U.D.C. 〔621.375.826.038.825.5:621.382.23＋621.383.52〕:621.391.64

光伝送用半導体レーザとフォトダイオード

Laser Diodes and Photodiodes for Fiber Optic Transmission

伊藤和弘* Kazuhiro Itô
安田洋一** Yôichi Yasuda
瓜田一幾** Kazuki Urita

光通信の分野では，従来の幹線系通信から加入者系などの中・短距離通信へと用途が拡大している。これに使われる半導体レーザとフォトダイオードも，その用途に応じた性能が必要となってくる。長距離幹線系には，主にDFB形(分布帰還形)半導体レーザが使われる。また中・短距離にはファブリペロ形半導体レーザが使われるが，周囲温度が高くても温度コントロールなしで動作することが必要となる。この用途に85 ℃まで動作する半導体レーザを製品化した。フォトダイオードはPIN形とAPD形(アバランシェ形)がある。APD形では，2.4 Gビット/秒高速通信用に利得帯域幅積が50 GHzの製品を開発した。

1 緒　言

光伝送部品としての発光素子は，発光ダイオードと半導体レーザに分けられる。半導体レーザは，従来，比較的長距離，高速伝送に用いられてきたが，最近ではデータリンクなど比較的短距離用途にも使用されている。求められる性能に二つの方向がある。一つにはギガビット伝送用に見られる，いかに高速・高出力が得られるか。もう一つは加入者系やLANに見られるように，いかに簡易にシステムが達成できるか。ここではこの二つの分野に対応する半導体レーザを開発し製品化したので述べる。また，これらの受信部として使われる三元PINフォトダイオードおよび三元APD(アバランシェフォトダイオード)について，その開発製品化状況を述べる。

2 高速広帯域光伝送用半導体レーザ

従来，光伝送用半導体レーザとしてはファブリペロ形が用いられていたが，中継距離および伝送容量の拡大に伴い，ファブリペロ形に代わる，高速変調時にも単一モード(動的単一モード)で動作するレーザが必要になってきた。動的単一モードのレーザとしては，構造的にDFB(Distributed Feedback：分布帰還形)，DBR(Distributed Bragg Reflector：分布反射形)などがある。日立製作所では，デバイスのしきい電流値の低減，注入電流や温度に対する特性の安定性，および高信頼性の確保の観点から，BH(Buried Hetero：埋込ヘテロ)構造によるDFBレーザの開発を進めてきた。

1.3 μm帯DFBレーザの構造を**図1**に示す。素子構造は，基本的にはBH構造であり，電流狭窄(さく)および横モード制御を可能にしている。ファブリペロ形半導体レーザの場合は壁開面を利用して光増幅を行っているが，DFB半導体レーザでは動的単一モード実現のため，回折格子によるブラッグ反射を利用して光増幅を行っている。回折格子はInP基板上に設け，活性層と回折格子の間には活性層内で発生した光子を回折格子へ導くための光ガイド層を設けている。また，レーザチップ片端面にはファブリペロ反射を抑えるためにスパッタで形成したSi_3N_4の無反射膜が形成されている。

