次世代ネットワークやLSIを革新するSiナノフォトニクス

西 研一・賣野 豊・大橋 啓之

要　旨

LSI を作製する最先端の技術を用いて、ナノレベルの微小構造によって光を制御する“Si ナノフォトニクス”は、従来の光素子と比べて桁違いの小型・低消費電力化を可能とし、また、これまで光による信号伝送は困難と考えられてきた、LSI内部への適用によって、LSI の高性能化までも可能とすることができます。このSiナノフォトニクス技術によって、NEC は次世代のネットワークや、LSIの革新に向けた新しいデバイスを実現しつつあります。

キーワード

●シリコン ●フォトニクス ●ポスト NGN ● LSI 光配線 ●光スイッチ ●光機能素子 ●プラズモン ●ナノフォトダイオード

1. はじめに

現在の高度情報化社会は、情報処理(IT)技術とネットワーク(NW)技術の2つの大きな技術領域によって支えられています。これら2つの技術領域の主要な機能、デバイス、技術、特徴、課題の概略を**図1**に示します。

IT技術領域におけるキーデバイスはシリコン(Si)を用いた大規模集積回路(LSI)です。LSIは、半導体材料として優れたSiにナノレベルの微細加工を施すことにより、高い量産性を持ってその性能を向上してきました。しかしながら近年、LSI内部の信号伝送の速度や距離に限界が見え始め、これがシステム性能向上の課題となる懸念が出ています。

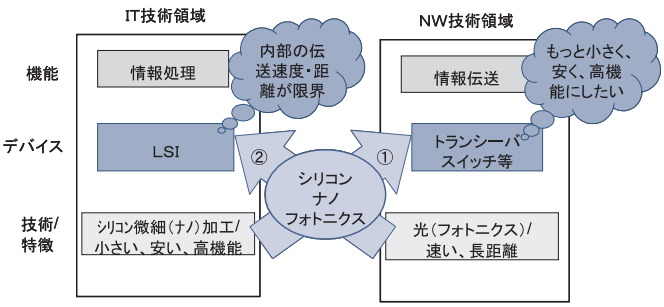

図1　IT技術とNW技術の特徴と課題

一方NW技術領域では信号を光で長距離間伝送する光ファイバ通信が主流となっています。光ファイバ通信は、伝送損失が小さく、1本のファイバで多数の異なる波長の信号を同時に伝送できるので、高速、長距離の伝送が可能という特徴があります。しかしながら、この領域でのキーデバイスとなる信号を発信/受信する光トランシーバや、信号の経路を切り換える光スイッチなどは、LSIのように小さく、安くすることは難しいと考えられています。

これら2つの技術領域は互いに相手の長所としている技術を必要としているように見えます。ここで紹介するSiフォトニクスは、SiのLSIプロセス技術と光によるデータ伝送技術を融合させ、両技術領域の課題を解決しようとする新しい技術です。NECではSiフォトニクスを、①光スイッチなどのNW用デバイスにLSIの加工プロセス量産技術を適用して、小型、低コスト、高機能化を図る、②エレクトロニクスデバイスであるLSI内部の信号伝送に光伝送を適用して、伝送速度や距離の限界を克服する、の2つの技術展開を行っています。本稿ではこれら2つの技術について紹介します。

2. Siナノフォトニクスによる通信用光デバイスの小型・高性能化

光ファイバを一般家庭やオフィスまで敷設し、インターネッ

ト経由で高画質映像などの大容量データを送受信するブロードバンド・アクセスネットワークが普及し始めています。これに伴い、これらアクセスネットワークを束ねるメトロ/バックボーンネットワークにも大容量化、高効率化が求められており、一般家庭・オフィス・電話局などに設置する通信用光装置・光デバイスの小型・低価格・低消費電力へのニーズがますます強くなっています。

LSIの基板材料として用いられるSiには、光学材料としては以下に示す特徴があり、このニーズに対応できる材料として期待されています。

・光ファイバ通信で用いられる近赤外波長で透明
・屈折率が高いため、光デバイスを小型化できる
・熱による屈折率の変化が大きいので、小型化、低消費電力化ができる
・既存のLSIの製造装置を利用して大量生産することで低コスト化できる
・電子集積回路と光集積回路を集積して高機能化できる

このようなSi材料の物理的特性およびLSIの微細加工製造技術の活用により、光機能素子を小型・集積化し、将来はネットワーク装置のモジュール化・ワンチップ化が可能になることが期待されます。

