

研究報告書

「有機電気光学材料による光メタ表面の機能化と高速変調素子への展開」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2016 年 10 月～2020 年 3 月

研究者: 種村 拓夫

1. 研究のねらい

本研究では、シリコンおよび金属からなるサブ波長格子に有機電気光学 (EO: electro-optic) ポリマーを埋め込むことで、電氣的に制御できるアクティブな「光メタ表面」を実証し、垂直入射型の高速な光強度／位相変調器に応用することを目的とした。これにより、既存の空間光変調器 (SLM: spatial light modulator) に比べて6桁以上高速な時間応答を持つ波面制御デバイスの実現を目指した。

「光メタ表面」とは、金属、半導体、誘電体等からなる波長以下の2次元構造体であり、近年のナノ加工技術の成熟に伴い、研究が活性化している。所望の微細パターンを基板上に形成することで、厚さ $1\mu\text{m}$ 以下の平面型薄膜レンズ、偏光フィルタ、広帯域反射鏡など、数多くのパッシブ光学素子が報告されている。その一方で、光メタ表面の特性を電気光学的に制御したアクティブ光学素子は実現が難しく、実用的な素子は実証されていないのが現状である。

一方、「有機 EO ポリマー」は、ガラス転移温度にて高電界を印加 (ポーリング) することで、色素分子が配向し、顕著なポッケルス効果が誘発される材料である。特に 2010 年以降、EO ポリマー材料の開発が国内外で加速しており、ニオブ酸リチウムなどの従来の EO 材料に比べて 1 桁近く大きな EO 効果が得られるようになった。100 GHz 以上の超高速光応答、圧倒的に低コストかつ簡易なプロセス、どのような基板上にも実装できる互換性といった利点から、光通信や光インターコネクトをはじめ、様々な分野への応用が期待され始めている。

以上の背景を踏まえ、本研究は、特異な反射／散乱現象を持つ光メタ表面に、近年急速に高性能化が進む有機 EO ポリマー材料を導入することで、GHz 以上の速度で動作する垂直入射型変調素子を初めて実現することを目指した。このような素子の実現すれば、時間と空間を有効に活用した、これまでにない光応用が可能になる。現在液晶型 SLM が用いられている光計測や光スイッチの高速化に直接寄与するだけでなく、光の空間モードをより積極的に利用した新しい光通信、光演算、光操作、光イメージング技術への展開が期待される。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、高い屈折率を持つシリコン、および、金属からなるサブ波長格子を基板上に形成し、有機 EO ポリマーによって埋め込んだ垂直入射型高速光変調素子を初めて実証することで、光通信や光イメージングなどの分野に応用することを目指した。具体的には、シリコンからなる高屈折率差サブ波長格子内の光共振効果を用いる手法と、金属サブ波長格子内のプラズモンニック効果を用いる手法の2種類について、新規素子の考案、設計、試作実証を行った。

まず、シリコン格子型変調素子の構造を図 1(a)に示す。シリコン格子間にEOポリマーを埋め込むことで、外部印加電界によって高屈折率差格子の共振波長がシフトする現象を用いる。シ

リコン格子を櫛歯電極としても兼用することで、周期反転ポーリングおよび屈折率変調が無駄なく得られ、高効率な変調が可能になる。素子構造の詳細設計、プロセス開発、試作実証を繰り返すことによって完成した強度変調素子の測定結果を図 1(b)に示す。設計通り、外部印加電界によって共振波長がシフトし、30 MHzにおいて20%以上の強度変調が得られることを実証した。さらに、格子周期を細かく調整することにより共振 Q 値を 1 桁以上改善できることを確認しており、さらなる高効率化が見込まれる。