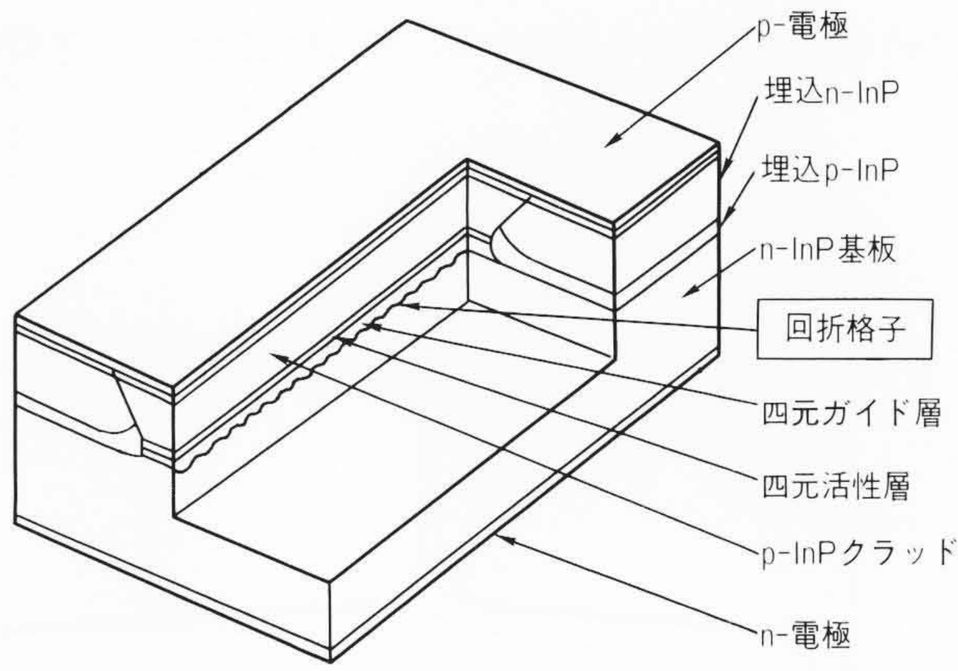

図1　DFB-LDチップの構造　DFB-LD(分布帰還形半導体レーザ)の構造は，InP基板上に回折格子が設けられており，このピッチに対応した波長で発振する。

DFBレーザでは，レーザ共振器中の進行波と回折格子からの反射(ブラッグ反射)波の位相がπだけずれるため，共振器端面からの反射のない理想的な状態では二つのモードで発振することになる。実際の素子では片端面だけ無反射コートしていること，回折格子終端部では実効的反射率の差があること

* 日立製作所 中央研究所　** 日立製作所 高崎工場小諸分工場

などの非対称性により，単一モード発振が得られる。この例を**図2**に示す。

動的単一モードをさらに向上させる方法として，回折格子を中央部で$\frac{\pi}{2}$だけシフトさせる構造がある。これを「$\frac{\lambda}{4}$シフト形DFB半導体レーザ」と言う。この構造では両端面を無反射コートしてある。

日立製作所では，これら2種類の構造で製品化しており，それぞれ1.3 μmと1.55 μm帯のものがある。特性の一覧を**表1**に示す。同表はチップ構造の差による分類であるが，おのおののチップ構造に対し用途に応じたパッケージ展開を行っている。ファイバーピッグティル，フォトダイオード，サーミスタおよびペルチェ素子を内蔵したパッケージの例を**図3**に示す。

一般にギガビット帯の高速・広帯域伝送に当たっては，半導体レーザの発振スペクトルの単一モード性が最も重要と考えられているが，実際に伝送を行ってみると，単一モード性以外にも伝送特性を左右させる要因があることがわかってきた。このため素子開発と並行して，実装特性とデバイス特性の対応付けを行い，レーザ固有の緩和振動周波数，DFBレーザの波長と最大利得での波長の差(デチューニング)などと伝送特性の関係を明らかにした。これらの関係を素子構造に反映させることにより，高速・広帯域伝送に対応できる素子を作ることができた。

