

# Beyond 5G無線通信に向けた 有機電気光学ポリマーデバイス技術

情報通信研究機構 未来ICT研究所  
神戸フロンティア研究センター  
ナノ機能集積ICT研究室

主任研究員 梶 貴博

2021年10月14日

5G (10-20Gbps @2020~)

↓  
Beyond 5G (>100Gbps ? @2030~?)

↓  
Beyond 5G (>1Tbps ? @2040~?)

XR (VR/AR/MR) 技術 (サイバーとフィジカルの融合)

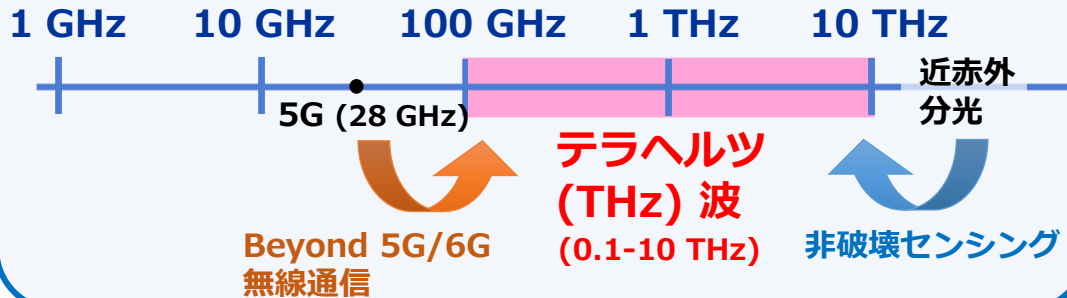
超高速

超低遅延

超多数同時接続

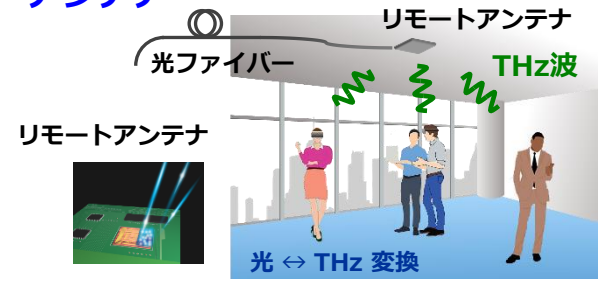
Beyond 5G通信技術

周波数



## Beyond 5G 無線通信

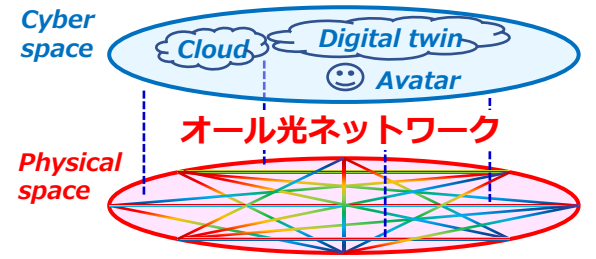
- 光ファイバー無線 (RoF) リモートアンテナ



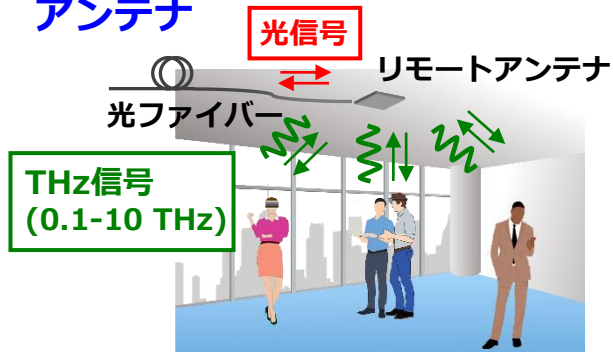
- モバイルフロント/バックホール無線通信



## 【サイバーフィジカル社会】



- 光ファイバー無線 (RoF) リモートアンテナ

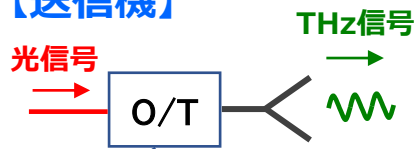


- モバイルフロント/バックホール無線通信



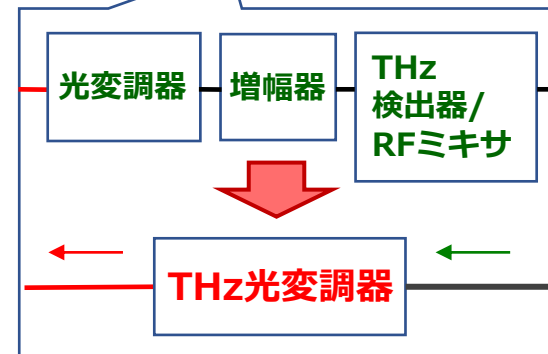
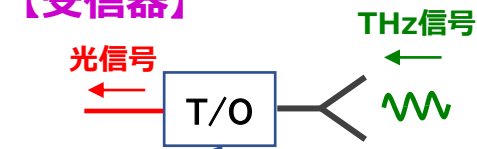
## 光<math>\leftrightarrow</math>無線信号 相互変換技術

【送信機】



UTC-PD (単一走行キャリアフォトダイオード) など。

【受信器】

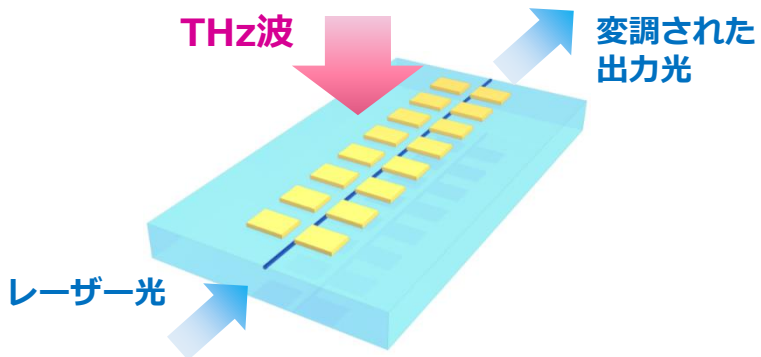


### 課題 【受信器】

THz信号  $\rightarrow$  電気信号  $\rightarrow$  光信号 変換が必要 (複雑な機構、帯域の制限、大きな装置サイズ、高コスト)

➡ THz信号  $\rightarrow$  光信号 直接変換デバイス (無線-光信号変換デバイス) の研究開発 (シンプルな機構、超高速、超広帯域、超低遅延、外部電源不要、小型、低コスト)

