

新型 MPPC の性能評価

2011 年 3 月

07S2016H

小林秋人

信州大学理学部物理科学科

高エネルギー研究室

指導教員：竹下徹

目次

第 1 章 序説

- 1.1 ILC 実験
- 1.2 ILD
- 1.3 カロリメータ

第 2 章 MPPC

- 2.1 光検出器
 - 2.1.1 光電子増倍管
 - 2.1.2 アバランシェフォトダイオード
 - 2.1.3 MPPC
- 2.2 MPPC の基本性能
 - 2.2.1 Gain
 - 2.2.2 Noise Rate
 - 2.2.3 Cross Talk
 - 2.2.4 After Pulse
 - 2.2.5 応答線形性
 - 2.2.6 その他の特性

第 3 章 新型 MPPC の性能測定

- 3.1 研究目的
- 3.2 測定方法
 - 3.2.1 Gain, Noise Rate, Cross Talk
 - 3.2.2 After Pulse
- 3.3 結果

第 4 章 MPPC の Response Curve の測定

- 4.1 測定方法
- 4.2 結果

第 5 章 まとめ

- 5.1 まとめと考察
- 5.2 結論
- 5.3 今後の課題

付録 A MPPC の検出光子数の算出方法

第 6 章 謝辞

第 7 章 参考文献

第 1 章 序説

現在、次世代の線形加速器として計画されている電子陽電子衝突型加速器 ILC (International Linear Collider) は、世界中で研究開発が進められている。この章では、ILC 計画の概観を述べると共に、本研究の目的を述べる。

1.1 ILC 計画

加速器実験とは、高電場を用いて人工的に高エネルギー粒子を作り、その粒子を衝突させることにより、高エネルギー領域での物理現象を探る、素粒子物理学における研究手段の一つである。

電場に加速させるため、加速させるのは電荷を持った粒子に限られる。衝突型の加速器として意味があるのは、陽子と反陽子（または陽子陽子）、電子と陽電子、陽子と電子（または陽電子）の 3 種類である。

2008 年より CERN で稼働中の LHC (Large Hadron Collider) のような円形加速器では、加速する粒子の質量によって重心系のエネルギーの限界が決まる。荷電粒子を磁場によって曲げると、シンクロトロン放射により粒子はエネルギーを失う。このエネルギーの損失が小さい粒子ほど、円形加速器で到達できるエネルギーが高いということになる。シンクロトロン放射によって失うエネルギー ΔE は次式で表される。

$$\Delta E \propto \frac{1}{R} \left(\frac{E}{mc^2} \right)^4 \quad (1.1)$$

ここで、(1.1) 式より、粒子の質量が大きいほど到達できるエネルギーが高いということがわかる。実際に LHC においては、陽子と電子を加速した時、重心系のエネルギーに 10 倍もの差が出ることがわかっている。

しかし、ここで問題になるのが測定の際のバックグラウンドである。陽子と反陽子の衝突による実験では陽子の内部のクォークやグルーオンが作り出すジェットによりバックグラウンドのイベントが多くなり解析が困難になる。だが一方で、電子陽電子衝突では衝突させる粒子が内部構造を持たないため、バックグラウンドの少ない精密な測定が可能になる。

現在計画中の ILC は線形加速器であり、これまで述べたシンクロトロン放射によるエネルギー損失を無くし、電子・陽電子衝突実験を高いエネルギー領域で行うことを目的としている。



図 1.1 ILC の構想図

1.2 ILD

本節では、ILC 計画における測定器のデザインのひとつである ILD (International Large Detector) について述べる。

ILD 測定器の全体図を図 1.2 に示す。ILC では新粒子を精度よく検出することを目的としているので、そのための測定器の性能の向上が求められている。

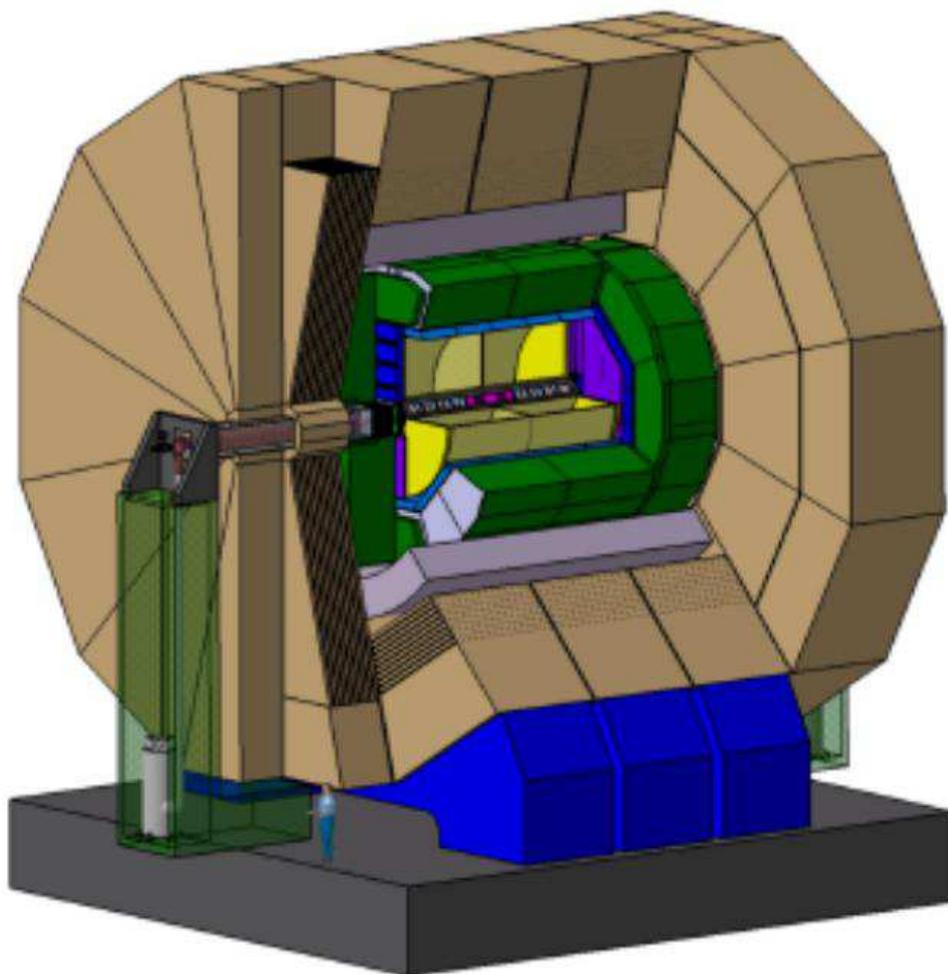


図1.2 : ILDの全体図。内側からバーテックス検出器 (ピンク)、中央飛跡検出器 (黄色)、電磁カロリメータ (青)、ハドロンカロリメータ (緑)、ソレノイドコイル (薄紫)、 μ 粒子検出器 (茶色) となっている。

以下では、図 1.2 中の測定器の簡単な説明をする。

・バーテックス検出器

電子陽電子衝突点にもっとも近い位置に設置される検出器である。バーテックス検出器は b クォークや c クォークの同定を行い、ILC では非常に高い性能が要求される。多くの物理プロセスの解析において b クォークと c クォークの同定は必要不可欠であり、そのためバーテックス検出器は重要な役割を担っている。

・飛跡検出器

飛跡検出器とは、荷電粒子の飛跡を正確に測定することで、荷電粒子の運動量を測定する装置である。ソレノイドコイルの磁場によって荷電粒子はローレンツ力を受けて曲線軌道を描く。その曲率と磁場の強さから粒子の運動量を求めることができる。現在は MPGD (Micro Pattern Gas Detector) をセンサーとして用いた TPC (Time Projection Chamber) が候補として上がっており、研究が進められている。

・カロリメータ

カロリメータは、入射粒子のエネルギーを測定する為の検出器である。カロリメータは電磁カロリメータとハドロンカロリメータの 2 種類があり、それぞれ電磁シャワーを起こす粒子、ハドロンシャワーを起こす粒子を測定する。ジェットを含むイベントが多いため、入射した粒子全体のエネルギーだけではなく、個々の粒子のエネルギーに分解できる高いエネルギー分解能と空間分解能が要求される。本論文で述べる MPPC が用いられる予定の検出器であり、次節で詳しい説明をする。

・ソレノイドコイル

荷電粒子の運動量測定のために、高磁場を掛ける装置である。コイル内ではビーム軸に平行な方向に 8T もの高磁場が作られる。コイル内に設置されている測定器、すなわちバーテックス検出器、飛跡検出器、カロリメータはこの高磁場を受けるため、高磁場に対する耐性を持つことが要求される。

・ μ 粒子検出器

ミューオンは物質透過力が強く、カロリメータ中で電磁シャワーを起こさず外側に通り抜けてしまう。この性質から μ 粒子検出器は測定器の一番外側に設置され、 μ 粒子の同定に用いられる。

