

令和 6 年 4 月 3 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04193

研究課題名(和文) E0ポリマー・プラズモニック光フェーズドアレー及び動的な光波面制御機能の構築

研究課題名(英文) Construction of E0 polymer plasmonic optical phased array and dynamic optical wavefront control function

研究代表者

桑村 有司 (Kuwamura, Yuji)

金沢大学・電子情報通信学系・准教授

研究者番号：10195612

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：我々は、電気光学ポリマーを用いたプラズモニック位相変調素子のアレーからなる新型プラズモニック光フェーズドアレーを提案して、1.55 $\mu\text{m}$ の波長で設計した。出力光は1本のみで、電圧制御により100度以上の広い範囲で偏向・走査可能である。小型、低電圧、高速、低消費電力の光フェーズドアレーを設計した。この素子は、電圧制御により光波面の形状を自由自在に操ることができる。集光レンズのように波面を円弧形状に調整すれば、焦点位置に光は集光でき、焦点位置も電圧で移動させることができる。光圧を利用して水中の微粒子を光の焦点位置にトラップして移動させることができる光ピンセット機能を有する光デバイスも設計した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電気信号で光ビームの出力方向を高速に走査できる光フェーズドアレー(OPA)は、自動運転支援システム、レーザ計測など多岐にわたる光技術分野で利用できる基本的な光デバイスである。本研究で設計したOPAは、出力光ビームを100°以上広い範囲で走査でき、小型、高速で、かつ消費電力が低い特徴があり、従来型OPAに比べ、高い性能があることが確認された。また、新たに設計した光ピンセット機能を有するOPAは、水などの液体中の微粒子や細胞などを自由に移動させることができるため、医療やバイオ関係の分野で活用できると予想される。

研究成果の概要(英文)：We have proposed and designed a new type of plasmonic optical phased array consisting of an array of electro-optic polymer-based plasmonic phase modulation elements. The proposed device has only one optical peak at a wavelength of 1.55 $\mu\text{m}$ , and the output light can be deflected and scanned over a range of more than 100 degrees by voltage control, which is confirmed by numerical calculations using the 2-D FDTD method. We were able to design a compact (70 $\times$ 26 $\mu\text{m}^2$ ), low-voltage (<10V), high-speed, low-power optical phased array. This device can freely manipulate the shape of the optical wavefront by controlling the voltage. By adjusting the wavefront to a circular arc shape, as in a condenser lens, light can be focused at a focal point, and the focal point can also be moved by voltage. We have designed a device with an optical tweezer function that can trap and move underwater particles at the focal point of the light using light pressure.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：光フェーズドアレー 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 光ピンセット

### 1. 研究開始当初の背景

光フェーズドアレイ (OPA) は、電氣的に光ビームの射出方向を高速に走査できる光偏向デバイスであり、ライダー、レーザ計測など多岐にわたる光技術分野で利用でき、最新光システム・装置を実現するための基本的なデバイスである。近年、自動運転支援システム用として Si フォトニクス光集積回路 (Si-OPA) や有機電気光学ポリマー材料 (有機 OPA) を利用した光 OPA 開発が盛んであるが、現有素子では偏向角動作範囲、動作速度、消費電力、安定した動作などの観点から、一部の性能特性が高いものの、一部の特性が低くなる OPA が多いのが現状である。Si-OPA では Si 細線導波路による光位相変調の原理としてヒータ加熱による Si 結晶の屈折率変化を利用しており、消費電力が数 W 程度と大きく、複数の熱源の干渉により動作が不安定で、動作速度が遅い。有機 OPA では、電界印加に伴う屈折率変化の起源が電子の電子分極であるため高速であるが、アレイ位相変調導波路の屈折率が 1.7 程度と小さいため、光閉じ込めに限界があり、偏向角動作範囲が 10 度程度と小さく、かつ出力される光ビームの数を 1 本に限定することが困難と予想される。本研究では、上記の OPA 特性に欠点がなく、バランスが取れた性能の新型プラズモニク光フェーズドアレイ (POPA) を提案して設計することを試みた。

