

OFC/NFOEC2008 速報 [光デバイス関連]

氏名 中村 滋 (NEC) 佐藤健二 (NEC) 松尾慎治 (NTT)

会議名 : The 2008 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference

開催期間 : 2008 年 2 月 24 日 - 28 日

開催場所 : San Diego Convention Center (San Diego, CA, 米国)

*****要 約*****

光デバイス分野は、光集積化および光電子集積化に向けた動きがますます加速している。近年注目度が高まっているシリコンフォトニクスをはじめ、光インターコネクション、送受信デバイス、光制御デバイス、光信号処理等あらゆる領域で集積化への取り組みが進められている。また電子回路によるデジタル信号処理技術を活用し多値変調、偏光多重、コヒーレント受信等と組み合わせたスペクトル利用効率の高い光伝送実験が盛んに行われていることから、こうしたデジタル信号処理技術への関心も高かった。

1. はじめに

アクセス系における FTTx の急速な展開 (Kogelnik 氏の Plenary Talk からは、FTTH 加入者数は日本が圧倒的に世界をリードしており、また今後 5 年で北米や中国でも急速な伸びが予想されていることが見てとれた) を背景に、ネットワークによって運ばれるトラフィックが Voice から Data へ、さらに Video へという時代を迎え、コア系における容量不足問題が再びクローズアップされつつあるように感じた。こうしたネットワーク容量増強への要請に向け、リンク容量増大、ノード容量増大を図るべく、様々な光ネットワーク技術、光デバイス技術が発表された。学会・展示会を含めた参加者数は 12000 人前後とのことで、昨年の 13000 人よりやや減少したようである。しかし、学会への投稿論文数は 1155 件と昨年より 20% 程度増加したとのことで、2000 年頃の状況に比べると学会的な性格を強めつつある (戻りつつある?) と言えるかもしれない。本報告では光デバイス技術に関して報告する。

光デバイス分野は、集約すれば、光集積化および光電子集積化に向けた動きがますます加速していると言っている。近年注目度が高まっているシリコンフォトニクスをはじめ、光インターコネクション、送受信デバイス、光制御デバイス、光信号処理等あらゆる領域で集積化への取り組みが進められている。また電子回路によるデジタル信号処理技術を活用し多値変調、偏光多重、コヒーレント受信等と組み合わせたスペクトル利用効率の高い光伝送実験が盛んに行われていることから、こうしたデジタル信号処理技術への関心も高かった。

2. シリコンフォトニクス

光回路の小型化・集積化および光電子集積化の観点から、シリコンをプラットフォームとし電子回路分野で培われてきた微細加工技術を活用して光デバイスを実現していくシリコンフォトニクスへの注目が近年高まっている。

初日に開催された Silicon photonics integrated devices (OSuB)と題した Workshop では、10 人の invited talk があり、その後 10 分程度で終了してしまいましたがパネルディスカッションも行われた。全体の印象としては、様々なデバイス機能の実現に加え、偏光の問題、実装の問題に関して活発な取り組みがなされていることがうかがえた。以下、invited talk の概要を順に記すと、1) Alcatel-Lucent からは、MIT、BAE Systems の collaboration の形で進められている DARPA-EPIC-Pj 関連の成果が紹介され、Si 細線導波路とその熱光学効果を利用した狭帯域フィルタ技術の説明、2) NRC からは、Si リブ導波路を用いた Array Waveguide Grating (AWG) や偏光無依存化に向けた技術の紹介、3) MIT からは、偏光無依存化、偏光ダイバシティ、フラットトップ化、ディスページョンレス化、交差の低損失化、最後にはマイクロリングへの光伝搬により生じるメカニカルな力を利用した All-optical feedback control など広範囲な活動内容、4) UCLA からは、ピエゾ材料を Si リブ導波路上部に形成して電圧印加に伴うストレス印加により光学特性をチューニングする技術の紹介があった。その後、5) IBM からは、on-chip optical network への展開まで含めた方向性について、6) Intel からはシリコンフォトニクス実用化に向けた様々な課題（第一がコスト、第二が消費電力）について、それぞれ説明が行われた。さらに、7) Kotura から、結晶成長により形成したテーパ構造を用いた低損失ファイバ接続技術、および、商品化されている電流注入型 Variable Optical Attenuator、8) Ghent 大から、Diffraction grating coupler を用いた低損失ファイバ接続技術、9) ROHM & HAAS から Si-Pak と称するパッケージ LD をシリコンベンチ上に実装する技術、10) Luxtera からは、部材が 1/3、アセンブリが 1/3、テストが 1/3 というコスト内訳を示すと共に Si を用いた部材費削減に加えアセンブリとテストの自動化に注力しているという方針、がそれぞれ説明された。

