

微小球を並べて作るマイクロ分波器

— 自己組織化プロセスを用いた集積回路の光配線 —

平成20年5月30日

独立行政法人物質・材料研究機構

概要

1. 独立行政法人物質・材料研究機構（理事長：岸 輝雄）、量子ドットセンターの三井正 主任研究員らは国立大学法人東北大学 多元物質科学研究所と共同で、微小球共振器を自己組織化的に並べることで、直角曲げが可能なミクロンスケールの光配線と分波器の開発に成功した。
2. 近年、コンピュータをさらに高速化するために、集積回路内部の情報伝送の一部を光通信に置き換える方法が注目されている。これを実現するためには数 μm の幅で最大数mmに渡って光を伝搬させ、さらに数 μm の曲率半径で自在に光配線を行う必要がある。しかしながら、これまでの光導波路の技術では屈折率差が大きくとれないため、このような小さい曲率半径を実現できなかった。一方で、エアートレンチ型クラッド¹⁾やフォトニック結晶²⁾を用いる方法が報告されているが、これらの新しい方法も、光を閉じ込めるための構造が外側に必要であるため、「ミクロンスケールの幅で、自在に」光導波路を作ることが難しかった。
3. 高屈折率の光共振器を連結させて作る光導波路 (coupled-resonator optical waveguide (CROW)) はクラッドを必要とせず、共振器自体を配列することで自在に光配線が可能である。特に、微小球を共振器として使う方法は、自己組織化手法を用いて配列することが可能となる。今回、パターンニングを行った基板をテンプレートとして用いることで、微小球を配列し、その内部の伝播光を導波路—集光モード近接場光学顕微鏡³⁾で観察を行ったところ、異なる共振波長の光を分岐させ、分波器としても機能することがわかった。
4. 今回開発した光配線法は、集積回路内部に複数個配置された中央演算装置(CPU)の間で、高速で情報をやり取りするための光導波路として応用が可能である。さらに、複数の波長を使い分けることで、行き先を指定した情報伝送も可能になると期待され、今後はより高度な機能を持った光導波路について研究を進めていく。
5. 本研究成果は、東北大学 多元物質科学研究所—物質・材料研究機構 連携ラボプロジェクトの一環として得られたものであり、6月26～27日につくば国際会議場で開催される日本光学会第17回ナノオプティクス研究討論会にて発表される予定である。また、米科学誌 Optics Letters 誌に、近日掲載される。

研究の背景

近年、コンピュータをさらに高速化するために、集積回路内部の情報伝送の一部を光通信に置き換える方法が注目されている。これは集積回路内部で処理する情報の量、及び伝送速度が増大し、電気をを用いた配線では、多線化を用いても追従できなくなりつつあるためである。

光を用いた集積回路はこれまでも光ファイバ通信の分野で用いられてきた。光ファイバ通信では、一つの波長の光だけではなく、多くの異なる波長の光を1本の光ファイバで同時に多重伝送すること（波長多重）により、多様な用途に対応可能な大容量の情報伝送が可能である。この波長多重通信を行う際、多波長の光を合わせたり（合波）、分離したり（分波）する手段として、固体基板上に作製した光集積回路が用いられてきた。この光集積回路は、わずかに屈折率を変えた石英ガラスでできた光導波路を用いることで光を閉じ込め、光配線を行ってきた。

しかしながら、コンピュータ用の集積回路内部で光配線を実現するためには、回路の設計にあわせて、数 μm の幅で最大数 mm に渡って光を伝搬させ、さらに数 μm の曲率半径で自在に光配線を行う必要がある。ところが、これまでの光導波路の技術では、屈折率差が大きく取れないため、このような小さい曲率半径を持った急峻な曲がり部を持つ配線は不可能であった。この急峻曲げ配線を実現する方法として、これまでエアートレンチ型クラッド¹⁾ やフォトニック結晶²⁾ を用いる方法が報告されている。しかしながら、光を閉じ込めるための構造が外側に必要であるため、実際には「ミクロンスケールの幅で、自在に」光導波路を作ることが難しかった。一方、気相成長で作った半導体ナノウイスカーを用いる方法も検討されているが、この方法は非常に高い組み立て技術が必要であった。