### 2. 研究の目的

本研究では、図 1 に示すような電気光学ポリマー (EOP) を利用したプラズモニク位相変調器をアレイ状に並べた新型プラズモニク光フェーズドアレイ (POPA) を提案し、波長  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  で素子設計を行い、上記の OPA 特性などを評価することを第 1 の目的とした。図 1(a) のように POPA の基本構造は、同図(b)に示した Ag/EOP (幅 100nm) /Ag からなるプラズモニク位相変調器を周期  $d$  で N 本アレイ状に並べて構成する。光入力用導波路から入射した光は、黄色で示した N 本の EOP 導波路内を伝搬するが、Ag 電極間に電圧を加えない時、出力端での光波面は同位相に設定しているので、青色破線のように直線して射出する。一方、Ag 電極間に電圧を加えると EOP の屈折率が変化するため、出力端近傍での光の等位相面を図 1(a) 中の赤色で示したように一直線上に傾けることができ、出力光の方向を曲げることができる。隣接する位相変調器間の出力端での位相差を一定値  $\Delta\phi$  に設定すると、光出力角  $\theta$  は、出力端での等位相面の傾き  $\Delta\phi / d$  値が大きいほど、大きく曲げることができる。数十 nm のナノ空間に光の回折限界を超えて光を閉じ込めることが可能な Ag/EOP/Ag プラズモニク導波路では隣接する導波路の間隔  $d$  を小さな値に設計可能で、 $\Delta\phi$  値を大きくでき、偏向角動作範囲を広く設計できる。また、Ag/EOP/Ag 構造では、Ag を直接電極として使用でき、EOP 幅を狭くすると、低い電圧駆動で高電界を EOP に加えることが可能となる。一方、図 2 に示すように POPA では、電圧制御により、出力端での光の等位相面形状を自由に操ることができるため、図 2(A) の 1 次元方向の偏向走査に加え、図 2(B) 又は (C) のように焦点距離可変の集光レンズ機能を有する動的な出力光ビーム形状・走査機能素子なども実現できる。その 1 例として、出力した光ビームを凸レンズのように焦点位置に集光でき、その焦点位置を印加した電圧で 2 次元方向に自由自在に移動でき、操ることが可能な動的なレンズ機能 (光ビームレット機能 POPA) を有する POPA を提案し、設計を行った。

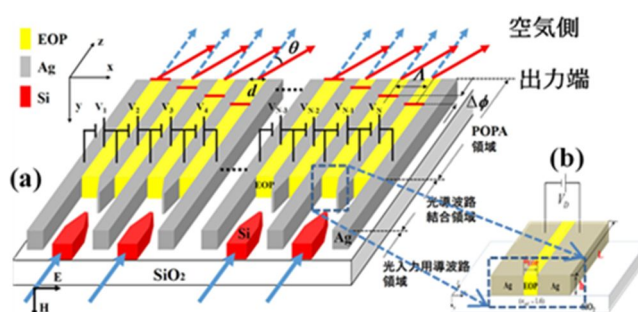


図 1 提案する光フェーズドアレイの基本構造

光入力用導波路から入射した光は、黄色で示した N 本の EOP 導波路内を伝搬するが、Ag 電極間に電圧を加えない時、出力端での光波面は同位相に設定しているので、青色破線のように直線して射出する。一方、Ag 電極間に電圧を加えると EOP の屈折率が変化するため、出力端近傍での光の等位相面を図 1(a) 中の赤色で示したように一直線上に傾けることができ、出力光の方向を曲げることができる。隣接する位相変調器間の出力端での位相差を一定値  $\Delta\phi$  に設定すると、光出力角  $\theta$  は、出力端での等位相面の傾き  $\Delta\phi / d$  値が大きいほど、大きく曲げることができる。数十 nm のナノ空間に光の回折限界を超えて光を閉じ込めることが可能な Ag/EOP/Ag プラズモニク導波路では隣接する導波路の間隔  $d$  を小さな値に設計可能で、 $\Delta\phi$  値を大きくでき、偏向角動作範囲を広く設計できる。また、Ag/EOP/Ag 構造では、Ag を直接電極として使用でき、EOP 幅を狭くすると、低い電圧駆動で高電界を EOP に加えることが可能となる。一方、図 2 に示すように POPA では、電圧制御により、出力端での光の等位相面形状を自由に操ることができるため、図 2(A) の 1 次元方向の偏向走査に加え、図 2(B) 又は (C) のように焦点距離可変の集光レンズ機能を有する動的な出力光ビーム形状・走査機能素子なども実現できる。その 1 例として、出力した光ビームを凸レンズのように焦点位置に集光でき、その焦点位置を印加した電圧で 2 次元方向に自由自在に移動でき、操ることが可能な動的なレンズ機能 (光ビームレット機能 POPA) を有する POPA を提案し、設計を行った。

