

100Gbps送信用 4 波長25.8Gbps 直接変調DFB-LD

境野 剛* 柳楽 崇*
 島田 征明* 岸本一誠*
 中村直幹*

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

Go Sakaino, Masaaki Shimada, Naoki Nakamura, Takashi Nagira, Kazumasa Kishimoto

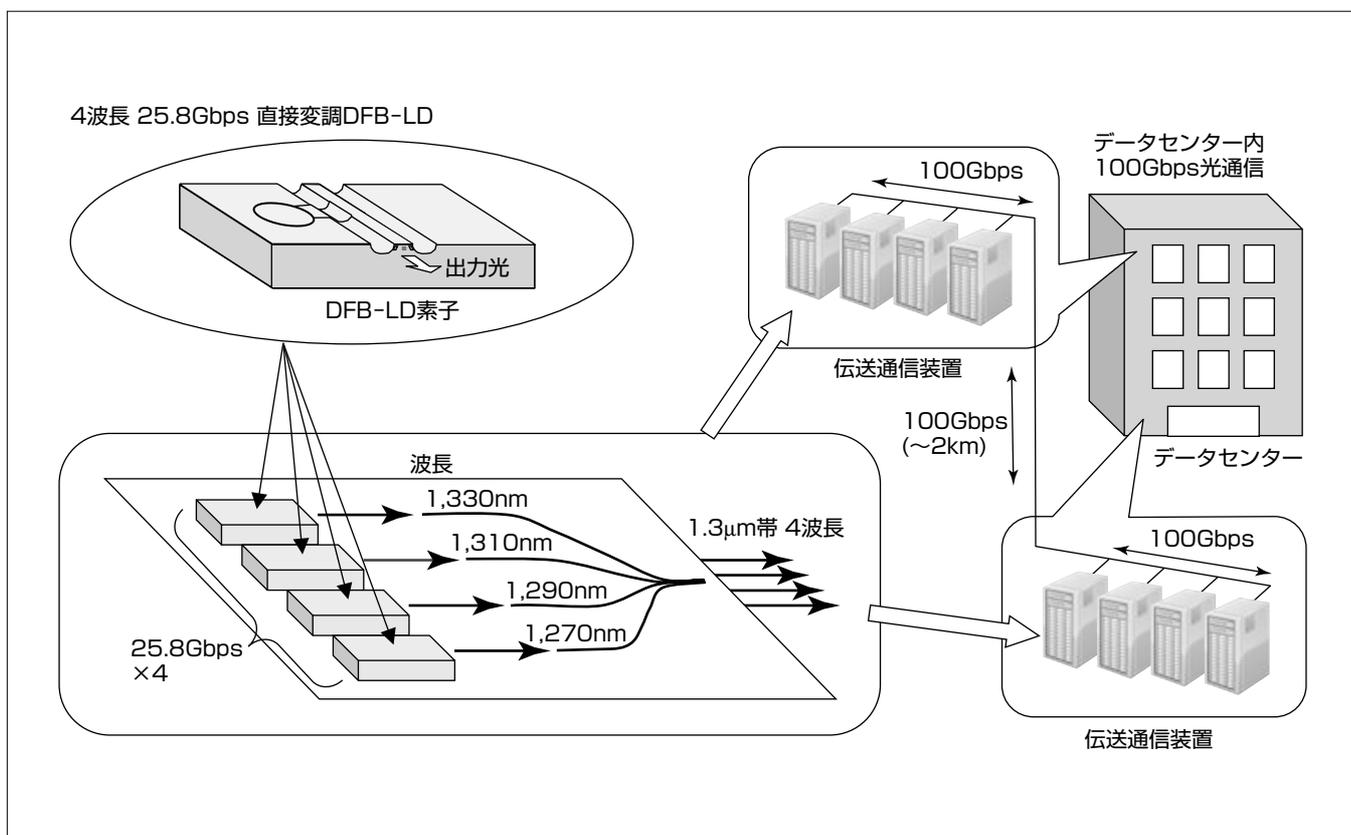
要 旨

携帯端末普及に対応するネットワークサービスの拡大、さらに情報セキュリティやサーバの管理強化推進に伴い、データを専用施設で集約管理し、インターネット経由で送受信利用するクラウドコンピューティングが一般的になりつつある。このための専用施設はデータセンターと呼ばれ、収納されたサーバや伝送通信装置間で大量のデータを扱うことから100Gbpsの高速通信が必要とされている。

