

10Gbps光通信 トランスインピーダンスアンプ

池田 等 大島 知之 角谷 昌紀
市岡 俊彦 木村 有

インターネットやイントラネットの急成長を背景に、大容量通信の需要が高まっており、10Gbps高速光通信システムの普及が急ピッチで進んでいる。また、世界的なデータ・トラフィックの増大は、従来の音声網（公衆網、テレコム）の大容量化を促進させるに留まらず、データ通信の新たなネットワーク（データコム）市場の拡大を加速させている。

このような大容量光通信システムでは、10Gbps時分割多重（TDM:Time Division Multiplexing）方式が既に実用化されているが、今後、波長分割多重（WDM:Wavelength Division Multiplexing）方式との併用などの本格的導入に向け、システムに用いられるICの更なる高性能化、低消費電力化、単一電源化が求められている¹⁾。

トランスインピーダンスアンプ（Transimpedance Amplifier）（以下、TIAと略す）は、この光通信システムを受信系に用いられるICである。光ファイバを伝送路として送られてくる光信号は、まずフォトダイオード（Photodiode）（以下、PDと略す）により光-電流変換される。TIAは、この電流信号をインピーダンス変換、増幅し、電圧信号として出力するICである。

TIAにおいては、低消費電力化、単一電源化に加え、昨今、急増しているデータコム等の短距離伝送への適用を目的に、大入力電流にも対応するTIAの実現が望まれている。

我々は、これまでに、+3.3V、-2.0V二電源仕様のTIAを開発してきている。今回、新たにTIAの-5V単一電源化を図ると同時に、チップ内に自動利得制御（Automatic Gain Control）（以下、AGCと略す）回路を設けることにより、高感度で広ダイナミックレンジが得られるTIAを開発した²⁾。本稿では、この-5V単一電源仕様のAGC付きTIAの回路設計や評価結果について述べる。

入力にはPDが接続され、光-電流変換された電流信号がICに入力される。ICは、三段のシングルエンド増幅回路と初段の入出力部に接続させた帰還抵抗（Rf）で構成されている。広帯域を実現させるため、初段の増幅には、カスコード回路を用いた。このカスコードバイアス（Vcas）はチップ内の抵抗分割により与えられる。また、単一電源駆動を実現させるため、増幅段の負電源側にはレベルシフトダイオードを設けた。

TIAの入力電流振幅（lin）と出力電圧振幅（Vout）と帰還抵抗（Rf）の間には、 $V_{out} = i_{in} \cdot R_f$ の関係があり、Rfの値を大きくすると微小な電流に対しても十分な感度、つまり十分な出力振幅が得られる。しかし、Rfの値が大きいと、入力電流振幅が大きくなった場合、出力波形が飽和し、歪んでしまうため、広ダイナミックレンジを得ることは困難となる。高感度を維持しつつ、大信号入力時の特性を向上させ、広ダイナミックレンジを実現させるため、本TIAでは、帰還部分にAGC回路を挿入した。

図2に、TIA-ICに内蔵されているAGC回路図を示す。スイッチの役目をする帰還用FET（Ffs）、サブの帰還抵抗（Rfs）、位相補償用のキャパシタ（Cfs）が、図のように帰還抵抗（Rf）に対して並列に接続されている。別に設けたバイアス検出回路が初段の出力バイアスを検出し、増幅した後、帰還用FET（Ffs）にバイアス（Vagc）

