



Title	一次元フォトリック結晶結合共振器型光導波路の曲げ特性並びに結合特性評価
Author(s)	川口, 雄揮; Kawaguchi, Yuki; 齊藤, 晋聖 他
Citation	電子情報通信学会論文誌. C, エレクトロニクス, J93-C(7), 224-230
Issue Date	2010-07-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/51451
Rights	copyright©2010 電子情報通信学会
Type	journal article
File Information	110007467231.pdf



一次元フォトニック結晶結合共振器型光導波路の曲げ特性並びに結合特性評価

川口 雄揮^{†a)} 齊藤 晋聖^{†b)} 小柴 正則[†]

Evaluation of Bending and Coupling Characteristics in One-Dimensional Photonic Crystal Coupled Resonator Optical Waveguides

Yuki KAWAGUCHI^{†a)}, Kunimasa SAITOH^{†b)}, and Masanori KOSHIBA[†]

あらまし 一次元フォトニック結晶結合共振器型光導波路 (1-D PC-CROW) は、低群速度や製造が容易であるという特徴を有していることから、超小型光波回路構成のための基本素子として注目されている。こうした 1-D PC-CROW を用いて実際に光デバイスを構成する際には、導波路曲がりや結合器が必要となるが、これまで、これらの曲げ特性や結合特性に関する評価は行われていない。そこで本論文では、有限要素法に基づく数値解析によってこうした諸特性を明らかにする。導波路曲がりや結合器の構造パラメータを変化させた場合の透過特性を調べることにより、高い透過率が得られる 1-D PC-CROW の曲げ導波路構造の探索を行う。更に、1-D PC-CROW に基づく結合器についても検討を行い、3 dB 方向性結合器の設計方法を示す。

キーワード 結合共振器型光導波路、フォトニック結晶導波路、有限要素法

1. ま え が き

Coupled Resonator Optical Waveguide (CROW) ,あるいは、Coupled Cavity Waveguide (CCW) と呼ばれる結合共振器型の導波路は、隣接する共振器間のモードの重ね合わせによって光波が伝搬するものであり、低群速度並びに中心波長において零群速度分散が得られるという特徴によって、超小型光波回路設計や非線形効果増強などへの応用が期待されている [1] ~ [4] . CROW を構成する一つの方法として、フォトニック結晶 (PC : Photonic Crystal) 導波路中に周期的に欠陥部分を設けて共振器とする構造が考えられる。なかでも、一次元 (1-D) PC 導波路に基づく CROW (1-D PC-CROW) は、二次元、あるいは三次元 PC に欠陥部分を設けた CROW と比較すると、構造が簡単であるため、製造・集積化の観点から最も有利な構造である。しかしながら、1-D PC-CROW は本質的に漏れ

構造であり、その漏れ損失が非常に大きいという問題があった [5] . そこで、我々はこれまでに、損失の原因となるコアとクラッドの境界における電磁界の波数の接線成分に着目し、漏れ損失の低減化について検討を行ってきた。共振器の両端における電磁界の反射を弱めることで、損失の原因となる波数成分を低減できることを示し、十分に低損失な 1-D PC-CROW の構造を明らかにするとともに [6] , 1-D PC-CROW の超小型光波回路構成への応用可能性を示してきた。また、こうした CROW を用いて実際に光波回路を構成するためには、シリコン細線導波路などの直線導波路から CROW へ光波を高効率に入射する必要がある。両者を単純に接続した場合には、接続部分の反射の影響によって、透過率が劣化するという問題がある。しかしながら、導波路幅と空洞の大きさを同時に変化させたテーパ導波路を用いることで、両者を広い波長帯域において高効率に接続できることを示してきた [7] .

