

InP半導体薄膜構造による1.55 μm 帯レーザーの低しきい値・高速動作

西山 伸彦^{1,2}, 荒井 滋久^{1,2}, 平谷 拓生¹, 井上 大輔¹, 雨宮 智宏^{1,2}

¹東京工業大学工学院 電気電子系 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1-S9-1)

²東京工業大学科学技術創成研究院 未来産業技術研究所 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1-S9-1)

Low Threshold and High Speed Operation of 1.55- μm -Band Lasers by InP-Based Membrane Structure

Nobuhiko NISHIYAMA^{1,2}, Shigehisa ARAI^{1,2},

Takuo HIRATANI¹, Daisuke INOUE¹, and Tomohiro AMEMIYA^{1,2}

¹Tokyo Institute of Technology, School of Engineering, Department of Electrical and Electronic Engineering,
2-12-1-S9-1, O-okayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552

²Tokyo Institute of Technology, Institute of Innovative Research,
Laboratory for Future Interdisciplinary Research of Science and Technology,
2-12-1-S9-1, O-okayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552

(Received April 27, 2016)

An overview of researches on semiconductor membrane lasers is presented. The membrane structure, which consists of very thin III-V core layers sandwiched by low index dielectric or air claddings, can enhance optical confinement to the III-V layers. This enhancement enables very low threshold current and highly efficient laser operation. An on-chip optical interconnection is one of the applications for membrane photonic integrated circuits toward large scale data center computing. Such application will require over 0.16 mW output power and 10 Gbit/s modulation with an operating current less than 1 mA. In theoretical calculations, these requirements can be met by membrane laser structures. In actual devices, a threshold current of 250 μA was achieved and a modulation efficiency of 9.9 GHz/ $\sqrt{\text{mA}}$ was demonstrated with InP-based membrane structure on Si substrate.

Key Words: Semiconductor Laser, InP, Membrane structure, Optical Interconnection

1. はじめに

光通信は、長波長帯レーザーの研究開発と、光ファイバの低損失により大陸間などの長距離通信でその重要性・必要性が認識され、今やオフィスや家庭での主な通信手段として浸透している。それによりインターネットというインフラが構築され、大量のデータを扱う新たなサービス産業が誕生した。Over the Topと呼ばれるこのインターネットインフラの上に立脚した企業は個々に巨大なデータセンターを有し、日々その拡張を続けている。このデータセンターの高性能化は、主にサーバの並列化に依っているが、並列化による高性能化の限界はアムダールの法則で表されることが広く知られている。ここで重要となるのが、個々の部品・装置間(チップ間、ラック間)の通信帯域であり、部品自身の速度が高速化しても最終的には、トータルの速度は通信帯域で制限される(I/Oボトルネックと呼ばれる)。これを解決するためには、通信帯域を増加させる必要があり、ラック間などでは、電線に比べ通信帯域増加が容易な光ファイバが

すでに導入されている。その一方で、ボード間やボード内のチップ間には、電気配線が未だ使われている場合が多い。しかしながら、データセンターへの大規模化の要求に伴い徐々に光配線への変更が検討され始めている。近年盛んに研究開発が行われているシリコンフォトニクス技術も大きな適用先の一つにこれが上げられる。

我々は、さらにその先であるCMOS LSIチップ上の光配線を目指し、研究を進めてきた。LSIの高性能化は、スケーリング則に伴うCMOSの速度向上に支えられてきたが、近年逆スケーリング則と呼ばれるI/Oボトルネックと同様の現象が指摘されている。つまりスケーリング則に伴い1チップあたりのトランジスタ数が増加すると、それらをつなぐ配線の距離が増加するため、結果的に遅延やジュール熱による発熱が生じ、性能を劣化させてしまうという現象である。その解決策としてチップ上光配線の導入が提案されてきたが、それを実現するためには下記のようないくつかの要求がある¹⁾。

- ・CMOS作製プロセスのバックエンド互換性が存在すること

- ・小型であること(幅は電気配線の最上配線層の大きさである数 μm 程度)
- ・データ伝送のためのエネルギーコストが十分小さいこと(100 fJ/bit以下, できれば10 fJ/bit以下)

これらの要求を踏まえると, 従来の半導体レーザーの構成では実現することが困難である. そこで, 新たにFig. 1のような半導体薄膜(以下メンブレン)光回路²⁾を提案した.

