

光伝送用光素子

Opto-semiconductor Devices for Optical Communications

広帯域、長距離光通信システムは実用化が進んでいるが、情報化社会の拡充につれて、情報伝送容量、無中継距離拡大の要求はますます強くなってきている。これにこたえるために、高速変調時にも単一モードで動作する分布帰還形レーザを開発した。横モード制御には、BH構造を採用し、従来のマルチモード動作のファブリ・ペロ形のレーザと同等以上の信頼度が確認された。

また受光素子として波長 $1.6\mu\text{m}$ 帯まで感度を持つInGaAs三元混晶を材料とするPIN-PD、APDの開発を行い、高速・高感度化、低暗電流化を実現した。

これにより、高速・大容量光通信に対応する高性能発・受光素子の製品系列を整備した。

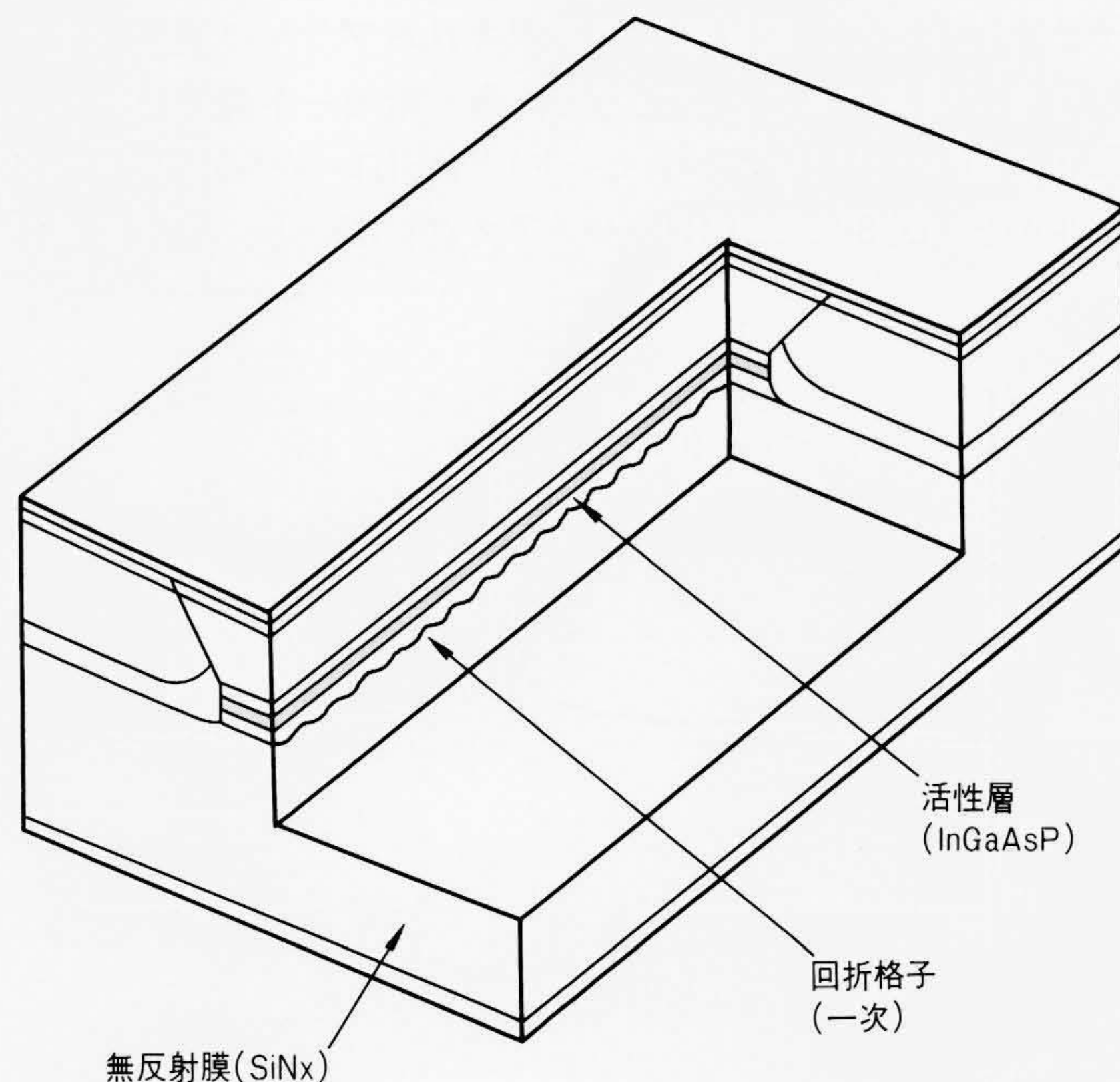
市来正浩* Masahiro Ichiki
平尾元尚* Motohisa Hirao
伊藤和弘** Kazuhiro Itô
熊沢鉄雄*** Tetsuo Kumazawa

1 緒 言

光通信はファイバの低損失化、高性能の発・受光素子の実現により、短波長多モード伝送から長波長単一モード伝送へ着実にその歩を進めてきた。波長 $1.3\mu\text{m}$ 帯のFP(ファブリ・ペロ: Fabry・Perot)形半導体レーザを光源とする長距離光ファイバ通信は、大西洋、太平洋横断海底光通信システムや日本電信電話株式会社の日本縦貫ルートなど海底通信、陸上幹線で実用化の段階に至っている^{1),2)}。一方、情報化社会が拡充するにつれて、情報伝送容量拡大の要求とシステムの信頼性を高め、コストダウンを図るための無中継距離拡大の要求は強くなってきている。このため、光源としては高速変調時にも単一モードで動作する動的単一モード(DSM: Dynamic Single Mode)レーザの実現が強く求められており、受光素子としてはより高感度、高速応答が可能なPIN-PD(PIN-Photo Diode)、APD(Avalanche Photo Diode)の要求が強い。ここでは高速・大容量光通信用に開発した高速変調時にも単一モードで動作する分布帰還形(DFB: Distributed Feedback)レーザ、波長 $1.6\mu\text{m}$ 帯まで受光感度を持つInGaAs三元PIN-PD、APDと約2 Gビット/秒までの高速応答が可能な通信用パッケージについて述べる。

2 DFBレーザ

光通信での無中継距離と伝送容量は、光ファイバの伝送損失と分散特性(伝搬する光の波長によって伝送速度が異なるという性質)によって大きく左右される。そのため、従来のFPレーザでは縦マルチモード発振であることにより、伝送損失が最小となる $1.5\mu\text{m}$ 帯でも無中継距離は $\sim 30\text{km}$ 、伝送容量は565Mビット/秒程度に制約される。この問題を解決し、無中継距離と伝送容量拡大を実現するための光源として、DSMレーザの要求が強く、中でもDFBレーザの実用化が注目されて



注: 回折格子を反射体とし、回折格子で選択されるブラッグ波長の光を活性層に帰還させ、単一縦モード発振を行う。

図1 DFB(Distributed Feedback)レーザチップ構造 埋込み成長によって形成された幅 $2\mu\text{m}$ 以下のストライプ状活性層と、活性層直下に一次回折格子を持つレーザである。

いる。

図1にInGaAsP DFBレーザ、HL1341、HL1541のチップ構造を示す。活性層の直下に一定の周期構造を持つ回折格子を持っているが、構造自体は従来のFPレーザで実績のあるBH

