

超小型・高密度集積に向けた光導波路技術

近年、すべてのモノがインターネットを介してつながり、これまでにない高度なサービスを提供できるIoT (Internet of Things) の実現に向けた取り組みが本格化しています。IoTを支える光通信ネットワークではやり取りされる情報が飛躍的に増大、かつ、多様となるため、そこで使用される光通信デバイスにも大容量化、経済化、小型化が強く求められています。本稿では、来たるIoT時代に向けて研究開発を進めている超小型・高密度光導波路デバイス技術を紹介します。

わたなべ けい くらた ゆう
渡辺 啓 / 倉田 優生
 にし ひでたか ひらき たつろう
西 英隆 / 開 達郎

NTT先端集積デバイス研究所

IoTサービス時代の光通信ネットワークに求められる光導波路技術

近年のFTTH (Fiber To The Home) やスマートフォンの普及に加えて、すべてのモノがインターネットを介してつながるIoT (Internet of Things) 技術の実用化によって、さらに高度なサービスが提供される社会の到来が予想されています。このような社会の基礎となる光通信ネットワークには、膨大で多様な情報を高速、かつ、柔軟に伝送して処理するため、光の経路を切り替える機能 (光スイッチ) や複数の異なる色の光を分けたり合わせたりする機能 (光フィルタ) など、光を電気に変えずに光のまま処理してさまざまな機能を実現する“光回路”が必要になります。このような光回路は、平面基板上に光が伝搬する道 (光導波路) を形成することで実現でき、光導波路の形状を適切に設計することでさまざまな機能を実現できます (図1)。光回路のサイズや光学特性は光導波路の設計とともに、光導波路を構成する材料によっても異なります。

光導波路の比屈折率差と最小曲げ半径との関係を図2に示します。比屈折率差とは、光が導波するコアとその周

りを覆うクラッドの屈折率差の比で、比屈折率差が大きくなるほど曲げ半径が小さくなるのが分かります。すなわち、比屈折率差の大きな材料を用いると、導波路をより小さく曲げて光回路を小型化できることを示しています。電子デバイスの場合、トランジスタを微細化・高集積化すると、トランジスタの単価は安くなり、同時に性能が向上します。

しかしながら、光デバイスの場合には、単に比屈折率差の大きい材料を利用して小型化すれば性能が向上するとは限りません。光デバイスの特性は光

導波路の寸法に影響を受けやすく、微細な導波路ほど寸法に敏感になるため、容易に集積度を上げることはできません。そこでNTT研究所では、用途や求められる特性に応じて適正な材料、比屈折率差を選択してさまざまな光回路を実現しています。

本稿では、超小型・高密度集積に向けた光導波路技術の進展として具体的に、①高性能石英系平面光波回路 (PLC) 技術、②低損失窒化シリコン系導波路技術、③電子融合を可能とするプラズモン導波路技術、④極限の小型化を提供する3次元光ピア技術、の

