

## 4-2-2 空間分割多重通信に向けた高速受光素子技術

### 4-2-2 *Advanced High Speed Photoreceiver Technology for Space Division Multiplexing Fiber Communications*

梅沢俊匡

Toshimasa UMEZAWA

空間分割多重通信技術を実装面から考えた場合、マルチコア・マルチモードファイバからの光信号は、そのコア数やモード数に応じてシングルモードへ変換を行う必要があり、結果として送受信端において、コア数やモード数に比例して多数のシングルモードファイバや送受信器を確保する必要がある。当研究室では同通信システム全体の小型化・省電力化、低コスト化を前提に、マルチコア・マルチモードファイバからの光信号の一括受信を目的に、2次元型高速フォトディテクターアレイ (2D-PDA) デバイスの開発を行っている。本稿においては同高速光デバイスの概要について紹介を行う。

With increasing demand for internet services, data rates in both fixed-fiber and wireless communications systems have continued to increase for next 5-10 years. To overcome this issue, new technologies such as wavelength division multiplexing, multi-level modulation format and space division multiplexing have been studied. In this paper, we introduce key optical to electrical convergence device technology in NICT, which are related to precise and high speed optical de-modulation for the advanced optical fiber communications. The topic is focused on “advanced high speed photoreceiver technology for space division multiplexing fiber communications” using III-V compound semiconductor material.

#### 1 まえがき

インターネットやモバイル通信の需要増加に伴い、光固定通信、ワイヤレス通信ともにその通信容量は増加の一途を示し、いまだ飽和傾向が見られていないことから、今後もその増加傾向は続くと思われ [1][2]。これら急激な通信量増加に対し、膨大な情報が集中するネットワークの幹線やデータセンタでは、光ファイバや通信装置の設置スペースや消費電力の削減が課題となる。

これに対し波長多重通信や多値変調技術をもってデータ容量拡大を図ってきたが [3][4]、近年ではマルチコアファイバやマルチモードファイバを用いた空間多重伝送が注目を集めており、これまで NICT は 1 本の光ファイバの中に多数の光通信路 (コア) を収めたマルチコアファイバ [5] を開発し、さらにマルチ伝搬モード [6] も利用したマルチコアファイバ 1 本で従来の 100 本分以上に相当する通信容量を達成してきた。

またマルチコアファイバにより、偏波多重、波長多重、多値変調技術を盛り込み、1,600 km 伝送に成功したとの報告例 [7] や、マルチコアファイバ内のコア

をシングルモードファイバから数モードファイバに置き換えた 19 コア、6 モードファイバによる大容量伝送が報告されている [8]。

#### 2 空間分割多重通信実装面における課題

これまで報告されている空間分割多重通信環境例は、マルチコア・マルチモードファイバからの光信号をコア数やモード数に応じていったんシングルモードファイバに変換を行うため、送受信端で多数のシングルモードファイバ及びこれに接続される送受信器や信号処理回路が必要となる。よってコア数、モード数の増加に伴い送受信システム全体の占有面積が大きくなる傾向にあり、通信システム全体の小型化・省電力化が課題となる。

例えばマルチコアファイバにおいては、コア数に応じたシングルモードファイバへ変換するファンイン・ファンアウト装置 [9] や、モード数に応じてシングルモードファイバへ変換するフォトニックランタン装置 [10] など比較的大きな装置が必要とされる。近年では光デバイス集積回路による小型化が検討されているが、

