

氏名	雨宮 智宏
所属機関	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
研究題目	メタマテリアルを利用した InP チップ上光無線受信器の創製

1. 研究の目的

通信光学・導波光学などの教科書に載っているマクスウェルの方程式を眺めてみると、誘電率 ϵ の記述は目に留まるが、透磁率 μ については一切登場しない。これは「光通信帯において、全ての物質の比透磁率 μ は 1 である」という純然たる事実が存在するためである。

InP 系の光集積プラットフォームにおいて、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全ては、誘電率というパラメータを制御することで様々な動作を実現している。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（かもしれない）パラメータの片方を全く利用していないことになる。

もしこの制約を取り払うことができると、InP 系の光集積素子にとって、以下の 2 つの恩恵が得られることになる。まず 1 つ目は透磁率の変化を純粋に屈折率の変化として利用できる点である。2 つ目のパラメータを同時に制御できるということは、従来の屈折率変化 ($n+\Delta n=\sqrt{\epsilon+\Delta\epsilon}$) に比べて更に大きい変化 ($n+\Delta n=\sqrt{\epsilon+\Delta\epsilon}\sqrt{\mu+\Delta\mu}$) を引き起こすことを意味する。これは従来の InP 系光集積素子の高性能化・小型化につながる。2 つ目は、誘電率と透磁率を適当な値に設定することで‘負の屈折率’を実現できる点にある。これにより従来技術では困難であった様々な特性が光集積プラットフォーム上において可能になると考えられる

光通信帯において μ が 1 である理由は、巨視的な磁化が高周波磁界に追従できないためである。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する研究が盛んに行われている。このような人工物質を総称してメタマテリアルと呼ぶ。‘メタマテリアルの歴史’は‘微細化に伴う高周波化の歴史’でもあり、1999 年の提案以来、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きた。そのようなメタマテリアルの次世代のトレンドとは、それらを実際にデバイスとして利用することにある。この目的のもと、近年になって MEMS や a-Si などと融合することでいくつかの素子が報告されている（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）。

本申請研究では、光通信素子として最も一般的である InP 系光集積素子に注目し、従来技術に‘メタマテリアル’の概念を導入することで、デバイス内の誘電率および透磁率の値を制御し、集積型光無線受信器の実現を行うことを目標とした。その目標に向けて、光集積素子にメタマテリアルを実装し、透磁率の変化を観測、また、外部信号によって、メタマテリアルの動的制御にも成功し、それをベースとする光スイッチング（変調）素子の開発を行った。

2. 研究の内容(手法、経過、評価など)

本研究は、(a) フォトニクスとしての先端的な半導体光素子を開発する技術と、(b) 応用光学としてのメタマテリアル（金属微細共振器アレイ構造）の作製・評価技術とを融合することにより、新しい研究分野・産業技術シーズを開拓する試みである。研究期間内では、以下の項目(A)(B)を設定し研究を推進してきた。

研究項目 (A) : 化合物半導体のキャリアを用いたメタマテリアルの特性評価

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ことを目標とした。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した (Fig. 1 に構造を記載)。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 以外の値を取るようになる。

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った。基礎データとしてフーリエ変換型赤外分光 (FT-IR) を用いて測定を行った結果、キャリア生成によってメタマテリアルの透磁率が変化する様子を観測することに成功した。

2. 研究の内容(続き)(書ききれない場合には、同一形態のページを追加しても結構です)

研究項目 (B) : メタマテリアル装荷型光変調器の作製

上記の研究項目(A)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、無線受信機の前段階として、集積型スイッチ素子の設計を行った。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、それらの技術を応用することでデバイスの作製を行った。

素子の作製プロセスは以下に示すとおりである。はじめに MOVPE により半絶縁性 InP 基板上に $\text{Ga}_{0.23}\text{In}_{0.77}\text{As}_{0.5}\text{P}_{0.5}$ コア層($\lambda_g=1.22\mu\text{m}$, 200nm)、 $n\text{-InP}$ クラッド層(400 nm)、 $u\text{-InGaAs}$ フィン層(75 nm)を成長した。その後、電子線描画(EBL)により PMMA でフィンアレイのパターンを形成し、それをマスクに CH_4/H_2 反応性イオンエッチング(RIE)を行うことで InGaAs フィンアレイを作製した。次に原子層堆積 (ALD) を用いて Al_2O_3 絶縁膜を 10 nm 堆積し、その上に、EBL および lift-off プロセスにより金属リング (Au 20nm / Ti 5nm) を作製した。微細金属共振器の形状については、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 Split-ring resonator (SRR) を採用した。TGM を形成後、100nm の SiO_2 薄膜を Plasma-CVD により堆積し、それをマスクとして EBL および RIE を用いて、最終的なデバイス構造を作製した。

