

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03985

研究課題名(和文) 偏波状態を利用した半導体光集積回路の開発と光通信応用

研究課題名(英文) Development of Semiconductor Photonic Integrated Circuits Utilizing the Polarization State of Light and Application to Optical Communication

研究代表者

種村 拓夫 (Tanemura, Takuo)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授

研究者番号：90447425

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、半導体光集積回路内で光の偏波状態を自在に制御・検出する技術を実現し、一連の偏波処理光集積回路を創製することを目的とした。インジウムリン(InP)基板上にハーフリッジ型偏波変換素子と量子井戸型変調器や受光素子をモノリシックに集積することで、小型かつ高効率な偏波変調素子と偏波アナライザが実現できることを提案し、素子の試作と実証に成功した。さらに、これらの素子を用いることで、高速な多値ストークスベクトル変調信号を復調できることを実証した。これらの技術は、次世代の光通信システムをはじめとし、光センシング、量子演算など、多様な分野への応用が期待される。

研究成果の概要(英文)：In this project, we aimed to develop novel devices to manipulate and detect the polarization state of light inside a semiconductor photonic integrated circuit. We first proposed and experimentally demonstrated that compact and efficient polarization modulators and polarization analyzers can be realized by monolithically integrating the half-ridge polarization converters with quantum-well-based modulators and detectors. By using developed devices, we also demonstrated high-speed decoding of multi-level Stokes-vector modulated signals. The developed technologies should have diverse applications including optical communication, sensing, and quantum computing.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：光集積回路 偏波

1. 研究開始当初の背景

レーザや受光器などの多数の光素子をインジウムリン (InP) 系半導体チップ上に集積した光集積回路 (光 IC) は、大容量光通信を支える技術として発展を遂げてきた。光 IC の集積度が上昇し続けている一方で、未だに集積が難しい光素子の一つが「偏波制御素子」である。偏波変換器 (PC) に関しては、いくつかの構造が提案・実証されているものの、いずれも素子単体の実証に留まっており、レーザをはじめとする能動光素子とモノリシックに集積した例はない。

これに対して、半導体チップ上で光の偏波状態を自在に制御する技術は、光通信、光センシング、光量子演算処理など、多様な分野での応用が期待されている。特に次世代の光通信システムでは、光の強度や位相に加えて、偏波状態を有効に活用する偏波多重通信方式やストークスペクトル変調方式が期待されており、光 IC 内で自在に偏波を操る技術のニーズが高まっている。

2. 研究の目的

本研究では、半導体光集積回路内で光の偏波状態を自在に制御・検出する技術を実現し、一連の偏波処理光 IC を創製することを目的とした。具体的には、応募者がこれまでに提案したハーフリッジ型 PC、および、偏波変調素子の高性能化を進め、InP 系レーザや受光素子とモノリシックに集積する技術を開発する。その上で、ストークスペクトル変復調回路への応用可能性を検証することを目指す。

3. 研究の方法

まず、各種偏波処理光 IC の実現に向けて、PC 素子の歩留まりを向上することが重要である。そこで、作製誤差への耐性向上を目指し、ドライエッチストップ層を導入した新規構造を検討した。具体的には、InGaAsP コア中に薄い InAlAs 層を導入し、CH₄/H₂ ガスによる誘導性結合プラズマ反応性イオンエッチング (ICP-RIE) プロセスの選択比を利用することで、エッチング深さを精度良く制御した。並行して、ハーフリッジ型偏波回転素子とモノリシックに集積できる偏波多重/分離素子を設計し、試作検証を行った。

偏波変調回路に関しては、変調効率の改善に向けて、量子井戸層を導入した新しい構造を検討した。最適な量子井戸構造を設計し、バットジョイント結晶再成長手法を用いて素子を試作した。さらに、偏波復調回路として、PC と量子井戸受光素子をモノリシックに集積した偏波アナライザを新規に提案し、素子の設計を行った。その上で、オフセット量子井戸手法を用いて素子の試作し、偏波検出機能を実験的に検証した。さらに、パッシブ回路部を用いて、ストークスペクトル変調信号の検出実験を行った。

4. 研究成果

図 1 に、ドライエッチストップ層を導入した PC の試作・実証結果を示す。ドライエッチング時間を 18 分から 24 分まで変化させた場合でも素子の断面構造はほとんど変わらず [図 1(a),(b)]、偏波変換効率も変化しないこと [図 1(c)] を確認した。