次節以降, その構造, 理論特性, 作製プロセスと実測による特性を順に述べてゆく.

2. メンブレン構造の理論特性

2.1 メンブレン構造

メンブレン構造は, Fig. 2(b)のように薄いIII-V族半導体をコアとする層と誘電体あるいは空気で構成される.

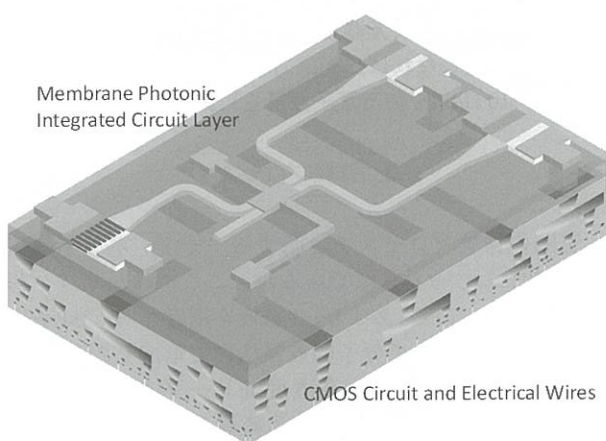


Fig. 1 Membrane photonic integrated circuit on CMOS LSI.

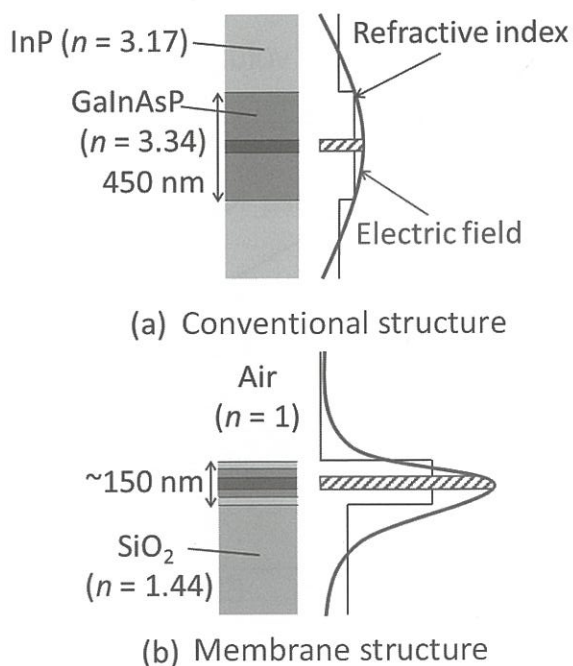


Fig. 2 Comparison of conventional and membrane semiconductor heterostructures.

一般的に半導体レーザーに用いられているダブルヘテロ構造(Fig. 2(a))はコア層とクラッド層の屈折率差は大きくない. 一方でクラッド層を例えばSiO₂にした場合, 屈折率は1.44となり, クラッド層がInPの場合(屈折率3.17)に比べ, 大きな差をとることが出来る. 結果としてコア層への光閉じ込めは増加し, コア層が約150 nm程度のとき, 最大に達し, 光閉じ込め係数は従来の構造のそれと比べて約3倍となる. この構造は, SOI基板を使ったシリコンフォトニクスに近い. シリコンフォトニクスはその強い光閉じ込めによって小型の光回路が作製できることを特長の一つとしているが, 本構造を使えばIII-V族半導体においても同様な小型の光回路が作製可能となる.

