

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)

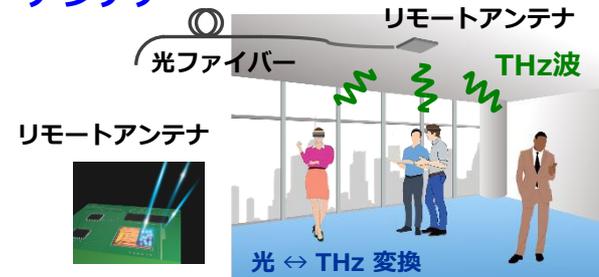


Beyond 5G通信技術



Beyond 5G 無線通信

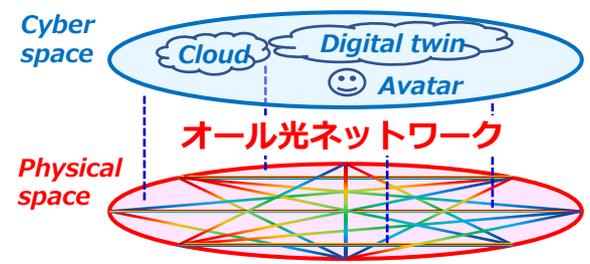
- 光ファイバー無線 (RoF) リモートアンテナ



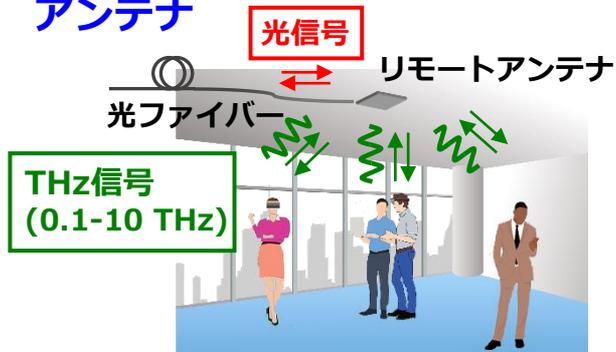
- モバイルフロント/バックホール無線通信



【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

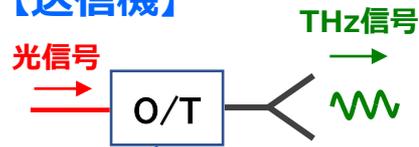


- モバイルフロント/バックホール無線通信



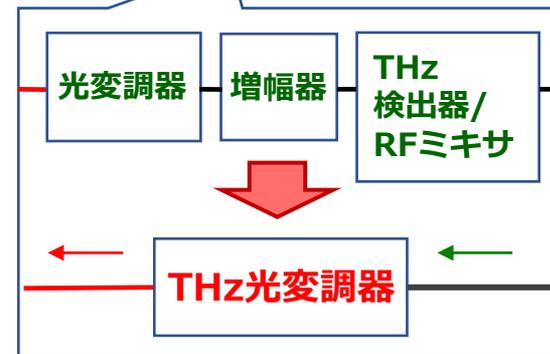
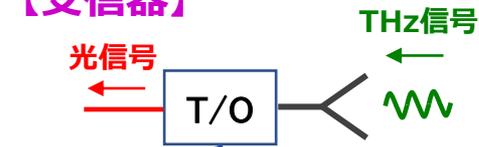
光\leftrightarrow無線信号 相互変換技術

【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】

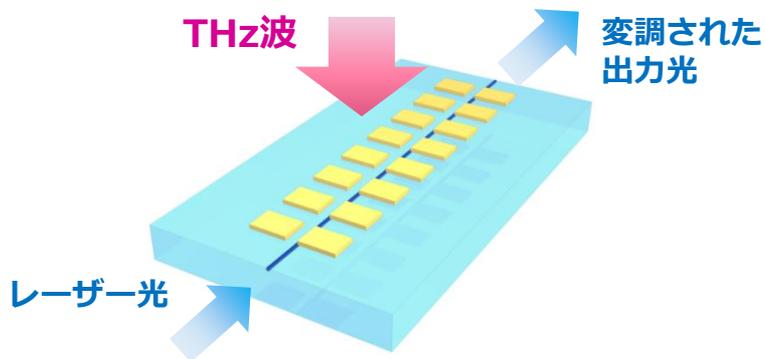


課題 【受信器】

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

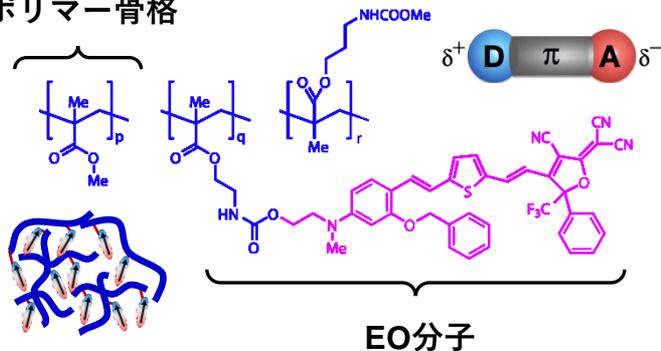


- ✓ 高効率 THz波 受信・発生
- ✓ 超広帯域 (0.1-10 THz以上)
- ✓ 光信号 ↔ テラヘルツ信号 変換
- ✓ デバイス化、光集積

有機EOポリマー

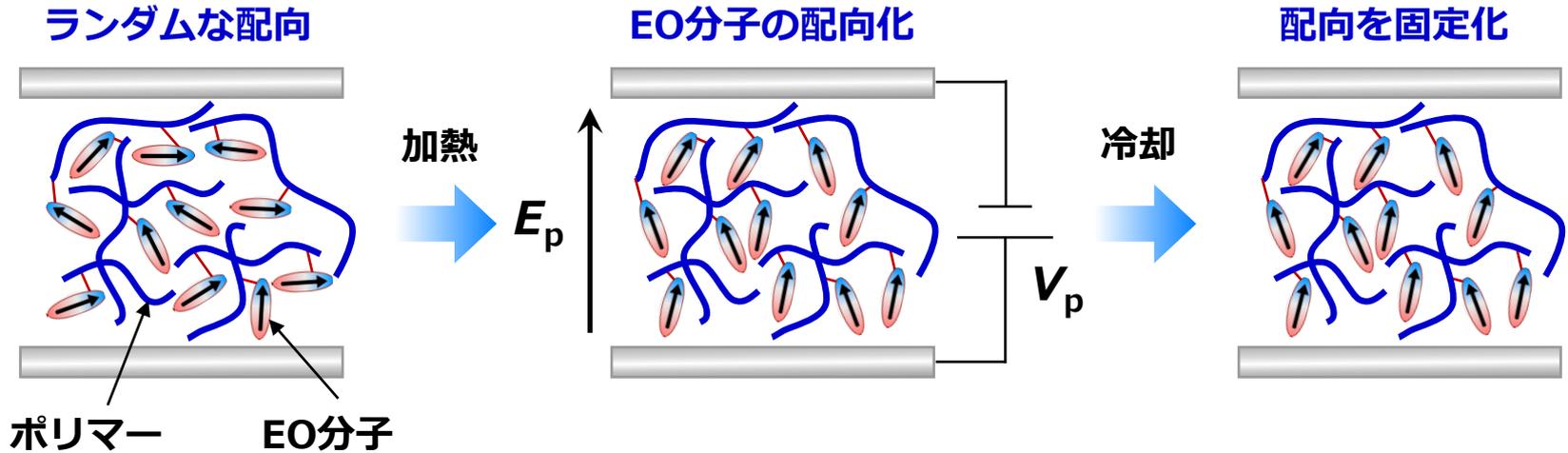
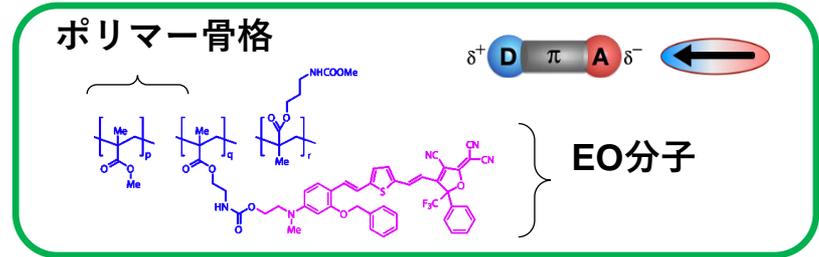
側鎖型EOポリマーの構造例

