

V字カット光ピンによる1対多チャンネル 光インタコネクションの検討

伊藤 哲*, 尾山 雄介*, 小幡 雄介*, 小澤 秀明*, 花島 宏*, 三上 修*, 内田 禎二**

Study on One vs. Multi-Channel Optical Interconnection Using V-Shape Optical Pin

Tetsu ITO*, Yusuke OYAMA*, Yusuke OBATA*, Hideaki OZAWA*, Hiroshi HANAJIMA*, Osamu MIKAMI* and Teiji UCHIDA**

*東海大学電子情報学部コミュニケーション工学科 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目1117)

**東海大学総合科学技術研究所 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目1117)

*School of Information Technology and Electronics, Tokai University (1117 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa, 259-1292)

**Research Institute of Science & Technology, Tokai University (1117 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa, 259-1292)

概要 近年、急速な通信容量の増大化、通信速度の高速化に伴った電気配線の限界から、チップ間/ボード間レベルの光インタコネクションが注目されている。光技術が有する高コスト、低生産性の課題を解決するため、われわれは“光表面実装技術”および“光ピン”を軸とした研究を行っている。しかし従来の光ピンは、容易に90度光路変換を実現する反面、1対1の処理システムに限定され、配線の自由度は低いものであった。そこで、光ピンの先端を様々な形状に加工した多分岐型光ピンを提案する。多分岐型光ピンを用いることで、光配線中に1対多分岐機能が付与されるため、配線の自由度を高め、並列処理システムが実現可能となる。本論文では、主にV字カット型光ピンに着目し、解析的および実験的検討を行ったので報告する。

Abstract

An optical interconnection is a key technology that allows best use of the advantages of both electronics and optics, and achieves high-speed and mass transmission at the board and interchip levels. However, there are some problems with optical interconnections, such as high cost and low productivity. We have tried to address these problems using “Optical surface mount technology (O-SMT)” and “Optical pin”. In this paper, we propose new optical pins whose end points are designed to have unique shapes for new generation optical wiring. These optical pins have a function of one vs. multi-splitting. Therefore, it is expected that the flexibility of optical wiring can be improved, and parallel processing will be feasible. In particular, a V-shape optical pin is taken up and its basic characteristics are studied both theoretically and experimentally.

Key Words: Optical Interconnection, 90 Degree Optical Path Change, Optical Surface Mount Technology, Optical Pin, Multi Splitter

1. はじめに

ブロードバンドやユビキタスをキーワードとし、産官学が一体となって取り組む次世代の情報通信技術は未来社会の核となる。しかし、現状の電気インタコネクションでは、次世代システムの高速度化や大容量化、高密度化、低電力化などに追従することが困難であると予測される。これを解決するために、ボード間やチップ間接続に光技術を導入した光配線、光インタコネクションの必要性が高まっている^{1),2)}。

光インタコネクションを実用化に導くためには、大量生産やコスト削減を可能とする光回路実装技術や、光特性を利用した全く新しい信号制御技術など、要素技術の革新が求められている。ボードレベルでの光インタコネクションを具現化する1つの方法として、電気配線と光配線を混載した光電子プリント配線板(OE-PWB)により構成された光表面実装技術(光SMT)が、1992年内田によって提唱さ

れた³⁾⁻⁷⁾。光SMTでは、光電気混載配線板とそこに搭載する光電子表面実装デバイス(OE-SMD)との間に、標準化された接続方法を採用することによって、事前の部品検査を容易にして大量生産によるコストダウンを図ることが期待できる。また、OE-SMDからの入出力光の進行方向と、OE-PWBの光配線の方向が直交するため、光配線(光導波路)をブレードで切断することによって、光導波路端面を45度マイクロミラーとして用いる90度光路変換技術^{8),9)}が必須となっていた。この方法は、多数の光配線を一括してミラー面形成するには適しているが、近傍の不要な光配線を切断してしまう危険性があった。これに対して、45度マイクロミラー面をファイバ先端に加工した光ピン^{3),4),10),11)}を新たに導入することによって、配線板の任意の箇所での光入出力を行うことが可能になった。この光ピン方式は、光実装時のアライメントのトレランスも大きく、かつ通常、マルチモードファイバ(MMF)を用いて加工することができるので、コストも低く抑えることが期待できる。

本研究では、この光ピン方式を低コスト光回路実装のキーテクノロジーと位置付け、これに新たな多分岐光接続機能を付与し、高速並列処理を実現させる新しい光インタコネクションの実現を目的としている。本論文では、光ピンの先端をさまざまな形状に加工した多分岐型光ピンを提案する。多分岐型光ピンを用いることで、光配線中に1対多分岐機能が付与されるため、配線柔軟性を高め、並列処理システムが実現可能となる。主としてV字カット型光ピンに着目し、解析および実験の両面から諸特性を確認したので報告する。

2. 多分岐型光ピン

本論文で提案する多分岐型光ピンは、光SMTにおける90度光路変換デバイスとして、低コストかつ簡易製作、高光結合を実現している光ピンを改良した光接続デバイスである。多分岐型光ピンは、光分岐する数だけ45度端面を形成するといったシンプルな構成であり、端面における全反射を利用して90度光路変換を行う従来型光ピンの機能を継承しつつ、光路変換と同時に光路多分岐を実現させる。設計面や実装面、基本特性については従来型光ピンと同様であるため、つぎに述べるような光ピンの持つ優位性を全て兼ね備えていると言える^{6),7)}。まず、ホール加工位置の制御により基板内で局所的なミラーの作成が可能である、それに伴い任意の場所での光信号の送受信が可能である、レンズなどが不要であるため光学部品を削減できる、安価な光ファイバの使用によるコスト低減が期待できる、光配線が多層化された場合も、光ピンの長さを制御することで入出力が可能である。

