



# アバランシェフォトダイオードを用いた光子計数法による可視および赤外極微弱光の検出

木谷 恵一・林 孝

武藏工業大学電子通信工学科 〒158 東京都世田谷区玉堤 1-28-1

(1983年7月25日受理)

## Photon Counting Method for Extremely Weak Signal Detection in Visible and Infrared Region Using Avalanche Photodiodes

Keiichi KIYA and Takashi HAYASHI

Department of Electronics and Communication Engineering, Musashi Institute of Technology,  
1-28-1, Tamazutsumi, Setagaya-ku, Tokyo 158

Experimental studies on operational characteristics of three kinds of avalanche photodiodes (Si-APD and Ge-APD) have been carried out for very weak optical signal measurement using photon counting method in the visible and infrared regions. Analytical consideration are given on the signal to noise ratio and the quality factor, on the basis of the excess noise multiplication factor. The weakest optical power to be detected is  $2.5 \times 10^{-17} \text{ W}$  by Si-APD ( $\lambda=632.8 \text{ nm}$ ) and  $1.2 \times 10^{-13} \text{ W}$  by Ge-APD ( $\lambda=1153.0 \text{ nm}$ ). The linearity of the signal pulse counts is kept down to  $P=10^{-10} \text{ W}$  and up to  $P=10^{-16} \text{ W}$ . Experimental results show that one could use an APD as the excellent optical sensor with a wide dynamic range. The quality factor  $\gamma$  is defined and the characteristics of an APD are described.

### 1. 緒 言

近年、極微弱光に含まれる情報の検出に対する要求は各方面で盛んとなってきている。たとえば超高層大気からの散乱光の検出のほか化学および生物学の領域でも多くの応用がある<sup>1,2)</sup>。

従来、紫外から近赤外域にわたり低雑音で極微弱な光の検出に適した素子としては光電子増倍管 (photomultiplier : PM) が広く用いられている<sup>3)</sup>。これに対して本報では赤外域においては PM よりも検出感度の延伸している avalanche photodiode (Si-APD と Ge-APD) を用いた光子計数法による可視および赤外における極微弱光の検出法について検討した。すなわち APD の電流増倍機構と増倍雑音指数にもとづいた信号対雑音比および光子計数法に適した素子の選定法について解析的な検討を行ない、それをもとに実験により可視および赤外における極微弱光の検出下限界を求めた。さらによい素子の選定法を実験的に検討した。

### 2. APD の増倍機構と増倍雑音指数

APD 内部のイオン化は禁制帯の幅よりも大きなエネルギーをもつ光によって行なわれる。すなわち光のエネルギーを受けて電子が価電子帯から伝導帯へ励起されて電子正孔対ができることがある。pn 接合に降伏電圧  $V_b$  の近くまで逆バイアス電圧  $V_a$  をかけると数百 kV/cm の電界が接合面に発生しこの高電界中にドリフトしてきたキャリアは電界から十分な運動エネルギーを得て束縛電子を衝突イオン化する。これがさらに次の衝突イオン化を起こすのでキャリアがなだれ状に増加して電流が増倍される。素子を冷却すると暗電流が減少するとともに  $V_b$  は低圧側へ偏移するためさらに増倍率  $M$  は大きくなり衝突イオン化は激しくなる。 $M$  は注入電流  $I_0$  と出力電流  $I$  の比で定義される<sup>4)</sup>。

いま光電流パルス 1 個に対する電荷量を  $Q$  とすると光子計数方式における APD の増倍率は実験的に次の式で与えられる。

$$M = \frac{\langle N_s(v_0) \rangle Q}{\langle N_p(\lambda) \rangle e \eta} \quad (1)$$

ただし、 $\langle N_s(v_0) \rangle$ : 光電流パルスの数、 $v_0$ : 測定系の入力感度、 $\langle N_p(\lambda) \rangle = P/h\nu$ : 入射光子の数、 $P$ : 入射光量、 $h$ : プランクの定数、 $\nu$ : 入射光の周波数、 $e$ : 電子の電荷、 $\eta$ : 量子効率、 $\lambda$ : 入射光の波長。いま負荷抵抗 $R_L$  から取り出したパルス電圧を直接観測してその波高を  $V$ 、パルス幅を  $t$  とすると発生光電流パルスの数は

$$\langle N_s(v_0) \rangle = \frac{M \langle N_p(\lambda) \rangle e \eta R_L}{Vt} \quad (2)$$

で与えられる。このほか、計数効率  $\xi(v_0)$  や性能指数  $F$  等を求めるこどもできる<sup>5)</sup>。

APD 内部で発生する雑音は内部増倍効果によって増倍過剰雑音となりその雑音指数は  $F = M^\alpha$  で与えられる。このため  $M$  と  $\alpha$  の増加によって  $F$  は急激に増大する。Si-APD の場合  $\alpha$  は 0.5 以下であり 77 K に冷却した場合、暗電流パルスの数  $N_D(v_0)$  はほとんどゼロに近い値となる。Ge-APD の場合は  $\alpha$  が 1 であり<sup>4)</sup> 増倍過剰雑音は Si に比べてはるかに大きい。したがって素子を冷却しても  $N_D(v_0)$  はきわめて大きな値を示す。

### 3. ディジタル動作検出方式の解析

APD への入射光量が極微弱になると単一光電子パルスの出現確率はポアソン分布に従い、おのののパルスの波高は APD によって定まる独立な波高確率分布  $P(v)$

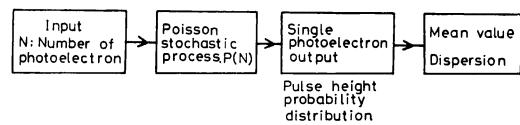


Fig. 1 Analytical method of signal to noise ratio  $S/N$  on digital detecting method.

