

光電気混載基板における 90 度光路変換の最適構造

神田昌宏*1, 三上修*2

Optimum Structures of 90-degree Optical Path Change for Opto-Electronic Printed Wiring Boards

by
Masahiro KANDA*1, Osamu MIKAMI*2

(received on Mar. 31, 2008 and accepted on Jun. 5, 2008)

Abstract

We analyzed optimum structures of 90-degree optical path change for opto-electronic printed wiring boards (OE-PWBs) by using a ray tracing method. We obtained following results to get high coupling efficiencies. A combination of an optical connection rod and an optical waveguide with a 42-degree mirror can give the highest efficiency in a case of transmission. On the other hand, a combination of an optical funnel and an optical waveguide with a 50-degree mirror is effective for the reception. It is also a key for achievement of the high coupling efficiency to choose a light emitting device with a smaller divergence angle.

Keywords: Optical waveguide, Optical pin, Optical funnel, Optical path, OE-PWB

1. はじめに

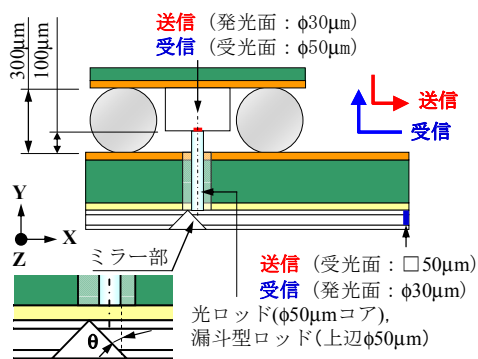
「いつでも、どこでも、何でも、誰でも」がコンピューターネットワークにつながり、様々なサービスが提供され、人々の生活をより豊かにするユビキタス社会実現に向けたネットワークの大型化や車載 LAN システムの多様化に伴い、IT機器やその周辺機器における信号処理の大容量化および伝送速度の高速化が進んでいる。しかしながら既存の電気配線によるボード間やチップ間におけるインタコネクションでは、信号の劣化、遅延、輻射などの問題のほかに、軽量化や省スペース化対策への課題が顕著になってきている。これら課題を解決するため、ボード間やチップ間に光インタコネクションを導入する検討が行なわれている。これらのアプリケーションを実現するためには、高効率で安価な光接続方法の開発が求められており、その1つに電気配線層と光配線層を貼り合わせた光電気混載基板が提案されている。

我々は今までに光電気混載基板の 90 度光路変換構造として、光硬化性樹脂を用い VCSEL 等の発光素子の発光部へ任意の断面形状をした柱状の自己形成光接続ロッド[1-2]や光接続ロッドの端面に 45° ミラーをもつ自己形成光ピン[3]を形成したデバイスを用いた接続法を提案してきた。更に受光側に注目し、光導波路からの光を漏らすことなく PD などの受光素子へ伝搬させるため漏斗型をした漏斗型ロッドを形成したデバイスの提案も行ってきた[4]。

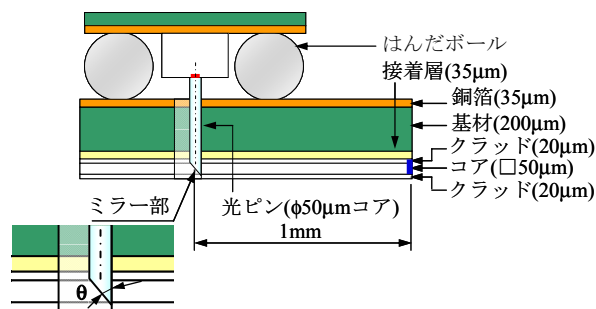
本稿では、これら光素子と光導波路間の 90 度光路変換について光線追跡法を用いた解析を行ない、その結果について報告する。

2. 光線追跡法による解析

光電気混載基板において 90 度光路変換を行う場合、一般的に 45 度ミラーが用いられる。しかしながら、発光素子から照射された光線はある拡がり角を有しており、そのため金属蒸着がなされていないミラー部では全ての光線が 90 度光路変換できず、一部の光線においてはミラーを透過してしまう。