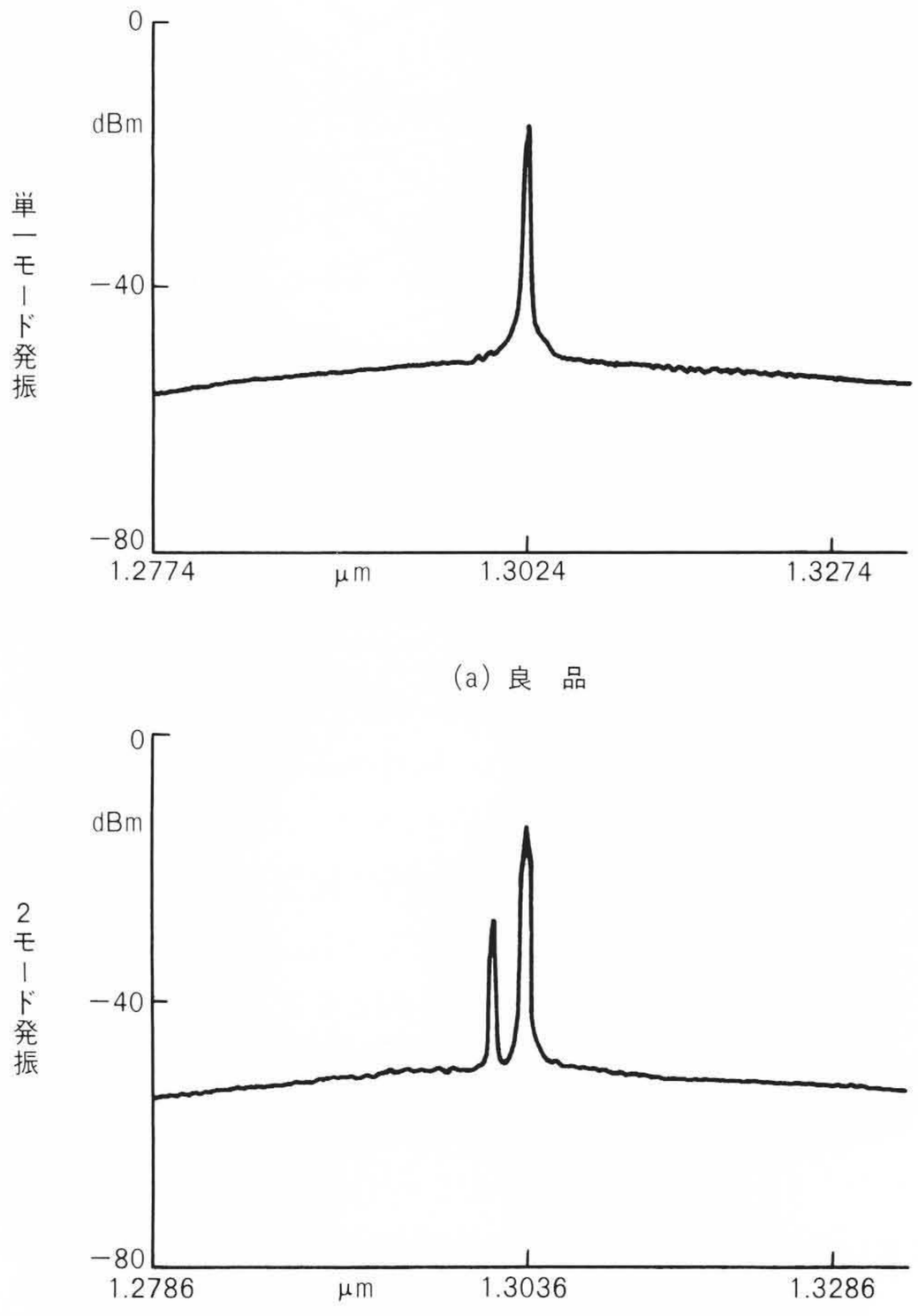

図2 発振モードの例 高速光伝送には，レーザの発振スペクトルが(a)図のように単一であることが必要となる。(b)図のように，第2のモードが大きいと伝送特性を悪化させる。

表1 DFB-LDの構造と特性一覧 日立製作所では，通常のDFB構造と$\frac{\lambda}{4}$位相シフト形DFBの両タイプをそろえている。$\frac{\lambda}{4}$位相シフト形DFBは，動的単一モード性がさらに向上し，高速光伝送に優れた性能を示す。

品 名	構 造	波長帯 λ_p(μm)	出 力 P_o(mW)	スペクトルサイドモード比Sr(dB)
HL1341A	DFB	1.31	5	35typ
HL1541A		1.55	5	35typ
HL1361A	$\frac{\lambda}{4}$位相シフト形DFB	1.31	5	38typ
HL1561A		1.55	5	38typ

注：略語説明 DFB(Distributed Feedback：分布帰還形)

3 加入者系高温動作形半導体レーザ

従来の幹線系光通信用半導体レーザは，温度コントロールなどを十分に行ったシステム設計によって使用されるが，加入者系，LAN，データリンクなどの中・短距離通信では，システムコストの低減，セットの小形化のため温度コントロールなしで使用できることが必要となる。したがって，半導体レーザの必要条件として，環境条件−40～＋85 ℃で安定に動作することが要求される。

日立製作所では，中・短距離光通信用途をターゲットとした半導体レーザHL1324MFを開発し製品化した。高温動作可能な半導体レーザの開発に当たっては，レーザチップの電流ブロック層構造を最適化し，高温動作時に問題となる側面リーク電流を低減させた。また，通常の半導体レーザの端面は，前後とも反射率30%で，前方と後方の光出力は等しいが，こ

