

## チップ上の微小点に保存した光の瞬時転送に成功 —量子情報光チップ等の実現に向けた一歩を達成—

京都大学工学研究科電子工学専攻 野田進（教授）、鴻池遼太郎（大学院学生）、浅野卓（准教授）等は、フォトニック結晶チップ上の微小点に保存した光を、“任意のタイミングで”、別の微小点に、“一方向かつ高効率に”（>90%）瞬時に転送可能な新しい光制御技術の開発に成功しました。本成果は、5月20日付（日本時間）の米国科学誌 Science 系のオンラインジャーナル「Science Advances」に掲載されました。

将来の量子情報等の高度な情報処理を可能とする光チップを実現するためには、光を微小点に保存するためのナノ共振器の開発、ナノ共振器に保存した光と電子系の相互作用等に基づく光量子演算ユニット等の形成、およびそれらを集積し、複数の演算ユニット間での情報転送の実現など、様々な課題が存在します。これまで、我々は、これらの課題を念頭に、光の波長程度の周期的屈折率分布をもつ独自のフォトニック結晶を用いて、

- 1) 光を微小点に長く保存することの出来る高Q値ナノ共振器の実現
- 2) ナノ共振器への光の出し入れや光メモリー動作の実現
- 3) ナノ共振器の集積と強結合状態の形成

等の研究を進めてきました。

今回、上記、1)-3)に続く展開として、高Q値ナノ共振器に保存した光を、制御光の照射により、別の離れたナノ共振器に、“任意のタイミングで”、“高効率に”転送することに成功しました。この成果は、光量子演算ユニット間の情報転送等を可能するもので、上記の全体目標達成に向けた一歩と言えます。また、これらを複数個集積することで、他の様々な機能の実現も期待されます。

得られた現象は、図1に示すように、ナノ共振器A（＝共振周波数 $\omega_A$ ）に蓄積した光（＝周波数 $\omega_A$ ）を、別のナノ共振器B（＝共振周波数 $\omega_B$ ）へと転送させるものです。転送の際には、共振器AとBの間に位置する第3のナノ共振器C（＝共振周波数 $\omega_C$ ）へ制御光の照射を行い、その共振周波数 $\omega_C$ を $\omega_C \ll \omega_A$ の状態から $\omega_B \ll \omega_C$ へと断熱的に変化させ、これにより、光を共振器Aから共振器Bへと一方向に、高効率（>90%）に、瞬時に（<100ps）転送することに成功したもので、物理的にも極めて興味深いものであります。

この成果の一部は、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）および日本学術振興会（JSPS）の援助を受けました。

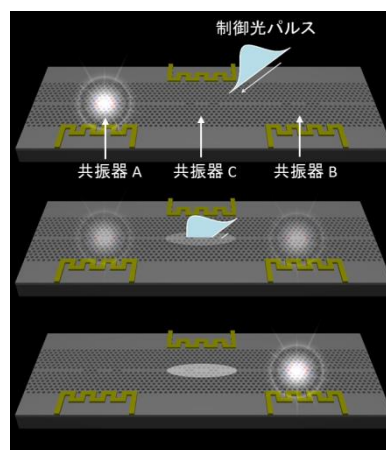


図 1: チップ上の微小点に保存した光の瞬時転送の模式図

詳細説明：

## 1. はじめに：

概要でも述べましたように、量子情報処理などの高度な情報処理を、光を用いてチップ上で実現していくためには、

- ・ 光をチップ上の一点に留め、物質との相互作用によるビット演算などの処理を行う
- ・ 留めた光を別の場所へと瞬時に転送し、情報伝達を行う

などを実現していくことが重要となります。光をチップ上の一点に留めて、保存し、物質と相互作用させることは、次項の原理でも説明するように、フォトニック結晶と呼ばれる光の波長程度の周期的屈折率分布をもつ光ナノ構造体とその中に形成したナノ共振器により可能となりつつあります。また、その中に量子ドットなどの電子系を導入して、光と電子系の相互作用に基づく光量子演算ユニットを形成することも可能となりつつあります。次の重要なステップは、保存した光の転送技術です。今回の成果のポイントは、このチップ上の光の瞬時転送を実現したことにあります。以下に、その原理と実験結果を示します。

