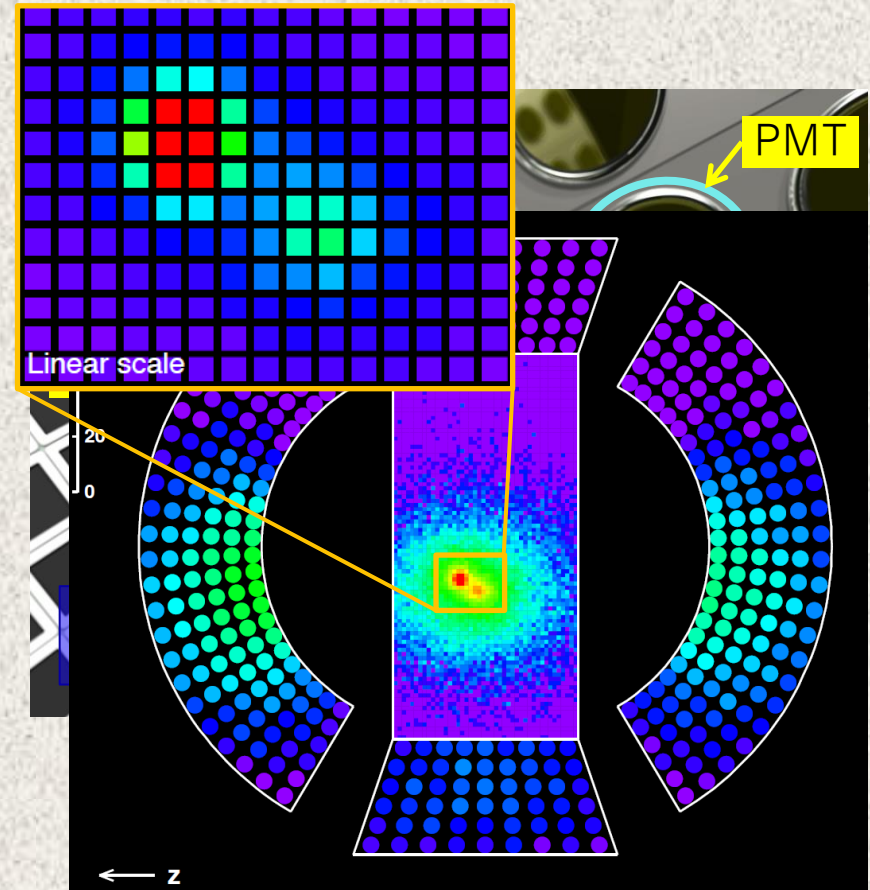
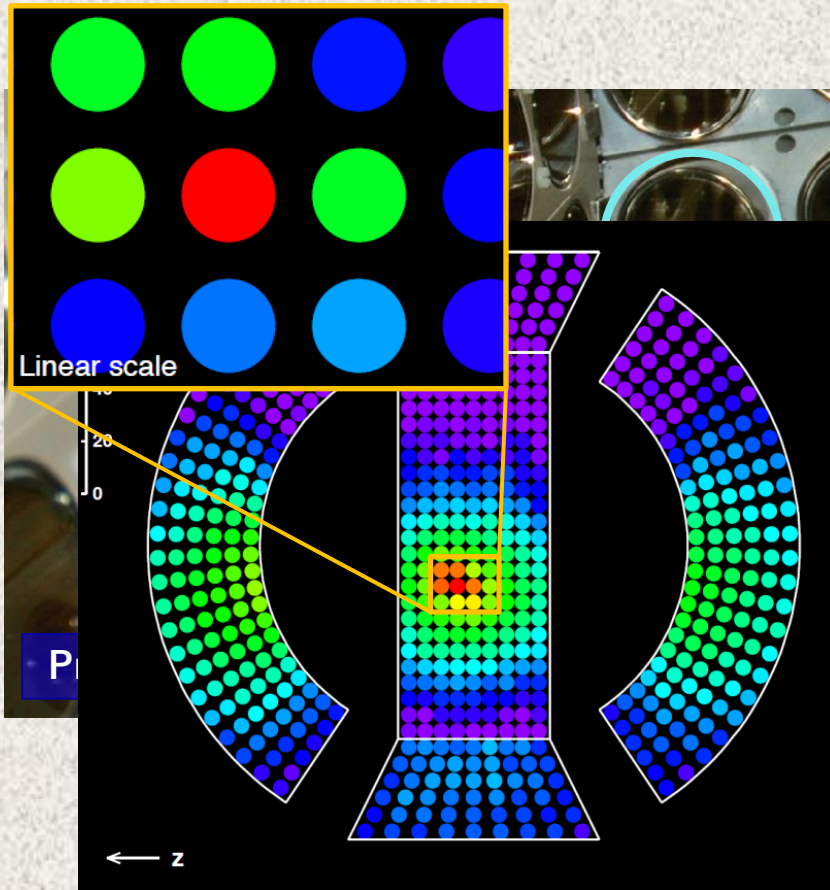