シリコンをコアとし石英をクラッドとする光導波路では、強い光閉じ込めを生かした急峻な曲げが実現可能であることから、これを高機能フィルタや光スイッチの実現に活用しようというのがシリコンフォトニクスの流れの一つである。マイクロリング光回路が用いられることが多いが、実用化に向けて求められる特性をどう実現していくかを検討する段階が始まりつつある。リングとマッハ・ツェンダを組み合わせることで集積した光回路を用いて 1GHz 以下の帯域幅で強度・位相の制御を行う狭帯域フィルタが Alcatel-Lucent、MIT、BAE Systems から発表されている (OTuF3)。また、マイクロリングを用いた波長可変フィルタにおいて、波長可変動作時のヒットレス化を実現するための構成と手順が MIT から発表されている (OTuF4)。位相を可変制御可能としたマイクロリングは波長選択性のある光スイッチとして用いることもできるが、結合マイクロリングを利用して透過スペクトルをフラットトップ化した結果が IBM から発表されている (OTuF5)。リング間の結合にアポダイゼーションを施すことにより 40Gb/s の光波形も歪ませることなく透過させることができるようになった。なお、この結合マイクロリングの光スイッチでは、光励起によるキャリア注入により屈折率変化を生じさせていたが、PDP セッションではキャリア注入に適した構造としてマイクロディスクを用いる方式が Sandia Natl. Labs. から発表された (PDP14)。直径 6 μ m の Si のマイクロディスクを形成した後、イオン打ち込みにより層構造の pn 接合を形成しており、従来マイクロリングで pn 接合を形成する際にリブ導波路にせざるを得なかったのに比べると、さらに小型でその分 FSR の大きなフィルタ特性が得られるようになった。光スイッチの動作時間も pn 接合へのキャリア注入を用いることで 2.4ns を観測している。

シリコンフォトニクスでは、光源の集積方法が大きな課題であるが、近年、UCSB と Intel のグループが進めているエバネッセントカップリングの方法が注目を集めており、今回の OFC においても何件か招待講演が行われる (OMN1、OMN1) と共に、PDP セッションでは DFB レーザ化が報告された (PDP15)。今

後、発表冒頭に示された silicon photonics vision にあった通り、変調器集積化、多波長集積化を進めていくものと予想される。

3. 光インターコネクション

光インターコネクション関連では、チップ間接続に向けた技術への注目が高まっている。IBM からは Terabus-Pj 関連で何件か招待講演が行われている (NMB1、OThS4) が、今回、11.5mm×15.1mm のシリコンキャリア上に 12.5Gb/s の送受信デバイス 24 チャンネルを集積した結果が報告されている (OMK5)。また、産総研からは、10mm 角に 10Gb/s の送受信デバイス 12 チャンネルを集積した結果が発表され (OMK6)、NEC からは、14mm 角に 10Gb/s の送受信デバイス 4 チャンネルを集積した超小型モジュールが展示会で 4 チャンネル同時動作で動態展示されるなど、集積度・完成度が進んできている。LAN 領域をターゲットとしている Luxtera の optical active cable も、今回、10Gb/s の送受信デバイスを 4 チャンネル集積した QSFP モジュールが発表されている (OMK7)。

4. 発光・受光デバイス

発光デバイス単体のトピックは、実用的なレーザにおいて、アンクルドかつ高速動作がどこまで可能か、であった。NEC エレクトロニクスから、1.3 μ m AlGaInAs BH-DFB レーザにおいて、-45 $^{\circ}$ C~105 $^{\circ}$ C で 10Gb/s 直接変調動作が報告された (OThK2)。全温度範囲において、バイアス電流は 53mA 以下、変調電流 34mA 以下と、低電流で動作している。ポストデッドラインペーパーでは、日立・日本オプネクストから、0-85 $^{\circ}$ C、25.8Gb/s InGaAlAs EAM 集積 DFB レーザ×4 台 (1.29 μ m、1.31 μ m、1.33 μ m、1.35 μ m) の構成で、トータル 100Gb/s で SMF 12km 伝送が報告された (PDP21)。25G×4 構成で、100G イーサーでの使用を想定している。低コスト・アンクル光源の直近の実用用途では、10Gb/s だけでなく 25Gb/s も必要になっていくであろう。日立・日本オプネクストからは他にも、InGaAlAs EA 変調器集積 DFB で、温度調整により narrowband tunable (100GHz 間隔 8 チャンネル) として、1.55 μ m 帯 10Gb/s 80km 伝送 (OThK4)。調整に必要な温度範囲は 15.9 $^{\circ}$ C から 65.4 $^{\circ}$ C、動的消光比 10dB、ペナルティ 2dB 以下が報告された。メトロ用途を狙うとのことであった。

