

# テラヘルツ連続発振光源のための メタサーフェス

**メタアトムを使って  
電波・光・熱輻射を  
制御する**

鈴木 健仁

東京農工大学 大学院工学研究院 JST さきがけ

[takehito@go.tuat.ac.jp](mailto:takehito@go.tuat.ac.jp)

# 発表の概要

1. 極限屈折率材料の探索
2. 平面アンテナへの応用
3. 0.3THz帯RTDによる実験
4. 基礎研究と産業応用の進捗
5. 3.0THz帯への材料の高周波化
6. まとめ

# 極限屈折率材料の探索

研究紹介 極限屈折率材料の探索とテラヘルツ波帯への応用  
鈴木 健仁

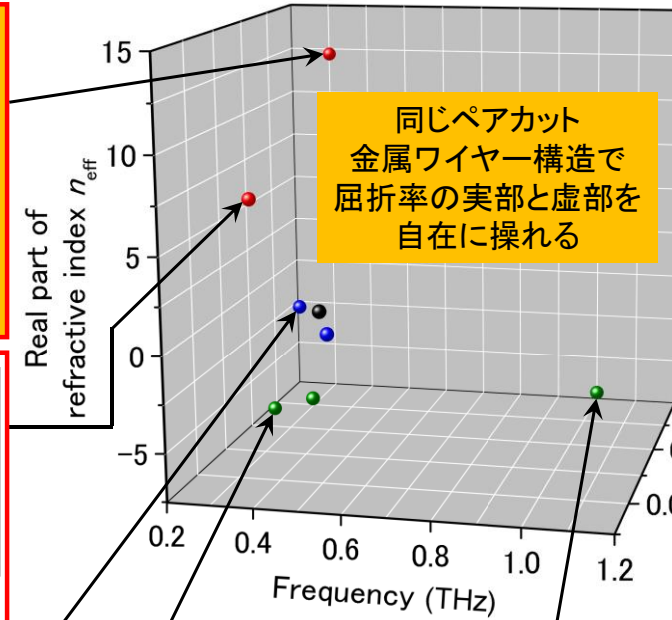
自然界に、0から無限まで連続的に変化する屈折率を持つ材料は存在しない。しかし、自然界の材料を人工的に設計することで、0から無限まで連続的に変化する屈折率を持つ材料を実現している。このように、自然界の材料を人工的に設計することで、0から無限まで連続的に変化する屈折率を持つ材料を実現している。自然界の材料を人工的に設計することで、0から無限まで連続的に変化する屈折率を持つ材料を実現している。

1. 実効誘電率  
電磁波が媒質に入射したときに生じる電場の平均値を、媒質中の電場の平均値と見做すことで、媒質の効果を単一の媒質として表現できる。これを実効誘電率と呼ぶ。媒質中の電場の平均値を、媒質中の電場の平均値と見做すことで、媒質の効果を単一の媒質として表現できる。これを実効誘電率と呼ぶ。



2. 実効磁気誘電率  
電磁波が媒質に入射したときに生じる磁場の平均値を、媒質中の磁場の平均値と見做すことで、媒質の効果を単一の媒質として表現できる。これを実効磁気誘電率と呼ぶ。媒質中の磁場の平均値を、媒質中の磁場の平均値と見做すことで、媒質の効果を単一の媒質として表現できる。これを実効磁気誘電率と呼ぶ。

- 高屈折率材料
- ゼロ屈折率材料
- 負の屈折率材料
- 自然界の材料 (シクロオレフィンポリマー)



© 2017 IEEE © 2017 IEEE  
 $n_{\text{eff}} = 12 + j0.92(0.31 \text{ THz})$   
 反射電力5.1% 透過電力73%

$n_{\text{eff}} = 6.7 + j0.12(0.31 \text{ THz})$   
 反射電力1.2% 透過電力92%

© 2017 IEEE  
 $n_{\text{eff}} = -0.38 + j0.45(0.34 \text{ THz})$   
 反射電力5.8% 透過電力88%

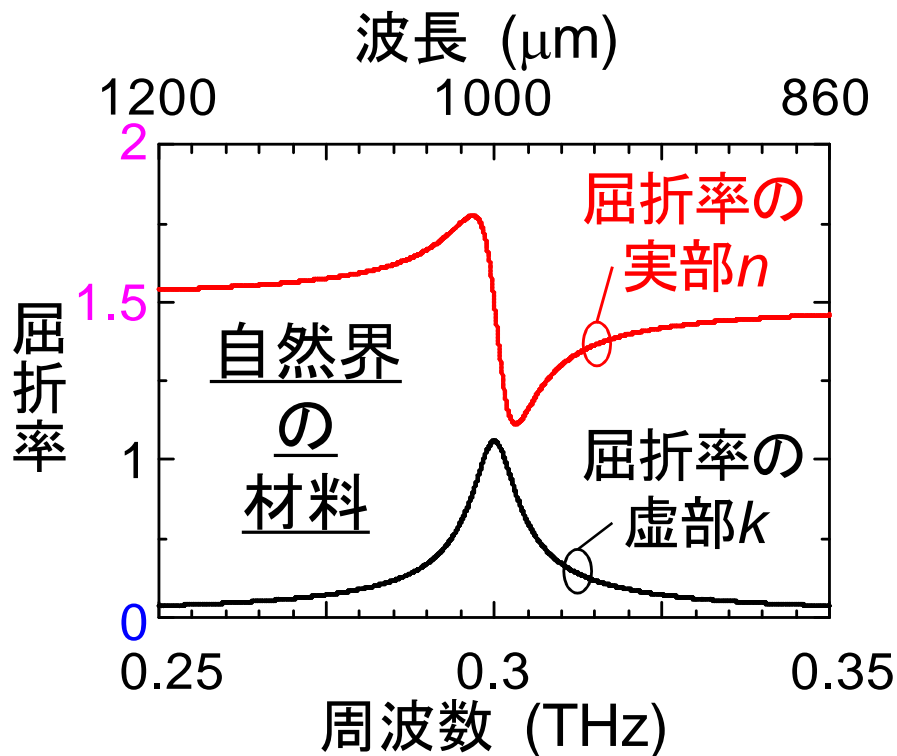
© 2017 IEEE  
 $n_{\text{eff}} = -5.4 + j0.32(0.31 \text{ THz})$   
 反射電力23% 透過電力57%

$n_{\text{eff}} = -5.1 + j0.61(1.05 \text{ THz})$   
 反射電力31% 透過電力31%

- ・ 応用物理 2017年10月号
- ・ 電気学会誌 2017年6月号
- ・ 電子情報通信学会誌 2016年2月号
- ・ 特開2017-157975
- ・ 特開2017-034584

- ・ T. Suzuki and S. Kondoh, Optical Materials Express, vol. 8, no.6, 2018.
- ・ T. Suzuki, M. Sekiya, T. Sato, and Y. Takebayashi, Optics Express, vol. 26, no.7, pp.8314-8324, Apr. 2018.
- ・ K. Ishihara and T. Suzuki, Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, vol. 38, no. 9, pp. 1130-1139, Sep. 2017. (招待論文)

# 電波・光・熱輻射の反射を制御したい



熱輻射は電磁波なので、  
光のアナロジーで考えられる。  
光の反射を位相まで考えると

$$\text{屈折率} = n + jk$$

$$\text{反射} = \left| \frac{n + jk - 1}{n + jk + 1} \right|^2 \times 100$$

$$= \frac{(n - 1)^2 + k^2}{(n + 1)^2 + k^2} \times 100$$

$$\rightarrow 67\% \text{ 反射 } (n \rightarrow 10)$$

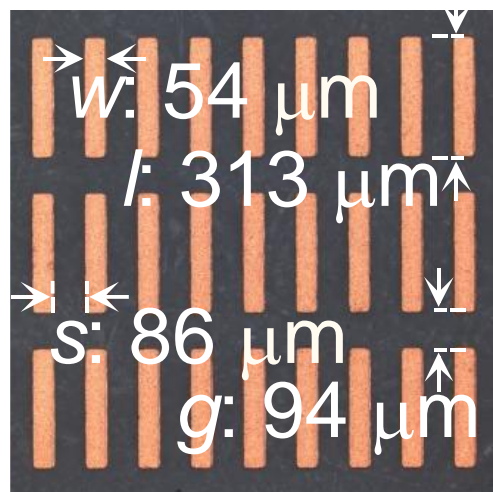
$$\rightarrow 100\% \text{ 反射 } (n \rightarrow 0)$$

普通の物質面では、屈折率  $n=10$ ・無反射材料は実現できない。  
→人工的な物質面(メタ・サーフェス)で実現する。

低周波(0.3THz帯)では高屈折率無反射材料を既に実現

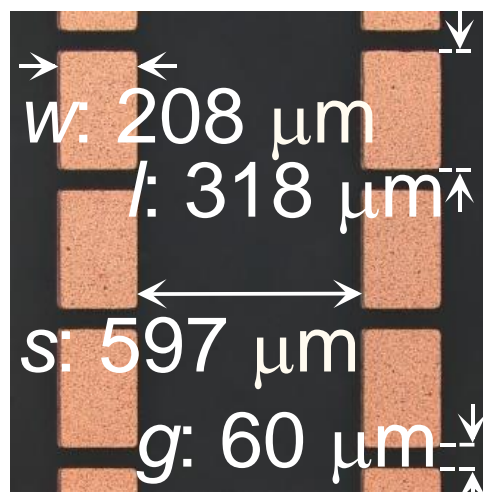
# メタサーフェスで屈折率の極限を作る

メタサーフェス上のメタアtomの面積のみで、  
屈折率・反射・透過を自由に制御した  
極限屈折率材料を創製できる。



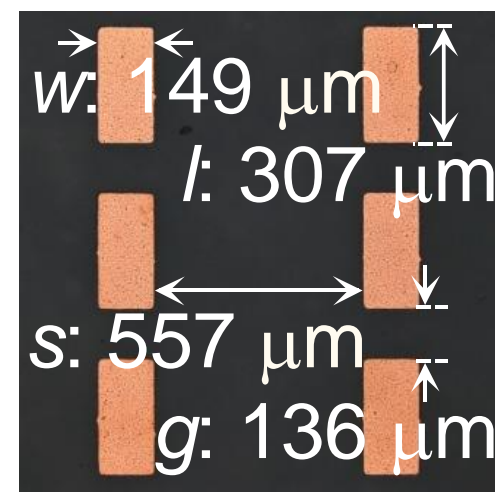
メタサーフェス(1)

超高屈折率・  
無反射材料



メタサーフェス(2)