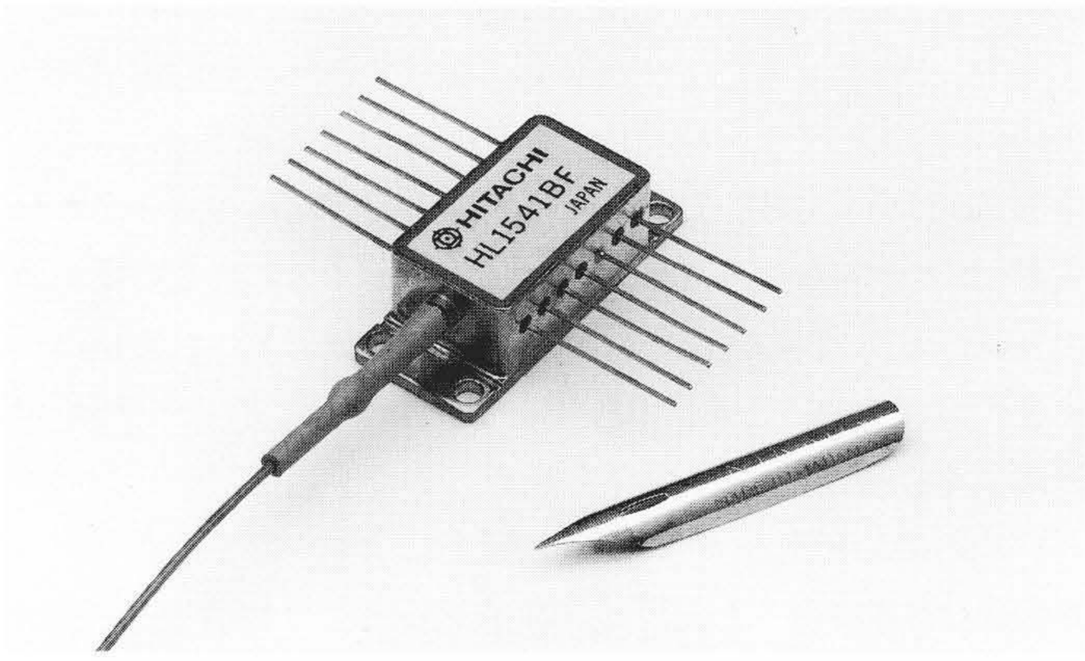

図3 HL1541BF(ペルチェクーラ，サーミスタおよびフォトダイオード内蔵) DFB-LDとモニタ用フォトダイオード，冷却用のペルチェおよび温度測定用のサーミスタを一つのパッケージに内蔵したものである。また，リードのインダクタンスを小さくし，高周波変調も可能なように設計されている。

の製品は後方の端面に高反射率のSiO_2膜を施し，非対称コートとして効率の向上を図り高温時の高出力化を実現している。出力の温度特性を従来品との比較で，**図4**に示す。85 ℃まで十分に動作することがわかる。

HL1324MFは以上述べた半導体レーザチップを使用し，光出力モニタ用のPINフォトダイオードとともに外径5.6 mmの小形パッケージに収納したもので，外形図を**図5**に示す。ケース温度85 ℃で光出力5 mWを確保し，しきい電流値も標準15 mAと低い。

4　フォトダイオード

光通信に用いられるフォトダイオードは，PIN-PD(PINフォトダイオード)とAPD(アバランシェフォトダイオード)の2種類ある。前者は半導体の光電効果(光吸収による電子正孔の発生)によって生ずる電流を利用するもので，主に中・短距離通信や半導体レーザのモニタ用に使用されている。APDは光電効果で発生した電子正孔の一方を，高電界に印加された結晶層内で走行させ，雪崩降伏(アバランシェ)現象を起こさせることにより電流の増倍作用を持たせた素子である。このため，APDは高感度という特長があり，長距離光通信用の受光器として使用されている。

ここでは，長波長光通信用のフォトダイオードとして実用されているInP/InGaAs系結晶の化合物半導体PIN-PDと，新たに開発した2.4 Gビット/秒用APDについてその構造と主な特性について述べる。

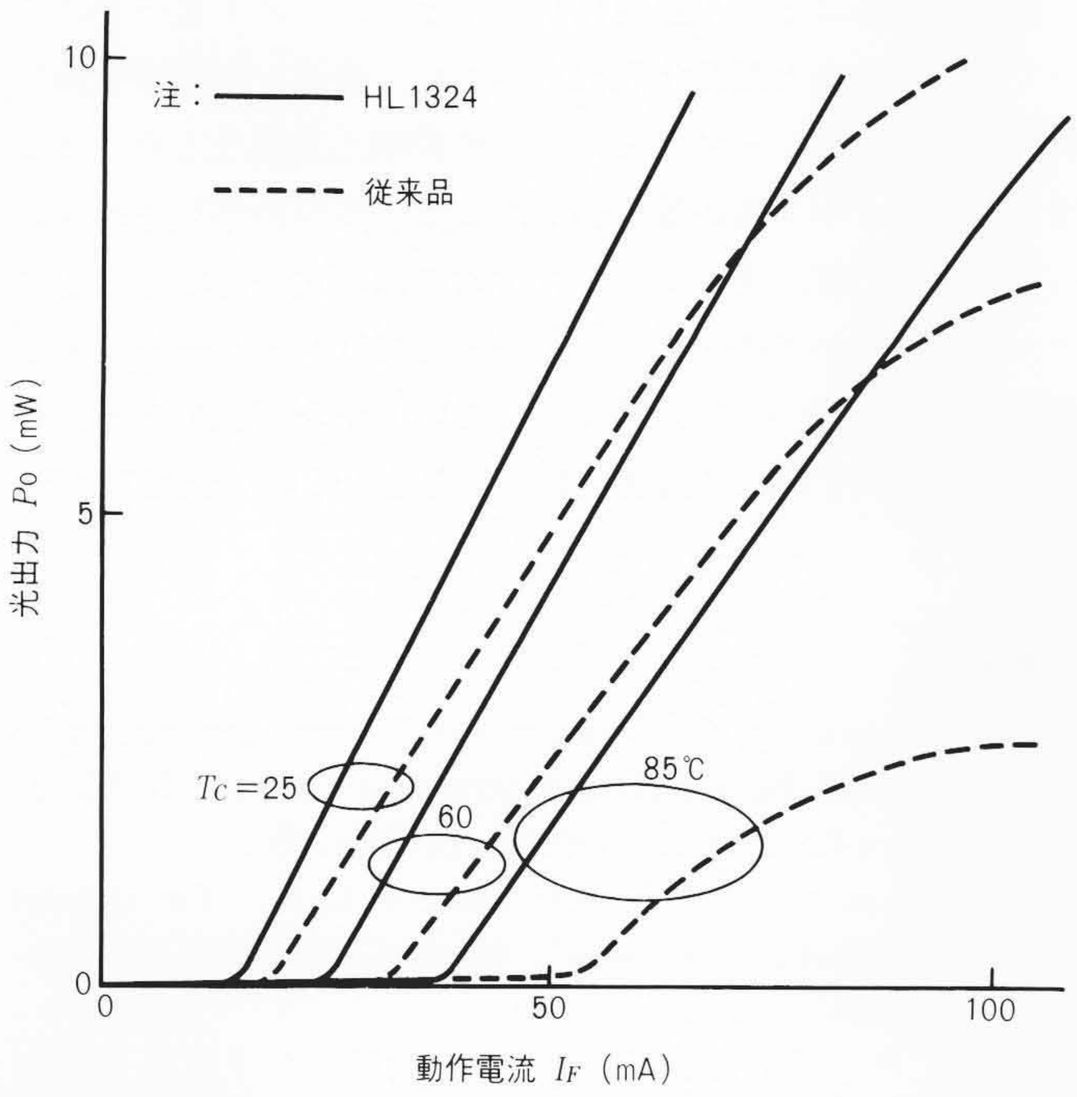

図4　高温動作形半導体レーザの出力特性　　従来品に比べて高温での動作が改良されている。従来品は60 ℃ぐらいが動作の上限であったが，HL1324は85 ℃までの動作が可能である。