* 日立製作所高崎工場 ** 日立製作所中央研究所 *** 日立製作所機械研究所

(Buried Hetero: 埋込ヘテロ)構造^{3),4)}を基本としている。回折格子は一次の回折格子を干渉露光法によって形成する。また、回折格子のピッチは、目的の発振波長に応じ次式により選択する。

$$\Lambda = \lambda / 2n$$

ここで Λ : 回折格子のピッチ

λ : 発振波長

n : 導波路の屈折率

ちなみに、波長 $1.3\mu\text{m}$ の場合、ピッチは約 200nm 、波長 $1.5\mu\text{m}$ では約 240nm となる。素子の製造プロセスは回折格子の形成以外は、従来のBH構造のFPレーザと同プロセスをとっているが、回折格子と活性層の間に光ガイド層を持っているために、横モードを制御するには各層の厚み、幅について従来以上の精密な制御が必要となる。またFPモードの発振を抑制し、単一モード発振の確率を向上させるために、前方レーザビーム出射端面には反射率2%以下の SiN_x の無反射膜コーティングを行う。

レーザ発振はFPレーザがチップのへき開両端面を反射鏡として共振させ発振させるのに対し、DFBレーザでは、回折格子を反射体とし、回折格子で選択されるブラッグ波長の光を活性層に帰還することによって、単一縦モード発振を行う。