1.3 カロリメータ

カロリメータとは、入射した粒子のエネルギーを測定するための装置で、粒子のエネルギーを光や電気信号に変換して測定する。高エネルギーの粒子を物質中に入射した際、入射粒子と原子核との相互作用により、粒子数が爆発的に増加する。この現象をシャワーと呼び、カロリメータでエネルギーを測定していく。ILD カロリメータの構造としては、粒子のエネルギーのほぼ全てをカロリメータ内で落とすために、十分大きい原子番号を持った物質で構成された吸収層と、信号を測定するための検出層が交互にサンドイッチされた構造をしている。

・電磁カロリメータ

高エネルギーの電子が物質中に入射すると、制動放射によって γ 線を放出してエネルギーを失う。一方、 γ 線は物質中で電磁場との相互作用によって電子、陽電子対を生成する。これらの相互作用の断面積は物質中の原子番号の二乗に比例する。これを何度も繰り返すことにより、やがて電子よりもエネルギーの低い多数の γ 線と、電子陽電子対が生成される。これを電磁カスケードシャワーと呼び、電磁カスケードシャワーを利用して生成された粒子の全エネルギーを測定するための装置を電磁カロリメータという。

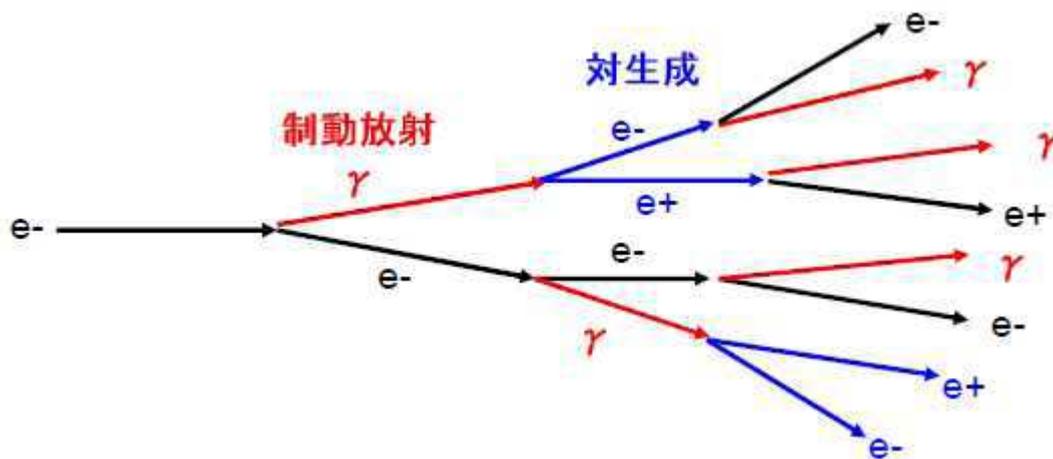


図 1.3 電磁シャワー

・ハドロンカロリメータ

高エネルギーのハドロンが物質中に入射すると、物質中の核子と衝突して中間子やバリオンなどの二次粒子が発生する。二次粒子のうちの荷電中間子とバリオンはさらに物質内の核子と衝突して三次粒子を発生する。 π^0 中間子は 2 つの γ 線に崩壊して電磁シャワーが作られる。このようにして生成されるシャワーをハドロンシャワーと呼ぶ。ハドロンシャワーは電磁シャワーと異なり、離散的に発生する。ハドロンは電子や光子

と比べて反応長が長い。そのため一般的には、内側に電磁カロリメータを、外側にハドロンカロリメータが設置される。

ILD カロリメータでは高い位置分解能を得るために検出層の細分化をしている(図 1.4)

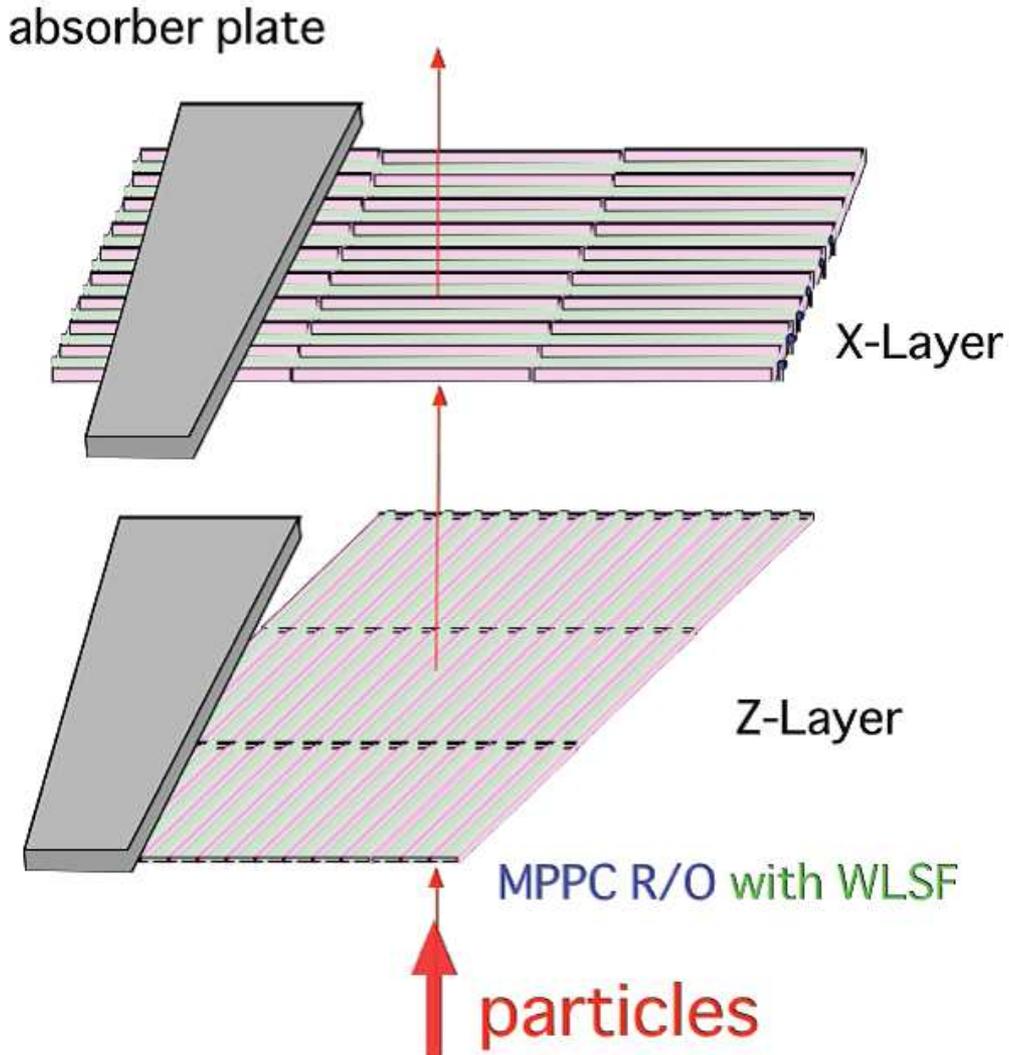


図 1.4 カロリメータの層構造の概念図

この細分化のため、ILD カロリメータの検出層で用いる光検出器には次のような性能が求められる。

- ・ 小型で多チャンネル化が可能であること
- ・ 高い増倍率を得られること
- ・ 強磁場に対する耐性を持つこと

これらの要求を満たすデバイスが MPPC である。

第 2 章 MPPC

MPPC (Multi Pixel Photon Counter) は、浜松ホトニクス社が開発した新しい光検出器で、現在では信州大学を始め、多くの大学や研究所で研究が進められている。今までの光検出器は、主に光電子増倍管が使われてきたが、前節のように磁場中で使用可能であることや、多チャンネル化にともなうコストパフォーマンスが良い等と言った理由から、ILD カロリメータには MPPC が用いられる予定である。この章では、光電子増倍管と MPPC、および MPPC に用いられているアバランシェフォトダイオードについて述べる。

2.1 光検出器

2.1.1 光電子増倍管

光電子増倍管 (PMT : Photo-Multiplier-Tube) はシンチレータで発光した光を増幅して電気信号として取り出すデバイスである。

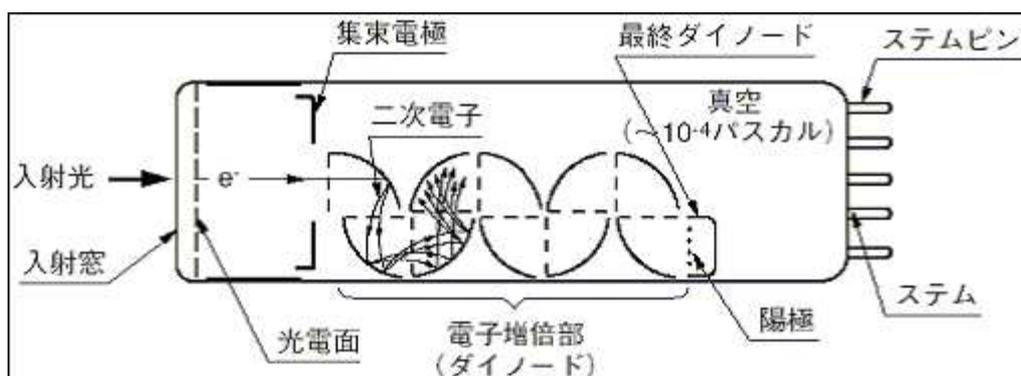


図 2.1 光電子増倍管による電子の増殖

光が金属、または半導体でできた光電面に当たると光電効果によって電子が放出される。図 2.1 のように光電面で放出された電子は電界で加速されて金属で作られた二次電子面 (dynode) に当たり、電子数が増幅される。二次電子面を 10 段重ねておくと、電子数は光電面で発生した電子数の 10^8 倍以上に達する。この電子束を陽極からパルス信号として取り出す。

