

機関番号：12608

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009 ～ 2010

課題番号：21860031

研究課題名（和文）メタフォトンクスデバイス 光通信帯域における化合物半導体とメタマテリアルの融合

研究課題名（英文）Meta-photonic Device ~ Possibility of Permeability Control in Semiconductor-based Photonic Device Combined with Metamaterial ~

研究代表者

雨宮 智宏 (AMEIYA TOMOHIRO)

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

研究者番号：80551275

研究成果の概要（和文）：

本研究は、従来の化合物半導体をベースとした導波路型光素子に、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によって、新規デバイスの実現を目指している。本稿では、その布石として、InP系導波路素子に金属微細共振器アレイ（メタマテリアル）を導入したデバイスを作製した。結果、 $1.5\mu\text{m}$ 帯域において明確な磁気共振（ $\mu \neq 1$ ）を観測することに成功した。

研究成果の概要（英文）：

We demonstrated InP-based optical multi-mode interferometers (MMI) combined with metamaterials. The MMI operated at optical-communication wavelength, $1.5\text{-}\mu\text{m}$. The metamaterial consisted of minute split-ring resonators (SRRs) arrayed on the MMI. Magnetic resonance established between the SRR metamaterial and light at $1.5\mu\text{m}$, and the relative permeability of the metamaterial increased to 2.4 around this wavelength. Our results show the feasibility of semiconductor-based photonic devices combined with metamaterials. This would be useful in the development of novel optical-communication devices.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,080,000	324,000	1,404,000
2010年度	880,000	264,000	1,144,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,960,000	588,000	2,548,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電子デバイス・電子機器

キーワード：光集積、メタマテリアル

1. 研究開始当初の背景

光通信帯において、全ての物質の比透磁率 μ は1である。通信光学・導波路光学などの教科書に載っているマクスウェルの方程式には透磁率の項は一切登場せず、比誘電率 ϵ

のみについて扱われていることから、その事実を確認できる。

光通信分野において、この制約を超えることは非常に大きな意味を持つ。レーザや変調器などの従来の光素子の多くは、誘電率のみ

で議論が行われており、このパラメータを制御することで動的特性を得ている。これは前述したように、高周波では“透磁率の制御”という概念が存在しないためである。つまり、光通信帯では、本来であれば制御可能なパラメータの片方を全く利用していないことになる。この制約を取り払うことで、従来技術では実現困難であった様々な素子動作が可能となると考えられる。

光通信帯において μ が 1 である理由は、高周波領域では巨視的な磁化はほとんど磁界に追従できなくなるためである。しかし、近年、マイクロ～ナノサイズの金属構造体中における自由電子の振動を利用することで、物質固有だと思われてきた誘電率や透磁率の値を人工的に制御し、自然界に存在しない物質を作り出す研究が盛んに行われている。このような人工物質は、メタマテリアルと呼ばれる。

本分野の焦点の 1 つは、動作周波数の高周波数化であり、THz・光通信帯・可視光域での動作を目指して、各国の研究機関から多くの報告がなされている。しかし、現状のメタマテリアルはガラス基板上に微細共振器構造を作製することで実現されているものがほとんどであり、光通信素子のような実際のデバイスとの整合性は未知数である。そのような中、導波路デバイスにおける遮蔽素子、ファイバ端面にメタマテリアルを配置した発光デバイスなど、最近になって、徐々にではあるものの、実際の光通信デバイスとの融合が試みられている（我々はこのような試みを広義の意味で“メタフォトンクス”と呼んでいる）。

2. 研究の目的

本研究は、従来の化合物半導体をベースとした導波路型光素子に、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によって、既存の技術では不可能であった新しい機能をもった素子（メタフォトンクスデバイス）を実現することを目指す。具体的には、光通信帯域におけるメタマテリアルの動的制御、およびそれをベースとしたデバイスの一例として全光メモリの実証を行う。本申請研究を通して、従来の光エレクトロニクスの世界を超えた、新しい光技術の可能性を示す。

3. 研究の方法

メタマテリアルの作製（適切な SRR 構造の検討）。メタマテリアルは一般に金や銀といった貴金属を、対象とする電磁波の波長よりもはるかに短いサイズの微細共振器に加工し、これをホストとなる材料中に分散・配列させることで実現する。本研究では、これを化合物半導体（InP）基板上に構成するのだ

