

フォトダイオードアレー & ビームステアリング

2021/3/31 6GWG



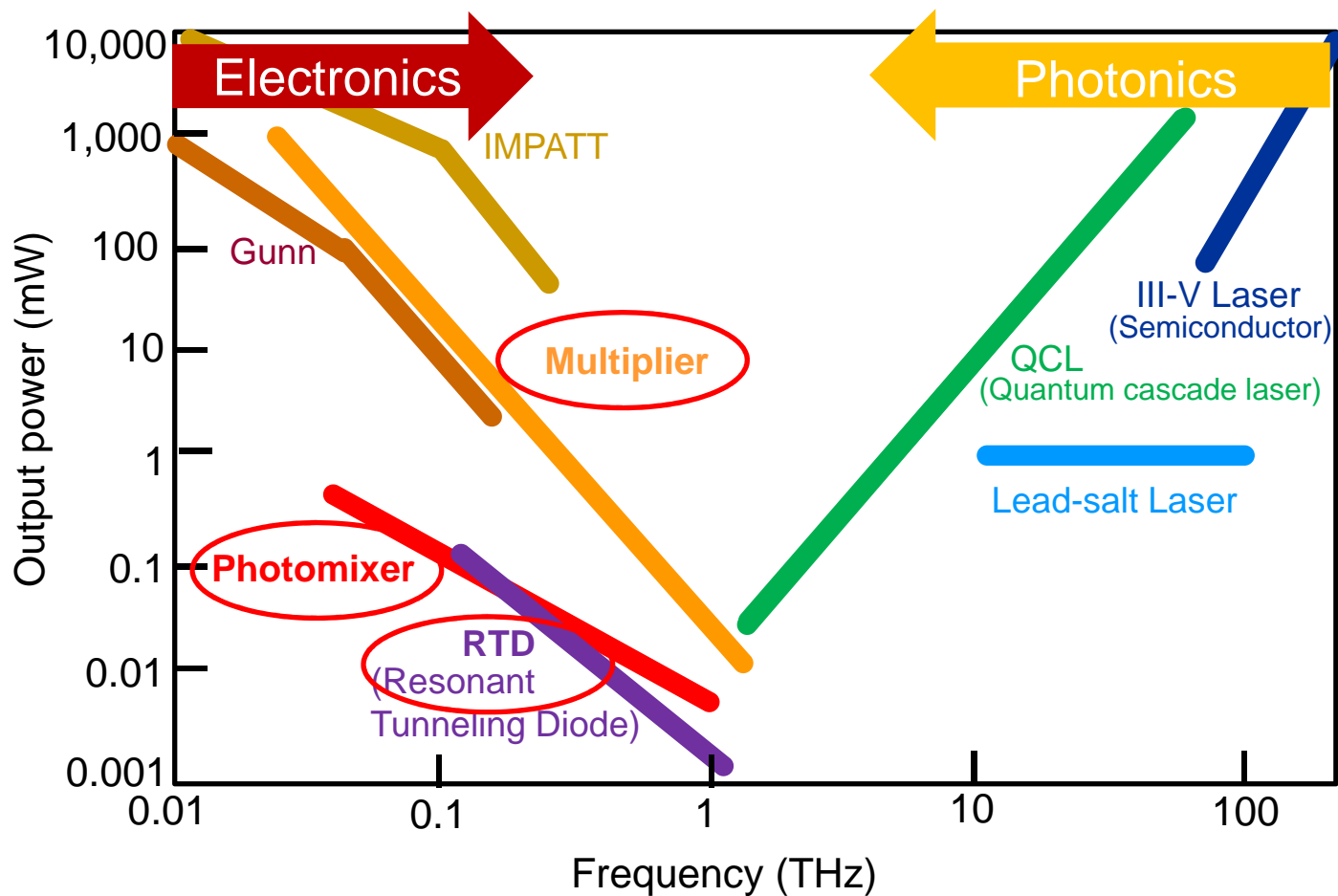
九州大学 大学院システム情報科学研究所

加藤和利

1. 研究背景と目的
2. アレー化によるビーム合成とステアリング
3. 光集積回路による高速ステアリング
4. まとめ

1. 研究背景と目的
2. アレー化によるビーム合成とステアリング
3. 光集積回路による高速ステアリング
4. まとめ

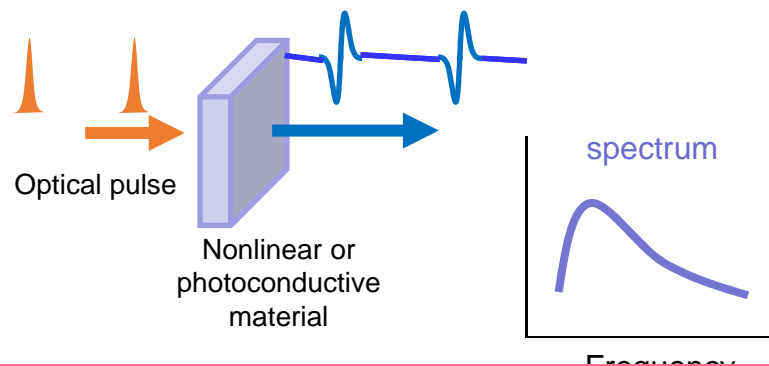
THz発生技術のトレンド



代表的なテラヘルツ波発生法

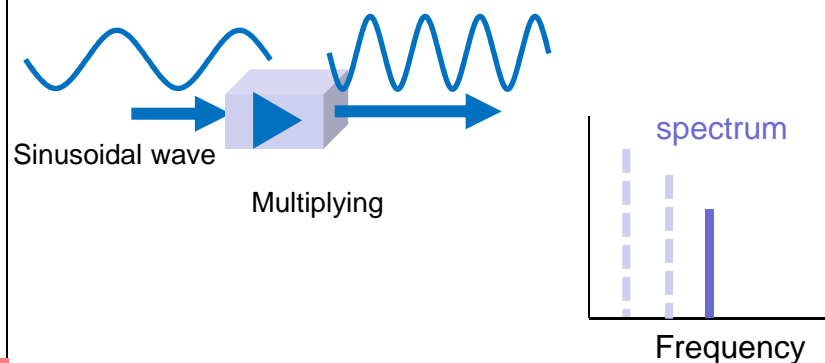
Optical generation

Optical pulse

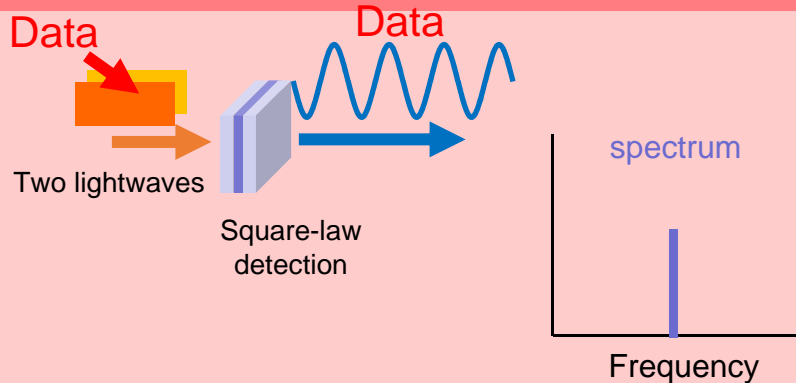


Electrical generation

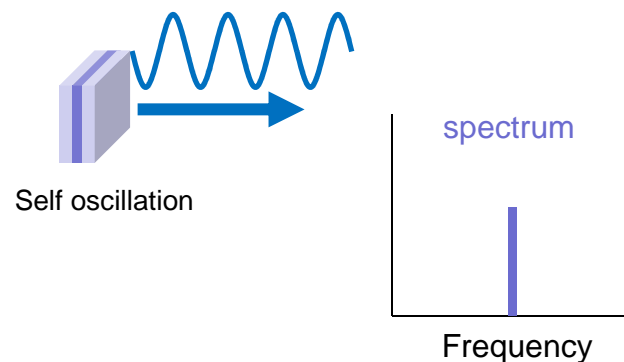
Multiplier



Large bandwidth
(ex. 340 GHz bandwidth @600GHz)



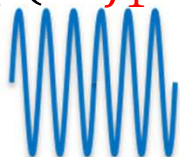
RTD



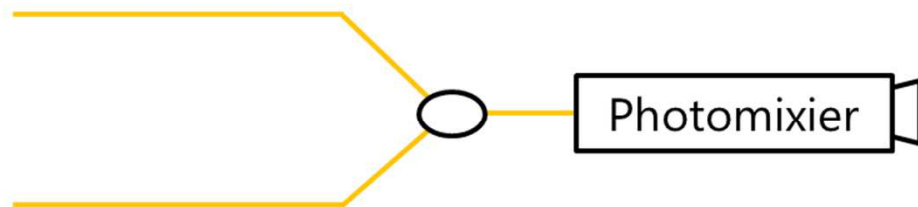
- ✓ 周波数の異なる2つの光からフォトミキサの自乗検波特性を用いて差周波の電気信号を生成

Electric field

$$\exp\{i(2\pi f_1 t - k_1 x + \phi_1)\}$$

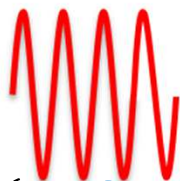


lightwave



Electric field

$$\exp\{i(2\pi f_2 t - k_2 x + \phi_2)\}$$



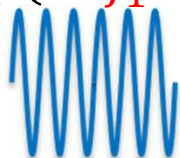
lightwave

フォトミキシング

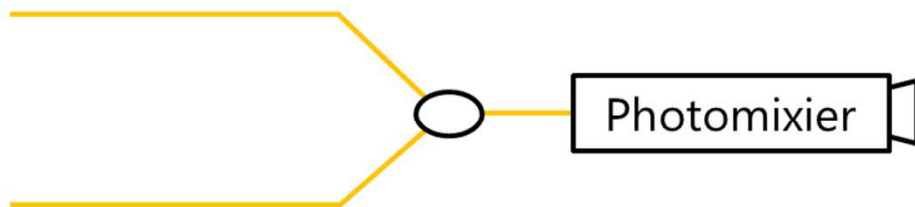
- ✓ 周波数の異なる2つの光からフォトミキサの自乗検波特性を用いて差周波の電気信号を生成