(a) 光接続ロッド/漏斗型ロッドを用いた場合



(b) 光ピンを用いた場合

Fig. 1 解析モデル

*1 総合理工学研究科総合理工学専攻 (博士課程)

*2 工学部光・画像工学科 教授

そこで本稿では、光電気混載基板における 90 度光路変換の最適構造を OptiCAD Corporation の解析ソフトである OptiCAD を用いて検討した。なお、OptiCAD の解析手法は光線追跡法である。Fig. 1 に今回行った解析のモデルを示す。Fig. 1(a)は光接続ロッドもしくは漏斗型ロッドを用いた場合の基板構成、Fig. 1(b)は光ピンを用いた場合の基板構成である。解析における光路については、発光素子から光導波路へ光が伝搬すると想定した場合を送信、光導波路から受光素子へ光が伝搬することを想定した場合を受信とした。また、Fig. 2 に本解析で用いた漏斗型ロッドを示す。なお、本解析では漏斗型ロッドのテーパ角を 4° としたが、これはテーパ角を 1~10° まで振って検討し得られた最良の値である。あわせて光接続ロッド/光ピンを用いない場合（空隙）においても検討を行なった。光源としては出射径 $\phi 30\mu\text{m}$ 、強度分布にガウシアン分布をもち、拡がり角は商用 VCSEL の仕様をもとに 14 度、22 度、30 度とした (Fig. 3)。その他解析条件として屈折率を Table 1 に示す。なお、本稿では純粋に 90 度光路変換構造の違いによる比較を行うため、光導波路の屈折率は光源の拡がり角が 30 度の場合でも漏れない、すなわち臨界角内におさまるよう設定した。

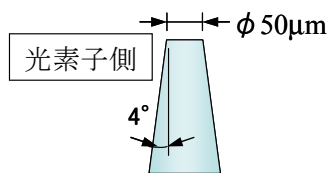


Fig. 2 漏斗型ロッド

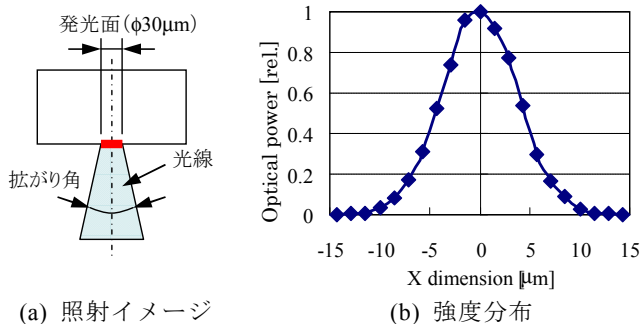


Fig. 3 解析上の光源

Table 1 屈折率

部品名		屈折率
光接続ロッド, 漏斗型ロッド, 光ピン		1.552
光導波路	コア	1.552
	クラッド	1.5

まず、Fig. 4 に送信時の解析結果を示す。Fig. 4(a)は空隙、Fig. 4(b)は光接続ロッド、Fig. 4(c)は漏斗型ロッド、Fig. 4(d)は光ピンを用いた場合である。また、全てのグラフにおいて横軸がミラー角、縦軸が取り出し効率（結合効率）である。空隙の場合の取り出し効率は、他の 3

つと比べ極端に悪い値となった。これは、発光素子と光導波路間に光を閉じ込めるものがなく、発光素子から照射した光は拡散し、多くの光が光導波路のミラー部に集光されないためである。光接続ロッド、漏斗型ロッドおよび光ピンでの比較では光接続ロッドを用いた場合で、送信時での取り出し効率が一番良い結果となった。その際のミラー角 θ については 45° より小さい角度である 42° で取り出し効率がピークになることを確認した。また、光源の拡がり角についての比較では、漏斗型を用いた場合以外では 14° のものが取り出し効率が良く、多くの場合において拡がり角の小さい光源を選ぶことで効率の改善ははかれることも確認した。なお、ここでの損失の内訳は、ミラー部での透過光および光導波路での漏れ光である。また、本解析条件において漏斗型を用いた場合、拡がり角が小さいものの方が漏斗型ロッドの側面での反射が少なく、光源から照射された光線のうち、ミ