ポリマー骨格



- 大きなEO係数 ($r_{33} > \sim 100$ pm/V)
(\leftrightarrow LiNbO₃: 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

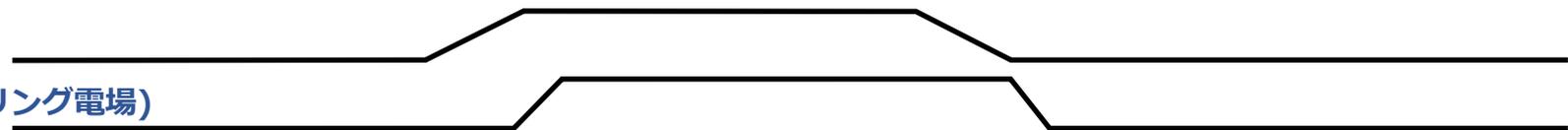
電場による電気光学 (EO) 分子の配向化 (ポーリング)



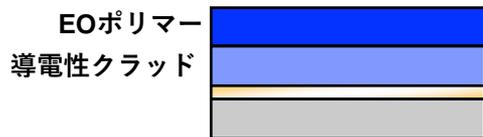
T_g (ガラス転移温度)

T (温度)

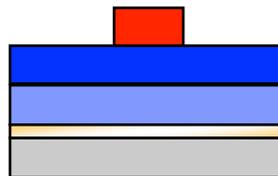
E_p (ポーリング電場)



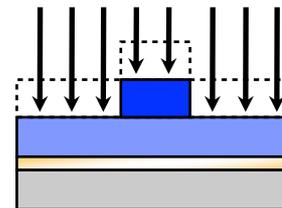
クラッド上へのコア層の塗布



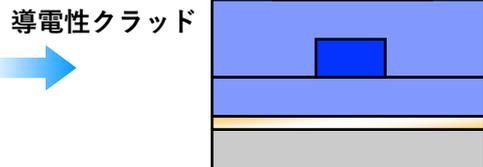
フォトリジストパターン



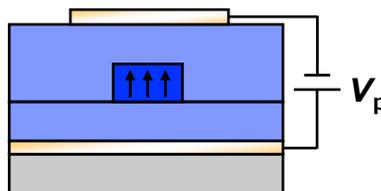
RIE



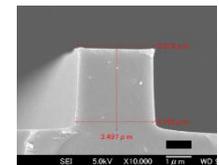
コア上へのクラッド層の塗布



ポーリング



RIE加工後のEOポリマー断面SEM像



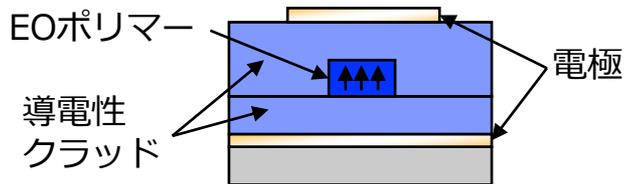
1 μm

→ 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)

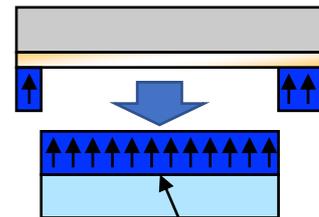
提案技術

- 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】

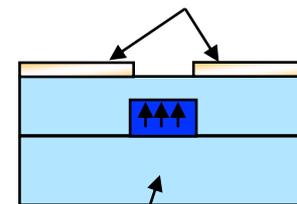
熱プレス転写

(→ 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



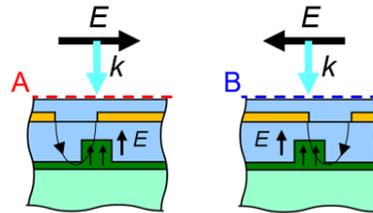
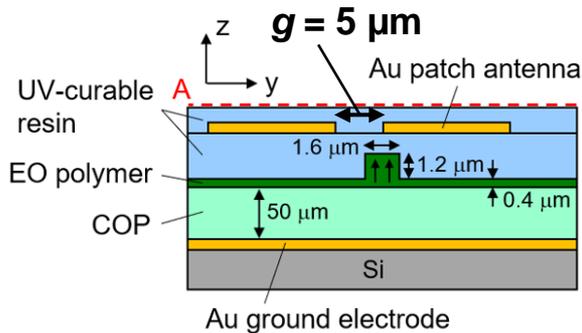
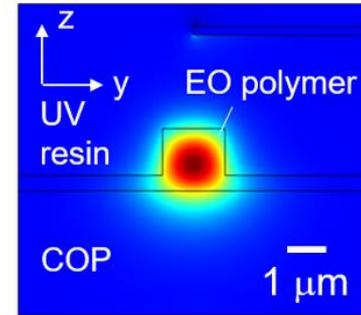
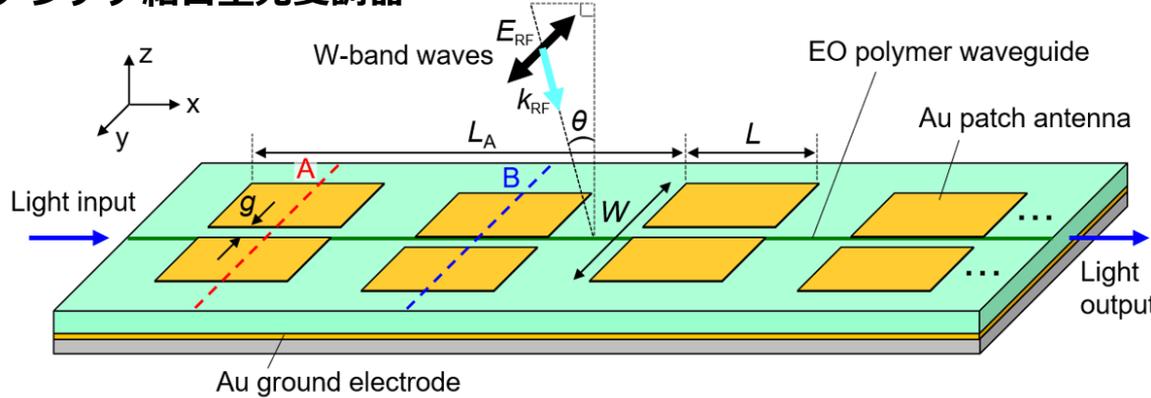
THz波低吸収損失材料 (シクロオレフィンポリマー等)

