

## GFP2010 ショート速報 [シリコンフォトニクス]

秋山 傑 (光電子融合基盤技術研究所/PETRA)

会議名 : 7th IEEE International Conference on Group IV Photonics

開催期間 : 2010年9月1日-3日

開催場所 : Friendship Hotel (北京、中国)

\*\*\*\*\*要 約\*\*\*\*\*

例年と同様、主として光インターコネク用用途の、光源、変調器、受光器、パッシブ導波路などの Si 基板上コンポーネントに対する研究成果が個別に報告された。アクティブ・デバイスでは、いずれのコンポーネントも、まだ、いろいろな材料・基本構造が並行して検討されている。光源と受光器では Ge 材料と III-V 材料ハイブリッド方式の両方が検討されており、変調器ではキャリア・プラズマ効果に加えポリマ材料の EO 効果、また、共振器構造の利用などが検討されている。今回は Ge 材料のアクティブ・デバイスへの活用が目を引き、特に Ge からの直接遷移発光については、2 件の発表があり、今後の進展も期待される。

\*\*\*\*\*

## 1. はじめに

Group IV Photonics (GFP) は、シリコンフォトニクス分野の研究開発を行う研究者にとって、最も主要な国際会議の一つである。今年は、7 回目の開催になるが、総発表件数は昨年並みの 151 件 (内オーラル発表 84 件) であり、3 日間に渡る合計 15 セッションにおいて、活発な議論がなされた。例年と同様に、主として、光インターコネクション用の光源、変調器、受光器、パッシブ導波路など、個別コンポーネントにおける研究成果の発表が多かった。以下、これらのトピックについて、コンポーネント別に会議での報告内容をまとめる。

## 2. 発光素子

Ge の直接遷移発光を利用したレーザの実現に向けて、MIT から招待講演として最近の検討をまとめた発表があった。主に発表済みの光励起 Q スイッチ・レーザが紹介されたが、発表の後半は、今後、電流注入による連続レーザ発振を目指す上でのポイントとして、Ge 発光層を Si または SiGe 層で挟むダブルヘテロ構造の実現について述べられた。また、ドーピング濃度及び測定温度の増大と共に、(Photo Luminescence) PL 強度が増大するという、Ge 材料に特有の光物性が紹介された。Post Deadline セッションでは、Stuttgart 大 (独) から、MBE 成長により作製した Ge の PIN 構造を Si で挟んだダブルヘテロ構造について、電流注入による室温での直接遷移発光の報告があった。Ge の直接遷移を利用した発光素子については、今回の会議では電流注入によるレーザ動作などの大きな成果は見られなかったものの、今後の進展を期待させる内容であった。

シリコンフォトニクスにおける光源に対する別のアプローチとして、III-V 材料をウェハ融着により、Si 基板上に形成する方式について、1 セッションが設けられて合計 7 件の発表があった。まず、ゲント大、IMEC、デンマーク大、CEA-LETI などから招待講演では、Si 導波路を形成した 200mm の SOI 基板上に、III-V 族

材料の die を融着する技術が紹介された。この場合、die を融着後、III-V 族材料に対して電極形成のプロセスを行う必要があるが、このプロセスを CMOS のバックエンド・プロセスにコンパチブルな形で行う点が特徴である。その意味するところは、プロセス温度を 350-400°C 以内にする、III-V 材料の素子では普通に用いられる Au 材料とリフトオフ・プロセスではなく、Ti/TiN/AlCu 材料の全面堆積とドライエッチングによるパターン形成を用いること、200mm ウェハのまま DUV によるリソグラフィを行うことである。

この他には、このようなハイブリッド光源におけるレーザ構造の改良についての発表が何件かあった。特に、Si 導波路と III-V 族材料の活性層との間の光結合構造が検討されている。従来は、Si 導波路を導波する光をエバネッセント波として、III-V 族の活性層へと結合していたが、これに対して CEA-LETI などから、Adiabatic (断熱的) なテーパ導波路構造を用いることで、レーザ部分において、Si 導波路を導波する光の大部分を III-V 族材料へと移す光結合構造についての発表があった。この場合、レーザ共振器は、Si 導波路に形成した一对の回折格子ミラーにより構成される。本構造のレーザにより、パルス駆動ではあるが、閾値電流 100mA、閾値電流密度 1.76 kA/cm<sup>2</sup>、最大光出力 7.2 mW (グレーティング・カプラからの出力) のレーザ特性が報告された。現在のレーザ特性の制限要因は、III-V 素子側の電氣的な特性 (抵抗の大きさ、電流狭窄) とのことである。