Electric field

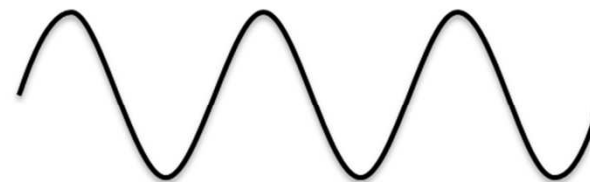
$$\exp\{i(2\pi f_1 t - k_1 x + \phi_1)\}$$



lightwave

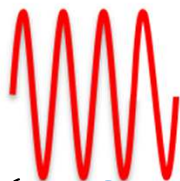


THz wave



Electric field

$$\exp\{i(2\pi f_2 t - k_2 x + \phi_2)\}$$



lightwave

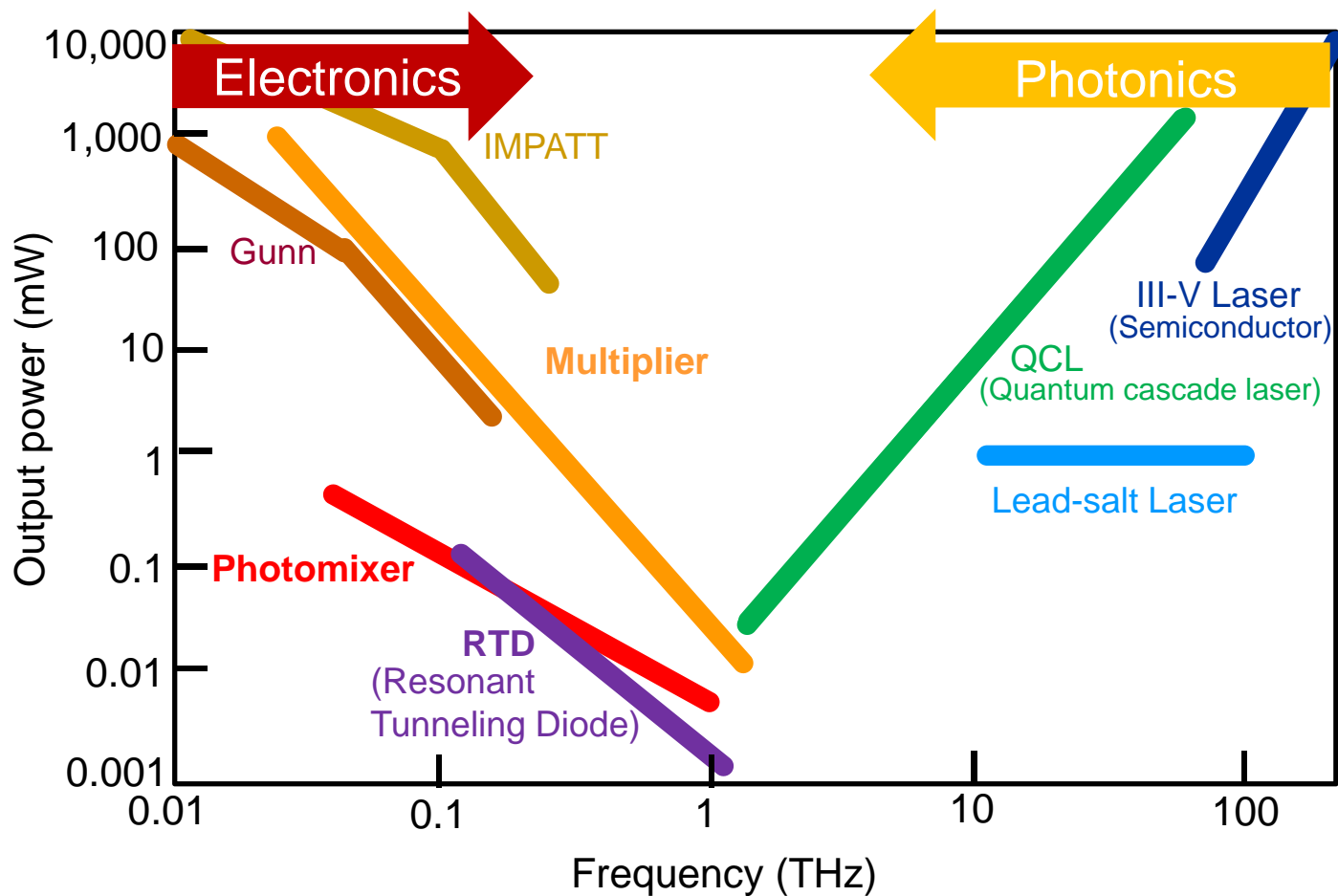
$$|\exp\{i(2\pi f_1 t - k_1 x + \phi_1)\} + \exp\{i(2\pi f_2 t - k_2 x + \phi_2)\}|^2$$

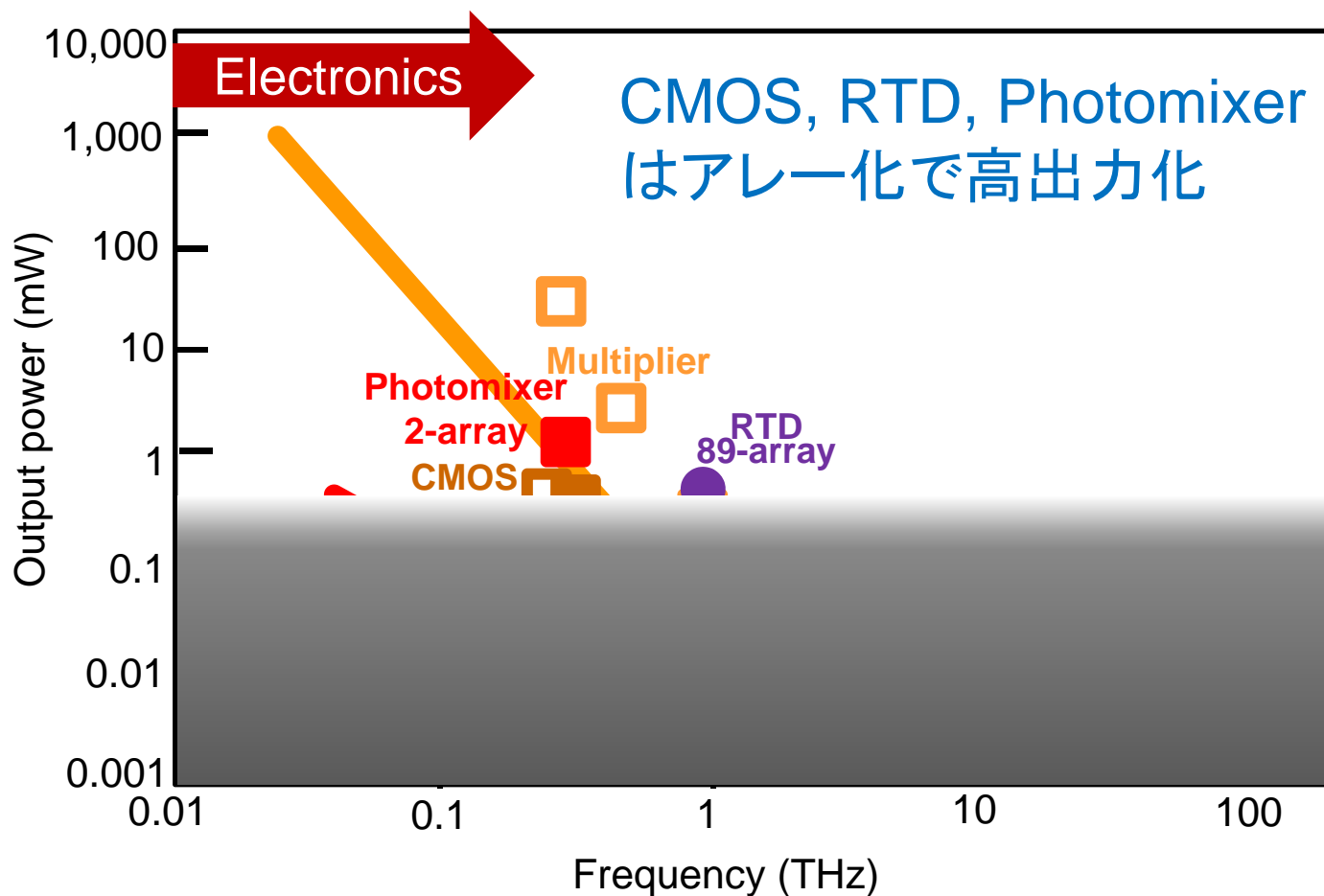
$$\propto 1 + \cos\{2\pi(f_1 - f_2)t - (k_1 - k_2)x + (\phi_1 - \phi_2)\}$$

フォトミキシングのメリット

1. 超広帯域 (@光からダウンコンバートするため)
2. アレー化と位相調整が容易 (@光領域)
3. データ変調が容易 (@光領域)

いずれも光を用いるからこそそのメリット





1. 高出力orアレー光源が必要
2. アレー状の光結合が必要
3. アレー状の光位相調整器が必要
(CMOS, RTDと異なり光導波路が必要)

