

# シリコンフォトニックベースPIC変調器、高密度データセンターインタコネクトに向け増強

ジャンイン・チョウ

拡張性のあるシリコンフォトニックアーキテクチャを利用するコスト効率の優れたスモールフォームファクタコヒーレント変調器は、高ボレートデータセンターインタコネクト需要向けでは、InP、あるいはLiNbO<sub>3</sub>よりも集積レベルが高くなっている。

分散型光通信アーキテクチャとともにメガサイズデータセンターの急増が、チャネルあたり、またファイバあたり大容量のデータセンターインタコネクト(DCI)コヒーレント伝送システムの大きな需要を作り出している。

DCIリンクは一般に100km以下をカバーし、64Gbaud/16QAM(直交振幅変調)を利用する波長あたり400Gbit/s、あるいは64Gbaud/64QAMを使い600Gbit/sで動作する。間もなく、90Gbaud/32QAMを使う800Gbit/s動作になる。

これらの高速ネットワーク向けに利用されるコヒーレント変調器は複雑な入れ子型マツハツェンダ変調器(MZM)である。これらは、以下のプラットフォームの1つをベースにした光集積回路(PIC)を利用して作製されている。インジウムリン(InP)、リチウムナイオベート(LiNbO<sub>3</sub>)あるいはシリコンフォトニクス(SiPho)である。

これらのプラットフォームのおおのが、長所と短所を持っているが、InPとLiNbO<sub>3</sub>は、一般的に、変調性能が高い。しかし、ハイボリュームアプリケーション向けでは、SiPhoがコスト効率のよい、スモールフォームファクタコヒーレント変調器になる。量

産、高歩留まり、高信頼の確立された大規模シリコンウエハプロセスを利用することで高収率の光・電気集積が得られるからである。

## SiPhoベースPICの例

スモールフォームファクタ、高収率と信頼性の両方だけでなく、SiPhoは高集積化への簡単な経路である。コヒーレントレシーバとコヒーレント変調器を1つのコヒーレント光サブアセンブリ(COSA)に統合することで製造を拡大できる。

米ネオフォトニクス社(NeoPhotonics)は、キャリア空乏MZMベースインフェーズ直交(IQ)変調器を開発した。これは、85Gbaud/16QAM、及び64Gbaud/64QAMを使用して600Gbit/sで動作する<sup>(1)</sup>。デバイスは、商用SiPho製造プロセスを使って製造された。また、消光比25dB、半波長電圧( $V_{\pi}$ 、変調器を透過する光で $\pi$ の位相変化を誘発するために必要な電圧)は4V、またオンチップ挿入損失7dBを実証している。

慎重な半導体ドーピングとデバイス設計最適化により、高速電気光応答は、簡素な差動コプレーナ電極構造で達成されている。この性能レベルとチップ

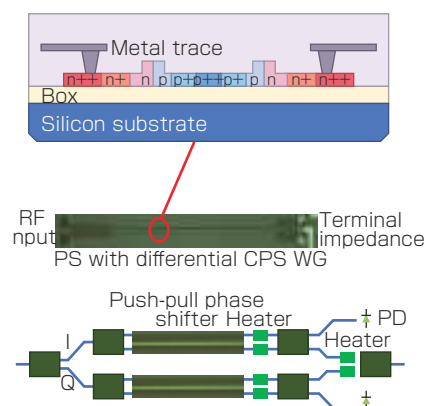


図1 機能ブロック図は、インタフェース直交マツハツェンダ変調器(IQ MZM)(下)、差動コプレーナストリップ進行導波路(CPS TW)(中央)、とプッシュプルp-n構造(上)を示している。

サイズは、プラグابل400ZRモジュール(400GEthernet標準)とコンパクトな600Gラインカードに適している。

## SiPho変調器の課題

シリコン光変調器設計には、InPまたはLiNbO<sub>3</sub>変調器よりも多くの制約がある。ほとんどの商用SiPho変調器は、キャリア空乏を利用して動作するので、関連のドーパントレベルは複雑な問題になっている。高キャリア濃度は、変調器(低いほうの $V_{\pi}$ )の位相シフタ(PS)部分の効率を高めるが、同時に損失も増やす。さらに、ドーパントレベルは、シリーズ抵抗・容量に、従って帯域にも影響を及ぼす。

InPやLiNbO<sub>3</sub>変調器にも適用されることであるが、PS長や電極に関連する無線周波数(RF)についての従来

の設計制約に加えて、このような考察すべき事柄がある。帯域と損失のためにデバイス長を短くすると、 $V_{\pi}$ が悪化する。従って、SiPhoには、InPやLiNbO<sub>3</sub>変調器よりもバランスをとるトレードオフが多く存在する。

キャリア空乏進行導波路マッハツェンダ変調器(TW-MZM)は、すべてシリコン材料であるので、商用利用には、最もコスト効率が良いが、高速、高性能SiPho変調器の設計には課題が存在する。性能に影響をおよぼす複数の重要要素に関連するからである。これには、p-n接合、PS、RF進行導波路や終端が含まれる。

