ポリマー光導波路の形成とそのデバイス特性

松 浦 徹*

1. はじめに

近年、情報通信の分野では光ファイバーを用いた光通信技術の進展がめざましい。すでに光ファイバー網は都市間の幹線だけでなく、FTTH (Fiber To The Home) に代表されるように各家庭まで行き渡りつつある。幹線系の光部品や光ファイバーには主に石英ガラスを用いた高機能な光導波路部品やシングルモードファイバー (SMF) が用いられている。一方、一戸建て住宅や集合住宅でのホームネットワーク、病院、官公庁、企業内のローカルエリアネットワーク (LAN) においては部品や配線の低コスト性が重要であるため、加工性に優れたポリマーを用いた光部品や大口径のプラスチック光ファイバー (POF) の導入が検討されている。そこで本稿では光通信用のポリマー光導波路に用いられる材料とその導波路加工方法について述べるとともに、作製したポリマー光導波路、光導波路部品の特性とそのネットワークへの適用例を紹介する。

2. ポリマー光導波路材料

2.1 種々のポリマー光導波路材料

現在、光導波路に用いるポリマーとして種々の材料が検討されている。表 1 に代表的な光導波路用ポリマー材料とその基本的な特性を示す。光導波路用材料に要求される最も基本的な要求性能は以下の 4 点である。

- 使用波長での光透過性に優れること。
- 精密な屈折率制御性を有すること。
- 薄膜成形と多層化が可能であること。

- 部品の使用温度範囲で十分な熱安定を有すること。

a. 使用波長と材料の光透過性

表 1 に示すように光導波路に用いられるポリマー材料は全ての波長で光透過性に優れているわけではなく、その材料の種類により適用可能な波長領域が異なっている。したがって、作製する光導波路部品の使用波長に応じて、適切な材料を選定する必要がある。長距離の光通信向けに近赤外波長 ($1.3 \sim 1.55 \mu\text{m}$) で使用される光導波路は、一般にコア系の小さいシングルモード光導波路であって、同波長で光透過性に優れた (低損失な) フッ素化ポリイミドや UV アクリレート樹脂が用いられている。一方、車やホームネットワーク等の、小規模な LAN では接続が容易でコスト的に有利な POF との組み合わせによる大口径のマルチモード光導波路が検討されており、波長は $1 \mu\text{m}$ 以下の $650 \sim 850 \text{ nm}$ が使われるため、この領域の可視波長で透明なエポキシ樹脂、ポリメチルメタクリレート樹脂等が用いられる。

b. 屈折率制御性

光導波路はその構造上の特徴から、平面型、スラブ型、リッジ型、埋め込み型に分類されるが (図 1)、光導波路部品として主に用いられるのは埋め込み型光導波路である。光は導波する媒体中において、屈折率の高い方へ進む性質があるため、埋め込み型光導波路は光の通る高屈折率のコアと光をコア内に閉じこめる低屈折率のクラッドからなり、コアがクラッドで囲まれた構造を有している。したがって、光導波路材料としては屈折率の異なる 2 種類の材料が必要であり、かつコアとクラッドの屈折率差 (Δ) は光の導波

表 1 光導波路用ポリマー材料の特性

材料	チャンネル導波路の損失値 (dB/cm)			耐熱性 (°C)		光導波路モード	
	$0.85 \mu\text{m}$	$1.3 \mu\text{m}$	$1.55 \mu\text{m}$	材料	導波路	シングル	マルチ
フッ素化ポリイミド		0.3	0.4	400	350	○	—
ベンゾシクロブテン		0.3	1.5	420		○	—
重水素化シリコン		0.12	0.4	420	250	○	—
重水素化 PMMA	<0.02	0.1	1.5	150	80	○	○
UV エポキシ樹脂	<0.1	0.5	4		200	○	○
UV アクリレート樹脂	0.1	0.2	0.24	150	85	○	○