高屈折率の光共振器を連結させて作る光導波路(coupled-resonator optical waveguide (CROW))は、クラッドを必要とせず、共振器自体を配列することで、自在に光配線ができるものと期待される。光共振器としては、リソグラフィ法を応用して作った「光リング」や（参考文献①）、化学合成的手法で作製した「微小球」（参考文献②）などを用いることができ、これまで多くの研究が行われてきた。特に後者の方法は、自己組織化的手法を用いて配列することが可能であるため、より簡便かつ省エネルギー、低環境負荷、そして基板へのダメージが少ないプロセスが実現できると期待されていた。

研究成果の内容

当機構と東北大学多元物質科学研究所は共同で、コロイド溶液の中での自己組織化現象を用いて微小球を配列し、光導波路を作製する研究を行ってきた（参考文献③、④）。今回、パターンニングを行ったシリコン基板をテンプレートとして用いることで微小球を自在に配列することに成功し、さらに導波路-集光モード 近接場光学顕微鏡 (NSOM)³⁾ を用いて観察を行ったところ、光が伝播することに加えて、異なる共振波長の光を分岐させる、分波器としても機能することが明らかになった。

図1 (a)は、今回用いたパターンニング基板の走査電子顕微鏡像 (SEM像) である。シリコンの(001)面に電子線リソグラフィ法を用いて正確なパターンニングを行った後、選択エッ

チング法を用いて(111)面を露出させることにより、逆ピラミッド型のピットを形成する。この基板の上に斜めにカバーガラスを立てかけ、その隙間に毛細管現象を利用して微小球を含んだコロイド溶液を注入する。このコロイド溶液は直径 $2\ \mu\text{m}$ のポリスチレンの微小球を含んでいる。乾燥が進むにつれてメニスカスが後退し、微小球がトラップされる(図1(b))。この自己組織化プロセスで作製した微小球列のSEM像を図1(c)に示す。ピットの間隔は正確に $2\ \mu\text{m}$ であり、また微小球の直径の標準偏差も1.1%と非常に小さいため、微小球同士はほぼ完全に密着していることがわかる。さらに、一部にL字型や十字型に配列された部分があり、直角曲げの光導波路構造が形成されていることがわかる。なお、今回は単純な正方格子のパターンを用いたが、電子線リソグラフィのパターンを目的の光配線となるようにあらかじめ設計すれば、光集積回路として作製することが可能である。

この光導波路構造の内部を伝播する光を、導波路-集光モードNSOMを用いて観察した。図2(a)はその模式図であり、図2(b)に汎用の光学顕微鏡で撮った微小球連鎖構造の写真と伝播光のスペクトルの測定位置を示す。今回は光源として蛍光色素をドープした微小球を用い、紫色のレーザー光(波長405nm)を対物レンズから照射し、励起させた。その蛍光は微小球列内部を伝播し、Point AとPoint Bに接近させたNSOMの光ファイバースローブから集光し、測定した。

そのスペクトルを図3(a)に示す。水色で示されたスペクトルは蛍光色素の元々のスペクトルを表している。これに対して、Point Aで測定されたスペクトルには2本のピークが観察され、さらにPoint Bで測定されたスペクトルでは、そのうち片方のピークの強度が弱いことがわかる。

Mie理論によるシミュレーションと比較したところ、2つのピークは微小球内部の共振モード⁴⁾のうち、TM16とTM15にほぼ対応していることがわかった。Point AとPoint Bのそれぞれのスペクトルにピーク強度の違いがあるということは、それぞれの波長について伝播特性が異なることを示している。Point AとPoint Bの間には直角に曲がった部分があることから、この現象を引き起こす原因は、直角曲がり部における微小球間の共鳴条件の違いであると考えられる。この場合、TM15の成分は直角に伝播しているが、TM16の成分は伝播していないことを示している(図3(b))。このことは、微小球内部で共振モードを利用することで光の分波が可能であり、マイクロ分波器としての光学特性を有していることを示唆している。

波及効果と今後の展開

今回開発した微小球配列構造を用いた光配線法は、集積回路内部に複数個配置された中央演算装置(CPU)の間で、高速で情報をやり取りするための光導波路として応用が可能である。さらに、複数の波長を使い分けることで、行き先を指定した情報伝送も可能になると期待される。今後は、より高度な機能を持った光導波路について研究を進めていく。

