

# Detection of Weak Light Signals

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-03 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: Matsuura, Kohki, Tsuda, Nobuo, Yamamoto, Gaishi メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.24517/00011765">https://doi.org/10.24517/00011765</a>

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



# 極微弱光の検出

松浦 弘毅\* 津田伸生\*\* 山本外史\*

Detection of Weak Light Signals

by

Kohki MATSUURA, Nobuo TSUDA and Gaishi YAMAMOTO

## Abstract

Theoretical and experimental evaluation of extremely low level photodetection techniques is described. The techniques evaluated are DC method and Single Photoelectron Counting method both using photomultiplier tubes. The photomultiplier tubes used are HTV-R132(S10) and HTV-R376(S20). Optimum values of applied voltage and threshold level of the multiplier tubes obtained by experiments are shown. The best signal sensitivity of 4.5 photo-electrons per second for a counting time of 10 seconds is acquired for HTV-R376 which is cooled down to  $-30^{\circ}\text{C}$ . This means the light power of  $2.8 \times 10^{-17}\text{W}$  ( $6328\text{ \AA}$ ) can be detected by the observation of 10 seconds.

## 1. まえがき

光強度が、およそ  $10^{-15}\text{W/cm}^2$  以下であるような極めて弱い光を検出することは、分光学、物性解析及び光学計測の分野で重要となりつつある。従来の微弱光検出の方法は、一般には、光電子増倍管を用いてその出力電流を読みとる直流法か、又は、その際の色々な装置の  $1/f$  雑音を避けるため、検出光をチョッパー等で変調し、位相検波器などで検出する方法が採用されてきた。しかし、極めて弱い場合には、これらの光が本質的には粒子的な光子という性質で説明されるように、光電子増倍管の出力は、もはや時間的に一定の強さを持っている電流という概念のものではなく、パルス状の電荷の粒として観測される事実に基づき、近年では、光電子増倍管からの出力電流の平均値を読むのではなく、出力パルスの単位時間内発生数を読み光の強さを知る方法が考え出された。

我々は、この光子計数法 (Photon Counting method) による微弱光検出を行ない、得られた結果を理論値及び従来の直流法による結果と比較、解析したので報告する。

## 2. 微弱光の検出法

光電子増倍管 (Photomultiplier tube 以後 PM 管と略記) を用いた光検出法に於て、 $S-N$  比を向上させる手段としては、従来は専ら測定系の等価帯域幅を狭めることにより雑音を減少させる方法のみが採用されてきた。同期検波法などのように、測定系に存在する  $1/f$  雑音の影響を避けるために変調法を用いて  $S-N$  比を向上させる改良も行なわれてきたが、この方法も本質的には、狭帯域化を行

\* 電子工学科    \*\* 大学院学生

なうものである。

近年、上記の方法とはまったく異なる発想による単一光電子計数法(Single Photoelectron Counting method 以後 SPC 法と略記)と呼ばれる光検出法が考えられた。以後この SPC 法を従来の検出法と比較しながら説明する。

従来もっともよく用いられてきたのは、直流法(DC method)で、これは PM 管の平均直流出力電流を読みとるもので装置は簡便なものですが、S-N 比向上のため時定数を大きくするとドリフトに悩まされることが多い。この DC 法では、周波数の高い成分はショット雑音として捨てられるが、AC 法と呼ばれる検出法では、このショット雑音成分電力が入力信号光電力に比例し、且つ、微弱な光強度の場合には直流成分電力よりショット雑音電力の方がより大きくなることに注目し、直流分を捨てショット雑音を測定する方法が考案された<sup>1),2)</sup>。この AC 法では、通過帯域下限周波数を適当に選べば、1/f 雑音の影響を取り除くことが出来、DC 法に比べて大幅な S-N 比の改善が期待できる。

更に、検出回路の帯域幅を広くすると、PM 管の出力は、連続した電流波形ではなくパルス状の時間的に離散したものとなる。これは入射する光が、本質的には時間的に不連続なもの(光子)であるからである。この出力パルス列の状況は、入射光の統計的性質を示すものであるから 単に入射光の強度のみでなく その他の性質を示す情報をも含んでいるのであるが、光強度測定の場合には一定時間内の平均発生個数を求めればよい。この SPC 法に於ては、出力パルスの波高が、信号光によるものと雑音によるものとでは統計的な違いがあることを利用して、相対的に信号分を多く含む波高値のパルス数のみを計測して S-N 比の向上を図る。この SPC 法では、S-N 比の向上を帯域幅を狭めることとはまったく異なって、入射光によるパルスとそれ以外の原因によるパルスの発生機構の差異に着目して行なう。

