

ビジョンチップを用いた屋内光無線 LAN

香川景一郎・太田 淳*

An Indoor Optical Wireless LAN Using a Vision Chip

Keiichiro KAGAWA and Jun OHTA

We present a new scheme of indoor optical wireless LANs based on a vision chip, which realizes a high-speed and compact communication module with large uplink capacity. We also show a newly developed vision chip for indoor optical wireless LANs with a function of detecting positions of communication nodes and a hub and capability of data acquisition at 4-ch \times 400-Mbps data rate.

Key words: indoor optical wireless LAN, vision chip, CMOS image sensor, BiCMOS technology, multi project

1. 屋内光無線 LAN とビジョンチップ

1.1 はじめに

われわれは、ビジョンチップ¹⁾を利用した小型かつ高速通信可能な赤外線通信モジュールと、それを利用した屋内光無線 LAN (local area network) システム²⁻⁴⁾を開発している⁵⁻⁷⁾。屋内光無線 LAN は、近赤外光による光無線通信方式を利用しており、光の高速通信・有線方式と比較した場合の施設の容易さ・情報の秘匿性などの特長から注目されている。空間光通信では、電波方式と異なり、周波数帯域割当の法規制がないため、広帯域通信が可能なのは大きな魅力である。現在、屋内光無線 LAN に向けて、100 Mbps 製品が市販されている。また、AV 機器間リンクでは、2003 年末の時点で、日本ビクターが 1.4 Gbps の高速通信をデモンストレーションしている。

屋内光無線 LAN は、上記のさまざまな利点をもつが、いまのところ大きな市場にはなっていない。これは、電波方式以上の高速通信と、装置の小型化・低価格化の両立などの課題が残っているからであると考えられる。また、光の高い指向性は、高速性、秘匿性と引き換えに、遮蔽物により通信が切断されるという不便さを生じる。しかしながら、近赤外光を用いた 1 対 1 通信規格である IrDA⁸⁾ のよ

うに広く普及している例もあり、Gbps 以上の広帯域無線通信方式として、赤外線通信は魅力的な選択肢である。上記の課題を克服することで、今後市場に広く受け入れられる可能性があると考えている。

1.2 ビジョンチップ

われわれは、受信デバイスにビジョンチップを用いた新しい屋内光無線 LAN 方式を提案している。広い意味でのビジョンチップとは、おもに VLSI (very large-scale integration) の製造に用いられている汎用 CMOS (complementary metal-oxide semiconductor) プロセスによりつくられる、高機能イメージセンサーと考えていただければ結構である。寄生素子として実現される p-n 接合によるフォトダイオード (PD) や、トランジスターのゲート直下に光電荷を蓄積するフォトゲートなどを用いることで、受光素子を LSI 上に集積することができる^{9,10)}。CCD (charge coupled device) 方式イメージセンサーと異なり、イメージセンサーの基本単位である画素内や画素アレイ周辺に、さまざまなアナログ、デジタル回路を付加することができる。そのため、ビジョンチップは、通常のイメージセンサーでは困難な高速処理や機能を実現することができる。

奈良先端科学技術大学院大学物質創成科学研究科 (〒630-0101 生駒市高山町 8916-5) *E-mail: ohta@ms.aist-nara.ac.jp