構成例をFig. 1に示す。光ファイバあるいは光導波路の片側端面をV字状にカットし、2つの45度端面の反射により、1対2光接続を実現させるV字カット型光ピン(Fig. 1(a))、同様に端面を十字状または四角錐状にカットし、1対4光接続を実現させる十字カット型光ピン(Fig. 1(b))と四角錐カット型光ピン(Fig. 1(c))、端面を円錐状にカットし、概念的には1対 ∞ ブロードキャスト光伝送を実現させる円錐カット型光ピン(Fig. 1(d))などが考えられる。

V字カット型光ピンを光SMTに適用した実装例をFig. 2に示す。従来型光ピンと同様に、光電子表面実装デバイス(OE-SMD)として光ピンをパッケージ化する。その後、パッケージ化されたOE-SMDのガイドピンを、光電子プリント配線板(OE-PWB)側に作製されたガイドピン用ホールに挿入し、アライメントと接着を行う。同時に、光ピンが光導波路上に加工されたスルーホールへ挿入され、分岐機能が付与された光結合が可能となる。

送信側において、VCSEL光源から出射した光は、V字カット型光ピン内を伝搬し、V字端面に達すると90度光路変換と同時に2方向に光路分岐され、光導波路内を伝搬する。一方、受信側において、光導波路を伝搬してきた光

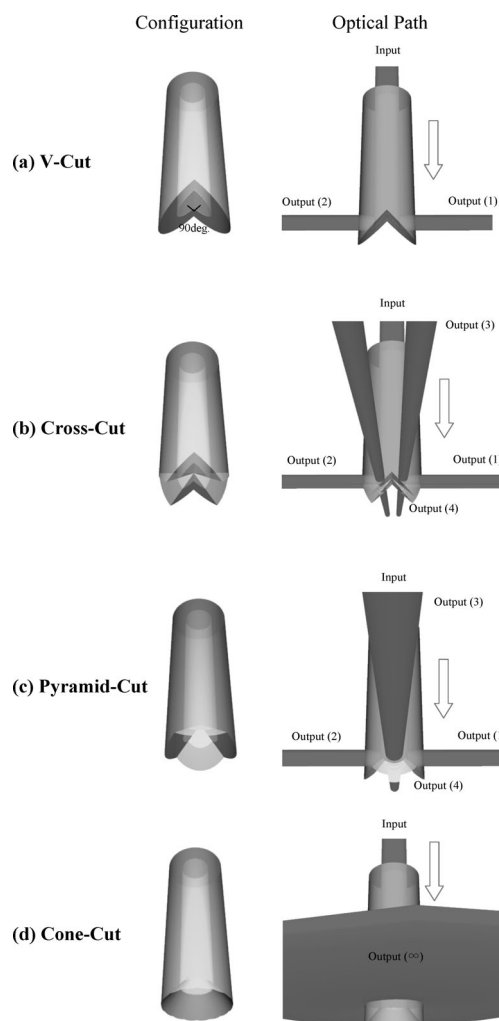


Fig. 1 Multi-split type optical pins & optical paths

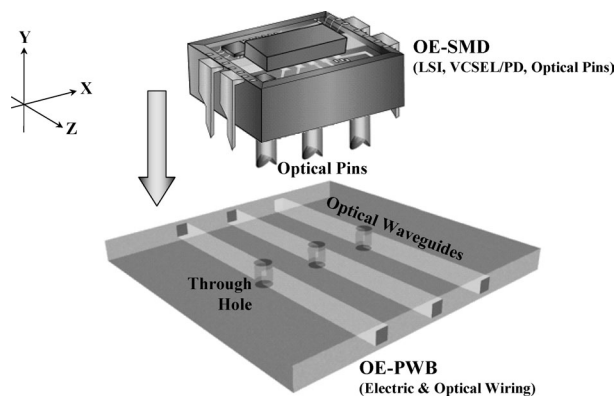


Fig. 2 Schematic view of mounting optical pins for O-SMT

は、V字端面に達した一部の光が90度光路変換され、光ピン内を伝搬し、PDによって受信される。すなわち、光ピンで光導波路を進行する光の一部を取り出すタッピング機能を有する。V字端面の上部または下部をスルーした光は、再び同じ光導波路内を進行する。

