

# 光回路のためのプラズモニクメタマテリアル

東京工業大学  
雨宮智宏, 荒井滋久

## 1 はじめに

物質の性質を考え、新しい性質を有する材料を作り出すことは、人々の生活のあらゆる場面に寄与する極めて重要な研究であるといえる。メタマテリアルの研究とは、いわばその究極系であり、物質の‘誘電率’と‘透磁率’を自在にコントロールすることで、あらゆる性質を持った材料を生み出すことを目的としている。「メタマテリアル」という言葉を直訳すると「超越物質」となるが、その名前からも「従来の概念を超えた究極の物質を作り出す」という先人たちの熱き思いが込められていることは、想像に難くない。

メタマテリアルの研究で最も注目される領域は、いわゆる屈折率が負になる領域であり、これは誘電率と透磁率を同時に負にすることによって実現される<sup>1,2)</sup>。この摩訶不思議な性質を利用することで、物理限界を超える集光や、光学的透明マントを作り出せることが示唆されており、それに向けて数多くの研究が行われている<sup>3~8)</sup>。

しかし、こと光通信帯(～200 THz)においては、透磁率を変化させるだけでも、大変な意義がある。今日まで、変調器や光スイッチなどの各種光通信デバイスは、誘電率のみを用いて動作制御を行ってきた。これは「光通信帯のような高周波においては、全ての物質の比透磁率 $\mu$ は1である」という純然たる事実が存在するためであるが、逆に考えれば、「制御可能かもしれないパラメータがもう一つ残されている」とポジティブに捉えることもできる。

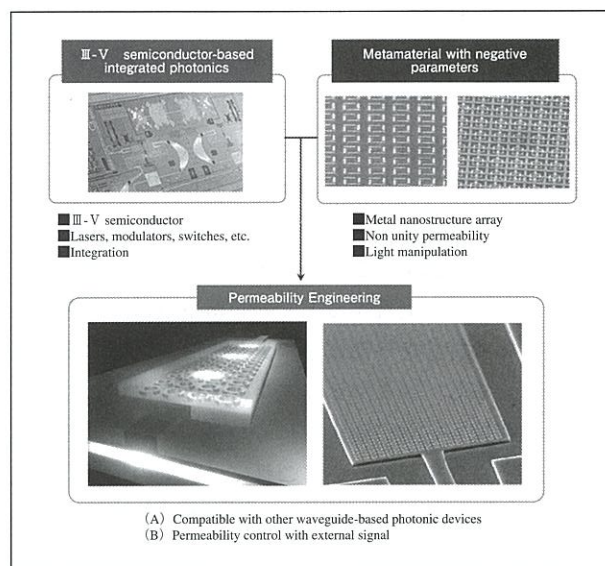


図1 従来の光回路とメタマテリアルとの融合

本稿では、光通信として最も一般的であるInP系プラットフォーム<sup>9~11)</sup>に焦点を当て、メタマテリアルを用いた透磁率制御の可能性について論じる。従来のInP系光集積回路に‘メタマテリアル’の概念を導入することで(図1参照)、回路内の誘電率および透磁率の値を同時に変化させることを可能にし、その一つの応用先として超小型な光変調器が実現できることを示す。

## 2 メタマテリアルからメタデバイスへ

光通信帯において比透磁率 $\mu$ が1である理由は、物質の巨視的な磁化が高周波磁界に追従できないためであ

る。光通信帯において動作するメタ材料を総称して、‘光メタ材料 (Photonic metamaterials)’ と呼ぶが、その正体は、「金属で構成されたナノスケールの電気回路 (RLC回路) の集合体」と言って差し支えない。入射光の周波数が回路の共振周波数に一致すると、RLC回路内に強い自由電子の振動が現れ、それに伴って誘導磁界が生じる。この誘導磁界は光周波数に追従しており、これを巨視的な磁化とみなすことで、透磁率の値を人工的に変化させることが可能となる。

‘メタ材料の歴史’は‘微細化に伴う高周波化の歴史’であり、1999年の提案以来、光通信帯・可視光域での動作を目指して、各国の研究機関が鎬を削ってきた<sup>12,13)</sup>。そのようなメタ材料の次のステップとは、それらを実際に光機能デバイスとして利用する、つまりメタデバイス化することにある。‘メタデバイス’とは、サウサンプトン大学のN. I. Zheludev教授が提唱した言葉であるが<sup>14)</sup>、メタ材料が次に向かうべき指標として、これ以上の表現はないだろう。

メタデバイスを実現する上での必須事項は、メタ材料自体の特性を外部信号により動的に制御することにある。しかし、メタ材料は構造を決定した瞬間に、その特性も完全に固定されるため、それを動的に制御することは容易ではない。これについての世界の研究動向として、‘形状変化型’と‘周囲変化型’の2つのアプローチから様々な試みがなされている (図2参照)。