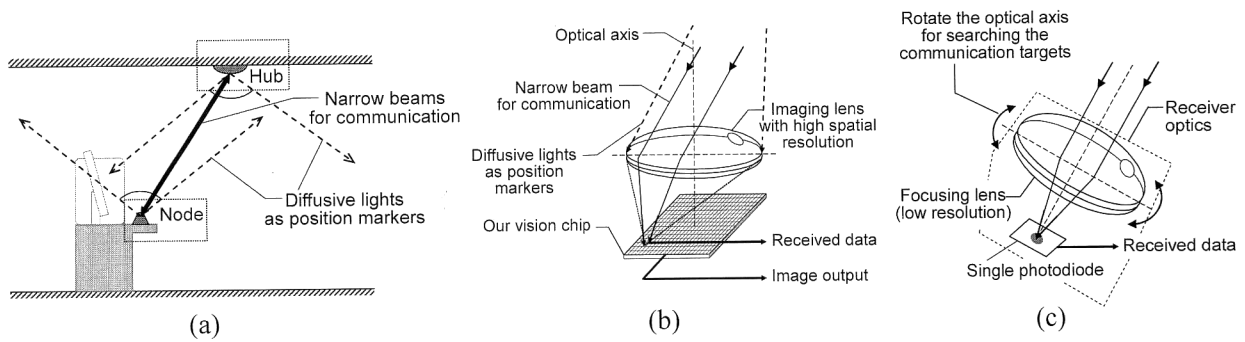


図1 光無線 LAN 用ビジョンチップを用いた屋内光無線 LAN 方式。(a) システム構成, (b) 受信光学系, (c) 従来例。

1.3 光無線 LAN 用ビジョンチップ

われわれは、通信ノードまたはハブの位置検出機能と、高速光信号受信回路をワンチップに集積したビジョンチップを用いることで、通信モジュールの小型化・高性能化をねらっている。図1(a)に、われわれが提案している屋内光無線 LAN のシステム構成を示す。この場合、PCなどに接続された通信モジュールどうしは、おもに天井に設置されるハブとよばれるデータの流れを制御する装置を介して通信する。通信モジュールはハブを中心としたネットワークの枝に位置するので、以降、通信ノードとよぶ。高速通信を行うには、受信パワーを高めるために、指向性の高い狭ビームを使うのが一般的である。このとき、送信器から受信器を正確にねらって、ビームを射出する必要がある。従来、受信側では、1個もしくはたかだか数個の受光素子が用いられており、信号光を受光素子内に収めるために、受信光学系の光軸を最適な方向に調整する必要があった。このため、図1(c)に示すように、既存システムは、送受信光学系の光軸方向を制御するための可動部をもっている。これは、装置の体積が大きくなる原因になる。

われわれの方式では、受信光学系に、撮像レンズと光無線 LAN に特化したビジョンチップを用いる。光無線 LAN 用ビジョンチップは、通常撮像機能（撮像モード）と、高速光信号の受信機能（通信モード）をあわせもつ。以下、ハブとノードを区別する必要がない場合、まとめて「端末」とよぶことにする。ここで、図1(a)に示すように、端末は自分の位置を示す拡散マーカ光を発しているものとする。ビジョンチップの有する撮像機能を利用してマーカ光の位置を検出し、その方向に向けて狭ビームを照射して通信を行う。図1(b)に、光無線 LAN 用ビジョンチップを利用した受信光学系と、その基本機能を示す。ビジョンチップを撮像レンズと組み合わせて用いる場合、異なる方向から到来した光は異なる画素で捉えられることになる。その結果、光学系の光軸の制御機構が不要になるため、

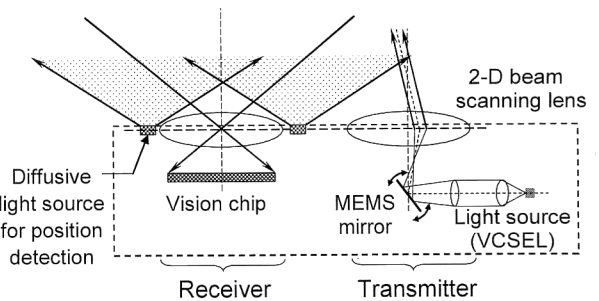


図2 通信モジュール構成。

位置検出時間を短縮でき、同時にモジュールを小型化できる。また、光無線 LAN 用ビジョンチップでは、複数端末からの光信号の同時受信が可能である。これは、総受信データレート的高速化に寄与し、特に複数のノードからデータが集中するハブにおいて有効である。