図 2(A) の 1 次元方向の偏向走査に加え、図 2(B) 又は (C) のように焦点距離可変の集光レンズ機能を有する動的な出力光ビーム形状・走査機能素子なども実現できる。その 1 例として、出力した光ビームを凸レンズのように焦点位置に集光でき、その焦点位置を印加した電圧で 2 次元方向に自由自在に移動でき、操ることが可能な動的なレンズ機能 (光ビームレット機能 POPA) を有する POPA を提案し、設計を行った。

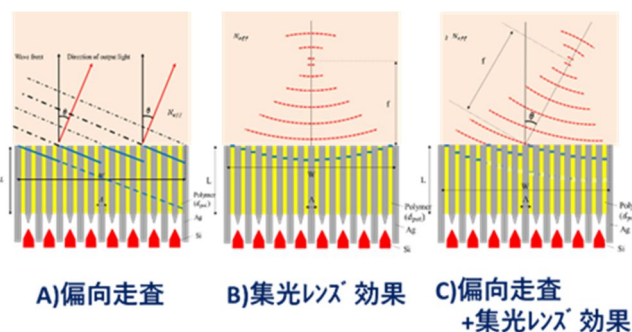


図 2 電圧印加による出力光波面形状の制御

### 3. 研究の方法

#### (1) プラズモニク光フェーズドアレイ: POPA

POPA 設計を行う事前準備として、図 1(b) に示した Ag/EOP/Ag で構成したプラズモニク位相変調器 (PPM) の特性を有限要素法で解析した。PPM 性能としては、 $-V \sim +V$  [V] の電圧を加えた時、出力端での光位相を  $2\pi$  [rad] だけ変化するように設計する必要がある。導波路の長さ  $L$  を長くした PPM では、位相変化幅を大きくできるが、PPM では Ag の光吸収損失が大きいため、 $L$  をあま

り長くできない．そこで，波長  $1.55\ \mu\text{m}$  での光吸収損が  $3\text{dB}$  以下になるように導波路長  $L$  を設計した．EOP 幅  $d_{\text{EOP}}=100\text{nm}$ ， $L=20\ \mu\text{m}$  のケースでは，半波長電圧  $V_{\pi}=9.5\text{[V]}$  (ポッケルス係数  $r_{33}=200\text{[pm/V]}$ ) であった．設計した PPM の動作速度は  $2.7\text{THz}$  である．一方，PPM でアレー導波路を構成したとき，隣接する PPM 導波路の周期間隔  $\Lambda$  を十分離しておけば，直交した伝搬モードとして各導波路中の光位相を独自に制御できるが，間隔  $\Lambda$  を近づけると結合した導波路系となってしまう．この光学的なクロストークを避けるには間隔

$700\sim 800\text{nm}$  程度 ( $d_{\text{EOP}}=100\text{nm}$ ) 離しておけば良いことを数値計算で検証した．

図 3 には 2 次元 FDTD 法を利用して POPA 素子設計を行った解析モデルを示した．POPA 領域の長さ  $L=20\ \mu\text{m}$ ，同領域中のアレー数  $N=32$  本，周期構造  $\Lambda=800\text{nm}$  とした．波長  $1.55\ \mu\text{m}$  の光は有機材料直線導波路から入射し，逆三角形形状の入力用導波路領域を通過して，POPA 領域内の 32 本のアレー-EOP 位相変調器内に光入力する構成とした．