## 2. 原理：

まず、光をチップ上の一か所に保存するためのフォトニック結晶およびその中に形成したナノ共振器について説明します。フォトニック結晶は、図 2(a)に示すように、光の波長程度の周期性をもつナノ構造で、ある特定の周波数範囲の光の存在を許さないことを特徴とします。(半導体との類似性をもっています。)ここで、わざと、同図(b)に示すように、その一部に周期性を乱すと、乱された部分において、光の存在が許されるようになり、その部分に光を保存することが可能となります。この乱した部分では、光が周りのフォトニック結晶から多重反射を受け、共振しながら保存されるので、微小共振器、またはナノ共振器と呼ばれることとなります。

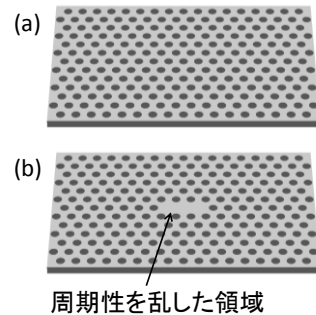


図 2: (a) フォトニック結晶および (b)その中に形成したナノ共振器の模式図

さて、本題である、1つのナノ共振器 A (共振周波数： $\omega_A$ ) に保存された光を、チップ上の別の離れたナノ共振器 B (共振周波数： $\omega_B$ ) に転送する方法について考えます。我々が見出した方法は、概要にも示したように、A と B の中間に、別の共振器 C を用意し、C の周波数 ( $\omega_C$ ) を変化させることで、A に保存した光を B へと転送するものです。

この現象は、連成振り子の考え方を発展させることで説明できます。振り子は、光の共振器に相当するものと考えられます。まず、簡単のために、2つの振り子を連結した図 3 に示すような連成振り子を考えます。まず

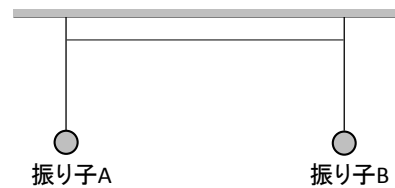


図 3: 連成振り子の模式図

2つの振り子をつるした糸の長さを同じにした場合を考えます。この場合、2つの振り子 A,B のもつ、ももとの振動周波数  $\omega_0$  は、同じ周波数となります。この場合、2つの振り子を連結すると、結合した振り子は、ももとの振動周波数  $\omega_0$  から、少しずつ離れた2つの周波数  $\omega_0 - \delta\omega$ 、 $\omega_0 + \delta\omega$  で振動するような結合振動をするようになります。 $\omega_0 - \delta\omega$  の周波数の振動状態は、2つの振り子が同じ方向に振れて振動するもの(図 4(a))、 $\omega_0 + \delta\omega$  の周波数の振動状態は、2つの振り子が逆方向に振れて振動するもの(図 4(b)) となります。 $\omega_0 - \delta\omega$  の振動状態を励振するためには、両方の振り子を、同じ方向に少し持ち上げて離して振動を開始させることで可能です。この場合、2つの振り子は同じ方向に振動する状態のみが励起され、2つが同じ方向に振動し続けます。一方、それぞれの振り子を逆方向に少し持ち上げて、振動を開始すると、逆方向に振動する状態(周波数  $\omega_0 + \delta\omega$  の振動状態) が励起されその振動状態が続きます。

