特集 8

1 μm 帯光通信用受光素子

三川 孝*・金田隆夫*

(1984年11月30日 受理)

Detectors for optical communication systems
in the 1 μm wavelength region

Takashi MIKAWA* and Takao KANEDA*

(Received November 30, 1984)

1. 序

光ファイバの低損失, 低分散領域が存在する^{1,2)} 光波長 1—1.6 μm の 1 μm 帯に於いて, 長距離, 大容量な光通信システムの需要が増大している。これに伴い, 本波長領域で高性能な受光素子の研究が活発に進められている。

光通信システムの受光素子に要求される性能は, ①高量子効率, ②低雑音, ③高速応答性, ④低動作電圧, ⑤小型軽量, ⑥高信頼性等であり, この中で①～③の性能の向上は, 一口で云えば受光素子の高感度化といえる。

今迄の 1 μm 帯の受光素子としては, 既に実用段階にあるゲルマニウム・アバランシェフォトダイオード (GeAPD)^{3~6)} を始め, より高感度化を目ざした InGaAs APD^{7~9)} が開発されている。GeAPD は目的に応じて, 受光径の比較的大きいもの, シングルモードファイバ用に開発された小受光径のもの¹⁰⁾, 光波長 1.55 μm に合わせたもの¹¹⁾ 等各種の最適化された素子が製造され, 実用に供されている。これらの諸特性

はほぼ理論限界値に近いものが得られている。InGaAs APD はまだ研究段階であるが, 実験的にはその諸特性の限界がほぼ見えてきており, 後は実用化に向けて如何に最適化していくかが残された課題となっている。

一方, 分子線エピタキシャル技術 (MBE), 有機金属化学的気相成長法 (MOCVD), 化学的気相成長法 (VPE) 等の結晶成長技術の進歩に伴って, 上に述べたような従来型の APD では実現不可能な飛躍的な高感度特性を持った新規な APD が研究され始めている。これらの APD は, スーパーラティス (超格子)¹²⁾ や, 傾斜 (グレーディッド) バンドギャップ¹³⁾ や共鳴電離現象¹⁴⁾ を利用したものであり, 主として結晶内のバンド構造を上 に述べたような結晶成長技術により人工的に操作することによって作り上げたものである。今迄に GaAlAs (0.8 μm 帯), GaAlSb, HgCdTe 等の物質を用いて大幅な低雑音化につながる実験結果の報告がなされている。これらの APD は, 研究としてはまだ緒についたばかりの段階であり, 今後の研究の動向

*富士通研究所 (〒243-01 厚木市小野1677)

* Fujitsu Laboratories Ltd. (1677, Ono, Atsugi, Kanagawa, 243-01)

が注目されている。

上に述べた高感度化に加え、低動作電圧、小型、軽量といった面を重視するものとしては、InGaAs PINフォトダイオード、又はそれとFETとを一体化した素子(PIN/FET)が研究されている。これらの素子は一般的には数100メガビット(Mb/S)以下の低・中ビットレート、短距離の比較的簡便なシステムで用いられる傾向にある。PIN/FETはハイブリッド^{15,16)}からモノリシック^{17~19)}な集積化への研究が進んでいる。又、このような従来型のPINフェトダイオードとは異なった新しい着想にもとづく素子としては、低動作電圧で且つゲインのある受光素子も研究されている²⁰⁾。

本稿では、光通信システムの代表的な受光素子であるAPDを中心に述べ、更にPINフォトダイオードの諸特性やその集積化の現状についてもふれる。

2. アバランシェ・フォトダイオード(APD)

APDは、通常のフォトダイオードに於いて、 p^+n 接合の一部を 10^5V/cm 以上の高電界にし、アバランシェ現象を利用して、光励起によって生じたキャリアに増倍作用が起こるようにしたものである。この増倍作用により、素子内部で電流利得が生じ、受信感度が向上する。このAPDの性能を表わす主要な特性パラメータは、①量子効率、②増倍雑音、③周波数特性、④暗電流特性等であり、これらの諸特性と次段のアンプの総合された特性として受信レベルがある。以下本稿ではこれらの諸特性に沿って各APDの概説を行う。

2.1 ゲルマニウムAPD(GeAPD)

最初のGeAPDは1966年にMelchior等により報告されたものである²¹⁾。その後 $0.8\mu\text{m}$ 帯の光ファイバの出現により、一時研究の主力が $0.8\mu\text{m}$ 帯のシリコンAPD(SiAPD)に移ったが、1976年に $1\mu\text{m}$ 帯で低損失、低分散の光ファイバが開発されるや否や^{1,2)}、一早くGeAPDの研究が再開され以後の精力的な研究により現

在では $1\mu\text{m}$ 帯で最も実績のある実用的な素子となっている。このGeAPDは大きく分けて次の3種類に分類される。①最も一般的な受光径 $100\mu\text{m}$ の p^+n 型GeAPD^{3,5)}、②シングルモードファイバ用の小受光径 p^+n 型GeAPD¹⁰⁾、③ $1.55\mu\text{m}$ 用のリーチスルー型 p^+nn^- GeAPD¹¹⁾。以下これらについて順に述べていく。

2.1.1 最も一般的な p^+n 型GeAPD

p^+n 型GeAPDの構造をFig. 1に示す。本素子では後で述べる低雑音化の要請から、 n 基板を用いた p^+n 構造となっている。素子は受光部、ガードリング、チャンネルストップから構成されており、受光径は $100\mu\text{m}$ である。表面はSiN又は SiO_2 で無反射コーティング並びにパッシベーションされている。 p^+ 層はインジウム(In)又はボロン(B)のイオン注入により形成されている。ガードリングはベリリウム(Be)のイオン注入により形成され、接合部周辺での局所的なブレイクダウンを防止し、受光部で均一に増倍が起こるようにするもので、受光部よりも10—20V高い耐圧が得られるように設計されている。チャンネルストップ部は砒素(As)のイ

Fig. 1 p^+n 型GeAPD素子構造

Fig. 2 p^+n 型GeAPD概観写真

Fig. 3(a) パッケージ化された $p^+n\text{GeAPD}$ Fig. 3(b) リセプタクル内に装着された $p^+n\text{GeAPD}$

オン注入により形成され、表面の横方向の暗電流を低く抑え、信頼性を向上させるために設けられている。Fig. 2に素子の概観写真、Fig. 3(a)に1ピンのパッケージにチップをマウントした状態を示す。Fig. 3 (b)は素子をリセプタクルに装着した様子を示す。

次に素子の諸特性を記す。

①暗電流・増倍率特性 Fig. 4に暗電流特性を示す(実線)。ブレイクダウン電圧は約32Vである。暗電流はブレイクダウン電圧の90%(0.9 V_B , V_B :ブレイクダウン電圧)で150nAと低い値を示し、チャンネルストップの効果が現わ

Fig. 4 暗電流・増倍率特性

Fig. 5 暗電流の発生機構

れていることがわかる。同図に光波長 $1.3\mu\text{m}$ に於ける増倍特性を示す100倍以上の最大増倍率が得られている。但し、増倍率 M は高バイアス時のフォトカレントを低バイアス時(GeAPDでは $V=1\text{V}$)のフォトカレントで割った値で定義され、電流利得を表わす。APDの暗電流は一般的にFig. 5に示すように3つの成分に分けられる²²⁾。①基板とパッシベーション膜の界面に沿って流れる表面電流 I_{DS} 、②空乏層中(図の l_D の部分)で発生する $g-r$ 電流 I_{DB} 、③空乏層