一例として、導波路型微小光スイッチを紹介します。光スイッチは、光ネットワークの効率的な運用に必要な光機能デバイスで、光信号の経路を電気に変換せずに光のまま切り換えるデバイスです。多数の光経路を同時に切り換えるためには、多数のスイッチエレメントを集積化する必要があり、個々のエレメントを小型化することが重要です。NECは、今回、世界最小の1×4光スイッチを試作し、そのスイッチ動作を実証することに成功しました[1)]。

試作した1×4光スイッチ・チップの顕微鏡写真を**図2**に示します。この1×4光スイッチは3つのマッハツェンダ干渉計型スイッチエレメントによって構成されています。各干渉計の一方のアームにはヒータが設置されており、ヒータで光導波路を加熱して屈折率を変化させると、光の干渉状態が変化して光路が切り換わる、という現象を利用しています。Siの熱による屈折率変化が大きいことを利用して、各スイッチエレメントの長さを約40 μmと非常に短くできました。また、前述のとおりSiは屈折率が高いため光を導波路内に閉じ込める作用が強く、導波路を小さな半径で曲げることができるので、各スイッチエレメント間を短距離で繋ぐことができます。そのため、3つのエレメントで構成される1×4スイッチ全体の大きさも200×120 μmと極めて小さくすることができました。

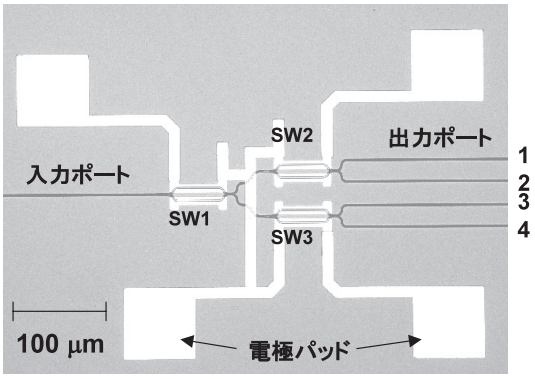

図2　1×4光スイッチ・チップの顕微鏡写真

図3に、試作した1×4光スイッチの動作実験結果を示します。入力ポートおよび出力ポートの矢印先端付近の白い点が入出力光のスポットを示しています。3つのスイッチエレメントのうちの2つのエレメントのON/OFFを切り換えることにより、4つの出力ポートのいずれにも光を出力できます。

この光スイッチの製造工程は以下のように比較的単純で

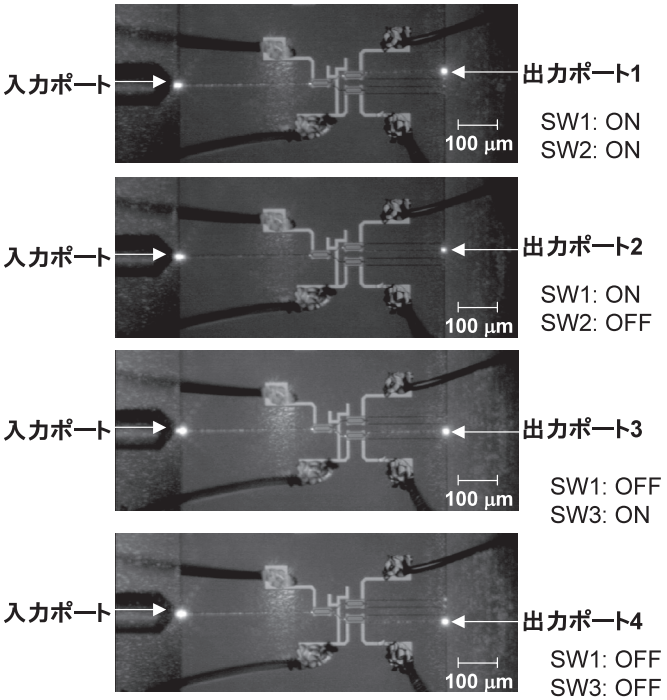

図3　1×4光スイッチの動作実験

す。①SOI (Silicon on Insulator)基板の表面Si層を部分的にエッチングして光導波路のコアを形成、②シリコン酸化膜を成膜してコアを埋め込む、③シリコン酸化膜上に抵抗体および導体を成膜/エッチングしてヒータおよび電極を形成。この製造工程はLSIとの共通性が高いので、量産時にはLSIの製造装置を用いることにより、光集積回路も電子集積回路に準じた低コスト化が可能になると期待されます。

