

## 二次元並列イメージファイバ光インターコネクト

中村守里也、北山研一\*

郵政省通信総合研究所 \*大阪大学

〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1

Phone: 042-327-7499, Fax: 042-327-7035, E-mail: moriya@crl.go.jp

\*〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1

Phone: 06-6879-7692, Fax: 06-6879-7774, E-mail: kitayama@comm.eng.osaka-u.ac.jp

あらまし

イメージファイバは、2次元並列光インターコネクトにおける光データ伝送路としての応用が期待されている。本報告では、イメージファイバと他の2次元並列光伝送路との比較を行い、イメージファイバの優位性について述べる。また、イメージファイバを用いた2次元並列光インターコネクトを支える技術として空間CDMA、イメージファイバカップラ、VCSEL/PD アレイを用いた2次元光データ伝送、そしてスキューについて検討した結果を報告する。

キーワード イメージファイバ、光インターコネクト、光CDMA

## Image fiber based 2D parallel optical interconnects

Moriya Nakamura and Ken-ichi Kitayama\*

Communications Research Laboratory, M. P. T. \*Osaka University

4-2-1 Nukui-kita, Koganei, Tokyo 184-8795, Japan

Phone: +81-42-327-7499, Fax: +81-42-327-7035, E-mail: moriya@crl.go.jp

\*2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

Phone: +81-6-6879-7692, Fax: +81-6-6879-7774, E-mail: kitayama@comm.eng.osaka-u.ac.jp

Abstract

Image fiber is an important candidate for 2D parallel optical transmission medium for highly parallel high-density optical interconnects. In this paper, we clarify the advantages of the image fiber by comparing it with the other candidates for 2D parallel optical interconnects, such as 2D fiber arrays and lens systems. We then describe key technical subjects for the image fiber based 2D parallel optical interconnects including space-CDMA, an image fiber coupler, 2D optical data transmission using VCSEL/PD arrays, and skew.

key words Image fiber, Optical interconnects, Optical CDMA

## 1. はじめに

並列光インターコネクは、パラレル/シリアル変換の無い高速なデータ伝送が可能となることから、計算機や交換機システムの高スループット化を実現する上で重要な技術とされている。これまでに、ファイバリボンと1次元の LD/PD アレイを用いた光インターコネクトモジュールが数多く報告されている。しかし、スマートピクセル技術に基づく超並列プロセッシングシステムのようなアプリケーションでは、その構造自体が2次元並列のプロセッサアレイをモジュールの単位とするため、インターコネクトに対しても2次元化が求められる[1]。また他の応用においても、2次元並列光インターコネクトは、高密度実装の観点から魅力ある技術であると考えられる。2次元並列光インターコネクトは、これまで主に、レンズ系を用いた“フリースペース光インターコネクト”の分野において研究が進められてきた[2,3]。しかしレンズ系は、コンパクトなアセンブリが可能であるという利点を持ちながらも、高精度のアライメントが必要であることや、実装時の配置関係が焦点距離などのレンズパラメータの制約を受けるといった問題がある。特に、ボード間やキャビネット間のインターコネクトには、応用が難しい。

我々は、イメージファイバ（以下、IF）を用いた2次元並列光インターコネクトの研究を行っている。特に IF と新しい多重方式である空間 CDMA とを組み合わせて、複数の2次元データを多重して伝送する実験にも成功している[4-7]。図1は IF の断面を示したものである。IF は従来、内視鏡などに用いられてきた。共通のクラッドの中に数千から数万のコアが埋め込まれた構造になっており、2次元の光信号を伝送することができる。

本報告では、IF と他の2次元並列光伝送路との比較を行い、IF の優位性について述べる。また、IF を用いた2次元並列光インターコネクトの技術を紹介する。

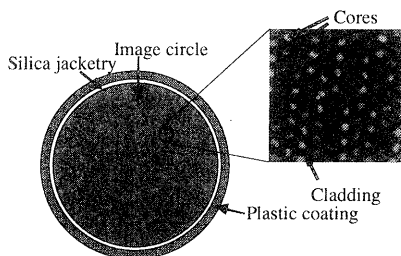


図1. イメージファイバの断面

## 2. IF と他の2次元並列光伝送路

表1に IF と他の2次元並列光伝送路との比較を示す。レンズ系による2次元光インターコネクトは、空間解像度が高く大きなアレイサイズの光信号を伝送可能であり、またコンパクトな実装が可能ではあ

