



世界に誇れる研究開発成果

石英系プレーナ光波回路技術

いのうえ やすゆき

井上 靖之

NTTフォトニクス研究所

NTTフォトニクス研究所では、1980年代初頭から石英系ガラス導波路を用いたパッシブ光集積回路であるプレーナ光波回路（PLC: Planar Lightwave Circuit）の研究に着手し、27年間もの長期的な研究開発を継続することで、PLCと呼ばれる研究分野を創出するとともにパッシブ光集積回路という産業の1テーマを形成してきました。その過程で、DWDM用波長合分波器としてのAWGや、FTTH用光スプリッタなど、光通信システムのキーデバイスを世界に先駆けて実用化してきました。ここでは、PLCの概要を紹介するとともに研究開発の歴史とその特徴および今後の展望について紹介します。

PLC研究開始の背景

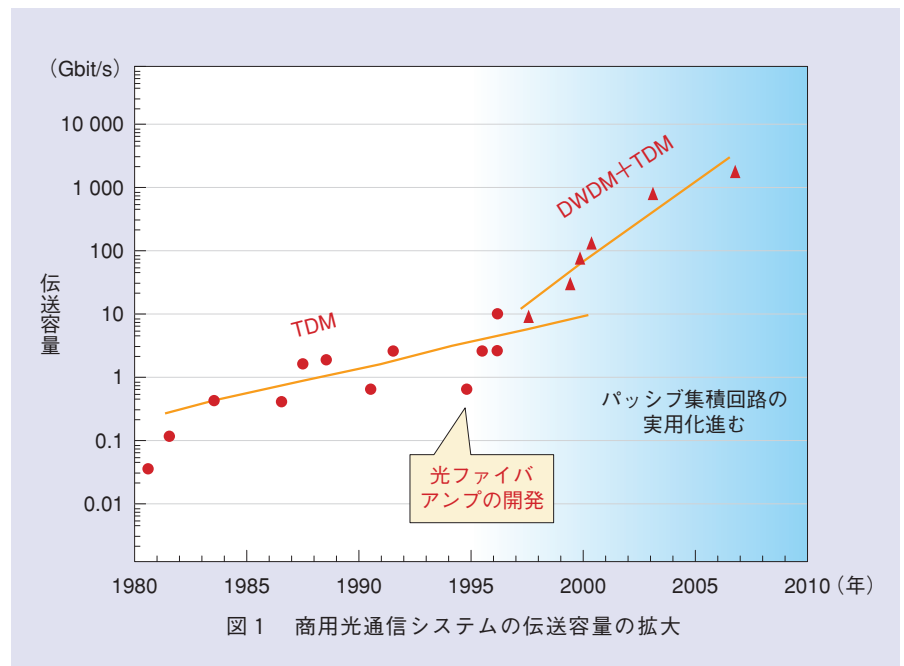
光集積回路の研究は、1969年に米国ベル研究所のS. E. MillerがIntegrated Opticsの概念を提唱したことに始まります。その後、GaAs, InPなどの半導体をベースとしたモノリシック光集積回路の研究や、LiNbO₃, 石英ガラス, シリコン, ポリマーなどの誘電体や有機物をベースとしたパッシブ光集積回路もしくはハイブリッド光集積回路の研究が世界中の研究機関で継続的に進められてきました。

一方、1970年に「半導体レーザーの室温連続発振」および「20 dB/km 低損失光ファイバ」の実現により、光通信の研究が加速され、1980年代初頭には光ファイバ通信が商用化されました。商用光通信システムの大容量化の進展を図1に示します。1980年から1990年代中ごろにかけて、時分割多重（TDM: Time Division Multiplexing）技術により32 Mbit/sから2.5 Gbit/sへと大容量化が進められました。その後、インターネットの普及による通信トラフィック需要の増大という背景のもと、光ファイバアンプの開発がブレイクスルーとなり高密度波長多重（DWDM: Dense Wavelength