上記プロセスにより作製されたデバイスの光学顕微鏡画像を Fig. 2a に示す。Fig. 2a 上図はチップ鳥瞰図、Fig. 2a 下図は MZ 構造を有する素子単体を拡大したものである。今回の実験では、TGM を有する MZ のアーム長は $200\mu\text{m}$ に固定しており、アーム部全体にゲート電圧を印加するように電極パッドを形成した。Fig. 2c に作製した TGM の走査電子顕微鏡 (SEM) 画像を示す。ここで、金属リングの細線幅およびギャップ幅は各々 50 nm, 75 nm となるよう設計した。

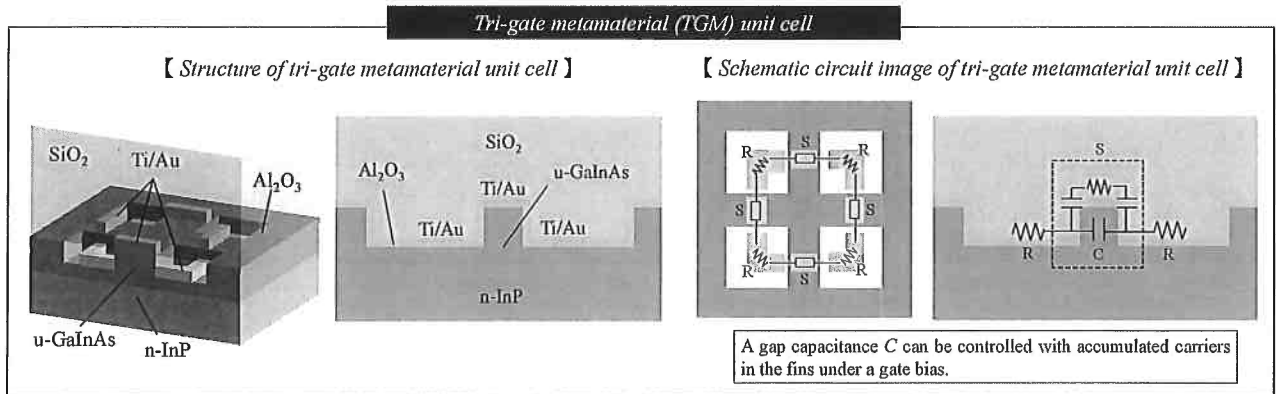


Fig. 1. Unit cell of tri-gate metamaterials consisting of a SRR and triple-gate field effect elements.