* Matsuura, Tohru
日本電信電話(株) NTT フォトニクス研究所
厚木市森の里若宮 3-1 (〒243-0198)
2004.9.27 受理

図1 光導波路の種類

特性に大きな影響を与えるために、材料の屈折率を精密に制御できることが要求される。石英系光導波路やSMFでは石英ガラスにGaやIn等の元素をドーピングすることで屈折率を制御しているが、ポリマーでは分子構造が多様であるため、屈折率の異なる2種類のポリマーを混ぜ合わせ、またはポリマー材料の原料であるモノマから共重合して、組成（共重合比）を変えることで屈折率を制御できる。ポリマー導波路材料は原料の選定により、石英ガラスのドーピングと比較して、屈折率の制御範囲が広く、高屈折率差の光導波路が作製可能であり、 Δ の大きなマルチモード光導波路に適した材料でもある。

c. 薄膜成形性と多層化

光導波路の作製方法は後に詳しく述べるが、光導波路は薄膜の光部品であり、そのコア系はシングルモードでは8 μm 程度、大口径のマルチモードでも数百 μm であるため、材料は薄膜に成形加工可能であることが必須である。したがって、材料は均一で適当な粘度を有する液体または溶液状態のコーティング剤であることが多く、これらはスピンコートやキャストにより薄膜に成形され、その後加熱やUV照射により硬化される。

また光導波路はクラッド層とコア層を多層化して作製するため、多層化が可能でなければならない。一般にクラッドとコアは類似の材料となるため、クラッド層の上にコア層を塗布するとクラッド層がコア層の液体や溶媒により溶解したり、クラックを生じる場合があり、材料の耐溶剤性が光導波路材料への適性を制約する大きな要因となっている。

d. 熱安定性

表1には、各材料および光導波路の耐熱性を示した。光通信に用いられる光導波路部品に要求される信頼性として、使用温度範囲での熱安定性（耐熱性）は最も基本的で必須の要求条件である。例えば、空調制御されていない環境で

使用される光受動部品においてIEC（International Electrotechnical Commission）規格では $-25\sim 70^{\circ}\text{C}$ での信頼性が要求される。したがって、これらに用いられる材料や作製される光導波路には上記温度範囲を完全にカバーする温度領域での耐熱性、熱安定性が不可欠となる。

以下にNTTで開発した代表的なポリマー光導波路材料を紹介する。

2.2 フッ素化ポリイミド

近赤外の光通信波長での光透過性と耐熱性に優れた光導波路用材料として開発されたフッ素化ポリイミド^{1), 2)}（FLUPI-CB）の分子構造を図2に示す。FLUPI-CBは 300°C 以上の耐熱性と長距離の光通信に用いられる近赤外波長での優れた光透過性、および屈折率制御性を有するフッ素化ポリイミド共重合体である。基本骨格は耐熱性に優れた芳香族ポリイミドで構成され、フッ素の導入により優れた光透過性を付与し、さらにフッ素含有率の異なる2種類のポリイミドの共重合を行うことで屈折率制御性を持たせている。図3に共重合比と屈折率の関係を示す。芳香族ポリイミドは分子に平面性があるため、基板上で薄膜を形成すると、複屈折（基板面に平行な光の偏波での屈折率 n_{TE} と基板面に垂直な方向の光の偏波での屈折率 n_{TM} の差）を生じるが、FLUPI-CBは共重合比に対する複屈折の依存性が小さく（図2において、 n_{TE} と n_{TM} の傾きが平行）、かつ共重合比を変えることで、屈折率を広い範囲（コア/クラッド屈折率差：最大3%）で精密に制御できる。

図4はコアとクラッドにFLUPI-CBを用いて作製した埋め込み型光導波路の損失の波長依存性を示したものである。波長1.1, 1.4, 1.65 μm にはフッ素化ポリイミド分子に含まれるC-H結合の振動吸収の高調波に基づく光吸収ピークが観測されるが、光通信で主に用いられる1.3,

図3 フッ素化ポリイミド（FLUPI-CB）の屈折率制御性

図2 フッ素化ポリイミド材料（FLUPI-CB）

図4 フッ素化ポリイミド (FLUPI-CB) を用いた光導波路の損失の波長依存性 (導波路長 5 cm, 接続損失を含む)

図5 全フッ素化ポリイミド材料 (FLUPI-PF)

1.55 μm では低い損失となっている。また前記屈折率の一定性により、材料としてはポリイミド特有の複屈折性を有するものの、TE および TM モードのコア/クラッドの屈折率差が等しくなり、両モードでの損失の差 (偏波依存損失:PDL) を小さくできる²⁾。これにより部品の回路設計が容易になり、また全モードでの損失性能を向上できる。