次に、上述の各方式の感度及び S-N 比について調べる。

まず DC 法に於ては、信号光による単位時間内の平均光電子発生数を  $n_s$ 、信号光以外の雑音とみなせるものによる等価雑音光電子数を  $n_n$ 、PM 管の信号光に対する増倍率を  $G_s$ 、又、雑音光に対してはそれらがカソード以後のダイノードからも発生していることから平均増倍率は  $G_n$  より低くなることが予想されるのでこれを  $G_n$  として表わすと、

$$\text{PM 管アノード出力平均電流 } I_a = (n_s G_s + n_n G_n) e,$$

$$\text{PM 管のショット雑音電流 } \sqrt{i_n^2} = \sqrt{2eI_a G \mu B} \quad ^3), \text{ 但し } B \text{ は帯域幅}.$$

ここで信号光と雑音に対する雑音指数  $\mu_s$ ,  $\mu_n$  (通常,  $1 < \mu < 2$ ) が、異なることを考慮すれば、

$$\frac{S}{N} = \frac{n_s}{2(\mu_s + \mu_n n_n G_n^2 / n_s G_s^2) B} \quad \text{但し } \mu_s > \mu_n, G_s > G_n.$$

従って、通常問題となる  $n_s \ll n_n$  の場合に検出可能な最少の  $n_s$  の値は、 $S/N = 1$  より、

$$n_{s\min} = \sqrt{2\mu_n B \left( \frac{G_n}{G_s} \right)^2 n_n}$$

次いで、AC 法に於て、信号光による直流電力よりショット雑音電力の方が大きくなる条件、つまり AC 法が有利となる条件を求めれば、

$$n_s^2 G_s^2 e^2 < 2e^2 n_n G_n^2 \mu_n B,$$

つまり、 $n_s < 2\mu_n B$  となる。

AC 法の実際の検出法では、ショット雑音を自乗検波することを考えて、S-N 比を計算すれば<sup>1)</sup>,

$$\begin{aligned}\frac{S}{N} &= \frac{(2e^2 n_s G_s^2 \mu_s BR^2)^2}{(e^2 BR^2)^2 2B(n_s G_s^4 \mu_s^2 + n_n G_n^4 \mu_n^2)} \\ &= \frac{2n_s}{B \left( 1 + \frac{n_n G_n^4 \mu_n^2}{n_s G_s^4 \mu_s^2} \right)} \quad \text{但し } n_s \ll n_n \ll \frac{1}{B}.\end{aligned}$$

よって、

$$n_{smi:n} = \left( \frac{G_n}{G_s} \right)^2 \frac{\mu_n}{\mu_s} \sqrt{\frac{B n_n}{2}}.$$

次に SPC 法について、まず光電子の発生が一つ一つのパルスとして分離できるための条件 (Single Photoelectron Event) を求める。光電子の発生はポアソン過程であると考えられるから平均発生個数を  $N$  とすれば、時間  $\tau$  内に光電子パルスが 2 個以上発生する確率は、 $P = 1 - (N\tau + 1)exp(-N\tau)$  で与えられ、一方、検出装置の帯域幅が  $F$  あるとすれば装置の時間分解能は  $1/2F$  秒であるから、 $1/2F$  秒内に 2 個以上のパルスが発生するのは望ましくないことになる。すなわち

$$\left( \frac{N}{2F} + 1 \right) exp\left( -\frac{N}{2F} \right) = 1 \quad \text{が、求むべき条件である。}$$

この条件は、完全には決して満たせないが、誤計数率を 5 %以内におさえるという条件ならば、右辺が 0.95 となり、 $F > 10N$  で与えられる。

上述の事柄は、SPC 法に於て、入射光強度と検出光電子数の間の直線性が 5 %まで劣化することを意味し、もし非直線性が 1 %以内でなければならない時には、 $F > 50N$  となり、例えば入射光強度が  $N = 10^5$  の強さであれば、検出装置の必要帯域幅は 5MHz 以上となる。