るが、ボード間やキャビネット間の光インターコネクトへの応用が難しい[2,3]。光ファイバによるものとしては、IF の他に2次元ファイバアレイが研究されている[8-10]。2次元ファイバアレイは、IF に比べ伝送特性が良好で、クロストークが小さい。しかし、大アレイサイズ化とそれに伴うピッチ誤差やスキューの問題が残されている。IF にも幾つかの問題点はあるが、画面内の位置によらず信号を伝送できることや分岐結合が容易であること等の長所があり、それらのメリットを活かしたアプリケーションの開発が望まれる。

並列光伝送路としては、現在ファイバリボンが多く用いられている。チャンネル数については10ch 程度のもので多く使用されているが、チャンネル数が大きくなるに従いスキューが問題となってくる。上に述べた2次元並列光伝送路は、ファイバリボンに代表される1次元の並列光伝送路とも、伝送特性やコストの面等において比較されなくてはならない。

		長所	短所
Fiber based	イメージファイバ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・アライメントが容易</li> <li>・光信号のアレイサイズ・幾何学的配置形態に無依存</li> <li>・低スキュー</li> <li>・分岐結合が容易</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・カップリングロスが大きい</li> <li>・イメージファイバを結合したときにコントラストが劣化</li> <li>・クロストークにより伝送距離が制限される</li> </ul>
	2次元ファイバアレイ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・IF に比べ良好な伝送特性</li> <li>・クロストークが小さい</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大アレイサイズ化の問題</li> <li>・ピッチの誤差(〜5μm)</li> <li>・スキューが大きい</li> </ul>
Free space	レンズ系	<ul style="list-style-type: none"> <li>・空間解像度が高い</li> <li>・コンパクトな実装が可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高精度実装が要求される</li> <li>・ボード間やキャビネット間への配線に應用が難しい</li> </ul>

表1. 2次元並列光伝送路の比較

## 3. 空間 CDMA による2次元多重光インターコネク

我々は、IF を用いた光インターコネクトとして、1対1のもののみではなく、複数の送受信間を結び多重データリンクシステムの検討を行っている。光インターコネクトにおける多重方式としては、TDM、WDM 等の検討がこれまで行われているが、我々は IF による2次元並列光伝送に適した新しい多重方式として、空間 CDMA の提案を行っている[4]。図2に空間 CDMA における符号化/復号化プロセスを示す。図の例では、2x2 の並列光信号が5x5 の空間直交符号（Optical Orthogonal Signature Pattern: OOSP）により符号化されている。多重化された2次元信号は、並列に受信側へ伝送される。デコーダでは、必要とする2次元信号に対応する OOSP を選び、多重信号との相関処理を行う。各画素における面積分と、符号間の干渉雑音を除去するための閾値処理を行うことにより、必要とする2次元信号が復号される。この空間 CDMA においては、OOSP の直交性により、符号化された信号が空間的な位置ずれを伴って多重化されたとしても復号が可能であるという大きな特徴を持っている。この性質により、

光実装時における位置合わせの条件を大幅に緩められることが期待できる。この空間 CDMA を用いて、これまでに、 $8 \times 8$  の 2次元信号を 4 多重して IF 伝送することに成功している [6]。伝送距離についても、100m の IF を用いて多重伝送を行っている [7]。図 3 に、現在構築中の、2次元 VCSEL/PD アレイを用いた空間 CDMA システムを示す。これまでは、空間 CDMA による多重分離の原理実験として 2次元信号を液晶パネルに表示していたが、VCSEL/PD アレイを用いて高ビットレートの伝送実験を行う予定である。