いずれも光を用いるからこそそのデメリット

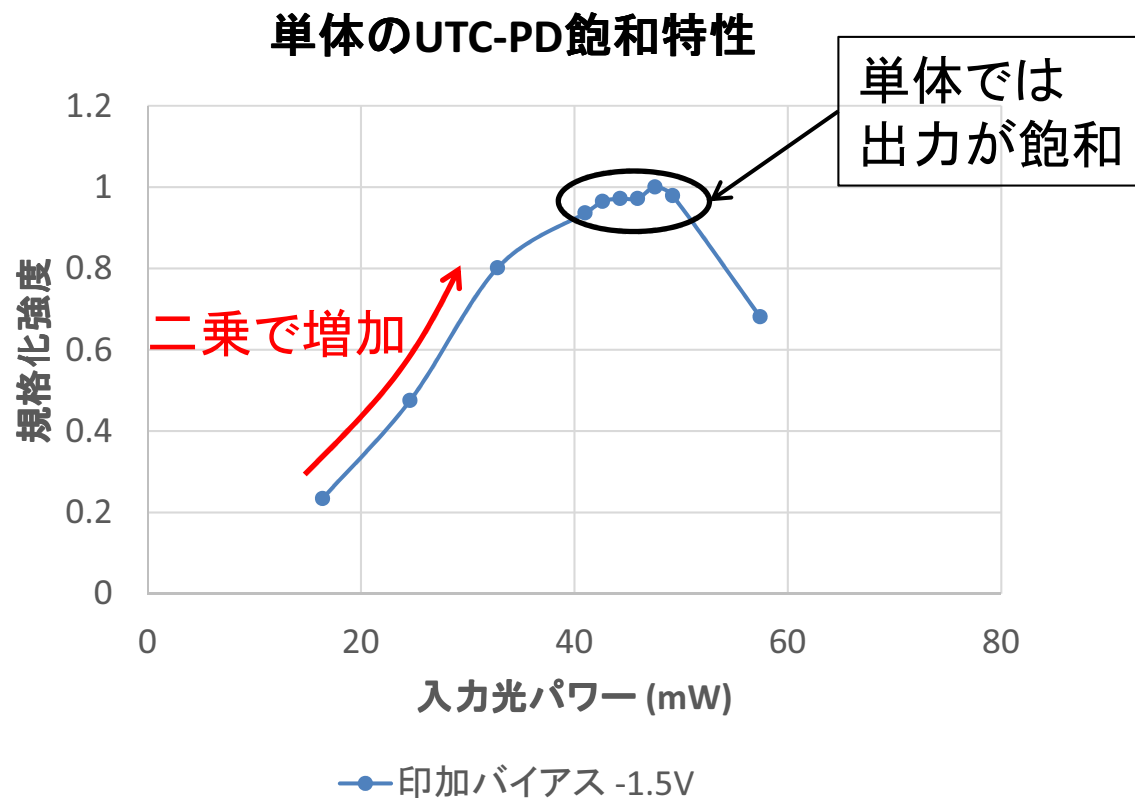
1. 研究背景と目的

2. アレー化によるビーム合成とステアリング

3. 光集積回路による高速ステアリング

4. まとめ

テラヘルツ波飽和特性 @300GHz



UTC-PD

- ✓ 電子のみをキャリアとして利用するため高速で動作

入射光のパワーを大きくすると電子が増加、空乏層のバンドが変化



電界強度が変化



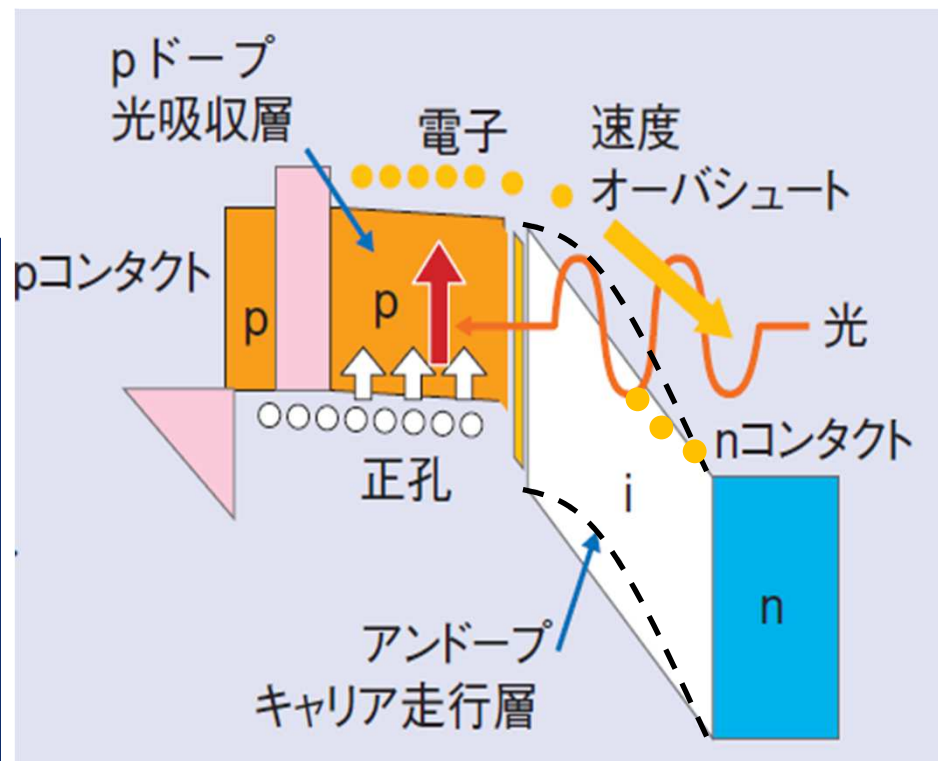
電子の移動速度が低下



出力強度が飽和



高速で動作するが出力強度に限界



UTC-PD

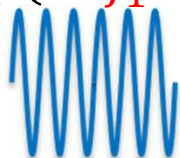
若月他 NTT技術ジャーナル 12月号 2011(p31)

フォトミキシング

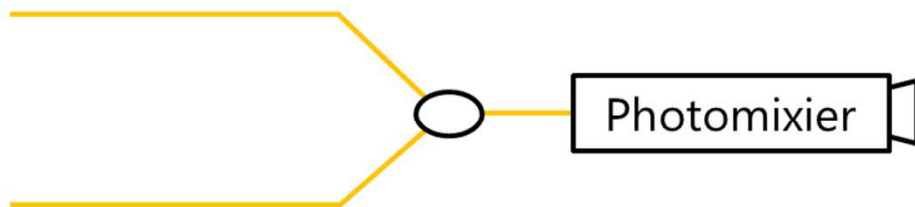
- ✓ 周波数の異なる2つの光からフォトミキサの自乗検波特性を用いて差周波の電気信号を生成

Electric field

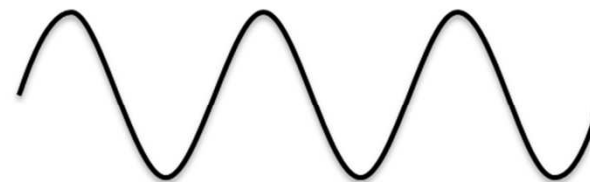
$$\exp\{i(2\pi f_1 t - k_1 x + \phi_1)\}$$



lightwave

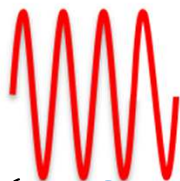


THz wave



Electric field

$$\exp\{i(2\pi f_2 t - k_2 x + \phi_2)\}$$

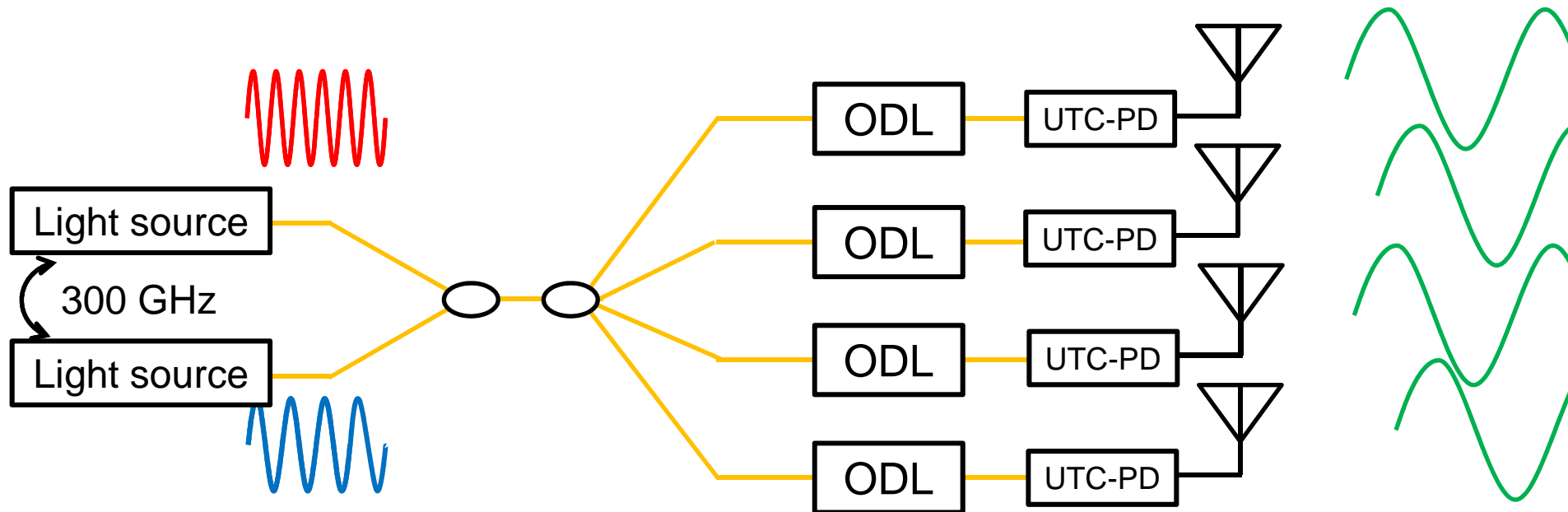


lightwave

$$|\exp\{i(2\pi f_1 t - k_1 x + \phi_1)\} + \exp\{i(2\pi f_2 t - k_2 x + \phi_2)\}|^2$$

$$\propto 1 + \cos\{2\pi(f_1 - f_2)t - (k_1 - k_2)x + (\phi_1 - \phi_2)\}$$

光路長変化による位相調整



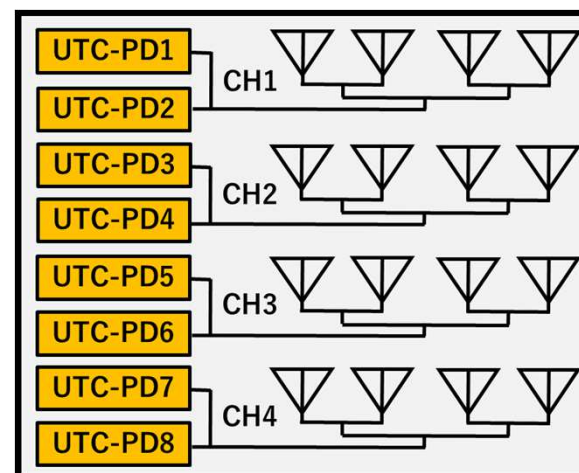
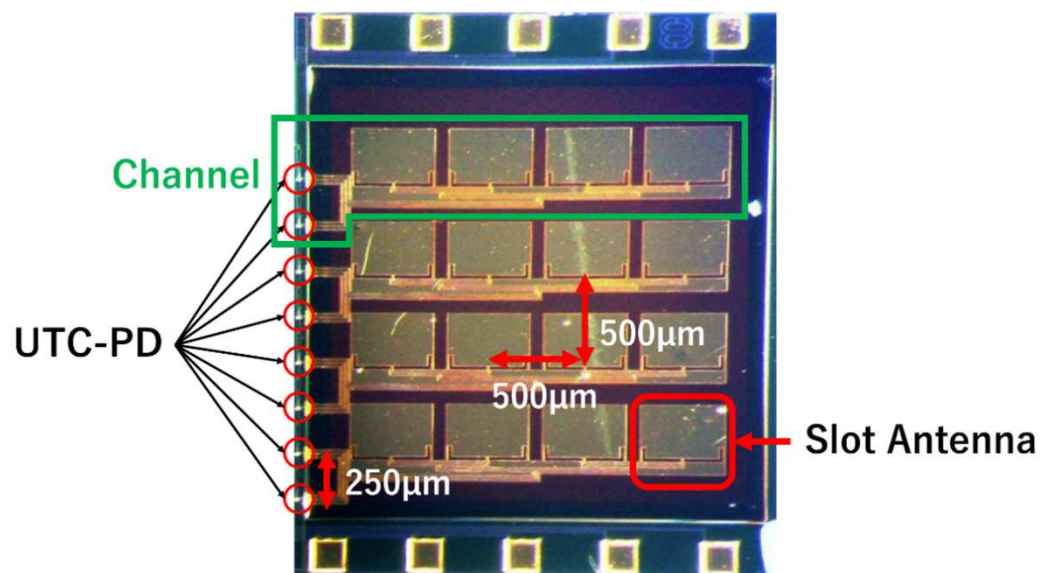
$$|\exp\{i(2\pi f_1 t - k_1 x + \phi_1)\} + \exp\{i(2\pi f_2 t - k_2 x + \phi_2)\}|^2$$

$$\propto 1 + \cos\{2\pi(f_1 - f_2)t - \underbrace{(k_1 - k_2)x}_{\text{circled}} + (\phi_1 - \phi_2)\}$$

