

再構成可能な多層光配線ボード間光インターコネクション用 透過型マイクロパッシブ波長選択器の設計と評価

仲間 健一*¹ 常盤 諭生*² 三上 修*³

Design and Evaluation of A Transparent Micro Passive Wavelength Selector for Reconfigurable Optical Multi-Layers Wiring Board to Board Interconnection

by

Kenichi NAKAMA*¹, Yu TOKIWA*² and Osamu MIKAMI*³

(Received on Sep. 29, 2010 and accepted on Jan. 22, 2011)

Abstract

Board to board optical interconnection between optical waveguide multi-layers is suitable for assembling high-speed optoelectronic printed wiring boards (OE-PWB). In this paper, we propose a novel optical interconnection method of a reconfigurable wavelength addressed optical waveguide multi-layers wiring. For the purpose, we also propose a transparent micro passive wavelength selector (T-MPWS) using a transparent diffraction grating. We designed the T-MPWS module of a bilateral telecentric system which was operated by using the wavelength of $\lambda=470\text{nm}$, 520nm , and 570nm as triple-layers. And we simulated the coupling efficiency and alignment tolerance of an incident optical waveguide plug (OWP) and an exit OWP. We found that the wavelength addressing operation of the T-MPWS was effective for the optical waveguide multi-layers wiring of the optical interconnection between the OE-PWBs.

Keywords: optical interconnection, wavelength addressing, diffraction grating, passive wavelength selector

1. まえがき

光インターコネクションは、高速の伝送速度、隣接チャンネル間のクロストークの少なさ、不要輻射の少なさ、低い消費電力などの優れた特徴から、大容量のローカルエリアネットワーク、大規模な光交換機、超並列コンピュータシステムなどへの展開が進みつつある。光表面実装技術(O-SMT)は、低コストで高密度の光実装が実現可能であると考えられており、このような応用に最適である¹⁾。

著者らは、これまでに 45° ミラーを有するガラスロッドであるマイクロ光ピンとプリント配線基板中に光導波路を埋め込んだ光電子プリント基板(OE-PWB)を用いて、OE-PWB上に実装配置した光電子表面実装デバイス(OE-SMD)間の光インターコネクションを行うO-SMTの研究を進めてきた²⁾。

一方、OE-PWBを多層光配線化して集積度を上げる試みがなされてきているが³⁾⁴⁾、多層化した光導波路レイヤ間の接続については未だ十分な検討がなされていない。

著者らは、任意のOE-SMD間を光接続できる再構成可能な光インターコネクションの実現のため、

OE-SMDの送信波長を複数化し、波長により接続する光導波路を選択する波長アドレス方式を提案した⁵⁾。またOE-PWB内の光インターコネクションに適用するためのマイクロパッシブ波長選択器(MPWS)モジュール、および、OE-PWBとMPWSの実装に光導波路プラグ(OWP)とマイクロホールアレー(MHA)を用いたプラグイン方式によるパッシブ調心を提案し実験的な検討を行ってきた⁵⁾。

本論文では、新たに光アドレス方式を適用したボード間の光インターコネクションを提案し、これを実現するキーデバイスである透過型マイクロパッシブ波長選択器(T-MPWS)モジュールを設計検討し、動作特性をシミュレーションにより検証したので、報告する。

2. ボード間の波長アドレス方式光インターコネクションの構成

波長アドレス方式のボード間光インターコネクションの概略図をFig. 1に示す。

複数の光導波路は、OE-PWBの内部に埋め込まれて多層の光導波路レイヤを構成し、銅の配線パターンは、OE-PWBの両側表面に形成される。

OE-SMDには、所定の発光波長を有する光源および受光素子(PD)がLSIなどの電子デバイスとともに実装

*1 総合理工学研究科総合理工学専攻博士課程

*2 工学研究科光工学専攻修士課程

*3 工学部光・画像工学科教授

され、OE-SMD のマイクロ光ピンと OE-PWB の光導波路レイヤに形成されたビアホールがパッシブ調心により接続される。

OE-PWB の光導波路レイヤ端面には、自己形成光導波路法 (SWW)⁶⁾ によって光硬化樹脂の OWP が形成され、テーパ状の穴形状を有する MHA に挿入固定することでパッシブ調心され、T-MPWS モジュールに接続される。