# MEG-II実験に向けたMPPC読み出し 液体キセノン検出器の研究開発

金子大輔、他MEGコラボレーション

# MEG-II実験の液体キセノン $\gamma$ 線検出器

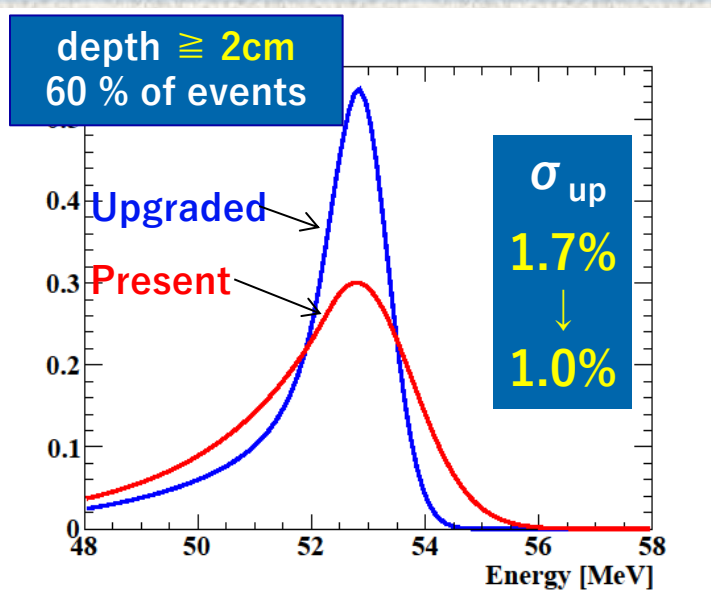
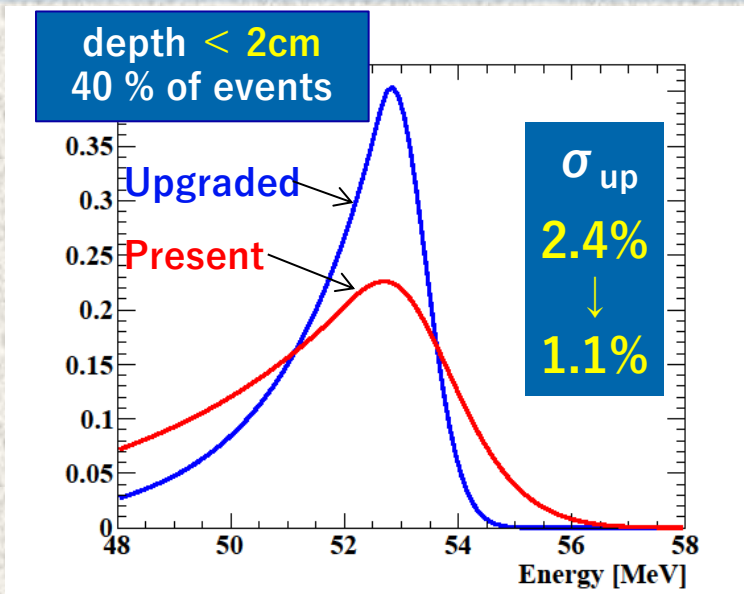
2



$\gamma$ 線の入射面のPMTをMPPCに交換  
175nmの波長に感度  
1チャンネルで $12 \times 12 \text{ mm}^2$ の面積  
約4000個

このようなセンサーはまだ市販されて  
いない。  
浜松ホトニクス社と協力して開発し  
ている。

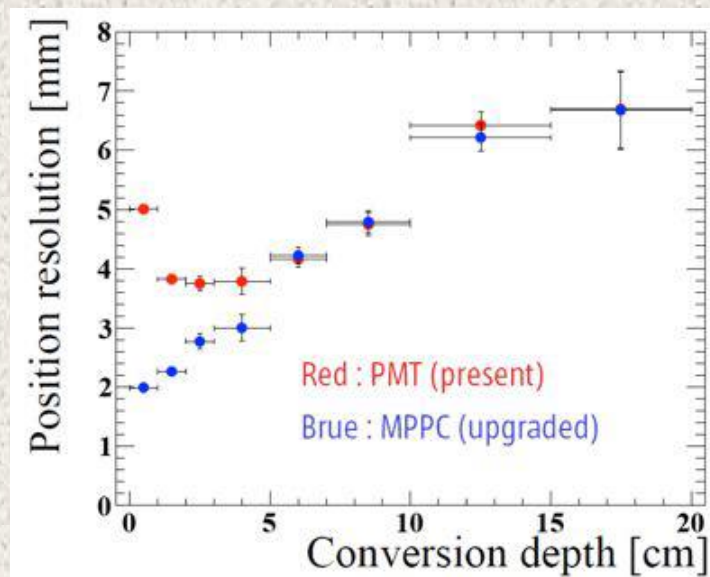
# 検出器の性能改善



↑ エネルギー分解能の比較

位置分解能の比較 →

検出効率の改善は約10%



これまでの日本物理学会発表

...