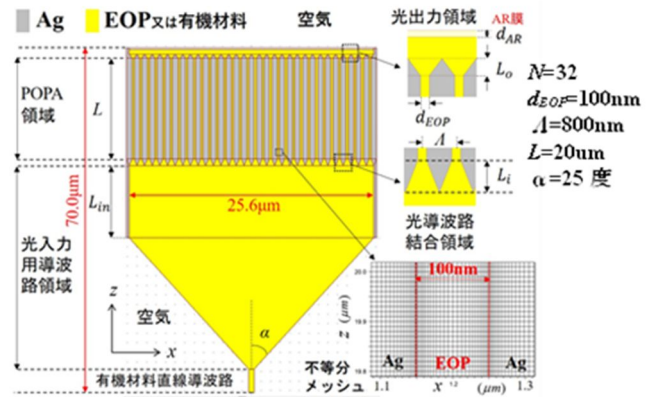


図 3 POPA 素子全体構造の 2 次元解析モデル

## (2) 光ピンセット機能 POPA

水などの中に含まれている水より屈折率の高い微粒子や分子に光を当てると，光のエネルギー密度の高い領域に粒子が引き込まれる力が働く．この現象を利用して液体中の粒子などを光圧で捕らえて， $xz$  平面内の希望する位置に微粒子を運ぶ光ピンセット機能を有する POPA を設計することを目指している．図 4 に光ピンセット機能 POPA の素子構造を示した．POPA から光放射される空間は空気ではなく，図 4(a)に示したように水などの液体をクラフト領域として含む水/高屈折率薄膜(厚さ  $100\text{nm}$ )/Ag 構造のスラブ導波路を想定している．図 4(a)中の赤色で示した曲線がスラブ導波路中を伝搬できる TM モードの電界分布  $E_y$  であり，水/高屈折率薄膜界面で電界が最も強く，界面から水領域にかけてエバネッセント波が  $1\ \mu\text{m}$  以上染み出している．図 2 B), C) に示した 2 次元面内では集光した焦点位置で光エネルギー密度は高く，図 4 中の 3 次元  $xyz$  空間では水/薄膜界面内における光焦点位置で最大密度となる．

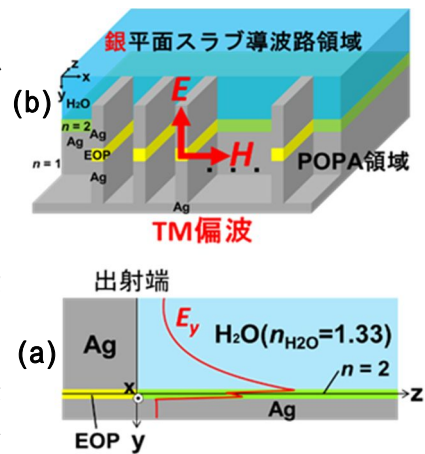


図 4 光ピンセット POPA 素子構造

粒子は焦点近傍に強い力で捕らえられているので，焦点位置を電圧制御で動かすと，粒子の位置を  $xz$  面内に沿って自由自在に移動させることができる．アレー-POPA 領域からの光を TM 偏波のスラブ導波路に結合させる必要があるため，光ピンセット POPA では上下 ( $y$  方向) 方向に Ag/EOP/Ag 構造で構成したの位相変調器を横 ( $x$  方向) 方向にアレー状に並べる必要がある．図 4 には POPA 領域に入力する光の偏向方向を赤色矢印で示した．図 4 に示した解析モデルを利用して 3 次元 FDTD 数値計算により，光ピンセット機能の妥当性について評価した．

## 4. 研究成果

### (1) プラズモニック光フェーズドアレー-POPA

図 5 は図 3 の解析モデルで POPA の偏向特性を計算した例で，有機材料直線導波路に光を入力した時の POPA 素子構造内部と出力側の空気領域での磁界  $y$  成分  $H_y$  の空間分布パターンを示した．図 5(d)中の  $Z=40\ \mu\text{m}$  の白線で示した位置が POPA 光出力端であり，黄色矢印が POPA 領域， $Z>40\ \mu\text{m}$  が空気領域である．図 5(a)は 32 本の EOP 導波路出力端での光の等位相面を一

