

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656044

研究課題名(和文) 微小プラズモニック光集積回路の基礎研究

研究課題名(英文) Research on ultra-small plasmonic photonic integrated circuits

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) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、化合物半導体を用いた光集積回路(光IC)に金属ナノ構造を用いたプラズモニック技術を融合させることで、微小プラズモニック光ICを創製することを目的とした。その成果として、新規プラズモニック集光器の設計を行い、グレーティングの構造と周期を最適化することにより、回折限界以下の微細プラズモニック導波路に効率良く集光できることを示した。さらに、実際に素子の試作と評価を行い、原理検証実験に成功した。並行して、金属を側壁に用いた微小金属キャビティレーザの検討を行い、球面ミラー構造を導入した新規カプセル型構造を用いることで、共振器のQ値を大幅に向上できることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this research, we have aimed to develop ultra-small plasmonic photonic integrated circuits by introducing plasmonic technologies to the compound semiconductor photonic integrated circuits. As a result, we have proposed a novel plasmonic coupler to efficiently focus and couple light into plasmonic waveguides narrower than the diffraction limit. We have successfully fabricated the device and carried out proof-of-concept experiment. Concurrently, we have analyzed nanometallic lasers and proposed a novel capsule-shaped structure to increase the cavity Q factor drastically.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用光学・量子光工学

キーワード：電子デバイス・機器 光エレクトロニクス ナノフォトニクス プラズモニクス 光デバイス

1. 研究開始当初の背景

光通信技術の発展に牽引され、レーザや受光器など多数の光素子を半導体チップ上に集積した「光集積回路(光 IC)」の研究が近年活性化している。2004年には、米国のインフィネラ社が、数百もの光素子を集積した光 IC を世界で初めて製品化し、実システムでの運用を開始した。今後は、集積度をさらに高め、数千~万個の素子を集積した「光 LSI」の実現が期待されている。しかし、光 LSI を実現する上で本質的な壁となるのが「光の回折限界」である。光を回折限界以下に閉じ込めて制御する方法として、「プラズモニクス」が提唱され、世界中で注目を集めている。金属ナノ構造の界面に局在する「プラズモン」を介して、微小な領域に光エネルギーを閉じ込めることで、回折限界を超えた光制御が可能になると同時に、局在プラズモン共鳴などの特異な現象が得られる。

2. 研究の目的

本研究では、半導体レーザなどのアクティブ光素子を多数集積した光集積回路(光 IC)に金属ナノ構造を用いたプラズモニクス技術を融合させることで、微小プラズモニク光 IC を創製することを目的とした。新規に提案するプラズモニク集光器を用いることで、金属界面に局在するプラズモンを介して、回折限界以下の微小領域に効率良く光を閉じ込める。これにより、従来困難だったプラズモニク素子の多段接続、および、高効率な光入出力を可能にする。この過程を通じて、これまでの半導体/誘電体に基づく光 IC 技術に対するパラダイムシフトを引き起こし、集積度を極限まで高めた光 LSI を実現することを目的とした。

3. 研究の方法

まず、プラズモニク集光器の設計には、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。並行して、プラズモニク導波路および金属キャビティレーザの設計には、有限要素法(FEM)によるモード解析を行った。

半導体光集積回路の作製には、有機金属気相エピタキシャル(MOVPE)結晶成長を用いて製膜を行い、誘導結合プラズマ反応性イオンエッチング(ICP-RIE)を用いて微細構造を作製した。一方、金属グレーティング構造のパターニングには、電子線(EB)描画装置を用い、ICP-RIEドライエッチングにより、微細グレーティング構造を形成した。こうして得られた構造の側面に金属材料を蒸着することで、本素子が完成させた。この通り、ナノスケールの精密な位置合わせを必要とせず、完全に自己整合(self-aligned)プロセスによって作製できることは、本素子の

最大の特徴である。

4. 研究成果

(1) プラズモニク集光器の設計

提案するプラズモニクの構造を図1に示す。InP/InGaAsPリッジ導波路から入射した光は、金属グレーティングによって散乱し、表面プラズモンポラリトン(SPP: surface plasmon polariton)波として金属界面を伝搬する。グレーティング構造を最適化することで、効率良く中央に集光し、幅100nmのMIM導波路に結合する。計算は、z方向の有効屈折率を用いて全素子を2次元構造として近似し、2次元FDTD法を用いた。初めに、溝の最適形状を求めるために、単一の溝に波長1.55 μm の平面波を入射したときのSPP発生効率を計算し、溝の幅 W と深さ D を決定した。次に、溝を周期的に合計 $2N$ 個配置し、MIM導波路への結合効率が最大になるように、グレーティング周期 G と第一グレーティング位置 a を求めた。