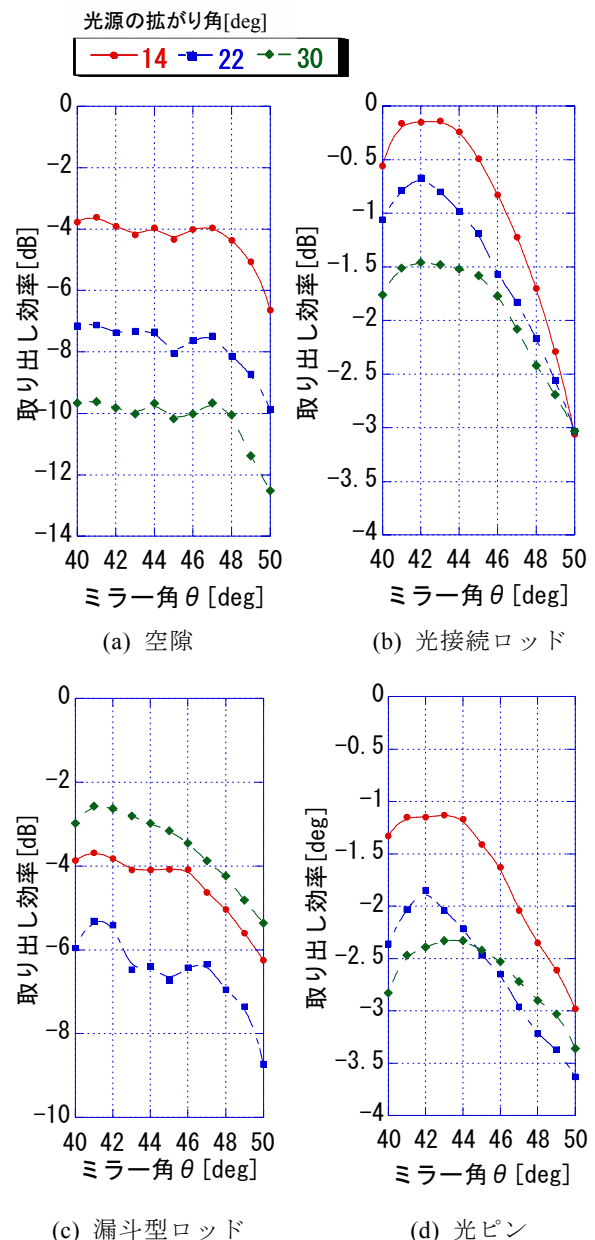


Fig. 4 取り出し効率解析結果（送信時）

ラー部に集光する光線が少なかったため、損失が大きくなった。

次に、Fig. 5 に受信時の解析結果を示す。Fig. 5(a)は空隙、Fig. 5(b)は光接続ロッド、Fig. 5(c)は漏斗型ロッド、Fig. 5(d)は光ピンを用いた場合である。送信時同様、空隙の場合の取り出し効率は、他の3つと比べ極端に悪い値となった。光接続ロッド、漏斗型ロッドおよび光ピンでの比較では漏斗型ロッドを用いた場合で、受信時での取り出し効率が一番良い結果となった。その際のミラー角については 45° より大きい角度である 50° で取り出し効率がピークになることを確認した。とりわけ拡がり角が 14° のものでは 0dB と損失が全く無かった。