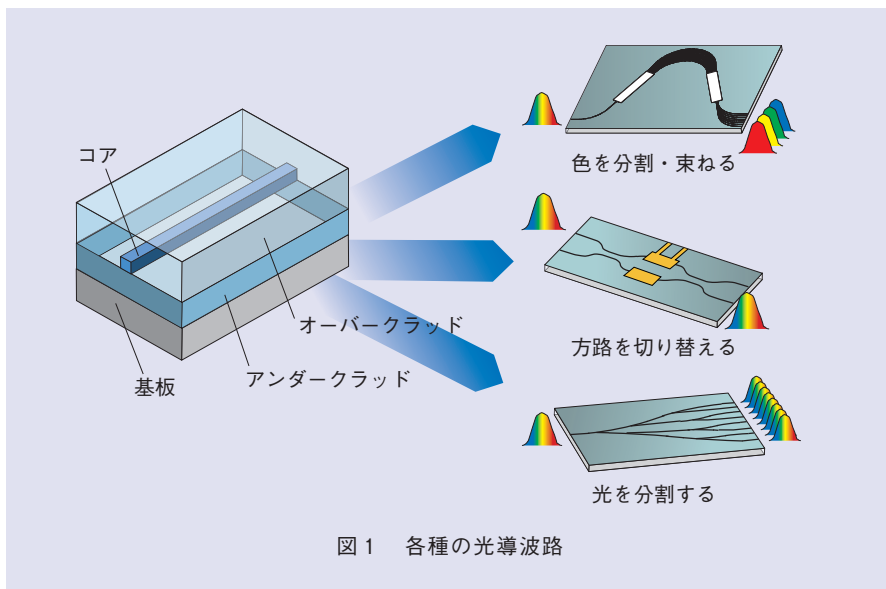


図1 各種の光導波路

4つのデバイス技術について最新の進展状況を紹介します。

石英系光導波路の進展

石英系平面光波回路 (PLC) は光ファイバと同じ石英ガラスを材料とした光回路です。そのため、光ファイバとの低損失な接続が可能、長期的に特性が変化しない高い信頼性といった特長を有しています。また、比屈折率差が比較的小さく高精度に特性が制御できるため、複数の異なる色の光を分離・合流させるアレイ導波路回折格子 (AWG: Arrayed Waveguide Gratings) などの高性能な光フィルタを実現する光導波路として適しています。石英系 PLC はこれらの特長を活かして、これまでに広く光通信ネットワークに導入、実用化されてきました。

現在、比屈折率差が1.5%、最小曲げ半径が1 mm程度 (比屈折率差1.5%) の導波路まで実用化されており、PLCチップの大きさは一般的なAWGを作製した場合で20~30 mm角でした。私たちは、導波路形成精度を向上し、優れた特性を維持したまま、大幅にチップ寸法を小さくする小型化技術の研究開発を進めてきました。

比屈折率差を5%まで大幅に増大し、高精度加工プロセスで作製したAWGのチップ写真と特性評価結果を図3に示します。AWGの回路本体はわずか1 mm角に収まる小型化を果たし、また、過剰損失はわずか0.2 dBと実用化されている同等製品と同程度の優れた特性を実現しました。

SiN系光導波路の進展

コア・クラッドの屈折率差40%程度のSi細線導波路は超小型光回路の実現が可能ですが、高精度な光回路を作製するには課題があります。例えば、

Si細線導波路を用いてアレイ導波路回折格子波長フィルタを作製する場合、現行の通信デバイスの仕様を満たすために要求される許容加工誤差は原子間距離レベルとなります。これは、最先端の加工技術でも実現困難な精度です。そこで、比較的高い集積度と加工誤差耐性の両立に向けて、石英とSiの間の屈折率差 (約20%) となる窒化シリコン (SiN) 導波路の適用が注目されています。特に、低温のプラズマCVD (Chemical-Vapor Deposition) 法により形成されるSiN導波路は、変調器や受光器などのアクティブ素子に熱ダメージを与えることなく一体集積

が可能となることから、その実用化が期待されています。しかし従来、CVD法により形成されるSiN膜では、光通信で用いる波長帯の近傍である1500 nm帯波長域に光吸収あることが課題でした。この光吸収はプラズマCVD法の原料ガスとして一般に用いられるシラン (SiH₄) ガスに含まれる水素が膜中に取り込まれ、N-H基を形成することに起因します。この課題に対して、NTTではプラズマCVDの原料ガスとして水素を含まない重水素化シランを用いる成膜手法を確立しました。

