

Simulation of plasmonic optical phased array using electro-optic polymer

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2020-04-06 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24517/00057320

This work is licensed under a Creative Commons
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0
International License.



電気光学ポリマーを利用した プラズモニック光フェーズドアレーのシミュレーション

桑村 有司[†] 日端 恭佑[†] 小川 嵩史[†]

[†] 金沢大学理工研究域 〒920-1192 石川県金沢市角間町

E-mail: kuwamura@ec.t.kanazawa-u.ac.jp,

あらまし 我々は、電気光学ポリマーを利用したプラズモニック位相変調器をアレー状に並べたプラズモニック光フェーズドアレーを提案している。この素子では、波長 $1.55\ \mu\text{m}$ において、電圧制御で出力光が 90 度以上の範囲で偏向走査できることを数値計算で確認したので報告する。ポッケルス係数 $r_{33} = 200\ \text{pm/V}$ の電気光学ポリマーを利用すれば、各位相変調素子へ印加する電圧は $|14|\text{V}$ 以下であり、 $40\ \mu\text{m}$ より短い長さの位相変調器アレー列を用いて $70 \times 13\ \mu\text{m}^2$ 以下のサイズで小型の光フェーズドアレーが構成できる。

キーワード 光フェーズドアレー, 光ビーム走査素子, プラズモニック位相変調器, プラズモニクス, 電気光学ポリマー

Simulation of plasmonic optical phased array using electro-optic polymer

Yuji KUWAMURA[†] Kyosuke HIBATA[†] and Takafumi OGAWA[†]

[†] Institute of Science and Engineering, Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa-shi, Ishikawa, 920-1192 Japan

E-mail: [†] kuwamura@ec.t.kanazawa-u.ac.jp

Abstract We have proposed a plasmonic optical phased array in which plasmonic phase modulators using electro-optic polymers are arranged in an array. We report on numerical calculation that this device can scan the output light within the range of 90 degrees or more by voltage control at the wavelength of $1.55\ \mu\text{m}$. If an electro-optic polymer with a Pockels coefficient $200\text{pm} / \text{V}$ is used, the voltage applied to each phase modulation is $|14|\text{V}$ or less, and a small device can be constituted by a phase modulator array having a length shorter than $40\ \mu\text{m}$.

Keywords Optical phased array, Optical beam scanning device, Phase modulator, Plasmonics, Electro-optic polymer

1. はじめに

光フェーズドアレー (Optical Phased Array : 以下 OPA) は、電氣的に光ビームの出射方向を高速に走査する光偏向デバイスであり、レーザレーダ、レーザ計測、空間光通信、光電力供給、立体ディスプレイ、最新医療用装置など多岐にわたる分野で応用でき、革新的な光システム・装置を実現するための基本的な光素子の一つである。これまでの光偏向器の駆動方式は、機械的な可動ミラー方式などが主に利用されてきたが、近年、新しい電子制御方式の光走査素子の研究[1]-[8]が国内外で盛んである。シリコン微細加工技術に基づく高密度光導波路を用いた OPA の研究も進展し、広角度の光偏向が実証された。しかしながら、シリコン OPA の多くは、ヒータ加熱によるシリコンの屈折率変化によって位相制御を行うため、低速で消費電力が高く、かつ光集積回路内での熱干渉にともなう温度制御が複雑になるという課題がある。一方、電気光学ポリマー (Electro-Optic polymer : EOP) は、加工性に優れ、電圧印加で屈折率を大きく変えることができる材料が開

発されつつある。屈折率変化の起源が有機分子内の π 電子の電子分極による応答であることから超高速の電気光学応答が期待できるため、EOP を用いた光変調器 [9] や OPA [10] の開発も盛んに行われている。

プラズモニクスの分野では、EOP を用いた金属/EOP/金属構造のスロット型プラズモニック光位相変調器 (Plasmonic Phase Modulator : 以下 PPM) の開発が進展 [11]-[14] し、 110GHz 以上の高速変調、 25fJ/b の低消費電力、 $40\text{V} \cdot \mu\text{m}$ の $V_{\pi} \cdot L$ 積 (π 位相を変えるのに必要な電圧 V_{π} $\times$ 位相変調器長 L) の他の動作原理では成しえなかった高速・低電力・小型の素子特性が実現されている。このような特性向上は、光の回折限界を超えて狭いスロット領域へ光を集束できる表面プラズモン独自の特徴と大きなポッケルス係数 r_{33} を有する EOP の実現との相乗効果による。

本報告では、我々が提案している EOP を利用した PPM を並べて構成したプラズモニック光フェーズドアレー (Plasmonic Optical Phased Array : 以下 POPA) の性能特性を数値解析した結果を報告する。