これに伴い、この用途では1.3μm帯25.8Gbps変調 4 波長レーザを用いることを想定した100Gbps伝送のMSA (Multi Source Agreement)が制定され実用時期を迎えつつあるが、データセンターの巨大化によって増大するセンター内の冷却用電力や伝送装置自体の消費電力の抑制が大

きな課題となっている。課題解決には伝送装置の高温低電流動作化が有効な手段であり、光伝送通信装置中に組み込まれるデータ送信用レーザ光源には75℃以上の高温での低電流動作が求められている。

これらのことから、小型化やコスト低減にも寄与する直接変調DFB-LD (Distributed Feed-Back Laser Diode) が最適であると考え、今回、これに対応する低電流で高速動作するレーザを開発した。このレーザは短共振器構造とともに低容量高効率電流狭窄(きょうさく)埋込層を用いた構造を採用することで高温低電流動作を実現しており、高速100Gbps短距離 2 km伝送の普及に貢献するものである。



データセンターでの100Gbps光伝送への4波長25.8Gbps直接変調DFB-LDの適用

ユーザーが保管・利用するデータが集中するデータセンター内では100Gbpsの高速通信が必要とされている。データセンターでは伝送装置が高密度に収容され消費電力も膨大になるため、伝送装置には低消費電力、低コストが求められる。この要求を満たす伝送装置用光源としては高温で低電流動作を実現できる直接変調DFB-LDが有望であり、高温75℃で低電流動作が可能な25.8Gbps直接変調DFB-LDを開発した。

1. ま え が き

個人や企業が取り扱うデータ量の増大とクラウドコンピューティングの普及によって、トラフィックが集中するデータセンターでは100Gbpsの高速光通信が必要となっている。また、データセンターでは多数の伝送装置が高密度に收容されることから、装置の駆動とその冷却のための消費電力が膨大になる。そのため低消費電力化の要請が非常に強く、さらに高密度実装やシステム普及のためには伝送装置の小型化と低コスト化も非常に重要となっている。

これらの課題に応えるには、非冷却で高温75℃以上で低電流動作する、直接変調型のDFB-LDを用いることが有効で、実際には25.8Gbpsで動作する4波長の直接変調DFB-LDを用い、それぞれの光信号を合波する波長多重方式で100Gbpsのデータ通信を実現することが可能となる。また、これら4つの波長を10Gbpsなどの伝送で用いられるCWDM(Coarse Wavelength Division Multiplexing)規格と同様、波長間隔を20nmとして各々の波長許容幅を13nmとすることで、非冷却動作が可能となる。この方式の有効性が認識され、実用化に向けたMSAとして、CWDM4⁽¹⁾、CLR4⁽²⁾が制定され始めている。これまで三菱電機も70℃で25.8Gbps動作する直接変調DFB-LDを開発し報告しているが⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾、70℃以上の高温では動作電流が大きく増加し、高速動作としても必ずしも十分ではなかった。今回非冷却低電流動作を目的として高温75℃で25.8Gbps動作する4波長CWDM対応直接変調DFB-LDを開発した。