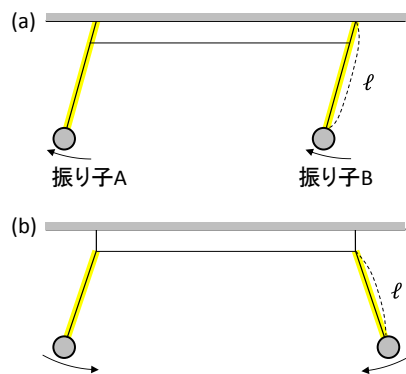


図 4: 結合した連成振り子の2種類の振動状態の模式図

一方、上記において、1つの振り子 A のみを持ち上げて、振動を開始させることを考えます。このとき、もう片方の振り子 B は、初期変位が零になっていますが、これは、実は、A と同じ向きと A と逆向きの変位を重ね合わせて励起することに相当し、図 4(a), (b) を同時に励振したことになります。この場合、それらの振動周波数  $\omega_0 - \delta\omega$ 、 $\omega_0 + \delta\omega$  が異なるので、同じ方向に振れる振動状態と逆方向に振れる振動状態が、少しずつタイミングをずらしながら、重なり合うので、うなりのような現象が生じ、結果として、まず図 5(a) のように A のみが振動している状態から、やがて、A の振動が徐々に減衰し、B の振動が徐々に大きくなり、やがて、B のみが振動するようになります(図 5(b))。さらに時間が経つと、今度は B の振動が徐々に減衰し、また、A に振動が移っていき図 5(a)

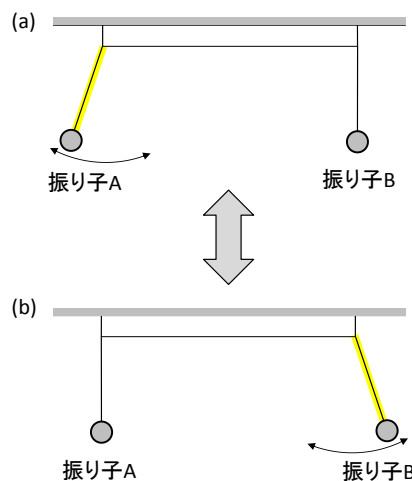


図 5: A と B が交互に振動していく連成振動状態の模式図

の状態に戻る、というように、A と B が交互に振動していくような振動状態となります。(良く話題に登る振り子の連成振動は、この場合を指すことが多いです。) この場合は、A から一旦 B に振動状態が遷移しても、また、A に振動状態が戻ってくるので、振動の転送が出来たとは言えません。

つまり、上記の振動の行き来は、 $\omega_0 - \delta\omega$ 、 $\omega_0 + \delta\omega$  の2つの振動状態を同時に励振し、2つの振動状態のうなりにより起こります。したがって、2つの振動状態が同時に駆動されないように、気をつけなければよいことになります。

では、どうするかについて説明いたします。  
 まず、振り子AとBの振動周波数を一緒にするのは  
 ではなく、最初、2つの振動数を十分に離しておいて、  
 2つの振動状態が結合しないようにしておきます。  
 つまりAの振り子の糸の長さに比べ、Bの糸の長さを  
 十分に長くしておく（すなわち、Bの振動周波  
 数を十分低くしておく）と、AとBの結合は最初起  
 りません。この状態で、Aのみを振動させると、B  
 は振動せず、当然、振動状態の行き来は起りませ  
 ん。この様子を図6(a)に示します。この状態で、B  
 の振り子の長さを徐々に短くし（すなわち、Bの周  
 波数を高くし）、Aの振動周波数に近づけていくと、  
 AとBが結合を開始するようになります。この際、  
 図4に示した両者の2つの結合状態のうちの一つ〔  
 ここでは、図4(b)〕が励振されるようになります〔  
 図6(b)〕。この際、もうひとつの結合状態は励振され  
 ないので、振動のうなりは生じず、振動状態の行き  
 来は生じません。さて、この状態から、そのまま、  
 Bの振り子の糸の長さを、さらに短くしていくと、  
 振り子A、Bは、一旦、形成された結合状態を維持し  
 ようとします。この結合した結合振  
 動状態を維持しつつ、振り子Bがより周波数の高い  
 振動状態に移動していくと、周波数の低い振り子  
 Aの振動が、振り子Bの振動についていけなくなり、  
 やがて、Aの振動が停止し、B  
 のみの振動状態へと収斂していくこととなります〔  
 図6(c)〕。よって、振り子Bの糸を短くするにつ  
 れて、振り子Aのみの振動状態が、やがて、振り子  
 Bのみの振動状態へと変化し、  
 AからBへと振動状態を一方向へ転送することが可  
 能となります。

