

# プラスチック光ファイバー

慶応義塾大学理工学部  
小池 康博

## Plastic optical fiber

Yasuhiro Koike

Faculty Science and Technology,  
Keio University

### Abstract

The construction of optical fiber network system has proceeded rapidly in recent years due to the approach of high-speed multimedia network. There has been considerable interest in the development of graded-index polymer optical fibers (GIPOFs) for high-speed short-distance with the order of giga bps and high efficiencies of fiber coupling and beam insertion because of its large core diameter.

The polymer optical fiber amplifier (POFA) was successfully obtained by the same manner of preparing the GIPOF. An input signal of 1W at 591 nm was amplified to 620W(28dB) by injection of 11kW of pump power at 532 nm into a POFA with 1m length.

## 1. はじめに

一般に光学材料は均一屈折率からなるものと考えられてきた。しかし、光学材料内部において、その屈折率を適切に変化させることができれば、その材料中での光線の進行を自由に制御することが可能となるため、これまでの均一屈折率材料では成し得なかった優れた特性を発揮させることができる。例えば、半径方向に高度に制御された屈折率分布を持つ屈折率分布型(GI型)ポリマー光ファイバー(POF)は、従来の屈折率均一のコアからなるPOFに比べ2桁以上の高速データ伝送が可能である。また、そのようなGI型POF内に、誘導放出機能を

有する有機物質がわずかに含有されていると、励起光存在下、微弱な信号光のみ数百倍に増幅できるポリマー光ファイバー増幅器となりうる。本論文では、通信のための広帯域POFを中心に解説する。

## 2. ポリマー光ファイバー(POF)

### 2.1 POFの特徴

これまで金属ケーブルが用いられてきた情報幹線系は、高密度情報通信が可能なシングルモード(SM)のシリカ系光ファイバーに置き換えられつつある。しかしながら、加入者系においては大きな問題に直面している。

これはシングルモード光ファイバーのコア系が、5~10ミクロンと髪の毛よりも細いため、

接続・分岐が難しくなるのである。実際に高精度なコネクタによる接続・分岐は、技術的には達成されているものの、これを実際に加入者系に応用するとなると、接続分岐の数が増大し膨大なコストが必要となる。現在我々が利用しているテレビ、FAX、電話などの情報機器に使われている電線の接続・分岐は、低コストで簡単に行われており、新しい機器の導入あるいは配線替えが必要になったとしても、容易に接続を変えることができる。光ファイバーの場合にも広伝送帯域を保ちつつこのような簡単な接続・分岐の手法が望まれる。

このような状況下、POFに多大な注目が寄せられ始めてきた。この特徴は安価なPOFを用いること、コア径が500ミクロンまたはそれ以上であるため、Fig. 1に示されているように、光源であるLDとファイバー、あるいはファイバーとファイバーの接続には高精度なコネクタやレンズ系をいっさい必要とせず、従来のコンセントと同様に極めて簡単に接続することが可能であることである。

この式に基づきシリカ径GI光ファイバー（コアの直径50 $\mu\text{m}$ の場合と、POF（コアの直径500 $\mu\text{m}$ ）の場合の接続損失を計算した結果をTable 1に示す。

Table 1 Comparison of calculated coupling loss in the two fibers connection between GI glass optical fiber(GOF)and GI POF. (d=amount of displacement)

d ( $\mu\text{m}$ )	GOF	GI POF
	Core diam. 50 $\mu\text{m}$	Core diam. 50 $\mu\text{m}$
2.5	0.19 dB	0.018 dB
5.0	0.39 dB	0.037 dB
7.5	0.59 dB	0.056 dB
50.0	—	0.039 dB
75.0	—	0.059 dB

$$L(\text{dB}) = -10 \log \left\{ \cos^{-1} \left( \frac{d}{2R} \right) - \left[ 1 - \left( \frac{d}{2R} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \left( \frac{d}{6R} \right) \left\{ 5 - \left( \frac{d^2}{2R^2} \right) \right\} \quad (1)$$

表に示されているように、POFにおいてはコア径が500 $\mu\text{m}$ と大きいため、シリカ系では全く光を送送できない50 $\mu\text{m}$ の位置のずれにおいても、損失は0.39dBであり約90%以上の光は伝送されることがわかる。

このようなコアの大口径化による損失の低減化はポリマー材料の持つ柔軟さにより成し得るものであり、いかなるガラス材料を用いても、同様の特性を達成することは不可能であると考えられる。

