

# 位相共役光を用いる不整合自己補正型光導波路結合

島 山 巖

## Optical Waveguides Connection with Self-Correction of Connection Mismatches by Using Phase Conjugate Wave

Iwao HATAKEYAMA

The automatic fabrication of the optical waveguides in the photopolymerizing resin by the emission power from optical fiber has been already demonstrated. Here, we discuss the feasibility of the self-correction of the mismatches, such as misalignments and/or mode field differences between two optical guides to be connected. By the phase conjugate mirror (PCM) memorized the transmitted modes information, the phase conjugate wave (PCW) reflected from the PCM reproduces the transmitted modes exactly, and consequently, corrects those mismatches automatically. The realization of the low accurate alignment connection of waveguides, three dimensional connection, and even free route connection may be expected by the PCM to supply sufficient power to the photopolymerizing resin.

**Key words:** optical waveguides, optical connection, phase conjugate wave, photopolymerizing resin

各種光システムのいっそうの低廉化に対して、光実装技術の中の光導波路接続技術がますますその重要性を増している。すでに光ファイバーコネクタなど実用化が進んでいる面もあるが、光素子の多様化やその低価格モジュール化に対処するためには、さらに新しいアイデアが期待されている。ここでは、特に結合部の各種不整合を自己補正する光導波路接続のひとつの新しい方法について解説する。

### 1. 光硬化樹脂中での光結合導波路形成

本技術のひとつの要素は、光導波路から出た光により光硬化樹脂中に結合導波路を自律的に形成させることである。光ファイバーの出射光で光導波路が形成できることは、すでに各務らの報告<sup>1)</sup>により明らかになっている。ここでは、同様の方法で異種光ファイバー間に結合導波路を形成させた結果を示す。用いた光ファイバーは、コア径  $10\ \mu\text{m}$ 、 $NA=0.1$  とコア径  $50\ \mu\text{m}$ 、 $NA=0.2$  であり、いずれも通信仕様である。これら間に市販のエポキシ系光硬化樹脂を充填し、 $20\ \text{mW}$  の Ar レーザー光を  $10\ \mu\text{m}$  コアから出射させ結合導波路を形成させた<sup>2)</sup>。間隙を変えて形成した回路の結合効率と回路の一例を図 1 に示した。結

合効率は、 $50\ \mu\text{m}$  コア光ファイバーから出た光を  $10\ \mu\text{m}$  コア光ファイバーで受光して測定した。したがって、光ファイバー間隙がゼロでも、結合効率は 0.12 程度である。測定に用いたレーザー光の波長は  $514.5\ \text{nm}$  である。結合導波路形成時の光ファイバーどうしの精密なアライメントは行っておらず、導波路は必ずしも相手のコア位置に正確に形成されていない。実線は、結合導波路がない場合の結合効率である。結合導波路形成時の結合効率は、実験での最良値をとったものであり、限界を示すものではない。光ファイバー間の間隙が大きいほど結合導波路形成の効果が大きいことがわかる。

### 2. 位相共役光での結合効率測定

上記結合導波路を形成させる場合、光導波路間の光を位相共役光にすることにより、光導波路間のミスアライメントやモードフィールドの不整合が自律的に自己補正され、高い結合効率をもつ結合導波路が得られると考えた<sup>3)</sup>。その原理を模式的に図 2 に示した。ただし、光導波路は多モード状態とする。図 2(a) では、光導波路 A から出た光はその屈折率構造に依存した屈折角で広がるが、その

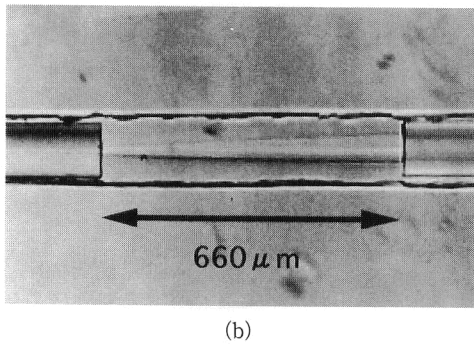
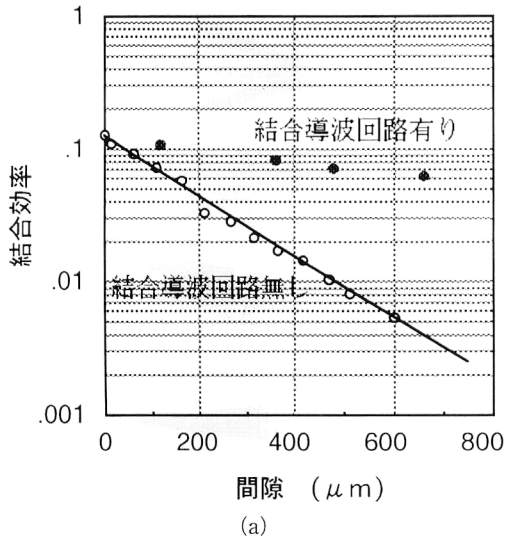