Division Multiplexing）による伝送容量の拡大が急速に進みました。DWDMシステムでは、光波長合分波器や光レベル等化器等のパッシブ光集積回路が必要とされます。このパッシブ光集積回路の実用化に関して、光ファイバアンプが重要な役割を演じており、パッシブ光集積回路で生じる光損失を光ファイバアンプで補償できたことが、パッシブ光集積回路の実用化を可能にしたといっても過言ではありません。さらに、2000年以降アクセス

用FTTH（Fiber To The Home）システムやROADM（Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexing）と呼ばれるフレキシブルな光通信システムが開発・実用化されたことにより、光スプリッタや光スイッチ等のパッシブ光集積回路の必要性が一段と高まってきています。

このような背景のもと、NTTでは1970年代に低損失光ファイバの研究を精力的に行い、茨城研究所においてVAD法（Vapor-phase Axial Depo-



sition Method)⁽¹⁾を電線メーカーと共同で研究開発し実用化しました。1980年代に入り、光ファイバの商用化が進む中で、光ファイバ研究を推進してきた研究者が次のテーマとして取り組んだものの1つがPLC研究でした。

PLCとは

PLCは、**図2**に示すように光ファイバと同様の光導波路構造を平坦な基板

の上に形成したものです。光ファイバは、直径約10ミクロンのコアを125ミクロンのクラッドで覆った構造になっており、コアに入射された光は、クラッドに比べて屈折率の高いコアに閉じ込められて光ファイバの長手方向に伝搬します。一方PLCは、数ミクロン角のコアを厚み50ミクロン程度のクラッドで埋め込んだ構造になっており、端面からコアに入射された光は、コアのパターンに従い長手方向に伝搬します。

基本的に光ファイバは遠方に光を伝搬させることが目的であるのに対して、PLCでは、分岐、カプラ、遅延線、位相シフタ等の回路要素を駆使することで任意の光回路機能を実現する点が両者の違いになります（PLCとはプレーナ光波回路という言葉から分かるように本来材料に依存しない概念です。しかし、ここでは、石英系ガラス導波路を用いたプレーナ光波回路という意味でPLCという言葉を用います）。

PLC作製工程の概要を**図3**に示します。まずはじめに、シリコン基板上にFHD法（Flame Hydrolysis Deposition Method）でSiO₂ガラス微粒子を堆積します。コア層に相当する部分にはGeをドーパントとして添加することで下部クラッド層よりも屈折率を高めています。次に、1000℃以上の高温で熱処理することによりガラス微粒子が溶けて透明なガラス膜が形成されます。その後、フォトリソグラフィと反応性イオンエッチング法によりコアを任意の形状にパターン化し、最後に、FHD法で上部クラッドガラスを堆積して、埋め込み導波路を実現します。PLC作製工程は、光ファイバ研究で培った透明度の高いガラス作製技術と、LSI研究で培ったフォトリソグラフィおよび加工技術をうまく融合して構成されているのです。

