



2006年12月21日

世界初、光を1ナノ秒蓄積に成功、光速も5万分の1に

－最高性能のフォトニック結晶共振器で実現－

日本電信電話株式会社（以下NTT；本社：東京都千代田区、代表取締役社長：和田紀夫）は、フォトニック結晶と呼ばれる光の人工結晶を用いた微小共振器構造により、世界で初めて光を波長サイズの微小体積に1ナノ秒（ナノは10億分の1）以上蓄積し、光の伝播速度を空気中の5万分の1以下に減速し1ナノ秒以上の大きな遅延を実現することに成功しました。

従来の光技術では光を蓄積したり減速させることは非常に困難でしたが、NTTではこれまでで最も高い光閉じ込め効果を持つフォトニック結晶共振器のデザインを見出し、高度な微細加工技術によってこの共振器をベースとした素子を作製することにより本成果を実現しました。今回の成果は、低消費電力で動作する光情報処理チップ*1、さらには光子*2単位で動作する量子情報処理素子*3の実現に向けて大きな可能性を開くものです。

この成果は、2007年1月に創刊予定の英国科学誌Nature Photonicsに発表されます。

<開発の経緯>

Bフレッツに代表される光技術は超高速の情報伝送が可能で、現在の高度情報化社会を支える重要な技術ですが、光はアインシュタインの相対性理論の要請により原理的に静止させることが不可能であり、閉じ込めたり、蓄積あるいは減速することが難しいという短所があります。この特徴は光技術にとって大きな制約となって、光を使った高機能な情報処理や光による集積回路を困難にしているため、光を自由自在に閉じ込め、蓄積、遅延が可能な技術が強く望まれていました。蓄積に関してはリング型共振器など様々なタイプの小型光共振器が近年活発に研究され、また光の減速に関してはスローライト*4という呼び名で様々な材料、構造が国際的にも活発に研究され始めています。

フォトニック結晶とはナノ加工技術によってシリコンなどの誘電体に数百ナノメートル径の穴を周期的に配列したもので、天然の物質にはない特異な性質を示します。その一つは“フォトニックバンドギャップ”と呼ばれる、ある特定の波長域でのみ光を通さない性質で、これによってフォトニック結晶は光の絶縁体として働きます。この絶縁体としての性質を利用すると、光を強く閉じ込

めることが可能で、リング共振器などの従来の方法に比べはるかに小さい体積で長時間の光の蓄積や遅延を実現できる可能性を秘めています。

私たちは（以下に示すように）このフォトニック結晶にある設計上の工夫を施すことで、波長サイズの微小領域に光を強く閉じ込める超小型共振器素子を構成することができることを見出しました。そして高精度の微細加工技術を用いてこの素子をシリコンチップ上に作製し、この素子が従来の素子を大幅に上回る性能を持つ蓄積、遅延素子として機能することを実証しました。

<実験の内容>

今回実現した光共振器構造は、シリコン基板上に直径200ナノメートル程の穴を三角格子状に配列したフォトニック結晶をベースにしています（[図1\(a\)](#)）。NTTが考案した超小型共振器構造は、光絶縁体としてはたらく周期構造部分と直線状に穴をとり除いた線状欠陥部分から成ります（[図1\(b\)](#)）。穴のない領域はフォトニックバンドギャップが存在しないため光を通すことができます。このデザインの鍵は、この直線部分に隣接する穴の位置（図で色づけした部分）を部分的に3から9ナノメートル外側にずらしている点にあります。このわずかなシフトにより線欠陥部の幅が部分的に変調されて、段階的に変化する光の閉じ込めが生じます。一般的にこのような共振器においては、光の閉じ込めを不連続的に変化させた場合よりも段階的に変化させた場合の方が漏れ損失が小さくなることが知られていますが、数値計算結果によりこの共振器の漏れ損失が非常に小さく、波長と同程度のサイズの閉じ込めモードが幅変調部に形成されることがわかりました。