このように、これまで 1-D PC-CROW の超小型光波回路設計への応用に向けて、その基本特性に関する調査を行ってきたが、1-D PC-CROW を用いて様々な機能デバイスを構成するためには、曲がり導波路や

[†] 北海道大学大学院情報科学研究科, 札幌市
Graduate School of Information Science and Technology,
Hokkaido University, Sapporo-shi, 060-0814 Japan

a) E-mail: kawaguchi@icp.ist.hokudai.ac.jp

b) E-mail: ksaitoh@ist.hokudai.ac.jp

光波を結合させることが必要不可欠である．しかしながら，こうした 1-D PC-CROW の曲げ特性や結合特性に関しては，実験的にも理論的にも評価が行われていない．そこで本論文では，1-D PC-CROW の曲げ特性並びに結合特性を有限要素法による数値解析シミュレーションによって明らかにする．はじめに，1-D PC-CROW における導波路曲がりの角度や，曲がり導波路を構成する CROW の周期数に対する透過率の波長依存性を調べることで，高い透過率が得られる 1-D PC-CROW の曲げ導波路構造の探索を行う．また，結合特性に関しては，1-D PC-CROW に基づく方向性結合器において，偶モードと奇モードの分散関係を調べることで導波路間隔と結合長の関係を明らかにするとともに，曲がり部分において近接する導波路間における光波の結合も考慮した 3 dB 方向性結合器の設計方法を示す．

2. 1-D PC-CROW の基本構造

1-D PC-CROW の基本構造を図 1 に示す．空孔間隔を a ，空孔半径を $r = 0.3a$ ，導波路幅を $w = 1.2a$ とし，共振構造とするために，空孔 4 個ごとの空孔間隔を $b = 2.5a$ とする．また，共振器両端における電磁界の反射を弱め，クラッド領域への漏れ損失を低減するために，共振器両端の空孔半径を $r' = 0.2a$ とする [6]．コア部の材料にはシリコンを想定して，その屈折率を 3.48，クラッドには空気を想定している．なお，CROW の構造周期は， $\Lambda = 3a + b = 5.5a$ となる．ここでは， y 方向に構造変化のない二次元構造を考えている．このような構造の CROW の TM モードに対する漏れ損失は，動作波長を 1550 nm とした場合，およそ 0.2 dB/mm 程度と見積られる [6]．ここで TM モードとは，磁界が y 方向に向いている偏波である．ここでは，面外への放射は無視しているため，有限の高さを有する三次元導波路に対する損失は，これよりも大きい値であると考えられる．

図 2 に，CROW の曲がり導波路の構造を示す．導

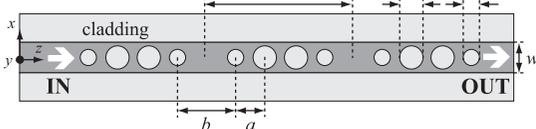


図 1 1-D PC-CROW の構造図
Fig. 1 Structure of 1-D PC-CROW.

波路幅や空孔半径は CROW の基本構造と同じとし，空孔間隔や共振器部分の長さは，それぞれの空孔の中心間を結ぶ弧の長さとしている．また，曲がりを構成する角度を θ ，曲げ半径は R としている．ここで，このような CROW の伝搬特性解析を行うには，直線導波路から光波を入射する必要があるが，両者を単純に接続すると，接続部分における反射が問題となる．そこで入出力部分に，直線導波路と CROW を高効率に接続するためのテーパ導波路を設ける．テーパの構造を図 3 に示す．テーパを構成する導波路パラメータについては，次式を用いて決定する [7]．

