

巨大構造分散によるスローライト技術

代表研究者	馬場 俊彦	横浜国立大学大学院工学研究院知的構造の創生部門教授
共同研究者	森 大祐	横浜国立大学大学院工学研究院日本学術振興会特別研究員
〃	松本 崇	横浜国立大学大学院工学研究院日本学術振興会特別研究員
〃	野崎 謙悟	横浜国立大学大学院工学研究院日本学術振興会特別研究員

1 はじめに

最近、スローライトと呼ばれる超低群速度 v_g をもつ光が目され、光遅延線、光バッファ、非線形効果増大などへの応用が期待されている[1]。このような光を発生させるためには、大きな材料分散を示す電磁誘導透過 (EIT) や、大きな構造分散をもつフォトニック結晶導波路 (PCW) を用いるのが有効であり、世界的に研究が行われている。PCW は、フォトニックバンド端において、巨大な 1 次分散による零に近い超低 v_g 、無限大に近い群屈折率 $n_g \equiv c/v_g$ を生む。極低温を必要とする EIT に比べて、室温でスローライトを発生させることができる点が、応用上の大きな利点である。しかし一般にこれらのスローライトには遅延時間と周波数帯域に排他的な関係がある。また、広いスペクトルをもつ短パルス光や高いビットレートの光信号は、大きな群速度分散 (GVD) によって著しく歪められてしまう。したがって、通信線路や光信号処理に利用できないという問題があった。これらを解決するため、動的な屈折率変化による信号スペクトル変調が提案されている。しかしこの方法では、信号を連続的に相互干渉なく蓄積・放出することが困難なため、基本的に 1 ビットメモリの動作となり、バッファとして用いることができない。

我々は、広帯域で分散の影響がない有用なスローライトを室温で発生させることを目指し、二つの方法を研究してきた。一つは、構造パラメータを徐々に変化させるチャープ構造によって動作帯域を広げ、内部で正負の GVD を補償する方向性結合器や結合導波路を利用する方法である[2,3]。これらのデバイス中では、最初、光パルスが分散するが、最終的には分散補償によってパルスが再生され、光が平均的に遅延される。ただし、これらの構造は一般にやや複雑である。また内部でパルスが広がるので、非線形効果の増大は得られない。もう一つは、もともと低群速度・低分散特性 (LVLD) を示すように PCW を設計する方法である[4]。PCW の構造パラメータを微調整すると、通常の PCW のフォトニックバンドがもっている歪みが補正され、特定の帯域に直線的かつ傾斜が小さなバンドが現れる。これによって、分散が小さいスローライトが得られる。この場合、光パルスは低群速度によって単純に圧縮、遅延されるので、非線形効果の増大には有効である。

本研究では、これまで理論が先行していたこれらのスローライトを実験で観測することを目的とした。

2 分散補償スローライトの実現

2-1 方向性結合器型

一般にバンドが平坦になる点で零 v_g が得られる。この点を変曲点とするバンドをチャープによってシフトさせると、最初に分散を受けながら伝搬していた光がやがて零 v_g 条件に達して遅延を受け、最後には逆の分散を受けて出力されるので、全体の分散が補償される。このような光伝搬が、チャープの範囲に応じた所望の帯域で得られる。方向性結合器型デバイスでは、逆分散をもつ 2 種類のチャープ構造 PCW A と B のバンド端を一致させることで、このような動作が実現されることを過去の研究で理論的に示してきた[2]。本研究ではまず A と B を個別に製作し、バンド端の低群速度と逆分散を評価した。次に、A と B のバンド端を一致させる構造微調整を行い、方向性結合器に対して広帯域スローライトを観測した[5]。デバイス構造とバンドの概要を図 1 に示す。ここでは、Si スラブに空孔を三角格子配列させたフォトニック結晶スラブを基本プラットフォームとしている。A は単純な線欠陥導波路であり、そのバンドは高周波方向へ向かう。B は線欠陥中央に小円孔が半周期だけ位相がシフトされて配列され、そのバンドは低周波方向に向かう。方向性結合器では、それぞれに由来する 2 つのバンドが現れる。このバンドがチャープによりシフトするので、A と B のバンド端が一致していると、A を伝搬する光がバンド端となる位置で遅延かつ方向性結合を起こし、B に移動する。2 つの導波路を伝搬した結果、分散が補償される。