外の中性領域中 (図の L_n の部分) のキャリアの拡散に起因する拡散電流 I_{Diff} この内 (a), (b) とは暗電流の温度変化を測定することにより活性化エネルギーの値から分離できる。即ち, (a), (b) の暗電流は真性キャリア密度 n_i の一乗即ち, $\exp(-E_g/2kT)$ に比例するため (E_g は物質のバンドギャップエネルギーで Ge の場合 0.67 eV) 暗電流の温度変化の活性化エネルギーは $E_g/2$ となる。一方, (c) の成分のみは n_i の2乗即ち $\exp(-E_g/kT)$ に比例するため, 活性化エネルギーは E_g となる。図6に GeAPD の暗電流の温度特性を示す。0.9 V_B の暗電流は15℃以上で $\exp(-E_g/kT)$ に比例して増加しており, 15℃以上では拡散電流が支配的となっていることがわかる。この場合活性化エネルギーは Ge のバンドギャップエネルギーの0.67 eV となっている。一方, 15℃以下では $\exp(-E_g/2kT)$ の変化を示し, (a)乃至は(b)が支配的要因となっていることがわかる。暗電流は又別の観点から次の2つに分類できる。即ち, (i) 受光部増倍層を通過して増倍を受ける暗電流²⁴⁾, (ii) 増倍を受

けない暗電流²⁴⁾, 前者(i)の増倍される暗電流は APD の大きな雑音源となり, システムの受信レベルに大きな影響を与える重要な因子である。次にこの増倍される暗電流を求めてみる。15℃以上で支配的となっている拡散電流は, 図5からもわかるように, 受光部を通過するため, 増倍される暗電流となる。従って, 図6の15℃以上の特性に於いて1 Vと0.9 V_Bの各バイアス電圧での暗電流値の変化は主として増倍のためと考えられ, この差から $V=1\text{ V}$ (即ち $M=1$) に於ける増倍される暗電流値 I_{DM} として $\sim 50\text{ nA}$ が求まる²⁴⁾。今15℃以上の活性化エネルギーは0.67 eVであるので, 通常の光通信システムの使用温度の上限である50℃では, 増倍される暗電流は $\sim 300\text{ nA}$ となる。これらの値は後に受光器の受信レベルの考察を行う時に重要なパラメータとなる。

② 量子効率 量子効率は1個のフォトンの入射に対し, 光電変換により発生する電子・正孔対の割合で $\eta = \frac{I/q}{P/h\nu}$ で表わされる。但し, η : 量子効率, I : 増倍率1に於けるフォトカレント, q : 素電荷量, P : 入射光子のエネルギー, h : プランクの定数, ν : 入射光の振動数。図7に量子効率の光波長依存性の計算結果 (実線) と実験結果を示す。短波長側になるに従い, 光の吸収係数の増大により表面付近で主に吸収されるため, p^+ 層の表面再結合の影響により量子効率が低下する様子がわかる。1.3 μm での表面でのロス約15%と見積られる。表面に SiN で無反射コーティングすることにより, 約84%

Fig. 6 暗電流の温度依存性

Fig. 7 量子効率の光波長依存性

の量子効率が実験的に得られており、計算結果とも良い一致を示している。

③ 増倍雑音 光電流に伴う雑音電流の2乗平均は通常ショット雑音となるが、この雑音はAPDでは増倍過程で M^2 倍され、更に増倍過程の統計学的な揺ぎのために、 F 倍(F :過剰雑音係数)されて過剰な増倍雑音を生ずる。この増倍雑音の大小がAPDの受信感度を決定する一番大きな要因となる。増倍雑音は物質定数である正孔と電子に対するキャリアイオン化率(β , α)と密接に関係し、McIntyreの理論²⁵⁾によれば、“イオン化率比(β/α or α/β)が大きき、しかもイオン化率の大きい方のキャリアを増倍層に注入した時に低雑音化される”ということがわかっている。Geのイオン化率の測定結果から、Geでは正孔に対するアオン化率の方が電子のそれよりも1.5倍程度大きいことがわかっている²⁶⁾。従ってGeAPDでは低雑音化するためには、増倍層への純粋な正孔注入条件を満足するように素子を作製する必要がある、正孔が少数キャリアとなる n 型基板を用いた p^+n 構造がとられている。Fig. 8に n^+p 及び p^+n 型の過剰雑音係数 F の光波長依存性の計算結果及び実験結果を示す²⁷⁾。 n^+p 型では光波長の増大と共に電子注入の割合が増加するため F 値が大きくなる。逆に p^+n 型では光波長の増加と共に光が n 型基板の奥で吸収されるための正孔注入の割合が増大し、 F 値が減少する。計算結果から、 p^+n 型の F 値は光波長 $1.3 \leq \lambda \leq 1.5 \mu\text{m}$ で約9が得られている。又、 $\lambda \sim 1.55 \mu\text{m}$ では $F \sim 7.2$ と下がっている。増倍雑音は又、素子の受光面内の増倍感度分布と密接に関係している。一般に、

Fig. 8 過剰雑音係数の光波長依存性

Fig. 9 面内増倍感度分布

Fig. 10 過剰雑音係数の増倍率依存性

受光面内の増倍感度分布に凹凸が激しく一様でない時は増倍雑音が増加する。Fig. 9に $M=10$, $\lambda=1.3 \mu\text{m}$ に於ける p^+n GeAPDの面内増倍感度分布を示す。受光面内の増倍はきわめて均一で、又周辺での局所的なブレイクダウンも認められず、良好なガードリング効果が得られている。図10に過剰雑音係数 F の増倍率 M 依存性を示す(測定の中心周波数30 MHz, バンド幅1 MHz, 波長 $\lambda=1.3 \mu\text{m}$ 及び $1.55 \mu\text{m}$) $\lambda=1.3 \mu\text{m}$ では $M=10$ で $E=8-9$, $1.55 \mu\text{m}$ では $6-7$ が得られており、Fig. 8の計算結果ともよく一致している。Fig. 11にこの増倍雑音の測定系のブロック図を示す。この測定系では適当な周波数(通常1 KHz程度)でパルス変調された光をAPDに照射し、これと同周波数、同位相のパルス信号を参照信号としてロックインアンプに加えることにより、暗電流に起因するショットノ

Fig. 11 増倍雑音の測定系

Fig. 12 $p+n$ 型GeAPDの周波数特性

イズを排除した状態で光電流のみに基づく増倍雑音を測定することができる。

④ 応答速度 APDの応答速度は次に述べる4つの因子で決められている(ヘテロ接合を含んだAPDでは後述するようにキャリアの蓄積効果により要因がもう一つ付け加わる)。(a)CR時定数, (b)アンバランシェビルドアップタイム, (c)空乏層中のキャリアの走行時間, (d)空乏層外の中性領域を走行するキャリアの拡散時間。Fig. 12に500MHz迄の周波数特性の測定結果を示す。測定は光波長 $1.3 \mu\text{m}$ で増倍率を変化させて行った。この図から増倍率が大きくなればなる程周波数特性が劣化する様子が良くわかる。これはAPDではキャリアの衝突電離により, ある増倍率に達する迄に一定の時間(アンバランシェビルドアップタイム)を要するためである²⁸⁾。アンバランシェビルドアップタイムに起因する3dBのバンド幅はGeの場合, 増倍率10付近で使用する時は $\sim 3 \text{GHz}$ となりかなり高い周波数領域となる。M=10以上では, 周波数特性の劣化は大きいため, 先の増倍雑音特性とも併せ考えると, GeAPDは増倍率10付近で使うことが望ましい。本構造の素子で一番周波数特性に大きく効く要因は, (a)のCR時定数の効果である。Fig. 12に示した測定は500MHz迄であるが, このCR時定数を考慮すると, $p+n$ 型Ge APDの3dBのバンド幅は $\sim 1.5 \text{GHz}$ と見積ることができる(素子容量 1.3pF , シリーズ抵抗 25Ω , 測定系 50Ω とする)。

