

10 Gbps用APDレシーバモジュール

APD Receiver Module for 10 Gbps High-speed Data Communication

あらまし

インターネットのネットワークを支える幹線系光通信は、2.4 Gbpsから10 Gbpsへと高速大容量化が進んでいる。富士通カンタムデバイスでは、この度10 Gbpsのシステム用受光デバイスとして、新たに光吸収層となだれ増倍層を分離したアバランシェフォトダイオード(APD)を開発し、量産化に成功した。さらに、APDと広帯域GaAs HBTプリアンプICを小型パッケージに集積した、感度・広帯域のAPD/プリアンプレシーバモジュールも他社に先駆けて製品化した。

本稿では、これら開発した基幹光通信用の10 Gbps超高速APDおよびAPD/プリアンプレシーバモジュールを紹介する。

Abstract

The transmission speed of trunk-line optical-fiber systems for the Internet has been increased from 2.4 Gbps to 10 Gbps. For the 10 Gbps system, Fujitsu Quantum Devices Ltd. has developed and mass-produced a high-performance avalanche photodiode (APD) in which the optical absorption layer is separated from the avalanche multiplier layer. Also, Fujitsu was the first to market a highly sensitive, wide-bandwidth APD/preamplifier receiver module. The module is physically small and contains a wide-bandwidth heterojunction bipolar transistor (HBT) preamplifier IC. This paper describes the APD and APD/preamplifier receiver module for 10 Gbps trunk-line optical network systems.



佐藤敬二 (さとう けいじ)

富士通カンタムデバイス(株)光デバイス事業部第二技術部 所属
現在、光通信用受光素子の開発に従事。



花輪育夫 (はなわ いくお)

富士通カンタムデバイス(株)光デバイス事業部第二技術部 所属
現在、光通信用受光素子の開発に従事。



小林正宏 (こばやし まさひろ)

富士通カンタムデバイス(株)光デバイス事業部第二技術部 所属
現在、InGaAs-APDなどの受光素子および光加入者系発光デバイスの研究・開発に従事。

ま え が き

インターネットの時代を迎え、大容量・高速光通信の需要が高まっており、現在、10 Gbpsの光通信システムが主流となりつつある。これら通信システム技術に不可欠である光半導体受光素子には、10 Gbpsの高速動作、高品位伝送特性、小型化、高信頼性、低コストが要求されている。

本稿では、これらの要求に応えるために、化合物半導体の技術を集約して開発・量産化した基幹光通信用の10 Gbps超高速InGaAs APD(Avalanche Photodiode)、およびGaAs HBT(Heterojunction Bipolar Transistor)を組み合わせたAPD/プリアンプレーシーバモジュールを紹介する。

広帯域 InGaAs-APD

● APDチップ構造

InP/InGaAs APDを10 Gbpsで動作させるためには、受光領域の小径化による単なる低容量化(100 fF程度)だけでなく、光励起されたキャリアが高速で移動し、なだれ増倍が極めて短時間に立ち上がるように、チップ内部の各半導体層のキャリア濃度や層厚を最適化しなければならない。図-1は、10 Gbps用InGaAs-APDの断面構造である。シングルモードファイバのコア径と同程度の微少な受光領域に信号光を低損失で照射できるように、裏面入射構造で、InPモノリシックレンズを光入射面(基板裏面)に形成している。

APD内部の半導体層構造は、基板側から n^+ -InPバッファ層、 n^- -InGaAs光吸収層、InGaAsPヘテロ緩和層、

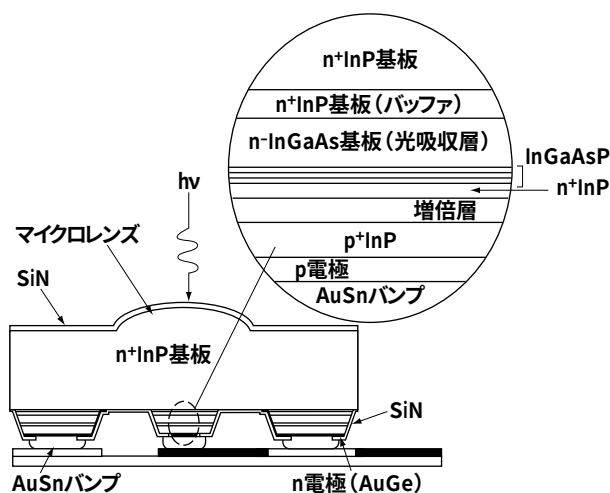


図-1 InGaAs APD構造
Fig.1-Structure of InGaAs APD.

