

GFP2007 ショート速報

山田 浩治 (NTT マイクロシステムインテグレーション研究所)

会議名 : The 4th International Conference on Group IV Photonics

開催期間 : 2007 年 9 月 19 日 - 21 日

開催場所 : 都ホテル東京 (Tokyo, 日本)

*****要 約*****
 本会議は周期律表第 IV 族元素(特にシリコン)を主材料とするフォトニクスを専門に扱う毎年開催の国際会議であり、今回第4回が東京で開催された。総発表件数は 105 件で、日米欧の寄与はほぼ等しい。近年話題のシリコンフォトニクスについて、基礎材料研究からシステム応用まで 13 の口頭セッションおよびポスターセッションが設定され、偏波ダイバーシティシステム、データコム用集積化トランシーバー、シリコン変調器や Ge デテクタの 40Gbps 動作など、当該分野のこの 1 年間における著しい進歩が報告された。

1. はじめに

この会議は周期律表第 IV 族元素 (特にシリコン) を主材料とするフォトニクスを専門に扱う IEEE/LEOS 主催の国際会議である。2004 年の香港に始まり、アントワープ、オタワと、亜・欧・米の 3 極を一巡して、今回第 4 回が東京で開催された。総発表件数は 105 件、うち口頭発表 50 件(招待講演 20 件を含む)であった。地域別発表件数内訳はアジア : 49 (うち日本 : 30)、北米 : 26、EU(スイスを含む) : 30 であった。日米欧の発表件数はほぼ同数であり、国内開催にもかかわらず、国際度の高い会議となったようだ。

この会議は、総参加者 146 人の比較的小さな会議ではあるが、近年話題のシリコンフォトニクスに関する中心的な会議であり、当該技術の進展と最新情報を網羅的に得ることができる。IV 族元素を主材料にするとは言え、基礎的材料研究からシステム応用まで、フォトニクスに関わる全分野を網羅する必要があるため、13 の口頭セッションと 1 つのポスターセッションが設定された。連日、朝 9 時から夜 7 時~8 時頃までのハードなプログラム構成であったが、この 1 年間における当該分野の著しい進歩に刺激され、最終セッションまで活発な議論が続いた。本報では、本会議の 13 セッションを、技術的内容を考慮した 7 グループに整理し、各グループにおいて印象に残った発表などについて報告する。

2. 発表内容概要

2. 1. プレナリー : 光インターコネクション

プレナリーでは 2 つの講演が行われたが、いずれもシリコンフォトニクスの最大の応用先と想定される光インターコネクションに関するものであった。まず MIRAI-Selete/NEC の大橋氏より、日本の代表的なシリコンフォトニクスプロジェクトである MIRAI-NSI チップ上光配線プロジェクトが紹介された。将来の高性能プロセッサ用チップ上光配線の実現にむけたデバイス性能などが検討され、さらに当該プロジェクトにおけるデバイス開発状況が紹介された。また、Sun Microsystems 社の A.V. Krishnamoorthy 氏からは、システム側からの見解が示されたが、高性能プロセッサへの要求性能と現実の電子回路技術とのギャップが

年々拡大しつつあり、ノード間やボード間には Tbps 級高速データ伝送を可能とする光インターコネクション技術が必要であろうとの見解であった。

光インターコネクション実現への最大の課題がビットあたりの消費電力の劇的な低減であることは、Selete、Sun の両者に共通しており、Krishnamoorthy 氏によれば、1mW/Gbps が条件であるとのこと。またコストも重要な課題で、\$1/Gbps が条件であるらしい。光インターコネクションにおけるこれらの厳しい制約条件は、1990 年代の日本において既にある程度見出されていたようで、この日本の先見性、先導性について東北大の小柳教授による特別講演が行われた。我々はそこでの経験を大いに活用すべきであろう。

2. 2. パッシブデバイス： 導波路デバイス・MEMS

導波路デバイスのセッションの発表は 8 件のうち 3 件を R. Baets 教授傘下の Ghent 大学グループが占め、存在感を示した。特に注目すべきは、彼ら独自の 2 次元グレーティングカップラーを用いた偏波ダイバーシティーシステムである。AWG 波長フィルターなどにこのダイバーシティーシステムを装備し、シリコン導波路デバイスの大きな課題である偏波面依存性の排除に成功していた。その他にも様々な波長フィルター類を実現していたが、いずれも IMEC の量産性に富む 193nm-ArF エキシマレーザーステップ露光で製作したものである。また、彼らは IMEC-CMOS ラインをシリコンフォトニクス用のファウンドリーとして利用する体制を構築していた。1 試作 5000 ユーロ程度の価格設定はシリコンフォトニクスへの参入障壁を大幅に低減させると思われるが、そのようなシステムを持たない日本にとっては逆に脅威である。Ghent 大以外では NTT の福田氏がシリコン細線型偏波スプリッターとローテータによる偏波ダイバーシティーシステムを実現し、リング共振器フィルターに適用していたが、挿入損失が Ghent 大よりも優れており、高評価を得ていたようだ。

