電流注入フォトニック結晶レーザー

松尾 慎治, 武田 浩司, 藤井 拓郎, 碓塚 孝明

日本電信電話株式会社 NTT先端集積デバイス研究所 (〒243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮3-1)

Electrically Driven Photonic Crystal Lasers

Shinji MATSUO, Koji TAKEDA, Takuro FUJII, and Takaaki KAKITSUKA

NTT Device Technology Laboratories, NTT Corporation 3-1, Morinosato-Wakamiya, Atsugi, Kanagawa 243-0198

(Received April 15, 2016)

Photonic crystal lasers have attracted much attention because of the feasibility of its small energy cost operation. An electrically pumped photonic crystal laser in room-temperature continuous-wave operation is strongly desired. We have developed electrically driven photonic crystal laser employing an ultracompact active region embedded with InP layer. The device exhibits threshold current of 4.8 μA and the energy cost of 4.4 fJ/bit at 10-Gbit/s modulation. In addition, we have demonstrated heterogeneous integration of photonics crystal laser on Si substrate by using buried growth on III-V template, which is directly bonded on SiO_2/Si substrate.

Key Words: Photonic crystal laser, Optical interconnection, Heterogeneous integration

1. はじめに

光ファイバ通信の適用範囲は、半導体レーザーの低消費エネルギー動作化により短距離化されてきた。例えば、低消費エネルギーで低コストな導波路型直接変調レーザーの開発によりアクセス網は光化され、近年では100ギガビットイーサネット用の光源としても使用されている¹⁻³⁾。また、微小共振器の面発光レーザー (VCSEL) の開発により、データセンターやスーパーコンピュータのラック間のデータ通信は光化されている^{4,5)}。光と電気の利用領域の境界は100 Gbit/s $\times$ mとの報告⁶⁾があり、今後、インターネットで取り扱う情報量はますます増大すると考えられることから、これまで電気によりデータ伝送していたボード内、チップ間、将来的にはチップ内においても光通信技術適用の必要性が増すと予想される。

しかしながら、これらの極めて短い距離に光通信技術を適用するためには面発光レーザーを上回る超低消費エネルギー動作可能な半導体レーザーの開発が必要である。例えば、チップ間やチップ内光インターコネクションに光デバイスを使用するためには、2022年に1ビットあたりチップ間伝送では34 fJ、チップ内伝送では7 fJという超低消費エネルギーで動作することが必要と算出されている⁷⁾。例えば、7 fJ/bitを変調速度10 Gbit/sで実現する場合、レーザーの消費電力は70 μW という極めて小さな値になる。

Fig. 1は、レーザー活性層の占有面積とレーザーの

Fig. 1 Energy cost as a function of active area.

1ビット当りに消費するエネルギーの関係を示している。近年盛んに研究開発が行われている100ギガビットイーサネット向けの直接変調DFB (Distributed Feedback) レーザーでは、共振器長を100 μm 程度まで短くすることにより消費エネルギーを1ビット当たり数pJ程度まで削減している^{2,3)}。一方、ラック間光インターコネクションに用いられている面発光レーザーでは、最小1ビット当たり81 fJの消費エネルギーが報告されている^{5,8,9)}。

面発光レーザーはAlAs層の酸化狭窄により電流が流れる活性層サイズを実効的に縮小することにより、アクセス網等で用いられているDFBレーザーより一桁程度の低消費エネルギー化を実現している。しかしながら、前述のようにチップ間およびチップ内光インターコネクションに半導体レーザーを用いるためには、さらに一桁程度の低消費エネルギー化、すなわち活性層サイズの低減が必要である。このような極めて小さな活性層でレーザー発振を得るためには、反射率の高いミラーの作製が重要である。従って、面発光レーザーの1/10程度の波長サイズで非常に高い反射率を得ることが可能なフォトニック結晶(Photonic Crystal: PhC)共振器が、このような目的に適した半導体レーザー用共振器として注目され2000年頃から盛んに研究されてきた¹⁰⁻¹²⁾。

