

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K13695

研究課題名（和文）微小カプセル型金属キャビティを用いたプラズモニック光集積回路

研究課題名（英文）Plasmonic Photonic Integrated Circuit Using Ultra-Compact Capsule-Shaped Metallic Cavity Structures

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） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、能動光素子を高密度に集積した半導体光回路の実現に向けて、微小金属キャビティを用いた各種プラズモニック素子を開発することを目的とした。まず、応募者が独自に提案したカプセル型微小金属キャビティ構造の作製に向けて、基盤プロセス技術の最適化を進めた。その結果、高解像かつ側壁の粗さを軽減した構造を作製することに成功し、室温レーザー発振動作を観測した。さらに、電流ブロッキング層を導入した電流注入型素子を試作し、電流注入下における低温レーザー発振に成功した。また、光導波路に結合したキャビティ構造を新規に設計し、素子の試作実証に成功した。

研究成果の概要（英文）：In this project, we aimed to develop compact plasmonic devices based on metallic cavity structures to realize future ultra-dense photonic integrated circuits. First, we optimized the key device processes to fabricate our original capsule-shaped metallic-cavity structures. As a result, we have succeeded in substantially reducing the sidewall roughness to observe room-temperature lasing operation under optical pumping. We also designed and fabricated a novel device structure with an optimal current-blocking layer to achieve electrically pumped lasing at low temperature. Finally, we proposed and designed a novel cavity structure coupled to an optical waveguide, and succeeded in device fabrication.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：光集積回路 プラズモニクス

1. 研究開始当初の背景

レーザや受光器を半導体チップ上に多数集積した光集積回路(光IC)は、光通信需要に牽引されて発展を続けている。現在では、数百もの光素子を集積した光回路が製品化され、実システムで用いられている。今後は、数千~数万オーダーの光素子を集積し、エレクトロニクスと融合した「光電子LSI」の実現が期待されている。

光素子の集積度を高めるための手法として、金属ナノ構造の界面に局在する表面プラズモンを利用した素子が注目されている。プラズモニック導波路などの受動素子は多く実証されている一方で、レーザなどの能動素子に関しては課題が多く、光導波路に結合した構造も実現できていない。

2. 研究の目的

本研究では、能動光素子を高密度に集積した半導体光回路の実現に向けて、微小金属キャビティを用いた各種プラズモニック素子を開発することを目的とした。応募者が独自に提案したカプセル型金属キャビティ半導体レーザを試作実証し、効率良く光導波路に結合することを目指した。

3. 研究の方法

素子の設計には、3次元有限差分時間領域法(FDTD)による数値計算を用いた。本素子は金属材料を含むため、時間領域における解析が厄介であるが、ローレンツ・ドゥルーデモデルにより金属の光学特性を精度よく近似した。

素子の作製には、代表者がこれまでに培ったInP系半導体レーザ/光集積回路のプロセス技術とプラズモニック光素子作製技術を基に、さらなる最適化を行った。ナノスケールのパターニングには、電子線(EB)描画と金属リフトオフプロセスを用い、InPメサ構造の作製には、メタン水素系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)を採用した。金属キャビティ構造の高解像化、および、側壁の粗さの軽減に向けて、HSQレジストを用いた電子線描画リソグラフィプロセス、および、エッチング後の表面処理プロセスを新たに導入し、反応性イオンエッチングプロセスの最適化を行った。

試作した素子は、顕微フोटルミネッセンス(PL)測定系、光導波路評価系、および、IV測定系により評価した。

4. 研究成果

まず、代表者が独自に提案したカプセル型微小金属キャビティ構造を試作し、パルス光励起下において室温レーザ発振動作を観測することに初めて成功した(図1)。従来の矩形型キャビティに比べてQ値が向上し、サイドモード抑圧比が上昇することを実証した。

続いて、電流励起下でのレーザ発振を実現

するための最適構造を設計した。薄いInAlAsブロッキング層を挿入することで、漏れ電流を抑え、発熱による閾値電流の増大を抑圧できることを提案し、数値解析により実証した。電流ブロッキング層を導入した素子を試作し、78Kにおいて電流注入下におけるレーザ発振に成功した(図2)。

並行して、光導波路に結合した構造を実現するために、導波路と結合した素子の設計を行った。光フィードバック部を導入することで、共振器のQ値を精度よく制御できることを実証した(図3)。

