

# 自己形成光導波路の形状制御

郭命俊\*<sup>1</sup>, 神田昌宏\*<sup>2</sup>, 三上修\*<sup>3</sup>, 米村正寿\*<sup>4</sup>, 河崎朱里\*<sup>4</sup>, 各務学\*<sup>4</sup>

## Shape Control of Self-Written Waveguide

by

Myung-Joon KWACK\*<sup>1</sup>, Masahiro KANDA\*<sup>2</sup>, Osamu MIKAMI\*<sup>3</sup>,  
Masatoshi YONEMURA\*<sup>4</sup>, Akari KAWASAKI\*<sup>4</sup>, and Manabu KAGAMI\*<sup>4</sup>

(Received on Mar. 30, 2009 and accepted on Jul. 6, 2009)

### Abstract

Recently, drastic increase of information flow is becoming a serious problem in information and communication technology, because of the data transmission rate limit in metallic wiring. To solve this problem, we have been paying a special interest to optical interconnection by SWW (Self-Written Waveguide). We studied the influence of fabrication parameters such as laser irradiation power and optical mode on SWW shapes. We simulated SWW shapes using the ray tracing method, and fabricated several SWWs with differential divergence angles. We demonstrated the control of SWW shape is possible with specific parameters.

**Keywords:** Self-Written waveguide, Optical waveguide, Optical printed circuit board, Optical interconnection

### 1. はじめに

現代社会は情報社会とも呼ばれるぐらい、取り扱われる情報量が多く、情報通信技術の発展は必要不可欠である。情報通信技術には、電気・無線通信が主に用いられてきたが、電磁波干渉(EMI: Electro-magnetic Interference)や、隣接チャンネル間のクロストーク、電力消費が大きいといった問題点により、伝送速度に限界が生じている。さらに、伝送チャンネルの多チャンネル化に伴う実装の高密度化においても制約がある。20世紀後半からこれらの問題点を克服するための方法として光通信技術が発展し、現在は数 cm から数十 cm までの短いポート間、あるいはチップ間をインタコネクする研究が行われ、光 PCB (Printed Circuit Board) の開発につながっている<sup>1)</sup>。

光 PCB は、光を用いてデータ転送する光配線層と、従来の電気配線層を組み合わせたものである。光 PCB の光配線には様々な光信号伝達媒体が用いられており、その媒体の1つに光硬化性樹脂を用いた光導波路がある。光硬化性樹脂に光を照射して連続的に硬化させながら作製する光導波路を自己形成導波路 (SWW : Self-Written Waveguide) と呼ぶ。SWW を用いることで光損失を少なくし、より簡易な作製方法での光インタコネクションが可能になる。しかしながら、安価かつ簡易に高いアライメントを実現するためには、アプリケーションに合わせた SWW 形状制御が必要である。例えば、コア径の異なる2本の光ファイバ間を SWW で接続する場合は、テーパ型の SWW が必要となる。

我々は SWW の形状を設計通りに制御するために、SWW 形状制御に関わる幾つかのパラメータを設定し、SWW 作製実験とシミュレーションからそれらの相関を求めた。最終的には理論体系を確立し、SWW の作製形状をシミュレートするソフトウェアの開発を目指している。

本稿では、その前段階として、光線追跡法を用いた SWW 形状制御解析と、照射光の拡がり角等をパラメータとして、実際に SWW を作製した結果について報告する。

### 2. SWW 形状制御解析

Fig.1 に光線追跡法に基づく解析ソフトを用いた SWW の作製形状解析の解析モデルイメージを示す。光硬化性樹脂が充填された全長 2mm のプラスチック容器の中へ、拡がり角 $\theta$ で HPCF (Hard Polymer Clad Fiber, コア/クラッド径:200/230 $\mu$ m)中に伝搬した光を照射し SWW を作製する。解析を行う際に設定できるパラメータにはいくつかあるが、今回の解析では、照射光のモード分布の違いが SWW 形状にどのように影響するのかを確認するために、

