

# 100Gbps送信用 4波長25.8Gbps直接変調DFB-LD

境野 剛\*  
外間洋平\*  
柳楽 崇\*

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

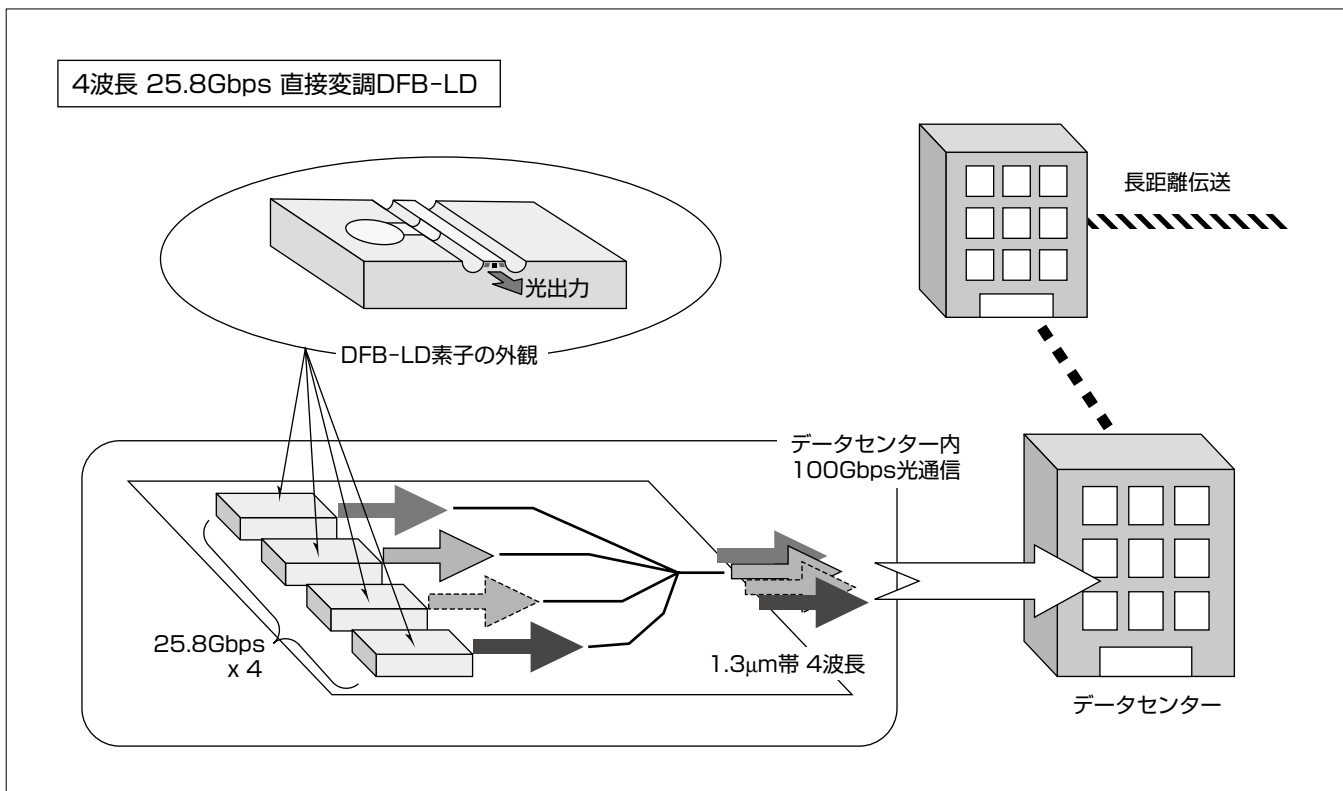
Go Sakaino, Yohei Hokama, Takashi Nagira

## 要 旨

インターネットのブロードバンド化や通信端末の普及による通信量増加に対応するため、光通信の高速化が進められている。特に伝送装置を収容するデータセンターではデータ通信のトラフィックが集中するため、100Gbpsという高速の光通信が必要とされている。2010年には100ギガビットイーサネット<sup>(注1)</sup> (100GbE)の国際標準化が完了し、1.3 $\mu$ m帯の25.8Gbps変調4波長レーザを用いる最大伝送距離10kmの100Gbps光通信が実用化の段階を迎えている。一方で高密度実装される伝送装置の冷却などで飛躍的に増大する消費電力を低減することが大きな課題となっている。この状況下、最大伝送距離が2 km以下となるデータセンターでの短距離伝送の国際規格制定に向けた動きが活発化している。この用途では特に多数の伝送装置を高密度で実装するため装置の小型化、低コスト化が重要で、データ送

