



# 極低損失テラヘルツフォトニック結晶とその応用

富士田 誠之

大阪大学基礎工学研究科

## 謝辞

大阪大学基礎工学研究科

永妻忠夫教授, 芦田昌明教授, 永井正也准教授

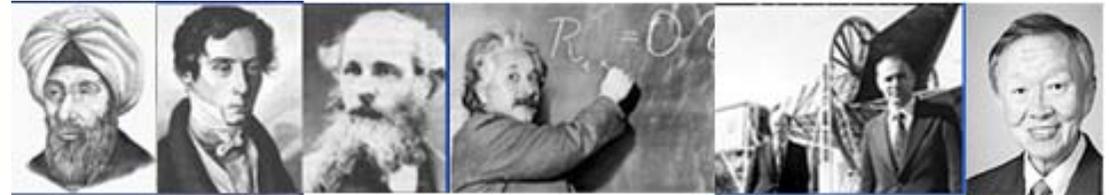
大学院生 鶴田一魁氏, 垣見亮磨氏, 矢田将大氏,

隅倉麻子氏, 石垣司氏

JST CREST “素材・デバイス・システム融合による革新的  
ナノエレクトロニクスの創成”領域 「共鳴トンネルダイオードと  
フォトニック結晶の融合によるテラヘルツ集積基盤技術の創成」,  
総務省戦略的情報通信研究開発事業(SCOPE),  
科研費, 東電記念財団, 村田学術振興財団, SCAT研究費助成,  
大阪大学基礎工学研究科未来ラボシステム  
などの支援を受けました.



INTERNATIONAL  
YEAR OF LIGHT  
2015



# 「国際光年」

(International year of light and light-based technologies)

光および光技術の国際年(IYL2015)は国際連合総会において採択されました。  
光技術がいかに、環境破壊なき開発を推進し、エネルギー、教育、農業、通信、健康等の分野における世界的な取り組みに対して解決策を提供しているかについて、知識を高めるために宣言されました。

1015 年:イブン・アル・ハイサムによる光に関する研究

1815 年:フレネルにより提案された波動説

1865 年:マクスウェルにより提案された光伝播についての電磁理論

1905年:光電効果

1915 年:一般相対性理論についてのアインシュタインの理論

1965 年:ペンジラスとウィルソンの宇宙マイクロ波背景放射の発見および光ファイバー通信に関するカオの業績

2015年は、光科学の歴史における一連の重要な画期的な発見・発明の記念年

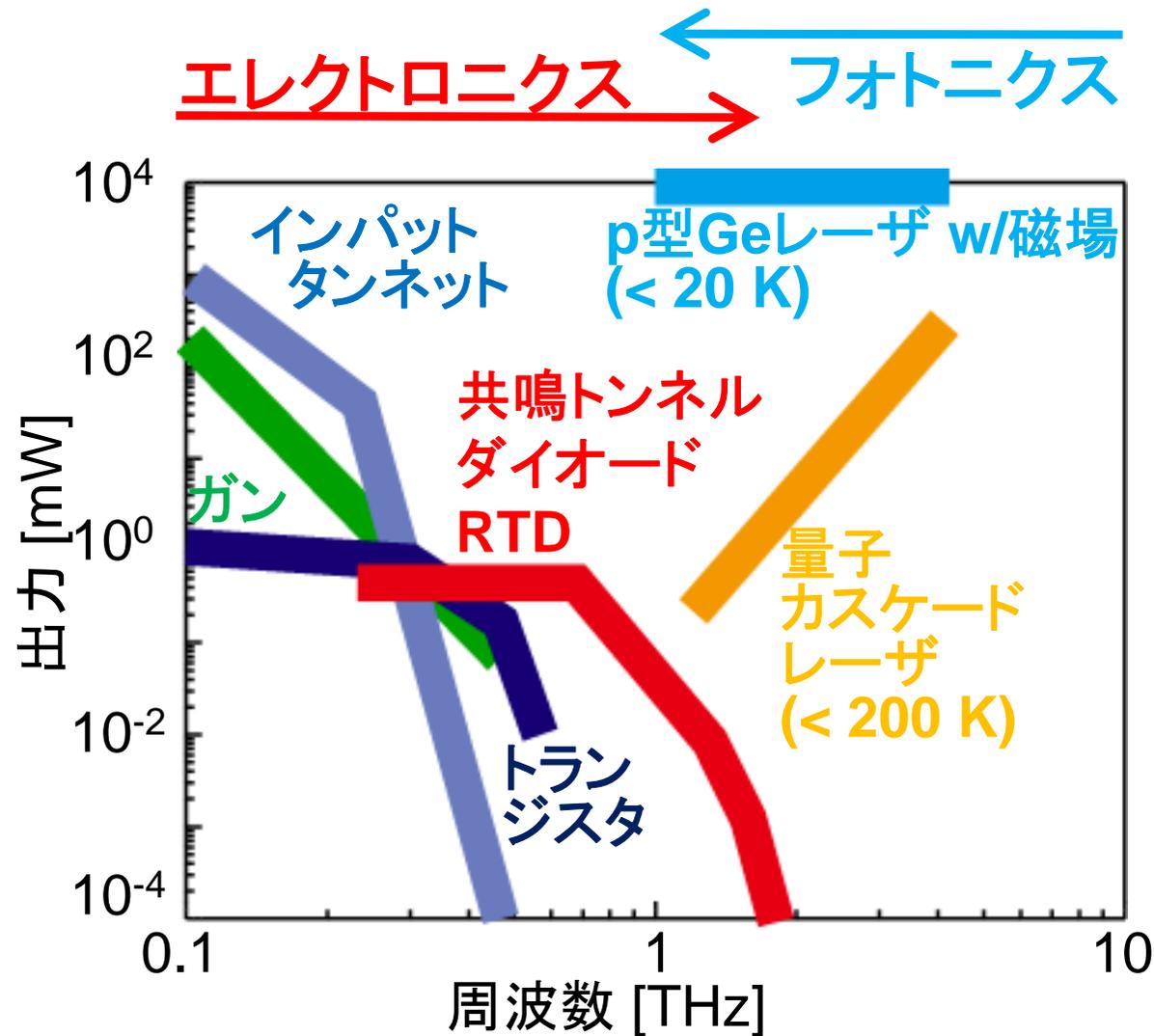
## 極低損失テラヘルツフォトニック結晶とその応用

- ・研究背景～テラヘルツ帯の小型集積デバイスに向けて～
- ・フォトニック結晶とは～その基本構造と特性～
- ・テラヘルツ集積回路応用に向けたフォトニック結晶の開発
- ・フォトニック結晶によるテラヘルツ波の操作と応用

## 極低損失テラヘルツフォトニック結晶とその応用

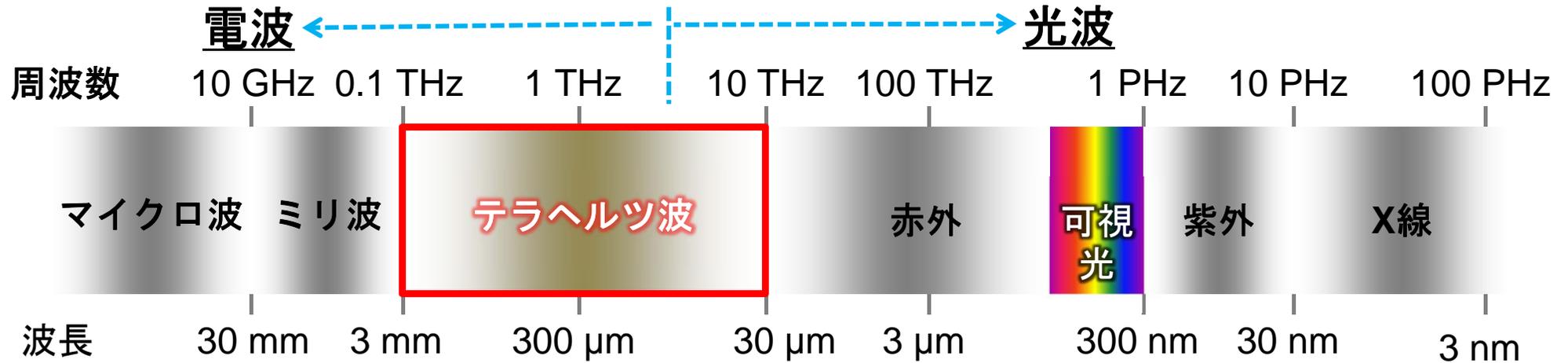
- ・研究背景～テラヘルツ帯の小型集積デバイスに向けて～
- ・フォトニック結晶とは～その基本構造と特性～
- ・テラヘルツ集積回路応用に向けたフォトニック結晶の開発
- ・フォトニック結晶によるテラヘルツ波の操作と応用

# 半導体テラヘルツ単体デバイスからの出力の現状

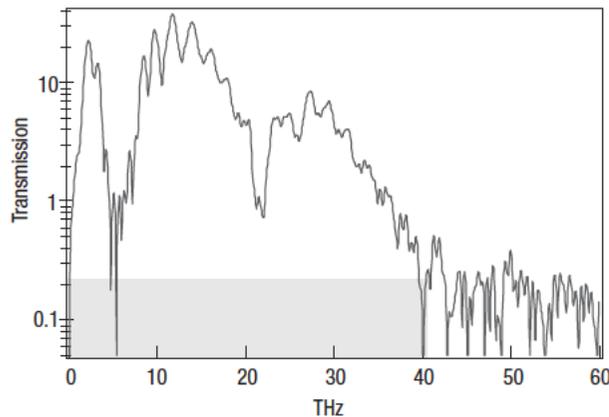


[東工大 浅田, 鈴木,  
応用物理 **83** (2014) 565  
に追記]

# テラヘルツ波: 0.1 THz–10 THz 開拓中の電磁波



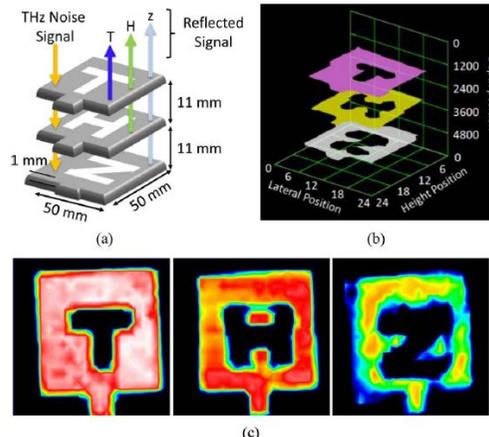
## 分光センシング



Ferguson et al. *Nature Mat.* 2002

物質固有吸収スペクトルを利用した物質同定

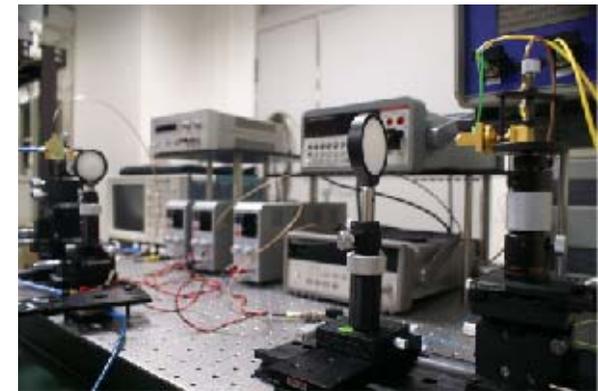
## イメージング



Isogawa et al. *IEEE THz Sci. Tech.* 2012

適度な透過性と分解能を有する非破壊検査

## 無線通信



Nagatsuma et al., *Opt. Express* 2013

高周波広帯域特性を活かした大容量高速無線通信

テラヘルツ 電磁波の応用が開拓中

# 現在のテラヘルツシステムの例

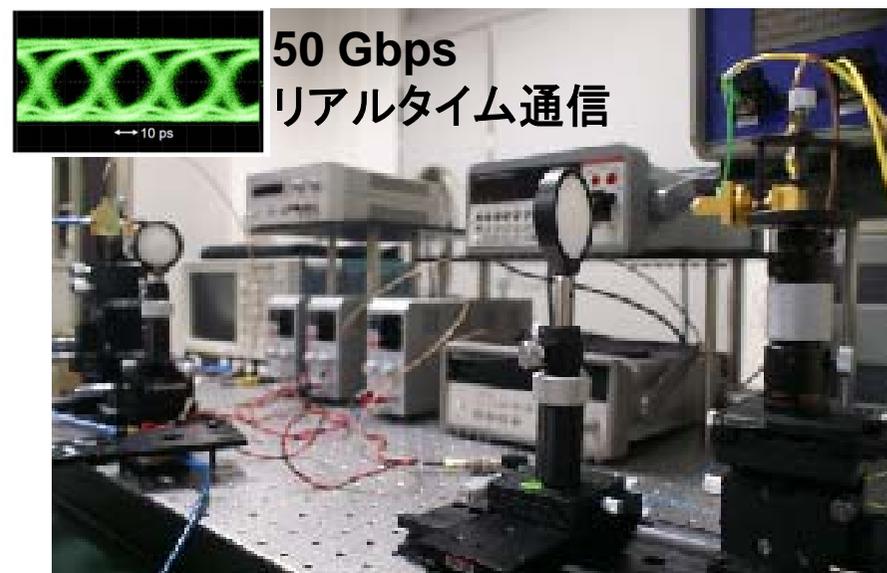
## 分光センシング装置



Advantest社 TAS7500



## 大容量高速無線通信実験



IEEE Photonics Society News Letter Apr. (2015) 12.

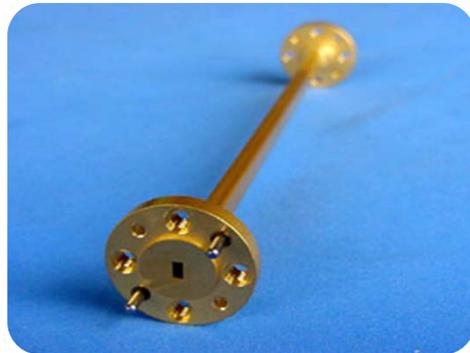
レーザ光源, レンズや導波管をはじめ, 多くの個別部品やデバイスで構成

今後は, テラヘルツ集積回路による小型集積化が不可欠



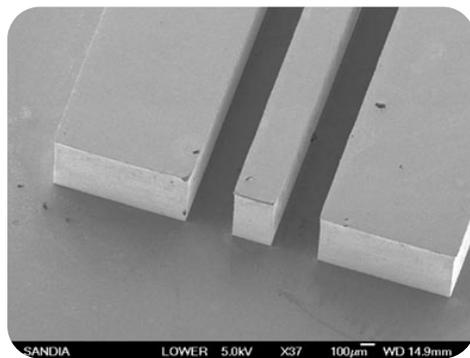
集積化可能な低損失のテラヘルツ伝送路は？

# 既存のテラヘルツ伝送路の例



## 中空導波管

- ・低損失 ( $\sim 0.4$  dB/cm@0.3 THz)
  - ・製品化
  - ・平面構造ではない. [微細な機械加工でコスト大]
- [Harris et al. *Infrared Phys.* **18** (1978) 741]



## 金属線路

- ・平面構造
  - ・損失大 ( $4\sim 25$  dB/cm@0.3 THz) [高周波で損失大]
- [*IEEE MTT* (1991) 910, (1994) 2399, (2005) 3281.  
*APL* **70** (1997) 2233. *JJAP* **44** (2005) 1011.]

新たな低損失かつ平面のテラヘルツプラットフォームの開拓が必要



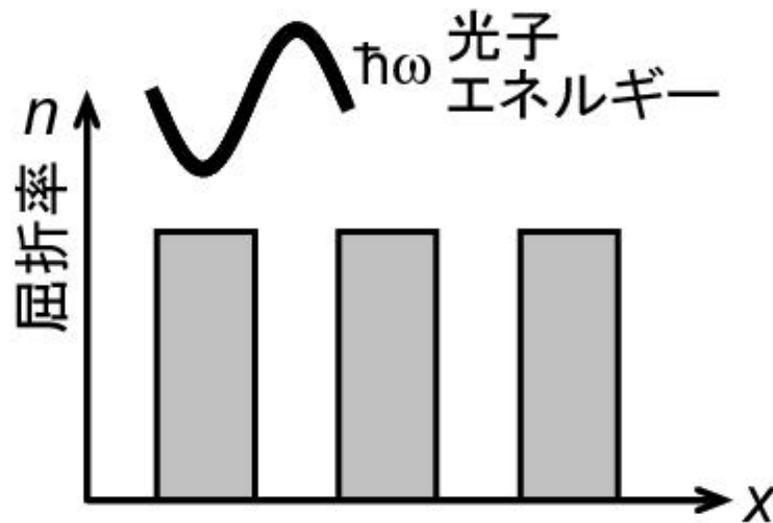
フォトリソグラフィに着目

## 極低損失テラヘルツフォトニック結晶とその応用

- ・研究背景～テラヘルツ帯の小型集積デバイスに向けて～
- ・**フォトニック結晶とは～その基本構造と特性～**
- ・テラヘルツ集積回路応用に向けたフォトニック結晶の開発
- ・フォトニック結晶によるテラヘルツ波の操作と応用

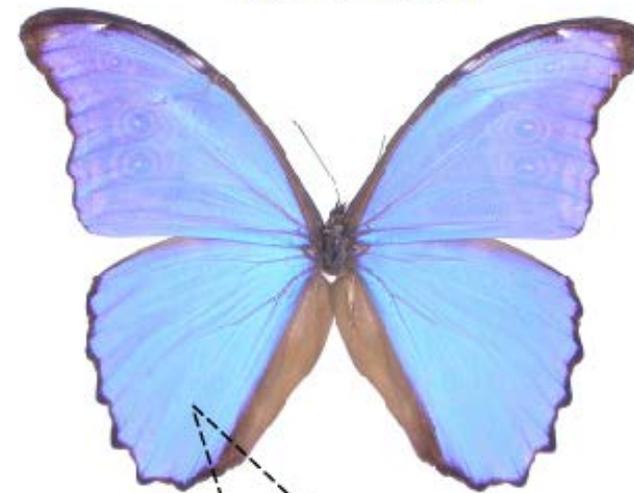
# フォトニック結晶とは

光の波長程度の大きさの周期的屈折率分布をもつ微細構造



After, E. Yablonovitch, *Phys. Rev. Lett.* **58** (1987) 2059 .

モルフォ蝶



1200 nm

cf. S. Kinoshita *et al*, *Chem Phys Chem* **6** (2005) 1442

自然界にも存在

# 固体結晶とフォトニック結晶のアナロジー

VOLUME 58, NUMBER 20

PHYSICAL REVIEW LETTERS

18 MAY 1987

## **Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics**

Eli Yablonovitch

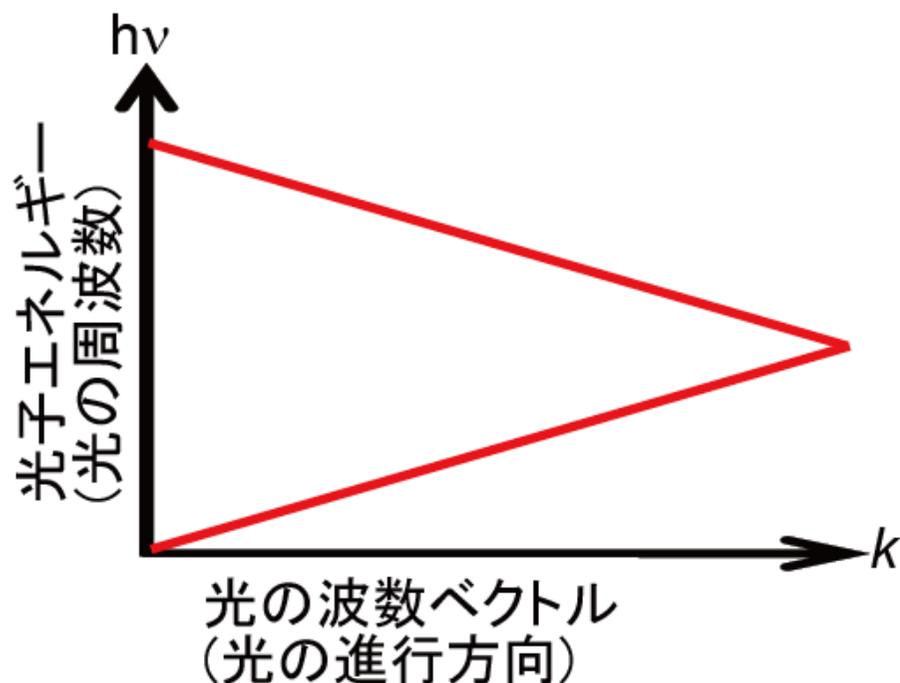
*Bell Communications Research, Navesink Research Center, Red Bank, New Jersey 07701*

(Received 23 December 1986)

It has been recognized for some time that the spontaneous emission by atoms is not necessarily a fixed and immutable property of the coupling between matter and space, but that it can be controlled by modification of the properties of the radiation field. This is equally true in the solid state, where spontaneous emission plays a fundamental role in limiting the performance of semiconductor lasers, heterojunction bipolar transistors, and solar cells. If a three-dimensionally periodic dielectric structure has an electromagnetic band gap which overlaps the electronic *band edge*, then spontaneous emission can be rigorously forbidden.