にしたがう。アナログ動作、すなわち multiple photo-electron event (MPE) からディジタル動作すなわち single photoelectron event (SPE) への移行は入射光量と測定系の分解能(応答時間)に依存する。極微弱光検出のための APD の動作は発生したキャリアによる光電流パルスが、ほとんど SPE になっている状態と考えてその解析法を Fig. 1 に示す。

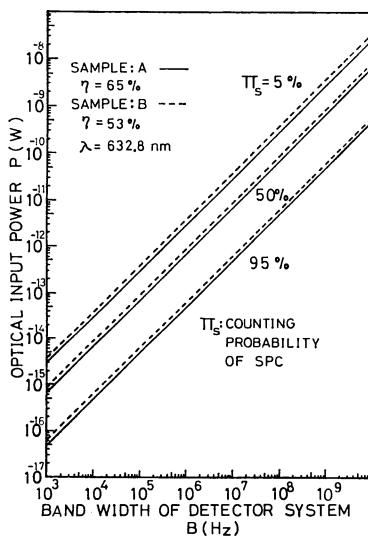
図の解析法にしたがって出力パルスの波高別別レベルが  $v$  以上のパルスの数に対する平均値と分散を求める次の式となる。

$$\langle N_s(v) \rangle = \langle N_s \rangle \int_{v_0}^{\infty} p_s(v) dv \quad (3)$$

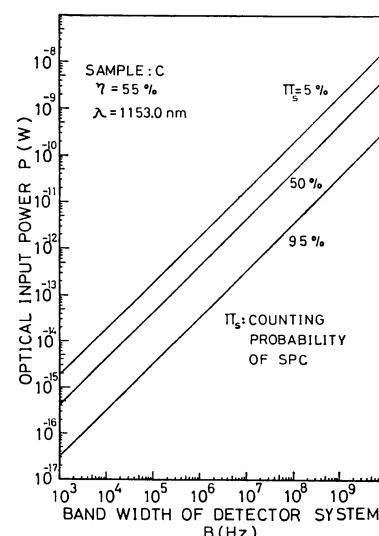
$$\sigma^2(v) = \langle N_s \rangle \int_{v_0}^{\infty} p_s(v) dv \quad (4)$$

ただし、 $\langle N_s(v) \rangle$ : 弁別レベル  $v$  以上の出力パルスの数の平均値、 $\langle N_s \rangle$ : 出力パルスの総数の平均値、 $p_s(v)$ : 出力パルスの波高確率密度関数、 $\sigma^2(v)$ : 出力パルスの平均値に対する分散。

ここで接合面より発生する光電子の単位時間当たりの平



(a)



(b)

Fig. 2 Theoretical variation of the optical input power as a function of the bandwidth of SPC detecting method. (a) Visible regions (Si-APD), (b) Infrared regions (Ge-APD).

均個数を  $\langle n \rangle$ , 分解時間  $T=1/2B$  内に計数される単位時間当りの平均パルスの数を  $\langle N \rangle$  とすれば両者間の関係はポアソンの確率分布より

$$\begin{aligned}\langle N \rangle &= \langle n \rangle \exp\left(-\frac{\langle n \rangle}{2B}\right) \\ &= \langle n \rangle I_{ls} \quad (5)\end{aligned}$$

と表わされる。ただし  $B$  は測定系の帯域幅であり  $I_{ls}$  は出力パルスがどの程度分離した SPE 状態になっているかを示す確率である。たとえば  $I_{ls}=95\%$  とすると入射光量  $P(\lambda)$  は次の関係で与えられる<sup>1)</sup>。

$$P(\lambda) \leq \frac{0.1 B h \nu}{\eta(\lambda)} \quad (6)$$

ここで(6)式に従って  $\lambda=632.8 \text{ nm}$  の光を Si-APD の試料 A (日本電気製 APD-200 B) および試料 B (三菱電機製 PD-050 B) で検出した場合  $I_{ls}$  をパラメータとして  $P(\lambda)$  と  $B$ との関係を示したもののが Fig. 2(a) である。 $B$  が広いほど  $P(\lambda)$  が強くても SPE となることが可能であることを示している。Fig. 2(b) は  $\lambda=1153.0 \text{ nm}$  の光を Ge-APD の試料 C (富士通製 FPD-140 M 3) で検出した場合である。

これらの直線によって分けられた下側の範囲は single photon counting (SPC) の可能な領域であり上側の AC 成分 (ショット雑音成分) の領域よりも光の強度に関する情報が多く含まれていることになる。したがって  $I_{ls}$  が 95% 以上では APD の出力はほとんどパルス状となるためアナログ量の電流値を検出するよりもディジタル動作となっているこのようなパルスを計数するほうがより精度の高い測定ができる。

このような光子計数法が適する領域でのパルス波高分布は APD の  $M$  がばらつくことから個々の APD によって異なっている。ここでは入射光量と計数率に十分な直線性が保たれる SPE 状態の場合について検討した。したがってパルスの出現確率がポアソン分布に従うものとすれば、計数誤差としての分散は平均計数率に等しいという仮定のうえで本方式の特性を考察する<sup>5)</sup>。

信号光、背景光、および熱励起による電子の単位時間当たりの平均計数値をそれぞれ  $\langle N_s \rangle$ ,  $\langle N_b \rangle$ ,  $\langle N_t \rangle$  として素子の外部回路から拾う雑音 (負荷抵抗におけるジョンソン雑音を含む) を  $\langle N_n \rangle$  とすれば、本方式における信号対雑音電圧比 (以後  $S/N$  とする) は APD の  $M$  を考慮に入れて次式で与えられる。

$$\begin{aligned}\left(\frac{S}{N}\right)_{SPC} &= M \langle N_s \rangle \int_{v_0}^{\infty} p_s(v) dv \sqrt{\tau} \\ &\quad / \left[ M^a \{ \langle N_s \rangle + \langle N_b \rangle \} \int_{v_0}^{\infty} p_s(v) dv + M^a \langle N_t \rangle \right]\end{aligned}$$