受光デバイスでは、HHI から、Self-Powered Photodectors の報告があり、1×4MMI でパワーをスプリットして、4 台の導波路型 PD で受けるが、信号を実際に受けるのは 1 台で、その電力を残り 3 台の PD からもらう形になっている。メンテフリーが売りで、80Gb/s で使用できる。また、Alcatel-Lucent から、InP ベースモノリシック集積による DQPSK レシーバで、NRZ-DPQSK で 107Gb/s で動作 (PDP23) の報告があった。さらに、シリコンフォトニクスに関連して、Si 導波路上に Ge を成長させた PD on SOI で、1.55 μ m 帯、40Gb/s 動作の報告が Intel (OMK2) からあった。

5. 光変調デバイス・光通信用電子デバイス

高速変調・長距離伝送の流れの中で複数の光変調デバイスを組み合わせて用いることが必須となっている。例えば RZ-DQPSK 信号を生成するためには RZ 信号用の 1 つの MZ 変調器と 2 つの MZ 変調器を用いる DQPSK 変調器を低損失に接続する必要がある。この低損失化、小型化が課題となっているため各社からハイブリッド集積あるいはモノリシック集積に関する報告があった。

最近の advanced modulation format に要求される光デバイスは何かを問いかけるワークショップ(OMF)

では、5件の招待講演があった。What is lowest cost? と投げかけ、チュートリアル的な説明から、最新デバイスの紹介がなされ、光デバイスには、higher degree of integration が求められると結論されていた。確かに今後は小型化の要求が強くなり、集積化の方向に進むと思われるが、何をどこまで集積化すべきかには、各社の腕の見せ所であろう。

NTTからはLiNbO₃で作製した位相変調器部と、低損失なPLC導波路で作製した光結合部を接続集積したハイブリッド型の111 Gbit/s RZ-DQPSK変調素子が報告された(OThC3)。Wavefront matching (WFM)法により作製した1x2カップラーとU字型のPLC回路を用いてコンパクト化(18.3 x 97.0 x 7.8mm)を実現していることが特長である。損失は7.9 dBであった。

一方、InP系半導体を用いたモノリシック集積化も盛んに行われている。InfineraはPDPセッションでDFBレーザと40G DQPSK変調器の10ch集積素子を報告した(PDP18)。これまでInfineraはEA変調器とDFBレーザの集積化を行ってきたが、今後予想されるバックボーンネットワークの40Gb/s、D(Q)PSKの流れを受けての発表である。構造、素子サイズ等は明らかにしていないが、MZ変調器部分の写真を見る限り、特に工夫の見られない電極構造に見受けられ、この電極構造で20Gb/s変調を行うには変調器のバンドギャップは、かなり発振波長に近いと予想され、伝送特性は所望のものとなっていない可能性がある。Infineraからは、他に、DFBレーザ+10G or 40Gb/s EA変調器+SOAを10アレイとし、AWGと集積化した結果(OWE1)が発表されている。80kmスパンではEDFAを用いなくてもすむよう、SOAまで集積化したチップでの低コストソリューションと言っている。受信側チップにもSOAプリアンプがある。各チャンネルそれぞれ10Gb/sおよび40Gb/sで動作し、SMF 86kmをEDFA無しで伝送。ただし、パターン効果等の問題は存在すると思われ、入力パワーは比較的小さなところで使用しているようであった。