## 2.2 POFの広帯域化

光ファイバーはその構造から、大きく3種類にわけることができる (Fig. 2 参照)。シングルモード (Single Mode; SM) 型光ファイバー、

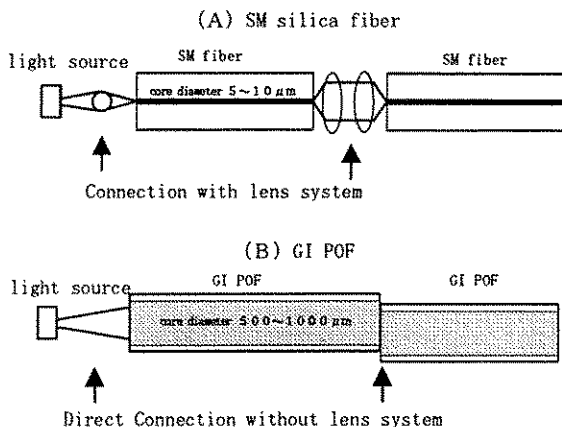


Fig. 1 Schematic representation of fiber connection.

コア半径Rの光ファイバー（屈折率分布型）どうしの軸ずれにおける接続損失L (dB)について、理論的に式(1)が提案されているが<sup>(1)</sup>、

マルチモードの屈折率分布 (Graded Index; GI) 型光ファイバー、そしてマルチモードの段階屈折率 (Step Index; SI) 型光ファイバーである。

らにポリマー材料の利点である大口径化も可能である。今のところ唯一市販されているSI型POFにおいては、Fig. 2に示されるように直進する光と反射を繰り返して進む光のモード分散により出射波形は入射波形に比べて大きく歪んでしまい、その伝送帯域は金属の同軸ケーブルと同程度の数MHz・kmと小さい。これはSM型の数百分の1程度であり、100mにつき数百Mbpsの伝送は難しい。

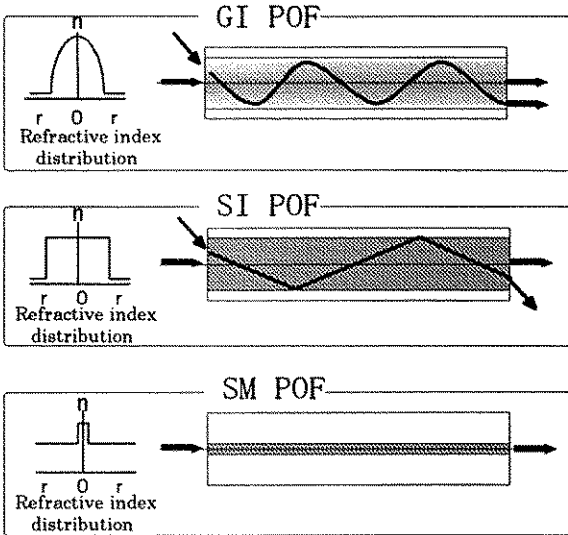


Fig. 2 Fiber types

この構造の違いはそのファイバーが有する伝送帯域に大きく影響してくる。例えば、SM型光ファイバーでは、伝送されるモードが一つであるためモード分散が起こらず、入射波形が保持されたまま伝送される。その結果伝送帯域は数GHz・kmとなる。このSM型ファイバーは、今後光による情報通信が広く一般に行われるマルチメディア社会となった時点でも十分な伝送容量を持つと考えられるが、SM型とするためには、コア径を数 $\mu\text{m}$ に制御する必要があり、ポリマー材料の利点である大口径化が可能であるという特長を生かすことができない。マルチモードのGI型光ファイバーにおいては、Fig. 2に示されるように、そのファイバーのコアが有する屈折率分布を適切に制御することにより、モード分散を抑えることができるため、入射波形に対する出射波形の広がりは見られなくなり、材料分散が伝送帯域を決定することになる。さ

### 2.3 GI型POF

現在高伝送帯域用POFとして、GI型POFの研究開発が進められている。広帯域にするにはこの屈折率分布を中心軸から周辺にかけて2次関数的に減少させれば良いことが知られている。これまでに屈折率分布を形成させる方法として、拡散の原理を用いる方法や、共重合反応における反応性比の違いを利用した共重合法などが提案されてきた<sup>2)</sup>。ここでは最近当研究室で報告された界面ゲル重合法 (Fig. 3参照) について説明する。

