

ECOC2009 速報[光材料・デバイス]

鄭 錫煥 (富士通研究所)

会議名 : The 35th International Conference on Optical Communication 2009 (ECOC 2009)

開催期間 : 2009年9月20日-24日

開催場所 : Austria Center Vienna (Vienna, オーストリア)

*****要 約*****
光デバイス関連の発表は、InP化合物半導体系デバイスに限らず、Si系材料、LiNbO₃系材料および石英系材料を用いた光デバイスの発表も数多く行われた。多値位相変復調デバイスに関しては、Baud rateを増大せずに大容量化する手段として更なる多値化を図る試みがなされていた。InP系デバイスに関しては、更なる小型化および高効率化に向け、集積度の向上が報告された。40GbE/100GbEに関しては、各社の完成度が高まり、実使用条件での伝送特性が報告された。シリコンフォトニクスに関しては、着実に技術が進歩しており、集積化に向けた取り組みも進められていた。

1. はじめに

今回の ECOC は、レギュラーペーパーは投稿件数 712 件、採択内訳は口頭発表 228 件、ポスター145 件、採択率は 52%、ポストデッドラインペーパーは投稿件数 67 件、採択数 22 件、採択率 33%で、これらに加えて招待講演 42 件、チュートリアル講演 9 件の発表が行われた。全体発表件数 395 件のうち、日本からの発表件数は 120 件を超え、全体件数の 3 割以上を占めており、本会議への日本の貢献度は高かった。

全体の動向としては、ネットワークトラフィックの更なる増大に対応するために、ネットワークの大容量化およびスペクトル利用効率増大の議論が活発になされ、上記ネットワーク向け多値位相変復調光デバイスも数多く報告された。InP 系集積デバイスについては、集積度が一層高まった印象を受けた。40GbE/100GbE 向けデバイスに関しては、光波長や伝送距離などの実使用条件での伝送特性が報告され、各社における完成度の高さが伺えた。レシーバ関連デバイスに関しては、高速化に主眼をおいたものが多かった。シリコンフォトニクスに関しては、大きなブレークスルーはなかったものの、着実に技術が進んでおり、Si 細線導波路の高いパワー密度に基づく非線形作用を用いるデバイスの発表が多かったほか、波長可変レーザや PD の報告も行われた。以下、筆者が主として聴講した光デバイスを中心に技術概要を報告する。

2. 発光デバイス

主な発光デバイスとしては、40GbE/100GbE 用光源、波長可変レーザ、半導体光増幅器(SOA)関連デバイス、量子ドット(QD)関連デバイス、InP 系集積デバイスが報告されていた。40GbE/100GbE 向け光源分野においては、今年の OFC2009 に引き続き、日本の研究機関が高いアクティビティを見せていた。三菱から 1.3 μm 帯 25Gb/43Gb 電界吸収型変調器集積 DFB レーザ(EML)の報告があった(8.1.3)。EA 変調器の量子井戸(QW: quantum well)構造を工夫し、高出力時の変調帯域を増大し、25Gb/43Gb 40°C動作で素子端出力 ~6dBm および 10 km の良好な伝送特性が報告された。NTT から 1.3 μm 帯 25Gb EML の報告があった(8.6.4)。

AlGaInAs系EA変調器の構造を最適化し、25Gbit/s 40°C動作で素子端出力~2.6dBmおよび40kmの良好な伝送特性が報告された。HHIから1.3μm帯28Gb/40Gb直接変調レーザ(DML)の報告があった(8.1.4)。今回、100GbE用に1.3μm帯で初めて試作した結果を報告し、パッケージングしたものも展示していた。日立から1.3μm帯un-cooled 25Gb DMLの報告があった(8.1.5)。AlGaInAs系DFBレーザの共振器長を最適化することにより、95°C動作でCW光出力>15mW、変調帯域25Gbを達成している。

波長可変レーザ分野では、CML(chirp managed laser)技術およびアレー導波路回折格子(AWG)を用いるデバイスが報告された。Finisarから波長可変MGY(modulated grating Y-branch)を用いたCMLの報告があった(PD1.5)。MGY CMLの構造を改良することにより、FM効率を増強した。また、CML技術を適用した利得領域での直接変調により、Cバンド帯域内で10Gb 200kmの伝送特性が報告された。

InP系集積アクティブデバイス分野においては、Infineraから高密度InPモノリシック集積デバイスの報告があった(1.7.2)。今年のおFC2009でDP(dual polarization) DQPSK(differential quadrature phase shift keying)×10λのInP系集積トランシーバが報告されていたが、今回、これに対応するDP DQPSK×10λのレシーバが報告された。レシーバは石英系PLC技術を用いたものであった。その他、石英系PLCマイクロリング共振器およびVOA(variable optical attenuator)を集積化したROADM(reconfigurable optical add-drop multiplexer)の報告もあった。OclaroからInP系モノリシック集積トランシーバの報告があった(1.7.4)。InP系DQPSK変調器が紹介され、10Gb MZ(Mach-Zehnder)変調器をモノリシック集積化した波長可変レーザにおいて、 $V_{\pi}=3.2$ Vおよび出力パワー $P_{out}=+3$ dBmが報告された。