高温75℃での低電流高速動作を実現するには、レーザ特有の電気と光の相互作用の結果、発生する光の振動による光変調波形の劣化を抑制する必要がある。この光振動の周波数は緩和振動周波数(f_r)と呼ばれ、良好な光変調波形を得るには、高温における f_r を変調信号周波数程度の高い値に保つことが重要である。そのため高温で顕著となる光の損失や発光層への電流注入効率低下、発光層における光密度低下とこれに起因する f_r の低下を抑制する必要がある、従来構造の素子では実現が容易でなかった。今回、新たに高温75℃でも低損失で発光層への効果的な電流注入と高い発光効率を安定して実現できる低容量高效率電流狭窄埋込層を用いた構造を開発・適用することで、世界最高レベルの低消費電流動作と良好な変調光波形を高温75℃で実現したので次に述べる。

2. 素子の設計

2.1 高温低電流高出力動作の設計

半導体レーザでは、発振光の一部がレーザ内で吸収されるため、この吸収損失と同等の利得が得られるまで電流を注入することでレーザ発振状態となる。この時の電流値がしきい値電流であり、低電流高出力化には、このしきい値

電流すなわち吸収損失を低減することが不可欠である。吸収損失には、図1に示すような素子を構成する半導体基板や各半導体層に添加する不純物が大きく影響し、一般的にはn型半導体よりもp型半導体の方が吸収損失は大きくなる。これは次の理由によるものである。

一般的にp型半導体層(インジウムリン(InP)層)に用いられる亜鉛(Zn)は吸収損失が大きく、発光層に拡散すると発光効率が低下する。特に半導体基板にp型InP基板を用いると(図1(a))、Znは半導体中での拡散係数が大きいいため、高濃度のZnを持つp型InP基板からZnが発光層に拡散しやすく吸収損失が大きくなる傾向がある。よってしきい値電流低減には半導体基板はn型InP基板(図1(b))を用いる方が好ましい。さらに高い電流注入効率を実現するため、発光層への効果的な電流注入が可能となる、鉄(Fe)を不純物として添加した半絶縁性InP埋込層を採用した(図1(b))。この埋込構造では、Fe-InP層が電子を捕捉して高抵抗化する特性を持つ。一方でp型InP層と埋込層が接する構造となっており、それぞれの層中のZnとFeが相互拡散する。相互拡散領域が存在すると、この領域を介して発光層を通らない経路の無効電流が急激に増大し、DFB-LDの発光効率が大きく低下する問題が発生する。このため、今回開発したレーザでは、この相互拡散の影響を最小限とするよう埋込構造を設計し適用した。

2.2 高速動作設計

レーザ素子が25.8Gbpsの高速入力電気信号に応答するには、素子の発光層側部に配置され、発光層に効果的に電流を注入するための電流狭窄埋込層を持つ寄生容量を抑制する必要があり、半絶縁性の半導体層を用いることが有効で

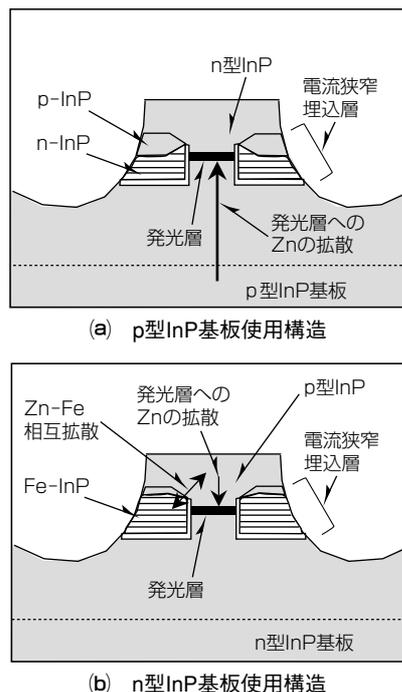


図1. DFB-LDの発光層周辺構造

ある。今回は2.1節の通り、FeドープInP層を用いることで十分低い寄生容量が得られた。

また高速25.8Gbps動作実現に向けては、低容量電流狭窄埋込層採用に加えて、高い緩和振動周波数(f_r)を確保する観点から設計を行った。

f_r は式(1)のように動作電流(I_{op})としきい値電流(I_{th})の差の平方根に比例し、低電流動作に必要な f_r を維持するには、しきい値電流を低減することが有効となる。