## EOポリマーTHzデバイス

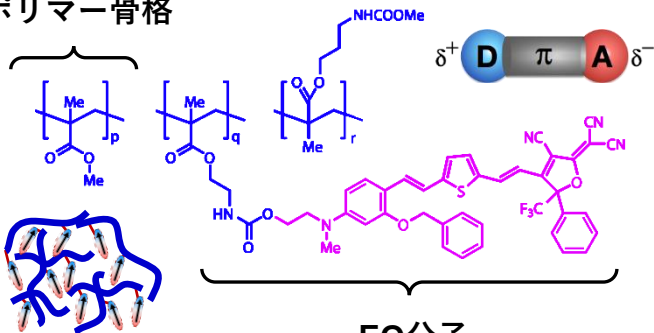


- ✓ 高効率 THz波 受信・発生
- ✓ 超広帯域 (0.1-10 THz以上)
- ✓ 光信号 ↔ テラヘルツ信号 変換
- ✓ デバイス化、光集積

## 有機EOポリマー

### 側鎖型EOポリマーの構造例

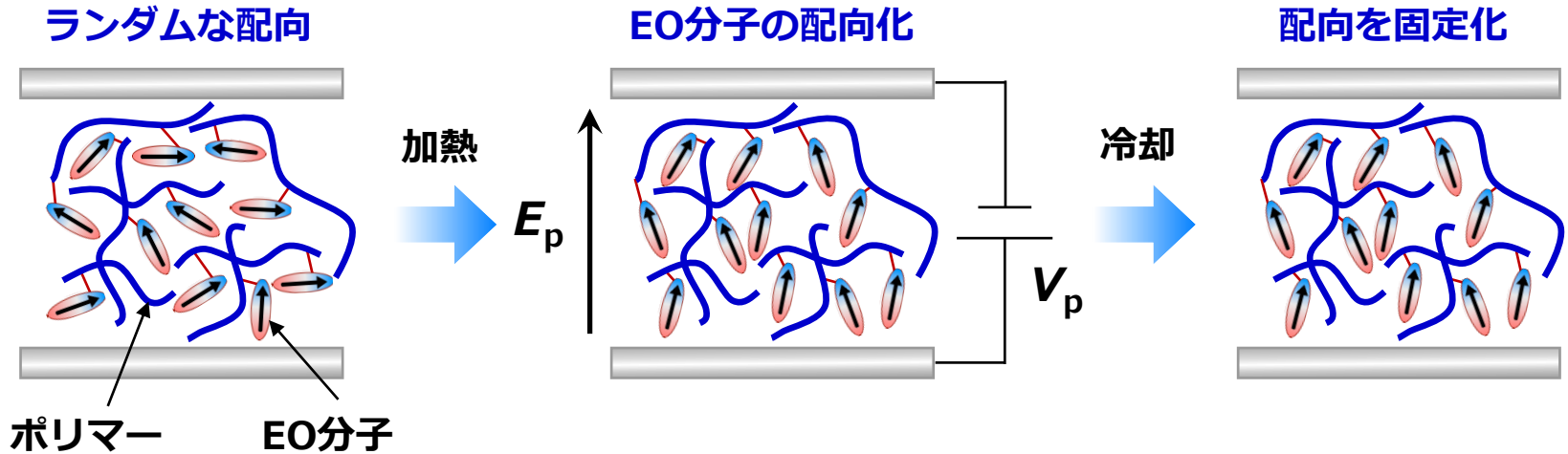
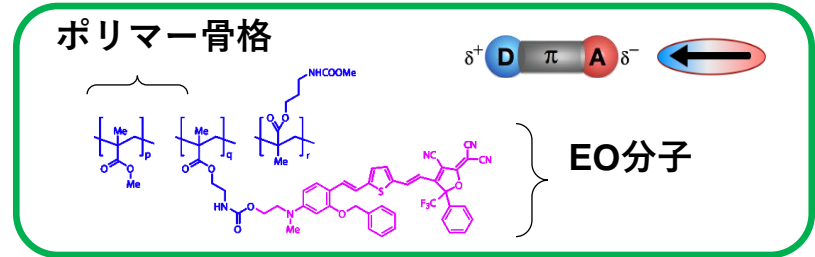
ポリマー骨格



EO分子

- 大きなEO係数 ( $r_{33} > \sim 100$  pm/V)  
( $\Leftrightarrow$  LiNbO<sub>3</sub>: 34 pm/V, DAST: 47 pm/V)
- 低誘電率かつTHz帯と光領域での屈折率差が非常に小さい
- THz帯での比較的小さな吸収係数
- マイクロ・ナノ加工によるデバイス作製が可能

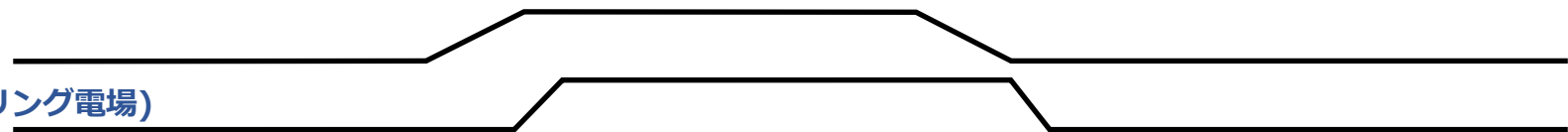
## 電場による電気光学 (EO) 分子の配向化 (ポーリング)



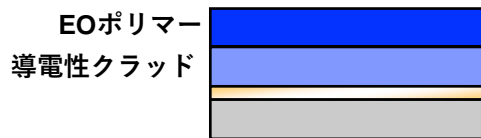
$T_g$  (ガラス転移温度)

$T$  (温度)

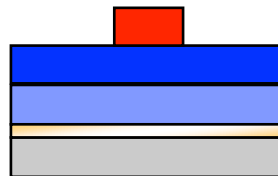
$E_p$  (ポーリング電場)



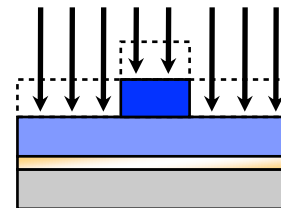
クラッド上へのコア層の塗布



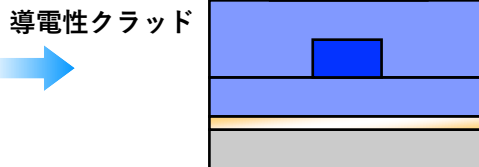
フォトレジストパターン



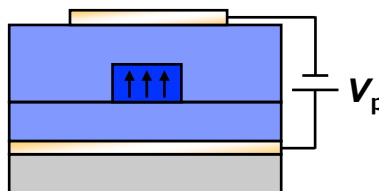
RIE



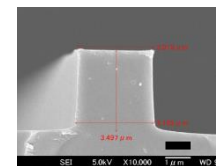
コア上へのクラッド層の塗布



ポーリング



RIE加工後のEOポリマー断面SEM像



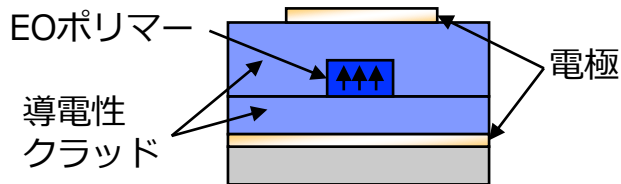
1  $\mu\text{m}$

**→ ポーリング電極や導電性クラッドによるTHz波の吸収損失、デバイス構造における制約（電極間距離や電極配置の制約）が大きな課題**

## 従来技術

- デバイス構造を作製後にポーリング

### 【導波路型】



- 電極や導電性クラッドによるTHz波の吸収損失
- デバイス構造の制約 (電極間距離や電極配置の制約)

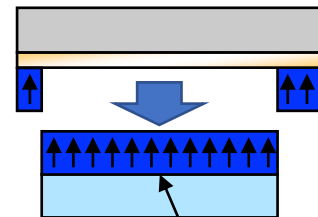
## 提案技術

- 予めポーリングを行ったEOポリマー膜の転写・接合

### 【導波路型】

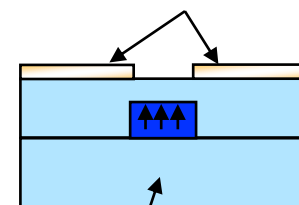
#### 熱プレス転写

(→ 高 $T_g$ ポリマーの使用)



