

埋め込みトンネル接合を用いた 長波長GaInNAs VCSEL

大西 裕*・嵯峨 宣弘・小山 健二
土井 秀之・石塚 貴司・山田 隆史
藤井 康祐・森 大樹・橋本 順一
嶋津 充・山口 章・勝山 造

Long-wavelength GaInNAs VCSEL with Buried Tunnel Junction — by Yutaka Onishi, Nobuhiro Saga, Kenji Koyama, Hideyuki Doi, Takashi Ishizuka, Takashi Yamada, Kosuke Fujii, Hiroki Mori, Junichi Hashimoto, Mitsuru Shimazu, Akira Yamaguchi and Tsukuru Katsuyama — We proposed for the first time the introduction of a buried tunnel junction structure to a GaInNAs vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) and demonstrated high power and low resistive operations. By introducing a buried tunnel junction as a current confinement structure, the differential resistance was reduced to 65Ω , which is 40% lower than that of a conventional long-wavelength oxide VCSEL. The maximum output power was 4.2 mW at 25°C and 2.2 mW at 85°C . A 3-dB modulation bandwidth over 9 GHz was obtained even at 85°C . Also, clear eye openings were confirmed at 10 Gb/s over the temperature range of 25°C to 85°C . This new VCSEL is promising as a light source that achieves high speed operation with low power consumption.

1. 緒 言

VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser) は基板に対して垂直方向に光を発する半導体レーザであり、動作電流が小さい、円形ビームでファイバへの結合が容易、ウエハ状態での検査が可能、2次元アレー化が可能といった特長をもつ。なかでも動作電流が小さいという特長は、消費電力低減の観点から重要である。

光トランシーバの消費電力は着実に低下しており、10 Gb/sにおいて1Wを下回る製品も登場している。しかしLDチップ単体の消費電力はほとんど低減されておらず、光トランシーバ全体の消費電力に占める割合は増加している。このため、さらなる低消費電力化のためにはLDチップの消費電力を下げる必要がある。VCSELの動作電流は、従来の端面射出型レーザに比べて7分の1程度と低いため、LDチップにVCSELを用いることで光トランシーバの低消費電力化が可能となる。850 nmのVCSELは、短距離光通信用光源としてすでに実用化されており、その有用性が実証されている。一方、波長1260 nm以上の長波長光通信帯においては、4 Gb/s以下の低速品が一部実用化されているものの、今後市場の伸びが期待される10 Gb/s高速通信に対応する素子は、まだ実用化されていない。

長波長VCSELは活性層成長に用いる基板によって2種類に大別される。ひとつはInP基板上VCSEL、もうひとつはGaAs基板上VCSELである。InP基板上の長波長VCSELは、活性層にGaInAsPよりも温度特性の良いAlGaInAsを、電流狭窄構造に埋め込みトンネル接合^{*1}を採用することで、

その特性を飛躍的に伸ばしてきた^{(1)~(3)}。しかし、DC特性で要求を満たす素子は報告されているものの、高周波特性においては高温での高速性が不足している。

一方、GaAs基板上の長波長VCSELは、活性層に温度特性の良好なGaInNAsを採用しているが、電流狭窄構造に問題がある。こちらも10 Gb/sの高速製品に関しては要求特性を満足できておらず、高温での高速動作に課題を残している^{(4),(5)}。

今回、埋め込みトンネル接合型構造を導入することで、これらの問題を解決したので報告する。

2. 埋込みトンネル接合型GaInNAs VCSELの特長

GaInNAs活性層を用いたGaAs基板上の酸化狭窄型VCSELは、AlGaInAs活性層を用いたInP基板上VCSELに比べ有利な点が大きく三つある。第一に、活性層に用いるGaInNAs量子井戸は伝導帯のバンドオフセットが大きいため、しきい値電流の温度依存性を小さくすることができる⁽⁶⁾。第二に、GaAs基板上に成長可能なAlGaAs/GaAs DBR (Distributed Bragg Reflector) は高い屈折率差をもつため、発振に必要な99%以上の高反射率膜を少ないペア数で得ることができ結晶成長が容易である。第三に、VCSELは注入電流に対する活性層の温度上昇が大きいため、低電流で光出力が飽和するが、二元混晶と三元混晶からなるAlGaAs/GaAs DBRは熱伝導率が高く活性層の温度上昇を