$$R_{ij} = R_0 + (1 - R_0)z_{ij}/(N_{taper}\Lambda) \quad (1)$$

$$w_{ij} = w_0 + (w - w_0)(i - 1)/N_{taper} \quad (2)$$

ここで， R_{ij} は $z = z_{ij}$ の位置における空孔の縮小率， N_{taper} はテーパを構成する CROW の周期数， z_{ij} は i 番目 ($i = 1, 2, \dots, N_{taper}$) の基本構造内に存在する j 番目 ($j = 1, 2, 3, 4$) の空孔の中心座標， R_0 は $z = 0$ の位置における縮小率であり，直線導波路とテーパの接続位置を $z = 0$ とする．また， w_i はテーパ導波路の i 番目の基本構造の導波路幅であり， w_0 は直線導波路の導波路幅である．こうしたテーパにおいて， $R_0 = 0.2$ ， $N_{taper} = 4$ ， $w_0 = 0.84w$ とした構造のテーパを用いて両者を接続した場合，1550 nm を中心におよそ 42 nm という広い波長帯域において，接続部分における反射の影響を低減し，98%以上の透過率を得ることができる [7]．ここでは，これらのパラメータを

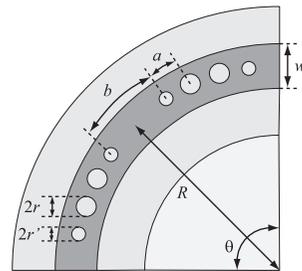


図 2 1-D PC-CROW による曲がり導波路の構造図
Fig. 2 Structure of bent 1-D PC-CROW.

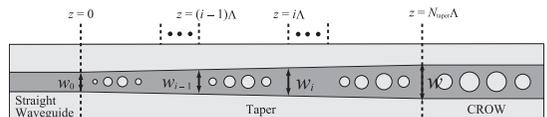


図 3 テーパの構造図
Fig. 3 Structure of taper waveguide.

有するテーパ導波路を入出力部分に設けて数値解析を行う。

3. 1-D PC-CROW の曲げ特性

図4に、解析対象とする導波路構造を示す。直線導波路から光波を入射し、 θ 度曲がり導波路を2回迂回した後の透過率を調べる。図2における曲げ半径 R は、以下の式で与えるものとする。

$$R\theta = N_{bend}\Lambda \quad (3)$$

ここで、 N_{bend} は曲がりを構成する CROW の周期数である。伝搬特性解析を行うには、直線導波路から光波を入射する必要があるため、入出力部分には、直線導波路と CROW を高効率に接続するためのテーパ導波路を設ける。はじめに、透過率の曲がりを構成する角度に対する依存性について調べる。図5に、二次元時間領域有限要素ビーム伝搬法 (2-D FETD-BPM) [8] を用いて計算された、式(3)中の N_{bend} を1に固定して θ を変化させた構造における TM モードに対する透過特性の波長依存性を示す。曲げの角度が緩やかになるにつれて、透過率が高くなっていることが分かる。CROW を1周期で90度曲げた構造 ($\theta = \pi/2, N_{bend} = 1$) では、およそ90%程度の透過率を示しており、動作波長を1550 nm と考えた場

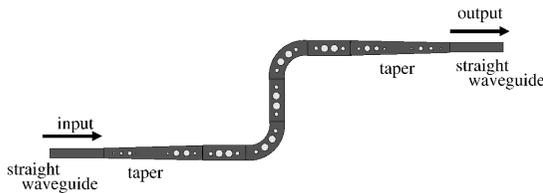


図4 曲がり導波路の構造図

Fig.4 Structure of a bent waveguide.

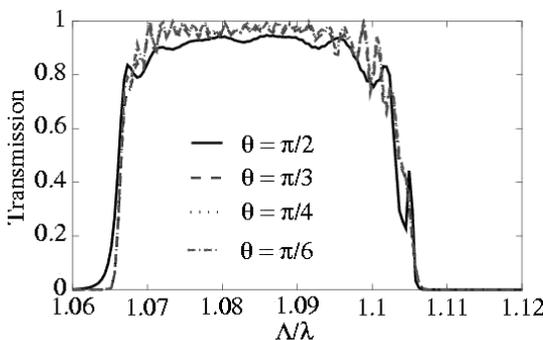


図5 透過率の θ 依存性 ($N_{bend} = 1$)

Fig.5 θ dependence of transmission ($N_{bend} = 1$).