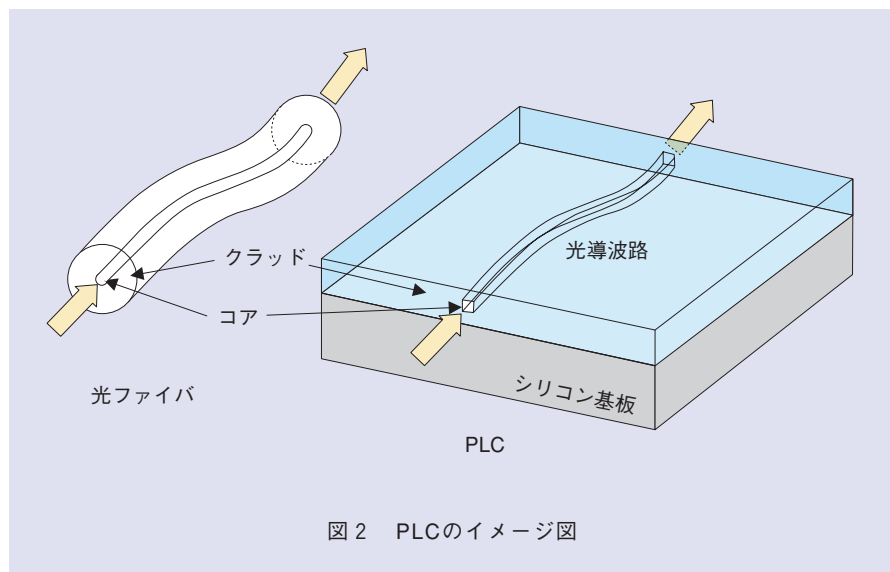


図2 PLCのイメージ図

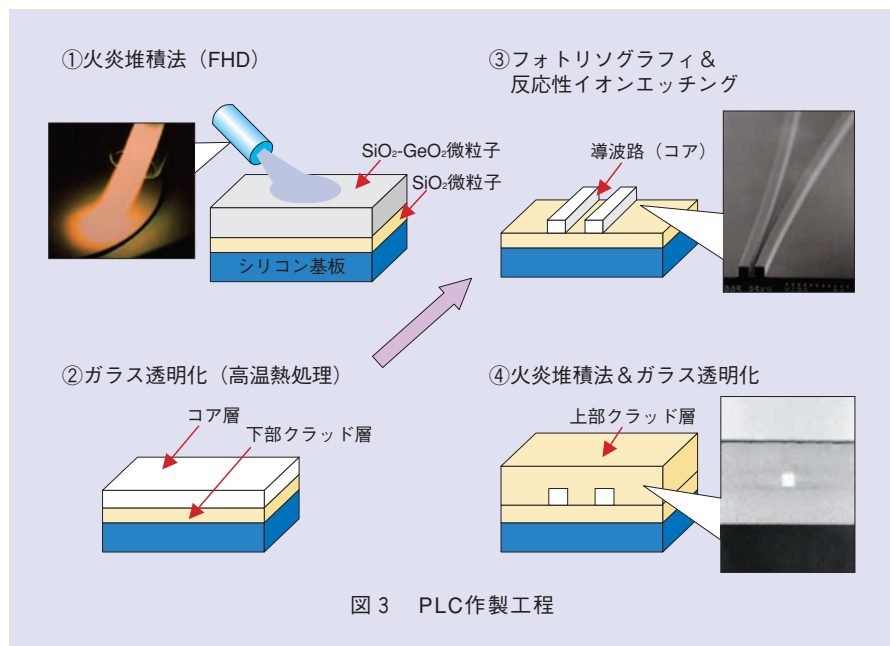


図3 PLC作製工程

PLC研究の歴史

NTTにおけるPLC研究の歴史を大まかに**図4**に示します。

NTTにおける石英系ガラス導波路の最初の試みは、1980年代初頭の武蔵野研究所における伊澤達夫らによる研究⁽²⁾でした。その後、PLC研究は茨城研究所に引き継がれ、河内正夫らによりVAD法を応用したFHD法⁽³⁾が開発され、**図3**に示すような現在のPLCの原型がかたちづくられました。

大まかな年代で分けると、1980年代に導波路そのものの研究が進められ、1980年代後半から1990年代前半にかけて、非対称マッハツェンダ干渉計をベースとした光周波数フィルタ⁽⁴⁾、波長無依存カプラ⁽⁵⁾、光スプリッタ、マトリクス光スイッチ⁽⁶⁾などの各種光回

路研究が行われました。

■AWGの発明

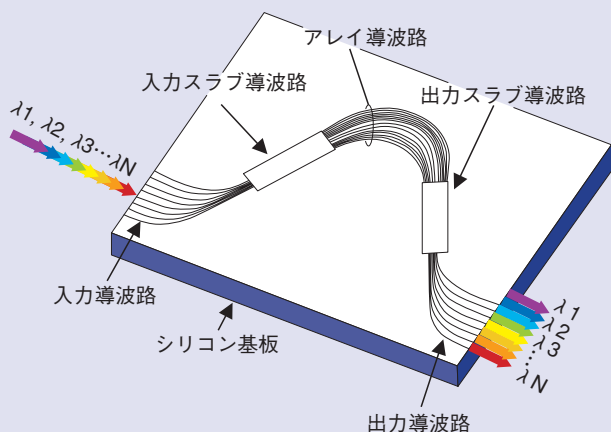
1990年代のもっとも重要な研究成果の1つが異なる波長の光を合分波することができるAWG (Arrayed-Waveguide Grating)⁽⁷⁾の発明です。AWGの回路構成を図5 (a) に示しま