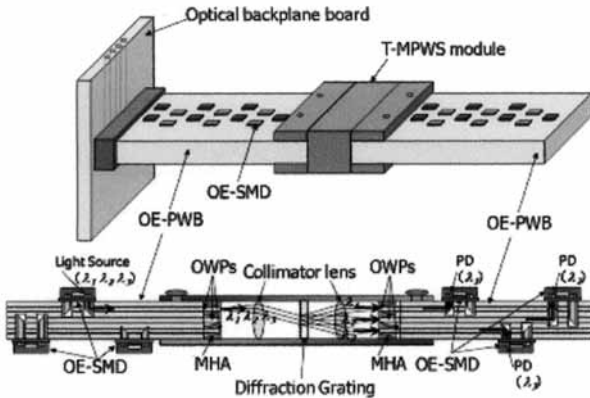


Fig. 1 Schematic figure of the OE-PWB and the T-MPWS module for board to board interconnection.

T-MPWS モジュールは、対向する 1 組のコリメータレンズ対の間に、透過型回折格子を配置して構成した。

T-MPWS モジュールの動作を以下に示す。

OE-SMD に、複数の異なる発光波長 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \dots$ を持つ複数の面発光レーザや LED のチップを光源として搭載し、電気的なスイッチングにより、インターコネクションを構成したい光導波路レイヤに応じた波長を選択する。選択した波長の光は、光ピンを介して予め決められた光導波路レイヤを導波し、入射側の OWP 端面より T-MPWS モジュールに入射する。第一のコリメータレンズで平行光に変換された光は、透過型回折格子を通過する際に波長毎に異なる回折角で回折され第二のコリメータレンズで収束されるため、波長毎に異なる位置に集光スポットが得られる。したがって、 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \dots$ の集光位置に、T-MPWS モジュールの射出側の OWP を配置すれば、各光導波路レイヤに $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \dots$ の波長アドレスを割り当てることができ、送信波長によって接続する光導波路レイヤを再構成が可能な OE-SMD 間の光インターコネクションが実現できる。

コリメータレンズの焦点距離を f とした場合、2 つのコリメータレンズと透過型回折格子との距離をそれぞれ f とし、OWP 端面とコリメータレンズとの距離もそれぞれ f とすることにより、両側テレセントリック光学系が構成できる。これにより、双方向に使用した場合でも OWP 端面に垂直に集光できる光接続効率の高い光学系が得られる。

3. T-MPWS モジュールの設計検討

本章では、T-MPWS モジュールの設計検討を行った。T-MPWS モジュールの光学系の配置を Fig. 2 に示す。

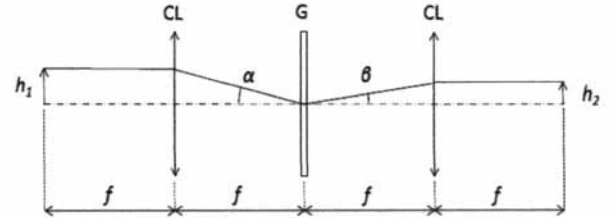


Fig. 2 Optical system of the T-MPWS module.

透過型回折格子 G の回折面の法線と入射光線とのなす角を入射角 α 、前記法線と回折光線とのなす角を回折角 β とすれば、 α, β は、以下のグレーティング方程式で関係づけられる。

$$m\lambda = d(\sin \alpha + \sin \beta) \quad (1)$$

ここで、 m : 回折次数、 λ : 光源の波長、 d : 格子定数である。

入射側の OWP の高さを h_1 、射出側の OWP の高さを h_2 とすると、

$$\tan \alpha = h_1/f \quad (2)$$

$$\tan \beta = h_2/f \quad (3)$$

(2)(3)式を(1)式に代入して整理すると、

$$h_1 \cos \alpha + h_2 \cos \beta = mf \lambda / d \quad (4)$$

$$h_2 = f \left[[1 - \{m\lambda/d - h_1(f^2 + h_1^2)^{-1/2}\}^2]^{-1} - 1 \right]^{1/2} \quad (5)$$

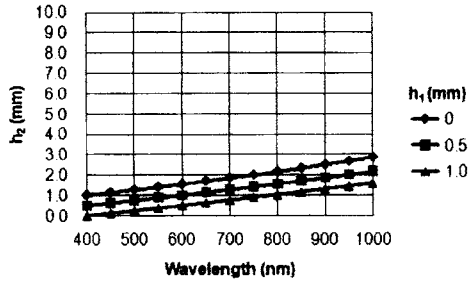
よって、回折格子の格子定数 d と回折次数 m 、コリメータレンズ CL の焦点距離 f 、入射側の OWP の高さ h_1 を定めれば、(5)式より、OE-SMD の発光波長 λ と射出側の OWP の高さ h_2 の関係を決定できる。