図 2 に、変調部に量子井戸構造を導入した偏波変調器の構造と測定結果を示す。量子井戸層のキャリア効果を用いることで効率良く変調を行い、僅か 14 mA の注入電流でポアンカレ球面上を π 以上回転させられることを確認した。

図 3 に、量子井戸型受光素子を集積した偏波アナライザの構造と測定結果を示す。任意の入力偏波光に対して、ストークスパラメータが正確に検出できることを実証した。さらにこのような素子をストークスペクトル変調信号の復調回路に用いた実験系と実験結果を図 4 に示す。3 GBaud において、4 値ストークスペクトル信号を復調できることを実証した。

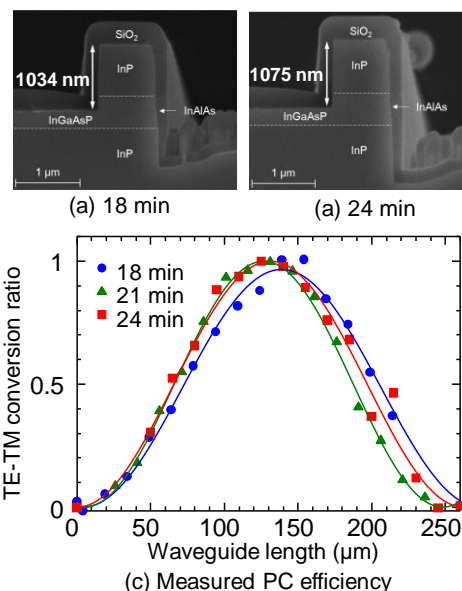


図 1. エッチストップ層を導入したハーフリッジ型 PC の断面図 (a, b) と偏波変換効率の測定結果(c).

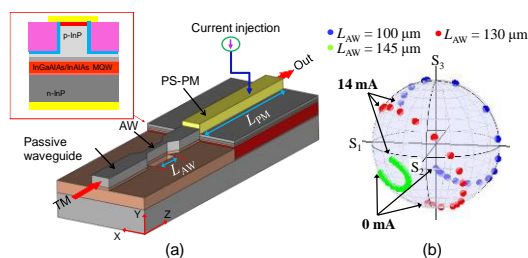


図 2. 量子井戸型変調器を集積した偏波変調素子の概要(a)と実験結果(b).

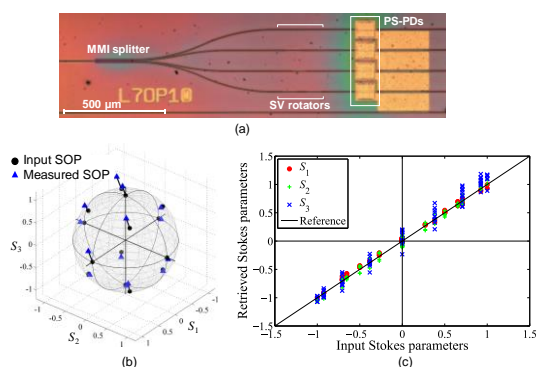


図 3. 量子井戸型受光素子を集積した偏波アナライザの写真 (a) と実験結果(b, c).

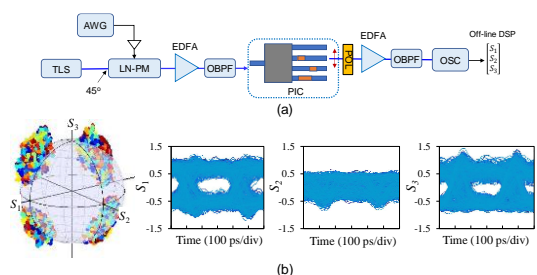


図 4. ストークスペクトル変調信号の復調実験. 実験系(a)と実験結果(b).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