合、 $\Lambda = 1.68 \mu\text{m}$ であるので、その曲げ半径はおよそ $R = 1.0 \mu\text{m}$ である。透過率が低下している原因として、曲がり部分における反射の影響、若しくは外側への放射が考えられる。そこで $\theta = \pi/2, N_{bend} = 1$ の構造における反射を計算した結果を図6に示す。図より、この構造における透過率の低下は、微小な曲げによる放射が原因であると確認できる。

次に、曲がりを構成する角度を90度 ($\theta = \pi/2$) に固定して、 N_{bend} を変化させた場合の透過率の評価を行う。図7に、 N_{bend} を1から4まで変化させた構造に対する透過率の波長依存性を示す。曲がりを構成する周期数を3周期以上とすることで、ほぼ放射なく90度曲げが可能であることが分かる。式(3)から分かるように、3周期の CROW で90度曲げを構成した場合、その曲げ半径はおよそ $3 \mu\text{m}$ 程度であり、シリコン細線導波路に代表されるような高屈折率差光導波路と同等の非常に小さい曲げ半径であるといえる。

ここまで、 N_{bend} を整数としてその曲げ特性の評価を行ってきたが、このような条件では、曲げ半径が

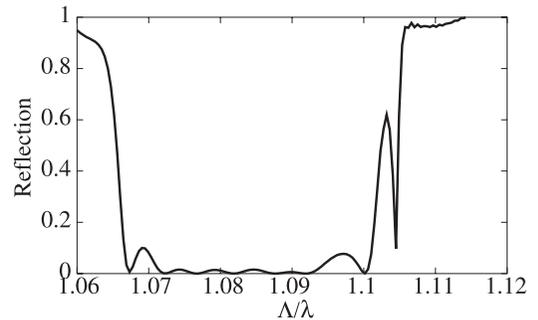


図6 $\theta = \pi/2, N_{bend} = 1$ の構造における反射

Fig.6 Reflection characteristic for the structure with $\theta = \pi/2, N_{bend} = 1$.

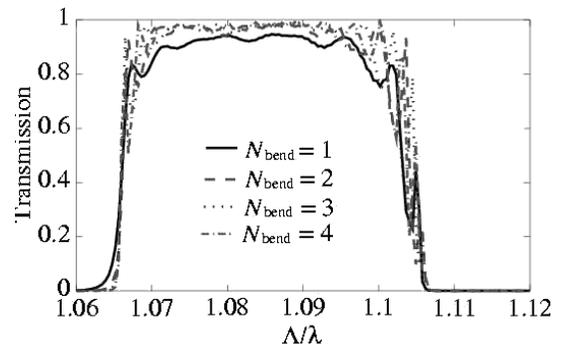


図7 透過率の N_{bend} 依存性 ($\theta = \pi/2$)

Fig.7 N_{bend} dependence of transmission ($\theta = \pi/2$).

Λ/θ の整数倍の値に制限されてしまう．そこで，光波回路設計における自由度を拡大するために， N_{bend} を CROW の基本構造の整数倍ではない場合の透過特性を調べる．ここで， $\theta = \pi/2$ とし，90 度曲がりに対しては CROW を 3 周期以上の周期数で曲げを構成することで，ほぼ 100%に近い透過率が得られることから，図 8 に示すように， N_{bend} を $3 + 0.5b/\Lambda$ ， $3 + (0.5b + a)/\Lambda$ ， $3 + (0.5b + 2a)/\Lambda$ ， $3 + (0.5b + 3a)/\Lambda$ とした構造について考える．それぞれの透過率を調べた結果を図 9 に示す．図から，CROW を曲げる際，その曲がり導波路を構成する曲げ半径は基本構造周期に制限されることなく，任意に設計できることが分か