### 3. 変調器

招待講演により、英国と EU におけるシリコンフォトニクスプロジェクト (それぞれ UK SP、HELIOS) の枠組みで研究されているシリコン変調器の紹介があった。PN 接合を逆バイアスで用いるマッハツェンダ変調器が 3 種類、また、回折格子や 2 次元フォトニック・クリスタルにおけるスローライトを利用した変調器、Ge 材料の量子閉じ込めシュタルク効果を用いた変調器など、多岐に渡る材料・構造の変調器の紹介があった。全体として、他で発表されているシリコン変調器の特性を大きく凌駕するものは今のところないようである。これらのうち、通常の PN 逆接合のマッハツェンダ変調器において、導波路コア内の PN 接合の位置により特性が左右されることを防ぐための構造・プロセスについて報告があった。これは、コア上面における Si 導波路形成時のハードマスクを利用して、セルフアライン的にドーピングのイオン注入を行うというものである。しかし、この場合は PN 接合の位置がコア側面に限定されるため、設計の自由度が損なわれる。実際、作製した素子により得られた変調効率は、6-8 V·cm と、あまり良くない値である。

Si からなるスロット導波路の間隙に、電気光学効果を有するポリマ材料を埋め込むタイプの変調器の発表が、Karlsruhe Institute of Technology (KIT, 独) とワシントン大 (米) から、それぞれ独立に行われた。前者は、変調効率が明確でないものの、作用長 1.7 mm の素子により、15-40 GHz の範囲で一定の変調効率を報告した。後者は、作用長 1 mm の素子により、 $V\pi L$  として 0.8 V·cm の変調効率、3 GHz (予稿では 1GHz) の変調帯域を実現している。また、伝搬ロス は 1 dB/cm である。0.8 V·cm の変調効率は、報告されている PN 接合の逆バイアス型のシリコン変調器の最良の値と同レベルである。ポリマ材料は、特性が安定して得られるか、CMOS 用のファウンドリにおいて受け入れられるか等、未知の部分も大きい。今後の改善の度合いによっては、PN 接合型の変調器を上回っていく可能性がある。

Kotura 及び Sun Lab. からは、近年、彼らが検討している PN 接合の断面のリング共振器型変調器により、10Gb/s、1 V<sub>pp</sub> 駆動の報告があった。変調効率としては、 $V\pi L$  換算で 0.71 V·cm という、Depletion モードで駆動するシリコン変調器としては最良の値が得られている。彼らがこれまでに報告してきた値に比較しても倍の変調効率が得られているが、用いた手法の詳細は発表では明らかにされなかった。発表では、むしろ予

稿と異なり、リング共振器上に形成したヒータによる動作波長のチューニングについて多く時間が割かれた。特に、シリコン導波路部分において、埋め込み酸化膜層の下部のシリコンを部分的に除去することで、ヒータのチューニング効率を増大させる構造が紹介された。リング共振器のFree Spectral Range (FSR) 分の幅のチューニングに必要な消費電力は 2.4mW であり、その速度も 170  $\mu\text{sec}$ . と速くなっている。本タイプの変調器を実際の環境で用いるためには、レーザ光源との波長ずれを何らかの方法でモニタし、ヒータの駆動電流にフィードバックをするよう、もう一段複雑な仕組みが必要と思われるが、これについてのコメントはなかった。

今回、報告者の知る限りでは初めて Samsung からシリコン変調器の発表があった。まず、アプリケーションとして DRAM メモリ・モジュールと CPU との間のオンボード・光インターコネクットの図が、コンセプトとして紹介された。変調器の方は、SOI 基板ではなく、バルクの Si 基板上を用いており、酸化膜を介してその上に形成された再結晶 Si 層で構成される。変調器の断面は、リブ構造であり、コアの両側に高濃度の p 層、n 層が形成される。発表では、作用長 200  $\mu\text{m}$  の変調器を用いて、順方向バイアスにて 1.8  $V_{pp}$  の通常の NRZ 信号 (プリ・エンファシスなし) により、5 Gb/s までのアイ・パターンが示された。順方向バイアスの場合、通常、ns オーダのキャリア寿命により、動作速度が制限されると思われるが、今回、このような高速駆動が可能になった理由として、再結晶 Si 層においてはキャリア寿命が小さくなっているためとの見解が示された。このような原理で、10 Gb/s 以上の駆動が可能であるか、また、再結晶シリコンを用いた変調器において安定した特性が得られるかが、今後注目される。

富士通研からは、本速報の報告者から、マツハツェンダ干渉計にリング共振器型の位相変調器を装荷した構造の変調器により、波長範囲 1 nm での 10Gb/s、1V<sub>pp</sub> 動作の発表があった。同じリング共振器を利用する上述の Kotura の変調器と比較すると、共振器の効果により変調効率を増大させながらも、より大きな波長帯域を得ることができるとしている。