溝の幅 W と深さ D を変えたときの溝単体によるSPP発生効率を図2に示す。図より、 $W = 100 \text{ nm}$, $D = 80 \text{ nm}$ (図中A点)、もしくは、 $W = 520 \text{ nm}$, $D = 100 \text{ nm}$ (同B点)のときに溝内部で共振が起こり、効率良くSPPが発生することが分かる。次に、 $W = 100 \text{ nm}$, $D = 80 \text{ nm}$ (A点), $G = 370 \text{ nm}$, $N = 12$, および、 $W = 520 \text{ nm}$, $D = 100 \text{ nm}$ (B点), $G = 820 \text{ nm}$, $N = 5$ の溝を配置した場合のMIM導波路出力における透過率を図3にそれぞれ示す。縦軸は、グレーティングが存在しない場合の透過率に対して規格化している。図より、どちらの場合も、 $a = 250 \text{ nm}$ としたときに中央においてSPPが強め合い、MIM導波路への結合効率が2.9倍以上向上することが分かる。今回は同一の溝を周期的に配置したが、溝の構造と間隔を非周期的に変化させることで、結合効率のさらなる改善が期待される。

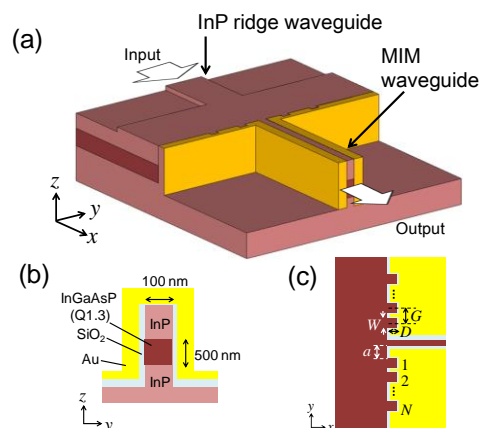


図1. MIM導波路とInPリッジ導波路を結合するための導波路型金属グレーティングカップラ。(a)模式図。(b)MIM導波路部の断面図。(c)カップラ部の上面図。

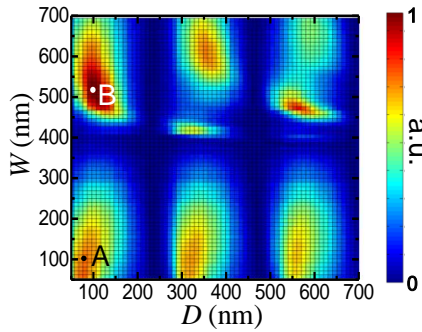


図2. 単一の溝によって発生するSPP強度の計算結果.

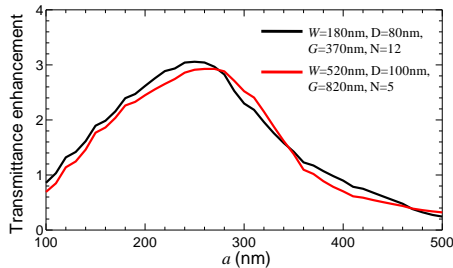


図3. MIM 導波路出力における透過率の数値計算結果.

(2) 金属キャビティレーザの設計と試作
レーザの模式図を図4に示す。ハイメサ型 InGaAs/InGaAsP 引張歪 (-0.7~0.8%) MQW レーザを 25 nm 厚の絶縁膜(SiO₂)と 2 μm 厚の金属(Ag)で覆い被せた構造になっている。金属が高効率な反射鏡として働き光を内部に閉じ込めることで W と L をサブ μm オーダーまで小さくすることができる。

まず、XY 断面構造における導波モードを二次元 FEM により計算し、TM モードの発光に最適な層構造と導波路幅 W を決定した(図4(b)). 続いて、三次元 FDTD 法による計算を行い、1.55 μm 帯で発振するように導波路長 L を選んだ。その結果、W=1.2 μm、L=2.5 μm としたとき、1553 nm において閾値利得 532 cm⁻¹ で発振することが確認された。

