

APD 読み出し二次元位置感応型  
プラスチックシンチレーション検出器の開発

広島大学 理学部物理科学科

クォーク物理学研究室

久保 武史 1379022E

主査 杉立 徹 教授

副査 山本 一博 助教授

指導教官 杉立 徹 教授

## 要旨

現在、二次元で粒子の入射位置を読み出す検出器は多くの粒子検出素子を組み合わせたものである。本研究ではプラスチックシンチレータ 1 枚だけで位置を読み出す検出器の開発を目的とする。シンチレータとは荷電粒子が入射すると蛍光を発するものである。その蛍光を検出するために光電子増倍管(PMT)を用いるのが一般的であるが、PMT に代わり半導体光検出素子で内部に電気信号を増幅することのできる機能を持ったアバランシェフォトダイオード(APD)を用いた。APD は PMT に比べて容積が小さく、動作電圧が低いのでより扱いやすい検出器を製作することが可能となる。さらに、磁場中での影響が少ないので強磁場中で行う高エネルギー実験でも容易に使うことが可能となる。しかし、現時点で入手可能な APD は 10 mm × 10 mm 程度と受光面積が小さいためプラスチックシンチレータと APD を組み合わせた検出器は少ない。本研究では APD の軽便性に注目しシンチレータの側面数箇所に設置し位置を特定する検出器を考案した。原型器の作製のために、APD の入射光量と検出信号の関係や最適な動作電圧の決定を行った。

- 1 序論
- 2 導入
  - 2.1 放射線と物体の相互作用
    - 2.1.1 シンチレーション検出器
    - 2.1.2 電離損失
    - 2.1.3 制動放射
    - 2.1.4 光電効果
    - 2.1.5 コンプトン散乱
    - 2.1.6 対生成
    - 2.1.7  $\beta$ 線
  - 2.2 宇宙線について
  - 2.3 光センサ
    - 2.3.1 光電子増倍管
    - 2.3.2 p型半導体・n型半導体
    - 2.3.3 フォトダイオード
    - 2.3.4 アバランシェ・フォトダイオード
- 3 検出器の動作条件最適化と性能評価
  - 3.1 使用機器
    - 3.1.1 パルスジェネレータ
    - 3.1.2 プリアンプ
  - 3.2 APDの出力信号のノイズ落とし
    - 3.2.1 実験
    - 3.2.2 結果
  - 3.3 LEDからの入射光量とAPDの出力信号
    - 3.3.1 実験
    - 3.3.2 結果 1
    - 3.3.3 LED回路変更
    - 3.3.4 結果 2
  - 3.4 APDのシグナル・ノイズ比の調査
    - 3.4.1 実験
    - 3.4.2 結果
  - 3.5 APDの増倍率

- 3.5.1 実験
- 3.5.2 結果
- 3.6 プリアンプ増倍率
  - 3.6.1 実験
  - 3.6.3 結果
- 4 原型器の製作
  - 4.1  $\beta$ 線測定
  - 4.2 結果
- 5 考察
  - 5.1 APD の性能
  - 5.2 プリアンプの性能
  - 5.3 粒子検出
- 6 結論

謝辞

参考文献

付録

## 1 序論

現在、二次元で粒子の入射位置を読み出す検出器は多くの粒子検出素子を組み合わせたものである。本研究ではプラスチックシンチレータ 1 枚だけで位置を読み出す検出器の開発を目的とする。シンチレータとは荷電粒子が入射すると蛍光を発するものである。その中でもプラスチックシンチレータは成形しやすく様々な形の検出器を容易に製作することができる。さらに、その光の減衰時間は数 ns と非常に短いので時間分解能がよい。現在、シンチレータからの蛍光を検出するには光電子増倍管(PMT)を用いるのが一般的である。なぜなら PMT は他の光検出素子に比べて、高い増倍率を持っているからである。しかし、PMT にも欠点はある。PMT の構造上、信号を増倍させるのに高電圧が必要なこと、さらに磁場中では使用が困難であることなどである。他の光検出素子といえば半導体光検出素子(フォトダイオード)ある。フォトダイオードは PMT と違い磁場中で使用でき、PMT ほどの高電圧を必要としない。本実験ではフォトダイオードであり、PMT と同様に内部に電気信号を増幅することのできる機能を持ったアバランシェフォトダイオード(APD)を用いた。APD は PMT に比べて容積が小さく、動作電圧が低いのでより扱いやすい検出器を製作することが可能となる。さらに、フォトダイオードなので磁場中の影響が少ないので強磁場中で行う高エネルギー実験でも容易に使うことが可能となる。しかし、現時点で入手可能な APD は 10 mm × 10 mm 程度と受光面積が小さいためプラスチックシンチレータと APD を組み合わせた検出器は少ない。そして、APD は逆電圧をかけて使用するために暗電流が必ず存在するのでノイズを拾いやすい。APD は光電子増倍管ほどの増倍率はないので微小な信号ではノイズに埋もれて検出できないということも十分考えられる。しかし、この APD を自由に使うことができるようになれば、様々な分野での応用が期待できる。そして、APD の軽便性に注目するとシンチレータの側面数箇所を設置し位置を特定する検出器も実現可能であると考えた。本実験では、原型器の作製のために APD の基本性能を調べ、そしてその性能の再現性を評価する。

## 2 導入

粒子検出器を製作するためには粒子がどの物質とどのような相互作用をして、その結果、生じる現象を理解せねばならない。本章では、まず物質と粒子の相互作用を述べる。次に粒子検出器として使われる受光素子について述べる。そして、信号を増倍させるアンプについて述べる。最後に本実験で使われたパルスジェネレータについて述べる。

### 2.1 放射線と物質の相互作用

#### 2.1.1 シンチレーション検出器

シンチレーション検出器は放射線検出器の一種で放射線と物質の相互作用を利用した検出器である。シンチレータは荷電粒子が物質中を通過するとき、その粒子が失うエネルギーを光に変換する物質である。シンチレータには有機シンチレータ、無機シンチレータ、などがある。下に有機シンチレータであるプラスチックシンチレータと無機シンチレータである NaI, PWO の性質を示した。プラスチックシンチレータはポリスチレン等プラスチックの中に有機発光物質が溶かし込まれたもので形状の加工が容易であり、値段も安価である。さらに応答が数 ns のオーダーであり、シグナルの立ち上がり時間、立下り時間がともに早い。しかし、NaI に比べて発光量が小さい。エネルギーが同じ粒子に対する発光量にばらつきがある。これをエネルギー分解能が低いという。

	プラスチック	NaI	PWO
相対発光量 (NaI を 100 とする)	30	100	1
モリエール半径 [cm]	42.5	2.59	0.89
減衰時間 [ns]	2~4	230	3~40
密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	1.032	3.67	8.28
発光波長 [nm]	350~450	413	430

一方、NaI、PWO などの無機シンチレータは高密度のため放射長、モリエール半径が小さいので検出効率が高い。特に PWO は減衰時間(光が入射して結晶中の電子が励起してか

ら基底状態に戻るまでの時間)が短い。そして、NaI は発光量がとても高い。しかし、無機シンチレータは値段も高く取り扱いに注意が必要である。中には潮解性(空気中に置いておくと水分を吸って自然に溶ける性質)を持つものもある。シンチレータに光が入射されると粒子のエネルギーに応じて発光し、その光を様々な光検出器で検出する。

### 2.1.2 電離損失

荷電粒子が物質中を通過する際には電磁相互作用により物質を構成する原子あるいは、分子中との電子との非弾性衝突をする。この過程において原子や分子中の電子が荷電粒子からエネルギーを受け取る。受け取ったエネルギーが電子の束縛エネルギーよりも大きい場合には、電子は原子・分子から弾き飛ばされる。これをイオン化という。受け取るエネルギーが小さい場合には、原子・分子がエネルギーの高い状態になる。これを原子・分子の励起という。これらの過程により、荷電粒子はエネルギーを失う。

荷電粒子が失うエネルギーは下のベーテ・ブロッホの式で表すことができる。

$$-\frac{dE}{dx} = nZz^2 \frac{4\pi\alpha^2 (\hbar c)^2}{m_e c^2 \beta^2} \left( \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I} - \beta^2 \right)$$

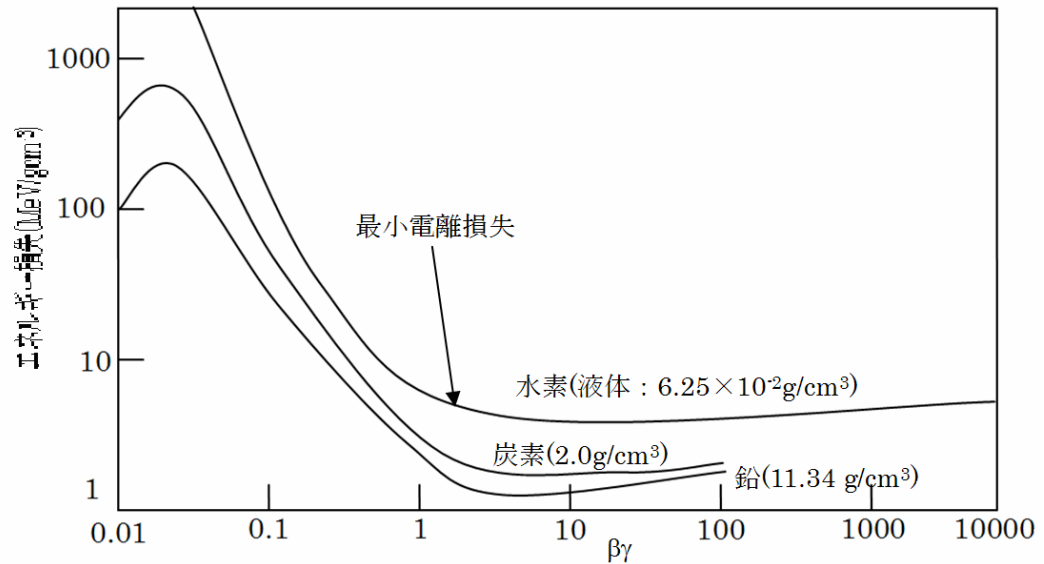
{

- dE : 距離 dx を進む間に失うエネルギー
- n : 物質中の原子の密度 (cm<sup>3</sup>)
- Ze : 物質原子の電荷
- m<sub>e</sub> : 電子の質量
- c : 光速度
- β : 入射粒子の速度 / c
- z : 入射粒子の電荷
- e : 電子の電荷
- I : 物質原子の平均電離ポテンシャル

I は物質ごとに測定値から求められる量であり、Z > 1 の場合、I = 16Z<sup>0.9</sup> eV となる。

このベーテ・ブロッホの式の特徴は、エネルギー損失の大きさが質量にはよらず、電荷の 2 乗に比例し、その速度 β について β<sup>-2</sup> の形を持つことである。また、物質中の密度 nZ = ρZ / A に比例する。したがって、-dE / d(ρx) = -(1 / ρ)(dE / dx) という量を考えて、Z / A および -ln I という量が物質による違いが少ないことを考えると、標的物質の個性によらない量となる。さらに、粒子の速度 β が大きくなって β ≈ 0.96 程度になるとエネルギー損失はほぼ一定の値をとる。このような粒子を minimum ionizing particle と呼ぶ。電荷 1 の粒子(陽子、π中間子、ミューオンなど)では

$$-\frac{dE}{d(\rho x)_{\min}} \approx 2 \text{MeV} / \text{gcm}^{-2} \quad \text{となる。}$$



参考文献[1]p68

### 2.1.3 制動放射

電子や陽電子のような質量の小さい荷電粒子の場合、制動放射によるエネルギー損失が大きな役割をもつ。制動放射は、入射粒子が原子半径より短い距離で核の近くを通るとき、原子核の電場によりその軌道が曲げられ運動エネルギーを失う。その失ったエネルギーが電磁波として放出される現象である。

制動放射の断面積は、 $\delta = Z^2 \alpha^3 / m_e^2 c^4$  である。このため、質量の大きな粒子ではほとんど無視できる。この断面積を使って単位長さ当りのエネルギー損失を求めると、 $-dT/dx = T$  であることが導かれる。したがって  $T = T_0 e^{-Ax}$  というように、電子のエネルギーは物質の厚さに対して指数関数的に減少する。エネルギーが  $1/e$  に減衰する長さ ( $1/A$ ) を放射長と呼ぶ。