この構造を半導体レーザーに適用した場合, その効果は大きい. 光閉じ込めが強いことは, 発振しきい値を低減できることを意味しており, さらにデータ伝送のための光変調の効率も向上することが可能となる. 実際に光励起での実験においては, 発振電力0.34 mW(電流換算24 μA)での動作が得られており³⁾, その理論的な検証は得られている. 実用化には電流注入動作が必要となるが, そのための構造をFig. 3に示す. ホスト基板(最終的にはCMOS回路であるが, 現段階ではSi基板を用いている)に接合材料を介してSiO₂クラッドを有したInP層を形成する. 厚みは数百nm程度であるため, 従来の半導体レーザーとは異なり縦に電流を注入することはできない. そのため横方向にpin接合を結晶再成長により形成している.

表面には, 共振方向の光閉じ込めを強めるための表面回折格子をすることで分布帰還型(DBF)構造としており, ここでも薄膜化の効果のため結合係数は数千 cm^{-1} 程度のものを容易に得ることができる. また, 近年作製している素子は, 後部導波路部分にも回折格子を導入することで前部に光出力を集中させる分布反射型(DR)構造としている⁴⁾.

2.2 メンブレンレーザーの発振特性

発振特性の理論的考察を議論する前に, オンチップ光配線を目的とした場合の光源であるレーザーに求められ

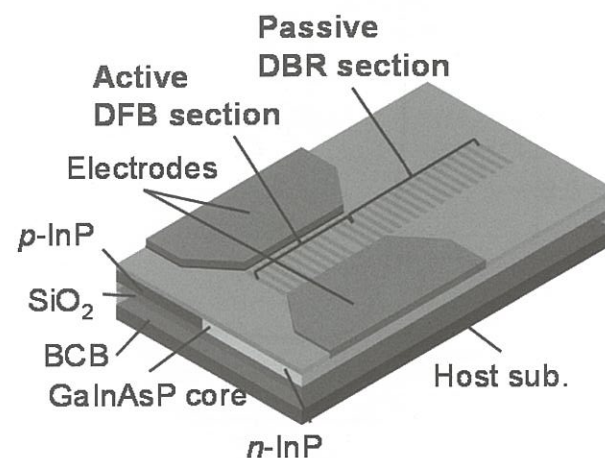


Fig. 3 Schematic diagram of the membrane DR laser with a surface grating structure.

る要求性能を考える。CMOSからの電気信号をレーザーによって光に変換し、導波路を介して最終的に受光器で再び電気信号に戻す。ここで、消費電力の観点から、受光感度が高いアバランシェ型の受光器は使用できずPIN型を想定する。この場合10 Gbit/sのデータレートでのエラーフリー動作を考えると最小受光感度は-13dBm程度が必要となる。ここからTable 1のように、2 cmの伝送や結合効率を仮定すると、レーザーの光出力としては0.16 mWとなる。また、レーザーの直接変調動作を考えると10 Gbit/s動作のためにレーザーの帯域は8 GHz程度が必要となる。この時のエネルギーコストは、前述したように100 fJ/bitであるので、駆動電圧を1 Vとすると、駆動電流としては1 mAとなる。つまり、1 mAの駆動電流で0.16 mWの光出力と8 GHzの変調帯域が要求されることになる。これは、従来の半導体レーザーでは達成できない厳しい要求である。逆にリングレーザー⁵⁾やフォトリソニック結晶レーザー⁶⁾などのマイクロ・ナノレーザーと呼ばれている構造では、光閉じ込めが強すぎて出力要求が達成できない。

それに対しメンブレンレーザーでは光閉じ込めを従来のレーザーに比べて高くしつつも、出力側の実効反射率を容易に調整することが可能である。Fig. 4には、メンブレンDRレーザーにおけるしきい値電流と外部微分量子効率の共振器長依存性を示す。構造としては1.5 μm帯GaInAsP量子井戸をGaInAsP光閉じ込め層、InPキャップ層で挟んだ層厚250 nmのコア層と空気とSiO₂のクラッド層からなる断面構造を有し、InP層を50 nmエッチングし表面回折格子により結合係数1800 cm⁻¹のDFB構造を形成している。また、後部導波路層にも反射率100%の回折格子を形成した構造を仮定している。また、前述したように横方向にPIN構造を形成しその活性層ストライプ

Table 1 Requirements for on-chip light sources.

