

## 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(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24246061

研究課題名(和文)集積回路上光配線に向けた横方向電流注入型半導体薄膜レーザの研究

研究課題名(英文) Investigations of Lateral-current-injection Type Semiconductor Membrane Lasers toward On-chip Optical Interconnects

研究代表者

荒井 滋久 (ARAI, SHIGEHISA)

東京工業大学・量子ナノエレクトロニクス研究センター・教授

研究者番号：30151137

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,600,000円

研究成果の概要(和文)： オンチップ光配線への応用に向けた小型かつ極低消費電力動作が可能な強光閉じ込め効果を用いた極低しきい値半導体薄膜DFBレーザの実現および高速動作化を目的として研究を行い、以下の成果を得た。

独自に考案した半導体薄膜構造を用いるレーザの低消費電力・高速直接変調可能性を理論的に明らかにすると共に、実際に回折格子反射器を用いる半導体薄膜分布帰還レーザ、およびさらに高効率動作が可能な半導体薄膜分布反射型レーザを作製し、極低電流動作を実現した。さらに、このレーザと光導波路を介して光検出器を集積し、将来の集積回路に重要となる光配線に向けた半導体薄膜光集積回路構造を初めて試作した。

研究成果の概要(英文)： With aiming at extremely low-power consumption operation lasers for on-chip optical interconnects in future LSIs, semiconductor membrane distributed-feedback lasers which enable extremely low threshold current operation and high-speed operation have been investigated.

As the results, we theoretically clarified the capabilities of low-power consumption as well as high-speed modulation of the semiconductor membrane lasers, and experimentally demonstrated extremely low threshold current operation of semiconductor membrane distributed-feedback lasers and semiconductor membrane distributed-reflector lasers which have better performance in output efficiency. Moreover, by integrating semiconductor membrane photo-detector with the semiconductor membrane distributed-feedback laser via optical waveguide, we demonstrated, for the first time, a semiconductor membrane photonic-integrated-circuit (MPIC).

研究分野：光・量子電子工学、光エレクトロニクス

キーワード：半導体薄膜レーザ 光配線 極低消費電力動作 分布帰還レーザ 分布反射型レーザ

## 1. 研究開始当初の背景

シリコン LSI 内の比較的遠い地点間の信号伝送に関わるグローバル配線がプロセスノードに対する動作速度の制限要因となることから、これを打破する解決策として CPU の並列処理化(マルチコア化)が進められる一方、半導体レーザを用いる超並列光インターコネクションや集積回路上光配線の研究が精力的に進められてきた。光配線では光導波路の低損失性および現在光ファイバ通信に実用されている光検出器の超高速かつ高感度な特性のために、必要受信光電力は 10 Gbit/s で -15 dBm (30  $\mu$ W) 程度、必要な入力光信号は 10 Gbit/s のチャンネル当たり約 -10 dBm (0.1 mW) 程度となり、電気配線に比べて超高速・低消費電力動作の観点で優れた可能性を有している

近年では、CMOS 技術を用いた高機能 Si チップを目指して、米国防総省高等研究計画局 DARPA の EPIC (Electronic and Photonic Integrated Circuits) や UNIC (Ultra-performance Nanophotonic Intrachip Communications)、また、マルチコア LSI 間の光伝送を目指して、最先端研究開発支援プログラム (JSPS-FIRST) 「フォトニクス・エレクトロニクス融合システム基盤技術開発(代表: 東京大学・荒川泰彦)」が進行しており、SOI 基板の上に電子集積回路だけでなく、高機能の光集積回路を実現・実用化しようとする研究が世界中で行われている。

本研究申請者は、光増幅機能を有する活性層を屈折率差 5-8% の半導体層で挟む従来レーザに対して、屈折率差 40% 程度の誘電体 (SiO<sub>2</sub> や BCB) で挟み、さらにその半導体コアを 150-200 nm 程度の薄膜構造化して光電界を活性層に強力に閉じ込める**半導体薄膜レーザ**を提案し、光励起下で室温から 85°C までの低しきい値連続動作を実現した。

提案した半導体薄膜構造では、光モード利得は従来レーザの約 3 倍に増強でき、キャリア寿命がキャリア注入密度にほぼ反比例するため、光出力効率を損なうことなく、しきい値電流を