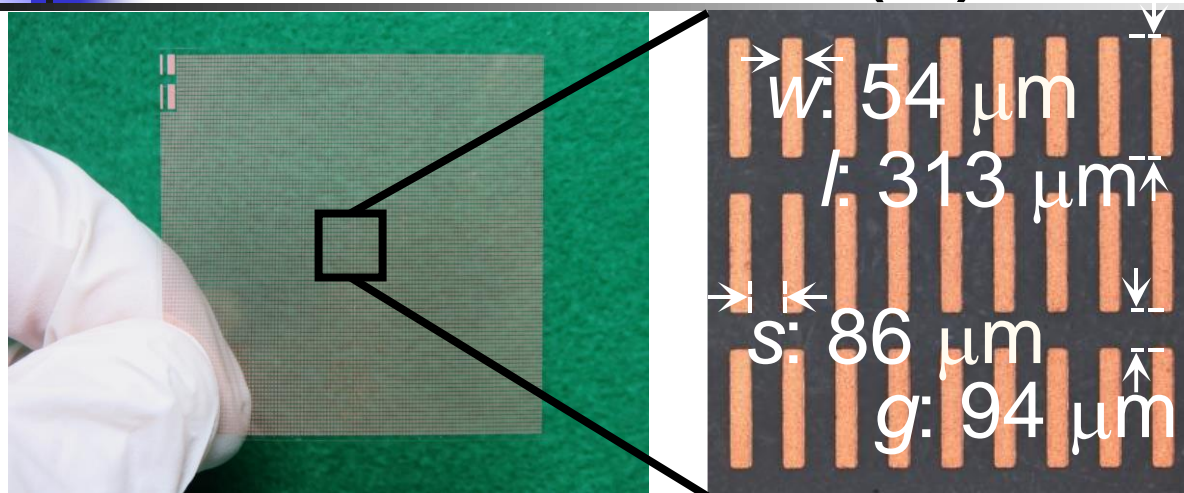
ゼロ屈折率・  
無反射材料



メタサーフェス(3)

負の屈折率・  
無反射材料

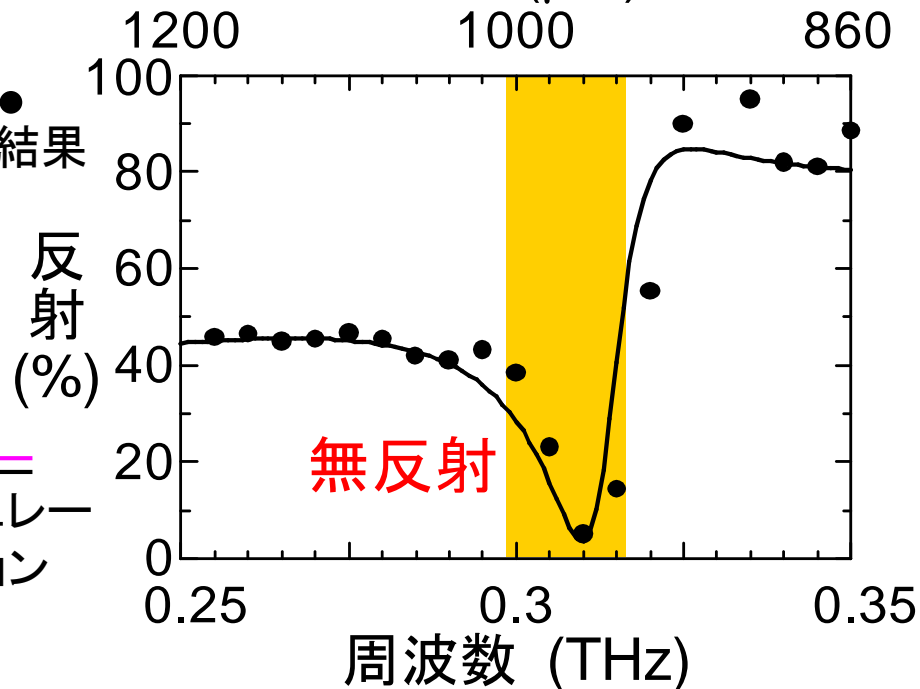
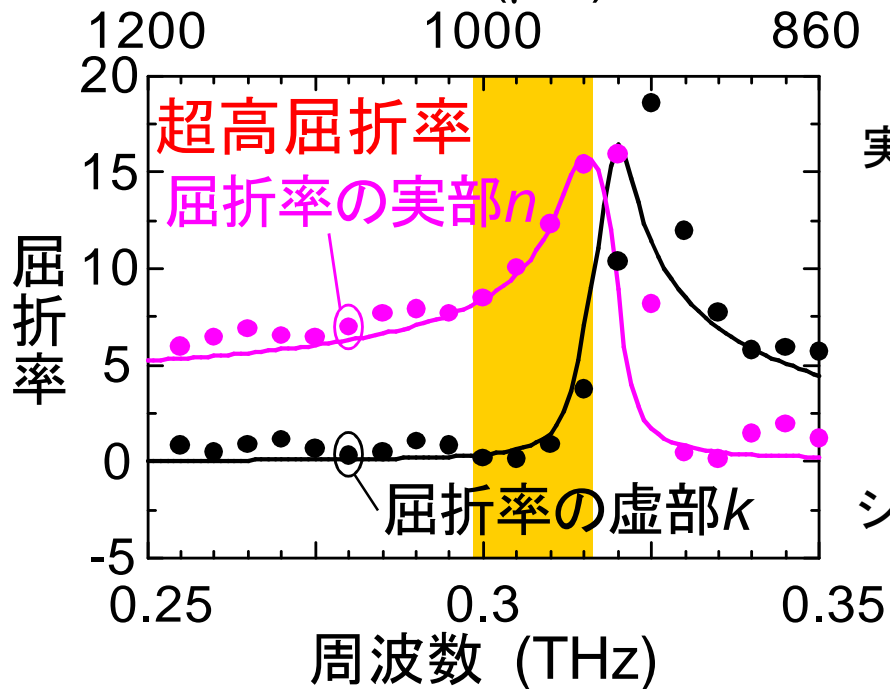
# メタサーフェス(1)



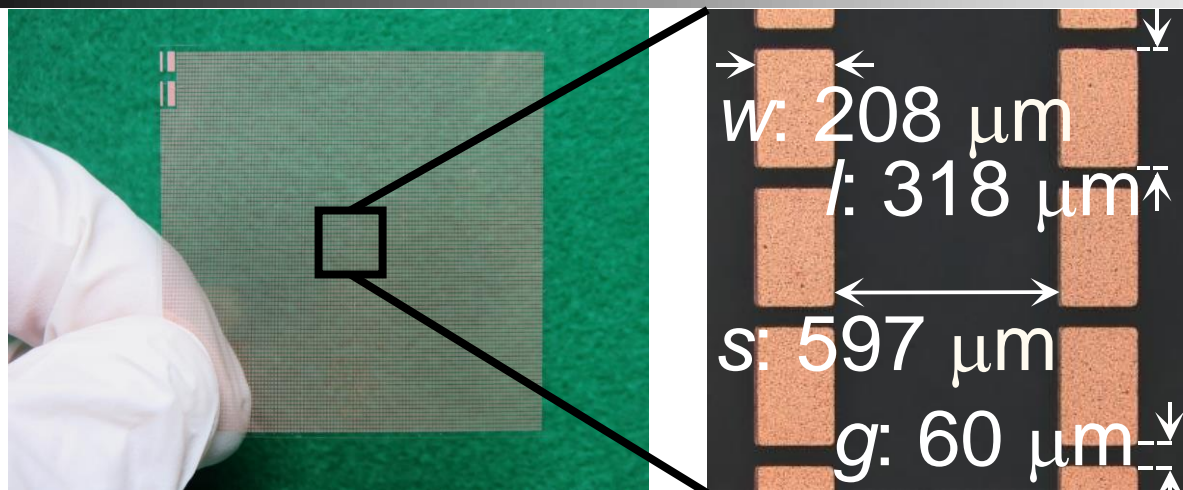
メタアトム  
 54 $\mu\text{m}$   $\times$  313 $\mu\text{m}$   
 間隔  
 横86 $\mu\text{m}$  縦94 $\mu\text{m}$

波長 ( $\mu\text{m}$ )

波長 ( $\mu\text{m}$ )



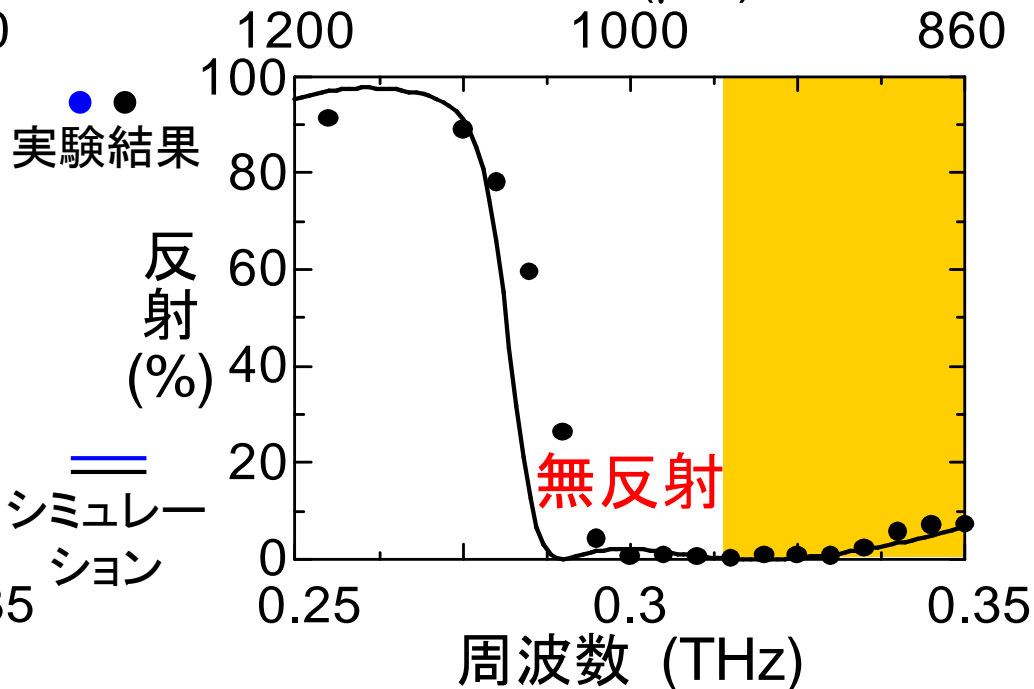
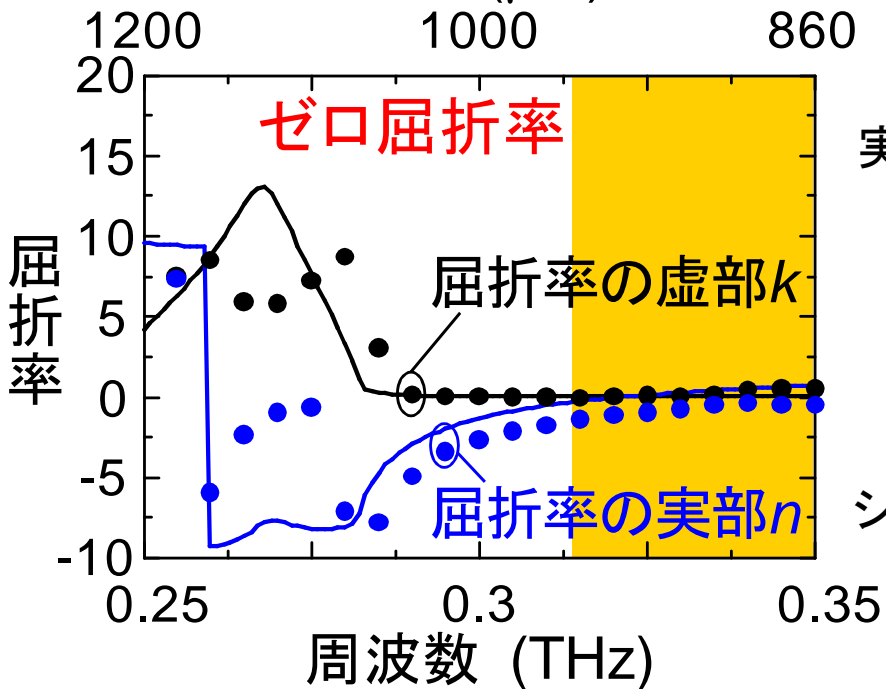
# メタサーフェス(2)