### 2.1.4 光電効果

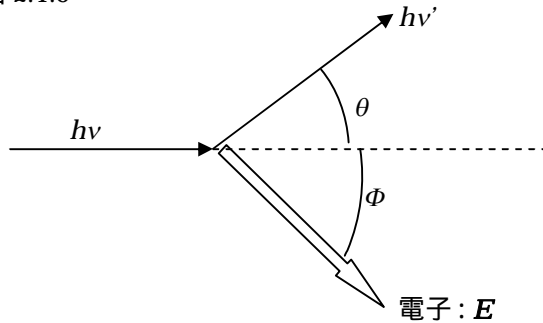
光電効果はエネルギー  $h\nu$  の光子が原子に吸収されて電子を放出する現象で、その電子の原子中での束縛エネルギー  $B.E.$  のぶんだけ小さくなったエネルギー  $E = h\nu - B.E.$  の電子が放出される。自由な電子は、運動量保存則のために光子を吸収することはできないが、原子に束縛された電子の場合には残りの電子が反跳運動量を担ってくれるので可能となる。



### 2.1.5 コンプトン散乱

コンプトン散乱は、光子と自由な電子との散乱である。(図 2.1.5)

図 2.1.5



この過程は運動量とエネルギーの保存より

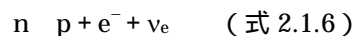
$$\left\{ \begin{array}{l} h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \gamma(1 - \cos\theta)} \\ E = h\nu - h\nu' = h\nu \frac{\gamma(1 - \cos\theta)}{1 + \gamma(1 - \cos\theta)} \\ \cot\Phi = (1 + \gamma) \tan\frac{\theta}{2} \\ \gamma = \frac{h\nu}{m_e c^2} \end{array} \right. \quad \text{と表される。}$$

### 2.1.5 対生成

対生成は、光子が電子と陽電子の対に転換される反応である。この反応はエネルギーと運動量の保存則により真空中では禁止されるが、原子核のクーロン場のおかげでこれが起こりうる。光子のエネルギーが電子と陽電子の質量の和  $2m_e c^2$  を超えると対生成が可能となる。

### 2.1.6 β線

β線は高速度の負電荷を持つ電子である。β線を出す反応をβ崩壊という。この現象は中性子が陽子と電子とニュートリノに崩壊する現象である。(式2.1.6)



β崩壊は3体での崩壊反応なのでエネルギースペクトルは連続スペクトルとなる。

### 2.2 宇宙線について

宇宙線は隕石と同様に宇宙の物質が地球に飛来したものである。地球の外からの宇宙線

を一次宇宙線と呼び、約 90%が陽子である。そして一次宇宙線が地球に入ってくるときに上層の大気や空気中の窒素や酸素の原子核に衝突して発生するものを二次宇宙線という。発生した二次宇宙線は $\pi$ 中間子、中性子、陽子など多数あり、中でも $\pi$ 中間子は大気中の原子と反応しやすいため、すぐに崩壊してミュオンを生じる。ミュオンは二次宇宙線の中の荷電粒子の約3/4を占め、物質との相互作用が弱いため、そのほとんどが地下深くまで貫通する。

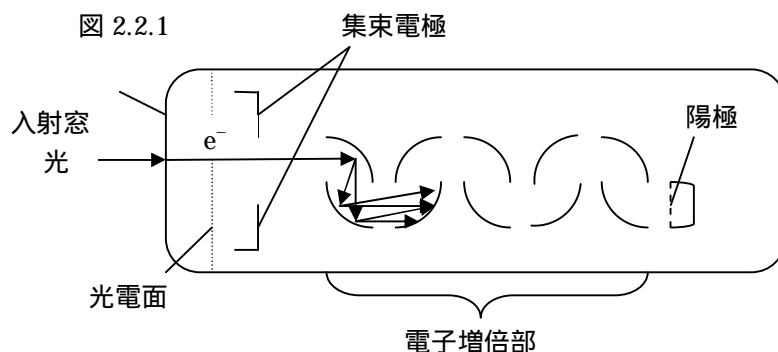
## 2.2 光センサ

ここではシンチレータから出てくる光を検出する素子を説明する。

### 2.2.1 光電子増倍管(Photomultiplier Tube , PMT)

PMT は光センサの中でも極めて高感度、高速応答な光検出器であり、光を電子に変換する陰極(光電面)、集束電極、電子増倍部、電子を集める陽極を真空の容器に収めたものである。(図 2.2.1)

光が光電面に入射すると光電効果により光電面から真空中に光電子が放出される。その電子は集束電極によって向かいの電子増倍部に導かれる。電子増倍部に導かれた電子は電子増倍部をたたき多数の電子を放出する。さらに電子増倍部でたたき出された電子は次の増倍部をたたき電子をたたき出す。このようにして電子増倍部で増倍された電子は陽極に入り出力信号として陽極に収束される。



### 2.2.2 n型半導体・p型半導体

n 型半導体は、高純度の半導体(主にシリコン(Si))にリン(P)などを不純物としてごく微量加えることによって作られる。

Si は価電子を 4 個持っていて Si の結晶では、隣り合った Si 原子が互いの電子を共有しあって、それぞれの原子が 8 個の電子を持っているような状態で結合している。

この状態の電子は、強く原子に束縛され、ほとんど電気伝導に寄与することができなくなる。したがって、純粋な Si の結晶には電流が流れにくく、抵抗率は約  $10^3 \text{ cm}$  という値である。

これに微量の P を加えた状態を考える。P は 5 個の荷電子をもっている。この P が Si の一部と置き換わると P の価電子のうち 4 個は隣り合う Si の価電子と共有結合をする。しかし、残り一個の価電子は共有結合することなく取り残される。よって残された価電子は束縛が弱く自由に動くことのできる伝導電子となる。電圧が加わるとこの電子は正の電極に向かって動き出す。

p 型半導体は、高純度の半導体(主にシリコン(Si))に砒素(B)などを不純物としてごく微量加えることによって作られる。

B は 3 個の荷電子を持っているので共有結合する価電子が 1 個不足する。このため B は Si の荷電子を 1 個切り離して結合を完成させようとする。よって電子が切り離された場所は正に帯電してホールが生じる。

n 型半導体の電子、p 型半導体のホールはそれぞれで電気伝導の主体となる。このような電気伝導の主体となるものをキャリアという。

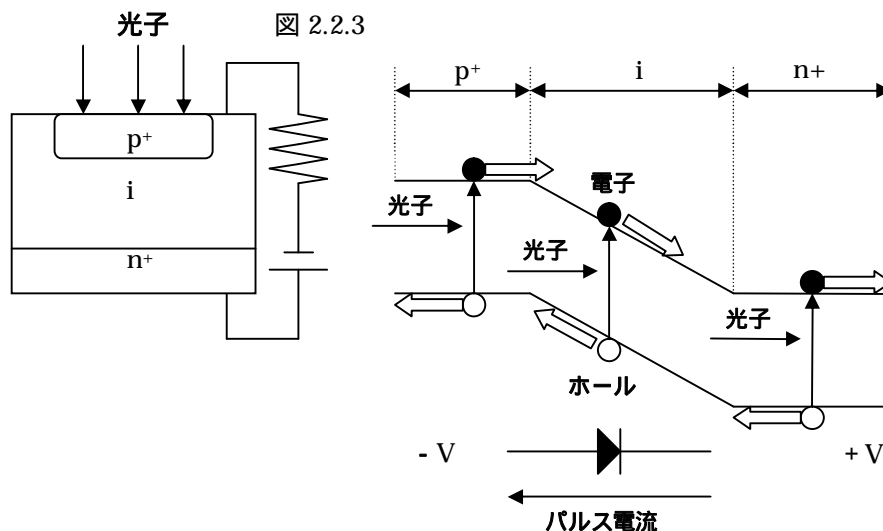
### 2.2.3 フォトダイオード

フォトダイオードはダイオードの一種であり逆方向バイアスで使用される。ダイオードに禁止帯幅よりも大きいエネルギーが入射されると価電子帯の電子が励起されホールと電子に分離する。逆方向バイアスをかけない場合、電子とホールは再結合するが逆方向バイアス電圧をかけているために電子は高電圧の p 型領域へ進む。そのために電流が流れる。

一般によく使われるフォトダイオードは pin ダイオードとであり、pn 接合の接合部に高抵抗率の真性半導体層(i 層)を挟んだものである。(図 2.2.3)

i 層の抵抗率は両側の p 層や n 層と比較して数桁以上高く、印加されたバイアス電圧による電場も大きい。そこで、i 層の中で発生したキャリア、あるいは i 層の中で発生したキャ

リア、あるいはi層の外で発生し拡散によってi層の中へ侵入したキャリアは加速され大部分は再結合によって消滅する前にi層を通過し終わり外部回路に効果的に電流を生ずる。i層の存在とそこにおけるキャリアの加速のために単純なpn接合の場合より感度が高く応答が速い。



#### 2.2.4 アバランシェ・フォトダイオード(Avalanche photo diode , APD)

フォトダイオードはPMTと違い、コンパクトで磁場中でも使えるが逆電圧をかけるために暗電流が存在し、自己増幅機能を持たないので微弱な信号を読み出すには適さない。そこで、自己増幅機能を持つフォトダイオードであるアバランシェ・フォトダイオードについて説明する。

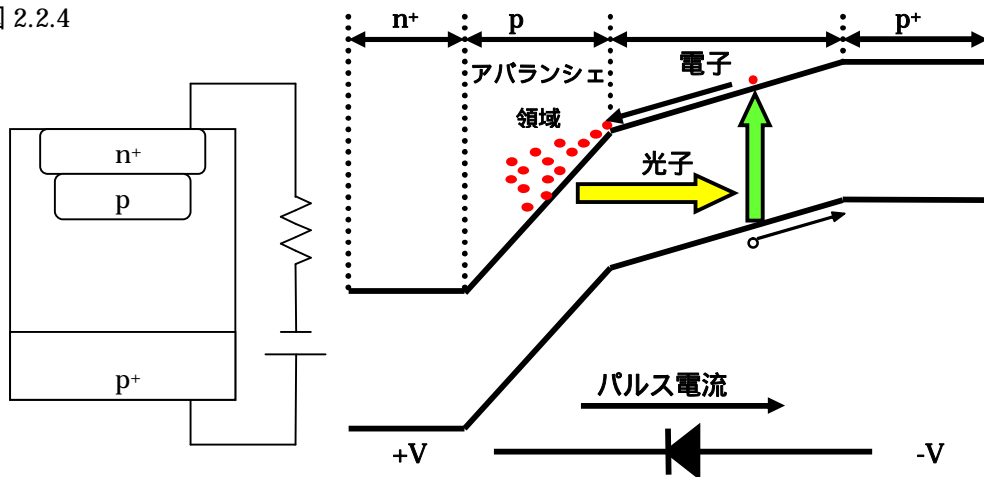
APDは光の入射面側から $n^+pnp^+$ という構造となっている。(図2.2.4)薄い $n^+p$ 領域は高電圧となっている。この領域(アバランシェ領域)は高エネルギーの電子が次々に衝突し、なだれ的にキャリアの増大を起こす。比較的厚い領域(ドリフト領域)は大きい逆方向バイアス電圧のために完全に空乏化した高電界領域である。この領域では生成された電子が加速される。

APDに光子が入射されると $n^+p$ 結合領域は非常に薄いので光子の吸収は少なく、比較的厚い領域で光子は吸収されホールと電子の対を生成する。領域で生成された電子は電界により加速され $n^+p$ 結合領域に入る。 $n^+p$ 領域は高電圧なのでこの領域に入った電子は衝突電離を繰り返しホールと電子の対を生成する。そして、生成された電子も加速され衝突電離を起こす。このようになだれ的にキャリアを増幅し、電気信号として外部に取り出す。このようにして増幅され増幅率は10~100倍である。

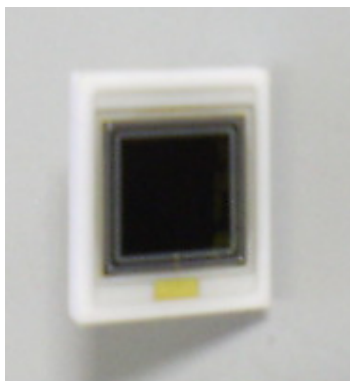
しかし、APDは逆方向バイアス電圧をかけるために暗電流が存在し、その暗電流が電気

信号を読み取る際のノイズとなる。APD を使用するには常にノイズを少なくすることが条件である。

図 2.2.4



本実験では浜松ホトニクス製 APD S8664-55 を使用した。その写真と仕様を下にあげる。



使用 APD  
浜松ホトニクス社製  
S8664-55

有効受光面サイズ(mm)	5 × 5	
有効受光面積 (mm <sup>2</sup> )	25	
動作温度( )	-20~ +60	
感度波長範囲 (nm)	320~1000	
最大感度波長(nm)	600	
量子効率 =420nm (%)	70	
降伏電圧	Typ.(V)	400
	Max.(V)	500

参考文献[2]

