

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2013～2014

課題番号：25420321

研究課題名(和文)化合物半導体キャリアによるメタマテリアルの動的制御を用いた小型光変調器の開発

研究課題名(英文)InP-based waveguide optical modulator using the concept of metamaterials

研究代表者

兩宮 智宏 (Tomohiro, Amemiya)

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：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を総称して、「メタマテリアル」と呼ぶ。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。本研究では、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をInP系光通信素子に融合することで、メタマテリアルの動的制御を行うとともに、それを利用した「集積型光変調器」を試作することに成功した。

研究成果の概要(英文)：Metamaterials promise ground-breaking new functionalities such as a negative index of refraction, invisibility, and imaging with super resolution. One new trend in this field is to think of metamaterials as devices in which the structure of the metal and the hybridization with functional agents bring new functionality. We report the experimental demonstration of a permeability-controlled waveguide optical modulator consisting of an InGaAsP/InP Mach-Zehnder interferometer with tri-gate metamaterial attached on its arms. The tri-gate metamaterial consists of metal resonator arrays and triple-gate field effect elements. Its permeability changes with changes in the gate bias voltage from 2 to 12 V, thereby changing the refractive index to switch the modulator with an extinction ratio of 6.9 dB at a wavelength of 1.55 μm . The result shows the feasibility of InP-based photonic integrated devices that can produce new functions by controlling their permeability as well as their permittivity.

研究分野：集積フォトニクス

キーワード：集積フォトニクス 光メタマテリアル 化合物半導体

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を総称して、「メタマテリアル」と呼ぶ。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しい概念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」などの発展に寄与すると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、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を InP 系光通信素子に融合することで、新しいデバイスフロンティアを拓く。具体的には、基礎研究段階としてメタマテリアルの動的制御を行うとともに、それを利用した「集積型光変調器」を試作することで、光集積回路を構成するために必要なデバイス群としてメタマテリアル(誘電率・透磁率の同時制御)が応用につながることを示す。

光通信帯(波長 1.3 μm および 1.55 μm)において、全ての物質の比透磁率 μ は 1 である。これは、光周波数程度の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。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通信用光素子においては、誘電率のみで議論が行われており、多くの素子において、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、高周波領域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使っ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。

本研究では、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を、化合物半導体をベースとした光通信素子に利用することで新規のデバイスを創製する。具体的には、

光通信周波数(193THz)において、外部入力によるメタマテリアルの動的制御を行うとともに、それを利用した導波路型変調器の実現を試みる。

3. 研究の方法

開発予定の素子は、マッハツェンダー干渉器の各アームに微細共振器(メタマテリアル)が一列に埋め込まれた構造をとる。本素子において、干渉器の各アームにおけるメタマテリアル群は、外部信号によって透磁率に変化が起こる性質を持っている必要がある。特に、本研究では外部信号として電圧による制御を考えており、これは特に光通信帯域(1.55 μm)におけるメタマテリアルでは、世界でほとんど報告されていないのが現状である。そのため申請研究では、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制御に焦点を当て、以下の手順で研究を遂行した。

【電圧制御可能なメタマテリアルの設計】

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。

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。実際のメタマテリアル特性の解析には実験結果にフィッティングする形で電磁界解析が必須であり(助成金使途内訳参照),これにより半導体内のキャリア濃度によってメタマテリアルの透磁率が変化する周波数(波長)にシフトが現れる様子を観測した。

【素子の作製と評価】

以上の議論にもとづいて、実際に微細共振器アレイの誘電率・透磁率が半導体キャリアによってどの程度変化するかを見積った後、光変調器の設計・作製を行った。

4. 研究成果

本研究は「メタマテリアルを利用することで新たな光通信デバイスを作り出すこと」を目標としているが、光集積回路内にメタマテリアルを実装するという目的から下記 A, B の2つの制約が必須となり、本申請研究をとおして、各々の基礎実証を完了させることに成功した。