$S-N$  比については、測定時間（時定数）を  $T$  とすれば、信号分  $S = (n_s T)^2$ 、雑音分は、光電子放出過程がポアソン過程であるが、 $n$  多数のためがウス分布をなすとしてよいから それらのゆらぎは総量の二乗根で表わされることより、 $N = (n_s + n_n) T$ 。よって  $n_s \ll n_n$  であれば、

$$\frac{S}{N} = \frac{n_s^2}{n_n} T, \quad n_{smi:n} = \sqrt{\frac{n_n}{T}} = \sqrt{B n_n} \quad \text{となる。}$$

上式では  $n_s$ ,  $n_n$  のパルス波高  $h$  の分布の違いを考えに入れなかったが、 $n_s(h)$ ,  $n_n(h)$  が発生機構のちがいにより異なる函数形をとり、波高弁別回路を通し、あるレベル区間の波高値をもつパルスのみを計数するようにした時には、 $S-N$  比の値は弁別回路のレベル  $h$  の函数となり、最大値をとる条件は次式で与えられる。

$$\frac{d}{dh} (ln n_s) = \frac{1}{2} \frac{d}{dh} (ln n_n).$$

$n_s(h)$ ,  $n_n(h)$  の函数形は、PM 管の光電面性質、カソード、ダイノード等の幾何的形状、配置によっても異なり、実測によって求められる。

以上の如く、各種検出法に於て常に問題となるのは、雑音電流であるが、PM 管の出力雑音成分は光を照射しなくても発生する暗電流及び電極間のリーケージ電流による雑音、管壁についていたり容器ガラス内に含まれている螢光物質による発光、宇宙線等による管内残留ガスのイオン電離による雑音などがある。これらの内で最も支配的なものは、主として熱電子放出によるといわれる<sup>4)</sup>暗電流でありこれを減少させるために、光電面々積を小さくしたり冷却する方法が有効である。冷却によって雑音電流を二桁低下させれば感度は一桁上がることになる。

実際に PM 管を選択する場合には、雑音電流が小さいものを選ぶことのほかに、使用光波長での量子効率  $\eta$  が高いことが条件となる。検出可能な最小光子数は  $\eta$  に逆比例するから、 $\eta / \sqrt{I_{noise}}$  は PM 管の Figure of merit とも云える。しかし実際には、この値で完全には PM 管の良さを表わし得ない。

いのは信号と雑音のパルス波高分布をも考慮に入れなければならないためである。

一般に信号光によるパルスの波高分布は二次増倍機構がカスケードになっている分布であるから、極大値をもつボアソン分布になり、一方、雑音のパルス波高分布は熱電子によるものについては、カソード面で発生したほぼ信号光による波高分布と同じもの他にダイノードで発生した波高の低いものが加わる。その他に宇宙線による電離のため生じたパルスは非常に高い波高を有すると云われる。この高い波高を有する雑音成分は、SPC 法に於てはウインドウ型コンパレータによって除くことができる。リーケージ電流による雑音は、特に冷却をした場合ソケット等に付着しやすい水分によって発生するので注意しなければならない。

PM 管以外の他の部分より発生する雑音は、通常 PM 管のそれより十分小さく、一般には PM 管の雑音のみが問題となる。

今まで述べてきた各方式の感度等の数値を代表的な具体例の場合について、第 1 表に示す。

第 1 表 各種検出法の感度

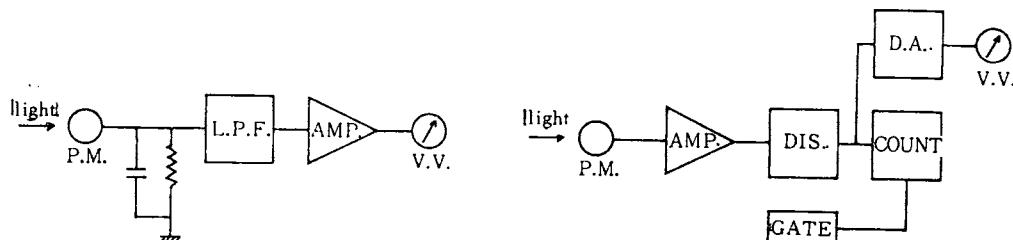
	最小検出可能光電子数		最小検出可能光強度 (6328Å)	
	$n_n = 1.25 \times 10^4$	$I_{noise} = 2 \times 10^{-15} A$	$n_n = 1.25 \times 10^2$	$I_{noise} = 2 \times 10^{-17} A$
DC $\sqrt{2\mu_n B \left(\frac{G_n}{G_s}\right)^2 n_n}$	97	PPS	9.7	PPS
AC $\left(\frac{G_n}{G_s}\right)^2 \frac{\mu_n}{\mu_s} \sqrt{\frac{B n_n}{2}}$	15		1.5	
SPC $< \sqrt{\frac{n_n}{T}}$	$< 112$		$< 11.2$	
			$\times 10^{-18} W$	$\times 10^{-17} W$
			6.1	6.1