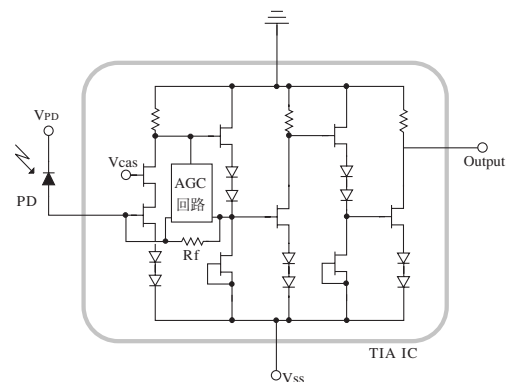


図1 トランスインピーダンスアンプの回路図

回路設計

図1は、今回開発したTIA回路の概略図である。TIAの

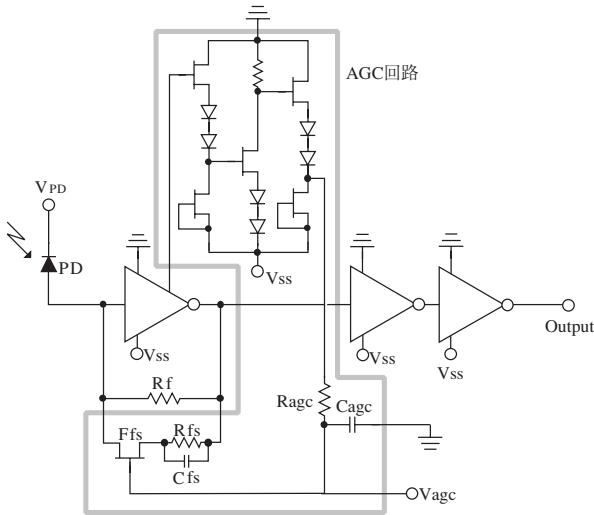


図2 AGC回路の回路図

を与える。PDに入力する光電力が小さいときには、V_{agc}のバイアス値は低く、FET (F_{fs}) は完全に閉じており、TIAの帰還抵抗はR_fにより決まる。入力光電力が大きくなるに従い、V_{agc}のバイアス値が上がりはじめ、入力光電力にして-5dBm以上になるとFET (F_{fs}) が徐々に開きはじめ、R_f、R_{fs}およびF_{fs}から成る帰還抵抗の合成抵抗値が低くなり、トランスインピーダンス利得を減少させるように機能する。

周波数が数GHz以下の場合には、初段増幅部の入出力では位相が反転しており、初段増幅部と帰還抵抗から成る帰還ループは負帰還となる。しかし、周波数が10GHz付近の高周波になってくると、図2に示した初段増幅部、帰還用FET (F_{fs}) と帰還抵抗 (R_{fs})、配線パターン長等から成る帰還閉ループの遅延が無視できなくなり、その帰還は正帰還に近づく。一般的に正帰還状態では、帰還アンプは不安定な状態になり、正の帰還量が多くなると、発振が生じたりする。図2に示した回路では、入力光電力が増えると、帰還用FET (F_{fs}) が開きだし、帰還量が多くなる。高周波領域でのこの正帰還を補償するため、帰還用キャパシタ (C_{fs}) が挿入されている。

AGC機能の時定数は、IC内蔵の抵抗 (R_{ags} : 6kΩ) と、V_{agc}端子を利用しIC外部に設けるキャパシタの容量により決まる。IC内部にもキャパシタ (C_{ags} : 20pF) を設けており、外部キャパシタを使用しない場合、その時定数は120nsecとなる。

広帯域、低ノイズTIAを実現するために、FETには0.1μmゲート長のInGaAs/AlGaAs系P-HEMT (Pseudomorphic High Electron Mobility Transistor)

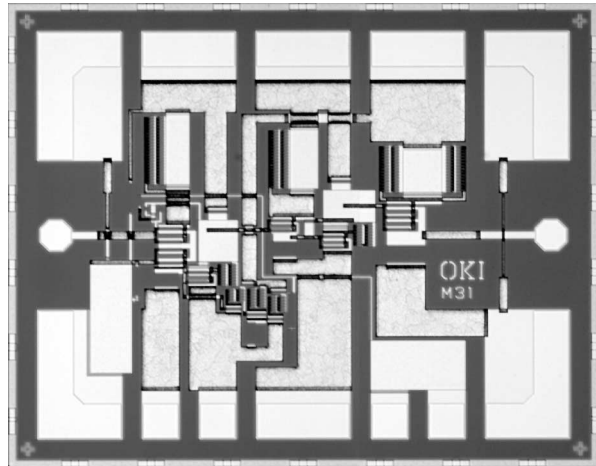


図3 TIA-ICのチップ写真

を用いた³⁾。このFETの遮断周波数は85GHz、閾値電圧は-0.5V、トランスコンダクタンスは600mS/mmであった。図3は、作製したTIA-ICのチップ写真である。チップサイズは1.6mm×1.3mmである。