信用レーザ光源としては、駆動が簡素な構成で行え、かつ低電流動作が可能で、伝送装置の冷却を不要にできる直接変調DFB-LD(Distributed Feed-Back Laser Diode)が有望である。非冷却動作の実現にはレーザを70 $^{\circ}$ C以上の高温で動作させる必要があり、使用上限温度を従来の50 $^{\circ}$ Cから70 $^{\circ}$ Cに高めた25.8Gbps動作4波長直接変調DFB-LDを開発した。このレーザは短共振器構造とともに今回開発した低容量高効率電流狭窄(きょうさく)層構造を採用することによって、高温70 $^{\circ}$ Cで世界最高レベルの低電流駆動と高品質な変調光波形を実現しており、高速100Gbps短距離光通信の普及に必要な低消費電力化、小型化、低コスト化への貢献が見込まれる。

(注1) イーサネットは、富士ゼロックス(株)の登録商標である。



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

光通信の伝送データ量増大によって、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。この用途では多数の伝送装置が高密度で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化、低コスト化が求められる。この要求を満たす伝送装置用の光源としては高温で低電流駆動が実現できる直接変調DFB-LDが有望であり、今までよりも高温の70 $^{\circ}$ Cで動作する高効率25.8Gbps直接変調DFB-LDを開発した。

## 1. ま え が き

インターネットのブロードバンド化やスマートフォンに代表されるデータ通信端末の普及によって、光通信のトラフィックが急激に増大している。このため、トラフィックが集中するデータセンターでは、100Gbpsの高速光通信が必要となっており、100ギガビットイーサネット(100GbE)の規格<sup>(1)</sup>が国際標準化され実用段階を迎えている。しかしデータセンターでは多数の伝送装置が高密度に収容されるため、装置の駆動とその冷却のための消費電力が膨大にな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である。

ところで、100GbEの規格の一つである100GBASE-LR4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てデータ伝送を行うが、変調光波形は伝送距離と波長に応じて光ファイバ中で劣化する性質がある。そのため規格で定められている最大10kmの伝送でもこの変調光波形劣化によって品質が低下しないようにするには、光の波長を1.31μm周辺の極めて狭い範囲に収める必要があり、4波長の波長間隔が約5nm、各々の波長で許容される幅が約2nmと非常に狭く設定されている。よって波長を規格内に制御するために送信側の発光素子を一定温度に保つ冷却機構が必要で、伝送装置として発光素子の駆動以外に大きな電力が消費される。しかしデータセンターのように最大2kmの短距離伝送では、伝送時の変調光波形の劣化が小さいため、10Gbpsなどの伝送で用いられるCWDM(Coarse Wavelength Division Multiplexing)規格と同様、4つの波長間隔を20nmとして各々の波長許容幅を13nmとする波長規格での伝送が可能となる。このCWDM波長規格を適用した場合、波長許容幅が広い発光素子の温度による波長変化を抑制する冷却機構を不要にでき、伝送装置の消費電力低減に大きな効果がある。なお伝送装置を非冷却とした場合、使用環境温度と周囲のデバイスの発熱を考慮すると発光素子として用いる半導体レーザは70℃以上の高温動作が必要となるが、低消費電流で高温駆動可能な直接変調型のDFB-LDが最適と考えられる。

これまで50℃で25.8Gbps動作する直接変調DFB-LDを開発し報告しているが、先に述べたとおり非冷却動作としては必ずしも十分ではなく、今回非冷却動作を目的として高温70℃で25.8Gbps動作する4波長直接変調DFB-LDを開発した。

70℃の高温で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変調光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(fr)と呼ばれ、良好な変調光波形を得るには、高温におけるfr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発光層への電流注入効率低下とこれに起因するfrの低下を抑制する必要があるが、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70℃でも発光層への効果的な電流注入を可能とする低容量高効率電流狭窄埋込層を開発し適用することで、世界最高レベルの低消費電流駆動と良好な変調光波形を高温70℃で実現した。