ポーリングされたEOポリマー膜

金属アンテナ



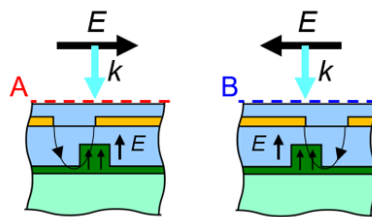
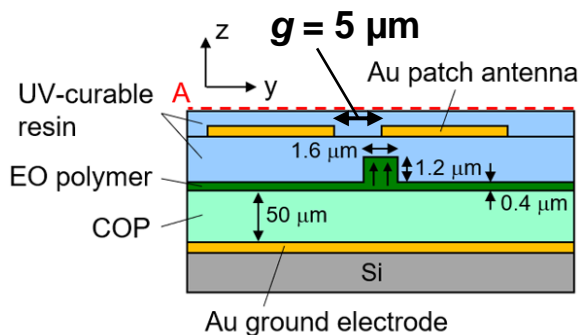
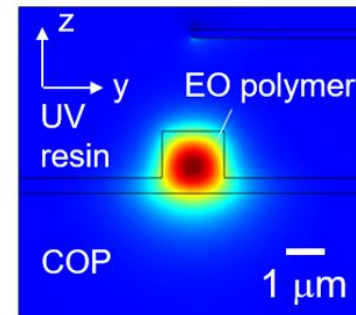
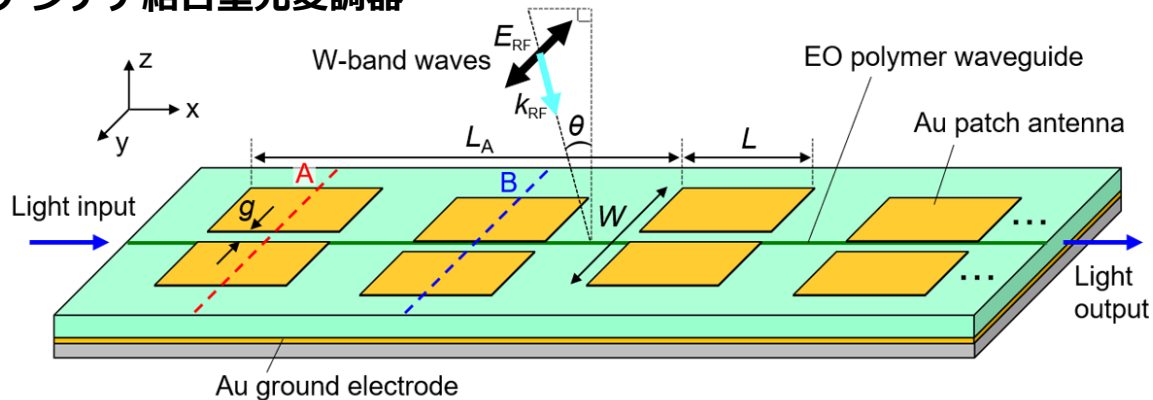
THz波低吸収損失材料 (シクロオレフィンポリマー等)

- ✓ THz波低吸収損失材料を用いたデバイス作製が可能
- ✓ 柔軟なデバイス構造
- ✓ 量産化へ適用可能

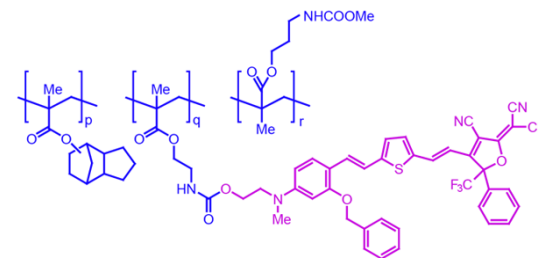
T. Kaji, Y. Tominari, T. Yamada, S. Saito, I. Morohashi, A. Otomo, Optics Express, 26, 30466 (2018)

## ギャップ埋め込み型パッチアンテナアレイを有する アンテナ結合型光変調器

T. Kaji, I. Morohashi, Y. Tominari, N. Sekine,  
T. Yamada, A. Otomo, Optics Express, 29, 29604 (2021)



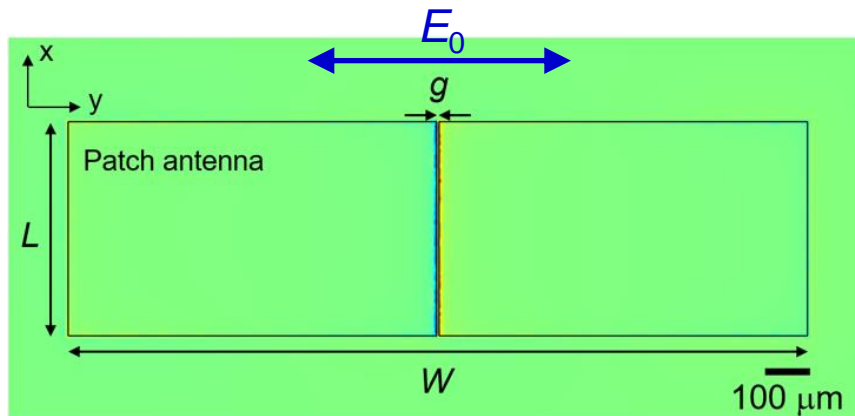
COP: シクロオレフィンポリマー



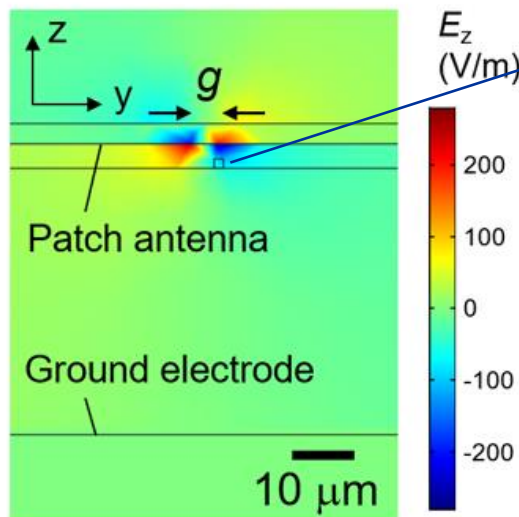
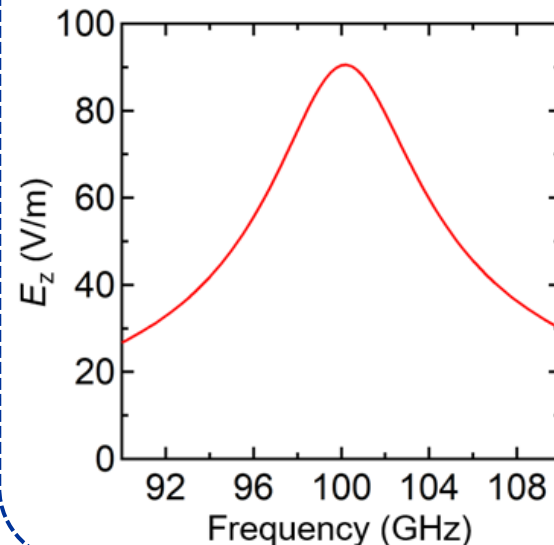
$T_g = \sim 160^\circ\text{C}$

- ✓ 低誘電率材料 (EOポリマー, COP) の使用 → **大きなアンテナサイズ**
- ✓ 小さな導波路サイズ ( $\sim 1.6 \mu\text{m}$ ) → **小さなアンテナ-導波路間の距離 ( $\sim 2.6 \mu\text{m}$ )**



