

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年5月30日現在

機関番号：12608
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2011～2012
課題番号：23760305
研究課題名（和文） InP系化合物半導体をベースとしたメタマテリアル装荷型光メモリの創製
研究課題名（英文） InP-based optical memory with the concept of metamaterial
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

研究成果の概要（和文）：

光通信帯では、全ての物質の比透磁率 μ は1であり“透磁率の制御”という概念は存在しない。レーザー・変調器・スイッチなどに代表される従来の光通信素子が、誘電率のみを制御することで動作特性を得ていることは、この事実の裏返しともいえる。

本研究では、光通信素子において、この制約を超える一すなわち誘電率と透磁率で与えられる材料定数を2次元的に制御すること、光メモリのような従来技術では実現が難しい素子特性が実現することを目的とする。その前段階として、半導体キャリアを利用することにより、透磁率の制御によるInP系導波路型スイッチを作製し6.9dBの強度変化を得ることに成功した。また、新しい解析手法も提案し、実験データと合わせることで詳細な理論解析ができるようになった。

研究成果の概要（英文）：

Optical metamaterials offer new opportunities for innovation in the field of electromagnetic parameter design, such as the design of permittivity ϵ and permeability μ . The major focus of attention is to create artificial materials with unique ϵ - μ values that cannot be observed in any existing media and to take advantage of these expanded parameters for better control of electromagnetic waves. One of the next trends is to think of metamaterials as devices, where the structuring of metal and the hybridization with functional agents brings new functionality. Especially, introducing optical metamaterials into actual photonic devices poses an exciting challenge.

In this study, we demonstrate InP-based optical devices combined with metamaterials to show the possibility of permeability control on the semiconductor-based photonics platform. As an actual example, we report an electrically-driven permeability-controlled optical switch, which shows great promise for using both the permittivity and permeability in semiconductor-based actual photonic devices.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：光デバイス・光回路・メタマテリアル

1. 研究開始当初の背景

これま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て、自然界に

存在しない物質（代表例として負の屈折率をもつような物質）を作り出そうという研究が最近注目を集めている。このような人工物質

は、「メタマテリアル」と呼ばれる。メタマテリアルに関する近年の様々な研究は、負の屈折率(Science 316, 430)、光周波数の磁性(Optics Express 15, 3333)、透明化(Phys. Rev. Lett. 102, 213901)など古典物理とされてきた電磁気学に新たなフロンティアを与えることに成功している。

メタマテリアルにおける次世代のトレンドは、それを各種機能材料と組み合わせることで、デバイスとして利用することにある。中でも光通信・可視デバイスにとっては「高周波帯における物質の比透磁率 μ は1である」という暗黙の制約を超えることが出来る点において、非常に大きな意味を持つ。メタマテリアルを用いて誘電率・透磁率を2次元的に制御することは、レーザや変調器などの通信用光デバイスの主流となっている InP 系プラットフォームにとって、「従来型デバイスの小型・高性能化」「新機能素子の実現」など、潜在的に大きな可能性を有する。

メタマテリアル分野の焦点の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“メタフォトニクス”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(メタフォトニクスデバイス)を実現することを目指す。具体的には、光メモリの前段階として、光通信帯域における半導体キャリアを利用したメタマテリアルの動的制御の実証を行う。さらに、メタマテリアルに限らず、導波路型光素子内に周期的な微細金属構造があるようなモデルを仮定した場合、そのような構造(特に金属構造と電磁波の相互作用により周辺の電磁界分布が変化するものが適当である)を有する導波路型光素子の解析手法を提案する。本方法を実際に前回報告した素子に適用し、比較的容易に解析が可能であることも示す。

3. 研究の方法

化合物半導体のキャリア密度を制御することでメタマテリアルの動的制御を行う。制御の概要であるが、化合物半導体基板上に浅い溝を掘り、その内部に金属微細共振器を作製する。このとき入射光の周波数が共振器の共振周波数と一致すると、入射光と金属共振器が共鳴して透磁率・誘電率に変化が生じる。ここで、デバイス上部からゲート電圧を印加することで、化合物半導体内に伝導キャリアを生成し、それに伴って金属共振器のギャップ容量を変化させることができる。この状況下では、金属共振器の共鳴周波数が変化し、対象周波数(光通信帯)において共振器としての性質を持たなくなる。つまり、ゲート電圧印加によるキャリアがあるときの比透磁率は通常の物質と同じく1に固定され、キャリアがないときの比透磁率は1以外の値を取ることになる。本項目は既に理論解析により一定の知見を得ている。