抑制しやすい。

これまで、GaAs 基板上の長波長 VCSEL では、電流狭窄構造の作製に Al 濃度の高い AlGaAs 層を選択的に酸化する手法がとられてきた。この手法は 850nm 帯の短波長 VCSEL で広く使用されている。しかし、長波長 VCSEL にはシングルモード発振が要求されるため、マルチモード発振の短波長 VCSEL に比べて酸化径を小さくする必要がある。酸化プロセスは Al 濃度、層の厚さ、酸化時の温度や湿度など、多くのパラメータに依存するため、電流狭窄構造を再現性よく作製することが困難である。一方、InP 基板上で採用されている埋め込みトンネル接合型の電流狭窄構造は、フォトリソグラフィとエッチングによって正確に形状を制御できる特長をもつ。トンネル接合では電子-正孔変換がなされるため、活性層上部の p 型層の大半を n 型層に置き換えることができる。電子は移動度が高いため、電流狭窄による抵抗上昇が抑制される。また、p 型層が少ないため価電子間帯吸収^{*2}が低減し、高出力化が可能になる。

そこで今回、我々は埋め込みトンネル接合を用いた GaInNAs VCSEL を提案した^{(7),(8)}。下部反射鏡には、AlGaAs/GaAs DBR を用いた。30 ペア程度の少ないペア数で 99 % 以上の高反射率を得ることができる。活性層には良好な温度特性をもつ GaInNAs 多重量子井戸を用い、電流狭窄構造には埋め込みトンネル接合を用いた。上部反射鏡には誘電体 DBR を用いた。半導体 DBR よりも高い屈折率差を有し光を強く反射するため、光は共振器内部に強く閉じ込められる。これにより実効的な共振器長が短くなり変調効率の向上が可能となる。一方、誘電体 DBR は熱伝導率が低いため、レーザ内部の温度上昇を招きやすいという欠点がある。しかし、下部反射鏡に熱伝導率の高い AlGaAs/GaAs DBR を用いているため、活性層付近での発熱を下側（基板側）に効果的に逃がすことが可能である。以上のように、提案する構造は低抵抗・低吸収（高出力）・高速動作が可能であるという特長をもつ。

3. GaAs 基板上トンネル接合の特性

まず、トンネル接合単体の特性を確認するための素子を試作した。構造を図 1 に示す。VCSEL 構造を模すために p 型 GaAs 基板を用いた。p-GaAs スペース上に GaAs 系トンネル接合を成長し、一旦成長炉から取り出してトンネル接合メサを形成した。再び成長炉に投入し、n-GaAs でトンネル接合を埋め込み、高ドープ n-GaAs コンタクト層を成長した。トンネル接合の直径は $5\mu\text{m}$ であり、上部電極開口径は $15\mu\text{m}$ とした。図 2 に作成したサンプルの電流-電圧特性および電流-微分抵抗特性を示す。実使用条件ではトンネル接合に逆バイアスが印加されるため、この評価においても同様に逆バイアスを印加している。10 mA における微分抵抗は 35Ω であり、良好なトンネル接合を作製することができた。この値には、トンネル接合のほか、n-コンタクト、

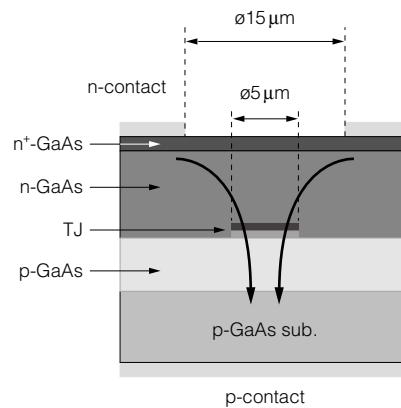


図 1 トンネル接合の試作構造

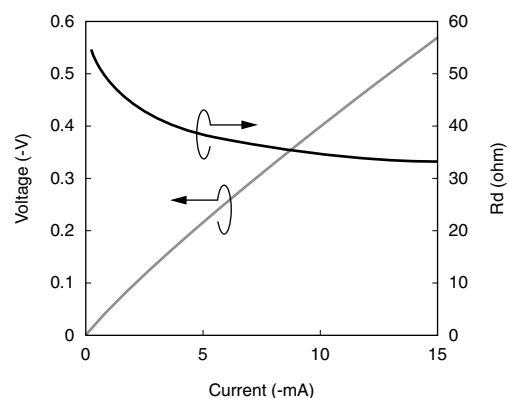


図 2 トンネル接合の電圧-電流-微分抵抗特性

n-GaAs 層、p-GaAs 層、p-コンタクトの微分抵抗が含まれている。このため、トンネル接合単体の微分抵抗は 35Ω よりも小さいと推測され、GaAs 基板上においても非常に低抵抗なトンネル接合を実現することができた。

4. デバイス特性

4-1 DC 特性 図 3 に試作した VCSEL の I-L 特性の温度依存性を示す。トンネル接合の直径は $6\mu\text{m}$ である。チップ温度 25°C および 85°C でのしきい値電流は 2.3 mA 、 2.2 mA であった。最大光出力は 25°C 、 85°C それぞれにおいて、 4.2 mW 、 2.2 mW と良好な値が得られた。発振波長は 1274 nm であった。図 4 にしきい値電流と最大光出力の温度依存性を示す。この温度範囲において、しきい値電流の変動は 0.22 mA と非常に小さいことがわかる。これは、GaInNAs 活性層の良好な温度特性を反映していることに加えて、共振波長と活性層利得のピーク波長が適切にチューニングされていることを示している。最大光出力は温度に対して線形に低下しており、高温で出力が急激に低下することはない。