一方、金属格子型変調素子については、詳細な数値解析による考察を経て、図 2(a)に示す新規構造を提案した。本研究提案時の構造と異なり、EO ポリマー層を上下の金属膜によって挟み込んだ構造を持つ。格子内に局在する2つのプラズモンモード間の相互作用を利用することで、プラズモニックメタ表面としては異例の Q 値が 100 以上の鋭い共振が得られることを発見した。実際に素子を作製し、評価した結果を図 2(b)に示す。EO ポリマーに外部電界を印加することで、反射スペクトルがシフトし、80%以上の強度変調が得られることを初めて確認した。さらに、電極パッドの寄生容量を低減することで、1GHz を超える変調帯域を初めて実証した。

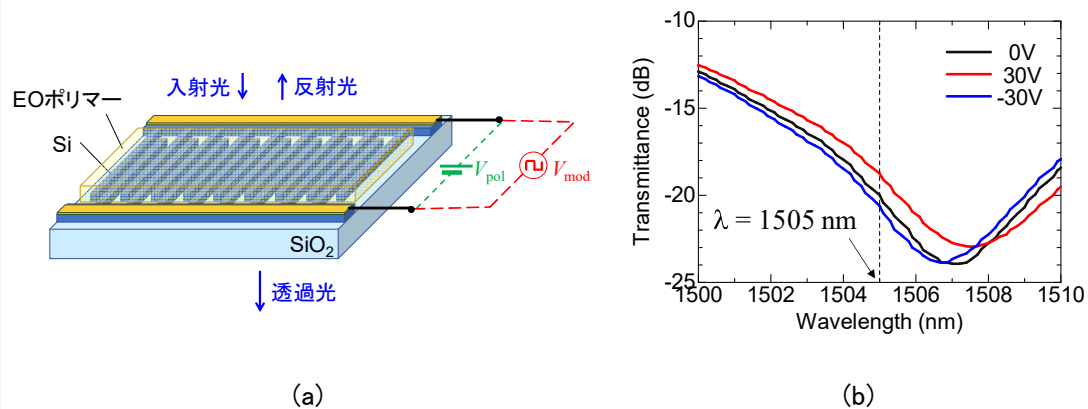


図 1: シリコン格子型素子の構造(a)と測定結果(b).

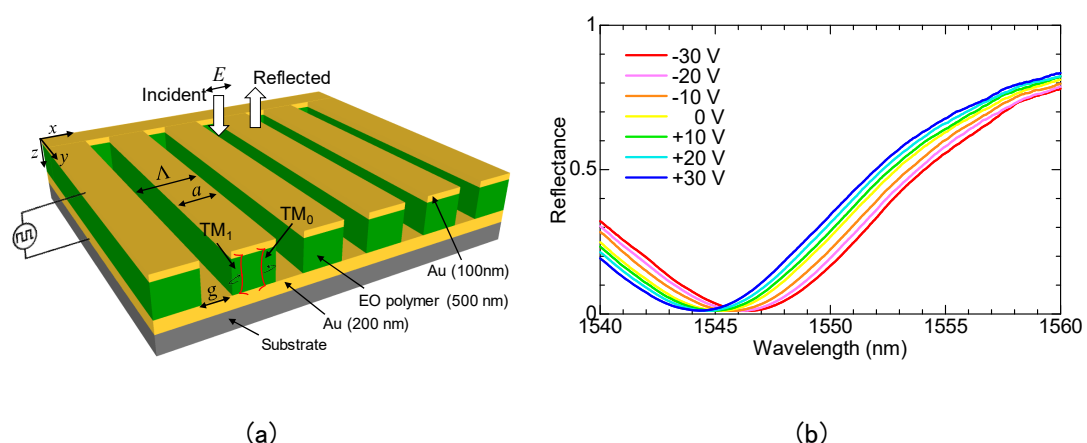


図 2: 金属格子型素子の構造(a)と測定結果(b).

