

## フォトニック結晶による スローライト生成

Slow Light Generation in Photonic Crystal

馬場俊彦 森 大祐



### Abstract

伝搬が極端に遅い光（スローライト）は、光信号の圧縮、バッファ、畳込み積分演算、ビームフォーミング、吸収・利得や非線形の増大など、様々な効果をもたらす。このような光は、材料や構造の極めて大きな分散を利用することで実現される。特にフォトニック結晶導波路は室温で容易にスローライトを発生させるので、種々のデバイス応用が期待されている。本稿ではスローライトの低速化と周波数帯域の関係など、本質的な課題を解説しながら、スローライトデバイスの可能性を議論する。

キーワード：フォトニック結晶， EIT， スローライト， 光遅延線， 光バッファ， 光メモリ

### 1. ま え が き

真空中の光速  $c \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$  は、1 ns で長さ 30 cm を通過するという著しい速さである。最近、この速度を極端に遅くする研究が、スローライトというキーワードで注目されている。もし光速を自由に制御できれば、光信号の到達を遅くする遅延線、光信号を光のままに蓄積する光バッファや光メモリ、畳込み積分など時間操作を必要とする光演算、アレーアンテナのような光ビームフォーミングなど、多くの応用が可能になる。またスローライトでは、遅い分だけ光信号が空間的に圧縮される。これを利用すれば、様々な光デバイスが縮小できる。同時に光エネルギーが停滞すると光と物質との相互作用が強まるので、例えば単位長さ当りの光吸収や利得、位相変化、非線形効果、等を大幅に増やすことができる。

スローライトを実現する方法として後述する2種類が研究されているが、本稿では光学波長オーダの多次元周期性を持つ微細構造＝フォトニック結晶（Photonic Crystal, 略して PC）による方法を主に紹介する。特にスローライトで一般的に問題となる低速化と周波数帯域の排他的な関係、及び大きな分散による光信号ひずみや入射端での反射損が、PCの最適化によって解決できることを説明する。

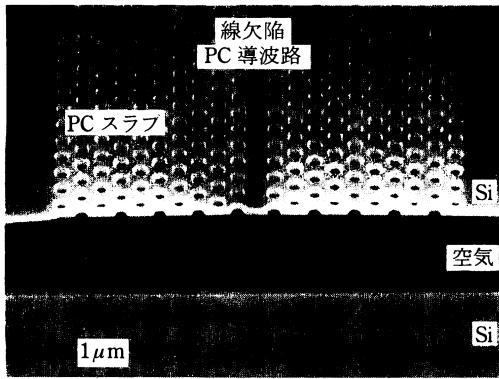
### 2. スローライトの生成

光が通過する媒質の屈折率を  $n$  とすると、光速は  $c/n$  となる。つまり  $n$  は光の減速度を表す指標ともいえる。ただしここでの光は単一周波数の連続波である。一方、パルス状の光信号に対しては、 $n$  の代わりに群屈折率  $n_g$  を用い、信号の速度を群速度  $v_g \equiv c/n_g$  で表すのが一般的である。 $v_g$  は光の周波数  $\omega$  と波数  $k$  を用いて  $(dk/d\omega)^{-1}$  で与えられる。真空中では  $k = \omega/c$  という比例関係があるので  $v_g = c$  となるが、特殊な分散を持つ材料や構造の中では  $v_g$  が大きく変化する。

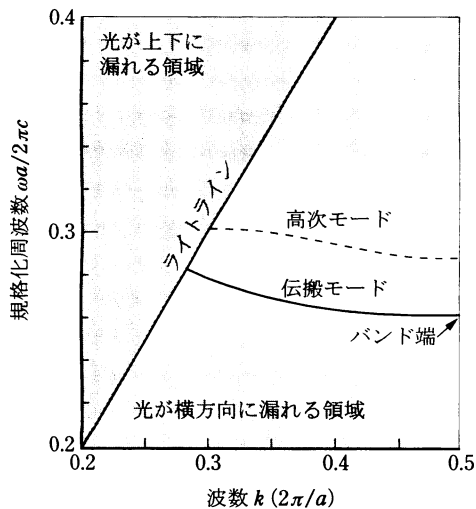
スローライトを発生させる現象として1990年代から研究されてきたのは、電磁誘導透過(Electromagnetically Induced Transparency, 略して EIT)である<sup>(1)</sup>。ここでは、三つの孤立した電子準位を持つ気体や固体結晶が用いられる。ここに基底準位から励起準位への遷移周波数を持つ励起光を入射させると、励起された電子と励起光の結合によって、励起準位が分裂する。更に別の基底準位からの遷移周波数を持つ信号光を入射させると、分裂した準位では吸収が起るが、その中間周波数では吸収がなくなり、光の透過が起る（これが EIT の名前の由来である）。この周波数では、クラマース・クロネツヒの関係に基づいて、吸収の変化に伴う急激な屈折率変化が起る。つまり極めて大きな分散が生じ、これによって例えば  $v_g = \text{数 mm/s}$ 、 $n_g > 10^{10}$  といった驚異的なスローライトが実現される<sup>(2)</sup>。