回折格子の格子定数 d を $1\mu\text{m}, 2\mu\text{m}$ 、回折次数 m を +1 次、コリメータレンズの焦点距離 f を $5\text{mm}, 10\text{mm}$ とした場合の h_2 の λ 依存性の計算結果を、Fig. 3 に示す。

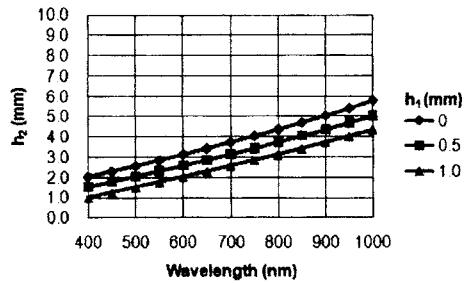
Fig. 3 より、回折格子の格子定数 d が波長 λ の 2 倍以上の場合 (Fig. 3(a), (b))、波長 λ に対する射出側 OWP の高さ h_2 はほぼ直線的に変化することが分かった。すなわち、波長によらず線分散が 0.0031mm/nm ($d=2\mu\text{m}, f=5\text{mm}$ の場合)、 0.0062mm/nm ($d=2\mu\text{m}, f=10\text{mm}$ の場合) とほぼ一定であることから、各光導波路レイヤに広い波長間隔の波長アドレスを割り当てる場合に好適であると考えられる。

一方、 d が λ の 2 倍未満の場合 (Fig. 3(c), (d))、 λ に対する h_2 の変化は、 λ が d に近づくにしたがって大きく

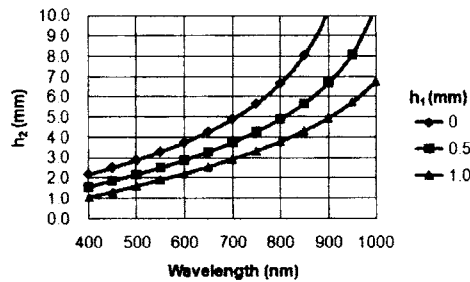
なることが分かった。例えば、 $d=1\mu\text{m}$, $f=5\text{mm}$, $h_1=1\text{mm}$ の場合 (Fig. 3 (c)), $\lambda=400\sim 650\text{nm}$ における線分散は 0.0060mm/nm であるのに対し、 $\lambda=800\sim 850\text{nm}$ における線分散は 0.0106mm/nm であり、約 1.8 倍の高い分散になることが分かった。



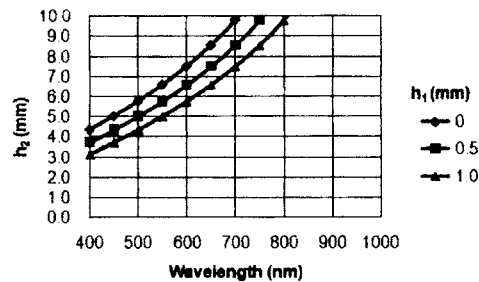
(a) $d = 2\mu\text{m}$, $m = +1$, $f = 5\text{mm}$



(b) $d = 2\mu\text{m}$, $m = +1$, $f = 10\text{mm}$



(c) $d = 1\mu\text{m}$, $m = +1$, $f = 5\text{mm}$



(d) $d = 1\mu\text{m}$, $m = +1$, $f = 10\text{mm}$

Fig. 3 Exit OWP height h_2 according to incident OWP height h_1 and operating wavelength.

このような領域では、高い線分散が得られることを

利用して、各光導波路レイヤに例えば $10\sim 20\text{nm}$ 程度の狭い波長間隔の波長アドレスを割り当てる場合に適用していると考えられる。

近軸領域においては、 $\cos \alpha \sim 1$, $\cos \beta \sim 1$ であるので、(4)式は、

$$h_1 + h_2 = mf\lambda/d \tag{6}$$

と近似できる。したがって、OE-SMD に実装した光源の波長間隔 $\Delta\lambda (= \lambda_1 - \lambda_2)$ と OE-PWB の導波路レイヤの間隔 $\Delta h_2 (= h_2(\lambda_1) - h_2(\lambda_2))$ は、(6)式に代入整理して、

$$\Delta h_2 / \Delta\lambda = mf/d \tag{7}$$

と表される。(7)式より、回折格子の格子定数 d とコリメータレンズの焦点距離 f を決定することができる。

一例として、 $\Delta h_2 = 125\mu\text{m}$, $m = +1$ とした場合のコリメータレンズの焦点距離 f に対する回折格子の格子定数 d の計算結果を Fig. 4 に示す。