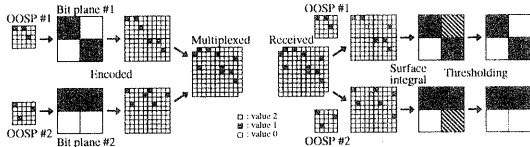


図 2. 空間 CDMA における符号化/復号化プロセス

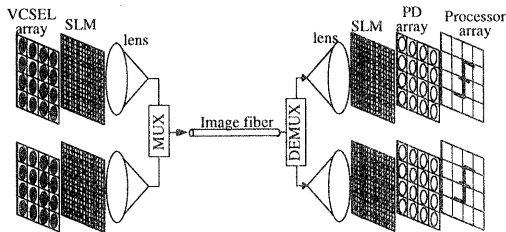


図 3. VCSEL/PD アレイを用いた空間 CDMA システム

#### 4. イメージファイバ光インターコネクットの要素技術

##### 4. 1. イメージファイバカップラ

IF によるネットワークシステムを実現するために必要となってくるデバイスの一つとして分岐結合器 (IF カップラ) がある。IF の分岐結合は、基本的に結像レンズ系とビームスプリッタ (BS) によって実現される。ただし、実際の設計においては、コンパクトなアセンブリやアライメントが容易であること等を考慮しなくてはならない。図 4 に我々が提案している IF カップラの構成を示す。V 溝上に配置された GRIN ロッドレンズと BS により構成される。結像面がレンズの端面にくるよう設計されているため、V 溝上で IF をレンズに突き合わせるだけでアライメントが終了する。また、IF の画面径は、一般に 1mm 程度と大きいいため、V 溝に要求される精度も数十  $\mu\text{m}$  程度で十分である。図 5 に、実際に構成された IF カップラを示す。

IF カップラによる空間解像度の劣化を USAF テストチャートを用いたコントラスト測定により調べた。測定結果を図 6 に示す。図よりコントラストの劣化が生じていることが分かる。ただし、このようなコントラストの劣化は、レンズ系の結像特性によるものではなく、IF の結合そのものによっている。

IF には数万のコアがあるため、コア間を 1 対 1 で結像することは不可能である。そのため、一つのコアから発した光は複数のコアに入ることになり、コントラストの劣化が生じてしまう。このような解像度の劣化は IF の結合に固有のものであり、IF ネットワークを設計する上で考慮に入れなければならない。

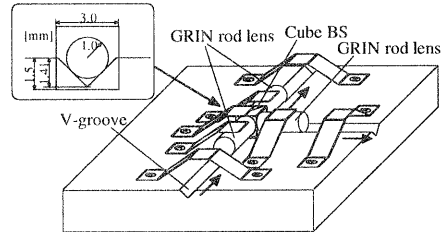


図 4. GRIN ロッドレンズ・キューブ BS・V 溝によるイメージファイバカップラの構成

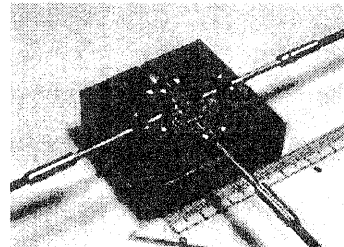


図 5. イメージファイバカップラ

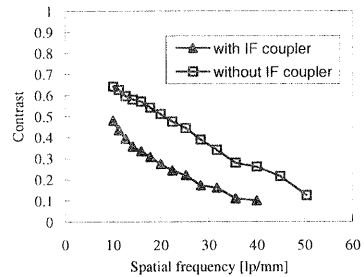


図 6. IF カップラによるコントラストの劣化

##### 4. 2. VCSEL/PD アレイを用いた高速 2次元光データ伝送

多重光インターコネクットシステムを構成する前段階として 1 対 1 のデータ伝送実験を行った [11]。図 7 に、IF と 2次元 VCSEL/PD アレイを用いた光インターコネクットの実験系を示す。 $8 \times 8$  VCSEL アレイは、波長 850nm、ピッチ 250  $\mu\text{m}$  [12]。 $8 \times 8$  PD アレイは、受光径 58  $\mu\text{m}$ 、ピッチは 250  $\mu\text{m}$  である。IF のコア数、画面径、コア間隔はそれぞれ、 $5 \times 10^4$ 、1020  $\mu\text{m}$ 、4.4  $\mu\text{m}$  である。また IF の長さは 1m である。