図2にFPレーザ(縦マルチモード)とDFBレーザの発振スペクトル例を、図3にHL1341のバイアス点を I_{th} とし、高速変調し

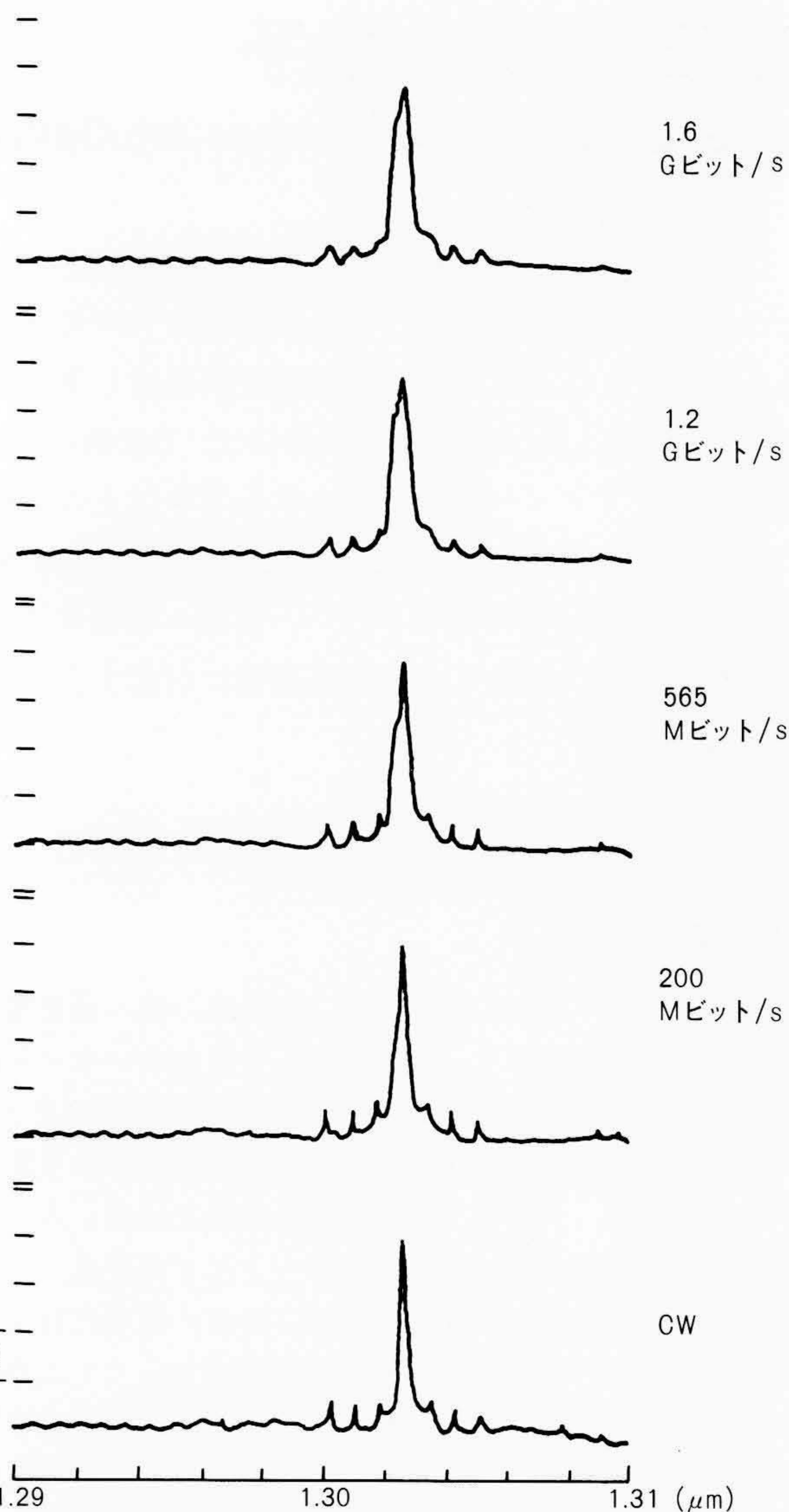


図3 HL1341の変調時のスペクトル DFB-LDは変調周波数によらず、縦単一モードで動作する。

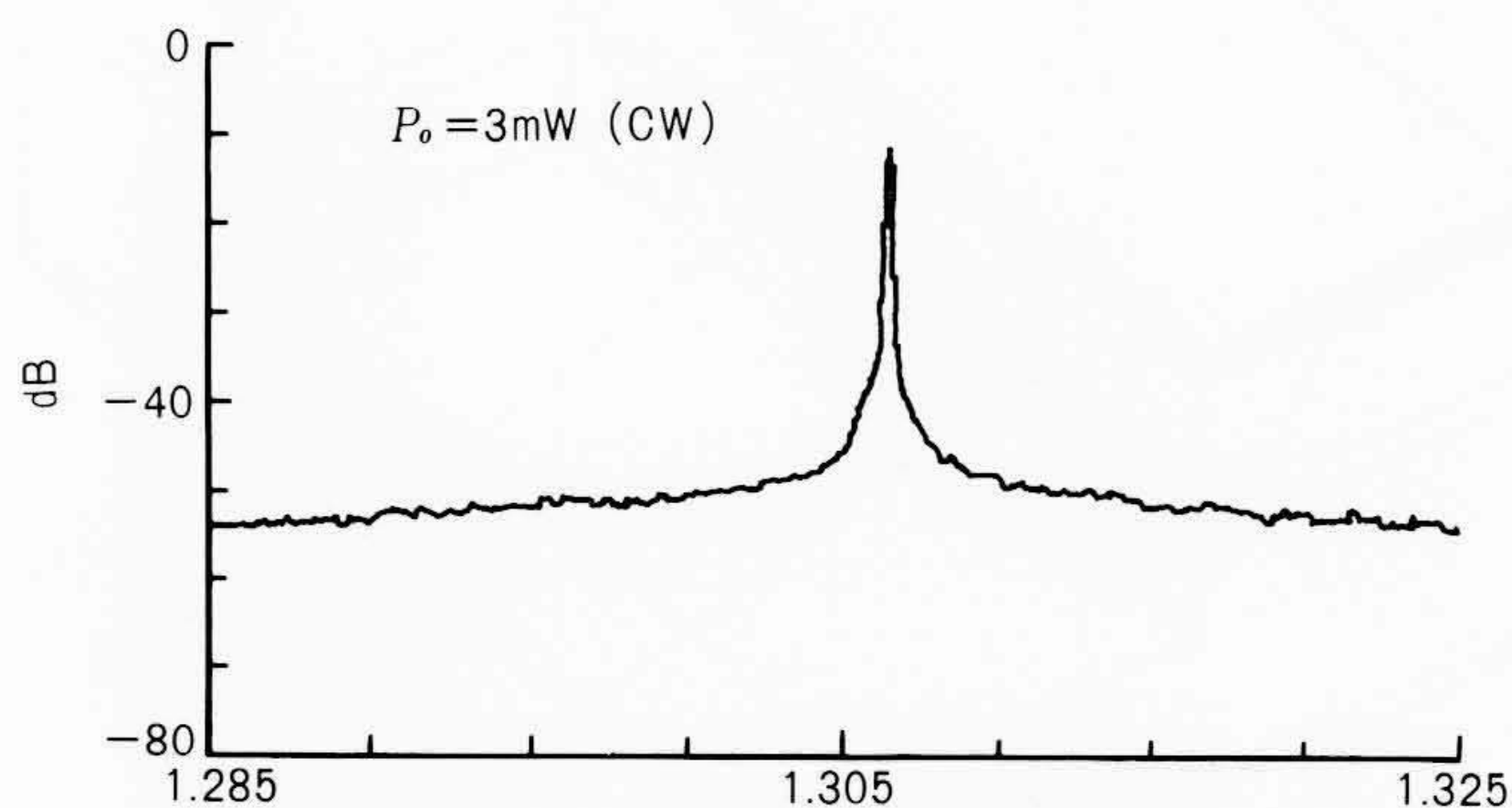
たときの発振スペクトルを示す。

表1にDFBレーザ、HL1341とHL1541の主要な光・電気特性を示す。スペクトルのサイドモード抑圧比は 35dB Typと単一モード性に優れ、 t_r , t_f は各々 0.5ns 以下の高速応答が可能である。

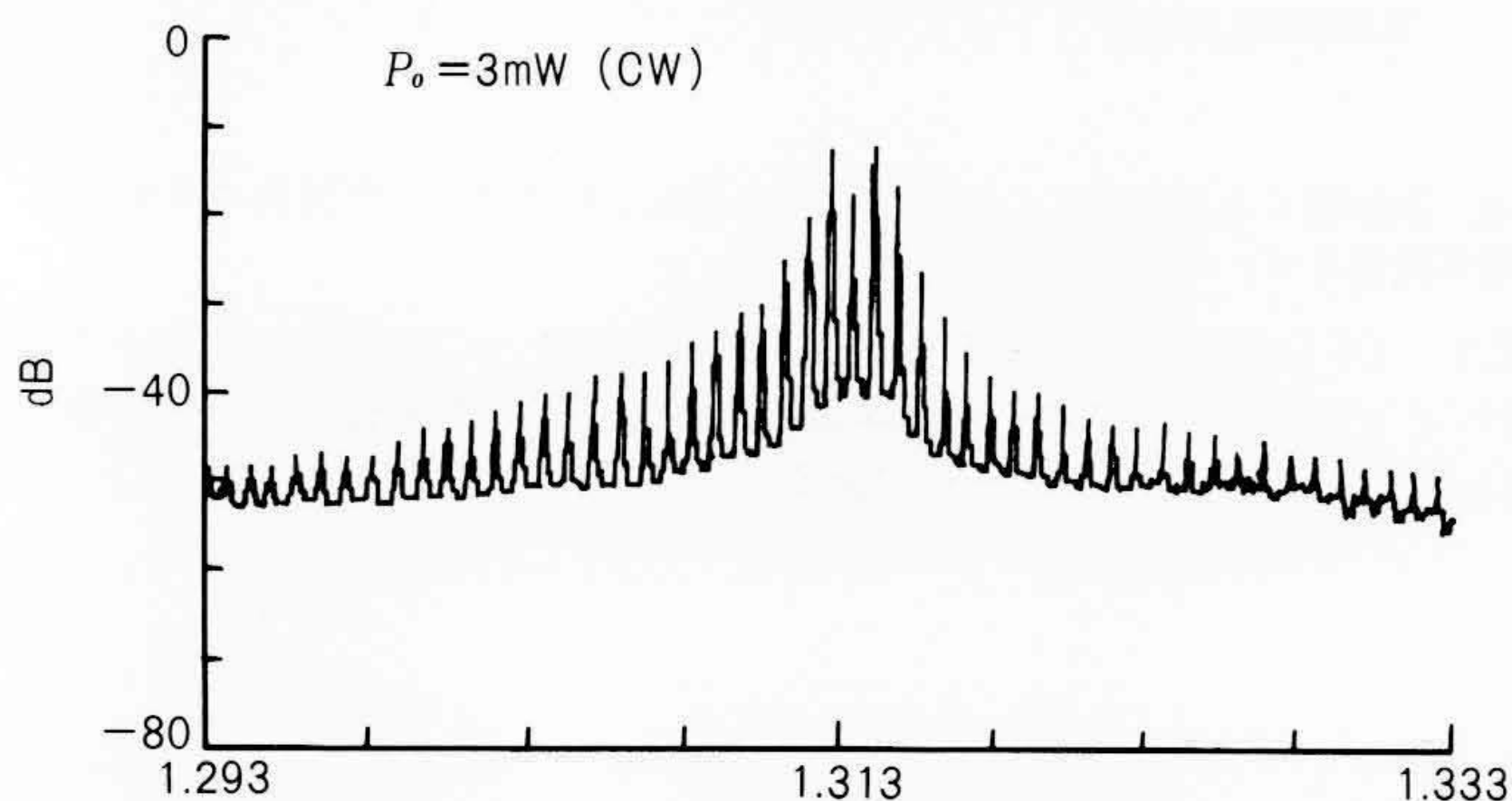
開発した素子の推定寿命分布を図4に示す。初期の速い劣化モードを、高温かつ大電流のスクリーニングによって除去することにより、 $T_c=50^\circ\text{C}$, $P_o=5\text{mW}$ で 10^6 時間以上の寿命を確保しており、実用上十分な信頼度レベルにある。また発振スペクトルの安定性については、高温・大電流の強制加速試験により試験を行ったが、その結果、動作電流が初期値の約2倍に劣化した素子でも発振スペクトルの変化はなく、単一モード発振が維持されていることを確認した。

3 長波長受光素子

長波長帯の受光素子としては、従来Geを材料とした素子が用いられてきたが、暗電流、過剰雑音が大きい欠点があり三



(a) DFB-LDの発振スペクトル



(b) FP-LDの発振スペクトル

注: 略語説明

DFB-LD(DFB-Laser Diode), CW(Continuous Wave)

FP-LD(Fabry Perot-Laser Diode)

図2 DFB-LD, FP-LDの発振スペクトル FP-LDが複数の発振波長ピークを持つ縦多モード動作するのに対し、DFB-LDは縦単一モードで動作する。

表1 DFBレーザの主要な光・電気特性 最大定格は光出力 5 mW、動作温度範囲は 0 ～ 50℃である。

項 目	記 号	試 験 条 件	単 位	HL1341			HL1541		
				最小値	標準値	最大値	最小値	標準値	最大値
し き い 電 流	I_{th}	—	mA	—	25	50	—	25	50
光 出 力	P_o	横単一モード	mW	5	—	—	5	—	—
		$I_F = I_{th} + 20\text{mA}$	mW	2.5	—	—	1.5	—	—
モ ニ タ 光 出 力	P_m			1.0	—	—	0.5	—	—
ピ ー ク 波 長	λ_p	$P_o = 3\text{mW}$	nm	1,280	1,310	1,340	1,520	1,550	1,580
サイドモード抑圧比	Sr		dB	—	35	—	—	35	—
ビ ー ム 広 が り 角	$\theta_{//}$	$P_o = 3\text{mW}$ 半値全角	deg	—	30	—	—	40	—
	$\theta_{\perp}$			—	40	—	—	50	—
立上り, 立下り時間	t_r, t_f	—	ns	—	—	0.5	—	—	0.5