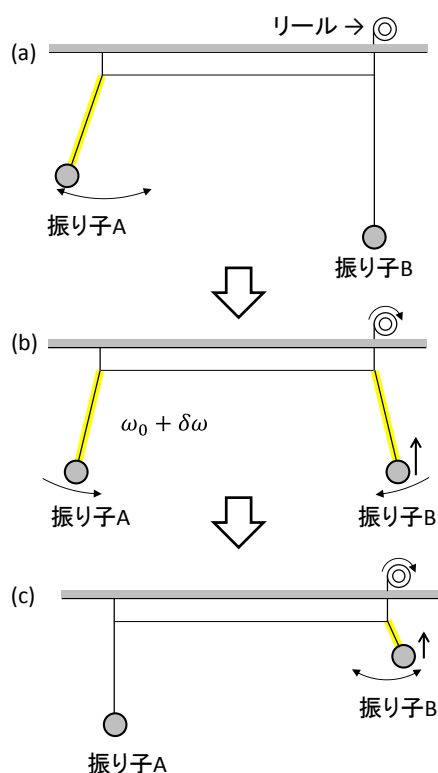


図 6: 振り子 B の振動周波数を時間的に変えた場合の振動状態の変化

以上の考えは、連成振り子 A と B の中間に、さらに振り子 C を導入し(図 7)、C の周波数を徐々に変えることで、A の振動状態を、C を介して、B へと移すことへと発展できます。今回の光転送は、まさに、この考えを用いて、行ったものであります。

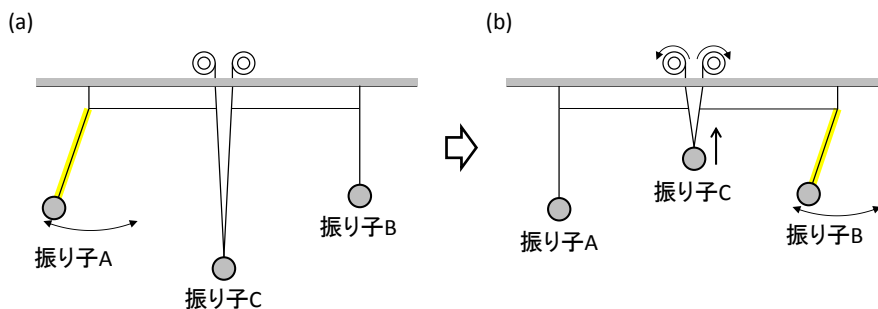


図 7: 3つの連成振り子において、振り子 C を変化させた際の振動状態の遷移

### 3. 試料作製と光転送実験

作製した試料の構造を図 8 (a)に示します。作製においては、厚さ 220 nm のシリコン薄板上に、三角格子状に空気孔を周期的に並べた 2 次元フォトニック結晶を形成しました。また図 8 (a)中に示したように、3つの光ナノ共振器 A, B, C を同一チップ上に形成しています。ナノ共振器 A と C, C と B の間には、それらの連成振動を可能とするための両端を閉じた導波路が形成されています。