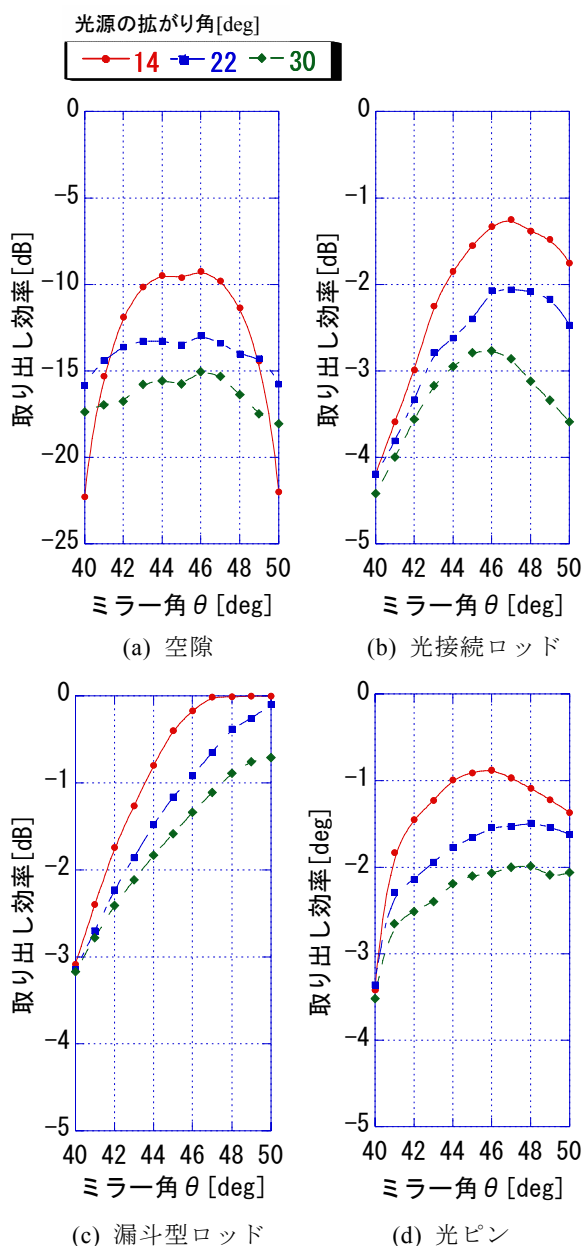
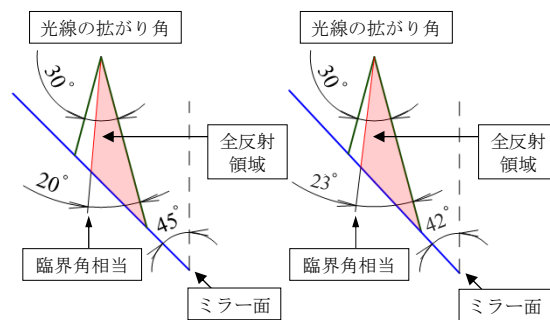


Fig. 5 取り出し効率解析結果 (受信時)

今回の解析では送信時、受信時ともにミラー角が 90° の半値である 45° 以外でピークとなった。ここで、送信時の場合を例に考察する。Fig. 6 はミラー部にあたる光

線をモデル化したものである。Fig. 6(a)はミラー角が 45° の場合、Fig. 6(b)はミラー角が 42° の場合である。

ここではミラー部の外側は空気であり、光導波路 (コア) の屈折率が 1.552 であることから、入射面であるミラー面に対する臨界角は約 40° となる。上方から照射された光線の拡がり角が 30° とした場合、全反射する光線はミラー角 45° の場合で拡がり角を有する光線の 20° 部分に対し、ミラー角が 42° の場合は 23° 部分で全反射し光導波路へと伝搬される。結果、ミラー角が 45° の場合よりミラー角が 42° の場合の方が取り出し効率が良い結果となった。すなわち、送信/受信とも光線の進行方向に対し、ミラー角を 45° より小さく設定することで、取り出し効率を良くする事が出来ることを確認した。ただし、Fig. 4 および Fig. 5 を見てわかるように、ミラー角が小さくしすぎても 90° 光路変換後に外部に漏れてしまう光が発生し、逆に取り出し効率を悪化させてしまう場合もあるので注意が必要である。