2012 秋

: VUV有感MPPCの試作試験  
 ◎ LXeに対し実用的なPDE

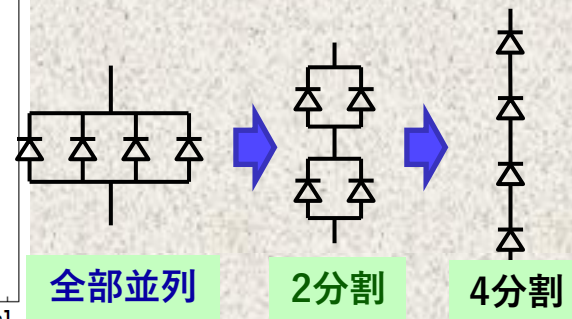
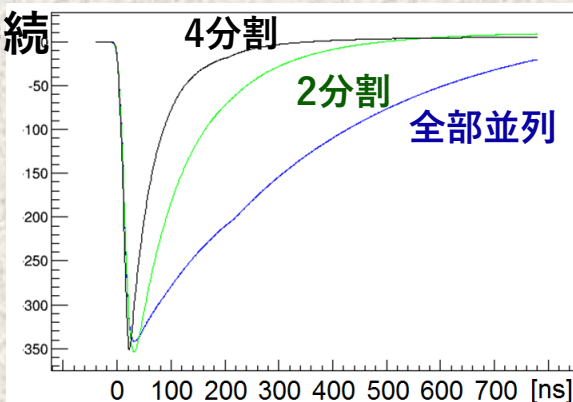
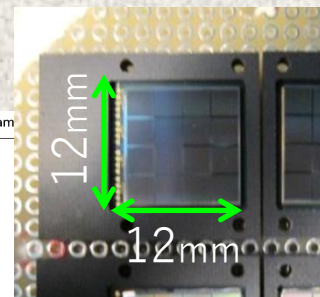
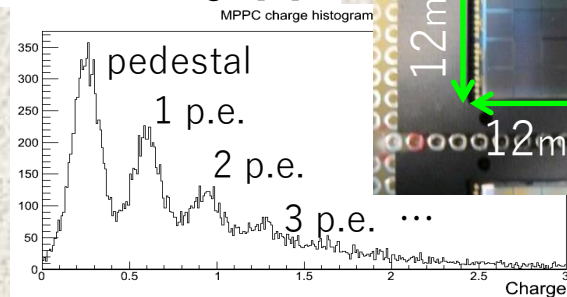
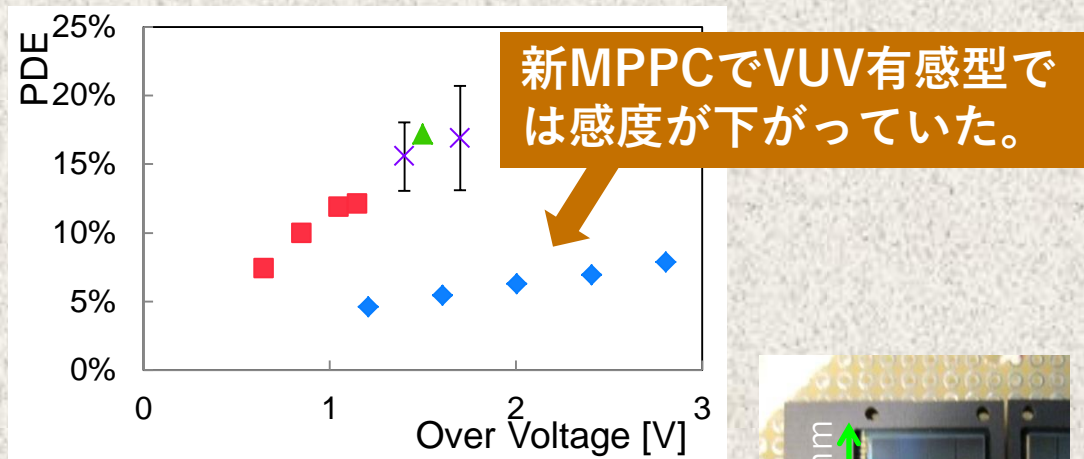
2013 春

: 初の12mm角かつVUV有感型  
 ◎ 設計の寸法で1光電子弁別可能  
 △ 12mm角だと波形がなまる  
 ( $\tau \sim 200\text{ns}$ )