⑤ 受信レベル Fig. 13に $1.3 \mu\text{m}$ 帯に於いて $p+n$ Ge APDを用いて行われた各種システム実

Fig. 13 最小受信レベルのビットレート依存性

Fig. 14 暗電流によるエージングテスト

験の最小受信レベルのビットレート依存性を示す。最も高域では 2Gb/s に於いて, -29.4dBm , 44.3km の無中継伝送が実現されており²⁹⁾, 広い周波数帯域にわたって実用的な特性を有していることがわかる。

⑥ 信頼性²⁴⁾ Fig. 14は暗電流による加速寿命試験(BT処理)の結果である。試験は 125°C , 25V で行い, 暗電流の測定は常温で行ったものである。1万時間経過後暗電流の変化は認められない。このことは, パッシベーションが良好であり, 表面反転層の発生が抑えられていることを示している。Fig. 15に過剰雑音係数, ブレークダウン電圧, 量子効率のBT処理試験の結果を示す。いずれも暗電流同様変化はみられず良好な特性を示している。この信頼度試験の結果からGeAPDは光通信システムの受光素子として, 高信頼な素子であることがわかる。最後に

Fig.15 過剰雑音係数 F , ブレークダウン電圧 V_B , 量子効率 η によるエンジグテスト

p^+n 型 GeAPD の諸特性を Table I に示す。

2.1.2 シングルモードファイバ用小受光径 GeAPD¹⁰⁾

今迄述べた受光径 $100\mu\text{m}$ の GeAPD は, シングルモードファイバ及びマルチモードの光ファイバに適用され, その有用性が実証されている。一方近年の光通信システムの大容量化, 長距離化に伴い, より高感度でしかもシングルモードファイバに適合した受光素子が必要となっている。受光径 $100\mu\text{m}$ の GeAPD は増倍雑音, 量子効率等にほぼ理論限界値に近い特性が得られており, これらをより改善することは困難である。

Fig.16 暗電流の受光径依存性

しかし暗電流には素子構造を最適化することにより, 改善の余地がある。即ち, 受光径を小さくすることにより, 受光部を流れる増倍される暗電流を低減し, 受信感度を上げることが出来る。本節ではこの目的で開発した小受光径 GeAPD の諸特性について述べ, $100\mu\text{m}$ GeAPD との比較も行う。

① 小受光径 GeAPD の諸特性

Fig.16 に同一ウェファァー上に受光径 20, 30, 50, 80, $100\mu\text{m}$ の APD を作製し, 増倍される暗電流 I_{DM} ($M=1$, 常温に於ける値) を測定した結果を示す³⁰⁾。図から I_{DM} は受光径の 2 乗に逆比例して大幅に減少することがわかる。 $30\mu\text{m}$ の

Table I p^+n 型 GeAPD の諸特性 (受光径 $100\mu\text{m}$)

Parameters	Vaue	Units	Test conditions
Breakdown voltage (V_B)	30—35	V	$I_D = 100\mu\text{A}$
Temperature coefficient of V_B	0.12	%/deg	*
Dark current (I_D)	0.15—0.3	μA	$V=0.9V_B$
Capacitance	1.3	pF	$f=1\text{MHz}$, $V=0.9V_B$
Quantum efficiency	80—84	%	$\lambda=1.3\mu\text{m}$, DC
Excess noisc factor	8—9	—	$\lambda=1.3\mu\text{m}$, $M=10$
Cutoff frequency	1**	GHz	$\lambda=1.3\mu\text{m}$, $M=10$ $R_L=50\Omega$, 3dB down to 100kHz

$$*\gamma = \frac{V_B(25^\circ\text{C} + \Delta T^\circ\text{C}) - V_B(25^\circ\text{C})}{V_B(25^\circ\text{C}) \times \Delta T^\circ\text{C}} \times 100 (\%/^\circ\text{C})$$

** Estimated from the frequency response up to 500 MHz.

素子では $I_{\text{DM}} = 5 \text{ nA}$ であり、従来の $100 \mu\text{m}$ の素子よりも一桁低暗電流化されている。今 $30 \mu\text{m}$ の受光素子の $0.9 V_{\text{B}}$ 及び 1 V に於ける暗電流の温度変化は 5°C 以上の温度に於いて $100 \mu\text{m}$ 径の場合と同様 $\exp(-E_{\text{g}}/kT)$ ($E_{\text{g}} = 0.67 \text{ eV}$) に比例した変化を示し、拡散電流が支配的となっている。これから通常のシステムの使用温度の上限である 50°C でも $I_{\text{DM}} \sim 30 \text{ nA}$ の低暗電流が得られ、大幅な受信レベルの向上が期待できる。Fig. 17 に受光径 $30 \mu\text{m}$ の素子(チップ+パッケージ)の C-V 特性を示す。 $100 \mu\text{m}$ の場合と比べ

Fig. 17 容量(C) — 電圧(V) 特性

Fig. 18 誤り率—受信レベル特性

容量値は半分以下 (0.5 pF , 於 30 V) に低減しており、CR 時定数による 3 dB 帯域は 4 GHz 以上の高域迄のびることがわかる。

② 最小受信レベルの評価

受光径 $30 \mu\text{m}$ の素子を球レンズを介してシングルモードファイバと結合し、モジュールを作製した。モジュールの量子効率と素子単体の量子効率と同程度の 90% の値を示し、 $5 - 50^\circ\text{C}$ の範囲の値の変化は常温の 3% 以内であり、シングルモードファイバとの結合が良好に行われていることがわかる。本モジュールを用い、 45 Mb/s (RZ), $1.3 \mu\text{m}$ に於いて $30 \mu\text{m}$ の素子の符号誤り率特性を調べ、最小受信レベルを評価した結果を Fig. 18 に示す。誤り率 10^{-11} に於いて、 $30 \mu\text{m}$ の場合 25°C で -51.9 dBm , 50°C で -50.7 dBm の高感度特性が得られている。 $100 \mu\text{m}$ の素子に比べ各々 2.5 dB , 4.5 dB の改善となっている。これは増倍される暗電流の低減の効果によるもので、小受光径化が素子の高感度化に大きく寄与していることがわかる。以上述べたことから、 $30 \mu\text{m}$ 程度の小受光径 GeAPD がシングルモードファイバ用受光素子としてすぐれていることがわかる。

2.1.3 $1.55 \mu\text{m}$ 用リーチスルー型 $p^+n n^-$ GeAPD¹¹⁾

近年、光波長 $1.55 \mu\text{m}$ で 0.2 dB/km の極低損失な光ファイバが開発され、 $1.55 \mu\text{m}$ 帯の光通信が各方面で注目されるようになり、この波長領域での受光素子の開発が急務となっている。