が、実際に光通信帯での動作にはいくつかの課題を克服する必要がある。まず、 $1.55\mu\text{m}$ （周波数 193THz）での動作を実現するには微細共振器のサイズを 50-200nm 程度まで小さくしなければならず、加工プロセスが非常に困難となる。またサイズの縮小化に伴って、共振器のリアクタンスが低下するが、それによる磁気応答の減少を最小限に抑える構造を考える必要がある。

メタマテリアルの特性評価。上記の議論にもとづいて構造を設計した後、実際に半導体基板上に作製した 1 重 SRR アレイの評価を行う。一般的に、メタマテリアルの特性パラメータである誘電率・透磁率は、媒質の反射と透過係数から決定することができる。このため、実際の測定では以下の手順を考えている。まず、励起光としては、InP のバンドギャップより大きいエネルギーが必要であるため、波長 800nm 程度の光を用いる。ここで、 $1.5\mu\text{m}$ 帯の信号光を試料に入射し、光励起直前および直後の透過・反射強度を測定することで、キャリア生成によってメタマテリアルの磁気応答が変化の様子を観測することができる。なお、実際の測定では入射波の電場成分がリングのギャップに垂直な場合と平行な場合で透過・反射スペクトルが変化すると考えられるので、それらについても合わせて議論する予定である。

上記の研究をより詳細に進めた後、実際に素子を作製し、光パルスが遅延時間測定を行う。光励起を行うことで生じるパルス伝搬時間の変化 Δt を測定することで、メタマテリアルの特性変化によって、どれほどの伝搬光の速度制御ができてきているのかを論じる。

4. 研究成果

本研究では、光周波数程度の高周波において十分な磁気応答を得るために、4 分割シングル SRR を採用した。SRR の解析は、COMSOL Multiphysics (COMSOL 社) を用いることで電磁界分布を計算した後、均質化理論によって誘電率・透磁率を導出した。その後、得られたパラメータを通常の MMI フーリエ解析に導入することで、実際に MMI の特性を計算した。

上記解析に基づいて、実際にデバイスを作製した。OMVPE により SI-InP 基板上に GaInAsP コア層 ($\lambda_g=1.2\mu\text{m}$, 200 nm), InP クラッド層 (450nm) を堆積後、電子ビーム描画および lift off プロセスにより微細共振器アレイを有する MMI (図 1) を作製した。本実験では共振器の大きさが異なる 3 つのデバイスを用意し、測定における参照デバイスとして、同一サイズでギャップの数を減らした（光周波数において共振を示さない）デバイスも併せて作製した。

測定は単一偏波状態の信号光を対象サンプルに入射し、透過光強度の波長依存性を観

測した。光透過強度から求められた SRR アレイの磁気共振による（透磁率 μ の変化による）光損失量の波長依存性を図 2 に示す。SRR のサイズに依存して損失のピーク波長が長波側にシフトしていく様子が見て取れる。最終的に、SRR のサイズが $350 \times 350 \text{ nm}^2$ のとき、波長 1520 nm 付近において明確なピークが観測され、透磁率の変化を導波路型光素子内で観測することに成功している。