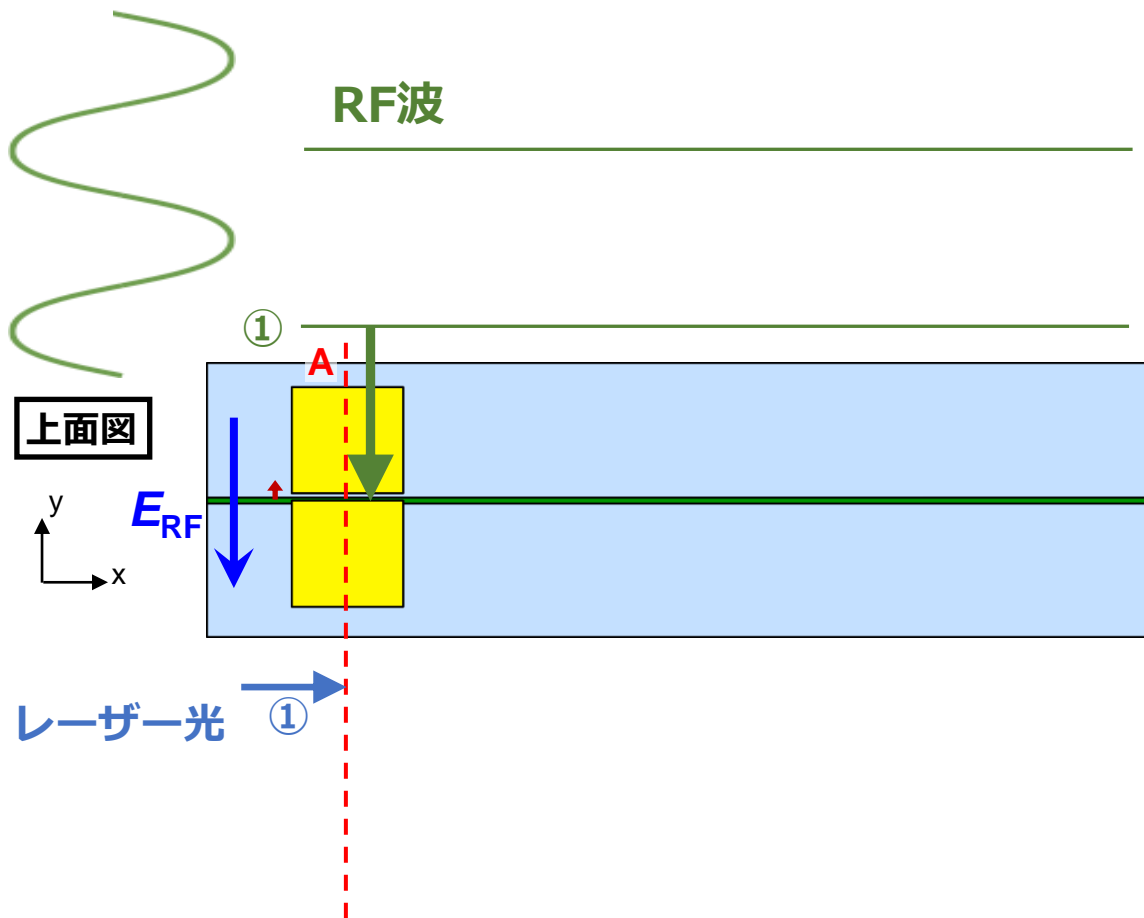


導波路位置での $E_z$ 電場強度



COPの損失:  $\tan\delta < \sim 0.003$

- ✓ 電場増強率 ( $E_z/E_0$ ): **~90倍 (@100 GHz)**
- ✓ 3 dBバンド幅: **>6 GHz**



EO効果による実効屈折率の微小変化

$$\delta n_e(x, t) = -\frac{1}{2} n_{EO}^3 r_{33} E_{wg}(x, t) \Gamma$$

$\Gamma$ : フィールド相互作用ファクター

入射RF電場

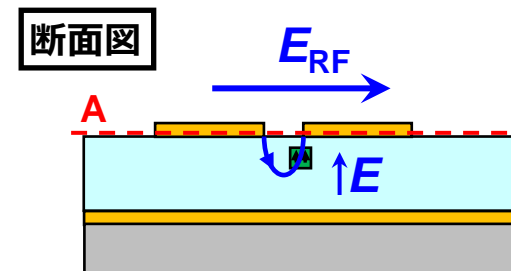
$$E_{RF} = E_{RF}^0 \sin(k_{RF} x \sin \theta - \omega_{RF} t)$$

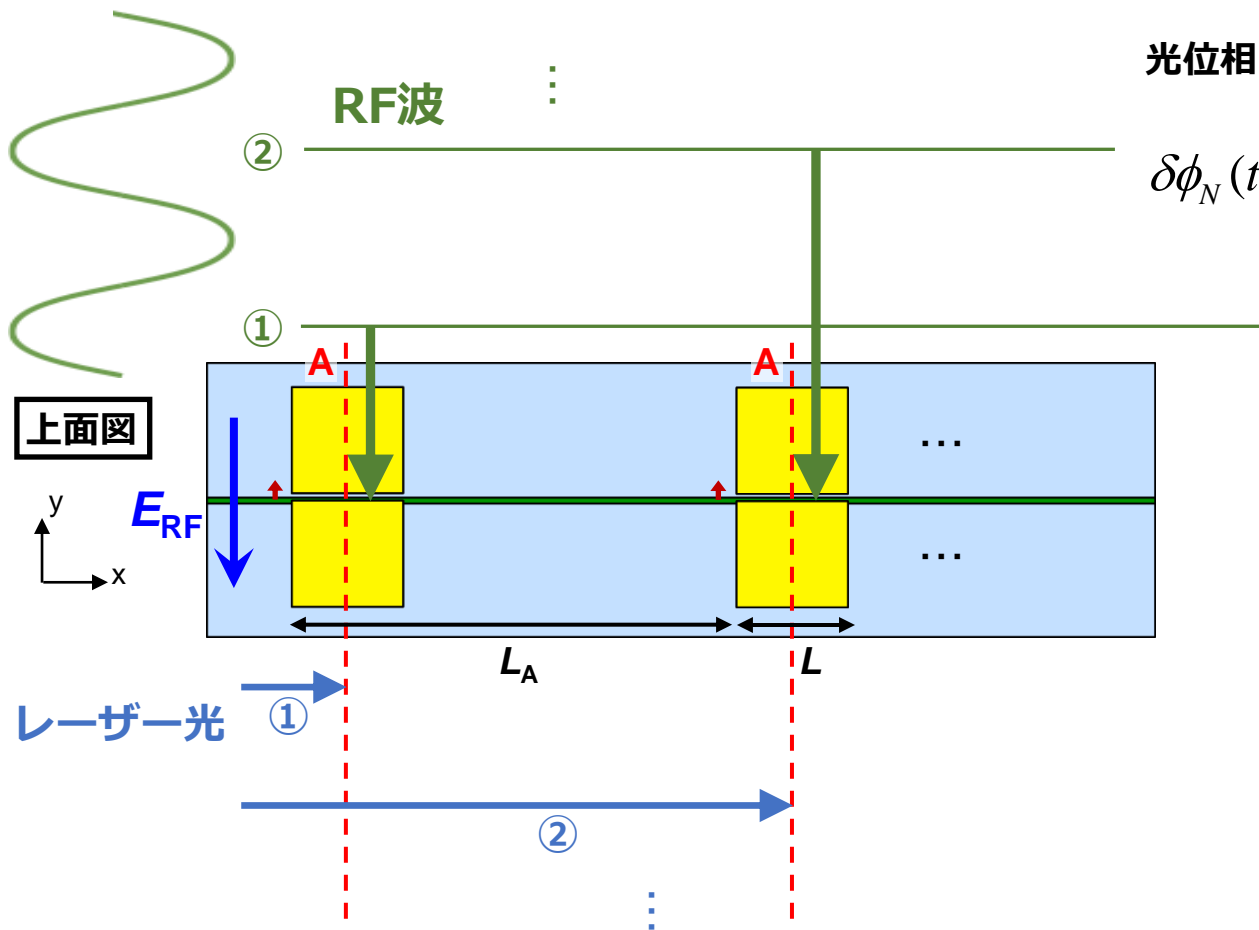
$E_{wg}/E_{RF}$ : 電場増強率、 $\theta$ : 入射角度