さらに、前記フッ素化ポリイミドの C-H 結合を全て C-F 結合に置き換えて、近赤外の光通信波長の幅広い波長での優れた光透過性を有する全フッ素化ポリイミドが開発されている (図5)^{3),4)}。この材料においても、屈折率が大きい屈折率制御基 (Rf) をポリイミドの分子内に導入し、Rf の添加量を変化させることで、精密な屈折率制御性を付与している。

2.3 フッ素化エポキシ樹脂

光ファイバーによる長距離の通信では伝送損失の小さい近赤外波長が用いられるが、LAN やホームネットワーク等の短距離の通信では 1 μm 以下の短波長が検討されている。図6にフッ素化エポキシ化合物の分子構造を示す。エ

ポキシ樹脂は図に示すような分子末端に 3 員環のエポキシ環を有する低分子量のオリゴマ化合物に硬化剤を添加し、これを UV 照射や加熱することで得られる。エポキシ樹脂は 1 μm 以下の短波長領域での優れた光透過性を有する材料であり、またフッ素含有率の異なるエポキシ化合物を複数配合することで屈折率制御性を付与できる (図7)。図8はフッ素化エポキシ樹脂を用いて作製した光導波路の損失の波長依存性を示したものである。前記フッ素化ポリイミドと比較して、分子内に C-H や O-H 結合等の近赤外波長で光を吸収する分子結合を多数含んでいるが⁵⁾、1 μm 以下の短波長領域では極めて低い損失を示す⁵⁾。

3. ポリマー光導波路の作製と特性

ポリマー材料を用いた光導波路の作製は石英等の無機材料を用いて従来から行われているドライエッチング法を始めとして、ポリマーの特徴を活かした種々の方法が検討されている。ここではこれら幾つかの代表的な作製方法を述べる。

3.1 ドライエッチング法による光導波路の作製

ドライエッチング法は無機の石英系光導波路の作製にも用いられている最も代表的な光導波路の作製方法である。図9に作製工程の概要を示す。シリコン等の基板上に下部クラッドとなる樹脂をスピンコート等により所定の膜厚に塗布し、加熱や UV 照射により硬化して、下部クラッド層を形成する。この上に同様の手法によりコア層を多層化して形成する。このとき、良好なコア/クラッド多層膜を形成するために材料が多層化可能であることが重要である。次にフォトリソマスクとレジストを用いたフォトリソグラフィを行い、マスクをパターンニングする。一般にポリマー材料は酸素プラズマでエッチングが可能であるため、マスクを形成したコアに酸素の反応性イオンエッチング (RIE) を行い、マスクで保護されていないコアの不要な部分を除去する。エッチング終了後、マスクを除去し、最後に上部クラッド層を塗布し、硬化することで埋め込み型光導波路が形成できる。ドライエッチング法は RIE 等の真空装置が必要であり、またフォトリソグラフィが必要である等、工程が長く複雑であるが、コア径が小さく精密加工が必要なシングルモード光導波路の作製に適している⁶⁾。

屈折率の異なる 2 種類の全フッ素化ポリイミド (図5) をコアとクラッドに用いて、シリコン基板上に作製した埋

図6 フッ素化エポキシ樹脂材料

図7 フッ素化エポキシ樹脂の屈折率制御性

図8 フッ素化エポキシ樹脂光導波路の損失の波長依存性

図9 光導波路の作製工程 (ドライエッチング法)

め込み型光導波路の断面顕微鏡写真を図10に示す。クラッド層の中央部に約8 μm径のコアが形成されていることがわかる。

図11は直径6インチの樹脂基板(光学用ポリイミド基板⁷⁾)上に全フッ素化ポリイミド材料を用いて作製した長尺(導波路長375 mm)の曲線埋め込み型光導波路である。この光導波路の入射端面から波長1.55 μmの光を入射し、出射端面から出てきた光の強度比から求めたこの長尺光導波路の損失は0.16 dB/cmであり、低損失の光導波路が大面積の基板上で歩留まりよく作製できていることがわかる⁷⁾。