す。この図における1本1本の線が図2で説明した光導波路に相当します。AWGは入出力導波路、2つのスラブ導波路、 ΔL ずつ長さが異なる数百本のアレイ導波路から構成されています。入力導波路から入射された光は、まず入力スラブ導波路で複数のアレイ導波路に分岐されます。各々のアレイ導波路を伝搬した光は出力スラブ導波路で多光束干渉を起こし出力スラブ導波路の出力端に焦点を結びますが、アレイ導波路の長さが ΔL ずつ異なるため出力スラブ導波路の入射端における波面は入射光の波長に依存します。すなわち、出力スラブ導波路の出力端における焦点位置も入射光の波長に依存することになります。その結果、異なる波長の光は異なる出力導波路に結合して別々の出力ポートから出力されることになり、AWGが光波長合分波器として機能することになります。

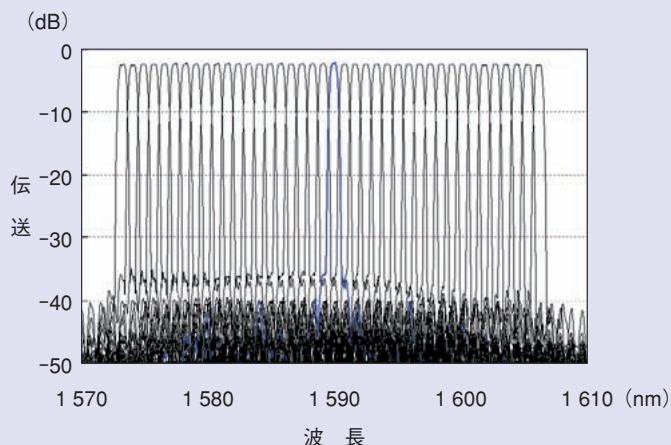
典型的な100 GHz 40ch AWGの透過スペクトル例を図5 (b) に示します。左側から個々のピークが異なる出力ポートの透過スペクトルを表しており、中央の21番ポートの透過スペクトルを青線で示しています。特定の出力ポ

年代とフェーズ	技術トピックス	外部状況と研究対象
1980~1990 導波路研究	石英系導波路の基礎研究開始 FHD法の発明 (1983)	各種光回路の研究 MZI光周波数フィルタ リング共振器 波長無依存カプラ (WINC) 光スプリッタ マトリクス光スイッチ
1990~1995 PLC基盤技術確立	PIRI社 (米国) 設立 (1987) AWGの発明 (1990) AWG偏波無依存化 NTTエレクトロニクス社 PLC部門設立 (1994) PLCハイブリッド集積研究	
1995~2000 PLCビジネス化	AWG温度無依存化 AWG低損失化	DWDM技術の普及 AWG需要増大
2000~2005 PLC機能集積化	スイッチ低消費電力化 高 Δ 化による小型化	ITバブル FTTHシステムの普及 光スプリッタ需要増大 ROADMシステムの普及 VOA、光スイッチ需要増大 高速位相変復調技術研究の進展 PLC-LNハイブリッド集積光変調器
2005~ ハイブリッド集積化	マルチチップ集積化 1チップ集積化	