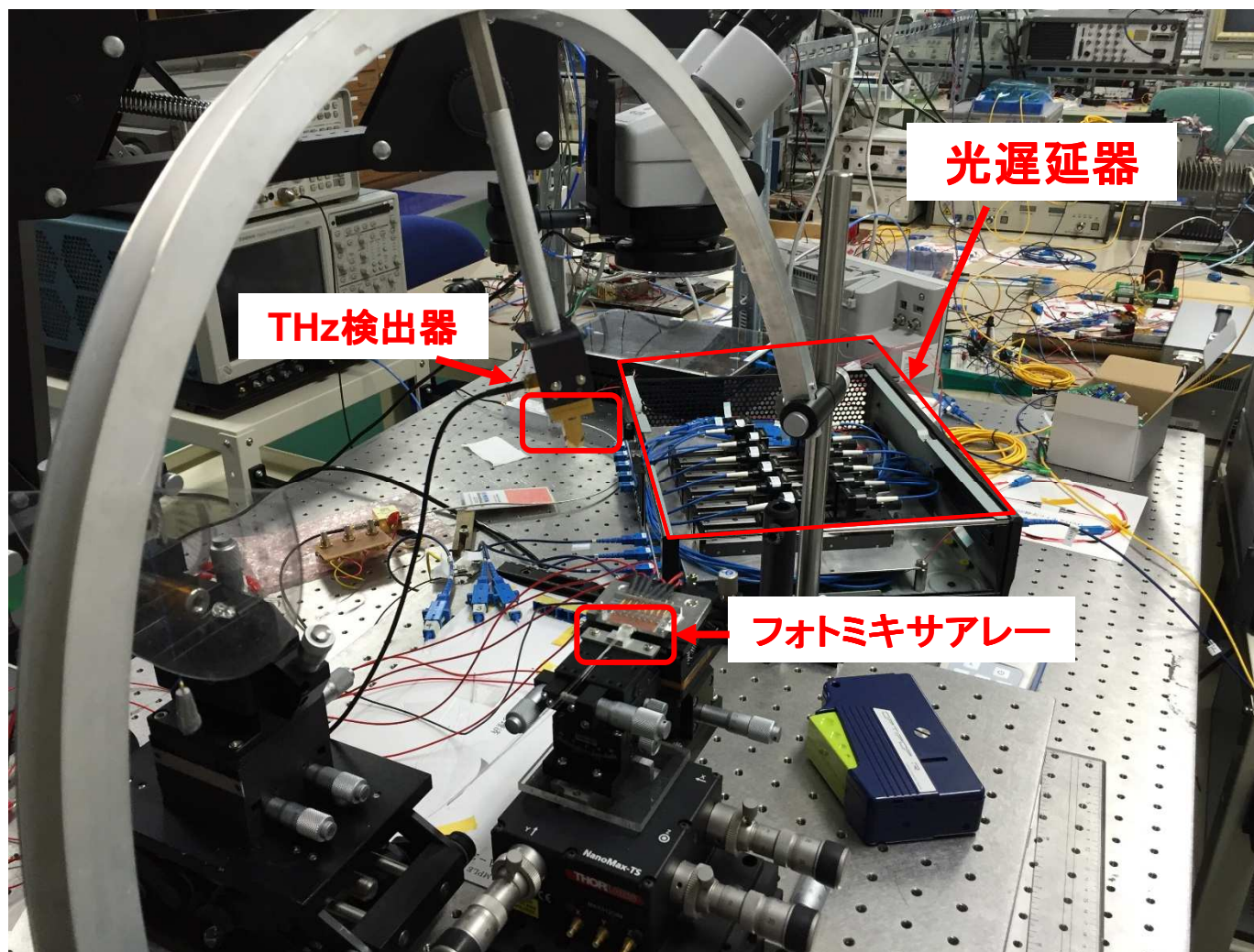
$$(k_1 - k_2)x \cong 2\pi \cdot 1000x \longrightarrow x \cong 1 \times 10^{-3} [\text{m}]$$

で 2π の位相変化

アレーフォトミキサ

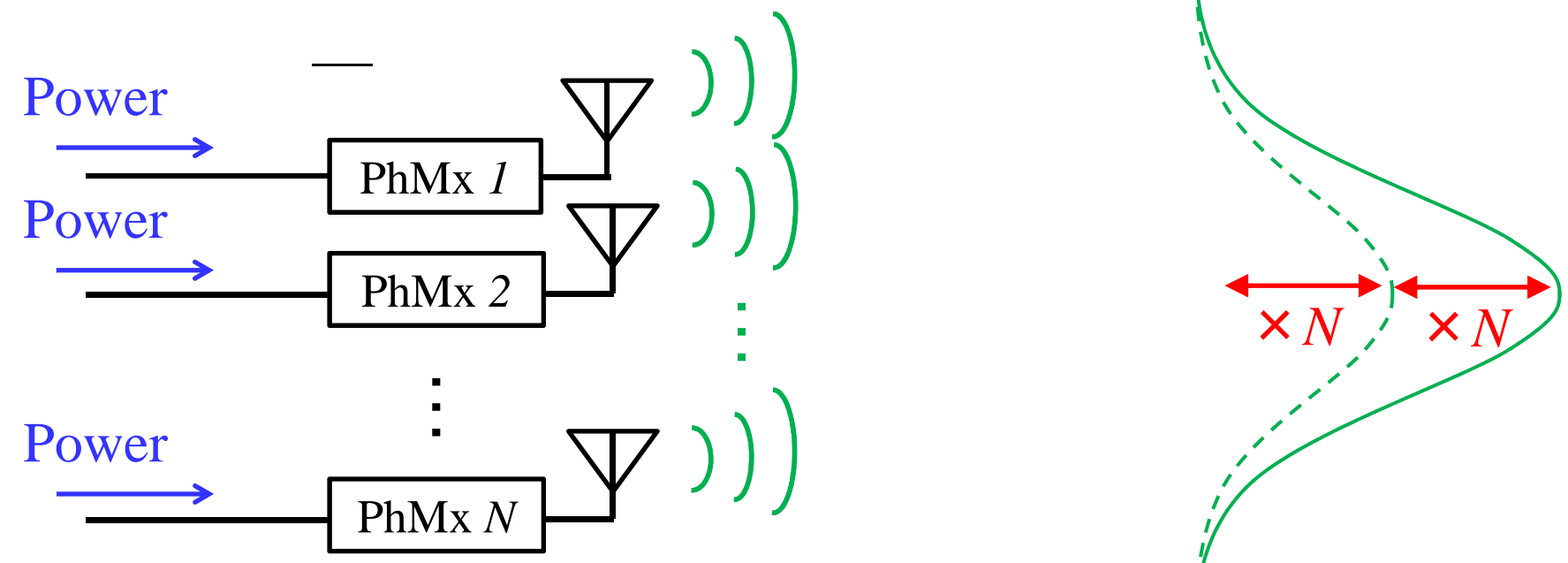


アレーフォトミキサ実験系



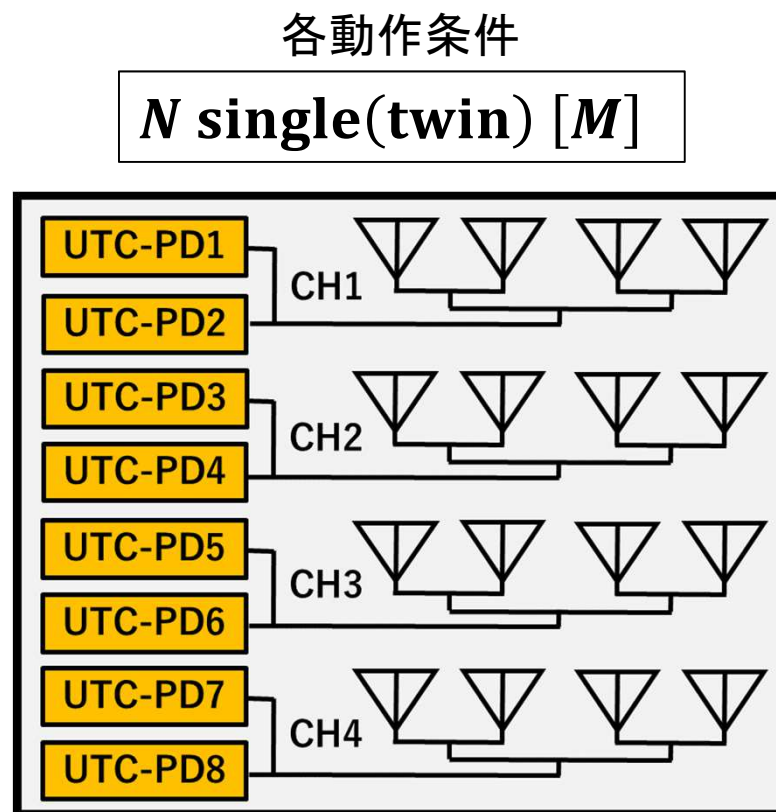
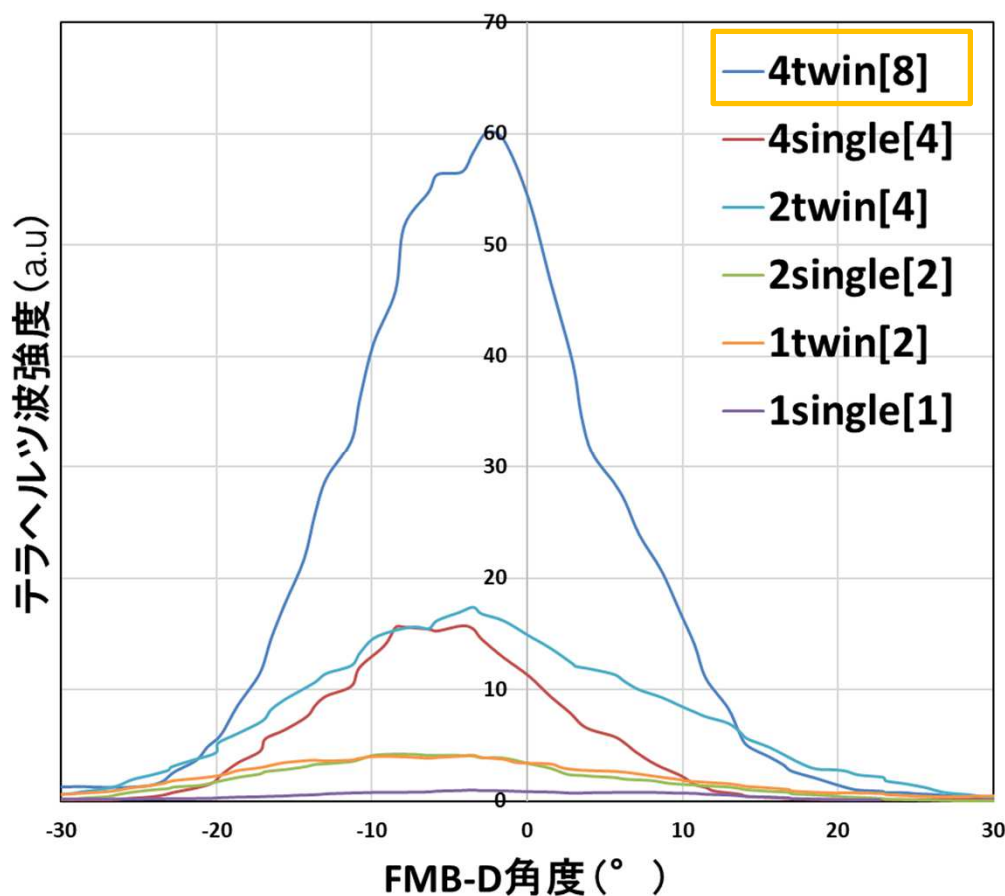
アレーによる指向性向上