1.4 通信端末モジュール構成

図2に、通信端末モジュールの構成を示す。ハブも同様な構造をもつが、複数ノードにデータを送信する必要から、送信系を複数備えることが望ましい。方向制御機構は、レンズ口径を小さくできるため、受信光学系に比べて送信光学系のほうが小さい体積で実装できる。したがって、光無線 LAN 用ビジョンチップにより受信光学系を小さくできることは、通信装置全体の小型化に大きく寄与する。例えば、装置の小型化に適した VCSEL (vertical cavity surface emitting laser) を光源として用い、その射出方向を MEMS (micro-electro-mechanical systems) ミラーなどの小型偏向素子で制御する¹¹⁾。また、図に示すように、送信系に二次元スキャンレンズを用いることで、MEMS ミラーの振れ角の2倍以上にビームの偏向範囲を広げることができる¹²⁾。われわれは、MEMS ミラー振れ角を7倍に拡大し、 X, Y 各軸に対して全角 140° のビーム偏向角を実現できるスキャンレンズの設計に成功している。これは、高さ 1 m の位置に通信端末があるとした場合に、1辺 10 m、高

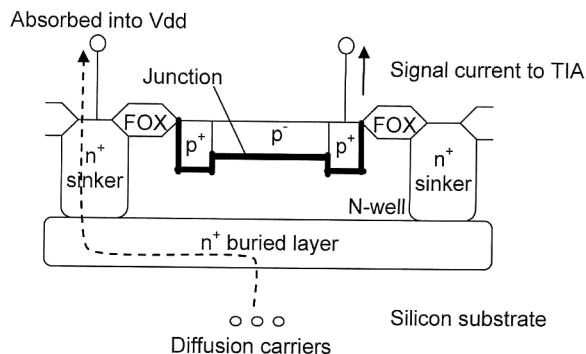
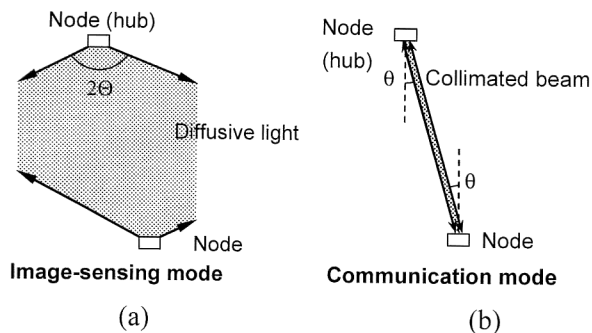


図4 BiCMOSプロセスによる高速フォトダイオード構造。

ズ $\Delta_x \times \Delta_y$ とすると、図3(c)に示されるビーム照射方向 (θ_x, θ_y) は、次式で表される。

$$(\theta_x, \theta_y) = (\arctan^{\Delta_x} / f, \arctan^{\Delta_y} / f) \quad (1)$$

撮像モードでは、通常のイメージセンサーと同様に、フォトダイオードで発生した光電流を1フレーム時間内で積分するため、高速に変調されたデータは受信できない。そこで、データ受信を行う場合、ビジョンチップにおいて光信号を受信している画素の動作を通信モードに切り替える。このモードでは、フォトダイオードを非蓄積モードで利用し、発生した光電流を積分せずに直接TIA (trans-impedance amplifier) で増幅する。通信モードは、蓄積モードに比べると増幅利得は低いが、高速信号を検出できる。

撮像モードで検出した通信端末位置は、1画素が見込む画角程度のあいまいさに加えて、送信、受信光学系の光軸間隔程度の誤差をもっている。対向端末の撮像レンズの入射瞳に正確にビームを入射するには、精密な位置検出とビーム射出角制御が必要となる¹³⁾。

