

BCB平坦化プロセスによる1.3 μm 波長帯 AlGaInAs/InP リッジ導波路型レーザ

八木 英樹*・大西 裕・小山 健二
 辻 幸洋・市川 弘之・吉永 弘幸
 甲斐田 憲明・野間口 俊夫・平塚 健二
 上坂 勝己

1.3 μm -Wavelength AlGaInAs/InP Ridge-Waveguide Lasers Utilizing Benzocyclobutene Planarization Process — by Hideki Yagi, Yutaka Onishi, Kenji Koyama, Yukihiko Tsuji, Hiroyuki Ichikawa, Hiroyuki Yoshinaga, Noriaki Kaida, Toshio Nomaguchi, Kenji Hiratsuka and Katsumi Uesaka — Aiming at high-speed direct modulation over 10 Gbit/s, the authors have developed a 1.3 μm wavelength AlGaInAs/InP distributed feedback (DFB) laser with a ridge-waveguide structure of 1.0 μm in the ridge width by utilizing a benzocyclobutene (BCB) planarization process. The laser recorded a wide electrical bandwidth of more than 20 GHz, promising the reduction of parasitic capacitance due to the effects of BCB buried structure. At the measurement temperature of 25 degrees Celsius, a clear eye-opening was observed with the extinction ratio of 6 dB in 26 Gbit/s direct modulation. Furthermore, under 14 Gbit/s direct modulation with the extinction ratio of 5 dB, uncooled operation was achieved until it reaches 85 degrees Celsius. This report emphasizes the high potential of ridge-waveguide lasers utilizing BCB planarization process as a light source for high-speed direct modulation over than 10 Gbit/s.

Keywords: AlGaInAs/InP, DFB laser, Ridge-waveguide structure, BCB planarization process

1. 緒言

データ通信の需要の急速な増加に伴い、波長分割多重 (WDM) 伝送を応用した 100 ギガイーサネット (100GbE)、さらには、16 ギガファイバチャネル (16GFC) 等の次世代超高速通信システムの標準化が進められている。これらの次世代通信システムでは、光源となる半導体レーザとして 100 GbE では、温調動作となるが、26 Gbit/s で動作するレーザが 4 波長必要となる。一方、16GFC では、14 Gbit/s 無温調動作が要求される。このようなレーザ実現には、電界吸収型変調器 (EAM) と分布帰還 (DFB) レーザが集積された EA-DFB レーザを用いた手法も考えられるが、我々はコスト、及び消費電力の観点で有利と考えられる直接変調型レーザを用いた超高速伝送の実現を目指している。

その実現に向けたアプローチとして、伝導帯側のバンド不連続が大きく、従来の GaInAsP 量子井戸と比較して高い微分利得が得られる AlGaInAs 量子井戸をレーザ活性層に採用した^{(1)~(5)}。また電流狭窄構造については、埋め込みヘテロ構造 (BH) と比較して、ストライプ横方向の電流、及び光閉じ込めが弱いことによりしきい値等のレーザ特性に難があるものの、電流狭窄に伴う pn 接合容量が付加されず、広帯域特性が期待できるリッジ導波路構造を採用した。さらに、低誘電率樹脂の一種である BCB (ベンゾシクロブテン) を用いた平坦化プロセス^{(6),(7)}を導入することで、電極配線部の低寄生容量化を試みている。

今回、BCB 平坦化プロセスを用いて、AlGaInAs/InP リッジ導波路型 DFB レーザを試作した結果、14 Gbit/s、ならびに 26 Gbit/s 直接変調動作を実現したので、報告する。

2. 作製プロセス

図 1 にリッジ導波路型レーザの作製プロセスを示す。最初に、(100) n^+ -InP 基板上に AlGaInAs 多層量子井戸を有機金属気相成長法 (OMVPE) により準備した後、電子ビーム (EB) 露光法、及びドライエッチングにより回折格子形成を行った。続いて、p-InP クラッド層、及び p^+ -GaInAs コンタクト層の再成長を行った後、フォトリソグラフィと SiN パターンをマスクとした CH_4/H_2 反応性イオンエッチング (RIE) によりリッジ構造を形成した。そして、保護膜となる SiO_2 を成膜した後、BCB 平坦化プロセスを実施した。

BCB 平坦化プロセスは最初に、感光性 BCB を塗布し、フォトリソグラフィと CF_4/O_2 -RIE により BCB 開口部を形成した。続いて、レジストパターンニング等は行わずに、BCB をマスクのように用いた CF_4 -RIE によるセルフアラインプロセスによりコンタクトのための SiO_2 開口パターンを形成した。写真 1 に示すように上述した BCB 平坦化プロセスにより高精度のリソグラフィ技術を必要とせず、2.0 μm 以下の BCB/ SiO_2 開口パターンの形成に成功している。

