

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26600112

研究課題名(和文) ナノスケール金属キャビティ半導体レーザーの基礎研究

研究課題名(英文) Research on Nanoscale Metallic-Cavity Semiconductor Lasers

研究代表者

種村 拓夫 (Tanemura, Takuo)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90447425

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、半導体レーザーを高密度に集積した光回路の実現に向けて、サブミクロンサイズの小さな半導体レーザーを開発することを目的とした。まず、占有面積を削減しながら共振Q値を高めるために、カプセル型微小金属キャビティ構造を新たに提案し、最適な曲率の側壁を導入することでQ値を大幅に増大できることを理論的および実験的に実証した。続いて、光導波路に結合した構造を実現するために、InP導波路上に金属キャビティ構造を結合させた素子の設計を行い、作製プロセスを開発した。最後に、電流励起レーザー発振を目指すため、光・電気・熱特性を全て考慮した数値計算モデルを新たに構築し、最適設計を完了した。

研究成果の概要(英文)：In this project, we aimed to develop sub-micrometer-scale semiconductor lasers to be integrated in the future ultra-dense photonic integrated circuits. First, we have proposed a novel capsule-shaped metallic-cavity structure to enhance the Q factor while reducing the footprint. By introducing sidewalls with optimal curvature, we have demonstrated both numerically and experimentally dramatic increase in cavity Q factor. We have then designed optimal metallic-cavity laser structure coupled to an InP waveguide and developed the fabrication process. Finally, to achieve electrically pumped lasing operation, we have constructed a novel numerical method that takes into account optical, electrical, and thermal properties self-consistently, and successfully derived the optimal structure.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：集積フォトンクス 半導体レーザー プラズモニクス

### 1. 研究開始当初の背景

光情報通信に用いられる  $1.55\mu\text{m}$  波長帯の光素子は、近年の高度情報化社会を支えるキーデバイスとして発展を遂げて来た。その結果、いわゆる「光のムーア則」に従って、光素子の集積度は年々指数的に上昇を続けている。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、共振器(キャビティ)に金属材料を用いた金属キャビティ半導体レーザーが提唱され、注目を集めている。しかし、未だに金属界面での光損失を十分に低減することが難しく、 $\mu\text{m}^3$ 以下のナノスケールサイズ、かつ室温で電流励起による連続発振に成功した例はない。さらには、光集積導波路に結合した構造も未だ実現できていない。

### 2. 研究の目的

本研究では、金属キャビティの構造を最適化することで、従来の InP 系レーザーに比べて大きさと消費電力を2桁以上削減した、超低消費電力ナノスケール半導体レーザーを新たに開発し、光導波路と結合させることを目的とした。

### 3. 研究の方法

まず、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。金属材料としては、金、銀、アルミニウムなどを比較し、最適な特性が得られる材料と構造を見極めた。レーザー活性層には、InGaAs バルク層と InGaAs/InGaAsP 多重量子井戸層の両方を比較した上で、微分光利得、表面再結合、偏波選択性、Purcell 効果など、様々な視点から検討を行い、最適な層構造を導き出した。

素子の作製には、代表者がこれまでに培った InP 系半導体レーザー/光集積回路のプロセス技術を基に、2010年以降に会得した微小プラズマモニック光素子作製技術を取り入れた。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た。その上で、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。

試作した素子は、顕微フォトルミネッセンス(PL)測定系、光導波路評価系、および、IV測定系により評価を行った。

### 4. 研究成果

まず、占有面積を削減しながら共振Q値を高めるために、図1に示すカプセル型微小金

属キャビティ構造を新たに提案した。3次元FDTD およびレート方程式による詳細な解析より、最適な曲率の側壁を導入することで、共振モードを中央に閉じ込め、金属による光吸収を抑えることでQ値を大幅に増大できることを明らかにした。さらに、素子を試作し、PL測定より、実際にQ値が4倍以上向上することを実証した(図2)。

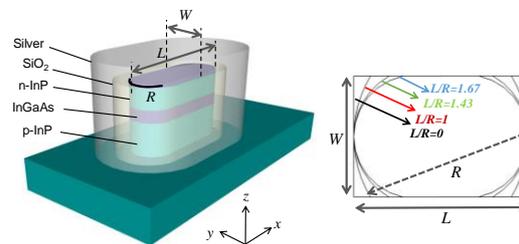


図1. カプセル型金属キャビティ構造

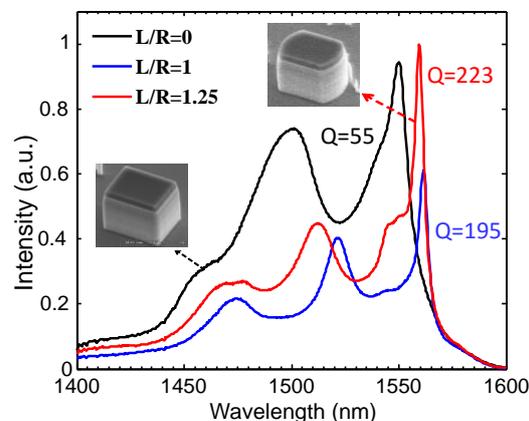


図2. カプセル型金属キャビティ構造のQ値測定結果

続いて、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い、試作プロセスを開発した。2段階 ICP-RIE プロセスを新たに開発し、InP ハイメサ導波路上に金属キャビティ構造を集積することに成功した(図3)