$$\begin{aligned} \text{但し, } & G_s = 10^6 \\ & G_n = 5 \times 10^5 \\ & \mu_s = 2 \\ & \mu_n = 1.5 \end{aligned} \quad \begin{aligned} & B = 1 H_z \\ & T = 1 \text{ sec} \\ & \lambda = 6328 \text{ Å} \\ & \eta = 5 \% \end{aligned}$$

表中の 3 つの方式について、それぞれ同期法が考えられるが、それらは  $1/f$  雑音がなければ、観測時間を減らすのみであり、AC, SPC の両方式については必ずしも  $S-N$  比の改善はみられない。又、第 1 表では、AC 法が最も優れた感度を示しているが、これらの検討は、5. あとがきで述べる。

### 3. 実験装置及び方法

我々が実験した DC 法及び SPC 法による光検出装置のブロック図を、第 1 図に示す。



第 1 図 a) DC 法

第 1 図 b) SPC 法

使用した PM 管は、HTV-R132, HTV-R376 であり、室温及び液体窒素ガスにて  $-30^\circ C$  程度に冷却した場合についても測定を行なった。

DC 法での PM 管の負荷抵抗は  $1M\Omega$ , LPF の時定数は  $10\text{sec}$  に選んである。

SPC 法での PM 管負荷抵抗は  $1K\Omega$ , 広帯域增幅器の帯域は, R132 の場合は  $10\text{K}\sim10\text{MHz}$ , R376 では  $1.1\text{K}\sim5.0\text{MHz}$  であり, 波高弁別回路はトンネルダイオードを使用したものである。この装置の計数可能速度は, 入力パルスが, 幅  $100\text{nsec}$ , 立上がり  $20\text{nsec}$  である時  $10^5\text{PPS}$  であった。波高弁別された出力パルスは, カウンタ又はダイオードを使用した簡単な D-A 変換器に導かれている。カウンタの計数時間, 変換器の時定数は DC 法と同じく  $10\text{sec}$  に統一して実験を行なった。

微弱光源としては, タングステン白熱ランプ, ナトリウムランプ及び  $H-Ne$  ガスレーザを用いた。微弱な光強度とするために, 白熱灯の場合は黒い布でランプ及び PM 管を包み, その状態で洩れてくる光を測定し, スペクトル光源の場合は分光器のスリット幅を最狭にし, 更に入射スリットへの照射を最適の状態からずらすなどして, PM 管カソード電流で  $10^{-17}\text{A}$  オーダ (数百ヶ光電子/秒) の微弱光を得ている。

測定を行なった項目は, PM 管信号及び雑音パルスの波高分布を 2 つの PM 管について, 同印加電圧及び温度を変えて測定し, SPC 法に於いての  $S-N$  比の変化を波高弁別レベルをパラメータとして同一入射光強度の条件で観測し, 次いで, DC 法と SPC 法による同時測定を行ない両方式での  $S-N$  比の差異を測定した。波高分布は, 弁別レベルを順次変化させてその時の計数値を記録して求めた。