塩素系ドライエッチングによりレーザ構造を作製し、その上に SiO₂ と銀を積層した。InP 基板側からの光励起と観測を行うために、素子を反転させてシリコン基板上に貼り付け、HCl を用いたウェットエッチングによって InP 基板を除去した。

W=1.2 μm、L=2.5 μm の素子に波長 532 nm のレーザ光を入射した際に室温で観測された顕微 PL スペクトルを図5に示す。FDTD 計算結果と一致し、1550 nm において共振モードが存在することが確認された。今後、作製プロセスの最適化を進め、電流注入による室温連続発振を目指す。

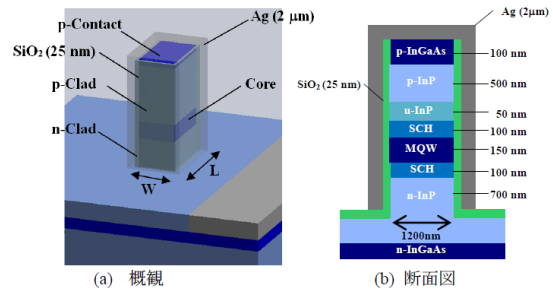


図4. 金属キャビティレーザの模式図

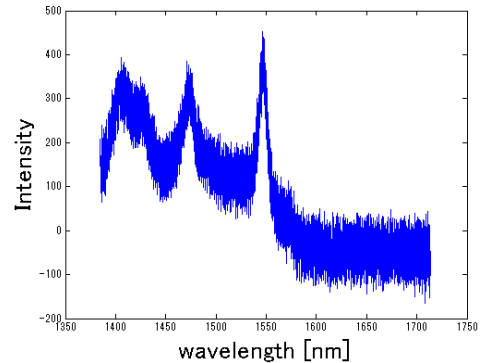


図5. W=1.2 μm, L=2.5 μm の素子の室温顕微 PL スペクトル測定結果

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 3件)

- ① P. Wahl, T. Tanemura, N. Vermeulen, J. Van Erps, D. A. B. Miller, and H. Thienpont, "Design of large scale plasmonic nanoslit arrays for arbitrary mode conversion and demultiplexing," *Opt. Express*, 査読有, vol. 22, no. 1, pp. 646-660, 2014.
- ② T. Tanemura, P. Wahl, S. Fan, and D. A. B. Miller, "Modal source radiator model for arbitrary two-dimensional arrays of subwavelength apertures on metal films", *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 査読有, vol. 19, no. 3, p. 4601110, 2013.
- ③ P. Wahl, T. Tanemura, C. Debaes, N. Vermeulen, J. Van Erps, D. A. B. Miller, and H. Thienpont, "Energy-per-bit limits in plasmonic integrated photodetectors," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 査読有, vol. 19, no. 2, p. 3800210, 2013.

[学会発表] (計 7件)

- ① 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.

- ② 沖本拓也, 財津優, 張柏富, 井上智之, 種村拓夫, 中野 義昭, “金属キャビティ TM モードMQW レーザの設計と試作,” 2014 年応用物理学会春季大会, 査読無, 20a-F8-9, 青山学院大学, 2014.
- ③ 野尻悠平, 種村拓夫, 中野義昭, “プラズモニック InP 導波路デバイスのための金属グレーティングカプラの設計,” 2014 年応用物理学会春季大会, 査読無, 20p-F8-1, 青山学院大学, 2014.
- ④ 張柏富, 沖本拓也, 種村拓夫, 中野義昭, “カプセル型キャビティを用いた微小金属半導体レーザーの設計,” 電子情報通信学会技術研究報告, レーザ・量子エレクトロニクス研究会 (LQE2014), 査読無, LQE2011-71, 2014.
- ⑤ 野尻悠平, 財津優, 種村拓夫, 中野義昭, “導波路型プラズモニック光カプラの設計,” 電子情報通信学会技術研究報告, 光エレクトロニクス研究会 (OPE2013), 査読無, 2013.
- ⑥ 綾田雅文, 種村拓夫, 中野義昭, “ITO を用いた光変調器の設計,” 電子情報通信学会技術研究報告, 光エレクトロニクス研究会 (OPE2013), 査読無, 2013.
- ⑦ T. Tanemura, P. Wahl, S. Fan, and D. A. B. Miller, “Optical transmission through arbitrarily located subwavelength apertures on metal films,” *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, 査読有, QTh1F.5, San Jose, USA, 2012.

[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