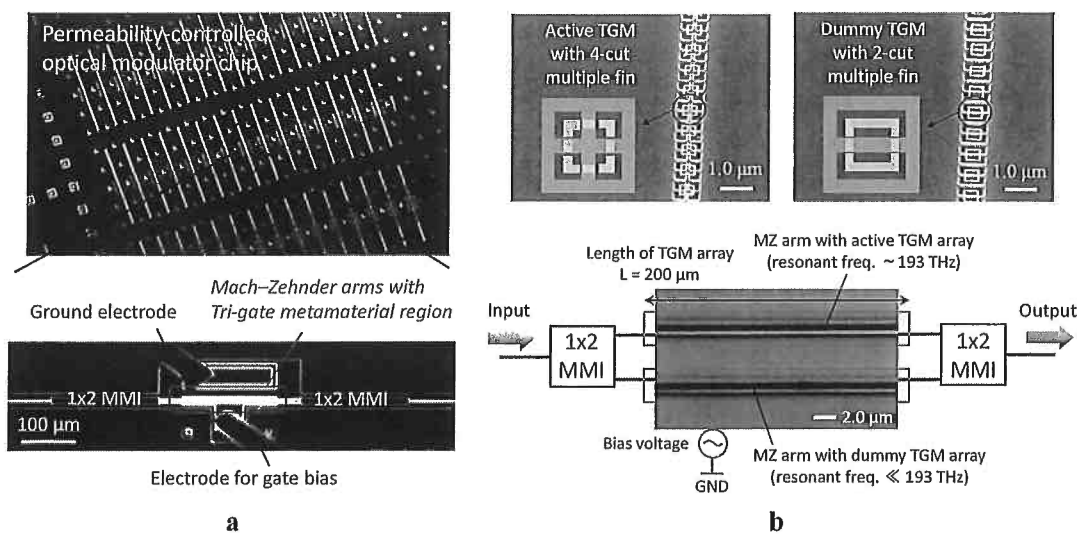


Fig. 2. Permeability-controlled optical modulator. a, Plan view observed with an optical microscope. b, Oblique view of active and dummy TGM arrays (before MZI pattern formation) observed by scanning electron microscopy. The length of the TGM array along the arm was set to $200\mu\text{m}$. The phase difference between the two arms is dependent only on the permeability change of the active TGM array and is independent of parasitic factors.

3. 研究の結論、今後の課題

本素子における MZ アームそれぞれに、以下 2 種類の TGM が使われている。一つは光通信帯 (=190THz) 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 (Fig. 2b 左上)、2 節において説明した構造である (これをアクティブ 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、1.5 μm 帯よりも低周波領域 (<100 THz) に共振ピークをもつダミー-TGM である (Fig. 2b 右上)。以降、それぞれのアームについての呼称をアクティブ TGM アーム、ダミー-TGM アームとする。

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、1550nm に対する透過光強度のゲート電圧依存性を観測した。Fig. 3a に TE モード光入射時における測定結果を示す。各データは各々 TGM のサイズが 300 \times 300nm, 350 \times 350nm, 400 \times 400nm のものである。TGM のサイズが 300 \times 300nm の素子に限って、ゲート電圧印加に依存して透過光強度の増加が見られた。これは、電圧印加に伴って片方のアームに配置されたアクティブ TGM の共振周波数がブルーシフトし、透磁率が 1 に近づいたためである。これにより、アクティブ TGM の特性がダミー-TGM に近づき、両アーム間の位相差が減少したと考えられる。実験で得られた消光比は 6.9dB であり、変調電圧はおよそ 2-12V の間であった。これは 300 \times 300nm のサイズの TGM のみ光通信帯にて透磁率変化が起こることを意味しており、この事実は FTIR の透過スペクトル測定とも一致を見ている。

Fig. 3b に、TGM のサイズが 300 \times 300nm 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、0V から 20V、50 μm から 1mm まで変化させた。解析結果に加えて、Fig. 3a における実験結果も同時にプロットした。これにより、アーム長 200 μm において、実験値と理論値が一致していることが見て取れる。また、アーム長 500 μm のときに最大で 15dB 程度の消光比が得られることも見積もられた。これは純粋に透磁率の変化のみを利用したときの特性であり、誘電率も同時に制御することができれば、更なる高性能化が期待できる。

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 (左手系光制御デバイス) を実現することを目指す。その一例として、本稿では、光通信帯域におけるメタマテリアルの動的制御をベースとしたデバイスとして「透磁率」を制御することによる光変調器を提案し、基本的動作を得ることに成功した。以降、透磁率に加えて従来どおり誘電率も制御することで小型かつ高性能な光変調器の実現を行い、本技術を利用して小型の光無線受信器まで実現する予定である。