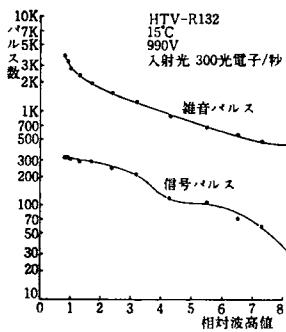
#### 4. 実験結果及び考察

測定した結果の内, 主なるものを第 2 表及び第 2 図以下に示す。

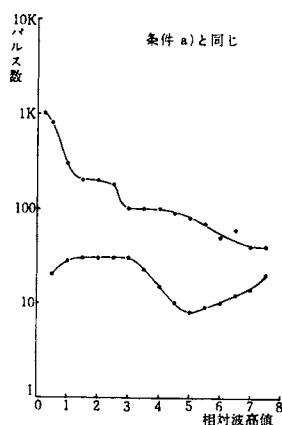
第 2 表 測定結果及び理論値

PM 管 及び印加電圧	$I_{noise}$				DC 法				SPC 法	
	アノード 測定値	PM 管 増倍率 $G_s$	カソード 換算値	$n_n$	$I_{smin}$		$n_{smin}$		$\sqrt{\frac{n_n}{T}}$	$n_{smin}$ 実測値
					理論値	実測値	理論値	実測値		
R132 (S-10)	720	$V \times 10^{-9}\text{A}$ 0.024	$\times 10^5 \times 10^{-18}\text{A}$ 1.9	1.9	1190	$\times 10^{-18}\text{A}$ 1.84	$\times 10^{-18}\text{A}$ 5.61	11.5	35	10.9
	810	0.132	4.0	4.95	3100	2.98	7.98	18.6	50	17.7
	900	1.27	9.5	20	12500	6.0	9.8	37.4	61	35.4
	990	2.10	19	16.5	10300	5.45	10	34	62.5	32.2
	1080	3.65	35	15.6	9750	5.29	7.84	33	49	31.2
R376 (S-20) 17°C	900	0.024	2.5	1.46	910	1.62	2.48	10.1	15.5	9.6
	950	0.032	3.5	1.37	855	1.57	2.88	9.8	18	9.3
	1000	0.072	5	2.15	1345	1.97	4.42	12.3	27.6	11.6
R376 (S-20) -30°C	900	0.006	2.5	0.36	225	0.8	2.11	5	13.2	4.75
	950	0.006	3.5	0.26	163	0.69	1.0	4.3	6.25	4.05
	1000	0.013	5	0.39	244	0.83	1.26	5.2	7.9	4.95

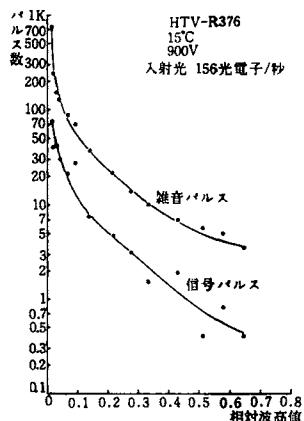
$$\text{但し, } B=0.1\text{Hg} \quad \frac{G_n}{G_s} = \frac{1}{1.5} \quad \mu_n = 1.25 \\ T=10\text{sec} \quad \mu_s = 1.5$$



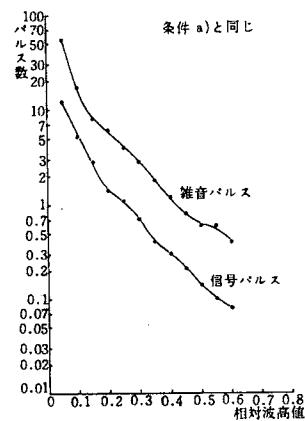
第2図 a) PM出力パルス波高分布（積分曲線）



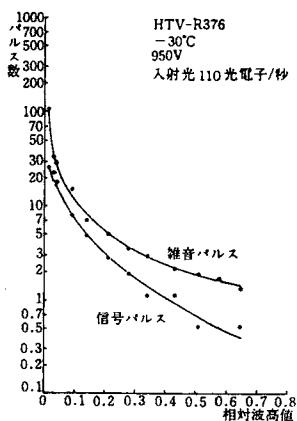
第2図 b) PM出力パルス波高分布（微分曲線）



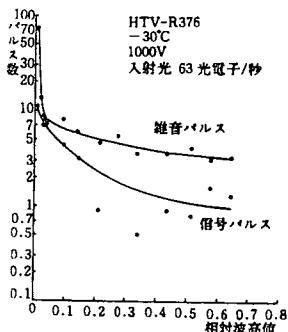
第3図 a) PM出力パルス波高分布（積分曲線）



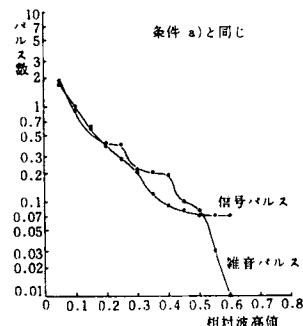
第3図 b) PM出力パルス波高分布（微分曲線）



第4図 a) PM出力パルス波高分布（積分曲線）



第5図 a) PM管出力パルス波高分布(積分曲線)