SOA関連デバイス分野においては、集積型ゲートスイッチ、PON(passive optical network)用途、制御方式など多岐に渡り、報告されていた。Cambridge大からSOAゲートを用いたスイッチの報告が2件あった。InP上QD-SOAとパッシブ1:8カプラによる8:1ゲートスイッチを形成し、無損失動作およびチャネル切り替え時間10ns、ペナルティフリー動作が報告された(6.2.3)。尚、Post Deadline Paperでは、4:4スイッチを3段構成にした16:16スイッチが報告された(PD1.7)。SOA192個、スプリッタ288個などを高密度にモノリシック集積しており、無損失動作、切り替え時間<10ns、パワーペナルティ2dBであった。CIPから反射型SOA集積EA変調器を用いたWDM(wavelength division multiplexing) PON ONU用の増幅・変調器が報告された(8.6.3)。SOAとEA変調器をバットジョイント集積して変調帯域の拡大を図っている。C-band全域で10Gb 80km伝送時のパワーペナルティ<1dBが得られている。富士通研からヒータ搭載SOAによる高出力ALC(automatic level control)動作の報告があった(6.2.5)。ヒータ搭載SOAの素子温度を介した利得制御により、利得制御時の飽和光出力を増大し、高入力パワー且つ低利得時のパターン効果発現を抑制することができ、高出力ALC動作(+8.0dBm)において広い入力パワーダイナミックレンジ(>17 dB)を実現した。

量子ドット関連デバイス分野においては、主に、高速性を生かした光信号処理応用に関する報告が多かった。阪大・富士通研からQD-SOAによる160Gb RZ信号波長変換の報告があった(PD1.4)。1.55μmコラナQD-SOAと波長フィルタデチューニング技術を組み合わせ、10ps以下のXGM(cross gain modulation)応答時間を実現し、160Gb RZ信号光をXGM効果により、波長変換動作が確認された。HHIおよびベルリン工大からGaAs基板上1.3μm QD-SOAにおける80Gb RZ信号線形増幅の報告があった(6.2.1)。利得回復時間はSOAバイアス電流増大により高速化し、500mAの電流注入時の利得回復時間は16ps程度であった。80Gb RZ信号の+17dBm出力、パターン効果フリー増幅動作が確認された。

3. 変調・復調デバイス

主な変調・復調デバイスとしては、InP系MZ(Mach-Zehnder)変調器、多値位相変調器関連、多値位相復調器関連などが報告された。最近の潮流である多値位相変復調関連の発表が多かった。

NTTから80Gb InP系MZモジュールの報告があった(5.2.2)。高速変調動作に向け、RF損失を低減するために、MZ変調器の電極線路としてLCP (liquid crystal polymer)を用いることにより、プッシュプル駆動電圧2.4V_{pp}およびRF消光比9dBが得られた。また、80Gb NRZ信号において、エラーフリー動作が確認された。

NTTから64QAM (quadrature amplitude modulation)多値位相変調器の報告があった(2.2.1)。非対称分岐カプラを含む導波路領域を石英系PLC技術により形成し、高速に駆動する位相変調器領域はLiNbO₃系材料により形成し、ハイブリッド集積化している。60Gbit/s (=10G×6bit)で動作し、挿入損は6.4dB程度にとどまっている。この発表に関連し、ポストデッドラインペーパーでは、Baud rateを20Gbにし、PDM (polarization division multiplexing)技術を用いることにより、240Gbit/s (=20Gb×12bit)での動作も報告された(PD2.2)。富士通研からLiNbO₃ PDM RZ-DQPSK変調器が報告された(2.2.2)。変調器を小型化するために、Uターン構造を採用し、導波路交差領域における過剰損<0.2dB、クロストーク<-24dBおよびPDL (polarization dependent loss)<0.3dBを得ている。50GbのDQPSK変調動作が確認された。