一方、本稿のテーマである PC、特に PC 導波路でも同様の  $v_g$  が期待できるので、より詳しく説明したい。

馬場俊彦 正員 横浜国立大学大学院工学研究院知的構造の創生部門  
E-mail baba@ynu.ac.jp  
森 大祐 横浜国立大学大学院工学研究院知的構造の創生部門  
Toshihiko BABA, Member and Daisuke MORI, Nonmember (Graduate School of Engineering, Yokohama National University, Yokohama-shi, 240-8501 Japan).  
電子情報通信学会誌 Vol.89 No.6 pp.494-499 2006年6月



(a) SOI 基板上に作製された導波路



(b) 三次元計算されたフォトニックバンド

図1 PC 導波路とフォトニックバンド

PC は 1990 年代前半から光デバイスの新しい母体として注目され、2000 年以降、世界的に研究されるようになったフォトニックナノ構造である。ここでは電子のバンド理論を光学理論と融合させたフォトニックバンドの開発により複雑な構造や光学現象が設計できるようになり、更に光の絶縁体となるフォトニックバンドギャップ (Photonic Band Gap, 略して PBG) が発見されたことで、ナノレーザーや光 IC チップを実現する夢の技術として期待されるようになった。本稿以外の多くの書籍、特集記事にも見られるように、近年、基盤技術が急速に向上している<sup>(3),(4)</sup>。

これまでに研究された PC の具体的な構造は非常に多彩である。ただし薄膜に孔を二次元配列させた、いわゆる PC スラブが、作製の容易さと効果の大きさを両立する構造として、近年の研究の定番になっている。ここでは光が全反射によって上下方向に閉じ込められ、横方向に対して PBG の作用を受ける。均一な PC スラブに一系列の線欠陥 (孔がない領域) を導入すると、光導波路として機能する<sup>(5)</sup>。作製された PC 導波路を図 1 (a) に示す<sup>(6)</sup>。ここでは LSI 用の Silicon On Insulator (SOI) 基板

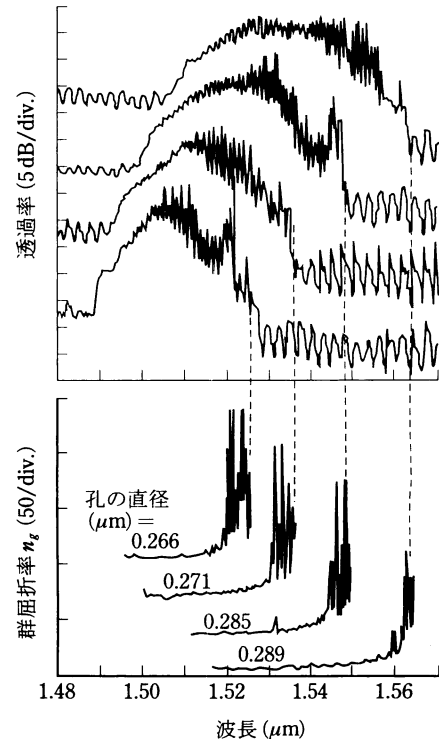


図2 孔の直径を様々に変えた試料に対して測定された透過スペクトル (上) と群屈折率スペクトル (下)