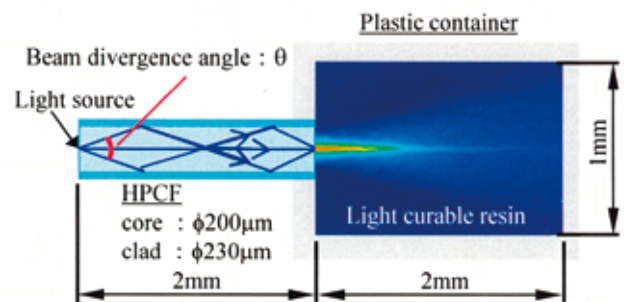


Fig.1 Simulation model

\*1 工学研究科情報通信制御システム工学専攻  
\*2 総合理工学研究科総合理工学専攻  
\*3 光・画像工学科教授  
\*4 株式会社豊田中央研究所

照射光の拡がり角 $\theta$ だけを変化させた。

Fig.2 に具体的な解析のフローチャートを示す。手順は①から④まであり、以下に要約する。

- ① 導波路や光硬化性樹脂をモデリングし、それらの屈折率、光源の光線数など解析パラメータを設定する。
- ② 光線追跡法による導波解析を実行し、光硬化性樹脂中を導波する導波光の強度分布を求める。
- ③ 樹脂が硬化するためには一定の光強度が必要と考えられることから、あらかじめ樹脂が硬化する強度の閾値を決定しておき、②で求めた導波光の強度分布から樹脂の硬化部分を求め、3D CAD を用いて効果モデルを作成する。(本解析では最大照射強度に対し、90%を閾値とした)
- ④ 硬化モデルを①の解析モデルの HPCF 先端に組込み、硬化することによって屈折率が変化した部分について屈折率を設定しなおした新たな解析モデルを作成する。②～④を繰り返すことにより、SWW が成長する様子のシミュレーションが可能となる。

手順①～④までを1段階とし、以降、手順②～④を9回繰り返し、10段階まで行った。

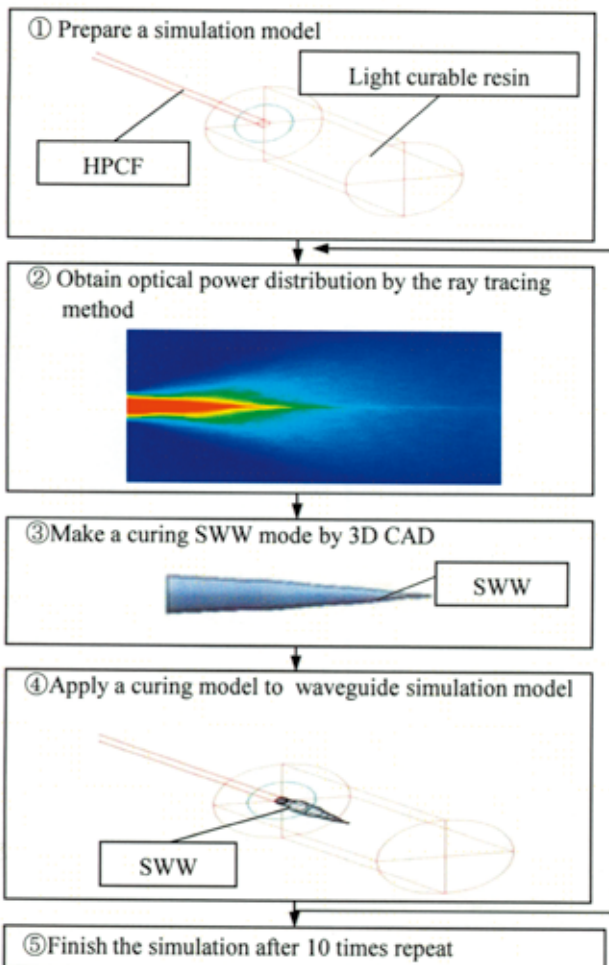


Fig.2 Procedure of the analysis

Table 1 Simulation condition

Parameter	Value	
Number of rays	10,000	
Curing threshold	More than 90% of max. irradiation power	
Refractive index of light curable resin	Before curing	1.54
	After curing	1.57
Beam divergence angle : $\theta$	10°, 30°, 50°	

解析条件を Table 1 にまとめる。照射光の強度を一定にし、3種類の拡がり角の条件で各10段階まで解析を行い、SWW が伸長して行く様子を求めた。各段階で得られたSWWの硬化モデルをFig.3に示す。同図において、時間の概念はないが同一段階での解析結果は同じ経過時間での結果と捉えることができる。