InP及びLiNbO<sub>3</sub>ベースの従来の変調器と比べると、SiPho変調器は、挿入損失が高い。自由キャリア吸収が強く、相対的に電気光学効果が低いからである。さらに、広帯域と高い変調効率、光とRF伝搬波の位相整合、RF進行導波路とp-nドーピングと印加電圧に強く依存する端子間のインピーダンス整合が必要である。しかし、従来の分析的等価回路モデルは、キャリア空乏変調器の設計最適化には十分な正確さがない可能性がある。

ネオフォトニクス社の変調器を設計するために、ハイブリッドモデルが開発された。これは画期的なセグメント法を利用するので、設計者は、電磁モデルと回路モデルを組み合わせ、SiPho進行導波路変調器の分散特性を

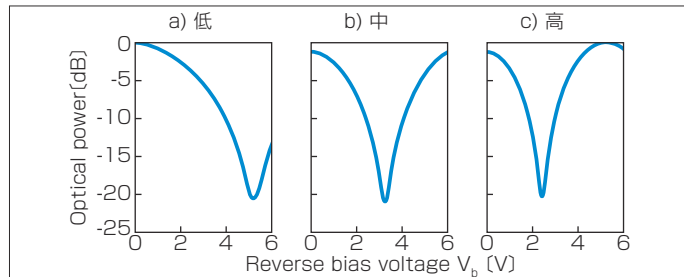


図2 MZM伝達関数は、低ドーピング(a)、中ドーピング(b)、高ドーピング(c)レベルで計測される。

正確に表示できる<sup>(2)</sup>。このモデルは、正確さだけでなく、p-n接合効果も含めて、効率的に波動伝搬をシミュレートできる。電気光帯域と変調効率を最大化するために、ドーピング、光学、RFパラメータの最適化により位相とインピーダンス整合が達成される。

### 変調器設計の最適化

高性能、高速変調器の目標設計は、光波とRF進行波との速度整合、負荷をかけた伝送線路(TXL)と終端インピーダンスとのインピーダンス整合を達成しなければならない。ネオフォトニクス社の変調器設計は、2つの金属トレースで形成されたコプレーナストリップ(CPS)電極を使用する。金属トレースの幅とギャップは、TXLとしてp-n接合に最適化されている。速度整合は、デバイスの電気光学設計と組み合わせたドーピング条件の選択で達成される。

TXLインピーダンスとRF群速度の正帰還シミュレーションには、電磁(EM)モデルとp-n接合回路モデルを組み合わせる(図1)。IまたはQに対す

る各MZMは、2つのp-n PSデバイスで構成され、マッハツェンダ干渉計(MZI)構造を形成する。p-n接合は、500nm幅リブ導波路と90nm厚スラブの横構造となっており、MZM位相チューニングにはヒーターを使う。

変調器設計を最適化するために、ドーピングレベルは多様にし、MZM伝達関数(すなわち、低ドーピング、中ドーピング、高ドーピングで、MZM出力vs. p-nバイアス)を計測した(図2)。予想通り、ドーピングレベルが高くなると所定のバイアス電圧で高い変調効率が達成される。しかし、ドーピングレベルを高くすると、デバイスの伝搬損失の増加でもある(表参照)。例えば、-3Vバイアスで異なるドーピング条件では、低ドーピングから高ドーピングまで $V_{\pi} * L$ (L=位相シフト長)は2倍以上の減となる。一方、伝搬損失は、0.85dB/mmから2.95dB/mmまでの増加となる。

### 位相シフトドーピング

低ドーピングの場合は、コンパクトなブラグブルモジュール向けのコヒーレント変調器には、明らかに実用的ではない。サイズが制約的(長すぎる)か、あるいは $V_{\pi}$ が高すぎるか、いずれかである。

結果的に中ドーピング及び高ドーピング設定が、変調器設計と製造プロセスで探求された(図3)。中ドーピング条件には2mm長と4mm長の位相シフトに対して異なるp-nバイアス電圧で周波数応答が解析された。基本的に高バイアスで短PSは、

表 異なるp-nドーピング条件での位相シフトの $V_{\pi} * L$ と光伝搬損失に関するシミュレーションデータとテストデータの比較。

-3V p-nバイアスで計測された位相シフト

	$V_{\pi} * L$ (V*mm)			伝搬損失 (dB/mm)		
	Simulation	Test	Error	Simulation	Test	Error
Light doping	25	25.5	2.0%	0.76	0.85	-11.8%
Mid doping	18	16	-11.1%	1.55	1.75	-12.9%
High doping	14.5	12	-17.2%	2.75	2.95	-7.3%