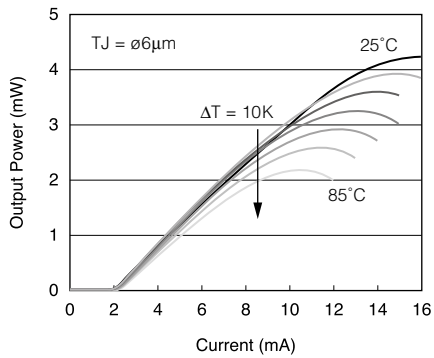


図3 I-L特性

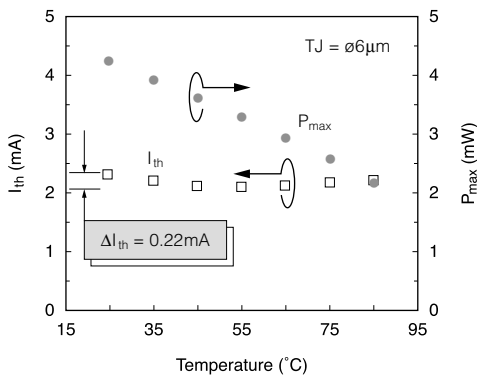


図4 しきい値電流と最大光出力の温度依存性

25°Cでの電流－電圧特性および電流－微分抵抗特性を図5に示す。7 mAでの電圧は1.65 V、微分抵抗は65Ωであり、従来の酸化狭窄型長波長VCSELに比べて約40%の低抵抗化を実現した。開発したトンネル接合はVCSEL構造に組み込んでも有効に機能していることがわかる。このように、トンネル接合とGaInNAs活性層を組み合わせることで、高出力動作と良好な温度特性を同時に実現することができた⁷⁾。

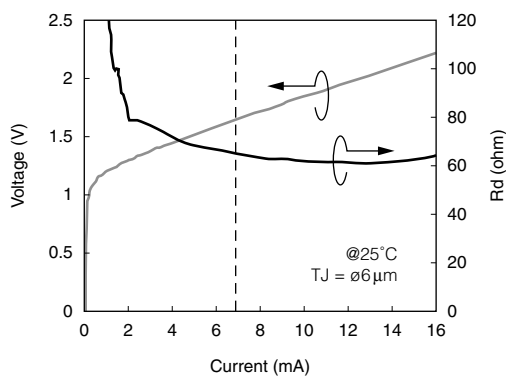


図5 電圧－電流－微分抵抗特性

4-2 AC特性 チップの小信号応答を測定した。測定はチップをキャリアに乗せてワイヤボンディング、レンズファイバをバットカップリングさせた状態で行った。チップ温度85°Cでの特性を図6に示す。8 mAでの3dB変調帯域は9.3 GHzで、10 Gb/s動作に十分な帯域を有している。フィッティングにより抽出した変調効率(しきい値電流以上の電流に対する緩和振動周波数の比)は3.47 GHz/mA^{0.5}であり、端面発光型レーザの1.5倍と高い値が得られた。図7(a)(b)にチップ温度25°Cおよび85°Cにおける10.3125

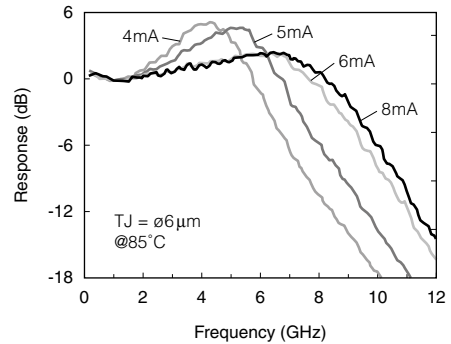
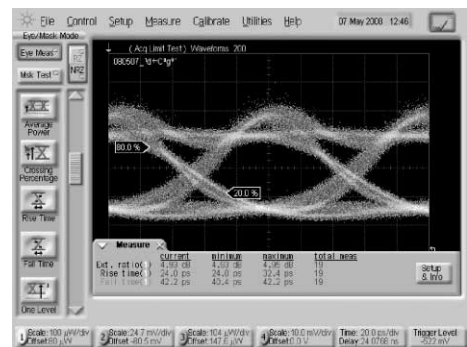
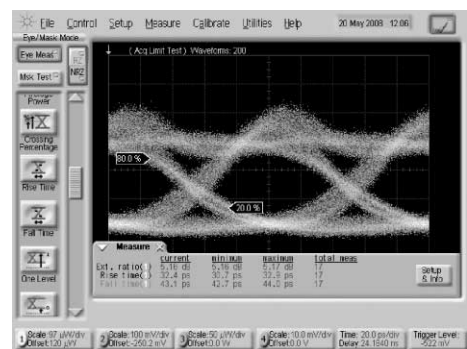