給電ポイント N 倍 × 指向性利得 N 倍



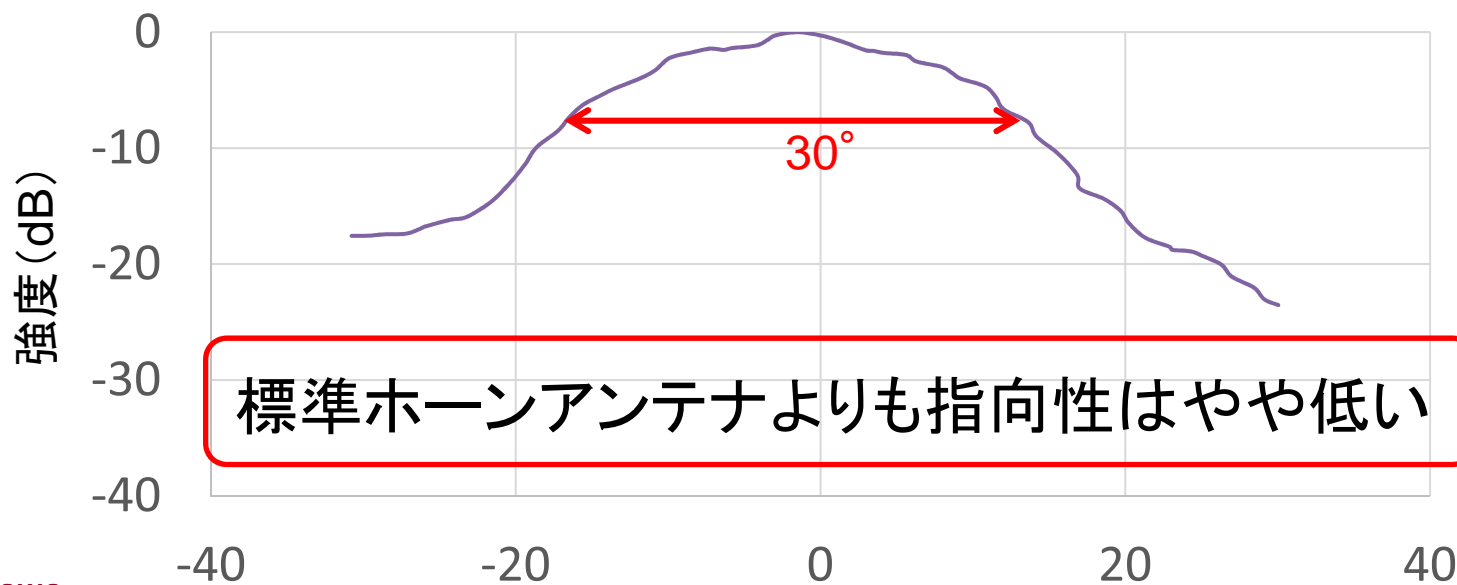
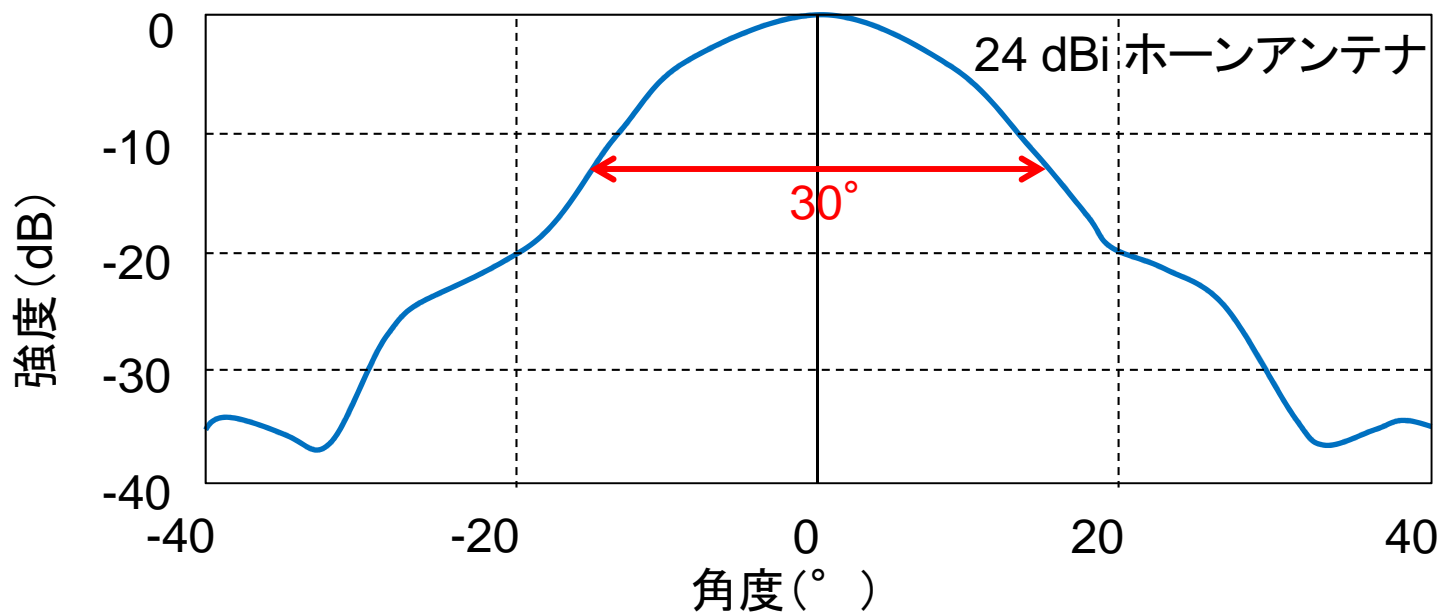
相対テラヘルツ波強度 = N^2

各動作条件に応じて動作させるUTC-PDの数を変化させながら放射指向性を測定

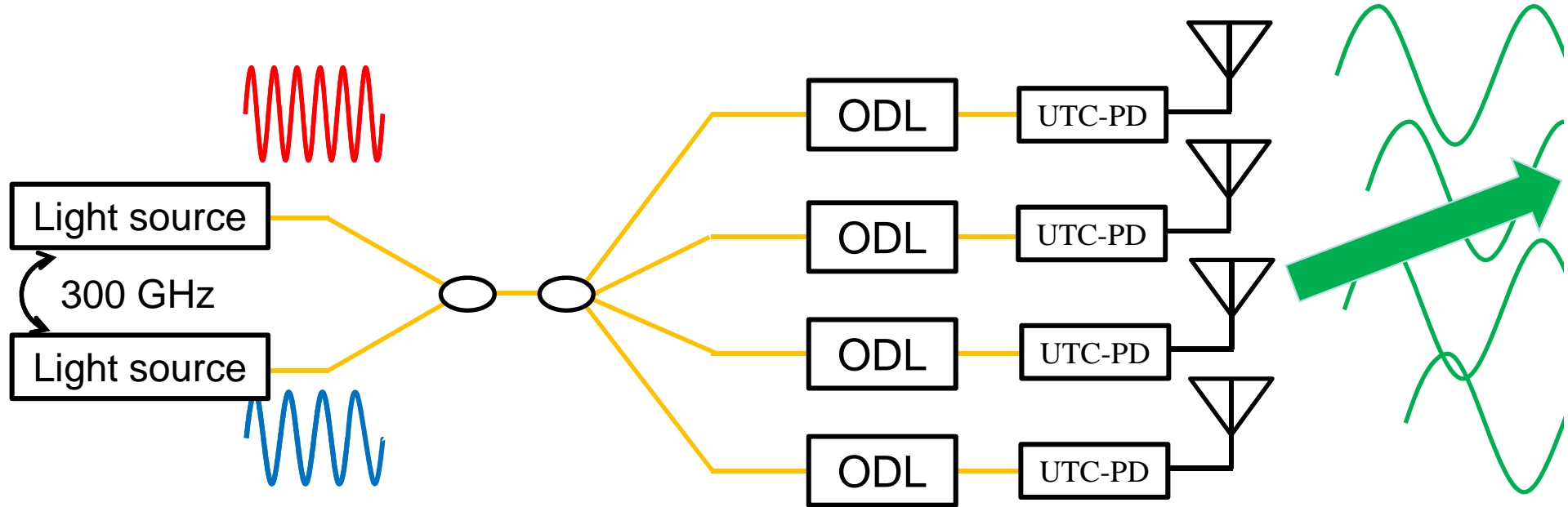


ピーク強度の増大及びビーム幅の変化が確認できた

ホーンアンテナとの比較



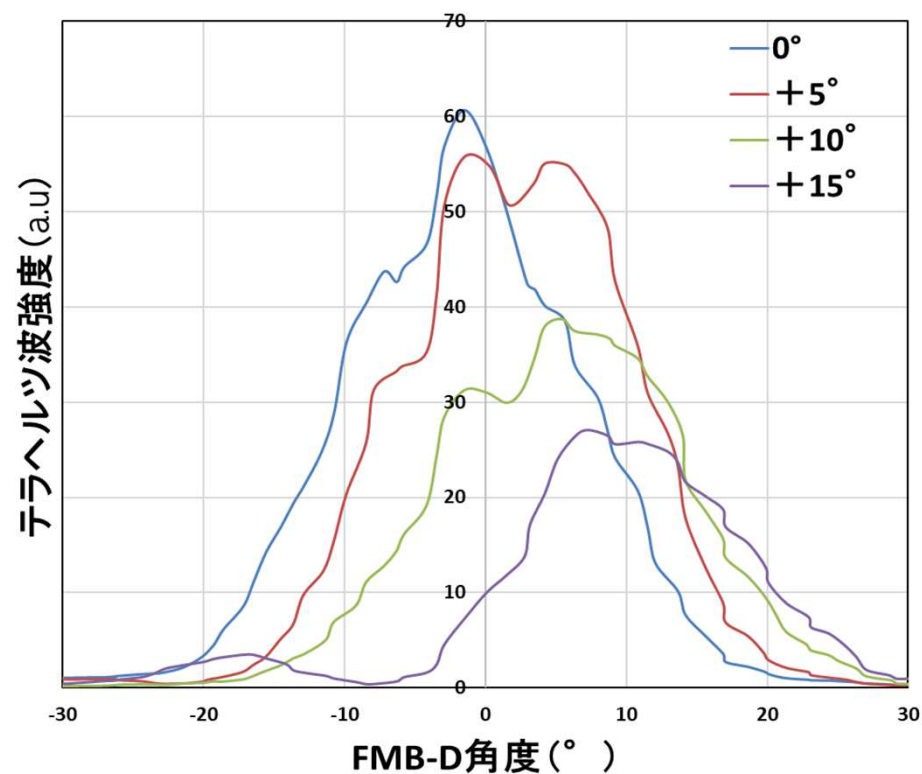
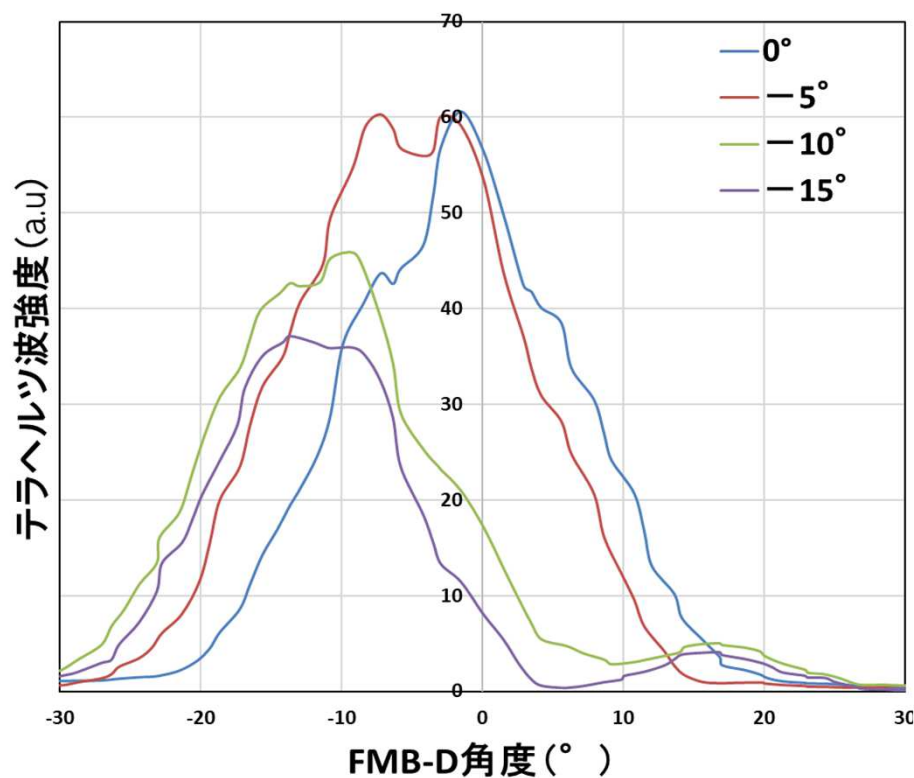
アレーによるビームステアリング