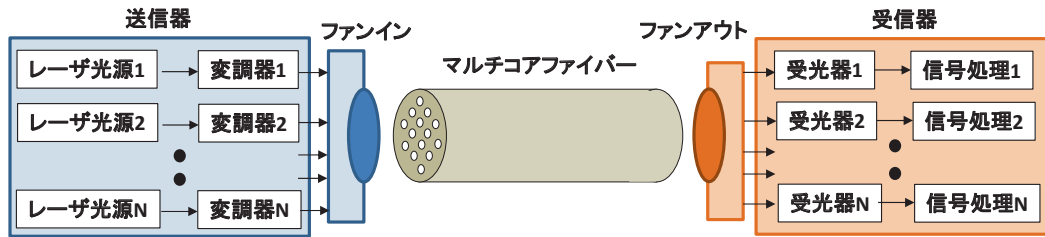


図1 従来技術によるマルチコアファイバー伝送システム概略図

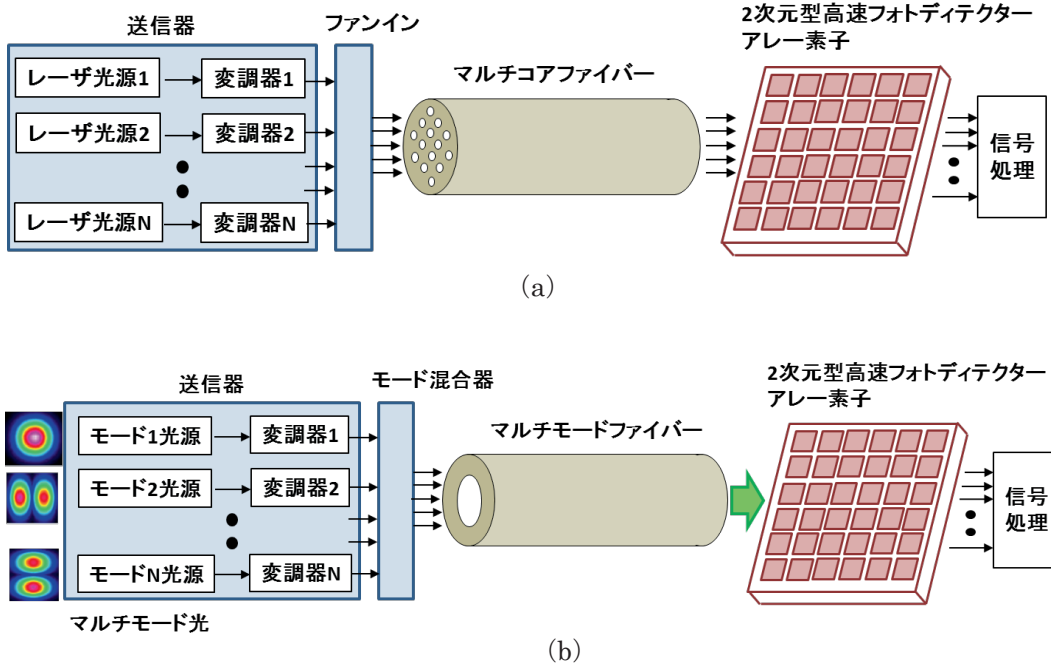


図2 高速2次元フォトディテクターアレーデバイスによる (a) マルチコアファイバー伝送システム、(b) マルチモード伝送システム概略図

いずれにしても光送受信器前後に煩雑な光回路が必要となりコンパクトかつシンプルなシステム構成が望まれる(図1)。

そこで本研究では、上記に掲げた課題点を解決するため、マルチコア・マルチモードからの信号光をシングルモードへ変換することなく、直接一括で受信可能な2次元型高速フォトディテクターアレー(2D-PDA)の開発を行った。これにより今まで必要とされていたファンアウト装置やフォトニックランタン装置を省略することが可能となり、受信系システム全体の小型化、低消費電力、低コスト化が期待できる[11](図2(a)(b))。

### 3 2次元高速フォトディテクターアレーデバイス

#### 3.1 デバイス設計・試作

高速2D-PDAにおけるピクセルサイズ及びピッチ間隔はデバイス特性全体を左右する重要なパラメータである。3 dB帯域幅、感度のほか、特に隣接ピクセル

間クロストークを考慮したデバイス設計が必要である。一般にピクセルサイズが小さいほどフォトディテクター(PD)の周波数特性は高速応答を示すが、ピクセル全体に対して一様に光照射された場合、ピクセルサイズが小さいほど光電流は小さく、感度低下を招く。逆に同一条件で、ピクセルサイズを大きくした場合、1ピクセルあたりの受光量が増加するため光電流は増加するが周波数特性は劣化傾向を示す。さらにピクセル間ギャップを縮めることで不感帯領域が減少しPDA全体の受光感度増加が期待できるが、隣接ピクセル間クロストークの影響が生じる。よってピクセルサイズ、ピッチと周波数特性、受光感度、クロストークとはトレードオフの関係にあり、最適点によりデバイス設計を行う必要がある。