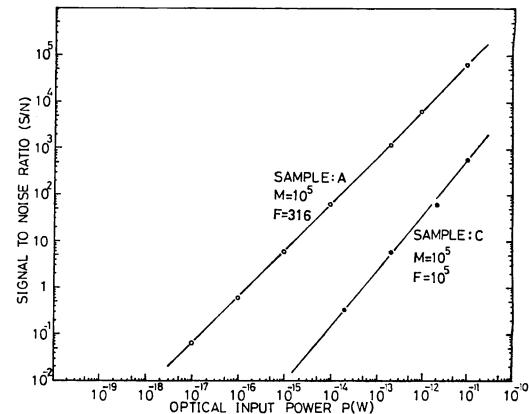


Fig. 3 Calculated variation of the signal to noise ratio as a function of the optical input power with different samples.

$$\int_{v_0}^{\infty} p_T(v) dv + \langle N_n \rangle \int_{v_0}^{\infty} p_N(v) dv \quad (7)$$

ただし,  $n=2+\alpha$ ,  $0 \leq \alpha < 1^{6)}$ .

ここで  $p_s(v)$ ,  $p_T(v)$ ,  $p_N(v)$  は光电流パルスおよび雑音電流パルスの波高確率密度関数である。また  $\langle N_b \rangle$  と  $\langle N_t \rangle$  を素子の暗電流成分としてまとめて  $\langle N_d \rangle$  とする

$$\begin{aligned}\left(\frac{S}{N}\right)_{SPC} &= M \langle N_s \rangle P_s(v_0) \sqrt{\tau} \\ &\quad / [M^a \langle N_s \rangle P_s(v_0) + M^a \langle N_d \rangle P_d(v_0) \\ &\quad + \langle N_n \rangle P_N(v_0)]^{1/2} \quad (8)\end{aligned}$$

となる。ただし,  $P_s(v_0)$ ,  $P_d(v_0)$ ,  $P_N(v_0)$  は光电流パルスおよび暗電流パルスと雑音電流パルスの波高確率分布関数である。

$M$  が大きくなると光电流パルスおよび暗電流パルスはジョンソン雑音を越えて観測できる<sup>7)</sup>。したがって上式分母の  $\langle N_s \rangle$ ,  $\langle N_d \rangle$  のショット雑音成分は  $\langle N_n \rangle$  よりもきわめて大きくなるからここで  $\langle N_n \rangle$  を消去すると

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{SPC} = \frac{\langle N_s \rangle P_s(v_0) \sqrt{\tau}}{\sqrt{M^a \{ \langle N_s \rangle P_s(v_0) + \langle N_d \rangle P_d(v_0) \}}} \quad (9)$$

となる。光电流パルスと暗電流パルスの波高分布にはほとんど差がなく  $P_s(v_0)$ ,  $P_d(v_0)$  を 1 とすると

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{SPC} = \frac{\langle N_s \rangle \sqrt{\tau}}{\sqrt{F \{ \langle N_s \rangle + \langle N_d \rangle \}}} \quad (10)$$

となる。

最小検出可能な光电流パルスの計数値は  $S/N=1$  において上式より

$$\langle N_s \rangle_{min} = \frac{F + \sqrt{F^2 + 4F \langle N_d \rangle \tau}}{2\tau} \quad (11)$$

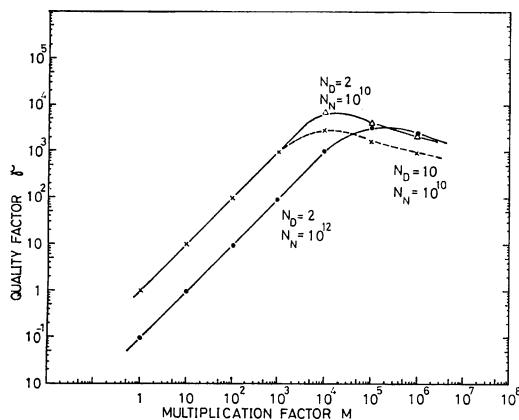


Fig. 4 Calculated variation of quality factor  $\gamma$  as a function of multiplication factor  $M$ .

となり最小検出可能光量は

$$\langle P_s \rangle_{\min} = \frac{h\nu}{\eta} \langle N_s \rangle_{\min} \quad (12)$$

で与えられる。

最適倍率  $M_{\text{opt}}$  は素子を 77 K に冷却した場合、約  $10^5$  となるためこの値を(10)式へ代入して  $S/N$  と入射光量との関係をグラフ化すると Fig. 3 となる。図から  $S/N=1$  となるところの入射光量は Si-APD で  $1.5 \times 10^{-16}$  W, F の大きな Ge-APD においては  $5 \times 10^{-14}$  W となっている。入射光量が大きくなるところでは SPE 状態から MPE の状態に移行するため計数値に誤差を生ずるとともに入出力特性は飽和するようになる。

次に(8)式において信号および暗電流パルスや雑音パルスの波高分布にあまり差がない場合は  $P_s(v_0)$ ,  $P_D(v_0)$ ,  $P_N(v_0)$  を 1 とおいて

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{SPC}} = \frac{M \langle N_s \rangle \sqrt{\tau}}{\sqrt{M^2 \langle N_D \rangle + \langle N_D \rangle + \langle N_N \rangle}} \quad (13)$$

が得られる。ここで暗電流成分や雑音成分に比べて信号成分がきわめて微弱となった状態の(13)式を  $\gamma$  (quality factor) とおき計数時間を 1 秒とすると

$$\gamma = \frac{M}{\sqrt{M^2 \langle N_D \rangle + \langle N_N \rangle}} \quad (14)$$