図4の青線は本手法を用いて成膜

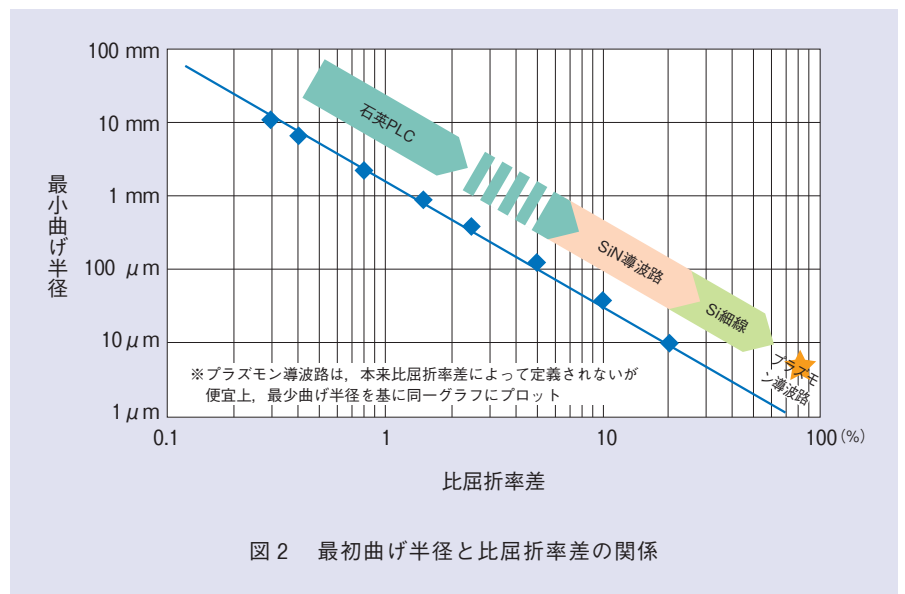


図2 最初曲げ半径と比屈折率差の関係

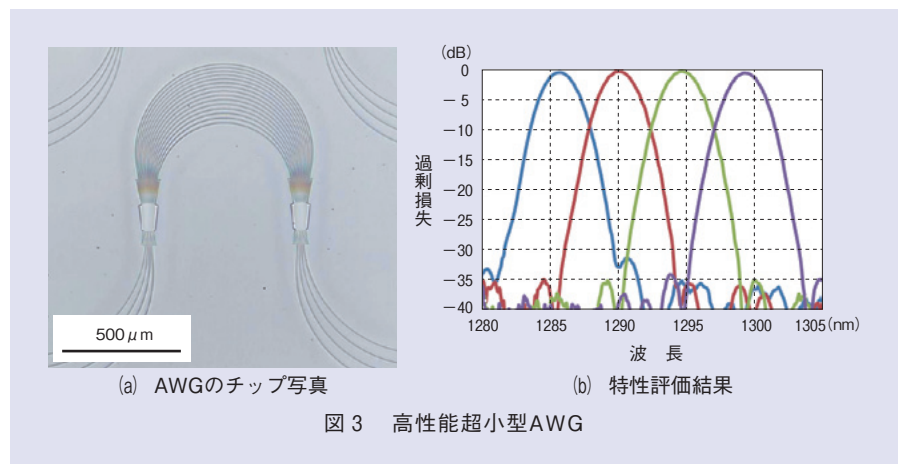


図3 高性能超小型AWG

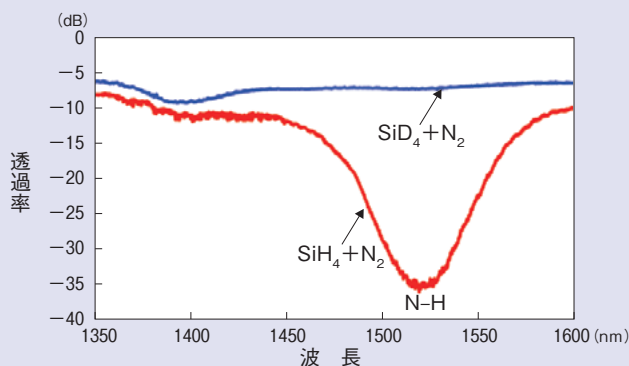
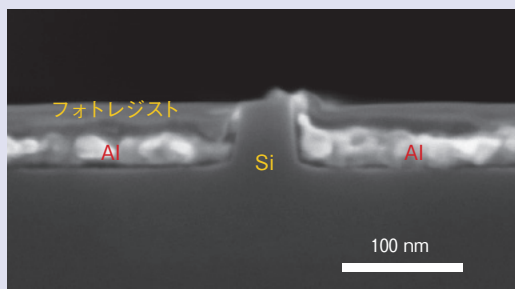
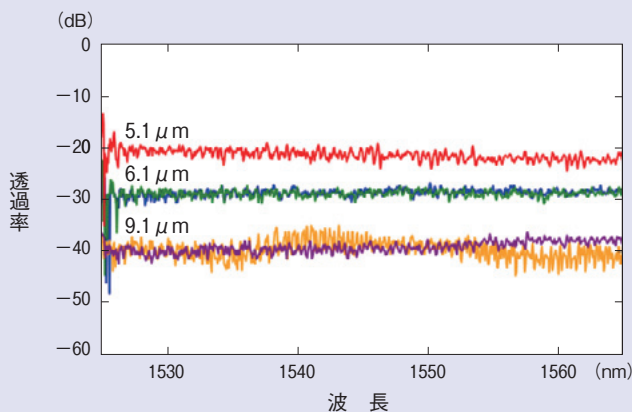