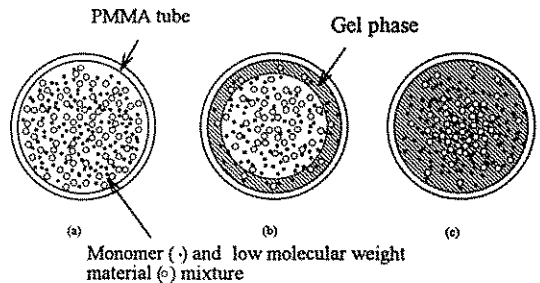


Fig. 3 Schematic representation of the interfacial-gel polymerization technique.

界面ゲル重合法においては、まずポリマーからなる重合管の中に、高屈折率で分子体積が大きく、かつ重合に関与しない低分子と、分子体積が小さく、かつ低屈折率を与えるモノマーを同時に仕込み重合させる (Fig. 3(a))。重合管の内壁はモノマーに僅かに膨潤するために、重合初期には重合管内壁にゲル層が形成される

(Fig. 3(b))。この部分ではポリマー固有のゲル効果が誘発されるため、重合は重合管の内壁から開始され徐々に中心部へ進行していく。このときゲル層内には分子サイズの小さいモノマーが優先的に入り込むため、重合が進行するにつれ、分子サイズの大きな低分子は中央に押しやられる。最終的に重合が完結すると (Fig. 3(c))、高屈折率を与える低分子が中央付近により多く分布した組成分布を有するプリフォームが得られる。この組成分布により屈折率分布が形成されることになる。現在のところ、重合条件 (温度、時間、低分子の種類等) を制御することにより、屈折率分布係数を 1.6 から 4.5 程度のものが作製されている。作製されたプリフォームを 190~250°C で熱延伸することにより、POF を作製した。得られた POF の屈折率分布はプリフォームの屈折率分布とほぼ同じである。

また、Fig. 4 に実際の 100m 長における S I 型及び G I 型 POF の 200ps 幅のインパルス応答の実験結果を示す。S I 型 POF では、モード分散のために出射パルスが大きく広がるが、G I 型 POF では、コア内の屈折率分布が、理想である 2 次分布にほぼ制御されているため、パルスの広がりはほとんど認められない。Fig. 4 の実験結果をフーリエ変換し、3 dB での伝送帯域を見積もると、100m あたり S I 型が 50MHz であるのに対し、G I 型は 10GHz 程度を有するこ

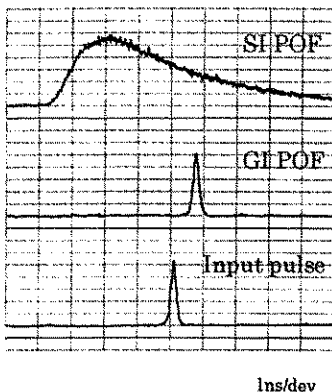


Fig. 4 Pulse broadening through GI and SI POFs. Fiber Length=100m

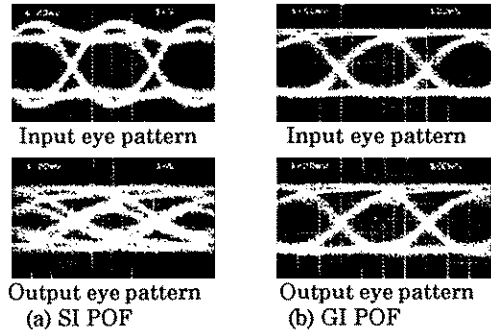


Fig. 5 Eye pattern changing through SI and GI POFs Fiber length=100m  
SI POF=250Mbps eye pattern  
GI POF=2.5Gbps eye pattern

とがわかった。

また近年 NEC にて開発された高速赤色 LD (650nm) を用いた信号伝送実験<sup>2)</sup>では、Fig. 5 (a) に示されるように 100m の長さで 2.5Gbps のアイパターン伝送に成功した (S I 型では 2.5Gbps の信号は全く伝送できなかったため、Fig. 5 (b) に示されるように 250Mbps で実験を行った。) これらの実験結果から、G I 型 POF は 100m 程度の範囲内であれば、現在提案されている高速マルチメディアの伝送容量をすべてカバーし得ることが明らかとなった。