今回我々は10 GHz以上で高速動作する6×6(32)ピクセルPDAの設計・試作を行った。ピクセルサイズは受光感度を確保するため主に30 μm×30 μmとした。またPD構造はInP/InGaAs系PIN構造を基本とし、各ピクセルのn-InPを共通とした。光入射は

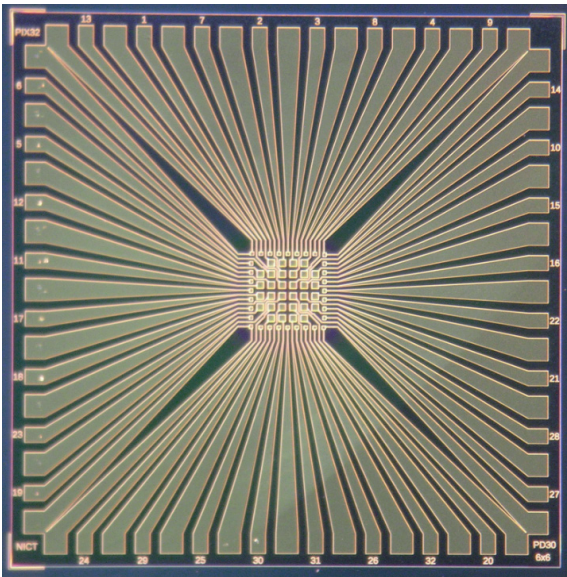


図3 2次元高速フォトディテクターアレー試作デバイスのチップ全体写真

裏面入射型とした。InGaAs 光吸収層膜厚を最適膜厚とした場合、計算から求められる 3 dB 帯域幅は 16 GHz と見積もられた。さらに、電磁界シミュレーションにより 10 GHz における隣接ピクセル間クロストークは約 -30 dB が得られる見込みを得た [11]。

図3に試作を行った 2 D-PDA デバイスチップ外観写真を示す。チップサイズは 2.3 mm × 2.3 mm であり、PD ピクセル数は 6 × 6 の正方配列とした 32 素子とした。この 32-PDA 素子からの高周波光電流が効率良く出力可能なよう PDA 素子に 32 本の CPW 型高周波伝送線路を接続した。

### 3.2 デバイス性能評価

作製した素子のピクセル暗電流、感度を測定し、全ピクセルにおいて動作を確認した。また 2 D-PDA のレイアウトは 1 象限 8 ピクセルを他象限に対して対称配置したものになっているため、1 象限 8 ピクセルの周波数特性測定結果が、32 ピクセル全体の周波数特性の代表値と考えられる。O/E 周波数測定結果、図4に示すように 8 ピクセルともに非常に特性が揃っていることが確認でき、平坦性も良好であることが確認できた。3 dB 帯域 = 9.1 ~ 12.4 GHz、平均 11.2 GHz を得ることができた [12]。

## 4 マルチコア信号光受信

新規開発した 2 D-PDA デバイスによるマルチコアファイバ信号光の一括受信の基礎検討を行った。実験はまず選択した 1 つのピクセルについて波形及びビットエラーレート (BER) 評価を行った。信号は NRZ 信号を強度変調器により形成し、レンズを通してピクセ

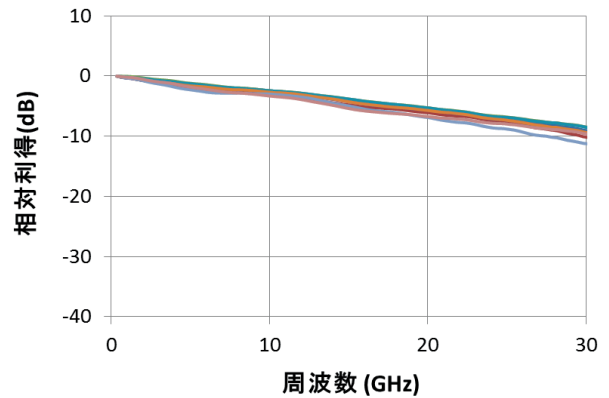


図4 2次元高速フォトディテクターアレーデバイスの周波数特性

ルに光入射を行った。ボーレート 10 ~ 39 Gbaud で波形特性を確認した結果、39 Gbaud までは Eye 開口が確認でき、25 Gbaud においては大きな Eye 開口とエラーフリーが確認できた。