2. 微小共振器レーザーの設計

第1章で述べた1ビット当たりの消費エネルギーをエネルギーコスト(E)と呼んでおり、エネルギーコストは次式であらわされる。

$$E = \frac{V_{\text{bias}} \cdot I_{\text{bias}}}{BR} \quad (1)$$

ここで、 V_{bias} および I_{bias} はそれぞれバイアス電圧、バイアス電流、 BR は変調速度である。変調速度は一般にレーザーの緩和振動周波数(f_r)に比例し、次式であらわされる。

$$BR \propto f_r = \sqrt{\frac{\Gamma v_g}{q} \frac{dg}{dn} \eta_i \frac{I_{\text{bias}} - I_{\text{th}}}{V}} \quad (2)$$

ここで、 Γ は活性層への光閉じ込め係数、 v_g は群速度、 q は電子の電荷、 dg/dn は微分利得、 η_i は注入効率、 I_{bias} はバイアス電流、 I_{th} はしきい値電流、 V は活性層サイズである。(1)式より明らかなようにエネルギーコストを削減するためにはバイアス電流を削減することが重要である。しかしながら(2)式よりバイアス電流を削減すると変調速度が劣化してしまう。そのため活性層体積を削減し、しきい値電流を削減することが重要であることがわかる。また、光閉じ込め係数の増大が低バイアス電流で高速変調を実現するうえで重要なこともわかる。このような背景からフォトニック結晶レーザーは、微小共振器で高い Q 値を持ち、かつ薄膜の活性層(250 nm程度)の上下を空気層で挟んだエアブリッジ構造を用いているため大きな光閉じ込めを得ることができることから注目されてきた¹⁰⁻¹²⁾。

次に共振器の重要なパラメーターである Q 値の最適化について述べる。Fig. 2は、しきい値電流の Q 値依存性を示している。計算では直径1 μm の面発光レーザーと活性層の底面積が $0.5 \times 0.3 \mu\text{m}^2$ のフォトニック結晶レーザーにおいて多重量子井戸数3と仮定した。活性層の光閉じ込め係数は、面発光レーザーにおいては1%/well、フォトニック結晶レーザーにおいては3%/wellとした。面発光レーザーの場合は、 Q 値が10,000程度までは増加

Fig. 2 Calculated threshold current as a function of cavity Q -factor.

とともに急激にしきい値電流が減少し、その後ほぼ一定のしきい値となる。フォトニック結晶レーザーの場合は、光閉じ込め係数が大きいいため面発光レーザーと比較して小さな Q 値でも低いしきい値を得ることが可能である。小さな共振器で高い Q 値を持つには高反射率ミラーが必要になることを意味するため、低い Q 値で発振が得られる光閉じ込め係数の増大は重要である。

Fig. 3は変調速度と出力光強度の Q 値依存性を示している。この場合、活性層での内部損失を 20 cm^{-1} 、バイアス電流100 μA とした。変調速度は(2)に示すように Q 値の増加とともにしきい値電流が減少するため、増加する。ただし、(2)は緩和振動周波数による変調速度の上限を示しており、実際のデバイスでは高キャリア密度状態においてダンピングによる制限が支配的になるため数10 Gbit/sで変調速度は頭打ちとなる。一方、出力光強度

Fig. 3 Calculated output power and modulation speed as a function of cavity Q -factor.

はバイアス電流一定の条件のもとでは、最初は Q 値の増加に伴うしきい値電流の減少により増加するが、高い Q 値の領域では内部損失にともなう吸収の増大により出力光強度は減少する。従って、最適な Q 値は変調速度と出力光強度の積が最大となる値となり、2~3,000程度となる。

3. InP基板上フォトニック結晶レーザー

一般的な二次元フォトニック結晶レーザーの構造をFig. 4に示す。前述したように活性層の上下が空気挟まれたエアブリッジ構造を用いているため高い光閉じ込めが実現される。多くの研究機関では活性層のみのフォトニック結晶スラブ構造を用いている¹⁰⁻¹²⁾。フォトニック結晶中に欠陥を作製することで高い Q 値を得ることができるが、活性層に用いているInGaAsP層の熱抵抗が大きいこと光注入量の増加に伴う活性層温度の上昇が大きい、生成したキャリアが共振器から拡散するため効率が劣化する等の問題がある。そのため光励起のレーザー動作においても室温連続発振を得るためには量子ドットの利用¹¹⁾、共振器サイズの削減¹²⁾などの工夫をする必要があった。出力光強度や変調、さらには電流注入の実現には大きな課題が残っていた。