(2) 詳細

本研究の目標を達成するために、下記の研究項目を並行して進めた。

研究テーマ A 「共通基盤技術の確立」

今回提案するシリコン格子型変調素子、および、金属格子型変調素子を開発する上で、共通する基盤技術を開発した。特に、EO ポリマーの扱いは、本研究で初めて直面する課題であり、一からノウハウを確立する必要があった。

まず、EO ポリマーの合成、塗布、アニールを行うためのプロセス装置を整備した。1 μ m 以下の狭い溝にポリマーを埋め込むプロセスの条件出しを行い、均一かつ精度よく埋め込む条件を見い出した。さらに、スピンコーティングの条件を細かく精査することで、EO ポリマー膜の厚みを精密に制御することに成功した。また、塗布後のポーリングに向けて、試料を 100℃ 以上に加熱しながら高電界を印加し、その後、冷却水を流して急冷する設備を新しく立ち上げた。これを用いることで、電気光学係数 r_{33} が約 30 pm/V のポッケルス効果が発現することを確認した。以上と並行して、シリコンおよび金属の微細ナノ加工を行うための基盤プロセスを開発した。

研究テーマ B 「シリコン格子型変調素子の開発」

まず、素子構造の設計改善を行い、格子に対して平行な電界成分を持つ直線偏波光を用いることで、当初設計(850nm 程度)に比べてシリコン層を 3 割以上薄く(550nm 程度)できることが分かった。高アスペクト比のシリコン格子の形成と、その内部への EO ポリマーの埋め込みは、素子の作製上、最大の難関であるため、シリコン層が薄膜化できることは大いなる意義を持つ。

本設計を基に、作製プロセスの最適化を繰り返すことで素子を完成させた。図 3(a)にシリコン格子形成後の走査電子線顕微鏡(SEM)像を示す。本素子に対して垂直に光を入射したところ、図 1(b)のように、Q 値が 60 程度の共振を確認した。図 3(b)には、30MHz において変調時の透過光強度の観測結果を示すが、20% 以上の変調が得られることを確認した。さらに、格子周期の最適化を進めることで、Q 値が 700 近くまで向上することを確認しており、さらなる高効率化に向けて素子の作製を進めている。

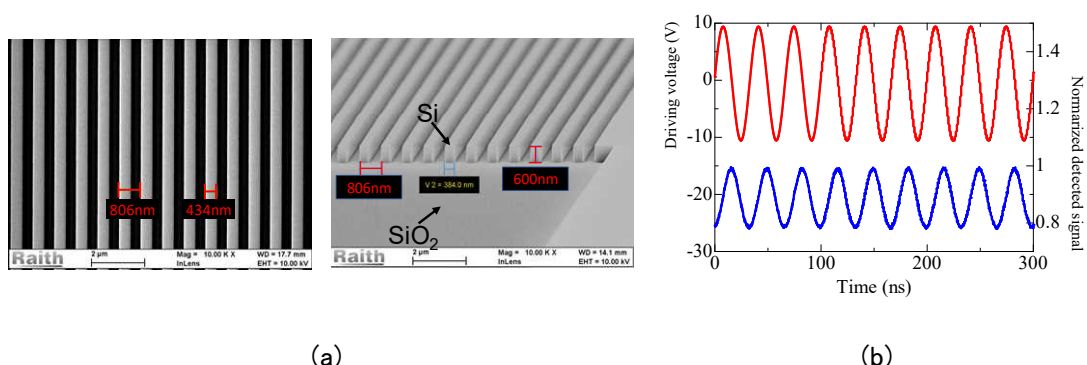


図 3: (a) 試作したシリコン格子型素子の SEM 像。(b) 30MHz 変調時の透過光測定結果。

研究テーマ C 「金属格子型変調素子の開発」

まず、有限差分時間領域(FDTD)法による数値シミュレーションのよる詳細な解析を行った。その結果、当初案とは異なり、図 2(a)のように金属を上下に配置して EO ポリマーを挟み込む構造を用いることで、横方向に金属-絶縁体-金属(MIM)導波路が形成され、高い Q 値の共振が生じることが分かった。シリコン型に比べると Q 値は小さいものの、相互作用長が長く取れるため、十分大きな共振波長シフトが得られることを確認した。