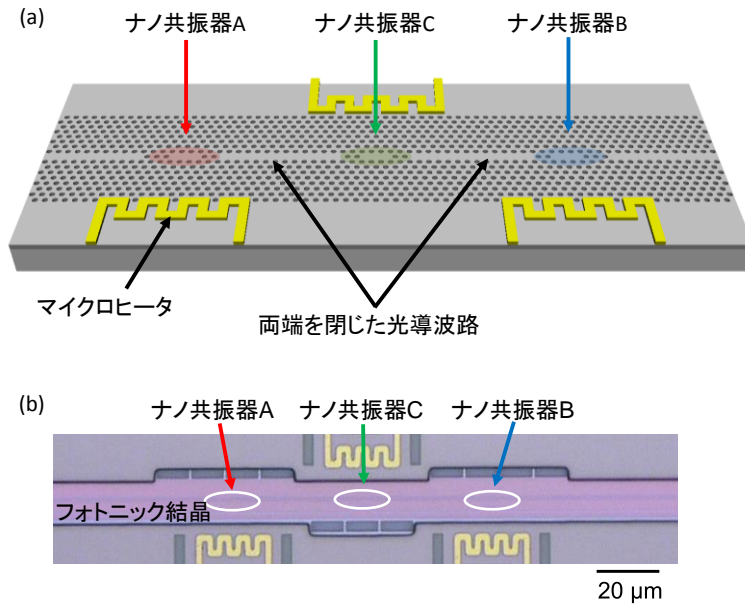


図 8: 作製した試料の (a) 模式図および (b) 顕微鏡画像

また、それぞれのナノ共振器の共振周波数を微調整するために、ナノ共振器の付近にはマイクロヒータが集積されています。実際に作製したサンプルの顕微鏡像を図 8 (b)に示します。同図の中央に見える明るい紫色の領域がフォトニック結晶を形成した領域であり、同図中に示す 3つの箇所にナノ共振器 A~C を形成しました。なお、共振器 A と B の間は、物質内での光の波長の 100 倍以上離れております。

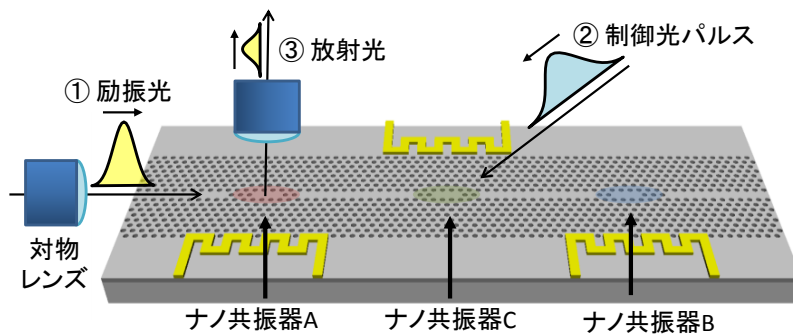


図 9: 光転送実験の模式図

光転送実験の模式図を図 9 に示します。まず、レーザー光源からの光パルスを、対物レンズを使用してサンプルの左側の導波路に入射しました(図 9 中の①)。この励振光の周波数は共振器 A の共振周波数に合わせているため、光パルスが共振器 A に到達すると、共振器 A を励振し、そこに捕捉されます。次に、任意のタイミングで、共振器 C に波長約 820 nm、時間幅約 71 ピコ秒の制御光パルスを照射しました(図 9 中の②)。この制御光パルスの持つエネルギーによって、シリコン中に電子-正孔対が瞬時に生成され、キャリアプラズマ効果とよばれる効果によって、共振器 C の屈折率が低下します。屈折率が低下することは、光路長が短くなることに対応するため、従って共振器 C の共振周波数が高くなります。これにより、あたかも振り子において糸の長さを時間的に変えるように、制御光パルスの照射によって共振器の共振周波数を時間的に、かつ瞬時(数十ピコ秒程度)に変えることができます。これにより、振り子における振動状態の転送と同様の原理で、共振器 A に捕捉されていた光が、制御光パルスの照射タイミングで共振器 B へと転送されます。この転送によって共振器 A 内部の光エネルギー(光振幅)は低下し、共振器 B 内部の光エネルギー(光振幅)は増加します。それぞれの共振器からは、ごくわずかな光が「放射光」という形で試料の垂直方向へと漏れ出しています(図 9 中の③)。我々は、この、共振器 A および B から漏れだす放射光の時間変化を「時間分解測定」と呼ばれる方法を用いて測定しました。