# 光の状態(モード)を表すフォトニックバンド図

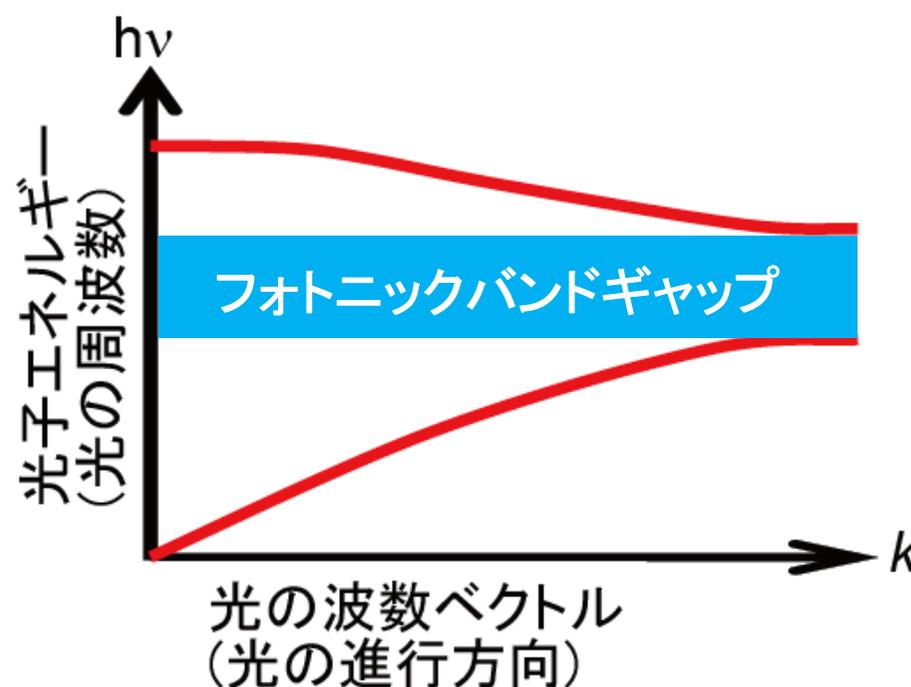
## 一様媒質



$$v = (c_0/n)k/2\pi$$

$c_0$ : 真空中の光速  
 $n$ : 屈折率

## フォトニック結晶

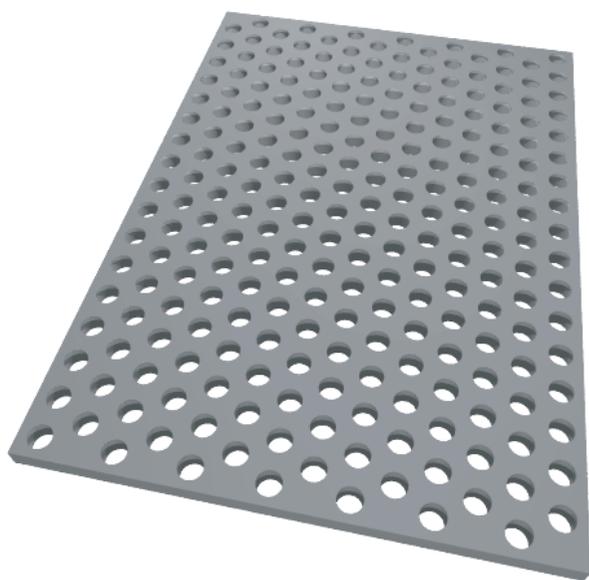


$$v = F(k)$$

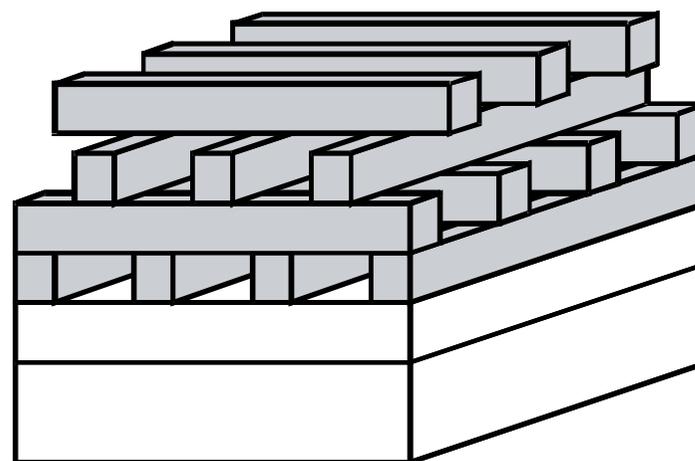
$F()$ : 任意の関数

# 典型的な(人工)フォトニック結晶構造

半導体微細加工技術で作製



2次元フォトニック結晶



3次元フォトニック結晶

[S. Noda, *J. Lightwave Tech.*, **24** (2006) 4554.]

# テラヘルツフォトニック結晶の先駆的な報告-3次元構造-

August 1, 1994 / Vol. 19, No. 15 / OPTICS LETTERS 1155

## Terahertz spectroscopy of three-dimensional photonic band-gap crystals

E. Özbay, E. Michel, G. Tuttle, R. Biswas, and K. M. Ho

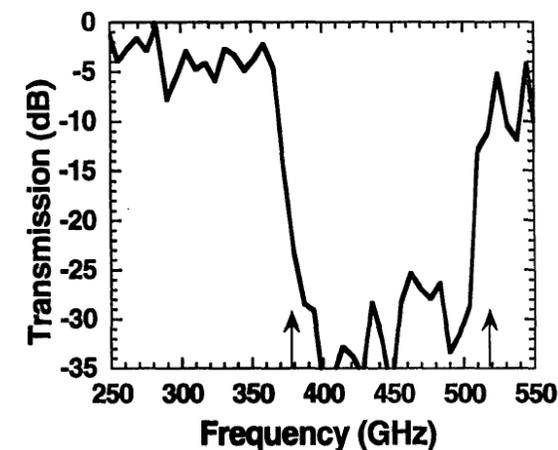
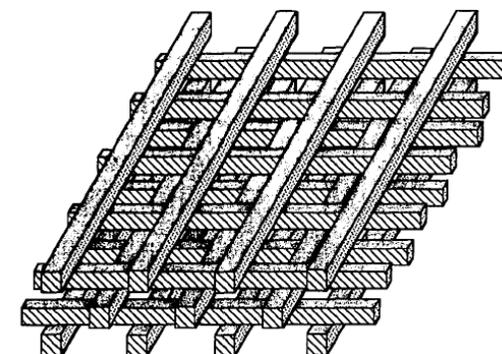
*Micorelectronics Research Center and Ames Laboratory, Iowa State University, Ames, Iowa 50011*

J. Bostak and D. M. Bloom

*Edward L. Ginzton Laboratory, Stanford University, Stanford, California 94305*

Received February 15, 1994

We have fabricated and built three-dimensional photonic band-gap crystals with band-gap frequencies larger than 500 GHz. We built the crystals by stacking micromachined (110) silicon wafers. The transmission and dispersion characteristics of the structures were measured by an all-electronic terahertz spectroscopy setup. The experimental results were in good agreement with theoretical calculations. To our knowledge, our new crystal has the highest reported photonic band-gap frequency.

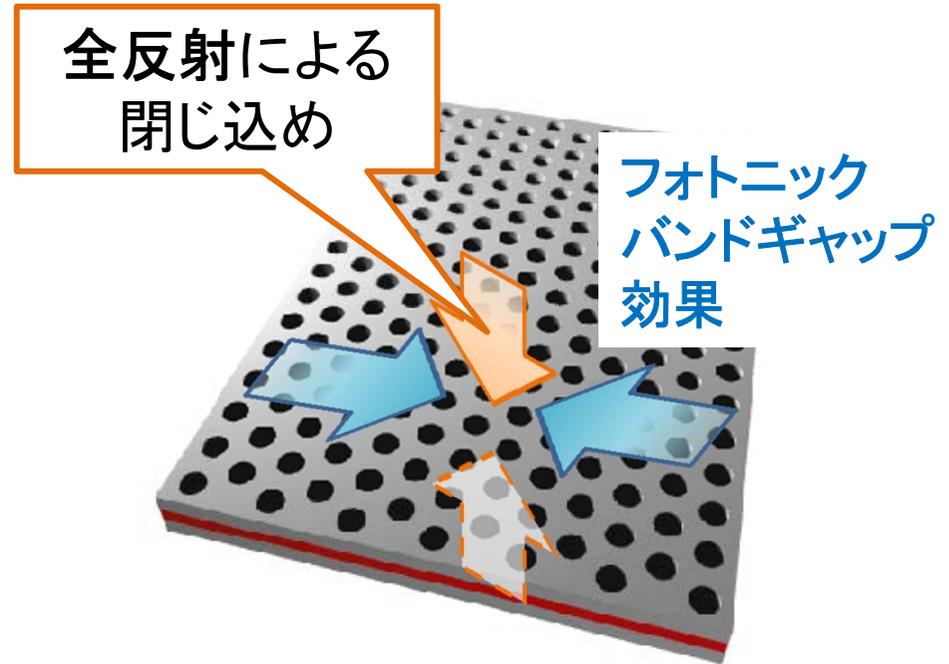


透過率の特性など，基礎物理の検証

## 2次元フォトニック結晶スラブ



半導体スラブ(薄板)

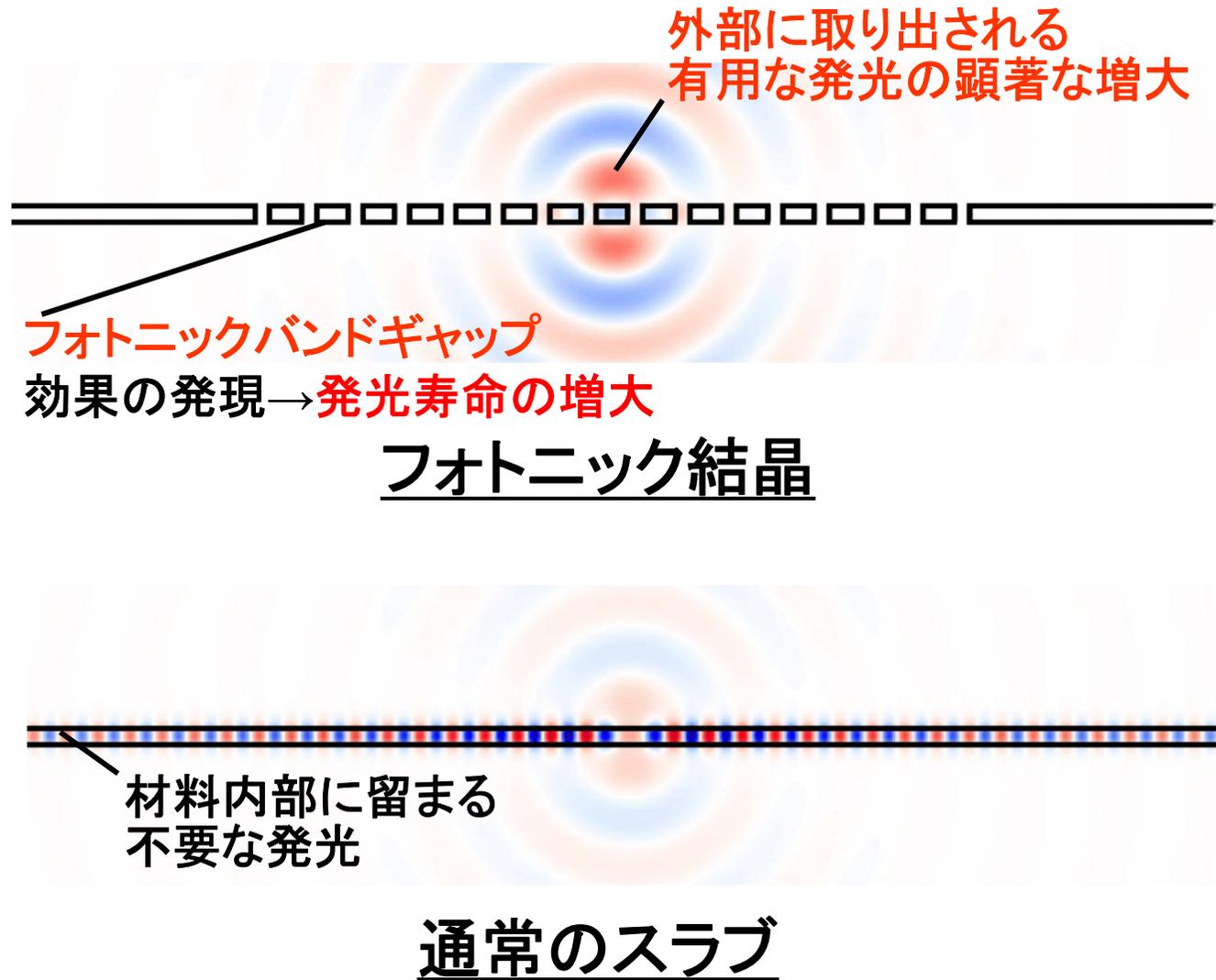


2次元フォトニック結晶スラブ

※屈折率の低い上下の空気クラッドにより、垂直方向の光閉じこめが可能。  
面内はフォトニックバンドギャップ効果が発現。

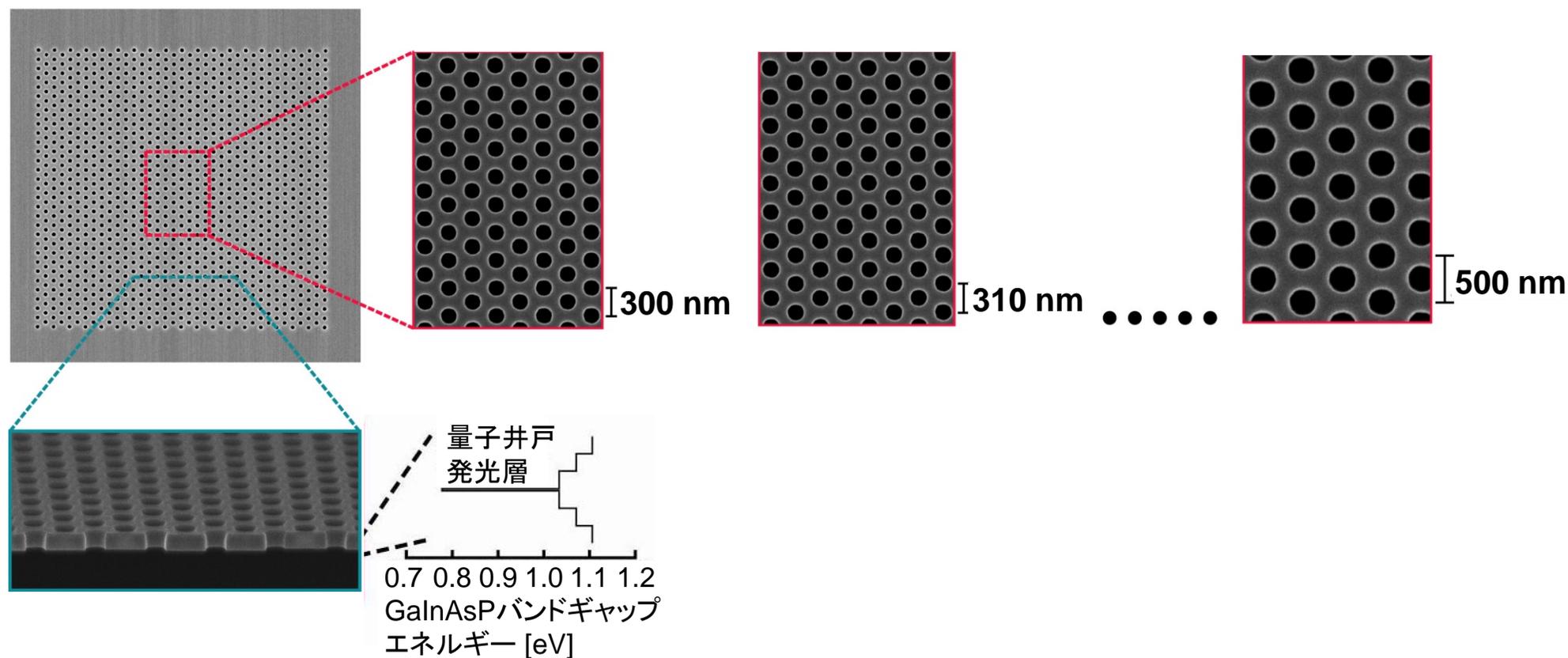
# フォトニック結晶スラブによる自然放出制御

※断面図

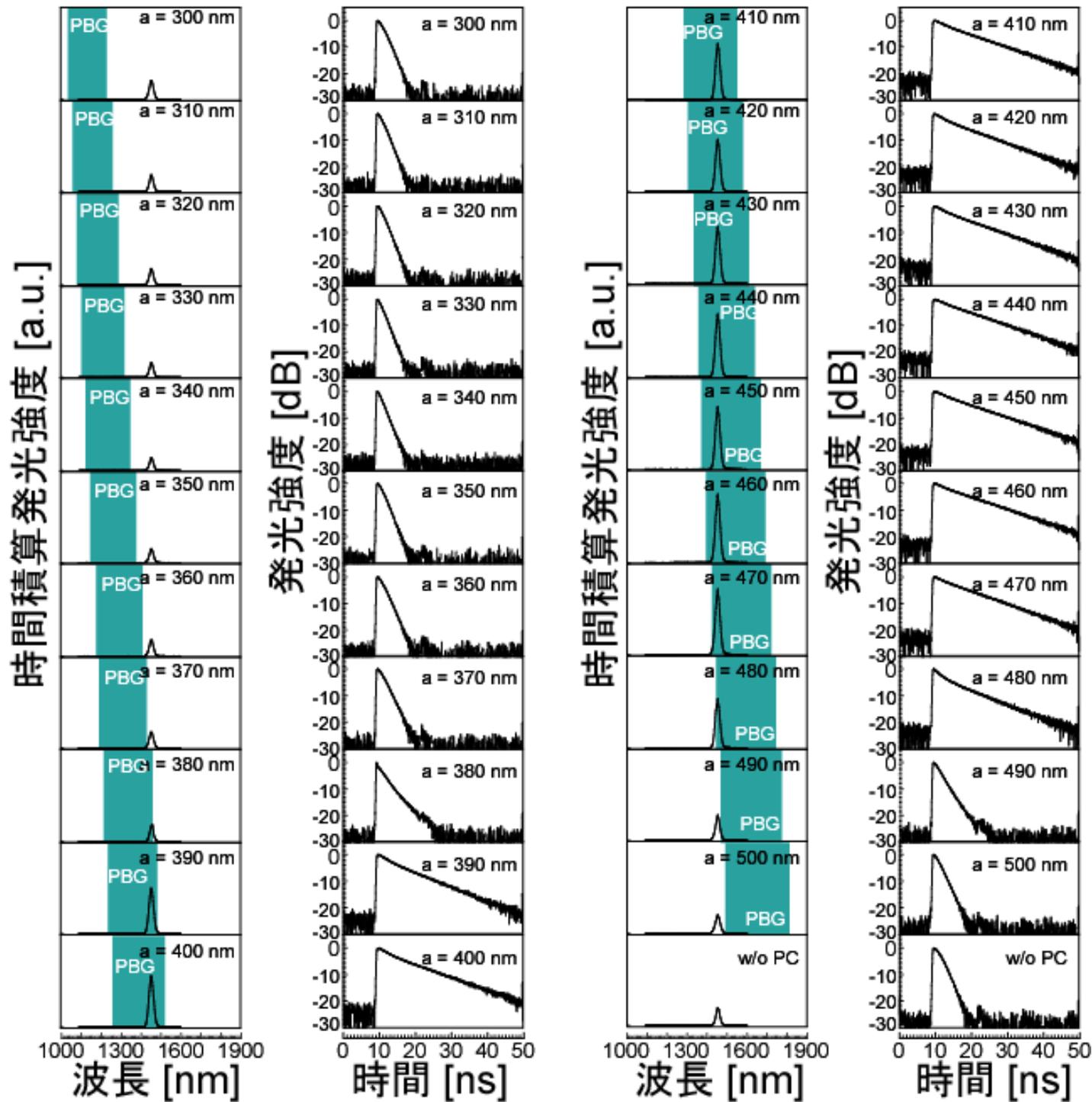


# フォトニック結晶スラブによる自然放出制御の実証

電子線描画とプラズマエッチングでGaInAsP半導体を微細加工



発光波長を固定で, フォトニック結晶の格子定数を変化させる



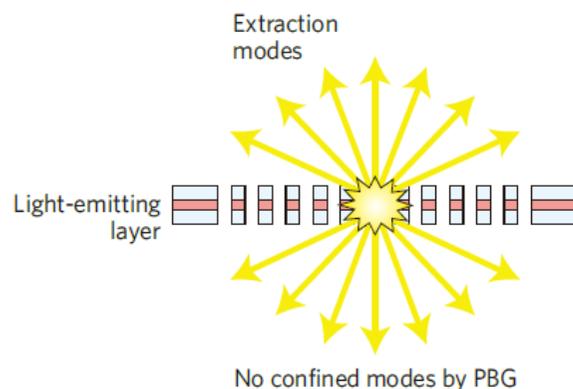
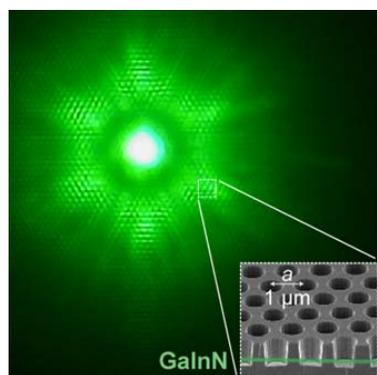
フォトニック結晶による発光制御の基本原理の実証に成功



2次元スラブ構造が各種応用へ向けて有望

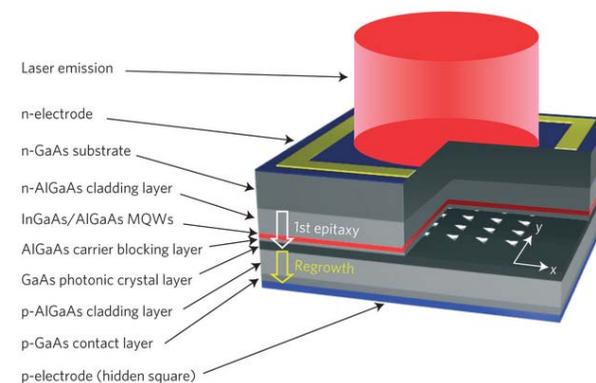
Fujita et al,  
*Science* **308**  
(2005) 1296.