光電子増倍管は増倍率も高く、非常に優れた光検出器なのだが、磁場の影響を受けやすいことや、高磁場中で用いる ILD カロリメータの読み出しデバイスには適さない。

2.1.2 アバランシェフォトダイオード

半導体を用いたデバイスの中でも、光を電気に変えるものを受光デバイスという。光検出器として用いられる半導体デバイスは全て受光デバイスである。

p型半導体とn型半導体を接合させたダイオードを光検出器として用いたデバイスをフォトダイオードと呼ぶ。接合部は互いにキャリアが打ち消しあい、キャリアが少ない領域が存在しており、これを空乏層という。ここに、半導体の禁制帯の幅 E_g よりも大きなエネルギーの光が入ると内部光電効果により、電子が励起され、電子と正孔が対生成される。

$$h\nu = E_g \quad (2.1)$$

ここで、 h はプランク定数、 ν は入射光の振動数である。

通常、pn 接合半導体は逆バイアスを掛けてもほとんど電流が流れない。しかし逆バイアス電圧がある一定以上になると、突然電流が流れるようになる。これをブレイクダウンと呼び、この閾値となる電圧のことをブレイクダウン電圧と呼ぶ。ブレイクダウンが起こる原因にはツェナー降伏と電子雪崩降伏の二つがある。ツェナー降伏と電子雪崩降伏の概念図を示す。

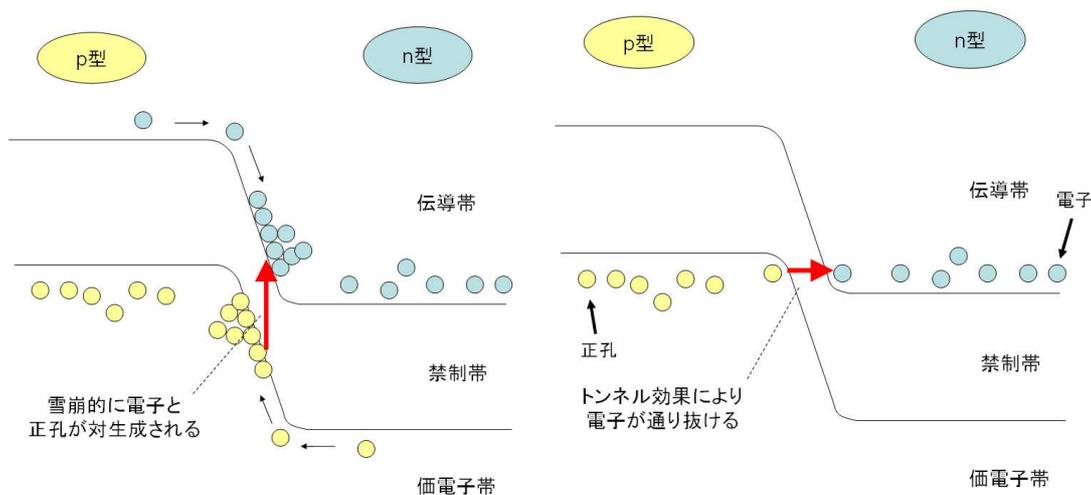


図 2.2 電子雪崩降伏 (左) とツェナー降伏 (右)

逆バイアス電圧が大きくなると p 型の価電子帯の電子がトンネル効果により禁制帯を通り抜けて n 型の半導体に移ることがある。このようにして移った電子により電流が流れる現象をツェナー降伏という。

また、逆バイアス電圧が大きくなると空乏層の中において高電場がかかるようになる。

この状態で空乏層に電子が入ると電場によって電子が加速され、そのエネルギーによって結晶格子の結合を切り、電子・正孔対を生成する。ここで生成された電子は電場によって加速され、再び電子・正孔対を生成する。このように次々と電子・正孔対が生成

されて電子数が雪崩的に増幅する現象をアバランシェ増幅と呼び、これにより大電流が流れるようになる現象を電子雪崩降伏という。

フォトダイオードにブレイクダウン電圧以上の電圧をかけたときに光子が入射すると、生成された電子は電場により加速され、他の原子と衝突して電子を弾き出す。弾き出された電子も電場で加速され、アバランシェ増幅が起こる。このようにしてアバランシェ増幅を利用して信号を増幅させたフォトダイオードをアバランシェフォトダイオード (APD) と呼ぶ。

APD をブレイクダウン電圧以上の逆バイアスで動作させると、同時に入射する光子数に関係なく一定の信号を出す。このモードをガイガーモードと呼ぶ。

2.1.3 MPPC

MPPC は多数のアバランシェフォトダイオード (Avalanche Photo Diode : APD) ピクセルにより構成されており、実際に受光面を見ると図 のように APD ピクセルが並んでいるのがわかる。

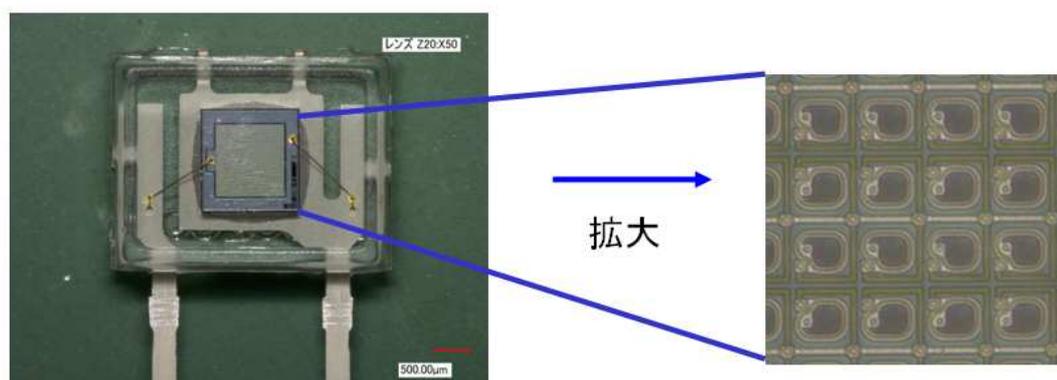


図 2.3 MPPC の全体図と受光面の拡大図

MPPC の主な特徴は以下のものが挙げられる。

- ・ 小型
- ・ 高ゲイン ($\sim 10^5$)
- ・ 磁場中・常温で動作可能
- ・ 低バイアス電圧で動作
- ・ 優れたフォトカウンティング能力

次に MPPC の動作について説明する。

図 2.4 に MPPC の内部回路を、図 2.5 にガイガーモード APD の動作を示す。APD はブレイクダウン電圧より 1～4V 程度高い逆バイアス電圧をかけることでガイガー

モードで動作する。この時入射光子によりたたき出された電子は増幅領域でアバランシェ増幅を起こす。アバランシェ増幅を起こしたピクセルから電流が流れると、ピクセルに直列に接続されたクエンチング抵抗で電圧降下が起こる。その後、再充電によって逆バイアスは元に戻り再びガイガーモードで動作できるようになる。再充電にかかる時間は数 ns だと言われている。

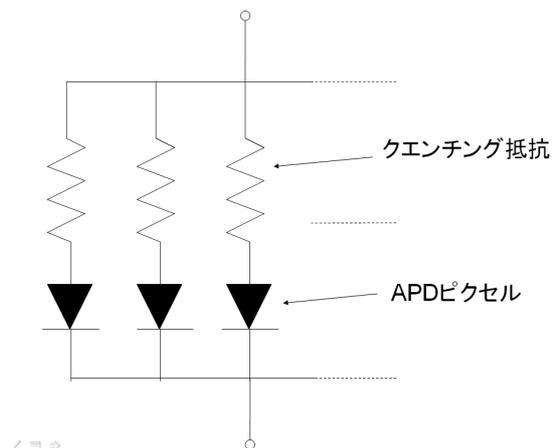


図 2.4 MPPC の内部回路

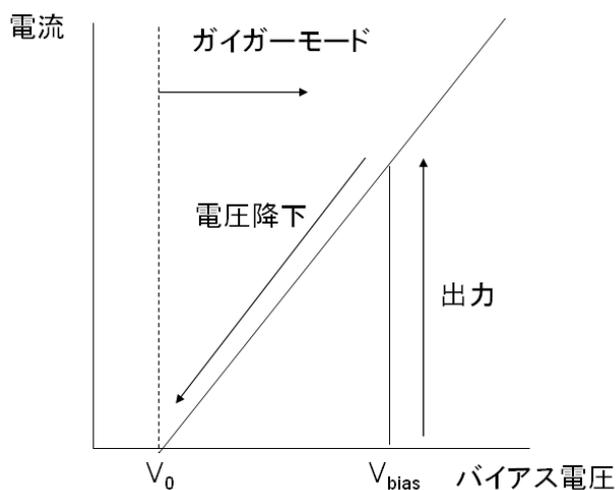


図 2.5 ガイガーモード APD の動作

図 2.4 からわかるように MPPC の出力信号は受光面を構成する APD ピクセル全ての出力信号の和になる。したがって同時に複数のピクセルが信号を出した場合、MPPC の出力はそれらの信号の重ね合わせになる。この信号の高さや積分電荷量を測定することで、どのくらいの数の光子が入射したかがわかる。図 2.6 に MPPC の出力信号と積分電荷量分布を示す。