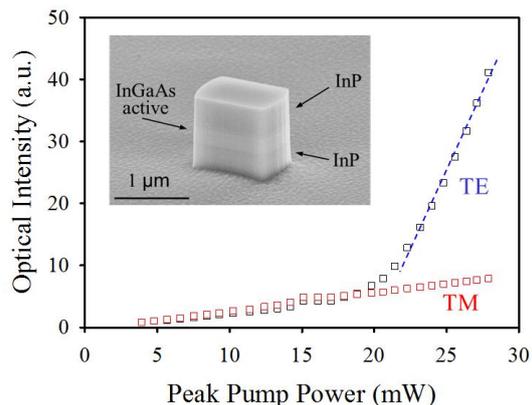


図1. カプセル型金属キャビティ構造のパルス光励起室温レーザ発振動作

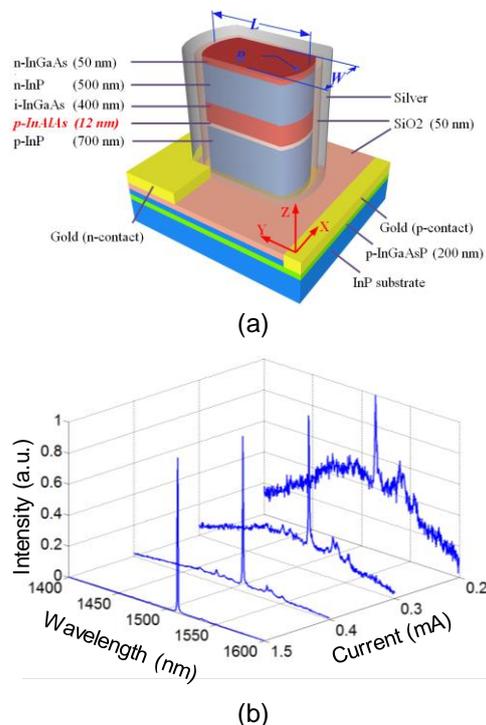


図2. 電流注入カプセル型金属キャビティレーザの構造(a)とスペクトル測定結果(b)。

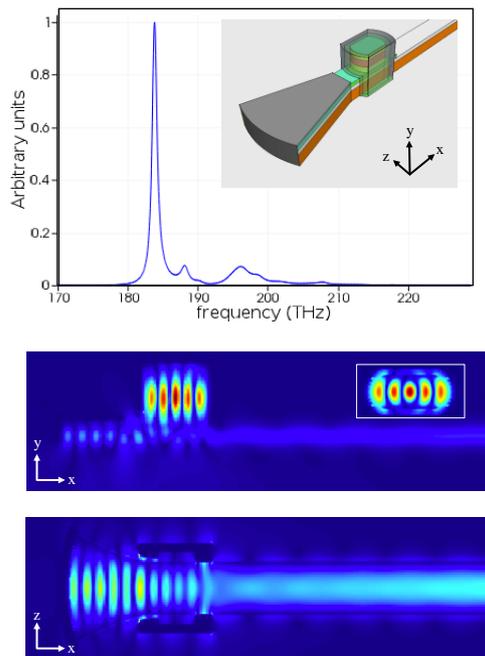


図 3. InP 導波路に結合した金属キャビティ構造 (挿入図) と計算結果

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Y. Xiao, R. J.E. Taylor, C. Yu, K. Feng, T. Tanemura, and Y. Nakano, "Room-temperature capsule-shaped wavelength-scale metal-clad laser with enhanced side mode suppression," *Appl. Phys. Lett.*, 査読有, vol. 111, no. 8, 081107, Aug. 2017. (doi: 10.1063/1.5000246)
- ② K. Feng, M. Nishimoto, C. Yu, S. Saylan, R. J. E. Taylor, T. Tanemura, and Y. Nakano, "Waveguide-coupled metal-clad cavity with integrated feedback stub," *Jap. J. Appl. Phys.*, 査読有, vol. 56, no. 8, 082201, Aug. 2017. (doi: 10.7567/JJAP.56.082201)

[学会発表] (計 7 件)

- ① C. Yu, Y. Xiao, R.J.E. Taylor, B. Zhang, K. Feng, T. Tanemura, and Y. Nakano, "Electrically pumped metallic cavity micro laser with InAlAs electron blocking layer," The 24th Congress of the International Commission for Optics (ICO-24), 査読有, Tu1J-02, Shinjuku, Japan, Aug. 22, 2017.
- ② Y. Xiao, R. J. E. Taylor, C. Yu, T. Tanemura, and Y. Nakano, "Room-temperature capsule-shaped wavelength-scale metal-clad laser operating at 1550 nm," The 12th Conference on Lasers and Electro-Optics

Pacific Rim (CLEO-PR 2017), 査読有, Jul. 31 - Aug. 4, 2017.

- ③ 肖イ, リチャード・テイラー, 虞伝慶, 種村拓夫, 中野義昭, "カプセル型波長スケール金属共振器レーザの試作と室温パルス発振," 2017 年応用物理学会春季大会, 査読無, 16a-422-3, パシフィック横浜(神奈川), 2017 年 3 月 16 日.
- ④ 西本昌哉, Feng Kaiyin, 種村拓夫, 中野義昭, "導波路と結合した金属クラッド共振器における Q 値向上に向けた検討," 15a-P6-3, 2016 年応用物理学会秋季大会, 査読無, 16a-A35-10, 新潟朱鷺メッセ(新潟), 2016 年 9 月 15 日.
- ⑤ K. Feng, C. Yu, M. Nishimoto, R. J. E. Taylor, T. Tanemura, and Y. Nakano, "Sub-wavelength metallic laser coupled to silicon-on-insulator waveguide with integrated optical feedback stub for Q factor enhancement," 25th International Semiconductor Laser Conference (ISLC 2016), 査読有, WB5, Kobe, Sept. 12-15, 2016.
- ⑥ K. Feng, C. Yu, M. Nishimoto, R. J. E. Taylor, T. Tanemura, and Y. Nakano, "Comprehensive analysis on wavelength-scale metal-clad laser coupled to silicon-on-insulator waveguide with integrated optical feedback stub," 2016 International Nano-Optoelectronics Workshop (iNOW 2016), 査読無, pp. 45-46, Munich/Wurzburg, Germany, July 28 (2016).
- ⑦ C. Yu, B. Zhang, Y. Xiao, T. Tanemura, and Y. Nakano, "Comprehensive analysis on electrically pumped metallic cavity lasers," Compound Semiconductor Week (CSW'16), 査読有, MoP-ISCS-029, Toyama, Japan, June 26-30, 2016.

[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/member/tanemura_j.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