‘形状変化型’は、文字どおりメタ材料の構造を変化させることで制御を行う。メタ材料は金属構造からなる電気回路であることは前述のとおりである

が、それらの形状をMEMS (Micro Electro Mechanical Systems)などの技術を用いることによって、直接的に変化させる<sup>15)</sup>。この方法は、形状変化に伴うメタ材料の特性変化を直感的に予想し易いことから、精度良く所望のデバイス動作を得ることができるという点で、大きな利点を有する。しかし、特性変化の速度がMEMSのスピードに律速されることから、高速動作が必要なデバイスには適さない。

一方、‘周囲変化型’は、メタ材料を何らかの機能材料と合わせることで、動的制御を行うアプローチである。メタ材料周囲に機能材料を配置し、その材料特性を変化させることで、メタ材料全体として、特性制御がなされているようにする。この方法の利点は、ひとえにデバイス作製の柔軟さにあり、デバイスの目的に応じて、各種機能材料を任意に選択することができる。組み合わせる材料は、アモルファスシリコン (a-Si)<sup>16,17)</sup>、酸化バナジウム (VO<sub>2</sub>)<sup>18)</sup>、など多岐にわたっており、近年、多くの報告がなされている。動作速度については、a-Siなどの半導体内キャリアを利用するものについては十分な高速性を有しており、これをベースにして全光変調器なども開発されている<sup>16)</sup>。ただし、各種材料の特性変化を鑑みたメタ材料の設計は難易度が高く、精度良くデバイス特性を得るにはそれなりの技術が必要となる。

### 3 光回路とメタ材料の融合

従来のIII-V族化合物半導体 (特にInP) をベースとした光集積回路 (Photonic Integrated Circuits: 以降PIC) は、ルーティング、光インターコネクト、センシング、イメージングなど様々な応用のもと、ここ数十年で急速な発展を遂げてきた<sup>10)</sup>。PICのポイントは1チップ上に‘様々な機能’を‘高密度’に集積することであり、近年の大容量光通信に伴って、それらに対する要求は年々高まっている。そのため、既存素子の更なるスケールダウンと低消費電力化が必要不可欠であるとされている。

我々が提案する「メタ材料を用いてPIC内における透磁率の値を制御する」というアイデア<sup>19~21)</sup>は、それらの問題へ向けたひとつの解決方法となりうる。メ

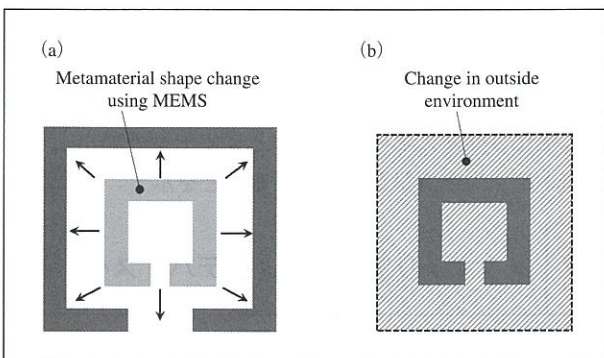


図2 メタ材料の動的制御手法 (a) 形状変化型 (b) 周囲変化型



タマテリアルの研究は、負の屈折率をはじめとした既存技術の枠組みを超える性質を追求することが一つのトレンドとなっている。しかし、InP系PICにメタマテリアルを利用するときは、その限りではない。そのような特殊な性質を利用せずとも、極めて大きな恩恵を得ることができるからである。

PICにおけるメタマテリアルの可能性として、もっとも単純かつ有望なのは、透磁率の変化 $\Delta\mu$ を純粋に屈折率の変化 $\Delta n$ として利用することである。InP系化合物半導体では、電気光学効果などで変化する屈折率（誘電率）の値は極めて微小である（0.1%程度）。この屈折率変化（誘電率変化）は物質固有のものであり、このままでは大きな変化は望めない。しかし、次節以降で述べる手法を用いれば、およそ1%程度の透磁率変化を実現でき、本来屈折率の可変幅が狭いInP系デバイスにおいて、極めて大きい屈折率変化（ $n+\Delta n=\sqrt{\epsilon+\Delta\epsilon}\sqrt{\mu+\Delta\mu}$ ）を与えることが可能となる。これを利用することで、前述のスケールダウンと低消費電力化を図ることができると考えられる。

本稿では、屈折率変化がデバイス性能に直結する光変調器に着目する。具体的には、InP系マッシュツェンダー（MZ）導波路内部に特殊なメタマテリアルを実装し、電圧印加に伴う透磁率の変化を利用して、透過光の強度を変調することを試みた。以降の節において、その詳細を記載する。

## 4 トライゲート（Tri-gate）メタマテリアル

まず、最も重要なポイントであるメタマテリアルの構造を決める。本研究では、PIC内に実装するという目的から、以下2つの制約を満たす特殊なメタマテリアルが必要となる。

### A. 光導波路との整合性

PIC内の各種素子は導波路構造をとっている。そのため、メタマテリアルもそれに合わせる形で実装する必要がある。特に、PIC内の標準偏光はTEモードであるため（光源である半導体レーザーがTEモード偏光で動作するので）、メタマテリアルもそれに対して磁気応答するよう