が転用され、電子ビーム露光とエッチングという単純なプロセスが用いられる。図 1 (b) はこのような構造に対するフォトニックバンドであり、横軸は導波路方向の波数  $k$ 、縦軸は規格化周波数  $\omega a/2\pi c = a/\lambda$  を表している<sup>(7)</sup>。ただし  $a$  は孔の周期、 $\lambda$  は  $\omega$  に対応した真空中の波長である。実線は主要な伝搬モードのバンドを表しており、バンド端とライトライン (上下に光が漏れ出す条件。上下が空気るときには  $\omega/c = k$ ) に挟まれた帯域で、光伝搬が起ることを示している。実際に図 1 (a) の素子では、スラブの厚さを 200 ~ 300nm、 $a$  を 400 ~ 450nm としたとき、1.55  $\mu\text{m}$  付近の波長で光伝搬が観測される。

ここで注目すべきはバンド端でバンドの傾斜が零になることであり、群速度の表式より分かるように、これは  $v_g = 0$  を意味する。このような現象は、PC のブラッグ反射条件によって光が前進と後退を繰り返すことに起因する。よって同様効果はあらゆるブラッグ反射構造に起り得るが、3. で述べる制約から顕著なスローライトは PC 導波路などでしか得られない。図 2 は実際に測定された PC 導波路の透過スペクトルを示している。スペクトルには導波路内部でのファブリペロー共振に由来する細かい振動が見られるが、バンド端に向かってピーク間隔  $\Delta\lambda$  が徐々に狭くなっている。導波路長を  $L$  とすると  $n_g = \lambda^2/2L\Delta\lambda$  という関係があるので、これより  $n_g$  を見積もることができる。図 2 に示すように、バンド端近くでは 100 以上の大きな  $n_g$  が現れている。同様のスローライトは、既に幾つかの機関から報告がある<sup>(8)-(11)</sup>。ただ

し更に大きな  $n_g$  を観測するのが難しいのは、次に述べる課題のうち、透過率の低下が主な原因と考えられる。

### 3. スローライトの課題

EIT と PC のスローライトは全く異なる原理に基づいているが、前者が材料分散、後者が構造分散というように、特殊な分散特性を用いる点では共通している。したがって、課題にも共通点がある。

まず群速度の表式から  $n_g$  は

$$n_g = c \frac{dk}{d\omega} = \frac{d(n\omega)}{d\omega} = n + \omega \frac{dn}{d\omega} \quad (1)$$

となる。ここでの  $n$  は、EIT では材料の屈折率、PC 導波路では伝搬モードの等価屈折率である。 $n_g$  が  $n$  よりもはるかに大きい状況では

$$n_g \cong \frac{\Delta n}{\Delta\omega/\omega} \quad (2)$$

となる。 $\Delta n$  を固定値と考え、 $n_g$  を極端に大きくするには規格化帯域  $\Delta\omega/\omega$  が狭いことが必須となる。例えば  $\Delta n = 0.1$  のとき、 $\lambda = 1.55\mu\text{m}$  (周波数 194THz) の光の信号帯域 40GHz に期待される  $n_g$  の最大値は 485 となる。また、EIT で得られる  $n_g > 10^{10}$  は 1.9kHz 以下の帯域でしか実現し得ない。つまりスローライトの低速性と利用できる帯域には、排他的な関係がある。ただし  $\Delta n$  が変れば当然、 $n_g$  も変化する。むしろ EIT や PC 導波路の役割は、大きな  $\Delta n$  を実現することである。詳しい説明は省くが、仮にほとんど傾斜のないバンドが実現できたとすると、バンド端とライトラインに挟まれた範囲で  $\Delta n$  は約 1 となる。しかし図 1 (b) のような実際のバンドでは  $\Delta n$  がこの数分の一になるので、上の  $n_g$  が妥当な値となる。2. ではあらゆるブラッグ反射構造のバンド端で  $v_g = 0$  になると述べたが、よくある構造、例えば屈折率コントラストの小さな光学多層膜や刻みが浅い回折格子では  $\Delta n$  が非常に小さい。このため、同じ  $\Delta\omega/\omega$  に対して  $n_g$  ははるかに小さくなる。