2. 光フェーズドアレーの構造と動作原理

2.1. 素子構造と動作

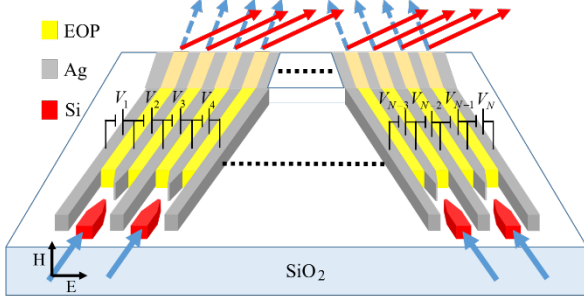


図 1. 提案している光フェーズドアレーの構造

図 1 に提案している POPA の構造を示す．素子の基本構成は，Si 細線導波路，光分岐導波路 (Y 分岐，MMI またはスターカップラ)，POPA から成る．POPA は N 本の PPM アレーで構成されており，それぞれ個別に設けられた電極により出力端での光の位相を電圧制御できる．Si 細線導波路に TE 偏光で入射した光は，光分岐導波路によって複数本の POAP の導波路に分配され，それぞれの導波路内で光位相を制御された後，出力端から回折現象に基づく光ビームパターンを出力することができる．図 1 中の銀／電気光学ポリマー／銀構造で構成された領域が，PPM である．PPM の銀電極間に電圧を印加して EO ポリマーの屈折率を変えることで導波路の等価屈折率を可変でき，出力端での光位相を制御できる．光の等位相面は周期的に繰り返すため，光位相を $-\pi \sim +\pi$ の範囲で制御できる PPM を N 本並べた POPA では，出力端での光の等位相面の形状を自在に操ることができる．のこぎり波形状として，光の等位相面を一直線上に斜めに傾けると，出力光の方向を中心角 θ だけ左右に曲げることができる．

2.2. 出力光特性

波長 λ の光を OPA に同位相で入力したとき，出力される光の偏向角 θ を 2 次元のキルヒホッフ回折公式を用いて近似計算する．図 2 は解析モデルであり，図 1 の出力端近傍を上から見た図である． N 本のアレー位相変調器を黄色で示しており，出力端が $z=0$ の位置にある．出力端でのフィールド分布を周期間隔 Λ で並んだ開口幅 d の N 個の開口スリットで近似する．出力端での磁界の複素振幅分布 $U_1(x_1)$ が， $z=\ell$ だけ離れたスクリーン上に作る複素振幅分布 $U_2(x_2, \ell)$ を求める．

$r = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + \ell^2}$ とおくと， $U_2(x_2, \ell)$ は，

$$U_2(x_2, \ell) \propto \sum_{i=1}^N \int_{(i-\frac{N+1}{2})\frac{\Lambda}{2}}^{(i-\frac{N+1}{2})\frac{\Lambda}{2}+\frac{d}{2}} U_1(x_1) \frac{\exp(-j(2\pi/\lambda)r)}{\sqrt{r}} dx_1 \quad (1)$$

のように複素振幅 $U_1(x_1)$ を波源とする円筒波の足し合わせとなる．ここで，複数の位相変調器内を進行する

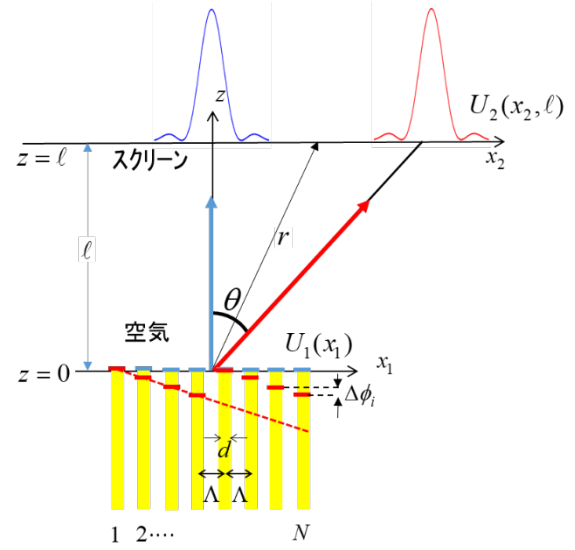


図 2. 光回折の解析モデル

光の等位相面が等間隔になるように電圧制御して，出力端での隣接する変調器間の位相差を一定値 $\Delta\phi$ に調整する． $z=0$ での複素振幅を $U_1(x_1) \propto \exp(-j\Delta\phi x_1 / \Lambda)$ と明記して，傾き $\Delta\phi / \Lambda$ の直線形状の等位相面で近似する． N 個の周期的開口スリットからの回折により，スクリーン上での光強度分布は

$$|U_2(x_2, \ell)|^2 \propto \left(\frac{\sin(N\Lambda X/2)}{\sin(\Lambda X/2)} \right)^2 \left| \text{Sinc}\left(\frac{dX}{2}\right) \right|^2 \quad (2)$$

$$X \equiv \frac{2\pi}{\lambda} \frac{x_2}{\sqrt{\ell^2 + x_2^2}} - \frac{\Delta\phi}{\Lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} \sin\theta - \frac{\Delta\phi}{\Lambda}$$

と求まる．スクリーン上で最大光強度となる条件は， $X=0$ であるため，最大光強度となる光偏向角 θ は，

$$\theta \approx \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{2\pi} \frac{\Delta\phi}{\Lambda}\right) \quad (3)$$

で近似できる．式(2)と式(3)から OPA からの回折パターンは以下のような特徴をもっていることがわかる．

光偏向角 θ を大きくするには， $\Delta\phi / \Lambda$ 値を大きくして光の等位相面の傾きを大きくすればよい．したがって， $\Delta\phi$ を電圧制御して広い範囲で偏向角を実現するには周期間隔 Λ を小さな値に設計できるアレー導波路構造を利用するのが有利である．