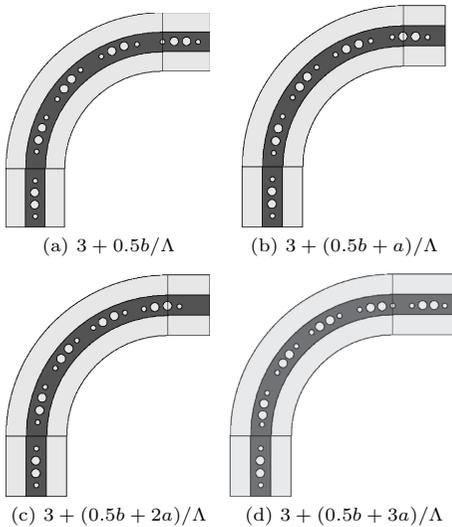


図 8 N_{bend} が整数でない場合の CROW の構造
Fig. 8 Bent 1-D PC-CROW structure with non-integral N_{bend} number.

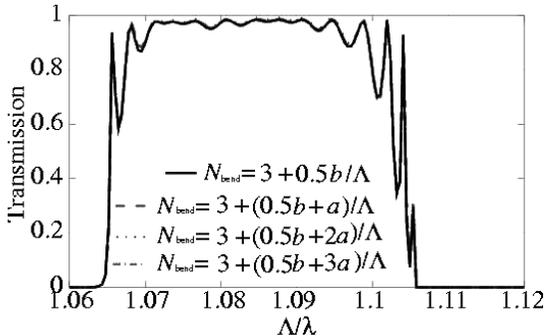


図 9 N_{bend} が整数でない場合の透過特性
Fig. 9 Transmission characteristics for the structure with non-integral N_{bend} number.

る．これは，曲がり部分のみではなく入出力部分も含めて CROW の周期性が保たれているために， N_{bend} が整数でない構造においても高い透過率が得られるものと考えられる．

4. 1-D PC-CROW の結合特性

図 10 に示すような 1-D PC-CROW による方向性結合器を考える．はじめに，結合長に関して検討を行う．結合長 L_c は，偶モード，奇モードの伝搬定数をそれぞれ β_e ， β_o として次式によって見積もられる．

$$L_c = \frac{\pi}{|\beta_e - \beta_o|} \quad (4)$$

図 11 に，周期構造導波路解析のための有限要素法 [9] を用いて算出された，二つの導波路間の距離 d を変化した構造に対する結合長の波長依存性を示す． $d = 0.08\Lambda$ とすると，中心波長における結合長がおよそ 6Λ となるので，CROW の基本構造 3 周期で結合器を構成すると 3 dB の結合率が得られると予想される．この結果をもとに 3 dB 方向性結合器の設計を行

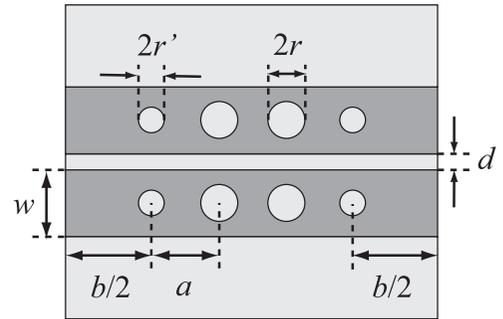


図 10 1-D PC-CROW に基づく方向性結合器の構造図
Fig. 10 Structure of a directional coupler based on 1-D PC-CROW.

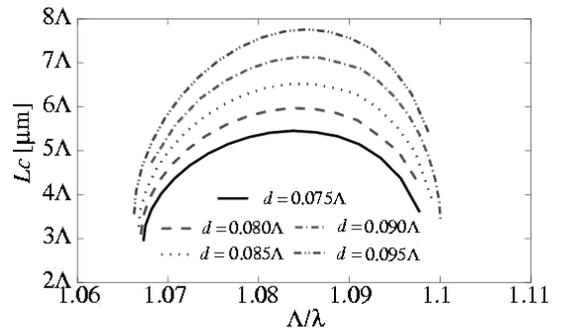


図 11 結合長の波長依存性
Fig. 11 Wavelength dependence of coupling length.