2013 秋

: 結晶を分割・直列(Hybrid)接続  
 することで波形の改善  
 ◎ 12mm角でも  $\tau < 50\text{ns}$

高レート環境での使用は？





## G型

旧世代 VUV有感  
PDE 17% 確認済み

## I型

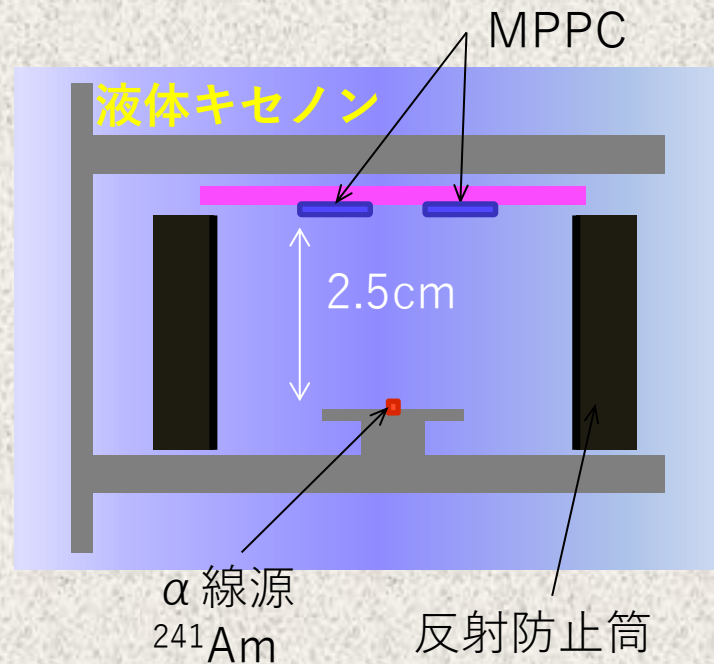