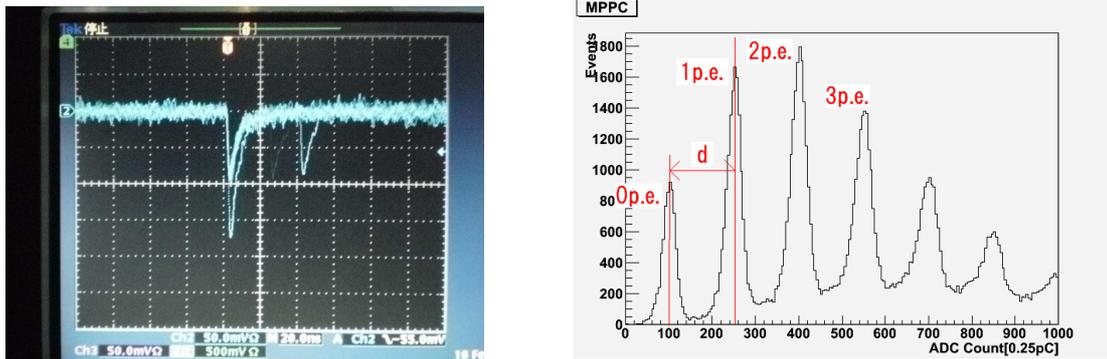


図 2.6 MPPC の出力信号 (左) と信号の積分電荷量分布 (右)

2.2 MPPC の基本性能

2.2.1 Gain

Gain とは光子が入り電子を叩き出したときのアバランシェ増幅によって増幅された信号の増幅率を指す。電荷量の増幅率を G 、出力信号の積分電荷量を Q とおくと、

$$Q = e \times G \quad (2.2)$$

と表せる。ここで、 e は素電荷 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ である。またこの増幅率 G は MPPC にかける逆バイアス電圧 V_{bias} とブレイクダウン電圧 V_0 の差 dV と APD ピクセルの静電容量 C に比例している。つまり次式

$$G = \frac{C}{e} (V_{bias} - V_0) \quad (2.3)$$

で表せる。

実験的にこの G を求める方法として、今実験では CAMAC の ADC を用いて図 2.6 に示した ADC 分布の Pedestal を差し引いた後の 1photo electron(以下 1p.e.) のガウス分布で Fitting したときの Mean の値を d として

$$G = \frac{d \times r}{A \times e} \quad (2.4)$$

ここで r : ADC の分解能 = $0.25 \text{ [pC/ADC Count]}$ 、 A : アンプの増倍率である。

2.2.2 Noise Rate

MPPC は光子が入射しなくても主に半導体内の熱電子が原因で信号を出してしまう。これをダークノイズと呼び、Noise Rate とは 1 秒間当たりのダークノイズの数のことである。

測定の方法としては、Discriminator の Threshold を変えていき、各点で Noise Rate

を測定し図 2. のように Threshold Curve を描く。Threshold 電圧が 1p.e.ピークに対応する所で Noise Rate は急激に下がる。その値を参考にして、ガウス関数のある下限以上で積分した相補誤差関数で Fitting を行うと 1p.e.threshold が決まる。そこから 0.5p.e.threshold を求めると、そのときの Count Rate が Noise Rate となる。

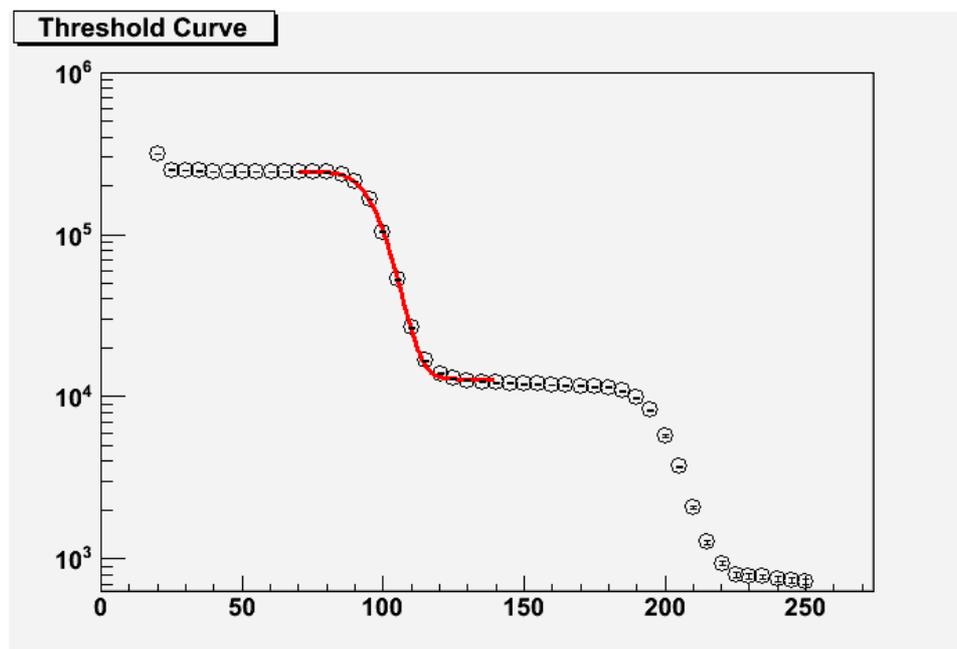


図 2.7 : MPPC の Threshold Curve。横軸は Discriminator の Threshold、縦軸は Dark Noise の一秒钟当たりのカウント数である。これは ADC 分布の積分に対応しており、横軸の Threshold が各 p.e.のピーク付近になるとカウント数が急激に減少する。

2.2.3 Cross Talk

APD ピクセルにおいて、アバランシェ増幅の過程で二次光子が出てしまうことがある。この光子が隣接するピクセルに入射して、再びアバランシェ増幅を起こしてしまう可能性がある。つまり Cross Talk とは一つの光子の入射に対して、2p.e.以上の信号を出してしまう現象のことを差す。本論文では、Cross Talk を Cross Talk が起こる確率という意味で用いる。Cross Talk の概念図を図 2. に示す。Cross Talk は図 2. において 1.5p.e.threshold と 0.5p.e.threshold の Count Rate の比

$$CrossTalk = \frac{NoiseRate_{1.5p.e.threshold}}{NoiseRate_{0.5p.e.threshold}} \quad (2.5)$$

で表すことができる。

2.2.4 After Pulse

After Pulse とは、一つのピクセルに光子が入射して信号を出力した後、短い時間を空けて再び信号が出力される現象のことである。この現象も Cross Talk と同じく、MPPC の検出光子数を多く見せてしまう。After Pulse という現象の描像は一般に以下のように言われている。まず APD に光子が入射してアバランシェ増幅を起こす。このときに半導体中の格子欠損に電子がトラップされる。APD が放電を終え、再充電されたときにトラップされた電子が放出され、アバランシェ増幅を起こして信号となる。

一般に最初の信号から数 10ns の時間を置いて After Pulse の信号が出力される。(図 2.8)

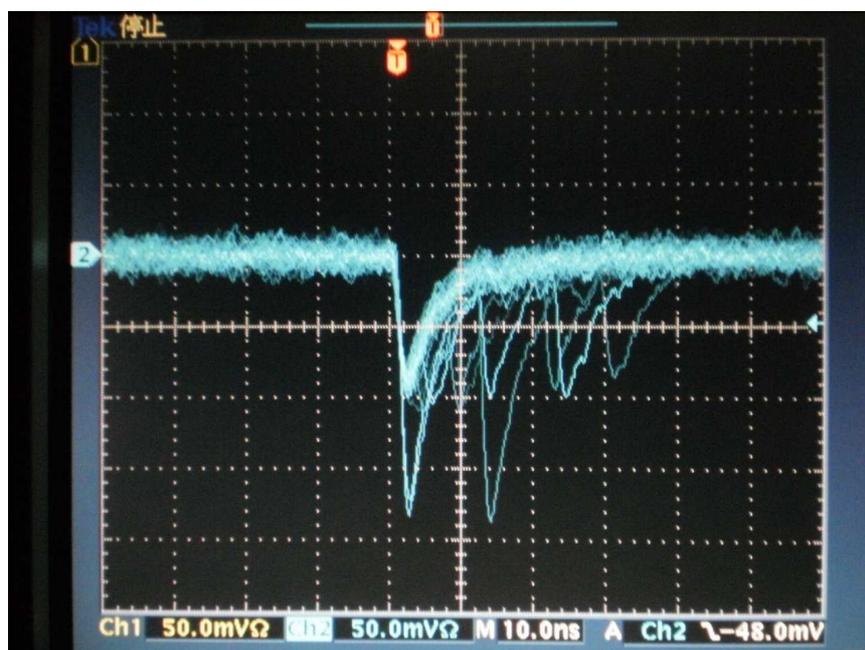


図 2.8 After Pulse による信号

本研究では、After Pulse の発生率を以下のように定義している。

$$\text{After Pulse} = 1 - \frac{\text{Noise Rate}(\text{Long gate})}{\text{Noise Rate}(\text{Short gate})} \quad (2.6)$$