各段階での比較より、SWWの形状および伸長速度がHPCFへの入射光の拡がり角に依存することがわかる。拡がり角が大きいほどHPCF先端から太い形状を示し、硬化した自己形成光導波路の最大直径もより大きい。一方、拡がり角が小さいほど、早い段階で2mmのプラス

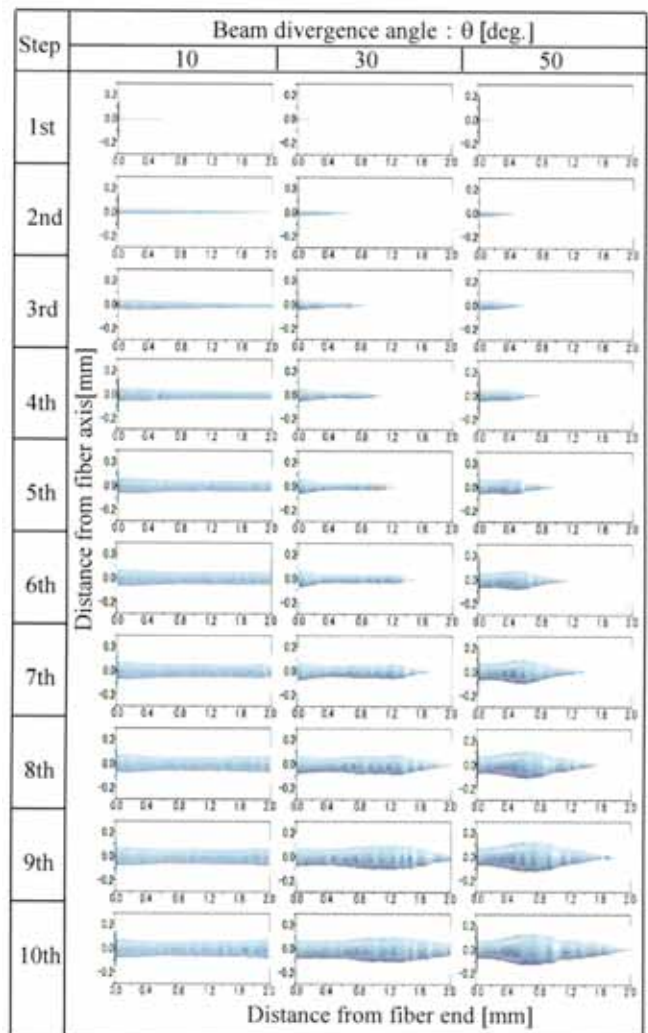


Fig.3 SWW shape dependence on the beam divergence angle

チック容器の最終端まで SWW が伸び、さらに SWW の伸長する速度が大きい。これらは照射光の拡がり角の変化によって、照射光モードの強度分布が変わったためであると説明される。つまり、同じ照射強度であっても、モードの変化により、より大きな拡がり角の条件では、高次モードの影響がより大きく、低次モードの影響はより小さくなるためである。

以上の解析結果から、照射光の高次モードの割合とその強度分布を調整することにより、SWW の形状を変化させることが可能であると推測できる。

### 3. SWW のテーパ形状制御実験

SWW の形状は、その用途によって、直線形状、テーパ形状、逆テーパ形状と大きく三つに分けられる。テーパ形状は、導波路から面発光レーザ(VCSEL: Vertical Cavity Surface Emitting Laser)などの送信装置側への結合をする際に、高いトランス幅を得るのに有利な形である<sup>2)</sup>。本稿では、照射光の拡がり角と SWW 形成時間をパラメータとし、実際に SWW 作製実験を行い、SWW 形状制御の実現可能性を検討した。

Fig.4 に SWW 形成の実験系を示す。レーザ光( $\lambda=456\text{nm}$ )のスポット径をいったんビームエキスパンダで広げた後、対物レンズを使用しモードスクランブラへと伝搬させる。さらに光硬化性樹脂が充填されたプラスチック容器(全長15mm)へと伝搬させた光により形成された SWW 形状をマイクروسコープを用いて観察した。

