

研究

プッチンマイクロコネクタによる自導光結合法

佐々木彩子・馬場 俊彦・伊賀 健一

東京工業大学精密工学研究所 〒227 横浜市緑区長津田町 4259

(1993年4月2日受付, 1993年5月6日受理)

Self-Aligned Optical Interconnects by Put-in Microconnectors

Asako SASAKI, Toshihiko BABA and Kenichi IGA

Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology,
4259, Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 227

(Received April 2, 1993; Accepted May 6, 1993)

We have proposed a novel scheme of self-aligning optical components and single mode fiber arrays, which is composed of an array put-in microconnectors. We fabricated a put-in (PI) microconnector consisting of an etched single mode fiber jack and an optical plug formed on a planar microlens substrate by a self-aligning technique. Some optical coupling characteristics without precise mechanical alignment were investigated.

1. はじめに

近年, 光ファイバ通信は光 LAN や加入者系への導入が検討されているが, そこでは光システムの大量生産と低価格化が不可欠となる. 多くの光回路や光素子で構成する光システムでは素子間の高効率結合がきわめて重要であるが, 現状ではそのために各素子の精密位置調整を必要とし, 膨大な人手と手間がかかるためシステムの大量供給を困難にしている. さらに最近試験的に導入されつつある並列光伝送システムの構築に至っては, アレー状の素子どうしを一括接続しなければならないので, この問題はいっそう深刻となる. 特に半導体レーザー (LD) とファイバの間の結合¹⁻⁶⁾では, 一般にアレーを構成するのは非常に困難であり, 直接突き合わせ法などいくつか報告例はあるものの, 十分な結合効率を得られていない^{7,8)}.

ところで, 平板マイクロレンズ^{9,10)}はガラス基板内部に半球状の分布屈折率をもつ集積型レンズであり, (1)大量生産が可能, (2)二次元アレー化が容易, (3)積層光回路^{11,12)}が構成可能, などの特徴をもつ. したがって LD とファイバのアレーの一括接続に有効であり, われわれはこれまで一対のマイクロレンズを用いたアレー結

合モジュールの検討を行ってきた¹³⁾. ここでもし, このマイクロレンズとファイバアレーの無調整結合が可能となれば, モジュールの組み立てが著しく簡略化されると考えられる.

本論文においてわれわれは, 光素子の精密位置調整という根本的な問題を解消するための新しい光結合法「自導光結合法」を提案する. ここで, 自導とは self-align な性格をもち, 素子自体が自然に適度な位置へ導かれるという意味である. そして簡単な方法で形成できる微小な光コネクタ「プッチンマイクロコネクタ (put-in microconnector)」を用いて平板マイクロレンズとファイバアレーの自導光結合を実際に試みた. 以下の章では, まず自導光結合の概念と適用について説明し, 続いて平板マイクロレンズ-ファイバ間結合デバイス構造と製作・評価について述べ, 本方法の有効性を示す.

2. 自導光結合法

自導光結合法は, レンズの焦点位置, 光導波路や光ファイバのコアなど, 一般に光素子のパワーが集中する箇所に, 光によって自動的に透明な突起や窪み, つまりプッチンマイクロコネクタを形成し, それらを単に接続することで無調整光結合を実現する方法である. 実際この

ような方法が可能となったとき、予想される適用例を **Fig. 1** に示す。さまざまなタイプのレンズとファイバの間の結合 (**Fig. 1 (a)**)、ファイバどうしの結合 (**Fig. 1 (b)**)、光回路とファイバとの結合 (**Fig. 1 (c)**)、微小な個別素子と光プリント基板^{14,15)}の結合 (**Fig. 1 (d)**)、その他、ハイブリッド光集積回路、光演算回路など広範な適用が期待できる。

平板マイクロレンズとファイバの間のアレー自導光結合の概念を **Fig. 2** に示す。ここでは平板マイクロレンズの焦点位置に円錐形の突起を形成し、一方、光ファイバのコア部分にはすり鉢状の窪みを形成して、一对のマイクロコネクタとしている。以下ではこのような突起および窪みをそれぞれ「光プラグ (または単にプラグ)」、 「ファイバジャック (ジャック)」と呼ぶことにする。また接続を容易にするために、ジャックのおよその位置決めを行うガイド孔も設ける。この孔をここでは「ファイバソケット (ソケット)」と呼ぶ。ソケットをファイバの外径より大きくすることにより、手作業または簡単な機械的作業でファイバをソケットへ挿入できる。最終的な精