続いて 7 コアファイバと試作した 2 D-PDA 間の光結合実験を行った。実験ではコア-ピクセル配置の違いから 2 コアからの 2 平行光信号と 2 ピクセル間の光結合にフォーカスした。その結果 1 倍光学レンズを介した単純な光学系により良好な光結合が確認でき、2 並行光の同時受信波形及びエラーフリーを確認した (図5)。

また今回設計を行った 2 D-PDA ピクセルサイズは 30  $\mu\text{m}$  × 30  $\mu\text{m}$  であり、1 倍レンズを通したビームスポット径は約 10  $\mu\text{m}$  である。よって設計上の光アライメント余裕度は  $\pm 10 \mu\text{m}$  と非常に大きなアライメント余裕を有する。したがって現状のコア配列 (三角配列) 若しくはピクセル配列 (正方配列) をファイバ側若しくは PDA 側配列に統一することで、32 ピクセル PDA と 32 コアファイバ間の光結合効率は 100 % 得られるものと考えられる。

また 2 D-PDA 中心部 16 ピクセル (4 × 4 ピクセル) と正方配列した 16 コア間で良好な光結合が得られることを想定し、PDA 中心部 4 × 4 ピクセル (16 ピクセル) 全数の受信波形評価を行った。ボーレートは 25 Gbaud (NRZ) に固定し、1 コアから光入力を行い、個々の 16 ピクセルの受信波形を取得した。その結果、図6に示すように、全ての 16 ピクセルから高品質な Eye 波形が得られることが確認できた。この結果よりマルチコアファイバのコア配列及び PDA ピクセル両者間の配列を一致させることで、今回試作したデバイスは 25 Gbaud × 16 ピクセル = 400 Gbps の一括受信能力があることが確認された [13]。