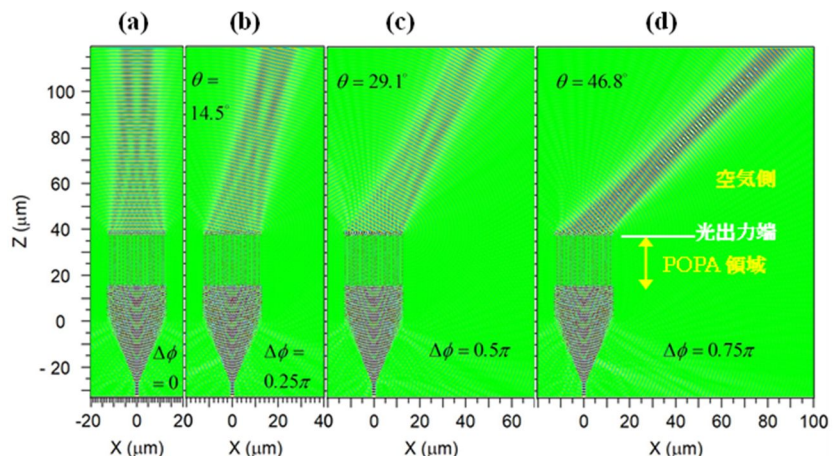


図 5 2D-FDTD 法により計算した磁界  $H_y$  フィールド分布

致するように電圧制御したケースで、空気領域をz軸に平行に直進している。また、図5(b)から(d)では、光出力端近傍での光等位相面の傾き  $\theta$  が一直線になるように電圧調整したケースで、(b), (c), (d)に従い  $\theta$  値をそれぞれ0.25, 0.5, 0.75 [rad]として傾きを順に大きくした。各条件での空気側への光放射角  $\theta_0$  は、それぞれ14.5°, 29.1°, 46.8°であった。また、1本のメインピークだけに光エネルギーが集中して空気側に放射されていることが確認された。図6には、 $\theta_0$  と偏向角  $\Delta\phi$  の関係を周期開口からの回折パターンでの近似式で計算した結果を青色線で示した。同図中の赤点は図5のFDTD計算による結果であり、両者はほぼ一致した。POPAの偏向角動作範囲は100°以上を広い角度範囲で偏向走査できることが実証された。なお、ポツケルス係数  $r_{33}=200\text{pm/V}$  のEOP材料を利用すれば、位相変調器に加える電圧は|9.5|V以下である。また、素子に入射した光電力の約40%以上は光出力しており、光損失は3~4dB程度である。一方、POPAから出力される光ビームの広がり角  $\Delta\theta$  は、光計測などでの解像度を定めるパラメータであり、光出力端での光開口の横幅  $W=N$  として  $\Delta\theta = 50.8 / W$  [度]の近似式で評価できる。図7には広がり角  $\Delta\theta$  と開口幅  $W$  の関係を黒線で示した。赤丸はFDTD計算から見積もった値であり、両者は一致した。アレー幅  $W=25.6\mu\text{m}$  のPOPAでは、約3度であったが、 $W$ 幅を広くすることで  $\Delta\theta$  値を更に狭く設計することができる。本研究課題で提案・設計したPOPA素子では、波長  $\lambda=1.55\mu\text{m}$  において、出力ピーク数は1本で、|9.5|V以下の制御電圧で、100度以上の広い範囲で偏向走査でき、小型(70×26  $\mu\text{m}^2$ )、高速かつ低消費電力の素子特性が期待でき、従来型のOPAに比べ高性能であることをシミュレーションにより確認できた。