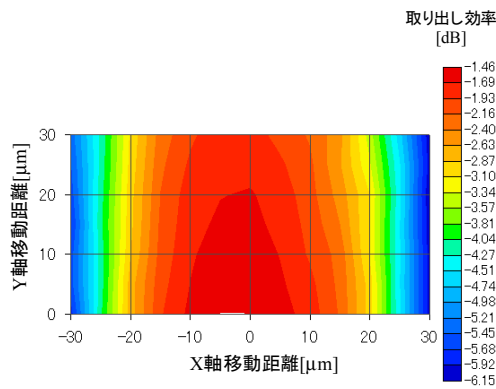


(a) ミラー角 45° (b) ミラー角 42°
Fig. 5 ミラー部にあたる光線モデル

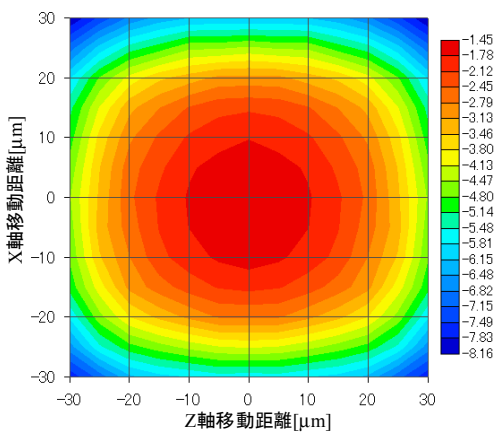
3. トレランス解析

送信/受信での取り出し効率の良かったもの、すなわち送信側では光接続ロッドとミラー角が 42° の光導波路を用いた場合、受信側では漏斗型ロッドとミラー角が 50° の光導波路を用いた場合におけるトレランス検討をした。なお、解析条件としては光導波路を固定し、光接続ロッド・漏斗型ロッドもしくは光ピンと光源を一体として最大で $\pm 30\mu\text{m}$ 移動させた。その際の光線の拡がり角をここでは 30 度とした。

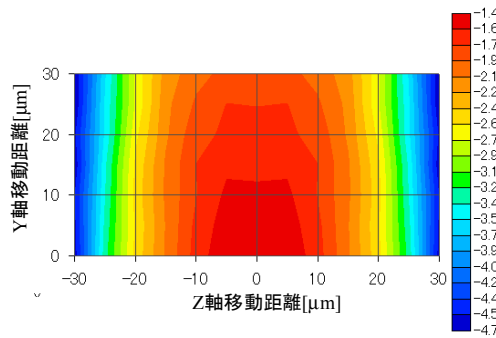
Fig. 7 に送信時のトレランス解析結果を示す。Fig. 7(a) は XY 平面の結果である。取り出し効率を示すカラーバーを見てみると、最大値は -1.46dB 、最小値は -6.15dB とした。 1dB ダウントレランスについては、X 軸上では $-18\mu\text{m} \sim 17\mu\text{m}$ 、Y 軸上では 30mm 以上の 1dB ダウントレランス幅を有していることがわかった。Fig. 7(b) は XZ 平面の結果である。カラーバーについては、最大値は -1.45dB 、最小値は -8.16dB であり、XY 平面と比べ広いレンジとなった。 1dB ダウントレランスでは、おおよそ半径 $18\mu\text{m}$ の円形となった。Fig. 7(c) は YZ 平面の結果である。カラーバーについては、最大値は -1.46dB 、最小値は -4.73dB である。