A. 電気的な透磁率の制御

光通信に限らず、メタマテリアルを何らかのデバイスとして用いる場合の必須事項は、メタマテリアル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、メタマテリアル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。そのため本研究では、メタマテリアル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を採用した。メタマテリアル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、メタマテリアル全体として、特性制御がなされているようにする。

具体的には、化合物半導体(インジウムヒ素)上に浅い溝を掘り、その内部にナノスケールの金属構造を作りこむことで、電圧制御が可能な特殊なメタマテリアルの開発に成功した。この構造では、上部から電圧を印加することで、半導体内のキャリア密度を変化させることができ、それに伴って金属微細構造の応答(=メタマテリアルの特性)に変化が生じる(キャリア発現の原理は3次元トランジスタと同一)。これにより、電圧印加の有無によって、透磁率の値を制御できることになる。

B. 電気的な透磁率の制御

上記のトライゲートメタマテリアル技術を光通信デバイスへ実装することで、「透磁率制御による強度変調」を実現した。このデバイスは、マッハツェンダー干渉器の各アームにトライゲートメタマテリアルが一列に埋め込まれた構造となっており、デバイス上部から電圧をかけ、アーム部の透磁率を変化させることで強度変調を行う。透磁率を制御することで、本来屈折率の可変幅が狭い InP 系デバイス内において大きな屈折率変化($n + \Delta n = \sqrt{\epsilon + \Delta\epsilon}$)を持たせることが可能となり、結果として、200 μm のデバイス長において約7.0dBの強度変調を得ることに成功した。

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 20 件)

1. Zhichen Gu, Tomohiro Amemiya, Atsushi Ishikawa, Yuki Atsumi, Joonhyun Kang, Takuo Hiratani, Yusuke Hayashi, Junichi Suzuki, Nobuhiko Nishiyama, Takuo Tanaka, and Shigehisa Arai, "Investigation of Optical Interconnection by Using Photonic Wire Bonding," *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, Vol. 10, No. 2, pp. 148-153 (2015).
2. Tomohiro Amemiya, Atsushi Ishikawa, Toru Kanazawa, JoonHyun Kang, Nobuhiko Nishiyama, Yasuyuki Miyamoto, Takuo Tanaka, and Shigehisa Arai, "Permeability-controlled Optical Modulator with Tri-gate Metamaterial: Control of Permeability on InP-based Photonic Integration Platform," *Scientific Reports*, Vol. 5, Issue 8985 (2015).
3. Daisuke Inoue, Jieun Lee, Takuo Hiratani, Yuki Atsugi, Tomohiro Amemiya, Nobuhiko Nishiyama, and Shigehisa Arai, "Sub-milliamper threshold operation of butt-jointed built-in membrane DFB laser bonded on Si substrate," *Optics Express*, Vol. 23, Issue 6, pp. 7771-7778 (2015).
4. Yuki Kuno, JoonHyun Kang, Yusuke Hayashi, Junichi Suzuki, Tomohiro Amemiya, Nobuhiko Nishiyama, Shigehisa Arai, "Design of Apodized Hydrogenated Amorphous Silicon Grating Couplers with Metal Mirrors for Inter-layer Signal Coupling: Toward Three-dimensional Optical Interconnection," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 54, No. 4S, 04DG04 (2015).
5. Takuo Hiratani, Kyohei Doi, Jieun Lee, Daisuke Inoue, Tomohiro Amemiya, Nobuhiko Nishiyama, and Shigehisa Arai, "Thermal Properties of Lateral-current-injection Semiconductor Membrane Fabry-Perot Laser under Continuous-wave Operation," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 54, No. 4, 042701 (2015).
6. 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," *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, Vol. 10, No. 1, pp. 48-52 (2015).
7. Tomohiro Amemiya, Masato Taki, Toru Kanazawa, Takuo Hiratani, Shigehisa Arai, "Optical Lattice Model