な構造にしなければならない。最も簡便な方法は、導波路上に標準的なスプリットリングを配置することである。これにより、TEモード伝搬光の磁場成分が丁度リングを貫くような形となり、磁氣的相互作用が発生する。光メタマテリアルに優位な形状として、堆積構造のフィッシュネット（Fishnet）型が多くの機関から報告されているが<sup>22, 23)</sup>、上記偏光の問題から光デバイスとの集積には不向きである。

### B. 電気的な透磁率の制御

PIC内の各種光デバイスは電気信号により動作しているため、メタマテリアルの制御にも、もちろん電気信号を選択する。メタマテリアルの制御には‘形状変化型’と‘周囲変化型’の2つのアプローチがあることは前述したとおりだが、ここでは‘周囲変化型’が適当である。光通信デバイスにおける要求動作速度（>10 G）を鑑みた場合、MEMSなどを使用する‘形状変化型’よりも、InP系化合物半導体のキャリアを制御して周辺環境を変える方が望ましい。

上記A、Bの制約を満たしたメタマテリアルの単位ユニットを図3(a)に示す。ナノスケールの金属構造で構成されたメタマテリアルに3次元トランジスタの技術を組み合わせることで、光周波数帯において電圧印加による透磁率の制御を可能にした。構造としては、Ti/Auの金属リングが $\text{Al}_2\text{O}_3$ 薄膜を介してGaInAs fin（浅い溝による周期構造）上に配置された形となっている。金属構造は、ナノスケールのRLC回路と等価であり、本構造における容量 $C$ は主にGaInAs finに依るものである。ここで、デバイス上部からゲート電圧を印加することでfin内にキャリアを生成、容量 $C$ を変化させることで透磁率の制御を行う。キャリア生成の原理は、3次元トランジスタ<sup>24, 25)</sup>のチャンネル領域に対するそれと同一であり、三方向から電圧がかかることで、fin領域に効率的にキャリアを誘起することができる。そういった意味で、我々は本構造をトライゲートメタマテリアル（TGM：Tri-gate metamaterial）と呼んでいる。

本研究で用いたTGMは、形状としては4分割（正確には8分割）シングルSplit-ring resonator（SRR）になって

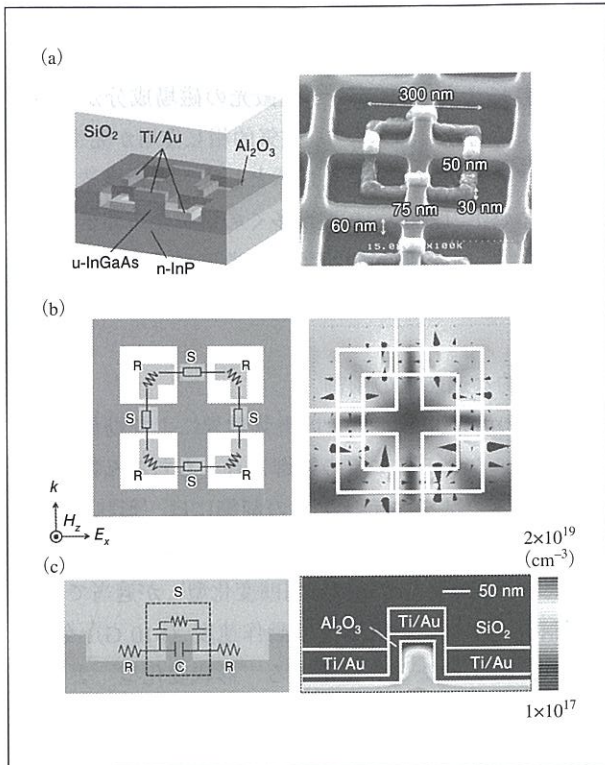


図3 (a) トライゲートメタ材料のユニットセルの概要と走査電子顕微鏡像 (b) 真上から見たトライゲートメタ材料の等価回路と共振時の電界分布 (c) 真横から見たトライゲートメタ材料の等価回路と電圧印加時のキャリア分布

おり、リング径をある程度の大きさに保ちつつ、光周波数程度の高周波において十分な磁気応答を得ることを可能にしている<sup>26)</sup>。入射光の周波数がTGMの共振周波数と一致した場合、TGM周囲の電界分布は有限要素法によって図3 (b) のように計算される。この分布からも分かるように、磁気共振時、リング内には誘導電流(図3 (b) の矢印)が生じており透磁率が変化する。TGM内のキャリア変化によって透磁率の制御を行う場合、その容量の変化は僅かであることから共振周波数のシフトも大きくは望めない。そのため、予め、図3 (b) のように光周波数(193 THz=1550 nm) 近辺において磁気共振が起きるようTGMの構造を設定しておく必要がある。

図3 (c) に半導体デバイスシミュレータ (Silvaco社 Device 3D) で計算したfin領域のキャリア密度分布を示す。ゲート電圧印加に伴って、キャリア密度は飽和する