図10 Si基板上に作製した全フッ素化ポリイミド埋め込み型光導波路の断面

チップサイズ: 約10cm角
導波路長: 375mm

図11 光学用ポリイミド基板上長尺埋め込み型光導波路

3.2 直接露光法による光導波路の作製

直接露光法は光硬化性のポリマー材料を用いた低コストの光導波路作製方法である。図12にUV硬化エポキシ樹脂を用いた作製例を示す。基板上に下部クラッド、コアを形成するまでは、前節のドライエッチング法と同様であるが、UV硬化エポキシ樹脂は樹脂自体に光反応性を有しているため、コアを塗布した後、レジストとRIEによるパターン形成が不要となる。コア層形成の後、直接フォトリソマスクを通してUV照射を行い、未露光部のコア層を現像することでコアリッジが形成される⁸⁾。ただし、コア形成は現像液によるウェットエッチングとなるため、ドライエッチングと比較して加工精度が劣る。したがって、直接露光法は比較的ラフなエッチング精度で作製可能であり、またドライエッチングでは長時間を要する大口径(エッチングが深い)マルチモード導波路の作製に適している。

3.3 スタンパ法による光導波路の作製

スタンパ法も直接露光法と同様、低コストで量産に適した光導波路の作製方法である。図13に作製工程の概要を示す。まず初めにスタンパとなる金型の周囲にスペーサを置き、ここに下部クラッド層となるUV硬化性樹脂をキャストした後、ガラス等の透明な基板を乗せて、基板の上からUV光を照射し、クラッド層を硬化する。次に全体を上下反転し、金型を剥離して下部クラッド層に形成されたスタンパの溝にコア材を流し込み、UVを照射してコアを硬化させる。さらに上部クラッド層をキャストし、透明フィルムを置いて、その上からUV照射を行い、上部クラッド層を硬化することで埋め込み型光導波路が作製できる⁹⁾。スタンパを用いるため、前節の直接露光法と同様に大口径のマルチモード光導波路の作製に適している。図中の写真

図 12 光導波路の作製工程 (直接露光法)

図 13 光導波路の作製工程 (スタンパ法)

は UV 硬化エポキシ樹脂を用いて作製したコア系 175 μm の大口径マルチモード光導波路の断面を顕微鏡で観察したものである。コア上部にはコア流し込み時にはみ出た角状の突起が見られるが、高精度を必要としない、大口径の光導波路の作製に適している。

3.4 直接描画による光導波路の作製

フッ素化ポリイミド材料では、材料に電子線を照射することで、フッ素が脱離して屈折率が高くなる性質がある。この現象を利用してフッ素化ポリイミド膜にコアパターンを電子線で直接描画し、光導波路を作製する方法が検討されている。特殊な電子線照射装置が必要となるが、材料が 1 種類でよく、描画により任意のコアパターンが形成できるユニークな光導波路作製方法である¹⁰⁾。

4. 光導波路部品の作製と特性

ポリマーを用いた光導波路部品の一例として、アクセス系の光ネットワークや LAN での波長間隔の広い波長合分波器 (CWDM) やアド・ドロップ・モジュール (ADM) が挙げられる。本節ではポリイミド光導波路を用いた CWDM と ADM を紹介する。

4.1 CWDM

図 14 に光学用ポリイミド基板に全フッ素化ポリイミド材料 (図 5) を用いて作製した 8 ch-CWDM の構成を示す。8 ch-CWDM は 1.3 μm 帯および 1.5 μm 帯の 2 台の 4 ch-CWDM, および 1.5 μm 帯と 1.3 μm 帯を合分波する 1.3/1.5 μm 2 ch-CWDM をシングルモードファイバーで融着

図 14 全フッ素化ポリイミドを用いた 8 ch-CWDM

図 15 8 ch-CWDM の波長スペクトル

接続した構成となっている。使用する 8 波の光波長は全フッ素化ポリイミド光導波路の近赤外波長での幅広い低損失性を利用し、 $1.3\mu\text{m}$ 帯として 1230, 1270, 1310, 1350 nm の 4 波長、 $1.5\mu\text{m}$ 帯としては 1470, 1510, 1550, 1590 nm の 4 波長であり、これらは ITU-T 規格 (International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector) で標準化された 20 nm 間隔の波長を 1 波長おきの 40 nm 間隔として採用している。ファイバーからの多重化光は 2 ch-CWDM で $1.3\mu\text{m}$ 帯の 4 波と $1.5\mu\text{m}$ 帯の 4 波に分離され、さらに $1.3\mu\text{m}$ 帯と $1.5\mu\text{m}$ 帯の 4 ch-CWDM で各波長に分波される。 $1.5\mu\text{m}$ 帯の 4 ch-CWDM についてさらに詳しく説明すると、この 4 ch-CWDM は光学用ポリイミド基板上に全フッ素化ポリイミドを用いて Y 分岐型光導波路を作製した後、3 か所の分岐部に溝を設けて 3 種類の誘電体多層膜フィルタを挿入し、フィルタを光学接着剤で光導波路に固定してある。5 か所の光の入出射端面 (多重光ポートと 4 波の各波長ポート) にはファイバーレイを取り付けて光ファイバーと接続されている。3 種類のフィルタはそれぞれ 1590, 1550, 1510 nm を透過して他の波長を反射するバンドパスフィルタを用いており、2 ch-WDM で分離された $1.5\mu\text{m}$ 帯の 4 波の多重化光は $1.5\mu\text{m}$ 帯 4 ch-CWDM 内の各フィルタで 1 波ずつ分離されて、各出力ポートから出射される。 $1.3\mu\text{m}$ 帯の光についても同様である⁷⁾。