## 2. 素子の設計

### 2.1 高温高出力動作設計

レーザ素子が25.8Gbpsの高速入力電気信号に応答するためには、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電流狭窄層で発生する寄生容量を抑制する必要がある。電流狭窄埋込層に半絶縁性の半導体層を用いることが有効である。そのため従来開発素子の50℃動作25.8Gbps直接変調DFB-LDでは、一般的に使用されている鉄(Fe)をドーピングした半絶縁性InP埋込層を採用している。この構造では100GbE-LR4規格を想定した50℃で45mAという極めて低い電流による駆動で実用レベルの良好な25.8Gbps高速変調波形を実現できている<sup>(2)(3)(4)</sup>。しかしながら、先に述べたCWDM波長規格での非冷却動作を想定した場合には更に高温の70℃以上での動作が必要となる。ところが従来の構造素子では半絶縁性InP層中のFeとp型InP層中のドーパントである亜鉛(Zn)が相互拡散するため、50℃よりも高温で駆動した場合にはこの相互拡散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大きくなり、DFB-LDの発光効率が大きく低下する問題があった。そこでこの無効電流を抑制する目的で新たな低容量高効率電流狭窄構造を開発した<sup>(5)</sup>。この構造開発で今回、半絶縁性InPにドーピングする材料として、p型InP層中のZnと相互拡散を起こさないルテニウム(Ru)という元素に着目した。このRuをドーピング材料に用いることで相互拡散に起因する無効電流の抑制は可能となるため、10Gbps駆動のDFB-LDに適用した例<sup>(6)(7)</sup>が報告されているが、Ruドーピング層を用いた電流狭窄構造として最適な層構成は十分に検討されておらず、今回この層構成について検討した。

RuドープInP層は、Feをドーピングした半絶縁性InP層と同等の十分な低容量を実現できることが分かっているが、電子だけを捕捉して高抵抗となるFeドープInP層とは異なり、電子とホールを双方を捕捉する性質を持つことから、高抵抗すなわち高効率電流狭窄構造を実現するためには、RuドープInP層に接する半導体層の極性について細心の配慮が必要となる。そこで今回レーザ構造に適用可能でかつ最も高抵抗が得られる層構成を検討し、実験で検証した。RuドープInP層に接する半導体層の極性を変えた複数サンプルの抵抗率比較評価を行った結果、図1に示すように、

RuドープInP層の上下にp-InPを配置するp/Ru/p-InPの3層構造にすることで、最も高い抵抗率( $10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ )が得られ、従来のFeドープInP層よりも高い発光層への電流注入効率が見込めることが分かった。

この結果からRuドープInP層がn型よりもp型のInP層に接している方が高抵抗化に対して有効であることが分かるが、これはRuドープInP層において、ホールを捕捉する準位が電子を補足する準位よりも深いことから、ホールを供給するp型InP層に接している方がより高抵抗になりやすいためと考えられる。なおこの構成をpn接合を持つレーザーに適用する場合、片側にはn-InP層を配置する必要があるため、p/Ru/p/n-InPの積層構造を用いることになるが、この場合でも従来のFeドープInP層よりも大きく十分な抵抗率が確認できており、高効率電流狭窄構造を実現できることが分かった。

2.2 高速動作設計

25.8Gbps高速動作実現に向けては、主に高い緩和振動周波数(fr)を確保する観点から設計を行った。一般的に高いfrを実現するには、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(MQW)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-MQWを採用することで、高い微分利得の確保を可能とした。さらに、高温動作に必要な利得を考慮に入れた上で、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大きく設定することで微分利得の増大を図った。同様に高いfrを得るためにはキャリア寿命を短くすることも効果があり、共振器長の短縮が有効である。今回は動作温度で十分な利得も得られることを考慮し共振器長は150 $\mu\text{m}$ とした。電気的高速応答に対しては先に述べたと

おり、素子の寄生容量が影響するが、高い抵抗率が得られたRuドープInP層を用いたp/Ru/p/n-InP層の構成は従来のFeドープInP層を用いた場合と同等で十分低い寄生容量が得られることが確認できた。