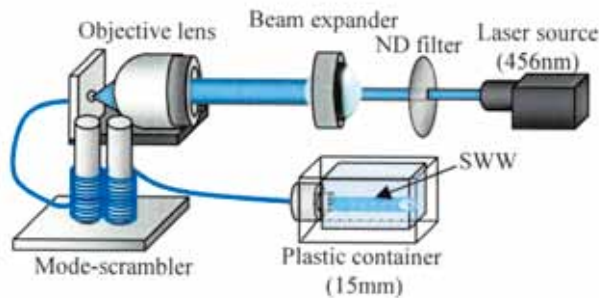


Fig.4 Experiment setup

Fig.4 に示すモードスクランブラは、光ファイバを小さい曲率半径で巻いたものである。本実験では、SWW の形状に最も影響を与える照射光すなわちファイバから射出する光の遠視野パターン(FFP: Far Field Pattern)を安定させ、実験の再現性を得るために用いた<sup>3)</sup>。異なる開口数(NA: Numerical Aperture)を持つコア径 200 $\mu\text{m}$  の HPCF を 3 種類準備し、それぞれ異なった FFP 半値全幅(FWHM: Full Width Half Maximum) 7°, 28°, 36° のモードスクランブラを製作した。作製したモードスクランブラの FFP 測定結果を Fig.5 に示す。SWW 形状制御実験では、この FFP 半値全幅を照射光の拡がり角 $\theta$ とする。また、Table 2 に実験パラメータをまとめる。SWW 形成時間とは、SWW

が 15mm のプラスチック容器の最終端まで完全に伸長するのに要する時間であり、形成時間の変化は照射光の強度の変化も意味する。例えば、照射光の拡がり角が同じ場合であれば、形成時間が短い場合に照射強度は強く、逆に形成時間が長ければ照射強度が弱いことを意味する。

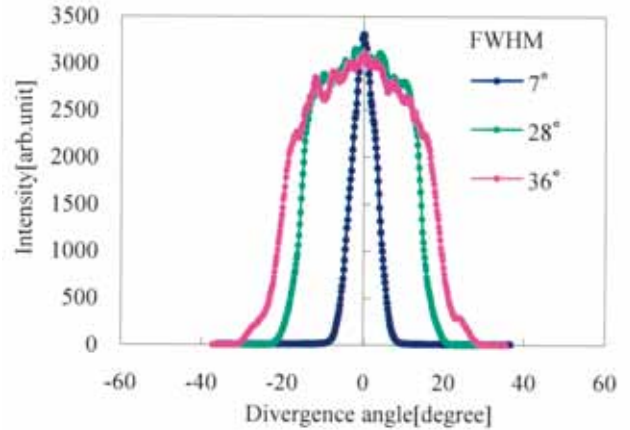


Fig.5 Observed FFP with several mode-scramblers

Table 2 Experiment parameters

Parameter	Value
Divergence angle $\theta$	7°, 28°, 36°
Fabrication time	6~20s

Fig.6 に SWW 形成時間を 6 秒に固定し、照射光の拡がり角を変化させた場合の SWW 作製結果を示す。拡がり角が小さい 7° の場合では、ほぼ直線型の SWW となり、拡がり角が 28° の場合ではテーパ型、さらに拡がり角の大きい 36° の場合では、28° の場合以上にテーパ角度の大きい SWW が作製された。

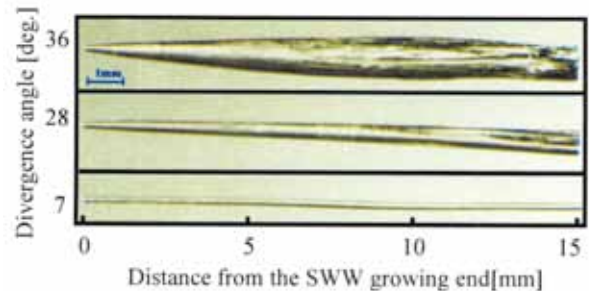
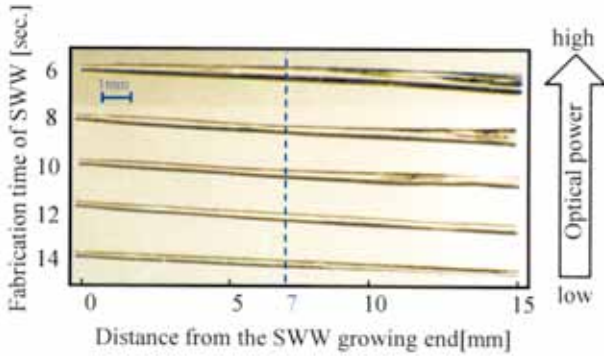