### 3 検出器の動作条件最適化と性能評価

#### 3.1 使用機器

##### 3.1.1 パルスジェネレータ

パルスジェネレータは様々なパルスを出すことのできる装置であり、そのパルスは次の値によって決められている。パルスジェネレータの波形の例を図 3.1 に示す。

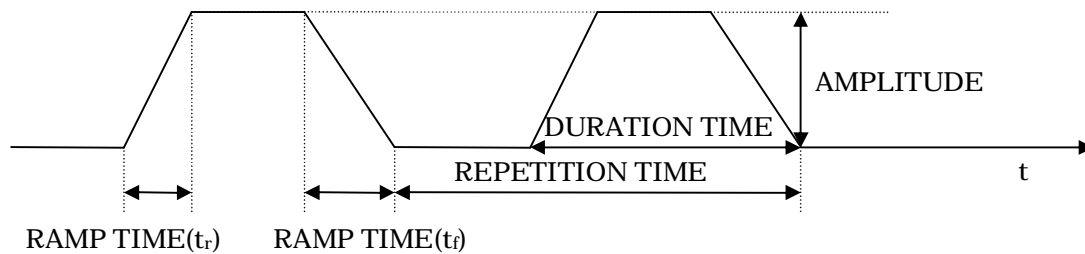
REPETITION TIME : パルスを出す間隔

DURATION TIME : パルスの幅

RAMP TIME ( $t_r$ ,  $t_f$ ) : (パルスの立ち上がり時間, パルスの立ち下がり時間)

AMPLITUDE : パルスにかける電圧

図 3.1

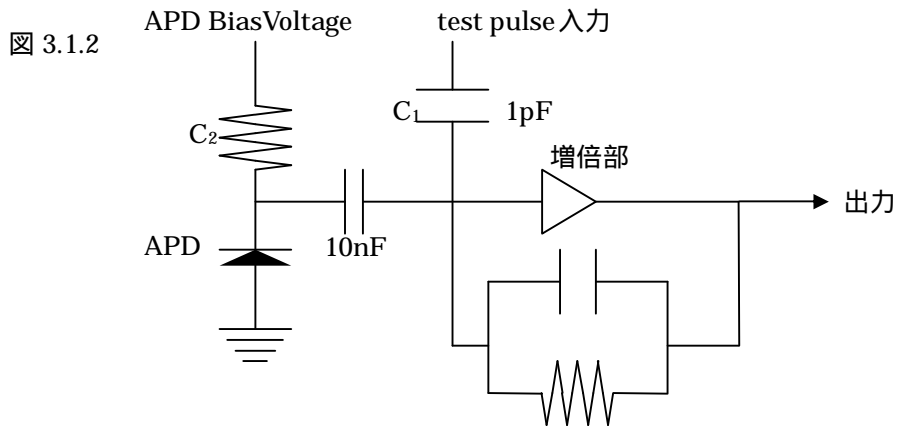


##### 3.1.2 プリアンプ

プリアンプは APD からのシグナルを増幅させるものである。

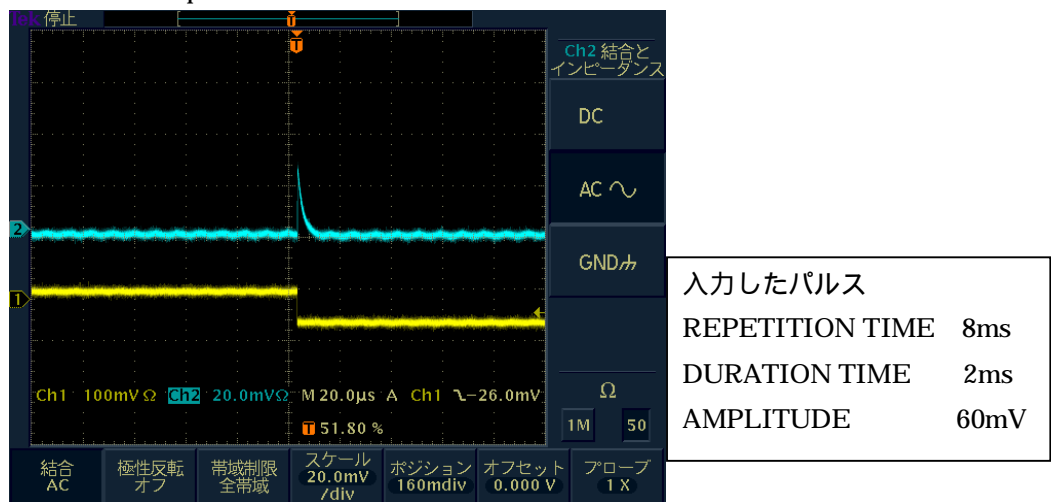
test pulse 入力から入ったシグナルは  $C_1$  に入る。(図 3.1.2)

$C_1$  から出てきたシグナルが増幅部に入り増幅される。



プリアンプの test pulse 入力に信号を入れると APD からからの信号と増倍部は変わらないので同じように増倍されて出力される。

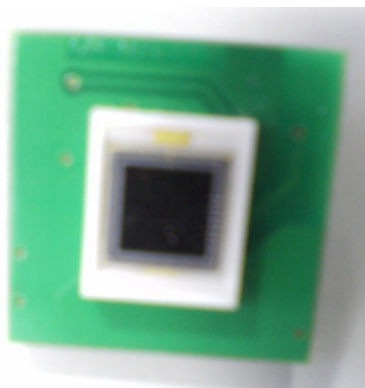
test pulse 入力から信号を入力したときの波形



## 3.2 ノイズ落とし

### 3.2.1 実験

APD をプリアンプにつなぎ、APD に 400V の電圧、プリアンプに -6V , +12V の電圧をかける。



プリアンプ付き APD

APD に LED で光を入射し、その信号を図 3.2.1 の示す。

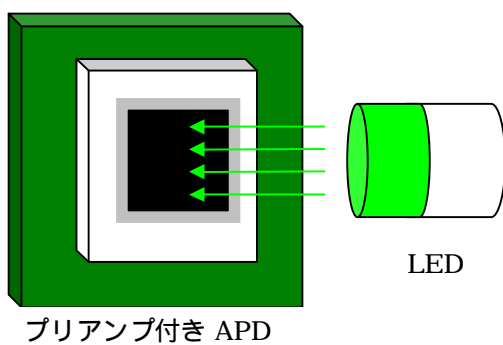
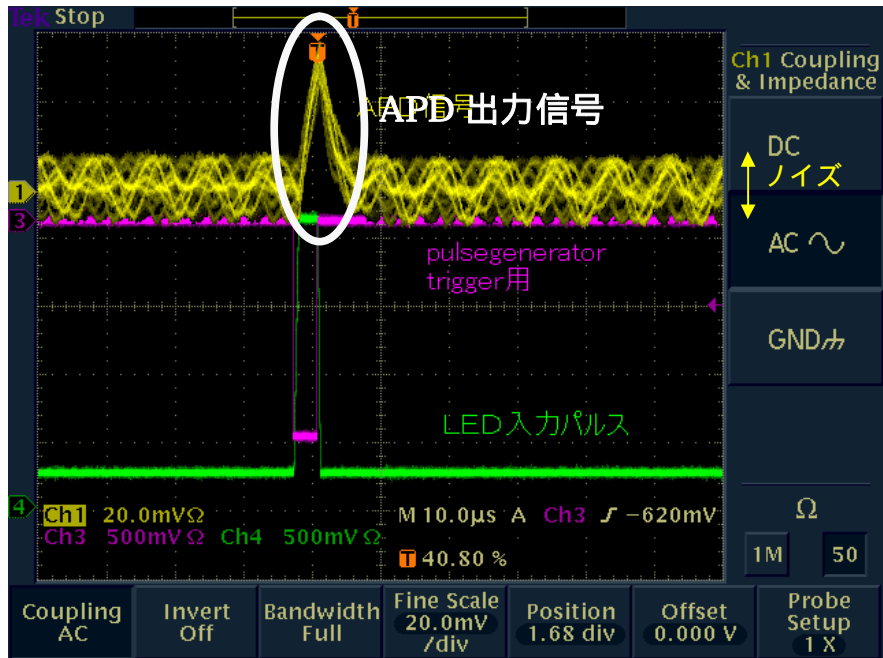


図 3.2.1





### ノイズ落とし

ただ APD を取り付けた状態では図 3.2.1 のようにノイズがひどいため微小な電気信号はノイズに埋もれて観測できない。

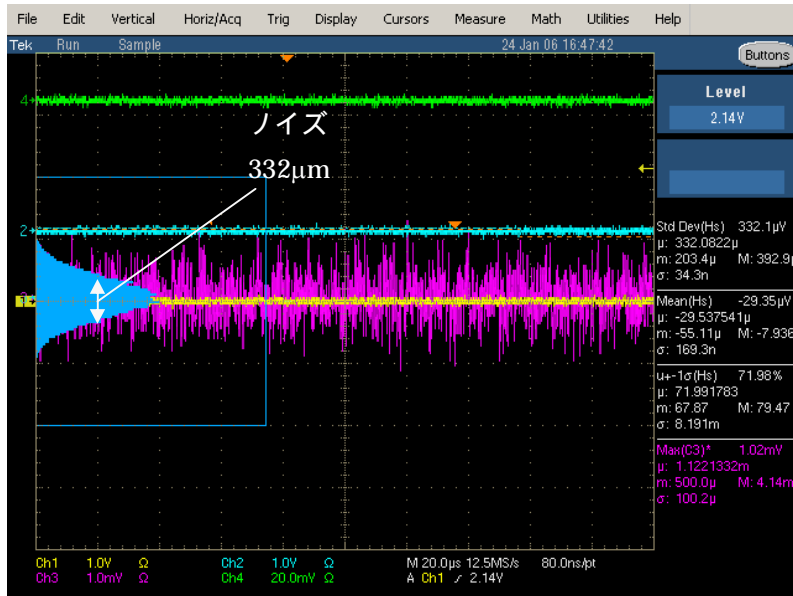
### ノイズを除去する方法

- 装置すべての GND をそろえる。
- 配線をなるべく絡ませないようにすること
- 装置自体を暗幕で覆う。
- プリアンプからの電源にコンデンサーをつなぎ電源からの供給を安定させる。

### 3.2.2 結果

このようにしてノイズを抑えた信号を図 3.2.2 に示す。この図には信号は入っていない。このシグナルの上下の揺れがノイズである。ノイズ落としの結果ノイズを 10mA から 1mA 未満まで小さくすることに成功した。

図 3.2.2



### 3.3 LEDからの入射光量とAPDの出力信号

#### 3.3.1 実験

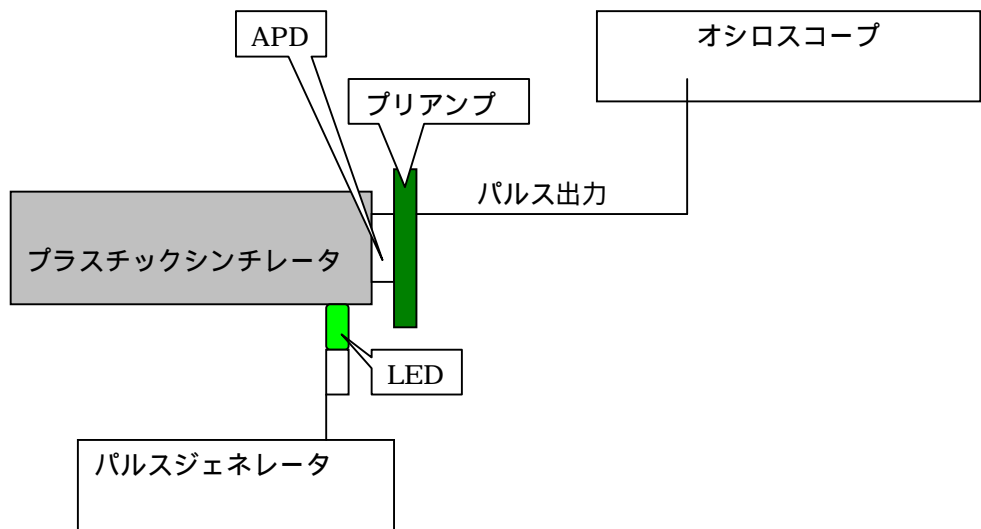
本実験に必要なAPDの機能は

1. S/Nがよい。
2. 適当な光量

光量は1度のパルス入力でのLEDの光量なので光の強さ、光る時間に依存する。

特に本実験では減衰時間が数nsのプラスチックシンチレータを使うのでnsオーダーの光の長さを検出できることが必要である。

パルスジェネレータからLEDに入力するパルスのDURATION TIME, かける電圧(LED DRIVE VOLTAGE)を変化させてAPDからの出力信号との関係を調べる。