図1 (a) 結合導波回路の有無に対する結合効率の間隙長依存性 (コア径  $50\ \mu\text{m}$ ,  $NA=0.2$  の光ファイバーからコア径  $10\ \mu\text{m}$ ,  $NA=0.1$  の光ファイバーへの入射結合効率), (b) 結合導波回路の一例。

中で相手光導波路 B の入射 NA を満足した光のみが結合して位相共役鏡に到達することを示した。ここで光導波路 B を伝搬中にモード変換はないものとする、位相共役鏡には結合して伝搬した光のモード情報が記録される。図 2(b) では、位相共役鏡から反射した位相共役光は、記録された伝搬光のモード情報によって結合経路を忠実に戻するため、光導波路 B から出た光は光導波路 A に 100% 結合することを示している。この位相共役光で満たされた経路を光硬化樹脂で硬化させることにより、コアの連続性が保たれるだけでなく、コアとクラッドの比屈折率差などが関与する規格化周波数の連続性も保存され、効率が大きい結合導波回路が自動形成されることが期待される。

ここで、位相共役光を用いた結合効率の測定例を図 3 に示す<sup>4)</sup>。結合効率は、図 1 と同様に、 $50\ \mu\text{m}$  コア光ファイバーから出た光を  $10\ \mu\text{m}$  コア光ファイバーで受けて測定した。位相共役鏡として  $\text{BaTiO}_3$  単結晶を用いた。ただし、間隙がゼロの場合の効率を 1 と規格化した。図 1 と比較して明らかなように、通常光では間隙長に対して大幅に結合効率が減少するのに対し、位相共役光では 1 の状態を保つ

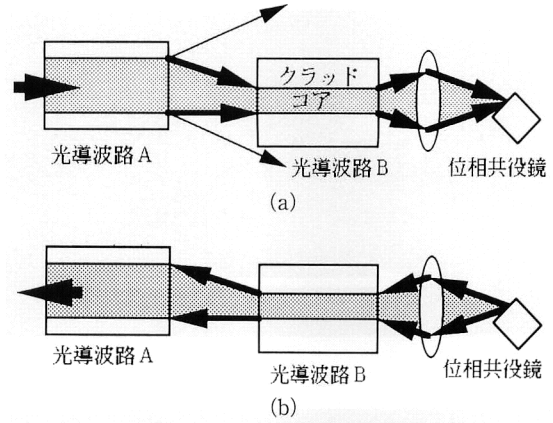


図2 位相共役光を利用した不整合自己補正光結合導波回路形成の原理。(a) 位相共役鏡へ伝搬導波光モード情報を記録、(b) 光導波路間へ伝搬導波光の位相共役光を発生、同時に光硬化樹脂で回路を形成。

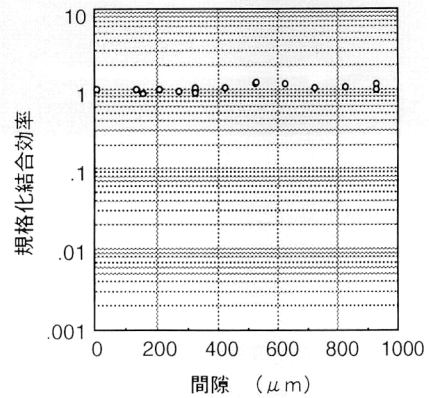
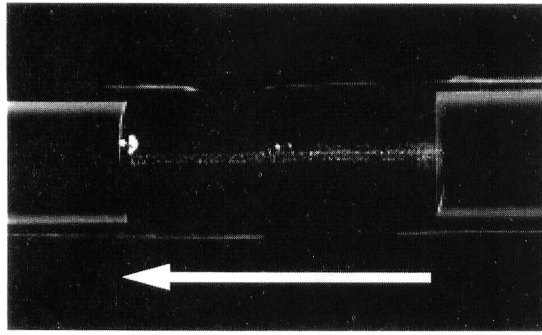


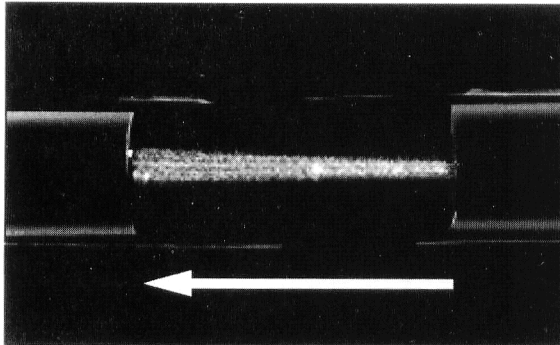
図3 位相共役光を用いて測定した異種光ファイバーでの間隙長に対する規格化結合効率。