出力光強度分布の広がり幅 Δx_2 は式(2)右辺分数の分子項で決まる．広がり幅を $\sin(N\Lambda X/2)=0$ の条件 $-\pi \leq N\Lambda X/2 \leq \pi$ で見積もると， $\Delta x_2 = 2\lambda\ell / (N\Lambda)$ となる．広がり角 $\Delta\theta$ に書き直すと， $\Delta\theta$ は，

$$\Delta\theta = \frac{2\lambda}{N\Lambda} \quad (4)$$

で評価できる．したがって出力光の広がり角 $\Delta\theta$ を狭くするには，アレー全幅 $N\Lambda$ を大きくすればよい．

一般の OPA では，異なる方向に複数本の出力光が射出されるため，メインピークの光強度が弱くなってし

まう．出力される光ピークの数，式(2)右辺分数の分母項が $\sin(\lambda X/2)=0$ となる X の数で決まる．出力光ピークを 1 本に限定するには， $|\lambda X/2| < \pi$ の条件

$$\lambda < \frac{\lambda}{\sin \theta} \left(1 - \left| \frac{\Delta \phi}{2\pi} \right| \right) \quad (5)$$

とすればよい．

本研究では銀または金による光損失の少ない波長 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 帯での POPA を提案している．採用している PPM では，50nm~200nm 程度の狭い銀電極の間隙内に光を集中させて閉じ込めているため，隣接する PPM の周期間隔幅 λ を $\lambda < \lambda/2$ の条件に設計することができる． λ を狭い値に設計すると，光の等位相面を大きく傾けることができ，光偏向角 θ の可変範囲を広い素子設計が可能となる．さらに $\lambda < \lambda/2$ は，式(5)の条件を満たすため，POPA からの出力光のピークは 1 本となる．以上のように提案しているプラズモニック光フェーズドアレーでは，90 度以上の広い範囲で出力光ビームの方向を電圧で走査でき，かつ出力光を 1 本に限定できる素子設計が容易である特徴を有する．

3. プラズモニック位相変調器の設計と特性

図 3 には設計を行ったプラズモニック光位相変調器の素子構造を示した．PPM は， SiO_2 基板上に厚さ h の Ag-EOP (幅： d_{EOP}) -Ag 構造のプラズモニック導波路で構成されている．光は，図 1 に示したように Si 細線導波路中を x 方向に電界の主成分成分を有する TE 偏波モードを利用して PPM 導波路に結合させる．このため，EOP 領域に光が強く集中して，かつ Ag/EOP/Ag 界面の 2 つの Ag 表面に電荷分布が非対称に分布した表面プラズモンモード (Surface Plasmon Polariton：以下 SPP) が PPM 導波路中に励起され伝搬する．このモードは gap SPP モードと呼ばれる．ここでは図 3 に示した 1 本の位相変調器の設計を行う．Ag 電極間に電圧 V_D を印加すると，EOP の屈折率 n_{EOP} が Δn_{EOP} だけ変化する．そこで gap SPP モードの等価屈折率 N_{eff} を印加電圧 V_D の関数として $N_{\text{eff}}(V_D)$ で表す．すると，電圧印加の有無による導波路長 L の出力端での gap SPP モードの光位相の変化量 $\Delta \phi(V_D)$ は，

$$\Delta \phi(V_D) = \frac{2\pi}{\lambda} \text{Re} [N_{\text{eff}}(V_D) - N_{\text{eff}}(0)] L \quad (6)$$

となる．また，出力端での光吸収損失 $\alpha_{\text{loss}} [\text{dB}]$ は，

$$\alpha_{\text{Loss}} = 4.34 \times (4\pi/\lambda) \text{Im} [N_{\text{eff}}(0)] L \quad (7)$$

で評価できる．EOP 内に直流電界 V_D/d_{EOP} を印加したときの屈折率変化 Δn_{EOP} は，

$$\Delta n_{\text{EOP}} = -\frac{1}{2} \frac{V_D}{d_{\text{EOP}}} r_{33} n_{\text{EOP}}^3 \quad (8)$$

で与えられる．ここで r_{33} はポッケルス係数である．近年， r_{33} 値が 100~300 pm/V を超える EOP 材料が開発

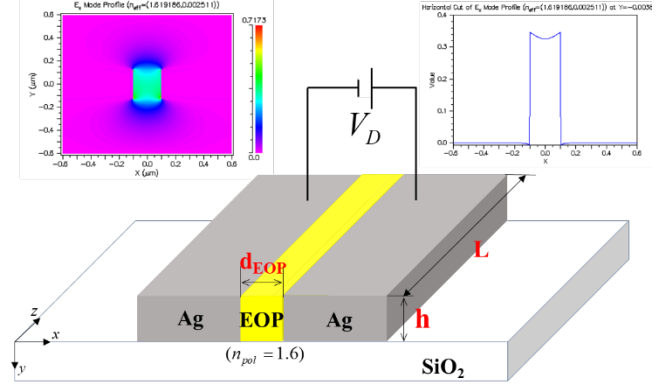


図 3. プラズモニック光位相変調器の素子構造

されている [9]．また， r_{33} には波長依存性があり， $d_{\text{EOP}} = 200 \text{ nm}$ 幅の PPM では波長 1.25~1.6 μm において r_{33} 値は 325~200 pm/V が実測されている [14]．