#### 4. 受光器

まず、招待講演にて、IBM から Ge の受光器について発表があったが、基本的に発表済みの内容をまとめたものであった。Ge-APD (アパランシエ・フォト・ダイオード) の特性については、暗電流が 50  $\mu\text{A}$  と大きいものの、1.5 V という小さいバイアス電圧にて、10 dB のゲインと 35 GHz の帯域が得られている。尚、発表においては、まずイントロダクションにおいて、彼らが近年発表で多用している電子デバイス層の上に光配線層が配置されたオンチップ・光インターコネクットの図を示していたが、これに対して、発表した Ge の APD は、SOI 層の直上部にフロントエンドのプロセスで形成しており、両者の間の不整合が気になった。IBM の発表の後には、Intel から同じ Ge の APD の発表が続く予定であったが、これはキャンセルされた (予稿はあり)。東芝は、ダイレクト・ボンディングにより、InGaAs 光吸収層を SOI 層上の Si 導波路に形成した構造の Metal-Semiconductor-Metal (MSM) 受光器を報告した。MSM の電極構造により本来の特性が抑えられているようであるが、それでも得られた効率は 0.94 A/W と高く、また、暗電流は 10 nA と小さい。実際に比較した訳ではないが、普通に個別素子として作製した InP 基板上的 InGaAs 受光器と同等の特性が得られると考えている、とコメントしていた。

#### 5. 集積素子

セッションの最初に Light Wire (米) から、シリコンフォトニクス (彼らの言葉では CMOS Photonics)

により構成した SFP+モジュールについての招待講演が予定されていたが、これはキャンセルされた（予稿もなし）。次に、前述の EU におけるシリコンフォトニクスプロジェクト HELIOS の研究者が、彼らが進めている光/電子集積技術についての紹介を行った。まず、SOI 基板上に集積形成されたグレーティング・カプラ、8-ch の Arayed Waveguide Grating (AWG)、Ge-受光器について紹介された。次いで、SOI 層に光デバイスを形成した SOI 基板を、フリップ・チップにより、電子デバイスを形成したウェハの最上面にボンディングする技術の紹介があった。

NTT は、キャリア注入により動作する Variable Optical Attenuator (VOA) と Ge のモニタ受光器を SOI 基板上に集積した素子について、実際に Ge 受光器からのモニタ電流を VOA への駆動ドライバにフィードバックして VOA からの光出力を一定値に制御するシステムの動作について報告があった。VOA への入力光レベルが -15 dBm から 10dBm に変化した場合に、VOA からの出力光をターゲット -30 dBm に対して、2.7 dB の範囲の揺らぎに収める動作を実証した。システムの応答時間としては 90 ns であった。今回は、フィードバック回路、VOA ドライバを筐体に納めてシステム実験を行ったが、これらを ASIC 化することで応答時間は 50 ns 程度に小さくなるとコメントしていた。

## 6. その他

招待講演では、Genalyte から Luxtera の CTO であった C. Gunn 氏から、シリコンフォトニクスのインターコネクタ以外への応用として、バイオ・センシングの講演があった。技術的な内容は割愛するが、イントロダクションにおいては、インターコネクタに対するバイオ・センシングの市場の大きさをアピールしていた。

Post Deadline のセッションで 2 件の発表があった。1 件は、前述の Ge の PIN 構造からの発光に関するもので、もう 1 件は Gent 大及び IMEC から導波路の低伝搬損失化に関するものである。導波路の直線部は伝搬損失の元々小さいリブ構造の断面、曲がり部分は光の閉じ込めのきついチャンネル構造の導波路とし、これらを適宜接続するハイブリッド構成により、光回路全体としての伝搬ロスを下げるというものである。これにより直線部の伝搬損失と 90° 曲がりあたりの損失を、それぞれ 0.27 dB/cm、0.027 dB と小さく抑えている。

## 7. おわりに

GFP2010 について、主に光インターコネクタ用の Si 基板上アクティブ・コンポーネントについて報告された内容をまとめた。光源、変調器、受光器などのアクティブ・コンポーネントにおいては、いずれも、これまでに引き続いて、いろいろな材料・基本構造が並行して活発に検討されている。光源と受光器では Ge 材料と III-V 材料ハイブリッド方式の両方が検討された。変調器では、キャリア・プラズマ効果、ポリマ材料の EO 効果、リング共振器・フォトニック結晶などの共振器を利用した変調器など検討されている。全体として、今回は Ge 材料のアクティブ・デバイスへの活用が目を引き、特に Ge からの発光については、2 件の発表があり、今後の進展が期待される。次回、2011 年の会議は、英国ロンドンにて行われる予定である。