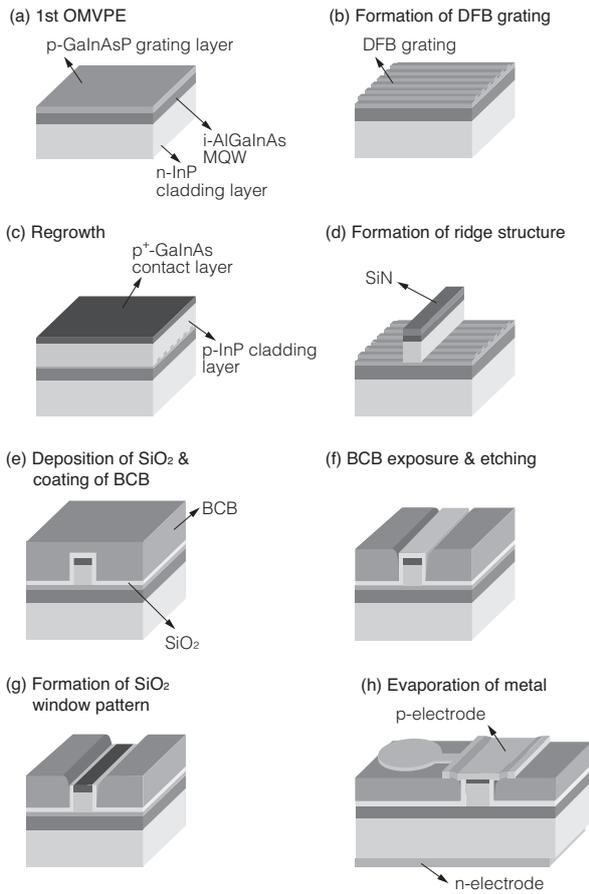


図1 BCB埋め込み型リッジ導波路型レーザの作製プロセス

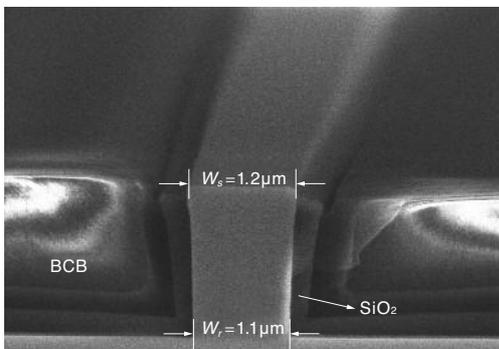


写真1 BCB/SiO₂開口パターン形成後のリッジ構造のSEM写真

そして、p側、及びn側のオーミック電極形成を行った後、前端面をAR、ならびに後端面をHRコーティングしている。

図2にBCB埋め込み型リッジ構造の回路応答の周波数依存性を示す。また、この結果はレーザ光出力応答から回路応答の寄与成分のみを抽出している。この図からわかるように、低誘電率樹脂（比誘電率：2.50–2.65）であるBCBを電極下に挿入したことに伴う低容量化に起因して、20 GHz以上の良好な f_{3dB} 帯域が得られた。以上の結果が

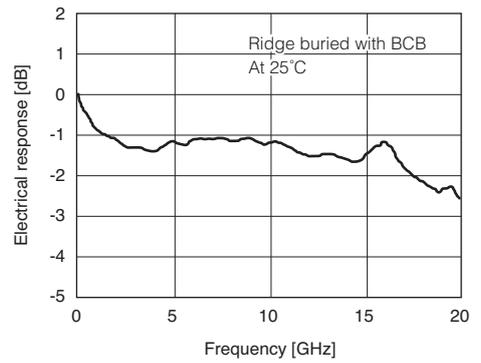


図2 BCB埋め込み型リッジ構造の回路応答の周波数依存性

ら、良好な電気帯域が得られるBCB埋め込み型リッジ構造が10 Gbit/s超の高速直接変調に効果的であることを確認した。

3. 特性評価

図3にBCB平坦化プロセスによるリッジ導波路型DFBレーザのCW駆動における電流–光出力特性を示す。共振器長 (L) 250 μm 、リッジ底部の幅 (W_r) 1.0 μm の素子のしきい値電流は25°Cでは13 mA、85°Cでは31 mAとなった。また、スロープ効率は25°Cでは0.41 W/A、85°Cでは0.25 W/Aとなった。素子抵抗に関しては6 Ω 程度と見積もられた。副モード抑圧比 (SMSR) は均一回折格子、AR/HR端面コーティングによるDFB共振器により35 dB以上が得られた。