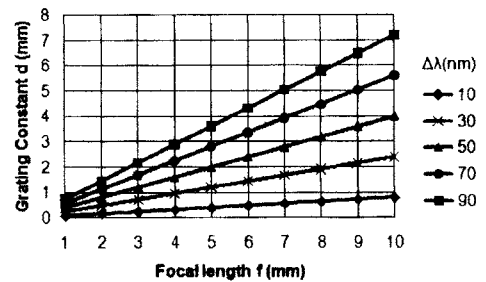


Fig. 4 Grating constant d according to wavelength interval and focal length ($\Delta h_2 = 125\mu\text{m}$, $m = +1$).

以上の結果から、光源の波長の 2 倍以上の格子定数になる範囲で、Fig. 4 より光源の波長間隔 $\Delta\lambda$ 、コリメータレンズの焦点距離 f 、回折格子の格子定数 d を選択すれば、出射側の OWP の間隔 $\Delta h_2 = 125\mu\text{m}$ に合わせた T-MPWS モジュールの光学系を設計することができる。

4. T-MPWS モジュールの動作シミュレーション結果

4.1 解析条件

本章では、3章で設計検討した T-MPWS モジュールの光学系を厚肉レンズと透過型回折格子で設計し、Lambda Research 社の光学設計ソフトウェア OSLO-EDU を用いてシミュレーションを行った。

今回の設計では、光源には波長 $\lambda = 470\text{nm}$, 520nm , 570nm の可視光光源を使用した。この場合、 $\Delta\lambda = 50\text{nm}$ となる。また OE-PWB の光導波路レイヤの間隔 (= 出射側 OWP の間隔) は、 $\Delta h_2 = 125\mu\text{m}$ とした。したがって、

$$\Delta h_2 / \Delta\lambda = 2500 \tag{8}$$

となる。3章の設計検討の結果に基づき、格子定数は使用波長の2倍以上となるよう $d=2\mu\text{m}$ とし、(7)式および Fig. 4 より回折次数 $m=+1$ 、コリメータレンズの焦点距離 $f=5\text{mm}$ を選択した。

厚肉レンズを用いた T-MPWS モジュールの光学系を Fig. 5 に示す。

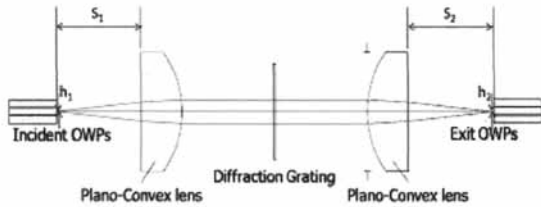


Fig. 5 Evaluated T-MPWS optical system.

本シミュレーションでは、入射側 OWP および出射側 OWP をコア直径 $50\mu\text{m}$ 、 $\text{NA}=0.2$ に設定した。また T-MPWS モジュールのコリメータレンズには、軸外収差を低減するため、硝材に高屈折率ガラス (SHOTT 社 LASFN30, $n_d=1.803181$, $\nu_d=46.38$) を用いた平凸レンズ (Edmund 社 EPCX45228, $f=5\text{mm}$, $\phi=5\text{mm}$, $t_c=1.87\text{mm}$) を使用した。また透過型回折格子には、樹脂製フィルムにインプリントで作製した回折格子 (Edmund 社 54510-L, $d=2\mu\text{m}$, $t=76\mu\text{m}$) を使用し、回折方向を y 方向とした。

また設計波長 $\lambda=520\text{nm}$ において入射側 OWP の y 方向の高さ h_1 と出射側 OWP の y 方向の高さ h_2 が、 $h_1=0$ の場合 (model 1)、 $h_1=h_2$ の場合 (model 2)、 $h_2=0$ の場合 (model 3) の3つの設計例について、 $\lambda=470\text{nm}$, 520nm , 570nm での動作シミュレーションを行った。各 model のシミュレーションではベストフォーカスの位置からスポットダイアグラムを見ながら、入射側 OWP と第1のコリメータレンズとの距離 S_1 、出射側 OWP と第2のコリメータレンズとの距離 S_2 を調整して $\lambda=470\text{nm}$, 520nm , 570nm の集光スポットが最も分離する最適位置を求めた。

4.2 集光スポットの解析結果

model 1 の設計例における光線追跡結果の一例を Fig. 6 に示す。

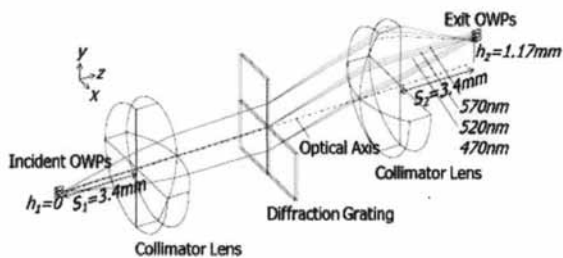


Fig. 6 Ray tracing results of model 1.