第5図 b) PM管出力パルス波高分布(微分曲線)

第2～5図の(a)に各種条件でのPM管出力パルス波高積分曲線を示す。同(b)に波高微分曲線を示す。これらの結果よりR132に於ては、雑音パルスは低い波高値のものが非常に多くあり、信号光パルスは相対波高値2位のものが多く低い波高値のものは少なくなっている。一方、R376に於ては、上述の傾向はあまりはっきりしないが、低い波高値(0.1以下)での雑音パルスの減少率が信号光パルスのそれよりもかなり大きく、波高値0.5以上の雑音パルスは急激に減少する特性を示している。更に波高値0.25付近のパルス密度が若干高いことがわかる。

上述の事実から、R132の雑音パルスは、カソードより以後のダイノードから発生するものとリーケージ電流等による低い波高値のパルスが多数を占め、R376の雑音はカソードから発生するものも多い事がわかる。この傾向は冷却してもあまり変わらないが冷却した場合の方が中位の波高値( $\approx 0.3$ )でのパルス密度が高くなるようである。これは冷却による熱雑音パルスの減少がカソード面での発生パルスの減少より、仕事函数の高いダイノードでの減少によるものの方が著しいため、光電面から発生したパルスの特長である極大を有するポアソン分布の傾向が強調されたためと思われる。

冷却は $-30^{\circ}\text{C}$ 程度で行なったが、約 $-20^{\circ}\text{C}$ 以下の温度にても雑音パルスのそれ以上の減少はあまり望めないという報告<sup>5)</sup>もあり、冷却効果はこの実験に於て十分に出ているものと思われる。

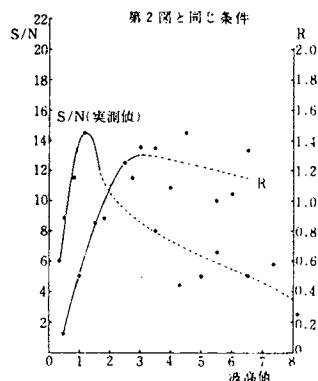
これら波高曲線の図の横軸の値は相対値としてあるが、実は幅100nsec、立上がり時間20nsecのパルスが入った時には単位をmVとして絶対値を与えるものである。しかし、PM管からの出力パルスの波形は正確にはわかつておらず、入力パルス波形が異なれば広帯域増幅器を通過したパルス波のピーク値も異なってくる事情から、横軸の値は相対値と記した。

第6図に、SPC法に於て弁別レベルを変えた時のS-N比の変化を示す。又、図中にR\*の値も示してある。理論的には、2に述べた如くR=0.5のとき最良のS-N比が得られるはずである。

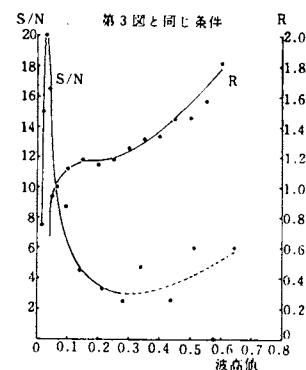
これを見ると、理論の示す通りほぼR=0.5の付近で最良になっており、又、弁別レベルの変化によりS-N比の値は一桁ほども異なることがわかる。更に、その最適レベルの設定幅はかなりシビアであり、PM管印加電圧、温度などの条件によっても変化することがわかる。

次に、上で求まった最適の弁別レベルの条件でのSPC法とDC法での最小検出可能光電子数を比較する。第7図に、DC法とSPC法での同時記録の例を示す。a)は最適レベルでの例ではないが、これらの例からSPC法の方がより良好な特性を示すのがわかる。第8図に、最少検出可能光電子数n<sub>smin</sub>を、PM管印加電圧をパラメータとして表わす。図中に、暗電流から計算したDC法に於けるn<sub>smin</sub>の理論値、SPC法での感度のめやすとなる値 $\sqrt{n_n/T}$ も記入してある。

