400 μm
ϵ_r	12.25

- ① フェムト秒レーザーをダイポールのギャップ部に照射
- ② キャリアが励起され過渡電流が発生する
- ③ ダイポールに電流が流れ、テラヘルツ波が放射

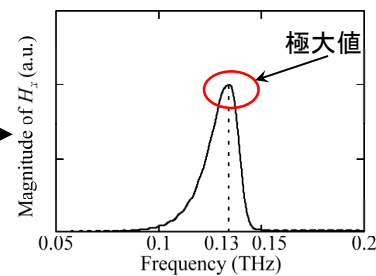
Dr. Withawat Withayachumnankul (アデレード大学)との共同研究

⑦ 表面波を利用したテラヘルツ波帯伝送線路

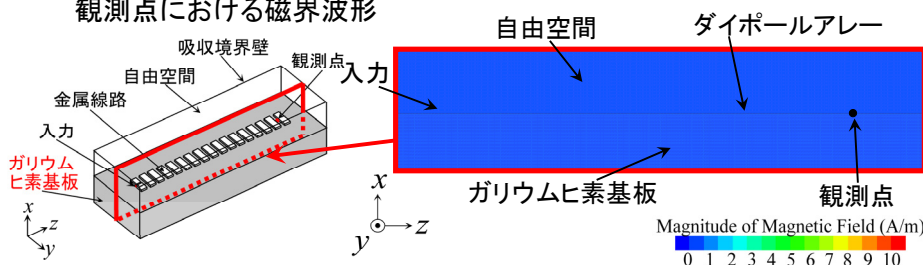
給電部(過渡波形)



フーリエ変換

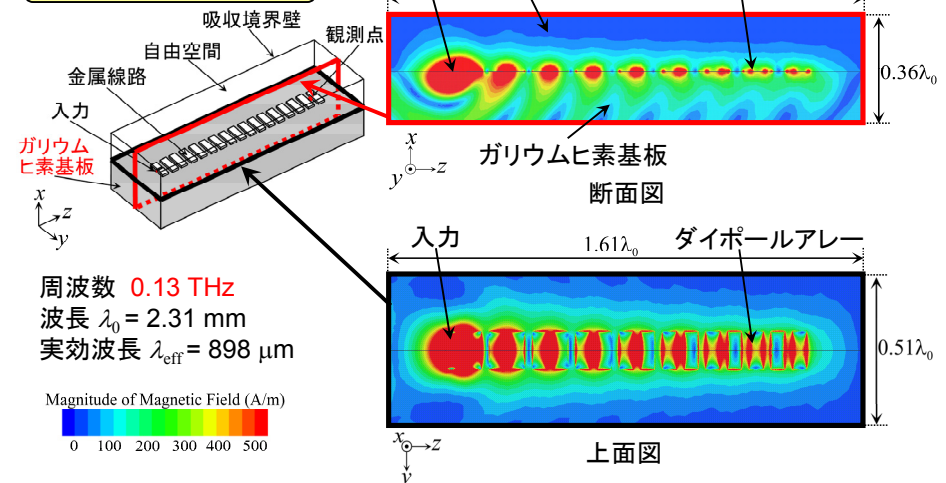


0.13 THzでの表面波伝搬を確認

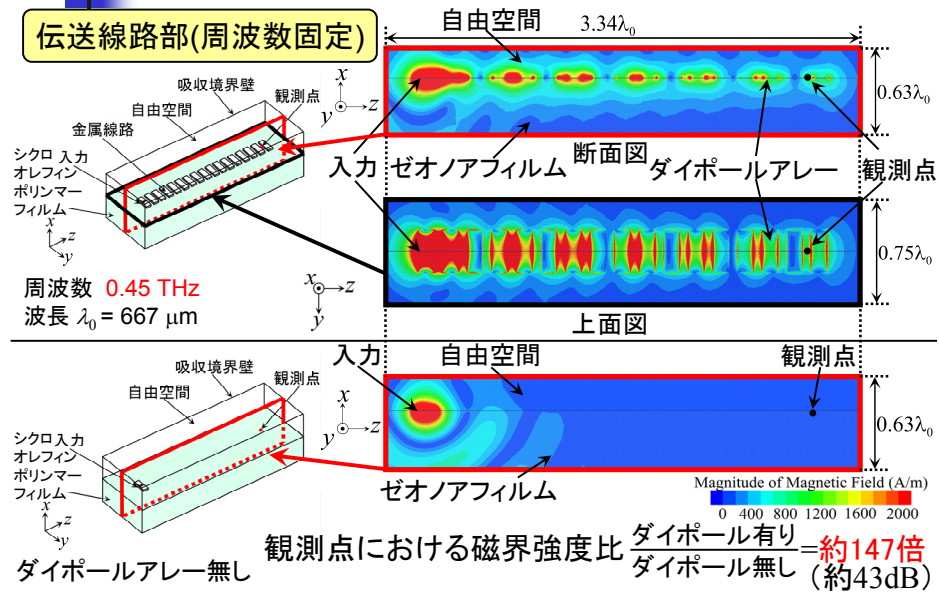


⑦ 表面波を利用したテラヘルツ波帯伝送線路

給電部(周波数固定)



⑦ 表面波を利用したテラヘルツ波帯伝送線路



謝辞

本研究の一部は、総務省SCOPE(122103011)の研究助成を受けたものです。本研究を大きく推進してくれました入江克成氏(学部・修士修了 現・茨城県庁)、今野拓矢氏(学部・修士修了 現・日立オートモティブシステムズ株式会社)、與那嶺 広樹氏(学部卒業 現・株式会社協和エクシオ)、研究室の学生、スタッフの方々に深く感謝いたします。また以下の共同研究者の皆様、日頃より貴重なアドバイスを頂いている皆様に深く感謝申し上げます。

萩行正憲教授(大阪大)、高野恵介博士(大阪大)、北原英明博士(大阪大)、谷正彦教授(福井大)、山本晃司准教授(福井大)、永井正也准教授(大阪大)、Withawat Withayachumnankul 博士(アデレード大)、御田護博士(株式会社M&M 研究所)、館野貴一様、滝田隆夫様、稲田禎一博士(左記 3 名 日立化成株式会社)、直之進様、John C. Young博士(ケンタッキー大)、広川二郎准教授(東工大)、安藤真教授(東工大)

ご清聴ありがとうございました。