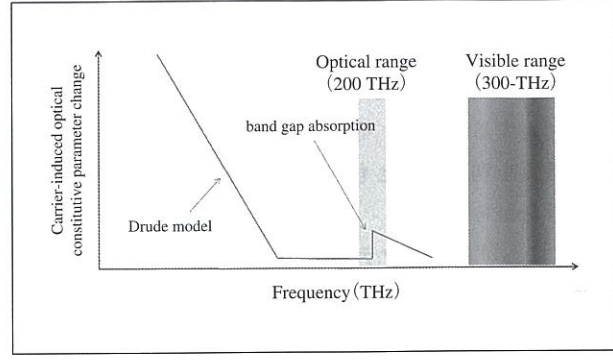


図4 半導体の光学特性変化(屈折率および吸収係数)のキャリア依存性

傾向にあり、最大で $2 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 程度の値が得られることが分かる。最終的に、ゲート電圧20 V印加時に、効率的にGaInAs fin内部に電子が生成されていることが見て取れる。半導体はキャリア濃度によって光学定数(誘電率や吸収係数)が変化するため、本構造では、それをメタ材料内部の容量Cの変化として利用している。

一般的に、半導体内のキャリアによる光学定数の変化は、図4 (a) のような形となる。低周波の電磁波に対しては、キャリア散乱が支配的となり、一般的なドルーデモデルにより光学特性が決定される<sup>27)</sup>。この領域では、特性変化が比較的大きいことから、それを利用したメタ材料の機能変化についてもある程度の値が望める。実際に、このようなアプローチに基づいた低周波のメタ材料制御については、ロスアラモス国立研究所<sup>16)</sup>、サンディア国立研究所<sup>28, 29)</sup> などを中心に多くの報告がなされている。

一方、キャリアの平均自由行程を超えた高周波領域では、半導体の光学特性はキャリア濃度に影響されることはほとんどなくなるが、唯一、対象半導体のバンドギャップエネルギー近傍の周波数でのみ変化が生じる。これは、バンドフィリング効果、自由キャリアプラズマ効果、バンドギャップ収縮などによって、半導体固有のバンドギャップが変化することに起因するものである<sup>30, 31)</sup>。本研究では、電圧印加によるキャリア分布(図3 (c))とキャリア濃度による半導体の光学定数変化を組み合わせることで、トライゲートメタ材料の解析を行っている(詳細は次節に譲る)。