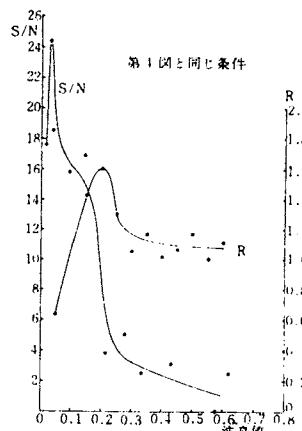
$$* R = \frac{d\ln N_s}{dh} / \frac{d\ln N_n}{dh}$$



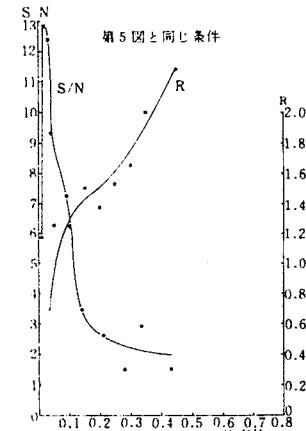
第6図 a) 弁別レベルによるS/Nの変化



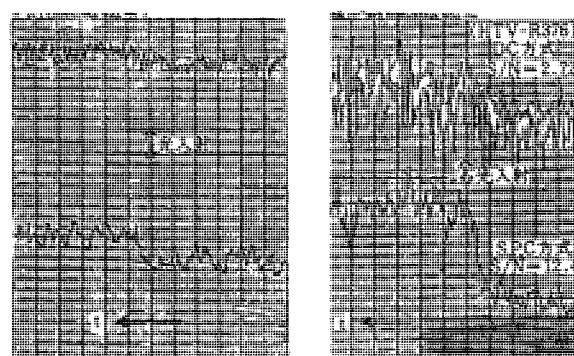
第6図 b) 弁別レベルによるS/Nの変化



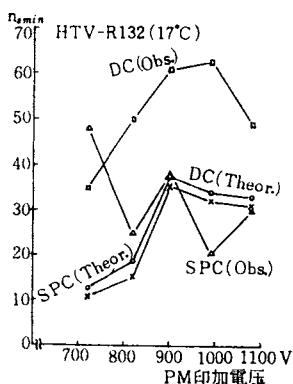
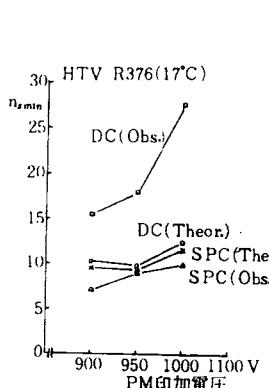
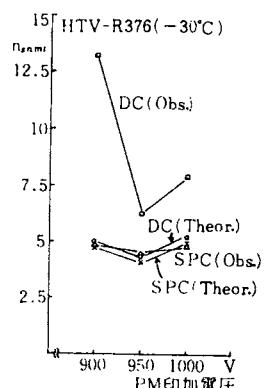
第6図 c) 弁別レベルによるS/Nの変化



第6図 d) 弁別レベルによるS/Nの変化



第7図 DC法とSPC法の比較

第8図 a) 印加電圧による最小検出可能光電子数N<sub>smin</sub>の変化第8図 b) 印加電圧による最小検出可能光電子数N<sub>smin</sub>の変化第8図 c) 印加電圧による最小検出可能光電子数N<sub>smin</sub>の変化

これらの結果から、R132については、SPC法では印加電圧による差違はあまりはっきりしないが720V印加の場合には理論的予想からはずれ一番感度が悪くなっている。DC法では、一般にSPC法より感度が低く1,000V付近より720Vの低い印加電圧の場合の方が良好な結果を示す。又、理論的限界値の1/2～1/3の感度にとどまっているのがわかる。

R376の感度は、R132よりも良好な値を示しており、DC法よりSPC法の方がより高感度であるのはR132と同じである。特にDC法では印加電圧の変化による感度の変動が大きいのに比し、SPC法ではあまり大きな変動がないのは注目に値する。DC法では、やはり理論値には達していないが、冷却時の950～1,000V印加した場合は比較的、理論限界値に近い感度が得られている。SPC法では、非冷却時に、弁別レベルを変化させて感度の改良を図らない場合の理論値 $\sqrt{n_e}/T$ よりも、良い感度が得られている。これより雑音と信号の波高分布の間に違いがあることがわかる。冷却時には、理論値とほぼ同じ感度であることは、冷却により低波高値のものが減少し雑音パルスの波高分布が信号分のそれと似た分布に近づいたためであろう。