## 超高効率発光デバイス

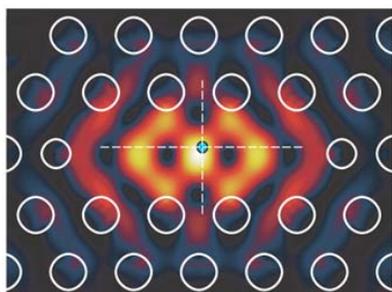
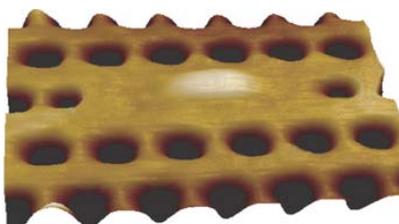
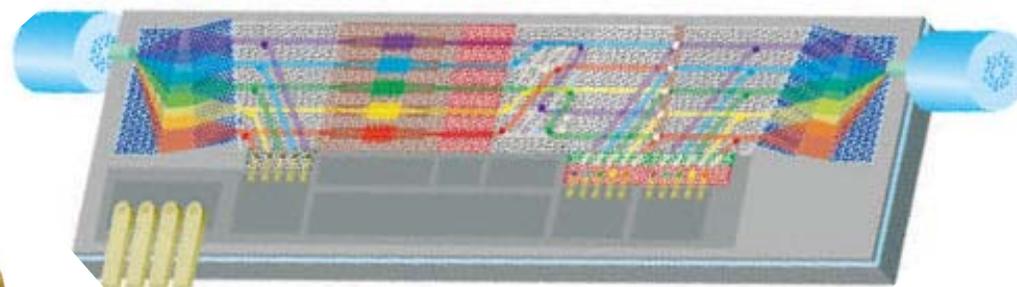


[e.g. Noda & MF, *Nature Photon.* **3** (2009) 129]

## ビーム制御高出力レーザー



[e.g. Hirose et al. *Nature Photon.* **8** (2014) 406]

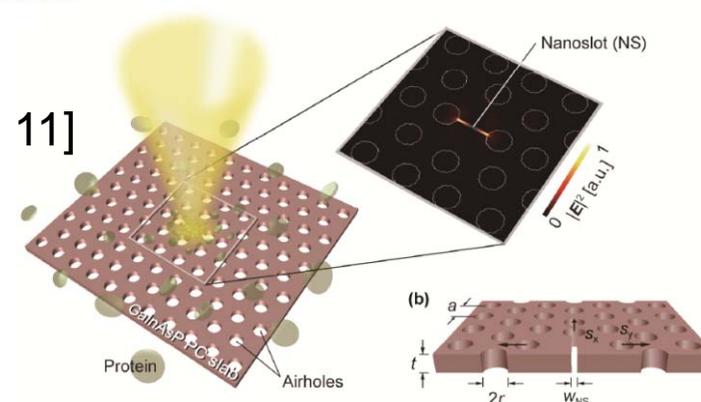


## 光集積回路

[ e.g. Baba, *Nature Photon.* **1** (2007) 11]

## 量子演算の場

[ e.g. Hennessy et al. *Nature* **445** (2007) 896]



## 超高感度センシング

[ e.g. Kita et al. *Opt. Express.* **19** (2011) 17683]

## 極低損失テラヘルツフォトニック結晶とその応用

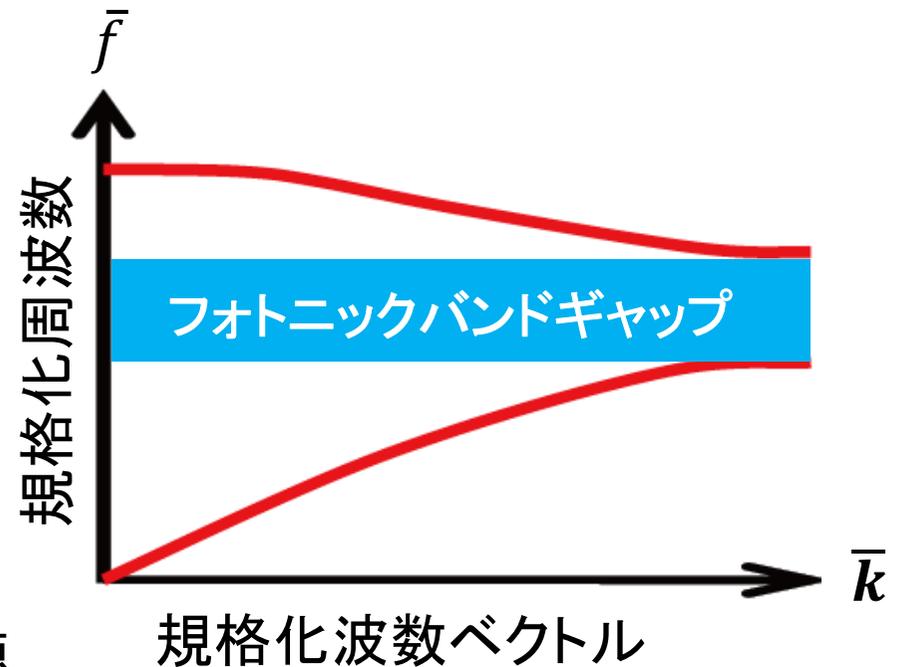
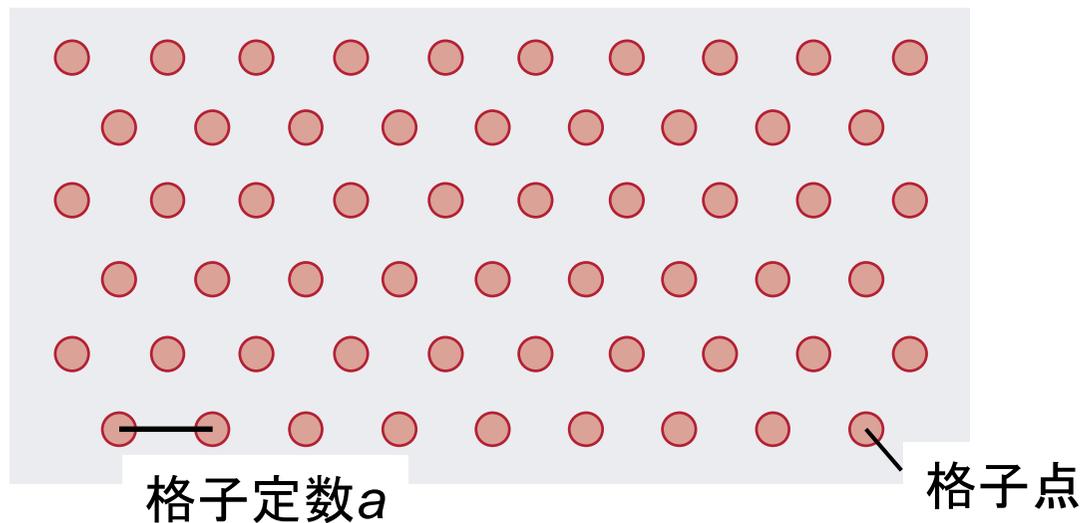
- ・研究背景～テラヘルツ帯の小型集積デバイスに向けて～
- ・フォトニック結晶とは～その基本構造と特性～
- ・**テラヘルツ集積回路応用に向けたフォトニック結晶の開発**
- ・フォトニック結晶によるテラヘルツ波の操作と応用

# フォトニック結晶のスケーリング則

フォトニック結晶の特性は周期(格子定数)  $a$  に比例して, 決定される

$$\text{規格化周波数: } \bar{f} = fa/c_0 = a/\lambda_0$$

$$\text{規格化波数: } \bar{k} = (a/2\pi)k$$



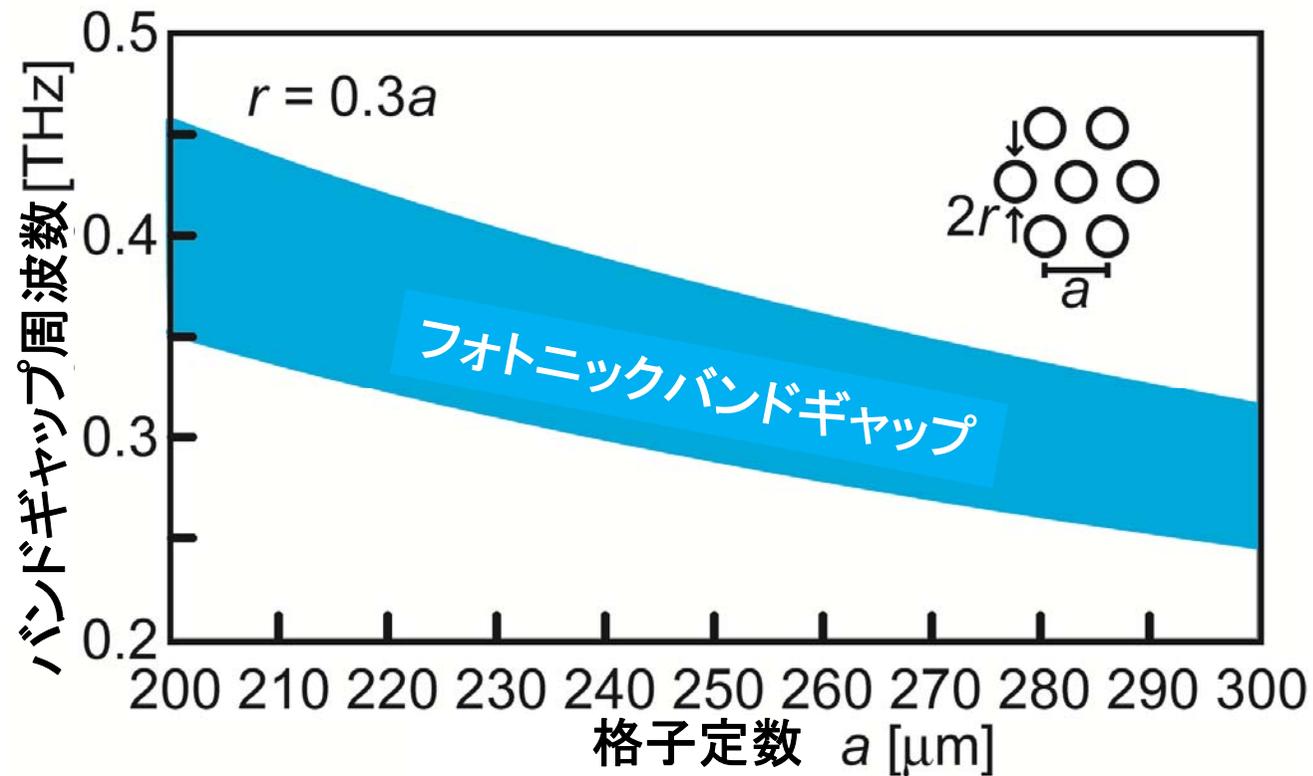
格子定数  $a$  が大きいと, 低周波数側(長波長側)に効果

格子定数  $a$  が小さいと, 高周波数側(短波長側)に効果

→ テラヘルツ帯へは光波領域と比較して, 格子定数  $a$  を大きくする

## 0.3 THz帯フォトニック結晶スラブの設計

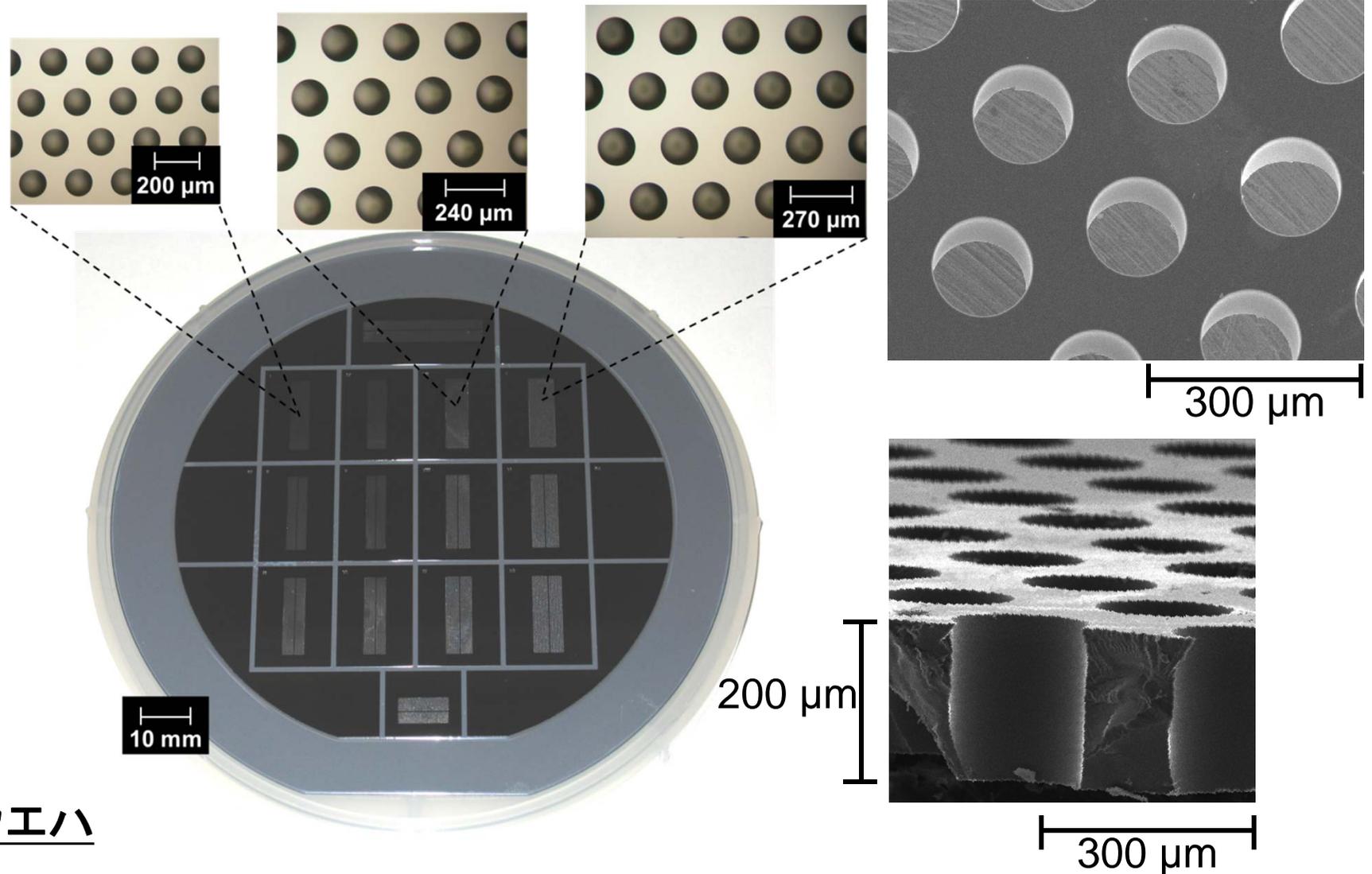
厚さ200  $\mu\text{m}$  シリコン基板



格子定数  $a = 200 \sim 280 \mu\text{m}$  で中心周波数  $0.30 \sim 0.40 \text{ THz}$ , 帯域幅  $0.09 \sim 0.12 \text{ THz}$  のフォトニックバンドギャップが形成