次に、分散による信号ひずみも解決すべき課題である。一般に  $v_g$  が周波数に対して変化する二次分散 (群速度分散ともいわれる) があると、信号波形が劣化する。EIT では分裂準位の間周波数で二次分散が零になるので、この問題に関する議論は少ない。一方、PC 導波路は、図 1 (b) のように伝搬モードが下に凸のバンドを持つので、バンド端付近では例えば 100ps/nm·mm という光ファイバの  $10^6$  倍もの大きな二次分散が生じる。実際の計算機シミュレーションや実験においても、半値幅 1ps 以下の超短パルスを送入しようとすると、出射端ではほとんど原形をとどめないほどパルスが変形される<sup>(10)</sup>。

また  $n_g$  が大きく異なる境界面では、一般に強い反射が起る。一方の媒質を空気、他方を  $n_g$  の材料または構造としたとき、境界面当りのパワー反射率はおおよそ  $[(n_g - 1)/(n_g + 1)]^2$  となることが知られている。よって  $n_g \gg 1$  ではパワー透過率が  $4/n_g \ll 1$  となり、透過率が著しく低下する。図 2 において、バンド端に向けて透過率が急激に減少するのはこれが一因と考えられる。

更に個別の課題を見ると、EIT では電子の準位を安定化させるために  $\mu\text{K}$  以下の極低温が要求され、遷移周波数に完全に整合した励起光や信号光を用意する必要もある。よって装置全体は大きくなる。PC 導波路では、構造のわずかな揺らぎがスローライトに対して大きな損失を生む<sup>(12)</sup>。図 2 のバンド端近くでの透過率の落ち込みはここにも原因がある。ただし PC 導波路のスローライトは室温で発生し、小型の固体デバイスとして利用できる点が有利である。

### 4. 広帯域化、分散補償、反射低減

3. で述べた帯域制限は本質的に打破できないが、所望の帯域内で分散補償されたスローライトが最大限利用できれば、様々な応用にとって大きな意義がある。ここでは、PC 導波路によってどのようにそれを実現するかを説明する。

図 3 は、チャープ構造 PC 導波路を使ってバンドを滑らかにシフトさせる概念を表している。チャープとは、導波路に沿って構造パラメータを連続的に変化させるこ

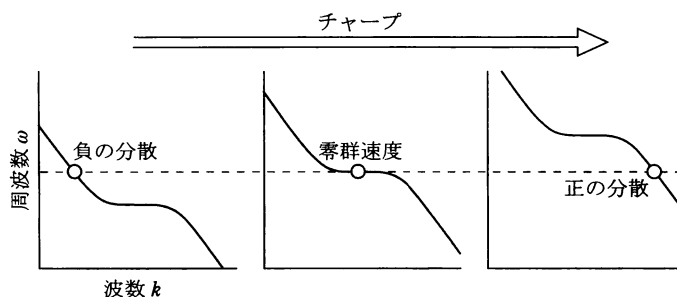


図 3 チャープ構造によって理想的なバンドをシフトさせる概念

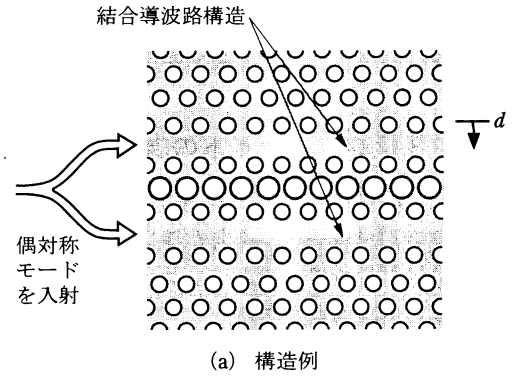
とを指す<sup>6)</sup>。これによってバンド端をシフトさせると、光信号の各周波数成分をそれぞれの位置でスローライト化することができる。また図3は普通のPC導波路のバンドではなく、分散補償のための理想的なバンド、すなわち零群速度と変曲点を兼ね備えたバンドを描いている<sup>13)</sup>。チャープによってこのようなバンドをシフトさせると、例えば最初に負の分散を受けながら伝搬していた光はやがて零群速度条件でスローライト化する。その後、スローライト領域を脱して再び伝搬していくと今度は正の分散を受ける。全体としては分散が補償され、光が出射される。またチャープ構造では、スローライト化される位置から外側に向かって $n_g$ が緩やかに変化し、デバイスの入出射端ではほとんど $n_g \sim n$ となる。これにより、3.で述べた反射損も抑制される。

このような理想的なバンドは、PC導波路を变形することで実現される。(このような設計を自在に、かつ正確に行える点がフォトニックバンド理論の威力である。) 具体的には