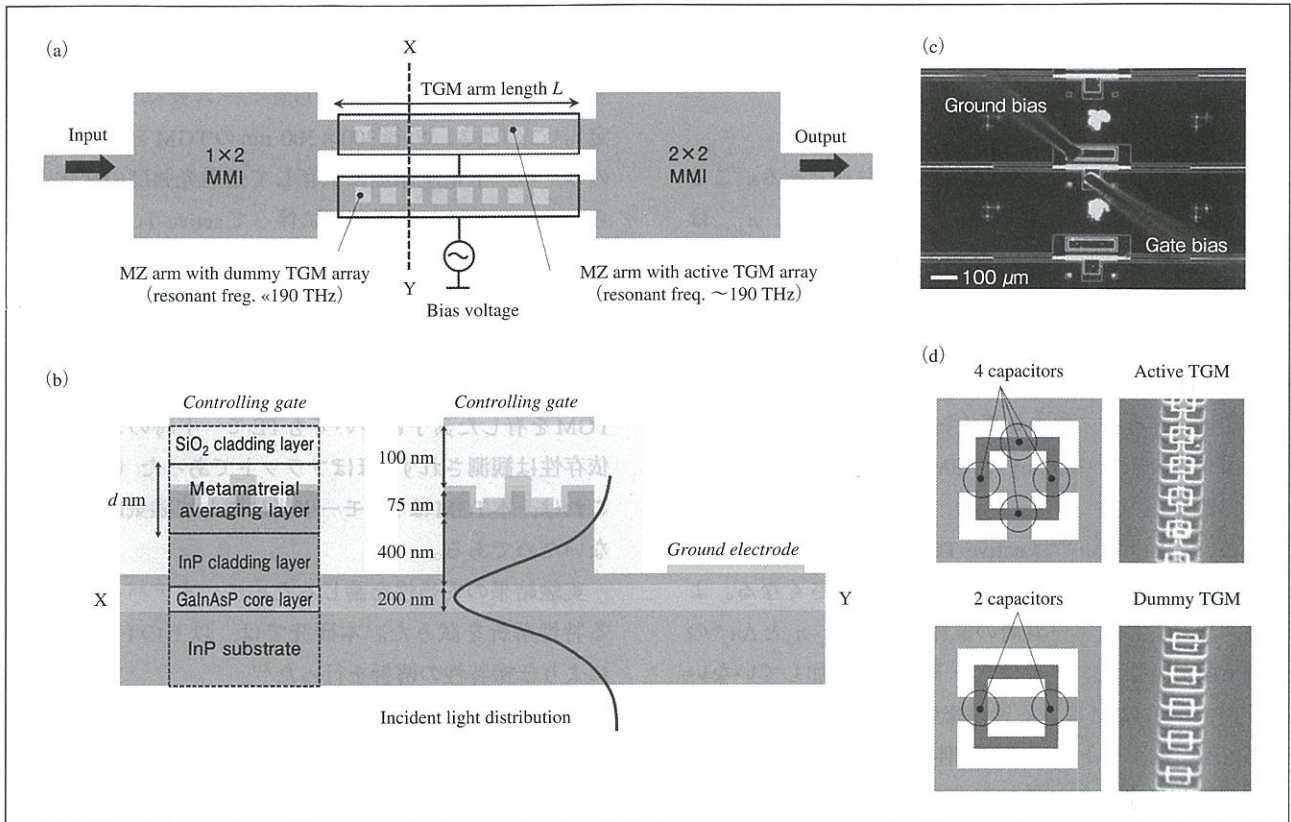


図5 メタマテリアルを実装した光変調器の概要 (a) 真上図 (b) 真横図 (導波路解析で考慮する擬似的な層構造, および伝搬光のモード分布も併せて示す) (c) 測定時の光学顕微鏡画像 (d) 各MZアームに配置したトライゲートメタマテリアル構造と走査電子顕微鏡像

## 5 メタマテリアルを実装した光変調器

本節では、前述のTGMを、実際の光変調器に実装することを考える。素子の具体的な構成は、図5 (a) および図5 (b) のようなMZ導波路の各アームにTGMが一行列に実装された形となっている。MZアームの上部からゲート電圧をかけ、トライゲートメタマテリアルの特性を変化させることで、入射波長 (1550 nm=193 THz) に対する透磁率の値を制御することができる。MZのアーム領域の屈折率を変化させ、位相差を与えることで強度変調を行う点は、LN変調器をはじめとする一般的なMZ光変調器と同様である。ただし、透磁率の変化に伴う大きな屈折率変化により、既存のデバイス (e. g., InP系MZ光変調器:  $5 \text{ mm} - 1 \text{ cm}^{32)}$ , LN変調器:  $1 - 10 \text{ cm}^{33}$ ) に比べて、遥かに短い素子長 ( $\sim 100 \mu\text{m}$ ) で適当な位相差

を得ることが可能となる。なお、デバイスの詳細構造やプロセスフローについてはref. <sup>34)</sup>を参照頂ければと思う。

本素子ではMZアーム各々に、以下2種類のTGMが使われている。一つは光通信帯 (=190 THz) において共振ピークを持つ4分割シングルリングで構成されたものであり、4節において説明した構造である (これを active TGMと呼ぶ)。もう一つは、構造パラメータは全く同じであるが、光周波数帯よりも低周波領域 (<100 THz) に共振ピークをもつdummy TGMである (図5 (c) 参照)。以降、それぞれのアームについての呼称を active TGMアーム, dummy TGMアームとする。

MZ型の素子において透過強度 (変調特性) を決定するパラメータとして、両アーム間を伝搬したときの光の位相差を考えることが重要である。本素子において両アーム間の位相差  $\Delta\phi$  は以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \frac{2\pi}{\lambda} (n_a + \Delta n_a^\mu + \Delta n_a^{etc} - n_d - \Delta n_d^{etc}) L \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} (n_a - n_d + \Delta n_d^\mu) \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)において各パラメータは以下のとおりである。ここで、 $\lambda$ は入射光の波長、 $L$ はTGMアームの長さ、 $n_{a(d)}$ はゲート電圧を印加していないときのactive (dummy) TGMアームの有効屈折率、 $\Delta n_a^\mu$ はゲート電圧印加に伴う透磁率変化(正確には誘電率も若干変化する)に起因するactive TGMアームの有効屈折率変化、 $\Delta n_{a(d)}^{etc}$ はゲート電圧印加に伴うその他の効果(キャリアによる吸収など)に起因するactive (dummy) TGMアームの有効屈折率変化、である。

ここで、 $\Delta n_a^{etc} - \Delta n_d^{etc}$ はactive TGMとdummy TGMの構造がほぼ同じことから、無視できるほど小さくなる。よって、最終的に両アーム間の位相差 $\Delta\phi$ は $n_a - n_d$ と $\Delta n_a^\mu$ の項が支配的となる。 $n_a - n_d$ はゲート電圧を印加していないときのactive TGMによる透磁率変化に依るものであり、一方、 $\Delta n_a^\mu$ はゲート電圧印加に伴うactive TGMアームの透磁率変化によるものである。つまり、本素子における透過強度変化は全て透磁率変化によるものである。

測定は偏波スタビライザにより得られた単一偏波状態の信号光を対象サンプルに入射し、1550 nmに対する透過強度のゲート電圧依存性を観測した。図6 (a)にTE

モード光入射時における測定結果を示す。図内の各データは各々TGMの外径が300×300 nm, 350×350 nm, 400×400 nmのものである(TGMアーム長は200 μmで固定)。このとき、外径300×300 nmのTGMを有した素子のみ、ゲート電圧印加に依存して透過強度の変化が見られた。これは、電圧印加に伴ってactive TGMの透磁率が変化、両アーム間に位相変化が生じたためである。実験で得られた消光比は6.9 dBであり、変調電圧はおおよそ2-12 Vの間であった。