波長 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ における gap SPP モードの等価屈折率 $N_{\text{eff}}(V_D)$ は有限要素法により数値計算した．波長 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ の Ag, EOP, SiO_2 , Si の屈折率は，それぞれ 0.14447-j11.366, 1.6, 1.444, 3.48 を用いた．図 3 には $d_{\text{EOP}} = 200 \text{ nm}$ ， $h = 300 \text{ nm}$ 寸法における gap SPP モードの x 成分の電界分布を挿入図として示した．電界の大部分が EOP 領域に集中して閉じ込められていることが確認できる．PPM に $V_D = 10 \text{ V}$ の電圧を加えたときの導波路長 1 μm 当たりの位相変化量 $\Delta \phi(10)/L$ と吸収

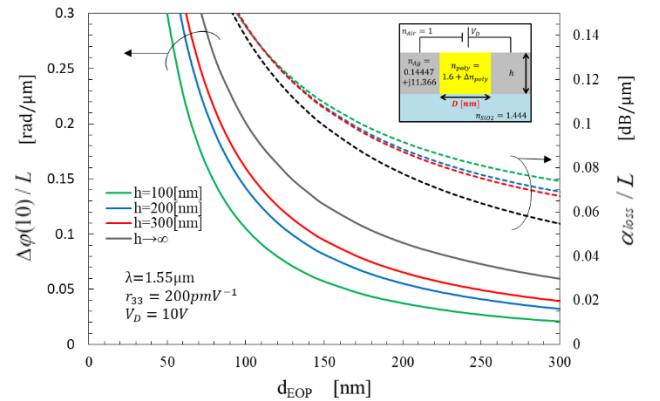


図 4. $\Delta \phi(10)/L$ と α_{Loss}/L の d_{EOP} 依存性

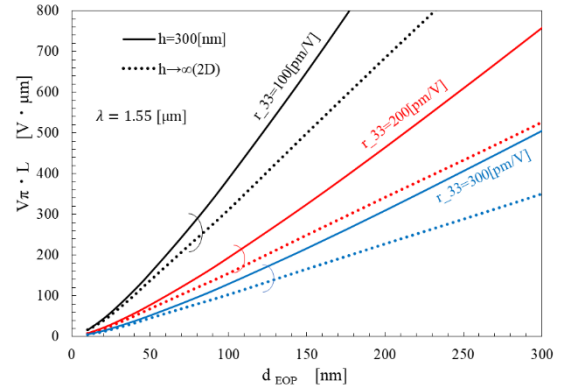


図 5. $V_{\pi} \cdot L$ の d_{EOP} 依存性

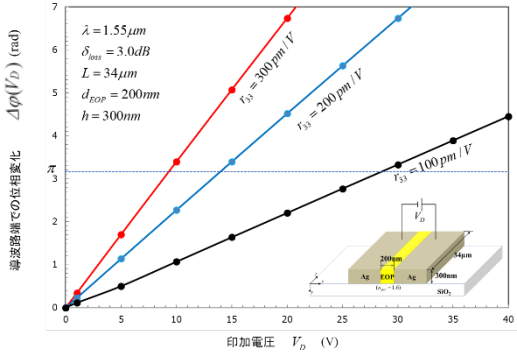


図 6. $L = 34\mu\text{m}$, $\alpha_{\text{loss}} = 3\text{dB}$ 素子の $\Delta\phi(V_D)$ 特性

損失 α_{loss}/L について EOP 幅 d_{EOP} を変えて評価した結果を図 4 中の実線および破線でそれぞれ示した. $r_{33} = 200\text{ pm/V}$ を仮定し, 厚さ h をパラメータとして示した. $\Delta\phi(10)/L$ は EOP 幅 d_{EOP} を狭くするとともに増加する. これは d_{EOP} の減少とともに EOP 内に印加される電界強度が強くなることと, gap SPP の群速度が遅くなり光と物質との相互作用時間が長くなるのが主な原因である. 厚さ h を厚くしても $\Delta\phi(10)/L$ 値は幾分増加した. $h = 300\text{ nm}$, $d_{\text{EOP}} = 200\text{ nm}$ での $\Delta\phi(10)/L$ 値は $0.0655\text{ rad}/\mu\text{m}$, EOP 幅を狭くした $h = 300\text{ nm}$, $d_{\text{EOP}} = 100\text{ nm}$ での $\Delta\phi(10)/L$ 値は $0.1597\text{ rad}/\mu\text{m}$ であり, 2.4 倍増加した. 一方, 吸収損失 α_{loss}/L は EOP 幅 d_{EOP} の減少とともに増加した. $d_{\text{EOP}} = 100\text{ nm}$ での吸収損失 α_{loss}/L の値は $0.145\text{ dB}/\mu\text{m}$ であり, $d_{\text{EOP}} = 200\text{ nm}$ での吸収損失 α_{loss}/L は $0.087\text{ dB}/\mu\text{m}$ であった.