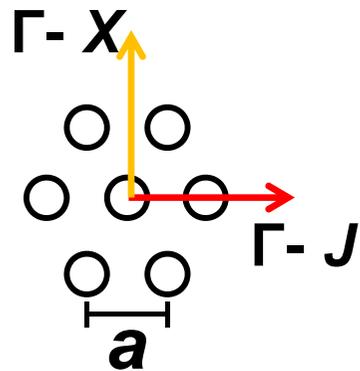
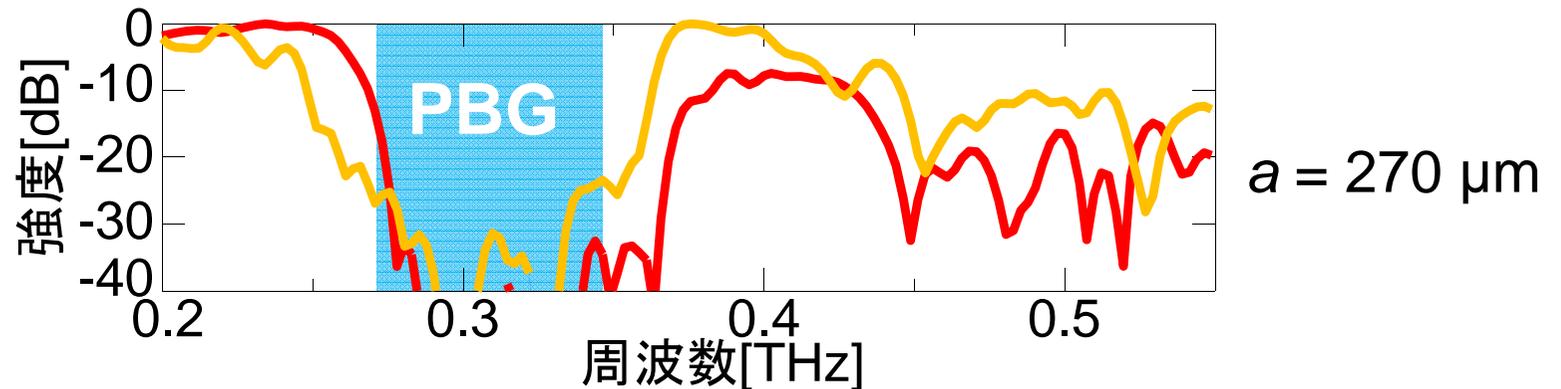
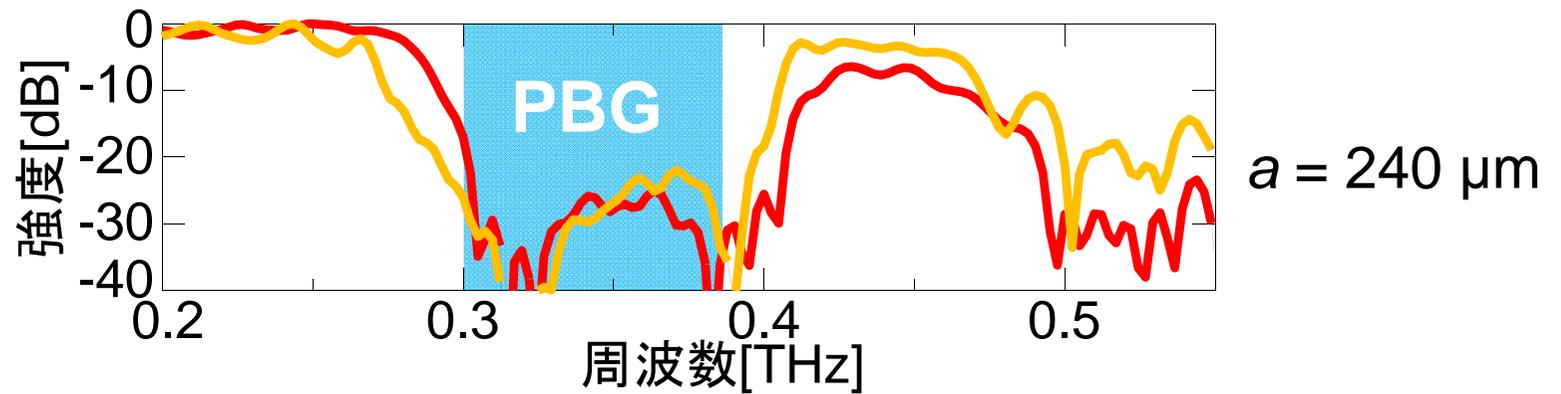
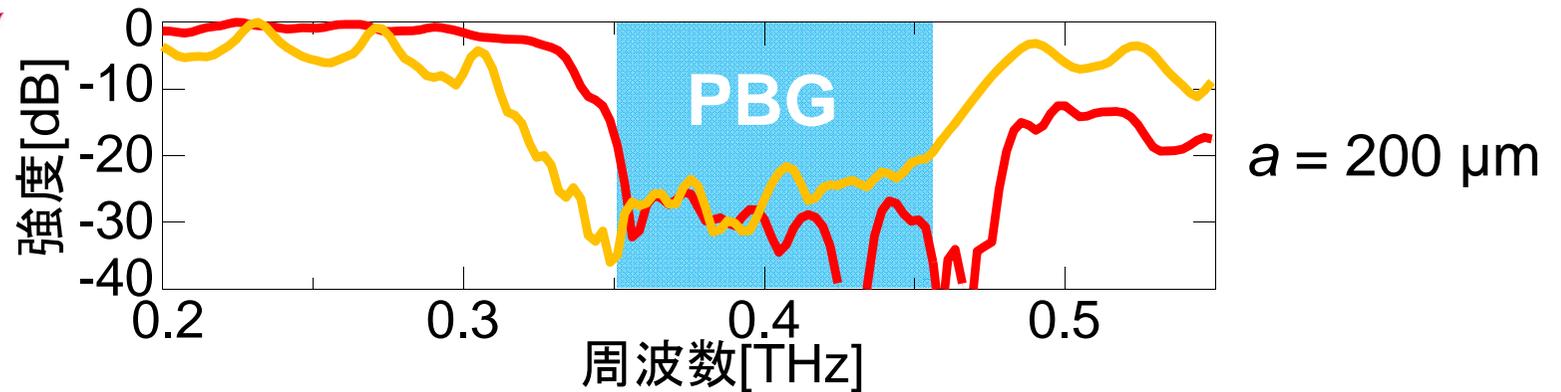
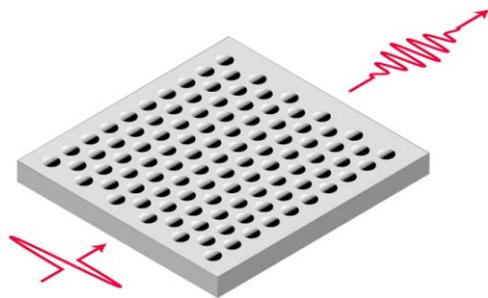
# テラヘルツフォトニック結晶の作製

MEMS作製技術(フォトリソグラフィ, プラズマエッチング)を利用



4インチ  
シリコンウエハ

# 0.3 THz帯フォトニックバンドギャップの観測

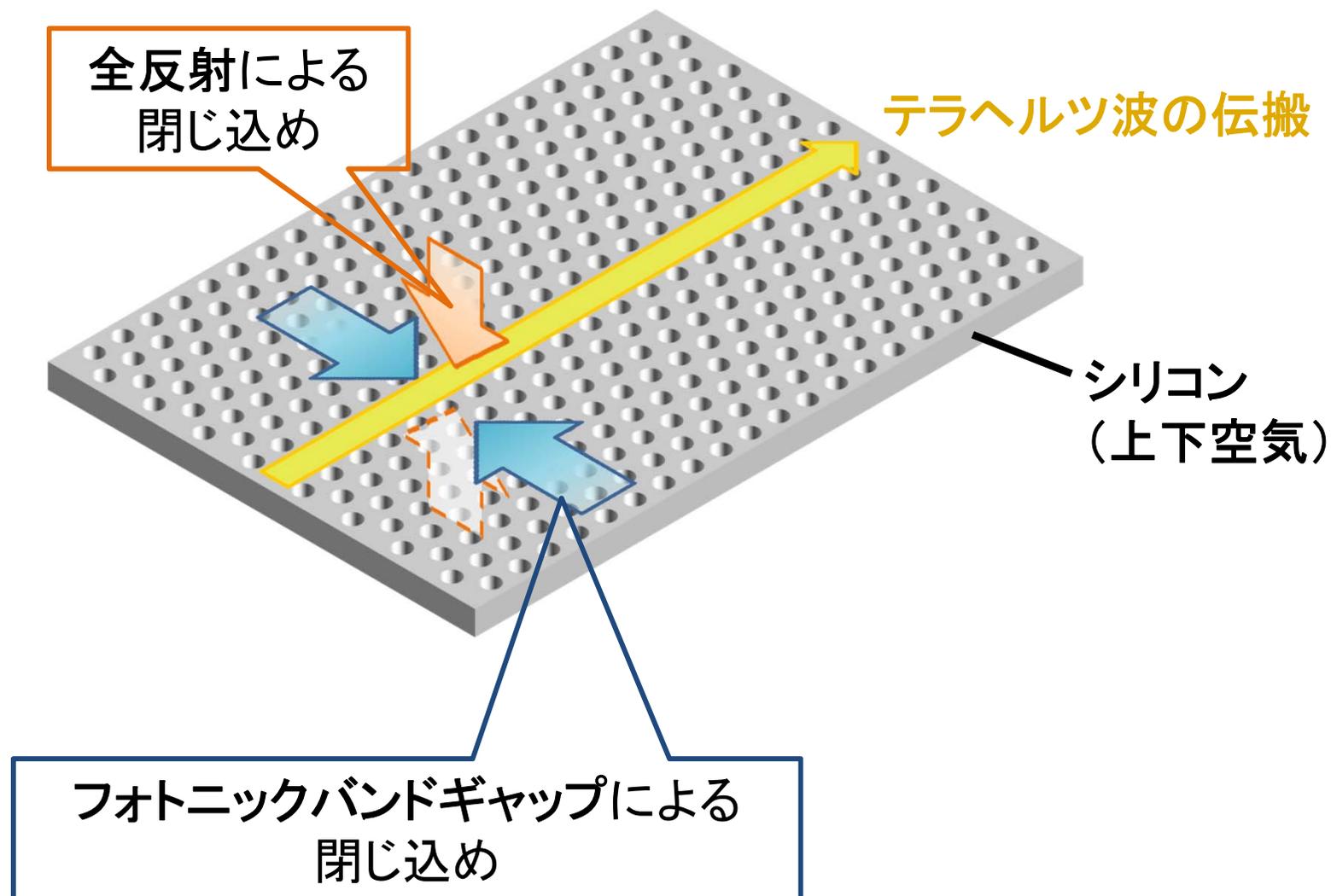


- $\Gamma$ -J 方向
- $\Gamma$ -X 方向

“Photonic-crystal slab for terahertz-wave integrated circuits”

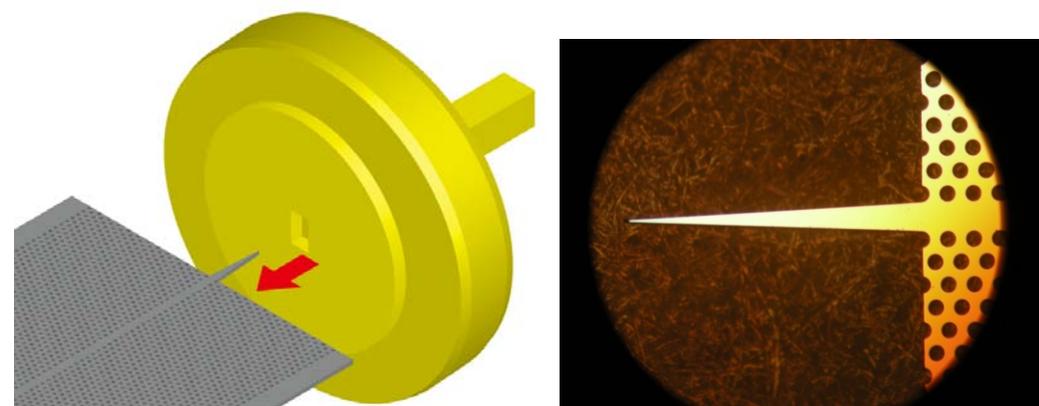
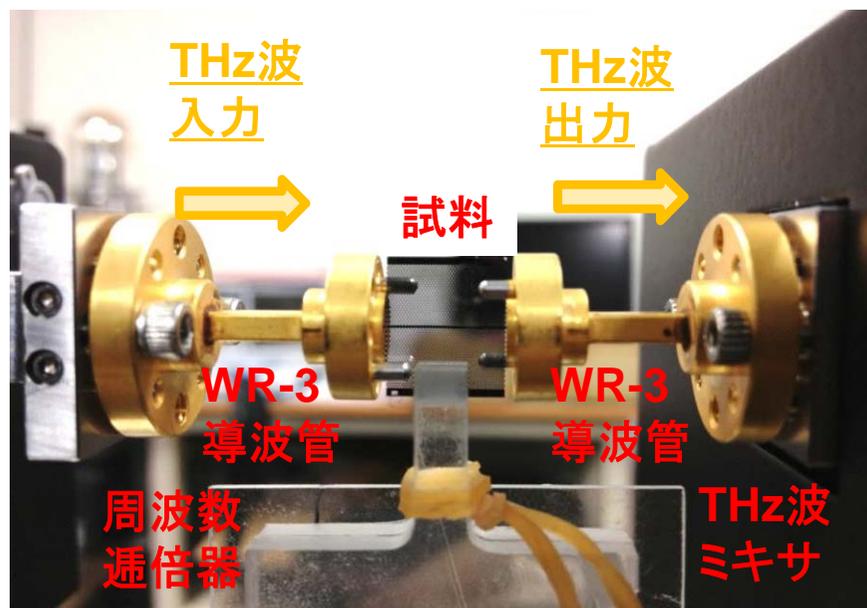
Ishigaki, Fujita, Nagai, Ashida, Nagatsuma, *IEEE Photonics Conf.* (2012) 774.

# フォトニック結晶平面導波路

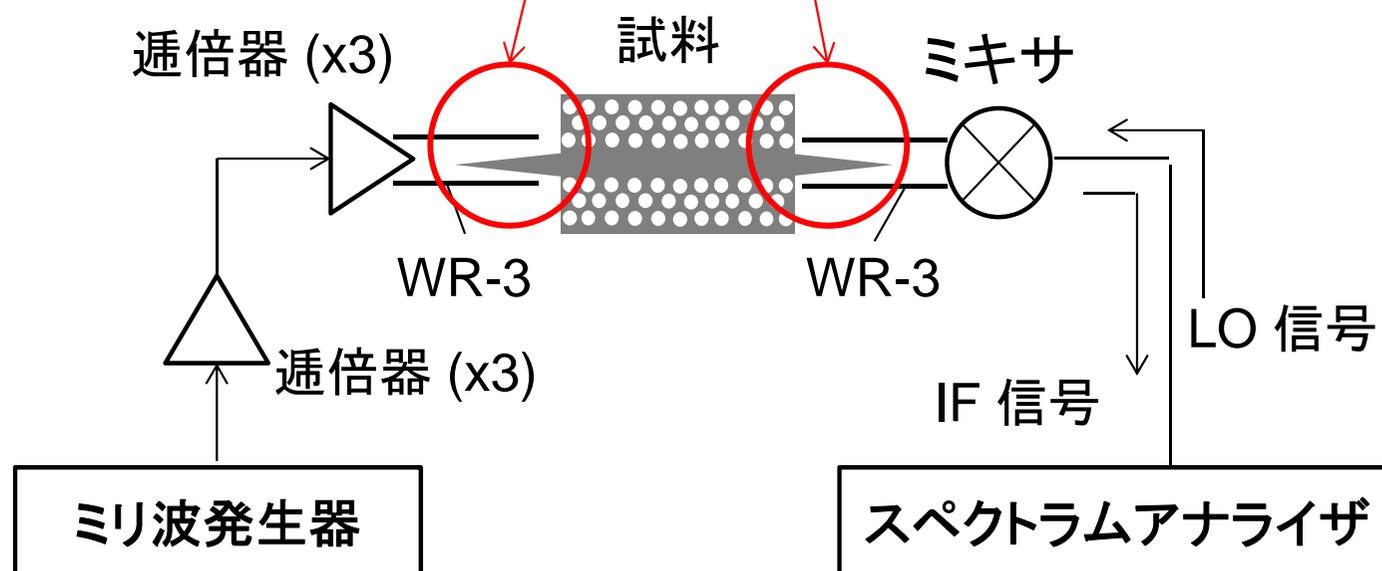


理論的には放射損失がなく、波長オーダサイズの微小回路が可能

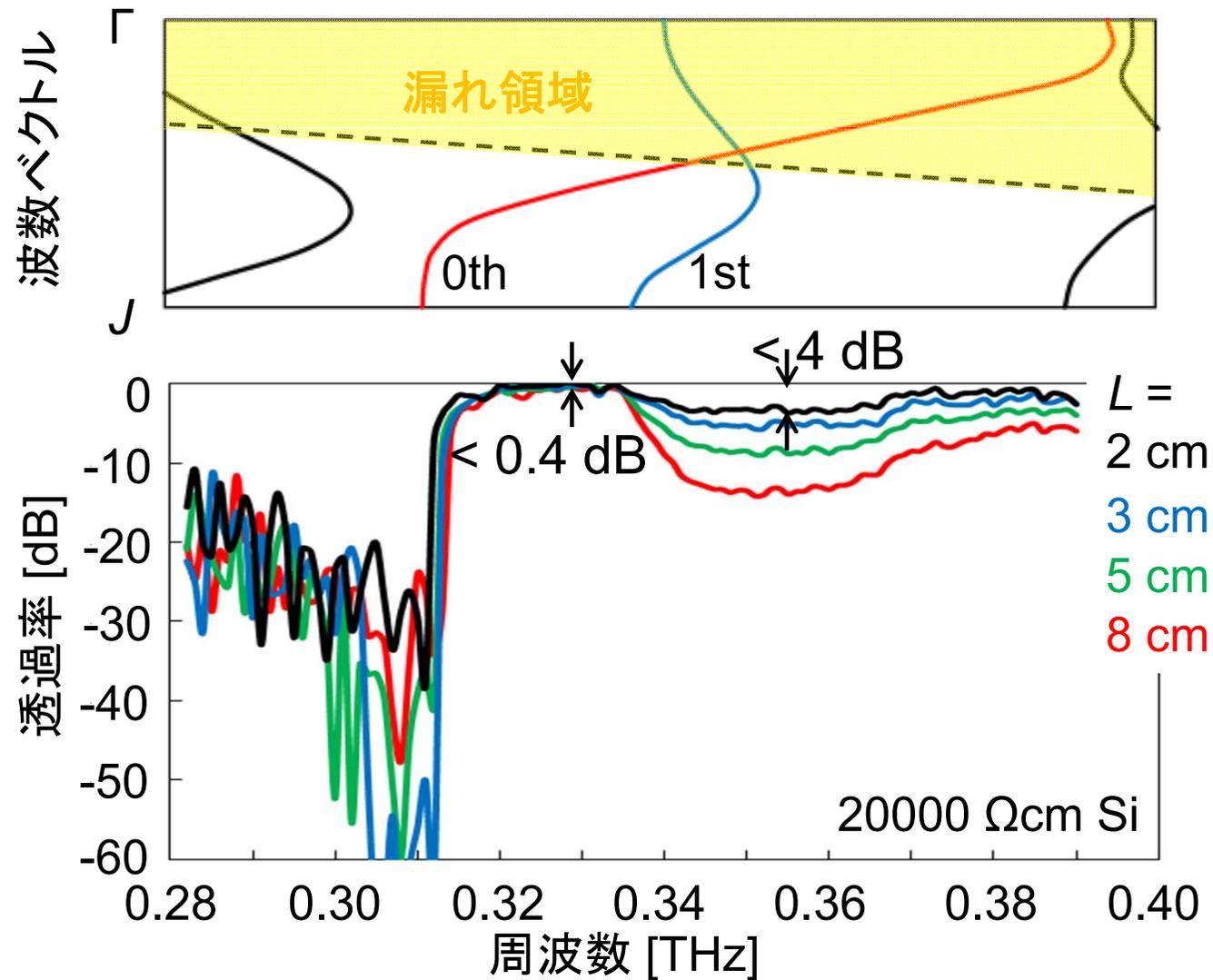
# テラヘルツフォトニック結晶導波路の評価系



## 「電子技術の利用」



# テラヘルツフォトニック結晶導波路の透過スペクトルの例



# 伝搬損失の要因

伝搬損失 = 放射損失 + 吸収損失

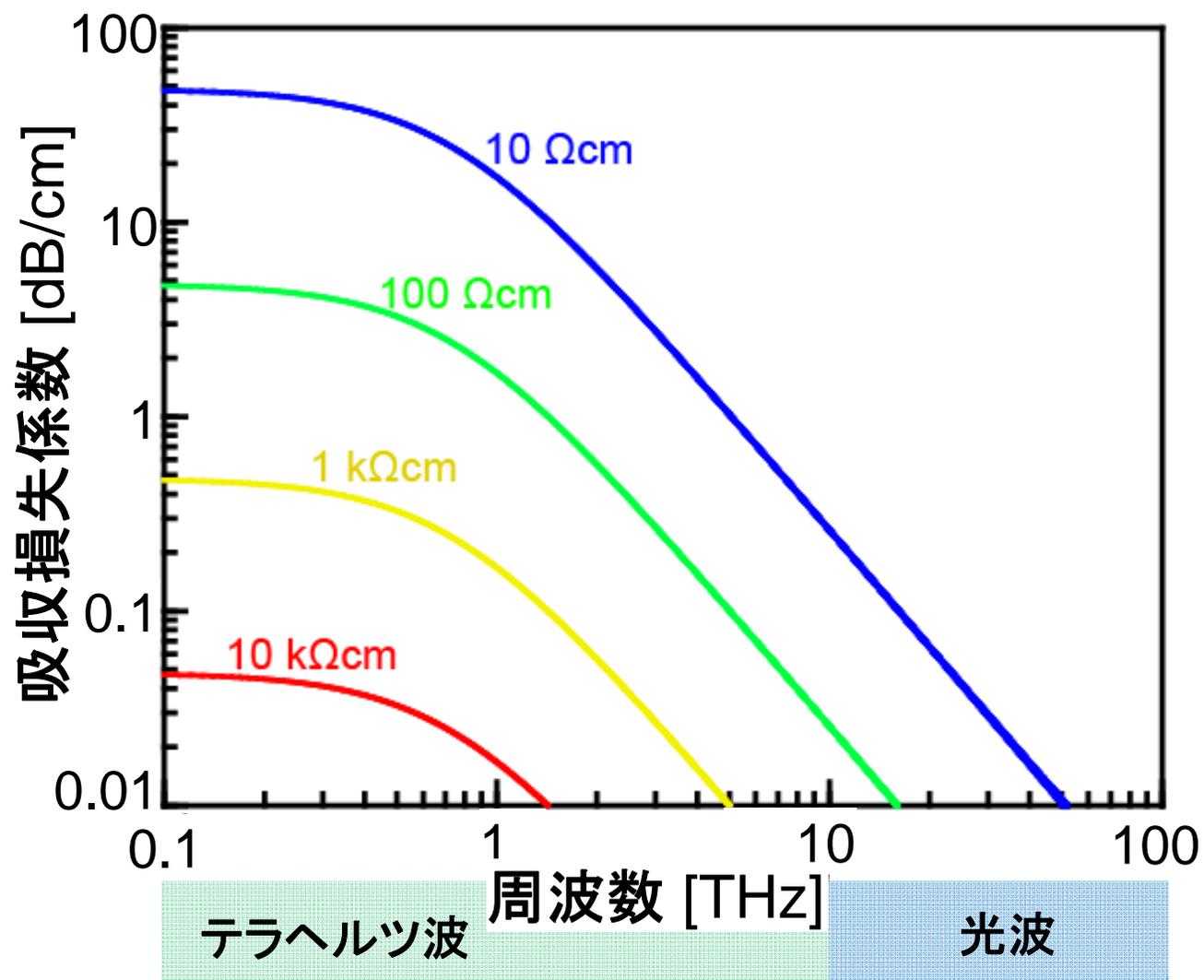
ドローモデル

$$\text{吸収損失 } \alpha(\omega) = \varepsilon_{\infty} \frac{\omega_{\tau} \omega_p^2}{[\omega^2 + \omega_{\tau}^2] n c_0}$$

$$\omega_p(\rho) = \sqrt{\frac{e_0^2 N(\rho)}{\varepsilon_{\infty} \varepsilon_0 m^*}}, \quad \omega_{\tau}(\rho) = \frac{e_0}{\mu_n(\rho) m^*}$$