実験では厚さ 0.213 μm の Si 層をもつ Silicon on Insulator (SOI) 基板に電子ビームリソグラフィと SF₆ 誘導結合プラズマ (ICP) エッチングで PC パターンを形成し、HF ウエットエッチングでエアブリッジ化した。個別に製作した A と B で得られた透過率と n_g のスペクトルを図 2 に示す。ここで波長 1.55 μm 付近にバンド端がくるように、格子定数 a と円孔直径 $2r$ 、導波路幅などが微調整されている。 n_g の評価は、PCW 内

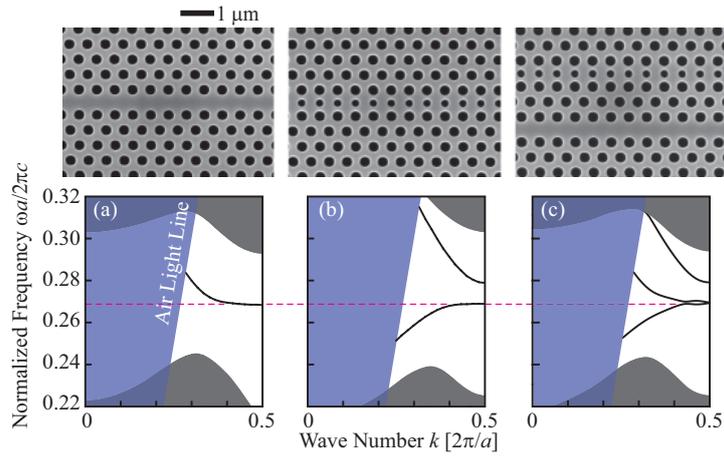


図1 二種類のフォトニック結晶導波路(a) A, (b) B と(c) 方向性結合器の表面構造とフォトニックバンド

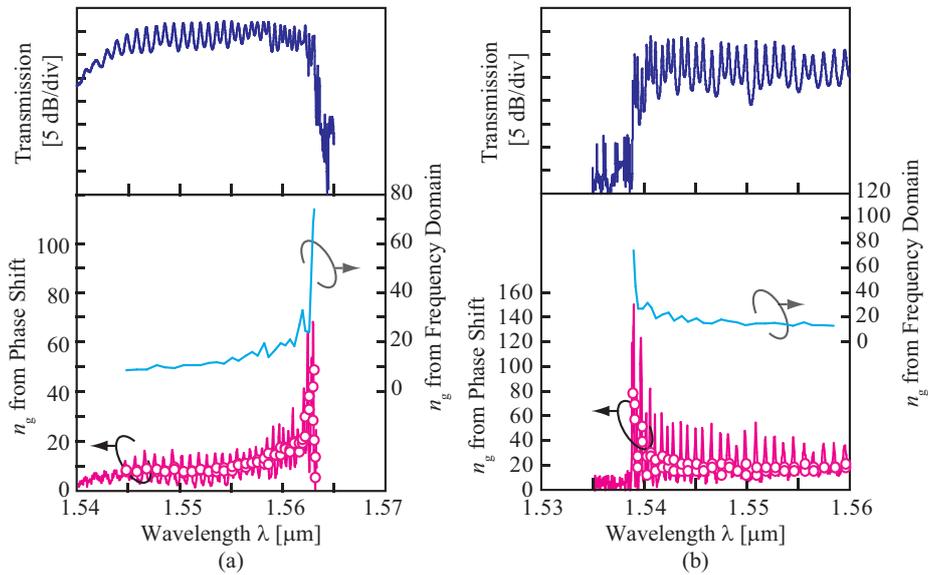


図2 導波路(a) A と(b) B の透過スペクトルと群屈折率

部のファブリーペロー共振間隔を測定する方法と、正弦変調された光の位相差を測定・算出する方法の2種類で行った。ただし後者も、ファブリーペロー共振の影響を受けて、位相が変化する。影響を受けた位相 Φ_d は、入射端の電界振幅反射率 r_i , r_o , 損失 α , 導波路長 L を用いて以下のように表される。

$$\Phi_d \cong \tan^{-1} \left[\frac{\pm r_i r_o e^{-\alpha L} \sin(2\omega_m n_g L/c)}{\{1 \mp r_i r_o e^{-\alpha L} \cos(2\omega_m n_g L/c)\}} \right]$$