出力端で光位相を $\pi\text{ rad}$ 変化させるために必要な半波長電圧 V_π は, 位相変調器における重要なパラメータである. V_π を用いた $V_\pi \cdot L$ 積の値は素子の性能を評価する指針として利用される. $V_\pi \cdot L$ 積値が小さい素子ほど, 小型 (短い L) で低い電圧 V_π で駆動できるため消費電力が小さくかつ高速動作 (CR 時定数が短くなる) にもつながるため良いと評価される. 図 5 には $V_\pi \cdot L$ 積の EOP 幅 d_{EOP} 依存性を示した. r_{33} と h をパラメータとした. $V_\pi \cdot L$ 積の値は EOP 幅 d_{EOP} が狭いほど小さくなり, $r_{33} = 200\text{ pm/V}$, $h = 300\text{ nm}$ の条件下で $d_{\text{EOP}} = 200\text{ nm}$ および 100 nm での $V_\pi \cdot L$ 積の値はそれぞれ $480, 197\text{ V} \cdot \mu\text{m}$ であった. 一方, EOP 幅 d_{EOP} の減少とともに吸収損失が大きくなるため, 設計においては $V_\pi \cdot L$ 積と α_{loss} のバランスを考慮して EOP 幅 d_{EOP} を選定する必要がある. 出力光強度も必要なため, ここでは素子の吸収損失 α_{loss} が 3 dB になるように導波路長 L を選んだ. EOP 幅 d_{EOP} が 200 nm 素子に電圧 V_D を加えたときの位相変化量 $\Delta\phi(V_D)$ を図 6 中に示した. 厚さ h は 300 nm とし, 導波路長は $L = 34.4\mu\text{m}$ である. r_{33} をパラメータとした. $r_{33} = 200\text{ pm/V}$ の PPM では, 半波長電圧 $|V_\pi| = 14\text{ V}$ より低い電圧印加で出力端での光位相を $-\pi$ から $+\pi\text{ rad}$ まで自在に制御できることが確認できた.

4. 光フェーズドアレーの特性解析

4.1. アレー導波路のレイアウト

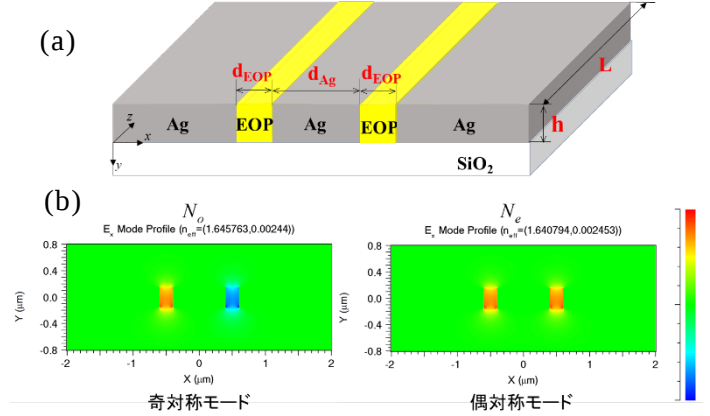


図 7. (a) 隣接した PPM 構造と (b) 奇・偶対称モード

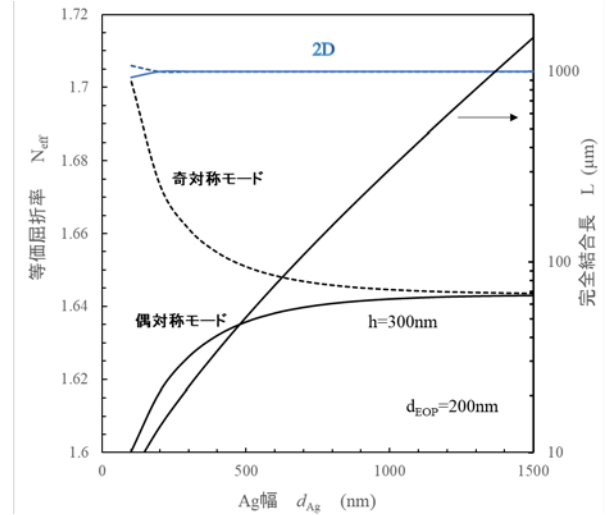


図 8. 奇・偶対称モードの N_{eff} の d_{Ag} 幅依存性

アレー導波路を構成したとき, 隣接する PPM の Ag 間隔幅 d_{Ag} を十分離しておけば, 直交したモード $\psi_1, \psi_2, \dots$ として各導波路中の光位相を独自に制御できる. 一方, Ag 間隔幅 d_{Ag} を近づけすぎると, 結合した導波路系となってしまう. 図 7(a) に示すような 2 本の PPM1 と PPM2 を隣接した構造では, 互いに直交する 2 つの固有モード ψ_o, ψ_e として, 図 7(b) のような奇および偶対称モードが存在し, それぞれの異なる等価屈折率 N_o と N_e の伝搬定数で伝搬できるようになる. 2 つのモード ψ_o と ψ_e が混在するとき, それぞれの伝搬定数が異なるので, 進行するにつれ伝搬定数差によるうなりが生じ, PPM1 と 2 の間で光電力の授受が生じうる場合がある. 光電力が PPM 1 から 2 へ 100% 移行するのに必要な導波路長は完全結合長 L_c と呼ばれ,