図 15 に作製した 8 ch-CWDM の特性 (波長スペクトル) を示す。各波長の挿入損失は 3.6~7.3 dB、クロストークは -18 dB 以下で、まだ改善の余地があるが、波長間隔を広く取ることによって透過波長帯を 13 nm 以上確保できており、温度制御不要の低コストレーザの適用可能性等、低コスト

図 16 全フッ素化ポリイミドを用いた ADM

図 17 ADM の波長スペクトル

のネットワーク実現の可能性を示している。

4.2 ADM

WDM を用いたネットワークにおいて、多重化光から選択された 1 波を分波し、または合波する機能を有する光回路が ADM (Add-Drop Module) である。分岐光導波路と光フィルタを用いると前記 2 ch-WDM とほぼ同じ回路構成で ADM を実現することができる。図 16 に ADM の概略図を示す。入射ポート (In) から入った多重化光は交差型の分岐導波路に挿入されたバンドパスフィルタにより特定の波長だけが透過し Drop ポートから取り出される。一方、同波長での新しい光信号は Add ポートより ADM に入射され、バンドパスフィルタを透過して、他の波長の多重化光にさらに多重化されて出射ポート (Out) から出力される。

全フッ素化ポリイミド材料を用いて作製した波長 1550 nm の ADM の特性 (波長スペクトル) を図 17 に示す。各ポートでの挿入損失は 2.4 dB 以下、クロストークは 20 dB 以上が得られている⁷⁾。

図 18 並列送受信モジュールの概要

図 19 CWDM と ADM を用いたユーザ系スケーラブルネットワーク

4.3 光インターコネクション用ミラー付きフィルム光導波路

ポリマー光導波路の大きな特徴の1つとして、フィルム型の光導波路が挙げられる。ポリマー光導波路は導波路自体に柔軟性があるため、基板から剥離してフィルム光導波路を作製できる。フィルム光導波路はファイバーアレイと同様に多数の光配線を一括して取り扱うことができ、また配線ボード間、ボード内の簡易な光配線部品として有用である。

図 18 は光導波路部品のモジュール内の光インターコネクションへの適用先として、ミラー付きフィルム状アレイ光導波路を用いた並列送受信モジュールの概要を示したものである。図は送信側を示したものであり、基板上には面発光型のレーザーダイオード (VCSEL) が搭載されてい

る。この VCSEL から光をボードに接続されたファイバーレイまで導く役目を果たするのがフィルム光導波路である。VCSEL から上側に発光された光は VCSEL 上にマウントされた導波路に入り、ミラーで水平方向に反射された後、フィルム光導波路内を導波して、ファイバーレイに導かれ、光源と光ファイバー間の高密度実装を実現できる¹¹⁾。

5. 導波路部品のネットワークへの適用

CWDM を用いたネットワークへの適用先として家庭内の波長分割多重 (WDM) を用いた光ネットワークが提案されている¹²⁾。ここでは前節で述べた CWDM と ADM を用いて宅内から集合住宅、社内 LAN、地域ネットに至る種々のネットワークに拡張可能な WDM 方式、スケーラブルネットワークへの適用例について述べる。

表2 ネットワークの損失内訳

モジュール		設計値		
		損失	台数	合計
8 ch CWDM	1.3/1.55 2 ch WDM	2 dB	1	8 dB
	CWDM	6 dB	1	
ADM (Through)		2.5 dB	7	17.5 dB
ADM (Add, drop)		3 dB	1	3 dB
合計				28.5 dB