2.1.1, 2.1.2 で述べた p^+n 型 GeAPD は、 $1.3 \mu\text{m}$ 帯用に開発されたもので、 $1.55 \mu\text{m}$ 帯では周波数特性に劣化をきたし、光通信用としては向いていない。この $1.55 \mu\text{m}$ での応答を改善する目的で開発されたのがリーチスルー型 GeAPD で、現在では $1.55 \mu\text{m}$ 帯で実用レベルにある唯一の光通信用受光素子である。Fig. 19 に示すように、 $1.55 \mu\text{m}$ では Ge の吸収係数が急激に低下するため、 $1.55 \mu\text{m}$ 光に対する光の吸収長は $20 \mu\text{m}$ にも達する。前述の p^+n GeAPD は空乏層幅が $2 - 3 \mu\text{m}$ と狭く、 $1.55 \mu\text{m}$ 光を受光した場合、Fig. 19 のインセットに示すように、大部分が空乏

Fig. 19 Geの吸収係数及び拡散電流成分の発生機構

Fig. 20 リーチスルー型 p^+nn^- GeAPDの素子構造 Fig. 21 リーチスルー型 p^+nn^- GeAPDと p^+n GeAPDの電界分布 (α : 光の吸収係数) 図には p^+ 部は示されていない。

層外で吸収されて遅い拡散成分となり、周波数特性乃至はパルス応答特性が劣化する。又、 p^+n 接合型で空乏層を広げようとするAPDの受光部耐圧が上昇し、ガードリング部耐圧と同程度となり素子実現が難しくなる。リーチスルー型構造は、空乏層を $1.55\mu\text{m}$ の光の吸収長に見合った十分に長くでき、しかも受光部耐圧を下げるために考えだされた構造で、GeAPDでは p^+nn^- 型となっている。Fig. 20に本素子の構造を示す。この接合の特徴はFig. 21に示すように、 nn^- 接合のところで、電界値が急激に低下するために、 n 層のない p^+n 接合と比較して、して、およそ斜線部で示される面積分だけ耐圧が低く抑えられることにある。同時に、各層の濃度、厚みを最適設計することにより、空乏層幅を吸収長の2倍（吸収係数 α の2乗分の1）程度に選ぶことができ（約 $20\mu\text{m}$ ）、 $1.55\mu\text{m}$ 光に対する周波数特性を改善することができる。

Fig. 22にリーチスルー型GeAPDの周波数特性の実験結果 (Δ) を示す。又、比較のために p^+n GeAPD ($100\mu\text{m}$ 受光径)の結果も示す。拡散電流成分が排除され、 p^+n 型に比べ、周波数特性が大幅に改善されていることがわかる。500 MHzでの周波数特性の劣化は凡そ1.5 dBである。この劣化は拡散の影響ではなく、空乏層を走行時間によるもので、リーチスルー型の場合、空乏層が長いから、ある程度本質的に避けられないものである。又、光の波長を変えた実験結果から、 $1.58\mu\text{m}$ 迄はこの $1.55\mu\text{m}$ と同じ周波数特性を示すことがわかっている。Fig. 23に100M

Fig. 22 リーチスルー型GeAPD (RAPD)の周波数特性

$p+n$ Ge APD
2nsec/div

リーチスルー $p+nn-$ Ge APD

Fig. 23 パルス応答特性 ($\lambda=1.55\mu\text{m}$, 100 Mb/s)

Fig. 24 誤り率—受信レベル特性

b/s, $1.55\mu\text{m}$ に於けるリーチスルー型と $p+n$ 型のパルス応答波形を示す。 $p+n$ 型でばパルスの立下り特性に遅い拡散電流成分に起因する裾引きが観測されるのに対し、リーチスルー型では裾引きはみられず、符号間干渉のない S/N 比の高い伝送を行うことができる。リーチスルー型と $p+n$ 型の受信感度を100 Mb/s, $1.55\mu\text{m}$ で測定した結果をFig. 24に示す。リーチスルー型では誤り率 10^{-11} に於いて最小受信レベル -44.3dBm が得られている。これは $p+n$ 型の素子により、 $1.3\mu\text{m}$ 帯で得られている受信レベルと同等の値である。又、リーチスルー型の場合、最小受信レベルが $p+n$ 型よりも約 5.2dB 大幅に改善されている。これは上述の周波数特性（即ち交流の量子効率）の向上や、パルス特性の改善により符号間干渉を排除したことによる。又本素子を用いた $1.55\mu\text{m}$, 400 Mb/s, 2 Gb/sの各伝送実験でも良好な結果が報告されている³¹⁾。以上からリーチスルー型GeAPDは、ファイバの伝送損失が最小となる $1.55-1.58\mu\text{m}$ の領域に於いて実用性が十分高いことがわかる。最後に代表的特性を表Ⅱにまとめる。表Ⅱで特に注目すべき点は、過剰雑音係数の値が次に述べるInGaAs APDに匹敵する程度迄低くなっていることである。これは $1.55\mu\text{m}$ では純粋な正孔注入が実現されているからである。

以上3種類のGeAPDについて概説した。Ge APDはファイバの低損失、低分散な波長領域 $1.3-1.6\mu\text{m}$ 帯で極めて実用的な特性を有していることがわかる。又、GeAPDの高感度化の面から、暗電流の低減のためには小受光径化が、 $1.55\mu\text{m}$ 帯への波長感度の拡大に対してはリーチスルー型構造が有用であることを示した。

2.2 InGaAs APD⁷⁻⁹⁾

Ge APDは物質定数からくる制限から、今迄述べてきた以上に低暗電流、低雑音化することは難しい。一方では、大容量、長距離の光通信を実現する上では、より一層の高感度化が要求される。この要求に答えるものとして、現在InP, GaSb等のⅢ—Ⅴ族化合物又はそれらの混

Table II リーチスルー型 p^+nn^- GeAPDの諸特性

容量 (pF)	全暗電流 (μ A)	増倍される 暗電流 (nA)	量子効率 (%)	過剰雑音係数 F ($M=10$)	遮断周波数 (MHz)
0.6	1.3	70	80	6.1	> 500

晶を用いた受光素子が研究されている。本節では、そのうち現在最も研究が進んでいるInP系のInP/InGaAs APDについて述べる。InP系はGeに比べバンドギャップエネルギーが大きく、真性キャリア密度も小さいため、本質的に低暗電流が期待され、又正孔と電子のイオン化率比も大きく、低雑音化、高速化が図られる等の利点を有している。このInP/InGaAs APDの高感度化を実現するためには、①ヘテロ界面の暗電流や周波数特性に及ぼす影響、②結晶軸の選択、③ガードリング効果の増大等の設計課題が存在する。本節では、これらの課題を克服しつつ実現したInP/InGaAs APDの諸特性について述べ、最後に総合的評価として、温度特性を含めた最小受信レベルを計算し、Ge APDとの比較も行う。

① 素子構造及び設計概念

Fig. 25に作製した素子構造を示す^{8,32)}。プレーナ型で、各層は液相成長法により形成されている。本構造の特徴を次に列挙する。

(i) SAM (Separate absorption and multiplication) 構造⁷⁾——低暗電流化

InP/InGaAs APD ではブレイクダウン電圧付近でトンネル電流が増大し、これが暗電流を支配する要因となり得る。このトンネル電流は一定電界の下では次式で与えられる。