Minimum Receiver Sensitivity		-13dBm
Assumption	PD-WG Coupling Loss	1.5dB
	LD-WG Coupling Loss	1.5dB
	Propagation Loss	2dB (1dB/cm)
Laser Output Power		-8dBm (0.16 mW)

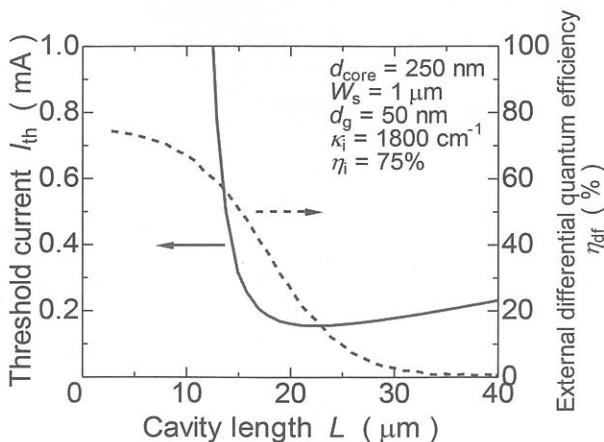


Fig. 4 Threshold current and external differential quantum efficiency as functions of the cavity length.

幅は1 μmとした。これより共振器長が20 μmあたりでしきい値電流は0.2 mAを切る値となり、その時でも外部微分量子効率は30%を確保することができる。これは、要求値を十分達成できる値である。Fig. 5には、消費電力の共振器長依存性を示している。この計算では、それぞれの共振器長において、もっとも消費電力が低減できるように結合係数を最適化している。ここでは、2つのプロットがあり、一つは光出力が0.16 mWの時の消費電力、もう一つは10 Gbit/sの直接変調が可能な帯域を達成する消費電力である。2つのプロットは異なる値を示し、ある共振器長でクロスするが、要求性能としては、この両方を達成する必要がある。これより、共振器長20 μmにおいて最小となりこの時の消費電力が1 mW以下(100 fJ/bit以下)であることから、要求性能を満たす構造が実現可能であることが明らかとなった。将来的には、Table 1で示した5dBのリンクロスや、CMOS回路直結のンプフリー受光器を導入することで最小受光感度の低減が可能となれば、光出力の要求性能を下げることができ、10 fJ/bitを切る素子設計も可能であろう。

3. 作製プロセス

実際の作製プロセスを説明する。まず、ホスト基板(最終的にはCMOS基板であるが、ここではシリコン基板を利用している)およびInP基板を用意する。InP基板は、初期構造として分子線成長法にて形成したGaInAs/InPエッチストップ層、高濃度BeドープGaInAs層、InPキャップ層、GaInAsP光閉じ込め層および1.5 μm帯5層GaInAsP量子井戸、そしてその左右を有機金属気相成長装置による選択成長により形成したnおよびp型InP層、前後にはGaInAsP受動導波路層から成っている。Fig. 6に