図4 SiN導波路の透過スペクトル測定結果



(a) SEM像



(b) 光透過スペクトル

図5 横型プラズモン導波路とその透過スペクトル

プラットフォーム上に最適な材料を用いた高性能光集積回路をつくることをめざしています。

プラズモン導波路

Si細線導波路はコア断面サイズが数100 nmと微小であることに加え、その材料や作製工程がSi電子デバイス製造と近いことから、光電子融合デバイスに向けた技術基盤として期待されています。しかし、近年のSiトランジスタのチャンネル幅は10 nmオーダに達しており、Si電子デバイスと、Si細線導波路に代表されるSi光デバイスとの寸法には、やはり大きな差があります。この差を埋める技術の1つとして、私たちはプラズモン導波路技術に取り組んでいます。プラズモン導波路は金属と誘電体の界面に励起される表面プラズモンポラリトンを利用した構造（金属-誘電体-金属）を有し、界面誘電体側に指数関数的に広がる電界強度分布が主たる光の存在領域となり、数10 nm領域に光を閉じ込めることが可能となります。また、このような極微小領域への光閉じ込めは、寸法以外の新たなメリットももたらします。例えば、電気光学効果を利用した光変調器ではその効率が電場強度に比例するため、光閉じ込めによる電場強度増大を利用することで低消費電力で光変調器を動作させることができます。

私たちがこれまでに提案・作製した横型プラズモン導波路の走査型電子顕微鏡 (SEM) 像を図5 (a)に示します。アルミニウム (Al) -Si-Al構造からなり、Siコア断面寸法は60×60 nmと近年のCMOSトランジスタ構造に比肩する寸法です。作製したプラズモン導波路の光透過スペクトル (長さ3水準) を図5 (b)に示します。一般的な

されたSiN導波路 (コアサイズ: 0.55 × 1.1 μm) の透過スペクトル測定結果です。従来のシランガスを用いて成膜されたSiN導波路 (赤線) と比べて波長1500 nm付近の吸収ピークが大幅に低減されています。導波路伝搬損失は波長1550 nmにおいて1.2 dB/cmと

非常に低損失であり、通信波長帯全域で低損失光回路が実現可能です。

また、このSiN導波路でスポットサイズ変換器を形成することで、Si細線導波路や石英系導波路などの異種導波路の一体集積も可能となります。NTTでは本技術を用いることで、Si