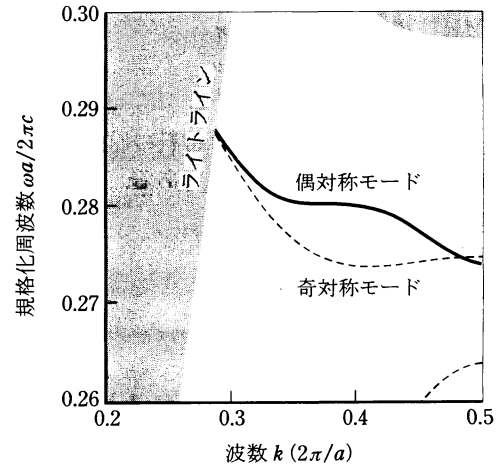
- ① 導波路パラメータの微調整<sup>14)</sup>
- ② 同種のPC導波路から成る結合導波路<sup>13)</sup>
- ③ 逆分散を持つ異種PC導波路から成る方向性結合器<sup>15)</sup>

が考えられる。①は例えばPCスラブの孔直径の拡大、線欠陥の狭幅化などである。この場合、他のバンドとの相互作用によって伝搬モードがひずみ、図3のようなバンドとなる。ただし $\Delta n$ が小さく、他のバンドが近過ぎて帯域の自由度が少ないなどの欠点がある。②は有望な構造であり、その一例と対応するフォトニックバンドを図4に示す。PC方向性結合器で中央の孔の面積比率を増やすと、偶対称性を持つモードに理想的なバンドが現れる。そこで一本の導波路からの光を分岐して同相で方向性結合器に入射させ、偶モードを選択的に利用して目的とするスローライトを得る。③と区別するため、我々はこのようなデバイスを結合導波路と呼んでいる。ここでの $\Delta n$ は①と③の間であるが、③で問題となる反射損が②では起らない。③では、PC導波路のバンド端の零群速度を利用する。ただし分散補償のために、通常のPC導波路と逆分散を持つPC導波路を方向性結合させ、バンド端で実効的に変曲点を実現する。ただし両導波路のバンド端を完全に一致させないと、3.で述べたものとは別の反射損が発生する点が欠点である。

チャープを加えた図4の構造に対して計算されるスローライト伝搬を時系列に並べて図5に示す<sup>13)</sup>。デバイスに入射した光パルスは伝搬方向の波形を乱さずに、デバイス中央でスローライト化している。ここでは計算時間の制約から、広い周波数スペクトル(>2THz)を持つ超短パルスとそれに対応する急激なチャープを仮定



(a) 構造例



(b) フォトニックバンド

図4 スローライトを発生させるPC結合導波路

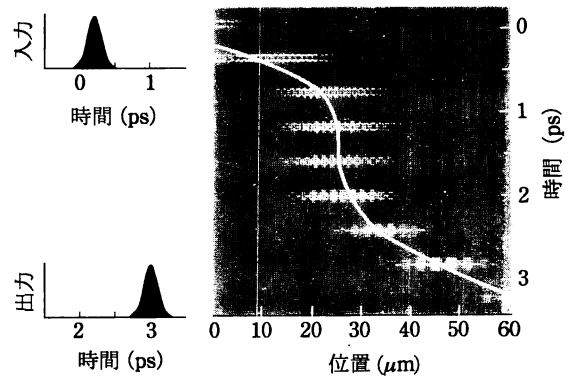


図5 PC結合導波路におけるスローライト伝搬の計算結果 詳しい計算条件やアニメーションは文献(13)に示されている。

しており、遅延時間はpsオーダーにとどまっている。しかし5.に示すように、帯域を適度に制限して最適なチャープを設定し、デバイス長 $L$ を数百 $\mu\text{m}$ 以上にすれば、nsオーダーの遅延が得られる。またこの計算では、入射光に対する反射光強度が約-30dBに抑えられている。これはチャープによる光の断熱的変化の効果である。