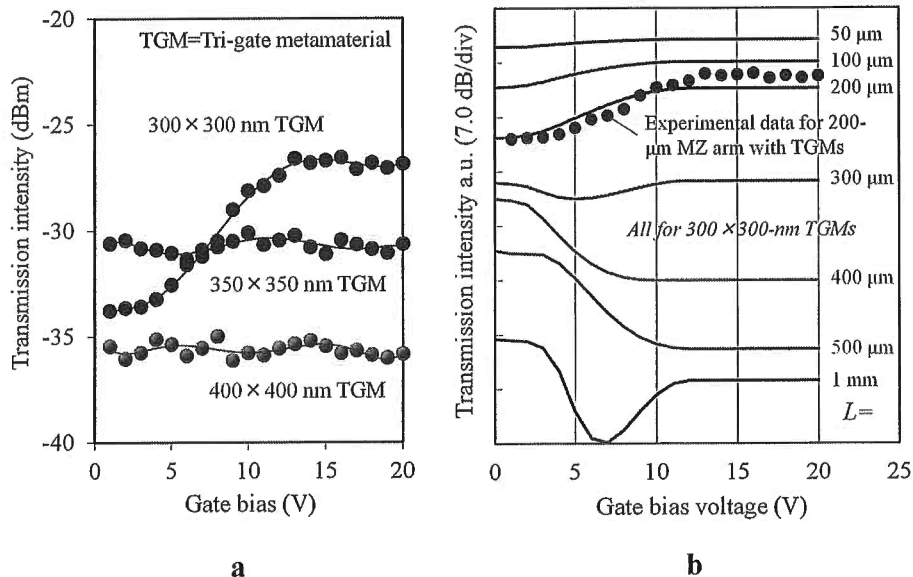


Fig. 3. Operation of permeability-controlled optical modulator. a, Transmission intensity as a function of gate voltage measured for 1550 nm TE-polarized parallel light. Results for three TGMs with different SRR ring sizes of 300 \times 300 nm, 350 \times 350 nm, and 400 \times 400 nm are plotted. b, Transmission intensity change as a function of gate voltage calculated for different lengths of the TGM array on the MZI arm. Measured result for a length of 200 μm is also plotted.

4. 成果の価値(とくに判りやすく書いて下さい)

4. 1. 社会的価値

光通信技術におけるロードマップには、必須要素技術の中に「低消費電力化」があり、特にチップ内の電氣的な通信処理速度の限界を超えることを目標としている。今回の研究開発により、変調領域における消費電力の低減につながり、汎用の電子機器における通信処理の省エネルギー化に大きく貢献すると考えられる。

4. 2. 学術的価値

本研究内容は、前述したように2つに分かれているが、そのいずれも「光機能素子」には不可欠な動的特性である。ここではまとめの意味も含めて各々の研究に対する展望を述べる。

- (A) まず、“キャリアダイナミクスを利用したメタマテリアルの制御”に関する研究については、半導体中のキャリアのダイナミクスを利用することにより、アクティブ素子を作製することを目指す。実際、通信波長帯域にて動作する機能素子は、ほぼ全て化合物半導体から構成されているのが現状であり、高周波化の研究が進んだメタマテリアルをそれらに応用する場合もできるだけ同系列の物質に沿うことが望ましい。よって、その可能性を見出す意味でも本研究における意義は大きいと考えられる。
- (B) 次に、“メタマテリアルの制御をベースとした光機能素子”については、メタマテリアル初の集積型変調素子を目標とする研究であり、世界的に見ても今回の提案が初めてだと考えられる。従来、メタマテリアルは物質の誘電率・透磁率を変化させることに主題が置かれてきたが、それを化合物半導体と融合させることで光通信素子にまでを考えに含めた研究は行われていなかった。そのような点からも、本研究は新規性にあふれていると思われる。将来的にメタマテリアルを利用した光集積回路が実現すれば、基礎物理学の領域を超えたメタマテリアルの次世代の方向性を示すことも予想される。

4. 3. 成果論文(本研究で得られた論文等を年代順に書いて下さい。未発表のものは公表予定を書いて下さい)

論文 (2012年度以降)