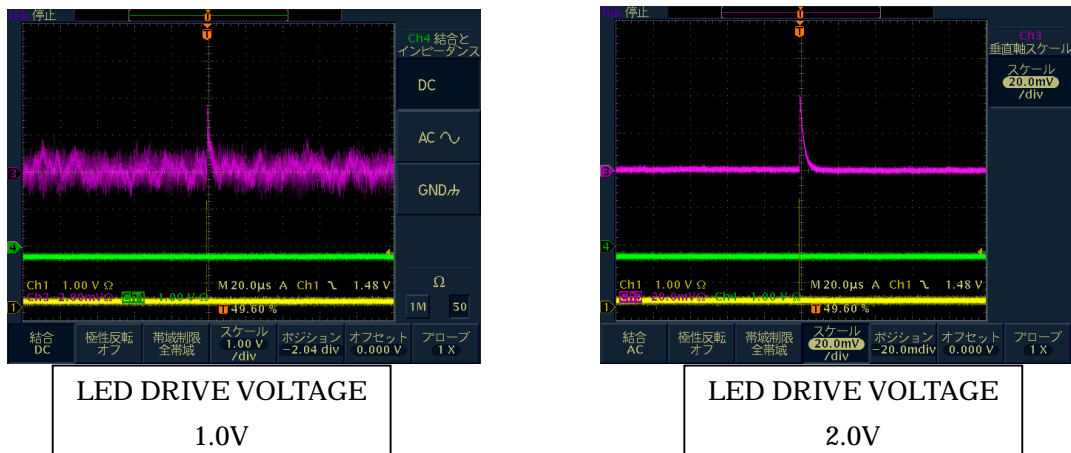


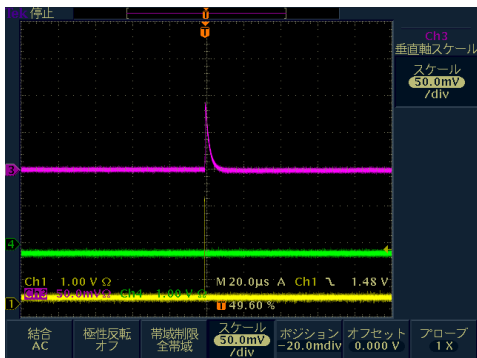
### 3.3.2 結果

パルスジェネレータから LED に入るパルスの DURATION TIME 100ns で固定し、amplitude を変化させたときの APD からの信号を図 3.3.2.1 に示す。APD からのシグナルの高さが LED DRIVE VOLTAGE を上げるにつれ大きくなっていくのがわかる。

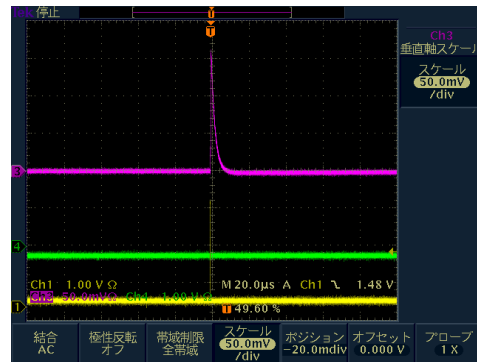
図 3.3.2.1 DURATION TIME 100ns の APD の信号

( APD 信号, trigger 用シグナル, LED シグナル)

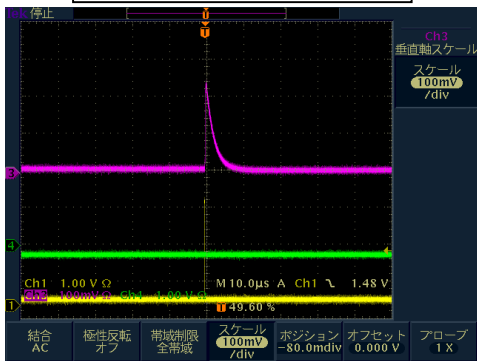




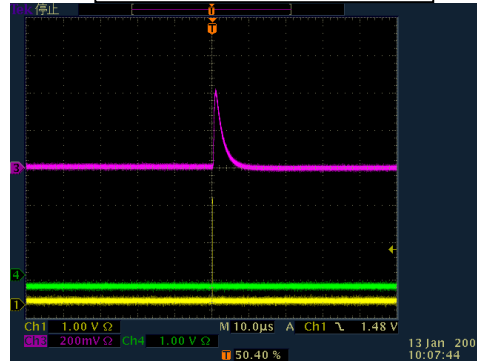
LED DRIVE VOLTAGE  
3.0V



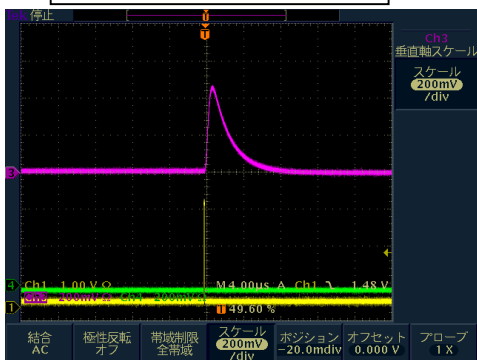
LED DRIVE VOLTAGE  
4.0V



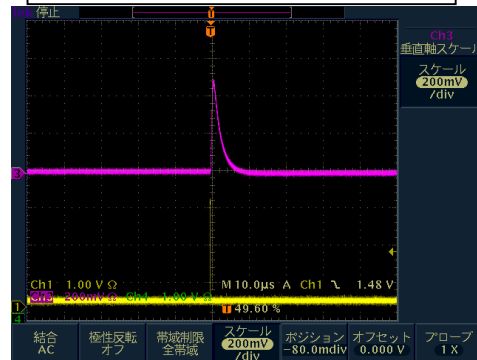
LED DRIVE VOLTAGE  
5.0V  
(インピーダンス 50Ω)



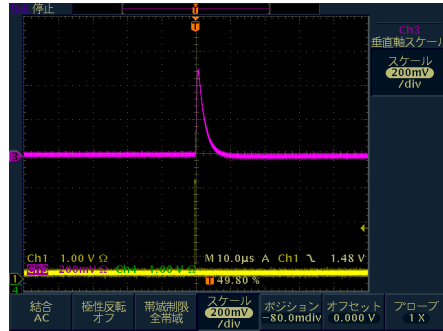
LED DRIVE VOLTAGE  
5.0V  
(200mA カレントシンク)



LED DRIVE VOLTAGE  
6.0V



LED DRIVE VOLTAGE  
7.0V



LED DRIVE VOLTAGE  
8.0V

別の DURATION TIME で測定した APD からの信号は付録に載せた。  
LED DRIVE VOLTAGE と APD の信号の関係を図 3.3.2.2(a)に、DURATION TIME と APD の信号の関係を図 3.3.2.2(b)に示す。

図 3.3.2.2(a)  
LED DRIVE VOLTAGE と APD の信号

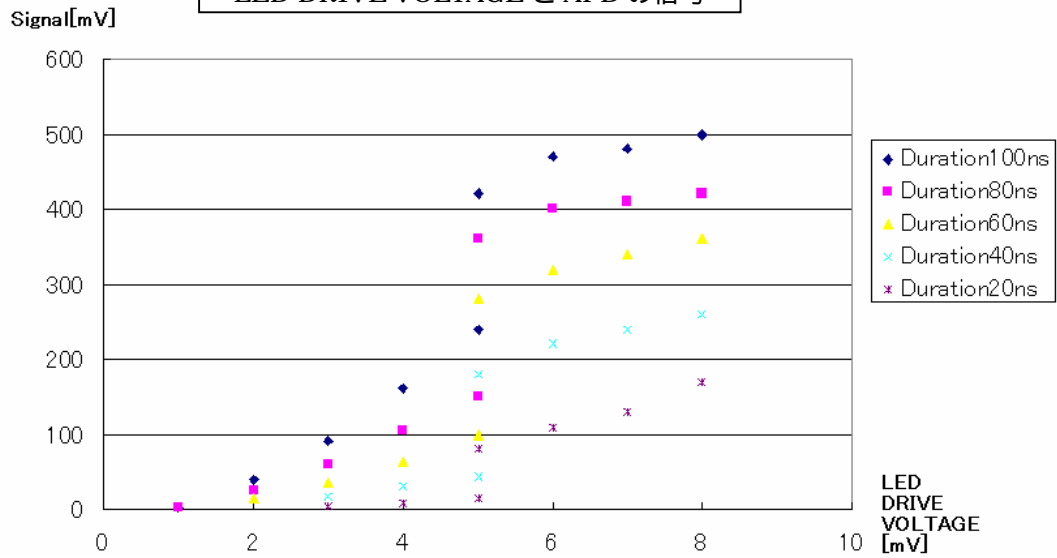
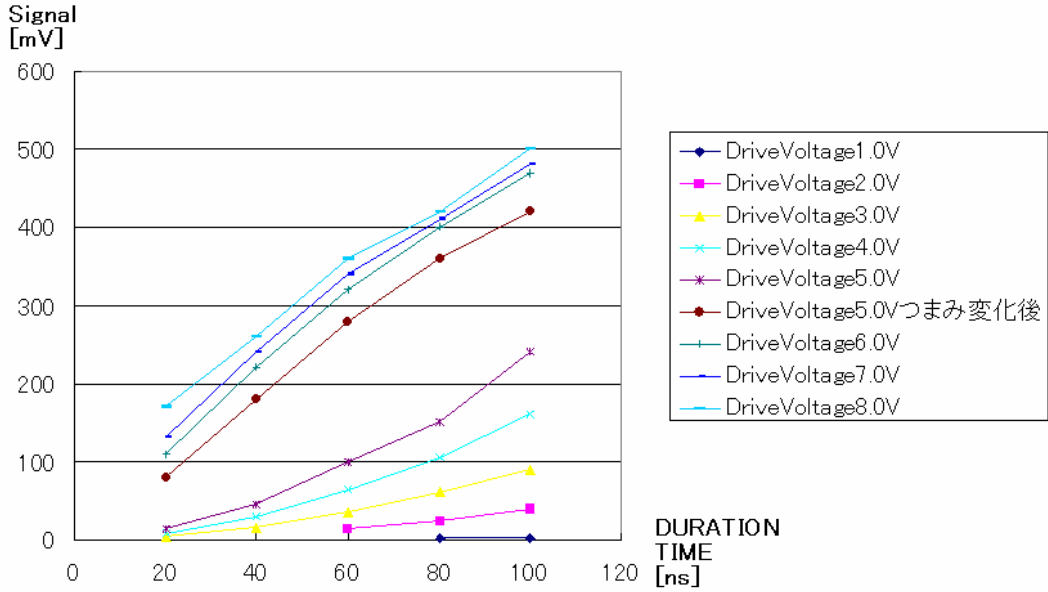


図 3.3.2.2(b)  
DURATION TIME と APD の信号



### 3.3.3 LED の回路変更

図 3.3.2.2(a)において LED DRIVE VOLTAGE が 5V で APD からの出力信号の値が大きく変わっている。それは、この実験で使用しているパルスジェネレータは約 5V 以下まではインピーダンス 50Ωで約5V 以上では 200mA のカレントシンクである。このため、LED DRIVE VOLTAGE 5V で値が大きく変わったと考えられる。よって、回路全体のインピーダンスを機器のインピーダンスの 50Ωに合わせると、このずれがなくなると考えた。

そこで、LED の回路をもう一度考え直す。

この以前の回路を図 3.3.3.1 に、新しく考案した回路を図 3.3.3.2 に示す。

図3.3.3.1

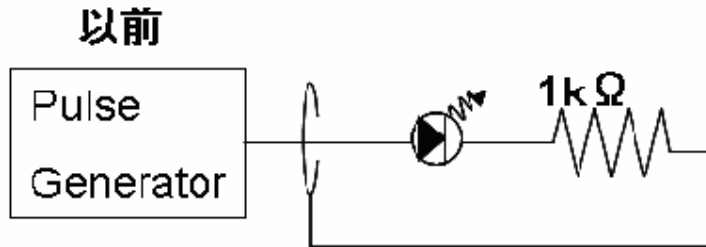


図3.3.3.2

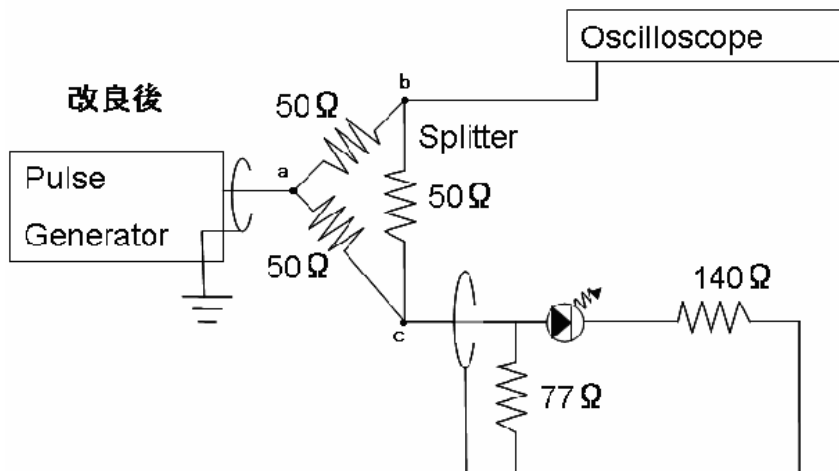


図 3.3.3.2 の回路は図中の a , b , c のどの点においても合成抵抗が 50Ωとなるように設定した。

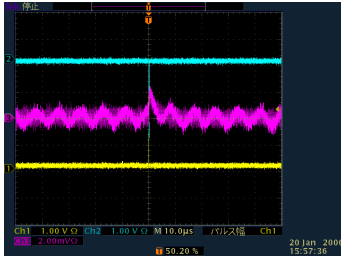
この LED 回路を用いて DURATION TIME を固定し、LED DRIVE VOLTAGE を変化させる実験を行った。