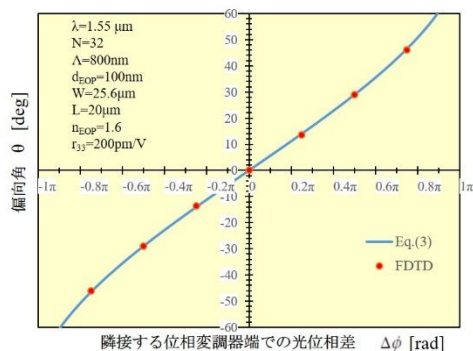


図6 光出力偏向角  $\theta_0$  の依存性

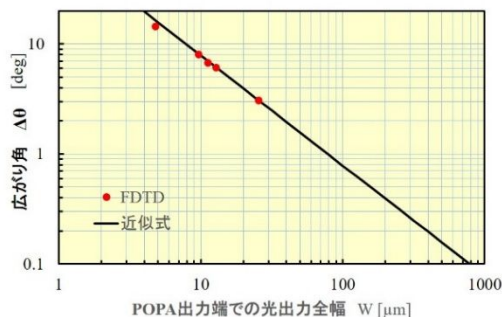


図7 出力光広がり角  $\Delta\theta$  のアレー幅  $W$  依存性

## (2) 光ピンセット機能 POPA

光ピンセット機能 POPA の偏向走査や集光レンズ機能については図4で示した素子構造の解析モデルを利用して3次元FDTD法で数値計算した。ここでは、波長1.55  $\mu\text{m}$  でのシミュレーション結果例を示し、各機能特性の妥当性について検討した。POPA領域のEOP寸法は縦100nm×横100nmスロット導波路を採用し、横方向に  $N=32$  本のPPMをアレー状に並べた。図4のようにPOPA出力端においてEOP領域とスラブ導波路の高屈折率薄膜(厚さ100nm)を突き合わせて接続した。図8及び図9には、POPAからのスラブ導波路への放射電界ファールド分布特性の計算結果例を示した。 $z=0$ 面に出力端があり、スラブ導波路領域内の電界分布のみを示している。(b)が水/薄膜界面内(xz面内)での電界  $E_y$  分布、(a)が  $z=15\mu\text{m}$  での電界パターンである。図8は出力端での光等位相面を出力面と一致するように制御した場合で、(b)から電界の等位相面はx軸に平行であり、光はz軸に沿って伝搬していることが確認できた。また、(c)からPOPAから入射した光電力のほぼ100%がスラブ導波路に結合しており、 $y=0\mu\text{m}$  近傍の導波路領域に沿って伝搬している様子が分かる。 $z=0$  近傍のPOPAから水領域接続部での光放射損失は確認できなかった。一方、図9は出力端でのアレーからの等位相面を一直線状に傾けたケースで、図9(b)より、xz面内で  $\theta=45$  度傾いた方向にスラブ導波路中に光が閉じ込められ伝搬しているようすが確認でき、偏向走査性の実証できた。