ここで、反射と伝搬による一往復あたりの光の損失をファブリーペロー共振の振幅から評価し、測定された位相を上式に代入することで、素子の n_g が見積もられる。図2よりわかるように、いずれの測定法においてもAでは導波バンドの長波長側にバンド端が現れ、最大60まで n_g が増大した。Bでは短波長側にバンド端が現れ、80まで n_g が増大した。すなわち、AとBのバンド端でのスローライト発生と逆分散が示された。

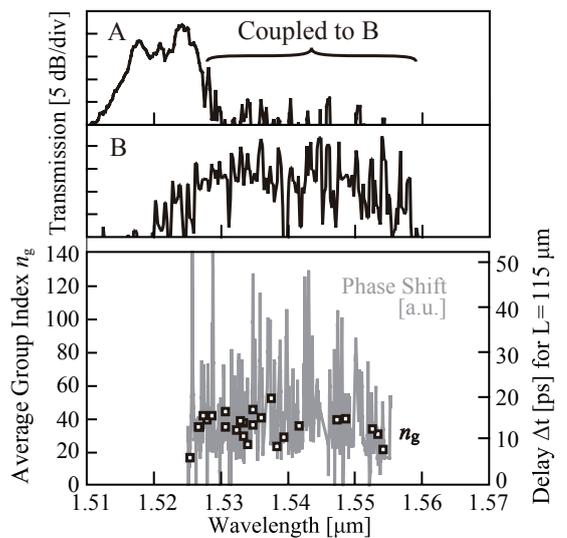


図3 方向性結合器の透過スペクトルと群屈折率

方向性結合器では、導波路長 $L = 115 \mu\text{m}$ の範囲で $2r$ を $0.27 \mu\text{m}$ から $0.29 \mu\text{m}$ へチャープさせた。製作した素子でも、おおむね滑らかなチャープが得られたが、各円孔に最大 $\pm 5 \text{ nm}$ の細かい揺らぎが生じた。測定では A に光を入射させた。短波長側の光はチャープ構造中でバンド端にまで到達せずに A から出射されるが、長波長側の光はバンド端に到達して方向性結合を起こし、B から出射される。A と B の出射端で観測された透過スペクトルを図 3(a) に示す。出射光は $\lambda = 1.525 \mu\text{m}$ で A から B にスイッチした。これより長波長側の 32 nm の波長帯域で、方向性結合が起こっている。A からの出射光はバンド端に到達していないため、大きな n_g は生じない。一方、B からの出射光は遅延されるので、大きな n_g が生じる。Fig. 3(b) は、B からの出射光の群遅延時間 τ とチャープ構造中の n_g のスペクトルを変調位相シフト法で評価した結果である。多少はばらつきがあるが、 $n_g = 30 - 40$ が評価され、広帯域分散補償スローライトが実証された。

2-2 結合導波路型

理想的な分散補償スローライトは、零 v_g 条件で変曲点となるバンドをチャープ構造によってシフトさせることにより得られる。上記の方向性結合器ではバンド端で A と B のバンドが結合し、実効的にこのような理想バンドを形成している。しかしバンド端が正確に一致しないと、周波数ギャップによって強い反射損失が生じる。 $2r$ のわずかな揺らぎによって局所的にこの反射損失が生じるため、図 3 に示したような激しく振動するスペクトルが現れた。この問題を解消するには、バンド端以外で連続的に変曲点をもつ零 v_g 条件を利用する必要がある。そのような理想バンドを生む構造として、我々は図 4 のような PC 結合導波路 (PCCW) を考案した。この構造は一見すると方向性結合器であるが、偶対称性をもつ結合モードのバンドは零 v_g 条件で変曲点をとる理想的な形状を示す。この変曲点を挟んで高周波数側と低周波数側でバンドを対称にすることにより、変曲点で零 v_g と零 GVD が満たされる。これにチャープ構造を適用することで広帯域分散補償スローライトが得られる。この素子では、偶モードのみを選択励振する必要がある。そこで、対称な分岐・合流を介して PCCW を入射用 PCW と接続させている。