- [1] **Tomohiro Amemiya**, Eijun Murai, Zhichen Gu, Nobuhiko Nishiyama, Shigehisa Arai, “GaInAsP/InP-Based Optical Modulator Consisting of Gap-Surface-Plasmon-Polariton Waveguide: Theoretical Analysis,” to be published, *Journal of Optical Society of America B*.
- [2] Zhichen Gu, **Tomohiro Amemiya**, Atsushi Ishikawa, Joonhyun Kang, Takuo Hiratani, Yusuke Hayashi, Junichi Suzuki, Nobuhiko Nishiyama, Takuo Tanaka, and Shigehisa Arai, “Investigation of Optical Interconnection by Using Photonic Wire Bonding,” to be published, *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*.
- [3] Atsushi Ishikawa, **Tomohiro Amemiya**, Yuya Shoji, Pham Nam Hai, Masaaki Tanaka, Tetsuya Mizumoto, Shigehisa Arai, and Takuo Tanaka, “Optical and Magnetic Microstructures in YIG Ferrite Fabricated by Femtosecond Laser,” to be published, *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*.
- [4] Junichi Suzuki, Yusuke Hayashi, Yuki Kuno, JoonHyun Kang, **Tomohiro Amemiya**, Nobuhiko Nishiyama, and Shigehisa Arai, “Surface Assessment after Removing III-V Layer on III-V/SOI Wafer Fabricated by Plasma Activated Bonding,” to be published, *Japanese Journal of Applied Physics*.
- [5] Daisuke Inoue, Jieun Lee, Kyohei Doi, Takuo Hiratani, Yuki Atsugi, **Tomohiro Amemiya**, Nobuhiko Nishiyama, and Shigehisa Arai, “Room-temperature continuous-wave operation of GaInAsP/InP lateral-current-injection membrane laser bonded on Si substrate,” *Applied Physics Express*, Vol. 7, No. 7, 072701 (2014).
- [6] JoonHyun Kang, Yuki Atsumi, Yuusuke Hayashi, Junichi Suzuki, Yuki Kuno, **Tomohiro Amemiya**, Nobuhiko Nishiyama, Shigehisa Arai, “Amorphous-Silicon Inter-Layer Grating Couplers with Metal Mirrors toward 3D Interconnection,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 20, No. 4, 8202308 (2014).
- [7] Kyohei Doi, Takahiko Shindo, Jieun Lee, **Tomohiro Amemiya**, Nobuhiko Nishiyama, Shigehisa Arai, “Thermal Analysis of Lateral-Current-Injection Membrane Distributed Feedback Laser,” *IEEE Journal of Quantum Electron.*, Vol. 50, No. 5, pp. 321-326 (2014).
- [8] JoonHyun Kang, Yuki Atsumi, Yuusuke Hayashi, Junichi Suzuki, Yuki Kuno, **Tomohiro Amemiya**, Nobuhiko Nishiyama, Shigehisa Arai, “50 Gbps data transmission through amorphous silicon interlayer grating couplers,” *Applied Physics Express*, Vol. 7, No. 3, 032202 (2014).
- [9] **Tomohiro Amemiya**, Atsushi Ishikawa, Yuya Shoji, P. N. Hai, Masaaki Tanaka, Tetsuya Mizumoto, Takuo Tanaka, Shigehisa Arai, “Three-dimensional Nanostructuring in YIG Ferrite with Femtosecond Laser,” *Optics Letters*, Vol. 39, No. 2, pp. 212-215 (2014).

成果論文(つづき)

- [11] Takahiko Shindo, Takayuki Koguchi, Mitsuaki Futami, Kyohei Doi, Yoshiaki Yamahara, Jieun Lee, **Tomohiro Amemiya**, Nobuhiko Nishiyama, Shigehisa Arai, "10 Gbps Operation of Top Air-Clad Lateral Junction Waveguide-Type Photodiodes, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 52, No. 11, 118002 (2013).
- [12] 雨宮 智宏, 荒井 滋久. 【解説】 オンチップ光通信に向けたプラズモニクス - 世界の今とこれから -, 光アライアンス (日本工業出版), Vol. 24, No. 9, pp. 42-48 (2013).
- [13] Takahiko Shindo, Mitsuaki Futami, Tadashi Okumura, Ryo Osabe, Takayuki Koguchi, **Tomohiro Amemiya**, Nobuhiko Nishiyama, Shigehisa Arai, "Lateral-Current-Injection Type Membrane DFB Laser With Surface Grating, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 25, No. 13, pp. 1282-1285 (2013).
- [14] Takahiko Shindo, Mitsuaki Futami, Kyohei Doi, **Tomohiro Amemiya**, Nobuhiko Nishiyama, Shigehisa Arai, "Lateral-Current-Injection Type Membrane Distributed Feedback Lasers for On-chip Optical Interconnections, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 19, No. 4, 1502009, (2013).
- [15] Noriaki Sato, Mizuki Shirao, Takashi Sato, Masashi Yukinari, Nobuhiko Nishiyama, **Tomohiro Amemiya**, Shigehisa Arai, "Design and Characterization of AlGaInAs/InP Buried Heterostructure Transistor Lasers Emitting at 1.3- μ m Wavelength, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 19, No. 4, 1502608 (2013).
- [16] 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- μ m Wavelength, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 25, No. 8, pp. 728-730 (2013).
- [17] 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, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 51, No. 12, 120203 (2012).
- [18] 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 (2012).
- [19] Seiji Myoga, **Tomohiro Amemiya**, Atsushi Ishikawa, Nobuhiko Nishiyama, Takuo Tanaka, Shigehisa Arai, "Carrier-concentration-dependent resonance frequency shift in a metamaterial loaded semiconductor, *Journal of Optical Society of America B*, Vol. 29, No. 8, pp. 2110-2115 (2012).
- [20] **Tomohiro Amemiya**, Seiji Myoga, Takahiko Shindo, Eijun Murai, Nobuhiko Nishiyama, Shigehisa Arai, "Permeability retrieval in InP-based waveguide optical device combined with metamaterial, *Optics Letters*, Vol. 37, No. 12, pp. 2301-2303 (2012).
- [21] 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 Technology Letters*, Vol. 24, No. 11, pp. 888-890 (2012).
- [22] 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 Journal of Quantum Electronics*, Vol. 48, No. 5, pp. 688-695 (2012).