2.2.5 応答線形性

APD は複数の光子が同時に入射しても一光子分の信号しか出さないため、MPPC の検出する光子の数は APD ピクセルの数で制限されることになる。

したがって、MPPC の実際の入射光子数 N_{in} と検出する光子数 N_{fired} の関係は非線形になり、一般には以下の式で与えられると考えられている。

$$N_{\text{fired}} = N_{\text{pix}} \left(1 - \exp\left(\frac{-\varepsilon \times N_{\text{in}}}{N_{\text{pix}}}\right) \right) \quad (2.7)$$

ここで、 N_{pix} は MPPC の有効ピクセル数と呼ばれるパラメータ、 ε は MPPC の検出効率である。

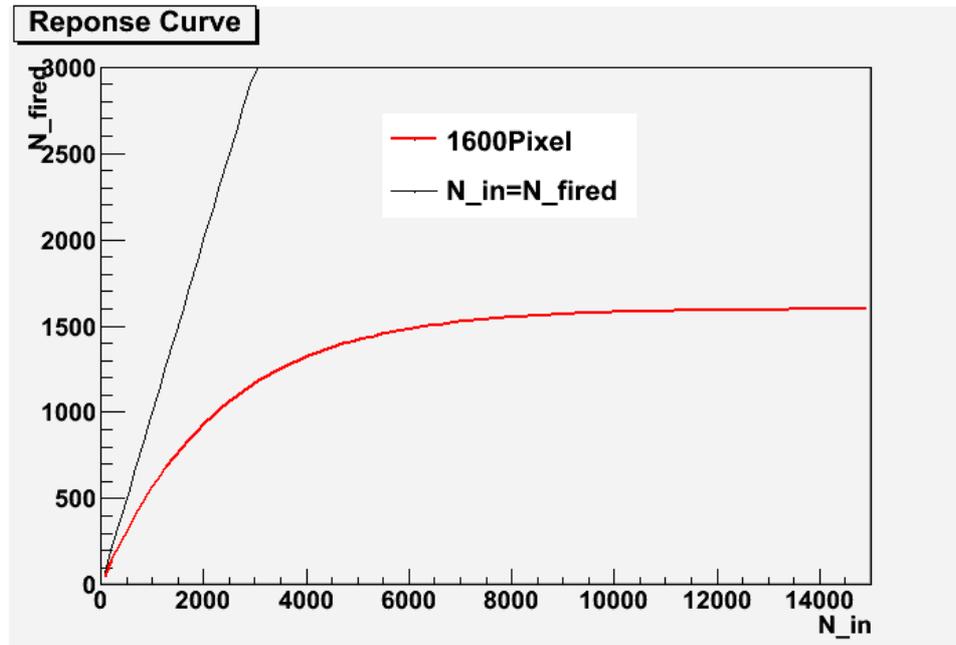


図 2.9 $N_{\text{pix}}=1600$ としたときの理想応答曲線

横軸が大きくなりすぎると、MPPC の検出光子数 N_{pix} に向かって収束し、真の入射光子数 N_{in} を正しく見積もることが出来なくなってしまう。

2.2.6 その他の特性

- ・ 温度依存性

MPPC の Gain や NoiseRate といった性能は一般に温度に依存して変化する。

特に Gain に関してはブレイクダウン電圧 V_0 が温度に比例して上昇するため、 V_b が一定ならば温度の上昇に伴って Gain は低下する。

第3章 新型 MPPC の性能測定

3.1 研究目的

MPPC を検出器として用いる場合、ピクセル数を大きく上回る数の光子が入射するようなイベントでは正しく光子数を見積もることができなくなってしまう。

そのため、大光量のイベントを精度良く検出するためには、MPPC のダイナミックレンジの向上が不可欠となる。

そのために信州大学と浜松ホトニクスで共同開発したのが本研究で取り扱う新型 MPPC である。(図 3.1 および表 3.1)

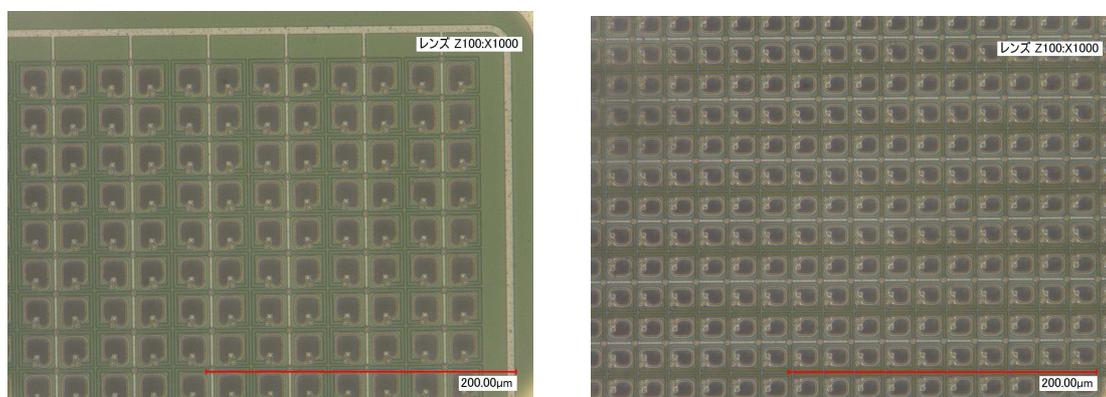


図 3.1 新型 MPPC (右) と 1600pixel MPPC (左) の受光面拡大図

二つの写真は同じ倍率で撮影したものである。この写真を見ると右の新型 MPPC の方が、ピクセルが小さいことがわかる。

	新型 MPPC	1600pixel MPPC
受光面	1mm × 1mm	1mm × 1mm
ピクセルサイズ	20 μm × 20 μm	25 μm × 25 μm
ピクセル数	2500	1600

表 3.1 新型 MPPC と 1600pixel MPPC の違い

新型 MPPC は現在 ILD カロリメータ試作機などに用いられている 1600pixel MPPC と比べて、同じ受光面中のピクセル数が 900 個多くなっている。

ピクセルサイズの縮小、ピクセル数の増加により、Gain の低下や Noise Rate の増加といった MPPC の諸性能の変化が予想される。

本研究では、試作された新型 MPPC の諸性能が ILD カロリメータにおける要求を満たしているか確かめ、さらにダイナミックレンジの変化を実験的に検証することを目的としている。