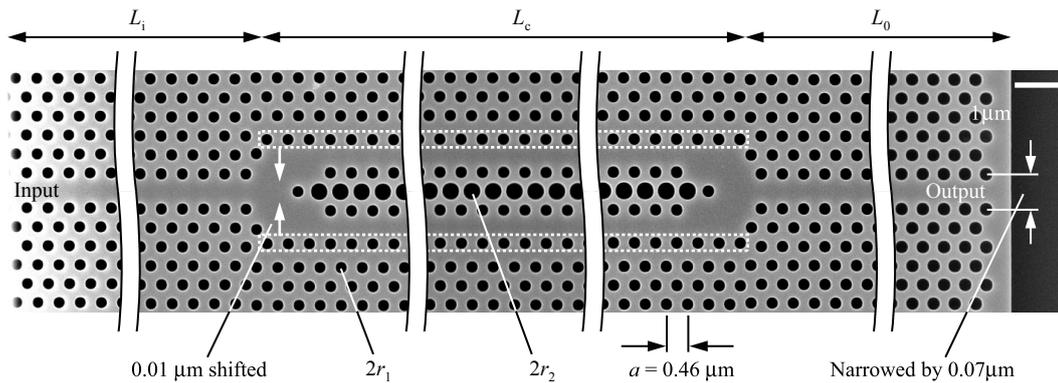


図 4 フォトニック結晶結合導波路の表面構造

作製法は方向性結合器と同じである。ここでも波長 $1.55 \mu\text{m}$ 付近での動作を狙ったパラメータ設定とし、まずはチャープ構造を導入せずに、特に重要な PCCW の中央の円孔直径 $2r_2$ を試料によって $0.34 - 0.38 \mu\text{m}$ と変化させた。フォトニックバンド計算によれば、 $2r_2 = 0.36 \mu\text{m}$ のとき、偶モードの理想バンドが現れる。入射用 PCW は、透過帯域が PCCW と一致するように、導波路幅が微調整されている。分岐・合流部は低反射率、高透過率が必要である。図 4 の構造は計算により最適な設計値を求めた。チャープの始点と終点のバンドを等価的に表す $a/\lambda = 0.297$ と 0.291 に対して反射率 R が低く、透過率 T が高い構造を探索したところ、図 1 の構造で反射率 1% 以下、スラブ面外への放射損失 1 dB 程度が見積もられた。変調位相シフト法を用いて評価された透過スペクトルと n_g 、ならびに $n_g = c\Delta k/\Delta\omega$ という関係を用いて得られるフォトニックバンドの実験値 (太い線) と計算値 (細い実線; 偶モード, 細い破線; 奇モード) を図 5 に示す。 $2r_2$ を変化させると特性が徐々に変化し、 $2r_2 \geq 0.38 \mu\text{m}$ では急に透過帯域が狭まるのが確認される。バンドを見ると、これは偶モードのバンドが高周波数側にせり上がるためだと理解できる。これに対して奇モードのバンドは変化せず、広い帯域をもっている。つまり、製作された素子では奇モードが励振されておらず、PCCW 中を偶モードのみが伝搬していることがわかる。 n_g は波長間隔 0.05 nm と十分詳細に測定したが、一部の波長では、透過強度が不足し、値が求まらなかったため、プロットが抜けている。 $2r_2 \leq 0.34 \mu\text{m}$ では $n_g = 5 - 20$ と比較的小さく、変化が少ない。 $2r_2 = 0.35 - 0.37 \mu\text{m}$ では n_g に大きなピークが現れ、 $2r_2 = 0.36 \mu\text{m}$ で最大値 $n_g = 130$ が観測