次にこの共振器と入出力導波路を集積化した素子構造をシリコンチップ上にナノ加工技術により作製し（[図1\(c\)](#)顕微鏡写真）、その光透過スペクトルを測定しました（[図2\(a\)](#)）。スペクトル測定から幅が1.3ピコメートルの非常にシャープな共鳴ピークが観測され、共鳴ピークの幅から、共振器の閉じ込めの強さを表す指標であるQ値^{*5}として120万という値が得られました。これは波長サイズの小型共振器としてはこれまでで最も高い値です。次にこの共振器への光入力を瞬間的にオフにした場合の出力光の時間変化を直接測定したところ（[図2\(b\)](#)）、共振器中に光が約1ナノ秒間以上蓄積されていることが確認できました。さらに光パルスを入力した場合、共振器によって出力光が1.45ナノ秒遅延することがわかりました（[図2\(c\)](#)）。これは共振器中で光の伝播速度が空気中の5万分の1以下になっていることに相当します（この素子長は8ミクロン程度ですが、同じ遅延時間の間空気中を伝播させれば光は約0.5メートルも伝播するはずです）。ここで得られた光の蓄積・遅延時間は波長サイズの人工構造としてはこれまでで最も長く、5万分の1という光の減速効果は従来の報告よりも二桁以上大きくあらゆる人工誘電体構造によるスローライト材料中で最も大きなものです。

＜今後の展開＞

光を波長サイズの微小体積に閉じ込め、蓄積や減速が自由自在にできれば、高機能な光処理素子や大規模光集積回路、超低消費電力の情報処理回路など従来の光技術では困難と考えられてきたものが実現すると期待されています。つまり、これまでにエレクトロニクス技術によって担われてきた処理部分をフォトニクス技術で置き換えていくことが可能になっていくと考えられます。NTT研究所では今回実現した超小型の光蓄積、遅延素子を、今後、光スイッチなどの処理素子に応用し、素子の超小型化と超低消費電力化を実現することを目指しています。また、構造上の工夫を加えることによって、さらに長い遅延時間を持つバッファ機能や、光子蓄積型の光メモリ機能を実現することも目指します。究極的には、これらの技術を組み合わせることによって、超低消費電力で動作する光情報処理チップ、さらには光子単位で動作する量子情報処理回路などが実現されることが期待されます。

用語解説

* 1 光情報処理チップ

光のまま複雑な情報処理を行うチップ。従来の情報処理は、光ファイバーで送られた超高速光信号を一旦電気信号に変換し、LSIのような電気信号処理回路で処理を行っているが、超高速光信号を光のまま情報処理することにより、低消費電力で高速な情報処理チップが実現できると考えられている。

* 2 光子

光の量子単位で、これ以上に弱い光強度は量子力学の要請により存在できない。例えば光通信で用いられる1.5ミクロンの波長では、おおよそ10の19乗分の1（千京分の1）ジュール。

* 3 量子情報処理素子

光子が持つ光の量子的な性質を利用して、量子計算、量子暗号などに代表される特殊な高速演算を行う情報処理素子。光子単位で動作し、光の量子的情報を壊さない集積素子が必要とされる。

* 4 スローライト

光の伝播速度を遅くして、大きな遅延時間を持つ遅延素子や相互作用を増強して低消費電力の光処理素子を作ることを目的に、現在様々な材料、構造がスローライトという分野を形成して近年活発に研究されている。極低温に冷却した原子ガスの特殊な励起状態を用いたものや、フォトニック結晶のような人工誘電体構造を用いたものが代表例。

* 5 Q値

共振器の閉じ込めの強さを表す指標。共振スペクトルの中心周波数を周波数幅で割ったものに相当し、閉じ込められているエネルギーがどれだけ長い時間共振器内に閉じ込められているかを意味している。

- [図 1\(a\) フォトニック結晶作製プロセスおよび作製した結晶の電子顕微鏡写真](#)
- [図 1\(b\) 幅変調型線欠陥フォトニック結晶共振器のデザイン](#)
- [図 1\(c\) 幅変調型線欠陥フォトニック結晶共振器素子の構造と電子顕微鏡写真](#)
- [図 2\(a\) 透過スペクトル測定結果](#)
- [図 2\(b\) 蓄積時間測定結果](#)
- [図 2\(c\) 共振器の遅延時間測定結果](#)

<本件に関する問い合わせ先>
N T T 先端技術総合研究所
企画部 広報担当
為近、甕(もたい)、飯塚
Tel: 046-240-5152
<http://www.ntt.co.jp/sclab/contact>

NTT ニュースリリース 