3.2 測定方法

3.2.1 Gain, Noise Rate, Cross Talk

<測定回路>

まず Gain, Noise Rate, Cross Talk の測定回路図を示す。

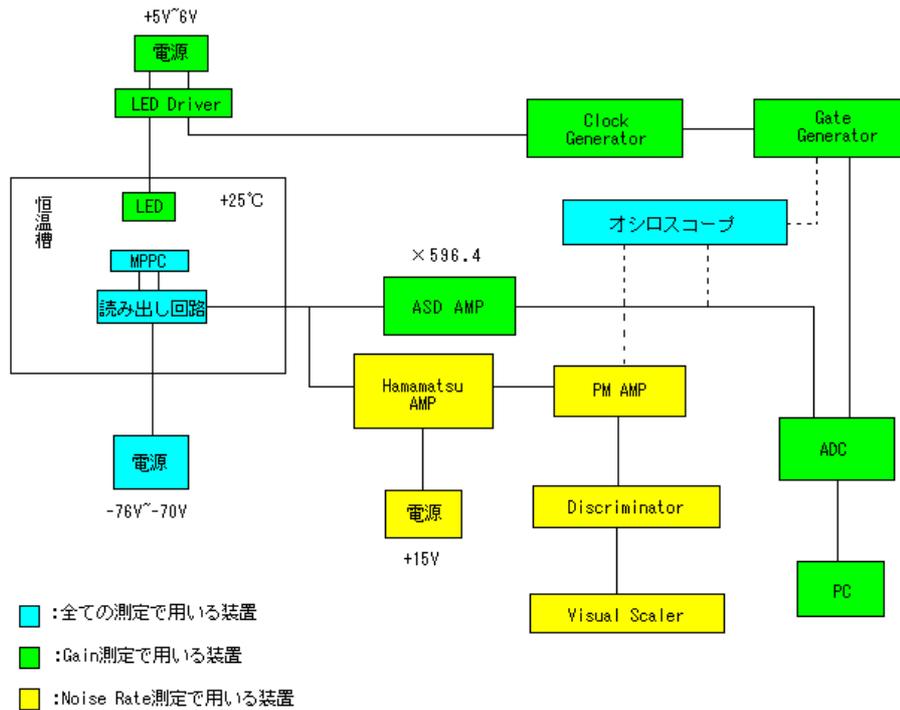


図 3.2 : 基本性能の測定回路図

以下では図 3.2 の装置の簡単な説明をする。

・ MPPC 読み出し回路

MPPC に電圧をかけ、信号を読み出すための回路。入力および出力は同軸ケーブルを用いている。

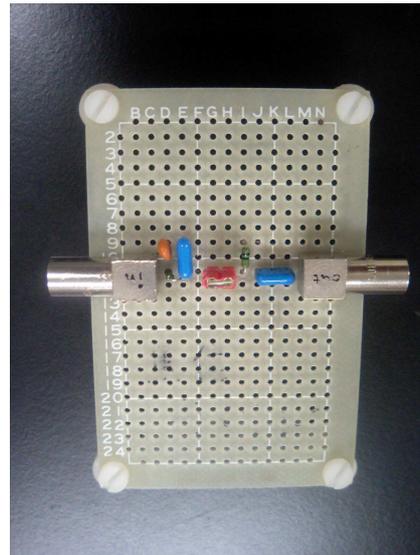
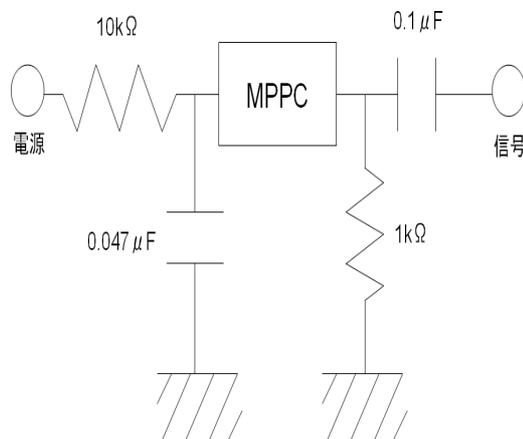


図 3.3 MPPC の読み出し回路図 (左) と実際に使用した回路 (右)

• LED Driver

トリガーパルスを入力すると、回路にかけた電圧に依存した信号を出力する装置。この回路の出力信号を LED に入力する。

• Clock Generator

任意の幅、周波数を持つ NIM パルスを出力するモジュール。このパルスを LED Driver と Gate Generator のトリガーとして用いる。

• Gate Generator

トリガーパルスの入力に対して、任意の幅、ディレイをかけた NIM パルスを出力する

• ADC(Analog to Digital Converter)

図 3.3 のように、アナログ信号に対して任意の幅の Gate Pulse を設定することで、アナログ信号を積分電荷量という値に変換する装置。この装置は基本的に負電圧の信号を積分するが、ノイズによる正方向の積分電荷量も出力できるように、ある値だけ底上げされており、これをペダスタルと呼ぶ。

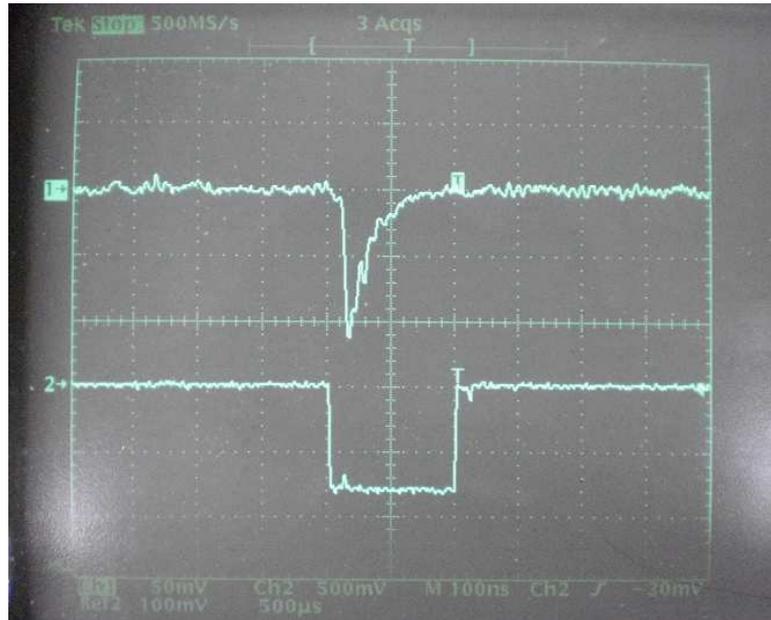


図 3.4 MPPC の信号と Gate Pulse

・ Discriminator

入力したアナログ信号が、ある閾値電圧（これを **Threshold 電圧** という）を超えた場合のみ NIM パルスを出力する装置。Noise Rate の測定では、この **Threshold 電圧** を変化させながら **Visual Scalar** でダークノイズの数を測定する。

・ Visual Scalar

入力された NIM パルスの数をカウントする装置。表示できるのは 7 桁までで、カウントが 1×10^8 を超えるとオーバーフローする。

・ 恒温槽

MPPC の温度を任意の値に保つための装置。周りを暗幕で覆うことで余計な光を遮蔽することにも役立つ。

< Gain の算出・評価方法 >

図 2.6 のような ADC 分布より 1p.e.相当の積分電荷量 d を決定し、式 (2.4) により **Gain** を求めることができる。そして求めた **Gain** を縦軸、バイアス電圧 V_b を横軸に取ってプロットすると次のような図 3.4 になる。これに

$$y = a(x - b) \quad (3.1)$$

というような関数で **Fitting** を行うことで、傾き $a(=C/e)$ 、 x 切片 $b(=V_0)$ を求める。本研究では MPPC の **Gain** は APD の静電容量 C とブレイクダウン電圧 V_0 の値で評価する。

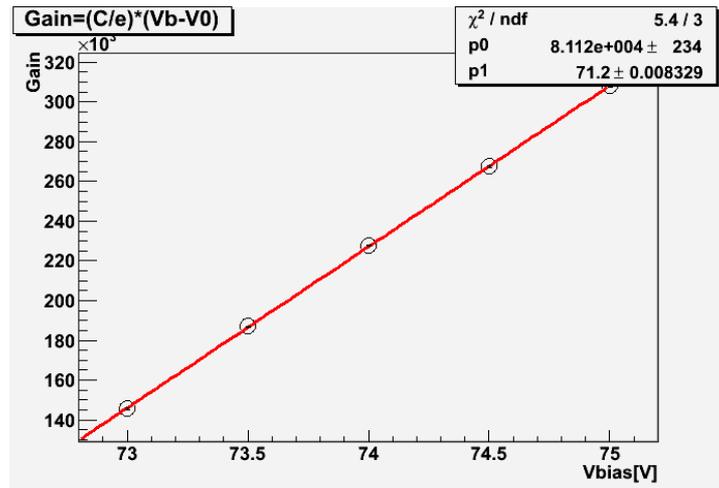


図 3.5 縦軸 Gain、横軸 Vb でプロットしたグラフ

3.2.2 After Pulse

After Pulse の測定回路を以下に示す。

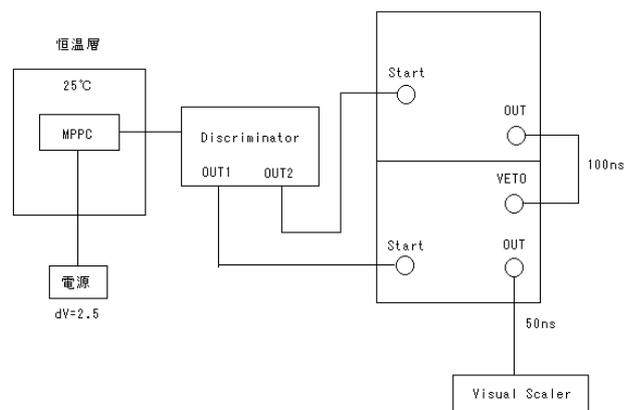


図 3.6 After Pulse の測定回路

ここで、VETO とは、パルスが入力されてる間だけトリガーパルスが入ってきても Gate Pulse を出力しないようにする装置である。

この実験における比較は Discriminator の出力パルス幅 25ns と VETO に入力したパルス幅 100ns の時それぞれの Noise Rate からアフターパルスの発生率を求めた。

3.3 結果

MPPCの基本性能測定は、新型MPPCは3つ(Serial No. 30093, 30096, 30099)について行い、また比較対象として1600Pixel MPPC(Serial No. 9240)も測定を行った。

<Gain>

Serial No.	9240	30093	30096	30099
V_0 [V]	69.52 ± 0.02	71.51 ± 0.01	71.44 ± 0.01	71.53 ± 0.01
C[fF]	19.0 ± 0.1	12.7 ± 0.1	12.7 ± 0.1	12.9 ± 0.1

表 3.2 Gain の測定結果

<Noise Rate & Cross Talk>

・ $dV = 2.0V$

Serial No.	9240	30093	30096	30099
NoiseRate[kHz]	183.7 ± 0.5	41.0 ± 0.3	38.2 ± 0.2	39.0 ± 0.2
CrossTalk	0.031 ± 0.001	0.0016 ± 0.001	0.016 ± 0.001	0.017 ± 0.001