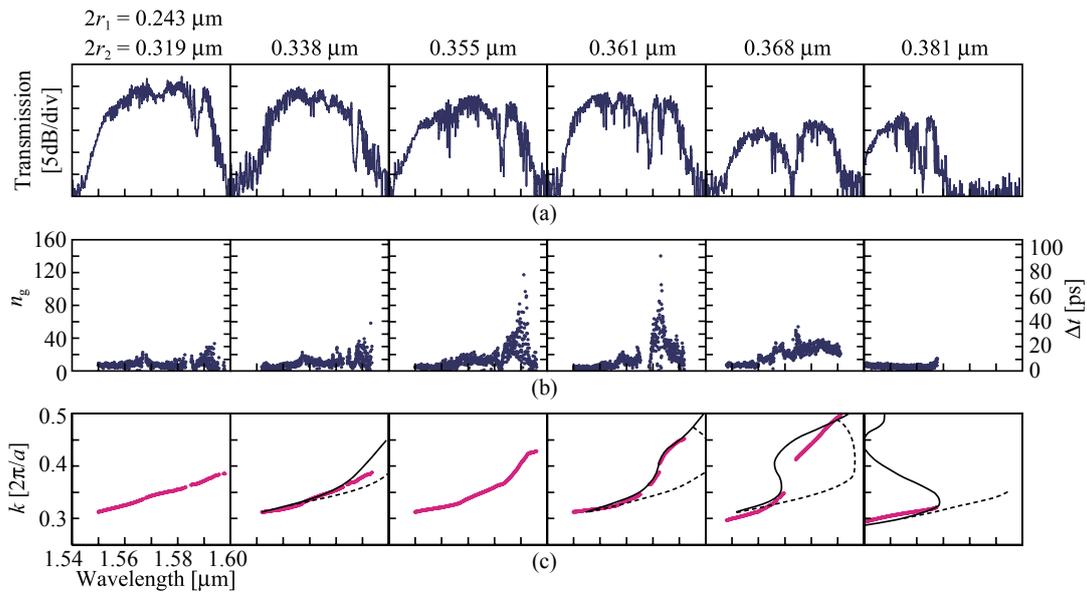


図5 非チャープ構造フォトニック結晶結合導波路の様々な中央円孔直径 $2r_2$ に対する(a) 透過スペクトル, (b) 群屈折率, (c) フォトニックバンド

された。このピークは、計算された零 v_g となる平坦なバンドに対応する。このピーク波長の透過スペクトルには、遅延が原因と思われるディップが観測された。ただしこの波長以外でも、透過スペクトルに大きなディップが見られる。このディップ波長では n_g に特別な変化が見られないが、 $2r_2$ には依存している。この原因は分岐・合流部で特に大きなモード不整合が生じている可能性などが挙げられる。計算と実験によるバンドはほぼ対応した。ただし $2r_2 = 0.368\mu\text{m}$ では n_g の極値が2箇所あるので、理論値のようにバンドが歪んでいると推測される。バンドが歪むと波数が一つに限定できないので、2極値間のバンドは再現されない。

次にPCCWにチャープ構造を導入した。ここでは中央以外の円孔直径をチャープ開始と終了の間で40nmだけ徐々に大きくしている。これに対して、透過強度と n_g は図6のように変化した。すなわち透過スペクトルには大きな変化は見られないが、ピーク的に大きくなっていった n_g は平均化され、約12nmの波長範囲で50 - 55とほぼ一定の n_g が観測された。すなわち広帯域分散補償スローライトがこの素子でも確認された[6]。

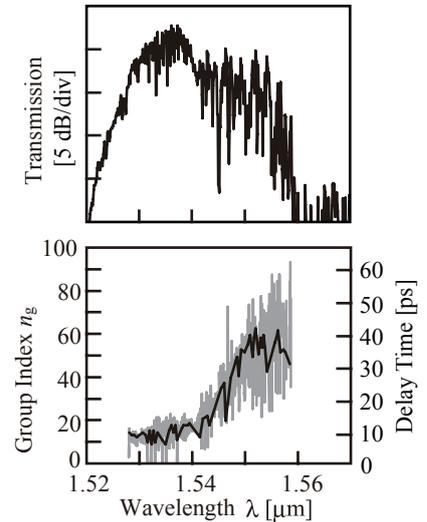


図6 チャープ構造結合導波路の透過スペクトルと群屈折率

3 零分散スローライトの実現

通常の単一線欠陥PCWに比べて導波路幅を狭くする、 $2r$ を大きくする、最も内側の円孔直径 $2r'$ を小さくする、線欠陥の屈折率を局所的に大きくするなどにより、伝搬モードとスラブモードが近接し、その影響でバンドの歪みが緩和され、直線的なバンド、すなわちLVLD特性が現れる[4]。ただしこの特性は、これらのパラメータに敏感であり、その観測には注意深い実験が必要である。本研究では $2r$ と $2r'$ を注意深く変化させることで起きるLVLD特性を実験的に評価し、理論との明確な対応を調査した[7]。

