

1. ま え が き

移動通信でのデータ通信量増大に伴う5Gへの移行が加速している。5G移動通信ネットワークのフロントホールのアンテナ基地局に適用する光通信デバイスは、通信機器内に内蔵される形で屋外に設置されるため、広い温度範囲での動作が求められる。さらに低消費電力動作の点で、熱電変換素子を不要にできて、直接変調動作が可能なDFBレーザが以前から使用されている。これまで適用されているDFBレーザの伝送速度は25Gbpsであり、データ伝送量を2倍の50Gbpsにするには、DFBレーザの変調速度を2倍にする、又は二つのDFBレーザを用いた並列伝送が考えられる。しかしながら、DFBレーザで広い温度範囲での高速動作は技術的な課題が多く、また複数のDFBレーザを使用することはコストが増大する。一方、フロントホールに対応するため制定された標準規格50GBASE-LRでは、光強度を従来の2値から4値にするPAM4変調方式が提案されており、この方式ではDFBレーザの変調速度を2倍にせずとも50Gbps伝送が可能になる。

今回、PAM4変調方式の動作に適した50Gbps DFBレーザチップと信号伝送線路を最適化した業界標準のTO-56CANパッケージを設計し、製品を開発した。

2. DFBレーザの設計

当社ではこれまで-40℃から90℃までの温度範囲で25Gbps動作するDFBレーザを製品化している。直接変調動作が求められるDFBレーザでは、レーザ特有の電気と光の相互作用の結果発生する光強度の振動による光変調波形の劣化抑制が重要である。この光強度振動の周波数は緩和振動周波数と呼ばれ、良好な光変調波形を得るには、全動作温度範囲で変調信号周波数と同程度の高い値を保つことが求められる。そのためには特に高温で顕著な光の損失や発光層への電流注入効率低下、発光層での光密度の低下を抑制する必要がある。またDFBレーザを搭載するパッケージでは、高周波電気信号の伝送線路の設計として、高周波特性の劣化を抑制するために内部インピーダンスの最適化が重要である。

今回、これらを考慮して光変調波形のシミュレーションを行ったので、その一例を用いてPAM4変調波形の特徴を述べる。シミュレーションモデルを図1、シミュレーション結果例を図2に示す。従来の25Gbps動作の

25GBASE-LR用途では、NRZ(Non Return to Zero)信号を使用し、25.78Gbaudで(約39psごとに)変化する2値のレベルを持った電気信号をDFBレーザに入力し、DFBレーザチップは2値のレベルを持った光信号を出力する。図2(a)は、LPF(Low Pass Filter)を通過後の光波形で、アイ開口部の最も内側の点線で囲まれた10角形はマ

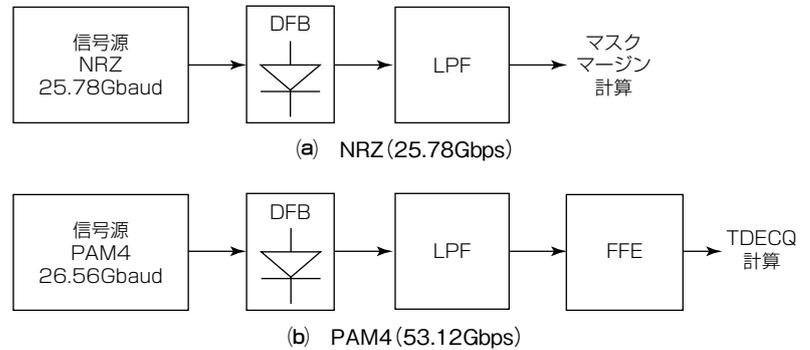
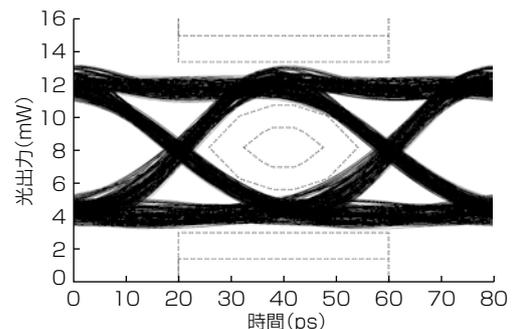
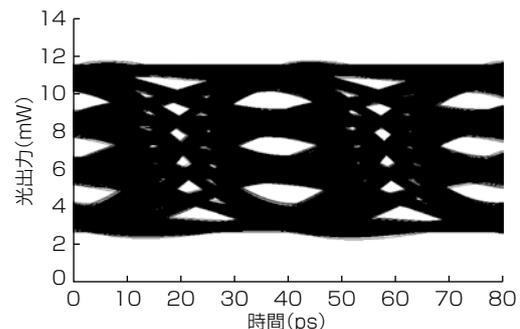


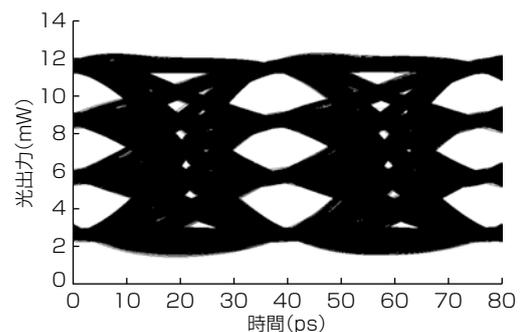
図1. 光変調波形のシミュレーションモデル



(a) NRZ



(b) PAM4のFFE前



(c) PAM4のFFE後

図2. 光変調波形のシミュレーション結果例

スクと呼ばれ、信号が存在しないようにすべき領域である。この領域を信号と接触するまで拡大したとき(Bit Error Ratio = $5E-5$ を適用)の元のマスク領域との差はマスクマージンとされ、良好な波形では大きな値になる。

今回目標とする50GBASE-LR用途では、25Gbpsの2倍の伝送速度を得るために、PAM4と呼ばれる4値の信号レベルを使用する。26.56Gbaudで(約38psごとに)変化する4値のレベルを持った電気信号をDFBレーザーに投入し、DFBレーザーチップは4値のレベルを持った光信号を出力する。三つのアイ開口を持つPAM4信号の良否を判別する指標はIEEE802.3cd⁽¹⁾で規定されており、LPFとFFE(Feed Forward Equalizer)で波形整形された光変調波形から算出されるTDECQが用いられる。TDECQは雑音への耐性を数値化した値で、NRZ信号でのマスクマージンに相当し、小さいほど波形品質は良好で、IEEE802.3cdのTDECQ規格値は3.2dB以下である。

PAM4信号波形では4値を持つため、アイ開口が縦に3個並んで、近接2値のレベル間の振幅はNRZ信号の1/3になる。さらに、中間レベルの存在で信号遷移が複雑になり、NRZ信号と比較してアイ開口が非常に小さくなって、伝送誤りが発生しやすい。また、DFBレーザーでは先に述べたように光強度の振動(緩和振動)が発生し、光変調波形へ悪影響を及ぼす。具体的には、光変調波形にオーバーシュートが発生し、図2(b)(c)のように、上部アイ開口が左側に動いて(進んで)、下部アイ開口が右側に動く(遅れる)。このようにDFBレーザー固有の緩和振動によって、波形品質が低下(TDECQが悪化)する傾向がある。さらに先に述べたように電気信号線路のインピーダンスの設計も重要なことから、緩和振動を考慮したDFBチップモデルと2017年に開発した25GbpsDFBレーザー⁽²⁾のパッケージを基本とした実装モデルを作成した。これを用いて今回、図2(b)(c)のようなシミュレーションを実施し、50Gbps DFBレーザーのDFBレーザーチップやパッケージを最適化設計した。

3. 素子構造と特性

今回開発した発振波長1,310nmの50Gbps DFBレーザーの外形写真を図3に示す。CANパッケージの外形は、業界標準のφ5.6mm TO-56CANを採用し、従来製品との互換性確保や小型トランシーバ規格(SFP56)への適合を可能にしている。

電流光出力特性を図4に示す。低温-40℃から高温90℃へのしきい値電流やスロープ効率の変化が小さく、50GBASE-LRに対して十分な特性が得られている。特に高温90℃で、しきい値電流は20mA以下、スロープ効率は0.22mW/mA以上、最大光出力は12mW以上が得られ

ている。

PAM4伝送光変調波形の測定系を図5に示す。任意波形発生器を信号源として、電気信号増幅によって振幅不足を補い、バイアスティからバイアス電流を印加し、DFBへ差動電気信号を入力した。波長1,310nm付近にゼロ分散を持つシングルモード光ファイバを用いて伝送し、光波形はLPFやFFEを通過した後に観察し、TDECQはIEEE802.3cdに準拠した方法で計算した。また、Pre-Emphasis(DFBレーザー等の周波数特性を補正するようにあらかじめ電気信号の立ち上がりや立ち下がりやを補正強調、以下“PE”という。)することでTDECQ値を改善できる。近年のドライバICはPEの能力が向上して実用化段階であり、今回比較のためPE有無のそれぞれについて評価した。

I-temp温度範囲(-40~+90℃)でのPAM4伝送光変調波形を図6に示す。必要な緩和振動周波数の確保が難しい高温90℃、さらに低温-40℃でも、PE有無にかかわらず、大きなアイ開口が得られている。また光変調波形は20km伝送後でも乱れが少なく良好である。

TDECQの伝送距離依存性を図7に示す。PEなしの条件での-40℃、25℃及び90℃のときのTDECQは、伝送前



図3. 50Gbps DFBレーザー

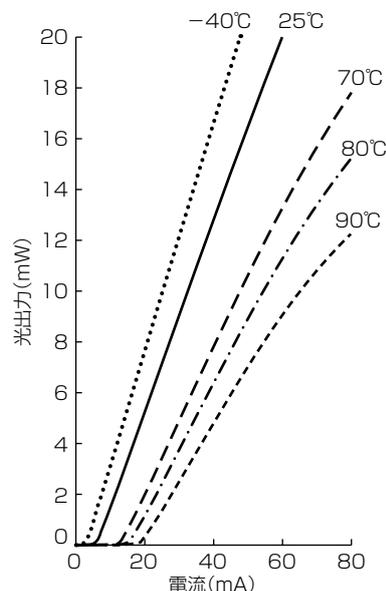


図4. 電流光出力特性

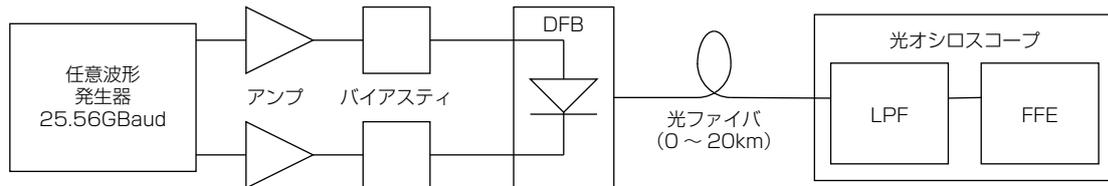


図5. PAM4伝送光変調波形の測定系

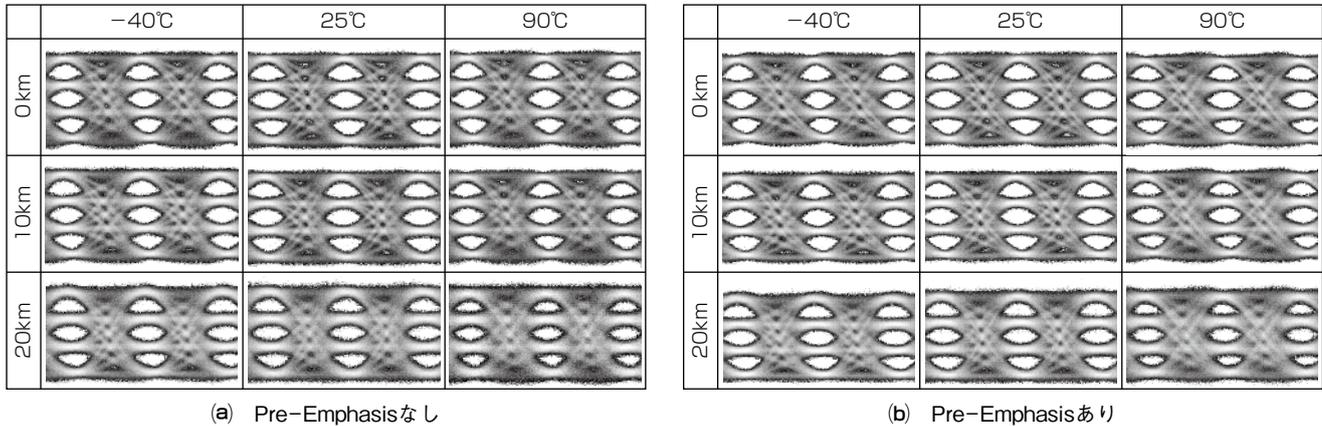
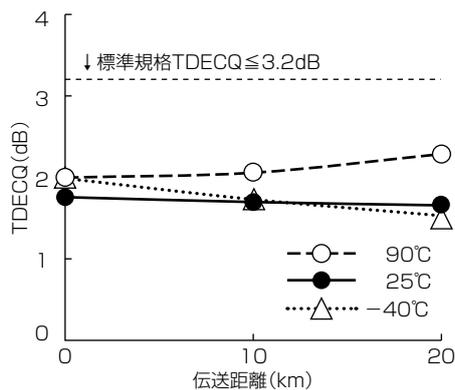
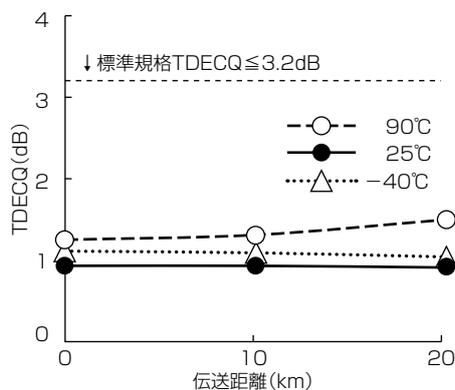


図6. PAM4伝送光変調波形



(a) Pre-Emphasisなし



(b) Pre-Emphasisあり

図7. TDECQの伝送距離依存性

(0 km)でそれぞれ2.3dB, 1.8dB及び2.0dB, さらに10km伝送後でも2.1dB, 1.7dB及び2.1dBであり, 50GBASE-LRが要求する10km伝送時でも, 標準規格値3.2dB以下

に対して十分に余裕がある特性になっている。またPEありの条件での-40°C, 25°C及び90°CのときのTDECQは, 10km伝送後でも1.1dB, 0.9dB及び1.3dBであり, PEを行うことで更にTDECQを向上させられることを確認した。

4. むすび

5G移動通信ネットワークのフロントホール向けにPAM4変調方式の動作に適した50Gbps DFBレーザを開発した。DFBレーザチップは必要動作温度範囲の-40~+90°Cで必要な電流光出力特性や緩和振動周波数を満たし, この特性に整合するよう最適化設計した信号伝送線路を持つ業界標準のTO-56CANパッケージを用いて, 小型トランシーバでの規格互換性を確保した。PAM4変調時の良好な光変調波形によって, 5G移動通信ネットワークのフロントホールに対応する標準規格50GBASE-LR (TDECQ ≤ 3.2dB, 10km伝送)を満たす特性(TDECQ ≤ 1.3dB, 10km伝送)を実現した。これによって, 従来比2倍の高速化が可能になり, 5Gの高速化と低消費電力化を実現できる。

参考文献

- (1) IEEE Standards Association : IEEE 802.3cd 50Gb/s, 100Gb/s, and 200Gb/s Ethernet Task Force <https://www.ieee802.org/3/cd/>
- (2) 境野 剛, ほか: 25Gbps光通信用直接変調DFBレーザ, 三菱電機技報, 89, No.5, 265~268 (2017)