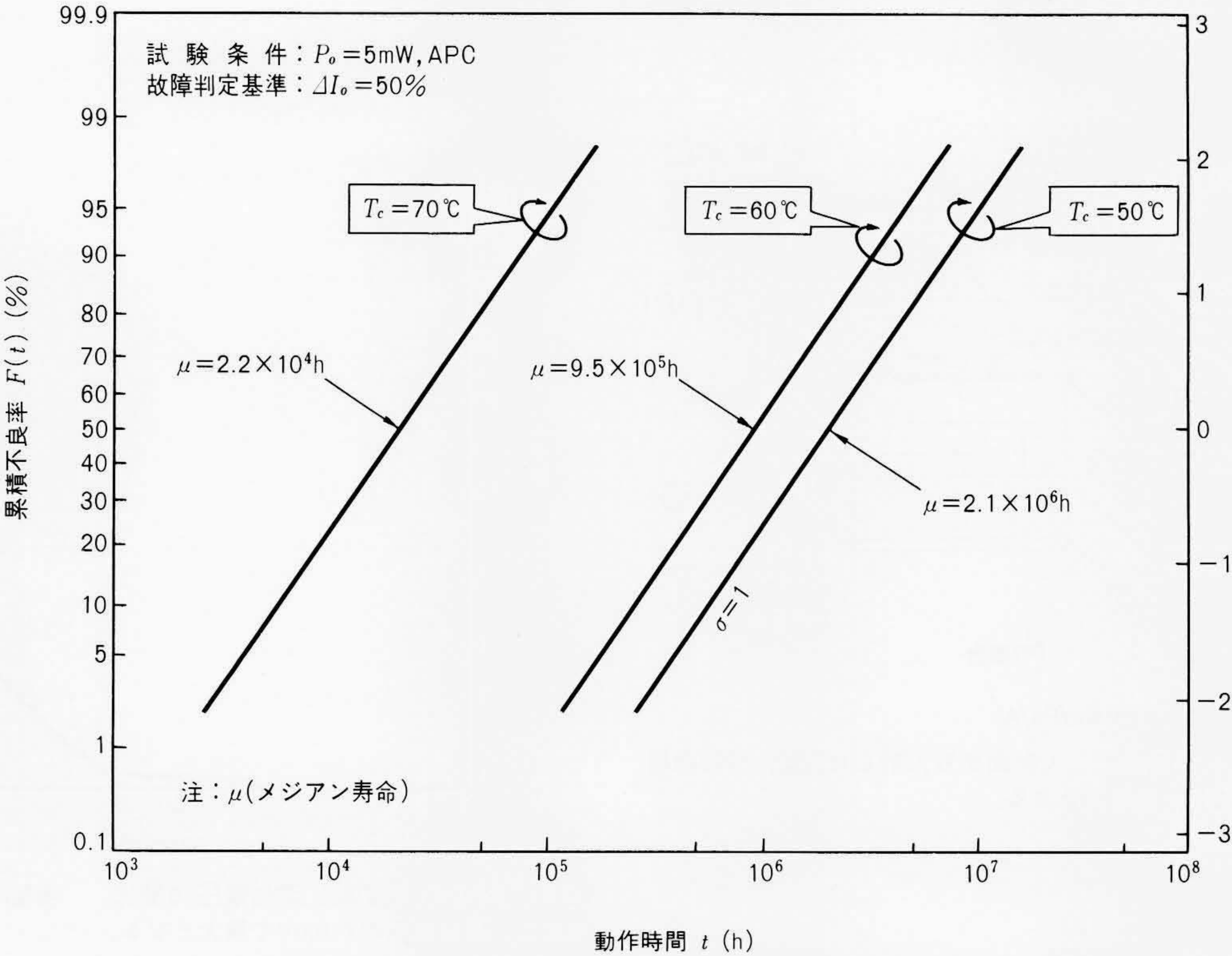


図4 HL1341(1.3μm帯DFB-LD)推定寿命分布 50℃, 5mW動作で不良率1%としたときの平均寿命は、約20万時間となる。

元混晶を材料とする受光素子への切換えが急速に進みつつある。今回製品化した長波長光通信用PIN-PD, APDの構造を図5, 6に示す。両素子ともInP/InGaAs系ヘテロ結晶を用いたプレーナ構造である。結晶の構成は、PIN-PDが、InGaAsの光吸収層、InPのバッファ層と窓層から成り、APDでは上記のほか、InGaAsPの障壁緩和層とInPの増倍層で成る。窓層側のP形領域に接触するリング状電極の内径部は受光面であり、ここから入射した光は、窓層を透過し、光吸収層で吸収されて電子・正孔対を生成する。電極から逆方向電圧を印加した状態では、PN接合から基板側に空乏層が伸び、電子と正孔は各々基板側とP形領域側に走行するため光電流として検知される。

なおAPDでは増倍層に高い電界強度が与えられているため、注入されたホールは、アバランシェ増倍を生じ、光電流の増幅作用を起こす。両素子とも、検知できる光波長はInPとInGaAsの禁止帯幅で定まる1～1.6μmの広い帯域である。良好な特性を得るには、結晶欠陥が少なく、キャリア濃度、層厚、組成が十分に制御された結晶が不可欠である。本開発では、結晶成長に制御性、量産性の良好な減圧MOVPE法(有機金属熱分解気相成長法)を用いた⁶⁾。本方法により、エッチピット密度が5,000個/cm²以下、アンドープキャリア濃度が2×10¹⁵cm⁻³以下の高純度結晶の成長技術を確認し、接合容量の低下と低暗電流化を図れた。PIN-PDは低電圧動作を目的と

して、PN接合を光吸収層内に達する深さとした。APDのPN接合は、アバランシェ増倍を行う中央部の主接合と、増倍を安定に行わせる周辺部のガードリング接合の2種から成る。

図7にPIN-PDの接合容量特性を示す。減圧MOVPE法の採用により、バイアス電圧10Vで、接合容量0.55pF、周波数応答2GHz以上、量子効率85%、暗電流1nAの特性を持つ高速・高感度の長波長受光素子が開発できた。一方APDでは、最大増倍率で50(図8)、周波数応答で1.5GHz以上(図9)の基本特性が得られた。

4 通信用パッケージ

光伝送用素子の実用化に際しては、そのパッケージ形態も重要な要素となる。

光通信用LD(Laser Diode)のパッケージにとっては、搭載されるLDの特性が最大限に生かされ、長期にわたって安定性に優れること、顧客のニーズに合っていること、が要求され