2. 光無線LAN用ビジョンチップの設計・試作

2.1 BiCMOSプロセスの利用

光無線LAN用ビジョンチップの設計においては、拡散キャリアの影響を十分考慮する必要がある。ビジョンチップに入射した強い通信光の一部は、シリコン基板の深部まで到達し、そこで拡散キャリアとよばれる光電荷を発生させる。これは長い寿命をもって周辺に拡散するため、フォトダイオードの応答速度低下や、マーカー光を受信している画素の飽和の原因となる⁷⁾。

拡散キャリアの影響を低減するには、BiCMOS (bipolar complementary metal oxide semiconductor) プロセスが有効である¹⁴⁾。BiCMOSプロセスとは、MOSトランジスターに加えて、高速なNPNバイポーラトランジスターを利用できるプロセスのことである。図4に示す

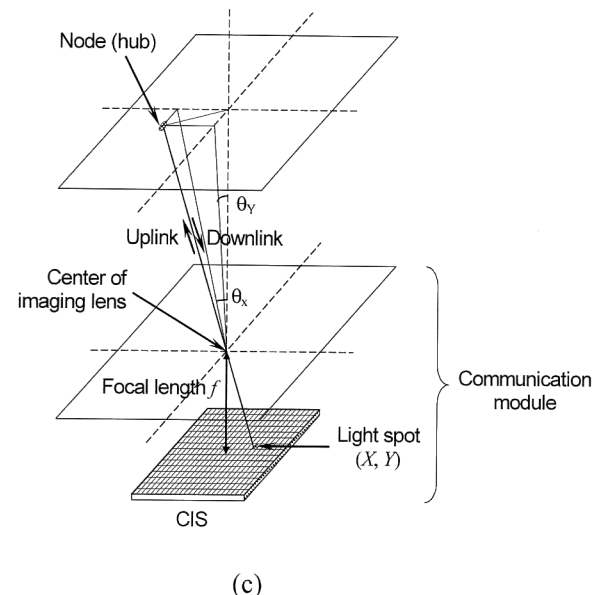


図3 ビジョンチップによる通信端末の位置検出と通信。(a) 拡散光を用いた位置検出、(b) 狭ビームを用いた通信、(c) 検出位置と通信用狭ビームの射出角。

さ3mの部屋を十分にカバーできる角度である。

1.5 端末位置の検出と通信

上述のように、光無線LAN用ビジョンチップは、撮像モードと通信モードをもつ。図3に、通信路確立過程におけるそれぞれの動作モードの用途を示す。初期状態では、ハブ、ノードは互いの位置を知るために、対向端末(ハブまたはノード)が存在する十分広い範囲に向けて、指向性の低い拡散マーカー光を発する。このとき、対向端末が受信する光量は非常に少ないため、撮像モードによりマーカー光を検出する。撮像モードでは、通常のイメージセンサーと同様に、フォトダイオードを蓄積モードで用いることで、高感度に画像を得る。取得した画像に対し、点滅光源の検出などの画像処理を行い、通信端末位置を得る。次に、検出した方向に向けて通信用ビームを射出する。この場合、指向性の高い狭ビームを用いて、対向端末における受信光量を高めるのが高速通信には有効である。検出位置の画素座標を (X, Y) 、レンズの焦点距離を f 、画素サイ

