

100Gbpsイーサネット光送信用 4波長25.8Gbps直接変調DFB-LD

境野 剛*
瀧口 透*
柳楽 崇*

25.8Gbps Direct Modulation DFB Lasers of 4 Wavelengths for 100Gbps Ethernet

Go Sakaino, Toru Takiguchi, Takashi Nagira

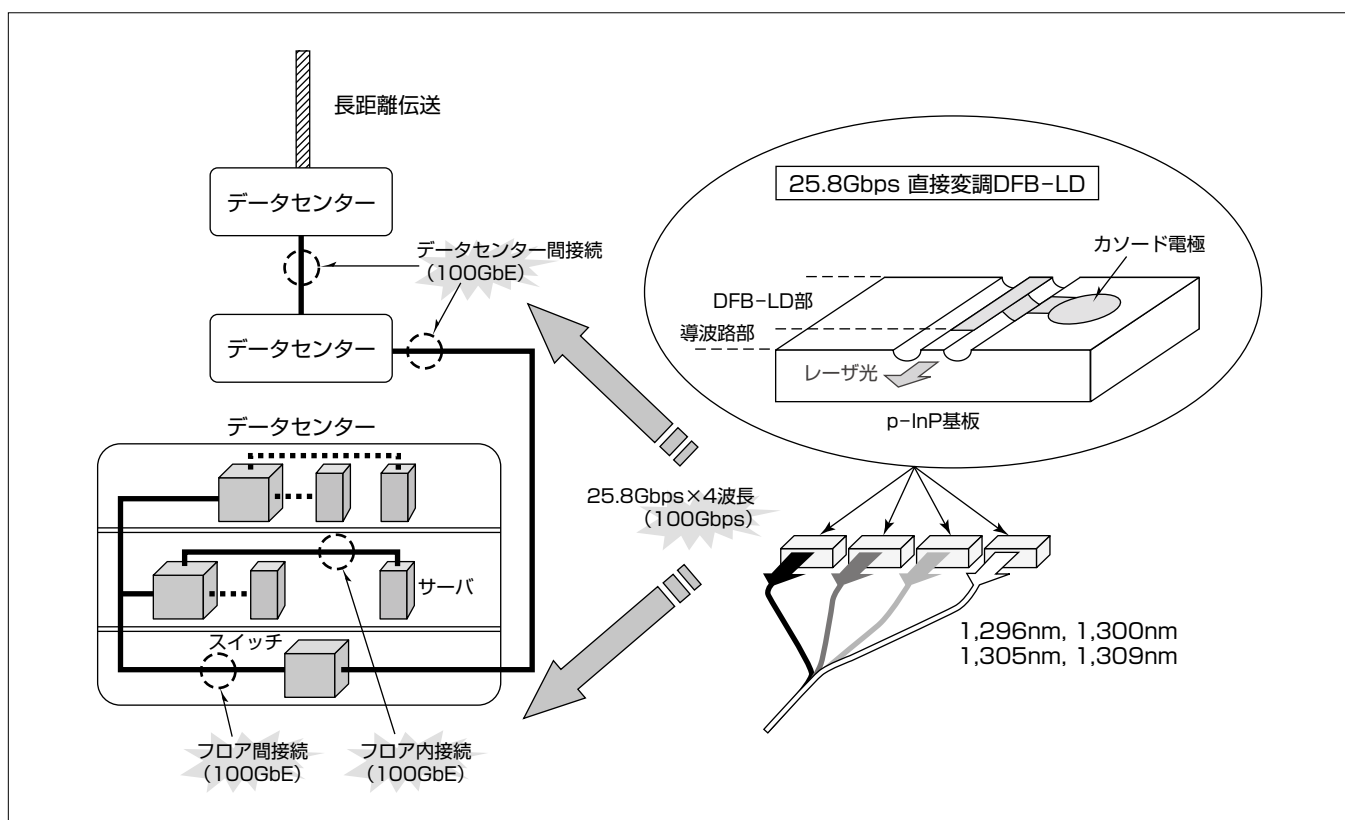
要 旨

光通信のブロードバンド化が進むことでトラフィックが集中するデータセンターでは超高速光通信が必要となっており、100Gbpsイーサネット^(注1) (100Gbps Ethernet^(注1) : 100GbE)がIEEE802.3baで標準化された。100GbEの伝送距離が最大10kmの規格では、25.8Gbpsで変調される1.3μm帯の4波長の光信号を用い100Gbpsの高速通信を実現するもので、この4波長の間隔が狭いためレーザは一定温度で駆動され、温度調節用電力低減のため使用温度は50℃が想定されている。