光位相シフト

$$\delta \phi(t_0) = k_{op} \int_0^L \delta n_g(x, t'(x)) dx$$

$$t' \approx (n_g/c)x + t_0$$

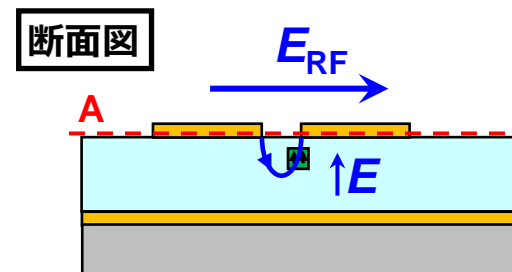




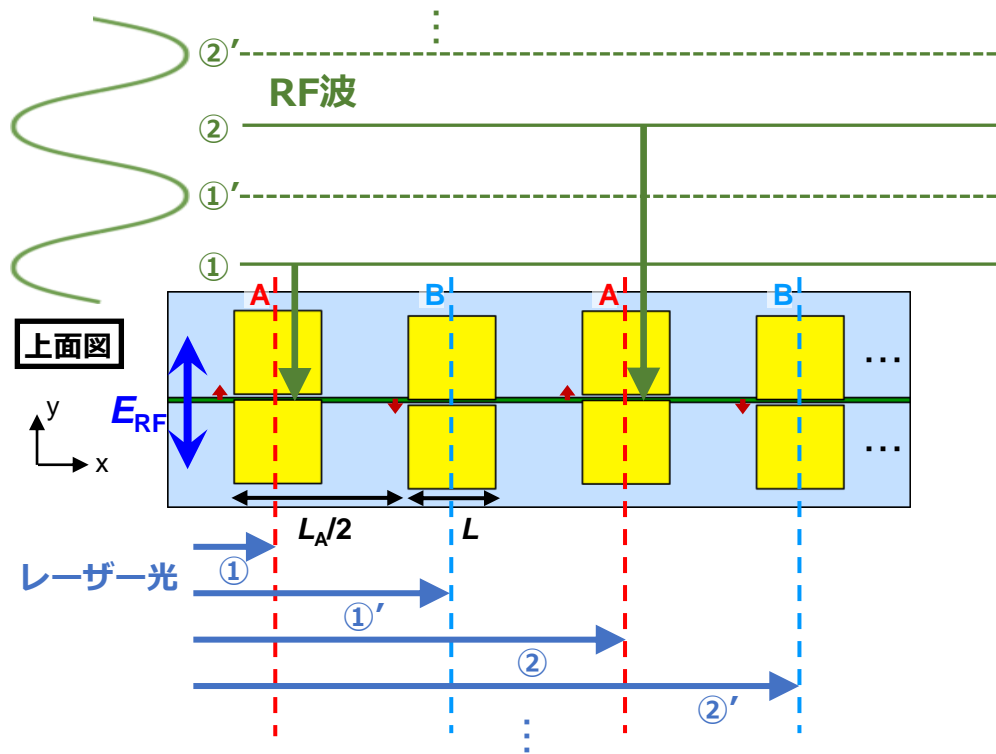
光位相シフト (アンテナ数:  $N$ )

$$\delta\phi_N(t_0) = \sum_{s=0}^{N-1} \int_{sL_A}^{sL_A+L} \delta n_g(x, t'(x)) dx$$

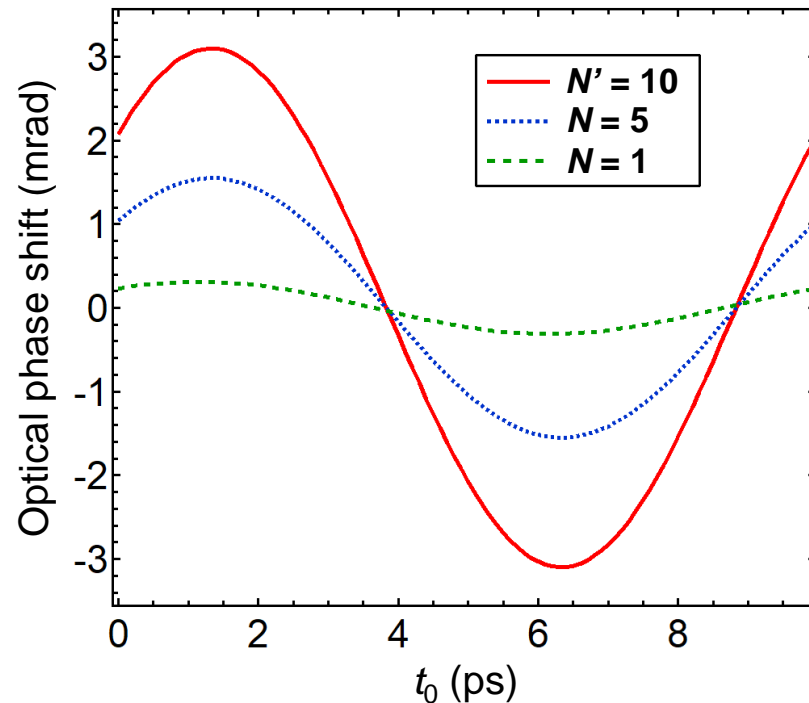
$$t' \approx (n_g/c)x + t_0$$







$L_A/2 = 0.88 \text{ mm}, L = 0.48 \text{ mm}$



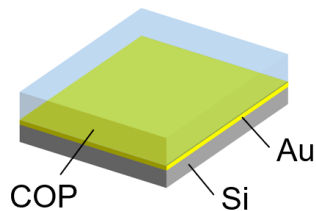
光位相シフト (アンテナ数:  $N$ )

光位相シフト (アンテナ数:  $N' = 2N$ )

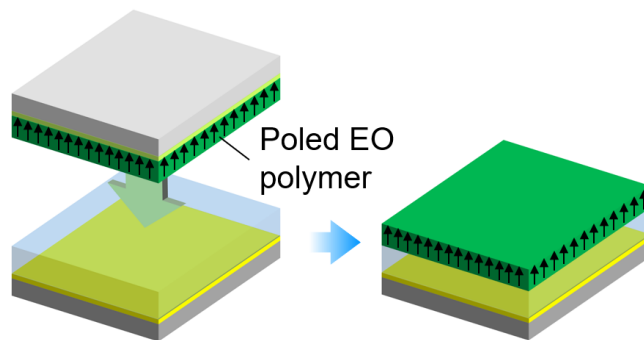
$$\delta\phi_N(t_0) = \sum_{s=0}^{N-1} \int_{sL_A}^{sL_A+L} \delta n_g(x, t'(x)) dx$$