光アライメントは次のように行われる。送信側は、IF の出力端においてカメラで光信号を観察しなが

ら、軸合わせが行われる。その後、IF 出力端は、受信側の GRIN レンズに V 溝上で突合せ接続される。IF を伝搬した光信号は、PD アレイ上で反射し図 7 中のカメラで観察される。また、PD アレイに順方向電流を流すことにより LED 発光させ、光信号と重なった画像としてカメラで観察することができる。図 8 にビジュアルアライメントの過程を示す。受光パワーのモニタリング無しに最適位置にアライメント可能であることが確認できた。構成およびアライメント方法がシンプルであるため、低コストの光インターコネクタモジュールの実現が可能であると考えられる。

クロストークの評価を簡単にするため、隣合う 4 つ(2x2)のチャネルのみを用いて伝送実験を行った。図 9 に IF 出力端における隣合う光信号の強度プロファイルを示す。無変調時(CW)におけるクロストークを PD 出力電流で測定したところ -34dB であった。一つの VCSEL を NRZ 2<sup>9</sup>-1 PRBS 15Mbps で変調し、他の 3 つをその反転信号で変調してたところ、VCSEL の平均出力パワー 1mW において、10<sup>-9</sup> 以下の BER 特性が得られた。

PD アレイを最適位置から横方向にずらしときの BER 特性を図 10 に示す。図には、一つの VCSEL のみを変調した(他の VCSEL は OFF) 場合の BER もプロットされている。BER が 10<sup>-9</sup> のときの位置ずれ余裕は 85 $\mu$ m であり、実際の光インターコネクタモジュール作成において十分な大きさである。また、隣合う 4ch の伝送と 1ch の伝送の間に大きな差が観測されなかった。これは、隣合うチャネル間の光学的なクロストークが十分に小さいことを意味している。

この実験においては、VCSEL のドライバ回路の特性により、伝送速度は 15Mbps/ch となっている。しかし、IF 伝送において光学的クロストークが十分に抑えられることが明らかになった。今後、高速伝送の実験を行った場合、VCSEL/PD 周りの電気的クロストークが重要な問題となる可能性がある。これについては、高周波回路実装技術による解決が期待される。また並列度については、商品化されている内視鏡用 IF でも、64(8x8)ch 以上の並列光信号を伝送できるだけの空間解像度を持っている。図 9 より、-20dB の光強度における信号のスポット半径は、48 $\mu$ m である。これは約 225(15x15)までの並列伝送が可能であることを意味しており、並列度において、IF がファイバリボンに比べ十分な優位性を持っていることが分かる。