## 5. チャープ構造での平均群屈折率

伝搬方向の座標を  $x$  としたとき、スローライトによる遅延時間  $T$  は

$$T = \int_0^L \frac{dx}{v_g(x)} = \int_0^L \frac{n_g(x)}{c} dx \quad (3)$$

で与えられる。チャープ範囲内での平均群屈折率  $\bar{n}_g$  は

$$\bar{n}_g = \frac{c}{\bar{v}_g} = \frac{c}{L/T} = \int_0^L n_g(x) dx / L \quad (4)$$

となる。チャープによるバンドのシフトは、一つのバンドの形をトレースすることに置き換えて考えられ、式(4)は

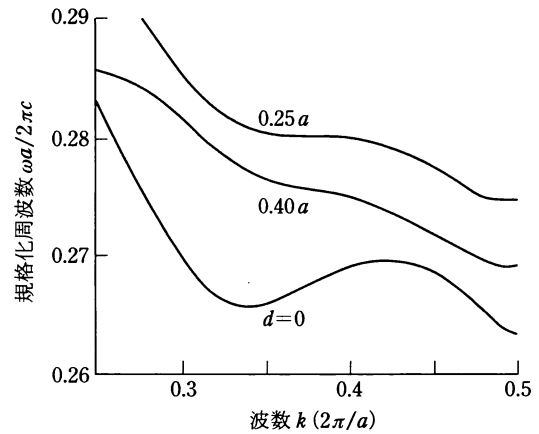
$$\begin{aligned} \bar{n}_g &\cong \int_{\omega_0}^{\omega_0 + \Delta\omega} n_g(\omega) d\omega / \Delta\omega = \int_{\omega_0}^{\omega_0 + \Delta\omega} c \frac{dk}{d\omega} d\omega / \Delta\omega \\ &= \int_{k_0}^{k_0 + \Delta k} c dk / \Delta\omega = c \frac{\Delta k}{\Delta\omega} \end{aligned} \quad (5)$$

となる。ここで  $\omega_0$  と  $k_0$  はチャープの始点に対応する周波数と波数である。式(5)より分かることは、 $\bar{n}_g$  がバンドの細かい形状によらず、チャープの始点と終点を結ぶ線の傾きで決まるということである。この結果は式(2)と全く同じことを意味しており、チャープ構造でも帯域制限を受けることが分かる。

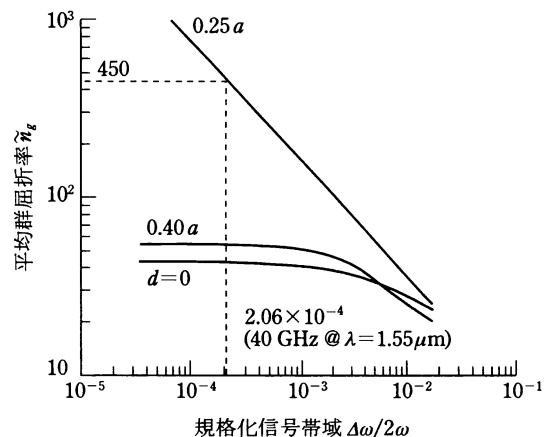
図4の構造に対して、孔の位置を表すパラメータ  $d$  を変化させたときの偶モードバンドを図6(a)に示す。 $d=0.25a$  で理想的なバンドが得られ、 $d$  がより大きいときは傾斜が大きなバンド、小さいときはうねりがあるバンドが現れる。チャープ構造の中で正負の分散を用いて分散補償するとき、利用できる信号帯域は  $\Delta\omega$  の半分以下となる。この点に注意して計算される規格化信号帯域  $\Delta\omega/2\omega$  と  $\bar{n}_g$  の関係を図6(b)に示す。理想的なバンドを与える  $d=0.25a$  では、帯域を狭めると  $\bar{n}_g$  が発散する。 $\lambda=1.55\mu\text{m}$  で信号帯域 40GHz を考えると、 $\bar{n}_g=450$  となる。これは  $L=670\mu\text{m}$  のデバイスで遅延時間 1ns を実現する値である。また  $d$  を  $0.1a$  だけ変えると、 $\bar{n}_g$  はほぼ 1/10 になる。局所的な屈折率変化でも同様の变化は起るので、 $T$  をチューニングすることができると考えられる。

## 6. 動的屈折率変調によるスローライト

ここまでの議論は、入射光の周波数スペクトルが変らないことを前提としていた。もし復元可能な方法でスペクトルをほとんど単一周波数に変換できれば、式(2)に従って、極めて大きな  $n_g$  が実現される。このような方