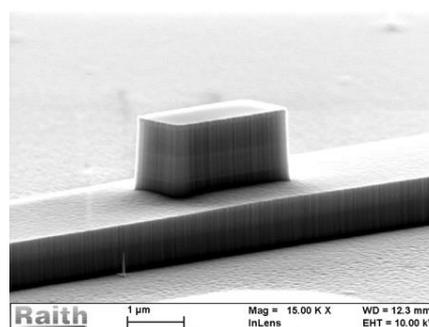


図3. InP ハイメサ導波路に結合した金属キャビティ構造の試作結果

上記と並行して、電流励起レーザー発振を目指すため、光・電気・熱特性を全て考慮し

た数値計算モデルを新たに構築し、最適設計を完了した。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、数値計算によりその有効性を実証した。今後、素子の作製を進め、電流注入による室温連続発振の実現を目指す。

#### 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 4 件)

- ① M. Ayata, Y. Nakano, and T. Tanemura, “Silicon rib-waveguide electro-absorption optical modulator using transparent conductive oxide bilayer,” *Jap. J. Appl. Phys.*, 査読有, vol. 55, no. 4, 042201 (2016).
- ② B. Zhang, K. Chieda, T. Okimoto, T. Tanemura, and Y. Nakano, “Q factor improvement by capsule-shaped cavity structure for subwavelength metallic lasers,” *Physica Status Solidi A*, 査読有, vol. 213, no. 4, pp. 965-969 (2016).
- ③ J. Ø. Kjellman, T. Tanemura, and Y. Nakano, “Compact photonic crystal disk cavity optimized using the gentle confinement method and boundary design,” *Jap. J. Appl. Phys.*, 査読有, vol. 54, no. 4, 042001 (2015).
- ④ B. Zhang, T. Okimoto, T. Tanemura, and Y. Nakano, “Proposal and numerical study on capsule-shaped nanometallic semiconductor lasers,” *Jap. J. Appl. Phys.*, 査読有, vol. 53, no. 11, 112703 (2014).

[学会発表] (計 11 件)

- ① T. Tanemura, B. Zhang, and Y. Nakano, “Capsule-shaped metallic-cavity semiconductor lasers for low-energy on-chip light sources,” *SPIE Photonics Europe*, 招待講演, 989214, Brussels, Belgium, 2016.
- ② B. Zhang, K. Chieda, T. Okimoto, T. Tanemura, and Y. Nakano, “InP-based capsule-shaped cavities for sub-wavelength metallic lasers,” 2015 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 招待講演, C-4-5, 東北大学, 2015.
- ③ M. Ayata, T. Tanemura, and Y. Nakano, “Compact silicon rib-waveguide electro-absorption modulator using multiple indium-tin-oxide layers,” *12th Int. Conf. on Group IV Photonics (GFP)*, 査読有, WP16, Vancouver, Canada, 2015.
- ④ B. Zhang, T. Okimoto, T. Tanemura, and Y. Nakano, “Observation of Q factor improvement by capsule-shaped subwavelength metallic-cavity structures,”

*27th Int. Conf. on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM)*, 査読有, O3.2, Santa Barbara, USA, 2015.

- ⑤ B. Zhang, T. Okimoto, T. Tanemura, and Y. Nakano, “Capsule-shaped metallic-cavity laser with reduced plasmonic loss,” *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, 査読有, JW2A.90, San Jose, USA, 2014.
- ⑥ B. Zhang, K. Chieda, T. Okimoto, T. Tanemura, Y. Nakano, “Experimental confirmation of Q-factor enhancement by capsule-shaped cavity for sub-wavelength metallic laser,” *International Nano-Optoelectronics Workshop 2015 (iNOW'15)*, 査読無, Tokyo, 2015.
- ⑦ K. Chieda, B. Zhang, T. Okimoto, T. Tanemura, and Y. Nakano, “Numerical investigation on compact metallic-cavity optical modulator integrated on InP-based waveguide” *International Nano-Optoelectronics Workshop 2015 (iNOW'15)*, 査読無, Tokyo, 2015.
- ⑧ 虞伝慶, 張柏富, 千枝航, 種村拓夫, 中野義昭, “電流注入型金属キャビティレーザの数値解析,” 2016 年応用物理学会春季大会, 査読無, 21p-P2-5, 東京工業大学, 2016.
- ⑨ 千枝航, 張柏富, 沖本拓也, 種村拓夫, 中野義昭, “InP 光導波路に結合した金属クラッド共振器型光変調器の設計,” 2015 年応用物理学会秋季大会, 査読無, 16a-2E-4, 名古屋国際会議場, 2015.
- ⑩ B. Zhang, T. Okimoto, T. Tanemura, and Y. Nakano, “Fabrication and photoluminescence characterization of capsule-shaped metallic InP/InGaAs cavity structures,” 2015 年応用物理学会春季大会, 査読無, 12p-A17-15, 東海大学, 2015.
- ⑪ 綾田雅文, 種村拓夫, 中野義昭, “高キャリア密度 ITO 層を用いたシリコンリブ導波路変調器の解析,” 2014 年応用物理学会秋季大会, 査読無, 18a-C6-6, 北海道大学, 2014.

[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](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