$$f_r \propto [(I_{op} - I_{th}) / \tau_p]^{1/2} \dots\dots\dots(1)$$

τ_p : 光子寿命

これには2.1節で述べたように、高出力化に効果のあるn型半導体基板を用いることが有用である。また一般的に高い f_r を得るためには、電流注入量に対する利得の比である微分利得を大きくすることが有効である。そのため、伝導帯における電子に対する多重量子井戸の深さが大きく、高温での電子の漏れ出しが抑制されるAlGaInAs(アルミニウムガリウムインジウムヒ素)発光層を採用することで、高い微分利得の確保を可能とした。同様に高い f_r を得るためには光子寿命を短くすることも有効で、共振器長の短縮が効果的である。今回は $-5 \sim +75^\circ\text{C}$ の動作温度範囲で十分な利得も得られることを考慮して共振器長は $150\mu\text{m}$ とし、さらに利得スペクトルとDFB発振波長の差に相当するデチューニング量を適切に設定することで微分利得の増大を図った。

3. 素子構造と素子特性

先に述べた設計に基づいて図2、図3に示す構造の4波長直接変調DFB-LDを作製した。n型InP基板を用いて回折格子形成後、AlGaInAs発光層を成長させた。発光層の側面には、p型InP、n型InPに加えて先に述べたFeドープInP層を用いた高抵抗低容量電流狭窄埋込層を配置した。電流狭窄埋込層は2.1節の通り、FeとZnの相互拡散の影響を抑制するため、発光層上部のp-InPクラッド層とFe-InP層の接触面積が最小限となる形状とした。レーザの共振器長は $150\mu\text{m}$ と極めて短くし、その上で、組立て工程で

のレーザの取扱いを容易にするため、光出力側に光導波路を集積して共振器方向の素子全長を $200\mu\text{m}$ とした。素子の共振器端面には、光出力側に低反射コーティング、反対側端面には高反射コーティングを施した。

次に4波長各々のDFB-LDの電流-光出力特性を図4に示す。低温 -5°C から高温 75°C へ向けてのしきい値電流やスロープ効率の変化が小さく良好な特性が得られている。どちらの波長の素子でも高温 75°C で、しきい値電流は 13mA 以下、スロープ効率は $0.2\text{mW}/\text{mA}$ 以上と低しきい値電流と高効率を両立できており、最大光出力としても 10mW 以上の高出力が得られた。

25.8Gbps変調の4波長DFB-LDを同時に使用する100Gbps光通信では伝送装置の小型化が必要となるため、4つのDFB-LDを1つのパッケージに実装する。この時、4波長の光を合波する構造となり、1波長で光伝送する場