となる。上式は検出回路から拾う雑音  $\langle N_N \rangle$  を含むがこれを一定とすれば素子のよさの目安となる。Si-APD では  $\alpha$  は 0.5 以下で Ge-APD は 1 とされている<sup>6)</sup>。これをもとに(14)式から  $M$  に対する  $\gamma$  の変化を求めてグラフ化したものが Fig. 4 である。  $M$  の増大とともに  $\gamma$  も増大し最大値を経てから後は減少はじめる。これは増倍過剰雑音の増加によるものである。したがって  $M$  には最適値  $M_{\text{opt}}$  が存在する。図から  $M_{\text{opt}}$  の値

は  $10^4 \sim 10^5$  の値となる。

#### 4. 素子の冷却方法と測定回路

実験に用いた素子は市販されているもので前述の Si-APD (試料 A, B) と Ge-APD (試料 C) の 3 本である。素子は Fig. 5(a) のごとく液体窒素に直接浸すため温度は 77 K で安定化し周囲の絶縁性はきわめて高く素子表面の漏洩電流は考えられない。このとき素子はきわめて徐々に冷却するためガラスファイバーとともに損傷をうけない。APD の逆バイアス供給用電源には 5 枝のディジスイッチで出力電圧を設定できる高精度電源を用いた。測定回路は同図(b) の回路構成とし極力漏洩電流と外部雑音を防止した<sup>8,9)</sup>。

光源は Fig. 5(a) のごとく Si-APD に対しては可視光 ( $\lambda=632.8$  nm), Ge-APD に対しては赤外光 ( $\lambda=1153.0$  nm) の He-Ne ガスレーザー光を用い APD への光の導入と入射光量の減衰法は従来の方法に従った<sup>9)</sup>。

#### 5. 実験結果と考察

##### 5.1 適正動作点の設定

各、試料について Fig. 6 のごとく  $V_a$  を変化させた場合の暗電流パルスの数  $N_D(v_a)$  と光电流パルスの数

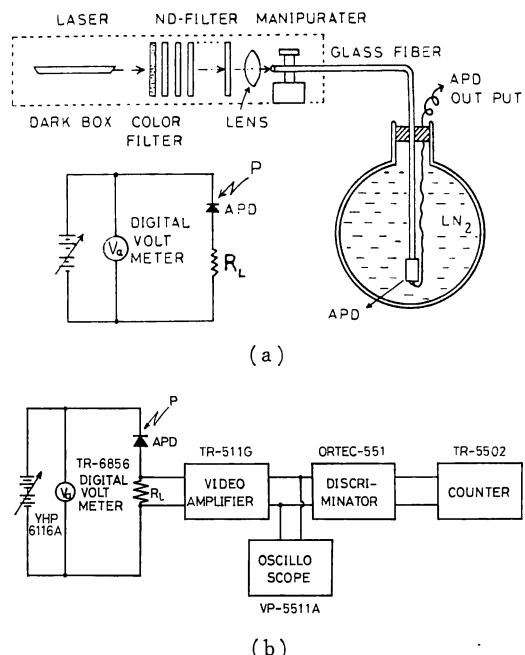


Fig. 5 Experimental arrangements for the measurement. (a) A schematic of the measuring system. (b) A block diagram of the measuring electronics.

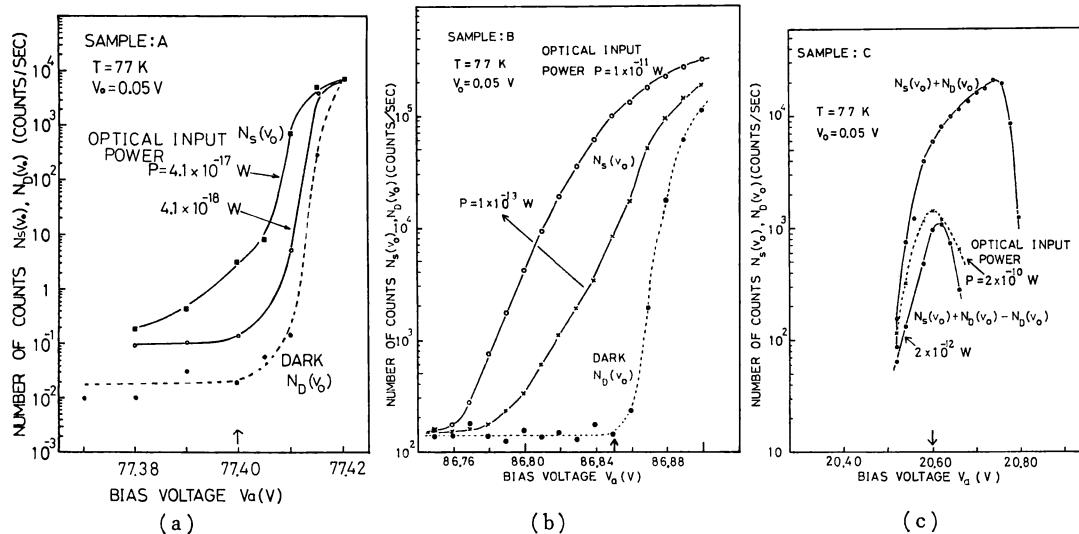


Fig. 6 Measured variation of the number of counts  $N_s(v_0)$ ,  $N_D(v_0)$  as a function of bias voltage  $V_0$  with the optical input power. (a) Sample A, (b) Sample B and (c) Sample C.