以上の議論にもとづいて、実際に構造を設計した後、実際に半導体基板上に作製した微細共振器アレイの評価を行う。基礎データとしてフーリエ変換型赤外分光(FT-IR)を用いて測定を行う。

上記の研究により、実際に微細共振器アレイの誘電率・透磁率が外部信号によってどの程度変化するかを見積った後、その値を用いることでスイッチング素子の設計を行う。導波路型光素子にメタマテリアルを導入する技術に関しては、既存のデバイスにおいて確立されており、大幅な変更なしに作製可能であると考えられる。

4. 研究成果

素子は、MZIの各アームに微細共振器(メタマテリアル)が1列に埋め込まれた構造となっている。両アームの共振器は各々異なる共振周波数を持ち、その1つは $1.55\mu\text{m}$ で共振するよう設計されている。素子上部からゲート電圧をかけ、両アームの共振周波数をシフトさせることで(これにより透磁率が変化する)、MZIの強度変調を行うことができる。共振器1ユニットは、多分割された金属リングがInGaAsを挟むFinFET-like構造となっている。上部からゲートバイアスを印加すると、InGaAs内にキャリアが励起され、共振周波数を制御することができる。これにより、メタマテリアルの動的制御の実証を行う。

FTIRによる垂直方向の透過特性にフィッティングをかけることで、側面方向に光を入射した場合の特性結果を理論解析したものである。結果、リング外径 300nm の構造において、ちょうど $1.55\mu\text{m}$ でLC共振する(透磁率が変化する)ことが見積もられた。最終的に作製した素子の透過特性は、リング外径 300nm の構造においてのみ、ゲート電圧に伴って、透過強度に 6.9dB の変化が得られた。

この結果は、先ほどの FTIR による結果とも一致をみている。

上記の金属周期構造のユニットセルあたりの電磁界解析を行い、それによって金属構造近傍における等価的な屈折率を導出した。その後、それらのパラメータを用いて実際の導波モード解析を行った。本解析手法を用いるに当たって、仮定するモデルが以下の要件を満たす必要がある: (a)導波モードの中心が伝搬に伴って大きく変化しない(金属構造に引きずられない)、(b)金属の周期構造自体が強いグレーティング効果を及ぼさない。

高さ 75nm、幅 50nm の n-GaInAs ($5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)/InP FIN 構造に 10 nm の Al₂O₃ を介して微小金属リングが配置されている。リング周期・素子幅は、デバイス構造を決定した時点で固定されるパラメータである。本解析では金属と電磁波の作用距離であり、このパラメータを変えることで、実験値との比較を行った。

はじめにユニットセル当たりの有限要素法電磁場解析を行い、TE モード電磁波の S パラメータを導出する。その後、再構成プロセスに従って等価的な物質パラメータを導出した。金属と電磁波の作用距離を 500nm に設定したときの等価的透磁率と屈折率の実部は、金属構造が共振していない 1800nm 以上の波長においては、透磁率はほぼ 1 であり、屈折率についても各材料の Filling factor から計算できる値(=2.35)とほぼ同じになった。一方、共振が見られる領域(1200-1600nm)においては、透磁率と屈折率ともに変化しており、バイアス電圧印加に伴って 1550nm において 2.85 から 2.75 の変化が得られた。

上記で得られた屈折率を用いることで、実際に MZ 型スイッチの導波モード解析を行った。1550nm の入射光に対して電圧印加に伴う透過強度の変化を実験値と比較することで、本メタマテリアルと入射電磁波の相互作用距離はおおよそ 600nm 程度であると結論付けられた。

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 15 件)