Fig. 25 プレーナ型 InP/InGaAsP/InGaAs APD の素子構造

$$J = \left(\frac{2m^*}{E_g} \right)^{1/2} \frac{q^3 E V}{(2\pi)^3 \hbar^2} \cdot \exp \left(- \frac{\pi}{4 \hbar q E} (2m^* E_g^2)^{1/2} \right)$$

ここに、 J : トンネル電流密度、 m^* 有効質量、 E_g : バンドギャップエネルギー、 E : 一定電界、 V : 印加電圧、 q : 素電荷量、 $\hbar$: プランクの定数の $1/2\pi$

従って、トンネル電流を低減し、低暗電流化するためには、アバランシェを起こさせる高電界部分にはできるだけバンドギャップが大きく、有効質量の大きな物質を用いることが有利である。このために、増倍層としてバンドギャップエネルギーや有効質量の大きなInP ($E_g=1.35$ eV)を用い、光吸収層としてバンドギャップエネルギーの小さいInGaAsP ($E_g=0.9$ eV)、やInGaAs ($E_g=0.75$ eV)を用いた増倍層と光吸収層を分離したSAM構

Fig. 26 正孔のヘテロ界面に於ける蓄積の説明図

造が一般的にとられている。このSAM構造の場合でも、InGaAs(P)層の最高電界は暗電流特性の面からは出来るだけ低く抑える必要があり、各層の厚み、濃度等に最適設計がなされている。

(ii) InGaAsP中間層の挿入—高速応答

InP/InGaAsのヘテロ界面にはFig.26に示すような価電子帯の障壁 ΔE が存在する。この障害のために光励起によって生じた正孔(図の○印)の走行が妨げられて障壁部に蓄積される^{33, 34)}。この蓄積された正孔は比較的遅い時定数(～30ns)で放出されるために、これが応答速度の劣化をもたらす。APDの応答速度を決める通常の要因は、先にGeのところで述べた4つが挙げられるが、ヘテロ界面を含んだAPDではこのようなキャリアの蓄積効果も劣化の要因として設計に組み込む必要がある。Fig. 25の構造ではInPとInGaAsとの間に両者の中間的なバンドギャップの値を持つInGaAsP層($E_g=0.9\text{eV}$)を挿入する³⁵⁾ことにより、各ヘテロ界面での価電子帯の障壁の高さを減ずることにより、高速応答を実現している。InGaAsP層の代わりに、バンドギャップがInGaAsP層からInPまで連続的に変わっている層を挿入しても良い。

(iii) <111>結晶軸の採用—低雑音化

本構造の素子の第3番目の特徴は、結晶軸として、<111>軸を採用していることである³⁶⁾。即ち、<100>や<110>方向と違って、<111>InPでは電子は衝突電離のための閾値エネルギーを持たないため、電子によるアバランシェは起きにくく、正孔と電子に対するイオン化率比 β/α は大きくなることが予想される。これにより低雑音化を図ることができる。

(iv) ガードリング

Fig. 25に示すようなプレーナ構造は、素子の信頼性や設計の自由度を考えた場合、不可欠な構造である。このプレーナ構造を実現するためには、良好なガードリング構造が是非とも必要となる。本素子ではBeのイオン注入

Fig. 27 暗電流・増倍率特性⁸⁾

による傾斜接合と、上部のInP層の濃度を低くし、Be接合のエッジでの局所的なブレイクダウンを防止することにより、良好なガードリング効果を得ている³⁷⁾。

② 暗電流及び増倍特性

Fig. 27に暗電流特性を示す(実線 I_d)。ブレイクダウン電圧 V_B は112Vで、 $0.9V_B$ で～10nAと低い値が得られている。同図に1.3 μm 光を照射した時の増倍特性(I_p)を示す。30V付近から光感度が生じているが、この電圧は空乏層がInGaAsP層へ到達(リーチスルー)する電圧に対応している。この電圧以下では、空乏層はInP中に有り、InP中では1.3 μm 光の吸収は行われないため、感度を生じない。最大増倍率は30程度であり、InP/InGaAs APDを用いた光通信システムの最適増倍率が20前後であることを考えると、十分高い値といえる。量子効率、1.3 μm 光に対して80%、1.55 μm では75%が得られている。Fig. 28に2素子のサンプルの暗電流の増倍率依存性を示す³⁸⁾。増倍率の高いところでは、全暗電流は主として増倍される暗電流で決まっていると考えられ、増倍率に対し、直線的な変化を示

Fig. 28 暗電流の増倍率依存性

す。この直線部分を外挿して縦軸との交点を求めることにより、増倍率=1に於ける増倍される暗電流 I_{DM} を見積ることができる。これから、 $I_{DM}=1.5-4.5\text{ nA}$ (於、 $M=1$, 常温) が得られる。この値は先に述べた $100\mu\text{ m}$ のGeAPDに比べ、一桁以上小さい暗電値である。常温 $\sim 80^\circ\text{C}$ の暗電流の測定結果では、暗電流は $\exp(-0.4/kT)$ に比例して増加しており (即ち活性化エネルギー -0.4 eV)、GeAPDの場合 (0.67 eV) よりも、緩やかな温度変化を示している。これから、 50°C でも増倍される暗電流は常温の 1.5 nA に対し 4.5 nA と低い値となり、InGaAs APDは 50°C 付近の高温領域でも優れた特性を示すことがわかる。

③ 増倍雑音

Fig. 29に増倍率10に於けるダイオードの面内感度分布を示す。受光面内で平坦な感度分布を示し、又ガードリング効果も良好であることがわかる。Fig. 30に過剰雑音係数 F の増倍率 M 依存性を示す。比較のために、 p^+n (Ge APD)の結果も示してある。 $\langle 111 \rangle$ 軸を用いた場合、増倍率10に於いて、過剰雑音係数 $F=5$ の低雑音値が得られており、同図に示す $\langle 100 \rangle$ 軸を用いた場合に比べ、雑音が低減されていることがわか

Spot scanned response

Active region

Fig. 29 面内増倍率分布

Fig. 30 過剰雑音係数の増倍率依存性

Fig. 31 周波数特性

る。又、Fig. 10の $1.3\mu\text{ m}$ に於けるGeAPDの場合と比べ、雑音が半減している。これはイオン化率比 β/α が 2.5 と大きいためである。

④ 周波数特性

Fig. 31に光波長 $1.3\mu\text{m}$ 、増倍率10に於ける周波数特性を示す。InP/InGaAsP/InGaAsAPDでは1GHz迄平坦な特性が得られている。InGaAsP層のない場合に比べ、大幅な改善がなされており、ヘテロ界面の障壁の減少による正孔の蓄積効果の低減が周波数特性の向上に大きく寄与していることがわかる。 $1.55\mu\text{m}$ でも同様な平坦な周波数特性が得られている。

⑤ 最小受信レベルによる評価

ここでは今迄述べてきたGe APD, InGaAs APDの諸特性を用いて、計算により両者の受信レベルを評価した結果について述べる³⁸⁾。Fig. 32に光波長 $1.3\mu\text{m}$ 、ビットレート400 Mb/s、温度 50°C 、 $S/N=22\text{dB}$ に於ける計算結果を示す。 $M=10$ 付近から増倍率の増加と共に受信レベルが劣化するのは、増倍雑音が急速に増加するために、一定の S/N 比を確保するためには、信号成分即ち、入射光パワーが大きくなる必要があるからである。一方増倍率が小さいところでは、増倍による利得の効果を十分に発揮できず、熱雑音の影響を受けるため、やはり受信レベル劣化する。従って本図から、最小の受信レベルを確保するためには、最適な増倍率 M_{opt} が存在することがわかる。本計算に用いた条件の下で