Optical-MEMS および 3 次元構造のセッションでは Neuchatel 大の N.F. de Rooij 教授が小型可動ミラーベースの Optical-MEMS を、台湾清華大の M.C. Lee 教授(UC Berkeley の Wu 教授の代理)がシリコン導波路とディスク共振器との可変結合系を利用した分散補償システムなどを報告していた。現在のシリコンフォトニクスは MEMS に疎遠であるが、近年の MEMS・電子回路融合の著しい進展を鑑みると、Optical-MEMS による光電集積もシリコンフォトニクスの一形態なのかもしれない。

2. 3. 変調器およびスイッチ

シリコン製 MZI 型変調器については、インテル、Luxtera、仏 CNRS から 10Gbps 超の高速動作が報告されたが、いずれも導波路コア内に p-n 接合を構築し、コプレーナ伝送路電極を通じた逆バイアス印加により空乏層サイズを変化させ、屈折率変調を得ている。特にインテルの A. Liu 氏からは 40Gbps(30GHz)の驚異的な高速動作が報告された。フォトニクス技術というよりは電子デバイス技術の勝利と言える。これらのデバイスでは高速動作と引き換えに、5dB 前後のキャリアプラズマ損失と数百 mW の消費電力を要するが、これと対照的なのが NTT から報告された低損失 p-i-n キャリア制御構造付導波路であろう。変調速度は ns 前後であるが、低損失、低消費電力なので、VOA や非線形デバイス用媒体に適しているとのこと。

また、SiGe を用いた変調デバイスとしては、Sanford 大の J.E. Roth 氏から Ge/SiGe-MQW における Stark 効果を用いた変調デバイスが報告された。現状では数 GHz の動作速度であるが、キャリアの移動を伴わないため低消費電力が期待される。

2. 4. アクティブデバイス： 発光材料・発光デバイス構造およびデテクタ

発光材料については、まず独 Forschungszentrum Juelich の G. Mussler 氏から SiGe 量子井戸カスケード構造による波長 $6\mu\text{m}$ の中赤外光源について報告された。現状では 14K の低温での発光に留まっているが、材料系が面白く、今後の進展が興味深い。鉄シリサイド、シリコンナノ構造などについては一部 EL が観測されつつあるも、量子効率実用レベルには至っておらず、シリコン系光源の難しさを再認識した。

このようなシリコン系発光材料の特性を補うべく、様々なデバイス構造が報告されたが、最も注目すべきは、日立製作所の斎藤氏による極薄シリコン p-n 接合による EL に関する報告であろう。特殊な材料を用いずに、シリコンを CMOS プロセスで極微細加工することにより発光効率を飛躍的に向上した事実は、シリコン系発光デバイス開発における重要な知見になるであろう。また極微小共振器によるパーセル効果と思われる発光増強の報告が、東大、京大をはじめ多数の研究機関から報告され、これらもシリコン系発光デバイス開発における重要な知見となるであろう。

デテクタとしては、CMOS コンパチプロセスで作製できる Ge デテクタがインテル、Luxtera、MIT、仏 CNRS、シンガポール IME などから報告されたが、いずれもほぼ同じ手法の Ge 選択成長に基づいており、その製作技術は確立されつつある。注目すべきはインテルの T. Yin 氏により発表された導波路結合型デテクタであるが、その性能は感度 $\sim 1\text{A/W}$ 、周波数帯域 $\sim 30\text{GHz}$ 、暗電流 $< 300\text{nA}$ と、既に商用化目前の感がある。