図6 85°Cでの小信号応答



(a) 25°C



(b) 85°C

図7 10 Gb/s アイパターン

Gb/sでの伝送前のアイパターンを示す。消光比は5dBに固定し、ベッセルトムソンフィルタを通して測定している。25℃でのバイアス電流は5.8 mA、85℃でのバイアス電流は6.9 mAである。25℃から85℃の範囲において、良好なアイ開口を得ることができた。

5. 結 言

高出力かつ低抵抗動作が可能な埋め込みトンネル接合型 GaInNAs VCSELを開発した。トンネル接合径6 μ mにおいて、25℃および85℃での最大光出力はそれぞれ4.2 mW、2.2 mWであった。注入電流7 mAでの微分抵抗は65 Ω であり、電流狭窄構造に埋め込みトンネル接合を導入することで、従来の酸化狭帯型長波長 VCSELにくらべ約40%の低抵抗化を実現した。85℃における3dB変調帯域は9 GHz以上と広帯域を有し、25℃から85℃の温度範囲で良好な10 Gb/s アイパターンを得ることができた。このVCSELは、高速かつ低消費電力動作が可能な短中距離光通信光源として有望である。

用語集

※1 トンネル接合

高ドープのn型層とp型層からなるpn接合。大きなバンドのゆがみによりp型層の価電子帯にある電子の波動関数がn型層の伝導帯に染み出すため、電界をかけると禁制帯をトンネルして移動する。エサキダイオードとも呼ばれる。埋め込みトンネル接合とは、電流を流したい部分だけトンネル接合を残し周囲を低ドープの半導体で埋め込んだ構造を指す。

※2 価電子帯間吸収

半導体レーザーにおける光損失の要因の一つ。その量は正孔密度に比例するため、p型半導体においてその影響は大きくなる。

参 考 文 献

- (1) W. Hofmann et al., "1.3 μ m InGaAlAs/InP VCSEL for 10G ethernet," Proc. International Semiconductor Laser Conference 2008, Sorrento, Italy, MB3.
- (2) N. Nishiyama et al., "Long-wavelength vertical-cavity surface-emitting lasers on InP with lattice matched AlGaInAs-InP DBR grown by MOCVD," IEEE J. Sel. Topics in Quantum Electron., 11, p.990 (2005)
- (3) A. Caliman et al., "Wafer-fused 1550-nm band VCSELs with fundamental mode output exceeding 6 mW," Proc. European Conference on Optical Communications 2008, Brussels, Belgium, We.3.C.5.
- (4) L. A. Graham et al., "LW VCSELs for SFP+ applications," Proc. SPIE, 6908 (2008)

- (5) F. Romstad et al., "Photonic crystals for long-wavelength single-mode VCSELs," Proc. SPIE, 6908 (2008)
- (6) M. Kondow et al., "GaInNAs : A Novel Material for Long-Wavelength-Range Laser Diodes with Excellent High-Temperature Performance," Jpn. J. Appl. Phys., 35, p.1273 (1996)
- (7) Y. Onishi et al., "High power and low resistive GaInNAs-VCSELs with buried tunnel junctions," Proc. International Semiconductor Laser Conference 2008, Sorrento, Italy, TuB2.
- (8) Y. Onishi et al., "100 $^{\circ}$ C, 10 Gbps operation of buried tunnel junction GaInNAs VCSELs," Proc. European Conference on Optical Communications 2008, Brussels, Belgium, We.3.C.6.

執 筆 者

大西 裕* : 伝送デバイス研究所 博士(工学)
光通信用半導体レーザーの設計・開発に従事



嵯峨 宣弘 : 半導体技術研究所 エピ技術研究部 主査
小山 健二 : 伝送デバイス研究所 主査
土井 秀之 : 半導体技術研究所 エピ技術研究部 主査
石塚 貴司 : 半導体技術研究所 エピ技術研究部 主査
山田 隆史 : 伝送デバイス研究所 主査
藤井 康祐 : 伝送デバイス研究所
森 大樹 : 半導体技術研究所 エピ技術研究部
橋本 順一 : 伝送デバイス研究所 主査 博士(工学)
嶋津 充 : 半導体技術研究所 エピ技術研究部 主幹
山口 章 : シニアスペシャリスト
半導体技術研究所 エピ技術研究部 部長 博士(工学)
勝山 造 : シニアスペシャリスト
伝送デバイス研究所 プロジェクトリーダー 工学博士

*主執筆者