$$L_c = \frac{0.5\lambda}{(N_o - N_e)} \quad (9)$$

で与えられる. 図 8 には Ag 間隔幅 d_{Ag} に対する等価屈

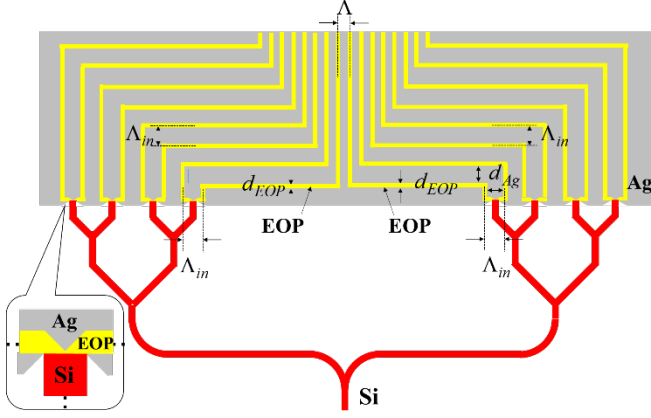


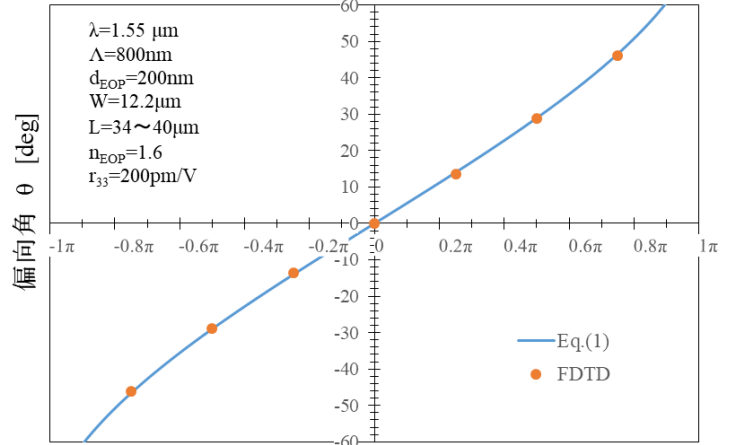
図9. 計算に採用した POPA の素子構造図

折率 N_o と N_e の変化および対応する条件での完全結合長 L_c をそれぞれ示した。波長 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ で、2本のEOP幅が共に $d_{EOP} = 200 \text{ nm}$ 、 $h = 300 \text{ nm}$ の例である。 $N_o \approx N_e$ となる最小Ag間隔幅を $D_{\min}$ と定義すると、上記の条件では $D_{\min} = 1400 \text{ nm}$ であり $d_{Ag} \geq D_{\min}$ 以上に離しておけば、独立した導波路として扱うことができる。

図9は今回の数値計算に採用したフェーズドアレーのレイアウトである。EPO幅 $d_{EOP} = 200 \text{ nm}$ のPPMを16本並べてPOPを構成した。Si細線導波路のY分岐等を用いてPOPへ光を入力するが、入力側のPPMアレーの周期間隔を $\Lambda_{in} = 1600 \text{ nm}$ として、 $\Lambda_{in} = D_{\min} + d_{Ag}$ に設定した。一方、光出力側のPPMアレーの周期間隔 Λ は $\Lambda = 800 \text{ nm}$ とした。 i 番目のPPMの導波路長を $L_{(i)}$ と明記すると、 $L_{(1)} = 34 \mu\text{m} \sim L_{(8)} = 40 \mu\text{m}$ である。図9の中央の8番目と9番目のPPMが $\Lambda = 800 \text{ nm}$ で近接する長さは $11 \mu\text{m}$ 、この条件での完全結合長は $L_c = 76 \mu\text{m}$ であり L_c に比べ十分短い長さに設定した。

4.2. FDTD シミュレーション

図9に示した16本の出力開口を有するPOPからの出力光特性を2次元の時間領域差分法（FDTD法）を用いて数値解析した。光波長は $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ である。PPM入力端にSi細線導波路から同位相の光を入力す



隣接する位相変調器端での光位相差 $\Delta\phi$ [rad]

図11. 出力光の偏向角 θ と $\Delta\phi$ の関係

ると、 i 番目の PPM に電圧 $V_{D(i)}$ を印加すると出力端での光位相変化 $\phi_i(V_{D(i)})$ は、

$$\phi_i(V_{D(i)}) = \frac{2\pi}{\lambda} \text{Re} \left[\left(N_{\text{eff}}(V_{D(i)}) - N_{\text{eff}}(0) \right) \right] L_{(i)} \quad (10)$$