これらの問題を解決するために我々はFig. 5に示す埋め込みヘテロ構造をもつフォトニック結晶レーザーを提案している。InPスラブで形成されたフォトニック結晶線欠陥導波路の内部に活性層を埋め込んでいる¹³⁾。我々は、波長オーダの埋め込みヘテロ構造を用いていることからLEAP(Lambda-scale Embedded Active-region Photonic crystal)レーザーと呼んでいる。LEAPレーザーはInP層

Fig. 4 Schematic diagram of photonic crystal laser with all-active and air-bridge structure.

Fig. 5 Photonic crystal laser with embedded active region.

の熱伝導率とバンドギャップがInGaAsP層よりも大きいこと、発生したキャリアが共振器内で効率良く閉じ込め可能なため高効率なレーザーが作製できる。

実用的な観点では、電流注入で発振するレーザーの作製が重要となる。二次元フォトニック結晶の場合、250 nm程度の薄膜の上下を空気層に挟まれた形状のため、Fig. 6(a)に示すような通常の半導体レーザーと同様に基板に垂直方向にpin構造を積層するのは困難である。このため、Fig. 6(b)のように基板に水平方向にpin接合を形成する技術の確立が重要であり、我々はアンドープInP層で活性層を埋め込んだ後に、p型化にはZnの熱拡散、n型化にはSiのイオン注入を用いる作製方法を検討した¹⁴⁾。これらの方法は、大規模化の進むシリコンCMOSと同様のプロセス方法であることから将来の大規模化に適すると考えられる。

Fig. 7に作製したLEAPレーザーの注入電流に対する光出力の変化(I - L 特性)を示す¹⁵⁾。活性層はInGaAlAsの3層量子井戸を用い $2.5 \times 0.3 \times 0.16 \mu\text{m}^3$ のサイズに加工した後、InP層で埋め込んだ。また、活性層が埋め込まれていない線欠陥導波路部分に電流ブロッキング用のトレンチを形成した。この場合、電流ブロッキングトレンチの

Fig. 6 Cross-sectional views of (a) vertical and (b) lateral current injection structures.

Fig. 7 I - L characteristic of LEAP laser on InP substrate.

作製により Q 値が劣化しないようにトレンチを配置した。ファイバと出力導波路の結合損失は約10dBと見積もられており、この損失を考慮した場合にSi細線出力導波路内で得られると考えられる光出力強度をプロットしている。図に示すようにしきい値は、 $4.8\ \mu\text{A}$ であり、室温で連続発振する最も小さなしきい値電流を持つ半導体レーザーである。

Fig. 8は、バイアス電流 $25\ \mu\text{A}$ において10 Gbit/sのNRZ信号でレーザーを変調した場合の出力波形を示している。この場合、バイアス電圧は1.74 Vであることからエネルギーコストは $4.4\ \text{fJ/bit}$ となり、コンピュータコムで必要とされる動作エネルギーをクリアした初めてのレーザーであることが確認された。

4. Si基板上フォトニック結晶レーザー

LEAPレーザーの適用を目指しているコンピュータコムでは、高密度かつ大規模な光集積回路を低コストに作製することが重要である。このため、シリコンCMOSの作製技術を利用することが非常に重要になると考えられる。我々の提案するシリコン熱酸化膜上LEAPレーザーの作製方法をFig. 9に示す¹⁶⁻¹⁸⁾。

Fig. 8 Dynamic response of LEAP laser with 25- μA bias current.

Fig. 9 Fabrication procedure of LEAP laser on SiO_2/Si substrate.