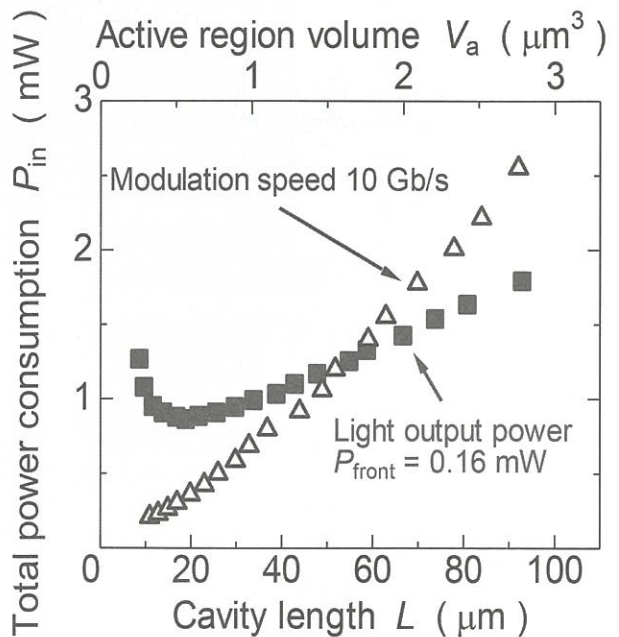


Fig. 5 Cavity length dependence of total power consumption for required light output power (0.16 mW) and that for 10 Gb/s operation.

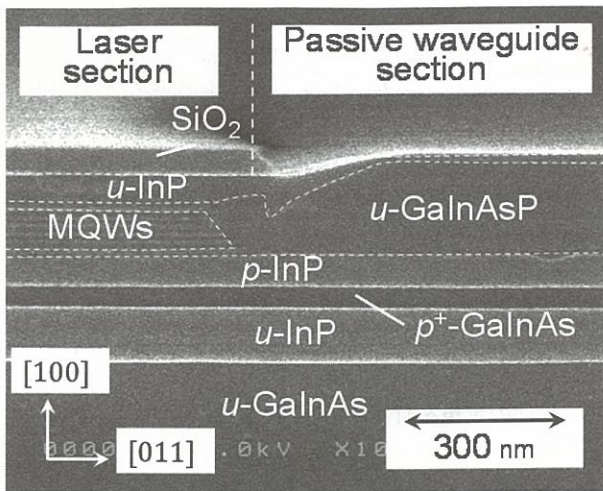


Fig. 6 A SEM view of the III-V structure after regrowth.

は、InP基板のレーザー共振器方向断面の電子顕微鏡写真を示すが、量子井戸と受動導波路領域が良好に隣接できていることが分かる⁷⁾。このような構造のInP基板に下部クラッド層となるSiO₂を形成し、ホスト基板側に接着層となるベンゾシクロブテン(BCB)を塗布する。その後150°Cでホスト基板上BCBをプリキュアしたあと2つの基板を貼り付ける。BCBは赤外光に対して十分透明であり、直接接合技術を利用したSi基板上ハイブリッドレーザー(SOI基板に形成された導波路とIII-V族半導体活性層を一体共振器としたレーザー)と異なり^{8,9)}表面での少々の凹凸に対しても貼り付けることができる。しかしながら条件によっては界面に空孔が発生する。これは、BCB前駆体に含まれる溶媒が気化するためであり、これを防ぐためには、事前に適度な部分固化が必要である。Fig. 7には赤外線カメラによる貼り付け界面の状態のプリキュア時間依存性を示すが、2分や10分のプリキュアでは空孔が多くみられるものの、20分以上になると良好

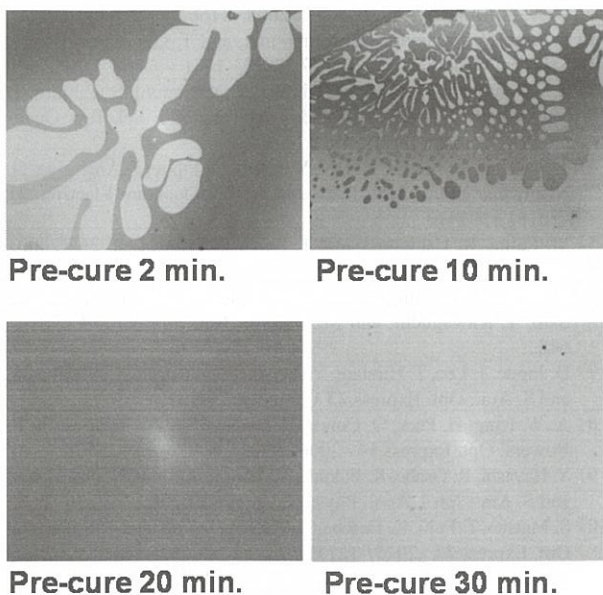


Fig. 7 IR images of the interfaces of bonded wafers.