著書 (2012年度以降)

- [1] 雨宮 智宏, 『透明マントを求めて 天狗の隠れ蓑からメタマテリアルまで』 ディスカヴァー・トゥエンティワン, 240 ページ, ISBN : 978-4-7993-1502-6, Jun. 2014.
- [2] **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.

国際会議 (2012年度以降)

- [1] **Tomohiro Amemiya**, "(Invited) Optical metamaterials for advanced photonic integrated circuits," *The International Conference on Small Science (ICSS 2014)*, to be presented, Dec. 2014.
- [2] Takuo Hiratani, Yuki Atsugi, Jieun Lee, Daisuke Inoue, **Tomohiro Amemiya**, Nobuhiko Nishiyama, and Shigehisa Arai, "Electrode Position Dependence of Energy Cost in Lateral-Current-Injection Membrane Distributed Reflector Laser," *The 24th IEEE International Semiconductor Laser Conference (ISLC 2014)*, TuP.04, Sep. 2014.
- [3] Daisuke Inoue, Jieun Lee, Takuo Hiratani, Yuki Atsugi, **Tomohiro Amemiya**, Nobuhiko Nishiyama, and Shigehisa Arai, "GaInAsP/InP Lateral-Current-Injection Membrane DFB Laser Integrated with GaInAsP Waveguides on Si Substrate," *The 24th IEEE International Semiconductor Laser Conference (ISLC 2014)*, MB.03, Sep. 2014.
- [4] Yuki Kuno, JoonHyun Kang, Yusuke Hayashi, Junichi Suzuki, **Tomohiro Amemiya**, Nobuhiko Nishiyama, Shigehisa Arai, "High Efficiency Apodized Grating Couplers with Metal Mirrors between a-Si:H Multilayer Waveguides toward 3D Optical Interconnection," *The 46th Solid State Devices and Materials (SSDM 2014)*, B-2-2, Sep. 2014.
- [5] **Tomohiro Amemiya**, Toru Kanazawa, Atsushi Ishikawa, JoonHyun Kang, Nobuhiko Nishiyama, Yasuyuki Miyamoto, Takuo Tanaka, Shigehisa Arai, "(Invited) Meta-photonics for Advanced InP-based Photonic Integration," *The Collaborative Conference on Materials Research (CCMR 2014)*, Day1. p.85, Jun. 2014.
- [6] Zhichen Gu, **Tomohiro Amemiya**, Atsushi Ishikawa, Yuki Atsumi, JoonHyun Kang, Yusuke Hayashi, Junichi Suzuki, Eijun Murai, Takuo Hiratani, Nobuhiko Nishiyama, Takuo Tanaka, Shigehisa Arai, "Investigation of Optical Interconnection using Photonic Wire Bonding," *The 15th International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM 2014)*, We2-O-1, Jun. 2014.