Fig. 6 の場合、集光スポットが最も分離する最適位置は $S_1=S_2=3.4\text{mm}$ であり、 $h_2=1.17\text{mm}$ であった。

出射側 OWP 面におけるスポットダイアグラムを Fig. 7 に示す。

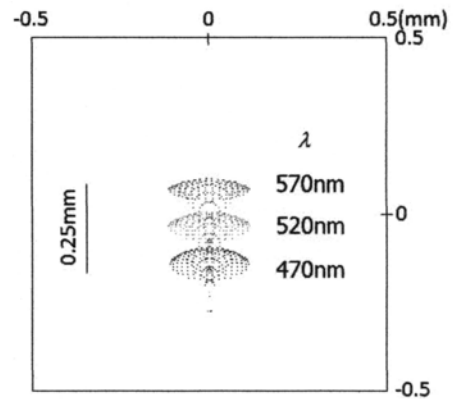


Fig. 7 Spot diagram on the exit OWPs of model 1.

Fig. 7 より各波長の集光スポットの配列は、3章の設計どおり、概ね $125\mu\text{m}$ 間隔になることが分かった。

スポットダイアグラムの光線分布から評価した各波長の集光スポットの大きさを Table 1 に示す。Table 1 より y 方向の集光スポットの大きさは $136\sim 377\mu\text{m}$ であり、集光スポットの配列間隔よりも大きいため、model 1 は各波長の集光スポットが分離できず、T-MPWS 用光学系として不適であると考えられる。

Table 1 Spot diameter on the exit OWPs of model 1.

wavelength (nm)	Spot Dia.	
	x (μm)	y (μm)
470	222	136
520	230	225
570	230	377

model 2 の設計例における光線追跡結果の一例を Fig. 8 に示す。

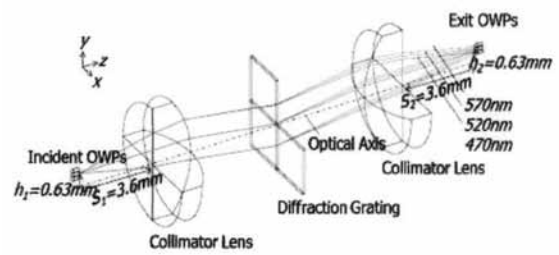


Fig. 8 Ray tracing results of model 2.

Fig. 8 の場合、集光スポットが最も分離する最適位置は $S_1=S_2=3.6\text{mm}$ であり、 $h_1=h_2=0.63\text{mm}$ であった。

出射側 OWP 面におけるスポットダイアグラムを Fig. 9 に示す。

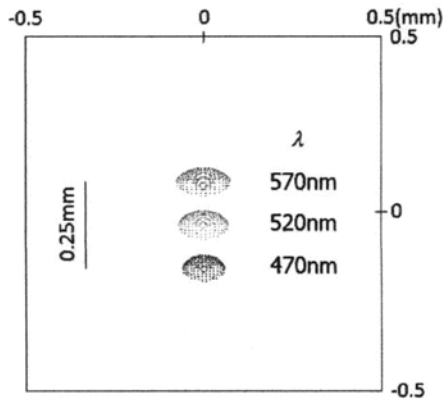


Fig. 9 Spot diagram on the exit OWPs of model 2.

Fig. 9 より各波長の集光スポットの配列間隔は、Fig. 7 と同様に概ね 125 μm 間隔になることが分かった。各波長の集光スポットの大きさを Table 2 に示す。Table 2 より y 方向の集光スポットの大きさは 75~83 μm であり、集光スポットの配列間隔よりも小さいため、model 2 は各波長の集光スポットを良好に分離でき、T-MPWS 用光学系として適していると考えられる。

Table 2 Spot diameter on the exit OWPs of model 2.

wavelength (nm)	Spot Dia.	
	x (μm)	y (μm)
470	118	75
520	135	83
570	150	82

model 3 の設計例における光線追跡結果の一例を Fig. 10 に示す。

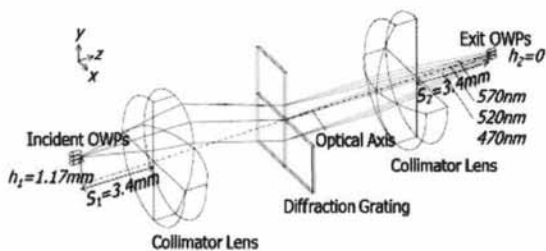


Fig. 10 Ray tracing results of model 3.