図4に (a) 25°C、及び (b) 85°Cにおける緩和振動周波数 (f_r) のバイアス電流依存性を示す。25°Cにおける f_r の電流依存性の傾きはデチューニング（ブラッグ波長と利

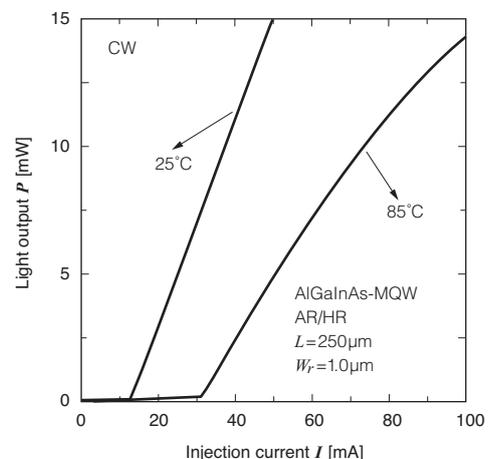


図3 BCB平坦化プロセスによるリッジ導波路型DFBレーザのCW駆動における電流–光出力特性

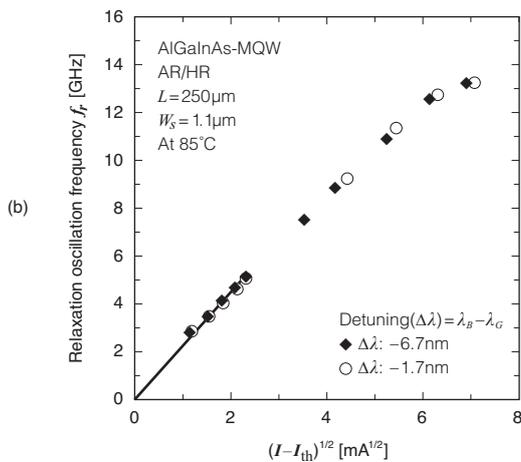
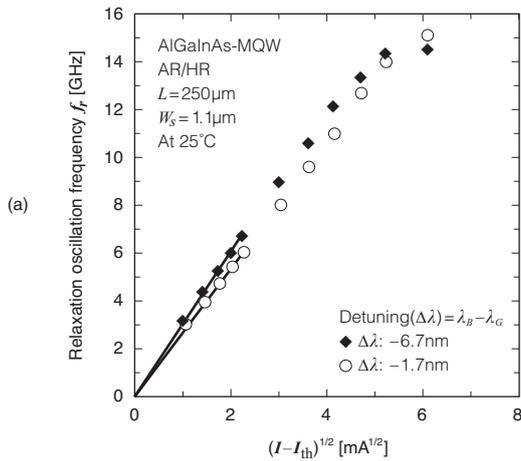


図4 (a) 25°C、及び(b) 85°Cにおける緩和振動周波数(fr)のバイアス電流依存性

得ピーク波長の差)を-1.7 nmとした場合には2.7 GHz/ $\text{mA}^{1/2}$ となった。また、デチューニングを-6.7 nmとした場合には3.1 GHz/ $\text{mA}^{1/2}$ と良好な値が得られた。また、85°Cにおける f_r の電流依存性の傾きはデチューニングを-1.7 nm、及び-6.7 nmとした素子の両者で、2.3 GHz/ $\text{mA}^{1/2}$ が得られ、AlGaInAs量子井戸の採用により高温でも良好な変調効率を得られた。

次に、デチューニングを-1.7 nmとした素子を用いて、ビット長 $2^{31}-1$ のNRZ擬似ランダム信号で、26 Gbit/s、及び14 Gbit/s直接変調における光波形の評価を行った。26 Gbit/s直接変調において、測定条件は25°C、バイアス電流50 mAとしている。また、この時の緩和振動周波数は15 GHzとなった。写真2に26 Gbit/s直接変調におけるアイパターンを示す。良好な電気帯域により消光比6 dBにおいて、明瞭なアイ開口が観測された。また、このアイパターンから、光波形の立上り時間(t_r)、及び立下り時間(t_f)はそれぞれ、13 ps、16 psと評価された。また、写真3に(a) 25°C、及び(b) 85°Cにおける14 Gbit/s直接変調におけるアイパターンを示す。25°C、及び85°Cの