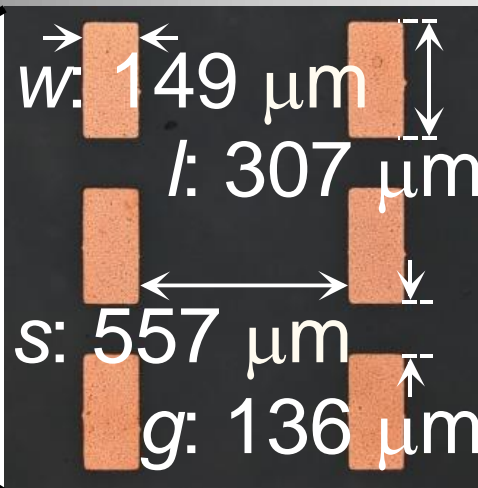
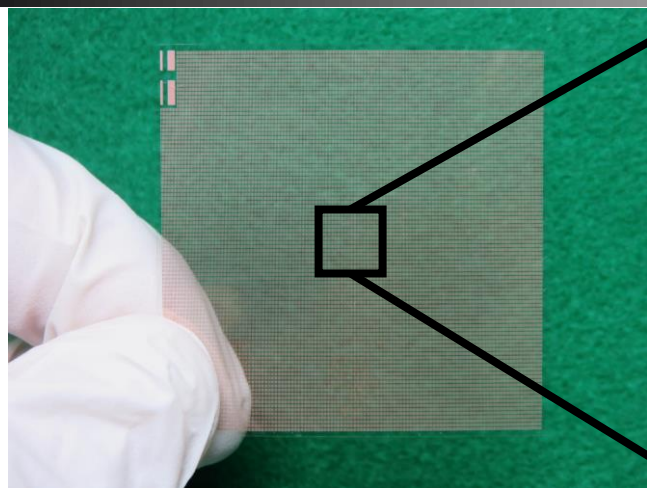
メタアトム  
 208 $\mu\text{m}$  × 318 $\mu\text{m}$   
 間隔  
 横597 $\mu\text{m}$  縦60 $\mu\text{m}$

波長 ( $\mu\text{m}$ )

波長 ( $\mu\text{m}$ )



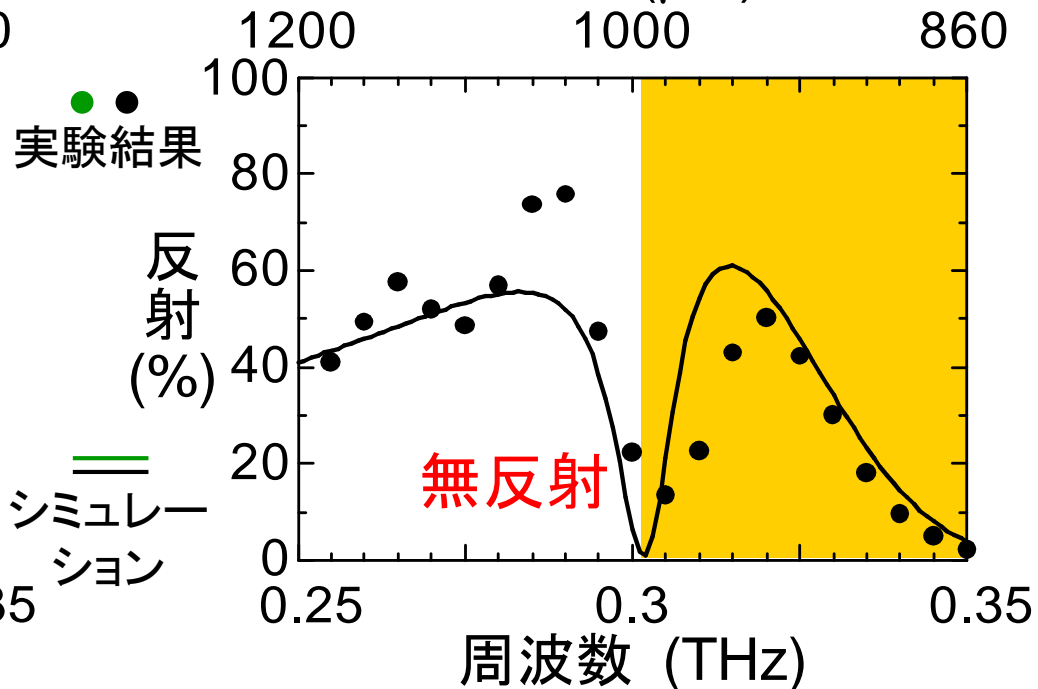
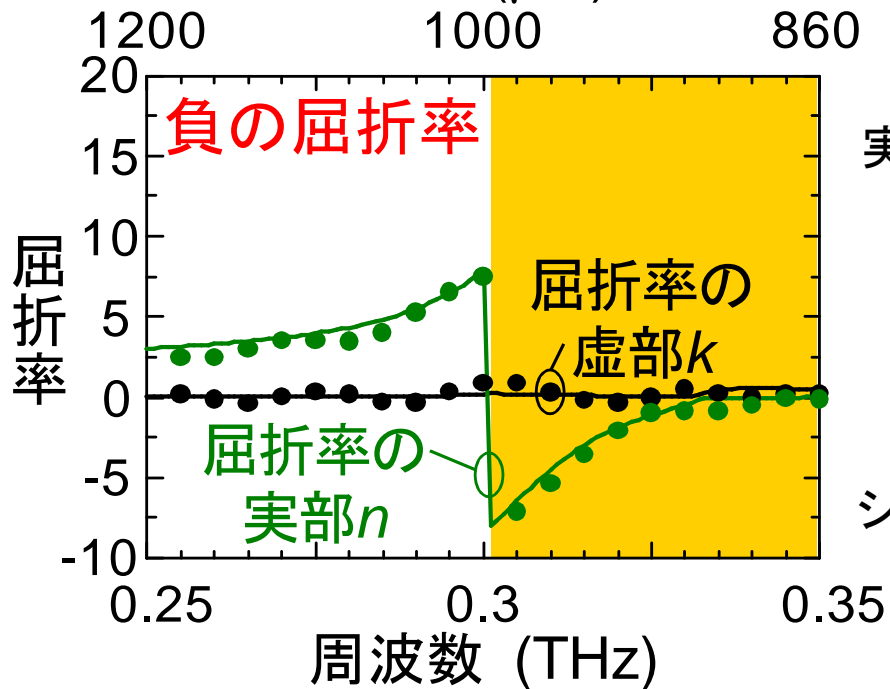
# メタサーフェス(3)



メタアトム  
 $149\mu\text{m} \times 307\mu\text{m}$   
 間隔  
 横 $557\mu\text{m}$  縦 $136\mu\text{m}$

波長 ( $\mu\text{m}$ )

波長 ( $\mu\text{m}$ )

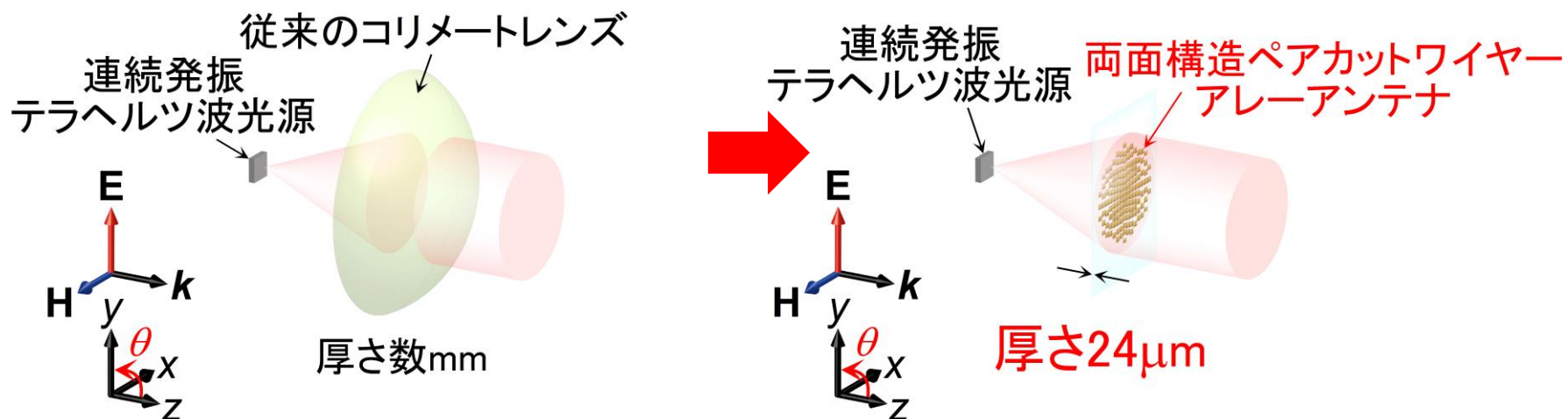




# 発表の概要

1. 極限屈折率材料の探索
2. 平面アンテナへの応用
3. 0.3THz帯RTDによる実験
4. 基礎研究と産業応用の進捗
5. 3.0THz帯への高周波化
6. まとめ

# 0.3THz帯での応用例



球面状に広がるテラヘルツ波を指向性利得の高い平面波に変換

## アプリケーション

高速無線通信  
T. Nagatsuma et al.,  
Nat. Photonics **10**,  
371 (2016).

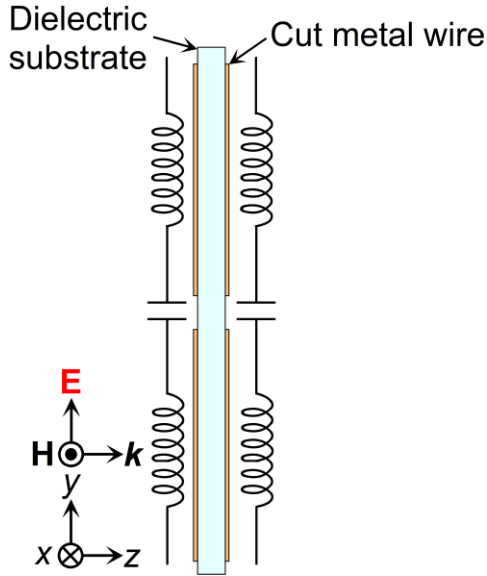
共鳴トンネルダイオード  
を用いたイメージング  
T. Miyamoto et al., Jpn.  
J. Appl. Phys. **55**,  
032201 (2016).