な界面が得られていることがわかる。実際に接合強度においてもプリキュア時間が20分を超えると強くなることが確認されている。このようにして貼り付けた後、ハードキュアでBCBを完全固化し、InP元基板をエッチングし、メンブレン基板が完成する。その上に、電極および電子ビーム描画による回折格子形成を経て完成となる。同様のメンブレン構造を有したレーザーは、近年他機関でも報告されており、貼り付けプロセスとしてSiO₂を介した直接接合法が利用されている¹⁰⁾。この場合、前述したように直接接合法では表面の凹凸に敏感なため、接合した後に再成長を行うシーケンスとしている。

また、BCBを利用した貼り付けという観点からは、メンブレン構造ではないが、薄いBCBを介することでSOI基板と貼り合せ、ハイブリッドレーザーを実現する試みも行われている¹¹⁾。薄いBCBを用いることによって光のモードフィールドをSOI基板側の導波路へ十分広げることができる。

本稿は、レーザーに関する概説のため詳細は割愛するが、このようなメンブレン構造を利用した低損失導波路¹²⁾やAWG¹³⁾、カップラ¹⁴⁾などのパッシブ部品に関する研究も著者らや他機関で行われている。

4. 素子特性

4.1 光出力およびスペクトル特性

実際の室温連続条件での素子特性をFig. 8, Fig. 9に示す¹⁵⁾。素子の大きさとしては、活性領域のストライプ幅0.7 μm, DFB領域長30 μm, 後部DBR領域長は90 μmとしている。しきい値電流は250 μAであり、理論計算通り1 mAを切るしきい値で発振することができた。しかしながら、理論に比べるとまだ高いしきい値であり、今後のリーク電流の低減や内部量子効率の向上により、さらに低いしきい値を達成することが可能となるであろう。本測定では光出力は、活性領域に集積したGaInAsP導波路の端面から取り出しているが、その場合の外部微

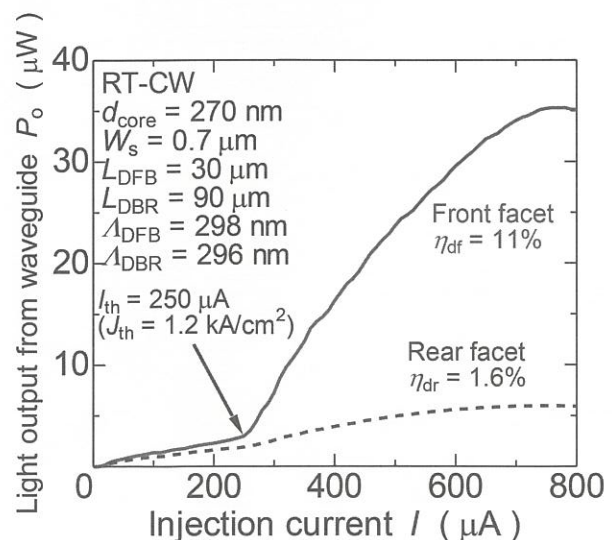


Fig. 8 I - L characteristics of DR lasers.