シリコンCMOSの製造装置を利用するためには大口径基板を用いることが必要である。しかしながらInP基板は4インチ程度に基板サイズが制限されるため、Si基板をプロセス用基板として用いる事が必要である。このため、Fig. 9(a)に示すように異種基板の直接接合技術を用い熱酸化膜付シリコン基板と活性層を成長したInP基板を接合し、その後InP基板を除去して薄膜テンプレートを形成する(Fig. 9(b))。Fig. 9(b)のテンプレートを用いて活性層をメサストライプ状に加工し両側をInPで埋め込みを行う(Fig. 9(c))。その後、Fig. 9(d)に示すようにZn熱拡散とSiイオン注入を用いて横方向pin接合を形成し、最後にフォトニック結晶の空孔と電極を形成する。

提案する作製方法を用いれば活性層の埋め込みプロセスの際の露光を直接接合後にシリコン基板上に形成されたマーカーを用いて行えるため、例えば複数のInP基板から大口径Si基板に転写したテンプレートを用いて埋込みヘテロ構造を形成する場合にも活性層の相対的位置や角度などがステッパのアライメント精度で制御できる。また、グレーティングの描画が高性能なステッパで行えるなどのメリットが考えられる。さらには、シリコンフォトニクス技術を用いて作製されるシリコン導波路と高い位置合わせ精度で集積することが可能となり、III-V族光半導体デバイスとシリコン光デバイスを高密度に大規模集積可能となる。

このようなシリコン基板上III-Vテンプレートを用いた再成長は複数機関で検討されているがIII-V族半導体とシリコンの熱膨張係数差により成長時に膜質が劣化してしまいレーザーのような発光素子は実現されていない¹⁹⁻²¹⁾。

この問題を解決するためにはテンプレート膜厚の薄膜化が重要である。我々はテンプレート膜厚を250 nm程度に薄膜化できれば、再成長時の温度上昇におけるテンプレートのフォトルミネッセンス強度の劣化を直接接合直後のものと比較して4%程度の劣化に抑えることが可能であることを確認している¹⁷⁾。

そこで、テンプレート膜厚が250 nmのInGaAsP系活性層を持つ2インチInP基板と熱酸化膜付シリコン基板を酸素プラズマを用いて直接接合を行った。その後活性層をメサ加工しMOVPEにより成長温度610度でInP層の埋め込み成長を行った。埋め込み成長後の断面TEM像をFig. 10に示す。MQW活性層が良好な界面を持って埋め込み再成長されていることがわかる。また、アモルファスである SiO_2 上にInP層を直接接合しているため格子定数の違いによりInP層に欠陥が生じるという問題もなく再成長できていることも確認される。

Fig. 11には、作製した素子の I - L 特性を示している。InP基板上のLEAPレーザーと比較すると一桁しきい値電流が増加しているがレーザー発振が得られた。今後、共振器の設計を最適化することによりInP基板と同等の特性を得ることができると考えている。

5. まとめ

我々の提案したLEAPレーザーは、活性層を面発光

Fig. 10 TEM images of fabricated buried heterostructure on SiO_2 layer.

Fig. 11 I - L characteristic of LEAP laser on SiO_2/Si substrate.

レーザーの1/10程度まで削減したうえで、特性の劣化を抑えることで面発光レーザーよりも一桁ほど小さな動作エネルギーで変調動作可能なことが明らかとなった。このことはレーザーを用いた光通信の適用範囲をボード内やチップ間にも拡大可能である事を示唆している。