3. 光線追跡解析

多分岐型光ピンの諸機能を確認するため、光線追跡法を用い解析を行った。本解析には、発光源、受光源、光導波路、光ピン、反射ミラー、以上5つの構成要素をモデル化した。

発光源としてはVCSELを想定し、スポットサイズ半径 ω を $10\ \mu\text{m}$ 、ビームウェスト半値幅を $1\ \mu\text{m}$ 、ビーム拡がり半角 θ を 8.0 度と、近似的に設定した。解析の安定性・信頼性を両立させるため、光線数は10万本とした。受光源としてはPDを想定し、光ピンもしくは光導波路の出射端と同位置に設定、形状および寸法は出射端のコアのそれと同等とした。発光源から発射した光線が受光源に達した光線数割合より、光結合効率を算出した。光導波路としてはポリマー光導波路を想定した。コア形状は矩形であり、断面寸法は $40\times 40\ \mu\text{m}$ 、屈折率 n_{core} は1.489のステップインデックス(SI)型とした。同様に、クラッド形状も矩形とし、寸法は $140\times 140\ \mu\text{m}$ 、屈折率 n_{clad} は1.471とした。NAは 0.20rad であり、長さは $500\ \mu\text{m}$ とした。光ピンとしてはコア径 $50\ \mu\text{m}$ のマルチモードファイバ(MMF)を想定し、片側端面を所定の形状にカットしたものとした。本解析においては解析の安定性を考慮し、ステップ型(SI-MMF)として設定した。形状は光ファイバ型の円形状(32角柱状)、光導波路型の矩形状、双方を用いたが、形状による機能・効率の差は無いものとした。コア寸法は、円形状で直径 $50\ \mu\text{m}$ 、矩形状で $50\times 50\ \mu\text{m}$ とし、屈折率 n_{core} は双方とも1.489のSI型とした。同様に、クラッド寸法は、円形状で直径 $125\ \mu\text{m}$ 、矩形状で $125\times 125\ \mu\text{m}$ とし、屈折率 n_{clad} は1.471とした。NAは 0.23rad であり、長さは $500\ \mu\text{m}$ とした。光ピンのカット面には、AlやAu等の金属膜を想定した反射ミラーを設定した。理想的な全反射を満たすため、反射率を1とし、90度光路変換を実現させるため、傾斜角度を45度として設定した。寸法はカット面一面を覆うものとし、各々の光ピンによって異なるカット面の数だけ設定した。ミラー厚は0とした。尚、本解析モデルにおいては、吸収損失や波

長依存性といったパラメータは考慮しないこととした。

各多分岐型光ピンを用いたモデル構成と解析結果をFig. 3~Fig. 6に示す。いずれの解析モデルにおいても、多分岐型光ピン上部から光を入射し、カット面で90度光路変換および光路分岐された光を光導波路に結合させ、光導波路出射端に設置した45度カット型光ピンで受信する構成となっている。Fig. 3よりV字カット型光ピンの1対2光接続機能