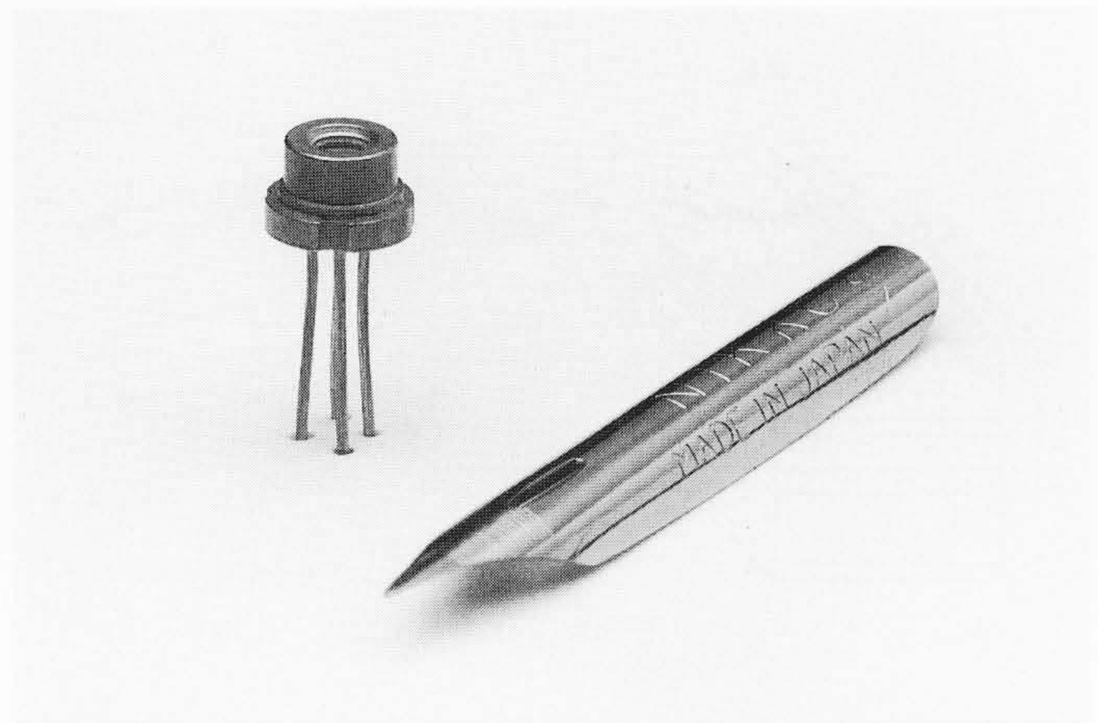

図5　HL1324MF外形図　　フランジの外径が5.6 mmと小形のパッケージである。モニタ用フォトダイオードを内蔵しており，コンパクトで使いやすいパッケージとなっている。

(1)　構　　造

PIN-PDの構造を**図6**に示す。結晶は光信号を吸収するInGaAs層をInP層で挟んだ多層で成り，InP基板上に成長させたものである。pn接合はInP窓層の表面からZnを拡散して形成しており，そのフロントはInGaAs層内にある。光が入射する受光窓の直径は，80～2,000 μmの範囲で4種類ある。小口径の素子は高速応答を必要とする通信用に，大口径の素子は光学結合が容易となるので主にモニタ用に使われる。

APDの構造を**図7**に示す。APDでは，InGaAsの光吸収層とInP窓層の間に，InGaAsPの障壁緩和層と比較的キャリヤ濃度の高いInP増倍層を設けてある。障壁緩和層は，光吸収層で発生した正孔がpn接合に向かって走行するのを容易にする役割を持つ。増倍層は，走行してきた正孔をトリガとして増倍作用を行う領域である。pn接合はZn拡散で作られた主接合とBeイオン打ち込み法で作られたガードリング接合で成ってい