3. LSI光配線を実現するためのSiナノフォトニクス技術

さらに大きなインパクトのある技術としてLSI上の電気配線の限界を突破する光配線の検討を行っています。今後数年のうちに、LSIチップ上のcm程度以下のサイズにおいても、電気配線における速度、雑音、また配線面積の問題が大きくなり、その解決が求められていくことが予想されます。Siナノフォトニクスにより、超小型の光変調器、受光素子、光導波路や合分波素子が実現され、LSIチップ上に電気回路と結合して設置できれば、光配線によって上記の問題を解決することができます。

光配線をLSI上にまで引き込むためには、エレクトロニクス素子の電気信号を光信号に変える光変調器や、逆に光信号を電気信号に変える受光素子などを小型、低消費電力化していく必要があります。これらの光素子をLSI上に集積して搭載することによって、光配線構造を形成することが可能になると考えられます。

期待される小型、低消費電力化をSiフォトニクス技術で実用化に近づけた例として、ナノフォトダイオードと呼ぶ新しい小型の受光素子の開発[2]があります。NECは、表面プラズモンアンテナと呼ぶ独自の構造によって、このアンテナの効果によって、極めて小型、低消費電力の受光素子を安価なSiプロセスで実現しました。

このナノフォトダイオードは、表面プラズモンアンテナによる近接場光を利用した技術です。表面プラズモンアンテナは、**図4(a)**に示すような周期的な凹凸(この場合は複数の同心円状)を表面に設けた金属膜で入射光を一点に集光する働きを持っています。この構造は、ナノテクノロジーを用いた加工技術により、金属膜の中心に波長サイズ以下の小さな孔(直径200nm程度)を設け、さらに穴の周囲も加工することで形成されています。ここに上面から光が入射すると、**図4(b)**に示すように、自由電子の粗密波である表面プラズモンが形成され、これにより、裏面側の孔の近傍に強力な近接場光を発生させることができます[3]。近接場光は波長より小さな領域に光を局在化させることができ、この近接場光を半導体で検出することによって、従来の受光素子では困難とされてきた高速性と高効率の両立を実現しています。

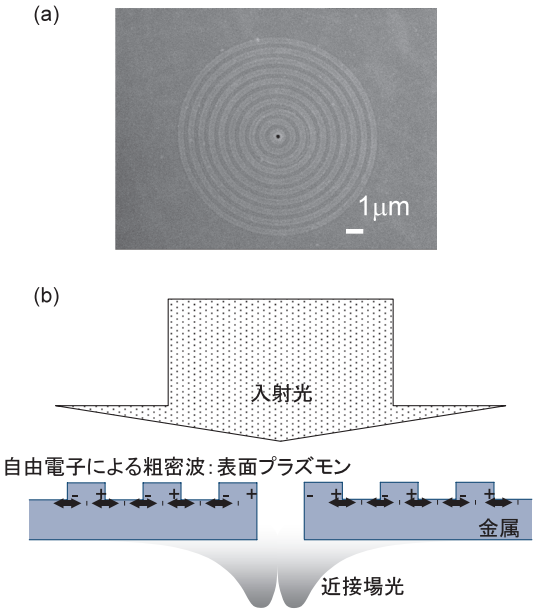

図4　(a)プラズモンアンテナの電子顕微鏡写真，(b)プラズモンアンテナの断面構造および入射光と表面プラズモンの共鳴現象

図5には、Siメサを含む、Siナノフォトダイオードの構造を模式的に示しています。表面プラズモンアンテナの中心部の孔近傍に発生した近接場光を、微小体積の半導体、ここではSiメサ構造によって吸収させ、ここで発生する電子を電流として検出します。実験的に、プラズモンアンテナのある場合とない場合で、生成される電流の効率が数十倍程度に増強され

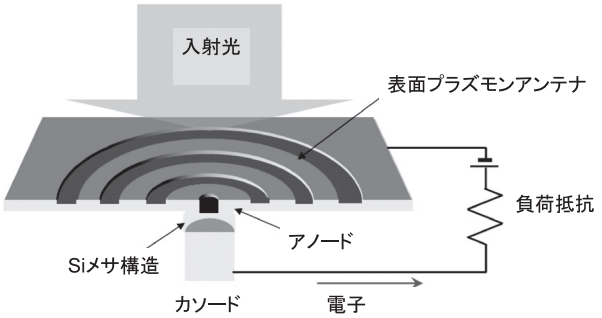

図5　Siナノフォトダイオード模式図

る効果が確認されています[4]。また時間応答についても、光短パルスに対する応答として、20ps程度のパルス幅の電流出力が確認されており[5]、50GHz程度の高速光信号に対する応答が得られることが期待されています。