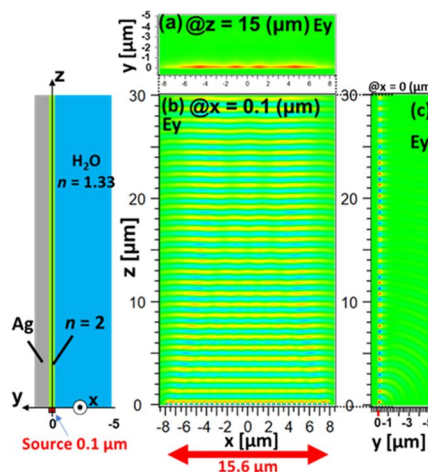


図8  $\theta_0 = 0^\circ$  の平行ビームで入射した時のスラブ導波路中の3次元電界分布

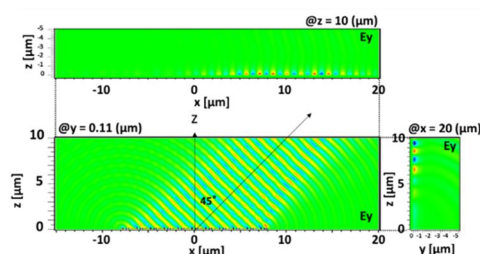


図9  $\theta_0 = 45^\circ$  の平行ビームで入射した時のスラブ導波路中の3次元電界分布

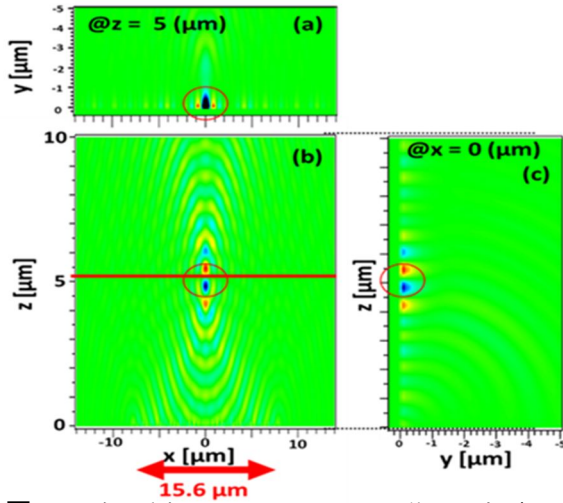


図 10 3次元座標( $x=0, y=0, z=5 \mu\text{m}$ )の位置に光が集光するように光等位相面形状を電圧制御した時のスラブ導波路中の3次元電界分布

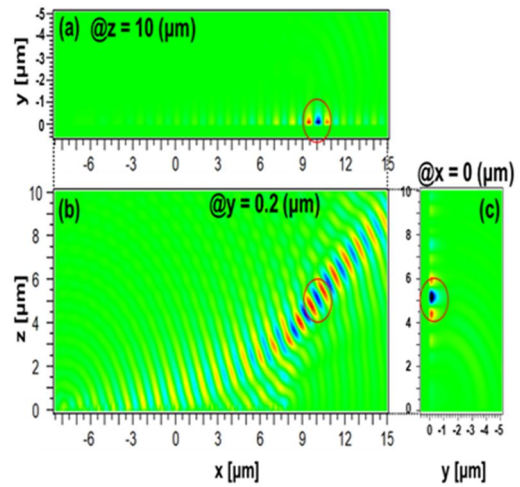


図 11 3次元座標( $x=10 \mu\text{m}, y=0, z=5 \mu\text{m}$ )の位置に光が集光するように光等位相面形状を電圧制御した時のスラブ導波路中の3次元電界分布

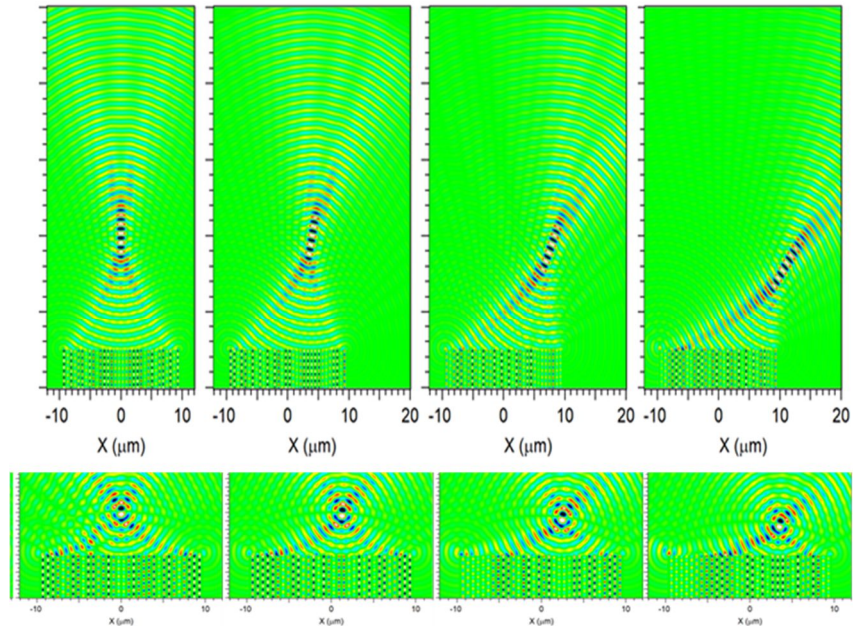


図 12 電圧制御して光焦点の座標位置を( $x=0 \sim 10 \mu\text{m}, y=0, z=5, 20 \mu\text{m}$ )に変化させた時のスラブ導波路中の電界分布パターン