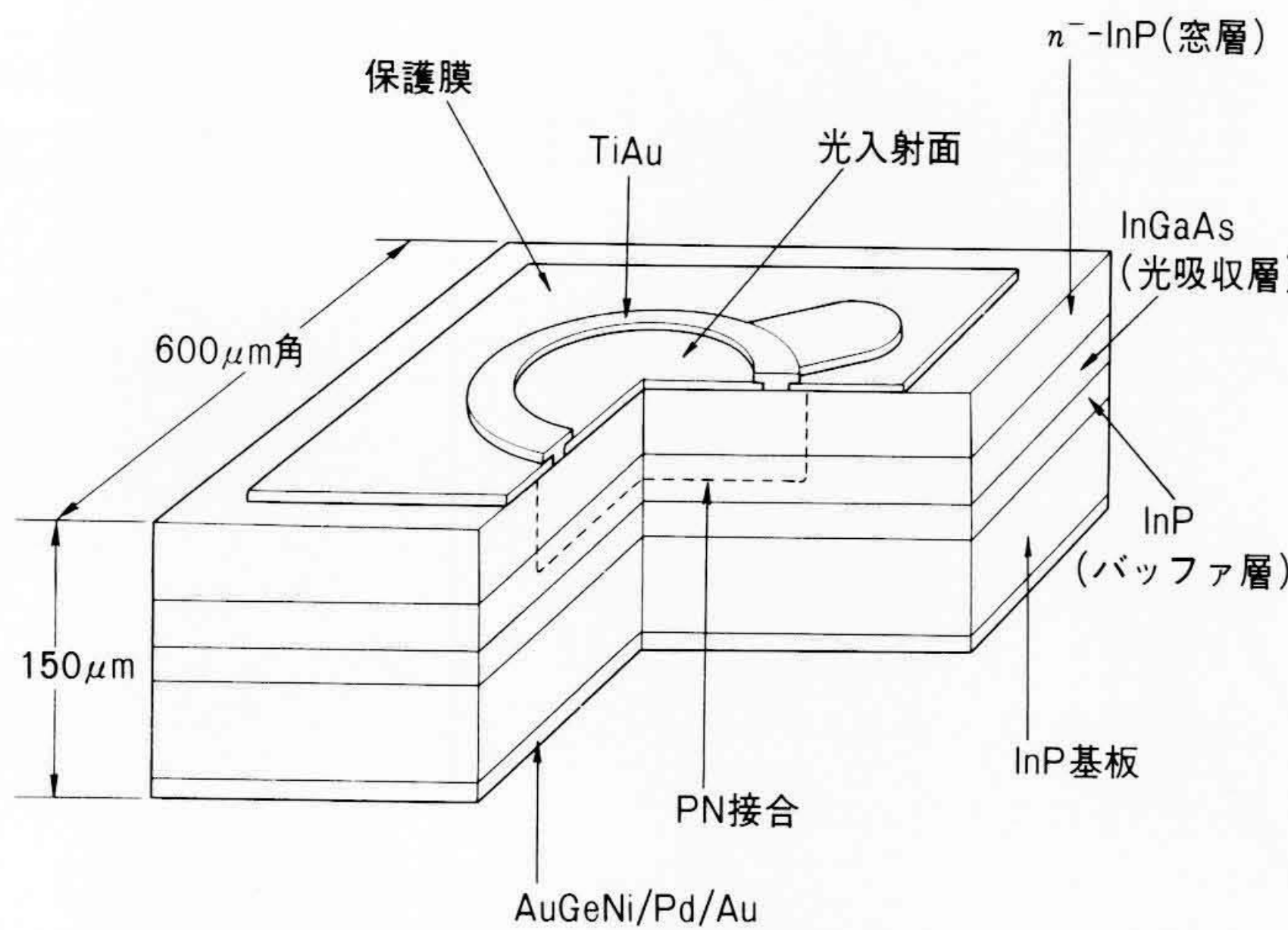


図5 PIN-PDのチップ構造 入射面から入射した光は、光吸収層で電子・正孔対を形成し、光電流となる。

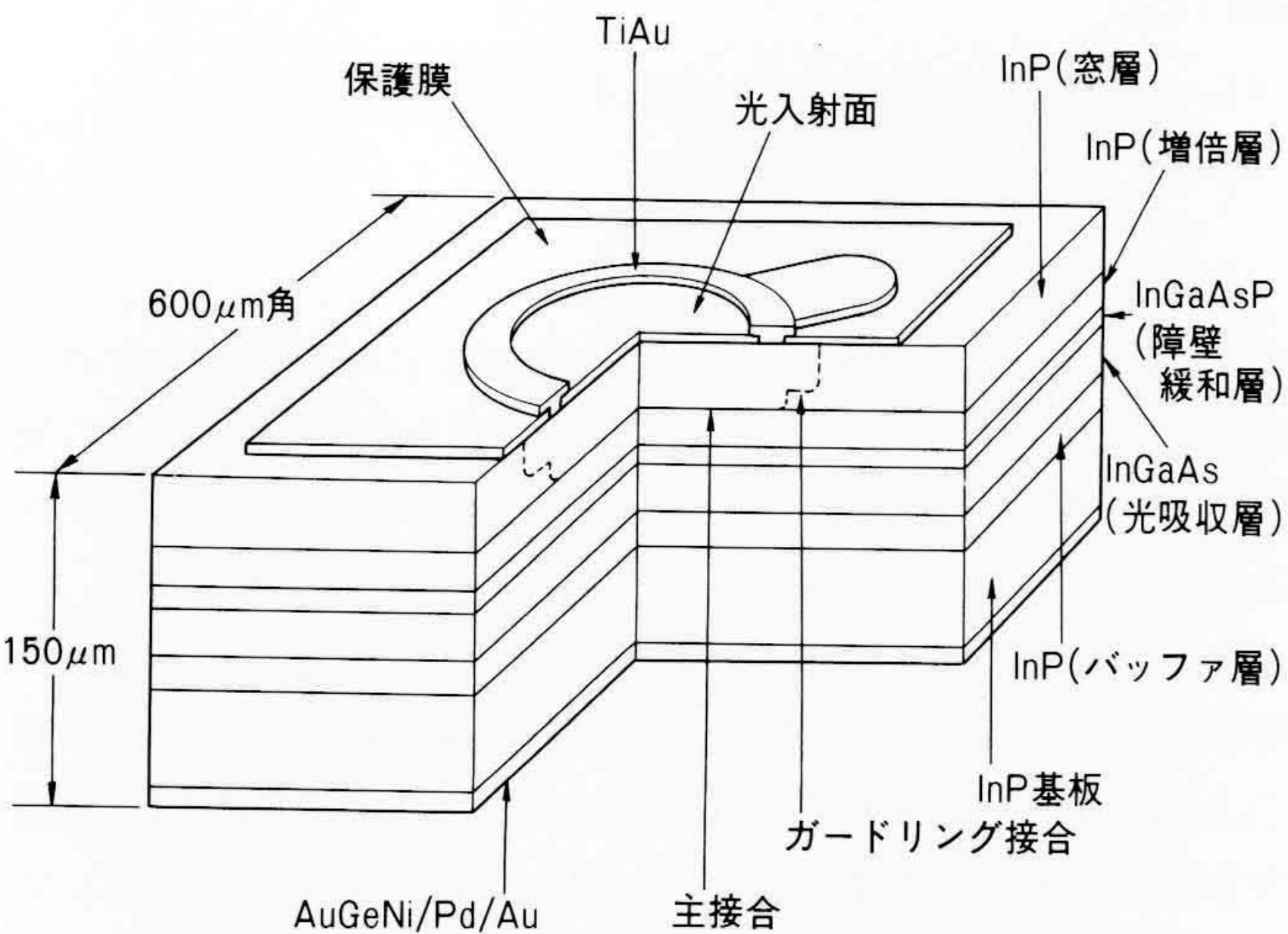


図6 APDのチップ構造 入射光は光吸収層で電子・正孔対を形成し、光電流となり、高い電界が印加されている増倍層でアバランシェ増倍が起こる。

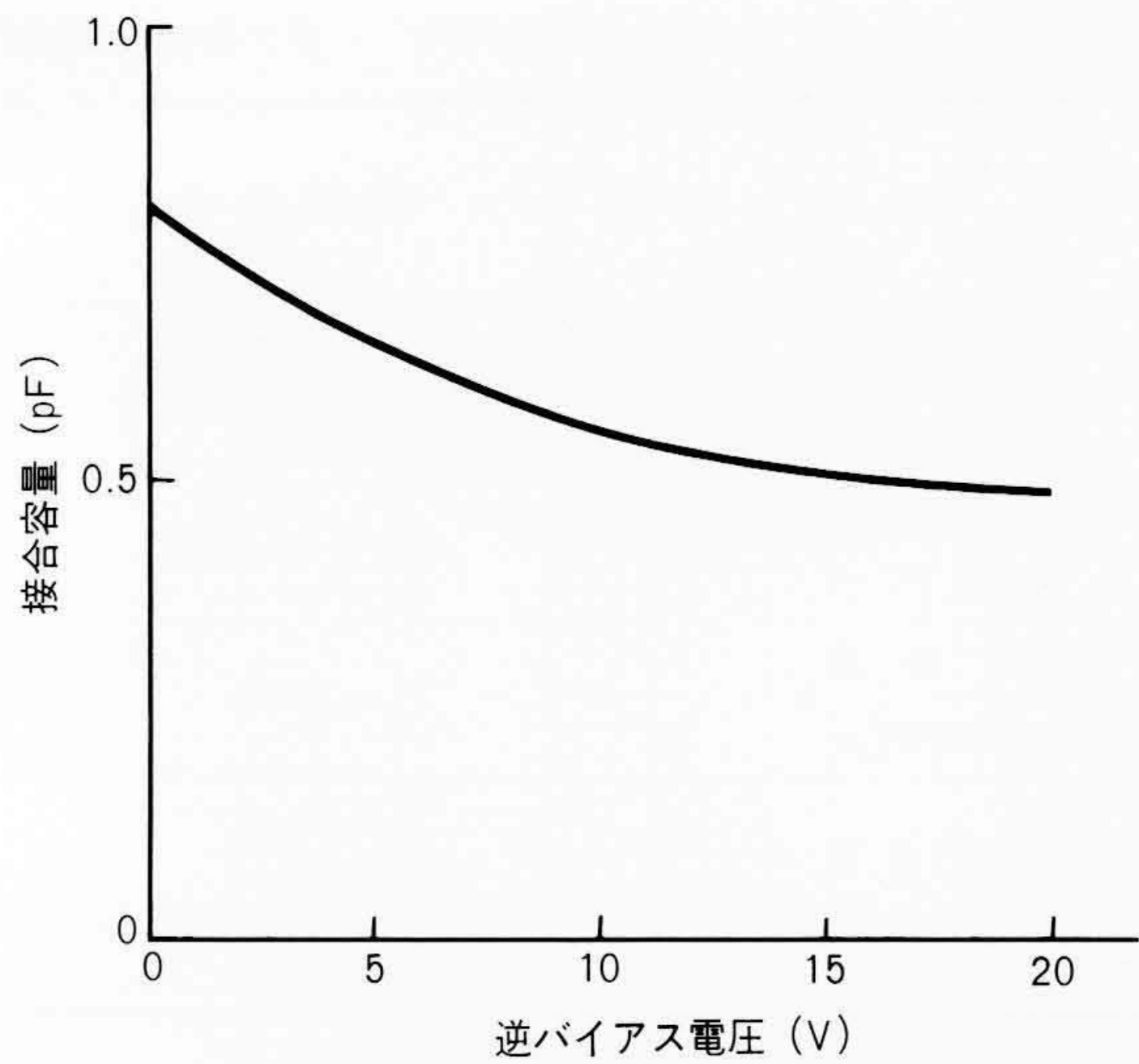


図7 PIN-PDの接合容量特性 逆バイアス電圧が増加するにつれて接合容量は減少し、15Vでほぼ一定値になる。

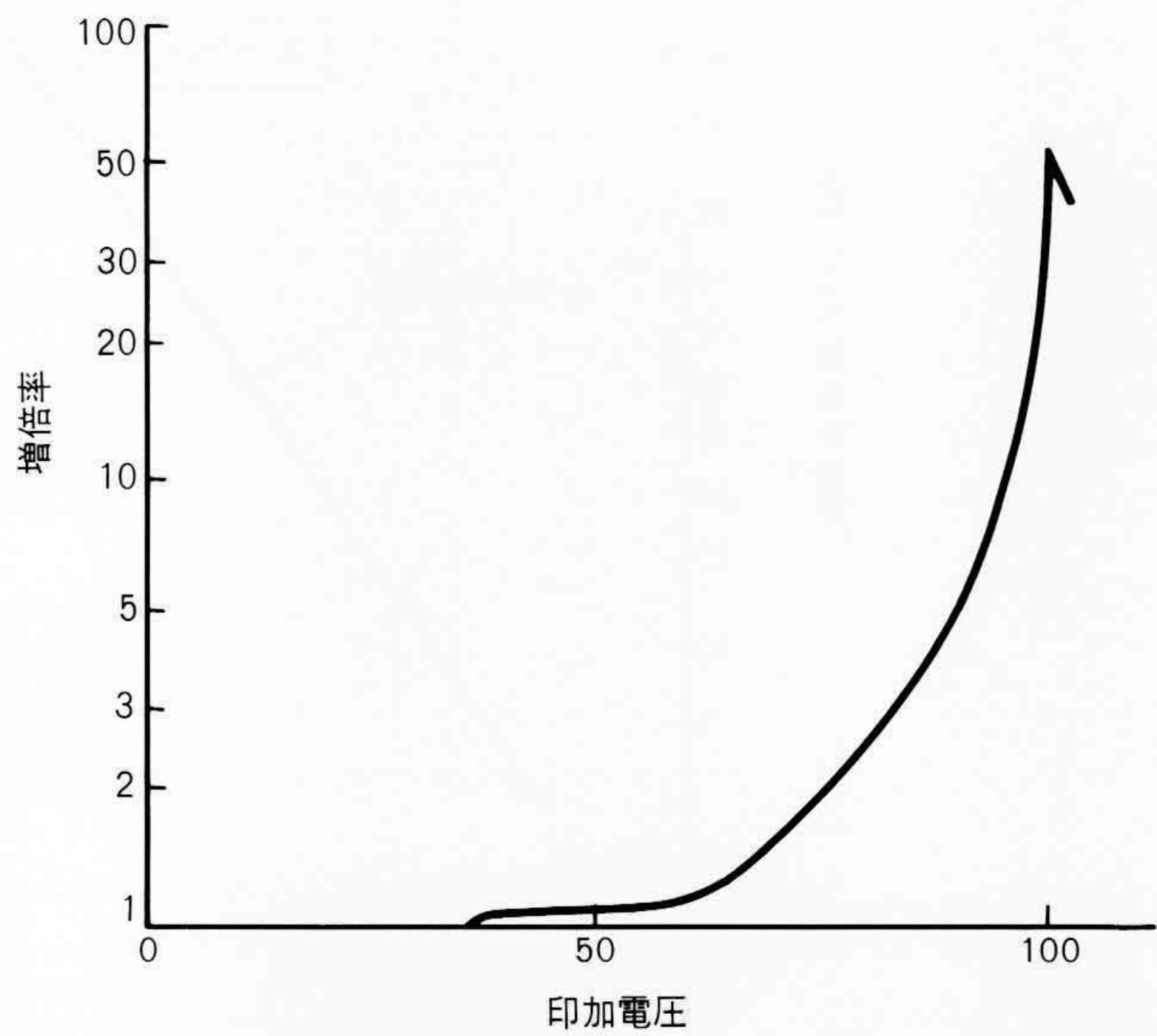


図8 APDの増倍率と印加電圧の関係 増倍率は印加電圧とともに増加し、降伏電圧の約100Vで最大となる。

る。これらの点から、下記を考慮してパッケージ設計を行った。

- (1) 顧客要求、パッケージの標準化の方向に沿ったパッケージとする。
- (2) 信頼度向上のため、部品点数を低減しパッケージ構造を単純化する。
- (3) 腐食及び経時変化をなくし、信頼性を向上させるためにパッケージ内部はオールメタル化する。

以上を配慮し設計したパッケージの形状は、2列14本のリードピン配列をなす箱形であり、配列ピンがケースの底面にあるDL形(Dual in Line Type)と2側面にリードピンを配列したBF形(Butterfly Type)の2種類である。その外形を図10に示す。DL形は周波数応答が約1Gビット/秒まで対応できる仕様