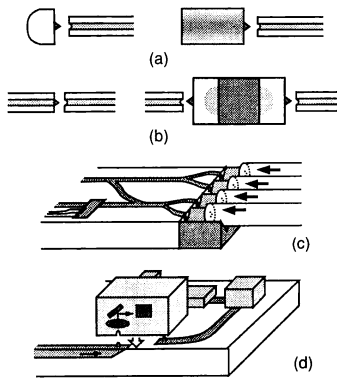


Fig. 1 Various applications of put-in micro-connectors. Coupling of (a) lens and fiber, (b) fibers, (c) integrated optics and fiber, and (d) optical printed circuit board and optical components.

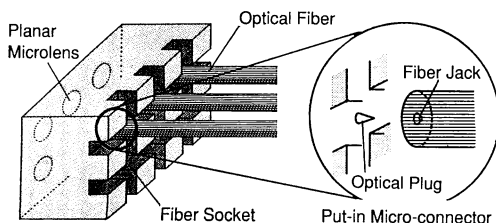


Fig. 2 Scheme of self-aligning device of planar microlens and fibers with put-in microconnectors.

密位置決めはプラグとジャックの結合によって自動的に行われるため、精密位置調整をいっさい必要とせずマイクロレンズとファイバの結合が完成する。

3. プッチンマイクロコネクタの設計と製作

3.1 プッチンマイクロコネクタの設計

プッチンマイクロコネクタの接続部の詳しい構造を **Fig. 3** に示す。ジャックは単一モードファイバのコア径に対応した窪み d_i をもち、プラグもこれと整合する大きさ d_o をもつものとする。ファイバの外径 D とソケットの幅 W の間には、挿入を簡単にするために若干のあそび δ が設けてある。 δ を $d_i/2$ 以下にすれば、ジャックとプラグの結合が可能となる。また、プラグはジャックを中心に支え、なおかつファイバが傾いてもファイバの端が溝の底に当たらないように、窪みの深さ h_i よりもやや高くする必要がある。ただしこのときファイバは角度 $\theta_{\max} = \delta/H$ の範囲内で傾くものと考えられ、これを小さくするには、ソケットの深さ H を十分大きくすることが必要となる。例えば $d_i \sim 20 \mu\text{m}$, $h_i \sim 6 \mu\text{m}$, $D \sim 90 \mu\text{m}$, $\theta \sim 2^\circ$ と仮定すると、プラグの高さ h_o は $8 \mu\text{m}$ 以上が必要となる。

次に、このような構造のプッチンマイクロコネクタの結合効率について考える。レンズで集光した光とファイバの伝搬光を同じスポットサイズ w をもつガウスビームで近似すると、最適位置からの横方向ずれ r 、光軸方向ずれ z 、角度ずれ θ に対する結合効率 η は

$$\eta = \kappa \exp \left[-\kappa \left\{ \left(\frac{r}{w} \right)^2 + 2 \left(\frac{\theta z}{2w} \right)^2 + \left(\frac{\pi \theta w}{\lambda} \right)^2 - \left(\frac{r \theta z}{w^2} \right) \right\} \right] \quad (1)$$

で与えられる¹⁶⁾。ただし、

$$\kappa = 1 / \{ 1 + (\lambda z / 2\pi w^2)^2 \} \quad (2)$$

であり、 λ は光の波長を表す。 $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$, $2w = 10 \mu\text{m}$ としたとき、横ずれ $r = 1 \mu\text{m}$ 以下であれば $\eta > 90\%$ 、損失 0.5 dB 以下が得られる。横ずれは突起と窪みの

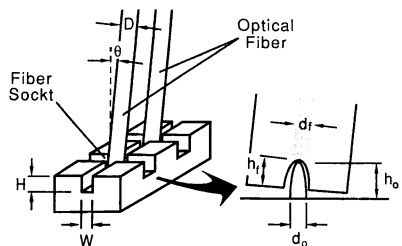


Fig. 3 Design of self-aligning device with put-in microconnector.