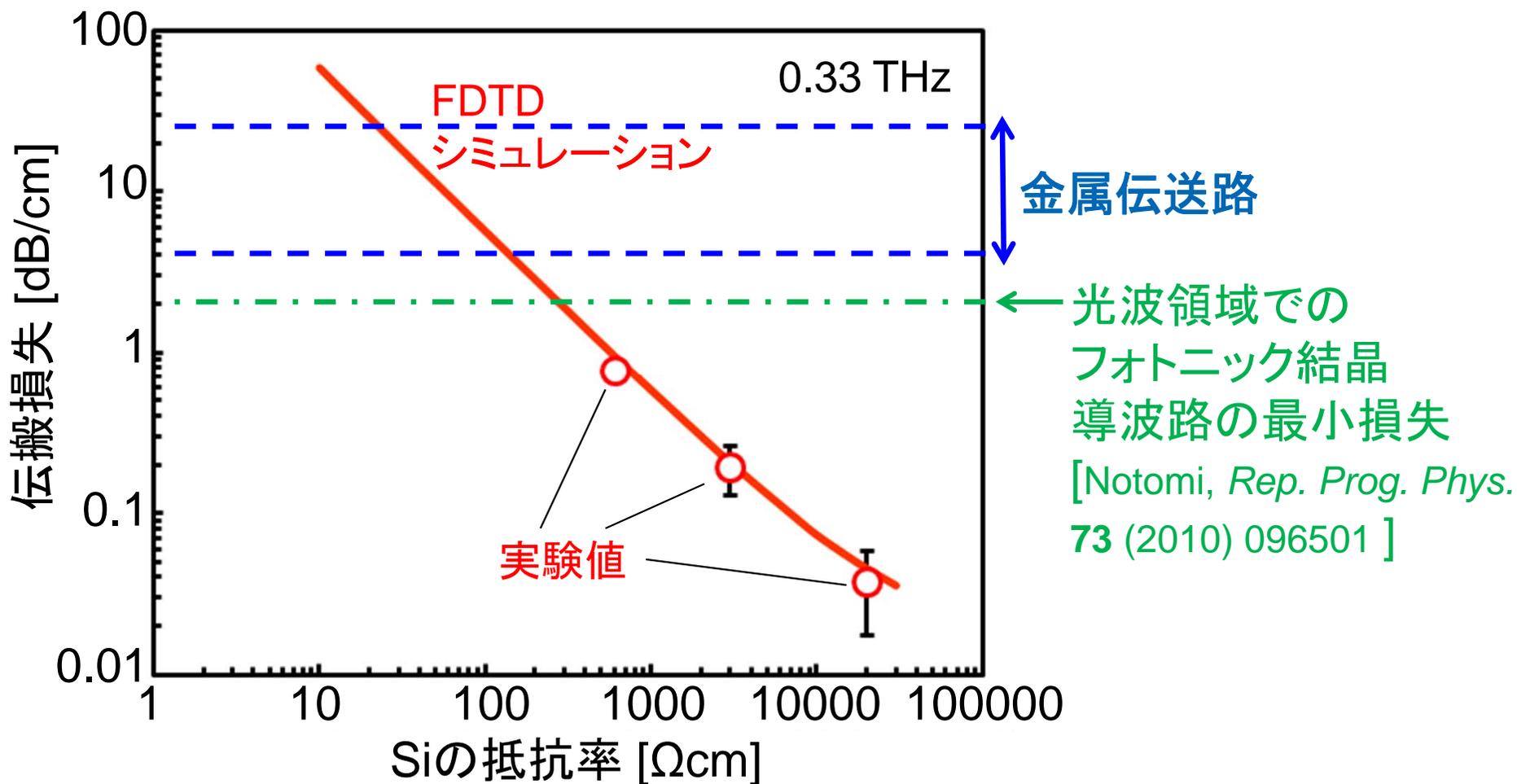
$n$ : 屈折率,  $c_0$ : 光速,  $e_0$ : 素電荷,  $m^*$ : 有効質量,  $\mu_n$ : 移動度  
 $\omega_p$ : プラズマ周波数,  $\omega_{\tau}$ : 緩和周波数,  $\omega$ : 角周波数,  $\rho$ : 抵抗率

# シリコンの吸収損失係数の周波数依存性



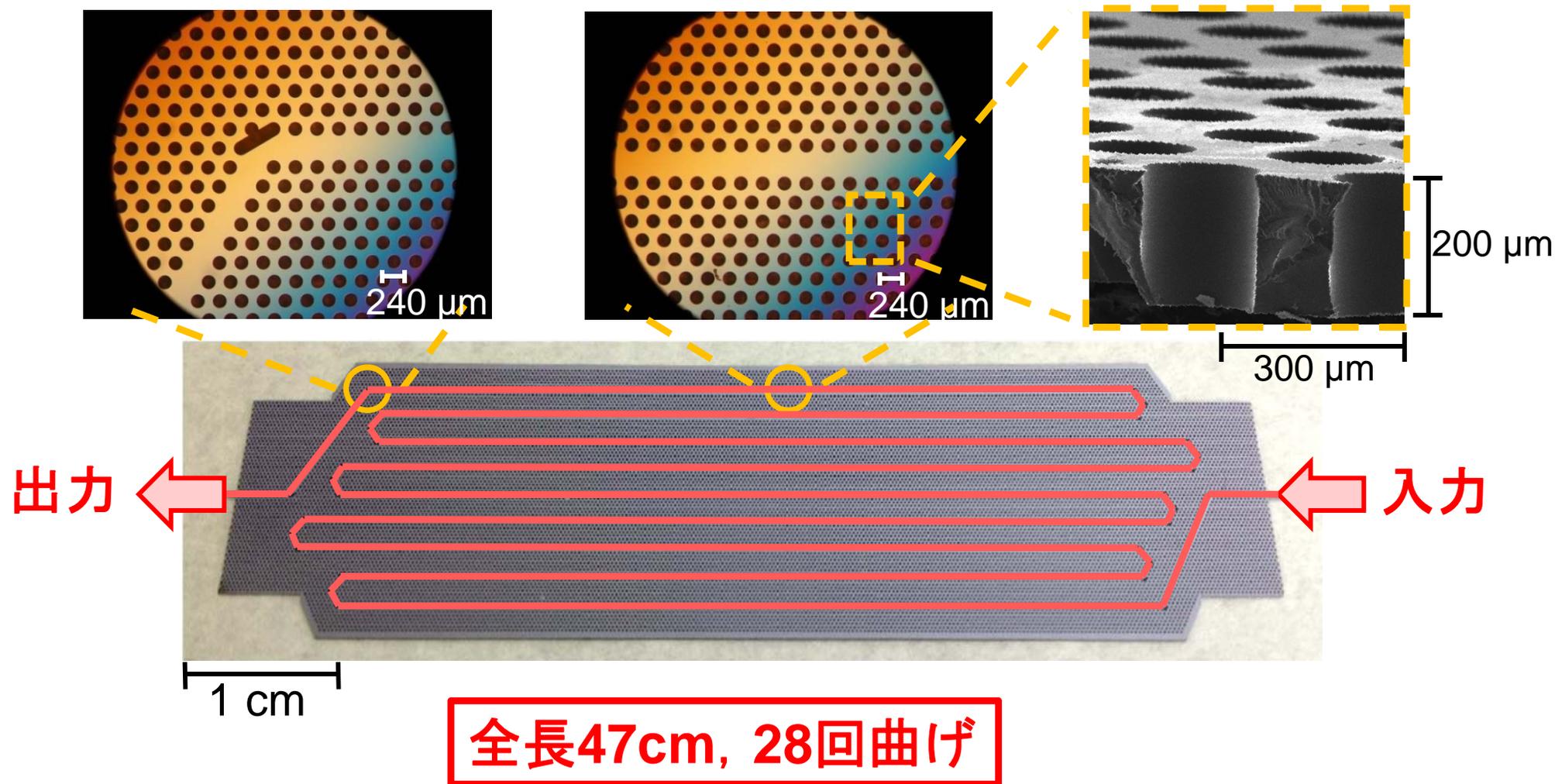
**吸収損失は周波数低で増大. 抵抗率大で減少**

# 様々な抵抗率のシリコンフォトニック結晶 テラヘルツ導波路の伝搬損失



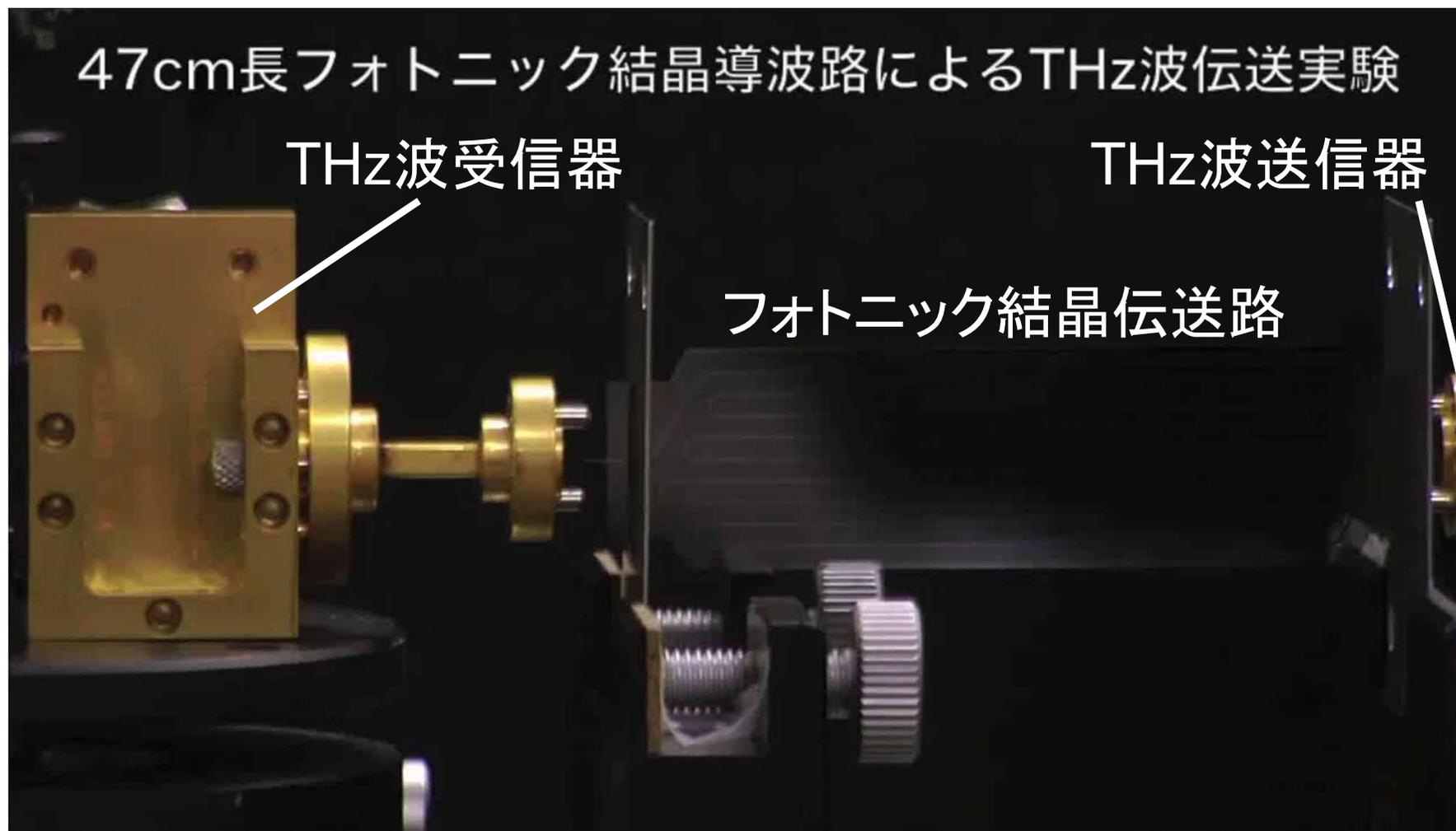
“Extremely low-loss terahertz waveguide based on silicon photonic-crystal slab”,  
Tsuruda, Fujita, Nagatsuma, *Opt. Express*, **23** (2015) 31977.

# テラヘルツフォトニック結晶導波路による ギガビットデータ伝送実験



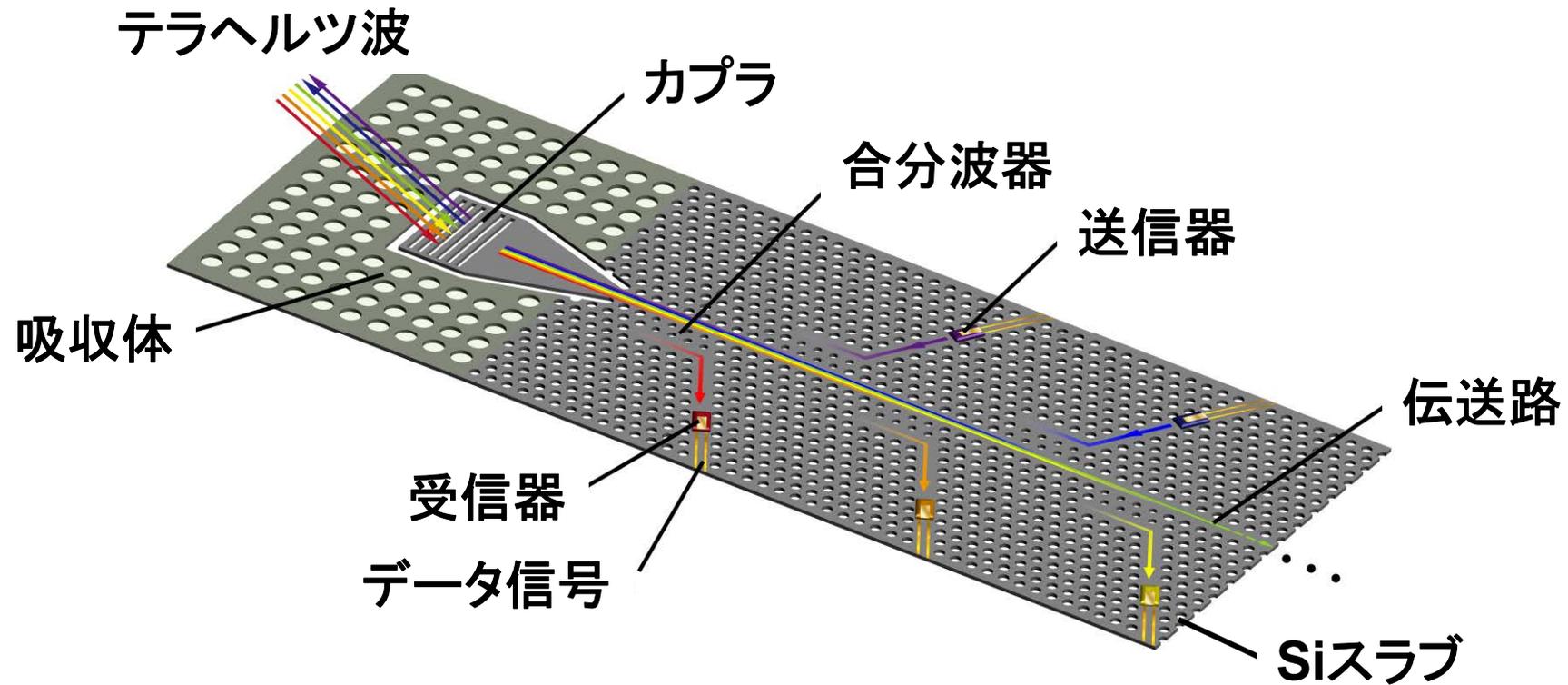
“Extremely low-loss terahertz waveguide based on silicon photonic-crystal slab”,  
Tsuruda, Fujita, Nagatsuma, *Opt. Express*, **23** (2015) 31977.