3. 素子構造と素子特性

先に述べた設計に基づいて図2に示す構造の4波長直接変調DFB-LDを作製した。p型InP基板を用いてAlGaInAs系の発光層を成長させた後、その上に回折格子を形成した。発光層の側面には先に述べたRu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、レーザーの共振器長は150 $\mu\text{m}$ とした。素子の共振器端面には、光出力側に無反射コーティング、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3に示す。室温25 $^{\circ}\text{C}$ から高温70 $^{\circ}\text{C}$ 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。

どの波長の素子でも高温70 $^{\circ}\text{C}$ で、しきい値電流は15mA、スロープ効率は0.29W/Aと低電流で高出力を実現できており、最大光出力としても15mW以上の高出力を得た。

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を一つのパッケージに実装することになる。このとき、4波長の光を合波する構造が考えられ、1波長で光伝送する場合と比較して合波による光損失が大きくなることが想定される。今回の4波長DFB-LDではどの波長でもそろって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の設計の制約を少なくできる。なおこのような高出力は今回開発したRuドープInP層を電流狭窄層として用いることによって、発光層に効果的な電流注入ができたことによるものと考えられる。

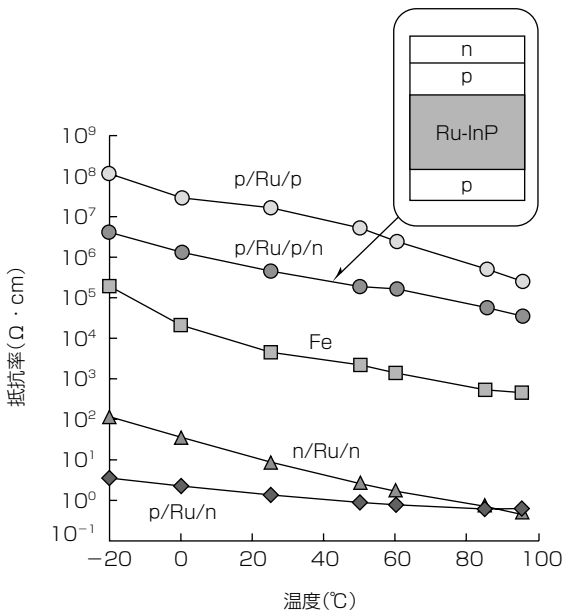


図1. 層構成と抵抗率

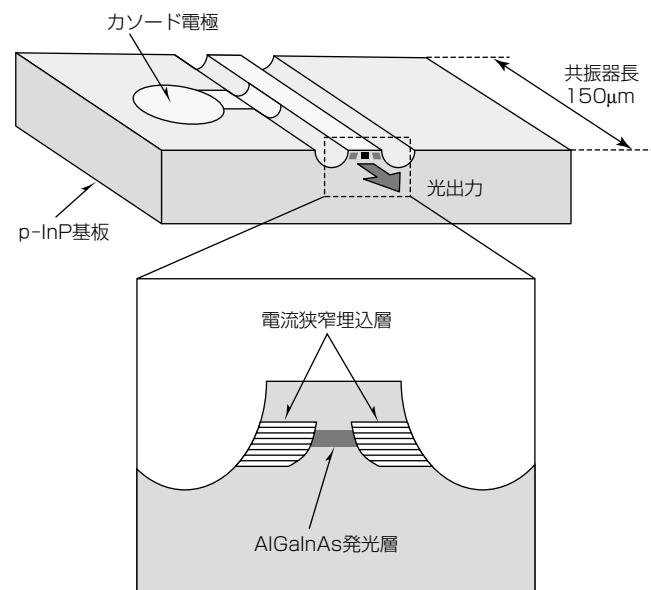


図2. DFBレーザーの構造

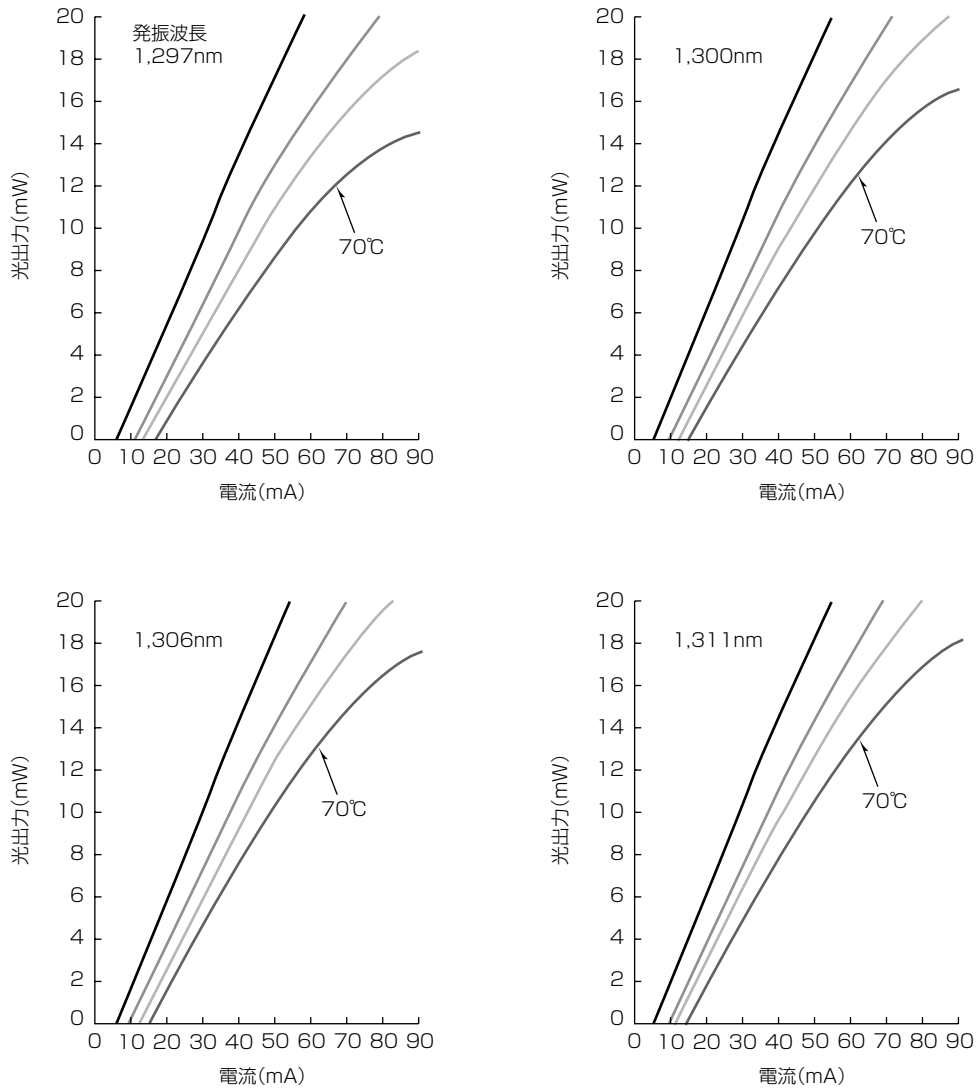


図3. 電流—光出力特性(25, 50, 60, 70°C)

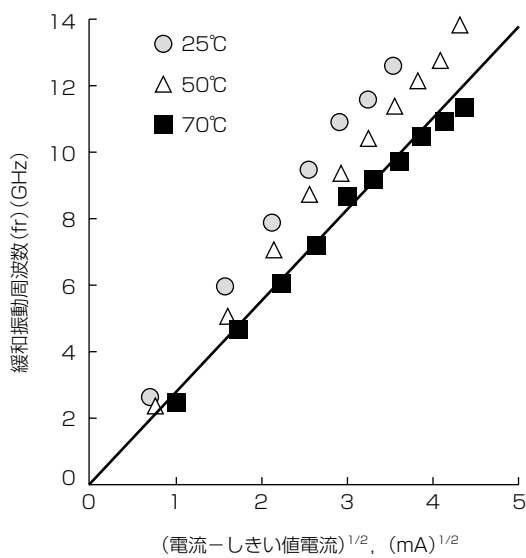
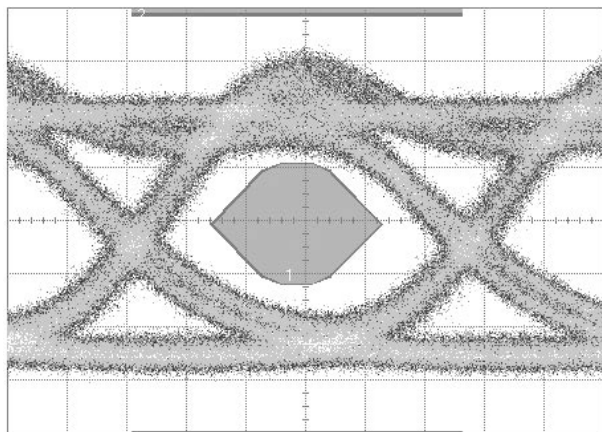