1. Noriaki Sato, Mizuki Shirao, Takashi Sato, Masashi Yukinari, Nobuhiko Nishiyama, Tomohiro Amemiya, Shigehisa Arai. Room-Temperature Continuous-Wave Operation of npn-AlGaInAs Transistor Laser Emitting at 1.3-um Wavelength, IEEE Photonics Technol. Lett., Vol. 25, No. 8, pp. 728-730, Feb. 2013.
2. JoonHyun Kang, Yuki Atsumi, Manabu Oda, Tomohiro Amemiya, Nobuhiko Nishiyama, Shigehisa Arai. Layer-to-Layer Grating Coupler Based on Hydrogenated Amorphous Silicon for

Three-Dimensional Optical Circuits, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 51, No. 12, pp. 120203, Nov. 2012.

3. Yuuta Takino, Mizuki Shirao, Noriaki Sato, takashi sato, Tomohiro Amemiya, Nobuhiko Nishiyama, SHIGEHISA ARAI. Improved regrowth interface of AlGaInAs/InP-buried-heterostructure lasers by in-situ thermal cleaning, IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 48, No. 8, pp. 971-979, Aug. 2012.
4. Seiji Myoga, Tomohiro Amemiya, Atsushi Ishikawa, Nobuhiko Nishiyama, Takuo Tanaka, Shigehisa Arai. Carrier-concentration-dependent resonance frequency shift in a metamaterial loaded semiconductor, J. Opt. Soc. Am. B, Vol. 29, No. 8, pp. 2110-2115, Aug. 2012.
5. Tomohiro Amemiya, Seiji Myoga, Takahiko Shindo, Eijun Murai, Nobuhiko Nishiyama, SHIGEHISA ARAI. Permeability retrieval in InP-based waveguide optical device combined with metamaterial, Optics Lett., Vol. 37, No. 12, pp. 2301-2303, Jul. 2012.
6. Mitsuaki Futami, Takahiko Shindo, Takayuki Koguchi, Keisuke Shinno, Tomohiro Amemiya, Nobuhiko Nishiyama, Shigehisa Arai. GaInAsP/InP Lateral Current Injection Laser with Uniformly Distributed Quantum Well Structure, IEEE Photonics Technol. Lett., Vol. 24, No. 11, pp. 888-890, Jun. 2012.
7. Daisuke Takahashi, SeungHun Lee, Mizuki Shirao, Takahiko Shindo, Keisuke Shinno, Tomohiro Amemiya, Nobuhiko Nishiyama, Shigehisa Arai. Carrier-Transport-Limited Modulation Bandwidth in Distributed Reflector Lasers with Wirelike Active Regions, IEEE J. Quantum Electron., Vol. 48, No. 5, pp. 688-695, May. 2012.
8. JoonHyun Kang, Yuki Atsumi, Manabu Oda, Tomohiro Amemiya, Nobuhiko Nishiyama, SHIGEHISA ARAI. Low-loss Amorphous Silicon Multilayer Waveguides Vertically Stacked on Silicon-on-Insulator Substrate, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 50, No. 12, pp. 120208, Nov. 2011.
9. Takahiko Shindou, Tadashi Okumura, Hitomi Ito, Takayuki Koguchi, Daisuke Takahashi, Yuki Atsumi, JoonHyun Kang, Ryou Osabe, Tomohiro Amemiya, Nobuhiko Nishiyama, SHIGEHISA ARAI. Lateral-Current-Injection Distributed Feedback Laser with Surface Grating Structure, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., Vol. 17, No. 5, pp. 1175 - 1182, Sep. 2011.
10. SeungHun Lee, Daisuke Takahashi, Takahiko Shindo, Keisuke Shinno, Tomohiro Amemiya, Nobuhiko Nishiyama, Shigehisa Arai. Low-power-consumption High-eye-margin 10 Gbit/s Operation by GaInAsP/InP Distributed Reflector Lasers with Wirelike Active Regions, IEEE Photonics Technol. Lett., Vol. 23, No. 18, pp. 1349 - 1351, Aug. 2011.
11. Yuta Takino, Mizuki Shirao, Takashi Sato, Nobuhiko Nishiyama, Tomohiro Amemiya, Shigehisa Arai. Regrowth Interface Quality Dependence on Thermal Cleaning of AlGaInAs/InP Buried-Heterostructure Lasers, Japanese Journal of Applied Physics (JJAP),