一方、TMモード光に対しては、外径300×300 nmのTGMを有した素子についてもTEモード時のような波長依存性は観測されず、ほぼフラットであった(図6 (b))。これは、本TGMはTMモード光に対して磁気応答を示さないためである。

実験結果の妥当性を論じるために、本デバイスにおける特性解析を試みた。本研究では、以下の1-3の手順により伝搬特性の解析を行った<sup>35)</sup>。

1. 半導体デバイスシミュレータにより、ゲート電圧印加に伴って発生するTGM周辺のキャリア密度解析を行い、TGM近傍における複素屈折率の分布を導出する。
2. TGMの1ユニットセルに対して、TEモード光を横方向から入射したと仮定し、有限要素法(FEM)による電磁界解析を行うことでSパラメータを導出。解

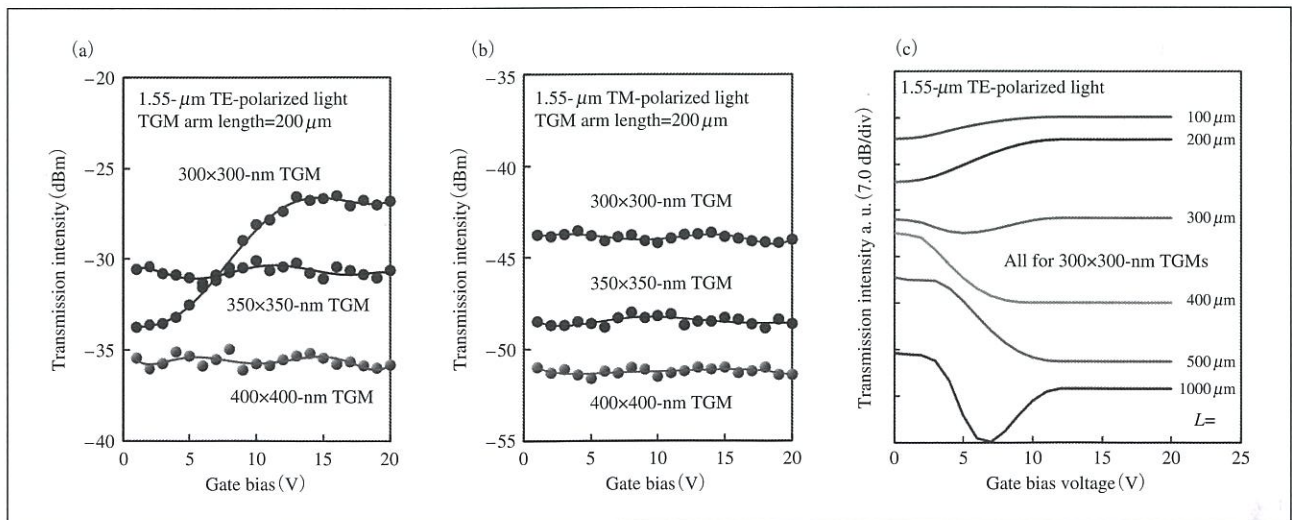


図6 メタマテリアルを用いた光変調器の特性 (a) TEモード光 (b) TMモード光 (c) 透過強度の印加電圧依存性の解析結果



析したSパラメータから誘電率および透磁率の再構成を行う。再構成の具体的な方法については既存の研究で用いられている方法<sup>36)</sup>と同じである。

3. 得られた誘電率および透磁率を用いることで、実際にMZ型変調器の導波モード解析を行う。このとき、TGM近傍は均一層とみなし、得られた誘電率および透磁率を持つと考える。均一層の膜厚はBで考えたユニットセルのz軸方向の長さとする（この膜厚はメタマテリアルの作用距離を表しており、本研究では250 nmとした）。あとは、通常の導波光学の解析<sup>37)</sup>として扱えばよい。

図6(c)に、TGMのサイズが $300 \times 300$  nmの素子において解析を行った結果を示す。解析では、ゲートに印加する電圧値とTGMを有するMZのアーム長をパラメータとし、各々、0 Vから20 V、100  $\mu$ mから1 mmまで変化させた。図6(a)における実験結果と比較した結果、対象のアーム長において、実験値と理論値にある程度的一致が見られるとともに、アーム長500  $\mu$ mのときに最大15 dB程度の消光比が得られることが分かった。

## 6 まとめ

本研究は、半導体をベースとした従来型の光回路に、誘電率や透磁率の値を人工的に制御できる「メタマテリアル」の概念を融合することで、既存の素子を発展させることを目指した。特に本稿では、メタマテリアルを実装した光変調器において、透磁率制御のみで強度変調が可能であることを示した。本技術は、光変調器に限らず光通信プラットフォームにおいて広く利用できるため、将来、さまざまなデバイスの小型化・高性能化に寄与することが期待される。