光トランシーバのダイナミックレンジ：31 dB

本スケラブルネットワークはCWDM, ADM等の各種部品とシングルモードファイバー (SMF) を用いたリング状配線で構成される。図19にネットワークの構成を示す。使用波長はポリイミドCWDMの特徴とレーザ等周辺技術の低コスト性を考慮した1470~1590 nm (40 nm 間隔) の4波長と1230~1350 nm (40 nm 間隔) の4波長である。これらの各波長の信号をポリイミド8ch-CWDMで多重化してSMFリング内に配信し、各配信先でポリイミドADMを用いて信号のadd/dropを行う。

ネットワークを構成したときの8ch-CWDMとADMの損失を表2に示す。各波長での各モジュールの損失は8ch-CWDMで8dB以下、ADMのThroughポートで2.5dB以下、AddおよびDropポートで3dB以下である。SMFの損失を十分小さいとすれば、通信光が最長の経路を通った場合のネットワーク全体の損失は28.5dBとなる。これまでに、1.5 μ m帯の4波長と1.31 μ mの合計5波長のMU型SFPトランシーバ (ダイナミックレンジ31dB以上) を用いて、全波長での双方向通信の動作が確認されている⁷⁾。

6. ま と め

ポリマー光導波路に用いる材料とその特性、光導波路の加工方法を紹介した。光導波路材料には、用途に応じて使用する波長での優れた光透過性が要求され波長により用いるポリマーを選定することが重要である。ポリマー材料を用いて光導波路を作製する方法としては既存のドライエッチング法の他、ポリマーの特徴を活かした加工方法として、直接露光法、スタンプ法、直接描画法等が用いられている。また、このポリマー光導波路の部品応用として低コストな波長合分波器 (CWDM, ADM) を挙げ、さらに光部品

への適用性を示すとともに、さらにCWDMとADMを組み合わせたネットワークを構築して、その動作を確認することで、ポリマー光導波路の有用性を示した。

今後、さらに多くのポリマー光導波路、光導波路部品が開発、実用化され、低価格で高品質な光通信サービスが実現されることを期待している。

参 考 文 献

- 1) 松浦 徹：ポリイミド最近の進捗 2003 (松本利彦, 安藤慎治, 横田力男), 29 (2003), 繊維工業技術振興会
- 2) 小林潤也, 松浦 徹, 佐々木重邦, 丸野 透：信学技報, CPM 97-43, OME 97-49, 25 (1997)
- 3) Ando, S., Matsuura, T. and Sasaki, S.: *Macromolecules*, **25** (21), 5858 (1992)
- 4) 景井絵美子, 山田典義, 川上直美, 小林潤也, 松浦 徹, 山本二三男, 増田 豪, 田尻浩三, 桑原正芳, 奥村康則, 浅子佳延, 八谷秀孝：電子情報通信学会総合大会, C-3-152 (2002)
- 5) Murata, N. and Nakamura, K.: *J. Adhesion*, **35**, 251 (1991)
- 6) Matsuura, T., Ando, S., Matsui, S., Sasaki, S. and Yamamoto, F.: *Electron. Lett.*, **29**, 2107 (1993)
- 7) 松浦 徹, 栗原 隆, 大庭直樹, 丸野 透, 川田久美子, 川上直美, 菅井栄一, 都丸 暁, 山本二三男, 横山博一, 杉本範己, 手柴敏博, 勝山 豊：信学技報, OPE-2004-17, 39 (2004)
- 8) Tomaru, S., Enbutsu, K., Hikita, M., Amano, M., Tohno, S. and Imamura, S.: OSA TOPS Vol.29 WDM Components, D.A. Nolan ed., 161 (1999)
- 9) 村越 裕, 村田則夫, 上原桂二, 水澤純一：2000年電子情報通信学会総合大会, C-3-18 (2000)
- 10) Maruo, Y. Y., Sasaki, S. and Tamamura, T.: *J. Light-wave Technol.*, **13**, 1718 (1995)
- 11) Usui, M., Matsuura, N., Sato, N., Nakamura, M., Tanaka, N., Ohki, A., Hikita, M., Yoshimura, R., Takeno, K., Katsura, K. and Ando, Y.: *10th LEOS '97*, **51** (1997)
- 12) Moriyama, K., Viet, N.H., Fujimoto, S. and Katsuyama, Y.: *Asia-Pacific Conference on Communications Bandung, Indonesia, sept.* 17-19, 512 (2002)