## 目的

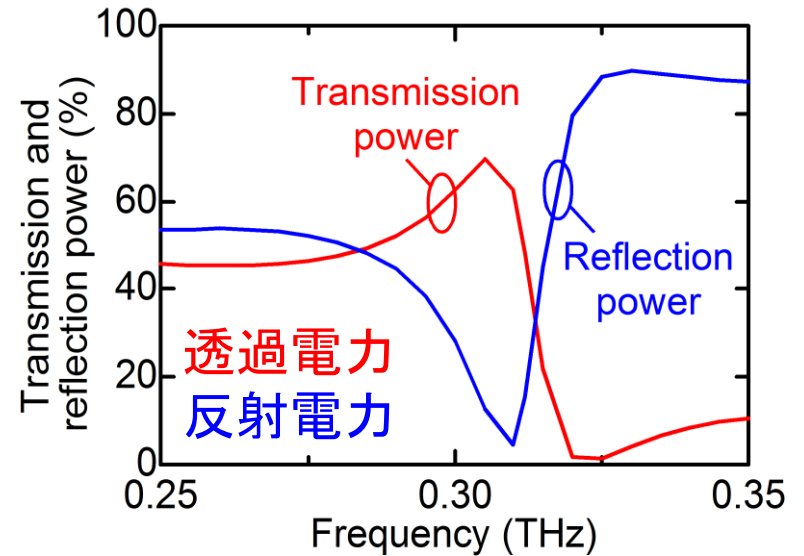
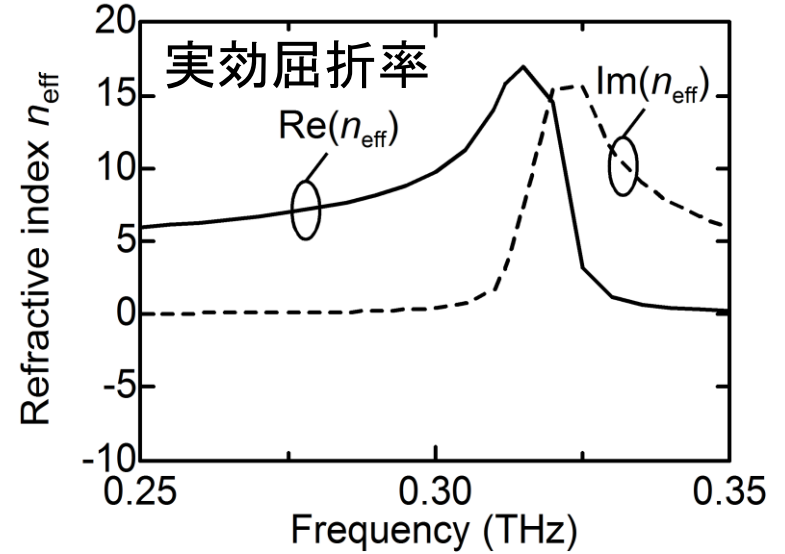
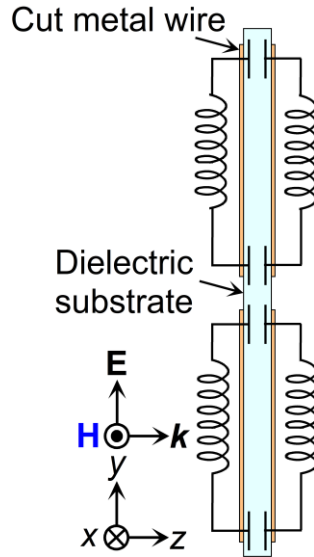
0.3 THz帯両面構造  
ペアカットワイヤー  
アレーアンテナによる  
テラヘルツCW光源の  
出力向上と指向性制御

# メタサーフェスの動作原理

## 誘電性の共振



## 磁性の共振



屈折率  $n = \sqrt{\epsilon_r} \times \sqrt{\mu_r}$

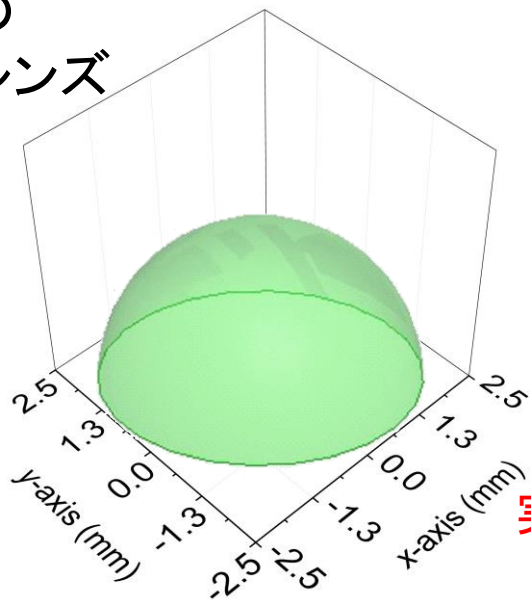
比インピーダンス  $Z_r = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}}$

$n_{\text{eff}} = 15.8 + j3.15$

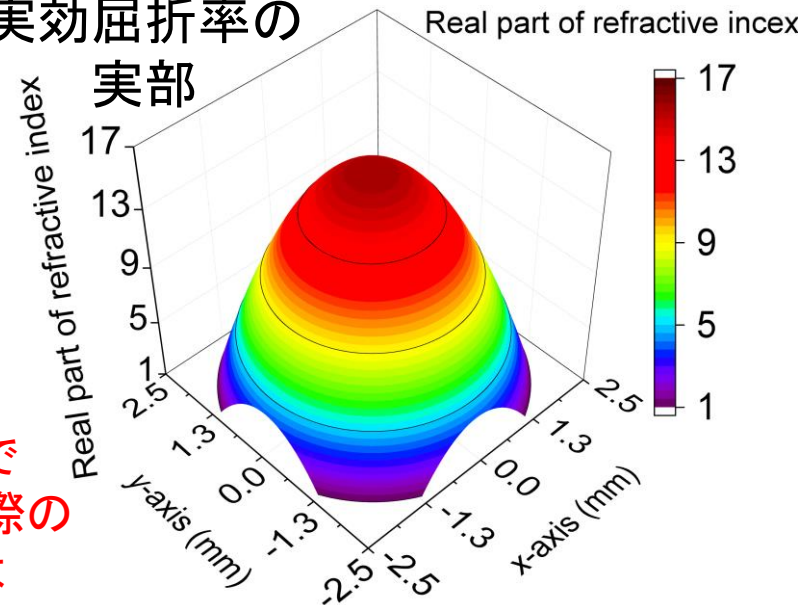
透過電力48.3% 反射電力15.3%  
at the 0.312 THz

# 従来のコリメートレンズ

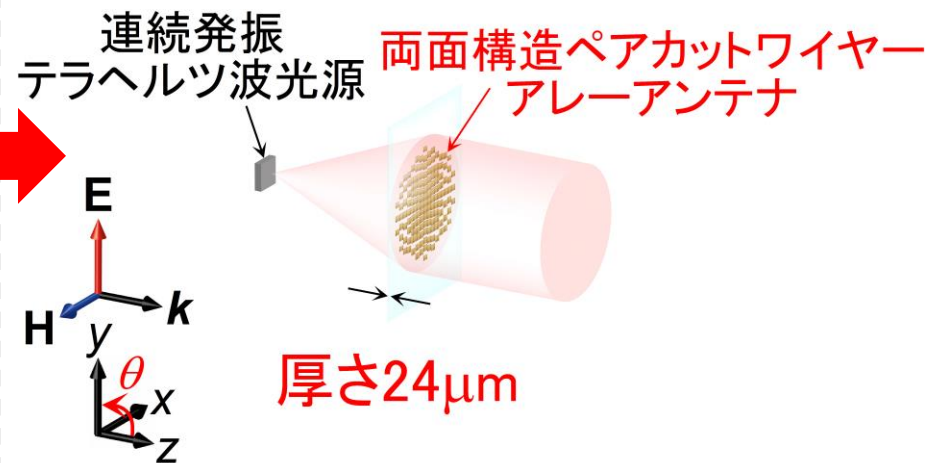
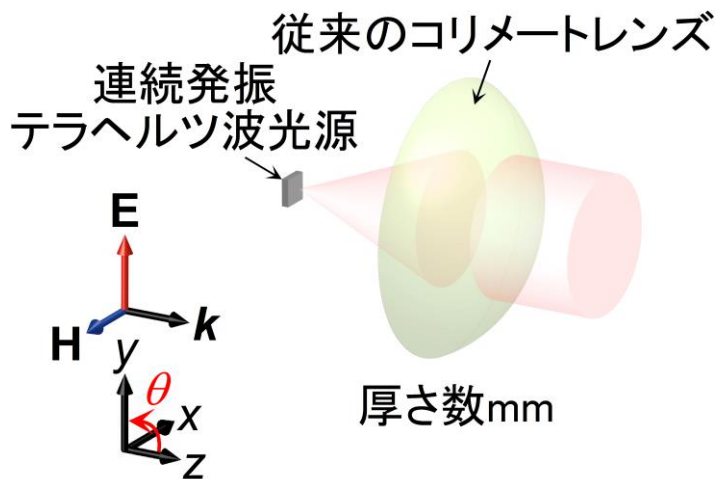
従来の  
コリメートレンズ



実効屈折率の  
実部



もし平面構造で  
実現しようとした際の  
屈折率分布は



# 発表の概要

1. 極限屈折率材料の探索

2. 平面アンテナへの応用

3. 0.3THz帯RTDによる実験

関谷 允志, 金 在瑛, 鈴木 健仁, "両面構造ペアカットワイヤーアレーアンテナによる0.3THz帯共鳴トンネルダイオードの指向性の向上と制御," 2019年第66回応用物理学春季学術講演会, 11p-S421-12, 東京工業大学, Mar. 2019.