- Towards Nonreciprocal Invisibility Cloaking,” IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 51, No. 3, 6100110 (2015).
8. Tomohiro Amemiya, Eijun Murai, Zhichen Gu, Nobuhiko Nishiyama, Shigehisa Arai, “GaInAsP/InP-Based Optical Modulator Consisting of Gap-Surface-Plasmon-Polariton Waveguide: Theoretical Analysis,” Journal of Optical Society of America B, Vol. 31, No. 11, pp. 2908-2913 (2014).
 9. 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,” Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 53, No. 11, 118003 (2014).
 10. Daisuke Inoue, Jieun Lee, Kyohei Doi, Takuo Hiratani, Yuki Atsuji, 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).
 11. 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).
 12. 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 Electronics, Vol. 50, No. 5, pp. 321-326 (2014).
 13. 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).
 14. 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).
 15. 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).
 16. 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 -, 光ライアンス(日本工業出版), Vol. 24, No. 9, pp. 42-48 (2013).
 17. 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).
 18. 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).
 19. 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).

20. 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).

[学会発表](計 46 件)

1. Naoya Hojo, Tomohiro Amemiya, Zhichen Gu, Nobuhiko Nishiyama, Shigehisa Arai, “Analysis of Plasmonic Mach-Zehnder Modulator with Metal Taper Structure Embedded in FTC-EO Polymer,” The 11th Conference on Laser and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2015), 28E2-2, Aug. 2015.
2. Yuki Kuno, Kazuto Itoh, Yusuke Hayashi, Junichi Suzuki, Tomohiro Amemiya, Nobuhiko Nishiyama, and Shigehisa Arai, “Apodized Amorphous Silicon Grating Coupler with Metal Mirrors for 3D optical Interconnection,” The 11th Conference on Laser and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2015), 25J1-3, Aug. 2015.
3. Takahiro Tomiyasu, Takahiro Tomiyasu, Daisuke Inoue, Takuo Hiratani, Yuki Atsuji, Tomohiro Amemiya, Nobuhiko Nishiyama, and Shigehisa Arai, “Room-temperature Continuous-wave Operation of $\lambda/4$ -shifted Membrane Distributed Feedback Lasers,” The 11th Conference on Laser and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2015), 28J2-2, Aug. 2015.
4. Yuki Atsumi, Ryohei Takei, Makoto Okano, Tomohiro Amemiya, Youichi Sakakibara, Masahiko Mori, “Design of Feasible Silicon Interlayer Polarization Beam Splitter toward 3D Optical Integrated Circuits,” 12th International Conference on Group IV Photonics (GFP 2015), to be presented, Aug. 2015.
5. Takuo Hiratani, Daisuke Inoue, Takahiro Tomiyasu, Yuki Atsuji, Kai Fukuda, Tomohiro Amemiya, Nobuhiko Nishiyama, Shigehisa Arai, “Semiconductor Membrane Distributed-reflector (DR) Laser,” Compound Semiconductor Week 2015: 27th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM 2015), O6.1, Jul. 2015.
6. Tomohiro Amemiya, Takuo Hiratani, Daisuke Inoue, Takahiro Tomiyasu, Nobuhiko Nishiyama, Shigehisa Arai, “(Invited) Membrane photonic integration on Si platforms,” The 20th Opto Electronics and Communications Conference (OECC 2015), to be presented, Jul. 2015.
7. Tomohiro Amemiya, Atsushi Ishikawa, Toru Kanazawa, Nobuhiko Nishiyama, Yasuyuki Miyamoto, Takuo Tanaka, Shigehisa Arai, “(Invited) Possibility of permeability control on InP-based photonic integration platform,” 8th International Conference on Materials for Advanced Technologies (ICMAT 2015), D2-PM2, Jun. 2015.
8. Toru Kanazawa, Tomohiro Amemiya, Atsushi Ishikawa, Vikrant Upadhyaya, Kenji Tsuruta, Takuo Tanaka, Yasuyuki Miyamoto, “Fabrication of Thin-Film HfS₂ FET,” 73rd Device Research Conference (DRC 2015), V-A.5, Jun. 2015.
9. Zhichen Gu, Tomohiro Amemiya, Atsushi Ishikawa, Takuo Hiratani, Junichi Suzuki, Nobuhiko Nishiyama, Takuo Tanaka, Shigehisa Arai, “Optical Interconnection between III-V chips on Si by using Photonic Wire Bonding,” IEEE Optical Interconnects Conference 2015, WB5, Apr. 2015.
10. Daisuke Inoue, Jieun Lee, Takuo Hiratani, Yuki Atsuji, Tomohiro Amemiya, Nobuhiko Nishiyama, Shigehisa Arai, “Monolithically Integrated On-Chip Optical