アフターパルス抑制機構

新世代VUV有感  
表面にVUVを吸収する層  
ができていてPDE低い

I型の問題を改善した  
サンプルを作成、PDE  
の測定を行った。

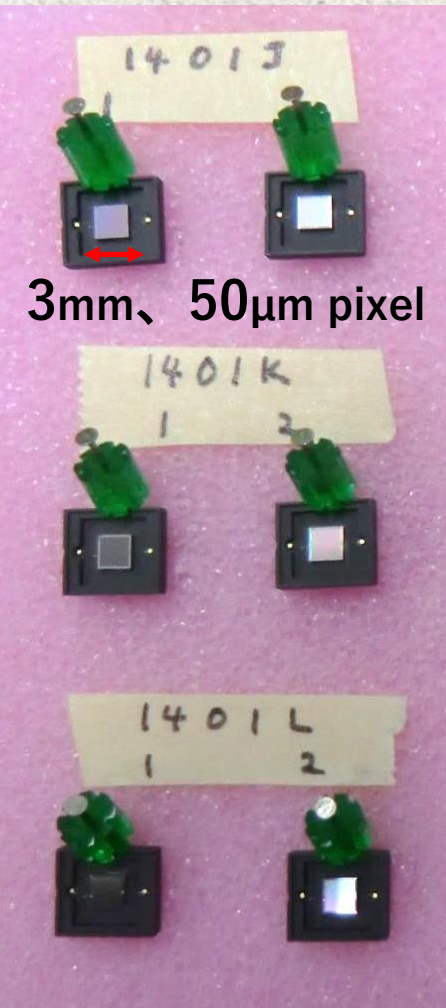
## J・K・L型

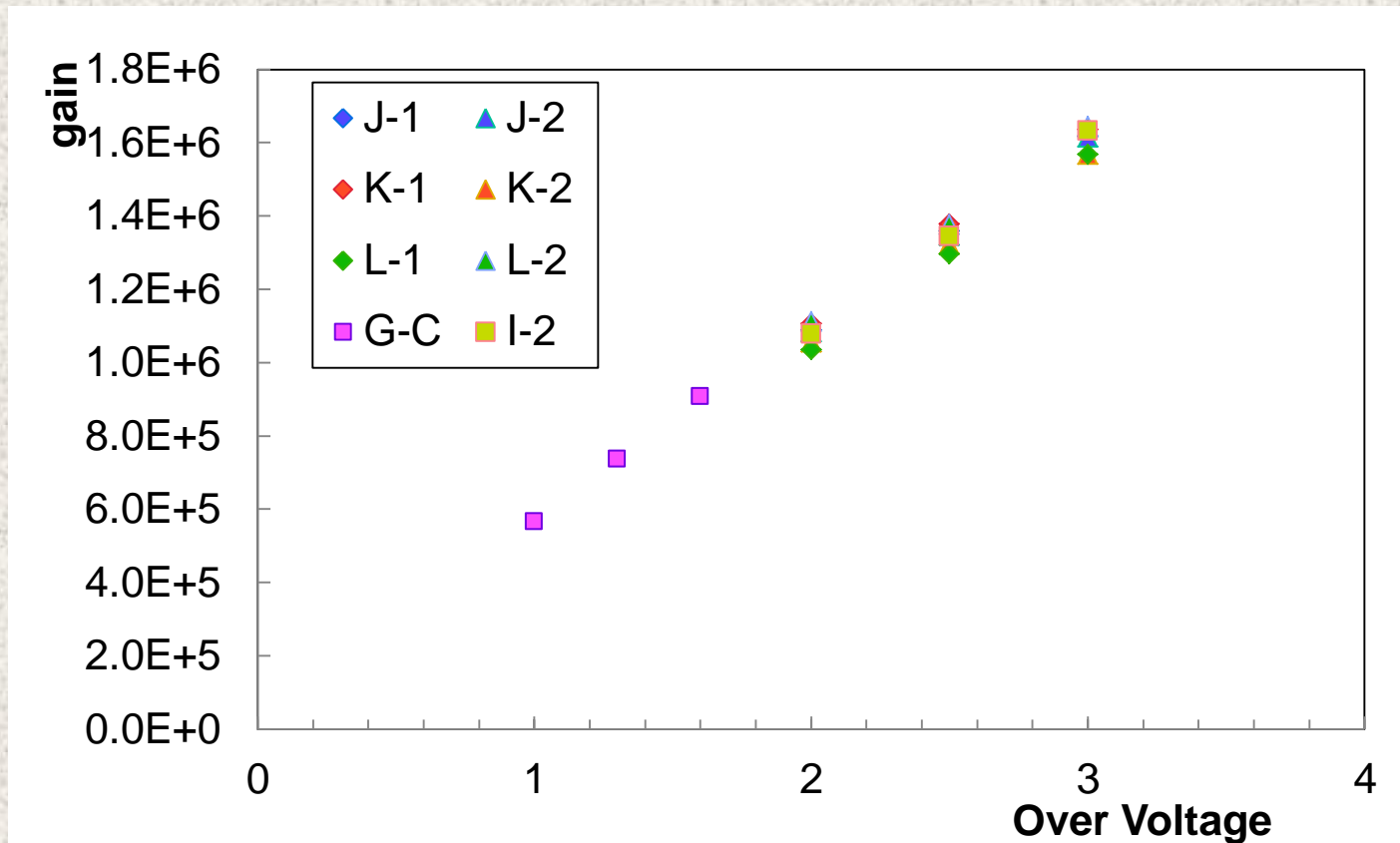