## 2.4 マルチメディアと POF

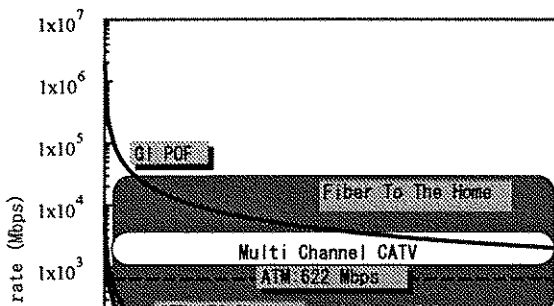
現在提案されているマルチメディアに必要な伝送速度 (Data rate) と、種々プロトコルで用いられる伝送媒体の伝送得度との関係を Fig. 6 に示す。横軸は伝送距離であり、G I 型、S I 型 POF のデータは、Fig. 4 の実験結果から見積もったものである。金属の同軸ケーブル、ツイストペア線のデータは、付加回路を用いた変調機能により高速化された値で見積もってある。このように G I 型ポリマー光ファイバーは、同軸ケーブル、ツイストペア線に比べ、約 1 桁以上大きな伝送速度を有している。Fig. 6 中には、現在提案されているデータ配線機構 (FDD I)、非同期転送モード (ATM)、多チャン

ネルケーブルテレビ配信機構 (Multi Channel CATV) あるいは、これらを総合的に利用する各家庭向けのマルチメディア情報伝送構想 (F T T H) の伝送領域が区分されている。例えば、CATVにより高画質のTV (HDTV) 情報を伝送しようとする、1チャンネルあたり約30Mbpsの伝送速度が必要であり、100m以内の加入者系といえども、これらの情報をすべてカバーできるものは、現存する伝送媒体としてG I型またはSM型光ファイバのみである。しかしながら、SM型光ファイバは接続・分岐が問題となっていることは前述したとおりである。

今後可視光域で使用するPOFシステム用の光増幅器、カップラー、スイッチなどの素子の研究開発が加速されるであろう。

ファイバー型光増幅器は、光励起で光を増幅できる、偏波に依存せず高効率・高利得・広帯域の光増幅が可能である、ファイバーシステムとの適合性が良い、などの特長を持っている。石英系では、現在までに、赤外域に光増幅機能を持ついくつかの希土類添加ファイバー増幅器が開発されているが、可視光域で使用できるプラスチックファイバー増幅器 (POFA) は無かった。

ローダミン系色素に代表される蛍光性の有機色素には、可視光域で非常に優れた光増幅特性を示すものがあり、その種類も多い。多種多様な分子構造のものを設計し、合成できるという点にも魅力がある。POFAでは、ガラス転移温度が低いため、これらの有機色素が添加できる<sup>4, 6)</sup>。各波長帯に適した誘導放出断面積の大きい有機色素を添加することにより、可視光域のどの波長帯においても高効率の光増幅が原理的に可能である。



成するための低分子化合物、増幅特性を付加するための有機色素、重合開始剤、連鎖移動剤、微量のジメチルスルホキシド (Dimethyl Sulfoxide:DMSO)を含むメチルメタクリレート (MMA)モノマー溶液を調整した。DMSOは、有機色素のモノマーおよびポリマーへの溶解を助けるために加えた。このモノマー溶液をポリメチルメタクリレート管に注入し、界面ゲル重合法で重合させることにより屈折率分布及び色素分解を有するプリフォームを得た。得られたプリフォームを190～250℃で熱延伸することによりPOFAを作製した。

Fig. 7 に母材中の屈折率分布と色素濃度分布を示す。屈折率分布は干渉法<sup>7, 8)</sup>で、色素濃度分布は吸光度を測定することにより求めた。いずれもほぼ2次分布となっており、これらの有機色素分布と屈折率分布は、母材のそれらとほぼ同じである。

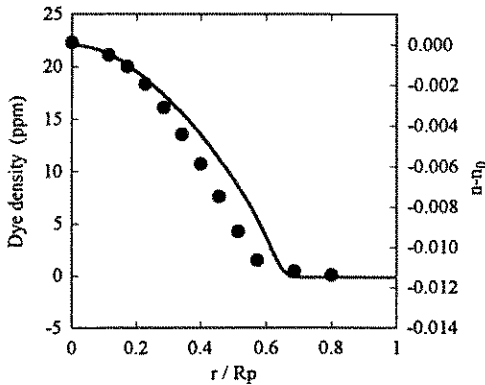


Fig. 7 Dye density and refractive-index distributions of rhodamine B-doped GI POFA prepared from methyl methacrylate solution of 20 ppm-rhodamine B.  $r/R_p$  means normalized radius. Plots and solid line mean dye density and refractive index, respectively.