1. T. Tanemura and Y. Nakano, "(Invited) Compact InP Stokes-vector modulator and receiver circuits for short-reach direct-detection optical links," *IEICE Trans. Electron.*, 査読有, in press.
2. T. Sukanuma, S. Ghosh, M. Kazi, R. Kobayashi, Y. Nakano, and T. Tanemura, "Monolithic InP Stokes vector receiver with multiple-quantum-well photodetectors," *J. Lightwave Technol.*, 査読有, vol. 36, no. 5, pp. 1268-1274, Mar. 2018. (doi: 10.1109/JLT.2017.2780905)
3. S. Ghosh, T. Tanemura, Y. Kawabata, K. Katoh, K. Kikuchi, and Y. Nakano, "Decoding of multi-level Stokes-vector modulated signal by polarization-analyzing circuit on InP," *J. Lightwave Technol.*, vol. 36, no. 2, pp. 187-194, Jan. 2018. (doi: 10.1109/JLT.2018.2791623)
4. M. Kazi, S. Ghosh, H. Sodabanlu, K. Suzuki, M. Sugiyama, T. Tanemura, and Y. Nakano, "High-speed carrier-injection-based polarization controller with InGaAlAs/InAlAs multiple-quantum wells," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 査読有, vol. 29, no. 22, pp. 1951-1954, Nov. 2017. (doi: 10.1109/LPT.2017.2757526)
5. S. Ghosh, Y. Kawabata, T. Tanemura, and Y. Nakano, "Polarization-analyzing circuit on InP for integrated Stokes vector receiver,"

Opt. Express, 査読有, vol. 25, no. 11, pp. 12303-12310, May 2017. (doi: 10.1364/OE.25.012303)

6. 種村拓夫, 中野義昭, "偏波操作光集積デバイス," *フォトニクスニュース*, 査読無, 第 3 巻, 第 2 号, pp. 55-59, 2017.
7. 種村拓夫, 中野義昭, "InP モノリシック集積偏波制御回路," *電子情報通信学会和文論文誌 C*, 査読無, Vol.J99-C, No.8, pp. 373-381, 2016 年 8 月.

[学会発表] (計 24 件)

1. M. Kazi, S. Ghosh, M. Sugiyama, T. Tanemura, and Y. Nakano, "Monolithically integrated Stokes vector modulator based on quantum-confined Stark effect," *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, 査読有, SM4B.6, San Jose, May 14, 2018.
2. 種村拓夫, 菅沼貴博, ゴッシュ・サミール, 中野義昭, "InP 集積ストークスペクトル直接検波受信器," 2018 年電子情報通信学会総合大会, 査読無, C-4-9, 東京電機大学(東京), 2018 年 3 月.
3. 大川幸祐, 菅沼貴博, 小林竜馬, 種村拓夫, 中野義昭, "偏波依存位相シフタを挿入した InGaAsP/InP ハーフリッジ導波路型偏波変換器の作製誤差耐性に関する検討," 2018 年電子情報通信学会総合大会, 査読無, C-3-30, 東京電機大学(東京), 2018 年 3 月.
4. M. Kazi, S. Ghosh, M. Sugiyama, T. Tanemura, Y. Nakano, "Experimental investigation of QCSE-based Stokes vector modulator on InP," 第 65 回応用物理学会春期術講演会, 査読無, 17p-A404-11, 早稲田大学(東京), 2018 年 3 月.
5. 菅一輝, 中野義昭, 種村拓夫, "1.3μm 帯光送信器に向けた InP 集積偏波多重回路の設計," 第 65 回応用物理学会春期術講演会, 査読無, 18p-B203-5, 早稲田大学(東京), 2018 年 3 月.
6. 種村拓夫, 菅沼貴博, ゴッシュ・サミール, 中野義昭, "光集積偏波アナライザの開発とストークス空間を活用した大容量光通信への展開," *レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会*, 査読無, みやこめっせ(京都), 2018 年 1 月.
7. 種村拓夫, 中野義昭, "集積フォトニクスによる偏波操作/ユニタリ光変換回路," *電子情報通信学会 集積光デバイスと応用技術時限研究専門委員会(IPDA)*, 査読無, 加賀市山代温泉(石川), 2017 年 11 月.
8. 菅沼貴博, 中野義昭, 種村拓夫, "4 ポート InP ストークスペクトル受信器の設計と感度特性解析," *電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会(OPE)*, 査読無, 2017 年 10 月.
9. ゴッシュ・サミール, 種村拓夫, 中野義昭, "InP 偏波解析回路を用いた 4 値ストークスペクトル変調信号の受信実験,"