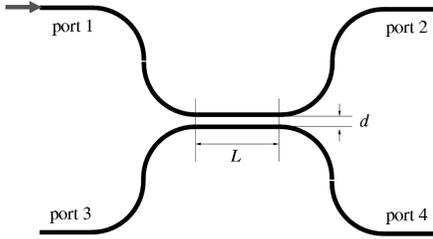


図 12 方向性結合器の全体構造図
Fig. 12 Overall structure of a directional coupler.

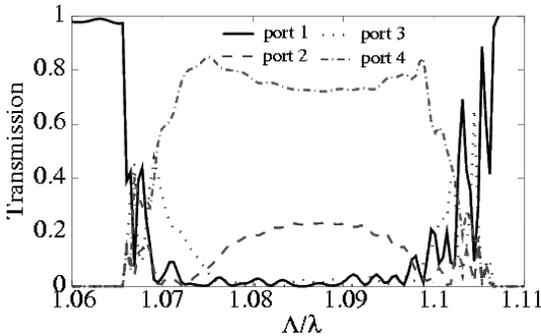


図 13 $d = 0.08\lambda, L = 3\lambda$ の場合の透過特性
Fig. 13 Transmission characteristic for the structure with $d = 0.08\lambda$ and $L = 3\lambda$.

う．図 12 に，ここで検討する方向性結合器の構造を示す．直線導波路から光を入射し，高効率に CROW と接続するために，各ポートの入出力部分にはテーパを設けている．CROW の曲がりに関しては，CROW の基本構造 4 周期で 90 度曲がりを構成している．結合器部分は，結合器を構成する CROW の直線部分の長さを L として， $L = 3\lambda, d = 0.08\lambda$ としている．図 13 に，透過率の波長依存性を示す．分散曲線から見積もられる結合長は 6λ であるため，本構造 ($L = 3\lambda$) においては，中心波長において 50% の結合率となることが予想されるが，実際には 70% 程度の結合率となっている．これは，結合器の直線部分だけでなく，曲がり部分において近接している導波路においても光波の結合が起こっているためであると考えられる．

そこで，曲がり部分における結合の影響がどの程度かを明らかにするために， $L = 0$ とした方向性結合器の透過特性を図 14 に示す．曲がり部分のみで 5.6% の結合が生じている．よって，この 5.6% の結合に相当する実効的直線部分の長さを求め，それを考慮して L を再設計することで 3 dB の結合を実現することを試みた．ポート 4 における透過率 T は，結合器の長さを

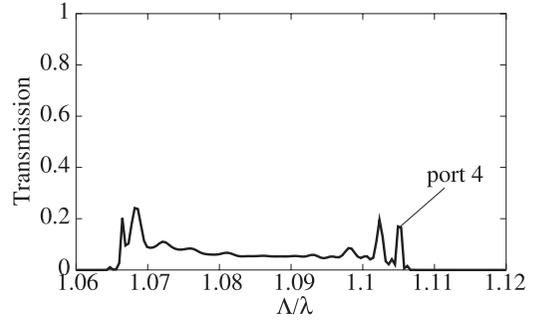


図 14 $d = 0.08\lambda, L = 0$ の場合の透過特性
Fig. 14 Transmission characteristic for the structure with $d = 0.08\lambda$ and $L = 0$.

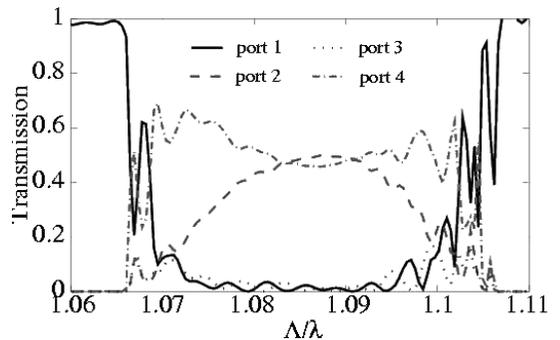


図 15 $d = 0.08\lambda, L = 2\lambda$ の場合の透過特性透過特性
Fig. 15 Transmission characteristic for the structure with $d = 0.08\lambda$ and $L = 2\lambda$.