次に POPA の集光レンズ機能を確認するため、出力端近傍での等位相面を図 2B) や C) 中の青色曲線の形状に制御したケースでのスラブ導波路領域空間内に出力される電界フィールド分布  $E_y$  のシミュレーション結果を図 10 及び図 11 に示した。POPA の出力端は  $z=0$  の面内にある。図 10 は、図 2B) の集光レンズ効果を想定し、3次元座標( $x=0, y=0, z=5 \mu\text{m}$ )の位置に光が集光するように等位相面を設定したケースでの電界分布の計算結果である。(b) からわかるようにスラブ導波路面内での等位相面は円弧形状となり、上記に設定した図 10 中の赤丸の焦点位置の点座標近傍に光が集光しているようすが確認された。集光された光強度の半値全幅は、 $0.5 \sim 0.6 \mu\text{m}$ であった。一方、図 11 は、図 2C) の偏向走査+集光レンズ効果を想定し、3次元座標( $x=10 \mu\text{m}, y=0, z=5 \mu\text{m}$ )の位置に光が集光するように等位相面の形状を設定したケースである。図 11(a), (b), (c) 中の赤丸で囲んだ座標が設定した焦点座標であり、光はその焦点座標に集光していることが確認できる。さらに図 12 は光焦点の座標位置を( $x=0 \sim 10 \mu\text{m}, y=0, z=5, 20 \mu\text{m}$ )で可変できるように光の等位相面形状を調整したケースである。等位相面形状を電圧印加で制御することにより、希望する座標位置に光焦点を自由自在に動かすことができる集光レンズ機能を有する光ピンセット POPA が設計できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 桑村 有司、日端 恭佑	4. 巻 J105-C
2. 論文標題 E0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提案	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌. C, エレクトロニクス	6. 最初と最後の頁 207 ~ 217
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transelej.2021JCP5005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 桑村有司	4. 巻 J104-C, No.10
2. 論文標題 銀回折格子上の表面プラズモンと電子ビームとの相互作用を利用した光放射の観測	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電子情報通信学会和文論文誌C分冊	6. 最初と最後の頁 pp.298-307
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 桑村有司	4. 巻 電子デバイス
2. 論文標題 〔招待講演〕真空中を進行する電子波動と銀回折格子上の表面プラズモンまたはシリコン光導波路との相互作用を利用した光放射	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告. ED, 電子デバイス (信学技報)	6. 最初と最後の頁 pp.1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Yuji Kuwamura and Hikaru Kumai
2. 発表標題 3D-FDTD Simulation of Voltage-Variable Focusing Lens Effect Using Plasmonic Optical Phased Array
3. 学会等名 EM-NANO 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 桑村有司
2. 発表標題 [招待講演] 真空中を進行する電子波動と銀回折格子上の表面プラズモンまたはシリコン光導波路との相互作用を利用した光放射
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告. ED, 電子デバイス (信学技報) (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuji Kuwamura, Kyosuke Hibata
2. 発表標題 Performance Estimation of EO-Polymer Plasmonic Optical Phased Array
3. 学会等名 CLEO Pacific Rim 2022 国際会議 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 示野義和, 河合勝太郎, 桑村有司, 丸山武男
2. 発表標題 ロックイン検出法を用いた光検出磁気測定系の高感度化
3. 学会等名 令和4年度(2022年) 応用物理学会 北陸・信越支部 学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 示野義和, 河合勝太郎, 桑村有司, 丸山武男
2. 発表標題 ロックイン検出法を用いた光検出磁気共鳴の高感度測定
3. 学会等名 2023年第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 河崎新一郎, 桑村有司
2. 発表標題 プラズモニック光フェーズドアレーの設計とその特性
3. 学会等名 2023年度電気・情報関係学会 北陸支部連合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉川裕起, 桑村有司
2. 発表標題 回折格子スラブ導波路を接続したプラズモニック光フェーズドアレーの設計
3. 学会等名 2023年度電気・情報関係学会 北陸支部連合大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関