$$\delta\phi'_{2N}(t_0) \approx 2 \times \delta\phi_N(t_0)$$

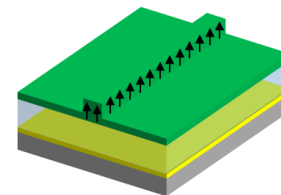
① グラウンド電極とCOPを有するSi基板の作成



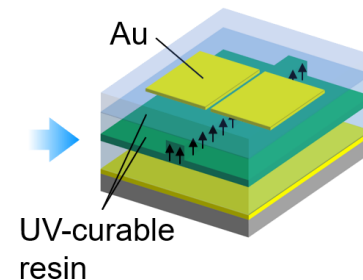
② ポーリングされたEOポリマーの転写・接合



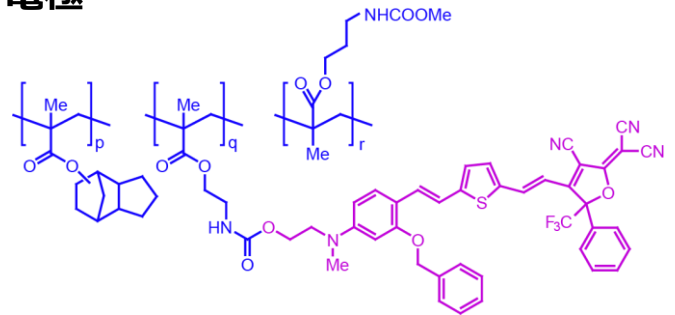
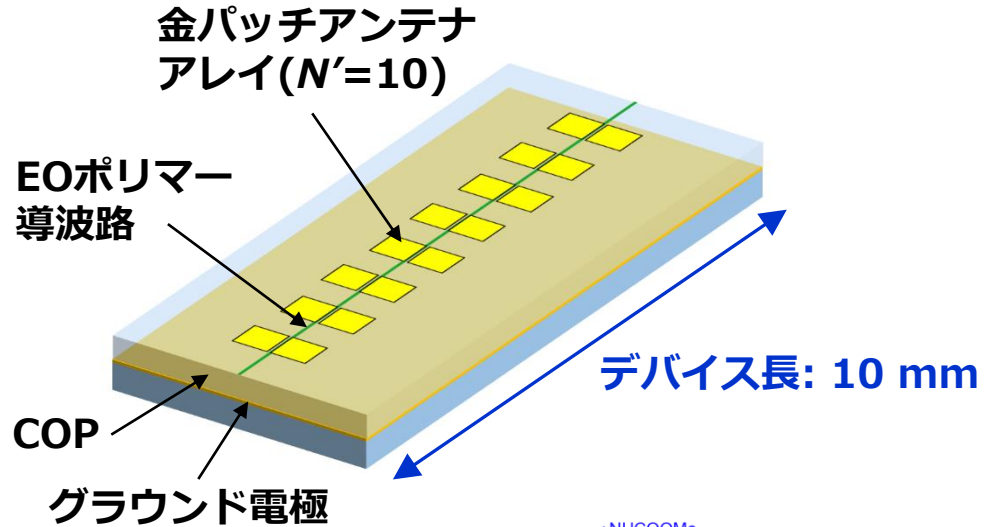
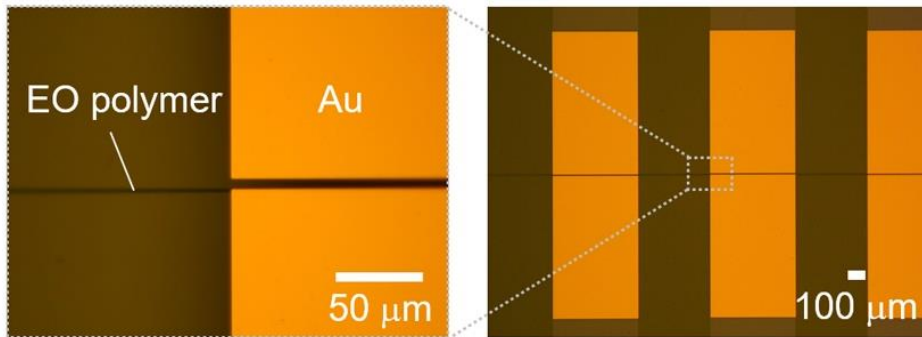
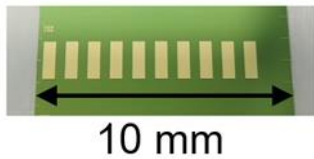
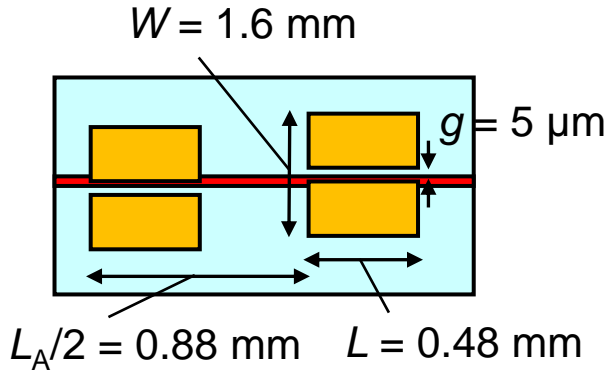
③ 導波路加工



④ 上部クラッド、金アンテナ、表面保護層の形成

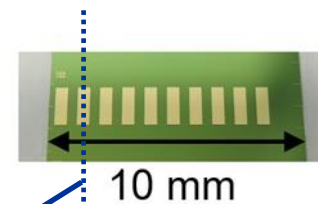
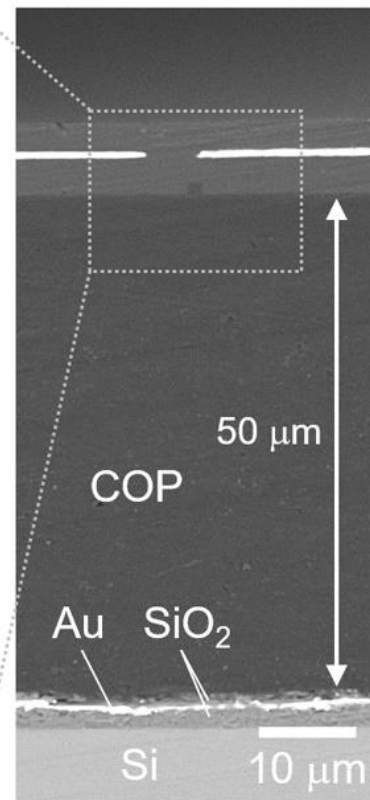
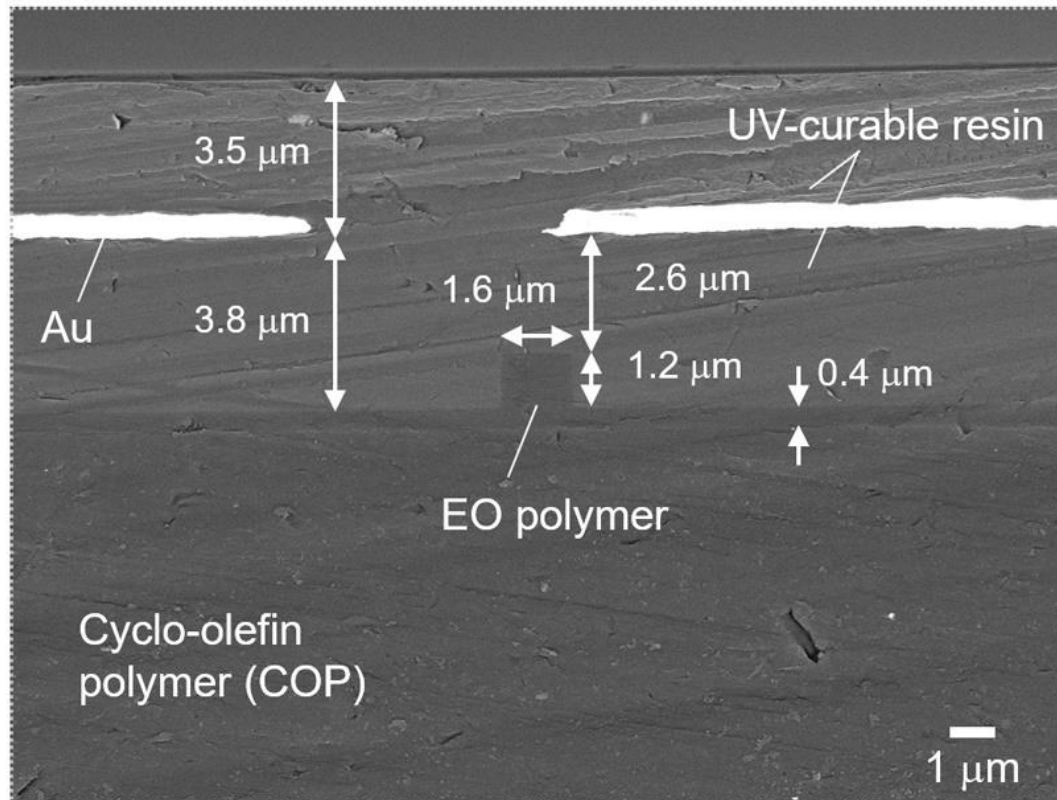