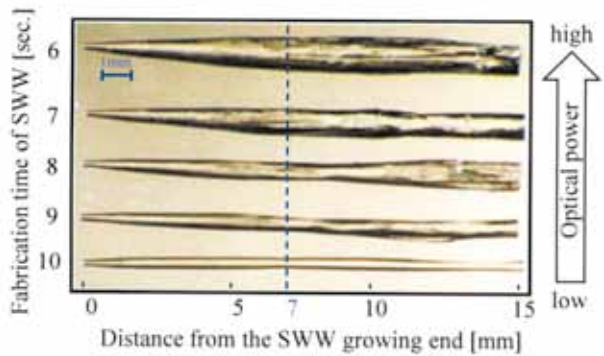
Fig.6 SWWs fabricated with divergence angle of 7, 28 and 36 deg. (Fabrication time: 6s)

つぎに SWW がテーパ形状となった照射光の拡がり角 28°, 36° の場合に対し、SWW の形成時間を変化させた場合の SWW 形状検討を行った。

Fig.7(a)に照射光の拡がり角 28°, Fig.7(b)に拡がり角 36° の場合における SWW 作製結果を示す。SWW 形成時間が短い、すなわち照射強度が大きい程、テーパ角度の大きい SWW が形成できることがわかる。



(a) Divergence angle 28 deg.



(b) Divergence angle 36 deg.

Fig7. Pictures of fabricated SWW

より具体的に SWW の形状評価を行うため、作製した SWW の直径をモードスクランブラの照射部から 7mm まで 1mm 間隔で計測を行った(Fig.8 を参照).

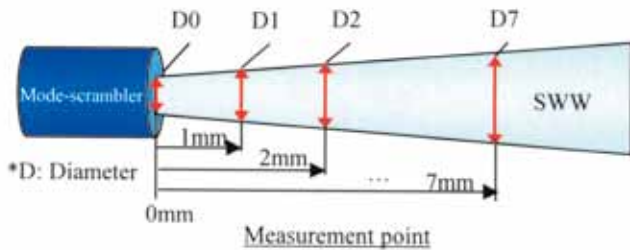
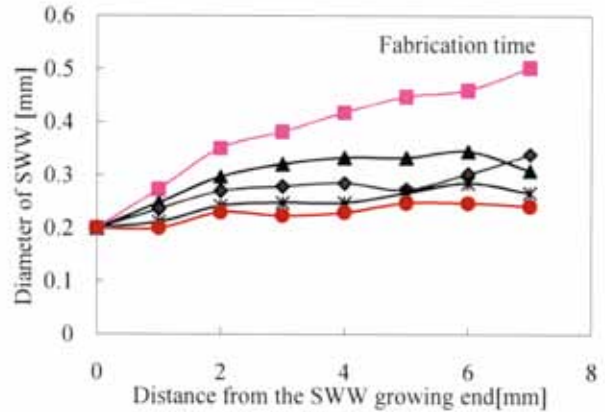


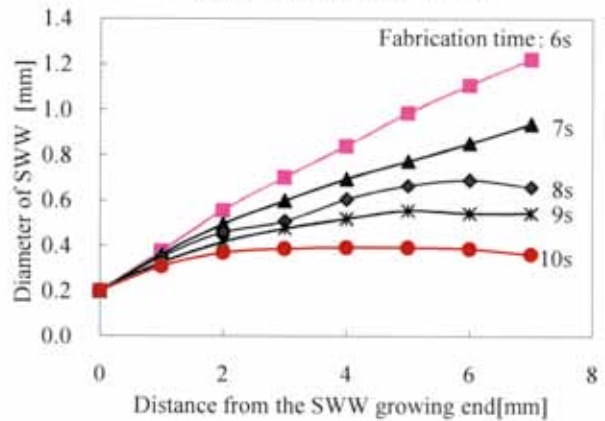
Fig.8 Evaluation method of SWW shape

Fig.9(a)に広がり角 28°, Fig.9(b)に広がり角 36° で作製した SWW 直径の測定結果を示す. 同じ広がり角の場合でも、形成時間が短い場合、すなわち照射光が強い場合はより大きなテーパ角度を持つ SWW が形成され、広がり角 28° において最も照射強度が大きい、すなわち最も形成時間が短い 6 秒の場合で約 1.3° のテーパ角を持つ SWW が形成された。また、広がり角 36° で形成時間 6 秒の場合、作製した SWW のテーパ角はより大きく約 4° であった。同じ形成時間でも照射光の広がり角が大きい場合に、より大きなテーパ角を持った SWW の作製ができるといえる。