本研究では、製作において最も調整しやすい $2r$ の変化を採用した。 $2r$ を大きくすると、直線的なバンドが現れる。さらに $2r$ を大きくするとバンドの歪みが大きくなり、PCCWのような平坦なバンドが現れる。直線バンドを観測しようとするとき、動作波長の調整が難しいという問題がある。そこで $2r'$ にも調整を加えた。 $2r'$ を小さくすると、スラブモードをシフトさせることなく、伝搬モードのみを低周波シフトさせるので、バンド形状と動作波長を同時に調整できる。

上記の素子と同様の手法で作製したPCWとそれに対応するフォトニックバンドを図7に示す。 $2r'$ は電子

ビーム描画の露光時間によって調整した。透過スペクトルと n_g の測定結果、および理論と実験のバンドを図 8 に示す。 $2r'/2r$ が小さくなると透過スペクトルのバンド端が低周波数シフトし、強度の落ち込みがなだらかになる。これは低群速度帯域が広がったことにより、結合損失や伝搬損失が大きくなったためである。 n_g は透過スペクトルによく対応し、LVLD 特性が現れている。ここでは、 $\Delta\omega/\omega = 0.93\%$ に対して $n_g \sim 30$ が得られた。このような変化は、上述の理論的考察と完全に一致している。理論と実験のバンドも形状はよく一致している。