問い合わせ先：

〒305-0047 茨城県つくば市千現1-2-1

独立行政法人 物質・材料研究機構

企画部 広報室 TEL:029-859-2026

研究内容に関すること：

独立行政法人物質・材料研究機構

量子ドットセンター ナノ物性グループ

主任研究員 三井 正

TEL：029-863-5418 FAX：029-863-5599

E-mail：MITSUI.Tadashi@nims.go.jp

半導体材料センター 半導体デバイス材料開発グループ

主席研究員 若山 裕

TEL：029-860-4403 FAX：029-860-4796

E-mail：WAKAYAMA.Yutaka@nims.go.jp

国立大学法人東北大学

多元物質科学研究所

教授 及川 英俊

TEL：022-217-6357 FAX：022-217-5645

E-mail：oikawah@tagen.tohoku.ac.jp

博士研究員 小野寺 恒信

TEL：022-217-5645 FAX：022-217-5645

E-mail：onoderat@tagen.tohoku.ac.jp

【用語解説】

1) エアートレンチ型クラッド

光導波路の曲がり部で、光が通るコアの外側に溝（トレンチ構造）を作り、クラッドとして空気を用いることでコアとの屈折率差を大きくする方法（参考文献①）。

2) フォトニック結晶

屈折率の異なる誘電体を用いて周期構造を作ることにより、この構造と同程度の波長を持つ電磁波に対して、特定の方向から完全に反射され、その方向からずれるにたい透過するようにした結晶。一般の結晶材料が電子波に対して分散特性をもつことに対比して、光の禁制帯を有する結晶という意味で名づけられた。

3) 近接場光学顕微鏡（Near-field Scanning Optical Microscope: NSOM）法

走査型プローブ顕微鏡の一種。トンネル電子の代わりに光（光子）を用いて画像化する。先鋭化した光ファイバーの先端に形成した微小開口や金属プローブを試料表面に近づけ（ ~ 10 nm）、全反射条件等で試料表面にまとわりついている近接場（エバネッセント場）を取り出して測定を行う。光の回折限界を超えた空間分解能での観察が可能である。導波路-集光モードは、光ファイバープローブを極小のプリズムカップラーとして用いることで、光導波路やフォトニクス結晶の内部を伝播する光そのものを直接観察する方法である（参考文献⑤）。

4) 微小球内部の共振モード

微小球の内部では、直交する光の共振モードとして、水平面内での周回と垂直面内での周回、そしてそれぞれに Transverse Electric (TE) と Transverse Magnetic (TM) の2つのモード、合わせて4つの種類がある。TE は周回面に対して電場が垂直な場合、TM は磁場が垂直な場合を表す。図 3 (b) は、TM (磁場が垂直、電場が平行) のモードを表しており、電場の成分が緑の矢印で示されている。光の波長が円周の整数倍に一致するとき共振モードとなる。本研究では蛍光色素の発光スペクトルの中に 15 番目と 16 番目のモードが含まれる。

【参考文献】

- ① 和田一実、ライオネルC. キマリング、応用物理、第 76 巻、p. 141-147 (2007).
- ② 五神 真、成田善廣、応用物理、第 71 巻、p. 671-677 (2002).
- ③ T. Onodera, Y. Takaya, T. Mitsui, Y. Wakayama, and H. Oikawa, Jpn. J. Appl. Phys. **47**, 1404-1407 (2008).
- ④ T. Mitsui, Y. Wakayama, T. Onodera, Y. Takaya, and H. Oikawa, Nano Lett. **8**, 853-858 (2008).
- ⑤ T. Mitsui, Rev. Sci. Instrum. **76**, 043703 (2005).