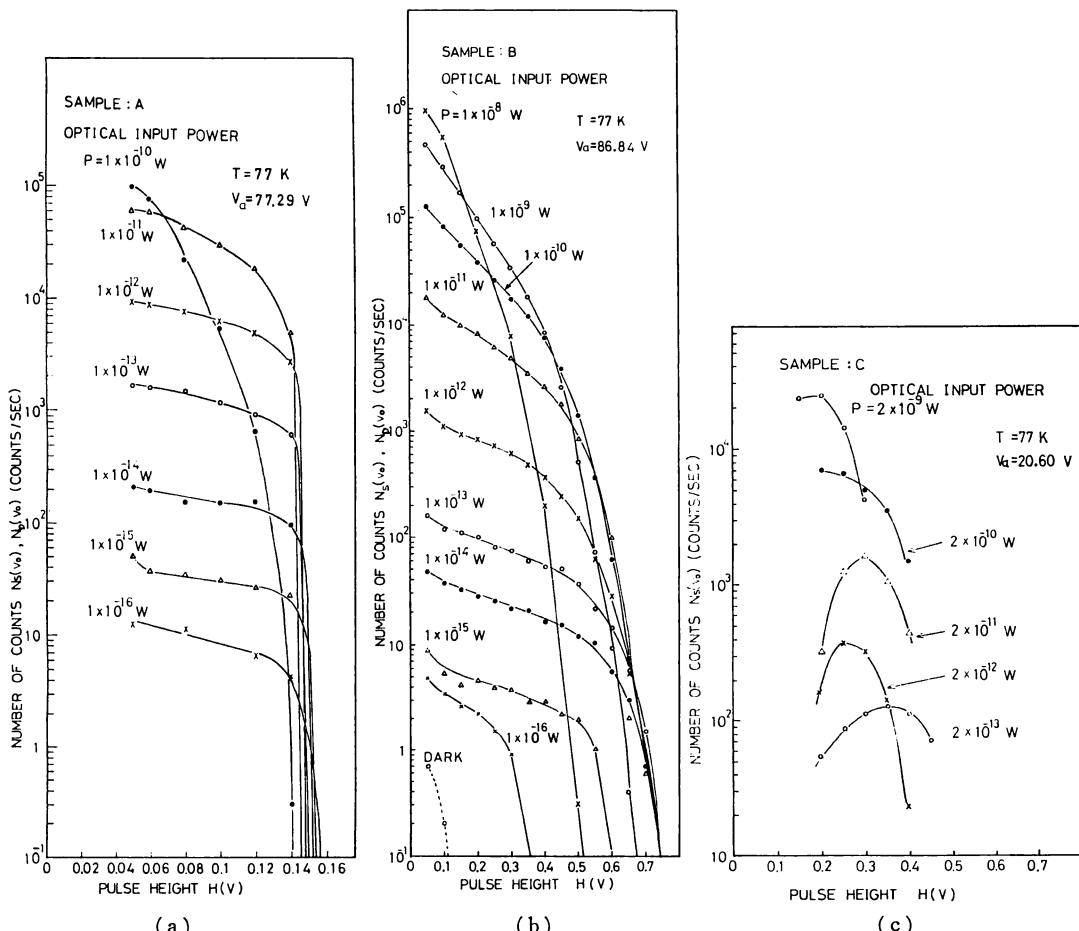


Fig. 7 Measured variation of the photoelectron pulse height distribution with optical input power. The result obtained by integrated method. (a) Sample A, (b) Sample B and (c) Sample C.

$N_s(v_0)$  の変化をもとに動作条件の設定法を調べた。図においてまだ  $N_D(v_0)$  は増加していないが  $N_s(v_0)$  は大きく増加している点の  $V_a$  が適正動作点  $V_{opt}$  といえる。各実験はこの点に電圧を設定して行なった。ただし試料 C は  $N_D(v_0)$  がきわめて多いため  $N_s(v_0)$  はマスクされてしまう。したがって Fig. 6(c) のごとく入射光のあるとき得られた出力の総数から  $N_D(v_0)$  を差し引いてはじめて図のような変化を得た。

## 5.2 暗電流パルスと光電流パルスの波高分布

入射光量をパラメータとした場合の光電流パルスの積分形波高分布を Fig. 7 に示した。同図(a), (b) の暗電流パルスはほとんどゼロに近く試料 B についてのみ図中わずかに示されている。(c) 図は試料 C のものであり得られた総数から  $N_D(v_0)$  を差し引くことにより、はじめて図のような波高分布が得られた。

入射光量  $P$  を増加させた場合、低波高側の  $\langle N_s(v_0) \rangle$  は  $P$  に比例して増加するが高波高側の波高値は低波高側へシフトする。したがって低波高側の最低値  $v_0$  (0.05

V) へ弁別レベルを設定して  $P$  と  $\langle N_s(v_0) \rangle$  積分形および  $P$  と  $\langle n_s(\Delta v) \rangle$  微分形の関係を求めると直線性のよい入出力特性が得られる。各試料に対する最適弁別レベルを検討するため、微分形波高分布<sup>10)</sup>を求めて弁別レベルに対する信号と雑音パルスの波高確率分布関数を求めたが適切な弁別レベルは存在しなかった。

## 5.3 信号対雑音比と入出力特性

$S/N$  や入出力特性の各値を精度よく求めるには相対分散を小さくするとともに期待値  $\langle N_s(v_0) \rangle$  の値を大きくすることが必要である。そのためには一定の計数時間で多数のサンプルを抽出するか計数時間  $\tau$  を長くする必要がある。

Fig. 8 は試料 A, B および C に関して入射光量の変化に対する  $S/N$  と出力特性を求めたものである。(a), (b), (c) は積分法により求めたものであり、(d) は試料 C について微分法によって求めたものである。得られた結果はよい直線性を保っている。