- Vol. 50, No. 7, pp. 070203-1 - 070203-3, Jul. 2011.
12. Tomohiro Amemiya, Takahiko Shindo, Daisuke Takahashi, Seiji Myoga, Nobuhiko Nishiyama, SHIGEHISA ARAI. Nonunity permeability in metamaterial-based GaInAsP/InP multimode interferometers, Optics Lett., Vol. 36, No. 12, pp. 2327-2329, Jun. 2011.
 13. 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, May. 2011.
 14. 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.
 15. 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.

[学会発表] (計 26 件)
 会議発表 (査読有り)

1. Tomohiro Amemiya, Toru Kanazawa, Atsushi Ishikawa, Seiji Myoga, Eijun Murai, Takahiko Shindo, J. Kang, Nobuhiko Nishiyama, Yasuyuki Miyamoto, Takuo Tanaka, Shigehisa Arai. (Invited) Photonic metamaterials in semiconductor optical devices, 2013 EMN Open Access Week, Chengdu, China, Oct. 21 (2013).
2. Tomohiro Amemiya, Toru Kanazawa, Atsushi Ishikawa, Seiji Myoga, Eijun Murai, Takahiko Shindo, J. Kang, Nobuhiko Nishiyama, Yasuyuki Miyamoto, Takuo Tanaka, Shigehisa Arai. Electrically-driven Permeability-controlled Optical Modulator using Mach-Zehnder Interferometer with Metamaterial, The Conference on Lasers and Electro-Optics 2013 (CLEO 2013), No. QM1A.6, San Jose, CA, USA, Jun. 10 (2013).
3. Tomohiro Amemiya, Toru Kanazawa, Atsushi Ishikawa, Seiji Myoga, Eijun Murai, Takahiko Shindo, J. Kang, Nobuhiko Nishiyama, Yasuyuki Miyamoto, Takuo Tanaka, Shigehisa Arai. Permeability-controlled Optical Modulator with Tri-gate Metamaterial, the 4th International Topical Meeting on Nanophotonics and Metamaterials (NANOMETA 2013), No. FRI5o.2,

Seefeld, Austria, Jan. 4 (2013).

4. T. Amemiya. Permeability-controlled Optical Devices on an InP-based Photonics Platform, BIT's 2nd Annual World Congress of Nano-S&T (Nano-S&T 2012), No. 1-4-8, Qingdao, China, Oct. 26 (2012).
5. S. Myoga, T. Amemiya, A. Ishikawa, N. Nishiyama, T. Tanaka, S. Arai. Carrier Concentration Dependent Resonance Frequency Shift in Metamaterial Loaded Semiconductor, 2011 IEEE Photonics Conference (IPC-2011), No. ThN2, Arlington, VA, USA, Oct. 13 (2011).
6. T. Amemiya, T. Shindo, S. Myoga, N. Nishiyama, S. Arai. Non-unity Permeability in InP-based Mach-Zehnder Interferometer with Metamaterial, 2011 IEEE Photonics Conference (IPC-2011), No. ThJ4, Arlington, VA, USA, Oct. 13 (2011).
7. T. Amemiya, T. Shindo, S. Myoga, N. Nishiyama, S. Arai. Semiconductor DFB Laser with Plasmonic Metal Layers for Subwavelength Confinement of Light, IQEC/CLEO Pacific Rim 2011, No. 4630-CT-3, Sydney, Australia, Aug. 31 (2011).

[図書] (計 1 件)

1. Tomohiro Amemiya, Takahiko Shindo, Seiji Myoga, Eijun Murai, Nobuhiko Nishiyama, Shigehisa Arai. Non-unity permeability in InP-based photonic device combined with metamaterial, Metamaterial (ISBN: 978-953-51-0591-6), IN-TECH, pp. 215-238, May. 2012.

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

http://t2r2.star.titech.ac.jp/cgi-bin/researcherinfo.cgi?q_researcher_content_number=CTT100576433

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

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし