特集論文

400Gbps光送信モジュールのための 100G/λ EML集積化技術

大畠伸夫* Nobuo Ohata
川本洋輔* Yosuke Kawamoto
村尾覚志*

今井雄大† Yı dai Imai 板本裕光† Hiromitsu Itamoto

Tadashi Murac

 $100G/\lambda$ EML Integration Technique for 400Gbps Optical Transmitter Module

要旨

近年、スマートデバイスの普及で大容量の情報の取得が容 易になり、通信トラフィックは増加の一途をたどっている。5G が普及することで、クラウドAR(Augmented Reality)/VR (Virtual Reality)サービス, 自動運転, スマートマニュ ファクチャリング等様々な活用が期待されており、光通信 機器の更なる高速・大容量化が求められている。データセン ターでは通信トラフィックが集中し、そこで使用されるルー タやスイッチには従来40Gbpsや100Gbpsの光トランシーバ が用いられてきたが、より大容量のデータを処理するために 国際標準規格のIEEE802.3bsに準拠する400Gbps光トラン シーバの導入が始まっている。この標準規格では伝送容量 を上げるために2ビットの光信号を送り出すPAM4(Pulse Amplitude Modulation-4)変調が採用されている。50Gbps

の伝送容量を持つ光信号を8波長束ねて送受信する方式 である。しかし、この方式は波長数が多く光モジュールの コストが高くなり、消費電力も大きくなる。一方、100G Lambda MSA(Multi-Source Agreement)では100Gbps の伝送容量を持つ光信号を4波長束ねて送受信する方式が 標準化された。この方式は光モジュールの構成を簡素化で き、消費電力も抑えられる。しかし、非常に高速な電気信 号でそれぞれのレーザを変調するため. 電気のクロストー クが発生して光信号が劣化するという技術的課題があった。 三菱電機では集積化したレーザ駆動に伴って発生する電 気クロストークを抑制する技術を新たに開発し、標準規格 を満足する良好な光モジュール特性を実証した。



400Gbps光通信モジュールの構成及び適用例

クラウドサービスの普及によってデータセンターの通信トラフィックが増大しており、通信機器の高速・大容量化のために400Gbps光トラ ンシーバの需要が増加している。特にルータやスイッチに搭載するラインカードの容量を増やすために小型かつ低消費電力の光トランシーバが 求められている。当社ではより低消費電力が期待できる100Gbps×4波長の構成を実現するための集積化技術を開発した。

1. まえがき

近年,スマートデバイスの普及で大容量の情報の取得が 容易になり,通信トラフィックは増加の一途をたどって いる。特にデータセンターでは通信トラフィックが集中 し,そこで使用されるルータやスイッチには従来40Gbps や100Gbpsの光トランシーバが用いられてきたが,より 大容量のデータを処理するために100G Lambda MSA⁽¹⁾ では1波長当たり100Gbpsの光信号を4波長束ねて送受 信する400GBASE-FR4/LR4が標準化された。この方式 は光モジュールの構成を簡素にできるが,非常に高速な変 調信号を四つ用いてそれぞれのレーザを変調するため,電 気のクロストークが発生して光信号が劣化するという技術 的課題があった。

当社では1波100Gbpsで動作可能なEML(Electro-absorption Modulator Laser)を集積した400Gbps光送信モ ジュールの電気クロストーク抑制技術を新たに開発し,標 準規格を満足する良好な光波形品質を得ることに成功した。

2. 電気クロストークの抑制技術

2.1 光モジュールとプリント基板の接続構成

図1に400GbpsEML光モジュールと光トランシー パプリント基板の接続構成を示す。PAM4変調された 100Gbpsの電気信号がDSP(Digital Signal Processor) から4レーン出力されて、それらは光モジュールのフレ キシブル基板を介して光モジュール内に搭載されるEML に加えられて、それぞれ異なる波長の光信号を出力する。 EMLから出射するレーザ光は光合波器によって一つに束 ねられてモジュールから出力される。DSPから出力され る4レーンの電気信号はプリント基板やフレキシブル基 板を並走するために電気クロストークが発生しやすい構 造になる。一般的に電気クロストークを抑えるためには信 号線路間の距離を離すことが有効であるが、業界標準仕様 であるQSFP56-DDトランシーバ⁽²⁾への搭載を考えると 従来の100GbpsEML TOSA(Transmitter Optical Sub-Assembly)⁽³⁾と同等の小型サイズが要求されて、線路間距 離を離さずに電気クロストークを抑制する技術が必要にな る。次に線路間距離を離さずに電気クロストークを抑制す る構造について述べる。

2.2 電気クロストークの抑制構造

電気クロストークを抑制するために今回フレキシブル基 板に着目した。表1にフレキシブル基板の線路構成と得失 比較を示す。フレキシブル基板にはマイクロストリップ線 路が一般的に用いられる。誘電体基板を信号線路とGND (GrouND)導体で挟み込んだ構造であり、電磁界の一部は 空気中に漏れる構造のため、複数の信号線路が並列に隣接 する構造では空気中に漏れた電磁界が隣接する信号線路に カップリングして電気クロストークが発生する。一方.ス トリップ線路は信号線路の上下をGND導体で覆う構造で あり、電磁界は誘電体基板内に閉じ込められることになっ て、線路が隣接する場合でも電気クロストークを低減でき る。しかし、この構造の場合電界は線路と上下のGND導 体に集中するためにマイクロストリップ線路と比較して 静電容量が2倍になる。信号線路は特性インピーダンス が50Ωになるように設計されており、例えばマイクロス トリップ線路の線路幅が100μmで50Ωの特性インピーダ ンスになるように設計した場合、基板の厚みや誘電率が同 じと仮定するとストリップ線路の線路幅は約50umまで細 くする必要があり、フレキシブル基板を曲げたときに断線

X1. フレインフル本(Kの)家田				
	マイクロ ストリップ線路	ストリップ線路	開口付き ストリップ線路	
A-A' 断面図		基板 信号線路 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人	基板 信号線路 子子子 GND	
電気クロス トーク特性	×	O	0	
線路幅	(≒100µm)	\times (\doteqdot 50 μ m)	(≒100µm)	

表1. フレキシブル基板の線路構成と得失比較



図1. 光モジュールとプリント基板の接続構成

しやすくなる。電気クロストーク抑制及び線路断線防止の 両方の観点から今回新たに開口付きストリップ線路を考案 した。この構造はストリップ線路に対して信号線路上部の GND導体の一部に開口を設けた構造であり,静電容量を 低減できるため,線路幅を細くせずに特性インピーダンス を50Ωに整合できる。また,上面に配置されたGND導体 によって電磁界が空気中に漏れることを抑制できるため隣 接信号線路への電気クロストークも抑制できる。

2.3 シミュレーション結果

図2にフレキシブル基板単体の隣接線路間クロストーク のシミュレーション結果を示す。シミュレーションでは 隣接する信号線路の間隔を1.3mmとして、マイクロスト リップ線路と開口付きストリップ線路それぞれの構造で 計算を実施した。マイクロストリップ線路では周波数が 高くなるにつれて電気クロストークが大きくなって、周 波数50GHzで約-27dBの電気クロストークが発生するこ とが分かった。一方、開口付きストリップ線路の場合広い 周波数範囲で電気クロストークが抑制できており、周波数 50GHzでは電気クロストークが約-33dBになり、マイク ロストリップ線路よりも6dBの改善効果を確認した。

フレキシブル基板単体での電気クロストークの改善効 果が確認できたため、図1に示す光モジュールの接続構成 で、それぞれのフレキシブル基板を用いたときの光出力波 形のシミュレーションを行った。表2に100Gbps(53Gbaud PAM4)で駆動したときの光波形のシミュレーション結果を 示す。シンボルパターンとしてSSPRQ(Short Stress Pattern Random-Quaternary)の一部を用いてシミュレーショ ンを行い、シミュレーション結果から光波形の品質を示す TECQ(Transmitter Eye Closure for PAM4)を算出して それぞれの条件で比較を行った。単レーンを駆動したとき の光波形は非常に良好なアイ開口が得られており、TECQ は2.2dBになった。フレキシブル基板にマイクロストリッ プ線路を用いたときの全レーン動作時の光波形は電気クロ ストークの影響によってアイ開口が閉じてしまい、TECQ