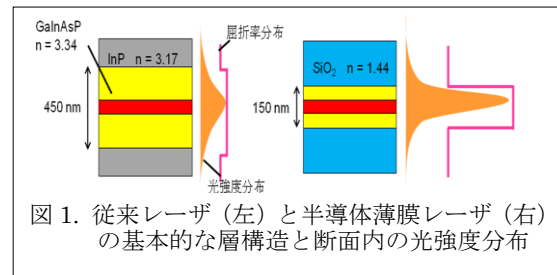


図 1. 従来レーザ (左) と半導体薄膜レーザ (右) の基本的な層構造と断面内の光強度分布

( $1/3^2$ ) 倍と約一桁低減することが可能である。しかし、半導体コア層が絶縁体で挟まれる構造のため、従来レーザのような縦方向電流注入動作は不可能であり、LSI 上での電気-光信号変換は不可能であった。

2007~2011 年度**特別推進研究「Si 系 LSI 内広帯域配線層の為に InP 系メンブレン光・電子デバイス」**では、この**半導体薄膜レーザの電流注入動作実現**を中心課題として、レーザストライプの両側に n 型 InP および p 型 InP を埋め込み再成長し、その上に電極を形成した**横方向電流注入型半導体(薄膜)レーザ**の研究を行い、2010 年に初めて室温動作、2011 年にはその低電流動作化に成功した。

## 2. 研究の目的

シリコン LSI 内のクロック周波数は、2017 年以降には 10 GHz を超えていくことが ITRS で予想され、従来の CR 型配線ではその遅延および高速化に伴う消費電力増大がボトルネックになる。LSI 内でも比較的長距離(数 cm)かつ高速信号用(10 GHz 以上)の配線を金属配線から光配線で置き換えることが限界を打破する方法として期待されているが、そのためには、従来の半導体レーザ光源の常識を破る**極低電流動作**と 10 GHz 以上の**高速動作**を同時に達成できる**新機軸の半導体レーザ**が必須になると考えられる。

本研究申請は、このような要求を満たす可能性を有する半導体レーザ光源として研究代表者が提案した**半導体薄膜レーザ(メンブレンレーザ)**の極低電流動作とその高速動作を実現することを目指し、シリコン LSI 上の広帯域光配線に適用しうる薄膜光集積回路構築の基盤技術を確立することを目的とする。

### (1) 横方向電流注入型半導体薄膜 DFB レーザの室温発振

図 2 に示すように、有機金属気相成長法による再成長を用いて横方向 pn 接合を有する**横方向電流注入型半導体薄膜 DFB レーザ**を実現し、共振器長 300  $\mu\text{m}$  の素子でしきい値電流 11 mA(室温)を得た。

この素子の表面回折格子深さは 30 nm であり、その結合係数は 150  $\text{cm}^{-1}$ と見積もられる。しかし、LSI 上光配線に適した特性を達成するためには、回折格子結合係数を高め、10-20  $\mu\text{m}$  に短共振器化する必要がある。

### (2) 横方向電流注入型半導体レーザーの内部量子効率向上の達成

図 2 の横方向電流注入レーザーでは、ストライプ側面の再成長界面および活性層のあるストライプ状半導体コア層の上下表面における非発光再結合電流低減が低しきい値・高効率動作の鍵となる。

表面回折格子の無い横方向電流注入構造ファブリ・ペロー共振器レーザーを作製し、その外部微分量子効率の共振器長依存性から、内部量子効率は約 40%と評価された。つぎに、活性層である 5 層の量子井戸の間隔を広げ、ストライプ状半導体コア層の上下表面における非発光再結合電流の低減を図った結果、内部量子効率 70%、光導波路損失 3.5  $\text{cm}^{-1}$  が得られ、**縦方向電流注入構造を用いる従来レーザーと比較して遜色ない横電流注入構造レーザーを実現**することに成功した。