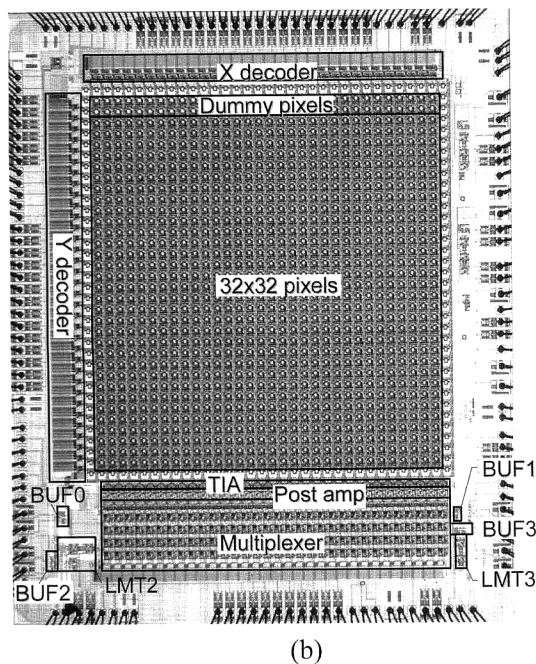
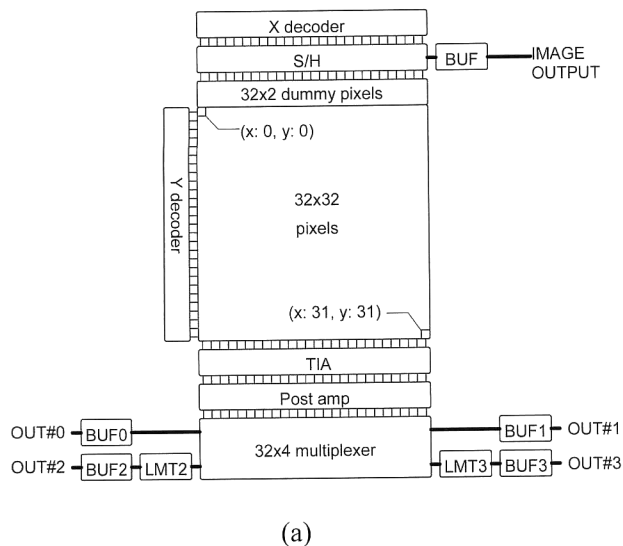


図5 (a) 光無線 LAN 用ビジョンチップの構成, (b) 顕微鏡写真. LMT: リミッター (二値化) 回路, BUF: 出力バッファ。

ように, NPN トランジスタに特有の埋め込みコレクター層とシンカー層により, 拡散キャリアを遮断し, フォトダイオードの応答速度を高めるとともに画素間クロストークを低減することができる. 文献 15 では, データレート 5 Gbps での光信号受信が報告されている.

2.2 ビジョンチップの構造と機能

図 5(a) に設計・試作したビジョンチップの構成と顕微鏡写真, 表 1 にチップの諸元を示す. ビジョンチップという名称からは, 高度な処理回路をチップ上に搭載しているという印象を受けるかもしれない. しかし, 機能性とチップ面積はトレードオフの関係にあることに注意しなければい

表 1 光無線 LAN 用ビジョンチップの諸元.

テクノロジー	0.8 μm BiCMOS (2 層ポリシリコン, 2 層メタル)
チップサイズ	5.8 \times 6.9 mm ²
画素数	32 \times 32
画素サイズ	125 \times 125 μm^2
フォトダイオード構造	N-well/P-base (埋め込みコレクターおよびシンカーあり)
フィルファクター	7%
電源電圧	5 V (イメージセンサー部), 6 V (光信号受信部), 9 V (フォトダイオードの逆バイアス電圧)

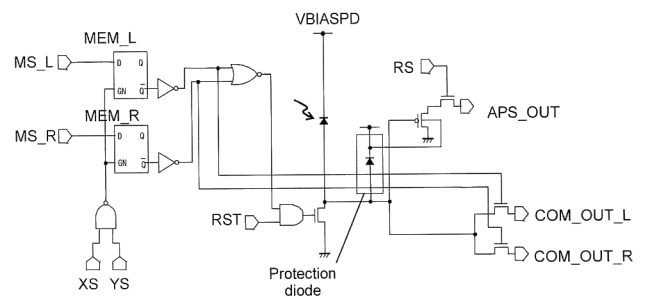


図 6 画素回路.