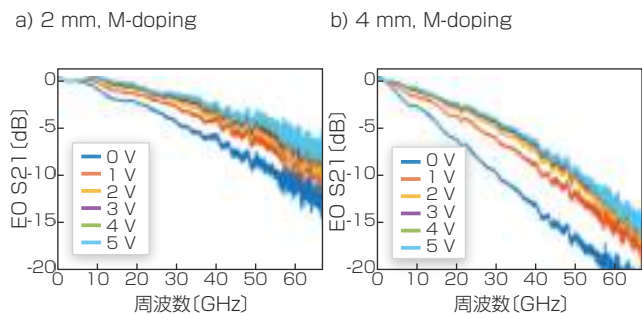


図3 MZM周波数応答(EO S21)は、中ドーピング条件、異なるp-nバイアス、2mm(a)と4mm(b)長位相シフトデバイスで変わる。

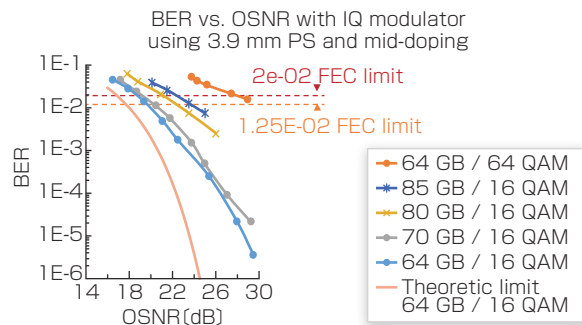


図4 3.9mm長位相シフト(PS)、中ドーピング条件のIQ変調器のビット誤り率(BER)対光信号対雑音比(OSNR)を記録。

電気光学帯域の拡大となり、それに対して低バイアスと長PSでは、変調効率増となる。データの示すところでは、中ドーピングMZMの3dB電気光学帯域は、4mm長と2mm長PSを使用すると、それぞれ22GHz、36GHzとなる。高ドーピングでは帯域が少しだけ下がるが、変調効率は相対的に高い。

これらIQ変調器は、多様な高ボレートアプリケーション向けに設計可能である。ドーピングレベルとPS長にトレードオフがある。高ボレート/高QAM性能を評価するために、ネオフォトニクス社は、3.9mm PS及び中ドーピングを使ってIQ変調器を製造した。チップの推定光損失は、7.3dB、 $V_{\pi}$  4.1ボルト。そのIQ変調器の光損失には、PSと想定されるカプラからの追加損失0.5dBが含まれており、ファイバ結合損失は含まれていない。

### 伝送実験

通信Cバンド波長での高ボレート試験に含まれていたのは、ネオフォトニクス社の出力パワー19dBm、線幅<50kHz、92GSa/sのマイクロ集積可変レーザアセンブリ(uITLA)、米キーサイト・テクノロジー社(Keysight Technology)の約32GHz帯域M8196A任意波形ジェネレータ(AWG)、160GS/s、約63GHz帯域のN4391A光多チャネ

ルアナライザ(OAM)、及びOSNR負荷テストステーションだった。

送信シンボルは、グレイコードQAMシンボルに対応づけられた15ビット擬似乱数データを使用して生成。試験では、0.2ルートレイズコサイン(RRC)ロールオフ係数アルファでナイキストシェイピングを利用し、-2V p-nバイアスでIQ変調器のビット誤り率(BER)対OSNRを計測し、記録した(図4)。

16QAMテストデータは、400ZRで定義された1.25e-2前方誤り訂正(FEC)BERしきい値で、OSNR感度は、19.4dBと23.4dBを示している。これは、それぞれ64Gbaudと85Gbaud、10dB光帯域、約70GHzと90GHzに対応するものである。留意すべきは、64Gbaud/16QAM構成では、OSNR感度の対応する理論限界は、17.6dBである点。64Gbaud/64QAMのテストデータは、2.0e-2 FEC BERしきい値で27.8dB OSNR感度を示しており、これは15% FECオーバーヘッドを想定している。

### 600G達成

これらの実験は、高性能、高速オールSiPhoキャリア空乏変調器が、商用ファウンドリで製造可能であることを示している。これには、設計で位相整合とインピーダンス整合の両方に正確な電気光学モデルを利用してドーピングレベルと進行導波路設計を共に最適化する必要がある。複数のドーピング条件下で変調器特性についての実験を行ったがそのテストデータは、シミュレーションデータとよく合致している結果となった。

-2V p-nバイアスで2mm PSを利用することで、作製されたMZMは、6dB EO帯域54GHzを達成する。中ドーピング条件で、60GHz周波数範囲に高速ロールオフはない。高電気光学帯域、>25dB消光比、85Gbaud/16QAM及び64Gbaud/64QAM動作の全SiIQ変調器は、コンパクト形状で波長当たり400Gb/s及び600Gb/sのデータ伝送サポートは容易である。

### 参考文献

- (1) J. Zhou et al., "Silicon photonics carrier depletion modulators capable of 85Gbd 16QAM and 64Gbd 64QAM," Optical Fiber Conference (OFC) 2019, paper Tu2H.2, San Diego, CA (Mar. 2019).
- (2) J. Zhou et al., "Model and design of silicon photonic carrier-depletion Mach-Zehnder modulators for 400Gb/s and Beyond PAM & QAM Applications," Proc. SPIE, 10923, 1092318 (Feb. 2019).

### 著者紹介

ジャンイン・チョウ(JIANYING ZHOU)は、米ネオフォトニクス社の設計、技術ディレクター。  
e-mail: jianying.zhou@neophotonics.com URL: www.neophotonics.com