- Interconnect Using Sub-mA Operated Membrane DFB Laser and Photodetector Bonded on Si Substrate,” IEEE Optical Interconnects Conference 2015, WB7, Apr. 2015.
11. Tomohiro Amemiya, Zhichen Gu, Atsushi Ishikawa, Yuya Shoji, Pham Nam Hai, Masaaki Tanaka, Tetsuya Mizumoto, Takuo Tanaka, Shigehisa Arai, “Magneto-Optical Integrated Circuits by femtosecond laser modelling in YIG,” Optics & Photonics International Congress (OPIC 2015), ALPSp14-59, Apr. 2015.
 12. Takuo Tanaka, Atsushi Ishikawa, Tomohiro Amemiya, “(Invited) Three-dimensional two-photon laser fabrication for metals, polymers, and magneto-optical materials,” SPIE Photonics West 2015 (LASE), 9353-21, Feb. 2015.
 13. Tomohiro Amemiya, “(Invited) Optical metamaterials for advanced photonic integrated circuits,” The International Conference on Small Science (ICSS 2014), NR-10, Dec. 2014.
 14. Zhichen Gu, Tomohiro Amemiya, Atsushi Ishikawa, JoonHyun Kang, Takuo Hiratani, Yusuke Hayashi, Junichi Suzuki, Nobuhiko Nishiyama, Takuo Tanaka, Shigehisa Arai, “Optical interconnection between III-V chips on Si by using photonic wire bonding,” 4th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence (ISPEC 2014), P-4, Nov. 2014.
 15. Daisuke Inoue, Jieun Lee, Takuo Hiratani, Yuki Atsui, Tomohiro Amemiya, Nobuhiko Nishiyama, and Shigehisa Arai, “Low-Threshold Current Operation of GaInAsP/InP Lateral-Current-Injection Waveguide Integrated Membrane DFB Laser Bonded on Si Substrate,” 4th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence (ISPEC 2014), P-6, Nov. 2014.
 16. Yuki Kuno, JoonHyun Kang, Yusuke Hayashi, Junichi Suzuki, Tomohiro Amemiya, Nobuhiko Nishiyama, and Shigehisa Arai, “High Efficiency Inter-Layer Apodized Grating Coupler with Metal Mirrors toward 3D Optical Interconnection,” 4th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence (ISPEC 2014), P-7, Nov. 2014.
 17. Yusuke Hayashi, Junichi Suzuki, Yuki Kuno, JoonHyun Kang, Tomohiro Amemiya, Nobuhiko Nishiyama, Shigehisa Arai, “GaInAsP/SOI Hybrid Laser with Ring-resonator-type Reflector Fabricated by Plasma Activated Bonding,” 4th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence (ISPEC 2014), P-8, Nov. 2014.
 18. Junichi Suzuki, Yusuke Hayashi, Yuki Kuno, JoonHyun Kang, Tomohiro Amemiya, Nobuhiko Nishiyama, and Shigehisa Arai, “Investigation of III-V Layer Removing Process in III-V/SOI Hybrid Devices,” 4th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence (ISPEC 2014), P-9, Nov. 2014.
 19. Takuo Hiratani, Yuki Atsui, Jieun Lee, Daisuke Inoue, Tomohiro Amemiya, Nobuhiko Nishiyama, and Shigehisa Arai, “Design of Electrode Position in Lateral-Current-Injection Membrane Laser,” 4th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence (ISPEC 2014), P-10, Nov. 2014.
 20. Takuo Hiratani, Yuki Atsui, 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.
 21. Daisuke Inoue, Jieun Lee, Takuo Hiratani, Yuki Atsui, 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.
 22. 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.
 23. Yusuke Hayashi, Junichi Suzuki, Yuki Kuno, JoonHyun Kang, Tomohiro Amemiya, Nobuhiko Nishiyama, Shigehisa Arai, “Investigation of High Temperature Process for III-V/SOI Hybrid Photonic Devices with AllnAs Oxidation Current Confinement Layer,” 4th IEEE International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration (LTB-3D 2014), Jul. 2014.