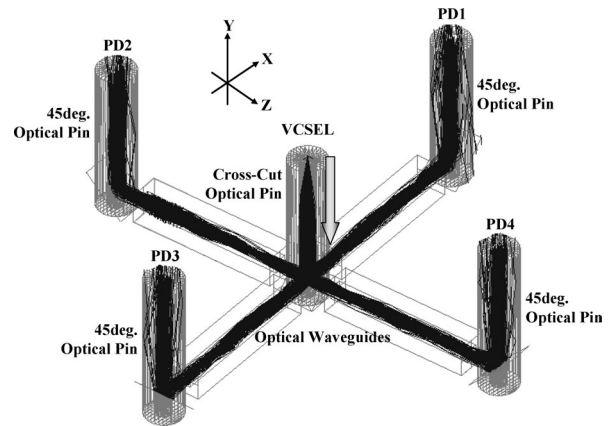


Fig. 4 Analytical result of cross-cut optical pin

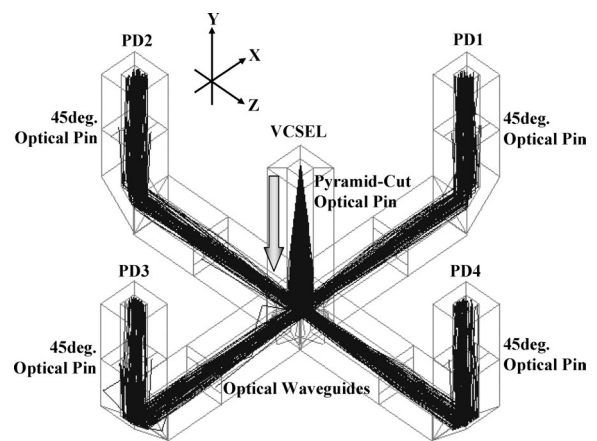


Fig. 5 Analytical result of pyramid-cut optical pin

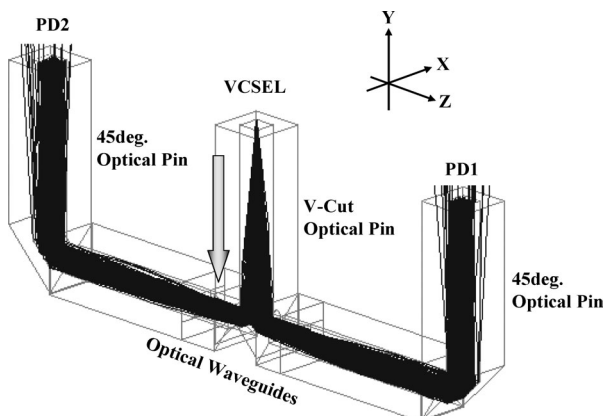


Fig. 3 Analytical result of V-cut optical pin

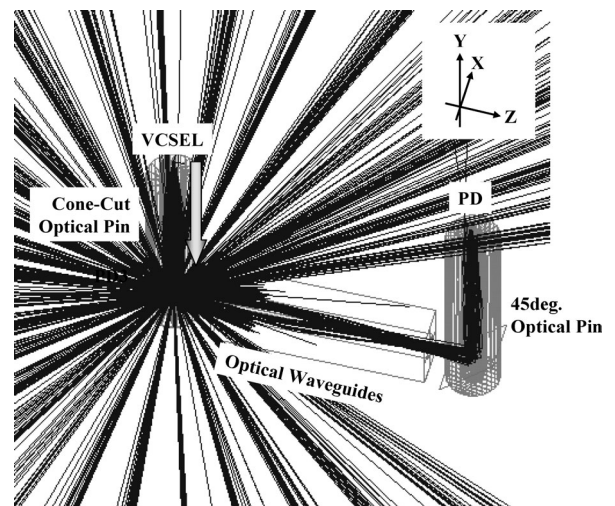


Fig. 6 Analytical result of cone-cut optical pin

(PD1=PD2=-3.4 dB), Fig. 4より四角錐カット型光ピンの1対4光接続機能 (PD1=PD2=PD3=PD4=-6.4 dB), Fig. 5より十字カット型光ピンの1対4光接続機能 (PD1=PD2=PD3=PD4=-7.3 dB)を, それぞれ確認した。各光ピンの光分岐数を考慮すると, 結合損失としてはいずれもマッチングオイル未使用状態のため生じる1.0 dB程度であり, 安定した光分岐接続が実現されているといえる。損失は全反射条件を満足しても, 相手方のコア部に入射しない光ビームがあること, および端面での反射の影響である。円錐型ピンについては, Fig. 6のように1対∞光拡散機能を有する。同図に示した位置にPDを設置した場合, 結合効率は-14.0 dBとなった。続いて, 各多分岐型光ピンを実装深さ方向 (Y軸方向) に位置ずれさせ, 光結合効率が1 dBダウンを許容するトレランス幅を解析したところ, いずれの解析モデルにおいても±15 μm程度のトレランスが得られ, 実装可能な範囲にあることを確認した。各多分岐型光ピンの実装深さ位置ずれに対する結合効率特性をFig. 7~Fig. 9に示す。円錐カット型ピンにおいて, PDの設置位置までの距離を変化させた場合の解析結果をFig. 10に示す。安定な光受信が得られるには, 200 μm程度の距離が必要であることがわかる。

4. V字カット型光ピン

4.1 試作

実験的検討を行う前に, 実際にV字カット型光ピンを試作した。加工方法をFig. 11に示す。先端に90度の切断部を持つダイヤモンドブレードを用いて, 光ファイバの先端をV字形状にカットする。この際, 光ファイバのふれ等により加工端が荒れる恐れがあるため, 光ピンを一度フェルールで固定し, フェルールごとカットする方法が最適である。この方法であれば, 研磨をせずとも光学的な端面を得ることが可能である。GI-MMF (50/125 μm)にV字加工を

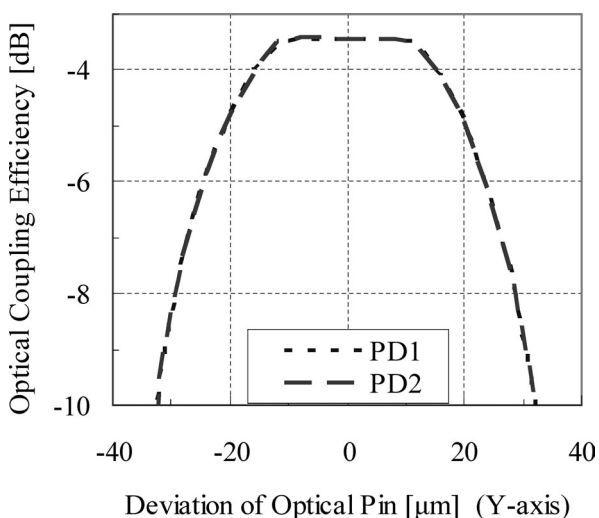


Fig. 7 Analytical result of coupling efficiency characteristics for V-cut optical pin

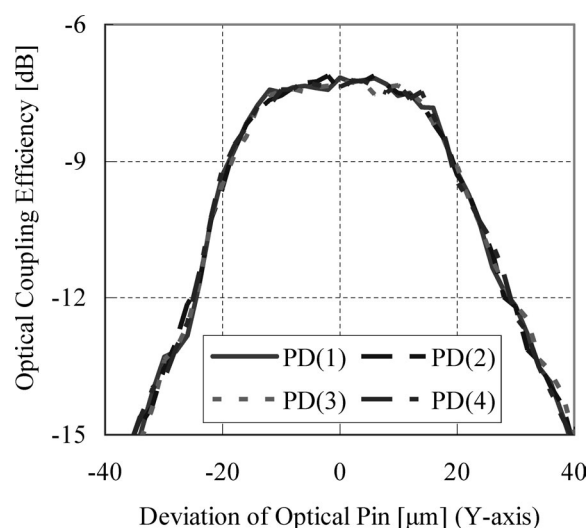


Fig. 8 Analytical result of coupling efficiency characteristics for Cross-cut optical pin