成果論文(つづき)

- [7] Atsushi Ishikawa, **Tomohiro Amemiya**, Yuya Shoji, Pham Nam Hai, Masaaki Tanaka, Tetsuya Mizumoto, Shigehisa Arai, Takuo Tanaka, "(Invited) Optical and magnetic microstructures in YIG ferrite fabricated by femtosecond laser," *The 15th International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM 2014)*, Fr1-In-7, Jun. 2014.
- [8] **Tomohiro Amemiya**, Atsushi Ishikawa, Yuya Shoji, Pham Nam Hai, Masaaki Tanaka, Tetsuya Mizumoto, Takuo Tanaka, Shigehisa Arai, "Three-dimensional Nanostructuring in YIG Ferrite with Femtosecond Laser," *The Conference on Lasers and Electro-Optics 2014 (CLEO 2014)*, STh1J.5, Jun. 2014.
- [9] Masato Taki, **Tomohiro Amemiya**, "Asymmetric Invisibility Cloaking Theory Based on Effective Electromagnetic Field for Photon, the 5th International Conference on Metamaterials," *The 5th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META'14)*, 4A32, May. 2014.
- [10] Takuo Hiratani, Kyohei Doi, Yuuki Atsudi, **Tomohiro Amemiya**, Nobuhiko Nishiyama, Shigehisa Arai, "Low-Power and High-Speed Operation Capabilities of Semiconductor Membrane Lasers - Energy Cost Limited by Joule Heat," *Compound Semiconductor Week 2014: 26th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM 2014)*, P29, May. 2014.
- [11] Yuuki Atsudi, Kyohei Doi, Jieun Lee, Yuki Atsumi, Takuo Hiratani, Daisuke Inoue, **Tomohiro Amemiya**, Nobuhiko Nishiyama, Shigehisa Arai, "Low-threshold-current Operation of Lateral Current Injection Membrane Distributed-feedback Laser Bonded on Si," *Compound Semiconductor Week 2014: 26th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM 2014)*, We-D2-2, May. 2014.
- [12] Jieun Lee, Kyohei Doi, Takuo Hiratani, Daisuke Inoue, **Tomohiro Amemiya**, Nobuhiko Nishiyama, Shigehisa Arai, "SiO₂ Thickness Dependence of Bandgap Wavelength Shift in Quantum-well Intermixing for Photonic Integration," *Compound Semiconductor Week 2014: 26th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM 2014)*, P28, May. 2014.
- [13] **Tomohiro Amemiya**, Masato Taki, Toru Kanazawa, Shigehisa Arai, "Asymmetric Invisibility Cloaking Theory Based on the Concept of Effective Electromagnetic Fields for Photons," *APS March Meeting 2014*, Z50.00014, Mar. 2014.
- [14] **Tomohiro Amemiya**, "(Invited) Photonic metamaterials for InP-based optical communication devices," *3rd International Conference on Nanotek and Expo (Nanotek 2013)*, Track 5-2, Dec. 2013.
- [15] **Tomohiro Amemiya**, Toru Kanazawa, Atsushi Ishikawa, Seiji Myoga, JoonHyun Kang, Nobuhiko Nishiyama, Yasuyuki Miyamoto, Takuo Tanaka, Shigehisa Arai, "(Invited) Photonic metamaterials in semiconductor optical devices," *2013 EMN Open Access Week*, Oct. 2013.
- [16] JoonHyun Kang, Yuki Atsumi, Takeshi Sifer, Yuusuke Hayashi, **Tomohiro Amemiya**, Nobuhiko Nishiyama, Shigehisa Arai, "Inter-Layer Grating Coupler with Metal Mirrors for 3D Optical Interconnects," *The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2013)*, MM1-5, Jul. 2013.
- [17] Shigehisa Arai, Nobuhiko Nishiyama, **Tomohiro Amemiya**, Takahiko Shindo, Mitsuaki Futami, Kyohei Doi, "(Invited) Lateral Current Injection Type Membrane DFB lasers," *The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2013)*, ThK2-1, Jul. 2013.
- [18] Shigehisa Arai, Nobuhiko Nishiyama, **Tomohiro Amemiya**, Takahiko Shindo, J. Lee, Mitsuaki Futami, Kyohei Doi, Takuo Hiratani, "(Invited) Semiconductor Membrane Photonic Devices for Ultra-low Power Consumption Operation," *IEEE Photonics Society Summer Topicals 2013*, WA1.1, Jul. 2013.
- [19] **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)*, QM1A.6, Jun. 2013.
- [20] Kyohei Doi, Takahiko Shindo, Mitsuaki Futami, Jieun Lee, Takuo Hiratani, Daisuke Inoue, Shu Yang, **Tomohiro Amemiya**, Nobuhiko Nishiyama, Shigehisa Arai, "Room-temperature Continuous-wave Operation of Lateral Current," *25th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM 2014)*, WeD2-3, May. 2013.
- [21] Daisuke Inoue, Jieun Lee, Takahiko Shindou, Mitsuaki Futami, Kyohei Doi, **Tomohiro Amemiya**, Nobuhiko Nishiyama, Shigehisa Arai, "Butt-Joint Built-in (BJB) Structure for Membrane Photonic Integration," *25th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM 2014)*, TuD3-6, May. 2013.
- [22] Jieun Lee, Yoshiaki Yamahara, Takahiko Shindou, Mitsuaki Futami, **Tomohiro Amemiya**, Nobuhiko Nishiyama, Shigehisa Arai, "Bandgap Wavelength Shift in Quantum Well Intermixing using Different SiO₂ masks for Photonic Integration," *25th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM 2014)*, MoPI-12, May. 2013.
- [23] JoonHyun Kang, Nobuhiko Nishiyama, Yuki Atsumi, **Tomohiro Amemiya**, Shigehisa Arai, "(Invited) Multi-stacked silicon wire waveguides and couplers toward 3D optical interconnects," *SPIE Photonics West 2013 (OPTO 2013)*, 8630-7, Feb. 2013.
- [24] **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)*, FRI5o.2, Jan. 2013.
- [25] Noriaki Sato, Mizuki Shirao, Takashi Sato, Masashi Yukinari, Nobuhiko Nishiyama, **Tomohiro Amemiya**, Shigehisa Arai, "Room-Temperature Continuous-Wave Operation of a 1.3- μm npn-AlGaInAs/InP Transistor Laser," *23rd IEEE International Semiconductor Laser Conference (ISLC 2012)*, MA7, Oct. 2012.