- ✓ 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

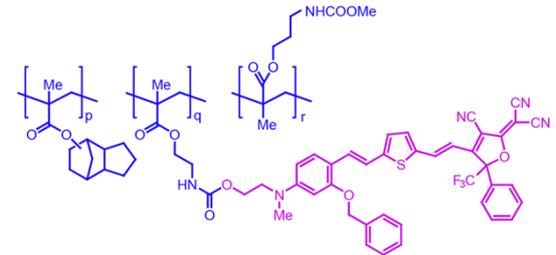
T. Kaji, Y. Tominari, T. Yamada, S. Saito, I. Morohashi, A. Otomo, Optics Express, 26, 30466 (2018)

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)

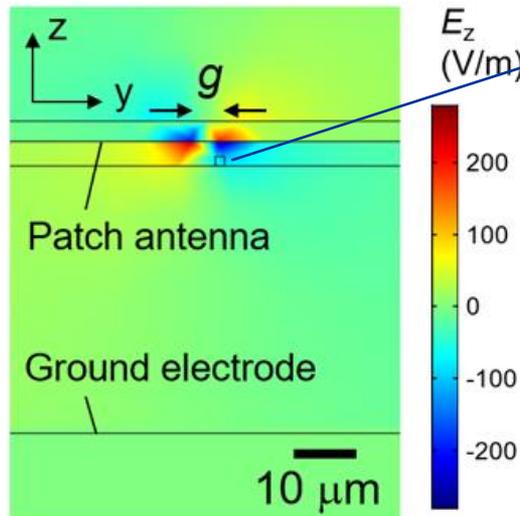
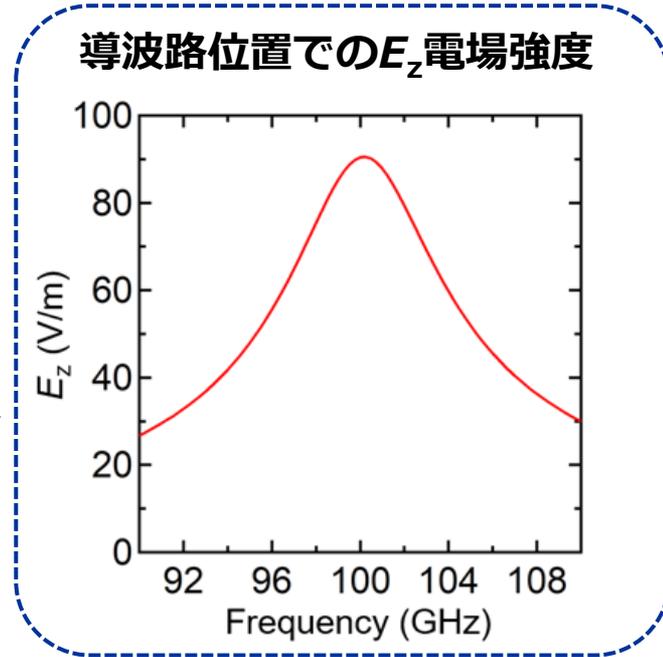
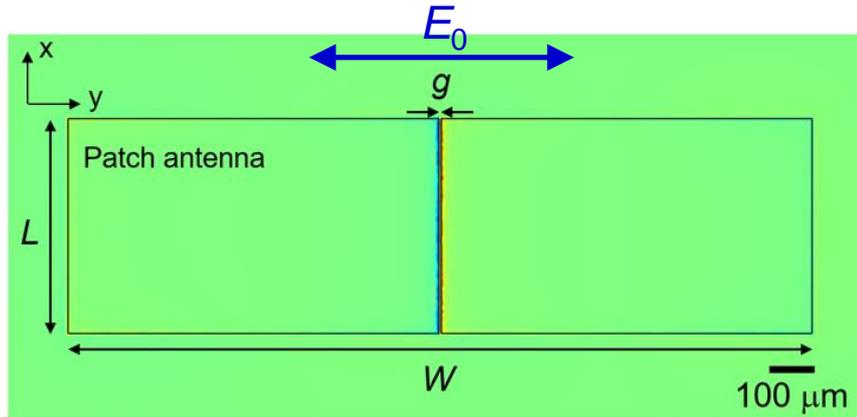


COP: シクロオレフィンポリマー



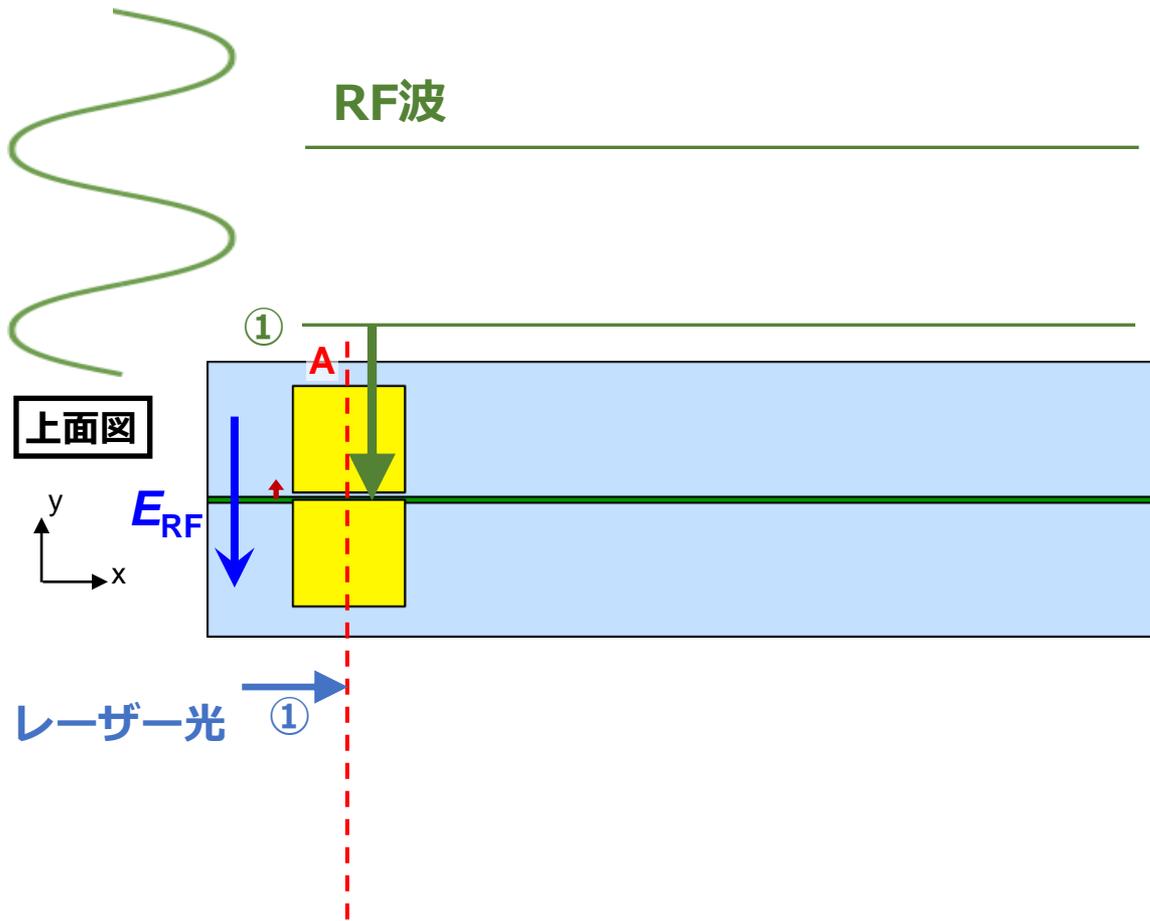
$T_g = \sim 160^\circ\text{C}$

- ✓ 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 ($\sim 2.6 \mu\text{m}$)**



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

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

Γ : フィールド相互作用ファクター

入射RF電場

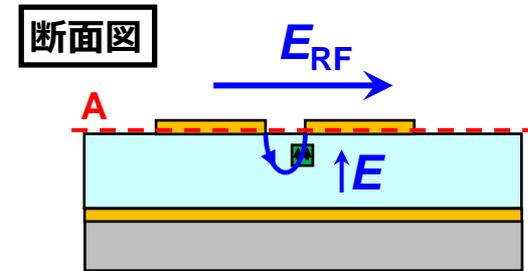
$$E_{RF} = E_{RF}^0 \sin(k_{RF} x \sin \theta - \omega_{RF} t)$$

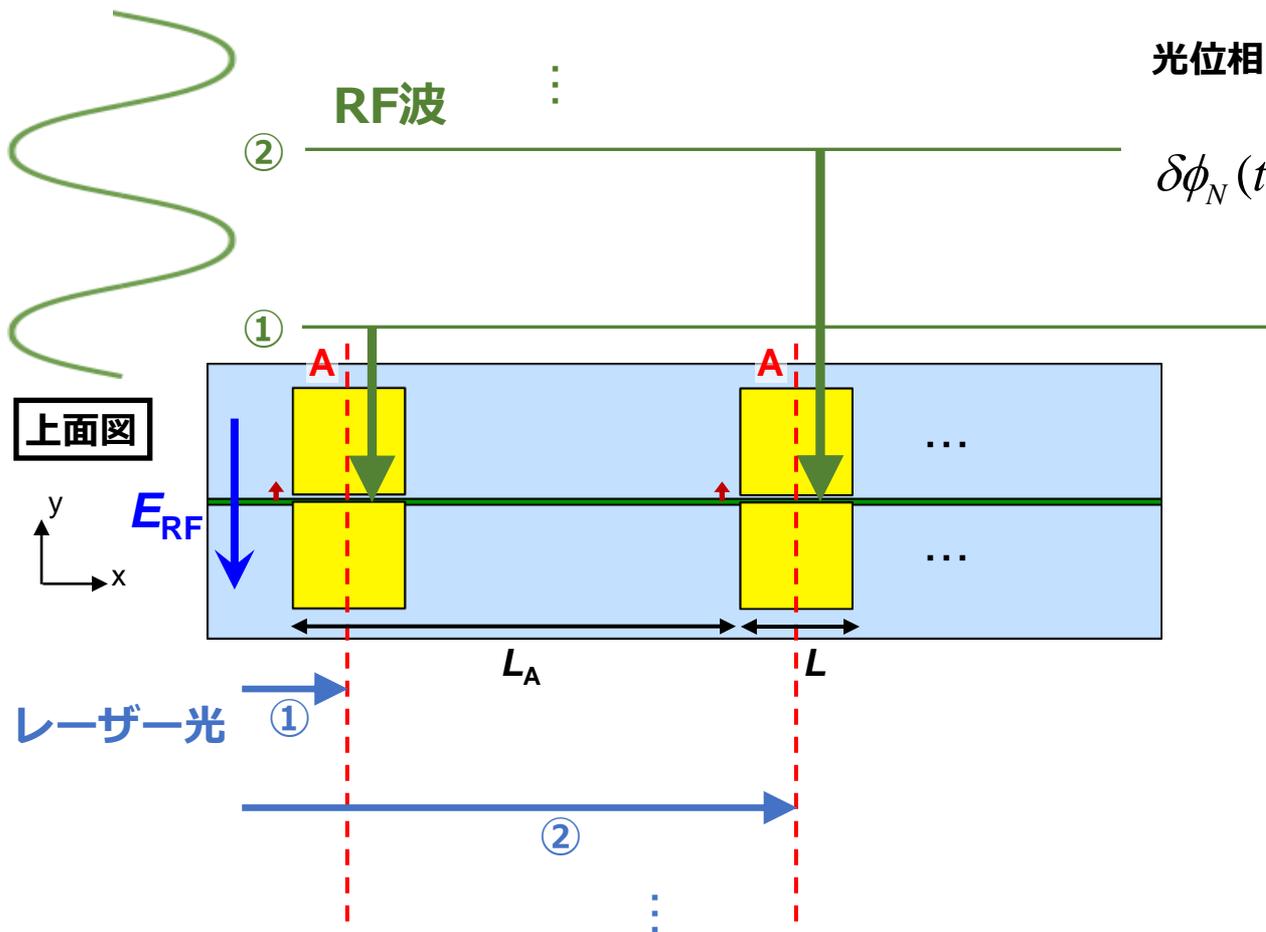
E_{wg}/E_{RF} : 電場増強率、 θ : 入射角度

光位相シフト

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

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

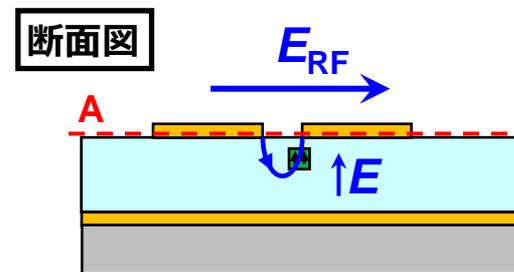


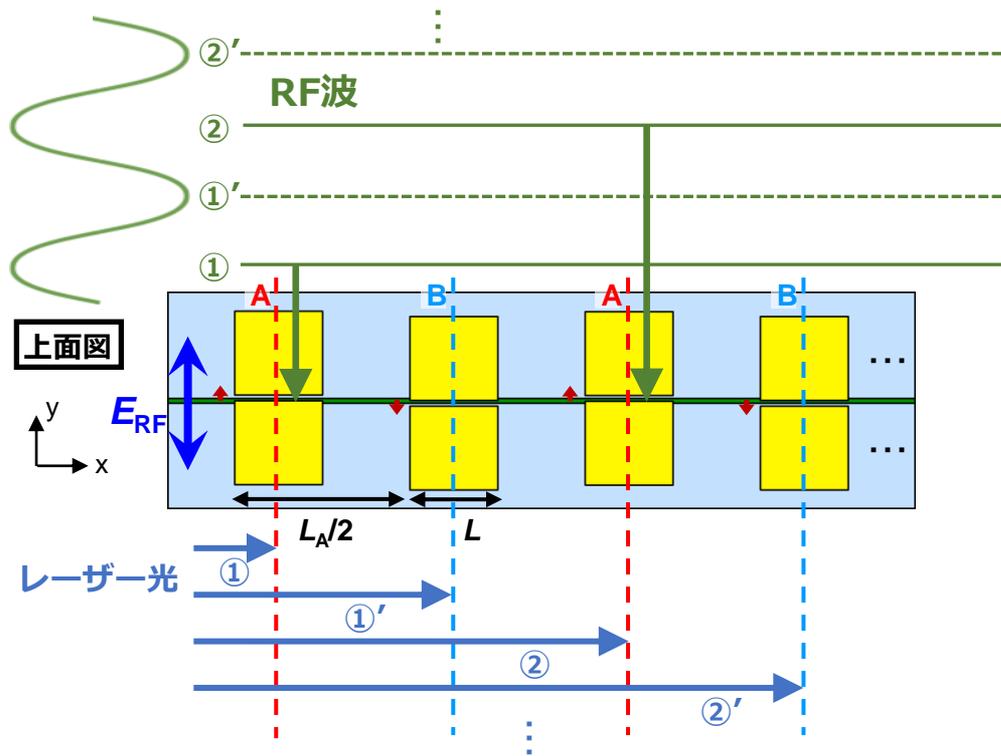


光位相シフト (アンテナ数: N)

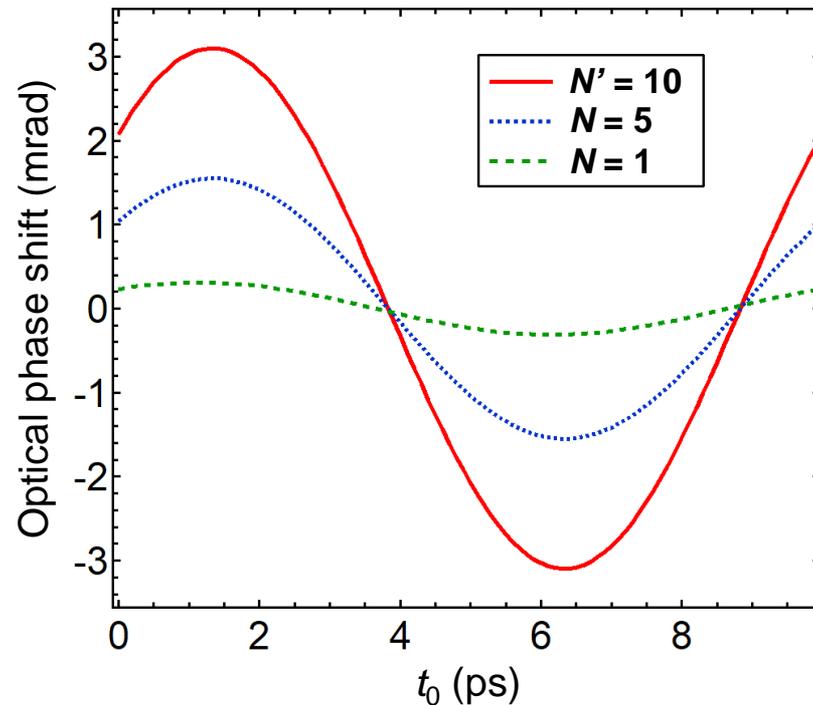
$$\delta\phi_N(t_0) = \sum_{s=0}^{N-1} \int_{sL_A}^{sL_A+L} \delta n_g(x, t'(x)) dx$$

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





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

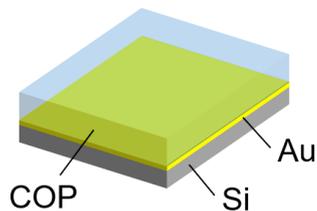


光位相シフト (アンテナ数: N)

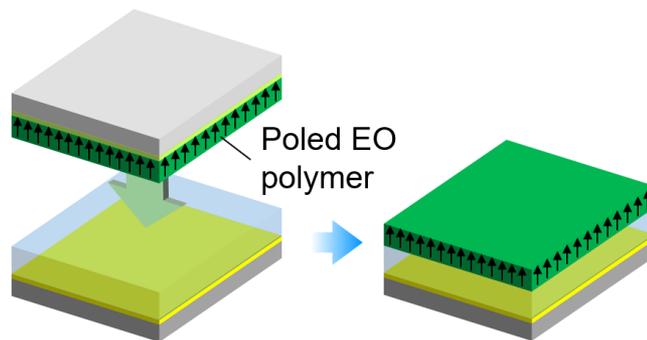
光位相シフト (アンテナ数: $N' = 2N$)

$$\delta\phi_N(t_0) = \sum_{s=0}^{N-1} \int_{sL_A}^{sL_A+L} \delta n_g(x, t'(x)) dx \quad \delta\phi'_{2N}(t_0) \approx 2 \times \delta\phi_N(t_0)$$

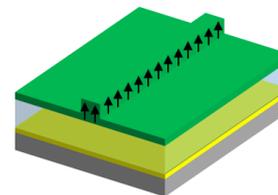
① グラウンド電極とCOPを有するSi基板の作成



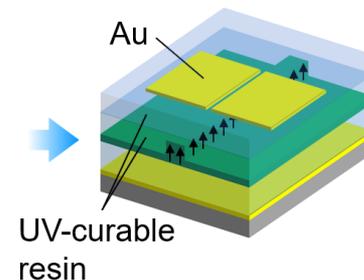
② ポーリングされたEOポリマーの転写・接合



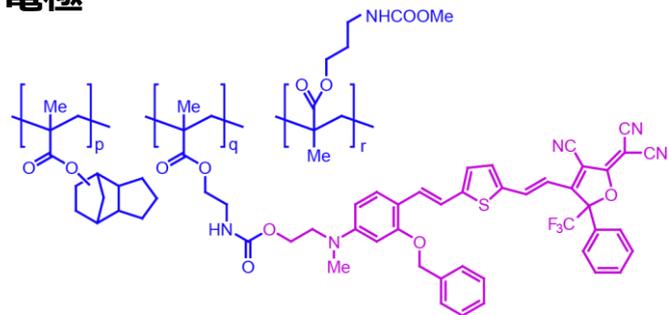
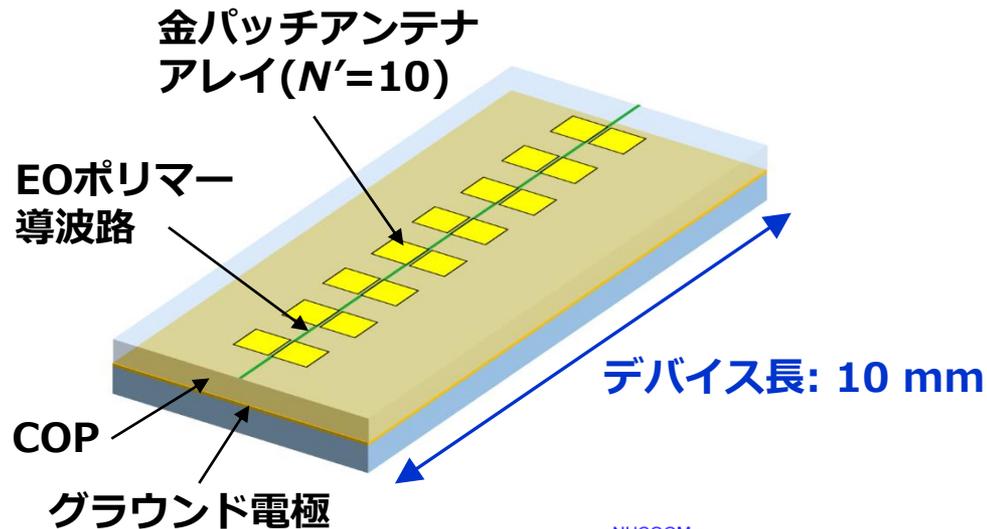
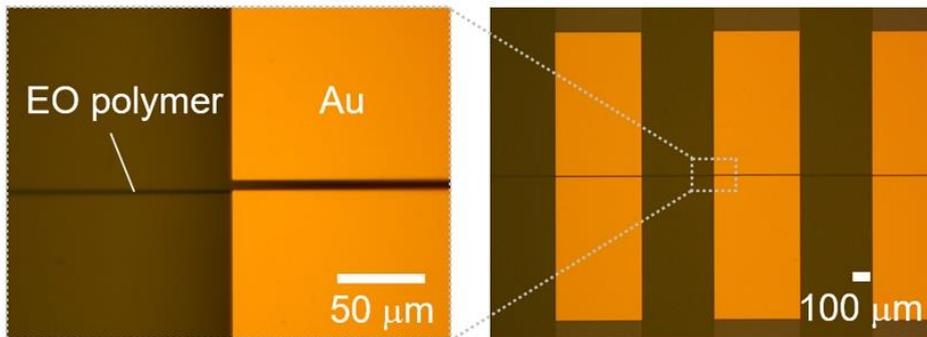
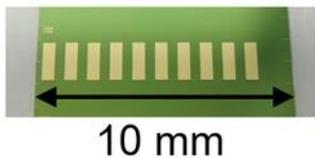
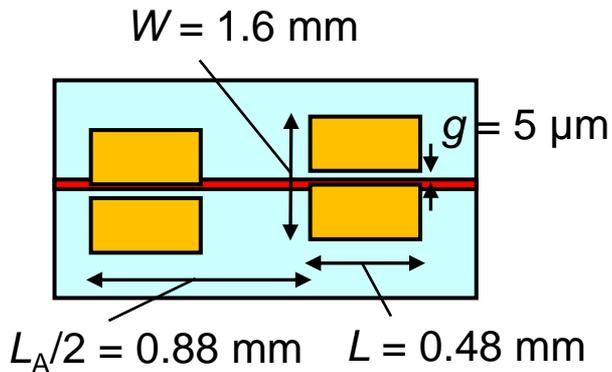
③ 導波路加工