格子周期 Λ の異なる素子をいくつも試作し、反射率スペクトルを測定した結果を図 4(a)に示す。計算結果(図 4(b))と見事に一致し、2つの MIM モードの分散曲線が交わる反交差点において、Q 値が急激に増幅する現象が初めて確認された。特に、 $\Lambda = 1040 \text{ nm}$ のとき、臨界結合条件が満たされ、図 4(c)に示すように、最大吸収率 $> 23 \text{ dB}$ 、Q 値 > 100 の鋭い共振を実証した。さらに上下の金属層に電界を印加することで、図 2(b)に示すスペクトルシフトが確認された。この結果から、波長 1547 nm 、印加電圧 $\pm 30 \text{ V}$ において、83% (8.7 dB) の変調度を実証した。さらに、電極パッドの寄生容量を低減した素子において、GHz 以上の変調帯域を確認した。

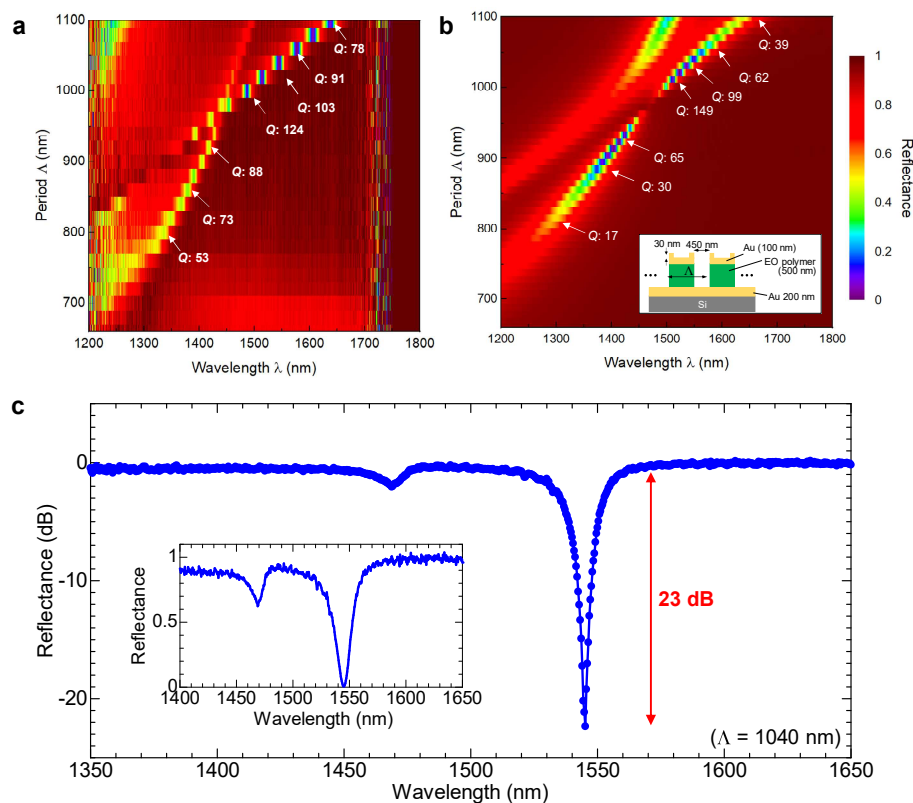


図 4: (a)金属格子型素子の反射率測定結果. (b)反射率計算結果.
(c)格子周期 $\Lambda = 1040 \text{ nm}$ のときの反射率スペクトルの測定結果.

3. 今後の展開

本研究により、シリコンおよび金属を用いた光メタ表面と EO ポリマーを組み合わせることで、GHz 以上の応答速度を持つ垂直入射型光変調素子の実現可能性が示された。今後、より EO 係数の高いポリマー材料の開発、ポーリング条件の最適化、および、微細加工プロセスの改善等を通じて変調効率を 1 桁向上させることで、数 V 程度の駆動電圧で動作する実用的

な素子の実現できると見込まれる。さらには、このような素子を基本ピクセルとして用い、2次元アレイ化を進めることで、高密度多チャンネル変調器や高速波面合成素子など、様々なデバイスへの展開が考えられる。