この100GbEに対応するため、50℃、25.8Gbps動作で10km伝送を可能とする4波長の直接変調DFB-LD (Distributed FeedBack Laser Diode)を開発した。

(注1) イーサネット及びEthernetは、富士ゼロックス(株)の登録商標である。

このレーザでは高速変調動作を実現するため緩和振動周波数の向上と寄生容量の低減を行った。緩和振動周波数の向上に対しては、レーザ部の共振器長を150μmと短くするとともに活性層の組成を最適化した。また発光部に電流を効率的に注入するため半導体層の再成長で活性層を埋め込む埋め込み型構造を採用するとともに、低容量化のため埋め込み層には半絶縁性半導体層を適用した。さらにレーザ実装時の取扱い性を考慮し、レーザの光出射端部に長さ50μmのパッシブ導波路を集積し素子全長は200μmとした。これらの構造を採用することで高温50℃での25.8Gbps高速変調が可能となり、全4波長の素子で世界最高レベルの低消費電流で、高品質変調波形とともに良好な伝送特性を実現した。これによって、このレーザのIEEE802.3ba 100GbEの普及への貢献が期待できる。



データセンターにおける100GbEの利用と4波長25.8Gbps直接変調DFB-LDの適用例

光通信のブロードバンド化によってトラフィックが集中するデータセンターでは、センター間、センター内で100Gbpsの高速光通信が必要となっている。低消費電力化や低コスト化でも強い要請があり、IEEE802.3ba (100GbE)で規定された25.8Gbpsの4波長光信号で実現する100Gbps通信では、低電流駆動で構成が簡素な直接変調DFB-LDが有望である。これを背景に、100GbEの一つの規格であるLR4 (最大伝送距離10km)に最適な4波長直接変調DFB-LDを開発し、高温50℃で低電流駆動で良好な変調波形と伝送特性が得られた。100GbEの低消費電力化、低コスト化への貢献が期待できる。

1. ま え が き

光通信の普及とともにブロードバンド化が進み、通信トラフィックが増大し続けている。このため、トラフィックが集中するデータセンターなどでは、100Gbpsの高速光通信が必要となっており、100GbEの規格がIEEE802.3baとして国際標準化され、高速光通信のさらなる普及に向けて準備が進んでいる。しかし通信の高速化では、消費電力が飛躍的に増大することが予想されており、低消費電力化の要請が非常に強くなっている。またブロードバンド光通信の普及には、通信機器の低コスト化も非常に重要である。この100GbEは25.8Gbpsで変調される1.3 μ m帯の4波長の光信号を用いる規格となっており、送信側の発光素子としては、高速駆動時の変調波形に起因する優れた長距離伝送特性を持つ変調器集積型DFB-LDが候補として挙げられている⁽¹⁾。一方で低消費電力化、低コスト化を指向する動きは強く、最大10kmの比較的伝送距離が短いLR4(Long-Reach over 4 WDM(Wavelength Division Multiplexing) Lanes)という規格では、これらを実現可能な直接変調DFB-LDが有力な光送信用素子と考えられている。直接変調DFB-LDの高速化では波形を劣化させる緩和振動周波数(以下“fr”という。)を大きくすることが必要で、25.8Gbpsという高速動作の実現は容易ではなかった。今回、レーザの活性層長を短くした短共振器構造の採用や活性層の最適化などでfrの向上を図り、25.8Gbpsの高速直接変調動作を可能とした⁽²⁾。また、レーザの冷却消費電力を小さくするために必要とされる50℃での高温動作を低駆動電流で実現した。