Fig. 32 光入射パワー(受信レベル)の増倍率依存性(計算)

は、Ge APDでは、 $M_{\text{opt}} \sim 7$ 、InGaAs APDでは ~ 15 となる。これらの最適増倍率に於いて両者の受信レベルを比較した場合、InGaAs APDでは、約4 dBの大幅な受信レベルの向上がなされている。これは先に述べたように、InGaAs APDでは、過剰雑音係数が小さいこと、又増倍される暗電流が常温で約1桁Ge APDに比べて小さく、温度変化も緩やかなためである。

以上Ⅲ—Ⅴ族APDの中で最も研究が進んでいるInP/InGaAs APDについて概説した。InGaAs APDでは低暗電流化、高速応答化及び低雑音化等に各種の最適設計を行うことにより、基本問題を解決し、Ge APDを凌ぐものが得られている。最後に代表的特性をTable Ⅲにまとめて示す。

Table Ⅲ プレーナ型InP/InGaAsP/InGaAs APDの諸特性

Active-area diameter	100 μm
Breakdown voltage V_B	100 V
Dark current at $0.9 V_B$	10 nV
Quantum efficiency at 1.3–1.55 μm wavelengths	80 %
Multiplication factor M	> 30
–3 dB cutoff frequency at 1.3–1.55 μm wavelengths	$> \text{GHz}$
Effective hole to electron ionization rate ratio (β/α)	2.5
Excess noise factor at $M=10$	5

3. PINフォトダイオード及びPIN/FET

今迄アバランシェ現象に基づくキャリアの増倍過程を利用したAPDについて述べたが、 $1\mu\text{m}$ 帯APDの場合、アバランシェに要する所用電圧は30–100 Vに達し、そのためには通信システムでは、DC-DC コンバータ等が必要となり、システム構成がそれだけ複雑となる。信頼性の面からも動作電圧はできるだけ低い方が望ましい。又、小型化といった面からも、APD の場

Fig. 33 各受光素子の受信レベルのビットレート依存性³⁹⁾(計算値), C_T はInGaAs PIN+FETの全容量値で, 1pF, 6pFの場合について計算してある。

合, 次段アンプ(例えばFET)との動作電圧が違いすぎ, 又APD作製のプロセスも一般にFET等の作製プロセスよりも, 複雑なため, 特にモノリシックICを考えた場合には集積化が難しい。この点PINフォトダイオードは動作電圧も低く, 又プロセスも比較的簡単なため, 次段アンプとの集積化も可能である。Fig. 33にPINフォトダイオード, APD, PIN/FET, APD/FET等の受信レベルのビットレート依存性の計算結果を示す³⁹⁾。PINフォトダイオード及びAPDについての曲線は, 次段アンプとして通常のSiバイポーラ・トランジスタを使用した場合について計算してある。図から明らかなように, PINフォトダイオードの受信感度は全帯域にわたり他の3者のそれに及ばないが, 短距離, 低ビットレートの領域では十分使用可能である, APD, PIN/FET, APD/FETはいずれも広い帯域にわたって高感度であり, 目的に応じて使い分ける必要がある。本節では, 現在開発されているPINフォトダイオード及び, それとFETとを組合せたPIN/FETの現状に簡単にふれる。

3.1 PINフォトダイオード

Fig. 34に開発されているInP/InGaAs PINの素子構造, 表IVに代表的な素子特性を示す。プレーナ型で, 素子表面はSiNでパッシベーションされている。最上部のInP層は, $1\mu\text{m}$ 帯光に

Fig. 34 プレーナ型InP/InGaAs PINフォトダイオードの素子構造

Table IV プレーナ型InP/InGaAs PINフォトダイオードの諸特性

Dark current (at 5 V)	50 pA
Quantum efficiency	80 %
Cutoff frequency	1 GHz
Capacitance (at 5 V)	0.5 pF

対するウィンドー層の役目を果しており, 素子表面での再結合が防がれ, 高い量子効率を得られている。 p^+n 接合はAPDの場合と異なり, 光吸収層であるInGaAs中に形成されている。このためヘテロ界面での正孔の蓄積効果による応答特性の劣化を防ぐことができ, 高い遮断周波数を得られている。又, このようにバンドギャップの狭いInGaAs中に接合があってもPINフォトダイオードの場合, 動作電圧はブレイクダウン電圧の遥か下であるので(通常10V前後), トンネル電流の影響も無視でき表IVに示すような低暗電流値が得られている。容量はInGaAs光吸収層, 及び下から2番目のバッファInP層を低濃度化することにより, 低い値が得られている。この低容量値により, FET等のアンプと結合した場合, 高い遮断周波数と低雑音特性が得られる。

3.2 PIN/FET^{15~19)}

PIN/FETは受光をPINフォトダイオードで行い, その出力信号を次段のアンプのFETで

増幅するものである。Fig. 33に於いて、PIN/FETとAPDの受信レベルを比較した場合、比較的ビットレートの高い領域で、APDの受信レベルは、大略ゲンド幅の1乗 ($\propto B$) に比例して劣化するのに対し、PIN/FETではバンド幅の $\frac{3}{2}$ 乗 ($\propto B^{3/2}$) に比例して急速に劣化する^{40,41)} (図からわかるように、 $B^{3/2}$ 乗の始まる領域は容量値 C_T や相互コンダクタンス等のPIN/FETデバイスの全体的な性能によって大きく左右される)。従って、PIN/FETを高ビットレート領域で使用することは難しいが、少なくとも数100 Mb/s迄は高感度な受光器 (レシーバ) として使用することができる。PIN/FETは今迄にInGaAs PINフォトダイオードとGaAs FETとをハイブリッドに結合させた例^{15,16)}、InGaAs PINフォトダイオードとInGaAs又はInPのFETとを半絶縁性InP基板上にモノリシックに集積化したもの^{17~19)}等が報告されている。同一基板上にモノリシックに一体化することにより、小型化が出来、寄生容量を低減させ、受光器の低雑音化、高速応答化が図られる等のメリ

Fig. 35 InGaAsモノリシックPIN/FET¹⁷⁾

ットがある。モノリシックに集積されたものの報告例は少ないが、Fig. 35に1980年に最初にLehny等によって発表されたInGaAs PINフォトダイオードと接合型InGaAs FETからなるモノリシックPIN/FETを示す¹⁷⁾。

InGaAs PINフォトダイオード、PIN/FETについて概観した。PINフォトダイオードは先に示したように、単体素子としての特性は出そろっており、現在商品化され、広く使われている。PIN/FETはまだ研究段階であるが、数100 Mb/s以下では優れた特性を示し、将来LAN (ローカルエリアネットワーク) 等に於ける受光器として有望視されている。

4. 新しい受光素子

1 μm 帯光通信の長距離、大容量化に対する需要の高まりと、結晶成長技術の向上に伴って、より高感度化を目指した新しいタイプの受光素子の研究が芽ばえている。Fig. 36にGe APD, InGaAs APD, SiAPDの増倍雑音特性を示す。図から明らかなように、GeやInGaAsの1 μm 帯APDとSiAPDとの間には、大きな雑音値の開きがある。これはキャリアとイオン化率比がSiAPDの方が一桁以上大きいためである (SiAPDでは $\alpha/\beta \sim 50$)。従ってこのSiAPD迄の間