z として，以下の式で表される．

$$T = \sin^2(\kappa z) \tag{5}$$

ここで， κ は結合係数であり，

$$\kappa = \frac{\pi}{2L_c} \tag{6}$$

と表される．今， $d = 0.08\lambda, L = 0$ のとき， $T = 0.056$ である．ここで，直線部分での結合長 $L_c = 6\lambda$ を用いると，曲がり部分 5.6% の結合を直線の長さに置き換えた値を求めることができ，その値は $z = 0.91\lambda$ と求まる．よって，直線部分の長さを 2λ とすれば，曲がり部分の 0.91λ を含めた実効的な L は 3λ 程度となり，3 dB 結合が実現できると予想される．図 15 に， $L = 2\lambda, d = 0.08\lambda$ とした方向性結合器の透過特性を示す．このように，曲がり部分における結合も考慮することによって，3 dB 方向性結合器を設計することができる．また，結合率には波長依存性があるが，このような方向性結合器を多段に接続することによって，波長無依存の結合器を構成することができると考えら

れる [10], [11].

5. むすび

1-D PC-CROW の曲げ特性並びに結合特性に関して検討を行った。はじめに、FETD-BPM を用いて、曲げを構成する角度や CROW の周期数に対する透過率の波長依存性を調べることで、高い透過率が得られる構造の調査を行った。特に、種々の光波回路を小型に構成する上で必要となる 90 度曲がりに関しては、曲げ半径およそ $3\ \mu\text{m}$ 程度の大きさで構成できることを示した。結合特性に関しては、導波路間隔と結合長の関係を調べ、これをもとに 3dB の結合率が得られる方向性結合器の設計を行った。分散曲線から見積もられる結合率と、実際に設計を行った方向性結合器では結合率に違いが見られたが、曲がり部分における光波の結合も考慮することで 3dB の結合率が得られることを示した。ここでは、初期的検討として、 y 方向には無限の構造を仮定して、その方向への放射を無視して解析を行ったが、実際の三次元の構造を有する CROW に対して解析を行うことが今後の課題である。

文 献

- [1] A. Yariv, Y. Xu, R.K. Lee, and A. Scherer, "Coupled-resonator optical waveguide: A proposal and analysis," *Opt. Lett.*, vol.24, pp.711–713, June 1999.
- [2] M. Bayindir, B. Temelkuran, and E. Ozbay, "Propagation of photons by hopping: A waveguiding mechanism through localized coupled cavities in three-dimensional photonic crystals," *Phys. Rev. B*, vol.61, pp.R11855–R11857, May 2000.
- [3] S. Oliver, C. Smith, M. Rattier, H. Benisty, C. Weisbuch, T. Krauss, R. Houdre, and U. Oesterle, "Miniband transmission in a photonic crystal coupled-resonator optical waveguide," *Opt. Lett.*, vol.26, pp.1019–1021, July 2001.
- [4] S. Mookherjee and A. Yariv, "Coupled-resonator optical waveguides," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol.8, pp.448–456, May 2002.
- [5] A. Martinez, J. Garcia, P. Sanchis, F.C. Soto, J. Blasco, and J. Marti, "Intrinsic losses of coupled-cavity waveguides in planar-photonic crystals," *Opt. Lett.*, vol.32, pp.635–637, March 2007.
- [6] Y. Kawaguchi, N. Kono, K. Saitoh, and M. Koshiba, "Loss reduction mechanism for coupled cavity waveguides in one-dimensional photonic crystals," *J. Lightwave Technol.*, vol.26, pp.3461–3467, Oct. 2008.
- [7] Y. Kawaguchi, K. Saitoh, and M. Koshiba, "Design of taper structure for highly efficient coupling between one-dimensional photonic crystal coupled resonator optical waveguide and straight waveguide," *J. Lightwave Technol.*, vol.27, pp.2924–2929, July 2009.
- [8] M. Koshiba, Y. Tsuji, and M. Hikari, "Time-domain beam propagation method and its application to photonic crystal circuits," *J. Lightwave Technol.*, vol.18, pp.102–110, Jan. 2000.
- [9] K. Inoue and M. Koshiba, "Finite-element analysis of periodically dielectric loaded axisymmetric waveguides," *Int. J. Electronics*, vol.71, pp.349–361, Feb. 1991.
- [10] B.E. Little and T. Murphy, "Design rules for maximally at wavelength-insensitive optical power dividers using Mach-Zehnder structures," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.9, pp.1607–1609, Dec. 1997.
- [11] M. Oguma, T. Kitoh, Y. Inoue, T. Mizuno, T. Shibata, M. Kohtoku, and Y. Hibino, "Compact and low-loss interleave filter employing lattice-form structure and silica-based waveguide," *J. Lightwave Technol.*, vol.22, pp.895–902, March 2004.