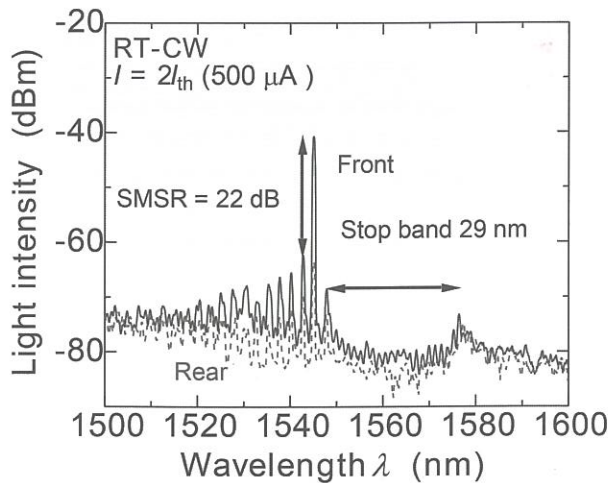


Fig. 9 A spectrum of DR lasers at a current of 500 μA .

分量子効率としては前端面11%、後端面1.6%を達成している。DR構造による非対称出力は得ているものの、今後は前端面出力をさらに増加していくことが必要である。スペクトル特性としては副モード抑圧比(SMSR) 22dB、ストップバンド幅29 nmを達成している。このストップバンド幅から計算される結合係数は 1300 cm^{-1} となる。このような広いストップバンド幅は大きな屈折率差を実現することができるメンブレン構造独特のものであり、それによって均一回折格子構造であっても利得スペクトル形状とのマッチングを利用して単一モード動作が可能となるが、さらなる低しきい値動作を考え $\lambda/4$ シフト構造の導入も検討している。

4.2 変調特性

前述したように、光出力と並んで要求性能として重要なのが変調特性(1 mAの駆動電流で10 Gbit/sの変調が可能であるか?)である。Fig. 10には、DFB構造を有するメンブレンレーザーによる小信号特性である¹⁶⁾。信号はGS型の40 GHz高周波プローブを利用して直接素子に印加している。しきい値電流270 μA の素子に対してバイアス電流1.03 mAかけることで、3dB帯域幅9.5 GHzを達

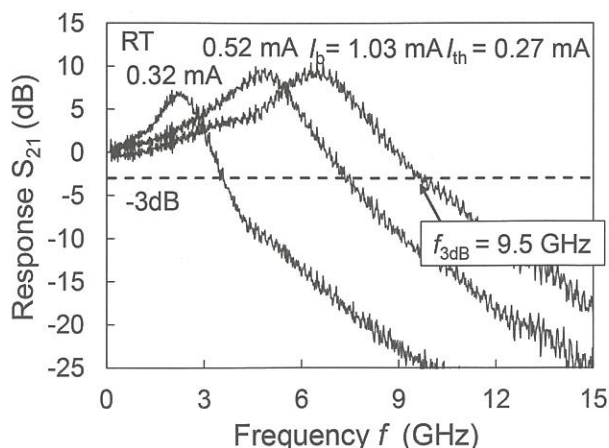


Fig. 10 Small signal modulation of a membrane DFB laser.

成しており、この値は十分10 Gbit/s信号が変調可能である。変調効率の指標となる緩和振動周波数のバイアス電流依存性は $9.9\text{ GHz}/\sqrt{\text{mA}}$ であり、従来の素子に比べて高い値を示した。他機関においても同じメンブレン構造で $9.4\text{ GHz}/\sqrt{\text{mA}}$ の報告もあり¹⁷⁾、メンブレン構造による活性層への光閉じ込め係数増加の効果が変調特性においても確認された。研究室内ではより高い変調効率を持つ素子も得られており、今後機会があれば報告する。現在は光出力が不十分であるため、実際の大信号変調でアンプ無しでのエラーフリー動作は得られてはいないが、今後前節で述べた特性の改善を行うことによって、エラーフリー動作の実現を目指す。