### 3.3.4 結果(2)

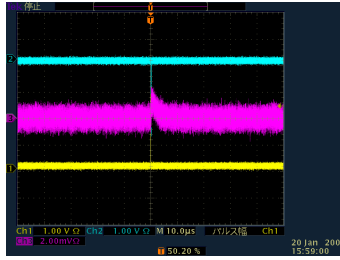
DURATION TIME を 40ns にし、LED DRIVE VOLTAGE を変化させたときの APD からの信号を図 3.3.4.1 に載せる。この結果、同じ LED DRIVE VOLTAGE 2.5V のパルスで同じ高さの信号が出る事が確認でき、前回と同じく LED DRIVE VOLTAGE を上げるにつれ大きくなっていく事も確認できた。

図 3.3.3.2 の回路ではパルスジェネレータからの信号をスプリッターで二分しているのでインピーダンス 50Ωと200mA カレントシンクの境目の 5V は 2.5V になっている。

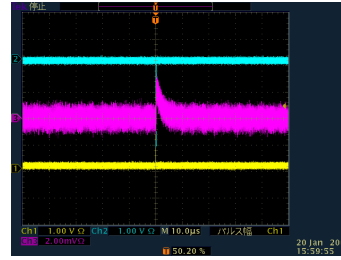
図 3.3.4.1 DURATION TIME 40ns



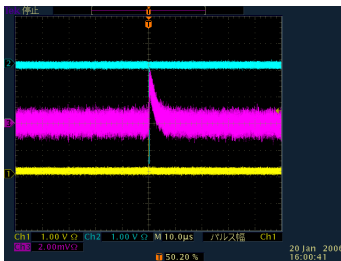
LED DRIVE VOLTAGE  
2.5V  
(インピーダンス 50 Ω)



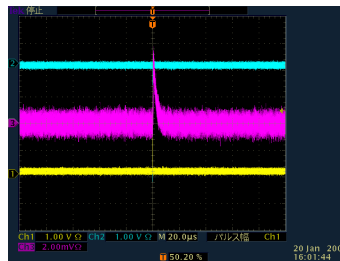
LED DRIVE VOLTAGE  
2.5V  
(200mA カレントシンク)



LED DRIVE VOLTAGE  
3.0V  
(200mA カレントシンク)



LED DRIVE VOLTAGE  
3.5V  
(200mA カレントシンク)



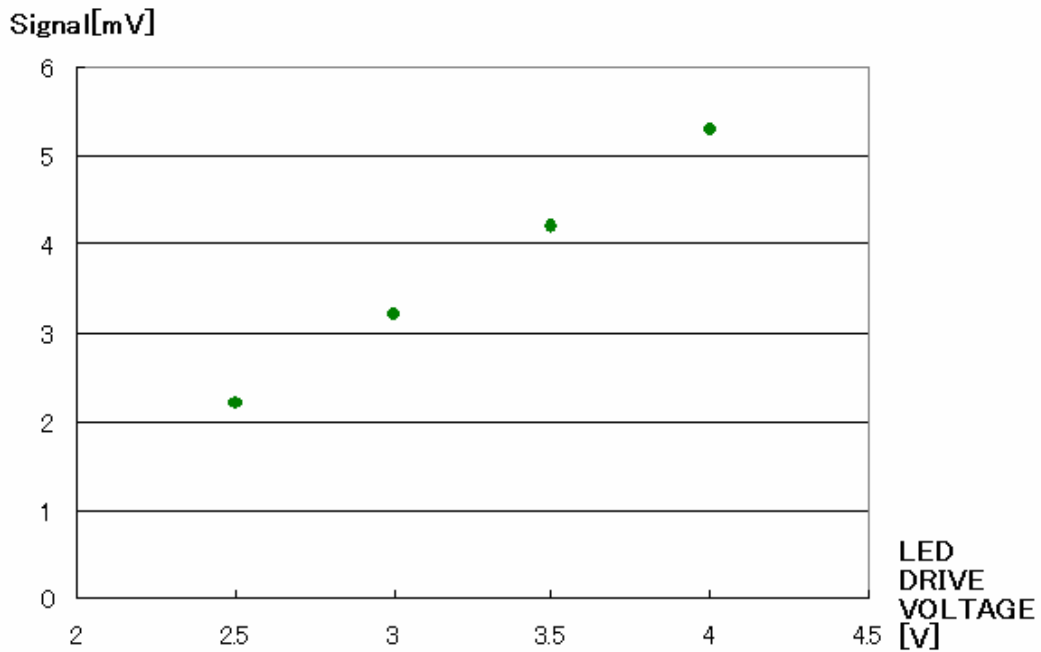
LED DRIVE VOLTAGE  
4.0V  
(200mA カレントシンク)

( APD 信号, trigger 用シグナル、 LED DRIVE VOLTAGE)

LED DRIVE VOLTAGE と APD からの信号の関係を図 3.3.4.2 に示す。



図3.3.4.2 LED DRIVE VOLTAGE と APDからの信号



### 3.4 APDのシグナル・ノイズ比の調査

#### 3.4.1 実験

微弱な信号を検出するには高い増倍率を必要とする。しかし、APDはBIAS VOLTAGEを上げると増倍率が上がるものの、同時にノイズも大きくなる。検出信号が高く、かつノイズの低いBIAS VOLTAGEを探するために、LEDに入力するパルスを固定してAPDにかける電圧(APD BIAS VOLTAGE)を変えていき、出力信号、ノイズがどのように変わるか調べる。さらに、シグナルとノイズの比(S/N)をとり、その値がもっともよい電圧を調べた。

#### 3.4.2 結果

図3.4.2.1(a), (b)にそのときのAPDの信号を示す。図3.4.2.2にAPD BIAS VOLTAGEとAPDからの信号(Signal), ノイズの関係を示す。

( APD 信号, trigger 用シグナル, LED DRIVE VOLTAGE)

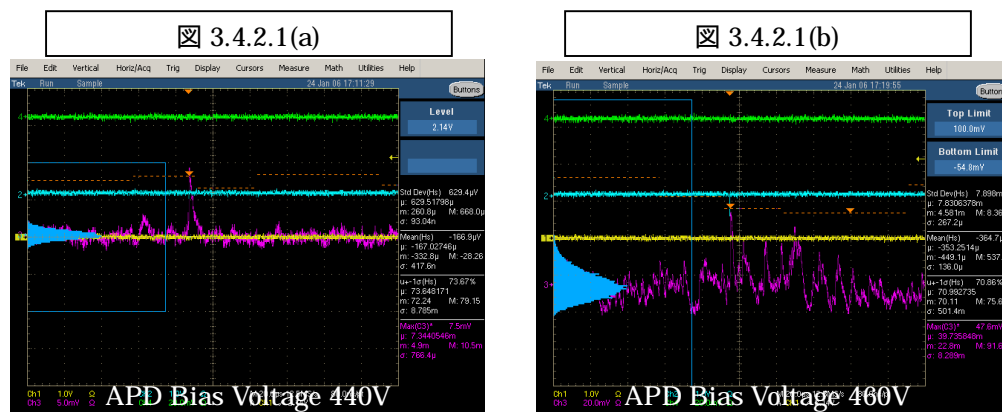


図 3.4.2.2  
APD BIAS VOLTAGE - Signal , Noise

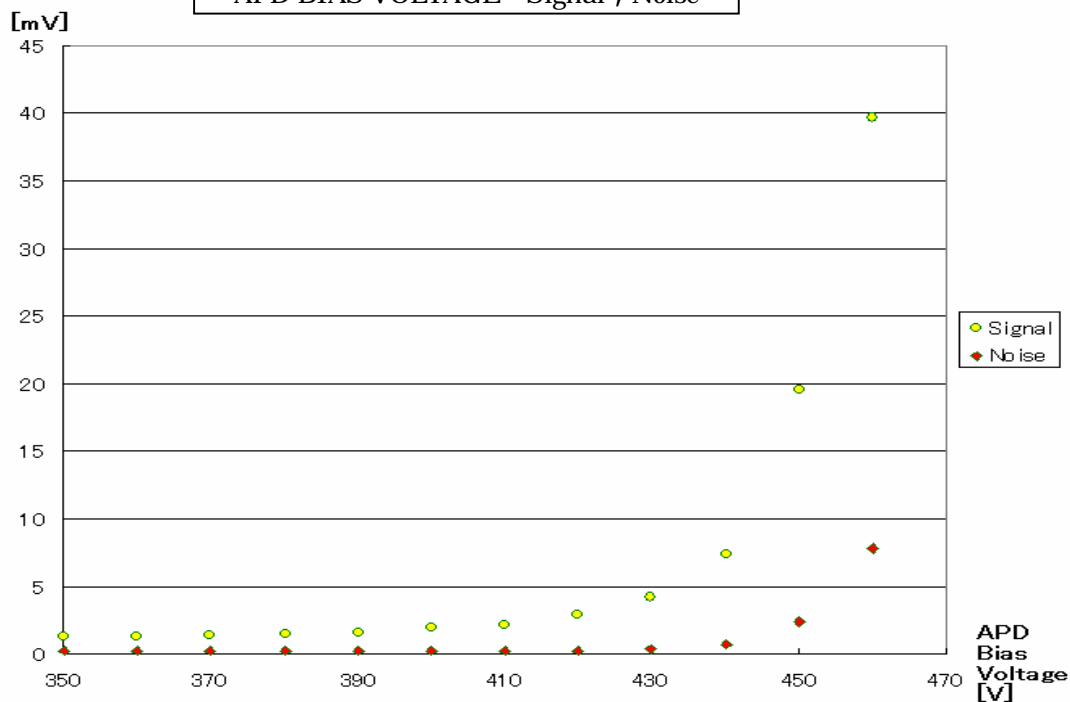
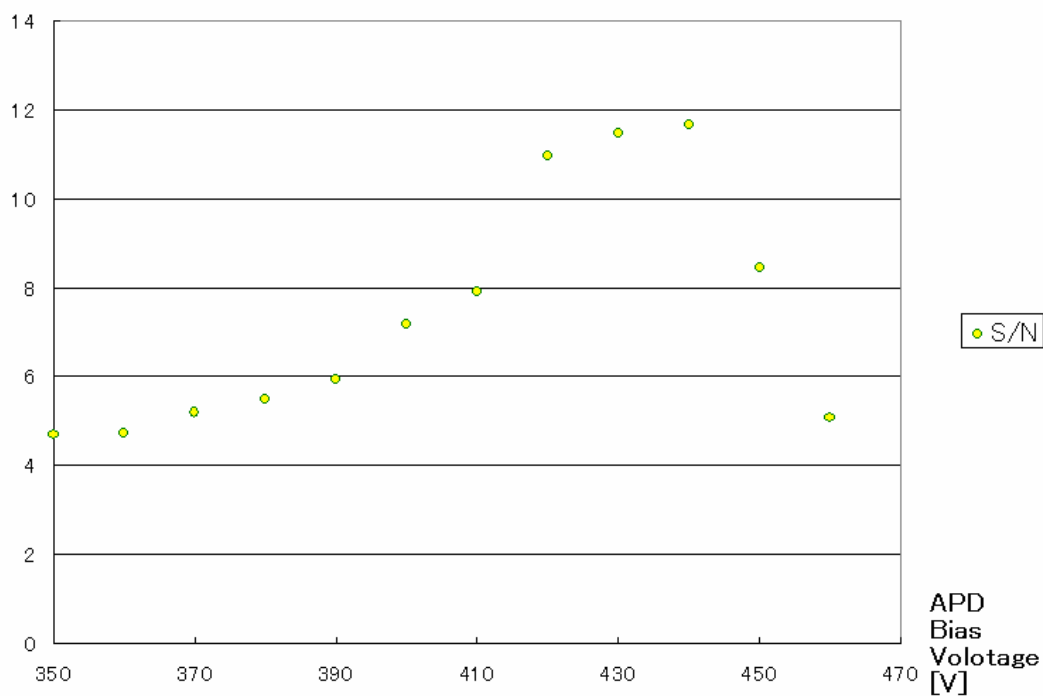