NECでは、このナノフォトダイオードの技術展開として、光通信用の高速、高感度光検出器への応用はもちろん、LSI上の光配線での光検出部としての応用も詳細に検討しています。たとえば、この技術によって、LSI内でのグローバルクロック配信を光で行うシステムが検討されています。

マルチコア時代のLSIにおいては、チップ内でコア間のデータのやりとりをする場合、光を受けるだけでなく光に信号を乗せる技術も必要となります。NECは、この電気信号を光に変換する光変調器として、ナノスケール(<20nm)の結晶粒からなる強誘電体セラミクスを用いて、低電圧で小型の構造を実現することを試みています。具体的には、圧電材料のPZT($Pb(Zr,Ti)O_3$)を、エアロゾルデポジション法で形成し、干渉型の光変調器へと適用する手法を試みています。これまでの基本的な材料評価から、電界に対する屈折率の変化としてのEO係数が、150pm/Vという、従来用いられている材料の値より1桁程度大きい値が得られています[6]。この結果から、具体的な構造が実現できれば、LSIチップ上に搭載可能なレベルまで変調器を微小化することが期待されています。図6に、このPZT材料による、マッハツェンダ干渉計型光変調器の小型化の検討について示します。

以上、LSI上の光配線に向けたSiナノフォトニクスにより光信号と電気信号を変換する基本素子を紹介しました。

4. おわりに

Siナノフォトニクスの技術によって、光ネットワーク向けの小型高機能光モジュールや、LSI上に搭載可能なレベルまでの光素子の小型化を実現することが可能になろうとしています。

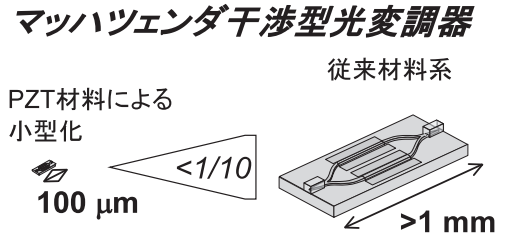

図6　PZTを用いた、小型の光変調器の可能性

このように、高速・大容量の通信技術や、コンピュータの基本素子としてのLSIの両方において、Siナノフォトニクスは革新的な技術になっていくと期待されます。

ここでは、Siナノフォトニクスによる光ネットワークの高性能化やLSI光配線向け実現に向けた技術紹介を行いました。さらに将来に向かって、たとえばLSIチップ上に波長多重の光ネットワークを実現することによりLSI上の機能をさらに大幅に向上させることが考えられます。ただし、そのような技術を実現するためには、超小型の波長制御素子を実現する必要があります。NECは、ナノスケールで光の特性を制御することにより、新しい光機能技術の実現に挑戦しています。

参考文献

1) T. Chu et al. ; " Compact 1 × N thermo-optic switches based on silicon photonic wire waveguides", Optics Express, Vol.13, No.25, p10109, 2005.
2) 大橋 啓之他:“プラズモン共鳴を用いた近接場光増強Siナノフォトダイオード”、応用物理74巻、1453頁、2005年。
3) T. W. Ebbesen et al. ; "Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays", Nature 391, 667 (1998).
4) T. Ishi, et al. ; "Si Nano-Photodiode with a Surface Plasmon Antenna", Jpn. J. Appl. Phys. 44, L364 (2005).
5) J. Fujikata et al. ; " Highly enhanced speed and efficiency of Si Nano-Photodiode with a Sur-face-Plasmon Antenna", Proc. Int. Conf. Solid State Devices and Materials, Kobe, E-3-3, 2005.
6) M. Nakada et al. ; " Electro-Optic Properties of $Pb(Zr_{1-x}Ti_x)O_3$ (X=0, 0.3, 0.6) Films Prepared by Aerosol Deposition ", Jpn. J. Appl. Phys. 44, L1088 (2005).

執筆者プロフィール

西 研一
基礎・環境研究所
ナノテクノロジーTG
主幹研究員

賣野 豊
基礎・環境研究所
ナノテクノロジーTG
主幹研究員

大橋 啓之
基礎・環境研究所
ナノテクノロジーTG
研究部長