n^+ -InP電界降下層と続いた後、最適設計された増倍層を有する構造となっている。これら各層は、厚さおよび不純物濃度の制御性に優れたMOVPE(有機金属気相成長法)によって形成される。APDの高速化に対しては、InGaAs光吸収層の厚さを1 μm 以下に薄くしてキャリアの走行時間を短くする必要があり、その結果、受光感度の低下といったトレードオフが発生する。本構造では、InGaAs光吸収層で吸収しきれなかった入射光をp電極により反射させ、再びInGaAs層で吸収させる折り返し効果を利用して受光感度を60%以上(入射波長1,550 nm)としている。

10 Gbps用APDでは、微少能動領域からの信号引き出しと高周波特性を考慮して、フリップチップ実装構造を採用した。ボンディング時のストレス緩和とチップ実装強度を確保するために、Auメッキ/AuSnを積層した柱構造のバンプとなっており、アルミナキャリア基板にフリップチップ・ボンディングできる。

● 電気・光特性および信頼性

(1) 電流-電圧特性

APDの電流-電圧特性を図-2に示す。図中上部実線は光電流を示し、図中下部実線は暗電流を示す。降伏電圧は約26 Vであり、その90%の印加電圧において100 nA程度の低暗電流化を実現している。上部実線で示されるカーブは、APDの増倍特性も示しており、増倍率40以上が得

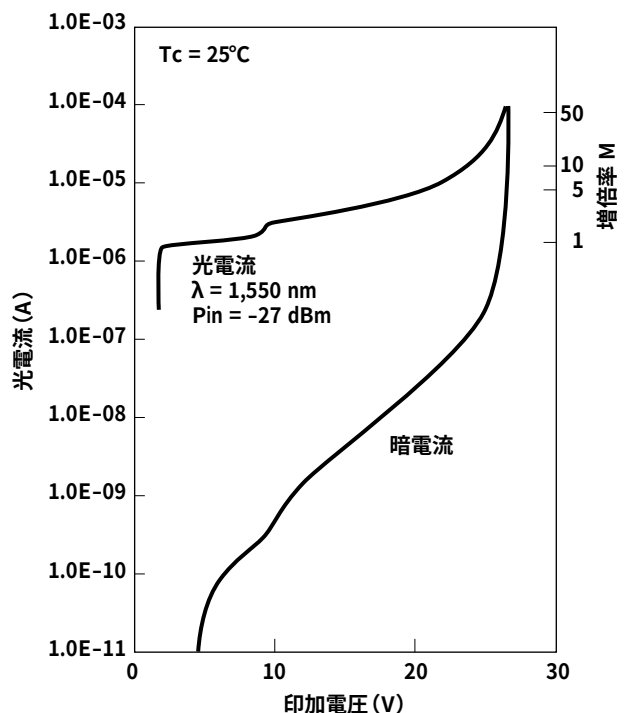


図-2 APD電流-電圧特性
Fig.2-Dark current and photocurrent-reverse voltage characteristics of APD.

られている。これは、局所的なブレイクダウンがなく、増倍領域全体にわたって均一に増倍が生じていることを意味している。

(2) 周波数特性

本素子の-3 dB遮断周波数 f_c の増倍率依存性を図-3に示す。CR時定数およびキャリア走行時間の低減により、増倍率 $M = 3 \sim 10$ の広い範囲にわたって、 $f_c \sim 10$ GHzの高速応答性が得られている。APDの周波数特性は、上述のCR時定数およびキャリア走行時間以外に、APD特有のパラメタとして増倍立上がり時間の影響を受ける。増倍立上がり時間とは、ある一定の増倍率に達するまでの時間のことを言い、APDのGB積(利得・帯域幅積)を決定する重要な設計パラメタである。作成した素子では、増倍層幅を最適化することにより、増倍立上がり時間を低減し、増倍率 $M = 10$ 付近で80 GHz以上の高GB積を得ている。

(3) 長期信頼度

長期信頼度試験として実施されたエージング試験結果を図-4に示す。エージングに用いた素子は、初期故障モードを除くために、雰囲気200°C、逆方向電流100 μ A、48時間の初期スクリーニングを実施してある。エージング条件は、雰囲気150°C、逆方向電流100 μ A(一定)であり、降伏電圧VBと暗電流(印加電圧はVBの90%)の経時変化をそれぞれ示した。約5,000時間の長期にわたって降伏電圧、暗電流ともにほとんど変動がなく、高い信頼性を有していることが分かる。InP系受光素子チップは、動作温度に対する活性化エネルギー(E_a)が約1.3 eVであること