4. 自己評価

まず、当初計画において目的としたシリコン格子型素子および金属格子型素子の双方について試作実証に成功し、概ね目標は達成したと言える。特に、金属格子型変調素子に関しては、当初計画とは異なる素子構造により効率良く臨界結合条件を達成できることを見出し、20 dB以上の吸収率を持つ急峻な共振特性、および、8 dB以上の変調消光比を達成した点は、目標値を上回る成果である。これらの成果をきっかけに、本素子の実用化を目指し、民間企業との共同研究を開始するに至っている。また、上記の研究を遂行する上で、実施体制の整備と研究費の執行に関してもほぼ計画通り適切に実施した。その結果、素子の作製において不可欠となるEOポリマープロセスの開発、および、必要な装置の整備も遅滞なく実施し、円滑に研究を進めることが出来た。

本研究の成果は、科学技術及び社会・経済の双方において多大なインパクトがあると考えられる。まず学術的には、2つの共振モード間の相互作用を利用することで従来の光メタ表面素子では難しかった高Q値かつ高消光比の共振、および、GHz以上の高速変調を実証したものであり、新規性が高い。一方、工学的には、現存の空間光変調器(SLM: spatial light modulator)に比べて6桁ほど高速な垂直入射型変調素子の実現可能性を示したものであり、多様な応用が期待される。例えば、反射型変調素子を高密度に2次元アレイ化することで、将来の高密度チップ間インターコネクต์への適用が考えられる。また、本素子を2次元アレイ化することで高速かつ安価な光ビーム整形器が実現すれば、LIDARなどの高速光イメージング、レーザ加工、光情報処理など広範な産業分野への応用が期待される。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

- | |
|--|
| 1. J. Zhang, Y. Kosugi, A. Otomo, Y. Nakano, and T. Tanemura, "Active metasurface modulator with electro-optic polymer using bimodal plasmonic resonance," Opt. Express, 2017, 25, p. 30304-3031. |
| 2. J. Zhang, Y. Kosugi, A. Otomo, Y.-L. Ho, J.-J. Delaunay, Y. Nakano, and T. Tanemura, "Electrical tuning of metal-insulator-metal metasurface with electro-optic polymer," Appl. Phys. Lett., 2018, 113, 231102. |

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 0 件(公開前の出願件名については件数のみ記載)

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. T. Tanemura “Active metasurface modulators with electro-optic polymer,” SNU-UT Workshop on Nanophotonics, Seoul, 2020.
2. M. Ogasawara, Y. Kosugi, J. Zhang, Y. Okamoto, Y. Mita, A. Otomo, Y. Nakano, and T. Tanemura, “Electro-optic polymer surface-normal modulator using silicon high-contrast grating resonator,” Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), JTh2A.48, San Jose, 2019.
3. 宮崎俊輝, 小笠原誠, 張家琦, 中野義昭, 種村拓夫, “電気光学ポリマー垂直入射型光変調器に向けた高 Q 値シリコン共振構造の作製,” 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, 2019.
4. J. Zhang, Y. Kosugi, A. Otomo, Y. L. Ho, J. J. Delaunay, Y. Nakano, and T. Tanemura, “Experimental demonstration of surface-normal MIM modulator with electro-optic polymer,” Int. Conf. Photonics in Switching and Computing (PSC 2018), Cyprus, 2018.
5. 小杉優地, 岡本有貴, 山田千由美, 肥後昭男, 山田俊樹, 大友明, 三田吉郎, 中野義昭, 種村拓夫, “TE 光を用いたサブ波長格子型光変調器の設計と試作,” 第 65 回応用物理学会春期術講演会, 18p-B203-6, 2018.
6. J. Zhang, Y. Kosugi, Y. Nakano, and T. Tanemura, “Numerical design of surface-normal plasmonic modulator with electro-optic polymer,” The 24th Congress of the International Commission for Optics (ICO-24), Th1J-02, Tokyo, 2017.