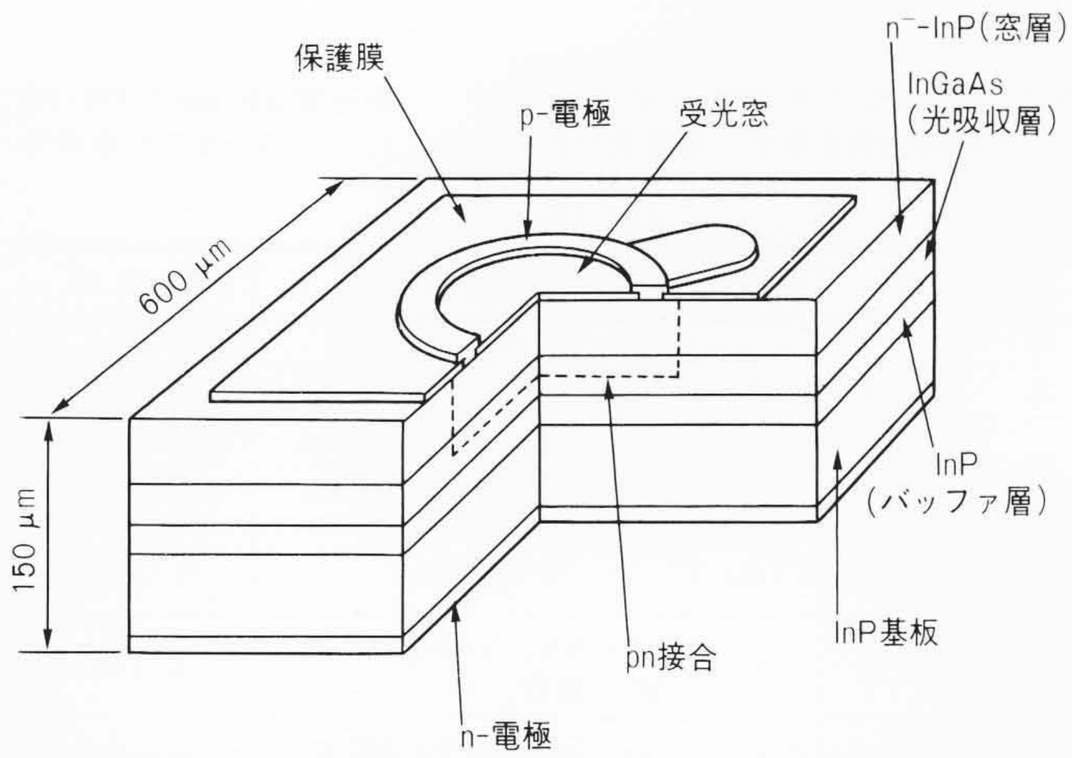

図6　PIN-PDの構造　　PIN-PDのチップ断面図を示す。受光窓の大きさが，用途によって異なる。

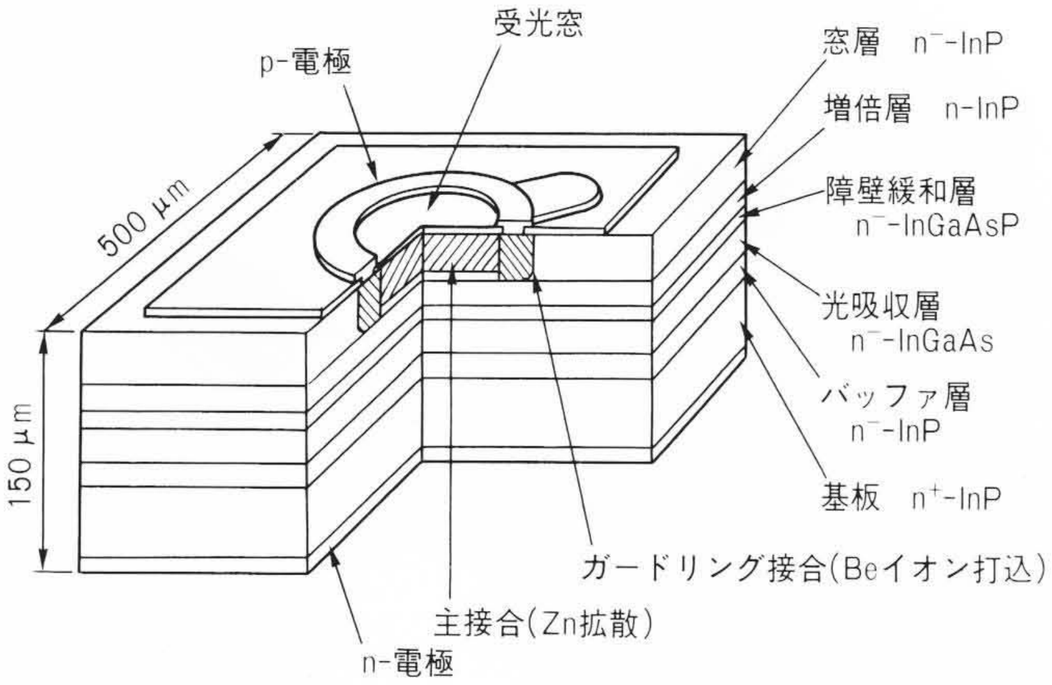

図7 APDの構造 APD(アバランシェフォトダイオード)のチップ断面図を示す。増倍層によりアバランシェ現象を起こし，増幅作用を持つ。

る。今回開発したAPDは，高速性を確保するためガードリングを主接合よりも深い位置に形成している。受光径の直径は30 μmと50 μmの2種類ある。APDでは，光吸収と増倍を材料の異なる別個の領域で行わせることと，両領域の間に障壁緩和層を設けることは，暗電流と増倍雑音を低くし応答速度を高めるうえで必須(す)の構造である。上記の構造は，いずれも日立製作所が初めて見いだした基本概念である。

(2) PIN-PDの特性

受光径80 μmのPIN-PD，HR1105の光学的電気的特性を**表2**に示す。暗電流が1 nAと低く感度0.9 mA/mW(λ_P = 1,550 μm)と高感度のPIN-PDであり，通信用途から半導体レーザのモニタ用として幅広く使用できる。パッケージはレセプタクル形，チップキャリヤ形と用途に応じて選ぶことができる。

(3) APDの特性

降伏電圧は約70 V，光感度発生電圧は約30 Vである。暗電流は，90%降伏電圧で10 nA以下と低い。遮断周波数の増倍率依存性を**図8**に示す。増倍率15以上でのGB(増倍率と遮断周波数)積は，50 GHz以上である。また，遮断周波数2.5 GHz以上を得られる増倍率は3～20と広い。90%降伏電圧での素子容量は受光径30 μm素子で0.3 pF，50 μm素子で0.4 pFである。過剰雑音指数は0.75，量子効率は波長1.55 μmのとき80%以上を得ており，2.4 Gビット/秒長距離通信用に適している。