④ 上部クラッド、金アンテナ、表面保護層の形成

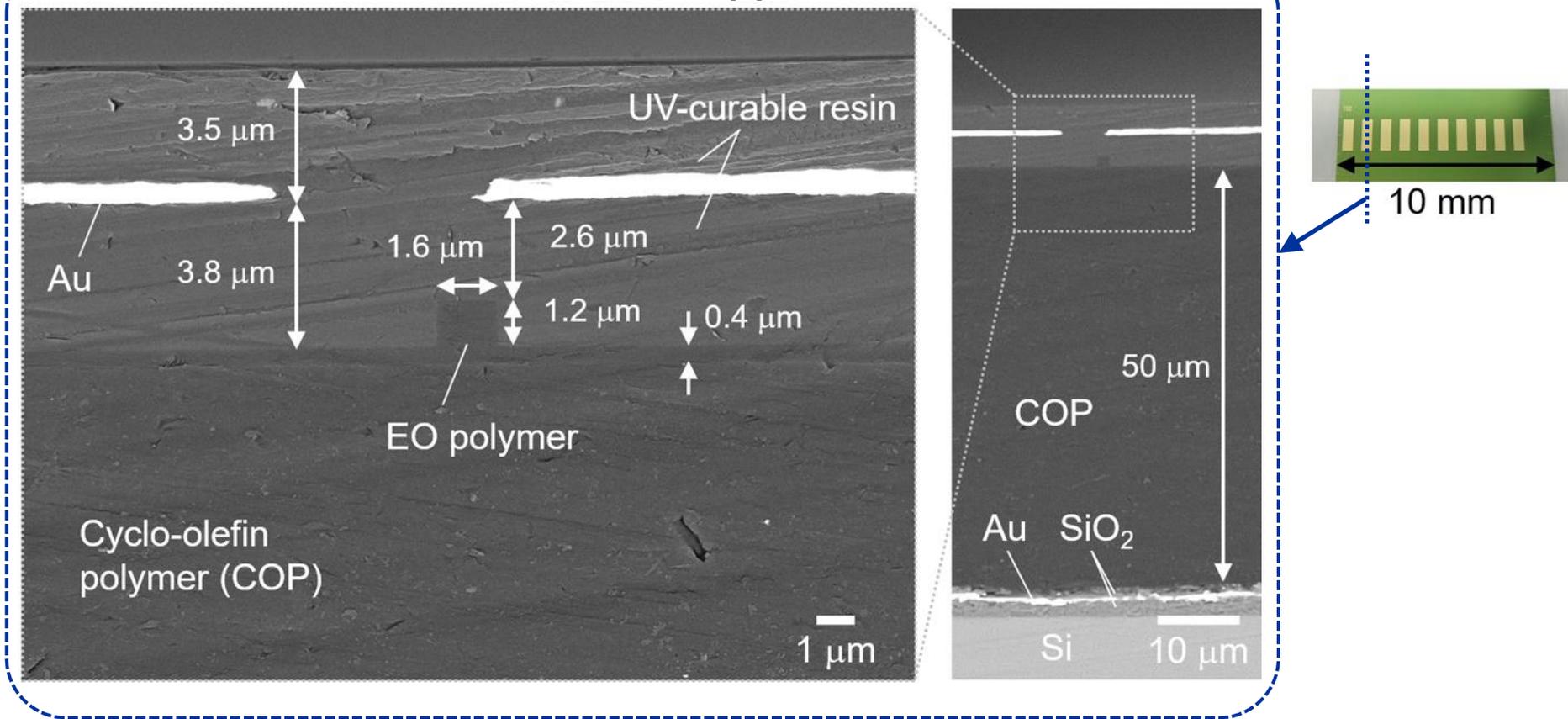


- 表面活性化、熱プレスにより接合強度を向上

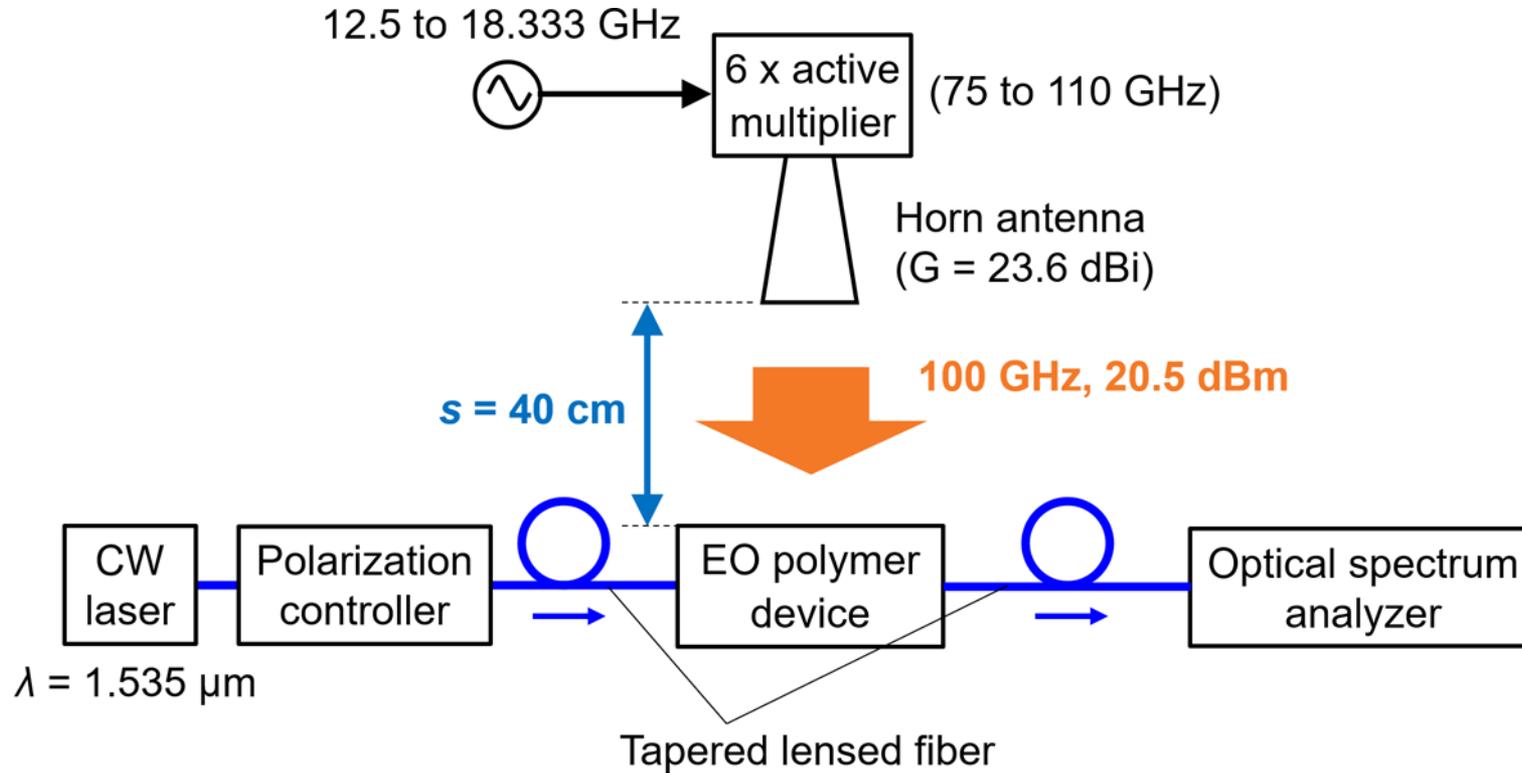


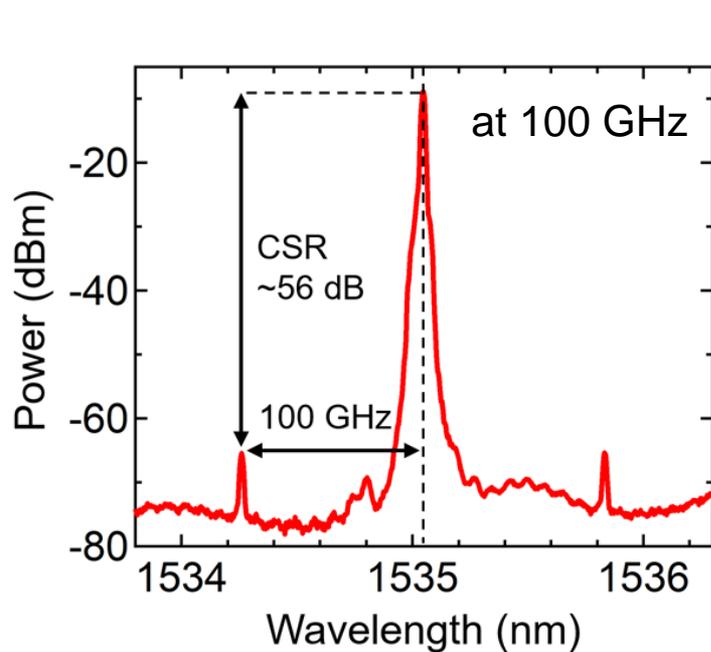
$T_g = \sim 160^\circ\text{C}$ 、 $r_{33} = \sim 36 \text{ pm/V @ } 1550 \text{ nm}$

反射電子SEM画像

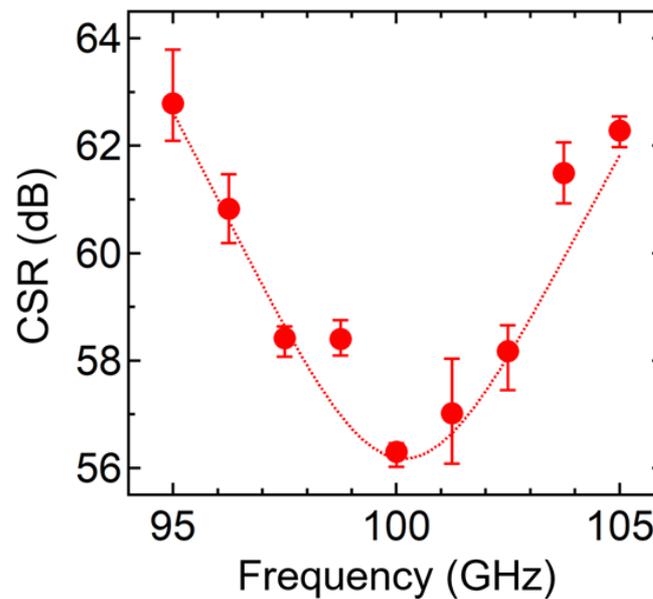


- 小さなアンテナ-導波路間の距離 ($\sim 2.6 \mu\text{m}$) (モードフィールドサイズ: $\sim 2 \mu\text{m}$)