Fig. 10 の場合、集光スポットが最も分離する最適位置は $S_1=S_2=3.4\text{mm}$ であり、 $h_1=1.17\text{mm}$ であった。

出射側 OWP 面におけるスポットダイアグラムを Fig. 11 に示す。

Fig. 11 の場合、各波長の集光スポットの配列間隔は、Fig. 7, Fig. 9 と同様に概ね 125 μm 間隔になることが分かった。

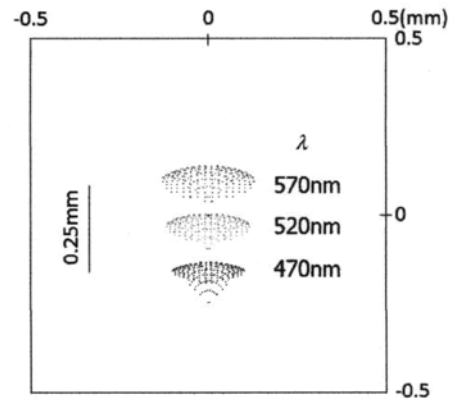


Fig. 11 Spot diagram on the exit OWPs of model 3.

各波長の集光スポットの大きさを Table 3 に示す。Table 3 より、y 方向の集光スポットの大きさは 98~112 μm であり、集光スポットの配列間隔よりも小さいため、model 3 は各波長の集光スポットを良好に分離できることが分かった。

Table 3 Spot diameter on the exit OWPs of model 3.

wavelength (nm)	Spot Dia.	
	x (μm)	y (μm)
470	198	112
520	230	98
570	256	100

一方、model 3 と model 2 とを比較した場合、x 方向の集光スポットの大きさは model 2 が 118~150 μm であるのに対して、model 3 が 198~256 μm であることから、model 2 のほうが良好な集光特性が得られると考えられる。

以上の結果から、入射側 OWP の高さ h_1 と出射側 OWP の高さ h_2 とを $h_1=h_2=0.63\text{mm}$ に等しく設定した model 2 が、T-MPWS モジュールの光学系として最適であると考えられる。

4.3 最適モデルでの結合効率の解析結果

次に、model 2 の光学系において、 S_1, S_2 を個別に調整して、y 方向、すなわち回折光の角度分散方向の集光スポットの大きさと、結合効率の変化を評価した。

T-MPWS モジュールの光導波路レイヤ間でクロストークが発生しないことを考慮すると、T-MPWS モジュールの出射側 OWP の配列方向の集光スポットの大きさは、出射側 OWP の配列ピッチよりも小さいことが必要条件となる。

$S_2=3.6\text{mm}$ とした場合の y 方向の集光スポットの大きさをシミュレーションした結果を Fig. 12 に示す。

Fig. 12 より、y 方向の集光スポットの大きさは、 $S_1=3.45\sim 3.95\text{mm}$ の範囲で出射側 OWP の配列ピッチ (125 μm) 以下となり、 $S_1=3.70\text{mm}$ の場合に 80 μm 以下

で最小となることが分かった。

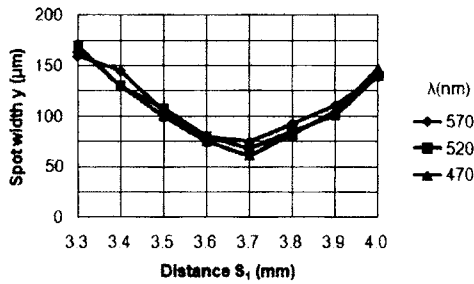


Fig. 12 Spot width of y-direction according to operating wavelength and distance S_1 ($S_2=3.6\text{mm}$) .

ガウシアンビーム同士の結合として S_1 を調整した場合の出射側 OWP への結合効率を評価した結果を Fig. 13 に示す。

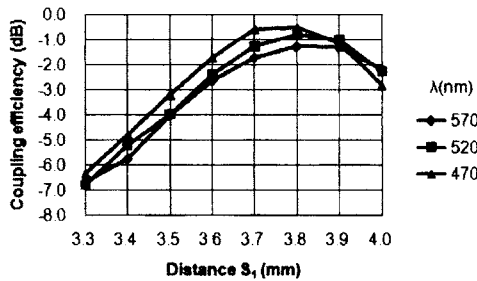


Fig. 13 Coupling efficiency according to operating wavelength and distance S_1 ($S_2=3.6\text{mm}$) .