- 表面活性化、熱プレスにより接合強度を向上



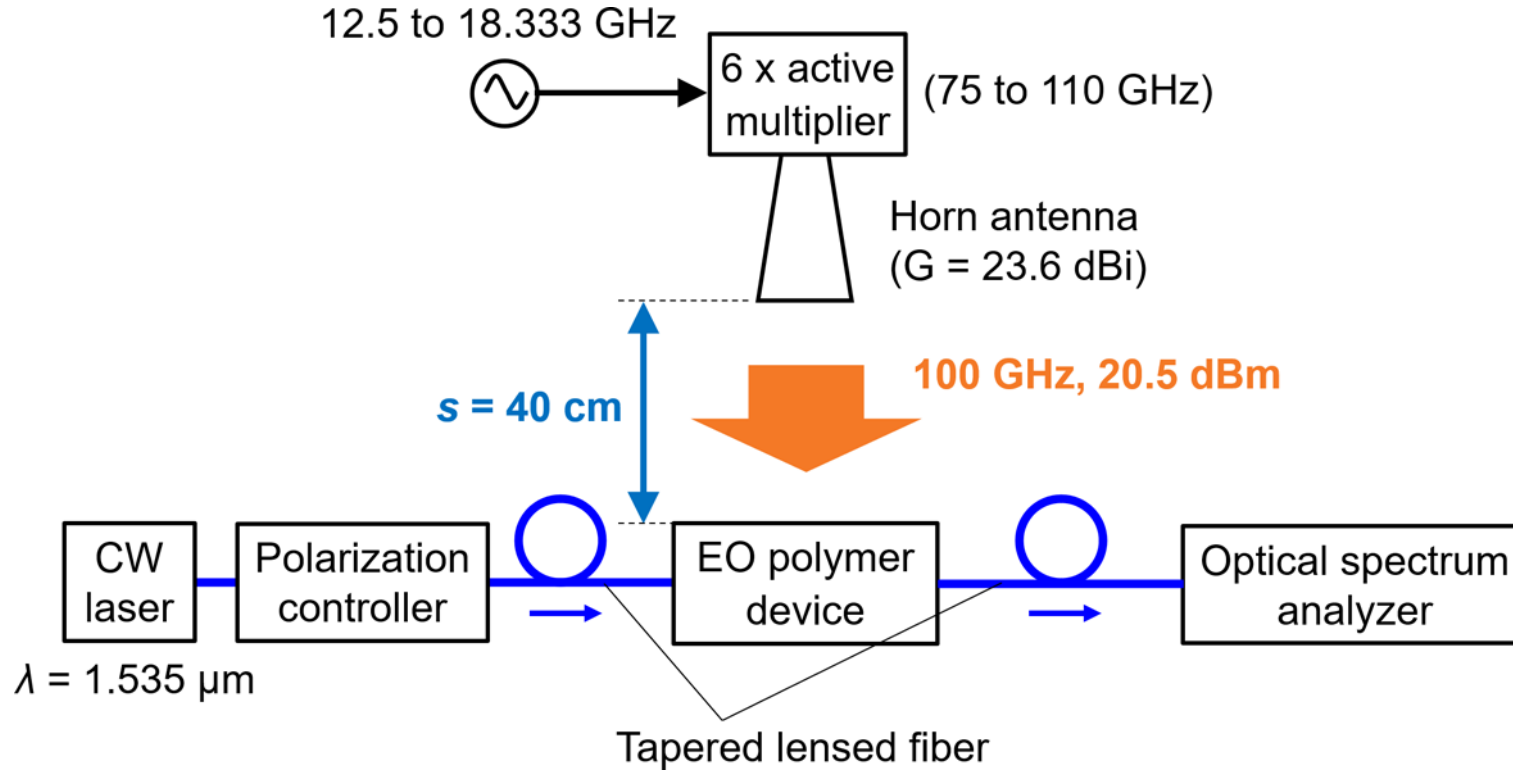
$T_g = \sim 160^\circ\text{C}$ 、 $r_{33} = \sim 36 \text{ pm/V @ } 1550 \text{ nm}$

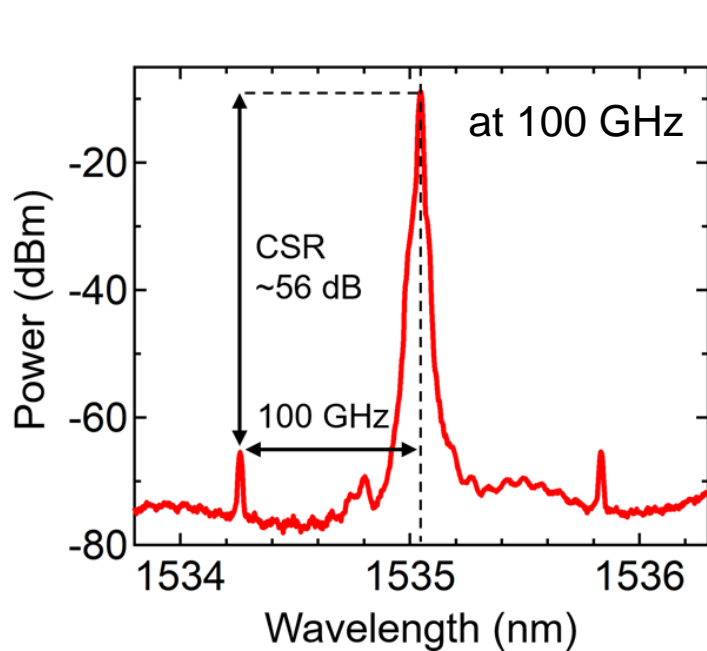
## 反射電子SEM画像



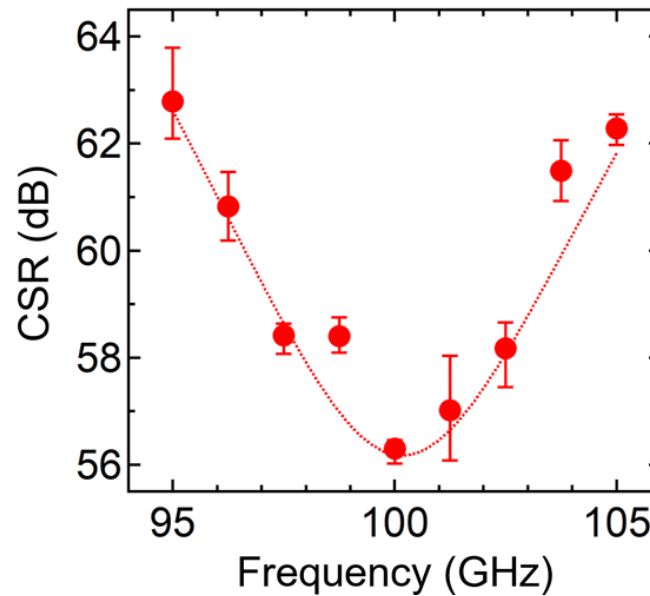
- 小さなアンテナ-導波路間の距離 ( $\sim 2.6 \mu\text{m}$ ) (モードフィールドサイズ:  $\sim 2 \mu\text{m}$ )