Fig. 36 過剰雑音係数の増倍率依存性 (Ge, InGaAs, Si各APDの比較)

隙を埋められるような、或はSiAPD以上に大きなイオン化率を持つような $1\mu\text{m}$ 帯APDの開発が望まれている。GeやInGaAsのような従来からの受光素子では特性はイオン化率を始めとする各材料の物質定数で決まってしまう、最適設計を行ったとしても、大幅な特性の改善は見込めない。本章では、結晶内部のバンド構造まで制御する所謂バンド工学的な立場から結晶に工学的に工夫を加え、各材料の従来の設計限界を超えた、感度の大幅な向上を目指した研究を数例紹介する。

Fig. 37(a) スーパーラティスAPD¹²⁾ (構造と増倍率特性)

Fig. 37(b) スーパーラティスAPDのバンド構造¹²⁾

4.1 スーパーラティスAPD¹²⁾

Fig. 37(a)のインセットに示したような p^+-i-n^+ 構造のGaAs/GaAlAs APDを作製し、増倍率特性からイオン化率を測定している。本構造の特徴は、アバランシェ増倍を越えるi層が、MBEにより形成されたGaAsとGaAlAsの数10層からなるスーパーラティス構造になっていることである。このスーパーラティス層のバンド構造図をFig. 37(b)に示す。このバンド構造によるイオン化率比増大の原理は、伝導帯ではGaAsとGaAlAs層に大きなバンドギャップエネルギーの差(ΔE_c)があることを利用したものである。即ち、GaAlAs中を走行している光励起によって生じたキャリアがバンドギャップエネルギーの小さなGaAs中に飛び込んだ時に、この電子のGaAs中での衝突電離の閾値エネルギーは ΔE_c だけ低くなるように見える。このために、電子に対するイオン化率はGaAs固有の本来の値よりもずっと大きくなる。一方、価電子帯では、GaAsとGaAlAsとではバンドの不連続が ΔE_c に比べて小さいので、正孔に対するこの効果の寄与は小さい。結果として、 α/β がGaAs固有の値($\alpha/\beta \sim 1$)よりもずっと大きくなる。Fig. 37(a)の実験では、 $\alpha/\beta \sim 8$ が報告されている。

Fig. 38 グレーデッド・バンドギャップAPDのバンド構造図¹³⁾

このスーパーラティス APD の概念は 1 μm 帯の APD についても適用され、InP/InGaAs 系でも研究が進められている⁴²⁾。

4.2 グレーディッドバンドギャップ APD¹³⁾

Fig. 38 に示すように GaAs 層から GaAlAs 層へ徐々に組成即ちバンドギャップエネルギー E_g が変化した構造のもので、やはり MBE により作製されている。Fig. 38 に於いて、電界により電子は E_g の小さい方に走行し、逆に正孔は E_g の大きい方へ走行する。従って電子の方が、衝突電離のための閾値エネルギーが小さくなり、衝突電離を起こしやすくなり、 α/β が増大する。実験結果として $\alpha/\beta \sim 7.5$ が報告されている。

4.3 共鳴電離現象を利用した APD¹⁴⁾

これは価電子帯のスプリット・オフバンドを利用したもので、GaAlSb や HgCdTe のある組成では Fig. 39 に示すように価電子帯と伝導帯のバン

Fig. 39 共鳴電離現象を利用した APD のバンド構造図¹⁴⁾

Fig. 40 ステアケース APD のバンド構造⁴¹⁾

ド幅 E_g と価電子帯のスプリット・オフバンド幅 Δ とが等しくなり、その時には高電界下でスプリット・オフバンドの頂点にある正孔のイオン化率は飛躍的に増大する。これが共鳴電離と呼ばれているもので、この現象を利用して GaAlSb で Si APD のイオン化率比に迫る $\beta/\alpha \geq 20$ の値が実験的に得られている。このような原理に基づくイオン化率の増大は、バンド構造の似ている II-VI 系の化合物 HgCdTe でも起こる可能性がある。

次に低電圧で動作し、しかもゲインのあるフォトダイオードを 2 例紹介する。

4.4 ステアケース APD⁴³⁾

Fig. 40 に示すような階段状のポテンシャルを持った多層構造の APD が提案されている。各層はグレーディッドバンドギャップ構造となっている。本構造では、伝導帯の段差 ΔE_c を電子のイオン化のエネルギーよりも大きくすることにより、伝導帯の各段差の部分のみでアバランシェを起こさせている。従ってこの構造では、動作電圧はキャリアを各層で走行させるのに必要な電圧のみでよく、即ち各層を空乏化させるだけでアバランシェが起きるため素子の動作電圧は極めて小さくなり、例えば数 10 倍の増倍率を得るのに 5 V 程度で良くなる。この構造の他の大きなメリットとして低雑音化が挙げられる。即ち本構造では正孔に対しては価電子帯の段差 $\Delta E_v \approx 0$ であり、又、印加電圧も小さいので、正孔の衝突電離は無視できる。又電子の衝突電離も伝導帯の段差部分という一定の限られた場所でのみ行われるため、増倍過程の揺ぎも少ない。これらの理由により、本構造の APD は通常の APD に比べ、大幅に低雑音化されるといわれている。この APD は、AlGaAsSb/GaSb, AlInGaAs/InP 系等で実現される可能性がある。

4.5 モジュレーティッド・バリアフォトダイオード (MBP)²⁰⁾

最後にアバランシェ現象を利用した APD ではなく、通常の PIN フォトダイオード程度の電

Fig. 41 モジュレーティッド・バリアフォトダイオードのバンド構造²⁰⁾

界で動作し、しかもゲインのある新しい構造のフォトダイオードについて述べる。素子のバンド構造をFig. 41に示す。通常のフォトダイオードでは少数キャリアの走行を利用するが、本素子では空乏層中を走行する多数キャリアを利用している点が特徴である。動作原理は π -GaAs (ドレイン) 中で光励起によって生じた正孔が、空乏層中の電界によって走行した後、 p^+ -GaAs の薄層からなるゲート部分でのポテンシャルの障壁のところで蓄積する。この正孔の蓄積によりポテンシャルの障壁が減少し、 π -AlGaAs のソース側から電子が流れ込みここにゲインが生ずる。MBEにより作製されたFig. 41の素子では、数Vの低動作電圧で ~ 1000 倍のゲインが実験的に得られている。

以上、イオン化率比 (α/β or β/α) の増大による低雑音化を中心に新しい動作原理に基づくAPDを紹介した。これらのAPDでは、すべて10程度の大きいイオン化率比が報告されており、これを過剰雑音係数 F に焼き直すと、 $F \sim 3$ (於 $M=10$) となり、従来のGeやInGaAs APDに比べ、3 dB以上の大幅な受信レベルの向上が期待できる。しかしこれらの研究はまだ物理定数としてのイオン化率等を見積るのに力が注がれている段階であり、完成されたデバイスとしてのAPDといったものとの間には大分距離がある。今後多くの基礎データを積み上げることによって、この距離を着実に縮めていくことが必要である。又、低動作電圧で、しかも