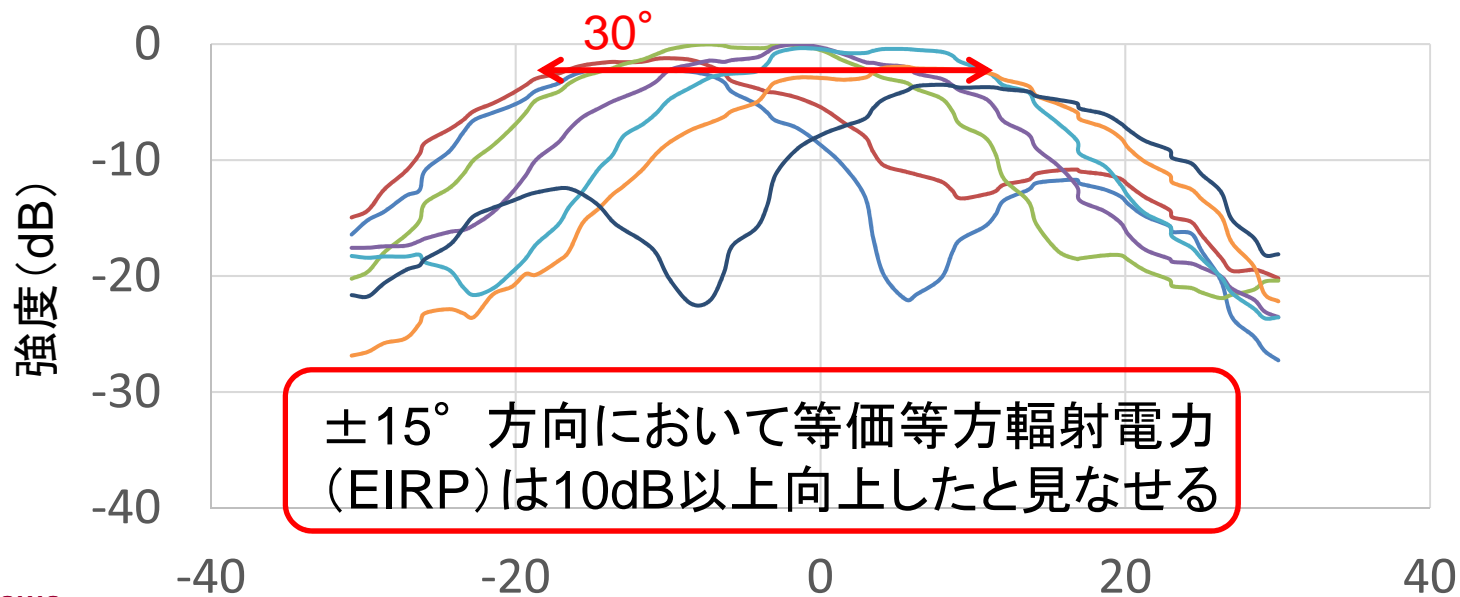
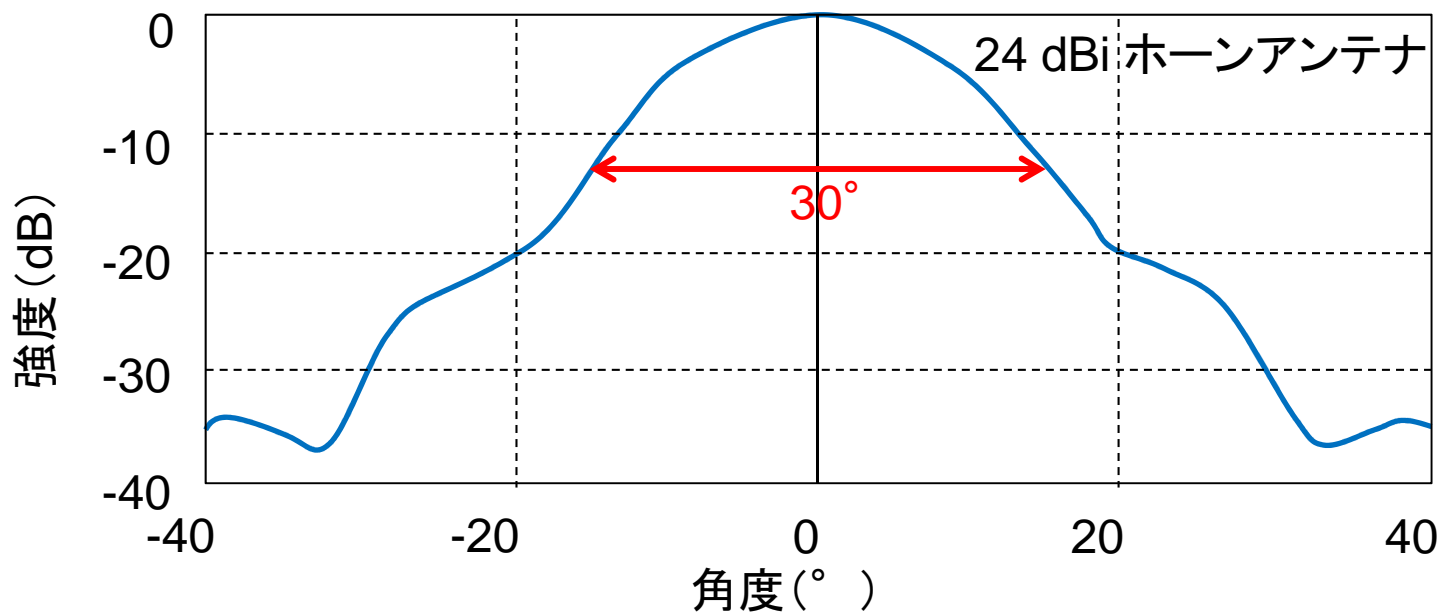
$$|\exp\{i(2\pi f_1 t - k_1 x + \phi_1)\} + \exp\{i(2\pi f_2 t - k_2 x + \phi_2)\}|^2$$

$$\propto 1 + \cos\{2\pi(f_1 - f_2)t - (k_1 - k_2)x + (\phi_1 - \phi_2)\}$$

8つのUTC-PDを動作させ、各角度にビームステアリングしたときの放射指向性を測定

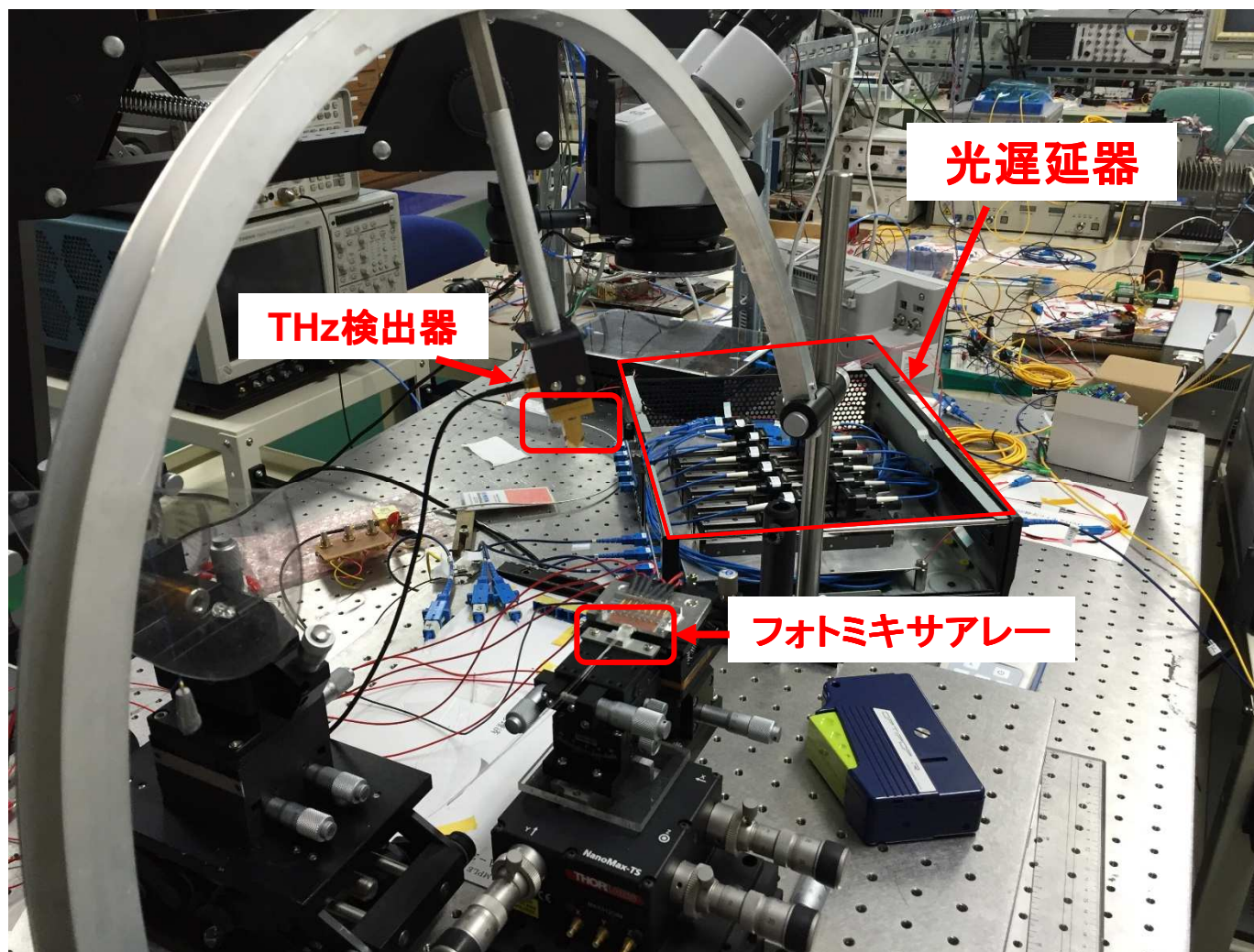


ビームステアリングのメリット



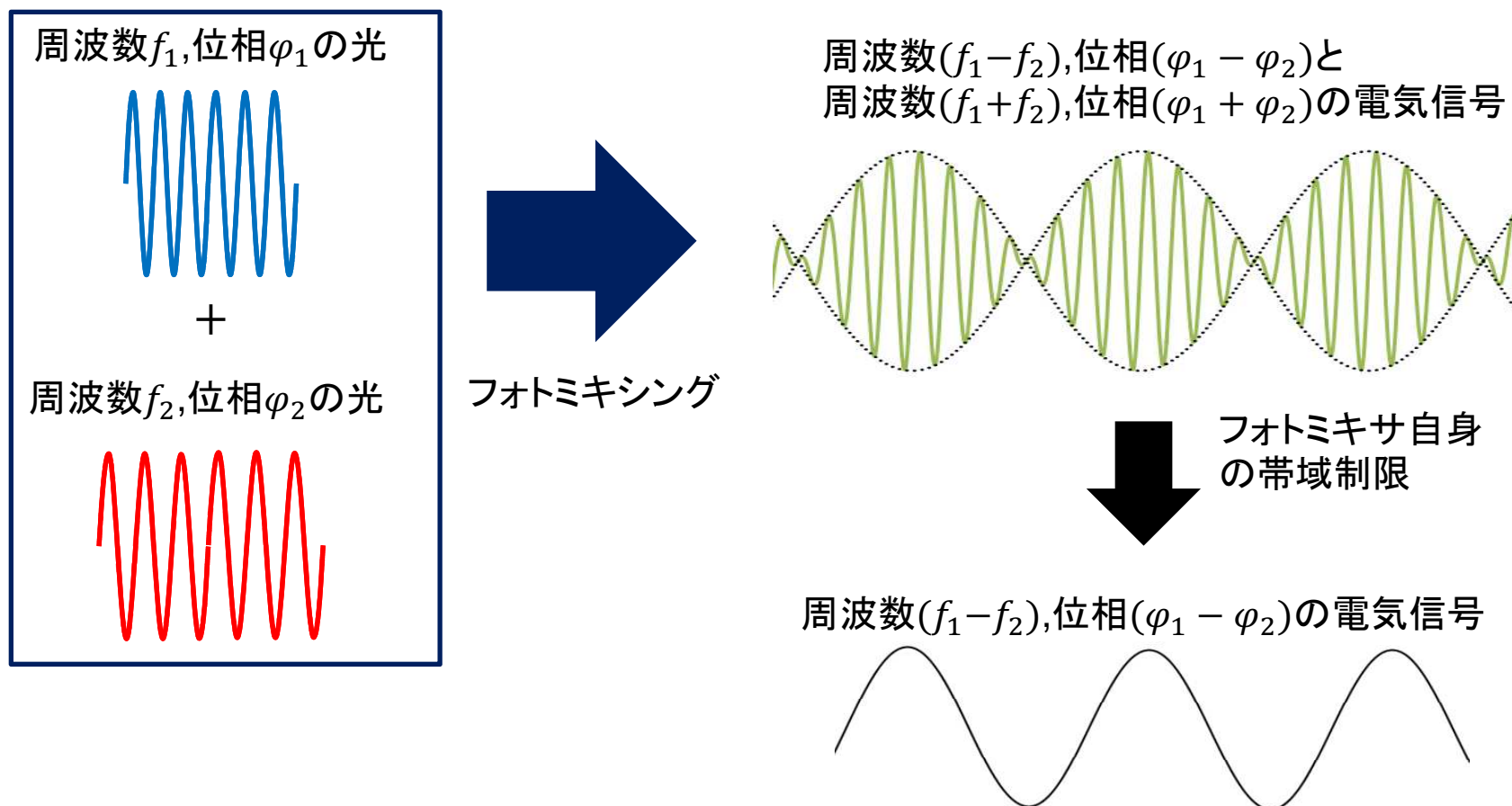
1. 研究背景と目的
2. アレー化によるビーム合成とステアリング
3. 光集積回路による高速ステアリング
4. まとめ