Fig. 13 より、結合効率は いずれの波長でも $S_1=3.8\text{mm}$ において -1.3dB 以上になることが分かった。また S_1 が $3.8\pm 0.1\text{mm}$ の範囲で結合効率の低下は 0.5dB 以内であることが分かった。

$S_1=3.6\text{mm}$ とした場合の y 方向の集光スポットの大きさをシミュレーションした結果を Fig. 14 に示す。

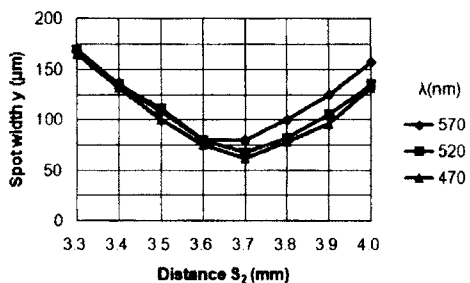


Fig. 14 Spot width of y-direction according to operating wavelength and distance S_2 ($S_1=3.6\text{mm}$) .

Fig. 14 より、 y 方向の集光スポットの大きさは、 $S_2=3.45\sim 3.90\text{mm}$ の範囲で、出射側 OWP の配列ピッチ ($125\mu\text{m}$) 以下となり、 $S_1=3.70\text{mm}$ の場合に $80\mu\text{m}$ 以下で最小となることが分かった。

S_2 を調整した場合の出射側 OWP への結合効率を評

価した結果を Fig. 15 に示す。

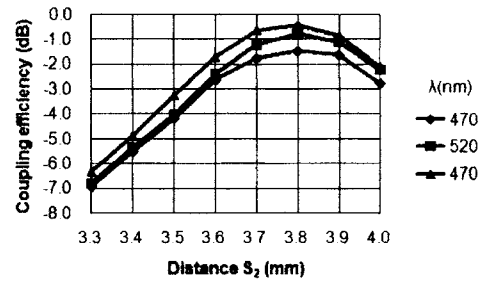
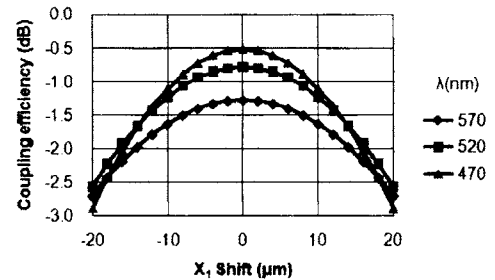


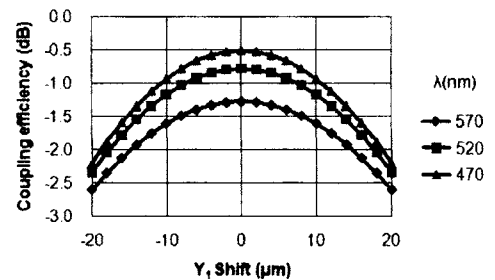
Fig. 15 Coupling efficiency according to operating wavelength and distance S_2 ($S_1=3.6\text{mm}$) .

Fig. 15 より、結合効率は いずれの波長でも $S_2=3.8\text{mm}$ において -1.5dB 以上になることが分かった。また S_2 が $3.8\pm 0.1\text{mm}$ の範囲で結合効率の低下は 0.5dB 以内であることが分かった。

入射側 OWP の x, y 方向の結合トレランスを評価した結果を Fig. 16 に示す。本評価では、Fig. 12, Fig. 13 の結果に基づき、 $S_1=3.8\text{mm}$, $S_2=3.6\text{mm}$ とした。



(a) x-direction



(b) y-direction

Fig. 16 Incident OWP alignment tolerance.