ゲインのとれる構造を2例紹介したが、これらも全く同様な状況にある。

5. 結 言

1 μ m帯光通信用のフォトダイオードについて概観した。実用的な素子としては、現在商品化されているGe APD, InGaAs PINフォトダイオードがあり、次のターゲットとして実用化を目指しているものに、InGaAs APD, InGaAs PIN/FET等の受光器があることを述べた。ビットレートからくる大まかな区分はあるものの、現実の光通信システムの中で、これらの受光素子を使い分けていくには、性能、信頼性、経済性等、各々の素子の特徴を生かした注意深い選択がその都度必要となろう。又、現在の受光素子の研究の流れは、イオン化率比の増大による低雑音化を中心としたAPDの高感度化と、それに加え、低動作電圧、小型、軽量を志向した素子のモノリシックな集積化に集約される。又APDとPINフォトダイオードの両者の利点を兼ね備えたゲインを有し、且つ低動作電圧を示すフォトダイオードも研究されている。これらの受光素子は将来的なデバイスであり、結晶成長技術と一体化した。長期的且つ基礎的な研究開発が望まれる。

参 考 文 献

- 1) F. Hanawa, S. Sudo, M. Kawachi and M. Nakahara : Electron. Lett. **16** (1980) 699.
- 2) H. Tsuchiya and N. Imoto : Electron. Lett. **15** (1979) 476.
- 3) H. Ando, H. Kanbe, T. Kimura, T. Yamaoka and T. Kaneda : IEEE J. Quantum Electron. **QE-14** (1978) 804.
- 4) T. Mikawa, S. Kagawa and T. Kaneda : IEEE J. Quantum Electron. **QE-17** (1981) 210.
- 5) S. Kagawa, T. Kaneda, T. Mikawa, Y. Banba, Y. Toyama and O. Mikami : Appl. Phys. Lett. **38** (1981) 429.
- 6) T. Kaneda and H. Kanbe : JARECT (OHM* North-Holland) **5** (1983) 48.
- 7) N. Susa, H. Nakagome, O. Mikami, H. Ando and H. Kanbe : IEEE J. Quantum Electron. **QE-16** (1980) 864.
- 8) T. Shirai, T. Mikawa, T. Kaneda and A. Miyauchi :

- Electron. Lett. **19** (1983) 534.
- 9) J. C. Campbell, A. G. Dentai, W. S. Holden, B. L. Kasper: Electron. Lett. **19** (1983) 818.
 - 10) T. Mikawa, T. Kaneda, H. Nishimoto, M. Motegi and H. Okushima: Electron. Lett. **19** (1983) 452.
 - 11) T. Mikawa, S. Kagawa, T. Kaneda and T. Sakurai: Technical Report of IECE Japan, 1981, 33, IQE 81-87 (in Japanese).
 - 12) F. Capasso, W. T. Tsang, A. L. Hutchinson and G. F. Williams: Appl. Phys. Lett. **40** (1982) 38.
 - 13) F. Capasso, W. T. Tsang, A. L. Hutchinson and P. W. Foy: Inst. Phys. Conf. Ser. **No.67** (1982) 473.
 - 14) O. Hildebrand, W. Kuebart, K. W. Benz and M. H. Pilkuhn: IEEE J. Quantum Electron. **QE-17** (1981) 284.
 - 15) D. Gloge, A. Albanese, C. A. Burrus, E. L. Chinnock, J. A. Copeland, A. G. Dentai, T. P. Lee, Tingye Li, and K. Ogawa: B. S. T. J. **59** (1980) 1365.
 - 16) D. R. Smith, R. C. Hooper, P. P. Smyth and D. Wake: Electron. Lett. **18** (1982) 453.
 - 17) R. F. Leheny, R. E. Nahory, M. A. Pollack, A. A. Ballman, E. D. Beebe, J. C. DeWinter and R. J. Martin: Electron. Lett. **16** (1980) 353.
 - 18) K. Kasahara, I. Hayashi, K. Makita, K. Taguchi, A. Suzuki, H. Nomura and S. Matsushita: IEDM (1983) 475.
 - 19) K. Inoue, K. Ohnaka, T. Uno, N. Hase and H. Serizawa: IOOC (1983) 186.
 - 20) C. Y. Chen, A. Y. Cho, P. A. Garbinski, C. G. Bethea and B. F. Levine: Appl. Phys. Lett. **39** (1981) 340.
 - 21) H. Melchior and W. T. Lynch: IEEE. Trans. on Electron Devices **ED-13** (1966) 829.
 - 22) C. J. Kircher: J. Appl. Phys. **46** (1975) 2167.
 - 24) S. Kagawa, T. Mikawa and T. Kaneda: FUJITSU Sci. Tech. J. **18** (1982) 397.
 - 25) R. J. McIntyre: IEEE Trans. on Electron Devices **ED-13** (1966) 164.
 - 26) T. Mikawa, S. Kagawa, T. Kaneda, Y. Toyama and O. Mikami: Appl. Phys. Lett. **37** (1980) 387.
 - 27) T. Mikawa, T. Kaneda, S. Kagawa, Y. Toyama and H. Ando: Technical Report of IECE Japan, 1979, ED79-65, p. 9.
 - 28) T. Kaneda and H. Takanasih: Jpn. J. Appl. Phys. **12** (1973) 1091.
 - 29) J. Yamada, S. Machida and T. Kimura: Electron. Lett. **17** (1981) 479.
 - 30) 三川, 金田, 西本, 茂手木, 奥島: 昭和58年春, 信学全大.
 - 31) J. Yamada, A. Kawana, T. Miya, H. Nagai and T. Kimura: IEEE J. Quantum Electron. **QE-18** (1982) 1537.
 - 32) T. Mikawa, T. Shirai, K. Nakajima and T. Kaneda: Technical Digest, CLEO '83, Baltimore (1983) 220.
 - 33) S. R. Forrest, O. K. Kim and R. G. Smith: Appl. Phys. Lett. **41** (1982) 95.
 - 34) K. Yasuda, T. Shirai, Y. Kishi, S. Yamazaki and T. Kaneda: Proc. 14th Conference on Solid State Devices, Tokyo, 1982; Jpn. J. Appl. Phys. **22** (1983) 291.
 - 35) Y. Matsushima, S. Akiba, K. Sakai, Y. Kushiro, Y. Noda and K. Utake: Electron. Lett. **18** (1982) 945.
 - 36) F. Osaka, T. Kaneda and K. Nakajima: Technical Digest, 40th Annual Device Research Conference, Ft. Collins (1982) II B-7.
 - 37) T. Shirai, S. Yamazaki, H. Kawata, K. Nakajima and T. Kaneda: IEE Trans. Electron Devices, **ED-29** (1982) 1404.
 - 38) T. Mikawa, T. Kaneda and K. Nakajima: 3rd Sensor Symposium IEEE of Japan, (1983) 69 (in Japanese).
 - 39) 西本, 岸勇, 茂手木, 金田: 昭和57年, 信学全大.
 - 40) K. Tabatabaie-Alavi and C. G. Fonstad, Jr.: IEEE J. Quantum Electron. **QE-17** (1981) 2259.
 - 41) Michael C. Brain and David R. Smith: IEEE Trans. on Electron Devices **ED-30** (1983) 390.
 - 42) 逢坂, 米野, 尾関, 金田: 昭和58年秋, 応用物理学会予稿集, p. 155.
 - 43) G. F. Williams, F. Capasso and W. T. Tsong: IEEE Electron Device Lett. **EDL-3** (1982) 71.