けない. 光無線 LAN 用ビジョンチップでは, 画像処理は外部のプロセッサで行うと割り切って, 機能を撮像と高速データ受信に的を絞ることにより, 画素サイズの縮小(すなわち多画素化)をねらった. 試作には, 0.8 μm BiCMOS プロセスを用いた. 受光素子として, 上記の拡散キャリア遮断層を有する高速フォトダイオードを用いた. このビジョンチップは, 32 列分の増幅回路を備える. 原理的には 32 の信号を同時に出力できるが, ピン数と消費電力の制約から, 32 \times 4 マルチプレクサーを用い, 4 つの信号を選択して出力できるようにした. つまり, 4 つの端末からの光信号を同時に受信することができる. また, 結像された光スポットは複数の画素により捉えられることが想定されるため, ビジョンチップには複数画素で発生した同一信号による光電流を合成する機能がある.

図 6 に画素回路を示す. 通信モードにおいて, 画素は光電流の合成のために, 出力先として左右の出力信号線 (COM_OUT_L, R) のいずれかを選ぶことができる. 光電流の出力先を記憶するために, 画素は 2 bit のメモリー (MEM_L, R) をもち, HIGH に設定されている側の信号線にフォトダイオードで発生した光電流を出力する. 画素メモリーのうちいずれかが HIGH の場合には, この画素は通信モードで動作することになる. 画素メモリーがともに LOW の場合, その画素は撮像モードで動作し, 光電流はフォトダイオードの接合容量に蓄積される. その結果は読み出しアンプ回路により APS_OUT に出力され, いっ

表2 光無線 LAN 用ビジョンチップの特性.

イメージセンサー部	
ダイナミックレンジ	49.2 dB
光感度	2.38×10^5 V/mW · s @ $\lambda = 830$ nm
飽和レベル	580 mV
画素間クロストーク	< -44.6 dB
光信号受信部	
データレート (NRZ)	400 Mbps (最小), 800 Mbps (最大)
ダイナミックレンジ 利得	16.9 dB (最小 30 μ W, 最大 210 μ W) 19.7 V/mW (最小), 211.1 V/mW (最大) @ $\lambda = 830$ nm
ビットエラーレート	$< 10^{-12}$ @ 30 μ W ~ 40 μ W, 400 Mbps, $\lambda = 650$ nm
画素間クロストーク	< -58.1 dB
消費電力	111.6 mW/ch (TIA+Post amp. 21 mW, Lmt.+Buffer 90.6 mW)
出力信号レベル	900 mV
ランダムノイズ	5.34 mV rms
イメージセンサー部 からのノイズ	700 mV p-p

たん S/H (sample-hold) 回路に記憶されてから、外部に読み出される。画像読み出しや、画素メモリー設定のための画素選択には X, Y デコーダー (図 5(a)) を利用する。

通信モードにおける増幅回路は、列ごとに設けた TIA とポストアンプ、マルチプレクサー後に設けたリミッター回路 (二値化回路) と出力バッファからなる¹⁶⁾。これらの回路は、高速化のためにバイポーラートランジスターを用いている。4 段構成とすることで、大きな利得を実現している。

2.3 ビジョンチップの動作実験結果

表 2 に、試作した光無線 LAN 用ビジョンチップの諸特性を示す。また、図 7 に撮像モードにおける撮像例を示す。拡散キャリア遮断構造を用いることにより、隣接画素間でのクロストークは測定限界の -44.6 dB 以下となり、非常に低く抑えることができた。そのため、図 7(b) に示すように、強いレーザー光源が視野内に入っている場合でも、周辺画素を飽和させることがなく、望ましい特性が得られている。撮像においては、相関二重サンプリング¹⁰⁾を用いることで、固定パターンノイズを低く抑えることができた。図 8 には、通信モードにおける受信信号波形を示す。擬似ランダム信号により振幅変調したレーザー光をビジョンチップ上に結像し、その信号を受信している画素を通信モードに切り替えて測定を行った。実験では、光学系のセットアップの容易さを考えて 650 nm のレーザー光源を用いたが、830 nm 程度の近赤外光を用いた場合も同様の結果が得られることを確認している。図 8(a) に示すように、入射光量 30 μ W、ビットレート 400 Mbps に対して、良好なアイパターンが得られている。大きい入射光量に対して