### 3. 3光増幅現象の確認と動作特性

GI型POFAは、既存の無機系光ファイバーアンプの作製温度約1000℃に比べ、約2

00℃以下の温度で作製できるため、エネルギー変換効率の大きい(約1万倍)有機色素をドープメントとして使用することができ、高出力が期待できること、またポリマーであるために大口径化が可能であるなどの利点がある(コア径500μm以上)。実験では励起光としてQスイッチNd:YAGレーザーの第2高調波(波長:532nm、パルス半値幅:約6.0ns)、信号光として色素レーザーの射出光(波長:591nm、パルス半値幅3.5ns)を用いた。両者を同時にPOFA端面から同軸に入射させ、ファイバー中を導波させた<sup>4, 6)</sup>。実験には、ローダミンBを添加したタイプのPOFAを使用した。

Fig. 8 にファイバーからの射出光スペクトルを示す。これから、信号光波長の光が選択的に増幅されていることが分かる。また、励起光のみ入射させた場合と励起光と信号光を同時に入射させた場合の600nm付近の強度変化から、自然放出により放出されていたエネルギーが、信号光を入射させることにより、信号光波長の光の増幅に使われていることから、POFA中で

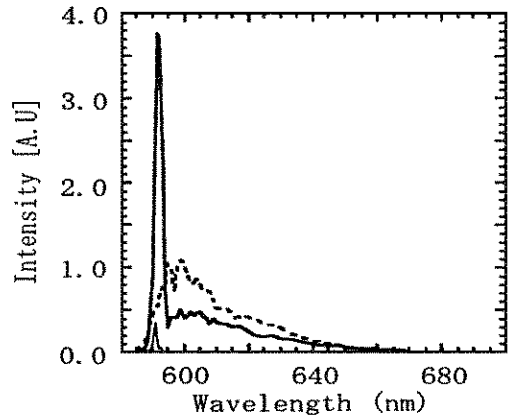


Fig. 8 Output spectra of POFA. The pump source was a doubled Q-switched Nd:YAG laser at 532nm wavelength, and the signal was dye laser at 591nm: thin soled line, only an injection signal light is used; dashed line, only a pump light is used; thick solid line, both the injection signal and the pump lights are used.

の誘導放出により信号光が増幅されたことを確認した。

POFAの利得の励起光強度依存症性の実測値をFig. 9に示す(黒丸プロット)。測定には、1.0ppmのローダミンBモノマー溶液から作製した、コア径500 $\mu\text{m}$ のファイバーを使用した。わずかファイバー長1mにおいて、1Wの入力信号光を最大620W(利得28dB)に増幅されることが確認された。

### 3. 4理論分析と性能予測

実測したローダミンBの誘導放出断面積・吸光断面積の値を用い、以下に示される式(2)～(4)によりPOFA中での光増幅現象を理論的に解析した<sup>9)</sup>。

$$\frac{dN_2(t, z)}{dt} = \frac{2\pi\sigma_p N_1(t, z)P_p(t, z)}{h\nu_p} \int_0^{a_0} \Theta(r)\Psi(r)rd r - \frac{N_2(t, z)}{\tau} - \frac{2\pi(\sigma_s N_2(t, z) - \sigma_s N_1(t, z))P_s(t, z)}{h\nu_s}$$

$$\times \int_0^{a_0} \Theta(r)\Psi(r)rd r$$

$$\frac{dP_s(t, z)}{dz} = -2\pi(\sigma_s N_2(t, z) - \sigma_s N_1(t, z))P_s(t, z) \times \int_0^{a_0} \Theta(r)\Psi(r)rd r \quad (3)$$

$$\frac{dN_p(t, z)}{dz} = 2\pi\sigma_p N_1(t, z)P_p(t, z) \times \int_0^{a_0} \Theta(r)\Psi(r)rd r \quad (4)$$