2. 素 子 設 計

2.1 高速動作設計

高速動作化には、直接変調波形に影響を与える緩和振動周波数(fr)と電気的な応答特性の向上が必要となる。それぞれの実現に向けた素子の設計内容を次に述べる。

2.1.1 緩和振動周波数の向上

緩和振動は活性層内の光子と注入電流によるキャリアの相互作用で両者が増減を繰り返すことで発生する。このfrを向上させるには光子寿命の低減や注入電流に対する利得増減の割合、すなわち微分利得の増大が有効である。今回光子寿命の低減に対しては、活性層の共振器方向の長さを短くする短共振器化の手法を用いた。また微分利得の増大については活性層の利得スペクトルよりもやや短波長側の微分利得の高い波長にDFB-LDの発振波長を設定するデチューニング量増大の手法を用いた。一方、これらの短共振器化とデチューニング量増大を極端に行うと、特に高温で十分な利得が得られなくなるため、50℃動作を考慮して最適値を決め、共振器長は150 μ mとした。さらに活性層は、

高温で大きな微分利得が確保できるAlGaInAs系材料を用いた多重量子井戸構造とした。また活性層への効果的な電流注入もfr向上には効果があるため、活性層を半導体層で埋め込む埋め込み型構造を適用した。

2.1.2 電気的応答特性

これらのfrの向上とともに入力電気信号に対する電気的な応答特性の向上も必要であり、レーザの活性層に並列に寄生する容量の低減が有効である。この寄生容量低減のため、活性層の半導体埋め込み層には半絶縁性のドーパントを用いた低容量埋め込み型構造を適用した。

2.2 高温高出力動作設計

50℃の高温で高出力動作を実現するためには回折格子によって共振器方向に光を閉じ込める度合いを示す結合定数(以下“ κ ”という。)と共振器長の積を適切な値に保つ必要がある。今回、短共振器化を行ったことで κ を従来よりも大きくすることが必要となっている。そこで、屈折率の低いInPクラッド層の中に周期的に形成する回折格子の半導体組成を高屈折率なものに変えることで光の反射を高めて κ を大きくしたが、高屈折率な回折格子へは注入電流によるキャリアが蓄積しやすく電流-光変換効率が低下するので⁽³⁾、キャリア蓄積効果の少ないn型InP層中に回折格子を形成した。またp型InP基板を用いて活性層上部のn型InP層中に回折格子を配置し、回折格子形成後の平坦性が十分でない面に活性層を成長しないよう配慮し、活性層の高品質化を図った。

3. 素 子 構 造

素子の構造を図1に示す。p型InP基板上にAlGaInAs系の活性層を成長させ、その上に回折格子を形成した。またレーザの活性層部の長さは150 μ mであるが、素子が小さく取扱いが困難になるため光出力端面側に50 μ m長のInGaAsPパッシブ導波路層を集積化し、全体では共振器方向が200 μ mの長さになるようにした。

4. 素 子 特 性

素子の電流-光出力特性を図2に示す。実使用温度の50℃で、しきい値電流とスロープ効率は各々およそ9.8mA、0.26W/Aと良好な値となっており、4波長のいずれの素子