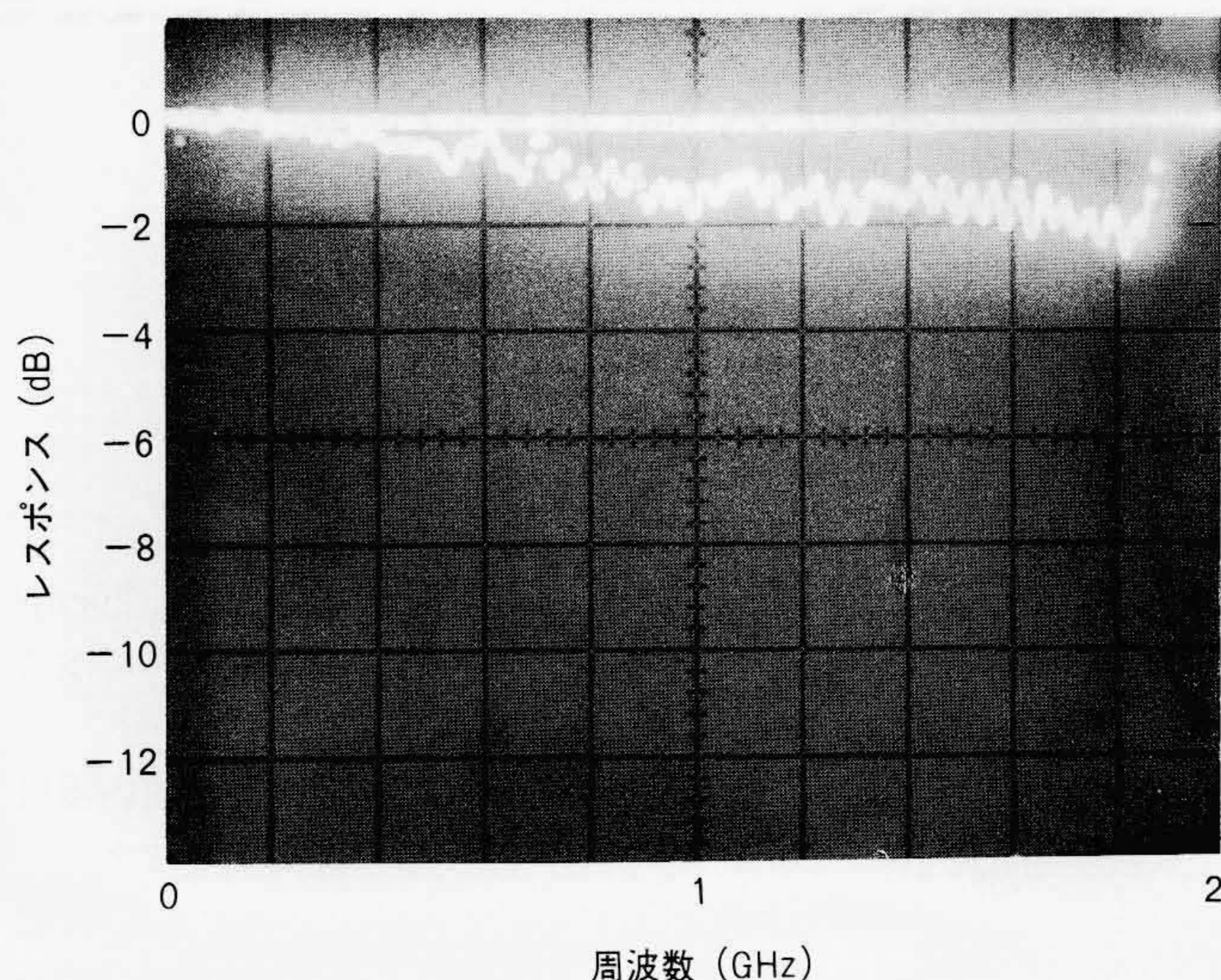


図9 APDの周波数特性 測定は $1.3\mu\text{m}$ LD(Laser Diode)光源を用いて行われ、 1.5GHz 以上の高周波動作ができることが分かる。

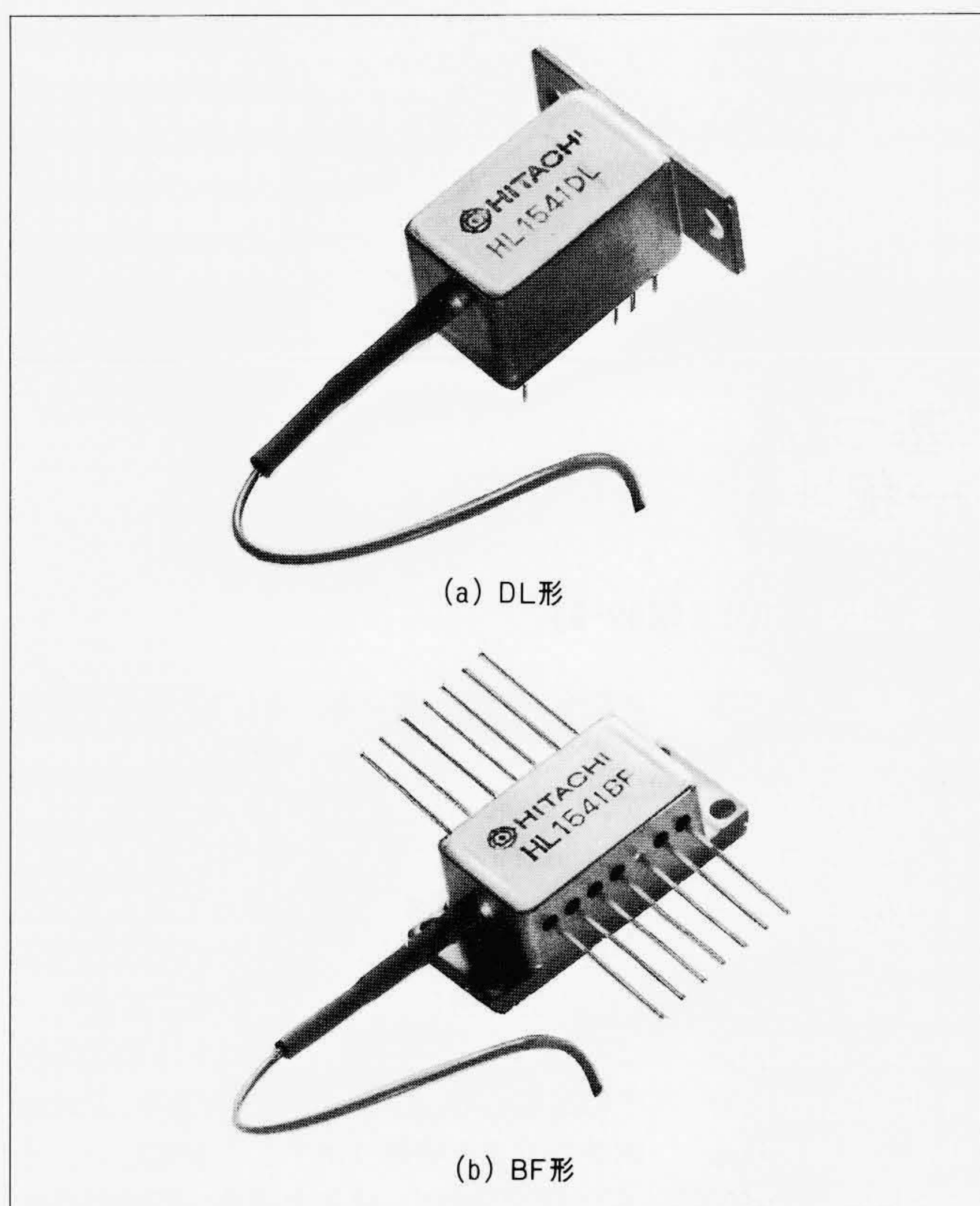


図10 通信用パッケージ ペルチェ素子、モニタ用PDを内蔵し、レーザー光はシングルモードファイバを介して外部に取り出す。

であり、BF形は約2 Gビット/秒の高周波応答が可能なパッケージ仕様となっている。BF形は主に電気インダクタンスに関するリードピンの形状、寸法を変え、高周波応答特性を向上させたパッケージであるが、内部構造はDL形と共通である。これらのパッケージの機能上のひとつの特長は、通電することによって加熱、冷却することができるペルチェ素子を内蔵し、LDの温度を一定に制御できる点にある。温度を一定に保持することで、より安定した光出力、波長での動作が可能となる。