表2 PIN-PDの光学的・電気的特性 受光窓φ80 μmのPIN-PD HR1105の特性例を示す。暗電流が低く，またλ_P=1,550 nmでも使用できる。

項目	記号	測定条件	標準値
暗電流	I_{DARK}	V_R= 5 V	1 nA
容量	C_t	V_R= 5 V, f= 1 MHz	0.8 pF
感度	S_1	V_R= 5 V, λ_P=1,300 nm	0.85 mA/mW
	S_2	V_R= 5 V, λ_P=1,550 nm	0.9 mA/mW
受光感度飽和バイアス電圧	$V_{R(S)}$	——	2 V max.
立上り時間	t_r	V_R= 5 V, λ_P=1,300 nm R_L=50 Ω	0.3 ns
立下り時間	t_f	V_R= 5 V, λ_P=1,300 nm R_L=50 Ω	0.3 ns

注：光学的電気的特性(T_c=25 ℃)

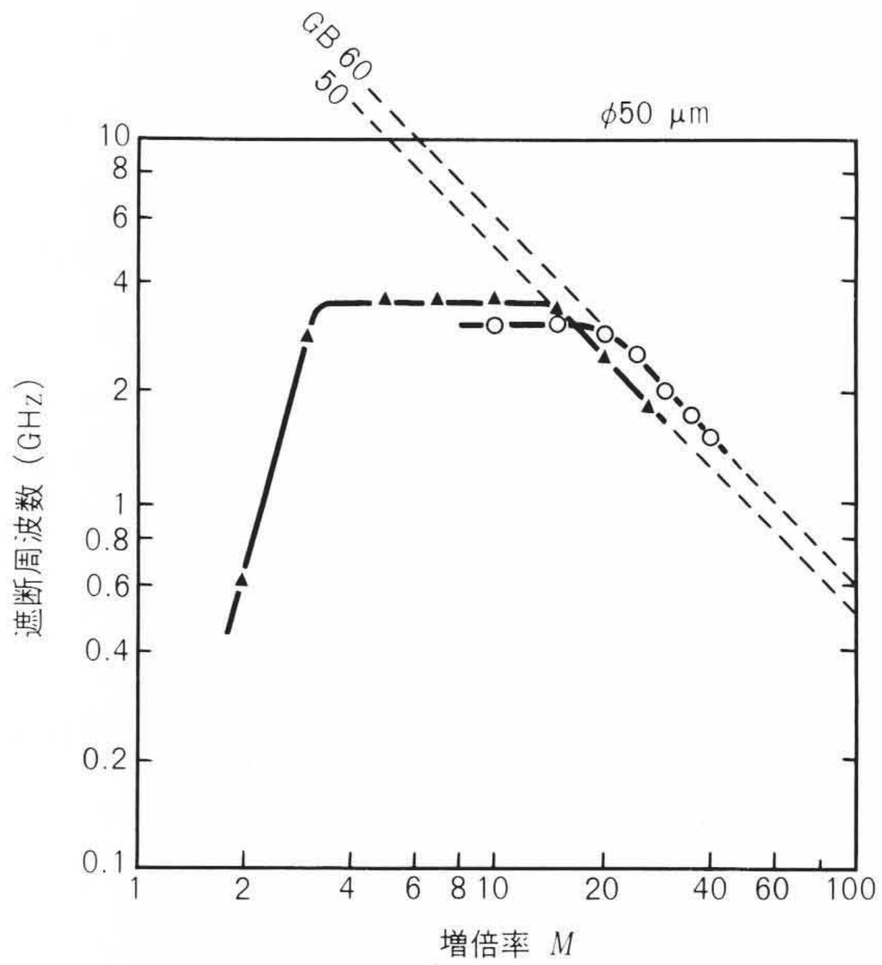

図8 遮断周波数の増倍率依存性 増倍率と遮断周波数の積(GB積)が50と高い値を示している。

5 結 言

光伝送用部品として半導体レーザとフォトダイオードについて，その技術と製品化状況を述べた。高速・広帯域光通信用にDFB半導体レーザと三元APDを開発し製品化した。また加入者系など中・短距離光通信用には，高温動作形半導体レーザを開発し製品化した。システムの標準化が進むとともに他方では用途が多様化し，光素子としてはパッケージ技術も含め，いかに使いやすい部品にしていくかが重要である。今後ともこの点を重点に開発し製品化を進めていく予定である。

参考文献

1) T. Ohtoshi, et al.：“Analysis of Current Leakage in InGaAsP/InP Buried Hetero Structure Lasers”, IEEE, J. Quantum Electronics, Vol.25, p.1399(1989)
2) M. Hirao, et al.：“Semiconductor Lasers for Optical Communication Systems”, Hitachi Review, Vol.33, p.193(1984)
3) 伊藤，外：第46回応用物理学会学術講演会予稿集，2PE4 (1985)
4) K. Nishida, et al.：Appl. Phys. Letter, Vol.59, p.251(1979)