## 4 アクセスマルチコアの大容量化を目指す研究開発

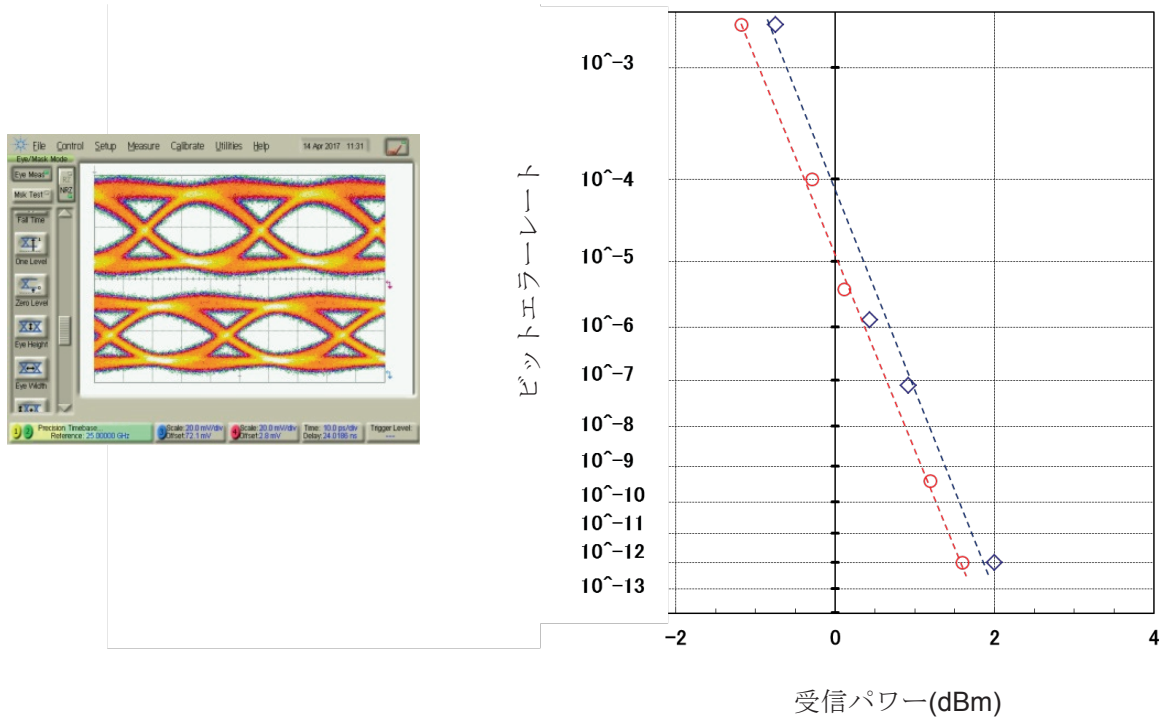


図5 2次元高速フォトディテクターアレイデバイスによるマルチコア(2コア)ファイバー信号からの受信特性(NRZ、25 Gbaud)、(a)2ピクセル同時受信波形、(b)ビットエラーレート測定結果

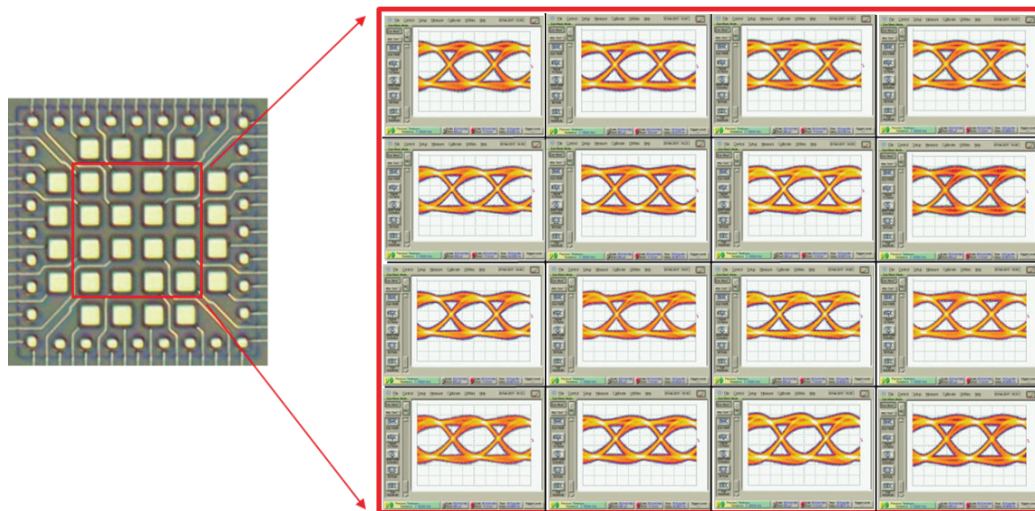


図6 2次元高速フォトディテクターアレイ16ピクセルの受信波形(NRZ、25 Gbaud、中心部16ピクセルの測定結果)

## 5 おわりに

今回我々はマルチコア・マルチモードによる空間分割多重伝送からの光信号一括受信を目的に、32ピクセル2D-PDAの研究開発を行った。最適化したピクセルサイズ、レイアウトにより3dB帯域11.2GHzを得ることができた。マルチコアファイバと2D-PDAは十分な光結合が期待でき、単一ピクセルはそれぞれ25Gbaud動作が確認された。また本稿で詳細は触れなかったが、2D-PDAを用いた3モード分割多重光の一括受信についても良好な実験結果を得ており、

20Gbps(10Gbaud、QPSK)の3モード一括受信を達成している[14]。今回開発した高速2D-PDAはマルチコア・マルチモードファイバからの多重化光信号の一括受信に対し、性能、消費電力、コスト、サイズ面から有効な受光デバイスのひとつと考える。