5. まとめ

半導体薄膜(メンブレン)構造、特に半導体レーザーについてその理論、作製方法、特性を概説した。メンブレン構造は、その構造的長から低しきい値、高効率、高速変調をバランスすることが可能であり、実際にその優れた特性を実証してきた。ここでは紙面の関係で紹介していないが、すでに光回路の主要部品である導波路や受光器においても、低い伝搬損失や10 Gbit/sでの信号受光も達成しており、初期的な集積構造も実現している。今後は、レーザーも含めた個々の素子の性能を向上させつつ、集積構造による光リンクを実証し、最終的にはCMOS回路上での動作を目指す。

謝 辞

本研究の成果の一部は科研費(15H05763, 25709026, 15J04654, 15J11776)、NEDOプロジェクト、JST-CRESTの援助を受けて実施した。

参考文献

- 1) D. A. B. Miller: *Proc. IEEE* **97** (2009) 1166.
- 2) S. Arai, N. Nishiyama, T. Maruyama, and T. Okumura: *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **17** (2011) 1381.
- 3) S. Sakamoto, H. Naitoh, M. Ohtake, Y. Nishimoto, S. Tamura, T. Maruyama, N. Nishiyama, and S. Arai: *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **13** (2007) 1135.
- 4) T. Hiratani, T. Shindo, K. Doi, Y. Atsui, D. Inoue, T. Amemiya, N. Nishiyama and S. Arai: *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **21** (2015) 1503410.
- 5) M. Fujita, R. Ushigome, and T. Baba: *Electron. Lett.* **36** (2000) 790.
- 6) S. Matsuo, A. Shinya, T. Kakitsuka, K. Nozaki, T. Segawa, T. Sato, Y. Kawaguchi, and M. Notomi: *Nat. Photonics* **4** (2010) 648.
- 7) D. Inoue, J. Lee, T. Hiratani, Y. Atsui, T. Amemiya, N. Nishiyama, and S. Arai: *Opt. Express* **23** (2015) 7771.
- 8) A. W. Fang, H. Park, O. Cohen, R. Jones, M. J. Paniccia, and J. E. Bowers: *Opt. Express* **14** (2006) 9203.
- 9) Y. Hayashi, R. Osabe, K. Fukuda, Y. Atsumi, J. Kang, N. Nishiyama, and S. Arai: *Jpn J. Appl. Phys.* **52** (2013) 060202.
- 10) S. Matsuo, T. Fujii, K. Hasebe, K. Takeda, T. Sato, and T. Kakitsuka: *Opt. Express* **22** (2015) 12139.
- 11) S. Stankovic, R. Jones, M. N. Sysak, J. M. Heck, G. Roelkens, and D. Van Thourhout: *IEEE Photonics Technol. Lett.* **24** (2012) 2155.

- 12) J. Lee, Y. Maeda, Y. Atsumi, Y. Takino, N. Nishiyama, and S. Arai: *Jpn. J. Appl. Phys.* **51** (2012) 042201.
- 13) M. Takenaka, M. Yokoyama, M. Sugiyama, Y. Nakano, and S. Takagi: *Appl. Phys. Express* **2** (2009) 122201.
- 14) P. R. A. Binetti, R. Orobtcouk, X. J. M. Leijtens, B. Han, T. de Vries, Y.-S. Oei, L. Di Cioccio, J.-M. Fedeli, C. Lagahe, P. J. van Veldhoven, R. Nötzel, and M. K. Smit *et al.*: *Photn. Tech. Lett.* **21** (2009) 337.
- 15) T. Hiratani, D. Inoue, T. Tomiyasu, Y. Atsuji, K. Fukuda, T. Amemiya, N. Nishiyama and S. Arai: *Appl. Phys. Express* **8** (2015) 112701.
- 16) D. Inoue, T. Hiratani, K. Fukuda, T. Tomiyasu, T. Amemiya, N. Nishiyama, and S. Arai: *Opt. Express* **23** (2015) 29024.
- 17) H. Nishi, T. Fujii, K. Takeda, K. Hasebe, T. Kakitsuka, T. Tsuchizawa, T. Yamamoto, K. Yamada, and S. Matsuo: *Proc. ECOC 2015* (2015) We.2.5.3.