富士通研からQPSK多値位相信号復調器(90度ハイブリッド)の報告があった(2.2.3)。90度ハイブリッド領域内で導波路交差が不要であり、従来技術に基づく90度ハイブリッドより動作帯域が増大可能なデバイスとして提案され、94nmにおよび波長帯域内で相対位相ズレ<±5度が実験的に確認された。NTTからDP-QPSK多値位相信号復調器の報告があった(2.2.4)。石英系PLC技術を用い、PBS (polarization beam splitter)および90度ハイブリッドを集積化している。PBSの消光比>25dBおよびCバンド帯域での相対位相ズレ<±3度が実験的に確認された。HHIおよびu^{2t}からInP系コヒーレントレーザの報告があった(P3.20)。50Gb QPSK変調信号において、480km伝送後もOSNR (optical signal to noise ratio)>30dBが得られ、50Gb NRZ QPSK信号における受信感度は43Gb NRZ DPSK信号の場合と同程度と報告された。

4. 受光デバイス

主な受光デバイスとしては、主に、高速化に主眼をおいた発表が多かった。

日立から100GbE向けCMOSレーザの報告があった(9.2.1)。レーザはPDおよびTIA (trans-impedance amplifier)で構成され、TIAは1段のPre amplifierおよび3段のPost amplifierで構成されている。TIAの最適化により、利得平坦化が向上し、25Gb動作時の消費電力は2.8mW/Gb/sであった。Alcatel-Thales研から10Gb面型Avalanche PDの報告があった(9.2.2)。暗電流生成を最低限に抑えるために、p型ドーパントとしてCarbonを用い、増倍暗電流(multiplied dark current)0.19nA、受信感度0.9A/Wおよび帯域150GHz (gain×bandwidth)が得られた。Discovery Semiconductor Inc.からRFリンク向け高出力面型PDが報告された(9.2.4)。PDA (partially depleted absorber)領域を設けることにより、応答の直線性を表すパラメータであるOIP3 (Two-tone 3rd order output intercept point)48.9dBmが得られた。上記線形動作はDC光電流が40mAまで増大しても保持された。

Alcatel-Thales研から導波路型UTC (uni-traveling carrier) PDの報告があった(9.2.5)。受信感度0.55A/W、3dB帯域>50GHzおよび出力光電流10mAと報告された。HHIおよびAlcatel-Thales研から107Gb向けレーザモジュールの報告があった(9.2.6)。モジュールは導波路型pin-PDおよび判別回路(decision flip-flop)で構成され、107Gb RZ OOK信号に対するEye Patternの開口も良好であった。u^{2t}、HHIおよびKyliaから86Gb

NRZ DQPSK向けレーザモジュールの報告があった(9.2.7)。モジュールはバルク光学に基づくDLI (delayed interferometer)、導波路型PD、limiting アンプおよび差動アンプで構成され、受信に伴うDLIの位相ズレに対するONSRペナルティにおいて、1dBペナルティトレランスはDPSK信号の場合 $<\pm 20$ 度およびDQPSK信号の場合 $<\pm 5$ 度であることが報告された。HHIから 107Gb PD OEICレーザの報告があった(PD1.8)。従来のOEICレーザで必要であったBias-Tが除去可能な新しい回路構造を提案し、Bias-Tの除去に対する損失低減(~ 2 dB)および 3dB帯域 103GHzが得られた。

5. 導波路・光制御デバイス

III-V族化合物半導体、石英系およびLiNbO₃系関連で様々な光制御デバイスの発表があった。特に、InP系半導体関連では大規模集積化が進められていた。

東大および Eindhoven 工大からモノリシック集積型 1×16ch スイッチの報告があった(1.2.1)。2つのスターカプラの間に複数のアレー導波路が位置し、アレー導波路での位相調整を行うことにより、16ch 全体において、スイッチング動作特性が得られ、切り替え速度は ~ 6 ns であった。出力光の消光比は 11.3～25dB であり、平均値は 18.6dB と報告された。産総研から InGaAs/AlAsSb 結合量子井戸のサブバンド間遷移を用いる 160Gb 全光波長変換の報告があった(1.2.2)。MZI (Mach-Zehnder interferometer)による XPM (cross phase modulation)効果を用いることにより、160Gb に及ぶ超高速動作が実現し、スイッチングエネルギーはサブ pJ のオーダーであった。産総研からサブバンド間遷移を用いる多重量井戸光ゲートを用いる NRZ-RZ 変換動作の報告もあった(1.2.3)。東工大から光デジタル・アナログ変換素子の報告があった(1.2.4)。1:3 光スプリッタと 3:1 光結合器の間に 2 種類の遅延導波路を設け、3 ビット光信号の DA (digital-to-analog) 変換を行う。40Gb 変調信号に対し、DA 変換動作が実験的に確認された。東大から MZI 構造を有する双安定レーザを用いた全光フリップフロップ動作の報告があった(1.2.5)。MZI 構造を導入することにより、スイッチングエネルギーは 1 桁低減し、しきい電流は 25%ほど低減し、スイッチング応答における立下り時間は 68ps まで高速化した。