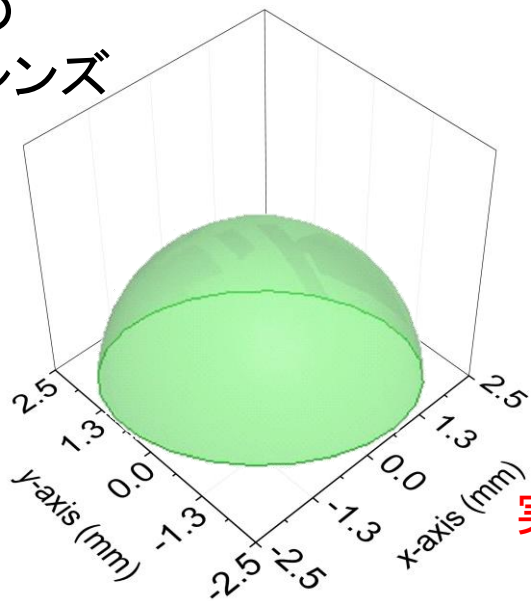
4. 基礎研究と産業応用の進捗

5. 3.0THz帯への高周波化

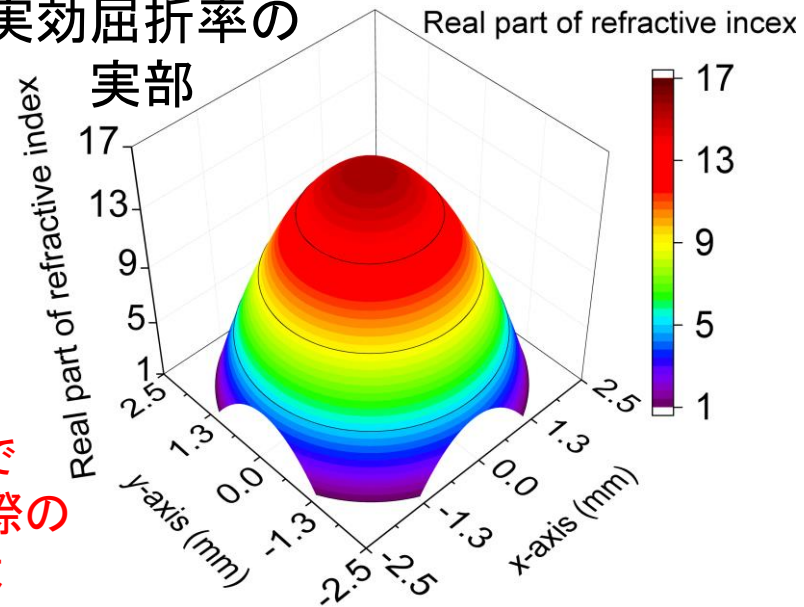
6. まとめ

# 共鳴トンネルダイオードへの実装

従来の  
コリメートレンズ



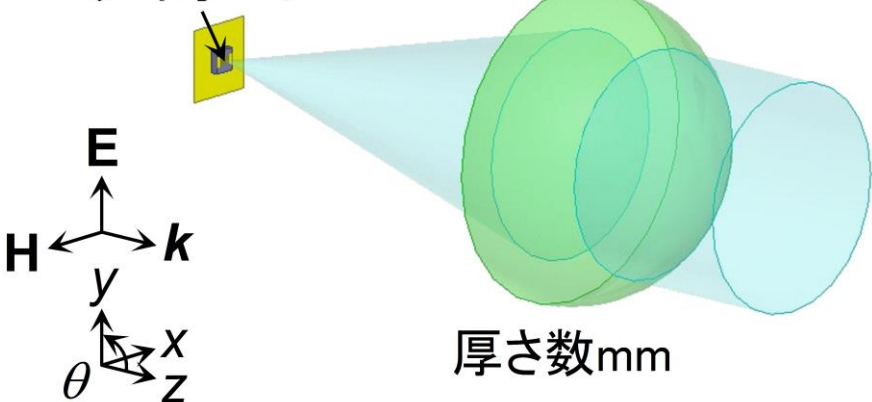
実効屈折率の  
実部



もし平面構造で  
実現しようとした際の  
屈折率分布は

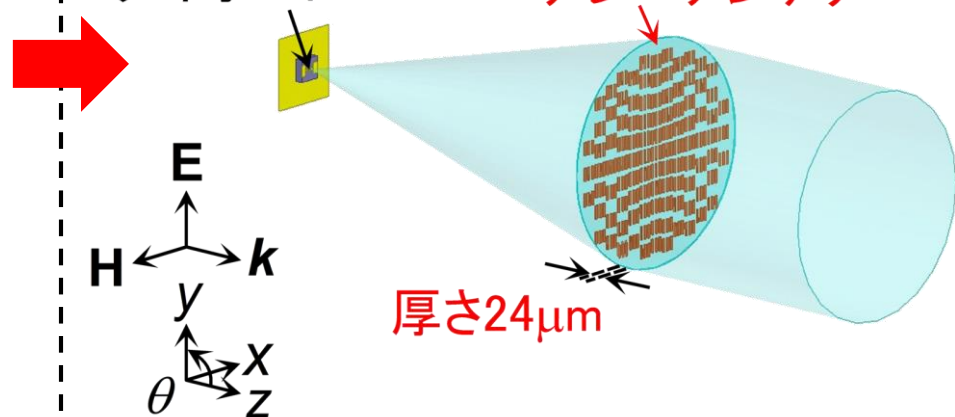
共鳴トンネル  
ダイオード

従来のコリメートレンズ



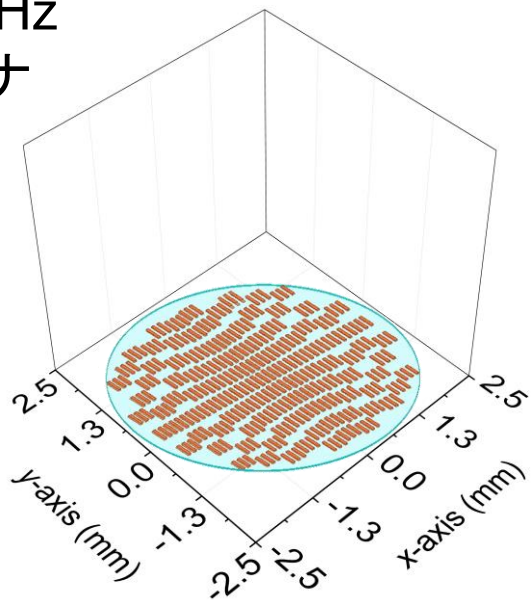
共鳴トンネル  
ダイオード

両面構造ペアカットワイヤー  
アレーアンテナ

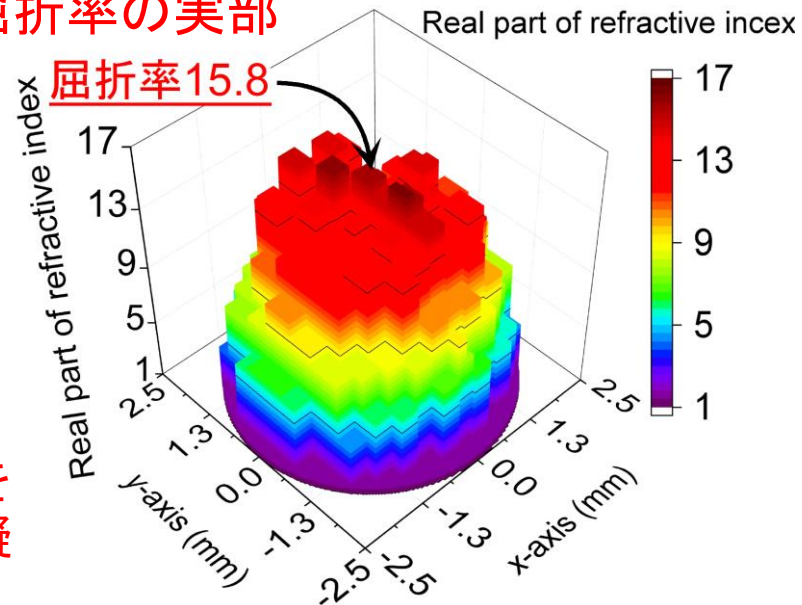


# 共鳴トンネルダイオードへの実装

0.312 THz  
アンテナ

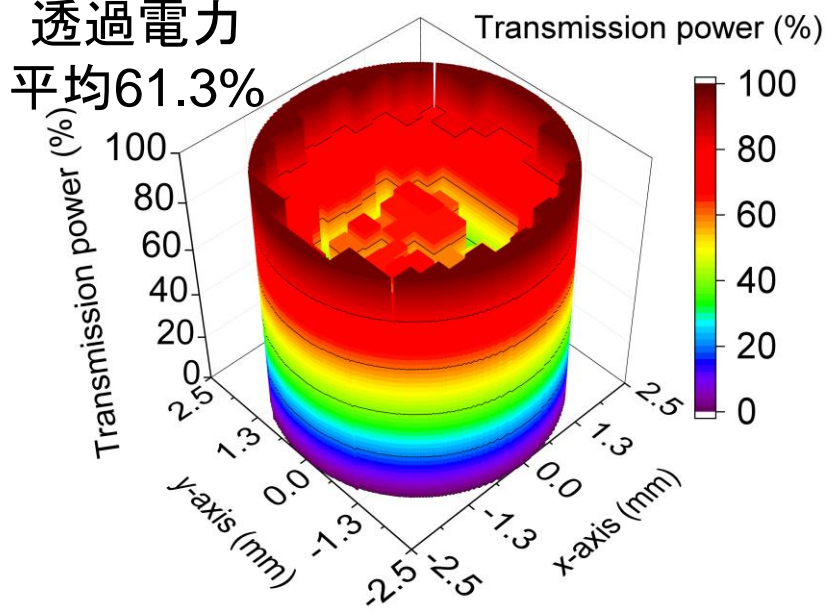


実効屈折率の実部

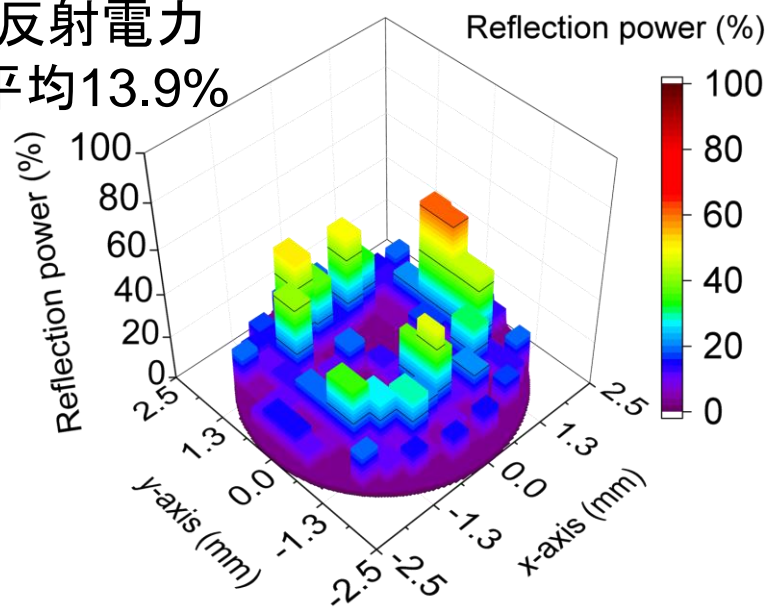


理想的な  
屈折率配置を  
離散的に模擬

透過電力  
平均61.3%



反射電力  
平均13.9%



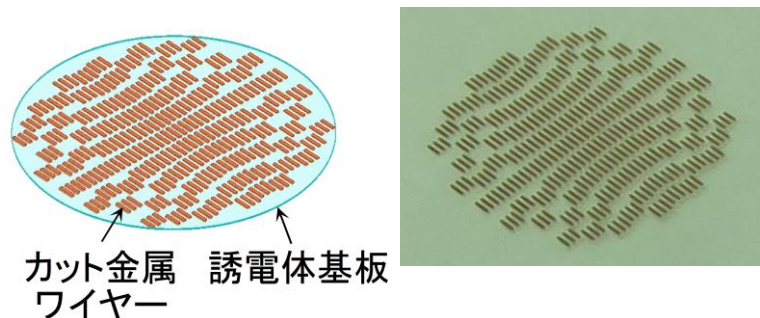
# アンテナ上で用いた材料特性

$l = 310 \mu\text{m}, g = 50 \mu\text{m}$

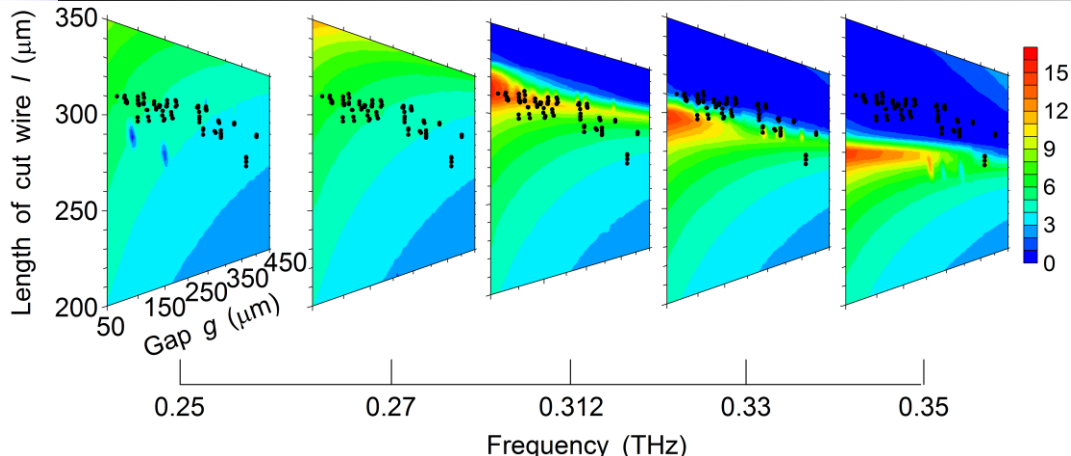
Frequency (THz)	0.25	0.27	0.312	0.33	0.35
Real part of a refractive index	6.34	7.1	15.6	13.6	6.81
Reflection power (%)	58.8	58.2	9.62	91.5	90.6