図4 NTTにおけるPLC研究の歴史



(a) 回路構成



(b) 透過波長スペクトル

図5 AWG波長合分波器

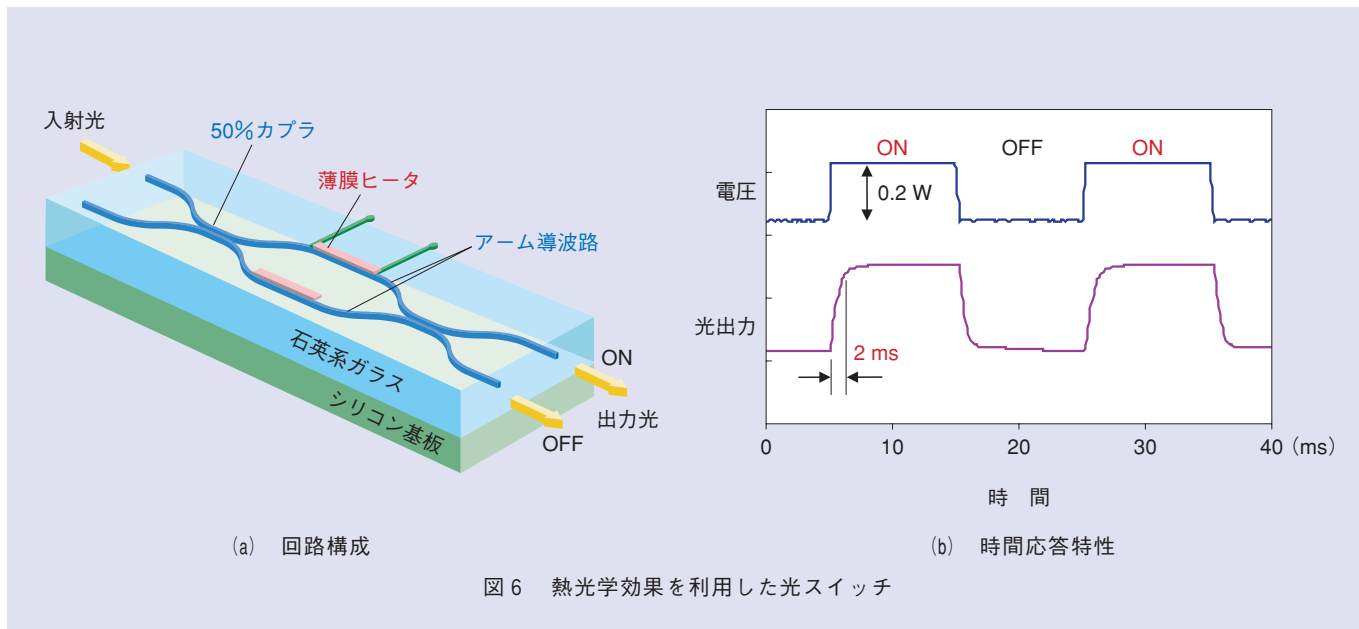


図6 熱光学効果を利用した光スイッチ

トには特定の波長のみが出力されていることが分かります。AWGは多光束干渉により多数の波長を一括して合分波できるため、他の合分波器に比べて小型低コストという特長を有しています。DWDM技術が普及した1990年代後半の段階では、ファイバブラッググレーティング (FBG: Fiber Bragg Grating) や誘電体多層膜フィルタ (TFF: Thin Film Filter) を用いた光波長合分波器の研究開発が盛んに行われましたが、その後の小型化および低コスト化要求の中でAWGが高いシェアを占めるようになってきています。

■光スイッチ

PLCは石英系ガラスから構成されているために材料的に極めて安定で信頼性が高いという特長があります。しかしその安定性と引替えに機能性が限定されています。唯一利用されている機能はガラスの屈折率が温度に依存する熱光学効果です。熱光学効果を利用した光スイッチの回路構成を図6 (a) に示します。光スイッチは2つの50%カプラを2本のアーム導波路で連結したマッハツェンダ干渉計になっており、

一方のアーム導波路表面に設けた薄膜ヒータを加熱することで、アーム導波路間に温度差を発生させ、熱光学効果を介してアーム導波路間の位相差を制御することができます。その結果として光のスイッチングが実現されます。光スイッチは、アーム導波路間の位相差を「0」と「 π 」で切り替えて使いますが、その中間状態を利用すれば可変光減衰器 (VOA: Variable Optical Attenuator) として機能させることもできます。DWDMシステムやROADMシステムにおける異なる波長信号間のレベル等化にはこのVOA機能が利用されています。

スイッチとして使用した場合の時間応答特性を図6 (b) に示します。スイッチング時間は2ミリ秒程度であり、電気光学効果等を用いた場合に比べ速度は遅いものの偏波依存性がなく、ドリフト等の問題もないため制御は比較的シンプルで容易という特長があります。PLCスイッチ・VOAは並列に多数の回路を集積することができるため、DWDMシステムにおいて波長数分のスイッチ・VOAが必要な場合などに多く使用されています。