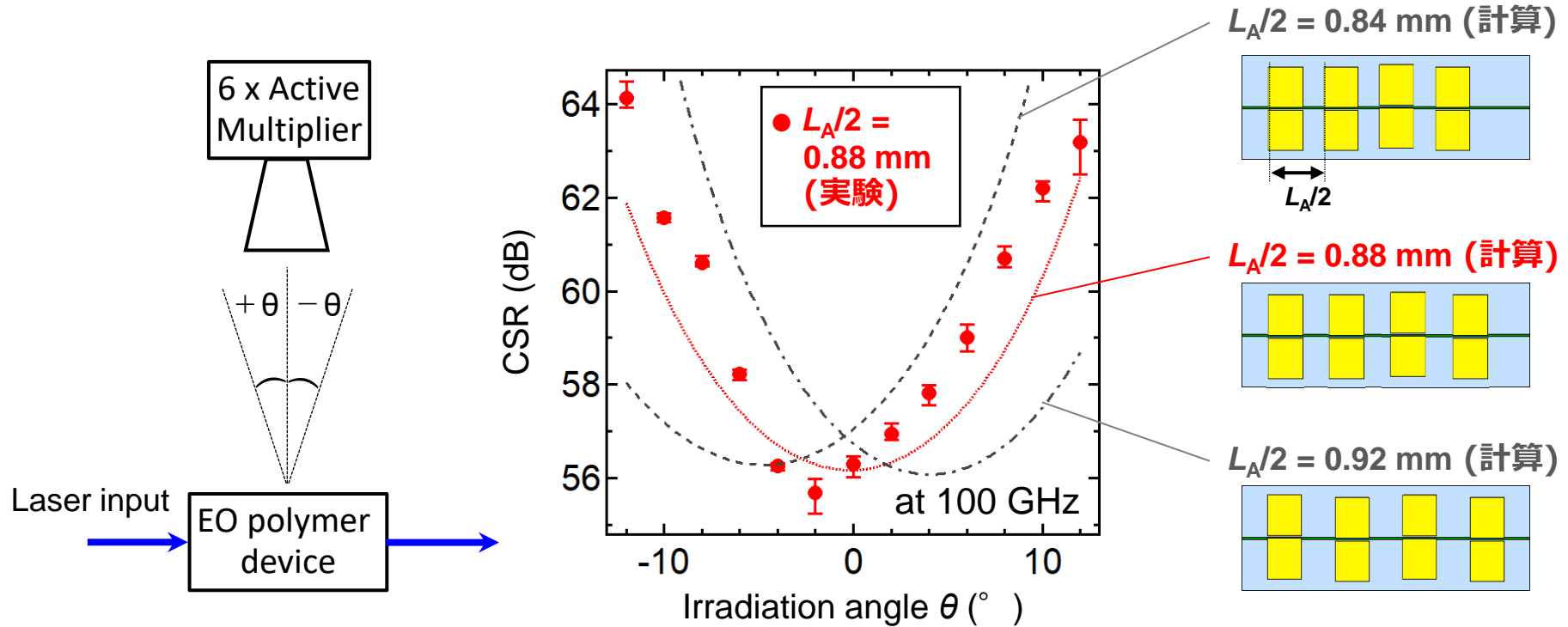


$L_A/2 = 0.88$  mm,  $L = 0.48$  mm,  $W = 1.6$  mm



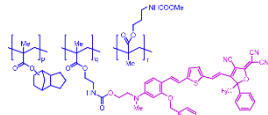
- キャリアサイドバンド比 **56 dB ( $m=3$  mrad)** を観測 (パワー密度:  $12.8\text{W}/\text{m}^2$ )
- 3 dB帯域幅 :  $\sim 6$  GHz
- カップリング損失と伝搬損失の合計 :  $\sim 15$  dB  
( $\rightarrow \sim 7$  dB (伝搬損失: 3 dB/cm) まで改善可能)

$$\text{CSR} \approx \frac{4}{m^2} = \left[ 20 \log \frac{2}{m} \right]_{\text{dB}}$$



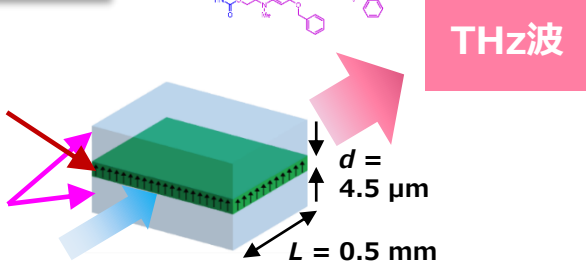
- $L_A/2=0.88$  mm のとき、 $\theta=-2^\circ$  (設計:  $\theta=0^\circ$ ) で最小のCSR (→ 指向性はアンテナ周期 $L_A$ に依存)
- モバイルフロントホール/バックホールの無線化で有用

## EOポリマー-THz波発生デバイス



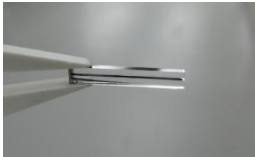
EOポリマー  
スラブ導波路

シクロオレフィン  
ポリマー(COP)

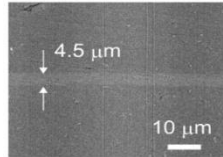


ポンプ光 (1.56 μm, <100 fs,  
50 MHz, 20 mW,  
シリンダリカルレンズで照射)

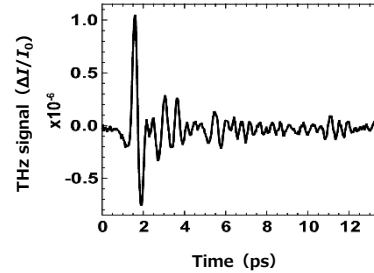
デバイスの外観



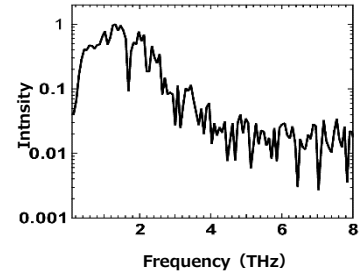
断面SEM画像



THz波の時間波形

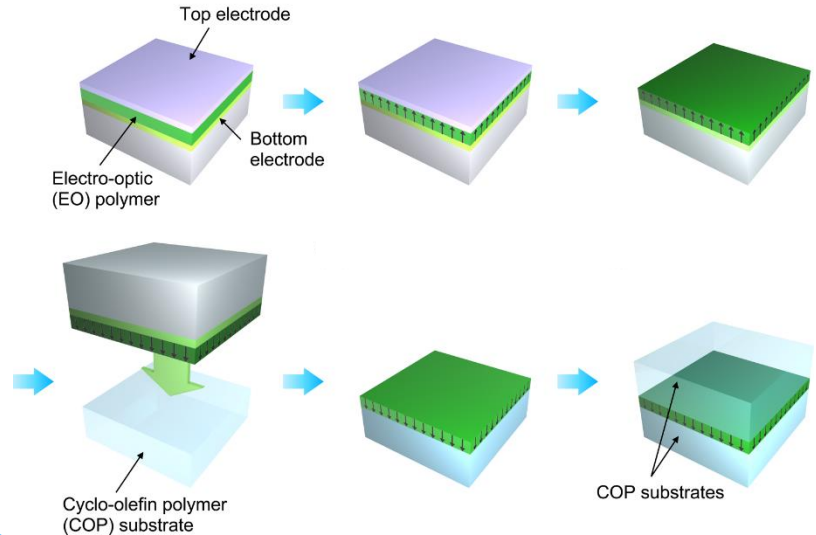


THzスペクトル



- 小型ファイバーレーザーを用いたスペクトルギャップフリーのTHz波発生

転写法を用いたデバイス作製プロセス



- 本技術により、Beyond 5G向けテラヘルツ受信デバイス（無線-光信号変換デバイス）等の作製、量産化への展開が可能
- 高効率化、高周波化に向けた改良を実施中であり、無線通信の実証実験も予定
  - 実用化、量産化に向けた共同研究の実施
  - Beyond 5Gでの標準化における連携

- 発明の名称：電気光学ポリマー層を含む  
非線形光学用積層体及びその製造方法
- 出願番号：特願2019-537669
- 出願人：情報通信研究機構
- 発明者：梶 貴博、富成征弘、山田俊樹、大友 明

**国立研究開発法人 情報通信研究機構**  
**イノベーション推進部門**  
**知財活用推進室**

**TEL 042-327-6950**

**e-mail ippo@ml.nict.go.jp**