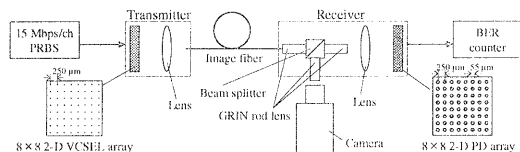


図 7. イメージファイバと 2 次元 VCSEL/PD アレイを用いた 2 次元並列光データ伝送の実験系

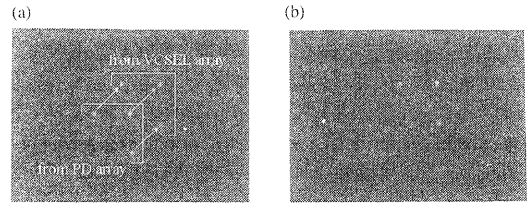


図 8. VCSEL/PD アレイ間のビジュアルアライメントの様子。(a)アライメントを行う前と (b)アライメント後

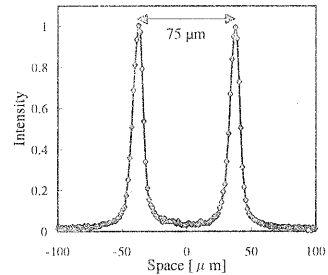


図 9. イメージファイバ出力端における隣合う 2 つの光信号の強度分布

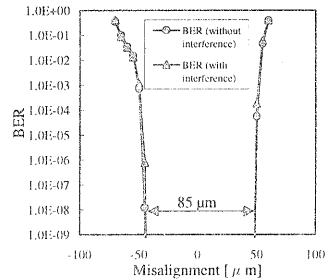


図 10. 1ch のみを伝送させた場合と隣合う 4ch を伝送させた場合とにおける、横方向の位置ずれに対する BER 特性

#### 4. 3. イメージファイバのスキュー

並列伝送路の最も重要なパラメータの一つはスキューである。スキューは、チャネル間の最大伝搬時間差により定義され、伝送レートを制限する要因となる。キャビネット間の光インターコネクタをアプリケーションとして考えた場合、100m 程度までの伝送距離が必要である。伝送速度として 1Gbps/ch (NRZ パルス幅: 1ns) を仮定した場合、周辺回路もスキューを持つことを考慮すると、伝送路のスキューは 1ps/m 以下であることが求められる。ファイバリボンのスキューに関しては、理論解析や低スキュー化の検討が行われている[13,14]。しかし、IF のスキューについては、これまで十分な検討が行われていなかった。これは、IF のコア間隔が数 $\mu$ m 程度と小さく、ファイバリボン等の並列伝送路のスキュー測定に一般に用いられている位相法[14]が適用できないことが原因の一つであった。

図 11 は、IF コア間の伝搬時間差が 2 次元光パルスに及ぼす影響を示したものである。IF のコア間隔は数  $\mu\text{m}$  程度と小さいため、それぞれの光パルスは複数のコアにより伝送される。そのため、コア間に伝搬時間差があると、光パルスが広がってしまう。また、画面内において伝搬時間の分布が均一でない場合は、IF 出力端への光パルスの到着時間に差が生じてしまい、スキューの原因となる。IF コアの伝搬時間差が関係する伝送特性としては、このようなパルス広がりやスキューの両方を知らなくてはならない。従って、微小領域におけるコアごとの伝搬時間差だけでなく、画面全域における伝搬時間差の分布を測定する必要がある。

これまでに IF のスキューを評価した例としては、河合等の実験が知られている[15]。これは、IF 画面内微小領域の複数コアで光パルスを伝搬させ、IF 出力端におけるパルス広がりの実測値と、モード分散によるパルス広がり計算値とから、コアの伝搬時間差を割り出すというものである。しかし、この方法では、コア単位の伝搬時間差の測定が出来ないことや、画面全域における伝搬時間差の分布を測定するのが困難であるといった問題があった。

図 12 に提案する IF スキューの測定方法を示す。LD から発せられた光パルスは、IF 中の全てのコアにより同時に伝搬される。IF 出力端は対物レンズにより、LD と同期されたストリークカメラの入力スリット上に結像される。これにより、スリット内に結像された IF コア全ての伝搬後の光パルスを同時にかつリアルタイムで観察可能となる。IF 出力端をスリットと垂直方向にずらしながらこの測定を繰り返すことにより、画面全域の測定が可能となる。

図 13 に測定結果の一例を示す。測定を行った IF は、長さ 100m、画素数 30,000、画面径 800  $\mu\text{m}$  のものであり、IF 画面中心部 40  $\times$  40  $\mu\text{m}$  の領域（約 100 コア）のデータをプロットしたものである。図 13 のような分布は、IF 画面内の中心部と周辺部の数箇所においてプロットされたが、測定位置による特徴の変化は見られなかった。また、対物レンズの結像倍率を変えることにより、IF 画面全域の伝播時間差の分布も測定され、それらの結果から、測定が行われた IF コアが約 5ps/m の伝播時間差を画面内でランダムに持っていることが分かった。ただし、この IF は複数の異なるコアから成るものであったため、コアのパラメータを揃えることにより、伝搬時間差の低減化が可能であると考えられる。

我々は、IF を曲げた状態での伝搬時間差の変化についても検討を行った。図 14 は、上の測定で用いた IF を直径 31cm のポビンに 100 回巻いた状態で測定した画面全域における伝搬時間差の分布である。スキューの増加は約 2ns であり、ポビンの半径方向外側へ向かって直線的であることが分かった。このようなスキューの増加は、曲げによって生ずる IF の内側と外側との間のひずみの差と、光弾性効

果による屈折率変化とによって説明することができると。IF を  $m$  回巻いたときのスキューの増加  $\Delta \tau_{\text{max}}$  は、次式で表されることが分かっている[16]。