## 謝辞

本研究の一部は総務省の「電波資源拡大のための研究開発による委託研究」により実施されたものである。

## 【参考文献】

- 1 Cisco White paper, "The Zettabyte Era: Trends and Analysis," June 2017.
- 2 "5G New Wave Towards Future Societies in the 2020s," 5G Forum white paper, March 2015.
- 3 S. T. Le, K. Schuh, M. Chagnon, F. Buchali, R. Dischler, V. Aref, H. Buelow, and K. Engenhardt, "8x256Gbps Virtual-Carrier Assisted WDM Direct-Detection Transmission over a Single Span of 200km," Th. PDP. B.1, post-dead-line paper, Proc. of ECOC 2017.
- 4 Robert Maher, Kevin Croussore, Matthias Lauerermann, Ryan Going, Xian Xu, and Jeff Rahn, "Constellation Shaped 66 GBd DP-1024QAM Transceiver with 400 km Transmission over Standard SMF," Th. PDP. B.2, post-dead-line paper, Proc. of ECOC 2017.
- 5 NICT プレスリリース 「光ファイバの最大伝送容量の世界記録を更新、2.15 ペタビット毎秒を達成」<http://www.nict.go.jp/press/2015/10/01-1.html> (2015/10/01).
- 6 NICT プレスリリース 「光ファイバの限界突破に挑戦」<http://www.nict.go.jp/press/2015/03/26-1.html> (2015/3/26).
- 7 T. Mizuno, K. Shibahara, H. Ono, Y. Abe, Y. Miyamoto, F. Ye, T. Morioka, Y. Sasaki, Y. Amma, K. Takenaga, S. Matsuo, K. Aikawa, K. Saitoh, Y. Jung, D. J. Richardson, K. Pulverer, M. Bohn, and M. Yamada, "32-Core Dense SDM Unidirectional Transmission of PDM-16QAM Signals Over 1600 km Using Crosstalk-managed Single-mode Heterogeneous Multicore Transmission Line," Th5C.3, post-dead-line paper, OFC2016.
- 8 Tetsuya Hayashi, Takuji Nagashima, Kazuhiro Yonezawa, Yuta Wakayama, Daiki Soma, Koji Igarashi, Takehiro Tsuritani, and Takashi Sasaki, "6-Mode 19-Core Fiber for Weakly-coupled Mode-multiplexed Transmission over Uncoupled Cores," W1F.4, Proc. of OFC 2016.
- 9 田中正俊, 八若正義, 谷口浩一, 時報次世代光通信を担うマルチコアファイバおよびファンアウト機能部品の開発, 三菱電線工業 pp.1-5, 109号, 2012年9月.
- 10 Optoscribe 製品カタログ "3 D OptoFanTM Multicore Fiber Fanout," <http://www.optoscribe.com/>
- 11 NICT プレスリリース 「世界初多数の光信号を同時に電気信号変換同時に電気信号変換する高速集積型受光素子を開発」<https://www.nict.go.jp/press/2017/09/14-1.html> (2017/9/14).
- 12 Toshimasa Umezawa, Takahide Sakamoto, Kouichi Akahane, Atsushi Matsumoto, Atsushi Kanno, Naokatsu Yamamoto, and Tetsuya Kawanishi, "10-GHz 32-pixel 2-D Photodetector Array for Advanced Optical Fiber Communications," SF21.1, Proc. of CLEO2017.
- 13 Toshimasa Umezawa, Takahide Sakamoto, Atsushi Kanno, Naokatsu Yamamoto, and Tetsuya Kawanishi, "High Speed 2-D Photodetector Array for Space and Mode-Division Multiplexing Fiber Communications," pp.3684-3692, J. Lightw. Technol., vol.36, no.17, Sept. 1, 2018.
- 14 Toshimasa Umezawa, Tadashige Sakamoto, Atsushi Kanno, Ken Kusakata, Kouichi Akahane, Atsushi Matsumoto, Naokatsu Yamamoto, and Tetsuya Kawanishi, "Dense SDM 32-pixel 2-D Photodetector Array," P1.SC2.29, Proc. of ECOC2017.



**梅沢俊匡** (うめざわ としまさ)

ネットワークシステム研究所  
 ネットワーク基盤研究室  
 主任研究員  
 博士(工学)  
 超高速光電気変換デバイス、サブシステム