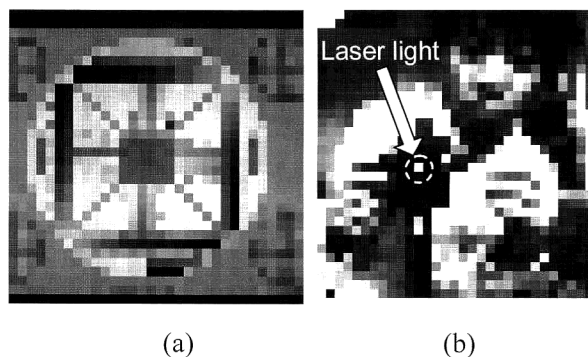


図7 撮像モードによる撮像例。(a) テストチャート, (b) 光源.

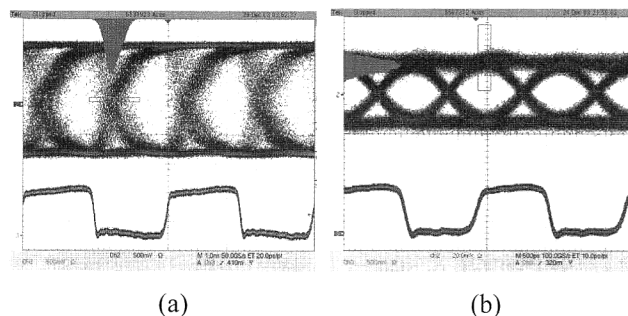


図8 アイパターン。(a) OUT#3@入射光量 30 μ W (H : 1.0 ns/div, V : 500 mV/div), (b) OUT#0@入射光量 710 μ W (H : 0.5 ns/div, V : 20.0 mV/div).

は、増幅利得を下げることで、さらに高いデータレートが得られる。図 8(b) に示すように、入射光量 710 μ W に対して、データレート 800 Mbps でアイが開いていることがわかる。

2.4 今後の課題と方向性

今後、以下の課題を解決していく必要がある。① 撮像モードの駆動用デジタル回路から、通信用増幅回路に混入するスパイクノイズの除去、② 受信可能な通信光のダイナミックレンジの拡大 (検出可能な最低入射光量の引き下げ)、③ 通信速度の高速化。われわれは、0.18 μ m CMOS プロセスなどの微細プロセスを利用することで、課題①~③を解決し、1 チャンネルあたり 1 Gbps 以上の受信能力をもつ光無線 LAN 用ビジョンチップが実現できると考えている。①の課題を解決するには通信モード用増幅回路の完全差動化が有効であるが、その結果、回路規模が大きくなるため、微細プロセスの利用が不可欠である。微細プロセスでは一般にフォトダイオードの受光感度が悪くなる傾向があるが、多くの微細 CMOS プロセスでは、ディープ N-well とよばれる、基板分離のための深い N-well が提供されている。これを用いることで、BiCMOS プロセスによる高速フォトダイオードに類似した構造を実現でき、高い

応答速度が得られると同時にフォトダイオードの接合位置を深くできることから、光感度を改善できると考えている。フォトダイオードの受光感度を高めると同時に、受光回路に高速なトランジスタを用いることで増幅回路のノイズを低減し、課題②、③を解決できる。また、今後、改良した光無線 LAN 用ビジョンチップを用いた実証システムの開発も進めていく予定である。