上記(2)の**横方向電流注入構造**に、本研究申請者がこれまで光励起下での極低しきい値動作を報告してきた半導体薄膜 DFB レーザに用いた**強回折格子構造**(結合係数 2,000  $\text{cm}^{-1}$ 以上)を導入し、共振器長を 20-30  $\mu\text{m}$  に短縮化することにより、低しきい値電流(< 0.1 mA)動作と高効率動作の両立を目指す。

これにより、低バイアス電流(1 mA)での高速直接変調動作(> 10 Gbit/s)という従来型の半

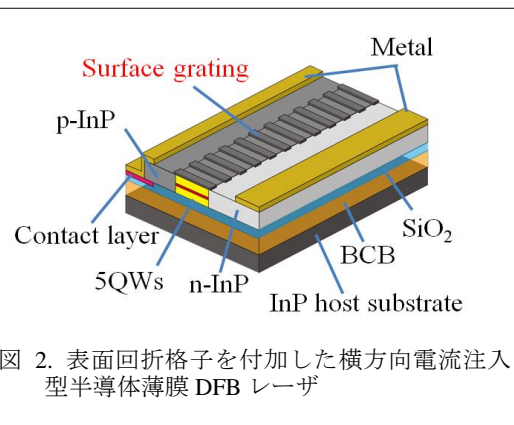


図 2. 表面回折格子を付加した横方向電流注入型半導体薄膜 DFB レーザ

導体レーザーでは到達不可能な低消費電力・高速動作(10 Gbit/s @ 1-2 mW)を実現できる可能性がある。

### 3. 研究の方法

本研究申請段階では、3 年間の期間に以下の研究を行うことを計画した。

- (1) **横方向電流注入型半導体薄膜 DFB レーザの低電流・高効率動作**: 活性領域に周期構造回折格子を有する DFB レーザ共振器を実現。低電流・高速変調性に優れた活性層構造および共振器構造の理論解析と実証。
- (2) **横方向電流注入型半導体薄膜レーザーの高速直接変調動作化**: 横配置された電極から活性層へのキャリア注入機構による直接変調帯域の理論的解明と検証。
- (3) **横方向電流注入型半導体薄膜レーザーの信頼性評価**: 縦方向電流注入を用いる通常レーザーと比較して、半導体コア層上下の界面での非発光再結合、高い電気抵抗・熱抵抗を有しているため、直流動作下における信頼性評価と高信頼化作製プロセスの開拓。

### 4. 研究成果

上記計画に沿って得られた成果を以下にまとめる。(文献番号は次節の主要発表論文番号に合わせ、新しいものからさかのぼって示した。)

- (1) **横方向電流注入型半導体薄膜 DFB レーザの低電流・高効率動作**: 図 2 に示した半導体薄膜 DFB レーザを試作し、2014 年

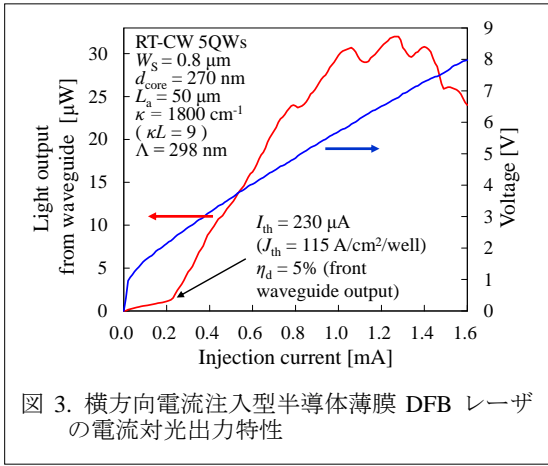


図 3. 横方向電流注入型半導体薄膜 DFB レーザの電流対光出力特性

に初めてその室温連続動作に成功すると共に、0.39 mA という低しきい値電流動作を実証した。(学会発表[3], 雑誌論文[2])。その後、回折格子強度を高めると共に短共振器構造化を進め、活性領域長 50 μm でしきい値電流を 0.23 mA まで低減した(雑誌論文[3])。しかし、そのレーザ構造は左右対称に光出力を放射する共振器構造であったため、微分量子効率が低い欠点を有していた。