形状に依存するが、両者が同形にできれば原理的に横ずりは起こらないはずである。また光軸方向ずれは、 $z=30\ \mu\text{m}$ に対しても損失 0.5 dB 以下なので深刻ではない。すなわち、プラグの高さとジャックの深さに対する許容誤差範囲は十分広い。一方、角度ずれは $\theta < 1^\circ$ に対して、損失 0.5 dB 以下が得られる。

3.2 プッチンマイクロコネクタの製作

Fig. 4 にプッチンマイクロコネクタの製作工程の概略を示す。平板マイクロレンズとしては基板の厚さ $1,500\ \mu\text{m}$ 、レンズ口径 $250\ \mu\text{m}$ 、ピッチ $250\ \mu\text{m}$ のものを使用した。ただしレンズ面に蒸着した Cr マスクで開口を直径 $200\ \mu\text{m}$ まで絞ってある。レンズ面からコリメート光を入射すると基板中で焦点を結ぶ。基板表面からこの焦点までの距離 f_i は $1100\ \mu\text{m}$ である。まずこの基板の裏面に、ブレードの幅 $80\ \mu\text{m}$ のダイシングソーを用い

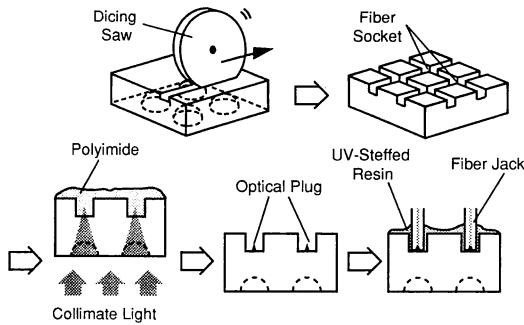


Fig. 4 Fabrication process of self-aligning device.

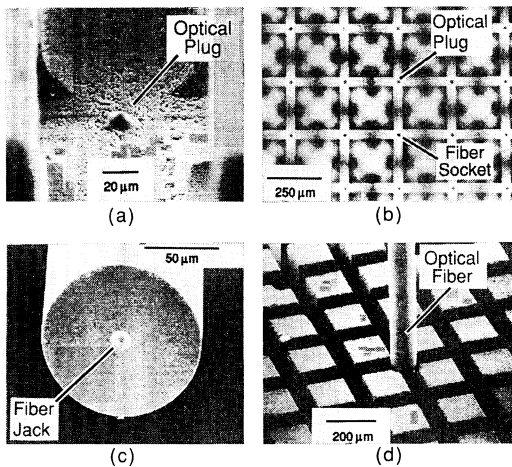


Fig. 5 SEM photographs of fabricated self-aligning device. (a) optical plug, (b) arrayed optical plugs and fiber sockets, (c) fiber jack, and (d) fiber inserted into fiber socket.

てメッシュ状の溝を彫る。ここで溝の交点が各レンズの中心軸と数ミクロンの誤差範囲内で一致し、しかも溝の底面がレンズの焦点面になるようにブレードの位置を制御する。このとき溝の各交差部が深さ $H=400\ \mu\text{m}$ のファイバソケットとなる。この交差部は対角の長さが $113\ \mu\text{m}$ となるので、 $80\ \mu\text{m} < D < 113\ \mu\text{m}$ を満たすファイバを挿入できる。