最後に、パラメータと SWW 形状の相関をまとめるために、広がり角 36° と 28° の結果から同条件の SWW を選び比較した。Fig.10 中の①, ②は広がり角が 36° の場合で、③, ④は広がり角が 28° の場合である。①~④の照射強度および形成時間については Table 3 に示す。Fig.10 からわかることは以下の通りである。



(a) Divergence angle 28 deg.



(b) Divergence angle 36 deg.

Fig9. Evaluation of SWW shape

- ・照射強度が等しい場合、広がり角が大きいほど直径が太く、大きなテーパ角を持つ SWW が形成される。
- ・広がり角が等しい場合、照射光の強度が強いほどテーパ角が大きく、より長いところまでテーパ形状を保った SWW が形成できる。

すなわち、照射光の広がり角および強度を調整することによって、SWW のテーパ角を制御可能であることを示唆している。

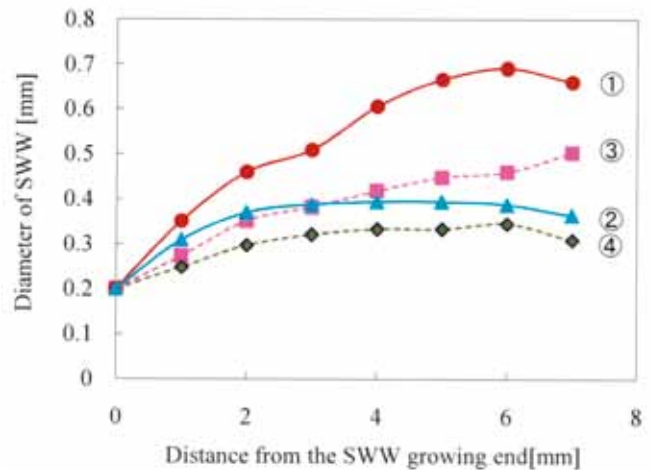






Fig. 10 Comparison of SWW shape between different divergence angles

Table 3 Fabrication condition of SWWs

SWW	Divergence angle	Irradiation power	Fabrication time
 ①	36°	4mW	8s
 ②		2mW	10s
 ③	28°	4mW	6s
 ④		2mW	8s

#### 4. まとめ

光線追跡法を用いて、光源の拡がり角の変化による SWW の形状制御の解析を行った。その結果、照射光のモードと形成される SWW の形状の相関が確認でき、高次モードは SWW の形状に、低次モードは SWW の伸長速度に大きく影響を及ぼすことがわかった。

一方、照射光の拡がり角とその強度変化による形成時間を実験パラメータとして、実際に SWW テーパを作製した。形成時間を変化させて SWW 作製形状評価をした結果、拡がり角が大きい場合、テーパ形状の SWW が作製される傾向にあり、照射強度の調整によってテーパ角度を制御できることを確認した。以上のことは前述した

シミュレーションで光源の拡がり角を変化させて SWW の形状制御を行った結果と同様であり、今後十分な検証が必要ではあるものの、ある程度理論と実験の結果における整合性は得られたものと考えられる。

以上のことより、SWW の形状制御が可能であることを確認し、SWW を用いた光インタコネクションにおいて高いトレランスを持った光結合実現の可能性を確かめた。今後、SWW 形状制御技術の実現のために、さらにシミュレーションと実験を通して様々なパラメータと SWW 形状の相関をより詳しく研究および検証し、理論体系を立てて行く予定である。

#### 参考文献

- 1)パクヒョフン, ジョムヒ, イテウ:KPCA Handbook「光 PCB 技術入門(1)」, 2007.
- 2) 三村祐介, 小澤秀明, 関谷悠哲, 三上修, 塩田剛史: “テーパ型自己形成光導波路を用いた光接続法”, エレクトロニクス実装学会, 16C-10, 2005.
- 3)各務学, 山下達弥, 河崎朱里: “自己形成光導波路を用いた3次元光回路”, R&D Review of Toyota CRDL, Vol.37, No.1, p.44, 2001.