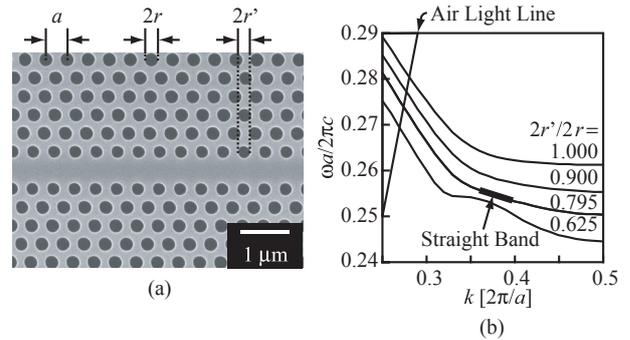


図 7 LVLD フォトニック結晶導波路の(a)表面構造と(b)フォトニックバンド

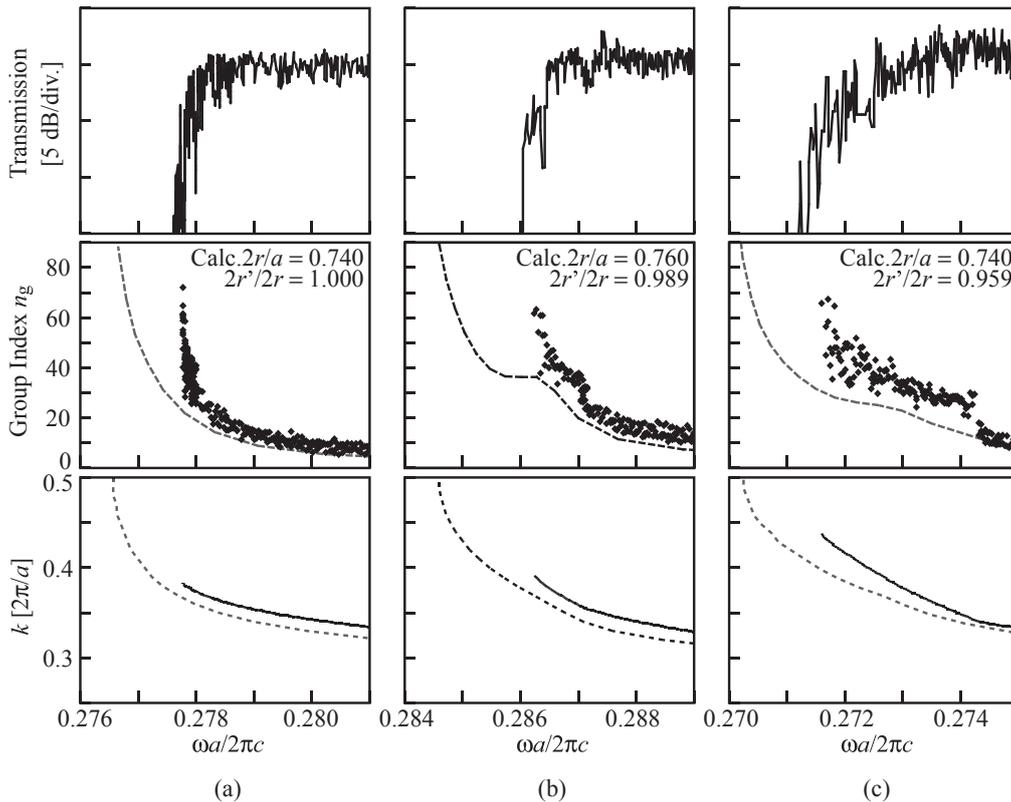


図 8 LVLD 導波路の透過スペクトル、群屈折率、フォトニックバンド

4 まとめ

本研究では、従来の狭帯域と高次分散の問題を解決した有用なスローライトを実証した。具体的には、本研究代表者が提案してきたフォトニック結晶方向性結合器や同結合導波路による分散補償スローライト、およびフォトニック結晶導波路を微調することで得られる零分散スローライトを実験において観測し、理論との良好な一致を確認した。本研究は、光バッファや非線形機能デバイスに道を開く重要な研究成果である。本研究を支援していただいた電気通信普及財団に深く感謝する。

【参考文献】

- [1] T. Baba and D. Mori, "Slowlight engineering in photonic crystals", J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 40, no. 9, pp. 2659-2665, 2007.(Invited Paper)
- [2] 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.

- [3] 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.
- [4] 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., Puerto Rico, no. ThQ5, 2004.
- [5] D. Mori, S. Kubo, H. Sasaki and T. Baba, "Experimental demonstration of wideband dispersion-compensated slow light by a chirped photonic crystal directional coupler", Opt. Exp., vol. 15, no. 9, pp. 5264-5270, 2007.
- [6] T. Kawasaki, D. Mori and T. Baba, "Large group index under zero GVD condition in photonic crystal coupled waveguides", IEEE/LEOS Int. Conf. Group IV Photon., Tokyo, no. WP34, 2007.
- [7] S. Kubo, D. Mori and T. Baba, "Demonstration of low-group-velocity and Low-dispersion photonic crystal waveguide", IEEE/LEOS Int. Conf. Group IV Photon., Tokyo, no. WP35, 2007.

〈 発 表 資 料 〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Slowlight engineering in photonic crystals	Journal of Physics D: Applied Physics	2007 年 1 月
Experimental demonstration of wideband dispersion-compensated slow light by a chirped photonic crystal directional coupler	Optics Express	2007 年 5 月
Transmission and optical delay measurement of group delay characteristics in photonic crystal coupled waveguides	Optics Express	投稿済み, 査読中
Low-group-velocity and low-dispersion slow light in photonic crystal waveguides	Optics Letters	投稿済み, 査読中
Controlled slowlight in photonic crystals	Proceeding of OSA Slow and Fast Light Topical Meeting	2007 年 7 月
Large group index under zero GVD condition in photonic crystal coupled waveguides	Proceeding of IEEE/LEOS International Conference on Group IV Photonics	2007 年 9 月
Demonstration of low-group-velocity and Low-dispersion photonic crystal waveguide	Proceeding of IEEE/LEOS International Conference on Group IV Photonics	2007 年 9 月
Controlled slowlight and miniature devices based on Si photonics waveguides	Proceeding of IEEE/LEOS International Conference on Group IV Photonics	2007 年 9 月
Wideband Slow Light in Photonic Crystal Coupled Waveguides with Chirped Structure	Proceeding of IEEE/LEOS Annual Meeting	投稿済み, 査読中