Eindhoven工大およびGhent大から、Si基板上のInP細線導波路形成に関する報告があった(4.2.4)。Si基板上のBCB高分子膜上に形成したInP細線導波路において、伝搬損失は 15dB/cmと計測された。Si細線導波路の伝搬損失(~ 1.5 dB/cm)よりは大きいものの、更なる損失低減が可能であり、今後の展開に注目していきたい。NTTから $\chi^{(2)}$ カスケード過程に基づくQPM (quasi phase matching) LiNbO₃ 波長変換デバイスの報告があった(5.2.5)。ポンプ光($\lambda \sim 0.78 \mu\text{m}$)および信号光($\lambda \sim 1.56 \mu\text{m}$)のマルチプレクサを集積化した構造であり、100GHzチャンネル間隔 8 波信号および 500GHzチャンネル間隔 13 波信号における一括波長変換動作が報告された。

NTT から石英系 PLC 技術による AWG の帯域平坦化の報告があった(PD1.6)。AWG の 1 段目のスラブ領域前にタンデム型 MZI を設け、MZI および AWG の FSR を等しくすることにより、過剰損を伴わない平坦化スペクトル特性を実現している。チップサイズ 25mm×36mm、Crosstalk <-33 dB および帯域内群遅延 $<\pm 1$ ps が得られた。NTT から石英系 PLC 技術による ONSR モニターデバイスの報告があった(7.2.5)。2 段の MZI が 3dB カプラを経由して直列に接続されており、全段の MZI は PBS として機能し、後段の MZI は ONSR モニターとして機能する。ONSR 10~25dB の信号において、誤差 <0.6 dB という結果が報告された。

6. シリコンフォトニクス

シリコンフォトニクス分野に関しては、InP 系材料や石英系材料のような異種材料との集積化が一層進んでいる。これらに関連したシンポジウムや招待講演は概ね盛況であった。尚、光スイッチ、OSNR モニター、波長変換デバイス、分散補償デバイスなどの光制御デバイスや波長可変レーザや光受信器などの報告もあった。

Karlsruhe工大、Ghent大、Lehigh大およびETH Zurichから高速化に向けたSilicon-Organic-Hybridの報告があった(5.2.4)。Si材料の利点を生かしたスロット導波路を形成し、高速な3次非線形感受率($\chi^{(3)}$)・2次電気光学係数($\chi^{(2)}$)を有する有機材料を埋め込むことにより、120Gb to 10Gb DEMUX動作が報告された。

NTT から Si 細線導波路における非線形作用および Quantum Entanglement 生成に関する報告があった(7.2.3)。28mm 長の Si 細線導波路において、FWM (four wave mixing)効果に基づき、100GHz 間隔 4 波長信号の一括全光波長変換動作が報告された。変換効率は-10dB であった。

NECからSi細線MRRにより発振モード制御を行う波長可変レーザが報告された(7.2.1)。発振モード制御のために用いるMRRを形成するために、Si細線技術を用いることにより、既存のSiO₂/SiON技術に基づくMRRより面積が1/25まで小型化した。発振モード制御は26mW程度の消費電力のみで38nm程度の波長可変発振動作(SMSR>30dB)を実現した。既存のSiO₂/SiON技術に比べ、消費電力は1/8に低減したと報告された。

Sydney大およびAndrew大から2次元フォトニック結晶線欠陥導波路を用いたONSRモニターの報告があった(7.2.2)。2次元フォトニック結晶導波路での第3高調波発生(THG: third harmonic generation)のパワーを計測することにより、40Gb RZ信号光信号におけるONSRの観測に成功した。従来技術であるCFWM (cascaded four wave mixing)効果に比べ、THG効率は出力ダイナミックレンジが格段に広いと報告された。Stuttgart大から25Gb向け面型SiGe pin-PDの報告があった(9.2.3)。PRBS (2⁷-1) 25Gb変調信号に対し、BER <10⁻¹²が得られ、SiGe系PDとしては最高速と報告された。

7. おわりに

投稿件数は去年に比べ、多少減っていたものの、展示を含めて全体的に盛況であった。モノリシック集積度の向上およびハイブリッド集積技術の向上は今後、本格的に進む予想される。多値位相変調・デジタルコヒーレント技術による大幅な伝送容量増大につれ、変復調デバイスの進展に注目していきたい。Si 関連デバイスの性能向上が報告された一方で、既存の InP 系デバイスに対する優位性がはっきりしていないことには変わりはないと思われ、今後のブレークスルーする技術にも注目したい。最後に、本報告書においては光デバイスの全分野をカバーしきれていないことについてお詫び申し上げたい。来年の ECOC 2010 は 9 月 19 日~23 日にかけてイタリアトリノで開催予定であり、再来年の ECOC 2011 は 9 月 18 日~22 日にかけてスイス連邦ジュネーヴで開催予定である。