光変調デバイスは、WDM通信システムにおいてどの波長でも使えるという要求に加えて、低損失化や小型化も視野に入れなければならない。半導体光変調デバイスはLN変調器と比較して小型・低電圧ドライブというメリットがある反面、挿入損失が大きいことがネックとなっている。そこで、半導体変調器の挿入損やファイバ結合損を補償するために、SOAを集積させてトータルでLoss-lessを実現しようという試みがなされている。Alcatel-Thales III-V Labからは、AlGaInAsのEA変調器を反射型とし、選択成長によってSOAを集積させたLoss-lessな変調器(OThC2)を以前から発表しており、今回は、リッジ構造だったものを高抵抗埋め込みへと変更し、50nmに渡り挿入利得10dBが得られ、動特性としては、60°Cで20nmに渡り10km伝送(ペナルティ2dB以上)を達成した。また、NTTからは、InP系n-p-i-nマッハツェンダー型変調器(MZM)に、SOAを集積させて、ファイバtoファイバでLoss-lessを実現した。SOA部はリッジ構造、MZM部はハイメサ構造になっている。フルCバンドで、10Gb/s NRZ SMF 100km伝送、ペナルティ1.5dB(OThC5)。半導体光変調デバイスでは、SOA集積型変調器は、今後も必須の構造となっていくであろう。また、光源と変調器の集積は、トータルサイズ、トータル損失の削減に有効で、UCSB・JDSUからは、SGDBR型波長可変レーザにMZMを集積させた構造を以前から発表している。今回は、10Gb/s Duobinaryで変調させて、1538-1564nmで250km伝送(ペナルティ3dB)を報告した(OThC4)。同一構造で、NRZ変調した場合では100km程度だったという。

さらにPDPセッションでは、LucentのDoerrから2つの変調器に関連する報告が行われた。まず、PDP19では、Dual-Polarization On-Off-Keying変調器が報告された。これは同一波長で異なる偏波に異なる信号を乗せることにより周波数利用効率を上げることを目的としているPolarization-division multiplexing(PDM)用の変調器である。素子は2つのPBSと2つの偏波無依存型EA変調器から構成される。入射光は

45° 偏向で素子に入射すると PBS で分離され異なるデータ信号で変調される EA 変調器に入射する。それぞれの EA 変調器は 115 μm 長で、容量を低減するためにパッド下の InP をエッチングして BCB で埋めることにより 40 Gb/s 動作を実現している。受信側で、偏波制御を行い片側の信号のみ取り出さなければならないという問題はあるものの 1-2dB のパワーペナルティで二つの信号を送信可能である。次に PDP20 では 43 Gb/s の 16QAM 変調器を報告した。これまでは LiNbO₃ を用いたもので報告があったが今回 InP でモノリシック集積したというものである。2 つのスターカップラーの間に 5 本の導波路(4 つの導波路に EA 変調器)から構成される EA 変調器を位相変調器として用いているため損失とチャープが問題となるとの事であった。このように InP 系光変調器はレーザ、SOA との集積、光フィルタとの集積により LiNbO₃ との差異化が図られている。

Si フォトニクスに関連する光変調器としてはこれまでキャリア注入によるプラズマ効果を用いたものが主流であり、このため応答速度に制限があった。この問題を解決するために UCSB の Bowers 教授のグループでは Si に AlGaInAs 光変調器の直接貼り付けを行い、エバネッセントカップリングにより光変調を実現した(OThC1)。現状では素子の最適化を行っていないため消光比は 10 dB、動作速度は 16 Gb/s に制限されているものの、進行波型電極を用い長尺化することにより高性能化可能であると述べており、シリコンエバネッセントレーザも含めた送信機としての集積化も含め今後の動向が注目される。

電子回路によるデジタル信号処理技術を活用し多値変調、偏光多重、コヒーレント受信等と組み合わせたスペクトル利用効率の高い光伝送実験が盛んに行われている。こうした電子回路によるデジタル信号処理技術は、光システム分野にとっては次のビジネスに直結する領域となっており、その先を見すえた光デバイス研究開発を進める上でもどこまでが電子回路で実現されてどこまでは光領域が期待されるのかを直視していかないといけない。これらの技術に関する招待講演 (OTuO3、OTuE1、NWC3 など) への関心は高かったように思う。線形伝送における補償・復調に対しては大きな威力を発揮してきており、XPM、FWM 等の非線形光学効果の影響への取り組みもみられるようになってきている。例えば、CMOS により作成した 8-state MLSE チップと InP MZM 送信器と組み合わせた 10.7Gb/s 伝送特性が報告された(OTuO2)。LN MZM 送信/オーバーサンプル受信の場合に匹敵する CD/PMD 耐性を確認している。OTuO3 ではすでに提案している Joint symbol MLSE (JS-MLSE) を DQPSK に拡張し、ハードデシジョン (HDR) と 3 種の MLSE 法の比較結果を報告した。