 24. Junichi Suzuki, Yusuke Hayashi, Yuki Kuno, JoonHyun Kang, Tomohiro Amemiya, Nobuhiko Nishiyama, Shigehisa Arai, “Light Propagation Properties of Si Waveguides after Removing III-V Layer on a III-V/SOI Wafer Fabricated by Plasma Activated Bonding,” 4th IEEE International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration (LTB-3D 2014), Jul. 2014.
 25. 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.
 26. 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.
 27. 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.
 28. 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.
 29. 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.
 30. 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.
 31. 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.
32. 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.
 33. 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.
 34. 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.
 35. Tomohiro Amemiya, “Electrically-driven Permeability Control of Photonic Metamaterials in Semiconductor Optical Devices,” 3rd International Symposium on Photonics and Electronics Convergence (ISPEC 2013), D-3, Nov. 2013.
 36. Takuo Hiratani, Kyohei Doi, Yuki Atsugi, Tomohiro Amemiya, N. Nishiyama, Shigehisa Arai, “Analysis of Energy Cost of Membrane Distributed-Reflector Lasers for On-Chip Optical Interconnection,” 3rd International Symposium on Photonics and Electronics Convergence (ISPEC 2013), P-1, Nov. 2013.
 37. Jieun Lee, Kyohei Doi, Takuo Hiratani, Daisuke Inoue, Tomohiro Amemiya, N. Nishiyama, Shigehisa Arai, “SiO₂ Mask Thickness Dependence of Bandgap Wavelength Shift in Quantum Well Intermixing for Photonic Integration,” 3rd International Symposium on Photonics and Electronics Convergence (ISPEC 2013), P-9, Nov. 2013.
 38. JoonHyun Kang, Yuki Atsumi, Yusuke Hayashi, Junichi Suzuki, Yuki Kuno, Tomohiro Amemiya, N. Nishiyama, Shigehisa Arai, “High Efficiency Inter-Layer Amorphous Silicon Grating Couplers with Metal Mirrors for On-Chip 3D Interconnects,” 3rd International Symposium on Photonics and Electronics Convergence (ISPEC 2013), P-43, Nov. 2013.
 39. 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.
 40. 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.
 41. 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.
 42. 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.
 43. 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.
44. 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.
 45. 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.
 46. 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.

〔図書〕(計 1 件)

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』 デイスクヴァー・トゥエンティワン, 240 ページ, ISBN : 978-4-7993-1502-6, Jun. 2014.

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

1. 日経エレクトロニクス 2014 年 8 月 4 日号の解説記事「波を操るメタマテリアル技術、材料からデバイスへ進化」で紹介
2. 2015 年 3 月付の各種ニュースサイト (Yahoo ニュース, Excite ニュース, Livedoor NEWS, EE Times Japan, マイナビニュース)において研究成果が公開

ホームページ等 :

研究成果を発信する個人ホームページ公開
<http://www.ametomo.info/>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

雨宮 智宏 (Tomohiro Amemiya)
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

(3)連携研究者