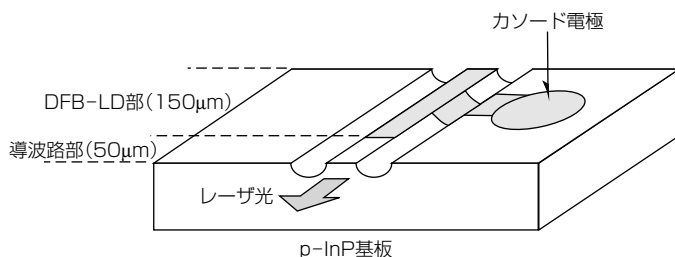


図1. 素子構造

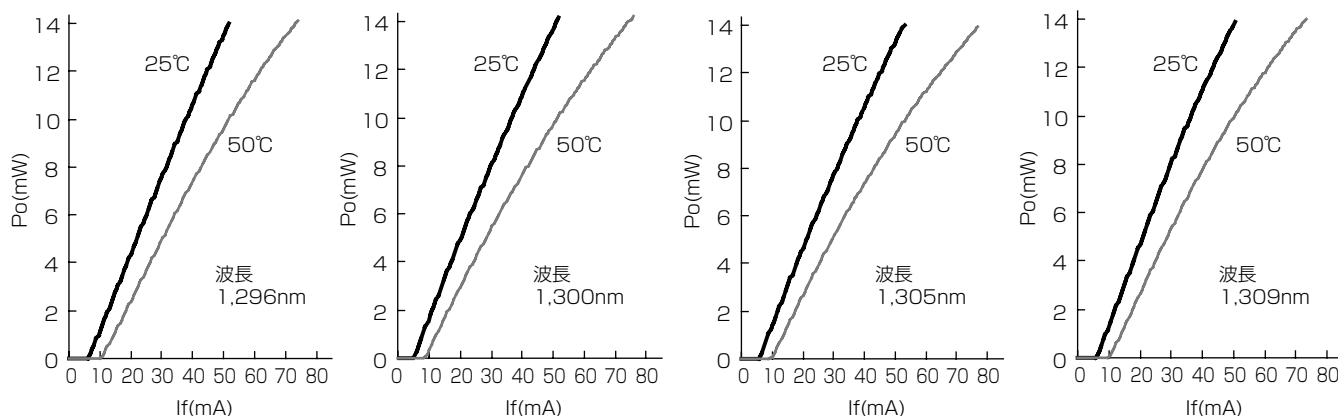


図 2. 電流－光出力特性

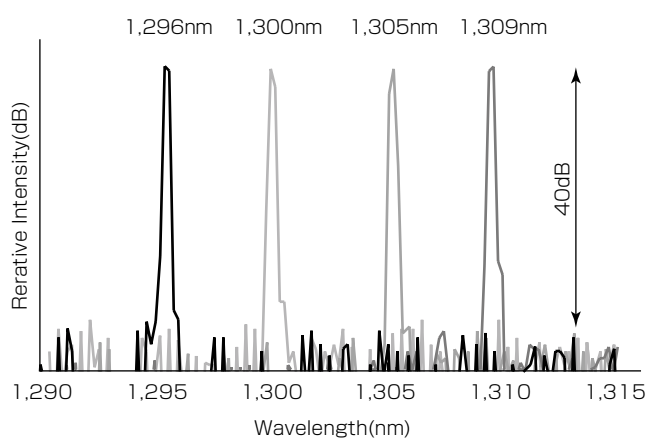


図 3. 発振スペクトル

でも揃(そろ)って優れた特性が得られた。また図 3 に示すように、得られた素子の4つの波長は規格の波長(中心波長 1,296.56, 1,300.05, 1,304.58, 1,309.14(nm), 各々の波長許容幅: 2 nm)を使用温度50℃で満たしている。サイドモード抑圧比は40dB以上と安定な単一縦モードが4波長のいずれの素子でも得られている。素子は光出力の大きな前端面側にパッシブ導波路を形成しているが、導波路層を集積しても無効電流や光の損失、反射がほとんどない理想に近い構造となっていることが分かる。

frの対電流効率を図 4 に示す。この値が大きいほど少ない電流注入量で大きなfrを得ることができ、低電流駆動が可能となる。frの効率は25℃で4.1GHz/(mA)^{1/2}, 50℃で3.4GHz/(mA)^{1/2}と十分に大きな値が得られ、短共振器化による光子寿命低減やデチューニング量調整等による微分利得向上の効果が確認できた。

図 5, 図 6 に変調波形とマスクマージンを示す。大きなfrを反映して高速25.8Gbps直接変調動作で非常にクリアな波形が得られている。

25℃では中心バイアス電流となる平均電流35mA, 消光比5.5dBの25.8Gbps直接変調条件下で安定した波形が得られ、4波長の素子でそれぞれ33~41%と非常に大きなマ