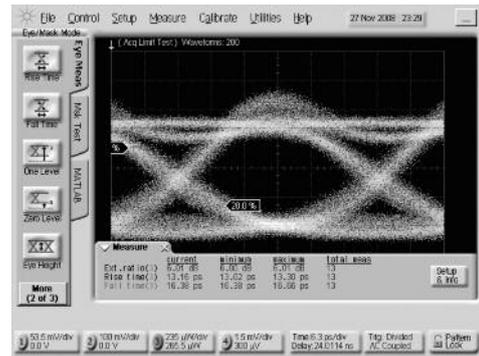


写真2 26 Gbit/s 直接変調におけるアイパターン (消光比: 6 dB)

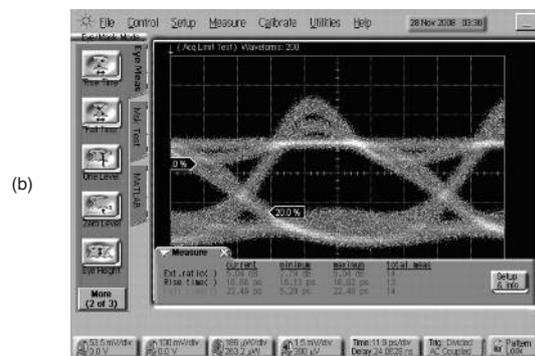
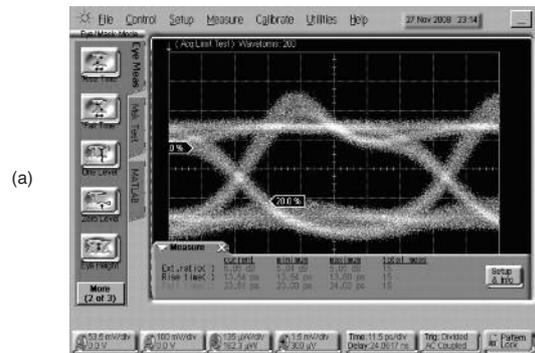


写真3 (a) 25°C、及び(b) 85°Cの14 Gbit/s 直接変調におけるアイパターン (消光比: 5 dB)

時のバイアス電流はそれぞれ、40 mA、60 mAとし、緩和振動周波数はそれぞれ、13 GHz、11 GHzとなった。この図からわかるように、消光比5 dBにおいて、明瞭なアイ開口が観測されており、16GFCに向けた14 Gbit/s無温調動作を達成した。

4. BCB平坦化プロセスの改善

セクション2で述べたように、感光性BCBを用いた平坦化プロセスによりリッジ導波路型レーザを作製していたが、この場合、感光性BCBへの直接露光に起因したBCB

開口形状の不安定性が生じ、歩留りに影響する。そこで、非感光性のBCBを採用し、その上にレジストパターンニングを行い、それをマスクとして、BCBエッチングによりBCB開口パターンを形成するプロセスに変更した。以上のBCB平坦化プロセスの変更により作製したリッジ導波路型レーザの断面SEM写真を図5(a)に示す。この図からわかるように、良好なBCB/SiO₂開口形状が得られ、電極金属の段切れも生じていない。また、この素子の加速信頼性試験(85°C、200 mAのACC条件、サンプル数:17)を行った結果、図5(b)に示すように1,200時間以上経過後も劣化は見られなかった。以上の結果から、BCB平坦化プロセスを用いたリッジ導波路型レーザが信頼性上、特に問題がないことを確認した。