評価結果

作製したTIAは、セラミック基板上にPIN-PDとともに実装し、光信号をPDに入力することにより評価した。PDの変換効率、光学的な損失込みで0.8A/Wであった。また、高周波領域での電源のインピーダンスを低く抑えるため、電源ラインには220pFおよび220pFのデカップリング用チップコンデンサを設けた。本TIAの-5V電源印加時の消費電力は500mWであった。

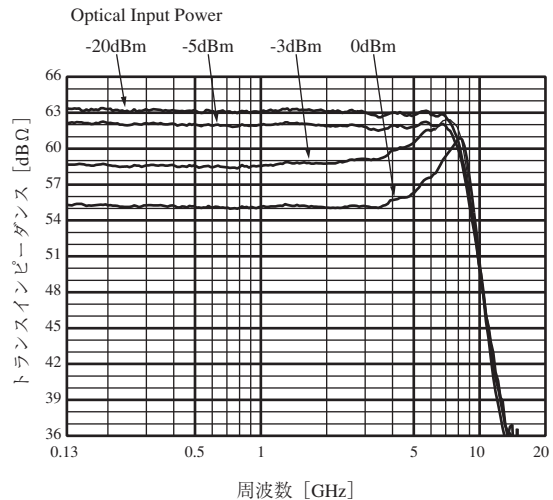


図4 トランスインピーダンスの周波数特性

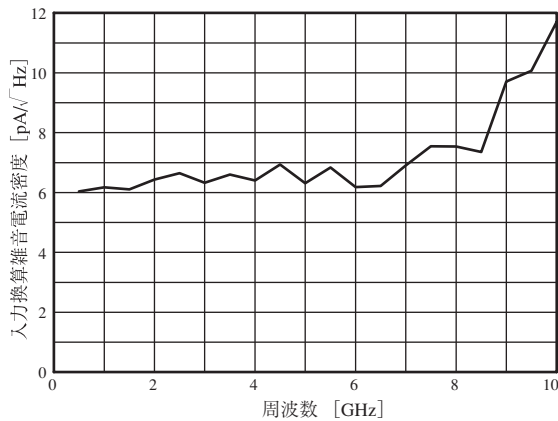


図5 入力換算雑音電流密度の周波数特性

本TIAのトランスインピーダンス利得（以下、 Z_t と略す）の周波数特性を図4に示す。入力させる光電力は、 -20dBm 、 -5dBm 、 -3dBm 、 0dBm と変化させた。 -20dBm の小信号入力時の Z_t は $63\text{dB}\Omega$ ($1.4\text{k}\Omega$)、 -3dB 帯域は 8.0GHz であった。入力光電力が -5dBm 以上になると Z_t が減少し始め、大入力に対して、AGC回路が有効に機能していることがわかる。

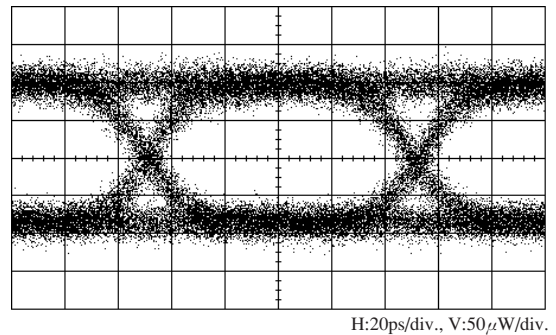
また、入力光電力が増加するにつれ、周波数特性の7~ 8GHz 付近にピークを生じるようになる。この原因は、大入力に対して帰還用FET (Ffs) が開き、帰還閉ループにこのFET分の遅延が加わると同時に、合成帰還抵抗の減少により帰還量が増加し、帰還が正帰還に近づいたためと考えられる。しかし、帰還用キャパシタ (Cfs) を設けた効果により、このキャパシタを設けない回路に比べ、そのピークは半分以下に抑制されている。