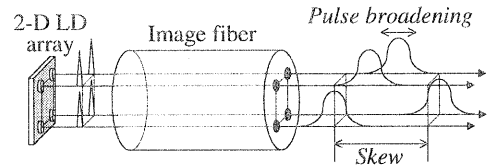


図 11. イメージファイバコアの伝播時間差によるパルス広がりやスキュー

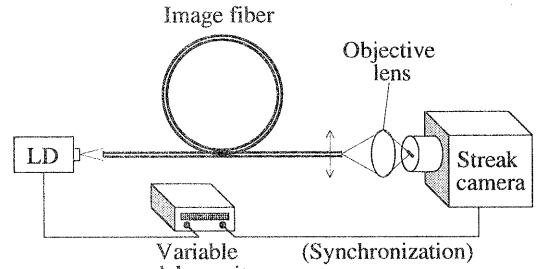


図 12. イメージファイバスキューの測定系

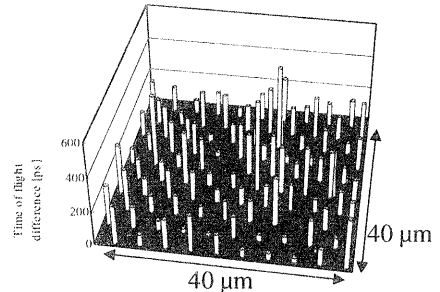


図 13. 画面中心部におけるイメージファイバコアの光伝播時間差

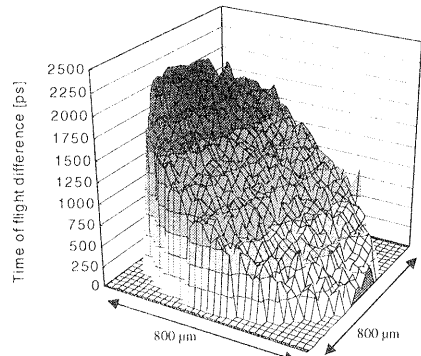


図 14. 画面内の光伝播時間差の分布 (IF をポビンに巻いた場合)

$$\Delta\tau_{\max} = 2\pi mD \left( \frac{N}{c} + \frac{CE}{c} \frac{\partial N}{\partial n} \right) \quad (1)$$

( $D$ : IF 画面直径、 $N$ : 群屈折率、 $c$ : 光速、 $C$ : 光弾性係数、 $E$ : ヤング率、 $n$ : コア屈折率)  
 ここで注目すべきことは、 $\Delta\tau_{\max}$  がボビン半径や IF のジャケット厚によらないことである。つまり IF は、どのような半径で巻いても、さらに一般的にはどのような形状で巻いても、1 巻き (1 turn) 当たりの伝搬時間の変化は等しい。つまり、式(1)において  $m=1$  とし 1turn でのスキューを求めておけば、ボビンに  $m$  回巻いたときのスキューの増加は、単純にそれを  $m$  倍すれば求まる。このようにして求められた理論値は図 14 の実験値とよく一致することが確かめられている[16]。

測定に用いた IF の場合、1turn 当たりのスキューの増加は約 20ps/turn である。式(1)において画面径  $D$  以外の値は、シリカガラスの IF であれば、大きな差はない。そのため、曲げによるスキューは、 $D$  の値によりほぼ決まるといってよい。測定に用いた IF の画面径  $D=800$  [ $\mu\text{m}$ ] は、IF としては、ほぼ典型的な値であるため、20ps/turn の曲げによるスキューの増加もまた典型的な値であるといえる。光インターコネクタへの応用を考えると、IF の引き回しによる「巻き」は数 turn 以内に抑えられることが期待できる。この場合の曲げによる帯域制限は数 Gbps/ch 程度となる。しかし、余長処理においてボビンに数十 turn 以上巻き付けた場合、1ns を超える大きなスキューが生じ、数百 Mbps/ch で帯域制限を受けてしまうことが分かる。このような曲げによるスキューの増加を抑えるためには、“IF を振る”ことや“8の字に巻く”等の手段をとる必要があると考えられる。