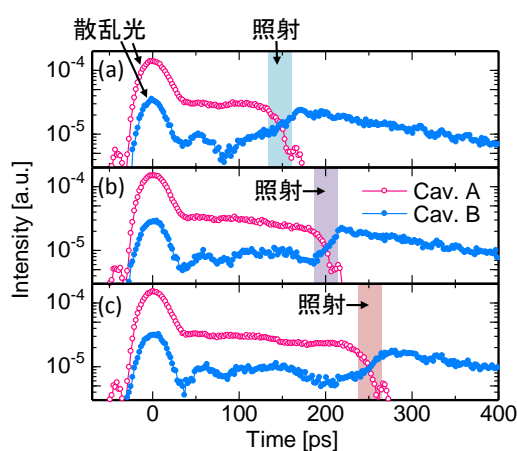


図 10: 光転送実験の測定結果。それぞれ制御光パルスの共振器 C への照射タイミングが(a) 150 ピコ秒、(b) 200 ピコ秒、(c) 250 ピコ秒程度に設定してある。

その実験結果の一例を図 10 (a)に示します。同図中に「散乱光」と示したパルス状の信号は、共振器 A を励振する励振光の一部が散乱して測定されてしまったもので、光転送とは関係がありません。時刻 50~130 ピコ秒あたりを見ると、共振器 A の振幅が、共振器 B よりも十分に大きく、共振器 A に主に光が捕捉されていることが分かります。同図中に「照射」と示した網掛け部分(時刻 150 ピコ秒あたり)で、共振器 C に制御光を照射しました。このタイミングで、前述の原理により光が共振器 B に転送され、時刻約 170 ピコ秒から 400

ピコ秒程度まで、共振器 B のみに光が捕捉されている様子が確認できます。よって、共振器 A に保存していた光を、瞬時(数十ピコ秒の間)に、チップ上の共振器 B へと転送させる操作に成功したといえます。また、共振器 C に制御光を照射するタイミングを変えた場合の測定結果を同図(b)および(c)に示します。これらの結果から、チップ上の離れた共振器 A, B の間で、任意のタイミングで光を転送できることがわかります。さらに、実験結果から光転送の効率は最大で 90%程度と見積もられ、高い効率をもつことがわかりました。

#### 4. まとめと今後：

今回、チップ上の微小点に保存した光を、任意のタイミングで、他の共振器へと瞬時に転送する操作を初めて実現しました。本成果により、チップ上の光量子演算ユニットの間で、自在なタイミングで情報転送を行う原理が実証できたため、将来的な、光を用いた量子情報処理デバイス等への展開が期待されます。また、本成果を、より多数の光ナノ共振器の結合系に適用することにより、複数光パルスのバッファリングや、ルーティングといった新規光デバイスへの波及効果も期待されます。

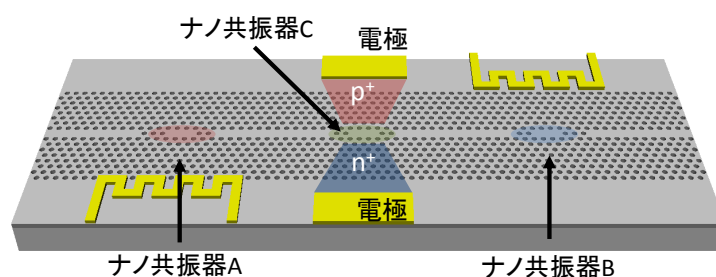


図 11: 電氣的制御回路を集積した光転送デバイスの基本単位

今後は、基板であるシリコン上にフォトニック結晶とともに電気制御回路を集積することで、電氣的制御によって光の転送操作を行うことを目指します。具体的には、図 11 に示すように共振器 C の周辺に面内 p-i-n 構造を形成し、電流の注入/引き抜きによって局所屈折率を変化させ、光の転送操作を行います。このような電氣的な制御回路はフォトニック結晶とともにチップ上に集積して形成できるため、これにより、光ナノ共振器およびその制御機能の大規模集積化が可能となると期待されます。

また、将来的には、光を用いた量子情報処理チップ等の実現に向けて、ナノ共振器に対して電子系を導入することで光量子演算ユニットを形成し、今回実証した手法を用いて、それらの間での情報転送を実証していくことも重要となります。