各2個  
表面の処理の違い  
L型はI型と同等品



α線イベントで計測される光電子数を用いてPDEを求める。

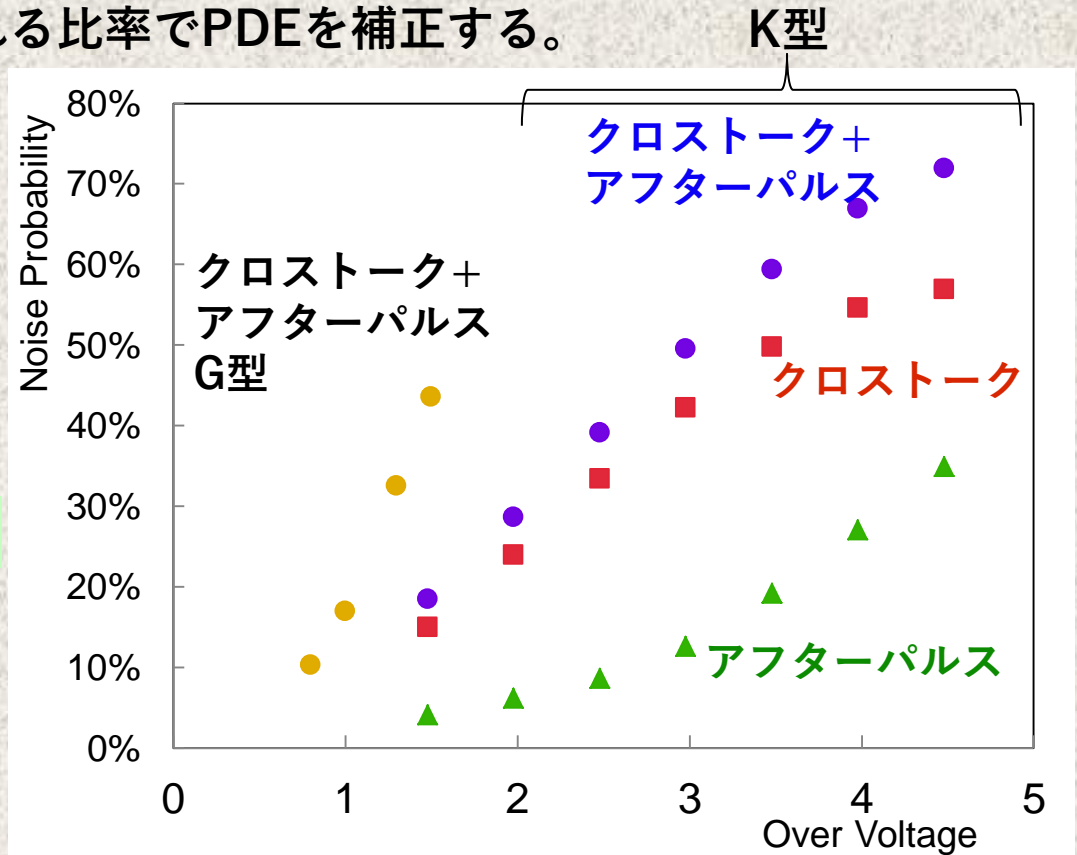
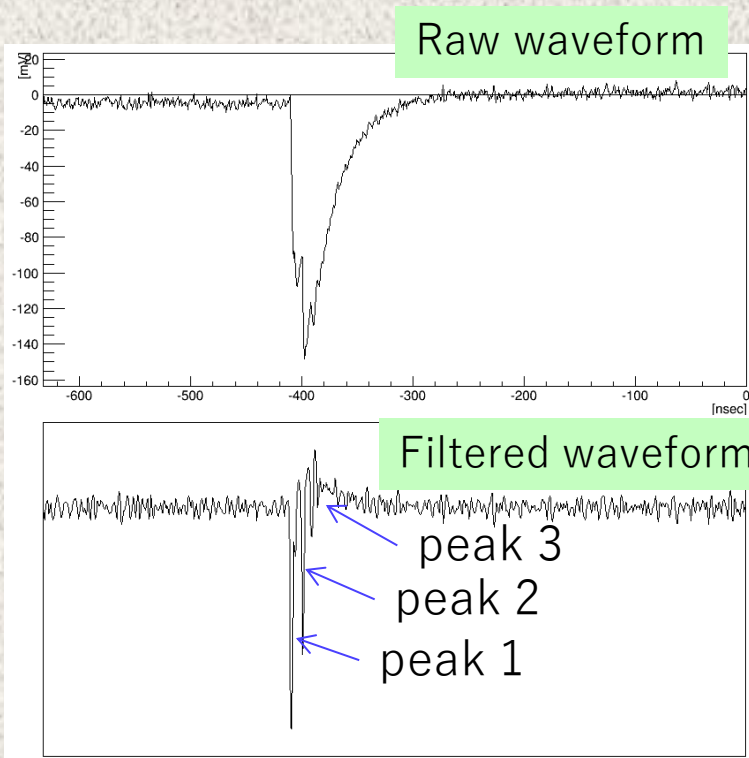
クロストーク・アフターパルスによる寄与は別に測定し、取り除く。