任意の周波数帯で  
高屈折率、低反射を設計できる。

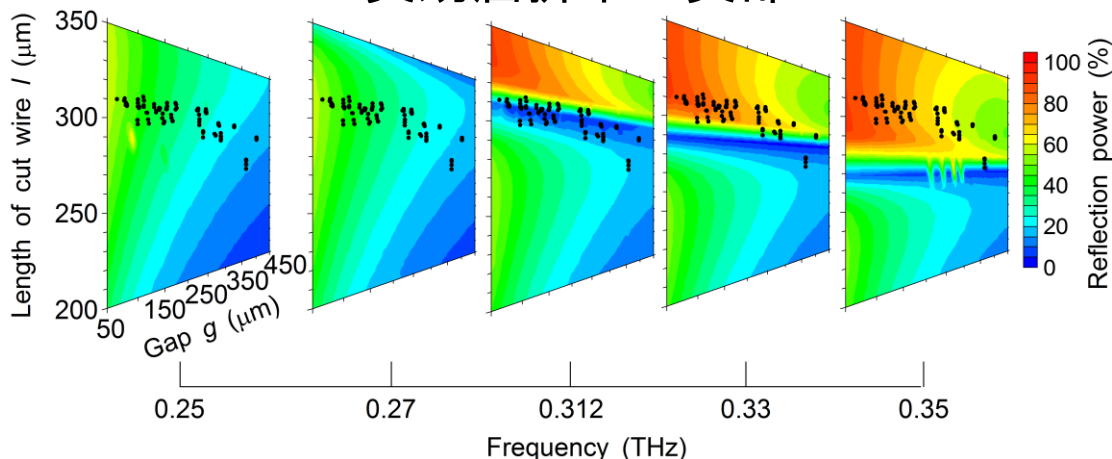
両面構造ペアカットワイヤー  
アレーアンテナの設計に活用



0.312 THz  
焦点距離10 mm  
両面構造ペアカットワイヤー  
アレーアンテナ



実効屈折率の実部

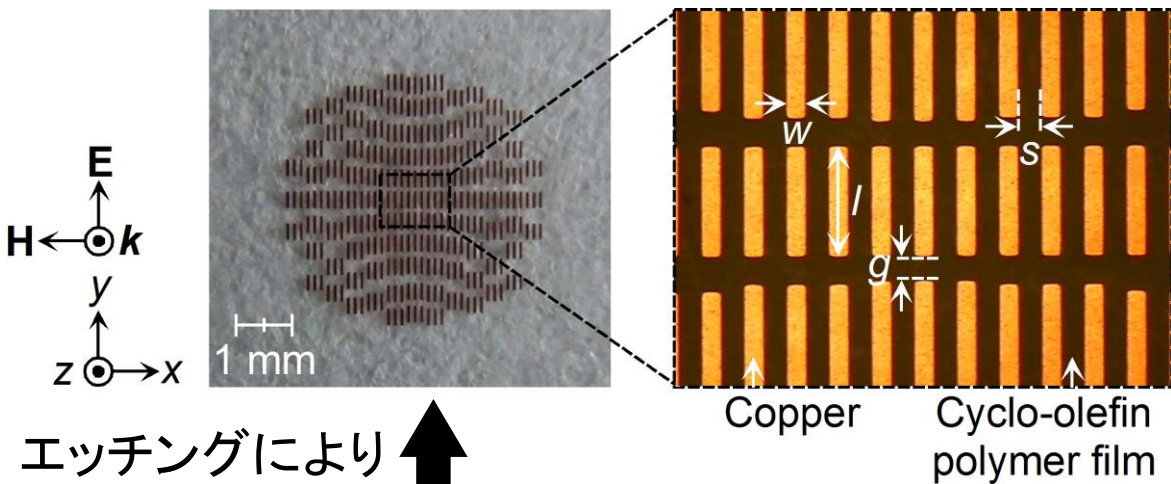


反射電力

- 設計パラメータ  $l = 273 \sim 316 \mu\text{m}, g = 65 \sim 410 \mu\text{m}$



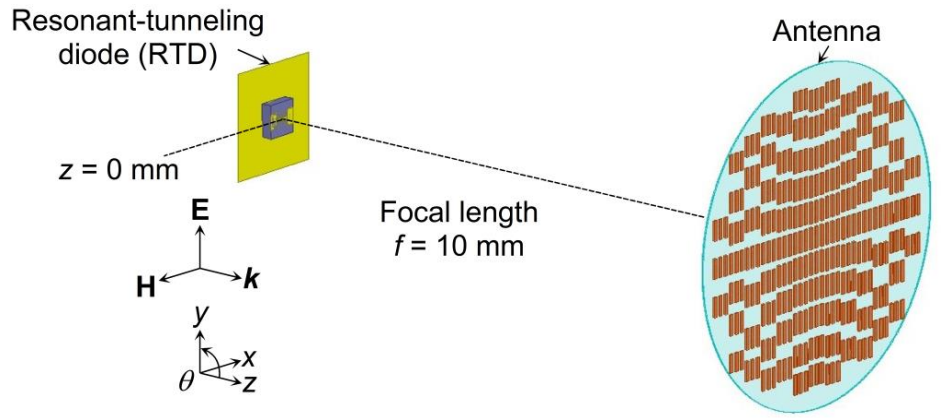
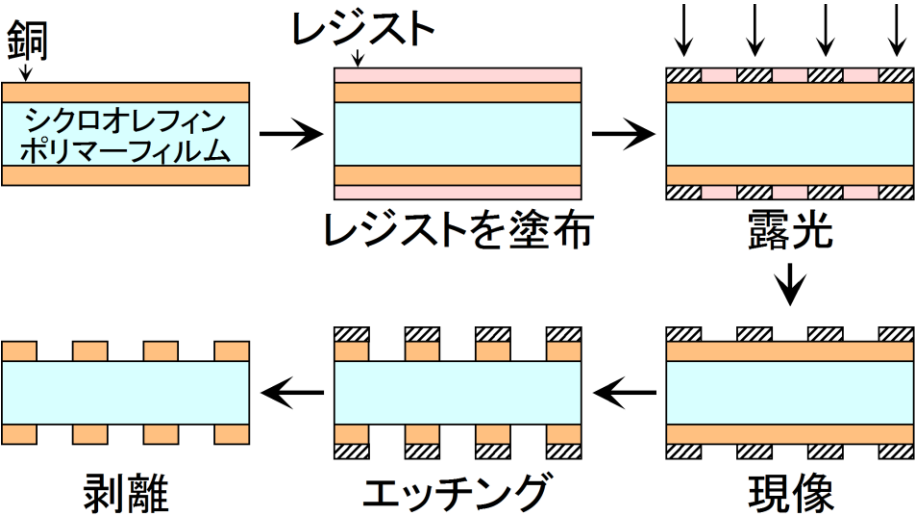
# アンテナの作製



Average of fabrication errors			
$l$ (%)	$g$ (%)	$w$ (%)	$s$ (%)
-3.10	6.95	-14.1	10.7