図2. 隣接線路間クロストークのシミュレーション結果

	光波形	TECQ (dB)	ペナル ティ(dB)
単一レーン動作	1.2 1.0 0.8 0.6 0.4 0.2 0 5 20 25 30 35 40 45 50 55 时間(ps)	2.2	_
全レーン動作 (マイクロ ストリップ線路)	1.2 1.0 0.8 0.4 0.4 0.2 0 5 20 25 30 35 40 45 50 55 時間(ps)	3.4	1.2
全レーン動作 (開口付き ストリップ線路)	1.2 1.0 0.8 0.4 0.2 0.5 20 25 30 35 40 45 50 55 時間(ps)	2.6	0.4

表2. 光波形のシミュレーション結果

も3.4dBまで劣化する。TECQのペナルティとしては、電 気クロストークがない単レーン駆動に対して1.2dB発生し た。一方、開口付きストリップ線路を採用したときの全 レーン駆動時の光波形は単レーン動作よりはアイ開口が閉 じているが、マイクロストリップ線路を用いたときのアイ 開口よりもクロストークの影響を受けておらず良好な開口 が得られている。TECQペナルティも0.4dBになり、マイ クロストリップ線路を用いたときと比較して0.8dBの改善 効果があることを確認した。

3. 光モジュールの試作と評価結果

シミュレーションで良好な結果が得られることを確認し たため、フレキシブル基板に開口付きストリップ線路を採用 した光モジュールの試作・評価を行った。図3に試作した 400GbpsEML光モジュールの写真を示す。大きさは6.5×



5.4×14(mm)であり従来の100GbpsEML TOSAと同等の パッケージサイズである。図4に試作した光モジュールの 隣接線路間クロストークの評価結果を示す。フレキシブ ル基板単体での電気クロストーク評価は難しいため光モ ジュールで評価を行った。光モジュールの電気クロストーク は周波数50GHzの帯域で約16.4dBであり、シミュレーショ ン結果と比較して実測結果が極めて近いことを確認した。

次に光波形での改善効果を確認した。図5に光モジュー ルの評価系を示す。DSPから出力される電気信号は電気 のドライバで増幅された後に光モジュールに加えられる。 光波形のリニアリティが最も高くなるようにEMLのバイ アス点の調整を行った。光波形はDCA(Digital Communications Analyzer)で測定した。電気クロストーク評価を するに当たって、L0~L3それぞれを単レーン駆動したと きの光波形と、全レーン駆動したときの光波形のTECQ を比較した。

表3に53Gbaud PAM4で駆動したときの光波形の測定結 果を示す。シンボルパターンはSSPRQを用いており、T-Spaced 5 Tap FFE(Feed Forward Equalizer)処理後の 光波形を示している。単レーン動作ではL0~L3全てのレー ンでTECQが2.50dB以下の極めて良好な光波形を確認し た。一方、全レーン動作時では電気クロストークの影響 でTECQが劣化しているものの、全レーンで2.82dB以下



図4. 隣接線路間クロストークの評価結果







のTECQが得られ、規格で規定している3.90dBを満足す る良好な結果を得た。電気クロストークによるTECQの ペナルティとしては最大で0.40dBになり、開口付きスト リップ線路を採用したことで電気クロストークが効果的に 抑えられることを実証した⁽⁴⁾。

4.むすび

1波長当たり100Gbpsで動作するEMLを集積した400Gbps 光モジュールでは電気クロストークが課題になる。これに 対して光モジュールのフレキシブル基板の信号線路に開口 付きストリップ線路を採用することで、電気クロストーク が抑制できることを実証した。電気クロストークで発生す るTECQのペナルティは全レーンで0.4dB以下まで抑制で き、TECQも全レーンで2.82dB以下と規格を満足する良 好な特性が得られることを確認した。

今後も高速・大容量化のトレンドは続くと考えられ,光 デバイスの帯域も拡大していく中,集積化に伴って発生す る電気クロストークを抑制する今回のような技術は今後も ますます重要になるであろう。

参考文献

- (1) 100G Lambda MSA https://100glambda.com/
- (2) QSFP-DD MSA
- http://www.qsfp-dd.com/
- (3) Murao, T., et al.: Efficient Optical Alignment Technique for Compact 100 and 400 GbE TOSAs With Integrated Multiplexing With Free Space Optics, Journal of Lightwave Technology, **37**, No.3, 799~807 (2019)
- (4) Ohata, N., et al.: A Compact Integrated LAN-WDM EML TOSA Employing Stripline With an Aperture in the FPC, Journal of Lightwave Technology, 38, No.12, 3246~3251 (2020)