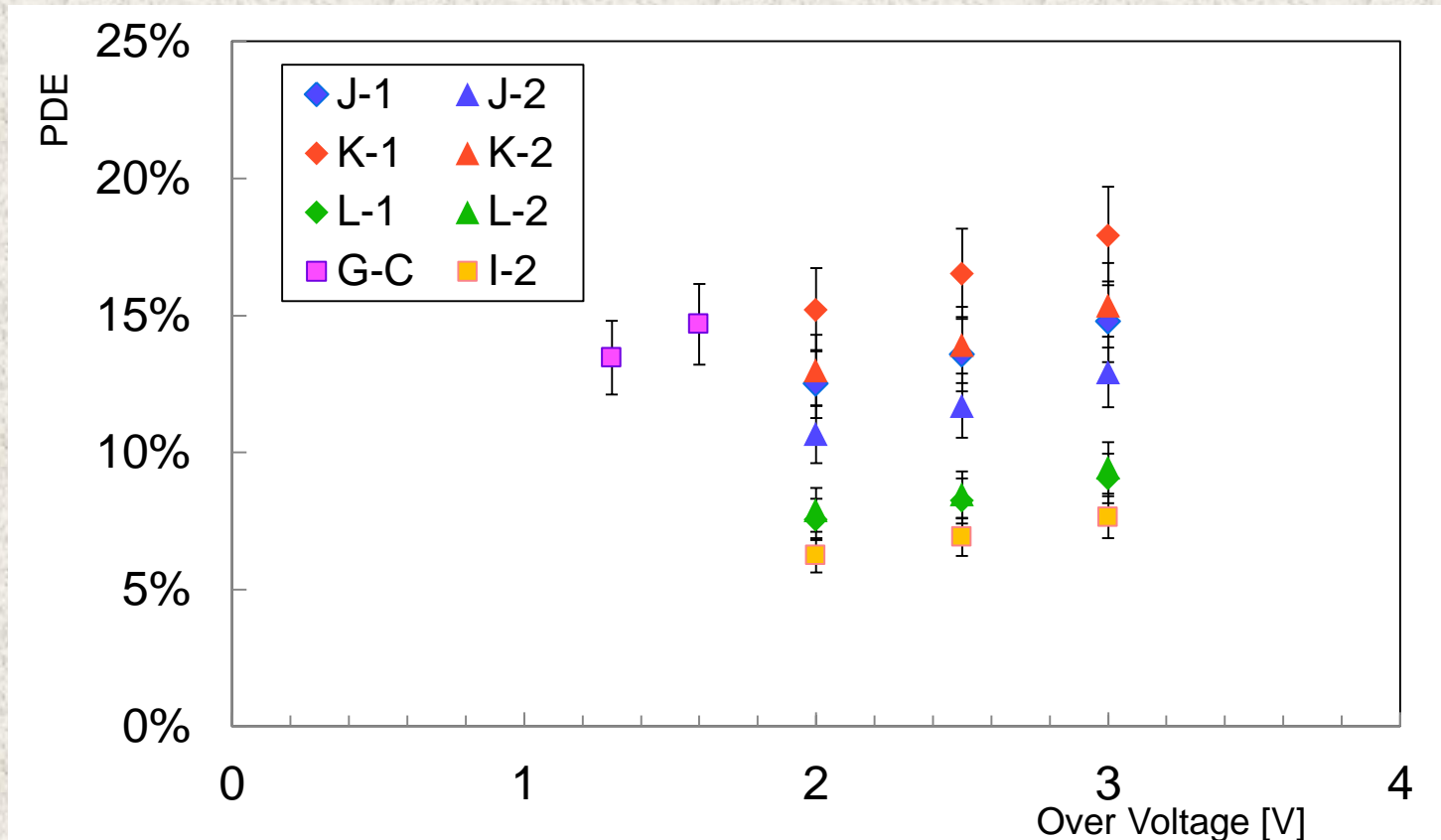
ゲインは各素子とも $3 \times 3 \text{mm}^2$ ,  $50 \mu\text{m}$ ピッチのMPPCの典型的な値に揃っている。キャパシタンスは約 $85 \text{fF}$