図4. 緩和振動周波数の電流依存性

この良好な光出力特性を反映して、高温70°Cでも大きな緩和振動周波数(fr)が得られており、電流に対するfrの増加量である電流効率として図4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frが得られることを示すものであり、低電流駆動すなわち低消費電流化が可能となる。今回のfrの電流効率は、高温70°Cで $2.8\text{GHz}/(\text{mA})^{1/2}$ と大きな値が得られ、更に高温の85°Cでも $2.4\text{GHz}/(\text{mA})^{1/2}$ と大きな値を維持しており、今後70°Cを超える高温での高速変調動作への対応も期待できる。

このように高温70°Cでの低しきい値電流、高出力と大きなfrが得られたことから、光伝送で重要な25.8Gbps変調光波形は非常に明瞭な形状が得られた。図5にその変調波形の一例を示す。70°Cで平均電流60mAという低電流動作でマスクマージンとして4%が得られている。

データセンターでの100Gbps短距離光通信で規格化が予想されるCWDM波長帯の1,270nm, 1,290nm, 1,310nm, 1,330nmを4つのDFB-LDの発振波長に設定した素子でも



発振波長：1.297nm  
消光比：5.5dB, 平均電流60mA

図5. 25.78125Gbps変調波形(70°C)

RuドーピングInP層を用いた電流狭窄埋込層を適用することで同様の良好な特性が見込まれ、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られる低消費電力、低コスト100Gbps短距離光送信用光源として非冷却動作を想定した70°C動作に対応する目的で、従来の50°Cよりも高温の70°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。高温でも発光層に効果的に電流注入することが可能な電流狭窄埋込層構造を開発し、高いfrが得られるAlGaInAs発光層を用いた短共振器構造のDFB-LDに適用することで、高温70°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4つの波長でそれぞれ波長許容幅が13nmと広く設定されるCWDM規格にこのレーザを適用することで非冷却動作が可能となり、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) IEEE P802.3ba 40Gb/s and 100Gb/s Ethernet Task Force  
<http://www.ieee802.org/3/ba/>
- (2) Sakaino G., et al. : 25.8Gbps direct modulation of BH AlGaInAs DFB lasers with p-InP substrate for low driving current, Semiconductor Laser Conference (ISLC), 22nd IEEE International, 197~198 (2010)
- (3) 境野 剛, ほか : 100Gbpsイーサネット光送信用4波長25.8Gbps直接変調DFB-LD, 三菱電機技報, **85**, No.5, 313~316 (2011)
- (4) 境野 剛, ほか : 低消費電流1.3μm帯AlGaInAs系25.8Gbps直接変調埋込型DFBレーザ, 電子情報通信学会技術研究報告. LQE, レーザ・量子エレクトロニクス, **110**, No.353, 23~26 (2010)
- (5) 外間 洋平, ほか : Ruドーピング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. EST, エレクトロニクスシミュレーション, **111**, No.415, 95~98 (2012)
- (6) Iga, R., et al. : 100°C 10Gb/s directly modulated InGaAsP DFB lasers with Ru-doped semi-insulating buried heterostructure, Electronics Letter, **42**, No. 5, 280~281 (2006)
- (7) 鶴岡清貴, ほか : Ruドーピング高抵抗InP埋込み構造AlGaInAs-MQW-DFB-LDの120°C-10Gb/s動作, 電子情報通信学会総合大会講演論文集 2006年\_エレクトロニクス C-4-11 (2006)