Fig. 16 から、いずれの波長でも x_1 は $\pm 9\mu\text{m}$ の範囲で、 y_1 は $\pm 10\mu\text{m}$ の範囲で、それぞれ結合効率の低下は 0.5dB 以内であることが分かった。

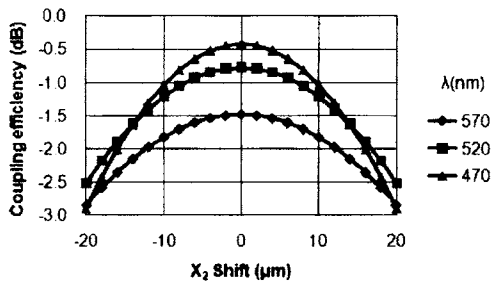
出射側 OWP の x, y 方向の結合トレランスを評価した結果を Fig. 17 に示す。本評価では、Fig. 14, Fig. 15 の結果に基づき、 $S_1=3.6\text{mm}$, $S_2=3.8\text{mm}$ とした。

5. まとめ

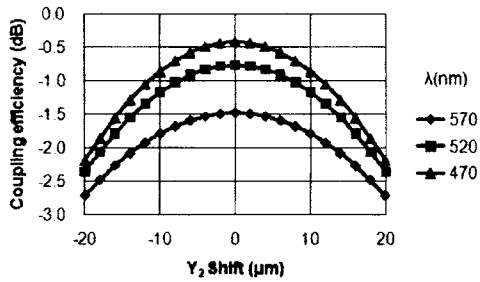
波長により再構成可能な OE-PWB のボード間光インターコネクションを提案し、それに用いる T-MPWS モジュールを提案した。

両側テレセントリック光学系の中央に透過型回折格子を配した T-MPWS モジュールを設計し、最適な配置を検討した。動作シミュレーションを行い、OE-PWB ボード間の結合効率 η は、 -1.5dB 以上、 0.5dB の結合効率の低下を許容した場合の OE-PWB の OWP と T-MPWS モジュールの MHA のパッシブ調心におけるトレランスは、MHA の穴径:OWP の外形 $+18\mu\text{m}$ 以内、MHA 挿入時の OWP の先端とコリメータレンズとの距離 $:3.8\pm 0.1\text{mm}$ 以内、の結果を得た。

これらの結果は、本設計による T-MPWS モジュールが OE-PWB のボード間光インターコネクションに有効であることを示唆している。



(a) x-direction



(b) y-direction

Fig. 17 Exit OWP alignment tolerance.

Fig. 17 から、いずれの波長でも x_1 は $\pm 9\mu\text{m}$ の範囲で、 y_1 は $\pm 10\mu\text{m}$ の範囲で、それぞれ結合効率の低下は 0.5dB 以内であり、入射側 OWP と等しいトレランスがあることが分かった。

以上の結果より、OE-PWB の OWP と T-MPWS モジュールの MHA のパッシブ調心において、 0.5dB の結合効率の低下を許容すれば、MHA の穴径は OWP の外形 $+18\mu\text{m}$ 以内、MHA 挿入時の OWP の先端とコリメータレンズとの距離は S_1, S_2 とも $3.8\pm 0.1\text{mm}$ 以内のトレランスがあると考えられる。

4.4 0次、-1次の回折光の影響

これまでの検討では、回折格子の回折次数 $m=+1$ の場合について T-MPWS モジュールの設計検討およびシミュレーションによる動作解析を行ったが、回折格子には、回折に寄与しない光 ($m=0$) や、設計した回折次数以外の $m=-1$ の回折光が存在するため、これらの影響をシミュレーションにより検討した。

$m=0$ の光線追跡を行った結果、 $h_2=0.63\text{mm}$ と評価され、出射側 OWP の位置とは 1.2mm 以上の距離があることから、クロストーク等の影響は殆どないと推察される。

同様に -1 次回折光の光線追跡を行った結果、 $h_2=1.49\text{mm}$ と評価され、光束は大きく広がっているものの出射側 OWP の位置とは 2.1mm 以上の距離があり、0 次光と同様にクロストーク等の影響は殆どないと推察される。

参考文献

- 1) T. Uchida and O. Mikami: IEICE Trans. Electron. E80-C (1997) 81.
- 2) O. Mikami, Y. Mimura, H. Hanajima, and M. Kanda: IEICE Trans. Electron. E90-C (2006) 1071.
- 3) N. Hendrickx, G. Van Steenberge, P. Geerinck, J. Van Erps, H. Thienpont, and P. Van Daele: Proc. SPIE 6185 (2006) 618503.
- 4) M. Shishikura, M. Matsuoka, T. Ban, T. Shibata, and A. Takahashi: Proc. 57th Electronic Components and Technology (2007), 1275.
- 5) K. Nakama, Y. Tokiwa, and O. Mikami: Opt. Rev. 17 (2010) 443.
- 6) Y. Obata, M. Kanda, and O. Mikami: IEEE Photonics Technol. Lett. 18 (2006) 1308.