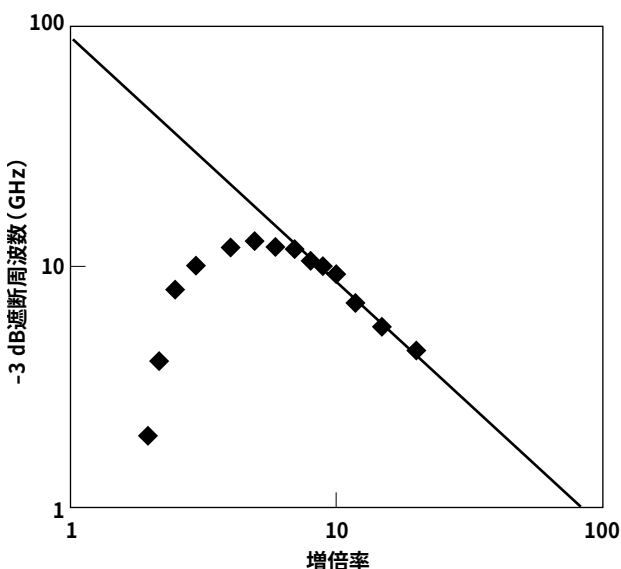


図-3 増倍率-遮断周波数特性

Fig.3-Cut-off frequency-multiplication factor characteristics of APD.

が求められており、上記のデータを平均動作状態40°Cに換算すると、平均故障寿命(MTTF) = 2.0×10^6 年 ($\sigma = 1$)が得られる。

APD レシーバモジュール

広帯域InGaAs APDチップとGaAs HBT(ヘテロ接合バイポーラトランジスタ)プリアンプICを小型バタフライパッケージにハイブリッド集積したレシーバモジュールを製品化した(図-5)。

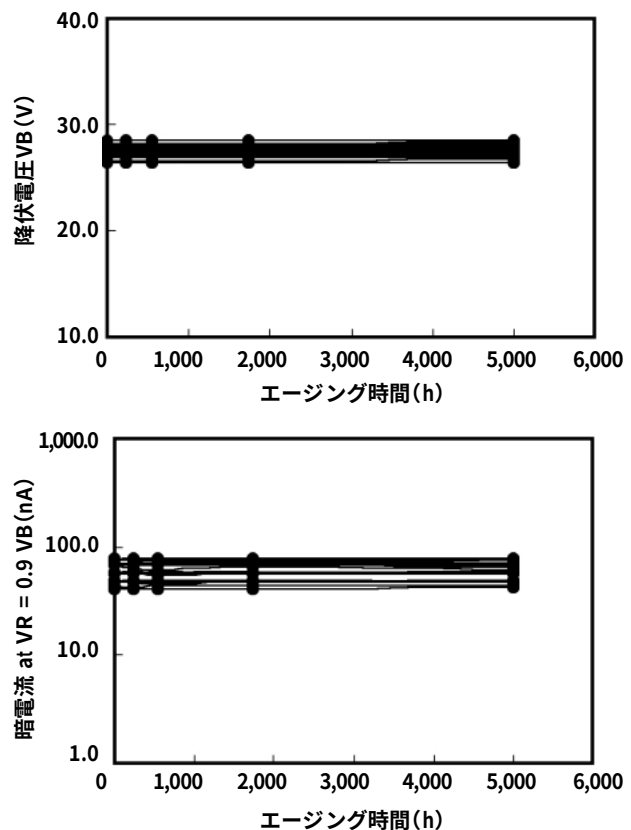


図-4 APD信頼度試験結果

Fig.4 Long term aging test results of APD.

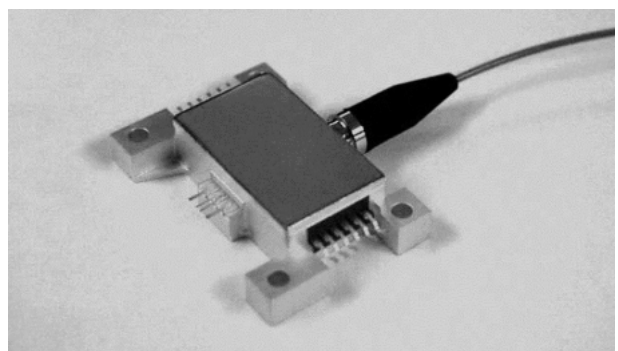


図-5 製品化された10 Gbps APDレシーバモジュール

Fig.5-Photograph of APD/preamp receiver module for 10 Gbps.

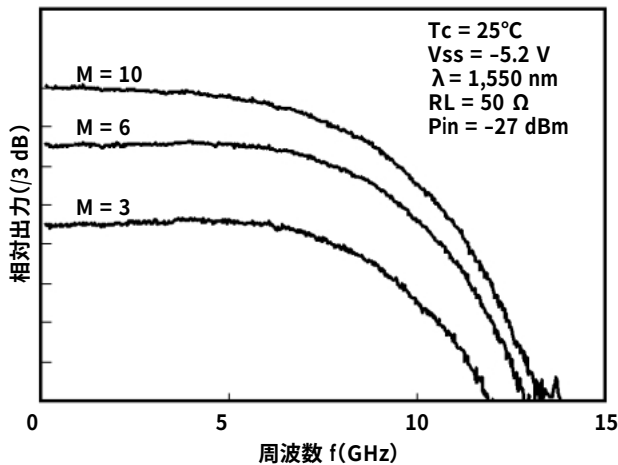


図-6 APDレーザモジュールの周波数特性
Fig.6-Frequency response of APD/preamp receiver module.