次に光プラグの形成法について述べる。プラグを自動的にかつ正確にレンズの焦点位置に形成するために、ここでは高い解像度をもつ感光性ポリイミド Photoneece UR-5100 ((株)東レ社製)を材料として使用した。このポリイミドは波長 $1.3\ \mu\text{m}$ に対して吸収損失が $0.04\ \text{dB}/\mu\text{m}$ 以下と小さく、十分使用可能と考えられる。このポリイミドを上記の溝中に塗布した後、Ar イオンレーザーのコリメート光をレンズ面から垂直に照射し、集光された光で焦点位置にあるポリイミドを選択的に露光する。ここでレーザーの波長は、ポリイミドの最大感度波長に近い $0.455\ \mu\text{m}$ を使用した。現像処理後に現れたプラグの SEM 写真を Fig. 5 (a) に示す。滑らかな表面をもつ円錐形のプラグが形成されているのがわかる。露光時間を 10 秒としたとき、光パワーに対するプラグの形状を Fig. 6 に示す。光パワーにより $10\sim 100\ \mu\text{m}$ の範囲で高さが制御可能なことがわかる。ただし現像後、熱処理 (350°C , 1 時間) を行ってプラグを安定化すると、収縮により高さが 40% 減少することに注意が必要である。また高さ h_0 にあわせて太さ d_0 も変化する。 $h_0 > 50\ \mu\text{m}$ に対して $d_0 \sim 30\ \mu\text{m}$ となり細長い形状となるため、ジャックを挿入したとき折れやすい、ポリイミドの吸収損失が大きくなるといった問題が生じる。また

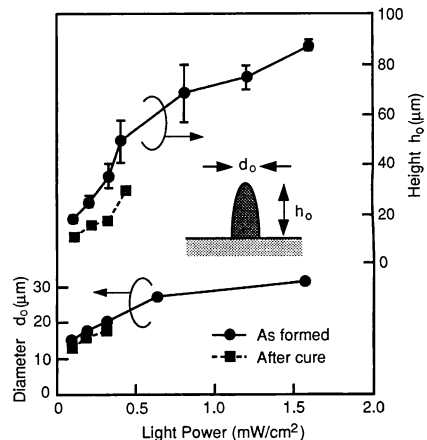


Fig. 6 Shape of optical plug versus exposure light power.

$h_0 < 15 \mu\text{m}$ に対しては $d_0 < 15 \mu\text{m}$ となり、後で述べるジャックの形状と整合しない。そこで本実験では光パワー 0.3mW/cm^2 で露光し、 $h_0 = 17 \sim 20 \mu\text{m}$, $d_0 = 17 \mu\text{m}$ とした。Fig. 5(b) はソケットとプラグを形成後、基板の裏面を上から見た写真である。プラグが各ファイバソケットのほぼ中央に位置しているのがわかる。

一方、ファイバジャックは光ファイバを沸化水素酸でエッチングして形成する。使用したファイバは、外径 $125 \mu\text{m}$, カットオフ波長 $1.1 \mu\text{m}$ の単一モードファイバである。ファイバのコアはクラッドより深くエッチングされ、Fig. 5(c) に示すように Ge ドープの濃度に対応した深さ分布をもつジャックが形成される。室温でのエッチング時間に対するファイバの形状の変化を Fig. 7 に示す。エッチング時間を増やすとジャックの深さ h_f は増加するが、8分間以上エッチングしても $h_f \sim 6 \mu\text{m}$ で一定となる。逆にエッチングし過ぎるとクラッドのエッチングが進行してファイバの外径 D が大きく減少し、先端が機械的に弱くなってしまふ。そこで

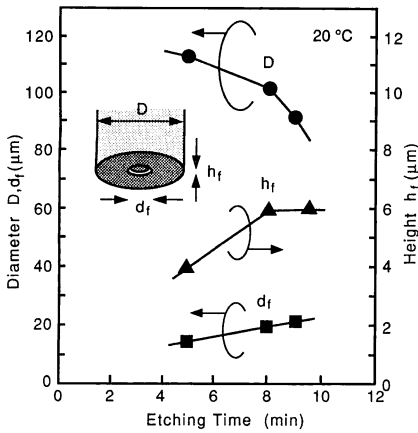
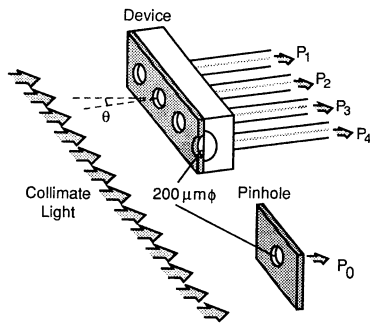


Fig. 7 Shape of fiber versus etching time.



$$\text{Loss} = -10 \log (P_i / P_0) \quad (i=1 \sim 4)$$

Fig. 8 Evaluation method of insertion loss.