図5に、本TIA-ICの入力換算雑音電流密度の周波数特性を示す。 8GHz 以下の周波数領域での入力換算雑音電流密度の平均値は、 $6.5\text{pA}/\text{rtHz}$ と極めて良好なものであった。

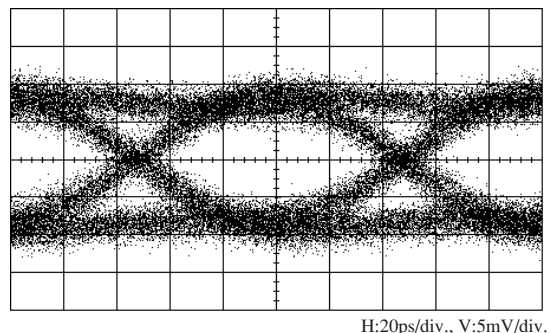
次に、 10Gbps の光信号を用いた測定結果を示す。測定には、31段の疑似ランダム・ビット・ストリーム (PRBS) を用いた。図6 (a) は、測定に用いた光信号の、光電力 -10dBm 時の波形である。図6 (b) ~ (d) に、光信号の入力電力を -20dBm 、 -5dBm 、 0dBm と変化させたときの、TIAの出力波形を示す。 -20dBm の小信号入力時においても、良好にアイ開口した波形が得られた。また、 -5dBm 光信号入力時と、 0dBm の波形を比較すると、両者の振幅がほぼ同じであることから、AGCが十分に機能していることがわかる。

図7、8に、ビット誤り率の測定結果を示す。PIN-PDの変換効率 $0.8\text{A}/\text{W}$ 時、ビット誤り率 10^{-9} 以下となる最小受光感度は -21.2dBm であった。また、最大光入力

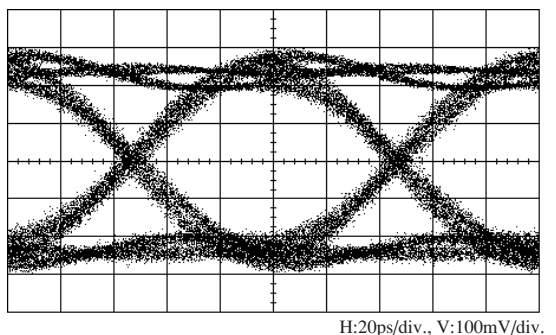
(a) 入力光信号波形 (-10dBm)



(b) 出力波形 (-20dBm 光信号入力時)



(c) 出力波形 (-5dBm 光信号入力時)



(d) 出力波形 (0dBm 光信号入力時)