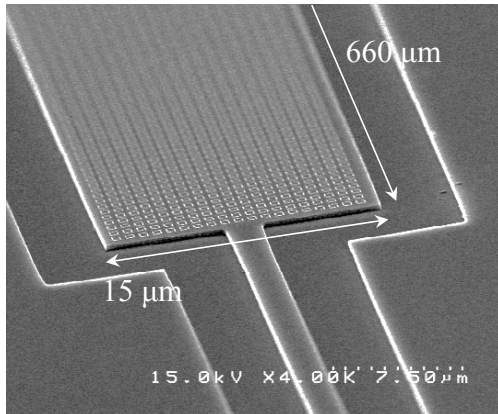


図 1 デバイスの SEM 画像

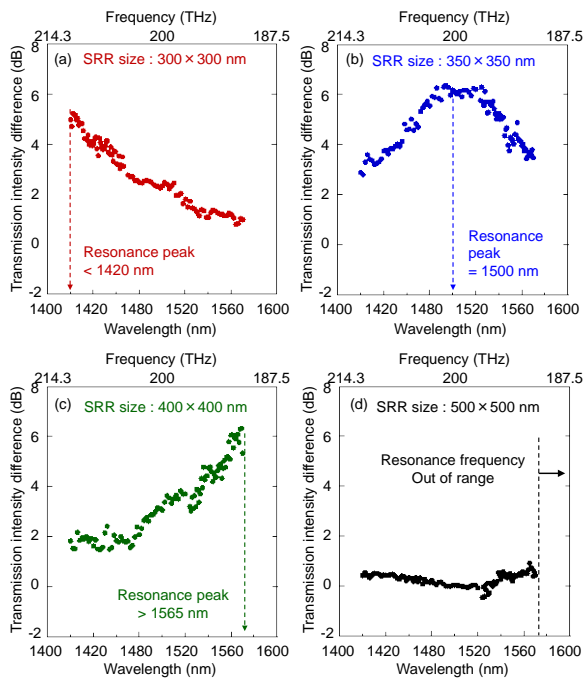


図 2 デバイスの透過特性

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 5 件）

① Tomohiro Amemiya, Takahiko Shindo, Daisuke Takahashi, Seiji Myoga, Nobuhiko Nishiyama, SHIGEHISA ARAI. Non-unity permeability in metamaterial-based GaInAsP/InP multimode interferometer, Optics Lett., Vol. 36, No. 12, pp. 2327-2329, June 2011.

② Tomohiro Amemiya, Takahiko Shindo, Daisuke Takahashi, Nobuhiko Nishiyama, SHIGEHISA ARAI. Magnetic Interactions at Optical Frequencies in an InP-Based Waveguide Device with Metamaterial, IEEE J. Quantum Electronics, Vol. 47, No. 5, pp. 736-744, Apr. 2011.

③ Tadashi Okumura, daisuke kondo, Hitomi Ito, SeungHun Lee, Tomohiro Amemiya, Nobuhiko Nishiyama, SHIGEHISA ARAI. Lateral Junction Waveguide-Type Photodiode Grown on Semi-Insulating InP Substrate, Japanese Journal of Applied Physics (JJAP), Vol. 50, No. 2, pp. 020206-1 - 020206-3, Feb. 2011.

④ Takahiko Shindou, Tadashi Okumura, Hitomi Ito, Takayuki Koguchi, Daisuke Takahashi, Yuki Atsumi, Joonhyun Kang, Ryou Osabe, Tomohiro Amemiya, Nobuhiko Nishiyama, SHIGEHISA ARAI. GaInAsP/InP lateral-current-injection distributed feedback laser with a-Si surface grating, Opt. Express, Vol. 19, No. 3, pp. 1884-1891, Jan. 2011.

⑤ Tomohiro Amemiya, Kenji Abe, Takuo Tanemura, Tetsuya Mizumoto, Yoshiaki Nakano. Nonreciprocal Polarization Conversion in Asymmetric Magneto-Optic Waveguide, IEEE J. Quantum Electron., Vol. 46, pp. 1662-1669, Nov. 2010.

〔学会発表〕（計 5 件）

① T. Shindo, Tadashi Okumura, Mitsuaki Futami, Ryou Osabe, Takayuki Koguchi, T. Amemiya, N. Nishiyama, S. Arai, Lateral Current Injection Distributed Feedback Laser with Wirelike Active Regions, The 23rd International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM-2011), Tu5.2-3, Berlin, Germany, May 24 (2011).

② T. Amemiya, T. Shindo, D. Takahashi, N. Nishiyama, S. Arai, Metamaterial-based Control of Permeability in GaInAsP/InP

Multimode- Interferometers, 23rd Annual Meeting of the IEEE Photonics Society (PHO-2010), WM3, Denver, Colorado (USA), Nov. 9 (2011).

③T. Amemiya, T. Shindo, D. Takahashi, N. Nishiyama, S. Arai, All-optical Switch Consisting of Multimode Interferometer Combined with Metamaterials: Device Design, The 22nd International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM-2010), WeP60, Takamatsu, Japan, June 4 (2010).