これらの式は簡単な3単位モデルを仮定することにより導出され、単位3は一重項の第一励起単位 $S_1$ 内のある振動エネルギー単位、単位

2は $S_1$ 内の最低振動エネルギー単位(レーザー遷移の上単位)、単位1は基底状態(下単位)を表す。ここで $N_i$ はファイバーの中心軸方向の座標 $z$ 、時刻 $t$ における単位 $i$ の占有密度、 $P_p(t, z)$ 、 $P_s(t, z)$ は励起光と信号光のパワー密度を表し、 $\sigma_p$ 、 $\sigma_s$ は励起光波長と信号光波長における吸光断面積、 $\sigma_s$ は信号光波長における誘導放出断面積、 $\nu_p$ 、 $\nu_s$ 、励起光と信号光の振動数、 $\tau$ は蛍光寿命、 $a_0$ はコア径、 $h$ はプランク定数をそれぞれ表している。光パワー密度分布関数 $\Psi(r)$ はガウシアン関数、色素密度分布関数 $\theta(r)$ は屈折率分布と同様な2次関数とした。

解析結果を測定結果と比較してFig. 9に示す(実線)。測定に用いたファイバーは、1.0ppmのローダミンBモノマー溶液から作製したが、ローダミンB濃度を0.2ppmと仮定した計算結果と良い一致を示した。ローダミン系色素は、重合時にラジカルの攻撃を受け、蛍光が減少することが知られている。したがって、色素の添加量に対し、20%程度が有効にPOFA内に存在しているものと思われる。

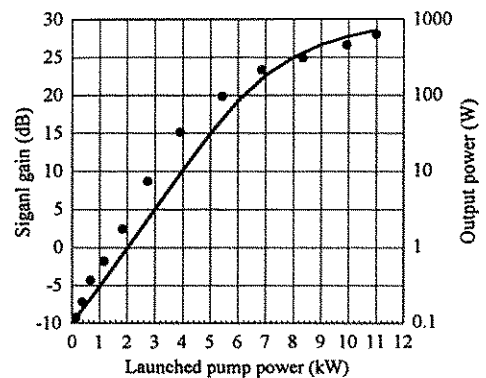


Fig. 9 Signal gain against launched pump power for Rhodamine B-doped GI POFA. Launched signal power(at 591nm)=1W. Pump wavelength=532nm. Fiber length=1m. ●: experimental vale. Solid line:calculated value assuming dye density of 0.2ppm.

#### 4. ま と め

現在マイルメディアネットワーク構想で問題となっている加入者系(端末領域)でネットワークを実現するための情報伝送媒体として、GI型POFはその伝送帯域特性、取り扱いの容易さ、優れた接続特性等から有力な候補と考えられる。またこの技術を応用して作製されたGI型POFAは、GI型POFの有する特徴を有すると同時に、現在実用化されているエルビウムイオンを用いたシリカ系アイプファイバーにはない、短距離での増幅が可能であること、大出力を取り出せること、ファイバーレーザーとしての応用が可能である等の特徴を有していることがわかった。以上通信のためのPOFを中心に述べた。

#### 文 献

- 1) G. Keiser, *Optical Fiber Communications*, McGraw Hill, New York, 1983
- 2) Y. Koike, *Polymers for Lightwave and Integrated Optics*, Chapter 3, Marcel Dekker, Inc., New York, 1992
- 3) Y. Koike "High-Speed Multimedia POF Network", Third International Conf. on POF & Appl. (POF'94) Conference Proceedings, 16(1994).
- 4) A. Tagaya, Y. Koike, T. Kinoshita, E. Nihei, T. Yamamoto and K. Sasaki: *Appl. Phys. Lett.* 63, 883(1993).
- 5) A. Tagaya, Y. Koike, E. Nihei, S. Teramoto, T. Yamamoto, K. Fujii and K. Sasaki: *Tech. Dig. CLEO'93*, Baltimore, 1993, paper CTuF3, p. 88.
- 6) A. Tagaya, Y. Koike, E. Nihei, S. Teramoto, T. Yamamoto, K. Fujii and K. Sasaki: *Appl. Opt.* to be published.
- 7) Y. Koike, Y. Sumi and Y. Otsuka: *Appl. Opt.* 25, 3356(1986).
- 8) Y. Otsuka and Y. Koike: *Appl. Opt.* 19, 2866 (1980).
- 9) A. Tagaya, S. Teramoto, T. Yamamoto, K. Fujii, E. Nihei, Y. Koike and K. Sasaki: *Tech. Dig 4th IKETANI CONFERENCE*, Hawaii Island, p. 166.