6. 光制御・光信号処理デバイス

ネットワークノードにおける消費電力の問題は今後最重要になっていくと多くの人が考えるようになってきているが、Tucker 氏による Tutorial: Optical Packet-Switched WDM Networks - A Cost and Energy Perspective (OMG1) では、今後アクセス系のビットレートが高くなるにつれ、コア系での消費電力増大がより深刻になるという試算が示された。こうした背景からノードにおける光技術の取り込み方に関しても検討を進める必要が高まっている。

実システムへの配備が進んできた ROADM をベースにメッシュ光ネットワークへ拡張していくための検討が盛んであるが (OWC: Wavelength Selective Switching、OThA: Optical Switching II 等)、この領域は、デバイス自体というよりも機能集積・拡張化の手法に視点が置かれている。また、光スイッチに関しては、適用形態次第によっては高速切替の必要性も高まってくるが、これに関連して偏波無依存 SOA を用いた 8:1 ゲート型スイッチが報告された(OWE2)。高ゲインかつ消光比 65 dB を得ており他のスイッチ構成では実現

できない良好な特性である。その一方、こうした光パススイッチングの先に位置付けられる光信号処理の分野は、デバイス自体の研究が中心であるが、関連する Workshop は、The Roles of Electronics and Photonics in Signal Processing (OSuE)、All-optical signal processing and conditioning (OMD)、Can Optical Packet Switching Solve the Bottleneck Problem in Electronic Routers? (OME)、と 3 件開催され、システム上のメリット明確化に向けた努力も続けられている。光信号処理用の非線形光学デバイスとしては、従来からの半導体光アンプ (SOA)、高非線形ファイバ、分極反転 LiNbO_3 導波路に加え、最近ではシリコン細線導波路や、オーストラリア勢からのカルコゲナイドガラス導波路も目立つ。SOA を利用する方式では、シリカ導波路上へのハイブリッド集積光回路で CIP がすっかり有名になっており、今回も招待講演 (OWI3) と共にヨーロッパの研究機関からの発表も何件か行われている (OTuL2、OWK5)。展示会でも、サイズのやや大きいとは感じたが、シリカ導波路「マザーボード」上に SOA をマルチチップ集積し得るようになってきているのを見てとれた。ファイバを利用する方式が件数としては多い。光結合などの点で実験しやすいという側面もあろう。しかし、ファイバを利用する場合、そのサイズからみて波長ごとの光信号処理ではメリットを出しにくいと思われる。ただ、特性からみて多波長チャンネル信号再生 (OWK3) の可能性はあり得る。シリコンやカルコゲナイドガラスを含め非線形光学媒質に対する性能指数比較もあらためて行われているが、シリコンの光 Kerr 効果を $1.55\mu\text{m}$ 帯で利用する上では二光子吸収の問題があることが指摘されている。その一方でシリコンの微細加工性はやはり魅力であり、Karlsruhe 大他のグループからは、高非線形媒質を高光閉じ込めの下で利用する手法としてシリコンスロット導波路に高非線形有機材料を埋め込んだものが発表されている (PDP25)。

7. おわりに

40Gb/s 化 100Gb/s 化によるリンク容量増大、光制御技術取り込みによるノード容量増大が図られる中、光デバイス分野は、光集積化および光電子集積化に向けた動きが加速している。近年注目度が高まっているシリコンフォトニクスをはじめ、光インターコネクション、送受信デバイス、光制御デバイス、光信号処理等あらゆる領域で集積化への取り組みが進められている。また電子回路によるデジタル信号処理技術を活用し多値変調、偏光多重、コヒーレント受信等と組み合わせたスペクトル利用効率の高い光伝送実験が盛んに行われていることから、こうしたデジタル信号処理技術への関心も高かった。今後、特に半導体ベースの光デバイスに対しては基本的に集積化への期待はますます高まっていくことになるだろう。これとともに、単に小型化・低コスト化手段としての集積化だけでなく、集積化により初めて可能になる新機能の実現にも期待したい。また、電子回路技術の進展をふまえた上での光デバイス技術開発もますます重要となってこよう。