エッチング時間は $8 \sim 9$ 分と設定した。このとき D は約 $90 \mu\text{m}$ となり、前述のファイバソケットへの挿入が可能となる。このときジャックの直径 d_f は約 $20 \mu\text{m}$ となる。

ソケットへジャックを手作業で挿入し、ジャックとプラグを結合させたときの様子を Fig. 5(d) に示す。最後にソケットに透明な紫外線硬化樹脂オプトダイン UV-4000 (ダイキン工業(株)製) を注入し、全体を固定する。この樹脂はレンズ基板やポリイミドに近い屈折率 1.54 をもち、各部の凹凸による光散乱を抑える働きも兼ねている。

4. 光結合特性

測定したプッチンマイクロコネクタは、プラグ: $h_0 = 17 \mu\text{m}$, $d_0 = 17 \mu\text{m}$, ファイバジャック: $D = 92 \mu\text{m}$, $d_f = 22 \mu\text{m}$, $h_f = 6 \mu\text{m}$, ソケット: $W = 80 \mu\text{m}$, $H = 400 \mu\text{m}$ である。Fig. 8 には結合損失の評価法を示す。測定光源としては波長 $0.633 \mu\text{m}$ の He-Ne レーザー光、および波長 $1.3 \mu\text{m}$ の LD 光の 2 種類を用意し、対物レンズで

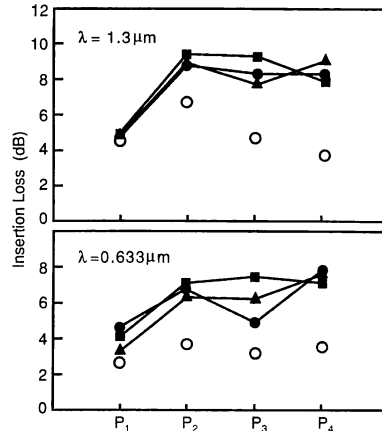


Fig. 9 Measured insertion loss for 4 fiber ports.

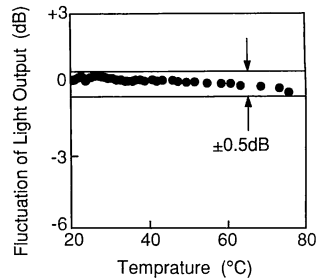


Fig. 10 Stability of coupling characteristic versus temperature.

コリメートした後、レンズ面に対してさまざまな角度で入射した。レンズ開口は直径 200 μm まで絞られているので、光ファイバからの出力パワーを単に直径 200 μm 円形窓をもつスリットを通過するパワーと比較した。

Fig. 9 は 4 本の出力ポートの損失を示す。一連の●, ■, ▲印はレンズ面に対する角度を 0.05° ずつ変化させたとき同時測定した損失を示し、○印は各ポートを独立に測定したときの最適角度に対する最低挿入損失を示している。ある角度に対して、波長 0.633 μm では損失 4.5~7.9 dB, 波長 1.3 μm では損失 4.7~8.9 dB を得た。また、各ポートの最低損失は、0.633 μm では 2.6~3.7 dB, 1.3 μm では 3.7~6.8 dB であった。いずれの場合も波長 1.3 μm の方が損失が 1~2 dB 大きいのは、ファイバが完全に単一モード化されて結合条件が厳しくなるためである。損失の原因としては、マイクロコネクタの結合位置ずれ、ファイバの角度ずれ、境界面での反射および散乱、界分布の不整合、ポリイミドの光吸収などが考えられる。ただし 1.3 μm に対する最低挿入損失のばらつきが大きいことから、各ファイバの角度ずれに起因した損失が特に大きいと推測される。ソケットをより深くしてこの角度を減らすことで、低損失化できると考えられる。また、光吸収がより少なく、ガラスとの屈折率差が小さいポリイミドを用いれば、さらに低損失が可能である。

Fig. 10 には製作したプッチンマイクロコネクタの温度に対する光パワーの変化を示す。20~90°Cの範囲でパワー変動は ± 0.5 dB に抑えられた。これより、ポリイミドの光プラグと紫外線硬化樹脂の固定で製作されたマイクロコネクタでも、ほぼ安定した温度特性が得られることが確認された。