・ $Gain = 2.0 \times 10^5$

Serial No.	9240	30093	30096	30099
NoiseRate[kHz]	149.3 ± 0.4	52.0 ± 0.3	53.4 ± 0.3	50.8 ± 0.3
CrossTalk	0.022 ± 0.001	0.0030 ± 0.001	0.028 ± 0.001	0.028 ± 0.001

表 3.3 NoiseRate および CrossTalk 測定結果

基本性能測定から新型MPPC3つの特性には大きな差がないことがわかった。したがって、以下の性能測定では新型MPPCはSerial No.30093のみ測定を行い、1600pixel MPPC(Serial No. 9240)と比較する。

<C, V₀の温度依存性>

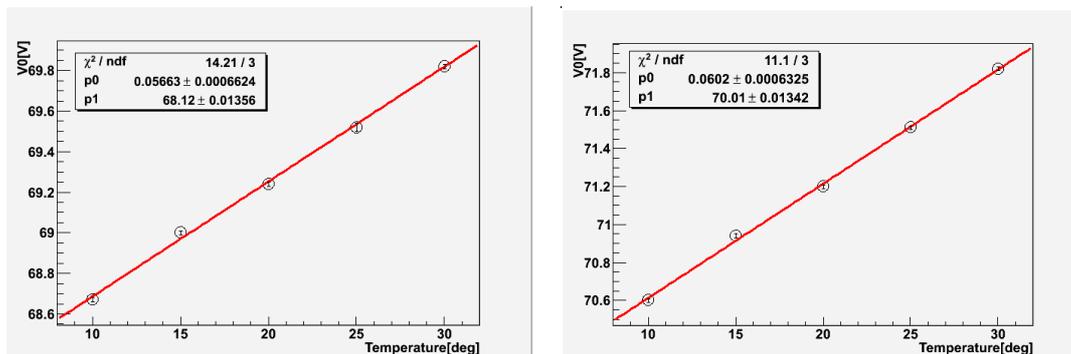


図 3.7 Serial No.30093 (左) と 9240 (右) の V₀の温度依存性

Serial No.	9240	30093
V ₀ [V](T=0°C)	68.12 ± 0.02	70.01 ± 0.01
ΔV ₀ /ΔT[mV/K]	56.6 ± 0.7	60.2 ± 0.7

表 3.4 V₀の温度依存性の測定結果

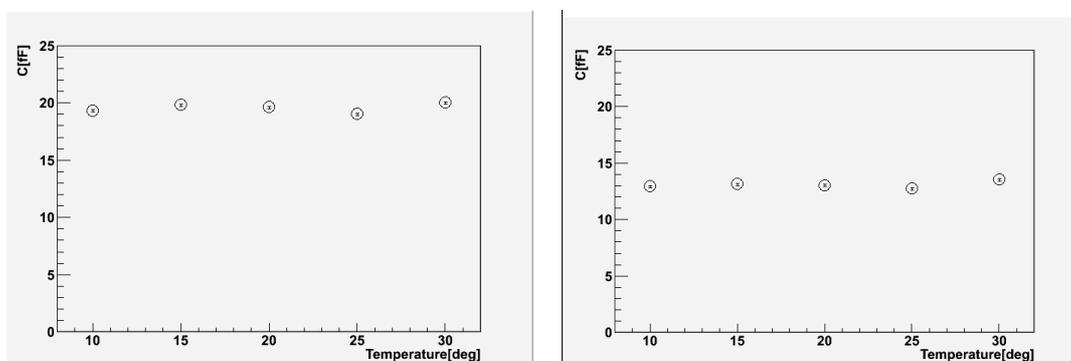


図 3.8 Serial No.30093 (左) と 9240 (右) の Cの温度依存性

<After Pulse>

Serial No.	9240	30093
After Pulse[%]	13.5 ± 0.4	4.7 ± 0.6

表 3.4 After Pulse の測定結果 (温度 25°C)

第 4 章 MPPC の Response Curve の測定

4.1 測定方法

<測定回路図>

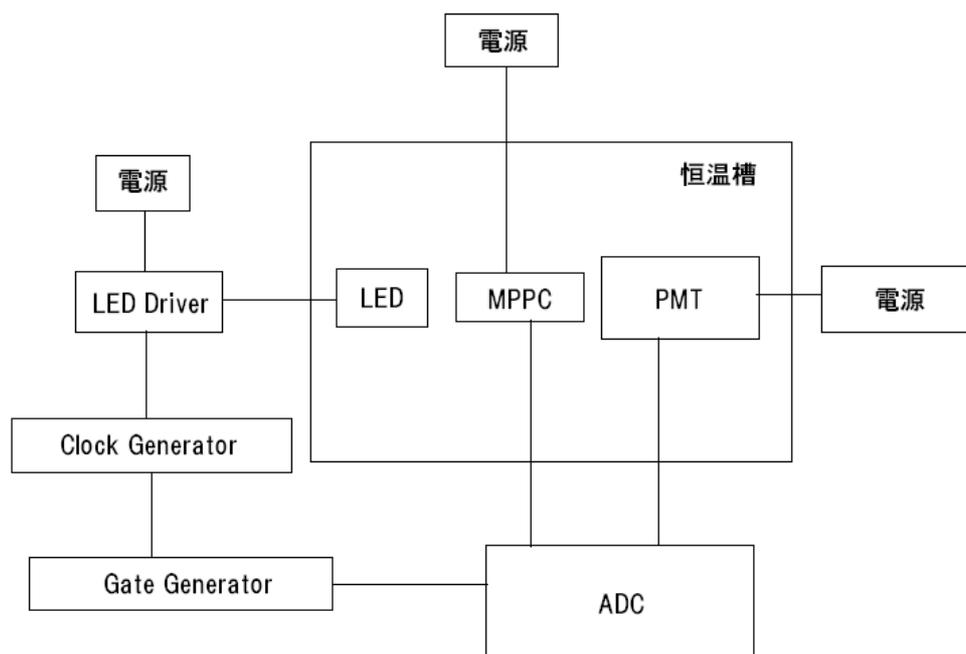


図 4.1 Response Curve の測定回路図。

恒温槽内部で外部の光を遮断して測定を行う。LED の光は指向性があるため、MPPC と PMT の両方に光が当たるようにセッティングを行った。LED 光源は MPPC の感度が良い青色（波長）のものを使用した。PMT は 2 インチのものを用い、バイアス電圧は 600V に設定した。MPPC のバイアス電圧は新型、1600 ピクセル共に温度 25°C で $dV=2.0$ となるように設定した。

ここで同時に測定をした PMT と MPPC の信号を横軸：PMT の ADC Count からペダスタルを差し引いた値、縦軸：MPPC の検出光子数としてプロットしたものを応答曲線（Response Curve）という（MPPC の ADC Count を検出光子数に換算する方法は付録 A を参照）。単純にダイナミックレンジが大きい＝光量が多いときの検出光子数が多いと考えて新型 MPPC のダイナミックレンジの評価を行う。

4.2 結果

- ・応答曲線の測定結果

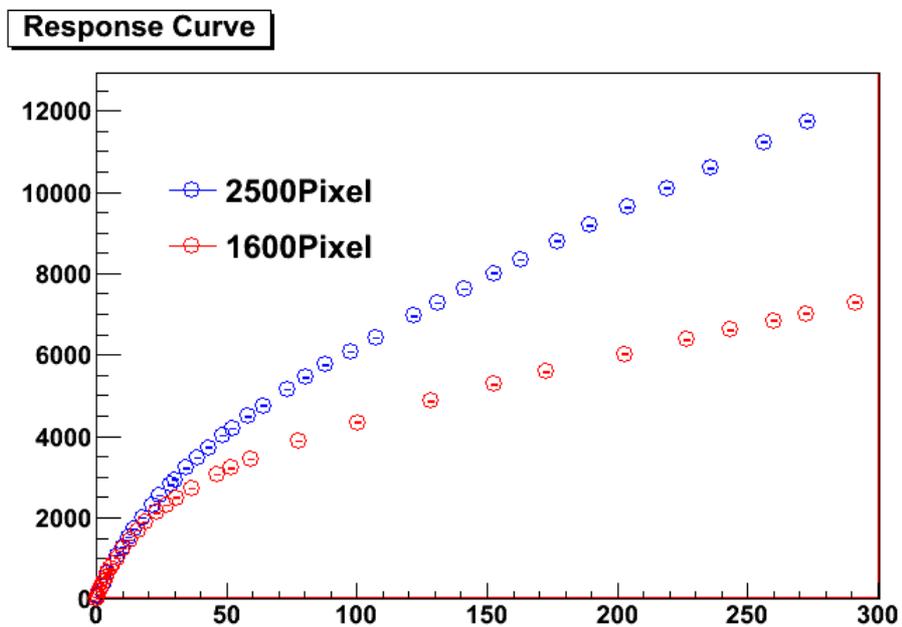


図 4.2 Response Curve の測定結果

グラフより、光量大きい領域になるほど、新型 MPPC と 1600pixel MPPC との検出光子数の差が大きくなっている。それに伴い、ダイナミックレンジにも大きく差が出ていると評価できる。