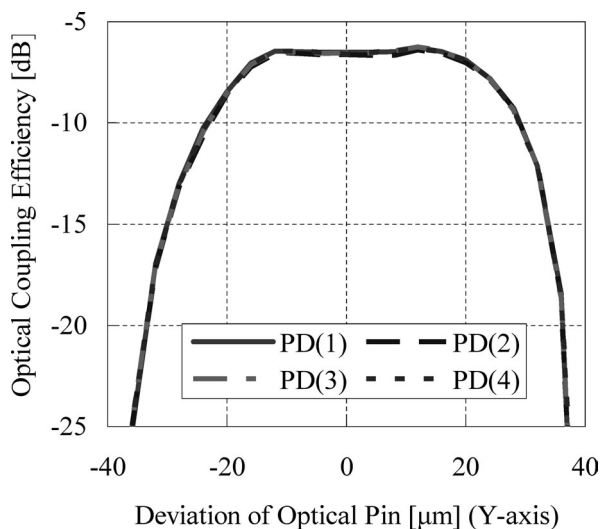


Fig. 9 Analytical result of coupling efficiency characteristics for Pyramid-cut optical pin

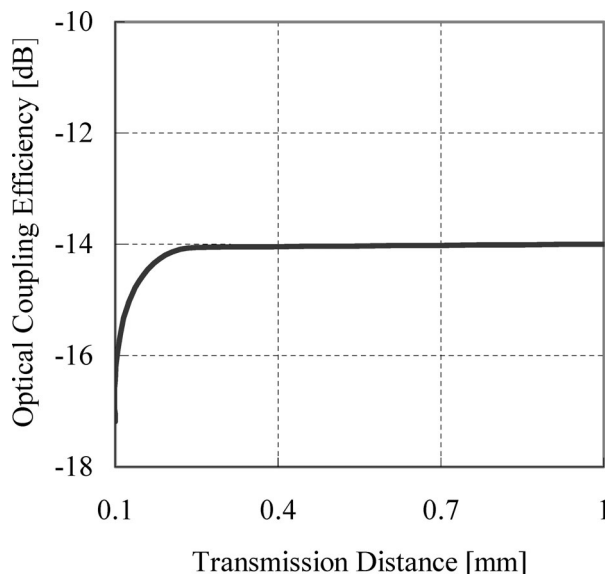


Fig. 10 Analytical result of coupling efficiency characteristics for Cone-cut optical pin

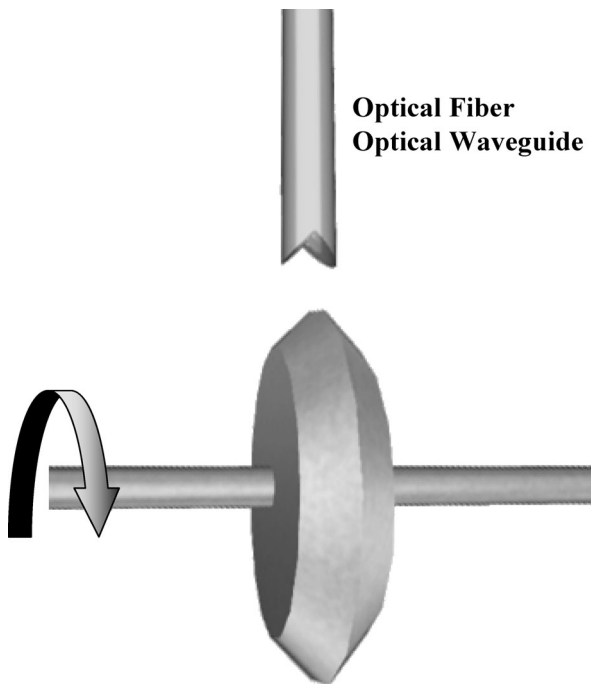


Fig. 11 Method of fabricating V-cut optical pin

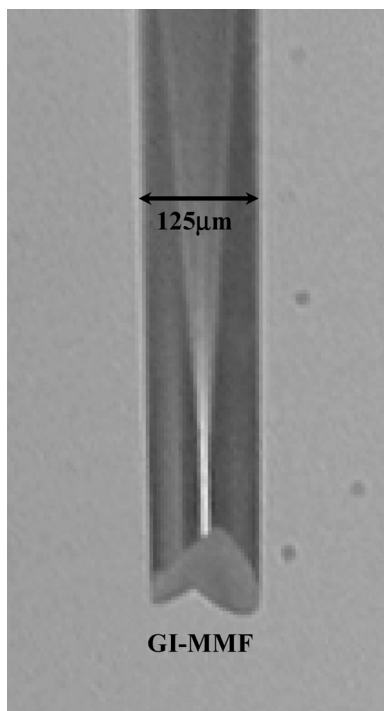


Fig. 12 V-cut GI-MMF

施したV字カット型MMFをFig. 12に示す。

V字カット型MMFに赤色He-Neレーザを入射させた際の光分岐の様子をFig. 13に示す。He-Neレーザの仕様は、波長633nm、出力0.8mWの連続発振である。入射光がV字カット型MMFを通過し、V字端面にて90度光路変換と同時に、2方向に光路分岐されていることが確認できる。下方向には、V字端面にて全反射条件を満たさない光が透