冷却の効果は、DC法に於て特に著しいが、全般にはっきりと現われている。DC法では、冷却時に、非冷却時の傾向とは逆に、高電圧側で感度が良くなっているのは注目される。

以上の内で、最も感度の良いのは、R376を冷却し、950Vの電圧を印加した場合で、毎秒4.5個の光電子まで検出できる。この値は、入射光波長が6,328Åであれば $2.8 \times 10^{-17}W$ に相当する。又、時定数が1秒の場合に換算すると、 $9 \times 10^{-17}W$ となる。

## 5. あ と が き

極微弱光を検出する各種の方法を検討、測定してきたが、我々の測定では、SPC法により従来のDC法より良好な結果( $9 \times 10^{-17}W$ : 6,328Å  $T=1sec$  S20光電面)を得た。DC法でも、一般に云われている程感度は悪くなく我々の場合SPC法より4割程の感度低下であった。しかし、実際には微小電流電圧を直接測定するDC法では、SPC法にくらべ、実験上格段に種々の注意を払うことが要求される。DC法では、リーケージ電流、ライン電圧などから生ずる1/f雑音などの影響も受けやすい。これらの影響を避けるため同期法があるが、一般に $1/\sqrt{2}$ だけの感度低下が生じる。しかしながら、DC法では、上の事情を総合的に見れば、DC法での検出限界をしらべるというような特別の場合でなく、日常的な光度測定を行なう場合には同期法を採用する方が良好な感度を保つためには有利であろう。

SPC 法では、前記のようなクリティカルさはなく良好な感度を日常的にも保ちやすい有利さがある。SPC 法に更に同期法を採用することは、この検出法が既に  $1/f$  雑音の影響を受けにくい方式であるので、一般に感度を増大させることにはならず、簡単な SPC だけの方が良い場合が多い。

我々も同期 SPC 法について、若干の実験を行なったが、SPC だけの場合よりも劣っていた。SPC 法では、PM 管の温度変化、ライン電圧内のパルス性雑音に関しては、DC 法より影響を受けやすいようである。殊に、ライン電圧から入ってくるパルス性雑音は防ぎにくく、電源をバッテリから取るのが良い結果を与えた。PM 管の温度変化は、測定値の基線が変動する影響を与え、長時間の測定をする場合に、特に注意しなければならない。

AC 法については、この論文では述べなかったが、我々の行なった範囲では、SPC 法より感度が低かった。最近の他の文献<sup>6), 7)</sup>を見ても、SPC 法より劣った結果が出ており、実際の微弱光測定に使われている例も少ないようである。AC 法は、必ずしも理論通りの結果が出るとは云えないようである。

以上を総合してみると、今までの所、SPC 法が最も望ましい方法であるといえるが、今の SPC 法が完全であるとは云えないように思われる。例えば、PM 管以後の測定系の帯域幅の影響、波高弁別器の分解能の問題その他の改良を要する点があり、これらの点の改良を行なうことがこれから問題点であろう。

おわりに、この実験を進めるにあたり色々と有益な示唆をして下さると共に、種々の設備の利用を許可して下さった金沢大学理学部附属電波物理研究施設、松岡慎一助教授、大橋信喜美氏に心から感謝する。又、実際の測定を行なった当電子工学科第 2 講座の卒研生諸氏には、いろいろ名前を挙げ得ない程多くの皆様の助力を受けた。ここに深く感謝する。

#### References

1. Pao, Y. H. and Griffiths, J. E.: *J. Chem. Phys.*, **46**, (1967) 1671.
2. Griffiths, J. E. and Pao, Y. H.: *J. Chem. Phys.*, **46**, (1967) 1679.
3. Shockley, W. and Pierce, J. R.: *Proc. I.R.E.*, **26**, (1938) No. 3, 321.
4. Andrew, T. Y.: *Appl. Opt.*, **6**, (1967) No. 5, 979.
5. Oliver, C. J. and Pike, E. R.: *Brit. J. Appl. Phys. (D)*, **1**, (1968) 1459.
6. Alfano, R. R. and Ockman, N.: *J. Opt. Soc. Amer.*, **58**, (1968) 254.
7. 清水、稻場：分光研究, **22** (1973) No. 4, 195.

(昭和 48 年 10 月 8 日受理)