前述の各種光回路研究に合わせて、1990年代前半に設計・プロセス・実装のPLC基盤技術が確立されました。特に汎用的な設計技術や作製再現性の高いプロセス技術、信頼性の高いファイバ接続技術⁽⁸⁾が確立されたのがこのころです。

1990年代後半になると、DWDMシステムの普及に合わせてAWGの需要が高まり、グループ企業を介したPLCのビジネス化が進みました。その過程で、AWGの偏波無依存化⁽⁹⁾、透過帯域のフラット化⁽¹⁰⁾、温度無依存化⁽¹¹⁾、低損失化⁽¹²⁾、小型化⁽¹³⁾など数多くの研究がなされ、AWGの完成度が高められていきました。

2000年代に入ると、アクセス系のFTTHシステム普及に伴い光スプリッタの需要が高まり、メトロ系のROADMシステム普及に伴いAWG、VOA、光スイッチ、モニターPDを集積したROADMスイッチ⁽¹⁴⁾の需要が高まりました。この需要増大に伴いPLCのビジネス化がさらに進んでいます。

最近では、40 Gbit/s以上のTDM高速化に向けて、無線技術を応用し

た多値位相変復調技術などの研究が盛んになっています。その中で、PLCとLiNbO₃をハイブリッド集積した多値位相変調器⁽¹⁵⁾やPLC遅延復調器⁽¹⁶⁾の研究が進んでいます。今後も、高度な変復調技術の実現に向けてPLCの活躍の場は広がっていくと思われます。

■骨太の技術形成

PLC研究の歴史の中で特筆すべき点は、PLCが研究の粋を出ていなかった1990年前後の時期に、早くもビジネス化を意識したPIRI社（米国）やNTTエレクトロニクス社PLC部門の設立がなされていることです。この背景には、光ファイバ研究を電線メーカと協力してやってきた研究者が、「自らの手でビジネス化までやらないと本当の意味での骨太研究はできない」との思いがあったからです。自分たちが研究開発した光部品をグループ企業で製品化し、それをユーザの厳しい目で評価してもらい、その要求に耳を傾けることで、自分たちの研究の方向付けを行っていかうと考えたのです。デバイス研究では、自らの技術やアイデアをベースに研究を進めるのは当然ですが、一方でユーザの視点を持つことも大切です。新しい光部品を考案・研究開発し、それをユーザに評価してもらい新たな要求を引き出すことで、次の研究テーマをつくっていくことが可能になります。

この「研究」「開発」「ユーザ評価」を繰り返すことで、骨太の技術を形成することができるのです。実際のPLC研究では、純粋な研究機関では対象としないような「偏波無依存化」「低損失化」「低消費電力化」「小型化」といったユーザの視点を意識した高性能化の研究開発を、デバイスの製品化とともに長期間にわたり繰り返し行ってきました。その結果として、市場ニーズに耐えることができるPLC技術が形成できたと考えられます。

今後の展開

前述のとおり、PLCは機能性が限られています。将来的には、機能性を高める研究が進められると推測されます。そのアプローチとして、1つはパッシブなPLCとアクティブな光素子をハイブリッド集積することで機能性を高める方法です。もう1つは、材料そのものの機能性を高める方法があります。ポーリングによるガラスの電気光学効果の発現は興味深いアプローチだと思われれます。