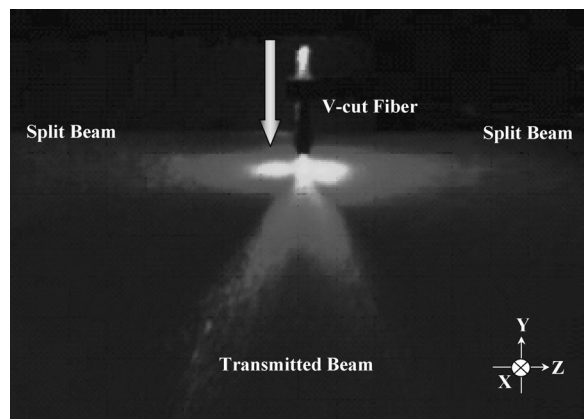


Fig. 13 Optical split result of V-cut optical pin

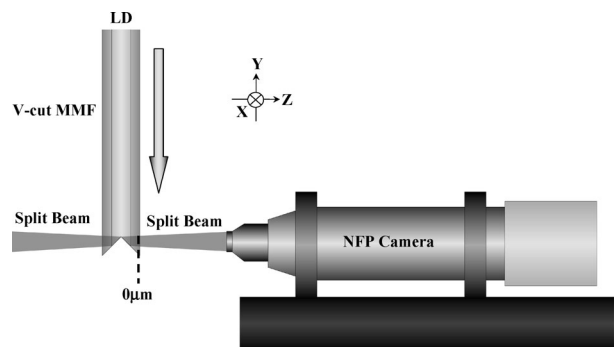


Fig. 14 Experimental setup of beam transmission characteristics

過光として生じている。この透過光は通常損失となってしまいが、V字端面にメタルをコーティングすることで、全ての光が光路変換され、分岐光として伝搬される。

4.2 ビーム伝搬特性の測定実験

光ピン出射光のビームスポット形状はガウシアン形状が理想とされるが、V字カット型光ピンの加工端面（反射面）は独特の半円形状となっているため、この影響により光分岐直後のビームスポット形状、ひいては光導波路結合後の伝搬モード状態が不安定となることが予想される。そこで、実際にV字カット型MMFを用いて、分岐出射光が進行するにしたいが、出射ビームがどのような伝搬特性を示すかを測定した。

実験系をFig. 14に示す。波長633nm、連続発振のHe-Neレーザ発振器から、FCコネクタを介して1m長のV字カット型MMFに光を入射し、その分岐出射光をNFP (Near Field Pattern)カメラを用いて測定した。使用したNFPカメラは各光学系から構成されており、終端のCCDカメラによってビームスポットを画像化し、コンピュータ上で画像解析を行った。この際、NFPカメラの焦点をV字カット型MMF出射端に合わせた後、NFPカメラを+Z軸方向に微動させ、X軸Y軸方向のビームスポット半径の伝搬特性を測定した。測定結果をFig. 15に示す。

V字カット型MMFから分岐出射直後のビームスポット

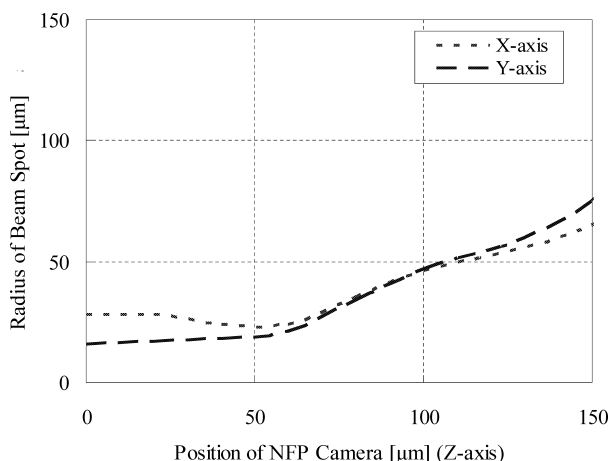


Fig. 15 Experimental result of beam transmission characteristics

形状は、V字端面とほぼ同じ半円形状、すなわち、X軸径大・Y軸径小の形状を示す。ビームが進行するに連れ、Y軸方向のビームスポット半径は、Z軸方向に60 μm 進行した付近まで15 μm 程度の値を示し、その後ビームは一定の拡がり角を持ち拡散していく。80 μm を過ぎた位置では、X軸方向のビームスポット半径と大小関係が逆転する。一方、X軸方向のビームスポット半径は、出射直後、MMFのコア半径と一致する25 μm 程度を示し、Z軸方向に60 μm 進行した付近まで光ピンの曲面によって作用するレンズ効果のために徐々に集光されている。最も集光された位置でのビームスポット半径は20 μm 程度となり、その後徐々にビームは広がっていく。

Z軸方向に80 μm 進行した位置では、X軸Y軸のビームスポット半径が共に35 μm 程度を示し、安定した伝搬モードを得たい場合、光導波路との光結合位置として最適であると考えられる。しかし、光インタコネクションとして光ピンに結合させる光導波路のコア半径は、20~25 μm 程度が一般的であるため、光結合効率を重視する場合は適していない。このため、光結合効率を重視する場合は、X軸Y軸のビームスポット半径が共に20 μm 程度に抑えられているZ軸方向60 μm の位置に、光結合位置を設定するのが最適であると考えられる。この場合、結合させる光のビームスポットY軸が抑えられている形状となるため、光導波路内の伝搬モード状態は若干不安定となることが予想されるが、光導波路長が500 μm 程度であれば、光導波路内部で伝搬モード状態を安定させることが可能なため、高い光結合効率が期待できる。

4.3 擬似光導波路との光結合実験

V字カット型MMFから出射された分岐光の諸特性を確認するため、擬似光導波路との光結合実験を行った。実験系をFig. 16に示す。擬似光導波路として、V字カット型MMFを製作したものと同一のGI-MMF(3m長)を、微動台上に設置したファイバホルダに固定する構成とした。使