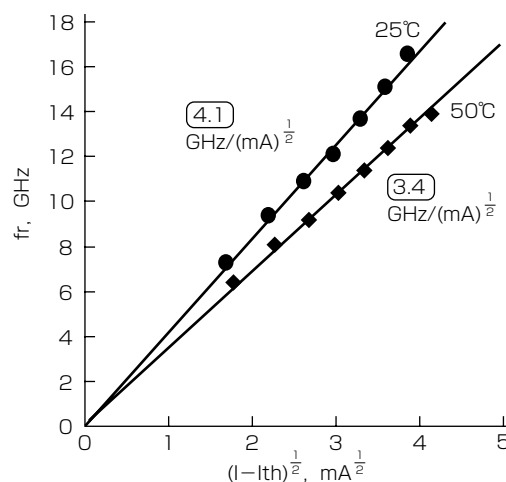


図 4. frの対電流効率

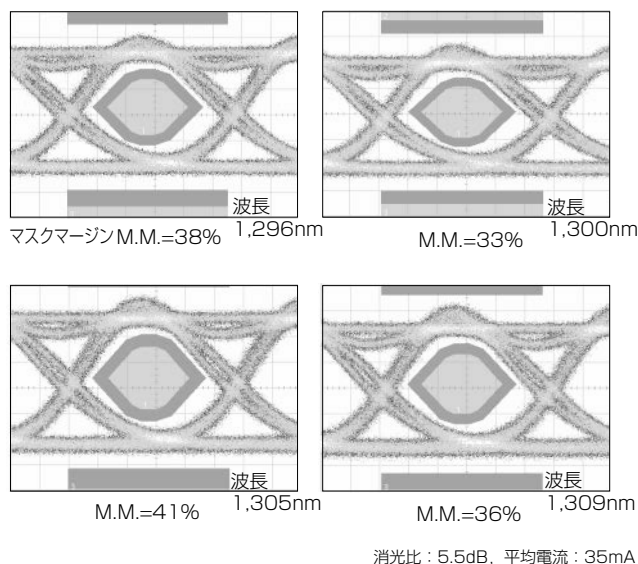


図 5. 25.8Gbps変調波形(25℃)

クマージンが得られた。また使用温度の高温50℃では、平均電流がわずか45mAという低電流でもアイパターンは良好で25℃からの変化も小さく、マスクマージンとしても4波長の素子で30~32%と実用上、十分大きな値が得られた。

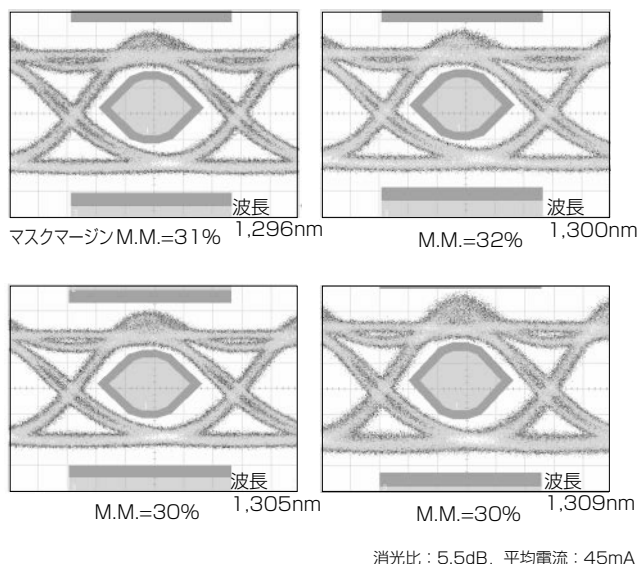


図6. 25.8Gbps変調波形(50℃)