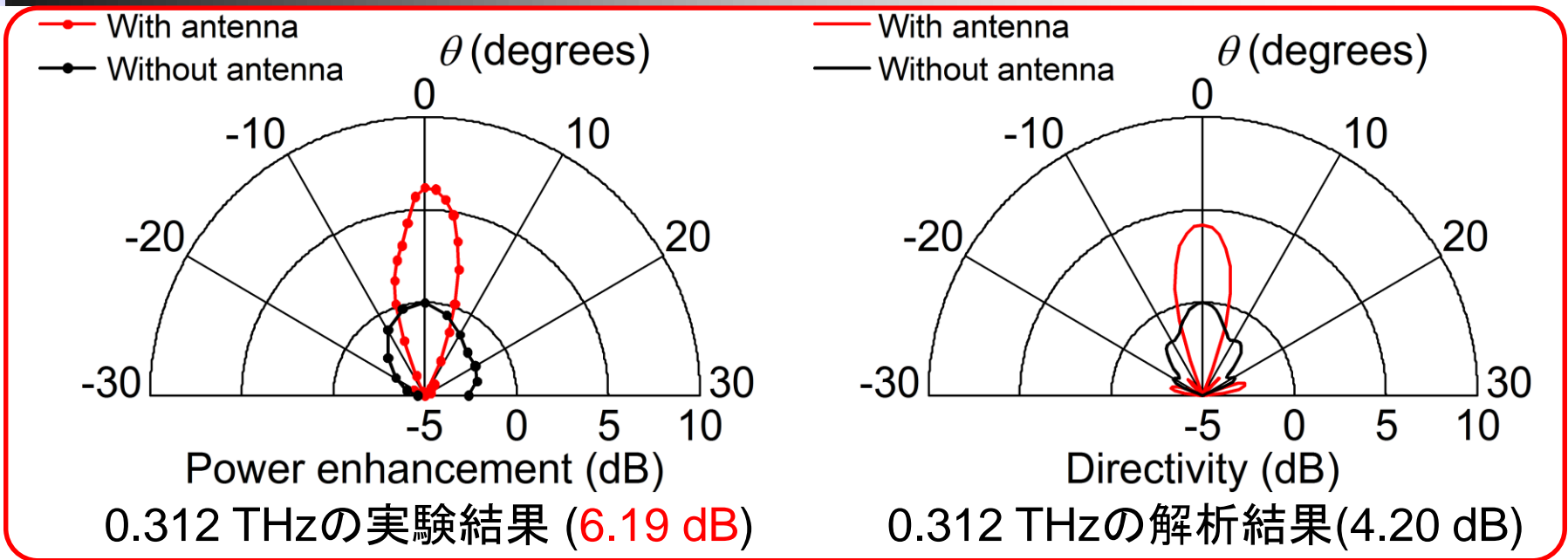
焦点距離 10 mm  
両面構造ペアカットワイヤー  
アレーアンテナ

エッチングにより  
作製



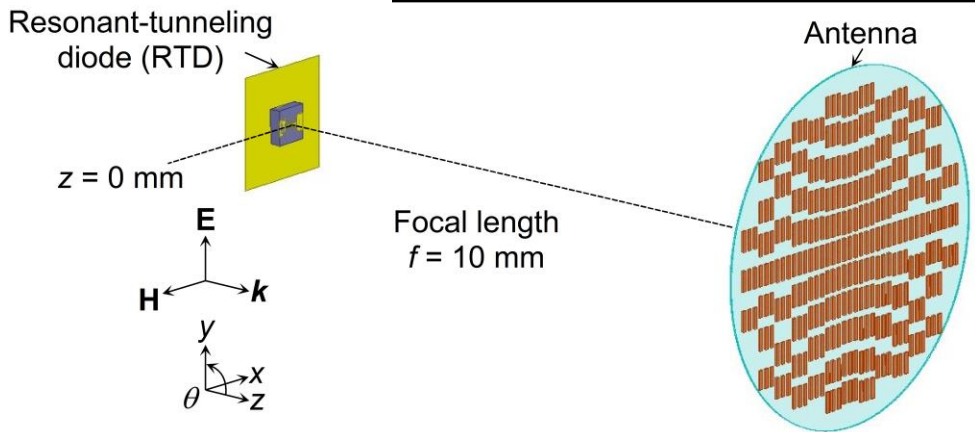
0.312 THzを発振する  
共鳴トンネルダイオードに  
搭載した実験

# yz面の遠方界放射パターン

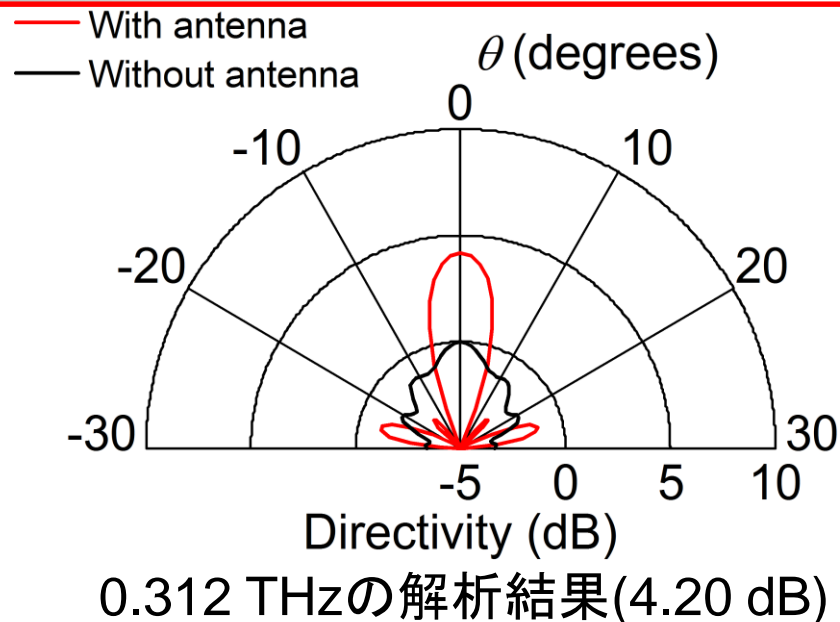
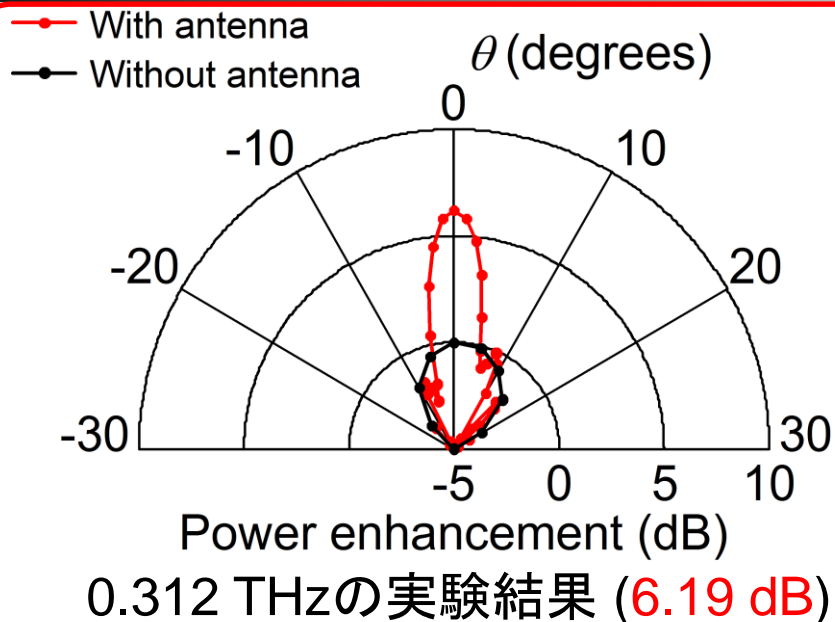


半値幅	
・実験結果	
アンテナあり	8°
アンテナなし	52°
・解析結果	
アンテナあり	12°
アンテナなし	61°

Average of fabrication errors			
<i>l</i> (%)	<i>g</i> (%)	<i>w</i> (%)	<i>s</i> (%)
-3.10	6.95	-14.1	10.7



# xz面の遠方界放射パターン



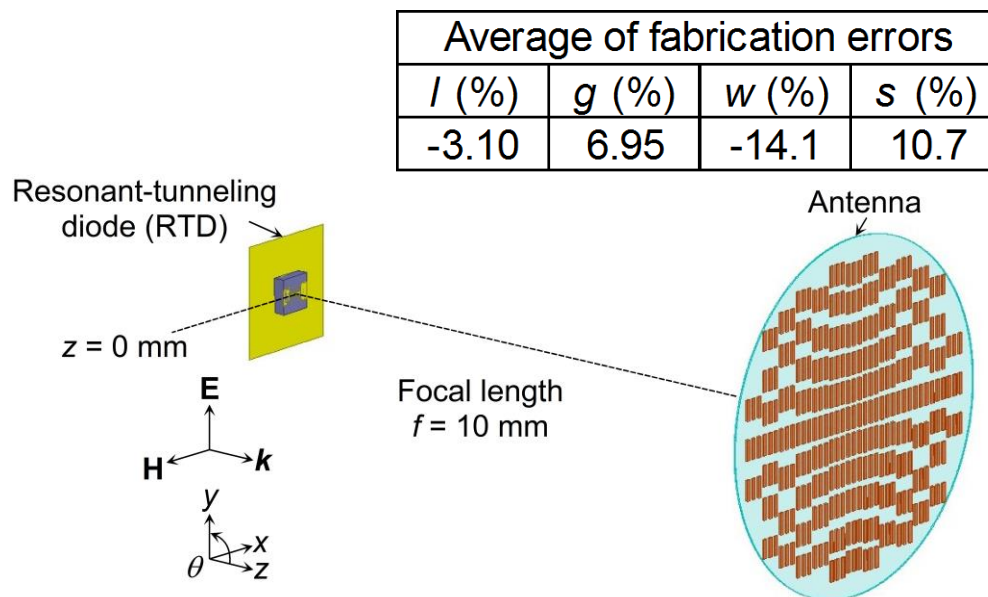
## 半値幅

### ・実験結果

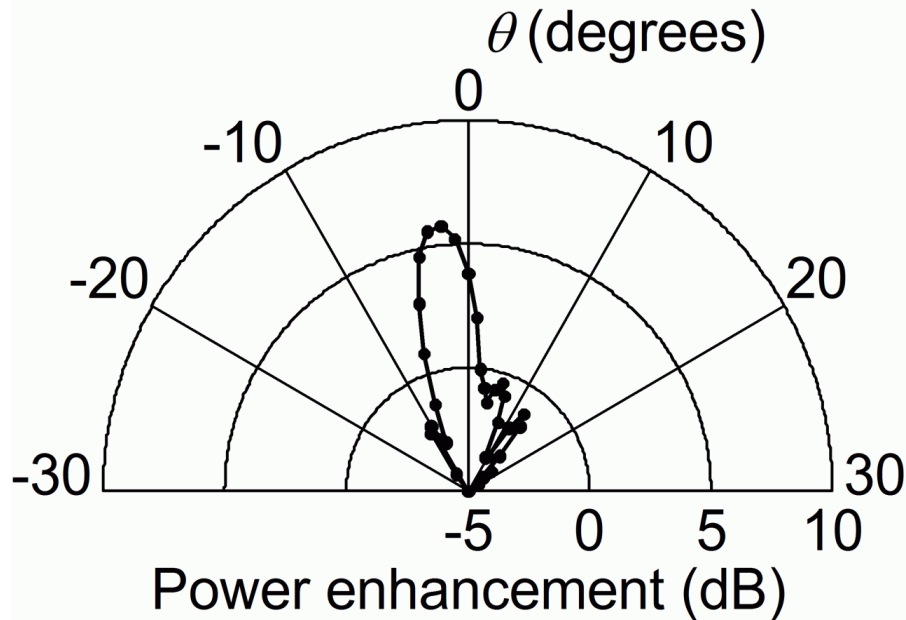
アンテナあり  $7^\circ$   
アンテナなし  $32^\circ$

### ・解析結果

アンテナあり  $12^\circ$   
アンテナなし  $83^\circ$



# 指向性制御の実験結果



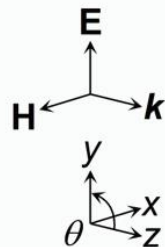
## 放射方向と出力の向上

$x = -0.5$ mm	-2度	5.77 dB
$x = 0$ mm	0度	6.19 dB
$x = 1.0$ mm	6度	5.73 dB
$x = 2.0$ mm	10度	5.51 dB
$x = 3.0$ mm	16度	4.85 dB
$x = 4.0$ mm	22度	3.02 dB

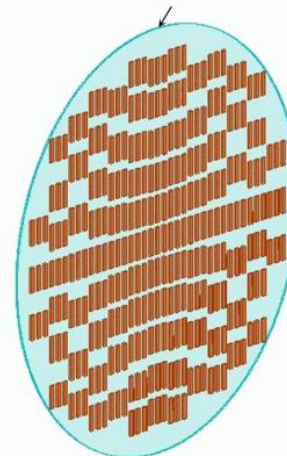
→ アンテナの位置制御で  
指向性制御が可能

$x = -0.5$  mm

Resonant-tunneling diode (RTD)



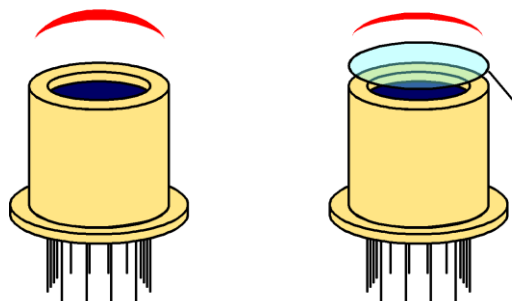
Antenna



# 発表の概要

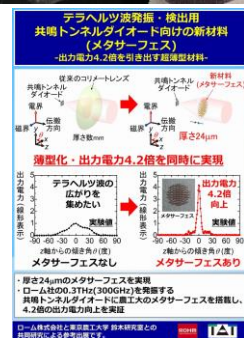
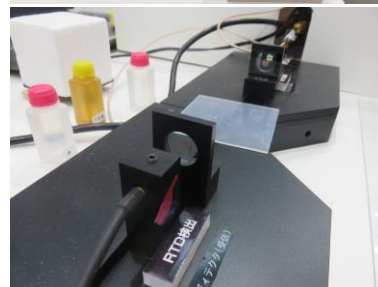
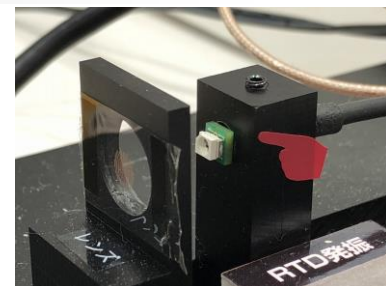
1. 極限屈折率材料の探索
2. 平面アンテナへの応用
3. 0.3THz帯RTDによる実験
4. 基礎研究と産業応用の進捗
5. 3.0THz帯への高周波化
6. まとめ