となる。したがって i 番目と $i-1$ 番目の位相差 $\Delta\phi$ は、

$$\Delta\phi = \phi_i(V_{D(i)}) - \phi_{i-1}(V_{D(i-1)}) \quad (11)$$

となる。計算では隣接する出力開口端での位相差 $\Delta\phi$ はすべて一定値 $\Delta\phi$ とし、かつ図2中の実線の等位相面のようにのこぎり刃形状になるように調整した。 $r_{33} = 200 \text{ pm/V}$ のEOPを用いた場合、各PPMに加える電圧の範囲は、

$$-14 \text{ V} < V_{D(i)} < +14 \text{ V}$$

の間にある。図10には、 $\Delta\phi = 0, 0.5\pi, 0.75\pi$ の条件で計算した磁界 H_y 成分の放射パターン分布をそれぞれ示した。 $z = 12 \mu\text{m}$ の位置にPOPの出力端がある。光放射パターンから見積もった偏向角度は、それぞれ0度、28.9度、46度であった。また、1本のメインピークだけが、空気側に光放射されていることが確認できた。

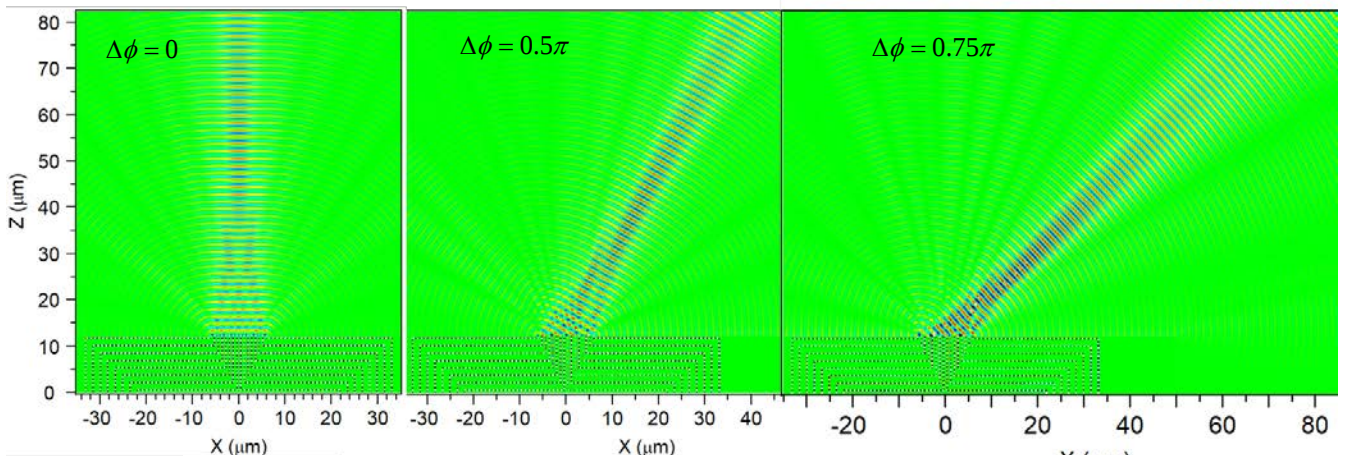


図10. 2D-FDTD法で計算した磁界 H_y 成分の放射フィールドパターン分布

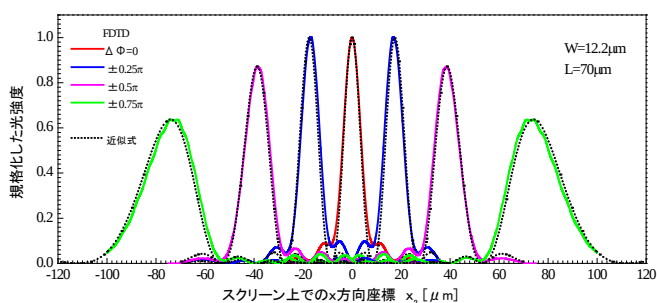


図 12. スクリーン上での光強度分布パターン

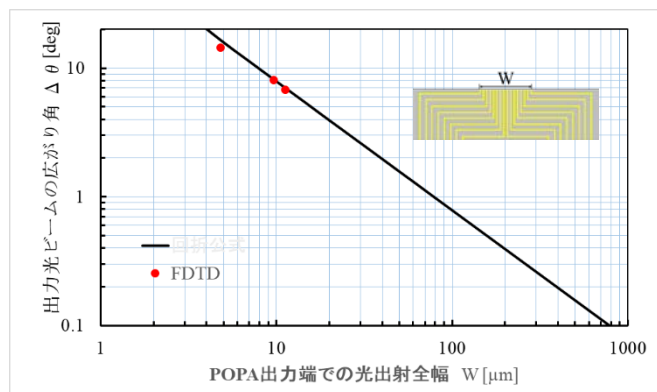


図 13. 光ビームの広がり角と光出口全幅の関係

図 11 は、 $\Delta\phi$ を 0 から 0.9π [rad]まで変化させて光偏向角をプロットしたグラフである。図中の実線は式(3)を利用した結果、丸印は FDTD 計算を示しているが、両者の結果はほぼ一致した。光偏向角は $\Delta\phi$ に対して単調増加し、 $\Delta\phi$ を -0.75π [rad]から $+0.75\pi$ [rad]まで変化させると偏向角は 90 度以上の範囲で出力光を走査できることを確認できた。

図 9 の 16 本の PPM に入力した全光電力の約 28% が出力光電力として空気側に出力されていたので、光損失は約 5.5dB 程度であった。その内、出力端での反射損は約 3.2dB であった。ただし、Si 細線導波路部等での損失は考慮していない。端面に無反射コート膜を形成すれば反射損は低減することができる。