図 3.4.2.1(b)のときは APD BIAS VOLTAGE が大きくなりすぎてノイズが大きくなっている。このように APD は BIAS VOLTAGE を大きくすると信号が大きくなるもののノイズも増える。微小な信号を観測するためには、信号に対しノイズが小さいのが条件となる。そこで、APD からの信号とノイズの比(S/N)を求めた。その結果を図 3.4.2.3 に示す。

図3.4.2.3

S/N



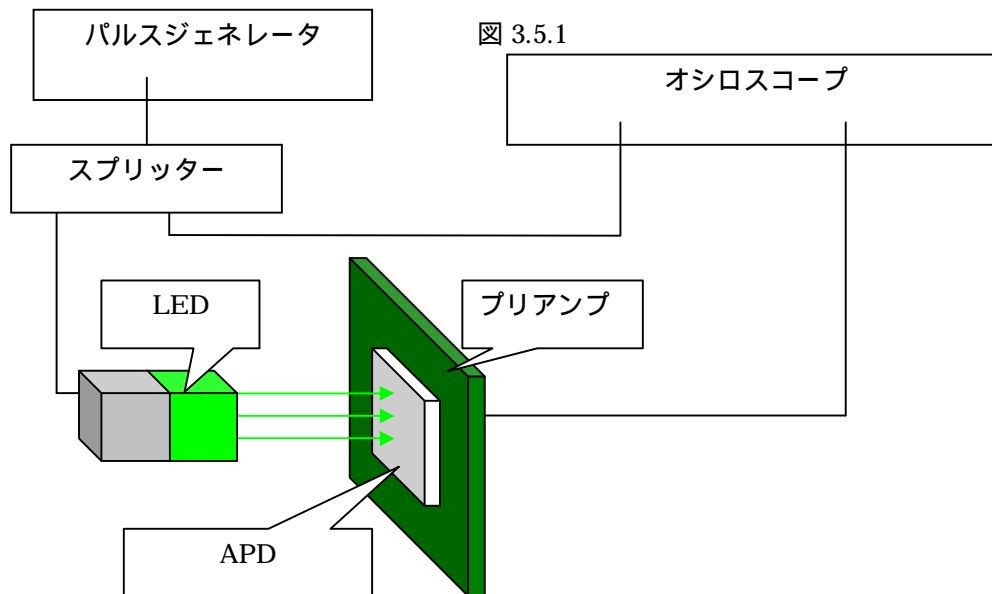
この結果、BIAS VOLTAGE 440V が使用するのに一番よい値であることがわかる。

### 3.5 APDの増倍率

#### 3.5.1 実験

2章でも書いたように、APDは逆電圧を大きくすることによって出力信号を増倍することができる。そこで、APDの増倍率が逆電圧とともにどう変わるかを調べた。さらに、実測値と製造元推奨値を比べ、APDの再現性を評価した。

図3.5.1のようにAPDにLEDで光を入射し、その信号を調べる。



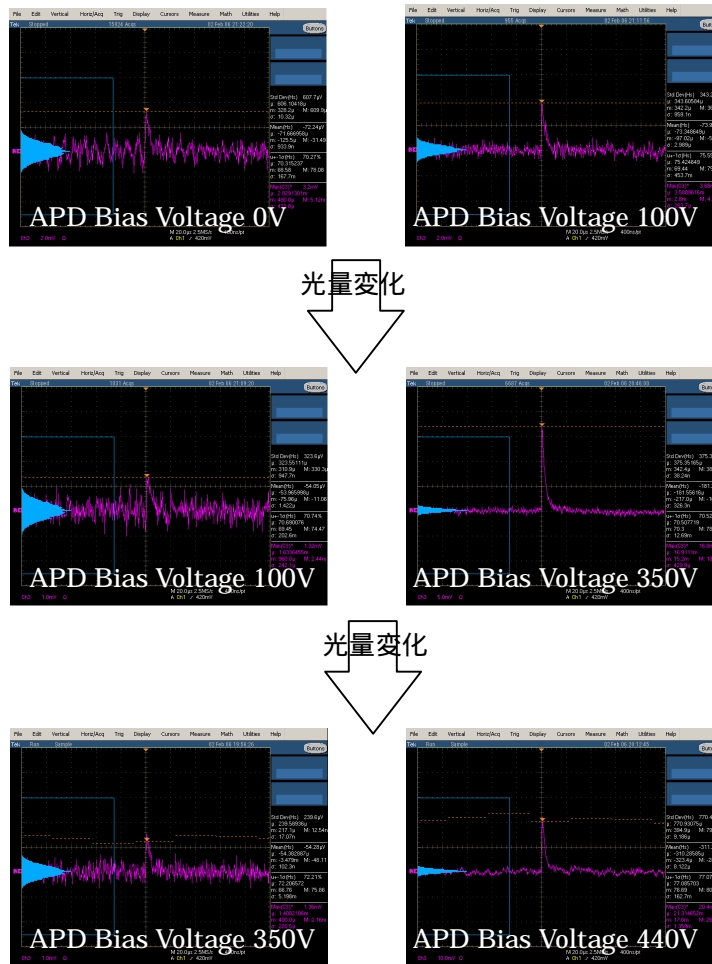
APDの増幅率はAPDにBIAS VOLTAGEをかけていないときを1とする。測定方法はあるBIAS VOLTAGE(本実験では400V)での信号を読み、そこからBIAS VOLTAGEを下げていく。信号が見えなくなるとLEDからの光量を増加し、信号を測定して再びBIAS VOLTAGEを下げていく。この操作を繰り返し最後にBIAS VOLTAGE 0Vのシグナルを計測する。BIAS VOLTAGE 0Vのときと同じ光量で計測したときはAPDからの信号の値が何倍になっているかを計算する。光量が違うときはBIAS VOLTAGE 0Vのときと同じ光量で計測した値と光量が違う値を1つのBIAS VOLTAGEで計測しその増倍率をもとに計算する。本実験ではBIAS VOLTAGE 350V, 100Vで光量を変化させた。

### 3.5.2 結果

このとき検出した信号の一部を図 3.5.2.1 に示す。

図 3.5.2.1

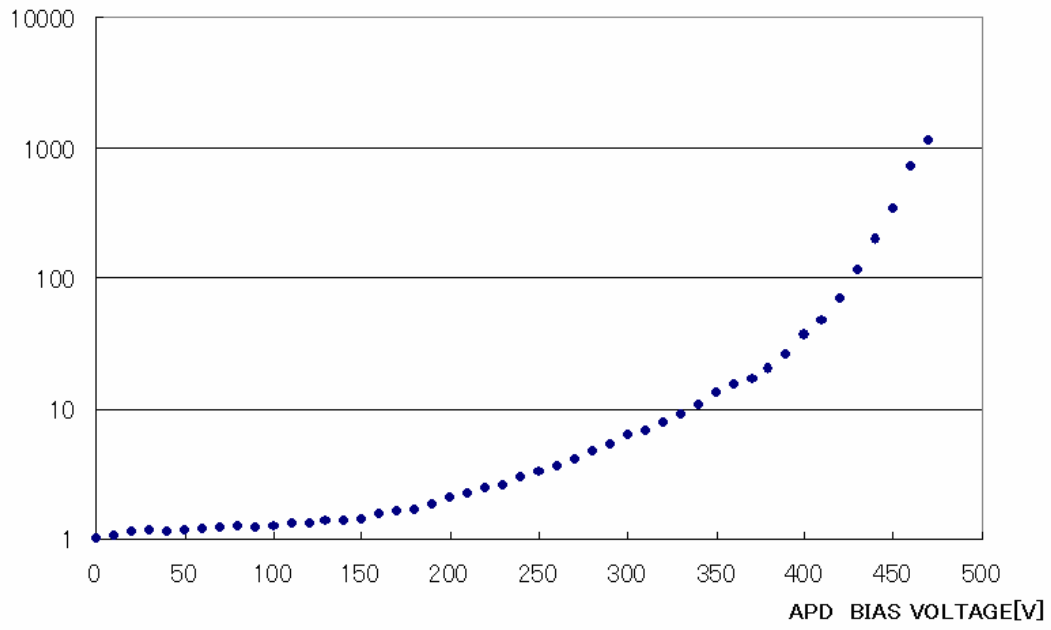
( APD 信号 )



このようにして APD BIAS VOLTAGE と増幅率の関係を求めた。この結果を図 3.5.2.2 に示す。その結果、3.4 で求めた S/N の最もよい BIAS VOLTAGE 440V において約 200 倍の増倍率を得ることができた。

図3.5.2.2

増倍率



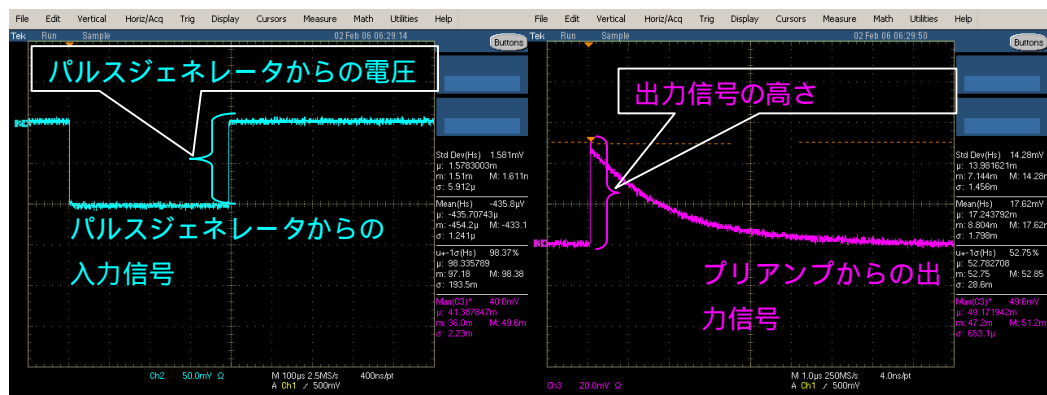
### 3.6 プリアンプの増倍率測定

#### 3.6.1 実験

検出したい粒子を検出することが可能かどうかを知るためにプリアンプの増倍率を求めた。

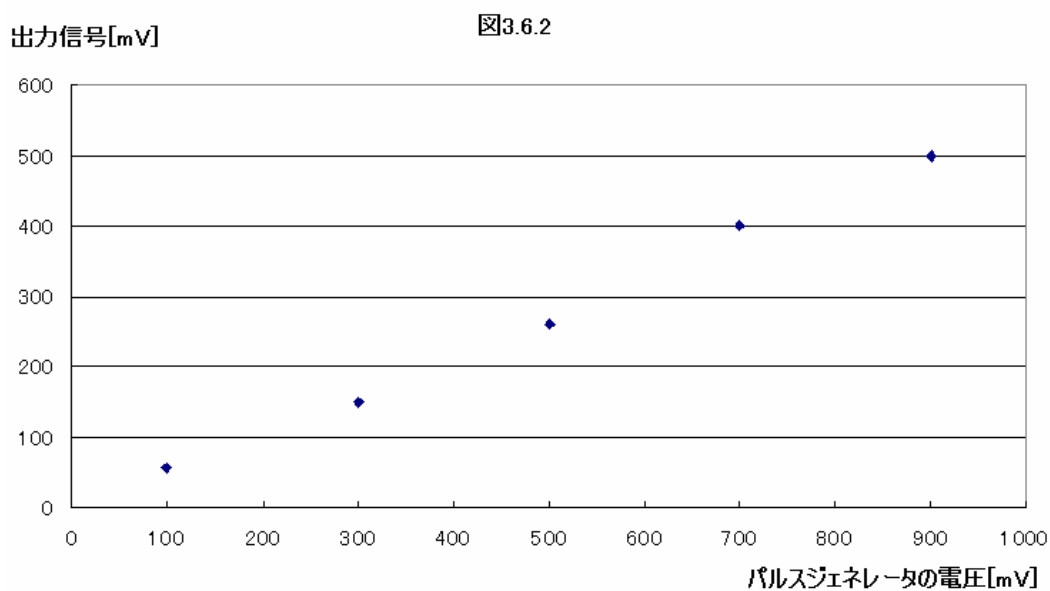
パルスジェネレータでプリアンプに test pulse 入力からパルスを入れる。出てきた出力信号の高さとパルスジェネレータから入れた電圧をグラフにプロットし、これらの関係を求める。(図 3.6.1)