# フォトニック結晶による非圧縮ハイビジョン映像伝送

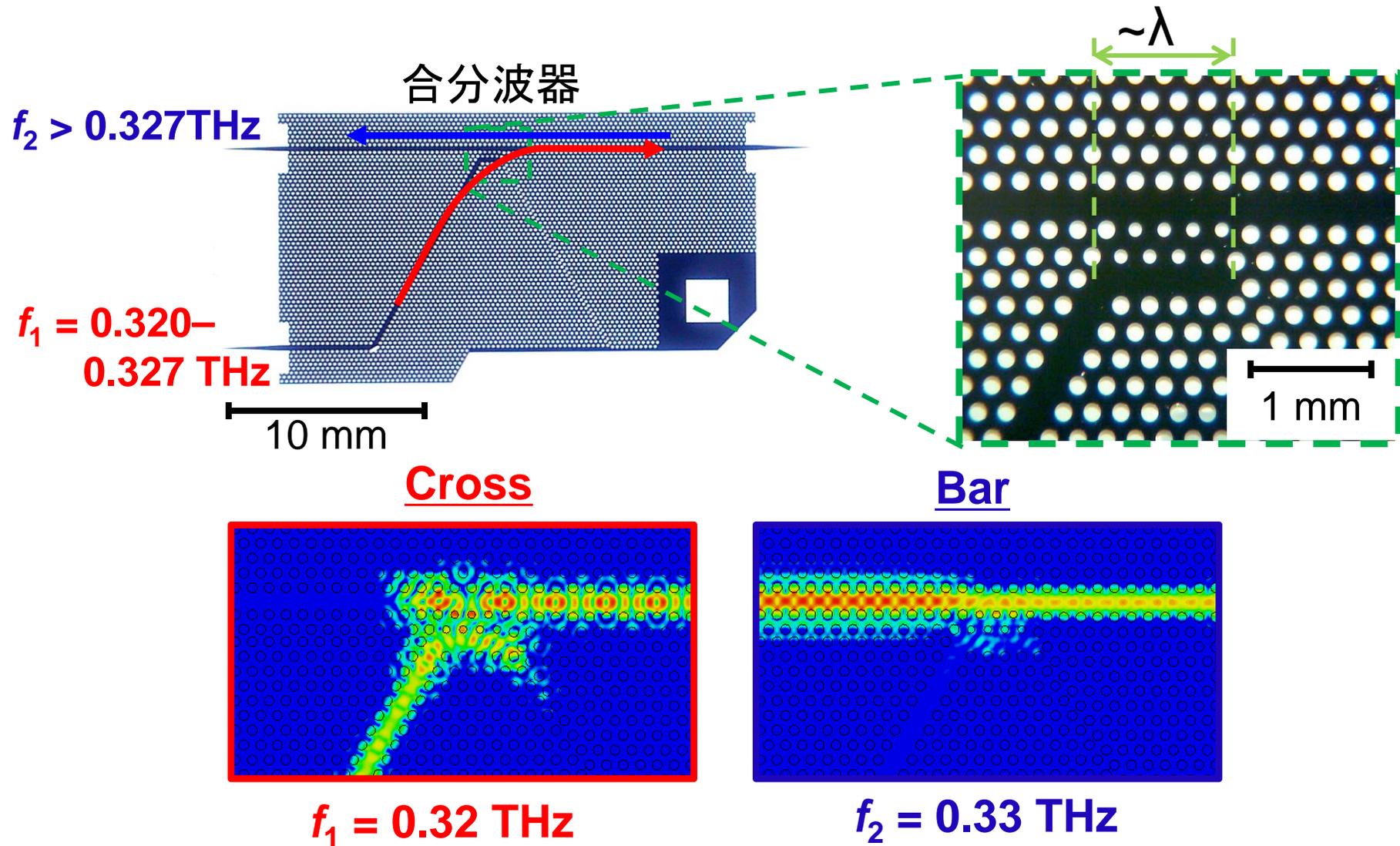


**フォトニック結晶のテラヘルツ波大容量高速通信システムへの  
応用可能性を初めて実証**

# フォトニック結晶をプラットフォームとする テラヘルツ波送受信集積デバイスのイメージ

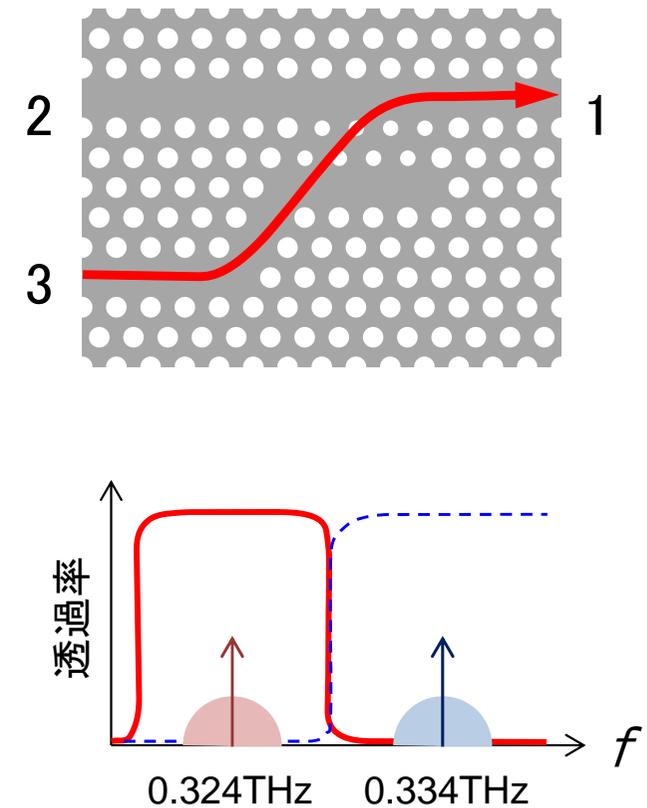
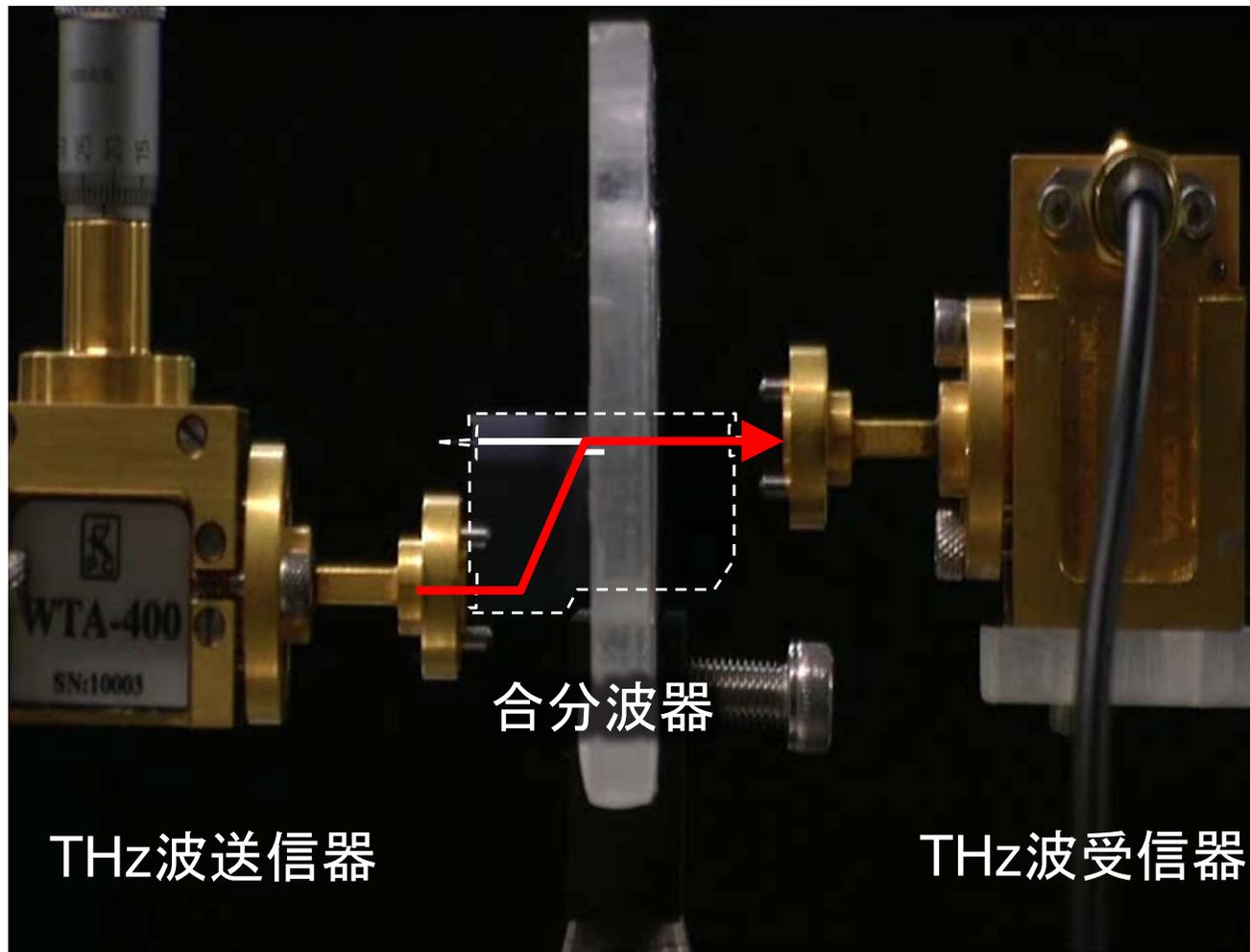


# フォトニック結晶テラヘルツ合分波器



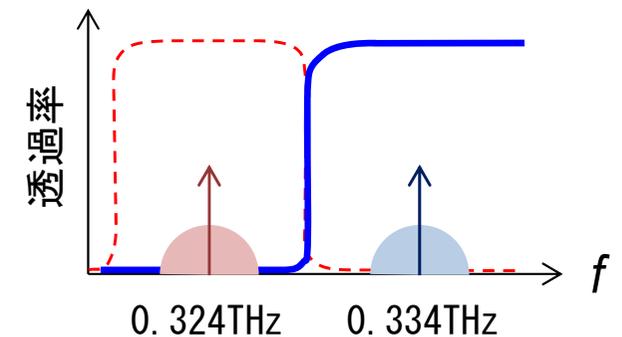
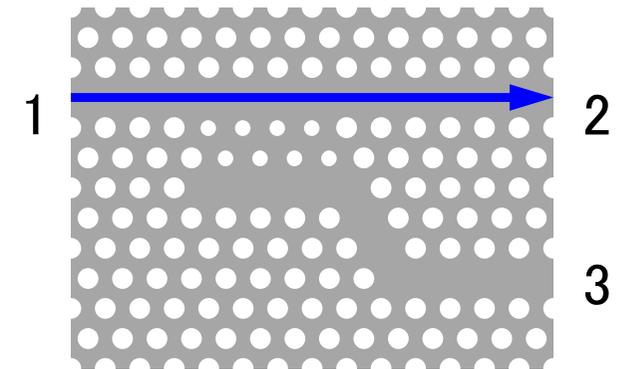
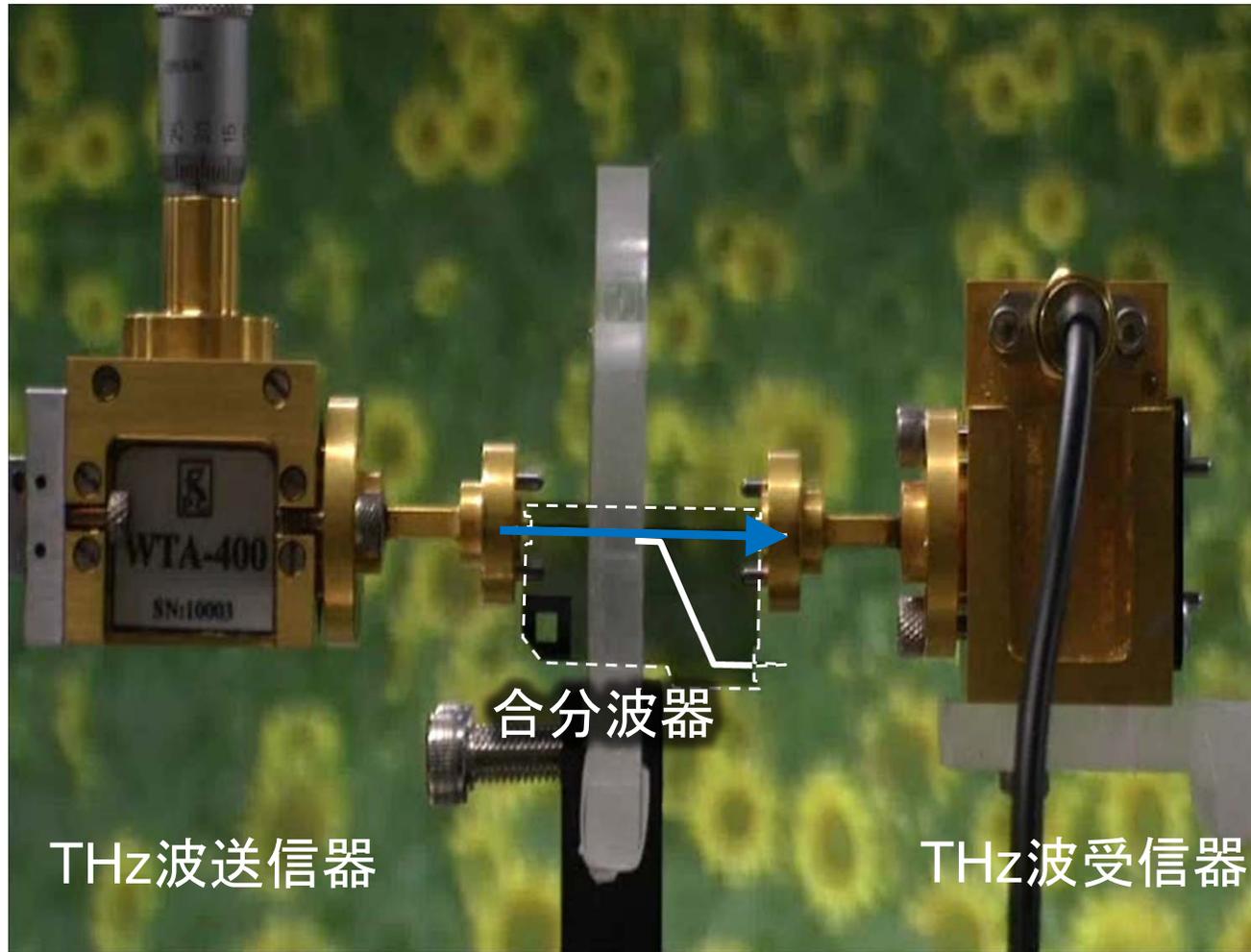
“Photonic-crystal diplexers for terahertz-wave applications”,  
Yata, Fujita, Nagatsuma. *Opt. Express* **24** (2016) (accepted for publication).

# 合分波器を用いた非圧縮ハイビジョン映像伝送



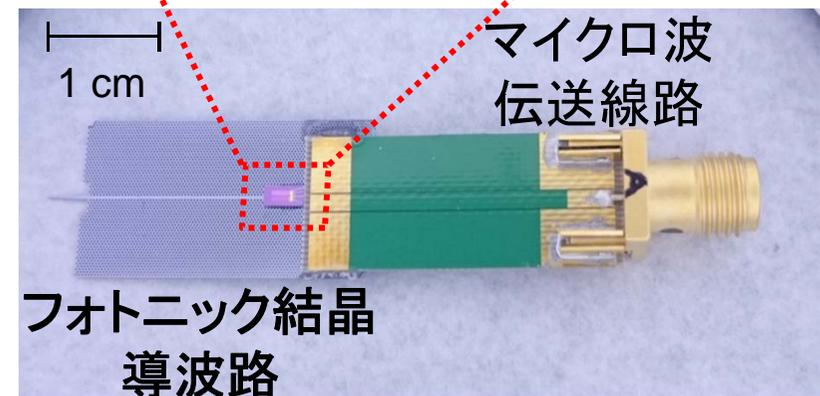
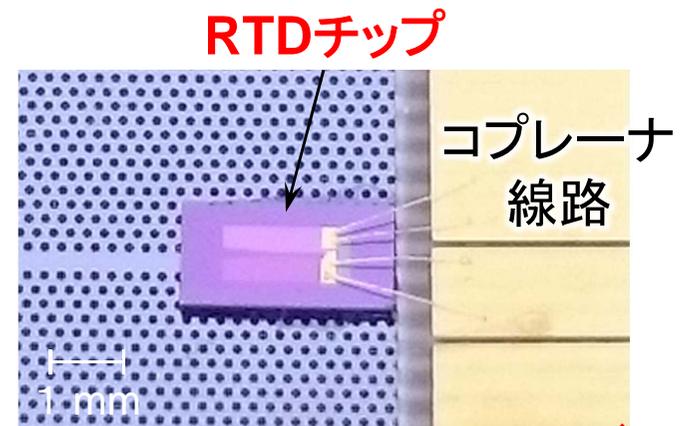
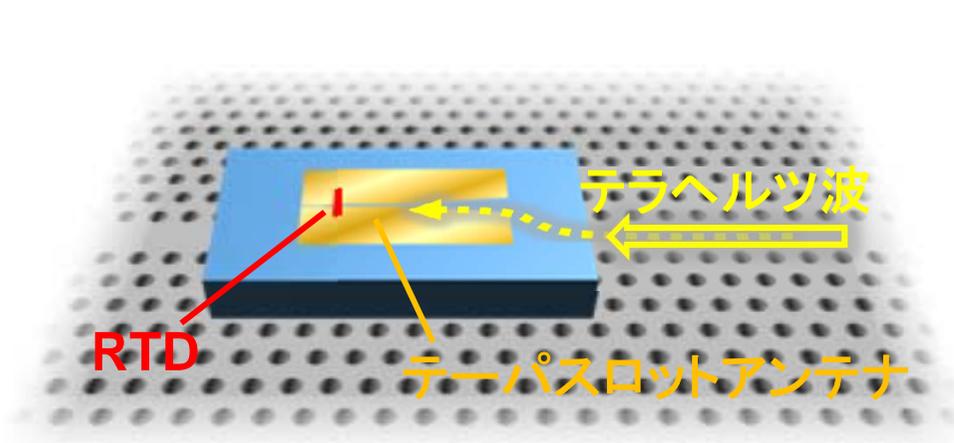
“Photonic-crystal duplexers for terahertz-wave applications”,  
Yata, Fujita, Nagatsuma. *Opt. Express* **24** (2016) (accepted for publication).

# 合分波器を用いた非圧縮ハイビジョン映像伝送

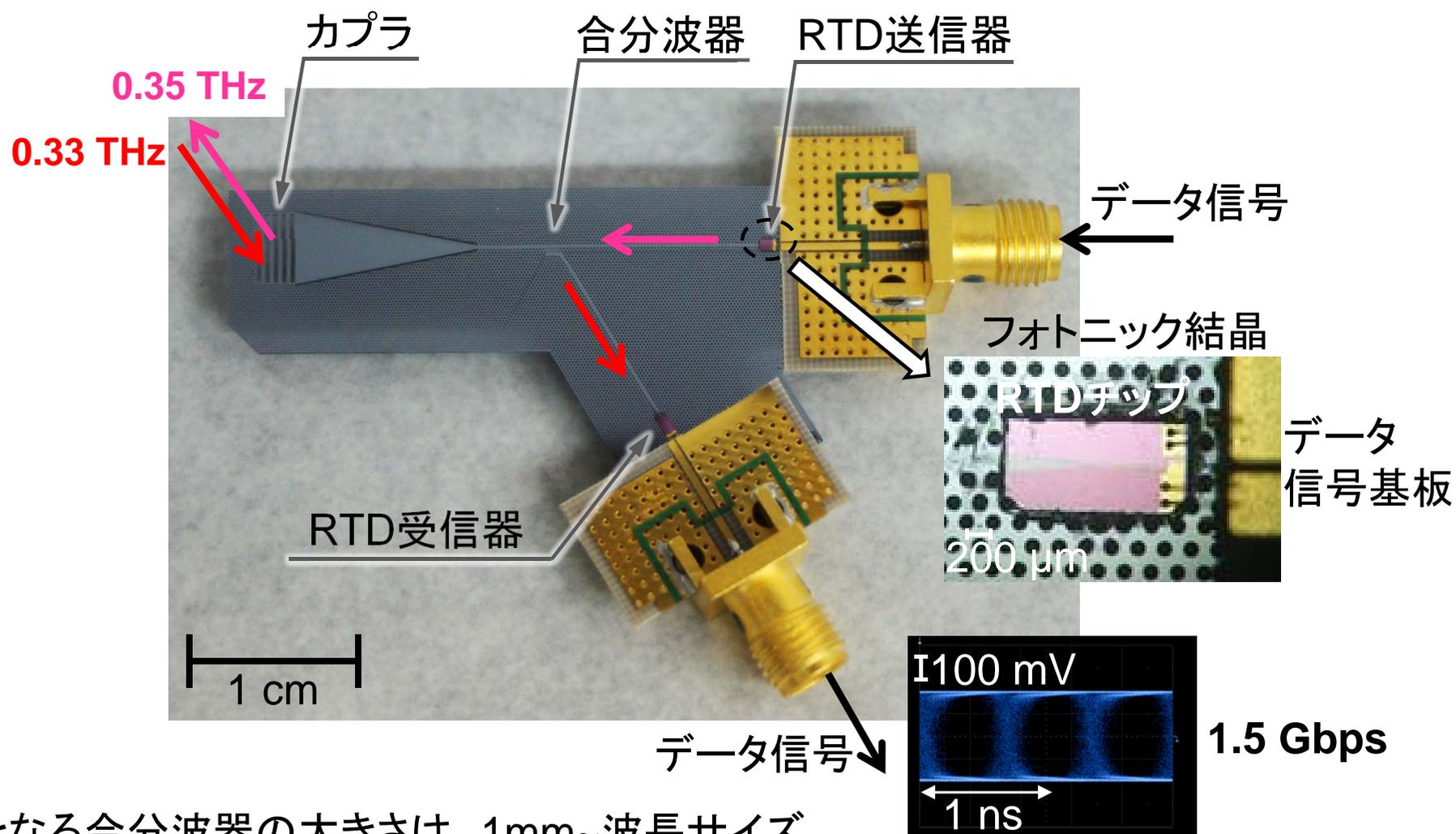


“Photonic-crystal diplexers for terahertz-wave applications”,  
Yata, Fujita, Nagatsuma. *Opt. Express* **24** (2016) (accepted for publication).

# RTDとフォトニック結晶導波路の融合



# 試作したテラヘルツ送受信デバイス



※コアとなる合分波器の大きさは、1mm~波長サイズ.