成果論文(つづき)

- [26] Takahiko Shindo, Mitsuaki Futami, Kyohei Doi, Tomohiro Amemiya, Nobuhiko Nishiyama, Shigehisa Arai, "Modulation Bandwidth of GaInAsP/InP Lateral-Current-Injection Membrane Laser," *23rd IEEE International Semiconductor Laser Conference (ISLC 2012)*, TuP17, Oct. 2012.
- [27] Tomohiro 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, Oct. 2012.
- [28] Kyohei Doi, Takahiko Shindou, Mitsuaki Futami, Tomohiro Amemiya, Nobuhiko Nishiyama, Shigehisa Arai, "Thermal Analysis of Self-Heating Effect in GaInAsP/InP Membrane DFB Laser on Si Substrate," *2012 IEEE Photonics Conference (IPC-2012)*, ThO2, Sep. 2012.
- [29] Mitsuaki Futami, Takahiko Shindo, Kyohei Doi, Tomohiro Amemiya, Nobuhiko Nishiyama, Shigehisa Arai, "Low-Threshold Operation of LCI-Membrane-DFB Lasers with Be-doped GaInAs Contact Layer," *24th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM 2012)*, Th-2C.5, Aug. 2012.
- [30] Jieun Lee, Yoshiaki Yamahara, Yuki Atsumi, Takahiko Shindou, Tomohiro Amemiya, Nobuhiko Nishiyama, Shigehisa Arai, "Compact InP-based 1×2 MMI Splitter on Si Substrate with BCB Wafer Bonding for Membrane Photonic Circuits," *24th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM 2012)*, Mo-1C.1, Aug. 2012.
- [31] Takahiko Shindo, Takayuki Koguchi, Mitsuaki Futami, Keisuke Shinno, Kyohei Doi, Tomohiro Amemiya, Nobuhiko Nishiyama, Shigehisa Arai, "10 Gb/s Operation of GaInAs/InP Top Air-Clad. Lateral Junction Waveguide-type Photodiode," *2012 IEEE Optical Interconnects Conference (OIC 2012)*, TuP2, May. 2012.
- [32] JoonHyun Kang, Yoshihiro Nishikawa, Yuki Atsumi, Manabu Oda, Tomohiro Amemiya, Nobuhiko Nishiyama, Shigehisa Arai, "Amorphous Silicon Grating-Type Layer-to-Layer Couplers for Intra-Chip Connection," *2012 IEEE Optical Interconnects Conference (OIC 2012)*, TuD3, May. 2012.

他 国内会議 47 件 (2012 年度 以降)