## 5. まとめ

IF と他の 2 次元並列光伝送路との比較を行い、IF の優位性について述べた。また、IF を用いた 2 次元並列光インターコネクタを支える技術について紹介を行った。今後、 $8 \times 8$  を超える多チャンネル伝送や数百 Mbps/ch の高速伝送でのクロストークの影響について検討を行う予定である。また、VCSEL/PD アレイと空間 CDMA による高速多重伝送の実験を行う予定である。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり御協力を頂いた浜松ホトニクス (株) の原勉氏、小林祐二氏、伊ヶ崎泰則氏、(株)フジクラの妻沼孝司氏、金田恵司氏、社本尚樹氏に感謝致します。また日頃よりご指導頂く、通信総合研究所の飯田尚志所長、板部敏和部長、中條渉室長に感謝致します。

## 参考文献

1. M. Ishikawa, "Optoelectronic parallel computing system with reconfigurable optical interconnection," in Vol. CR62 of SPIE Critical Review Series, *Optoelectronic Interconnects and Packaging*, R. T. Chen and P. S. Guilfoyle, eds. (SPIE Press, Bellingham, Wash., 1996), pp. 156-175.
2. F. A. P. Tooley, S. M. Prince, M. R. Taghizadeh, F. B. McCormick, M. W. Derstine, and S. Wakelin, "Implementation of a hybrid lens," *Appl. Opt.*, vol. 34, pp. 6471-6480, 1995.
3. K. Hamanaka, "Optical bus interconnection system using Selfoc lenses," *Opt. Lett.*, vol. 16, pp. 1222-1224, 1991.
4. K. Kitayama, "Novel spatial spread spectrum based fiber optic CDMA networks for image transmission," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 12, pp. 762-772, 1994.
5. K. Kitayama, M. Nakamura, Y. Igasaki, and K. Kaneda, "Image fiber-optic two-dimensional parallel links based upon optical space-CDMA: experiment," *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, pp. 202-212, 1997.
6. M. Nakamura, K. Kitayama, Y. Igasaki and K. Kaneda, "Four-channel,  $8 \times 8$  bit, two-dimensional parallel transmission by use of space-code-division multiple-access encoder and decoder modules," *Appl. Opt.*, vol. 37, pp. 4389-4398, 1998.
7. M. Nakamura, K. Kitayama, Y. Igasaki, and K. Kaneda, "Space-CDMA based 2D parallel optical transmission over record length (100m) long image fibre," *Electron. Lett.*, vol. 34, pp. 1127-1128, 1998.
8. K. Koyabu, F. Ohira, and T. Yamamoto, "Fabrication of two-dimensional fiber optic arrays using microferrules," *IEEE Trans. Components, Packaging, and Manufacturing Technol.*, vol. 21, pp. 11-19, 1998.
9. G. M. Proudley, C. Stace, and H. White, "Fabrication of two-dimensional fiber optic arrays for an optical crossbar switch," *Opt. Eng.*, vol. 33, pp. 627-635, 1994.
10. A. Sasaki, T. Baba, and K. Iga, "Put-in microconnectors for alignment-free coupling of optical fiber arrays," *IEEE Photon. Technol. Lett.* vol. 4, pp. 908-911, 1992.
11. M. Nakamura and K. Kitayama, "Error-free transmission of image fiber-optic 2-D parallel interconnection using VCSEL/PD arrays: experiment," *OFC2000*, ThK2, Mar. 2000.
12. Y. Ohiso, Y. Kohama, and T. Kurokawa, "0.85- $\mu\text{m}$  vertical-cavity surface-emitting laser array grown on GaAs and AlGaAs substrates by metal organic vapor deposition," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 34, pp. 6073-6078, 1995.
13. A. P. Kanjamala and A. F. J. Levi, "Subpicosecond skew in multimode fibre ribbon for synchronous data transmission," *Electron. Lett.*, vol. 31, pp. 1376-1377, 1995.
14. N. Kashima, "Influence of fiber parameters on skew in single-mode fiber ribbons," *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, pp. 1858-1864, 1998.
15. S. Kawai, Y. Li, and T. Wang, "Skew-free optical interconnections using fiber image guides for petabit-per-second computer networks," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 37, pp. 3754-3758, 1998.
16. 中村守里也、大坪俊通、北山研一、“イメージファイバのスキュー測定と理論的考察,” 信学技報 OFT99-20, 1999.