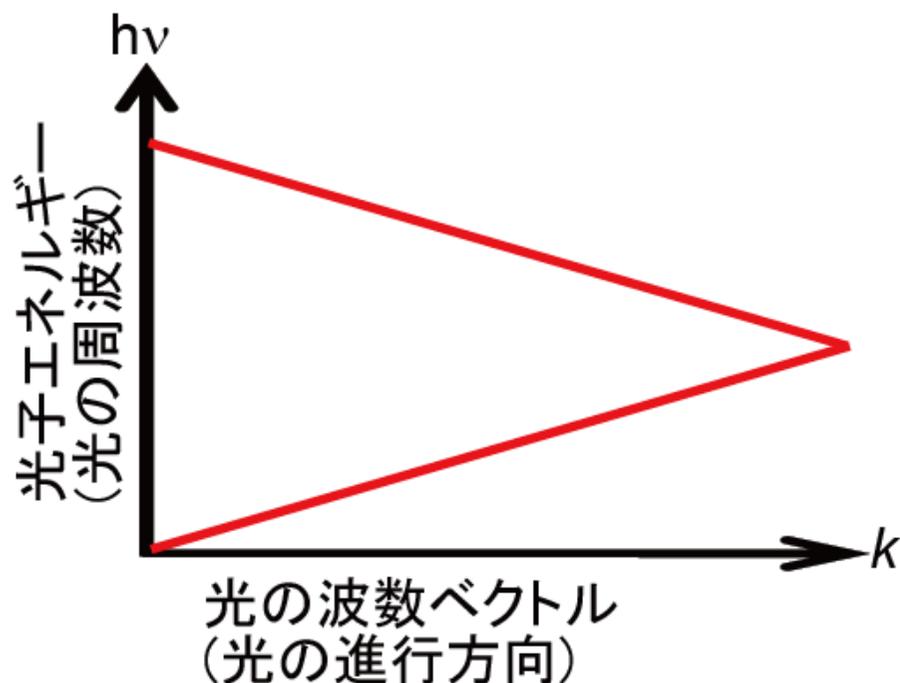
JST CREST「共鳴トンネルダイオードとフォトニック結晶の融合によるテラヘルツ集積基盤技術の創成」として、これを発展させる研究を開始. (2015/10 ~ 2021/3)

## 極低損失テラヘルツフォトニック結晶とその応用

- ・研究背景～テラヘルツ帯の小型集積デバイスに向けて～
- ・フォトニック結晶とは～その基本構造と特性～
- ・テラヘルツ集積回路応用に向けたフォトニック結晶の開発
- ・**フォトニック結晶によるテラヘルツ波の操作と応用**

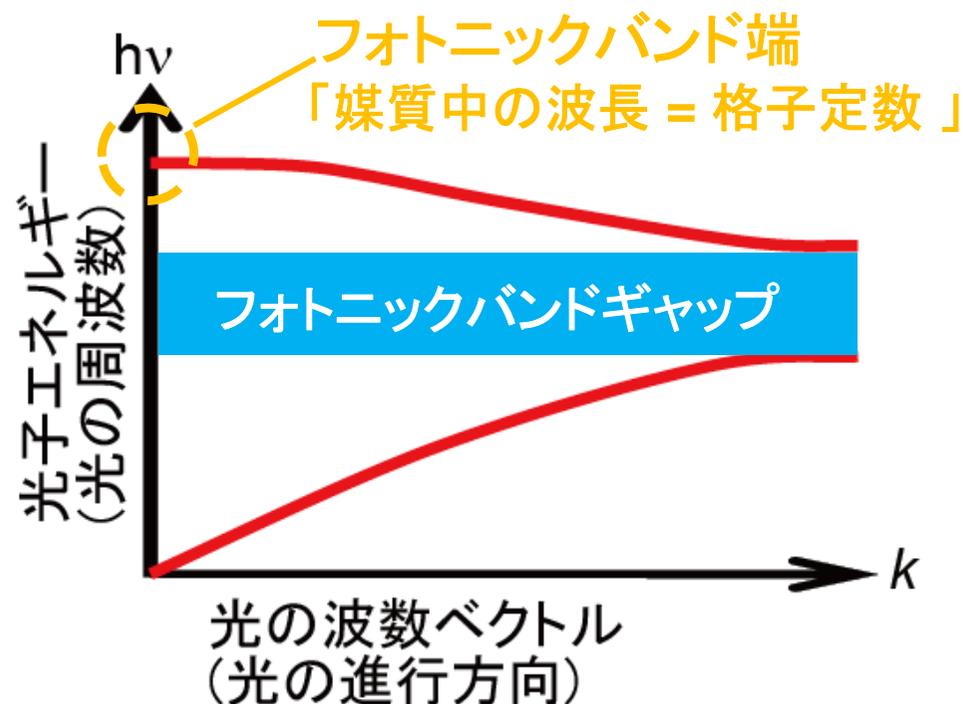
# 光の状態(モード)を表すフォトニックバンド図

## 一様媒質



$$v = (c_0/n)k/2\pi$$

## フォトニック結晶

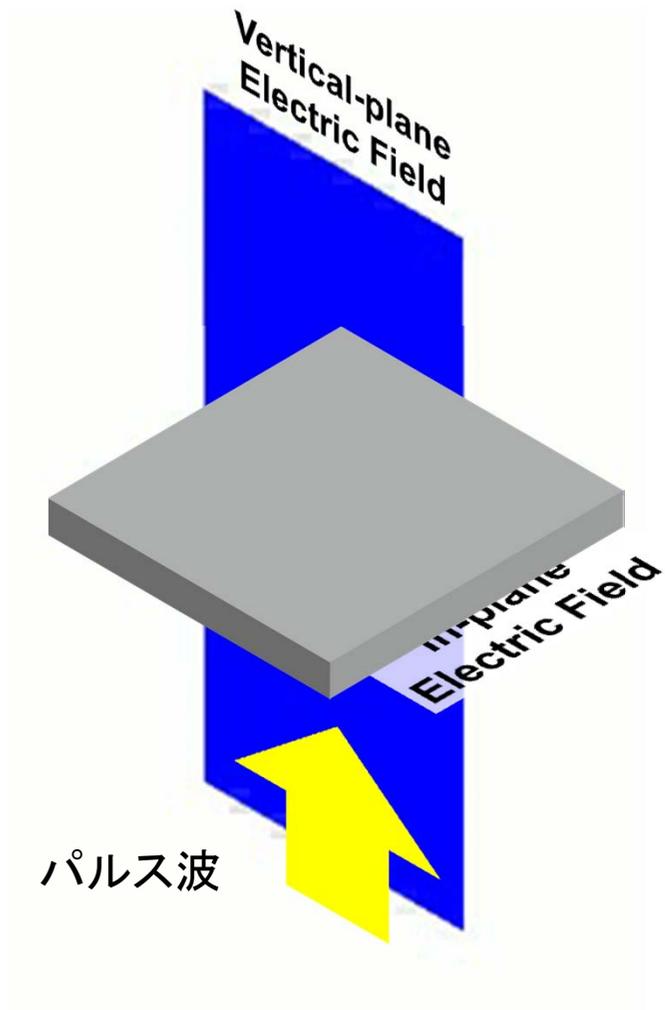


$$v = F(k)$$

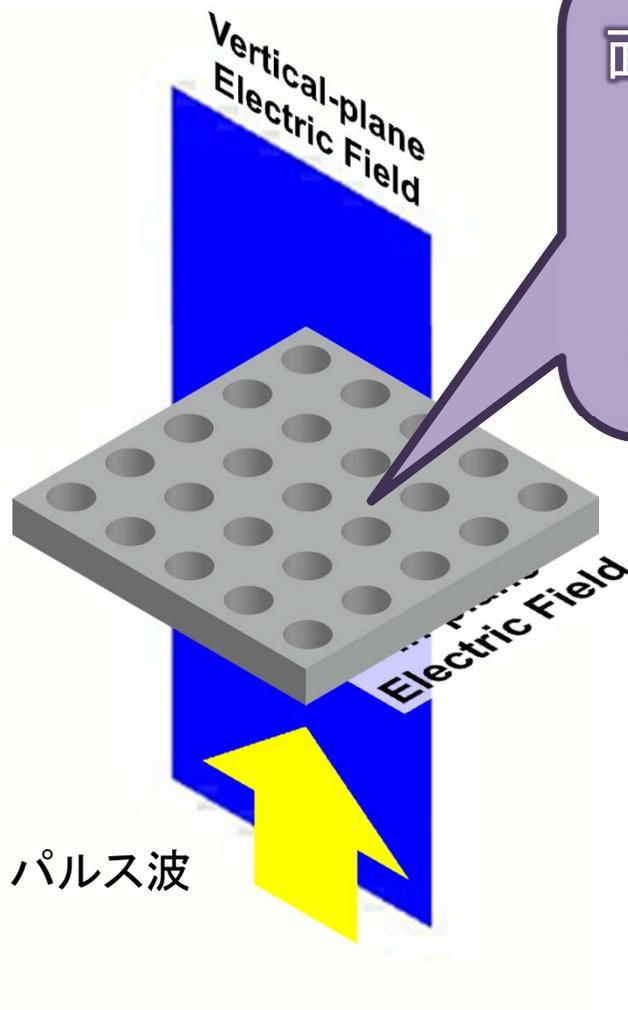
フォトニックバンド端を利用することで面内への光閉じこめが可能  
バンド端のモードと自由空間との結合が可能

# 自由空間を伝搬するテラヘルツ波捕獲のイメージ

## スラブ構造

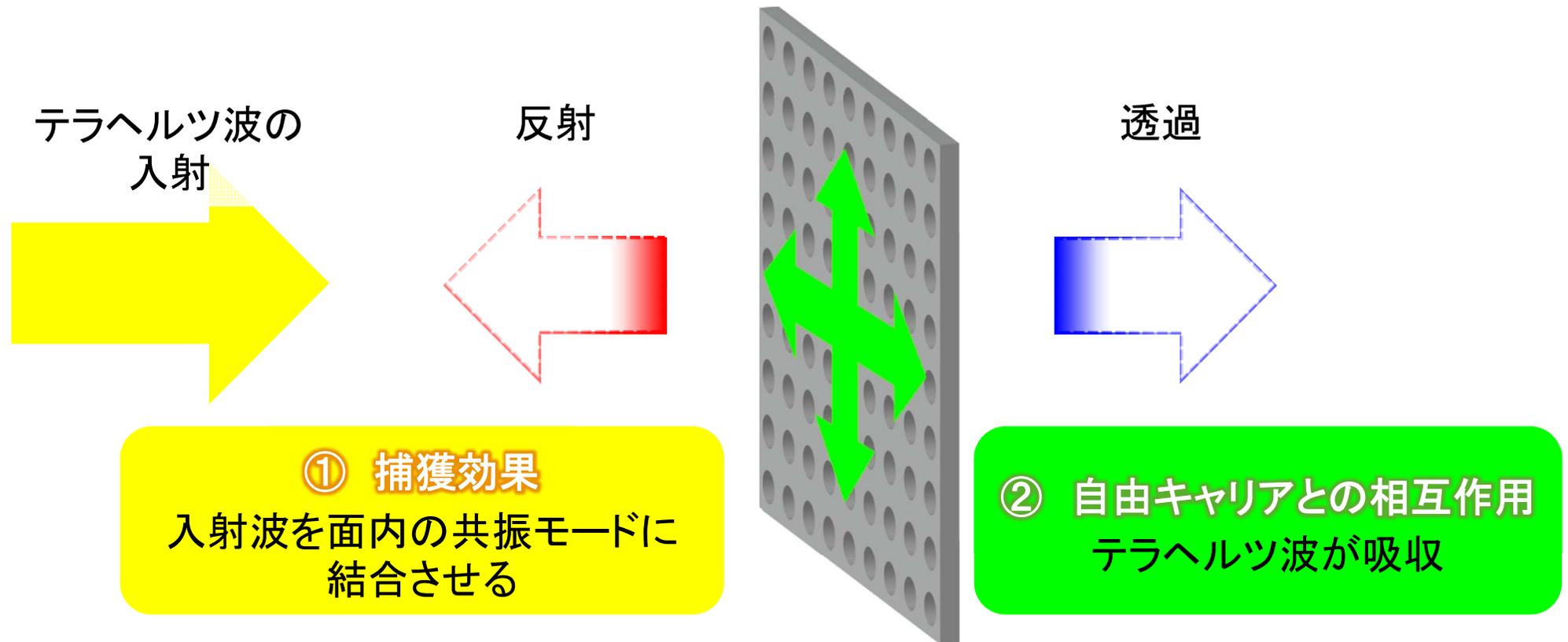


## フォトニック結晶

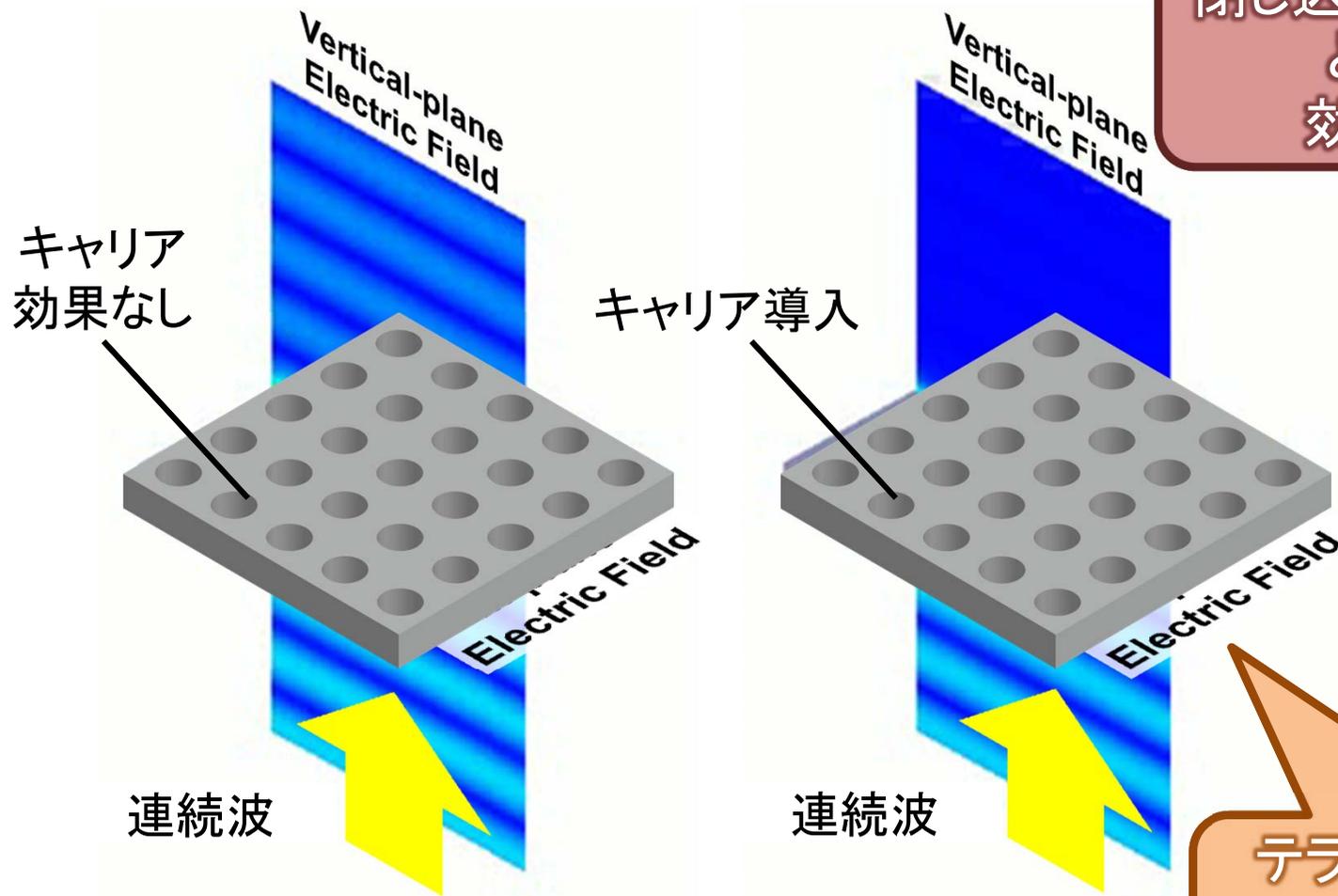


面内の共振モードが励振  
↓  
閉じ込められた  
テラヘルツ波  
がゆっくりと解放される

# テラヘルツ波と電子との相互作用の導入



# 自由キャリアのフォトニック結晶への導入



閉じ込められたテラヘルツ波  
と自由キャリアが  
効果的に相互作用

テラヘルツ光が外部から  
観察できなくなる  
→(完全)吸収体

# テラヘルツ近接無線通信と吸収体

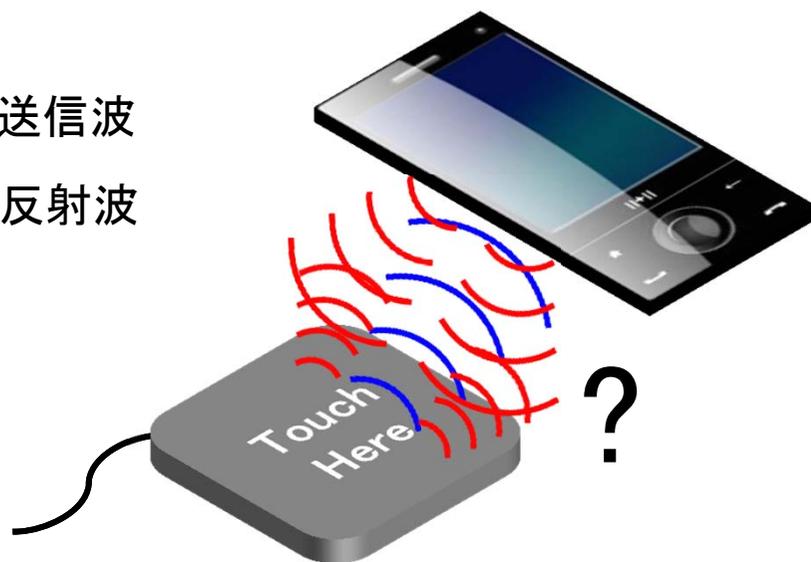
モバイル端末を用いた超高速近接データ通信を想定

テラヘルツ波が  
多重反射+干渉

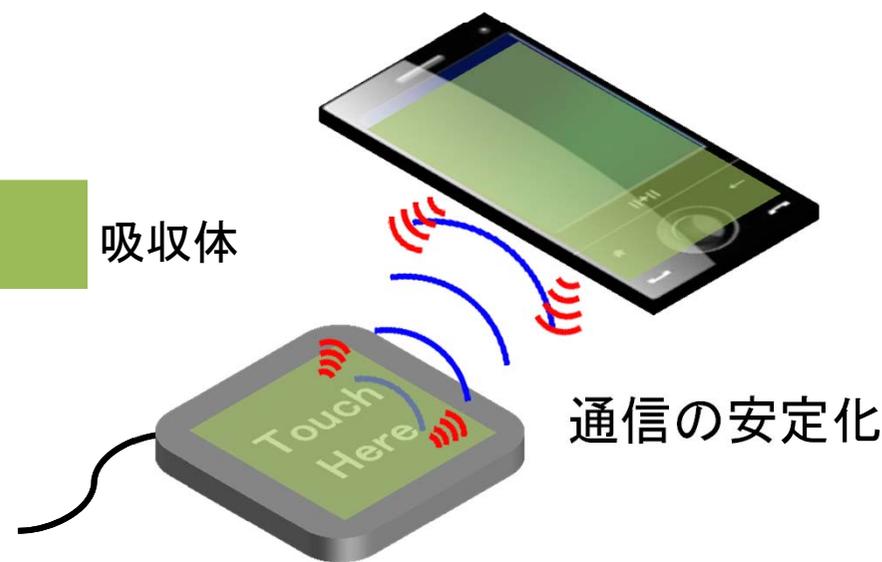


不要な反射を防ぐ  
吸収体を内蔵

))) 送信波  
))) 反射波



吸収体



通信の安定化

# テラヘルツ吸収体に期待される性能

- ・高吸収率(相互作用の効率) **最大吸収率~99%**
- ・広帯域動作 **中心周波数の10% (90%吸収率帯域)**
- ・薄膜構造 **波長以下の厚さ**

Supplementary Information in *Nature Photonics* **8** (2014) 657.