(a) XY 平面



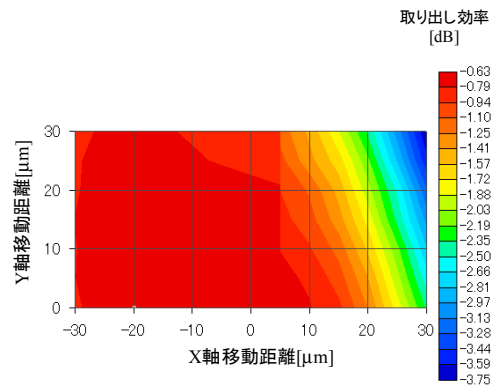
(b) XZ 平面



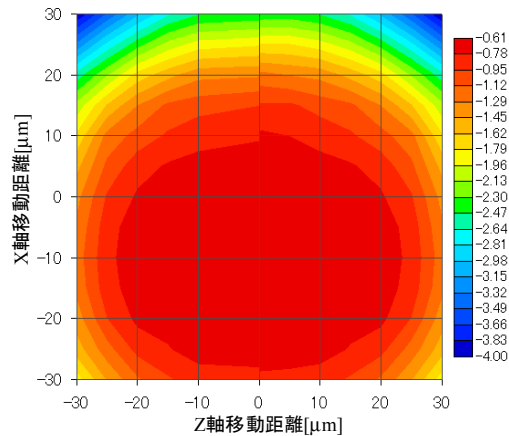
(c) YZ 平面

Fig. 7 送信時（ミラー角 42 度）のトレランス解析結果

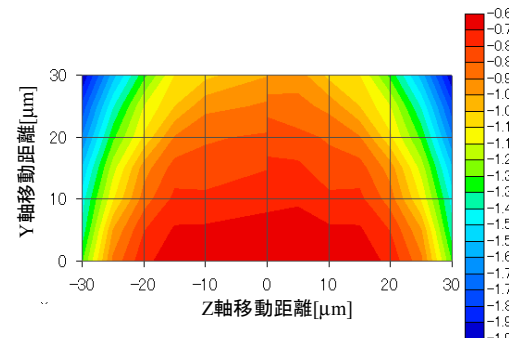
Fig. 8 に受信時のトレランス解析結果を示す。Fig. 8(a) は XY 平面の結果である。カラーバーについては、最大値は-0.63dB、最小値は-3.75dB とした。1dB ダウントレランスに関しては、X 軸上ではプラス側で 23 μm 、マイナス側では 30 μm 以上の 1dB ダウントレランス幅を有していることが分かった。Y 軸上においても 30 μm 以上の 1dB ダウントレランス幅を有している。Fig. 8(b)は XZ 平面の結果である。カラーバーについては、最大値は-0.61dB、最小値は 4.0dB である。Z 軸上の-1dB ダウントレランスについては、 $\pm 30\mu\text{m}$ 以上のトレランス幅を有していることが分かる。なお、Z 軸で最大のトレランス幅



(a) XY 平面



(b) XZ 平面



(c) YZ 平面

Fig.8 受信時（ミラー角 50 度）のトレランス解析結果

を有しているのは、X 軸上の-10 μm とやや光軸をマイナス側にずらした場合であった。Fig. 8(c)は YZ 平面の結果である。カラーバーについては、最大値は-0.67dB、最小値は-1.98dB と他の平面と比べ狭いレンジとなっている。全体的にみても受信側の場合は送信時と比べ、広い 1dB ダウントレランスを有していることを確認した。

5. 光路構造以外の損失

本稿における解析では、光路変換構造に焦点をあてミラー部での取り出し効率およびトレランス検討を行なった。しかしながら、光接続ロッドの使用を想定した光電

気混載基板において、実際には(1)発光素子の発光面と光接続ロッド(ロッドA)の屈折率差による反射損, (2)ロッドAのNAによる漏れ損失, (3)ロッドAの材料固有の伝送損失, (4)送信側ミラー部での光路変換損失, (5)ロッドAと光導波路の屈折率差による反射損, (6)光導波路のNAによる漏れ損失, (7)光導波路の材料固有の伝送損失, (8)受信側ミラー部での光変換損失, (9)光導波路と受光素子上に作製した光接続ロッド(ロッドB)の屈折率差による反射損, (10)ロッドBのNAによる漏れ損失, (11)ロッドBの材料固有の伝送損失, (12)受光素子の受光面とロッドBによる反射損が考えられる。なお、アライメントにより光接続ロッド, 光導波路間に空気層が生じた場合, 損失は更に大きくなる。屈折率差による境界面での透過率 T ・反射率 R は以下の式で求める事ができる。

$$\text{透過率 } T = \frac{4n_0n_1}{(n_0 + n_1)^2} \quad (1)$$

$$\text{反射率 } R = \left(\frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \right)^2 \quad (2)$$