パッケージとしては今後更に、複合化、多機能化を行い光通信の各種用途に応じ品種系列の拡充を図っていく。

5 結 言

高速・大容量化が進む光通信に対応するために、波長 $1.3\mu\text{m}$ 及び $1.5\mu\text{m}$ 帯のDFBレーザを開発した。このレーザは、高速変調時にも縦単一モードで動作するもので高速応答性にも優れている。平均寿命は 50°C で 10^6 時間以上で実用上十分な信頼度レベルにあり、また発振スペクトルも安定であることが確認された。パッケージとしてはDL形、BF形を開発し、約2 Gビット/秒の高速応答を可能にし、搭載するチップの機能を十分引き出せるようにした。

受光素子としては高感度、高速化及び低暗電流化を目的とし、InGaAs系のPIN-PD、APDの開発を行った。PIN-PDは、バイアス電圧10Vで暗電流1 nA、接合容量0.55 pF、遮断周波数2 GHz以上の特性を持ち、APDは量子効率85%、最大増倍率50、遮断周波数1.5 GHz以上の特性を示した。

以上の結果により、従来のFPレーザ、発光ダイオードと併せ、多様化する光通信用途に対応する高性能、高信頼度の発・受光素子の製品系列を整備し、今後のシステム開発への寄与が期待される。

参考文献

- 1) Dr.P.K.Runge, et al.: Journal of Lightwave Technology LT-2 No.6 744~753(1984)
- 2) 相田, 外: 通研研究実用化報告, 第36巻, 第3号, 315~321(1987)
- 3) S.Tsuji, et al.: Journal of Lightwave Technology LT-5 No. 6, 822~826(1987)
- 4) 平尾, 外: 光通信用半導体レーザ, 日立評論, 65, 10, 707~712(昭58-10)
- 5) M.Hirao, et al.: IEEE Journal on Selected Areas in Communications SAC-4, No. 9 1494~1501(1986)
- 6) 伊藤, 外: 第46回応用物理学会学術講演会予稿集, 2pE4(1985)

半導体酸化・拡散装置における過渡的なウェーハ面内温度分布解析

日立製作所 李屋錦司・松葉育雄・他1名

電子情報通信学会論文誌 J70—C—3, 324~331 (昭62-3)

半導体製造プロセスの高温熱処理工程で問題となる過渡的なウェーハ面内温度分布の解析方法を取り上げ、その計算結果が実用的な精度にあることを実験によって確認した。面内温度分布は、熱応力による結晶欠陥、酸化膜厚及び接合深さの均一性を支配するものであり、素子製造歩留まりを大きく左右する。

現状の高温熱処理工程は、酸化・拡散装置内の円筒形の反応管の中に、50~100枚のウェーハをボート上に等間隔に並べて一度に処理する方式が主流となっている。本報では、このバッチ方式を対象に、反応管、ウェーハ列、ボートの放射熱伝導を記述したウェーハ面内温度分布推定モデルの誤差評価を行っている。ウェーハ面内温度分布の、本モデルによるシミュレーション結果と赤外線放射温度計による計測データとの比較では、各時刻で発生する面内温度分布の推

定誤差は5%内である。

温度計測は、反応管入口から計測可能な後端ウェーハに焦点を合わせた赤外線カメラを、ボート挿入・引出し装置のロード後部に固定させ、リアルタイムモニタによるウェーハ面内熱画像から、放射率補正を行って、その温度分布を得ている。

ϕ 150mmのウェーハを速度20cm/minで950℃の管内へ挿入した場合、ウェーハ上部から下部にかけて各時刻で発生する150℃程度の垂直方向断面の温度分布形状のシミュレーション結果は、本測定時の温度分解能25℃内で、実測値とよく一致する。更に、面内分布形状を代表する等温線分布に関しても、ウェーハ下端を中心に形成された熱画像が得られ、モデル計算結果とよい一致を示す。このウェーハ下部領域の温度低下は、ウェーハに比べ熱容量が大きいボートの時間遅れによるものである。

なお、挿入速度を100cm/minに増加して、反応管内へウェーハ列を挿入すれば、20cm/minのときに比べて、ウェーハ面内の温度こう配は20~30%大きくなる。

一方、中央ウェーハの過渡的な面内温度分布を、面内情報として計測することは現状では不可能である。しかし、本モデルによる計算結果から、中央ウェーハは後端ウェーハに比べ、両隣のウェーハによって、反応管壁からの放射が遮断されるため、更に大きな温度こう配を発生していることが推定できる。

ウェーハの大口径化及び素子の高集積化に伴い、酸化・拡散装置へのウェーハ列挿入・引出し時のウェーハ温度の過渡状態の解析がますます重要な意味を持つようになってきた。本モデルは、新製品の立上げ、不良解析及び新形酸化・拡散装置の設計を行う上で、CAEシステムの中核となる。

人間の制御戦略に基づくFuzzy制御方式の一提案

日立製作所 安信誠二

計測自動制御学会論文集 23—9, 969~976 (昭62-9)

近年、マイクロコンピュータなどのハードウェア技術の発達に伴い、従来人間が行ってきた制御(運転)に関する知的活動を、アルゴリズム化し計算機化しようという試みが盛んである。

Fuzzy制御は、熟練者の経験則に含まれるある量が、「大きい」とか「小さい」といった、人間の主観的な言葉のあいまいさを、0から1までの値に対応させることによって、定義するFuzzy集合により定量化し、経験則を制御則化し対象システムの制御を行うものである。

これまで、Fuzzy制御は対象システムの状態量をFuzzy量として評価し、制御指令を決定する状態評価Fuzzy制御方式が提案され、セメントキルンや浄水場の薬剤注入などの制御に適用されてきた。これに対し筆者らは、熟練者による対象システムの運転を、(1)システム特性の把握、(2)本来の制御目的の評価により、望ましい状態となるように操作しているととらえ、これを定式化した

新しい予見Fuzzy制御方式を提案した。提案方式は、列車自動運転システムへ適用され、マイクロコンピュータにより熟練運転士と同等の運転を実現している。また、コンテナクレーンの自動運転にも適用し、実システムで良好な結果を得ている。

本論文では、まずこれら実システムへのFuzzy制御の適用経験に基づき、従来制御方式及び熟練者の運転に対するFuzzy制御の位置づけを検討する。次に、熟練者の運転を、対象システムの特性を推定し、最適な制御を行うとしてアルゴリズム化し、はん(汎)用Fuzzyコントローラを提案した。

本コントローラは、人間の制御戦略を、対象システムに対する過去の経験からその特性を定性的に把握し、ノウハウを蓄積することによって、(1)ときどき過去の制御指令に対する応答をチェックし、対象システムの現在特性を推定しながら、(2)要所要所で本来の制御目的を満足する制御方策を判断し、(3)通常はその制御方策に従って、制

御指令を決定している、として定式化した。

本コントローラは、上記人間の制御戦略を、(1)推定(評価)部、(2)判断部、(3)実行部の3階層に分け、各階層に対して経験則をFuzzy制御則化することによって、実現した。

提案方式は、実システムでの人間の制御活動を計算機化するのに適する。しかし、この計算機化では、対象システムの特殊性の経験則化も重要なファクタであり、Fuzzy制御の特長を明確に示すことが難しい。そこで本論文では、提案方式を、実システムの近似として有効であり、制御理論の適用例として一般的である、むだ時間を入力に持つ定位性プロセスへ適用し、計算機シミュレーションを行い評価した。

その結果、提案方式は人間の経験則に基づき推論しているため、コントローラが現在何を考え、何を評価基準とし、どうしようとしているのかを表示し、それを人間がチェックすることが可能であり、より人間に近づいた制御の実現に有効なことを示した。