アレーフォトミキサ実験系



フォトミキシングによるテラヘルツ波生成

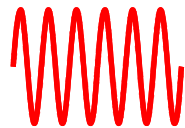
周波数の異なる2つの光からフォトミキサを用いて光のビート信号を生成



光波位相による位相調整

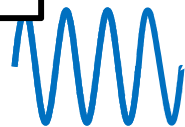
Electric field

$$\exp\{i(2\pi f_1 t - k_1 x + \phi_1)\}$$



Light source

Light source



Electric field

$$\exp\{i(2\pi f_2 t - k_2 x + \phi_2)\}$$

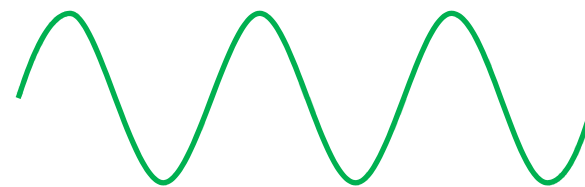
Electric power

$$|\exp\{i(2\pi f_1 t - k_1 x + \phi_1)\} + \exp\{i(2\pi f_2 t - k_2 x + \phi_2)\}|^2$$

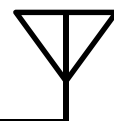
$$\propto 1 + \cos\{2\pi(f_1 - f_2)t - (k_1 - k_2)x + (\phi_1 - \phi_2)\}$$

↓
 $\cong 1.55 \mu\text{m}$
 の光路長変化で
 2π の位相変化

THz wave



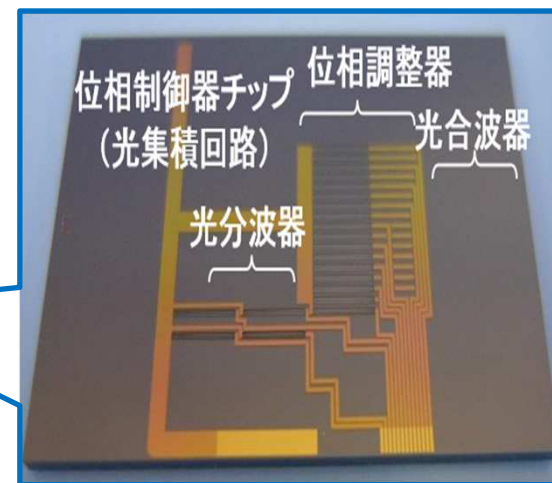
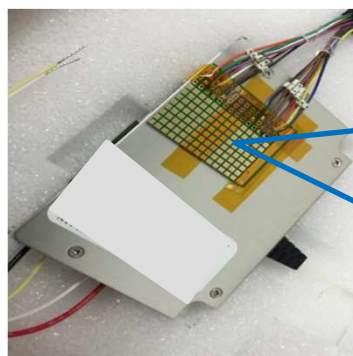
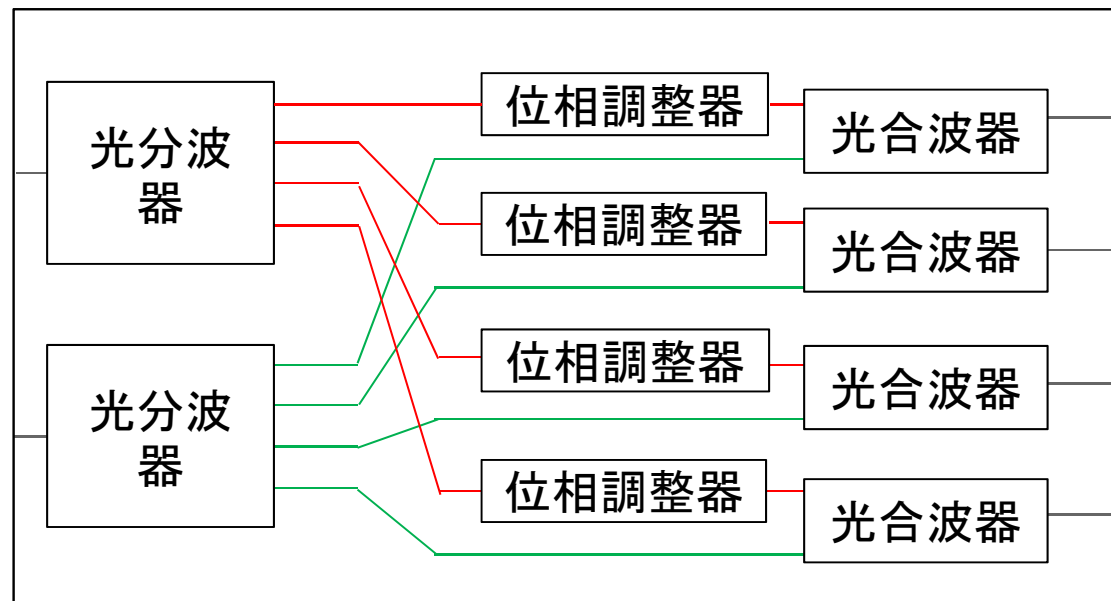
UTC-PD



位相調整用平面光波回路

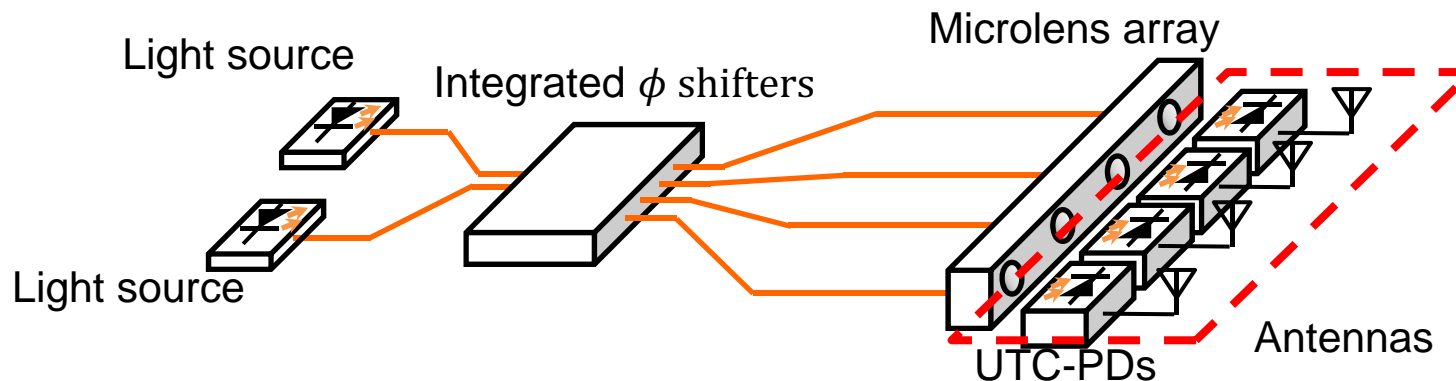
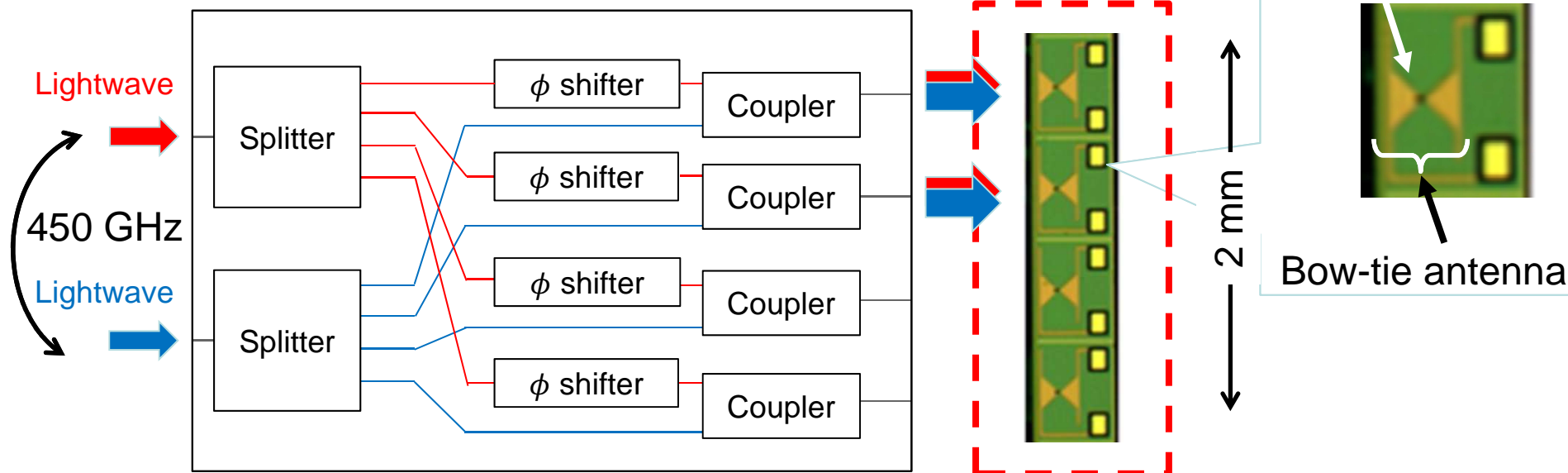
- 8チャンネルをワンチップ上に集積