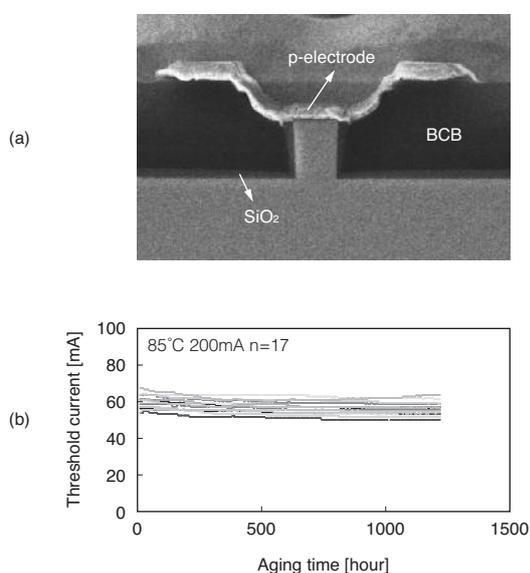


図5 (a) 非感光性BCBプロセスによるリッジ構造の断面SEM写真、及び (b) ACC条件による加速寿命試験

5. 結 言

BCB埋め込み型リッジ構造を有する1.3 μm波長帯Al-GaInAs/InP DFBレーザを試作した結果、測定温度25°C、消光比6 dBにおける26 Gbit/s直接変調において、明瞭なアイ開口が得られた。また、測定温度25°C、及び85°C、消光比5 dBにおける14 Gbit/s直接変調において、明瞭なアイ開口が得られ、無温調14 Gbit/s直接変調動作を達成した。さらに、BCB平坦化プロセスの改善を行ない、その素子の加速信頼性試験(85°C、200 mA、サンプル数:17)を行なった結果、目立った劣化は見られず、良好な信頼性を有していることを確認した。以上の結果から、BCBを用いた平坦化プロセスによるリッジ導波路型レーザが、10 Gbit/s超の直接変調をターゲットとした光源として有望であることを明らかにした。

参 考 文 献

- (1) K. Nakahara, T. Tsuchiya, T. Kitatani, K. Shinoda, T. Kikawa, F. Hamano, S. Fujisaki, T. Taniguchi, E. Nomoto, M. Sawada, and T. Yuasa, "12.5-Gb/s Direct Modulation Up to 115 °C in 1.3-μm InGaAlAs-MQW RWG DFB Lasers With Notch-Free Grating Structure", *J. Light. Technol.*, vol. 22, no. 1, pp. 159-165 (Jan. 2004)
- (2) K. Takagi, S. Shirai, Y. Tatsuoka, C. Watatani, T. Ota, T. Takiguchi, T. Aoyagi, T. Nishimura, and N. Tomita, "120 °C 10-Gb/s Uncooled Direct Modulated 1.3-μm AlGaInAs MQW DFB Laser Diodes", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 16, No. 11, pp. 2415-2417 (Nov. 2004)
- (3) N. Ikoma, T. Kawahara, N. Kaida, M. Murata, A. Moto, and T. Nakabayashi, "Highly Reliable AlGaInAs Buried Heterostructure Lasers for Uncooled 10Gb/s Direct Modulation", *Optical Fiber Communication (OFC 2005)*, no. OThU1, Anaheim, CA, USA (Mar. 2005)
- (4) R. Kobayashi, A. Ito, S. Kato, Y. Muroya, T. Kouji, Y. Sakata, J. Shimizu, and S. Ishikawa, "Low Drive-Current and Wide Temperature Operation of 1.3-μm AlGaInAs-MQW BH-DFB Lasers by Laterally Enhanced Cladding Layer Growth", *Optical Fiber Communication (OFC 2008)*, no. OThK2, San Diego, CA, USA (Feb. 2008)
- (5) K. Otsubo, M. Matsuda, K. Takada, S. Okumura, M. Ekawa, H. Tanaka, S. Ide, K. Mori, and T. Yamamoto, "Uncooled 25 Gbit/s direct modulation of semi-insulating buried-heterostructure 1.3-μm AlGaInAs quantum-well DFB lasers", *Electron. Lett.*, vol. 44, no. 10, pp. 631-632 (May 2008)
- (6) J. Wiedmann, M. M. Raj, K. Ebihara, K. Matsui, S. Tamura, and S. Arai, "Deeply etched semiconductor/benzocyclobutene distributed Bragg reflector laser combined with multiple cavities for 1.5-μm-wavelength single-mode operation", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 40, part 1, no. 6A, pp. 4031-4037 (Jun. 2001)
- (7) H. Yagi, K. Miura, Y. Nishimoto, D. Plumwongrot, T. Maruyama, and S. Arai, "Low Threshold Current Density Operation of GaInAsP/InP DFB Lasers Consisting of Quantum-Wire Active Regions," *International Conference on Quantum Electronics 2005 and the Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics 2005 (IQEC/CLEO-PR 2005)*, no. CTuJ1-4, pp. 61-62, Tokyo, Japan (Jul. 2005)

執 筆 者

八木 英樹*: 伝送デバイス研究所
博士(工学)
光通信用半導体レーザのプロセス、
設計の開発に従事



大西 裕 : 伝送デバイス研究所 博士(工学)
小山 健二 : 伝送デバイス研究所 主査
辻 幸洋 : 伝送デバイス研究所
市川 弘之 : 伝送デバイス研究所
吉永 弘幸 : 伝送デバイス研究所
甲斐田憲明 : 伝送デバイス研究所 主査
野間口俊夫 : 伝送デバイス研究所 主席
平塚 健二 : 伝送デバイス研究所 主幹 理学博士
上坂 勝己 : 伝送デバイス研究所 主席

*主執筆