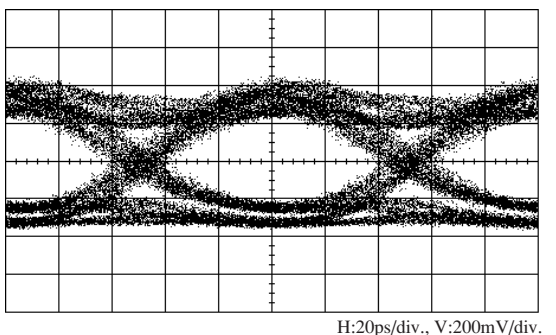


図6 トランスインピーダンスアンプの出力波形

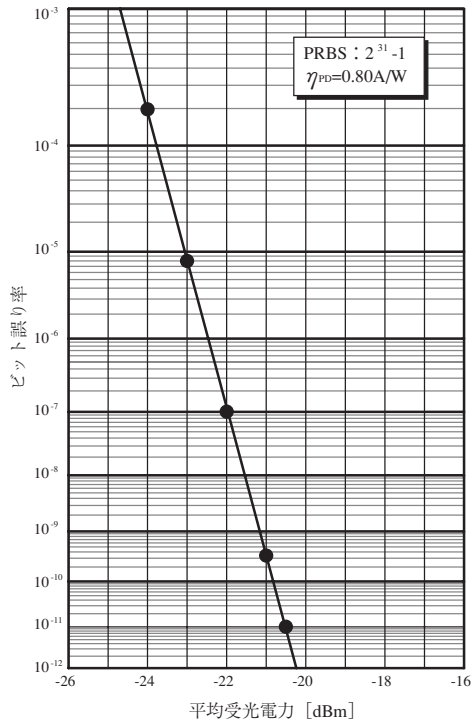


図7 最小受光感度特性

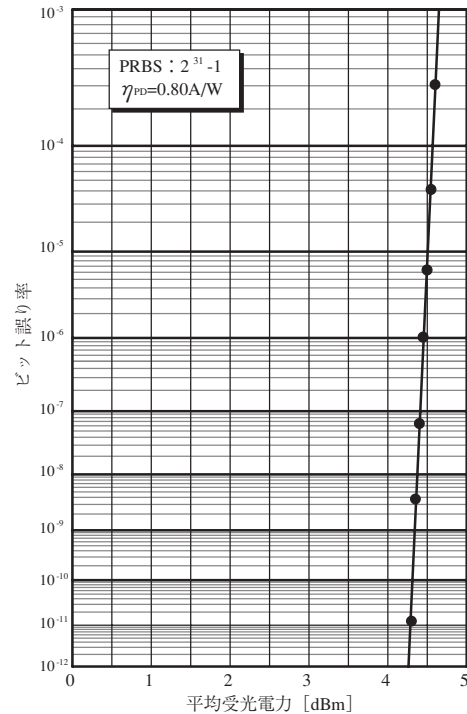


図8 最大光入力特性

+4.3dBmであった。この結果から、本TIA-ICは25.5dBの広いダイナミックレンジを有することが確認できた。

あとかぎ

今回開発した-5V単一電源駆動、10Gbps光通信用TIAについて概要を述べた。トランスインピーダンスは63dBΩ、帯域8.0GHz、入力換算雑音は6.5pA/rtHz、最小受光感度は-21.2dBmと極めて良好な特性を有している。また外部調整を必要としないAGC機能の搭載により、25.5dBの広ダイナミックレンジを実現した。これらの優れた諸特性を有する本TIAは、高速光通信システムのキーデバイスとしての応用が大きく期待される。◆◆

参考文献

- 1) 阿部, 三村, 茅根: 光・マイクロ波半導体応用技術, 第1版, p305, 1996 サイエンスフォーラム
- 2) Ikeda et al.: AGC TIA with low noise and wide input dynamic range, IEEE GaAs IC Symposium Tech. Digest, p193, 2000
- 3) Ohshima et al.: Improvement of 0.1 μm-gate InGaAs/AlGaAs HEMT performance by suppression of electro-chemical etching in deionized water, Solid-State Electronics 43, p1519, 1999

● 筆者紹介

- 池田 等: Hitoshi Ikeda. コンポーネント事業部 III-Vデバイス部 GDチーム
 大島知之: Tomoyuki Ohshima. コンポーネント事業部 III-Vデバイス部 DPチーム
 角谷昌紀: Masanori Tsunotani. コンポーネント事業部 III-Vデバイス部 DPチーム
 市岡俊彦: Toshihiko Ichioka. コンポーネント事業部 III-Vデバイス部 GDチーム
 木村 有: Tamotsu Kimura. コンポーネント事業部 III-Vデバイス部