私たちは、今後もPLCをベースとした光部品の研究開発を通して、光通信システムの発展に寄与していきます。

■参考文献

- (1) T. Izawa, S. Kobayashi, S. Sudo, and F. Hanawa: "Continuous fabrication of high silica fiber preform," in Tech. Dig. Int. Conf. Integrated Optics and Optical Fiber Commun., p.375, 1977.
- (2) T. Izawa, H. Mori, Y. Murakami, and N. Shimizu: "Deposited silica waveguide for integrated optical circuits," Appl. Phys. Lett., Vol.38, No.7, 1981.
- (3) M. Kawachi, M. Yasu, and T. Eda: "Fabrication of SiO₂-TiO₂ glass planar optical waveguides by flame hydrolysis deposition," Electron. Lett., Vol.19, No.15, pp.583-584, 1983.
- (4) N. Takato, K. Jinguji, M. Yasu, H. Toba, and M. Kawachi: "Silica-based single-mode waveguides on silicon and their application to guided-wave optical interferometers," IEEE J. Lightwave Technol., Vol.6, No.6, pp.1003-1010, 1988.
- (5) K. Jinguji, N. Takato, A. Sugita and M. Kawachi: "Mach-Zehnder interferometer type optical waveguide coupler with wavelength-flattened coupling ratio," Electron. Lett., Vol.26, No.17, pp.1326-1327, 1990.
- (6) A. Himeno, M. Okuno, Y. Ohmori, and M. Kawachi: "High-extinction ratio 8x8 thermo-optic matrix switch using silica-based planar lightwave circuits," in Tech. Dig. 1996 Topical Meet. Photonics in Switching, Vol.1, pp.177-178, paper PThB3, 1996.
- (7) H. Takahashi, S. Suzuki, and K. Kato: "Arrayed-waveguide grating for wavelength division multi/demultiplexer with nanometre resolution," Electronics Letters, Vol.26, pp.87-88, Jan. 1990.
- (8) Y. Hibino, F. Hanawa, H. Nakagome, M. Ishii, and N. Takato: "High reliability optical splitters composed of silica-based planar lightwave circuits," J. Lightwave Technol.,

Vol.13, No.8, pp.1728-1735, 1995.

- (9) H. Takahashi, Y. Hibino, and I. Nishi: "Polarization-insensitive arrayed-waveguide grating wavelength multiplexer on silicon," Optics Letters, Vol.17, pp.499-501, 1992.
- (10) K. Okamoto and A. Sugita: "Flat spectral response arrayed-waveguide grating multiplexer with parabolic waveguide horns," Electron. Lett., Vol.32, No.18, pp.1661-1662, 1996.
- (11) Y. Inoue, A. Kaneko, F. Hanawa, H. Takahashi, K. Hattori, and S. Sumida: "Athermal silica-based arrayed-waveguide grating (AWG) multiplexer," IEE Electron. Lett., Vol.33, No.23, pp.1945-1947, 1997.
- (12) A. Sugita, A. Kaneko, K. Okamoto, M. Itoh, A. Himeno, and Y. Ohmori: "Very low insertion loss arrayed-waveguide grating with vertically tapered waveguides," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol.12, No.9, pp.1180-1182, 2000.
- (13) Y. Hida, Y. Hibino, M. Itoh, A. Sugita, A. Himeno, and Y. Ohmori: "Fabrication of low-loss and polarisation-insensitive 256 channel arrayed-waveguide grating with 25 GHz spacing using 1.5% Δ waveguides," Electron. Lett., Vol.36, No.9, pp.820-821, 2000.
- (14) S. Suzuki, Y. Inoue, S. Mino, M. Ishii, I. Ogawa, R. Kasahara, R. Kasahara, Y. Doi, Y. Hashizume, and T. Kitagawa: "Compactly integrated 32-channel AWG multiplexer with variable optical attenuators and power monitors based on multi-chip PLC technique," OFC2004, ThL2, 2004.
- (15) T. Yamada, Y. Sakamaki, T. Shibata, A. Kaneko, A. Sano, and Y. Miyamoto: "Compact 111-Gbit/s integrated RZ-DQPSK modulator using hybrid assembly technique with silica-based PLCs and LiNbO₃ devices," OFC'08, Tech. Digest OThC3, 2008.
- (16) M. Oguma, Y. Nasu, H. Takahashi, H. Kawakami, and E. Yoshida: "Single MZI-based 1x4 DQPSK demodulator," ECOC 2007, Tech. Digest 10.3.3, 2007.



井上 靖之

光通信システムのさらなる発展を目指して、経済的かつ高機能なPLC技術の研究を進めていきます。

◆問い合わせ先

NTTフォトニクス研究所
複合光デバイス研究部
TEL 046-240-4022
FAX 046-240-4529
E-mail yinoue@aocl.ntt.co.jp