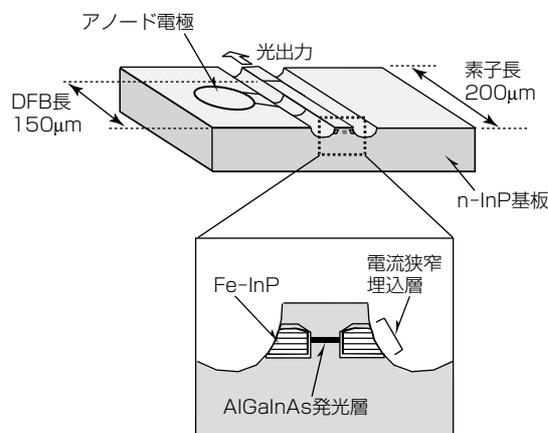


図2. DFB-LDの構造



図3. DFB-LDの共振器構造

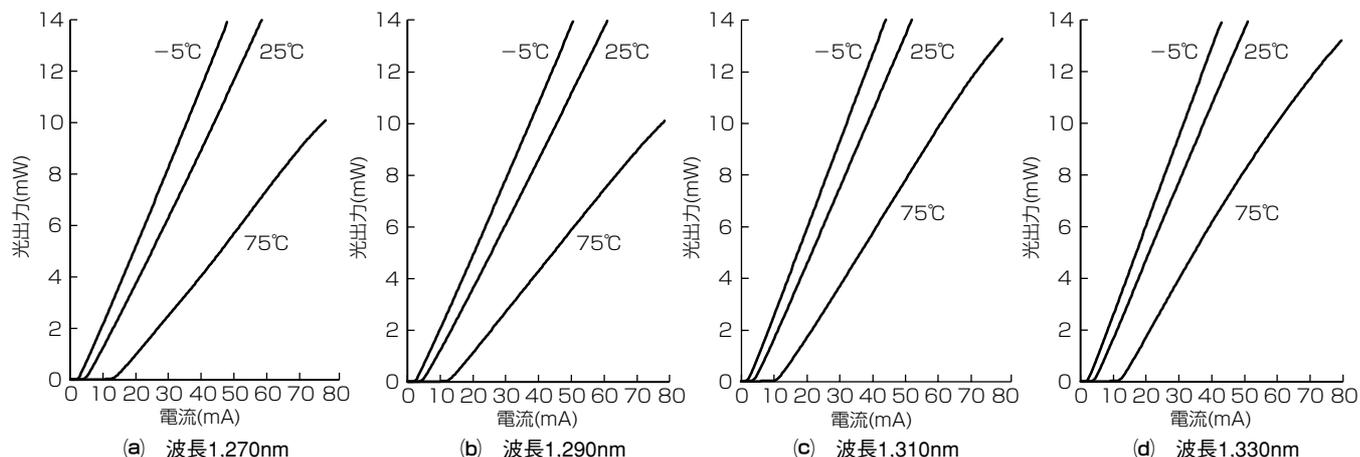


図4. 電流-光出力特性($-5, 25, 75^\circ\text{C}$)

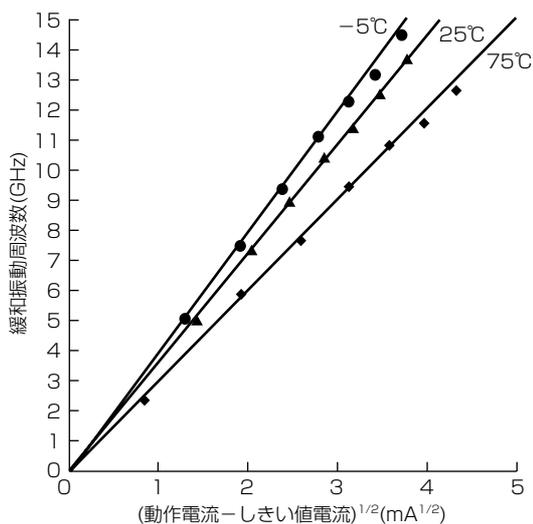


図 5. 緩和振動周波数の電流依存性(波長1,310nm)