(a)  $d$  を変えたときのバンドの変化



(b) 規格化信号帯域と群屈折率の関係

図6 PC結合導波路の偶対称モードのバンドと群屈折率

法が EIT, PC の両方で検討されている。

例えば EIT では、あらかじめ励起光の結合を強くして準位の分裂幅を広げ、広帯域な光信号を媒質の中に導入する<sup>(16)</sup>。この状態では  $n_g$  が小さいが、信号が内部に収まった後で動的に分裂幅を狭めて分散を高め、 $n_g$  を大きくする。こうすると光が位相変調を受け、分散の変化に沿うように断熱的にスペクトルを狭くする。結果として、光信号全体がスローライト化される。またこの状態から動的に分裂幅を広げて分散を小さくすると、逆の過程で光が進み始めると同時にスペクトルが復元される。

PC 導波路でも同様の現象を実現するために、媒質の屈折率を局所的かつ動的に変えたときの分散の変化が調べられている<sup>(17)</sup>。PC に線欠陥を導入すると光導波路になることを 2. で説明したが、同様に点欠陥は光共振器として働く。点欠陥を線欠陥の近くに置くと、導波路の伝搬光が共振器に結合する。共振器は、共振周波数の光を蓄積する一種の光メモリである。蓄積時間を長くするには共振器 Q 値を高めればよいが、これは帯域制限になる。この点はスローライトと同じである。多くの点欠陥が導波路に沿って配置された状況で、動的な屈折率変

化によって両者の結合を変化させると、分散特性の変化が起こる。これにより導波路を伝搬する広帯域スペクトルの光が位相変調され、点欠陥に収まる共振スペクトルの光に変換される。またこの過程を逆にたどれば、最初の伝搬光を復元することもできる。

これらの方法はスローライトの帯域制限を打破するという点で興味深い。ただしここでは、伝搬光がそれぞれの点欠陥に分割、蓄積される。その光強度の包絡関数は元の光信号の空間分布を保存している。つまりスローライトに期待される空間圧縮が行われない。そのため連続信号を蓄積するには、長いデバイスが必要になる。例えば、 $n=3$ の媒質中で40GHzの光信号の1周期の空間長は2.5mmである。周期とピットがおよそ対応すると考えると、長さ1cmのデバイスに蓄積できるピットは高々4個となる。また、いったん屈折率変化を与えると、次の信号を導入できない。よってこの方法はピット単位の光の蓄積、つまりDRAM的な動作に適する。

## 7. む す び

スローライトの原理と帯域制限等の課題、対策を説明した。PC導波路を用いると室温で手軽にスローライトが得られ、チャープ構造と分散補償構造を併用すると、帯域や波形の調整と反射の抑制が実現される。例えば帯域40GHzに対して、真空中の450分の1の平均群速度とそれに応じた信号の空間圧縮、1.5ns/mmの遅延時間が期待される。また局所的な屈折率変化によって、遅延時間を約1けたの範囲でチューニングできると予想される。一方、動的な屈折率変化を用いれば帯域制限の制約が打破できるが、一方で空間的な制約が生じる。スローライトの利用においては、低速性と帯域、空間の三つを要求に合わせてバランスさせることが重要になるであろう。

本稿では理想的なスローライトの生成を述べたが、PC導波路では構造揺らぎによる損失が大きな問題である。これらについては損失原因の探求と低減だけでなく、出力強度を外部増幅する、もしくはスローライトデバイスと集積できるPC光増幅器<sup>(18)</sup>を検討する必要があるだろう。

## 文 献

- (1) M.D. Lukin and A. Imamoglu, "Controlling photons using electromagnetically induced transparency," *Nature*, vol.413, pp.273-276, 2001.
- (2) J.J. Longdell, E. Fraval, M.J. Sellars, and N.B. Manson, "Stopped light with storage times greater than one second using electromagnetically induced transparency in a solid," *Phys. Rev. Lett.*, vol.95, no.6, 063601, 2005.
- (3) Roadmap on Photonic Crystals, S. Noda and T. Baba, Eds., Kluwer Academic, 2003.
- (4) 特集「フォトリック結晶の新展開」, 応用物理, vol.23, no.2, pp.146-191, 2005.
- (5) T. Baba, N. Fukaya, and J. Yonekura, "Observation of light

transmission in photonic crystal waveguides with bends," *Electron. Lett.*, vol.35, no.8, pp.654-655, 1999.