二光波の位相を調整して
合波
↓
出力テラヘルツ波の
位相を一致

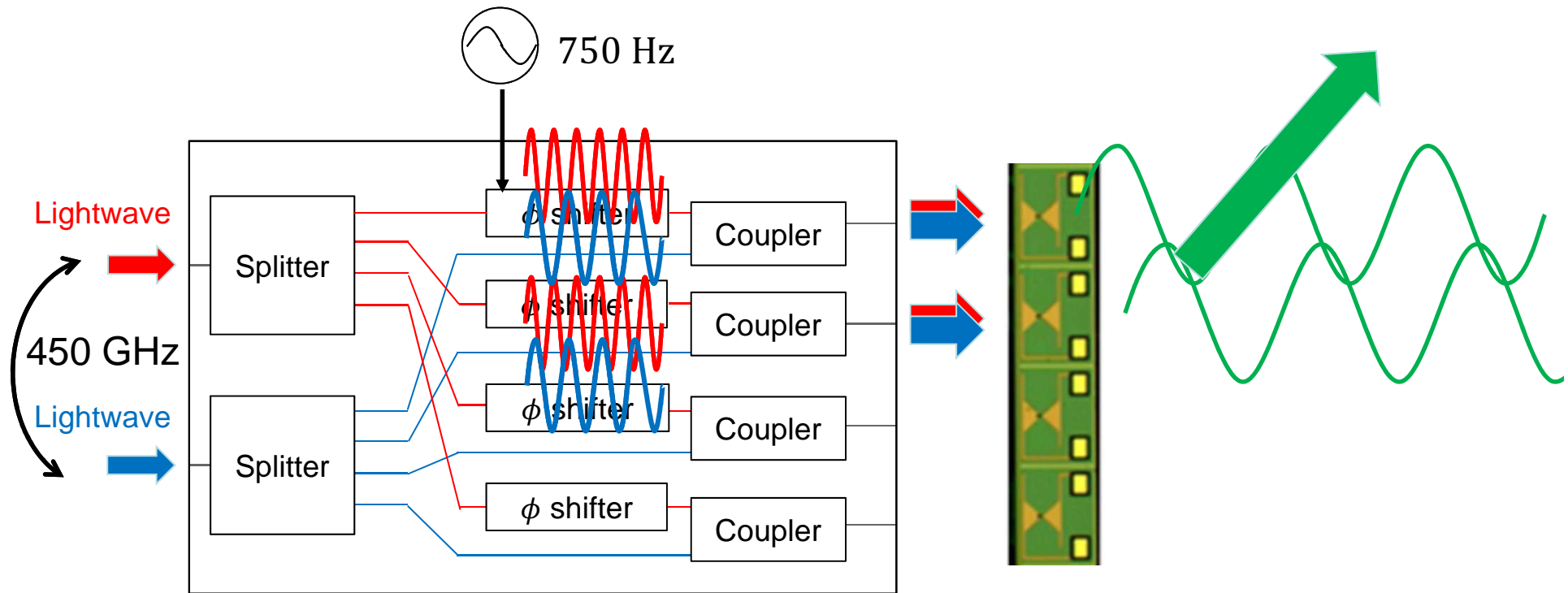


平面光波回路を用いたビームステアリング

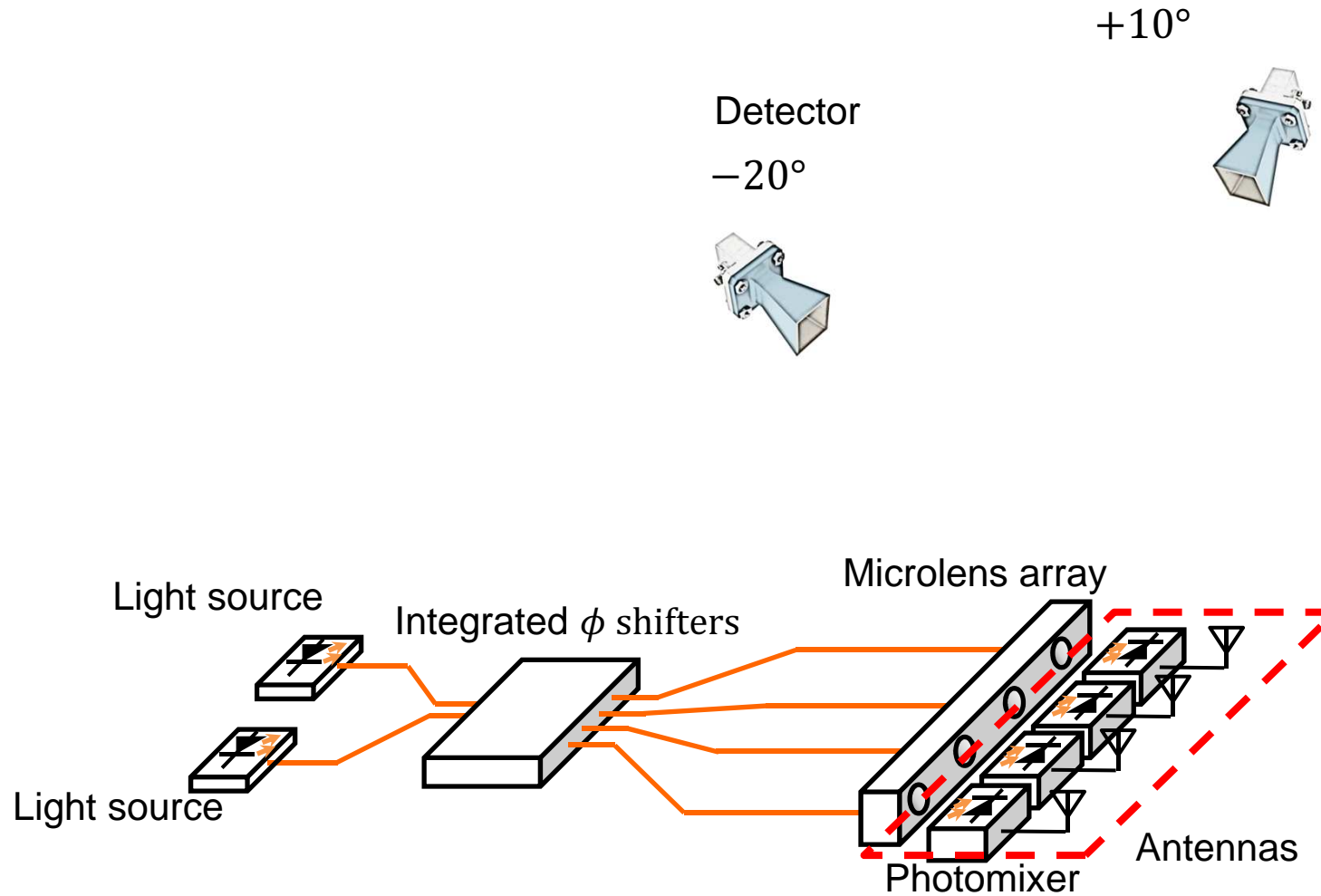
Integrated ϕ shifters



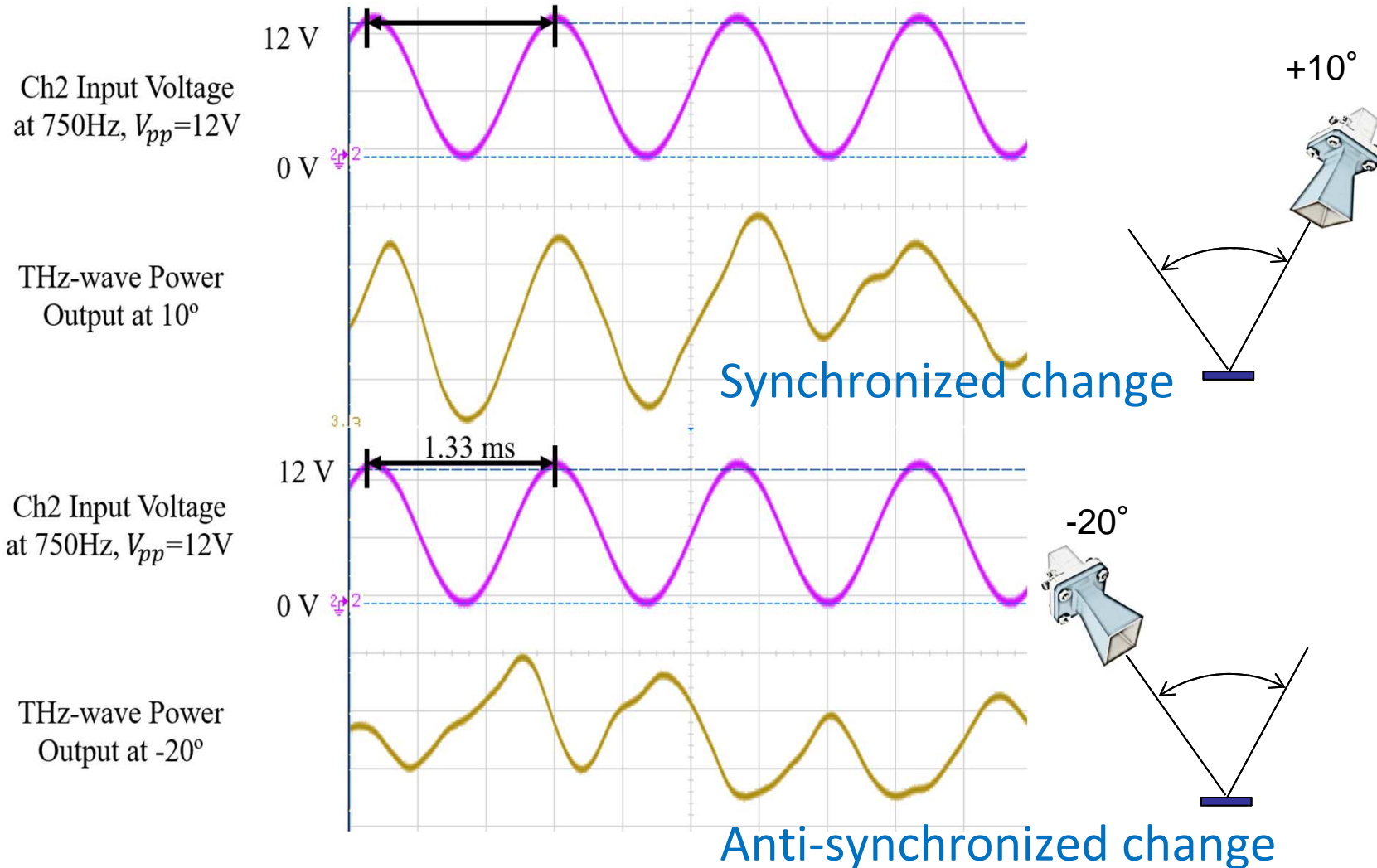
平面光波回路を用いたビームステアリング



平面光波回路を用いたビームステアリング



平面光波回路を用いたビームステアリング



450GHzビームを750Hz周期でステアリング

1. 研究背景と目的
2. アレー化によるビーム合成とステアリング
3. 光集積回路による高速ステアリング
4. まとめ

- ・オンチップTHz波源 (CMOS, RTD, Photomixer) はアレー化による高出力化が進行中 (1mW @300GHzも間近)
- ・通信エリア (角度) を必要とする場合、ビームステアリングにより実質的にEIRPは10dB程度向上する (@4x4アレー)
(アレー規模増大によりさらに向上の可能性)
- ・フォトミキシングのメリットは
 - 超広帯域 (キャリア周波数の50%の帯域の報告あり)
 - アレー化/ビームステアリングのための位相調整が光領域で実現可能

以下の機関からご協力をいただきました



大阪大学大学院基礎工学研究科

永妻研究室 (情報フォトンクスグループ) *Nagatsuma Laboratory (Information Photonics Group)*



NTT 先端集積デバイス研究所
Device Technology Laboratories

以下の機関からご支援をいただきました



科学技術振興機構 産学共創基礎基盤研究プログラム



総務省

MIC Ministry of Internal Affairs
and Communications

戦略的情報通信研究開発推進事業 (SCOPE)