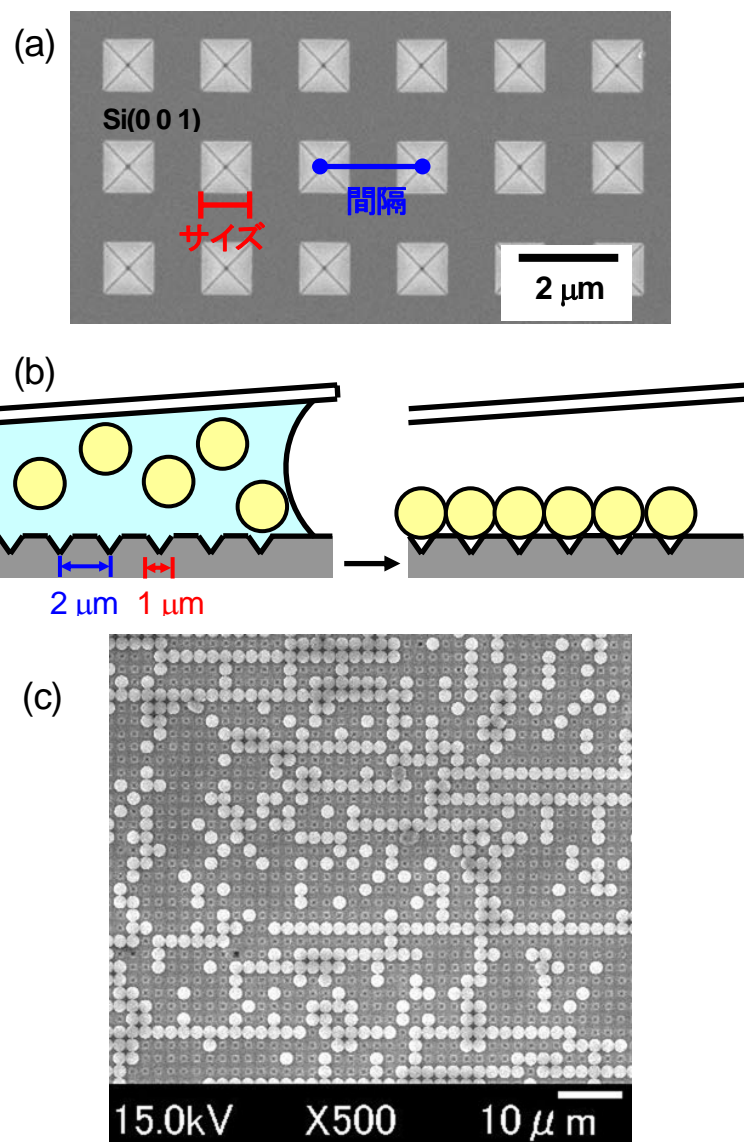


図1 微小球連鎖構造による光導波路

(a) パターニング基板の走査型電子顕微鏡像

(b) 毛細管現象を用いた自己組織化プロセス

(c) パターニング基板の上に配列されたポリスチレンの微小球列

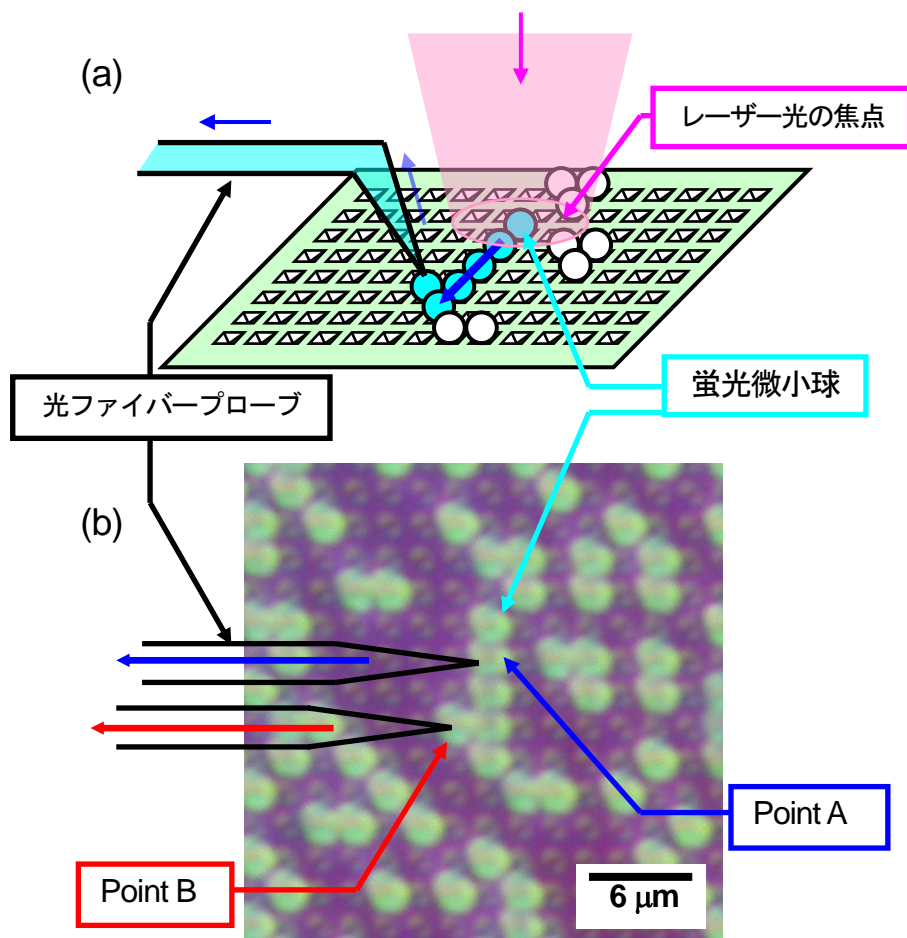


図2 微小球列の内部を伝搬する光の観察