2. 5. 集積技術： OE 集積・III-V デバイス集積

OE & III-V 集積に関するセッションは米国 3 件、欧州 2 件の報告があり、欧米がシリコンプラットフォームへの光源、PD 搭載技術を重要課題と認識して注力していることがわかる。特に注目すべきは、UCSB の A.W.Fang 氏がインテルと共同で発表した、40GHz モードロックレーザであろう。同じグループが昨年発表したエバネセントレーザの発展形で、シリコン導波路上に InP 活性層と過飽和吸収体をウエハーボンディングで一括集積し、自励モードロック発振を実現した。同じ III-V ボンディング集積でも、欧州はアプローチが異なり、Ghent 大の R.Baets 教授からは、DSV-BCB なる有機材料を用いた die ボンディングによる LD とシリコン細線導波路との結合などが報告された。ボンディングの方が、Flip-chip 集積やエピタキシャル成長よりメリットがあるとの主張であった。また Luxtera の G. Masini 氏からは、数百 μm 以下のデータコム用に、130-nm CMOS プロセスで光電モノリシック集積した 40Gbps トランシーバー付き光ファイバーが発表された。シリコンフォトにクスによる事実上初めてのデータコム商品であり、注目される。但し、現状の CMOS 光電融合プロセスでは光デバイス性能（特に PD 暗電流）が通信仕様を確保できず、今回はファイバー固定で商品化されたようである。

2. 6. 新機能： 非線形光学・スローライト・フォトニック結晶

非線形光学関連のセッションでは、香港中文大の H.K. Tsang 教授から、格子欠陥を導入したシリコン導波路により $1.5\mu\text{m}$ 帯フォトデテクタが実現可能であることが報告された。さらにその応用として、欠陥導入フォトデテクタと p-i-n 型 VOA とを集積した高速ダイナミックゲインイコライザが紹介された。WDM-PON における EDFA の過渡応答補償を想定したデバイスであるが、この分野では数少ない実用志向の成果であり、今後の進展に期待したい。また仏 CEA-LETI の J.M. Fedeli 氏から、光閉込の強いシリコン細線導波路中央部に非線形材料を配置すべくコア中央にスロットを設けた導波路が報告されたが、今後の進展が興味深い。

フォトニック結晶デバイスについては、非線形光学関連のセッションで NTT の納富氏からフォトニック

結晶極微小共振器を利用した高速直接光スイッチングや波長変換などの全光処理機能について、また横国大の馬場教授からはフォトニック結晶導波路を利用した広帯域光遅延構造についての講演が行われた。いずれもフォトニック結晶ならではの優れた機能を有しているが、極めて高精度な形状制御や各種損失の低減などの課題もあり、実用デバイス化にはこれら課題の解決が重要となる。また、課題解決へのアプローチとして St. Andrews 大の T.F. Krauss 教授により伝搬損失の要因同定と対策に関する講演が行われた。ちなみにこの Krauss 教授の発表で紹介された SNOM による実導波路デバイスの分散曲線測定は、測定技術の見地から一見の価値がある。

2. 7. 革新的な材料・プロセス技術

Disruptive materials & process technologies なるセッションでは、まずアリゾナ州立大の R. Roucka 氏が、Ge や SiGe に周期律表で一段下の IV 族元素の Sn を加え、バンドギャップ操作の自由度を増やすことにより、シリコン基板上に赤外レーザーやデテクタが構築可能であることを示した。さらに SiGeSn は Si 上へ III/V 族成長のバッファ層になることも報告された。またミネソタ州立大の J.H. Stadler 教授は、MgO や SiO₂ をバッファ層として YIG(Yttrium-iron-garnet) をシリコン基板上に形成、導波路化し、アイソレータ用ファラデーローテータの実現可能性を示した。MIRAI-Selete の清水氏はエアゾル制膜法により PLZT 導波路をシリコン基板上に形成し、PLZT の EO 効果を利用した超小型高速変調器の実現可能性を示した。本セッションでは優れた特性を持つ非シリコン系材料をシリコンフォトニクスに活かそうという観点での発表が集まっており、これらの材料が CMOS コンパチビリティを獲得すれば、フォトニクスの分野に大きなインパクトを与えるであろう。

3. おわりに

今回の会議を通じ、シリコンフォトニクスの進歩の速さを実感した。例えば、つい2年前にはシリコン変調器が 40Gbps で動作するなど想像できなかったが、今回の会議で実現されてしまった。このような急速な進歩は、シリコンフォトニクスが産業技術のブレイクスルーとして、各方面で強力に推進され始めたことの現れである。欧米各国は最先端の CMOS ラインを共同利用ファンドリーとして投入する体制を整え、この動きに備えつつある。フォトニクス関連技術の競争力を維持するために、そろそろ日本にも同様な組織が必要なのかもしれない。ちなみに、次回の GFP は 2008 年 9 月にイタリアで開催される。