また4波長の素子間で電流－光特性や低電流駆動での変調波形が揃っており、モジュール化時に用いる光部品や駆動条件の設定等の観点からも好ましい特性となっている。

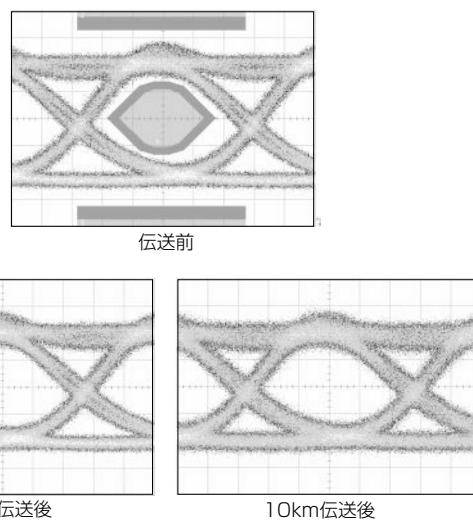
さらに、50℃における伝送前後の変調波形を図7に示す。伝送前の波形に対してシングルモードファイバ3km及び10km伝送後でも波形変化は極めて小さく、良好であることが分かる。また、50℃における25.8Gbps伝送時のビットエラーレート特性を図8に示す。

伝送前後のパワーペナルティは、3km伝送、10km伝送で各々-0.01dB、-0.42dBと極めて小さく、高温50℃でも低消費電流(平均電流: 45mA)で良好な伝送特性が得られていることが分かる。

5. む す び

100Gbpsイーサネット(100GbE)のLR4規格(最大伝送距離10km)への適用を目的として、50℃の高温で25.8Gbpsの動作が可能な1.3μm帯4波長の直接変調DFB-LDを開発した。p型InP基板を用いた短共振器構造を採用するとともに活性層構造や回折格子形成部の最適化を行うことで、使用想定温度の50℃で良好な光出力特性と安定した単一縦モード発振の素子を規格の4波長で得た。また、どの波長でも50℃で45mAという低電流でクリアな25.8Gbps変調波形が得られ、10kmの伝送でも良好な伝送特性を実現した。これによって直接変調DFB-LDが100GbEに使用可能であり、さらに低消費電力、低コスト化の実現を実現可能であることが確認できた。

なお、この研究の一部は、平成21年度 総務省国家プロジェクト 超高速光伝送システム技術の研究開発(イーサネット向け超高速省電力光伝送技術)で実施したものである。



25.78125Gbps, 消光比: 5.5dB, 平均電流: 45mA, 波長1,310.2nm(50℃)

図7. 伝送前後の変調波形(50℃)

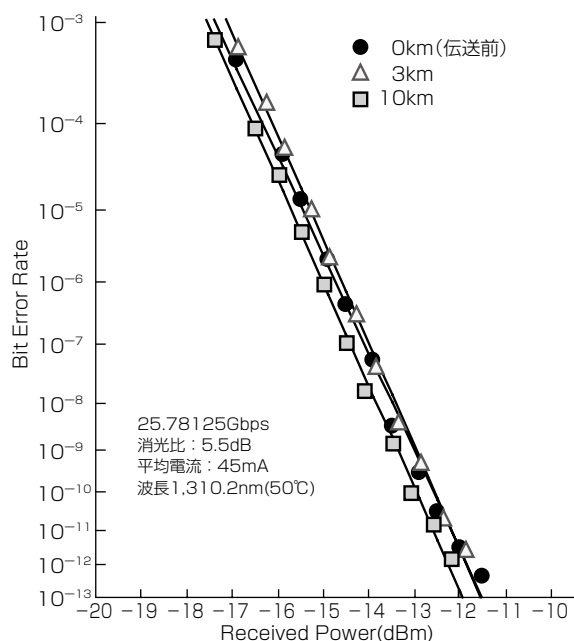


図8. ビットエラーレート特性(50℃)

参 考 文 献

- (1) Saito, T., et al.: Clear eye opening 1.3μm-25/43Gbps EML with novel tensile-strained asymmetric QW absorption layer, ECOC2009, Paper 8.1.3 (2009)
- (2) Sakaino, G., et al.: 25.8Gbps direct modulation of BH AlGaInAs DFB lasers with p-InP substrate for low driving current, ISLC2010, ThB5 (2010)
- (3) Takagi, K., et al.: 120℃10-Gb/s Uncooled Direct Modulated 1.3-μm AlGaInAs MQW DFB Laser Diodes, IEEE Photon. Technol. Lett., **16**, 2415~2417 (2004)