- (6) T. Baba, D. Mori, K. Inoshita, and Y. Kuroki, "Light localization in line defect photonic crystal waveguides," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol.10, no.3, pp.484-491, 2004.
- (7) T. Baba, A. Motegi, T. Iwai, N. Fukaya, Y. Watanabe, and A. Sakai, "Light propagation characteristics of straight single line defect optical waveguides in a photonic crystal slab fabricated into a silicon-on-insulator substrate," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol.38, no.7, pp.743-752, 2002.
- (8) M. Notomi, K. Yamada, A. Shinya, J. Takahashi, C. Takahashi, and I. Yokohama, "Extremely large group-velocity dispersion of line-defect waveguides in photonic crystal slabs," *Phys. Rev. Lett.*, vol.87, no.25, 253902, 2001.
- (9) T. Asano, K. Kiyota, D. Kumamoto, B-S. Song, and S. Noda, "Time-domain measurement of picosecond light-pulse propagation in a two-dimensional photonic crystal-slab waveguide," *Appl. Phys. Lett.*, vol.84, no.23, pp.4690-4692, 2004.
- (10) H. Gersen, T.J. Karle, R.J.P. Engelen, W. Bogaerts, J.P. Korterik, N.F. van Hulst, T.F. Krauss, and L. Kuipers, "Real-space observation of ultraslow light in photonic crystal waveguides," *Phys. Rev. Lett.*, vol.94, no.7, 073903, 2005.
- (11) Y.A. Vlasov, M. O'Boyle, H.F. Hamann, and S.J. McNab, "Active control of slow light on a chip with photonic crystal waveguides," *Nature*, vol.438, pp.65-69, 2005.
- (12) E. Kuramochi, M. Notomi, S. Hughes, A. Shinya, T. Watanabe, and L. Ramunno, "Disorder-induced scattering loss of line-defect waveguides in photonic crystal slabs," *Phys. Rev. B, condens. Matter Mater. Phys.*, vol.72, no.16, 161318, 2005.
- (13) D. Mori and T. Baba, "Wideband and low dispersion slow light by chirped photonic crystal coupled waveguide," *Opt. Express*, vol.13, no.23, pp.9398-9408, 2005.
- (14) A. Sakai, I. Kato, D. Mori, and T. Baba, "Anomalous low group velocity and low dispersion in simple photonic crystal line defect waveguides," *IEEE/LEOS Annual Meet.*, no.ThQ5, pp.884-885, 2004.
- (15) D. Mori and T. Baba, "Dispersion-controlled optical group delay device by chirped photonic crystal waveguides," *Appl. Phys. Lett.*, vol.85, no.7, pp.1101-1103, 2004.
- (16) C. Li, Z. Dutton, C.H. Behroozi, and L.V. Hau, "Observation of coherent optical information storage in an atomic medium using halted light pulses," *Nature*, vol.409, pp.490-493, 2001.
- (17) M.F. Yanik, W. Suh, Z. Wang, and S. Fan, "Stopping light in a waveguide with an all-optical analog of electromagnetically induced transparency," *Phys. Rev. Lett.*, vol.93, no.23, 233903, 2004.
- (18) E. Mizuta, T. Ide, J. Hashimoto, K. Nozaki, T. Baba, T. Kise, K. Kiyota, and N. Yokouchi, "Characterization of photonic crystal waveguide for SOA operation," *Pacific Rim Conf. Laser and Electro-Optics*, no.CThE1-4, pp.1134-1135, 2005.

(平成18年2月17日受付)

馬場 俊彦 (正員)

昭60横浜国大・工・電気卒。平2同大学院博士課程了。工博。平6横浜国大・助教。平17同教授。現在、フォトリック結晶、シリコンフォトニクス、ナノレーザを研究中。平5年度本会学術奨励賞、論文賞、平17年度論文賞、平2丹羽記念賞、平12丸文研究奨励賞、平18日本学術振興会賞各受賞。



森 大祐

平15横浜国大・工：電子情報卒。平17同大学院修士課程了。現在、同博士課程。現在、フォトリック結晶によるスローライトを研究中。