本研究は、通信・放送機構が実施した「産学連携支援・若手研究者支援型研究開発制度」の一環として行ったものである。また、本研究の一部は、研究成果活用プラザ大阪育成研究事業の中で行ったものである。本稿で紹介したビジョンチップの設計は、東京大学大規模集積システム設計教育研究センターの協力で行われたものである。この場を借りて、深く感謝いたします。最後に、光無線 LAN 用ビジョンチップの設計に尽力いただいた浅津博昭氏（現ローム株式会社）と、スキャンレンズの設計に多大な貢献をいただいた川上智朗氏（現キヤノン株式会社）に深く感謝します。

文 献

- 1) A. Moni: *Vision Chips* (Kluwer Academic Publishers, New York, 1999).
- 2) J. R. Barry: *Wireless Infrared Communications* (Kluwer Academic Publishers, New York, 1994).
- 3) オプトロニクス編集部：光空間通信ネットワーク技術資料集 (オプトロニクス, 2000).
- 4) 廣本宣久：“高速赤外空間通信技術の展望”，*光学*, **27** (1998) 423-429.
- 5) 香川景一郎，西村智博，平井隆夫，太田 淳，布下正宏，山崎康司，山田雅司，杉下正蔵，渡辺國寛：“光無線用高速ビジョンチップの開発”，*電子情報通信学会技術研究報告*, **101**, No. 283 (2001) 31-36.
- 6) K. Kagawa, T. Nishimura, Y. Yamasaki, H. Asazu, T. Kawakami, J. Ohta, M. Nunoshita and K. Watanabe: “Proposal and preliminary experiments of indoor optical wireless LAN based on a CMOS image sensor with a high-speed readout function enabling a low-power compact module with large uplink capacity,” *IEICE Trans. Commun.*, **E86-B** (2003) 1498-1507.
- 7) 香川景一郎，浅津博昭，川上智朗，西村智博，池内隆志，藤内亜紀子，太田 淳，布下正宏，渡辺國寛：“イメージセンサーを応用した空間光伝送用受光デバイスの設計・試作”，*映像情報メディア学会誌*, **58** (2004) 334-343.
- 8) 松本充司：“赤外線通信インタフェースの標準規格”，*電子情報通信学会誌*, **80** (1997) 461-469.
- 9) E. R. Fossum: “CMOS image sensors: Electronic camera-on-a-chip,” *IEEE Trans. Electron. Devices*, **44** (1997) 1689-1698.
- 10) 米本和也：*CCD/CMOS イメージ・センサーの基礎と応用* (CQ 出版社, 2003).
- 11) H. Miyajima, N. Asaoka, M. Arima, Y. Minamoto, K. Murakami, K. Tokuda and K. Matsumoto: “A durable, shock-resistant electromagnetic optical scanner with polyimide-based hinges,” *J. Microelectromech. Syst.*, **10** (2001) 418-424.
- 12) 川上智朗，香川景一郎，西村智博，浅津博昭，太田 淳，布下正宏，渡辺國寛：“赤外光無線通信用 2 次元スキャンレンズの設計と通信路確立実験への適用”，*第 28 回光学シンポジウム予稿集* (2003) pp. 101-102.
- 13) 香川景一郎，川上智朗，浅津博昭，池内隆志，藤内亜紀子，太田 淳，布下正宏，渡辺國寛：“CMOS イメージセンサーを用いた屋内光無線 LAN システム II”，*電子通信情報学会総合大会*, B-10-110 (2004) p. 481.
- 14) T. K. Woodward and A. V. Krishnamoorthy: “1-Gb/s integrated optical detectors and receivers in commercial CMOS technologies,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum. Electron.*, **5** (1999) 146-156.
- 15) J. Wieland, H. Duran and A. Felder: “Two-channel 5 Gbit/s silicon bipolar monolithic receiver for parallel optical interconnects,” *Electron. Lett.*, **30** (1994) 358-359.
- 16) B. Razavi: *Design of Integrated Circuits for Optical Communications* (McGraw-Hill, Boston, 2003).

(2004 年 5 月 13 日受理)