ている。特別な工夫により、通常光を遮断し位相共役光のみの散乱光を観察した写真<sup>4)</sup>を図 4(a) に示した。図 4(b) は通常光が右の光導波路から出射している場合であり、光は出射角に従って広がっている。位相共役光の場合、見かけ上光学の原理に逆らって、大きいコアから小さいコアに光が収束している。このように、位相共役光として戻ってくる光は、光ファイバー間に間隙のみならず軸ずれや折れ曲がりなどの不完全性、コア径や比屈折率差またはコア形状の違いに起因するモードフィールドの差があっても、それらの不整合を自律的に自己補正すると考えられる。なお、原理的に単一モード条件ではその特性の利用は困難であるが、赤外領域で単一モード仕様のもをより短波長で用いることで多モード状態にすれば、位相共役光の特性を利用することが可能となる。

3. 対向フォトリフラクティブ位相共役鏡間での光共振  
本技術の実施にあたって実時間の位相共役鏡を使う場合、1 個のみでは結合部に不必要な光が残る。そのため、2



(a)



(b)

図4 50  $\mu\text{m}$  コア光ファイバー (右) から出射された光の経路。(a) 位相共役光が10  $\mu\text{m}$  コア光ファイバー (左) のコアに収束, (b) 通常光が広がって出射。

個の位相共役鏡の間で光導波路を挟み共振させることが必要となる。しかし、フォトリフラクティブ位相共役鏡間での共振の検討結果、安定共振するための共振系の減衰率に限界があり、現状で入手できるフォトリフラクティブ位相共役鏡では、その限界が30~40%程度であることがわかった<sup>5)</sup>。これは決して十分な値ではなく、この方法での結合回路形成は成功していない。

#### 4. 高パワー位相共役光の発生

原理で述べたように、本技術は、伝搬光モード情報の記録とその位相共役光を別々の時間に分けること、すなわちホログラムを利用して実現できる。ただし、光硬化樹脂の硬化感度は低く、樹脂への照射パワーは500 mW/mm<sup>2</sup>以上が必要である。ホログラムの回折効率が低いほど高い入力光パワーへの耐性が要求されるため、通常ホログラム媒体ではその利用が難しい。しかし、近年光の利用効率が大きい空間光変調器が市販されるようになっており、高パワーの位相共役光の発生に大きな道が開けてきた。高パワーの位相共役光の利用が可能であれば、さらに興味ある応用の道が開けよう。たとえば、図5に示したように、立体分岐回路、アライメントトレランスを大きく許容するV字型

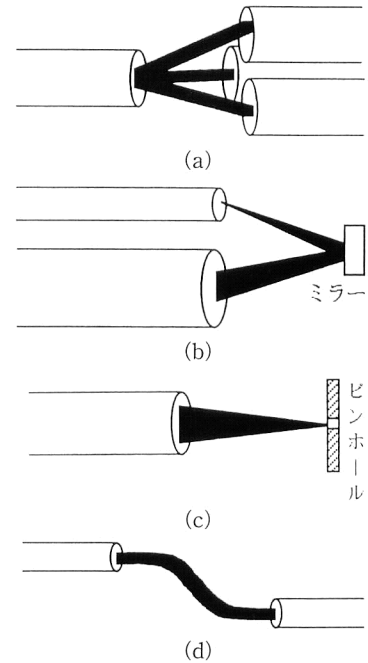


図5 位相共役光利用各種光結合回路の可能性。(a) 1:3の立体分岐, (b) V字型接続 (あるいはL字型接続), (c) 集光回路, (d) 自由ルート接続。

あるいはL字型接続、レンズレスの集光回路、さらには位相共役光パターンを時間的に変化させることにより、自由なルートをもつ接続も可能と考えられる。

位相共役光を利用した光導波路の結合について解説した。大まかな可能性を述べただけであり、樹脂中に形成される導波路の形成精度など未検討の要素も多い。しかし、各所で伝搬光による導波路の自律形成<sup>16)</sup>が検討されており、この方面の理解も急速に進もうとしているおり、関連技術として興味を示していただければ幸いである。

#### 文 献

- 1) 各務 学, 山下達弥, 伊藤 博: “自己形成光導波路技術”, エレクトロニクス実装学会誌, **30** (2000) 481-485.
- 2) 畠山 巖, 高塩健次, 飛田耕一: “導波光によるモード結合導波路の直接作製”, 第45回応用物理学関係連合講演会予稿集 No. 3 (1998) p. 1104.
- 3) 畠山 巖: “自己形成型光回路作製技術の研究”, 平成9年度~平成10年度科学研究費補助金研究成果報告, 課題番号09555112 (1999).
- 4) 畠山 巖, 市毛勝正, 山口一弘: “2本の異なる光ファイバー間を伝搬する位相共役光の結合経路直接観測”, 電子情報通信学会論文誌, **J81-C-I** (1998) 560-561.
- 5) 畠山 巖, 市毛勝正, 山口一弘: “対向フォトリフラクティブ位相共役鏡間での共振に対する系の減衰率の影響”, 電子情報通信学会論文誌, **J84-C** (2001) 652-659.
- 6) 広瀬直宏, 吉村徹三, 茨木 修: “自己形成導波路を用いた光接続における光ハンダ効果”, 第48回応用物理学関係連合講演会予稿集 No. 3 (2001) p. 1182.

(2001年9月18日受理)