ここで  $S/N$  は入射光量  $P$  の一定値に対して測定回

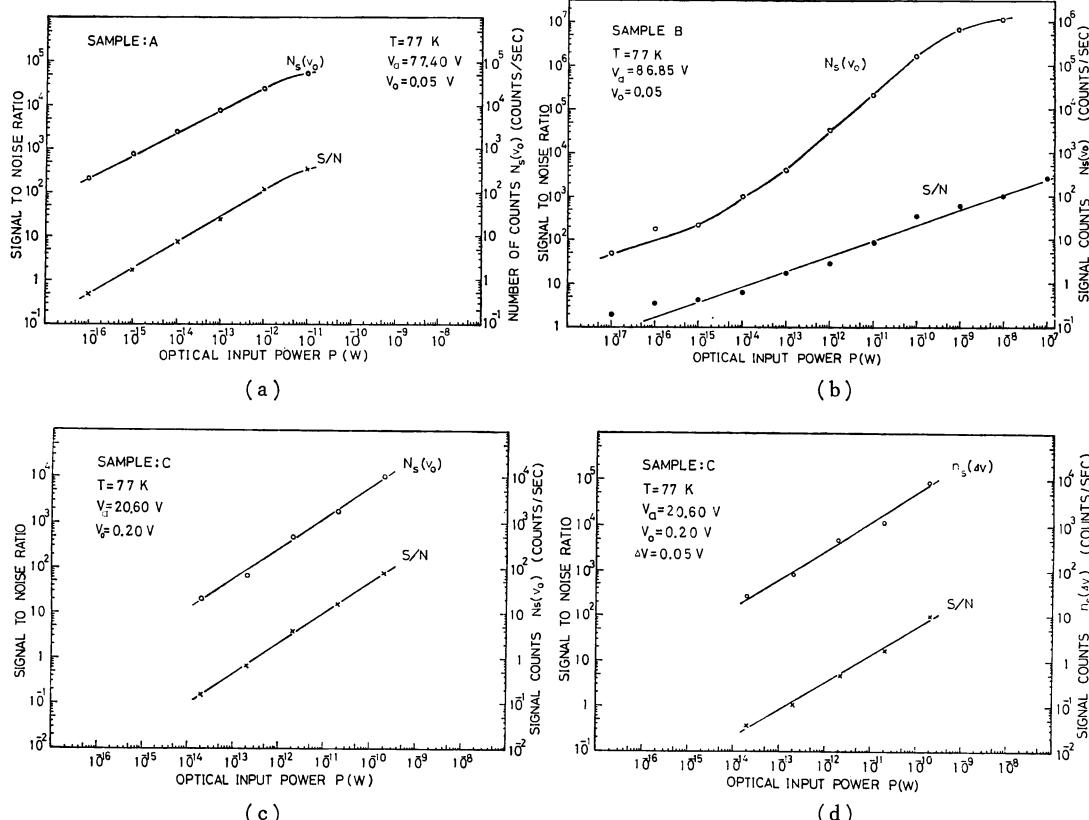


Fig. 8 Measured variation of the signal to noise ratio  $S/N$  and the number of counts  $N_s(v_0)$  as a function of the optical input power. The result obtained by integrated method. (a) Sample A, (b) Sample B and (c) Sample C. (d) By differentiated method on Sample C.

**Table 1** Measured comparison of the minimum detectable optical input power.

Measured method	A : APD-200B	B : PD-050B	C : FPD-140M3
Integrated method	$4.0 \times 10^{-16} \text{ W}$	$2.5 \times 10^{-17} \text{ W}$	$3.0 \times 10^{-13} \text{ W}$
Differential method	$4.5 \times 10^{-16} \text{ W}$	$4.0 \times 10^{-17} \text{ W}$	$1.2 \times 10^{-13} \text{ W}$

**Table 2** Summary of the measured characteristics of the three APD's used for the photon counting experiments.

Optical input power $P(\text{W})$	A : Si-APD APD-200 B			B : Si-APD PD-050 B			C : Ge-APD FPD-140 M 3		
	$\eta_{\alpha} = 63\%$	$1 \times 10^{-15}$	$1 \times 10^{-13}$	$1 \times 10^{-15}$	$1 \times 10^{-13}$	$1 \times 10^{-15}$	$2 \times 10^{-10}$	$2 \times 10^{-13}$	
Counting mode	Diff.	Integ.	Diff.	Diff.	Integ.	Diff.	Diff.	Integ.	Diff.
$\frac{\Delta P_s(v)}{\Delta P_D(v)}$	0.25	1	0.18	1	0.75	1	0.3	1	0.89
$P_s(v)$	0.84	1	0.84	1	0.57	1	0.57	1	0.16
$\langle N_p \rangle_{\min}$	0.797	0.707	77.5	2.83	$7.6 \times 10^2$	$6.7 \times 10^2$	$8.4 \times 10^2$	$1.3 \times 10^2$	$6.7 \times 10^6$
$n_s(\Delta v)$	$2 \times 10^3$	$8 \times 10^3$	$1.4 \times 10^2$	$8 \times 10^2$	$3 \times 10^2$	$4 \times 10^2$	6	20	$3.4 \times 10^7$
$N_s(v_0)$	0.42	0.5	0.42	0.5	0.4	0.7	0.4	0.7	$6.7 \times 10^5$
$n_p(\Delta v)$	$N_D(v_0)$	$N_D(v_0)$	$N_D(v_0)$	$N_D(v_0)$	$N_D(v_0)$	$N_D(v_0)$	$N_D(v_0)$	$N_D(v_0)$	$3.4 \times 10^3$
$\xi(v_0)$	0.63	2.5	$4.38 \times 10^{-2}$	0.25	$9.4 \times 10^{-4}$	$1.3 \times 10^{-3}$	$1.9 \times 10^{-3}$	$6.3 \times 10^{-3}$	$6.7 \times 10^{-6}$
$n_s(\Delta v)_{\min}$	0.52	0.46	50.4	1.84	$4.1 \times 10^2$	$3.6 \times 10^2$	$4.4 \times 10^2$	$69$	$1.9 \times 10^5$
$N_s(v_0)_{\min}$	0.83	$7.35 \times 10^{-2}$	$1.15 \times 10^3$	7.35	$3.8 \times 10^5$	$2.8 \times 10^5$	$2.2 \times 10^5$	$1.1 \times 10^4$	$5.6 \times 10^{11}$
$(P_s)_{\min}(\text{W})$	$2.47 \times 10^{-19}$	$2.19 \times 10^{-19}$	$2.4 \times 10^{-17}$	$8.77 \times 10^{-19}$	$2.4 \times 10^{-16}$	$2.1 \times 10^{-16}$	$2.6 \times 10^{-16}$	$4.0 \times 10^{-17}$	$1.14 \times 10^{-12}$
$F_v$	1.93	5.44	$1.99 \times 10^{-2}$	0.544	$2.8 \times 10^{-3}$	$2.8 \times 10^{-3}$	$2.2 \times 10^{-3}$	$1.5 \times 10^{-2}$	$5.8 \times 10^{-12}$
$\xi(v_0)F_v$	1.21	13.6	$8.72 \times 10^{-4}$	0.136	$2.6 \times 10^{-6}$	$3.5 \times 10^{-6}$	$4.2 \times 10^{-6}$	$9.5 \times 10^{-5}$	$1.14 \times 10^{-12}$
$\eta\xi(v_0)F_v$	1.52	8.84	$5.67 \times 10^{-4}$	$8.84 \times 10^{-2}$	$1.4 \times 10^{-6}$	$1.9 \times 10^{-6}$	$2.2 \times 10^{-6}$	$5.0 \times 10^{-5}$	$5.8 \times 10^{-12}$
S/N	$8 \times 10^3$	24.2	800	$1.7 \times 10^2$	$4.0 \times 10^2$	1.5	1.9	$9.9 \times 10^{-13}$	$2.3 \times 10^{-13}$
								$2.9 \times 10^3$	$1.1 \times 10^3$
								0.49	0.13