④G. Takahashi, T. Amemiya, T. Tanemura, Akio H., K. Takeda, Y. Nakano, TM-Mode Waveguide Isolator Monolithically Integrated with InP Active Devices, The 22nd International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM-2010), Takamatsu, Japan, June 4 (2010).

⑤ Tomohiro Amemiya, Takahiko Shindou, Daisuke Takahashi, Nobuhiko Nishiyama, SHIGEHISA ARAI. Magnetic Interaction at Optical Frequencies in InP-based Waveguide Device Combined with Metamaterial, Conference on Laser and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS-2010), CFB1, San Jose, CA (USA), May. 21 (2010).

⑥雨宮智宏, 進藤隆彦, 高橋大佑, 明賀聖慈, 西山伸彦, 荒井滋久. 金属側壁層を有するプラズモニック DFB レーザの理論解析, 第 58 回応用物理学関係連合講演会, Vol. 神奈川, No. 26a-P5-13, Mar. 16 2011.

⑦進藤隆彦, 奥村忠嗣, 二見充輝, 長部亮, 高橋大佑, 伊藤瞳, 小口貴之, 雨宮智宏, 西山伸彦, 荒井滋久. 横方向電流注入型レーザにおける発振特性のストライプ幅依存性, 第 58 回応用物理学関係連合講演会, Vol. 神奈川, No. 26a-P5-17, Mar. 16 2011.

⑧明賀聖慈, 雨宮智宏, 石川篤, 西山伸彦, 田中拓男, 荒井滋久. III-V 化合物半導体のキャリアを用いたメタマテリアルの共振周波数変化, 第 58 回応用物理学関係連合講演会, Vol. 神奈川, No. 27p-KB-1, Mar. 16 2011.

⑨二見充輝, 進藤隆彦, 奥村忠嗣, 長部亮, 伊藤瞳, 小口貴之, 雨宮智宏, 西山伸彦, 荒井滋久. 細線状活性層を有する GaInAsP/InP 横方向電流注入型 DFB レーザ, 第 58 回応用物理学関係連合講演会, 第 58 回応用物理学関係連合講演会, Vol. 神奈川, No. 26a-P5-16, Mar. 16 2011.

⑩雨宮智宏, 進藤隆彦, 高橋大佑, 明賀聖慈, 西山伸彦, 荒井滋久. メタフォトン素子 ~ 導波路型光デバイスにおける透磁率制御の可能性 ~, 電子情報通信学会

フォトニックネットワーク研究会, Vol. 鹿児島, Feb. 28, 2011.

⑪進藤隆彦, 奥村忠嗣, 伊藤瞳, 小口貴之, 高橋大佑, 渥美裕樹, カン ジュンヒョン, 長部亮, 雨宮智宏, 西山伸彦, 荒井滋久. a-Si 表面回折格子を有する 1550nm 波長帯横方向電流注入型 DFB レーザ, 電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会, Vol. 東京, Dec. 17, 2010.

⑫雨宮智宏, 進藤隆彦, 高橋大佑, 西山伸彦, 荒井滋久. GaInAsP/InP MMI とメタマテリアル融合素子における透磁率変化の観測, 第 71 回秋季応用物理学学会学術講演会, Sep. 14, 2010.

⑬高橋元悟, 武田浩司, 雨宮智宏, 種村拓夫, 肥後昭男, 中野義昭. TM モード導波路型アイソレータを集積一体化した半導体リングレーザーの設計, 第 57 回春季応用物理学関係連合講演会, Mar. 18, 2010.

⑭雨宮智宏, 進藤隆彦, 高橋大佑, 西山伸彦, 荒井滋久. メタマテリアルを有する InP 導波路型デバイスにおける光周波数領域での磁気応答, 第 57 回春季応用物理学関係連合講演会, 18p-P6-18, Mar. 18, 2010.

〔図書〕 (計 1 件)

Tomohiro Amemiya, Yoshiaki Nakano. Single Mode Operation of 1.5- μm Waveguide Optical Isolators Based on the Nonreciprocal-loss Phenomenon, Advances in Lasers and Electro optics, IN-TECH, Austria, pp. 117-136, 2010.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

雨宮 智宏 (AMEMIYA TOMOHIRO)

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

研究者番号: 80551275