# 基礎研究と産業応用の進捗

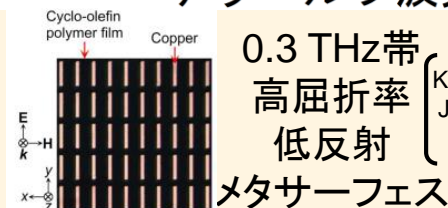


高屈折率低反射材料を用いた  
分布屈折率レンズ

室温動作・連続発振  
テラヘルツ波光源

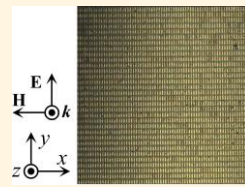


CEATEC 2018デモ



0.3 THz帯  
高屈折率  
低反射  
メタサーフェス

[K. Ishihara and T. Suzuki,  
J. Infrared Millim. Te. **38**,  
1130 (2017)]



3.0 THz帯  
高屈折率  
低反射  
メタサーフェス

テラヘルツ波帯  
メタサーフェス  
(人工構造材料)

2017年発表

2019年3月

0.3 THz

1 THz

2 THz

3 THz

4 THz

5 THz

室温動作・連続発振  
共鳴トンネルダイオード

[T. Maekawa et al.,  
Appl. Phys. Express **9**,  
024101 (2016)]

室温動作・連続発振  
量子カスケードレーザ

[M. Razeghi et al.,  
Opt. Express **23**,  
8462 (2015)]

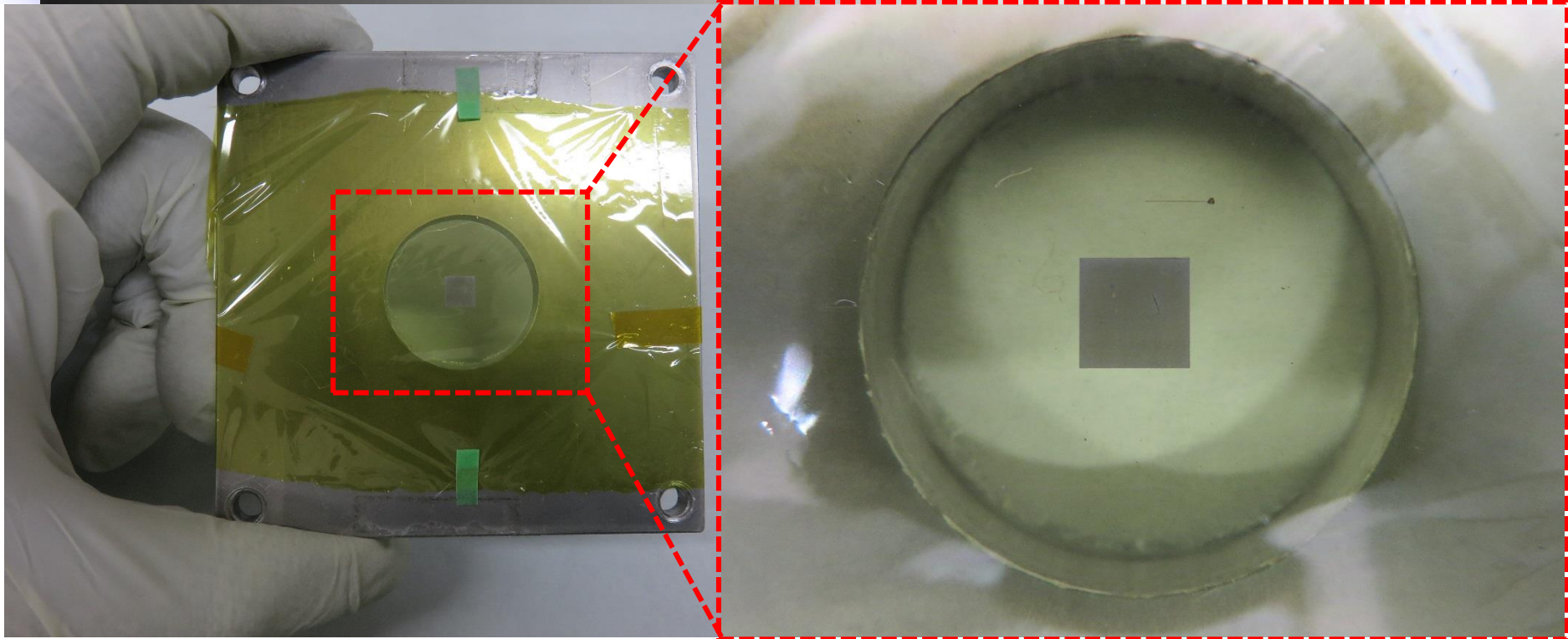
テラヘルツ波帯  
連続発振光源

# 発表の概要

1. 極限屈折率材料の探索
2. 平面アンテナへの応用
3. 0.3THz帯での実験
4. 基礎研究と産業応用の進捗
5. 3.0THz帯への高周波化
6. まとめ

朝田 晴美, 鈴木 健仁, “スーパーインクジェットプリンタで試作した3.0THz帯高屈折率低反射メタサーフェスの実験評価,” 2019年第66回応用物理学春季学術講演会, 東京工業大学, Mar. 2019.

# 3.0THz帯への高周波化



プラズマ処理  
(表面改質)



撥液剤塗布  
(格子を描画)



銀インク滴下  
NPS-J



インク焼成  
220°C 1時間

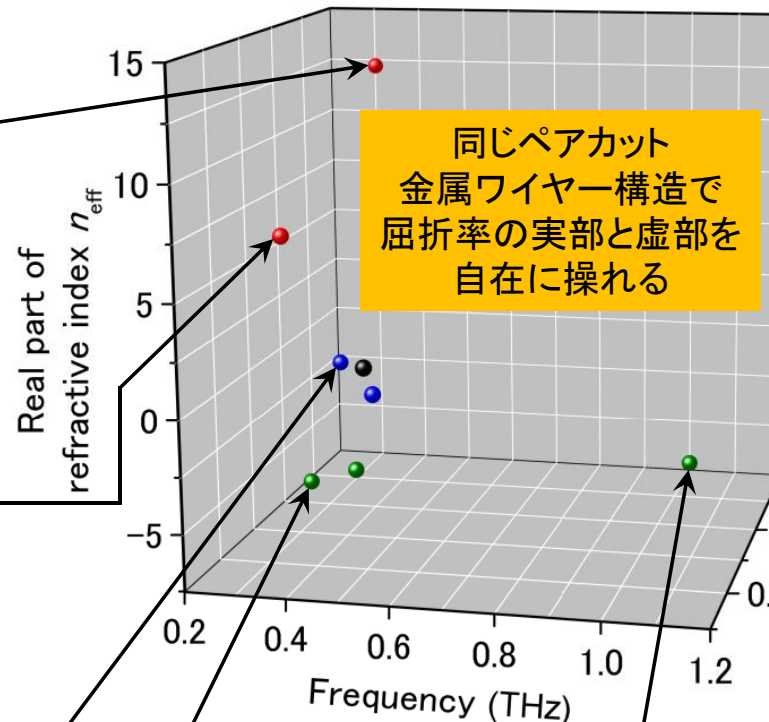
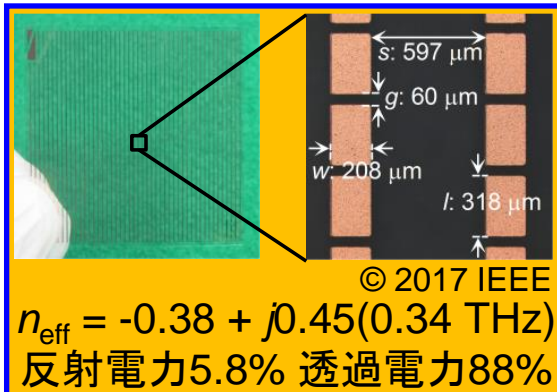
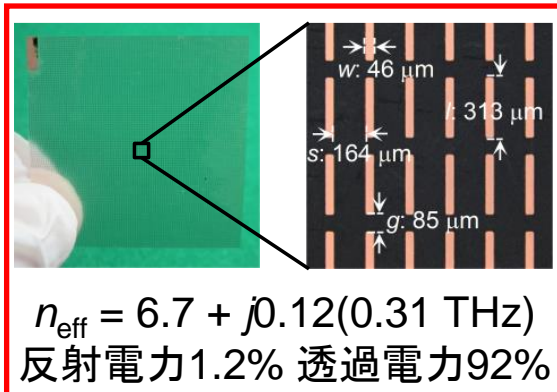
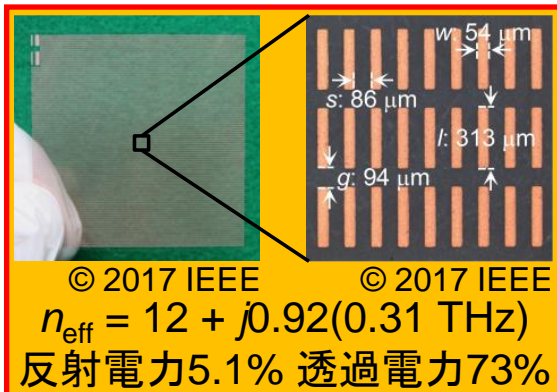
スーパーインクジェットプリンタ(SIJテクノロジー社製)で作製



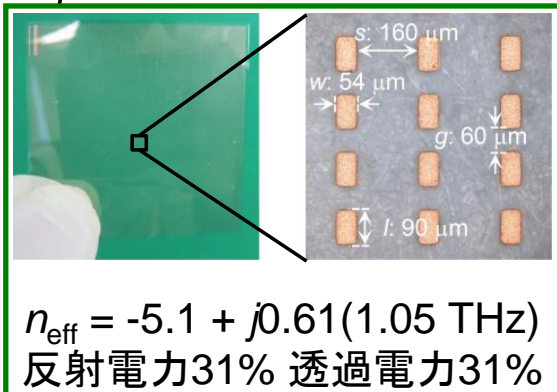
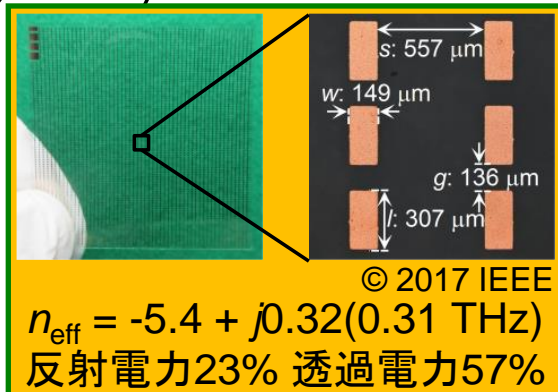
# 発表の概要

1. 極限屈折率材料の探索
2. 平面アンテナへの応用
3. 0.3THz帯RTDによる実験
4. 基礎研究と産業応用の進捗
5. 3.0THz帯への高周波化
6. まとめ

# まとめ



- 高屈折率材料
- ゼロ屈折率材料
- 負の屈折率材料
- 自然界の材料 (シクロオレフィンポリマー)



# 謝辞

本研究の一部は、文部科学省科研費基盤(C)(18K04970)、JSTさきがけ(JPMJPR18I5)、公益財団法人東電記念財団、公益財団法人稲盛財団の助成を受けたものです。

3. 及び4. のCEATEC JAPAN 2018のデモはローム株式会社との共同研究による成果です。

5. の素子は株式会社SIJテクノロジーのご協力により作製した素子です。

研究室をご支援くださる皆様に深く感謝を申し上げます。

ご清聴

ありがとうございました。