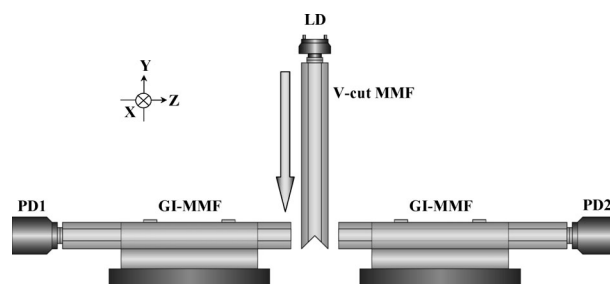


Fig. 16 Experimental setup of optical coupling characteristics

用したファイバホルダは125 μm 径に最適化されたものである。前項の結果より、V字カット型MMFの分岐出射部と擬似光導波路片側端面との間に50~60 μm 程度ギャップが生じる位置、かつ、擬似光導波路同士の光軸が一致する位置に擬似光導波路を設置した。

測定は、V字カット型MMFから出射される各分岐光を2本の擬似光導波路に結合させ、出射端に設置されたFCコネクタを介してPDにより受信する方法を取った。尚、V字カット型MMFへの入射光は、波長1.3 μm のLD光をFCコネクタを介して入射させた。V字カット型MMFのX軸およびY軸位置については、最大光結合効率を得られた点を基準とするアクティブ・アライメントとした。

各擬似光導波路の最大光分岐結合効率を測定した結果、PD1=-6.0dB、PD2=-6.2dBと、光分岐比率をほぼ1対1とした良好な光分岐結合効率を得られた。V字カット型光ピン(端面無コーティング)の理想的な光分岐結合効率は、双方-5.0dBであることを解析により確認している。すなわち、本実験における結合損失は1.0dB程度であると考えられる。メタルコーティングを施した従来型光ピンを光導波路と結合させた場合、マッチングオイルを用いた場合でも0.8dB程度の結合損失を生じる報告がされているが⁶⁾、これを考慮すると、本結果は非常に良好な結果であるといえる。

続いて、最大光結合効率を得られた点からV字カット型光ピンを実装深さ(Y軸)方向に位置ずれさせ、実装位置ずれに対する光結合効率特性を測定した。測定結果をFig. 17に示す。Fig. 17より求めた最大結合効率より1dBダウンを許容するトレランス幅は、PD1側で $\pm 16\mu\text{m}$ 、PD2側で $\pm 14\mu\text{m}$ となった。この結果は、Fig. 7で示した光線追跡解析結果とほぼ一致し、一般的な光導波路のコア寸法40 \times 40 μm に対し、計30 μm の位置ずれを許容していることは、V字カット型光ピンを用いた光伝送系が光インタコネクションシステムとして実装可能な範囲内にあることを示すことができる。双方の光結合効率特性に若干ながら差が生じている原因としては、加工の際、V字面頂軸がGI-MMFの中心からわずかにずれてしまったためであると考えられる。

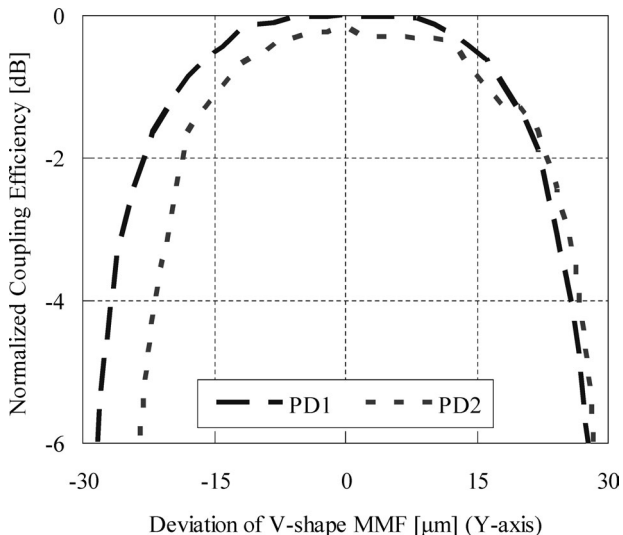


Fig. 17 Experimental result of optical coupling characteristics (Transmission)

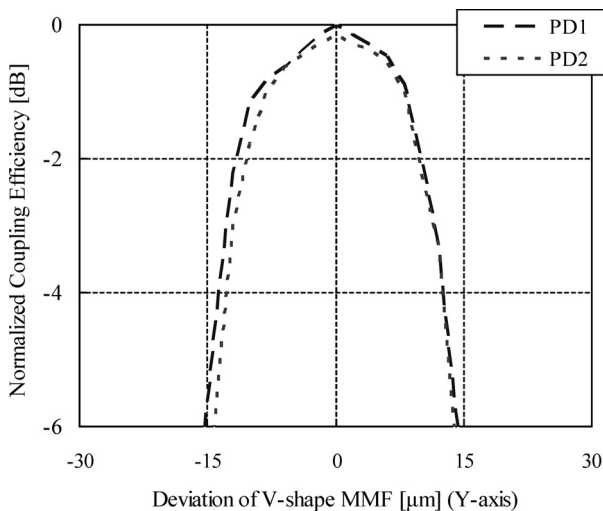


Fig. 18 Experimental result of optical coupling characteristics (Reception)