数  $n$  が 30 回にわたる期待値を計数し、その平均値  $\langle N_s(v_0) \rangle$  と標準偏差  $\sigma$  から得られたものである。S/N と平均値は次式で与えられる<sup>7)</sup>。

$$\left(\frac{S}{N}\right) = \frac{\langle N_s(v_0) \rangle - \langle N_d(v_0) \rangle}{\sigma} \quad (15)$$

$$\langle N_s(v_0) \rangle = \frac{\sum_{j=1}^n n_{sj}(v_0)}{n} \quad (16)$$

分散は  $\sigma^2 = \langle N_s^2(v_0) \rangle - \langle N_s(v_0) \rangle^2$  となる。P が  $10^{-14}$  W 程度まで小さくなると  $\langle N_s(v_0) \rangle$  のゆらぎが目立ち S/N は低下する。また P が  $10^{-10}$  W 以上になると  $\langle N_s(v_0) \rangle$  の値は増大しながらもその波高値は低くなる<sup>7)</sup>。したがって計数率は低下して S/N は飽和していく。微分法では弁別レベルの窓を  $\Delta v$  としその平均値を  $\langle ns(\Delta v) \rangle$  で示した。

#### 5.4 最小検出可能光量

前記の測定結果をもとに  $S/N=1$  となる点の検出下限界の入射光量を表にまとめたものが Table 1 である。表から試料 B の検出下限界が最も低く  $P=2.5 \times 10^{-17}$  W の極微弱光を検出した。また試料 C では  $P=1.2 \times 10^{-13}$  W であり積分法で得た  $3.0 \times 10^{-13}$  W よりも延伸している。

各試料について Fig. 8 の出入力特性の値をもとに積分法および微分法で得られた資料を含めて計算<sup>5,7)</sup>で得られた種々の値を Table 2 にまとめた。

ここで当然ではあるが Si-APD に関しては、Table 1, 2 とも積分法のほうが優れた結果を得ている。ただし常温動作や迷光等の存在する場合は暗電流パルスの計数

値がすでに高い値となっているためそこへ信号光を入力するとさらに全体の計数値は高いものとなる。したがってすべての出力パルスを計数する積分法では回路系が応答しきれなくなることもある。この場合にはむしろ微分法によってある弁別レベル間の幅  $\Delta v$  の中に入るパルスのみを計数するほうが優れた結果を得る。

Ge-APD では暗電流雑音が大きいため S/N および最小検出可能光量は Fig. 8(d) や Table 1 および 2 のごとく微分法のほうが積分法を上まわっている。これは光電流パルスを観察すると Si-APD の場合はおのとののパルス相互間がよく分離したものとなっている<sup>7)</sup>が Ge-APD ではきわめて大きな暗電流パルスの数に光電流パルスが重畳するため各パルス相互間は十分には分離していない状態となっている。したがって光電流パルスの数え落しが多くなるものと考えられる。

Si-APD における光電流パルス 1 個の波形写真<sup>9)</sup>からその電荷量を計算すると約  $1.2 \times 10^{-11}$  C である。この値は光電子パルスとはほど遠いものである<sup>11)</sup>。この理由は、pn 接合というきわめて狭い領域の強電界のもとから光電子パルスがなだれ状に発生するため、その出力パルスは各光電子パルスの集りとしてまとまって発生することが原因と考えられる。また波高分布がポアソン分布になつてない理由は受光面の各部分における増倍率はそれぞれ異なるも入射光はその全域に入力されているため平均した増倍率で動作していることが原因と考えられる。