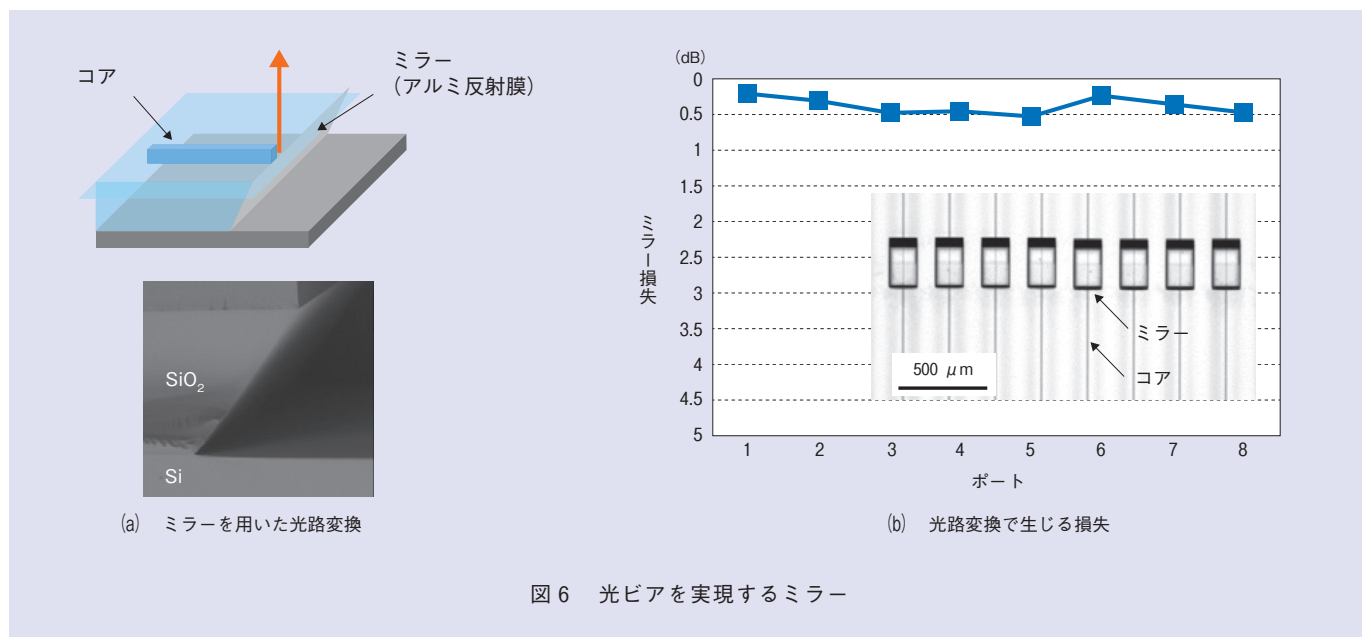


図6 光ビアを実現するミラー

光通信デバイスの動作波長範囲で波長依存性なく光伝搬可能であり、光伝搬損失は約 $4 \text{ dB}/\mu\text{m}$ と見積もられ、今後の製造技術開発によって $1 \text{ dB}/\mu\text{m}$ 以下に改善可能と考えています。これらの値は他の誘電体導波路と比べて非常に大きいですが、利用形態をSi電子デバイス近傍の数 μm という極短距離に限り、Si細線導波路を含む他の光通信デバイスと共存した最適光回路構成を探索することで、超小型・超低消費電力な電気-光インターフェースとしての応用をめざします。

光ビア導波路技術

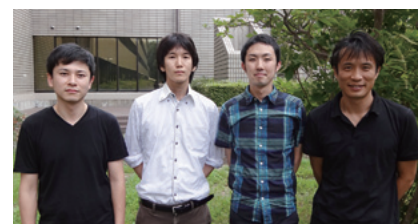
超小型・高密度集積を実現する方法は、比屈折率差を高くし光回路の曲げ半径を小さくするアプローチだけではありません。光回路をスタックする(重ねる)ことによっても小型、高密度集積を実現することができます。しかも、スタックした場合、異なる材料からなる、異なる機能の光回路を1つに集積することも容易になります。もちろん光回路を重ねただけでは機能せず、重ねた各レイヤ間の光をきちんと結合す

ることが必要です。このような異なる光レイヤ間を光結合する機能、具体的には、ある光レイヤを伝搬してきた光を、基板垂直方向に光路変換し、別の光レイヤで再度光路変換して伝搬する機能を光ビアと呼んでいます。ここで光ビアを実現するうえで重要なのが光路の変換技術になります。NTT研究所ではこのような光路変換を、ミラーを用いて実現する試みを行っています。作製した8チャネルミラーのミラー損失であり、1回の光路変換で生じる損失を図6に示します。これを見ると、0.5 dB以下のわずかな損失で光路変換できることが確認できます。したがって、レイヤ間の光結合でも、損失は1 dB以下であり、光ビアを実現するに十分低損失なミラーを実現しています。

今後の展開

本稿では、本格的なIoTの実用化による高度なサービスの基盤となる光通信ネットワークに求められる大容量、低コスト、超小型光デバイスの実現に向けた重要な光導波路技術の最新動向

を紹介しました。今後も、光通信ネットワークを革新するデバイス開発を進めていきます。



(左から) 渡辺 啓/ 倉田 優生/
開 達郎/ 西 英隆

日本、世界における光半導体の研究開発用ファウンドリとして、来たるAI-IoTサービス時代を下支えする光通信デバイス技術開発を弛まずに進めていきます。

◆問い合わせ先

NTT先端集積デバイス研究所
研究推進担当
TEL 046-240-2300
FAX 046-240-4328
E-mail sende-kensui@lab.ntt.co.jp