- 電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会(LQE), 査読無, 2017年10月.
10. T. Suganuma, S. Ghosh, R. Kobayashi, Y. Nakano, and T. Tanemura, "Fully integrated Stokes vector receiver with MQW-based photodetectors on InP," European Conference on Optical Communication (ECOC), 査読有, M1.C4, Gothenburg, Sweden, Sept. 17-21, 2017.
 11. 菅沼貴博, ゴッシュ・サミール, カズイ・モヒユディン, 小林竜馬, 中野義昭, 種村拓夫, "多重量子井戸光検出器を集積した InP ストークスベクトル受信回路," 2017年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 査読無, 東京都市大学(東京), C-3-28, 2017年9月.
 12. 小林竜馬, ハッサネット・ソダーバンル, 杉山正和, 中野義昭, 種村拓夫, "InAlAs エッチストップ層を導入した InP/InGaAsP ハーフリッジ導波路型偏波変換器の設計と試作," 2017年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 査読無, 東京都市大学(東京), C-3-28, 2017年9月.
 13. M. Kazi, S. Ghosh, H. Sodabanlu, M. Sugiyama, T. Tanemura, and Y. Nakano, "Fabrication of monolithic InGaAlAs/InAlAs MQW-based polarization controller," 2017年応用物理学学会秋季大会, 査読無, 6p-A410-8, 福岡国際会議場, 2017年9月.
 14. M. Kazi, S. Ghosh, H. Sodabanlu, T. Tanemura, and Y. Nakano, "Monolithic polarization controller with InGaAlAs/InAlAs multiple-quantum-well phase shifter," Compound Semiconductor Week (CSW), 査読有, Berlin, Germany, May 14-18, 2017.
 15. S. Ghosh, T. Tanemura, Y. Kawabata, K. Katoh, K. Kikuchi, and Y. Nakano, "Simple direct-detection-based Stokes vector receiver circuit on InP," Optical Fiber Communication Conference (OFC), 査読有, Th1A.6, Los Angeles, Mar. 23, 2017.
 16. 種村拓夫, "(招待講演) 光集積回路における偏光制御とストークス空間を活用した近距離多値光通信," エイトラムダフォーラム, 査読無, ルヴェンソンヴェール本郷(東京), 2016年10月.
 17. T. Tanemura and Y. Nakano, "Polarization manipulation in monolithic InP-based PICs," Integrated Photonics Research, Silicon and Nano-Photonics (IPR), 査読無, Vancouver, Canada, July 19, 2016.
 18. S. Ghosh, Y. Kawabata, T. Tanemura, and Y. Nakano, "Integrated Stokes vector analyzer on InP," 21st OptoElectronics and Communications Conference / International Conference on Photonics in Switching (OECC/PS), 査読有, WD4, Niigata, Japan, July 3-7, 2016.
 19. T. Tanemura, "InP polarization-manipulating circuits," Workshop on transport technologies for Terabit-era and beyond," 21st OptoElectronics and Communications Conference / International Conference on Photonics in Switching (OECC/PS 2016), 査読無, Niigata, Japan, July 3, 2016.
 20. 菅沼貴博, 中野義昭, 種村拓夫, "InP ストークスベクトル受信回路の設計と作製誤差耐性に関する検討," 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会(OPE), 査読無, 2017年4月.
 21. 川端祐斗, 種村拓夫, 中野義昭, "InP モノリシック集積偏波アナライザの提案と試作," 2016年電子情報通信学会総合大会, 査読無, C-3-39, 九州大学, 2016年3月.
 22. 鈴木健太郎, 川端祐斗, 種村拓夫, 中野義昭, "InGaAlAs/InAlAs 多重量子井戸キャリア注入型偏波制御器の設計と試作," 電子情報通信学会第3回 IPDA 研究会, 査読無, P24, 2016年3月.
 23. K. Suzuki, Y. Kawabata, T. Tanemura, and Y. Nakano, "Design and experimental investigation of monolithic polarization controller with InGaAlAs/InAlAs multiple quantum wells," International Conference on Photonics in Switching (PS), 査読有, We12.2, Florence, Italy, Sept. 22-25, 2015.
 24. 鈴木健太郎, 川端祐斗, 種村拓夫, 中野義昭, "InGaAlAs/InAlAs 多重量子井戸を用いたキャリア注入型偏波制御器の設計と予備検討," 2015年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 査読無, C-3-4, 東北大学, 2015年9月.
- [図書] (計0件)
- [産業財産権]
- 出願状況 (計0件)
 - 取得状況 (計0件)
- [その他]
- ホームページ等
<http://www.ee.t.u-tokyo.ac.jp/~nakano/lab/index.html>
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
種村 拓夫 (TANEMURA, Takuo)
東京大学・大学院工学系研究科・准教授
研究者番号: 90447425
 - (2) 研究分担者
なし
 - (3) 連携研究者
なし
 - (4) 研究協力者
なし