(a) 導波路—集光モード近接場光学顕微鏡法の模式図

(b) 微小球連鎖構造の汎用光学顕微鏡像とスペクトルの測定位置

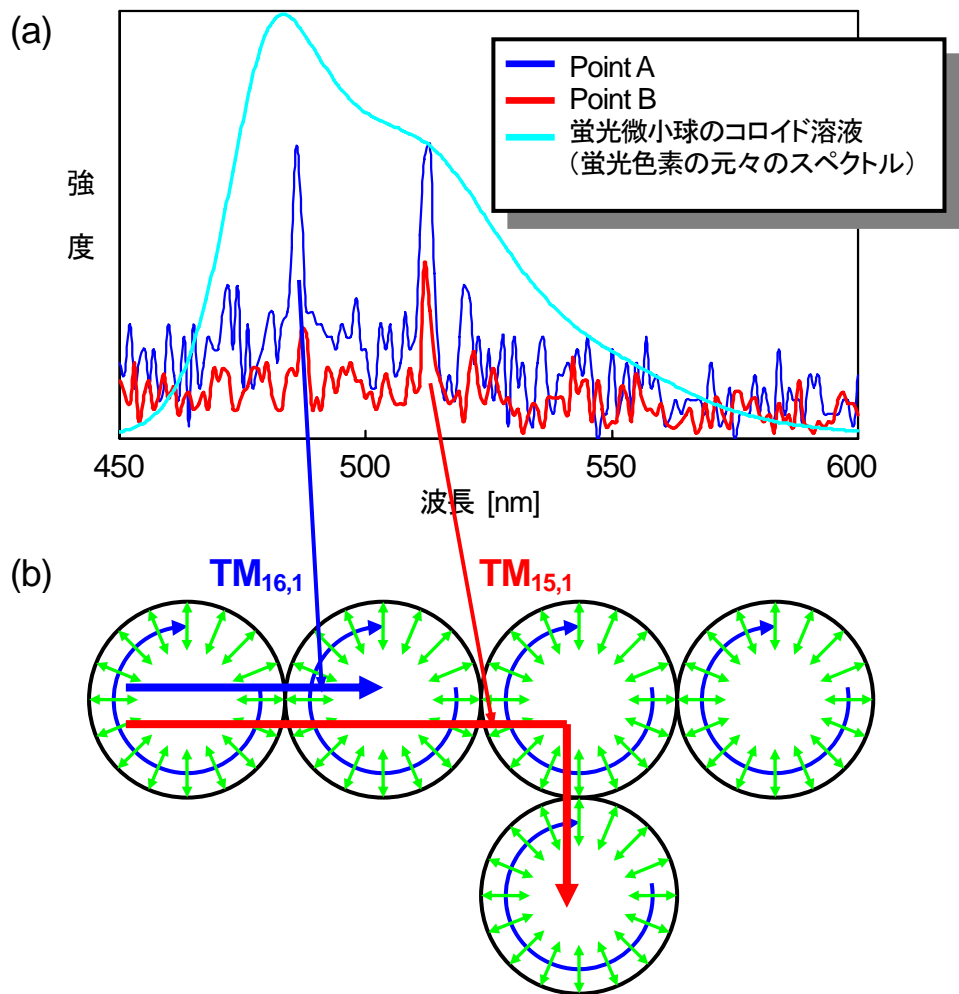


図3 マイクロ分波器としての光学特性

- (a) 導波路-集光モード近接場光学顕微鏡で測定した伝播光のスペクトル
- (b) 微小球内部での光の共振モードによる光の分波、波長選択の模式図