一方、出力光ビームの広がり角は光計測における解像度を決める主要因である。図 12 には、図 2 に示した出力端から $l=70\mu\text{m}$ 離れたスクリーン上での光強度分布を示した。図中の実線は FDTD 法、点線は式(2)より計算した分布であり、両者はほぼ一致した。図 13 は、光出力端から十分離れた位置での光強度分布の半値全幅より求めた広がり角の光出射全幅 W 依存性である。実線が近似式、丸印は FDTD 計算結果である。図 9 のレイアウトの $W=12.2\mu\text{m}$ では、広がり角は約 6.6 度と幾分広い値となっていた。アレーの本数 N を増やして W 幅を広げれば広がり角を狭く設計することができる。

文 献

- [1] Jie Sun, Erman Timurdogan, Ami Yaacob, Ehsan Shah Hosseini and Michael R. Watts, "Large-Scale nanophotonic phased array", Nature, 493, pp.195-199, 10, January 2013.
- [2] A. Forouzmand and H. Mosallael, "Tunable two dimensional optical beam steering with reconfigurable indium tin oxide plasmonic reflectarray metasurface," J. Opt. 18, 125003, 2016.
- [3] J. C. Hulme, J. K. Doyle, M. J. R. Heck, J. D. Peters, M. I. Davenport, J. T. Bovington, L. A. Coldren, and J. E. Bowers, "Fully integrated hybrid silicon two dimensional beam scanner," Opt. Express, vol. 23, no. 5, pp.5861-5874, 2015.
- [4] D. N. Hutchison, Jie Sun, J. K. Doyle, R. Kumar, J. Heck, W. Kim, C. T. Phare, A. Feshali, and H. Rong, "High-resolution aliasing-free optical beam steering," Optica. vol. 3, no.8, August, pp.887-890, 2016..
- [5] M. J. R. Heck, "Highly integrated optical phased arrays: photonic integrated circuits for optical beam shaping and beam steering," Nanophotonics, 6(1), pp.93-107, 2017
- [6] X. Gu, T. Shimada, A. Matsutani, and F. Koyama, "Miniature nonmechanical beam deflector based on bragg reflector waveguide with a number of resolution points larger than 1000," IEEE Photonic journal, vol.4, no.5, pp.1712-1719, 2012.
- [7] H. Abe, M. Takeuchi, G. Takeuchi, H. Ito, T. Yoyama, K. Kondo, Y. Furukado, and T. Baba, "Two-dimensional beam-steering device using a doubly periodic Si photonic-crystal waveguide," Optics Express, vol.26, no.8, pp.9389-9397, 2018.
- [8] Y. Kurosaka, S. Iwahashi, Y. Liang, K. Sakai, E. Miyai, W. Kunishi, D. Ohnishi and S. Noda, "On-chip beam-steering photonic-crystal lasers," Nature photonics, vol.4, pp.447-450, 2010.
- [9] 横山士吉, "EO ポリマーを用いた光変調デバイス," 電子情報通信学会誌, vol.101, no.8, pp.845-849, 2018.
- [10] 平野芳邦, 本山靖, 田中克, 町田賢司, 菊池宏, "電気光学ポリマーを用いた光フェーズドアレーの動作解析," NHK 技研 R&D/no.166, pp.46-52, nov., 2017.
- [11] A. Melikyan, L. Alloati, A. Muslija, D. Hillerkuss, P. C. Schindler, J. Li, R. Palmer, D. Korn, S. Muehlbrandt, D. Van Thourhout, B. Chen, R. Dinu, M. Sommer, C. Koos, M. Kohl, W. Freude, and J. Leuthold, "High-speed plasmonic phase modulators," Nat. Photonics 8(3), 229-233, 2014.
- [12] C. Haffner, W. Heni, Y. Fedoryshyn, J. Niegemann, A. Melikyan, D. L. Elder, B. Baeuerle, Y. Salamin, A. Josten, U. Koch, C. Hoessbacher, F. Ducry, L. Juchli, A. Emboras, D. Hillerkuss, M. Kohl, L. R. Dalton, C. Hafner, and J. Leuthold, "All-plasmonic Mach-Zehnder modulator enabling optical high-speed communication at the microscale," Nat. Photonics 9(8), 525-528, 2015.
- [13] C. Haffner, W. Heni, Y. Fedoryshyn, A. Josten, B. Baeuerle, C. Hoessbacher, Y. Salamin, U. Koch, N. Đorđević, P. Mousel, R. Bonjour, A. Emboras, D. Hillerkuss, P. Leuchtmann, D. L. Elder, L. R. Dalton, C. Hafner, and J. Leuthold, "Plasmonic Organic Hybrid Modulators: Scaling Highest Speed Photonics to the Microscale," Proc. IEEE 104(12), pp.2362-2379, 2016.
- [14] C. Haffner, W. Heni, D. L. Elder, Y. Fedoryshyn, N. Đorđević, D. Chelladurai, U. Koch, K. Portner, M. Burla, B. Robinson, L. R. Dalton, and J. Leuthold, "Harnessing nonlinearities near material absorption resonances for reducing losses in plasmonic modulators," Optica Materials Express, vol.7, no.7, pp.2168-211, 2017.