#### 5.5 素子の選定規準

試料 B および C をはじめ最近入手した素子を含めて光

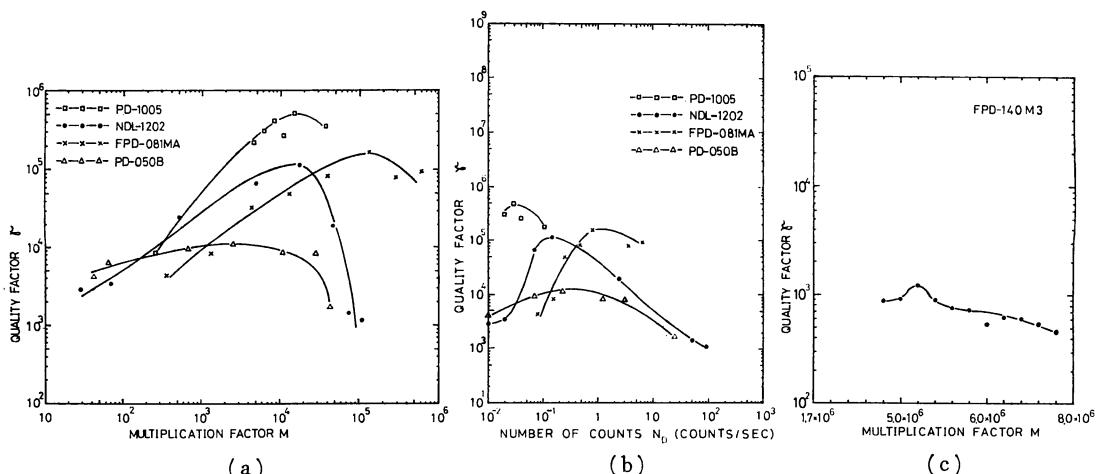


Fig. 9 (a) Measured variation of the quality factor  $\gamma$  as a function of the multiplication factor  $M$  (Si-APD). (b) The quality factor  $\gamma$  as a function of the number of dark counts  $N_D$  (Si-APD). (c) The quality factor  $\gamma$  as a function of the multiplication factor  $M$  (Ge-APD).

子計数用素子としての良好度を検討する。

三菱電機製 PD-050 B および PD-1005 と日本電気製 NDL-1202 および富士通製 FPD-081 MA の 4 試料は Si-APD であり富士通製 FPD-140 M 3 は Ge-APD である。これらの素子について  $M$  の変化に対する  $\langle N_D \rangle$  を測りその値から  $\gamma$  を求めてグラフ化したものが Fig. 9 である。(a)図から  $M$  の値の低いところで  $\gamma$  の値の大きなもの、ならびに(b)図から  $\langle N_D \rangle$  の値の小さいところで  $\gamma$  の値の大きいものがよい素子であるといえる。図では試料 PD-1005 が最良の素子であると判定される。試料 C は(c)図のように  $M$  の高いところでも  $\gamma$  の値は低く SPC 用には不適当であると判断される。これらの関係は(14)式から得られた Fig. 4 の図と対応させて考えることができる。

## 6. 結 言

APD の電流増倍率  $M$  と増倍雑音指数  $M^a$  にもとづいた解析をもとに信号対雑音比  $S/N$  と入出力特性を検討した。すなわち可視および赤外光に対する光子計数法の適用範囲を検出系の帯域幅と入射光量との関係からグラフ化して検出可能な領域の目安を得た。

次に入射光量に対する信号対雑音電圧比を計算し実験値と比較した。その結果 Si-APD の検出下限界は入射光量が  $2.5 \times 10^{-17}$  W, Ge-APD では  $1.2 \times 10^{-13}$  W であった。このとき入射光量対光電流の関係は  $10^{-10}$  W から  $10^{-16}$  W にわたり直線性のよいものが得られた。

次に光電流パルス 1 個のもつ電荷量を仲立ちとして増倍率と発生する光電流パルスの数との関係を与える実験式を導出した。

適正動作点の設定は APD の逆バイアス電圧の変化に対して光電流パルスの数は大きく変化しながらも暗電流パルスの数は増加していないところを  $V_{opt}$  と定めた。この状態に設定しておいて光電流パルスと暗電流パルス

の積分形波高分布を求め適切な弁別レベルを波高の最低点  $v_0$  に設定した。このとき試料 C のごとく雑音の多い素子ではむしろ微分形波高分布をもとに  $S/N$  を求めるほうがよい結果を得ることがわかった。これらの結果をもとに三つの試料について計数効率をはじめ最小検出可能光電子数や  $S/N$  について計算し表にまとめた。

最後に最近入手した素子も含めて素子の選定基準となる quality factor  $\gamma$  を定義し実験値と比較した。その結果、増倍率と暗電流パルスの数の低いところに  $\gamma$  の最大値が存在し、かつその値の大きいものが光子計数法に適する素子であると判定した。この方法は今後、よい素子を選定する場合の指針となると考えられる。

以上、非直線性の強いことから APD は従来、光通信用受光素子としてディジタル用に使われてきたが本報の方法によればダイナミックレンジの広い極微弱光の光センサーとしても用いうことがわかった。また雑音の多い Ge-APD にても赤外領域の極微弱光の検出が可能であることがわかった。

終りに本研究を行なうにあたりご懇切なるご指導とご討論をいただいた東北大学電気通信研究所稻場文男教授はじめ元同研究室山岸昭雄博士ならびに前本学教授中村新太郎氏に感謝申し上げます。

## 文 献

- 1) 清水慶昭, 稲場文男: 分光研究, 22 (1973) 195.
- 2) 稲場文男: 光学, 12 (1983) 166.
- 3) 市村 勉, 稲場文男: 応用物理, 39 (1970) 913.
- 4) 西田克彦: 日経エレクトロニクス, 6月2日号 (1975) 90.
- 5) 市村 勉, 浅井和弘, 稲場文男: 電子通信学会量子エレクトロニクス研究会資料, QE 69-20 (1969).
- 6) 藤川恭一郎, 高宮三郎: 電子通信学会半導体・トランジスタ研究会資料, SSD 69-40 (1970).
- 7) 木谷恵一, 林 孝: 光学, 10 (1981) 27.
- 8) 木谷恵一, 林 孝: 分光研究, 30 (1981) 17.
- 9) 木谷恵一, 林 孝: 光学, 9 (1980) 282.
- 10) 清水慶昭, 達 保宏, 稲場文男: 光学, 4 (1975) 105.
- 11) P. P. Wabb, R. J. McIntyre and J. Conradi: RCA Rev., 35 (1974) 234.