これを克服するために、図 4 に示すように、DFB 領域の後ろ側の受動導波路領域に分布ブラッグ反射器 (DBR) 集積した半導体薄膜分布反射型 (DR) レーザの理論解析と試作を行った。その結果、図 3 の DFB 構造レーザと同等のしきい値電流を有し、なおかつ光出力効率が倍以上となる DR レーザを実現することに成功した(学会発表[1])。

- (2) 横方向電流注入型半導体薄膜レーザの高速直接変調動作: 上記 DR レーザの理論解析を行い、低バイアス電流 (1 mA) でオンチップ光通信に必要なとされる光出力 (160 μW) および高速直接変調動作 (> 10 Gbit/s) が両立できる可能性を明らかにした(学会発表[2])。
- (3) 横方向電流注入型半導体薄膜レーザの信頼性評価: 縦方向電流注入を用いる通常レーザ構造と比較して、半導体コア層上下の界面での非発光再結合、高い電気抵抗・熱抵抗を有していることが研究初期

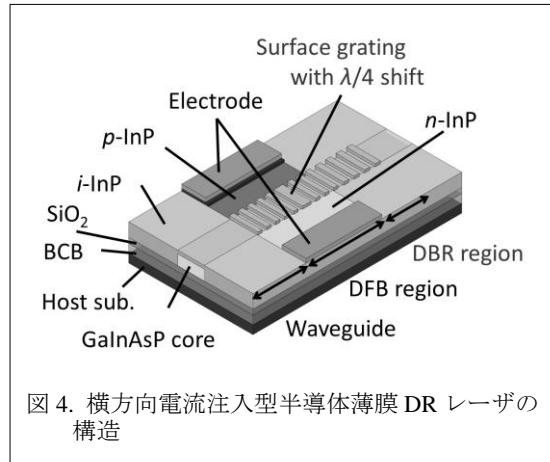


図 4. 横方向電流注入型半導体薄膜 DR レーザの構造

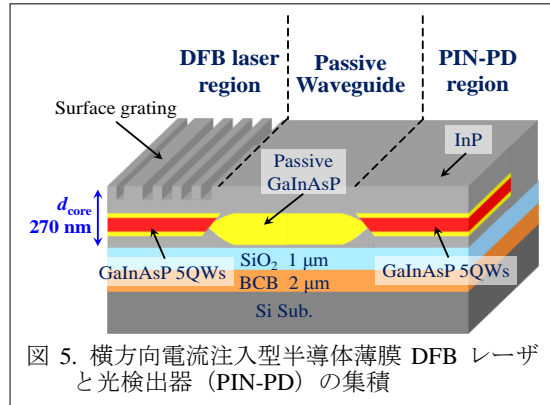


図 5. 横方向電流注入型半導体薄膜 DFB レーザと光検出器 (PIN-PD) の集積

には懸念されていた。

まず、共振器長の異なる半導体薄膜フアブリ・ペロー共振器レーザを作製し、その微分量子効率の共振器長依存性から内部量子効率は約 75% であり、長波長材料による通常の半導体レーザと同程度であることから、半導体薄膜構造化による非発光再結合の問題は見られないことを明らかにした(雑誌論文[5])。

つぎに、半導体薄膜 DFB レーザの熱抵抗特性に関して理論解析を行った結果、熱抵抗は共振器長約 50 μm の素子で 6100 K/W と通常の半導体レーザの約数十倍と非常に高い反面、オンチップ配線用レーザとして想定される動作電流 (1 mA) は数十分の一と低いため、発熱量が非常に低く、熱抵抗に起因する素子の温度上昇は雰囲気温度 80°C でも 10°C 以下と問題とならない値であることを明らかにした(雑誌論文[6])。また、実際に試作した共振器長 700 μm の素子で測定した結果、理論値 330 K/W に対して、実験値 340 K/W が得

られた(雑誌論文[4])。これらの結果から、半導体薄膜DFBレーザの熱抵抗特性は、理論予測通りに低電流動作させることができれば、実用上の問題は無いと考えられる。

最後に、横電流注入構造を用いる光検出器(pn接合フォトダイオード:PIN-PD)を作製し、10 Gbit/sの光信号検出を実証すると共に(雑誌論文[7])、図5に示すような半導体薄膜DFBレーザと半導体薄膜PIN-PDを集積した素子を実現した。この半導体薄膜DFBレーザのしきい値電流は0.28 mAであり、集積した半導体薄膜PIN-PDの暗電流は0.8 nAと非常に低雑音であることを明らかにした(雑誌論文[1])。