5. ま と め

本研究では、プッチンマイクロコネクタを基本構成要素とする新しい光結合法「自導光結合法」を提案した。この光結合法の製作はすべて自動的に行われ、各部の精密位置調整を必要としないので、大量生産性に最適な手法といえる。ファイバ間結合、ファイバ-光回路間結合、光素子-光回路間結合などあらゆる光結合に適用可能となるであろう。実際に試みたマイクロレンズアレーとファイバアレーの自導結合においては、波長 1.3 μm の光に対して損失 7 dB 以下で完全無調整結合が実現できた。今後いっそう低損失化をすすめると共に大規模アレーでの均一性を高めれば、実用的なデバイスになるものと思われる。また今回製作した結合デバイスに、さら

に高 NA コリメート用マイクロレンズ^{13,17)}とアイソレータなどを組み合わせれば、半導体レーザーと光ファイバの多数本アレー一括結合モジュールが容易に構成できると期待される。

レンズサンプルの供給および日頃討論いただく日本板硝子(株)西澤紘一博士、及川正尋博士に感謝する。

文 献

- 1) D. Kato: "Light coupling from a stripe-geometry GaAs diode laser into an optical fiber with spherical end," Jpn. J. Appl. Phys., **44** (1973) 2756.
- 2) 伊賀健一, 大島 茂, 北原知之: 信学会 OQE 研資 (1977) OQE 77-11.
- 3) T. Uchida and K. Kobayashi: *Optical Device & Fibers* (Ohm Sha & North-Holland, Tokyo, §2.2, 1982).
- 4) I. Kitano: *Optical Device & Fibers* (Ohm Sha & North-Holland, Tokyo, §2.5, 1983).
- 5) 加藤邦治, 西 功雄: "非球面ガラスレンズを用いた単一モードファイバ用 LD モジュール", 信学春季全大 (1990) C-264.
- 6) 豊中隆司, 辻 伸二, 羽田 誠: "半導体光増幅器用非球面レンズ光結合系に関する検討", 信学秋季全大 (1991) C-119.
- 7) M. S. Cohen, M. Cina, E. Bassous, M. M. Oprysko and J. L. Speidell: "Passive laser-fiber alignment by index method," IEEE Photon. Tech. Lett., **27** (1991) 985-987.
- 8) C. A. Armiento, M. Tabasky, C. Jagannath, T. W. Fitzgerald, C. L. Shieh, V. Barry, M. Rothman, A. Negri, P. O. Haugsjaa and H. F. Lockwood: "Passive coupling of InGaAsP/InP laser array and singlemode fibers using silicon waferboard," Electron. Lett., **27** (1991) 1109-1111.
- 9) M. Oikawa, K. Iga and T. Sanada: "A distributed-index planar microlens made of plastics," Jpn. J. Appl. Phys., **20** (1981) L51-L54.
- 10) M. Oikawa, K. Iga, T. Sanada, N. Yamamoto and K. Nishizawa: "Array of distributed-index planar micro-lenses prepared from ion exchange technique," Jpn. J. Appl. Phys., **20** (1981) L296-L298.
- 11) K. Iga, M. Oikawa, S. Misawa, J. Banno and Y. Kokubun: "Stacked planar optics; an application of the planar microlens," Appl. Opt., **21** (1982) 3456-3460.
- 12) K. Iga, Y. Kokubun and M. Oikawa: *Fundamentals of Microoptics* (Academic Press Inc. & Ohm Sha, Tokyo, 1984).
- 13) A. Sasaki, T. Baba and K. Iga: "Focusing characteristics of convex-shaped distributed-index microlens," Jpn. J. Appl. Phys., **31** (1992) 1161-1167.
- 14) 内田禎二: 特公昭 48-5975.
- 15) Y. Kokubun, T. Baba and K. Iga: "Silicon optical printed circuit board for three-dimensional integrated optics," Electron. Lett., **21** (1985) 508-509.
- 16) 河野健治: 光デバイスのための光結合系の基礎と応用 (現代工学社, 1991).
- 17) M. Oikawa, H. Nemoto, K. Hamanaka and E. Okuda: "High numerical aperture planar microlens with swelled structure," Appl. Opt., **29** (1990) 4077-4080.