プリアンプICは、トランスインピーダンス・アンプとリミティング・アンプ機能を同一チップ内に有し、動作電圧-5.2 Vの低消費電力設計となっている。高感度、広帯域を実現するため、APDチップとプリアンプIC間の接続は、浮遊容量や寄生インダクタンスが最小になるように設計されている。モジュールからの出力は、後段ICと各々50 Ωにインピーダンス整合された正逆の差動出力となっており、ボード実装性も考慮してセラミック端子を採用した。製品化されたAPDレーザモジュールの周波数応答特性の代表例を図-6に示す。10 Gbps用として使用される増倍率 $M = 3 \sim 10$ の範囲で十分な帯域(7 GHz以上)が得られている。伝送特性を図-7に示す。入射光は10 Gbpsで変調された波長1,550 nm光であり、エラーレート 10^{-10} において-25 dBmの高感度特性が実現されている。製品化されたAPDレーザ・モジュールの主要な特性を表-1に示す。

む す び

長距離・大容量の受光素子として、10 Gbpsで動作するAPDおよびAPDレーザモジュールについて紹介した。

これらはインターネット幹線系光通信受光モジュールとして十分な特性と信頼性を示し、今後多くのシステムに使用されると考えられる。

波長多重伝送(WDM)用として、波長感度を長波長側(1,620 nm)へ伸ばす要求がある。残された課題として、今後はこの改良を行い、APD受光素子の有用性をより一層高めていきたい。

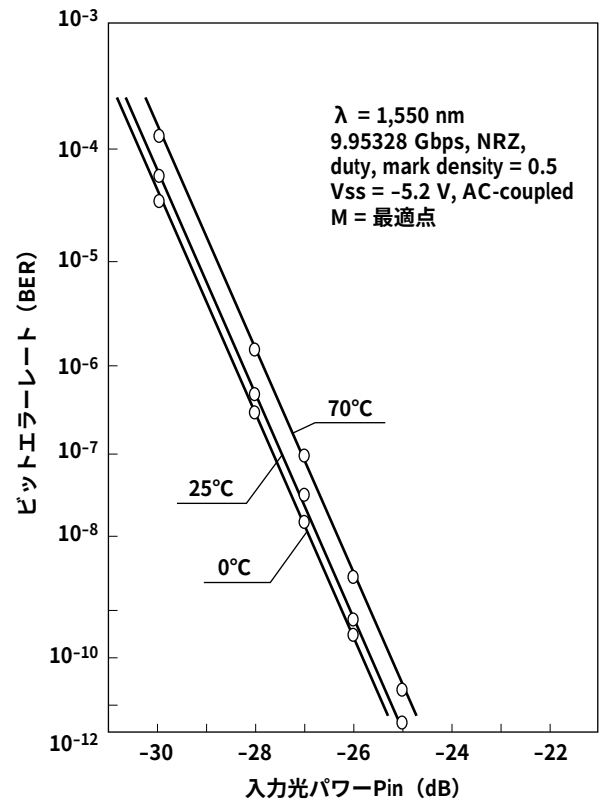


図-7 APDレーザモジュールの伝送特性
Fig.7-Bit error rate characteristics of APD/preamp receiver module.

表-1 APDレーザモジュールの代表特性

項 目	特 性
バンド幅	7.0 GHz ($M = 3 \sim 10$, $0 \sim 70^\circ\text{C}$)
最小受信感度	$< -23 \text{ dBm}$ ($\text{BER} = 10^{-10}$)
トランスインピーダンスゲイン	1,300 Ω (標準値)

参 考 文 献

- (1) Y. Kito et al. : High-Speed Flip-Chip InP/InGaAs Avalanche Photodiodes with Ultra-low Capacitance and Large Gain-Bandwidth Products. *IEEE Trans. Photonics Technol. Lett.*, 3, pp.1115-1116(1991).
- (2) R. S. Sussmann et al. : Ultra-Low-Capacitance Flip-Chip Bonded GaInAs PIN Photodetector For Long-Wavelength High-Data-Rate Fiber-Optic Systems. *Electron. Lett.*, 21, pp.593-595 (1985).
- (3) O. Wada et al. : High Radiance InGaAsP lensed LEDs for Optical Communication Systems at 1.2-1.3 μm. *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-17, pp.174-178(1981).