参考文献

- 1) H. Ohashi, M. Fukuda, Y. Kondo, M. Wada, Y. Tohmori, Y. Sakai, H. Toba, and Y. Itaya: *J. Lightwave Technol.* **16** (1998) 1302.
- 2) T. Tadokoro, T. Yamanaka, F. Kano, H. Ohashi, Y. Kondo, and K. Kishi: *IEEE Photon. Technol. Lett.* **21** (2009) 1154.
- 3) M. Matsuda, T. Simoyama, A. Uetake, S. Okumura, M. Ekawa, and T. Yamamoto: *Electron. Lett.* **48** (2012) 450.
- 4) F. Koyama, S. Kinoshita, and K. Iga: *Appl. Phys. Lett.* **55** (1989) 221.
- 5) P. Moser, W. Hofmann, P. Wolf, J. A. Lott, G. Larisch, A. Payusov, N. N. Ledentsov, and D. Bimberg: *Appl. Phys. Lett.* **98** (2011) 231106.
- 6) A. Krishnamoorthy, K. Goossen, W. Jan, Z. Xueze, R. Ho, L. Guoliang, R. Rozier, F. Liu, D. Patil, J. Lexau, H. Schwetman, F. Dazeng, M. Asghari, T. Pinguet, J. Cunningham *et al.*: *J. Sel. Top. Quantum. Electron.* **17** (2011) 357.
- 7) D.A.B. Miller: *Proc. IEEE* **97** (2009) 1166.
- 8) Y.-C. Chang and L. A. Coldren: *IEEE 21st International Semiconductor Laser Conference* (2008) 159.
- 9) K. Takaki, S. Imaia, S. Kamivab, H. Shimizua, Y. Kawakita, K. Hiraiwa, T. Takagia, H. Shimizua, J. Yoshida, T. Ishikawab, N. Tsukijia, A. Kasukawa, *et al.*: *Proc. Int. Soc. Opt. Eng.* **7952** (2011) 1.
- 10) O. Painter, R. Lee, A. Scherer, A. Yariv, J. O' Brien, D. Dapkus, and L. Kim: *Science* **284** (1999) 1819.
- 11) M. Nomura, S. Iwamoto, K. Watanabe, N. Kumagai, Y. Nakata, S. Ishida, and Y. Arakawa: *Opt. Express* **14** (2006) 6308.
- 12) K. Nozaki, K. Kita, and T. Baba: *Opt. Express* **15** (2007) 7506.
- 13) S. Matsuo, A. Shinya, T. Kakitsuka, K. Nozaki, T. Segawa, T. Sato, Y. Kawaguchi, and M. Notomi: *Nature Photon.* **4** (2010) 648.
- 14) S. Matsuo, K. Takeda, T. Sato, M. Notomi, A. Shinya, K. Nozaki, H. Taniyama, K. Hasebe, and T. Kakitsuka: *Opt. Express* **20** (2012) 3773.
- 15) K. Takeda, T. Sato, A. Shinya, K. Nozaki, W. Kobayashi, H. Taniyama, M. Notomi, K. Hasebe, T. Kakitsuka, S. Matsuo *et al.*: *Nature Photon.* **7** (2013) 569.
- 16) S. Matsuo, T. Fujii, K. Hasebe, K. Takeda, T. Sato, and T. Kakitsuka: *Opt. Express* **22** (2014) 12139.
- 17) T. Fujii, T. Sato, K. Takeda, K. Hasebe, T. Kakitsuka, and S. Matsuo: *IET Optoelectron.* **9** (2015) 151.
- 18) S. Matsuo, T. Fujii, K. Hasebe, K. Takeda, T. Sato, and T. Kakitsuka: *J. Lightwave Tech.* **33** (2015) 1217.
- 19) A. F. Morral, J. M. Zahler, H. A. Atwater, S. P. Ahrenkiel, and M. W. Wanlass: *Appl. Phys. Lett.* **83** (2003) 5413.
- 20) K. Matsumoto, T. Makino, K. Kimura, and K. Shimomura: *J. Cryst. Growth.* **370** (2013) 133.
- 21) C. Zhang, D. Liang, and J. E. Bowers: *ECS Solid State Lett.* **2** (2013) Q82.

レーザーワード

二次元フォトリック結晶

フォトリック結晶は波長オーダーで周期的な屈折率分布をもつ構造であり、光子のエネルギーに対してバンド構造が形成される。二次元フォトリック結晶は、屈折率の周期構造が二次元的な構造を持つことを特徴としてい

る。本報告では、二次元フォトリック結晶として上下を空気層で挟まれた半導体層(膜厚250 nm)を用い、この半導体層に二元的にフォトリック結晶の空孔を作製している。三次元フォトリック結晶と比較すると作製が容易であることから幅広く用いられている。(松尾 慎治)