### 参考文献

- 1) R. M. Walser, "Electromagnetic metamaterials", Proc. SPIE, vol. 4467, pp. 1-15 (2001).
- 2) W. Cai, V. M. Shalaev, Optical Metamaterials: Fundamentals and Applications (Springer, New York, 2010).
- 3) X. Ni, N. K. Emani, A. V. Kildishev, A. Boltasseva, V. M. Shalaev, "Broadband light bending with plasmonic nanoantennas", Science, vol. 335, 427 (2012).
- 4) Z. H. Jiang, S. Yun, L. Lin, J. A. Bossard, D. H. Werner, T. S. Mayer, "Tailoring Dispersion for Broadband Low-loss Optical Metamaterials Using Deep-subwavelength Inclusions", Sci. Rep. vol. 3, 1571 (2012).
- 5) I. M. Pryce, K. Aydin, Y. A. Kelaita, R. M. Briggs, H. A. Atwater, "Highly Strained Compliant Optical Metamaterials with Large Frequency Tunability", Nano Lett., vol. 10, pp. 4222-4227 (2014).
- 6) X. Fang, M. L. Tseng, J.-Y. Ou, K. F. MacDonald, D. P. Tsai, N. I. Zheludev, "Ultrafast all-optical switching via coherent modulation of metamaterial absorption", Appl. Phys. Lett., vol. 104, 141102 (2014).
- 7) K. L. Tsakmakidis, A. D. Boardman, O. Hess, "Trapped rainbow storage of light in metamaterials", Nature, vol. 450, pp. 397-401 (2007).
- 8) H. Hu, D. Ji, X. Zeng, K. Liu, Q. Gan, "Rainbow trapping in hyperbolic metamaterial waveguide", Sci. Rep., vol. 3, 1249 (2013).
- 9) J. J. G. M. Tol, Y. S. Oei, U. Khalique, R. Nötzel, M. K. Smit, "InP-based photonic circuits: Comparison of monolithic integration techniques", Prog. Quantum Electron., vol. 34, pp. 135-172 (2010).
- 10) L. A. Coldren, "High performance InP-based photonic ICs—A tutorial", IEEE J. Lightwave Technol., vol. 29, pp. 554-570 (2011).
- 11) R. Nagarajan *et al.*, "Terabit/s class InP photonic integrated circuits", Semicond. Sci. Technol., vol. 27, 094003 (2012).
- 12) S. Linden, C. Enkrich, G. Dolling, M. W. Klein, J. Zhou, T. Koschny, C. M. Soukoulis, S. Burger, F. Schmidt, M. Wegener, "Photonic metamaterials: magnetism at optical frequencies", IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., vol. 12, pp. 1097-1105 (2006).
- 13) N. I. Zheludev, "A roadmap for metamaterials", Opt. Photonics News, vol. 22, pp. 30-35 (2011).
- 14) N. I. Zheludev, Y. S. Kivshar, "From metamaterials to metadevices", Nature Materials, vol. 11, pp. 917-924 (2012).
- 15) J. Y. Ou, E. Plum, J. Zhang, N. I. Zheludev, "An electromechanically reconfigurable plasmonic metamaterial operating in the near-infrared", Nat. Nanotechnol., vol. 8, pp. 252-255 (2013).
- 16) K. M. Dani, Z. Ku, P. C. Upadhyaya, R. P. Prasadkumar, A. J. Taylor, S. R. Brueck, "Ultrafast modulation of optical metamaterials", Opt. Express, vol. 19, pp. 3973-3983 (2011).
- 17) S. Kocaman, M. S. Aras, P. Hsieh, J. F. McMillan, C. G. Biris, N. C. Panou, M. B. Yu, D. L. Kwong, A. Stein, C. W. Wong, "Zero phase delay in negative-refractive-index photonic crystal superlattices", Nature Photon., vol. 5, pp. 499-505 (2011).
- 18) T. Driscoll, H.-T. Kim, B.-G. Chae, B.-J. Kim, Y.-W. Lee, N. M. Jokerst, S. Palit, D. R. Smith, M. Di Ventra, D. N. Basov, "Memory Metamaterials", Science, vol. 325, pp. 1518-1521 (2009).
- 19) T. Amemiya, T. Shindo, D. Takahashi, N. Nishiyama, S. Arai, "Magnetic Interactions at Optical Frequencies in an InP-Based Waveguide Device with Metamaterial", IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 47, pp. 736-744 (2011).
- 20) T. Amemiya, T. Shindo, D. Takahashi, S. Myoga, N. Nishiyama, S. Arai, "Nonunity permeability in metamaterial-based GaInAsP/InP multimode interferometers", Optics Lett., vol. 36, pp. 2327-2329 (2011).
- 21) T. Amemiya, S. Myoga, T. Shindo, E. Murai, N. Nishiyama, S. Arai : "Permeability retrieval in InP-based waveguide optical device combined with metamaterial, Optics Letters, vol. 37, pp. 2301-2303 (2012).
- 22) J. Valentine, S. Zhang, T. Zentgraf, E. Ulin-Avila, D. A. Genov, G. Bartal, X. Zhang, "Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index", Nature, vol. 455, pp. 376-379 (2008).
- 23) J. Yang, C. Sauvan, H. T. Liu, P. Lalanne, "Theory of Fishnet