* n_0, n_1 は各媒質の屈折率

材料の選定により, NA による損失は抑える事が可能であるが, トレランスにより光接続ロッドと光導波路間に空気層が生じてしまうことを回避することは非常に難しい。そのため反射の影響はどうしても受ける。マッチングオイルを用いることで影響を最小限に抑える事が可能ではあるが, マッチングオイルを使用しない場合, 受発光素子間で光路変換構造による損失の他に, 今回のケースでは Table 2 に示す影響が考えられる。結果, 透過率だけでもトータル 0.94dB の損失があり, 実際の材料選定等において, 考慮する必要がある。

Table 2 各種損失要因

透過率	発光素子*1-ロッドA	-0.08dB
	ロッドA-空気層	-0.21dB
	空気層-クラッド(光導波路)	-0.18dB
	クラッド(光導波路)-コア(光導波路)	0dB
	コア(光導波路)-クラッド(光導波路)	0dB
	クラッド(光導波路)-空気層	-0.18dB
	空気層-ロッドB	-0.21dB
	ロッドB-受光素子*1	-0.08dB
材料損失 (参考: PMMA 値)		0.16dB/m

*1: 反射防止膜(SiN)で処理されているものと想定

6. まとめ

90 度光路変換における最適形状について解析を行った。その結果最大取り出し効率は, 送信時はミラー角が 42° の光導波路と光接続ロッドを, 受信時はミラー角が 50° の光導波路と漏斗型ロッドを用いた場合であり, ともに光線の進行方向に対し, ミラー角を 45° より小さくすることで取り出し効率を良くする事ができる。さらには拡がり角の小さい発光素子を選択することも挙げられる。

また, 1dB ダウントレランス幅については, 送信側の X 軸上で $-18\mu\text{m} \sim 17\mu\text{m}$, Y 軸上で $30\mu\text{m}$ 以上, Z 軸上で $\pm 18\mu\text{m}$ となり, 受信側の X 軸上ではプラス側で $23\mu\text{m}$, マイナス側で $30\mu\text{m}$ 以上であった。また, Y 軸上で $30\mu\text{m}$ 以上, Z 軸上で $\pm 30\mu\text{m}$ 以上あった。この結果, 送信/受信とも十分なトレランス幅を有している事が分かった。とりわけ, 漏斗型を用いた受信側においては格段に良い結果を得ることが出来た。なお, 総合的な結合効率を検証する場合は, 反射損や材料固有の伝送損失を考慮する必要がある。

参考文献

- [1] Y. Obata, M. Kanda, and O. Mikami, "Self-Written Waveguide on VCSEL's Emitting Window using Photo-mask Transfer Method", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 18, Issue 12, pp. 1308-1310, June 15, 2006.
- [2] 神田昌宏, 久保宏行, 小幡雄介, 尾山雄介, 三上修, "マスク転写法によるVCSEL上への自己形成光接続ロッドとその光学的特性", 電子情報通信学会論文誌 C Vol. J90-C No.11 pp.785-792, Nov. 2007
- [3] H. Hanajima; Y. Obata; H. Ozawa; M. Kanda; O. Mikami; "Self-Written Waveguide Optical Pin Fabricated Using Photomask Transfer Method", IEEE Photonics Technology Letters, Volume 18, Issue 19, pp. 2020-2022, Oct.1, 2006.
- [4] H. Kubo, M. Kanda, O. Mikami, "Self-Written Optical Funnel for Optical Interconnect by Microlens-transfer Method", OECC/IOOC 2007, 10E2-4, 2007.7, pp.92-93