**Table S1.** Comparison of the metamaterial THz-wave absorbers

Reference no.	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21	S22	S23	S24	S25	S26	S27	S28
Frequency [THz]	1.3	1.6	1.15	0.45	3.0	0.74	5.2	3.56	0.89	0.93	4.1	1.71	2.3	4.6	0.46	0.85
Theoretical peak absorptivity [%]	98	99.9	95	>99.99	>99	>99	99	99.93	N/A	99.9	98	99.5	98	98	97	99.95
Experimental peak absorptivity [%]	68	96.8	77	80.8	94	~98	74	86.8	99.8	~99.9	98	96.7	97	94	80	97
Experimental minimum reflectivity in dB	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	-27	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Experimental 90%-absorptivity bandwidth [%]	N/A	3.7	N/A	N/A	4.1	3.0	N/A	N/A	4.8	9.0	5.6	2.7	5.2	3.8	N/A	2.1

# 高吸収率：キャリア密度の最適化

材料のキャリア密度

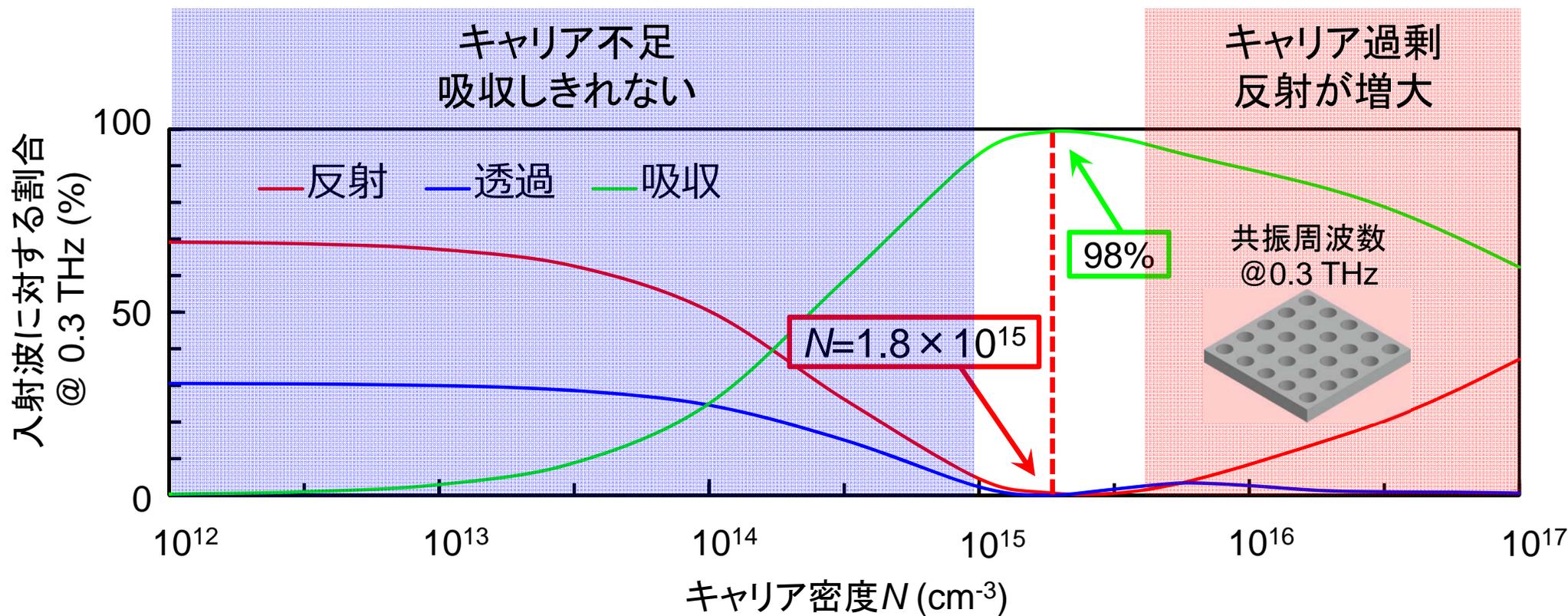
小  大

材料の吸収係数

小  大

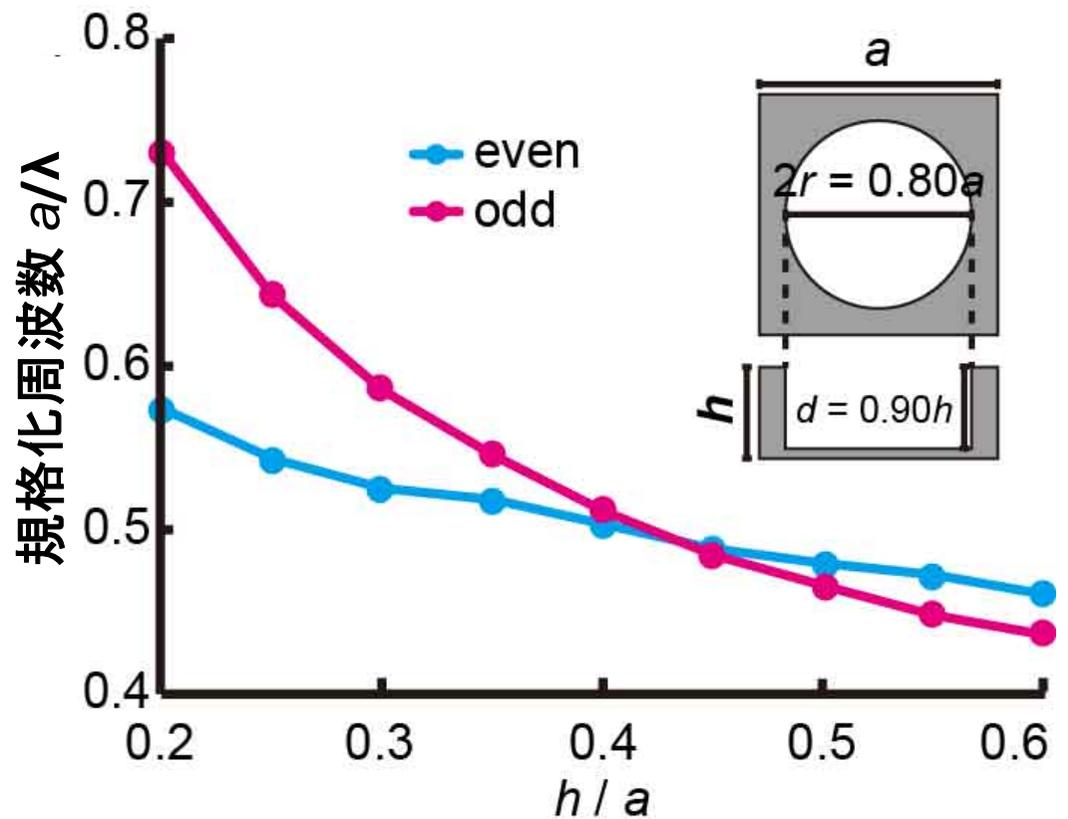
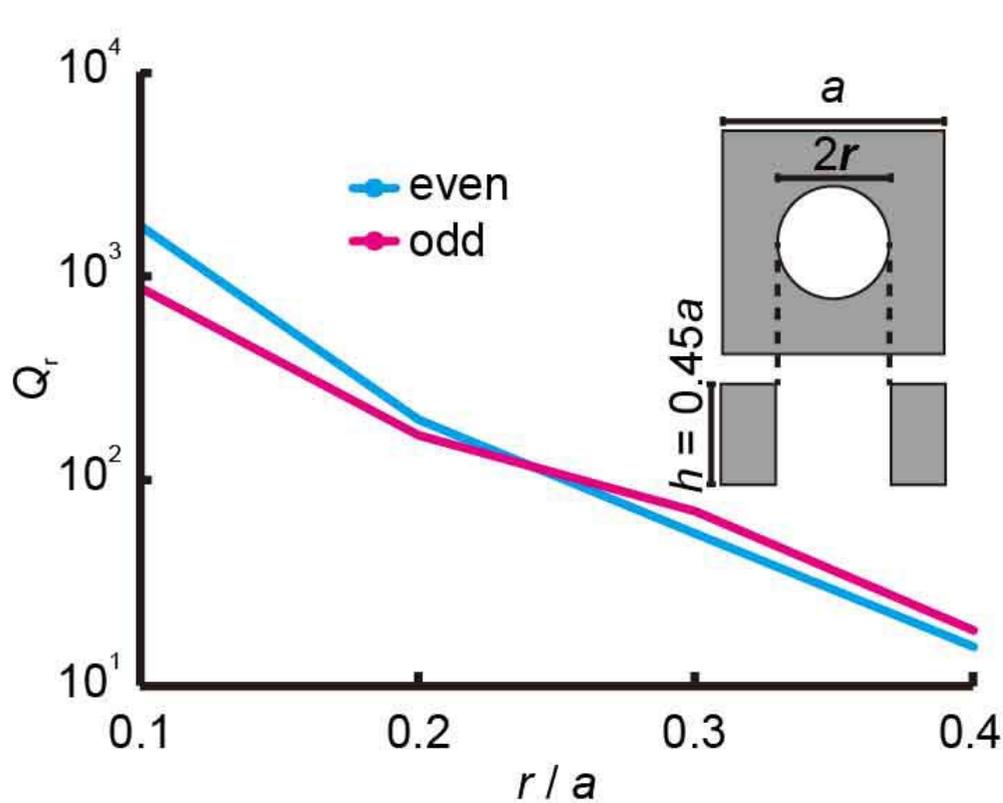
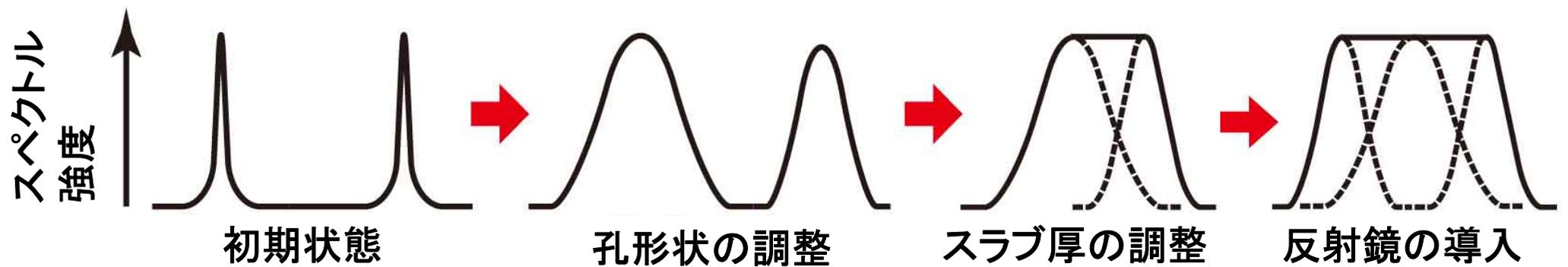
吸収率

小  大  小

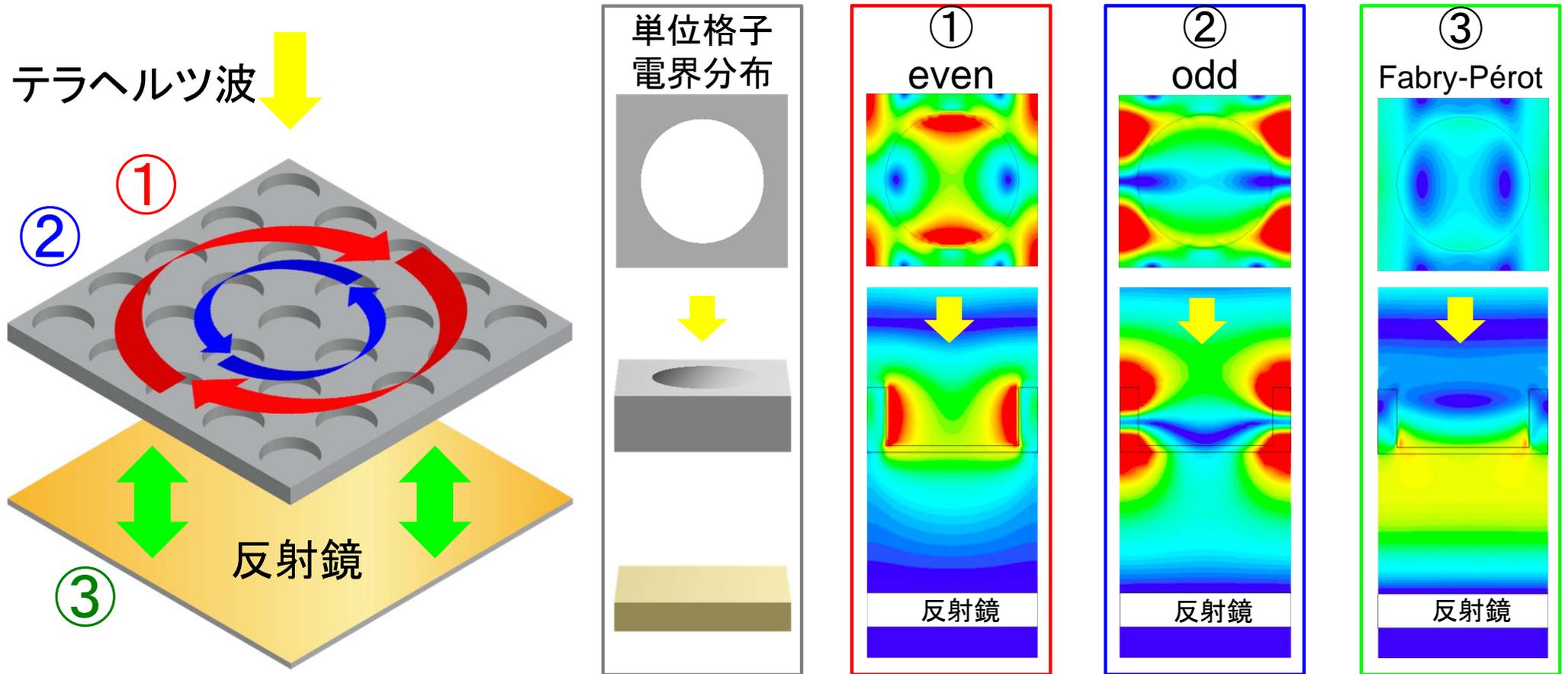


高い吸収率を得るために最適なキャリア密度にする必要がある

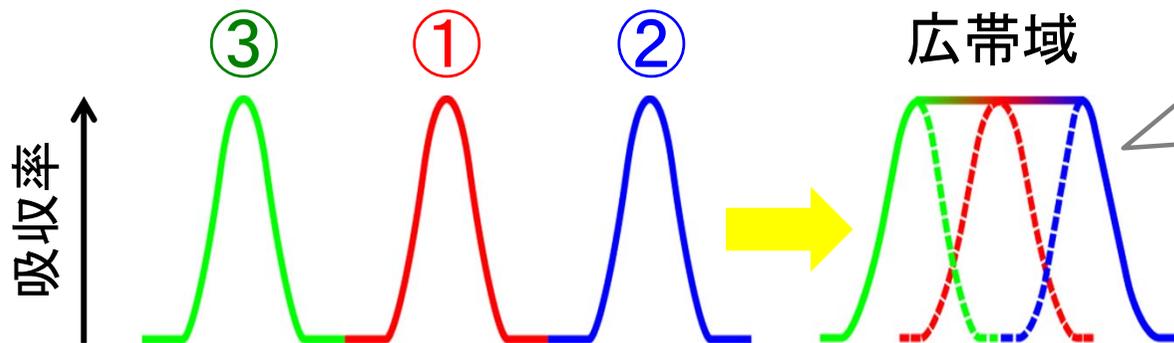
# 広帯域動作：共振モードのチューニング



# 広帯域動作:トリプルモード動作



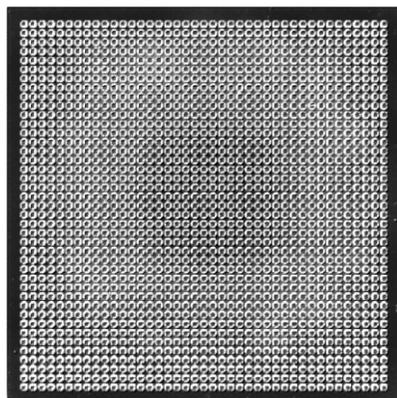
## 三種の共振モードを用いたトリプルモード動作



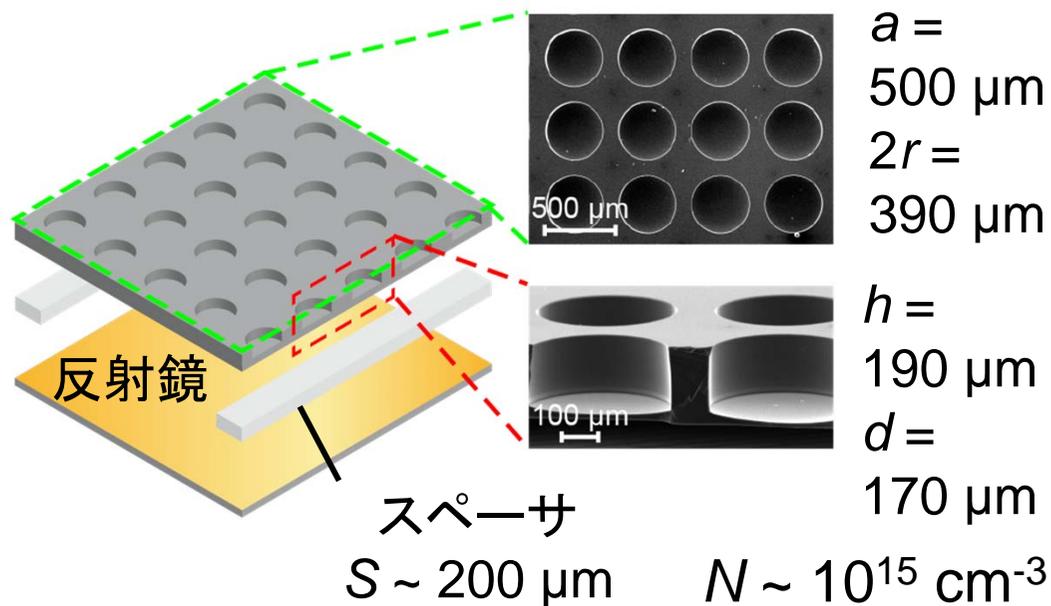
フォトニック結晶構造  
+ 反射鏡間隔を調節  
三種の吸収ピークが  
周波数的に隣接するよう設計

# 最適構造の作製結果

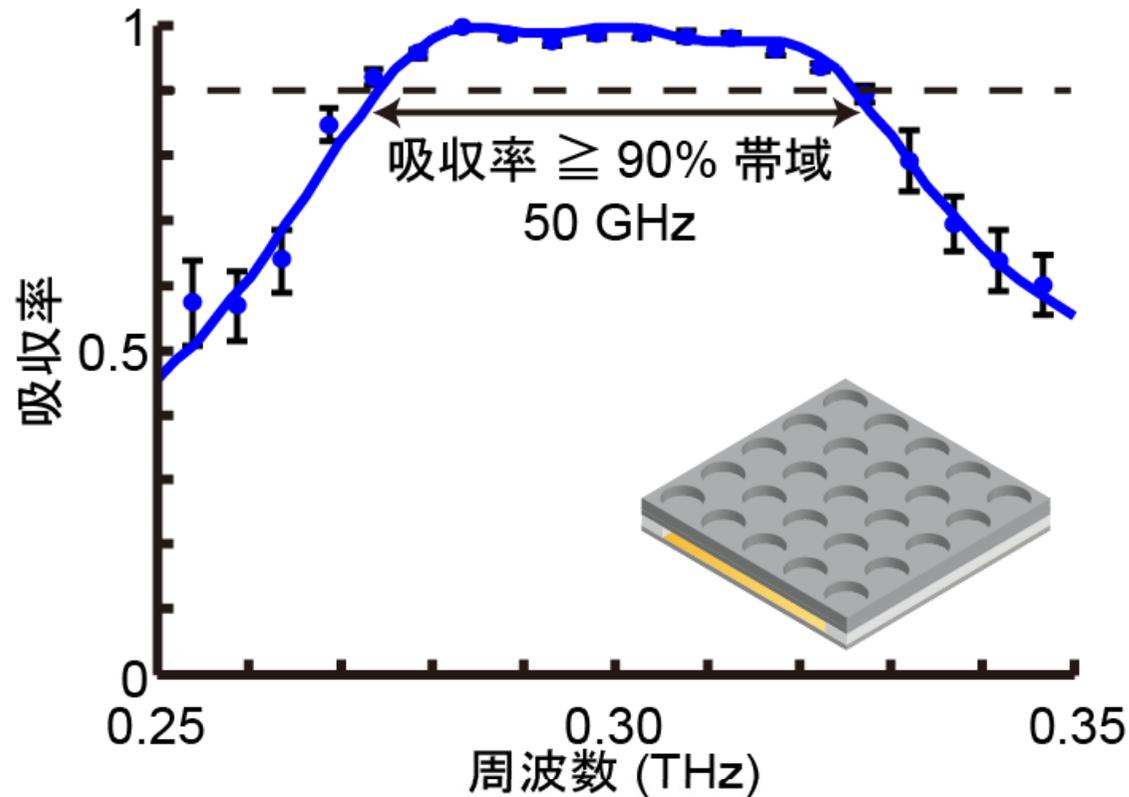
光学顕微鏡写真



電子顕微鏡写真



# 最適構造の吸収スペクトル



ピーク吸収率 :  $> 99\%$

吸収率  $\geq 90\%$  の帯域 : 0.5 THz (中心周波数の約17%)

の吸収体を波長 $\nearrow$ 2の厚さで実現



*“Capture of a terahertz wave in a photonic-crystal slab”,  
Kakimi, Fujita, Nagai, Ashida, Nagatsuma. Nature Photonics 8 (2014) 657.*



# まとめ

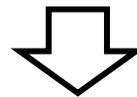
## 極低損失テラヘルツフォトニック結晶とその応用

テラヘルツ集積回路応用に向けたフォトニック結晶の開発

- ・**極低損失**( $<0.1$  dB/cm) **導波路**の実現とギガビット通信の実現
- ・伝送路と集積化した小型( $\sim\lambda$ ) **合分波器**による周波数分離ギガビット通信の実現

フォトニック結晶によるテラヘルツ波の操作と応用

- ・広帯域(17%)高吸収率( $>99\%$ )薄膜( $\sim\lambda/2$ ) **吸収体**の実現と近接無線通信の安定化



**テラヘルツ帯プラットホーム構造として、**  
**平面薄膜のフォトニック結晶スラブが有望**

※応用物理学会誌2016年6月号に研究紹介

「フォトニック結晶スラブによるテラヘルツ波の操作と応用」が掲載予定