- Negative-Index Optical Metamaterials”, Phys. Rev. Lett., vol. 107, 043903 (2011).
- 24) X. Huang *et al.*, “Sub-50 nm P-Channel FinFET”, IEEE Trans. Electron. Devices vol. 48, no. 5, pp. 880-886 (2001).
  - 25) C. Auth *et al.*, “A 22 nm High Performance and Low-Power CMOS Technology Featuring Fully-Depleted Tri-Gate Transistors”, Symp. VLSI Tech., 131 (2011).
  - 26) A. Ishikawa, T. Tanaka, S. Kawata, “Frequency dependence of the magnetic response of split-ring resonators”, J. Opt. Soc. Am. B, vol. 24, pp. 510-515 (2006).
  - 27) D. J. Griffiths, Introduction to Electrodynamics (Prentice-Hall 1999).
  - 28) Y. C. Jun, E. Gonzales J. Reno, E. Shaner, A. Gabbay, I. Brener, “Electrically-Controlled Thermal Infrared Metamaterial Devices”, Proc. CLEO 2012, CF2M (2012).
  - 29) Y. C. Jun, E. Gonzales J. Reno, E. Shaner, A. Gabbay, I. Brener, “Active tuning of mid-infrared metamaterials by electrical control of carrier densities”, Opt. Express, vol. 20, pp. 1903-1911 (2012).
  - 30) B. R. Bennett, R. A. Soref, J. A. Del Alamo, “Carrier-induced change in refractive index of InP, GaAs and GaInAsP”, IEEE J. Quantum Electron., vol. 26, pp. 113-122 (1990).
  - 31) B. R. Bennett and R. A. Soref, “Electrorefraction and electroabsorption in InP, GaAs, GaSb, InAs, and InSb”, IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-23, pp. 2159-2166 (1987).
  - 32) K. Tsuzuki, T. Ishibashi, T. Ito, S. Oku, Y. Shibata, R. Iga, Y. Kondo, and Y. Tohmori, “40 Gbit/s n-i-n InP Mach-Zehnder modulator with a  $\pi$  voltage of 2.2 V”, Electron. Lett., Vol. 39, pp. 1464-1466 (2003).
  - 33) D. Janner, D. Tulli, M. G.-Granda, M. Belmonte, V. Pruneri, “Microstructured integrated electro-optic LiNbO<sub>3</sub> modulators”, Laser & Photon. Rev., vol. 3, pp. 301-313 (2009).
  - 34) T. Amemiya, A. Ishikawa, T. Kanazawa, J. Kang, N. Nishiyama, Y. Miyamoto, T. Tanaka, S. Arai: “Permeability-controlled Optical Modulator with Tri-gate Metamaterial: Control of Permeability on InP-based Photonic Integration Platform”, Scientific Reports, Vol. 5, 8985 (2015).
  - 35) キャリア解析, Sパラメータの導出, 誘電率・透磁率の再構成には, それぞれ, ATLAS Device3D, COMSOL Multiphysics, Mathematicaを用いた。解析において, ATLAS Device3Dでは, 以下の7つを考慮した。Poisson equation, Electron and hole continuity equation, Parallel electric field-dependent mobility model, Concentration-dependent carrier mobility model, Shockley-Read-Hall (SRH) recombination model, Material-dependent band parameter model, Fermi-Dirac statistics model。また, COMSOL Multiphysicsにおいては, 金属はDrude modelに従うと仮定し, 境界条件はPEC (perfect electric conductor) およびPMC (perfect magnetic conductor)とした。
  - 36) D. R. Smith, D. C. Vier, Th. Koschny, C. M. Soukoulis, “Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials”, Phys. Rev. E, vol. 71, 036617 (2005).
  - 37) L. A. Coldren, S. W. Corzine, M. L. Mashanovitch, “Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits (Wiley Series in Microwave and Optical Engineering 2012).

■ Plasmonic metamaterials for photonic integrated circuits

■ ①Tomohiro Amemiya ②Shigehisa Arai

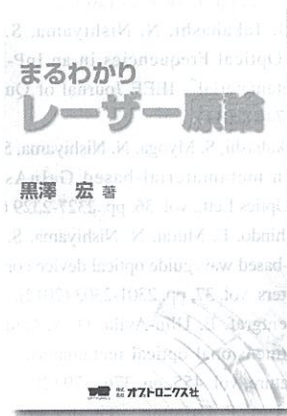
■ ①Quantum Nanoelectronics Research Center, Tokyo Institute of Technology, Assistant Professor ②Quantum Nanoelectronics Research Center, Tokyo Institute of Technology, Professor

①アメミヤ トモヒロ

所属：東京工業大学 量子ナノエレクトロニクス研究センター 助教

②アライ シゲヒサ

所属：東京工業大学 量子ナノエレクトロニクス研究センター 教授



## まるわかり レーザー原論

---

- 著者：黒澤 宏
- 体裁：A5判 430頁      ● 刊行：2011年4月
- ISBN：978-4-902312-49-2
- 定価：本体2,800円+税

**光のオンライン書店**

<http://shop.optronics.co.jp/>

クレジット・代金引換・コンビニ払い・銀行振込

光のオンライン書店

検索