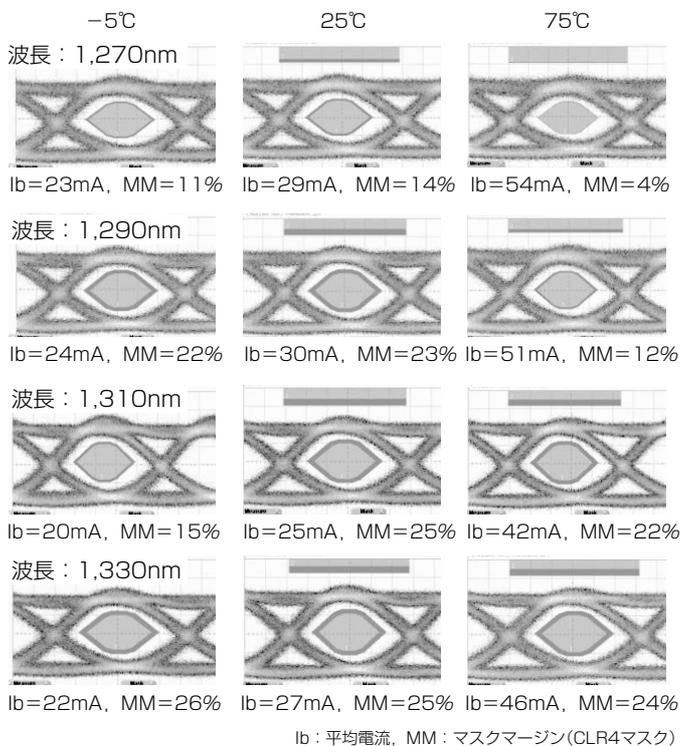


図 6. 25.78125Gbps変調光波形(光出力: 6 mW, 消光比: 5 dB)

合と比較して合波による光損失が大きくなる。今回の4波長DFB-LDではどの波長でも高出力が得られていることから、この光損失を補うことで光合波構造の設計の制約を小さくできる。このような高出力は、先に述べたように吸収損失の小さいn型InP基板を用い、さらにFeとZnの相互拡散抑制を考慮して高い電流注入効率を得られる構造のFeドープInP層を電流狭窄埋込層として用いたことによるものと考えられる。

この良好な光出力特性によって、高温75°Cでも大きな緩和振動周波数(f_r)が得られており、電流に対する f_r の増加量である電流効率として図5に示す。この図の傾きである電流効率の値が大きいほど、少ない消費電流で大きな f_r が

得られることを示しており、低電流動作が可能となる。今回の f_r の電流効率は、-5°C、25°Cで3.9及び3.6GHz/(mA)^{1/2}、高温75°Cでも3.0GHz/(mA)^{1/2}と大きな値が得られており、高温での高速変調動作が可能となっている。

このように高温75°Cで、低しきい値電流、高出力と大きな f_r が得られたことから、光伝送で重要な25.8Gbps変調光波形として、非常に明瞭な形状が得られた。図6にその変調光波形を示す。

上段から波長1,270nm, 1,290nm, 1,310nm, 1,330nmの素子の結果であり、データセンターでの100Gbps短距離光通信におけるMSAに対応したCWDM波長帯の4波長の各々のレーザで75°Cで平均電流54mA以下という低電流動作で良好なマスクマージンが得られている。これによって、低消費電力化、低コスト化、小型化が可能となり、100Gbps短距離光通信普及への貢献が期待できる。

4. むすび

データセンターで用いる低消費電力、低コスト100Gbps短距離光送信光源として非冷却動作を想定した使用に対応する目的で、75°Cで25.8Gbps動作する1.3μm帯4波長直接変調DFB-LDを開発した。吸収損失の小さいn型InP基板を用い、高温でも発光層に効果的に電流注入することが可能な低容量電流狭窄埋込層構造と高い f_r が得られるAlGaInAs発光層を組み合わせた短共振器構造のDFB-LDとすることで、高温75°Cで高出力かつ良好な25.8Gbps高速変調光波形を低電流で得ることができた。これによって、非冷却動作を前提とする波長多重方式(CWDM)を採用するCWDM4規格やCLR4規格にこのレーザを適用することが可能となり、伝送装置で求められる低消費電力化、低コスト化への貢献が期待できる。

参考文献

- (1) CWDM4 MSA Group
<http://www.cwdm4-msa.org/>
- (2) 100G CLR4 Alliance
<https://www.clr4-alliance.org/>
- (3) Sakaino, G., et al.: 25.8Gbps direct modulation AlGaInAs DFB lasers with Ru-doped InP buried heterostructure for 70°C operation, Optical Fiber Communication Conference (OFC/NFOEC), OTh3F3 (2012)
- (4) 外間洋平, ほか: RuドープInP埋込構造AlGaInAs 25.8Gbps直接変調DFBレーザ, 電子情報通信学会技術研究報告, **111**, No.415, 95~98 (2012)
- (5) 境野 剛, ほか: 100Gbps送信用4波長25.8Gbps直接変調DFB-LD, 三菱電機技報, **87**, No.2, 132~136 (2013)