4.4 タッピング機能の検討実験

続いてV字カット型光ピンのタッピング機能について諸特性を確認するため、V字カット型光ピン側で光を受信する受信側について、同様に光結合実験を行った。基本的な実験系の構成はFig. 16と同様である。ただし、LDとPDの位置を入れ替え、それぞれの擬似光導波路を伝搬する光をV字カット型MMFに結合させ、タッピングにより光を受信する測定方法とした。

V字カット型MMFにより受信された最大光結合効率は、PD1=-6.2dB、PD2=-6.6dBと、受信側においても安定した光結合効率が得られた。Fig. 18に、送信側と同様にして測定した実装深さ(Y軸)位置ずれに対する光結合効率特性を示す。Fig. 18より、最大結合効率より1dBダウンを許容するトレランス幅は、PD1側で±10μm、PD2側で±9μmとなった。この結果は、前項送信側の実験結果よりも狭い

トレランス幅となっているが、この原因について考察する。

送信側と比較してトレランス幅が小さくなってしまった原因は、光結合部における光出射面および光入射面のコアサイズの違いにある。送信側の結合部において、光はV字カット型MMFコア部のV字端面(25×50μm径半円に近似)からGI-MMFのコア端面(50μm径正円)へ光路を取る。この時、光出射面のV字端面サイズは光入射面となるGI-MMFのコア端面サイズの約半分である。すなわち、光出射面が光入射面に対して小さいため、光の進行と共にビームが広がってしまっても、ある程度の範囲であれば高結合が可能である。一方、受信側においては、結合部での光出射面が光入射面に対して大きいため、光入射面をスルーし、他方のGI-MMF側へ進行する光が必然的に増えてしまう。この現象が起因し、トレランス幅を小さくしてしまっただと考えられる。しかしながら、コア部のV字端面形状に対し、計20μm程度のトレランスが得られているため、V字カット型光ピンを受信用として用いる場合でも、光インタコネクションシステムとして適用可能であると考えられる。

5. むすび

次世代の光インタコネクションを担う要素技術確立を目指し、光配線中に1対多分岐機能を付与することで、配線柔軟性を高め、並列処理システムを実現可能とする多分岐型光ピンを提案した。

1対2光接続を実現するV字カット型光ピン、1対4光接続を実現する四角錐カット型光ピンおよび十字カット型光ピン、ブロードキャスト光伝送を実現する円錐カット型光ピンの基本構成を示し、光線追跡解析により、各々の光接続機能について確認した。光結合効率、1dBダウントレランスに注目した解析を行い、多分岐型光ピンの有効性を確認した。

つぎに実際にGI-MMFにV字加工を施し、実験的検討を行った。ビーム伝搬特性の測定実験より、光ピン出射部から50~60μm地点が最適結合位置であることを確認し、この結果に基づいた光結合実験を行った。その結果、送信側、受信側いずれの場合においても、-6.0dB程度の良好な光分岐結合効率を示すことを実証した。また、実装深さ位置ずれに対するトレランス幅についても、受光面に対し十分な範囲が得られている。以上の結果から、V字カット型光ピンが光インタコネクション・システムへの適用に十分な基礎特性を示していると考えられる。

(2005.3.16-受理)

文 献

- 1) 石田宏司, 他: “光回路実装技術の動向”, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 7, No. 3, pp. 203-228, 2004.5
- 2) エレクトロニクス実装学会: 光回路実装技術委員会ロード

- マップ検討資料, 2003年9月
- 3) Henning Schroder, et al.: "New optical coupling element for 90 degree waveguide coupling in electrical-optical circuit boards (EOCB)", 10th MicroOptics Conference MOC '04, L-27, 2004.9
 - 4) Han Seo Cho, et al.: "Demonstration of 2.5 Gb/s optical interconnection using 45°-ended connection blocks in fiber- and waveguide-embedded PCBs", IEEE Electronic Components and Technology Conference, pp. 1547–1551, 2004
 - 5) 内田禎二, 三上 修: "光表面実装技術", 回路実装学会誌, Vol. **10**, No. 5, pp. 346–350, 1995
 - 6) T. Uchida and O. Mikami: "Optical surface mount technology", IEICE Trans. on Electron., E-80-C, pp. 81–87, 1997
 - 7) 三上 修, 内田貞二: "光表面実装技術の進展", 電子情報通信学会論文誌C, Vol. **J84-C**, No. 9, pp. 715–726, 2001.9
 - 8) R. Yoshimura, M. Hikita, S. Tomaru and S. Imamura: "Low-Loss Polymeric Optical Waveguides with 45 Mirrors", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. **37**, No. 6B, p. 3657, 1998
 - 9) 木下雅夫: "ASETにおける光素子技術", 第19回OPT公開研究会資料, pp. 26–45, 2003.11
 - 10) 尾山雄介, 村田佳一, 渡邊則利, 三上 修, 市村 顕, 平松星紀: "面発光レーザと45度ミラー付きファイバとの光結合", エレクトロニクス実装学会誌, Vol. **7**, No. 6, pp. 353–540, 2004
 - 11) 村田佳一, 渡邊則利, 尾山雄介, 三上 修, 内田禎二: "光表面実装技術向け光ピンの光導波路への結合に関する研究", エレクトロニクス実装学会誌, Vol. **8**, No. 1, pp. 52–58, 2005