(平成 21 年 8 月 10 日受付, 11 月 17 日再受付)



川口 雄揮 (学生員)

平 19 北大・工・電子卒・平 21 同大大学院修士課程了。同年同大大学院博士課程入学, 現在に至る。フォトニック結晶導波路に関する研究に従事。日本学術振興会特別研究員。



齊藤 晋聖 (正員)

平 9 北大・工・電子卒・平 11 同大大学院修士課程了。平 13 同博士課程了。同年北大大学院・助手, 平 17 同助教, 平 19 同准教授, 現在に至る。光ファイバ通信, 光エレクトロニクス, ナノフォトニクスなどに関する研究に従事。博士(工学)。平 11~13 日本学術振興会特別研究員。平 11 本会論文賞, 平 14 本会学術奨励賞, 平 15 丹羽保次郎記念論文賞, 平 17 エリクソン・ヤング・サイエンティスト・アワード, 平 20 文部科学大臣表彰若手科学者賞, 平 21 船井情報科学奨励賞受賞。IEEE, OSA (the Optical Society of America) 各会員。平 21~22 年度本会北海道支部庶務幹事, 平 21~22 IEEE Sapporo Section Secretary。



小柴 正則 (正員:フェロー)

昭 46 北大・工・電子卒．昭 48 同大学院修士課程了．昭 51 同博士課程了．同年北見工大・工・電子講師．昭 52 同助教授．昭 54 北大・工・電子助教授．昭 62 同教授．平 9 北大大学院・教授，現在に至る．光ファイバ通信，光エレクトロニクス，ナノフォトリクスなどに関する研究に従事．工博．昭 62，平 9，平 11 本会論文賞受賞．平 10 本会エレクトロニクスソサイエティ賞受賞．平 16 本会業績賞受賞．著書「光・波動のための有限要素法の基礎」(森北出版)、「光導波路解析」(朝倉書店)、「基礎からの電磁気学」(培風館)、「波動解析基礎」(コロナ社)，“Optical Waveguide Analysis” (McGraw Hill)，“Optical Waveguide Theory by the Finite Element Method” (KTK Scientific Publishers/Kluwer Academic Publishers)．共著 1 冊．分担 19 冊．映像情報メディア学会，電気学会各会員．IEEE Fellow．OSA (the Optical Society of America) Fellow．平 11 年度本会エレクトロニクスソサイエティ会長．平 14 IEEE Lasers and Electro-Optics Society (LEOS) Japan Chapter 委員長．平 15 年度映像情報メディア学会副会長．平 15～16 年度本会調査理事．平 17 年度本会エレクトロニクスソサイエティ光エレクトロニクス研究専門委員会委員長．平 17～20 年度本会評議員，平 20 年度本会北海道支部長，平 21～22 年度本会副会長，平 21～22 IEEE Sapporo Section 委員長．