図 3.6.1



#### 3.6.2 結果

パルスジェネレータからの電圧と出力信号の高さの関係を図 3.6.2 に示す。

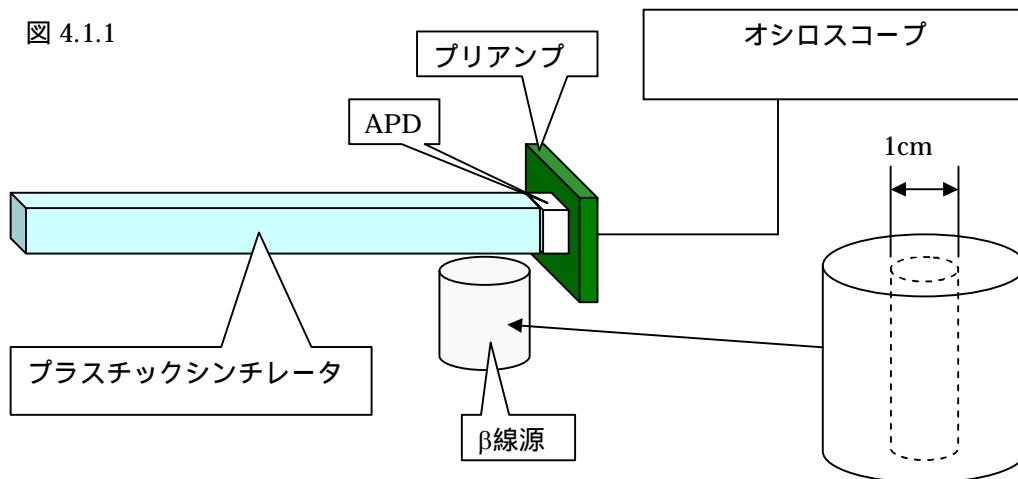


## 4 原型器の製作

### 4.1 $\beta$ 線検出

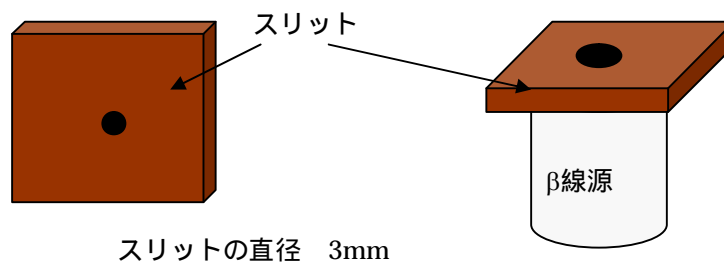
検出器を作るために、まず $\beta$ 線検出を行った。さらに線源にスリットを置き $\beta$ 線の位置を自ら特定できる状況でも行った。

プラスチックシンチレータに $\beta$ 線源(Sr)を置き、そこから出る $\beta$ 線を APD で観測した。(図 4.1.1)



さらに線源の上に鉛でできたスリットを置き、 $\beta$ 線の位置を特定できるようにした。(図 4.1.2)

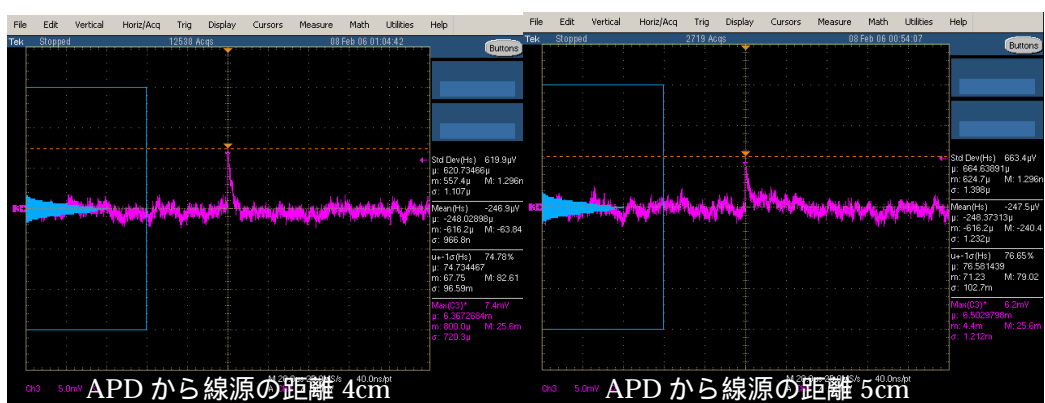
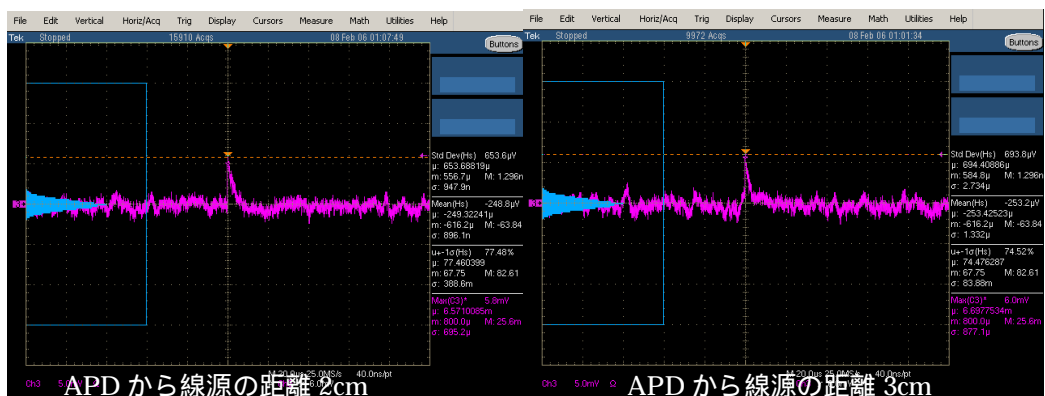
図4.1.2



### 4.2 結果

この実験で得たシグナルを表8.2に示す。





## 5 考察

### 5.1 APD の性能

まず、3.5で使用したAPDの製造元推奨値を図 5.1.1 に示す。

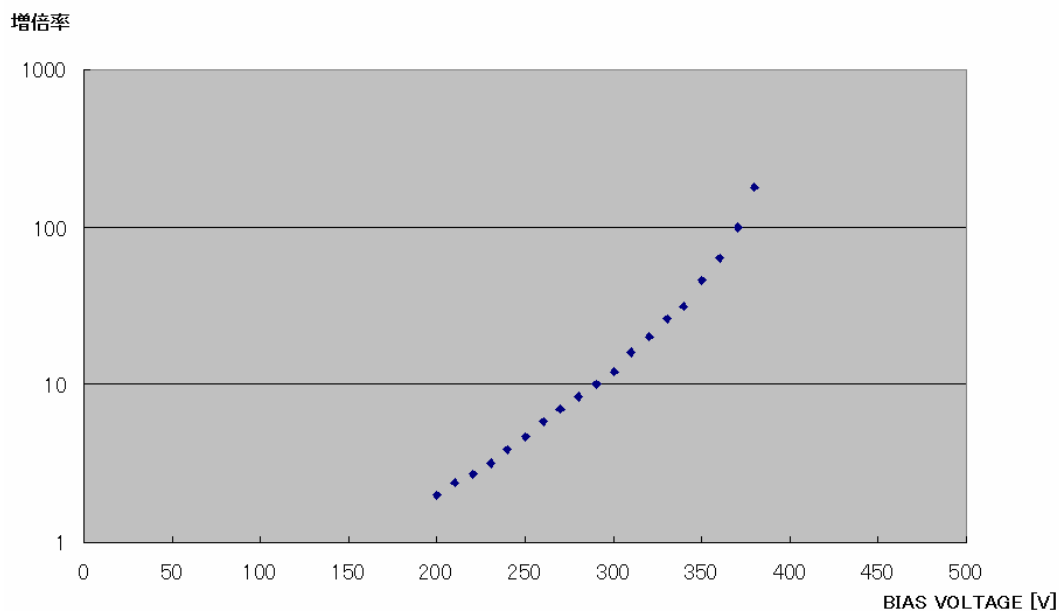
図5.1.1

VB[V]	VR[V](増倍率 50)	ID
447	401.9	4.5

今回使用した APD で微弱な光を検出するのにもっとも適当な BIAS VOLTAGE は約 440V である。そのときの増倍率は約 200 倍であり、S/N が最もよい値になっている。

さらに、増倍率を測ったところ 410V で 47 倍となり製造元推奨値は再現できるものである。図 5.1.2 に製造元推奨値の増倍率曲線を示す。

図5.1.2



参考文献[2]

本実験の増倍率曲線(図 3.5.2.2) は図 5.1.2 の曲線とは値が違うが、増加の仕方は同じ曲線を描いている。だから、この増倍率曲線も再現できると言える。

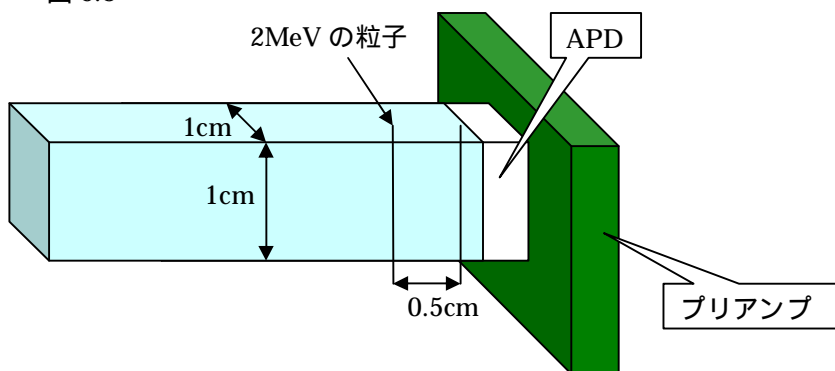
## 5.2 プリアンプの性能

今回、使用したプリアンプはコンデンサーから流れてきた電気量を増幅するものである。したがって増幅されたシグナルの大きさはコンデンサーの電位差によって決まる。今、コンデンサーCにQの電気量があるとすると増倍部に入る電荷 $\Delta Q$ はテストパルス入力での電圧 $\Delta V$ に依存し、 $\Delta Q = C \cdot \Delta V$ となる。これと図 3.6.2 から考えると 1pc 辺り 0.6V のシグナルが出ると考えられる。

## 5.3 粒子検出

5.2で出された結果より2MeVの粒子が図 5.3 のように入ってきた場合を考えてみた。

図 5.3



2MeV の粒子がプラスチックシンチレータに入射されるとプラスチックシンチレータから  $2 \times 10^4$  個の光子が出る。全方向に同じ量だけ出ると考えると APD のある面に出る光子は全体の 6 分の 1 である。さらに APD の受光面が  $5\text{mm} \times 5\text{mm}$  であることを考えると、その 4 分の 1 となり、APD に入る光子は約  $8 \times 10^2$  個と考えることができる。プラスチックシンチレータから出る光の波長は 391nm で、その波長での APD の量子効率率は 60% である。さらに APD で約 200 倍に増幅されるとして APD から出る電子は  $10^5$  個であると考えられる。 $10^5$  個の電子の電荷は  $16 \times 10^{-15}\text{C}$  である。5.2 の結果より約 9.6mV のシグナルが出ると考えられる。

$\beta$ 線検出について、今回の実験では位置を特定することはできなかった。ここで、スリットがある場合とない場合の違いを考えてみる。 $\beta$ 線は厚さ数 mm のアルミニウムで停止する。今回、使ったスリットは直径 3mm の鉛なのでスリット以外からでてくる $\beta$ 線はない。だから、スリットを入れると $\beta$ 線源から出る $\beta$ 線の本数は1/10程度になると予想できる。

## 6 結論

今回、APD とプラスチックシンチレータで $\beta$ 線を検出できる PMT を使用するよりも小さい検出器を製作した。APD は PMT に比べてノイズが生じやすい。今回、ノイズを落とすために GND をそろえ、電源からの電流を安定させることで S/N が 12 を得ることができた。今回使用した APD では S/N が一番高いのは BIAS VOLTAGE 440V で約 200 倍の増倍率を得ることができた。この S/N の値、増倍率ならばプラスチックシンチレータを用いた荷電粒子検出器への応用が可能である。微弱なエネルギーの粒子を扱う場合、さらに小さなノイズにすることが重要である。従って、今よりも便利に使うためには他のノイズを落とす方法も考案するべきである。位置を検出するには複数個の APD を使用しなければならない。複数個の APD を各々の最適な BIAS VOLTAGE を個別に与えることのできる環境の構築も必要である。