・測定データの比

測定した MPPC の検出光子数の比を取り、光量との相関を調べた。

具体的には、1600pix のデータ点を (Xa、Ya)、2500pix のデータ点を (Xb、Yb) と定義し、Xa と Xb の差が 5 以下になるようなデータを取り出し、狭い範囲でなら検出光子数が直線に近似できると仮定して、

$$Y'_b = Y_b \times \frac{X_a}{X_b} \quad (4.1)$$

という式を使って Yb を補正し、Ya と Yb' の比と Xa との関係をプロットしたのが図 4.3 である。

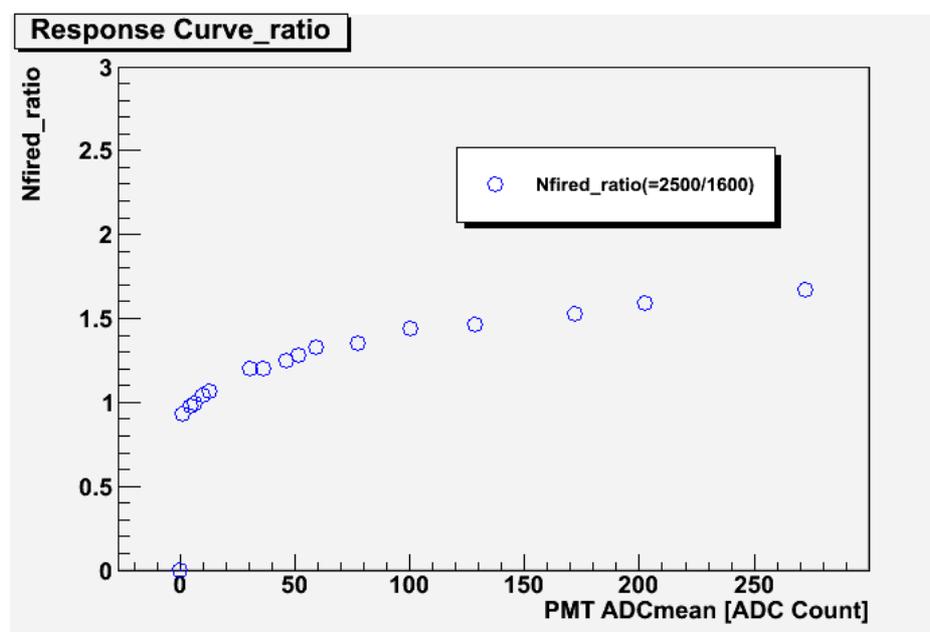


図 4.3 検出光子数の比

低光量の際は検出光子数の比はほぼ 1 に近い値になっている。そして光量が増えるに連れて比率が大きくなっていき、最終的に約 1.6 程度に収束しているように見える。

この値はピクセル数の比約 1.56 に近い値になっているが、これよりもさらに光量が上がった場合は比がさらに大きくなってしまいう可能性は十分にある。

第5章 まとめ

5.1 まとめと考察

新型 MPPC の基本性能測定を始めとした実験による結果、新型 MPPC には以下のような特徴が見られた

- ・ Gain が小さい。
- ・ Noise Rate が少ない
- ・ After Pulse が小さい。
- ・ 大光量における検出光子数が多い。

Gain が小さくなった原因はピクセルサイズの縮小が原因と考えられる。1600pixel MPPC との比をとってみると、Gain の測定結果：0.67 倍、ピクセルサイズ比：0.64 倍となり、非常に近い値になっている。これにより、APD の静電容量 C は APD ピクセルを並行平板コンデンサーと考えたときの静電容量 C とほぼ同じだと予想される。

Noise Rate が減少した原因については今のところ不明。浜松ホトニクス社曰く、APD に使用される半導体の質が向上したということだが、実験的な検証は行うことができなかった。

After Pulse が減少したことは上記の Noise Rate の減少と同じく不明。After Pulse には半導体中の格子欠陥が大きく寄与するため、APD の半導体材質の変化が影響している可能性はある。要検証。

検出光子数の増加はピクセル数が増加したことに起因しており、ダイナミックレンジが向上したことの証明と言える。ただし、今回の測定では完全に Saturation をする領域までデータを得ることはできなかったため、ダイナミックレンジを定量的に評価することができなかった。

5.2 結論

今回測定した新型 MPPC は ILD カロリメータでの要求性能

- ・ $\text{Gain} > 10^5$
- ・ $\text{Noise Rate} < 10^6$

を十分に満たしている。

また、開発目的であるダイナミックレンジの向上も、実験的に確かめることができた。

5.3 今後の課題

今後の課題としては以下のことが挙げられる。

- ・ Noise Rate および After Pulse の変化の原因調査、および半導体材質の変化が与える影響の調査

- ・ 新型 MPPC の電圧回復時間の測定。MPPC の回復時間が非常に小さい場合、同じ時間幅で After Pulse を測定したときに結果に差が出ると考えられる。そのため、 After Pulse の変化の原因を探るためにも、回復時間を測定していく必要がある。

- ・ ダイナミックレンジの定量的な評価方法の確立。具体案としては実験から得られるデータがどのような関数に従うかを調べることで、 Saturation をする領域まで、光源の時間スケールを一定に保ちつつ光量を増やす方法を探ること、などが挙げられる。

付録 A MPPC の検出光子数の算出方法

MPPC の信号を ADC で測定し、その ADC Count から検出光子数を算出する方法を説明する。

まず、式 (2.3)、(2.4) より

$$Gain = C(V_b - V_0) = \left(\frac{d \times r}{A} \right) \quad (\text{A.1})$$

アンプを通さない場合の d を d_0 とすると、

$$Gain = C(V_b - V_0) = (d_0 \times r) \quad (\text{A.2})$$

よって、

$$d_0 = \frac{C}{r} (V_b - V_0) \quad (\text{A.3})$$

となり、それぞれの MPPC の測定結果 C 、 V_0 があれば d_0 を見積もることが出来る。

測定した MPPC の信号の ADC 分布は非常に幅の狭いガウス分布をしているので、Fitting により得られた値を $Q \pm \sigma_Q$ とすると、MPPC の検出光子数 N_{fired} は、

$$N_{\text{fired}} = \frac{Q}{d_0} \quad (\text{A.4})$$

$$\sigma_{N_{\text{fired}}} = \frac{\sigma_Q}{d_0} \quad (\text{A.5})$$

と求めることができる。

実際に応答曲線作成時に計算にしようとした $dV=3.0V$ 、 $T=25^\circ\text{C}$ の時の d_0 の値を表 A.1 にまとめておく

Serial No.	9240	30093
C[fF]	19	12.7
d_0 [ADC Count]	0.22	0.15

表 A.1 測定した MPPC の静電容量 C と d_0

謝辞

この研究をした一年間で、高エネルギー物理学研究室の皆様には大変お世話になりました。指導教員の竹下徹先生を始め、長谷川庸司先生、研究員の小寺克茂さん、研究室の友人達など、多くの人に支えていただいたからこそ、一年間研究を続けることが出来たと思います。特に、小寺さんには研究に当たって、お忙しい中様々なアドバイスをいただきました。また、研究室の仲間たちとも活発に議論を交わし、研究に詰まったときなど、よく相談に乗ってもらっていました。研究に当たりお世話になった皆様に、この場を借りてお礼申し上げます。

私が信州大学で過ごした4年間はあっという間でしたが、充実したものだったと思います。

最後に、これまでずっと支えてくれた両親に感謝の言葉を申し上げたいと思います、本当にありがとうございました。

2010年 3月

小林 秋人

参考文献

- [1] ILC project <http://aaa-sentan.org/ILC/>
- [2] ilc <http://www.linearcollider.org>
- [3] 浜松ホトニクス社資料 <http://jp.hamamatsu.com>
- [4] 放射線計測ハンドブック
Glenn F. Knoll 著 木村逸郎／坂井英次 訳
- [5] 素粒子物理入門 渡邊靖志 著
- [6] 前田高志 『リニアコライダー実験用カロリメータのための光検出器 MPPC の研究開発』
筑波大学 数理物質科学研究科 修士学位論文 (2007年)
- [7] 田村勇氣 『次世代線形加速器実験へ向けての新型光検出器の評価』
神戸大学 自然科学研究科 修士学位論文 (2007年)
- [8] 坪川貴俊 『MPPC の性能評価方法の研究』
信州大学 工学系研究科 修士学位論文 (2007年)
- [9] 佐久間隆幸 『MPPC の安定性能の研究』
信州大学 理学部物理科学科 卒業論文 (2008年)
- [10] 戸塚俊介 『MPPC とストリップ型プラスチックシンチレータの研究』
信州大学 理学部物理科学科 卒業論文 (2009年)
- [11] 五味慎一 “半導体光検出器 MPPC の性能評価システムの構築”
京都大学 理学研究科 修士学位論文(2008年)
- [12] 素粒子を探る粒子検出器 政池明 著
- [13] 半導体エレクトロニクス 石原宏 著