#### 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 28 件)

- [1] D. Inoue, T. Hiratani, Y. Atsuji, T. Tomiyasu, T. Amemiya, N. Nishiyama, and S. Arai, "Monolithic Integration of Membrane-based Butt-jointed Built-in DFB Lasers and PIN Photodiodes Bonded on Si Substrate," to be published in *IEEE J. Sel. Top. in Quantum Electron.*, 2015.
- [2] Y. Atsuji, K. Doi, T. Hiratani, D. Inoue, J. Lee, Y. Atsumi, T. Amemiya, N. Nishiyama, and S. Arai, "Low Threshold Current Operation of Membrane DFB Laser with Surface Grating Bonded on Si Substrate," to be published in *Jpn. J. Appl. Phys.* June 2015.
- [3] D. Inoue, J. Lee, T. Hiratani, Y. Atsuji, T. Amemiya, N. Nishiyama, and S. Arai, "Sub-milliampere threshold operation of butt-jointed built-in membrane DFB laser bonded on Si substrate," *Optics Express*, vol. 23, no. 6, p. 232433, Mar. 2015.
- [4] T. Hiratani, K. Doi, J. Lee, D. Inoue, T. Amemiya, N. Nishiyama, and S. Arai, "Thermal properties of lateral-current-injection semiconductor membrane Fabry-Perot laser under continuous-wave operation," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 54, no. 4, pp. 042701-1-5, Mar. 2015.
- [5] D. Inoue, J. Lee, K. Doi, T. Hiratani, Y. Atsuji, T. Amemiya, N. Nishiyama, and S. Arai, "Room-temperature continuous-wave operation of GaInAsP/InP lateral-current-injection membrane laser bonded on Si substrate," *Appl. Phys. Express*, vol. 7, no. 7, pp. 072701-1-4, July 2014.
- [6] K. Doi, T. Shindo, J. Lee, T. Amemiya, N. Nishiyama and S. Arai, "Thermal analysis of lateral-current-injection membrane distributed feedback laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 50, no. 5, pp. 321-326, May 2014.

- [7] T. Shindo, T. Koguchi, M. Futami, K. Doi, Y. Yamahara, J. Lee, T. Amemiya, N. Nishiyama, and S. Arai, "10 Gbps operation of top air-clad lateral junction waveguide-type photodiodes," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 52, no. 11, pp. 118002-1-3, Nov. 2013.

[学会発表] (計 108 件、うち招待講演 7 件)

- [1] T. Hiratani, D. Inoue, T. Tomiyasu, Y. Atsuji, K. Fukuda, T. Amemiya, N. Nishiyama, and S. Arai, "Semiconductor Membrane Distributed-reflector (DR) Laser," accepted for *Int. Conf. on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM 2015)*, Santa Barbara, USA, O6.1, July 2015.
- [2] T. Hiratani, Y. Atsuji, J. Lee, D. Inoue, T. Amemiya, N. Nishiyama and S. Arai, "Electrode Position Dependence of Energy Cost in Lateral-Current-Injection Membrane Distributed Reflector Laser," *Int. Semiconductor Laser Conference (ISLC 2014)*, Palma de Mallorca, TuP.04, Sept. 2014.
- [3] Y. Atsuji, K. Doi, J. Lee, Y. Atsumi, T. Hiratani, D. Inoue, T. Amemiya, N. Nishiyama, and S. Arai, "Low-threshold-current Operation of Lateral Current Injection Membrane Distributed-feedback Laser Bonded on Si," *Int. Conf. on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM 2014)*, Montpellier, France, We-D2-2, May 2014.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.pe.titech.ac.jp/AraiLab/index.html>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

荒井 滋久 (ARAI, SHIGEHISA)

東京工業大学・量子ナノエレクトロニクス  
研究センター・教授

研究者番号：30151137

##### (2) 研究分担者

なし

##### (3) 連携研究者

雨宮 智宏 (AMEMIYA, TOMOHIRO)

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