## 謝辞

本研究を行うにあたって多くの指導と研究とは何かを教えていただいた杉立先生、そして、数々の助言を下された志垣先生、本間先生に感謝します。榎本さん、坂田さんにはAPDやプリアンプの使い方を一から教えていただきました。さらに、自分の研究があるにもかかわらず私がわからないことを一緒に考えてくださったクォーク物理学研究室の皆さんにここでお礼を述べたいと思います。本当にありがとうございました

## 参考文献

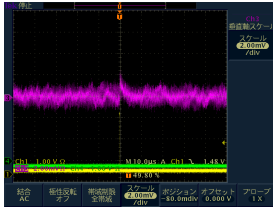
- [1] 永江知文・長宮正治 共著 『原子核物理学』
- [2] 浜松ホトニクス社ホームページ  
[http://jp.hamamatsu.com/index\\_f.html?dir=/&lang=ja&ext=xml](http://jp.hamamatsu.com/index_f.html?dir=/&lang=ja&ext=xml)
- [3] 平下賢一 卒業論文 『PSpice によるアバランシェ・フォトダイオード読み出し回路のシミュレーション』
- [4] 広島大学クォーク物理学研究室ホームページ  
<https://www.hepl.hiroshima-u.ac.jp/hadron/welcomejp.html>

付録

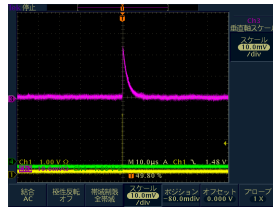
本文中に示さなかったオシロスコープの画像をここで示す。

入射光量と出力信号

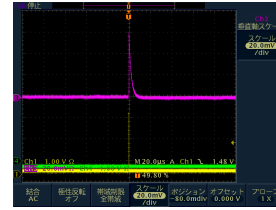
DURATION 80ns



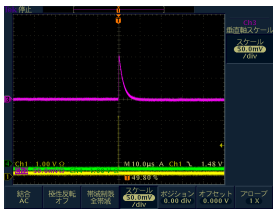
LED DRIVE VOLTAGE  
1.0V



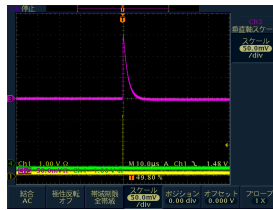
LED DRIVE VOLTAGE  
2.0V



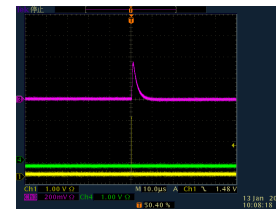
LED DRIVE VOLTAGE  
3.0V



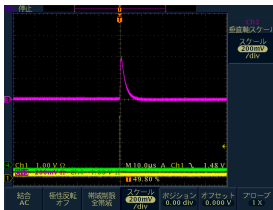
LED DRIVE VOLTAGE  
4.0V



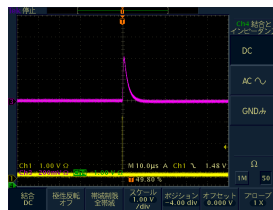
LED DRIVE VOLTAGE  
5.0V



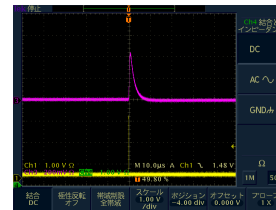
LED DRIVE VOLTAGE  
5.0V つまみ変化後



LED DRIVE VOLTAGE  
6.0V

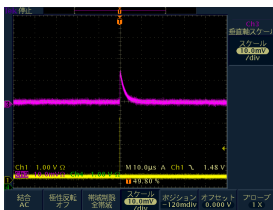


LED DRIVE VOLTAGE  
7.0V

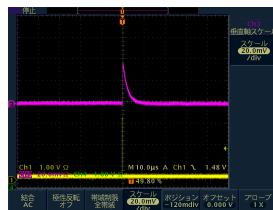


LED DRIVE VOLTAGE  
8.0V

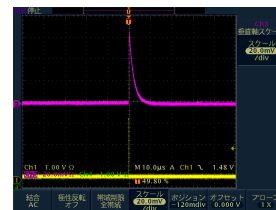
DURATION 60ns



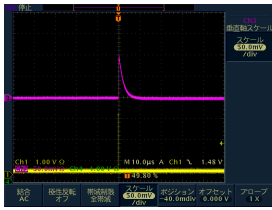
LED DRIVE VOLTAGE  
2.0V



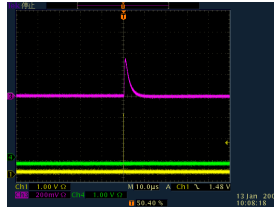
LED DRIVE VOLTAGE  
3.0V



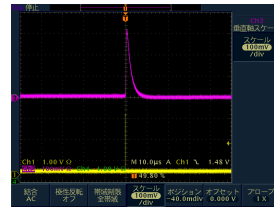
LED DRIVE VOLTAGE  
4.0V



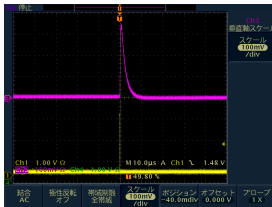
LED DRIVE VOLTAGE  
5.0V



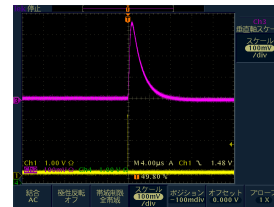
LED DRIVE VOLTAGE  
5.0V つまみ変化後



LED DRIVE VOLTAGE  
6.0V

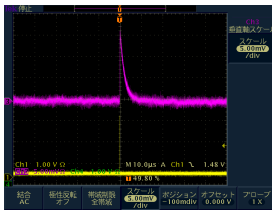


LED DRIVE VOLTAGE  
7.0V

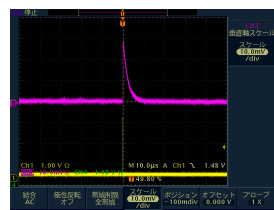


LED DRIVE VOLTAGE  
8.0V

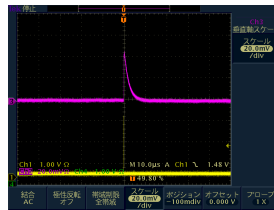
DURATION 40ns



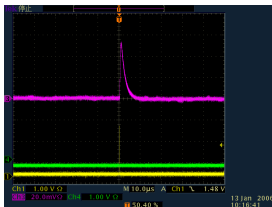
LED DRIVE VOLTAGE  
3.0V



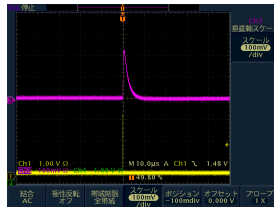
LED DRIVE VOLTAGE  
4.0V



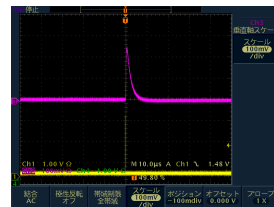
LED DRIVE VOLTAGE  
5.0V



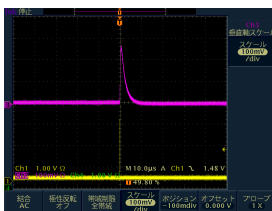
LED DRIVE VOLTAGE  
5.0V つまみ変化後



LED DRIVE VOLTAGE  
6.0V

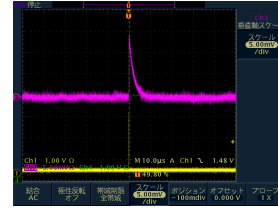
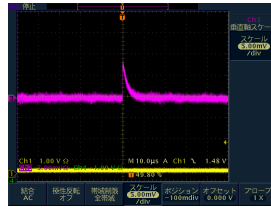
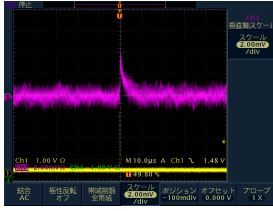


LED DRIVE VOLTAGE  
7.0V



LED DRIVE VOLTAGE  
8.0V

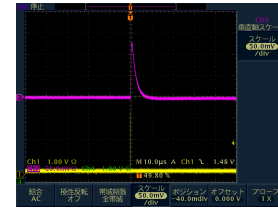
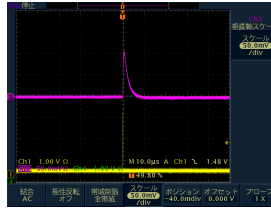
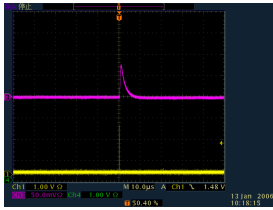
DURATION 20ns



LED DRIVE VOLTAGE  
3.0V

LED DRIVE VOLTAGE  
4.0V

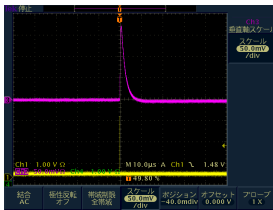
LED DRIVE VOLTAGE  
5.0V



LED DRIVE VOLTAGE  
5.0V つまみ変化後

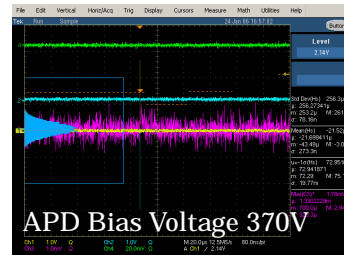
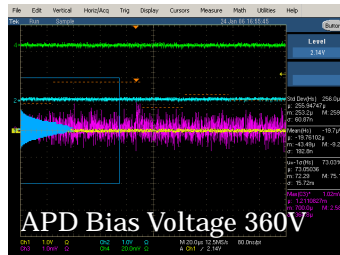
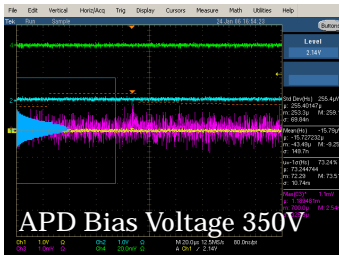
LED DRIVE VOLTAGE  
6.0V

LED DRIVE VOLTAGE  
7.0V

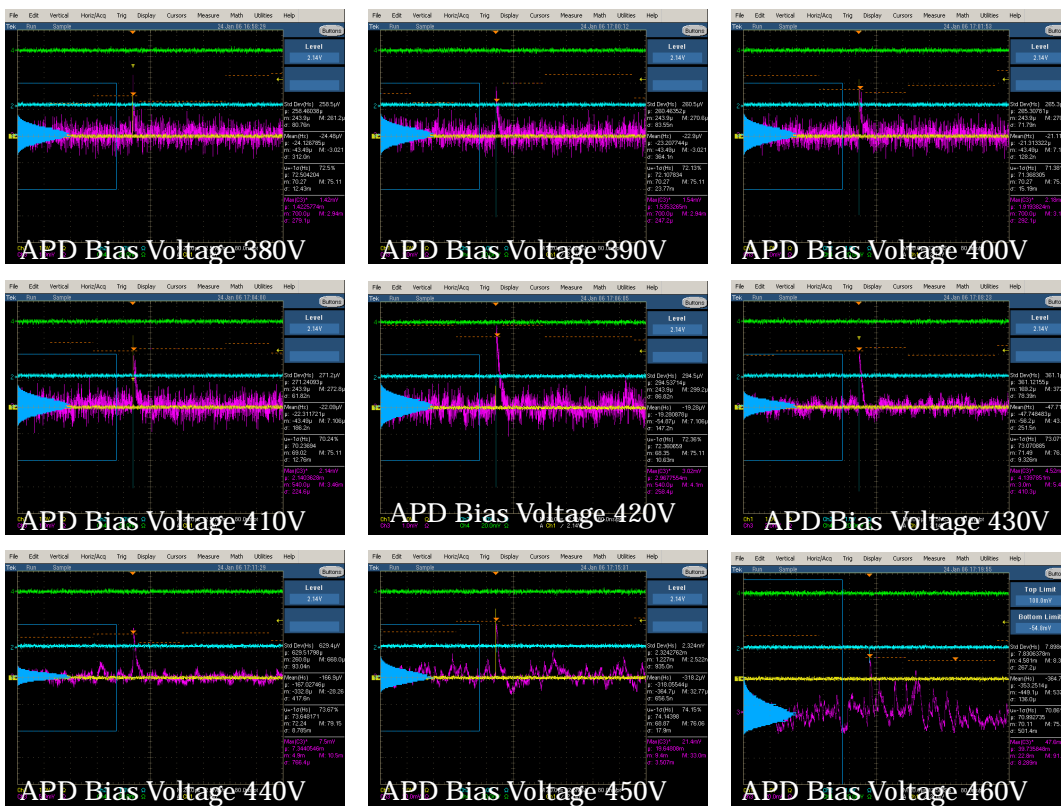


LED DRIVE VOLTAGE  
8.0V

シグナル、ノイズ比の調査







APDの増幅率