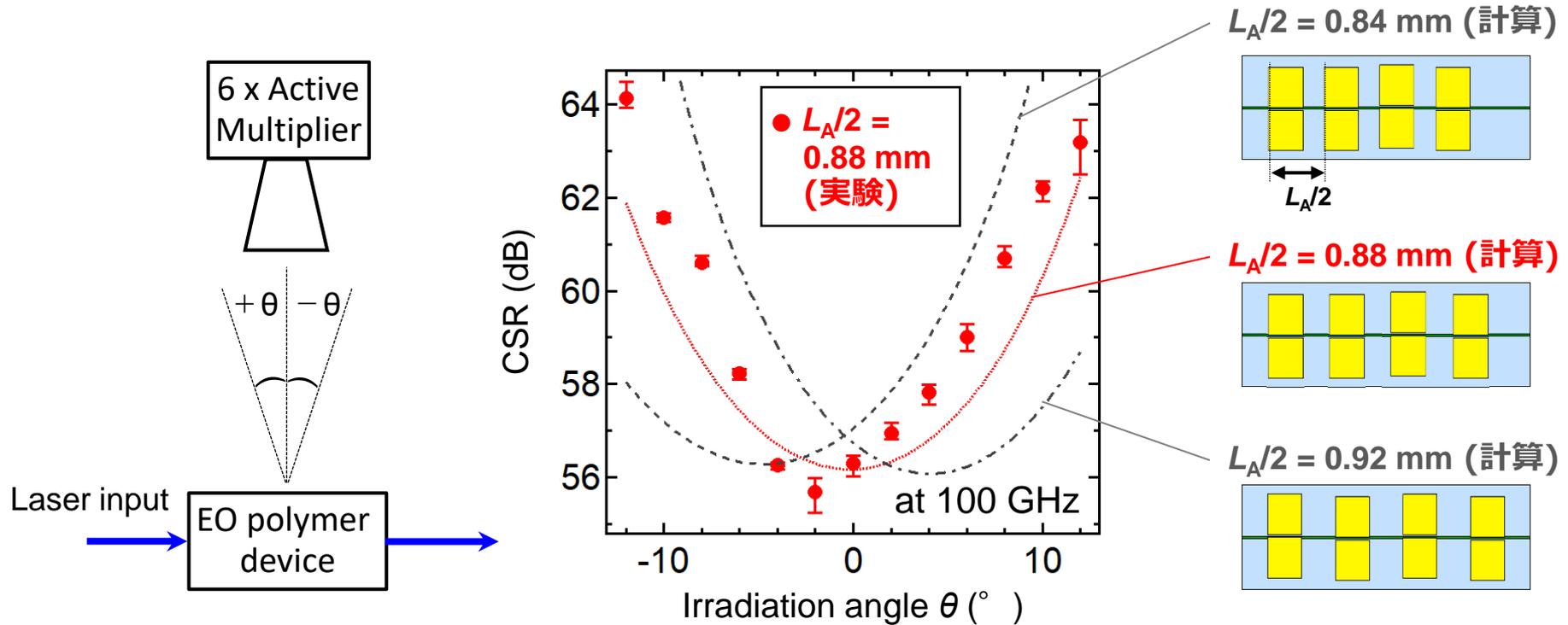


$L_A/2 = 0.88$ mm, $L = 0.48$ mm, $W = 1.6$ mm



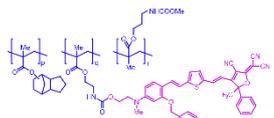
- キャリアサイドバンド比 **56 dB ($m=3$ mrad)** を観測 (パワー密度: $12.8\text{W}/\text{m}^2$)
- 3 dB帯域幅 : ~ 6 GHz
- カップリング損失と伝搬損失の合計 : ~ 15 dB
($\rightarrow \sim 7$ dB (伝搬損失: 3 dB/cm) まで改善可能)

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



- $L_A/2=0.88$ 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

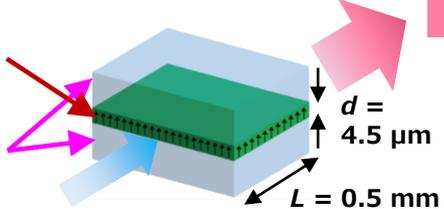
EOポリマー-THz波発生デバイス



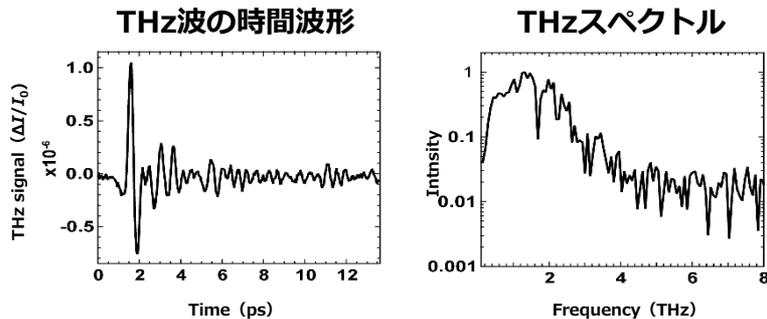
THz波

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)

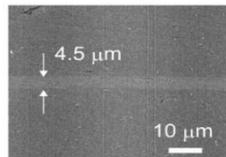


- 小型ファイバーレーザーを用いたスペクトルギャップフリーのTHz波発生

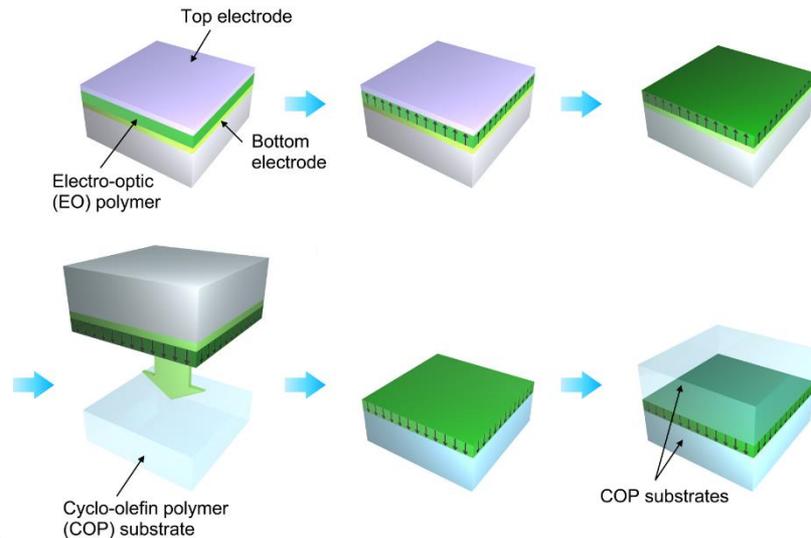
デバイスの外観



断面SEM画像



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