LEDを用いて、クロストークとアフターパルスの確率を求める。  
これらの寄与で信号が増幅される比率でPDEを補正する。



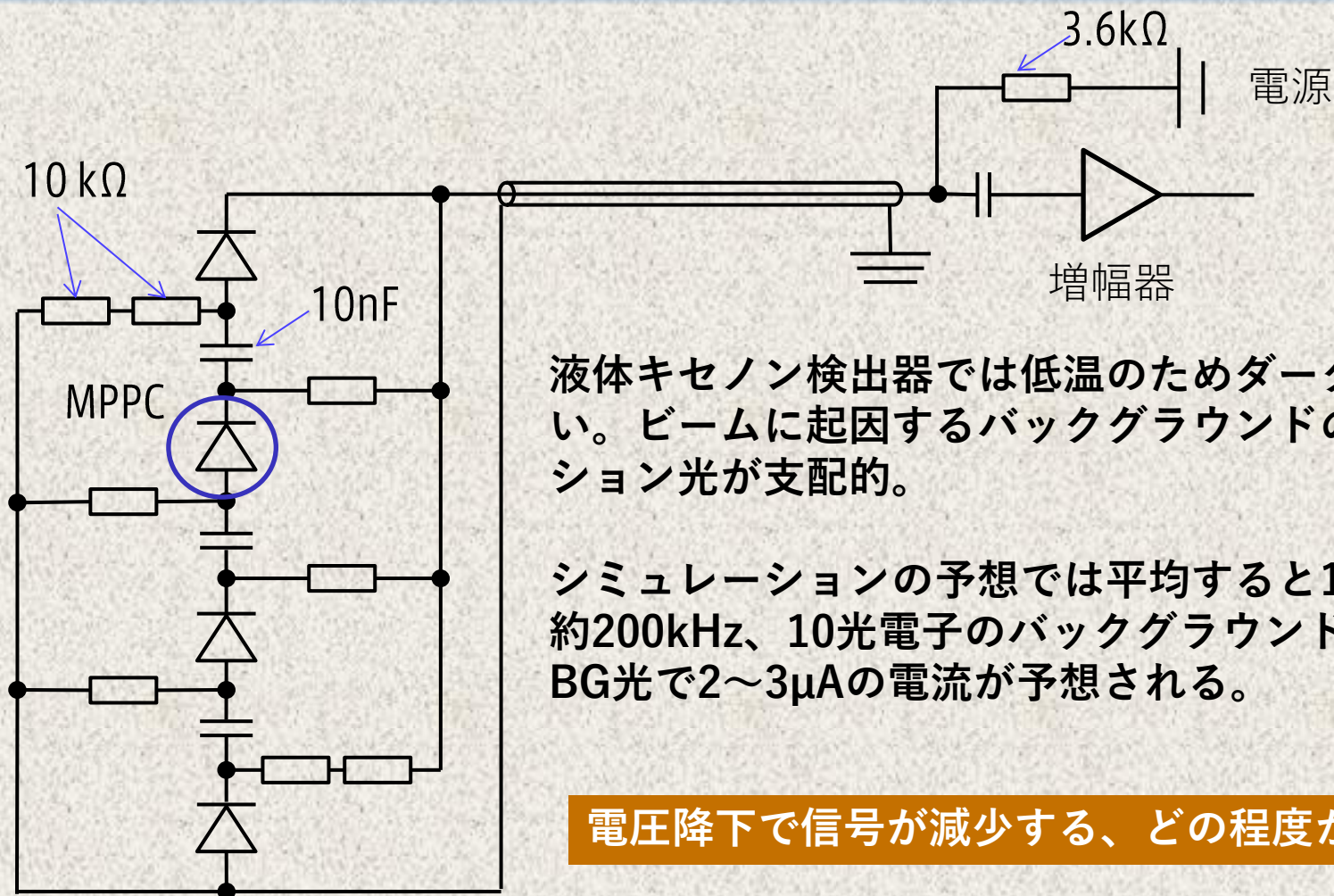
↑ 波形からパルスの時間と高さを求める

アフターパルスの確率が他の浜松製新MPPCと同様抑えられている。  
最終量産型にはクロストーク抑制の仕様も追加する予定。



PDE(光子検出効率)はK型が最も高く、J型が次ぐ。L型はI型と変わらない。  
J-1・J-2とK-1・K-2の差は測定時の誤差と見られる。  
プロトタイプ用の600個はK型と同様のプロセスで生産する。





hybrid接続例：  
4分割の場合

液体キセノン検出器では低温のためダークノイズは少ない。ビームに起因するバックグラウンドのシンチレーション光が支配的。

シミュレーションの予想では平均すると1チャンネルに約200kHz、10光電子のバックグラウンド。BG光で2~3 $\mu$ Aの電流が予想される。

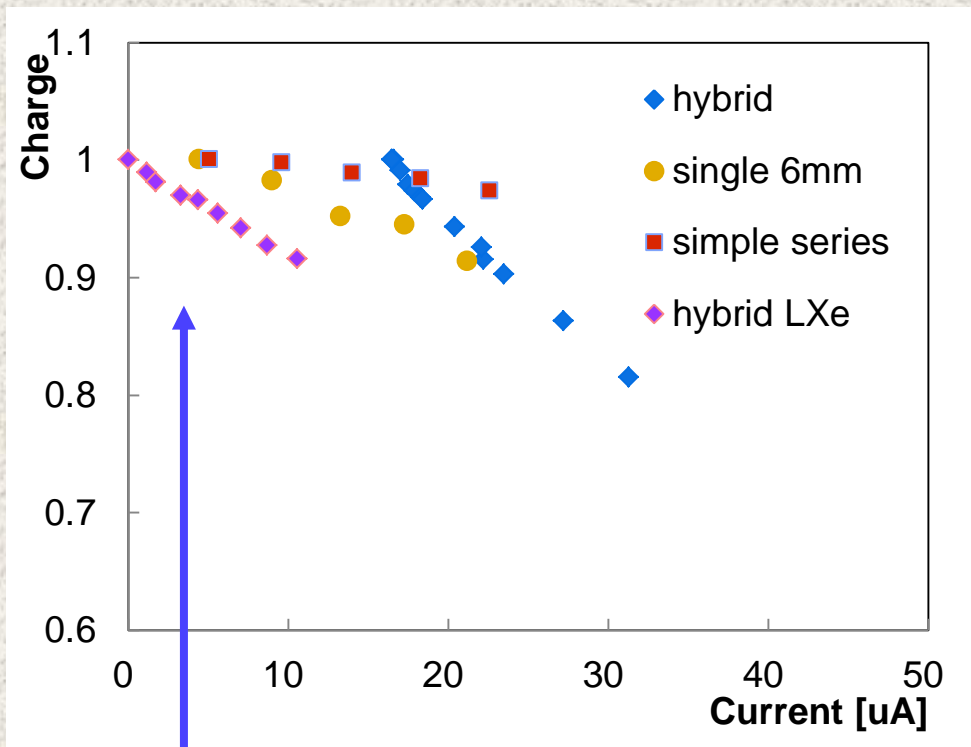
電圧降下で信号が減少する、どの程度か？

高レートで波形が変化しないか？

ハイブリッド接続では、抵抗が余分に入っているため、単純な直列に比べ電圧降下が大きい。

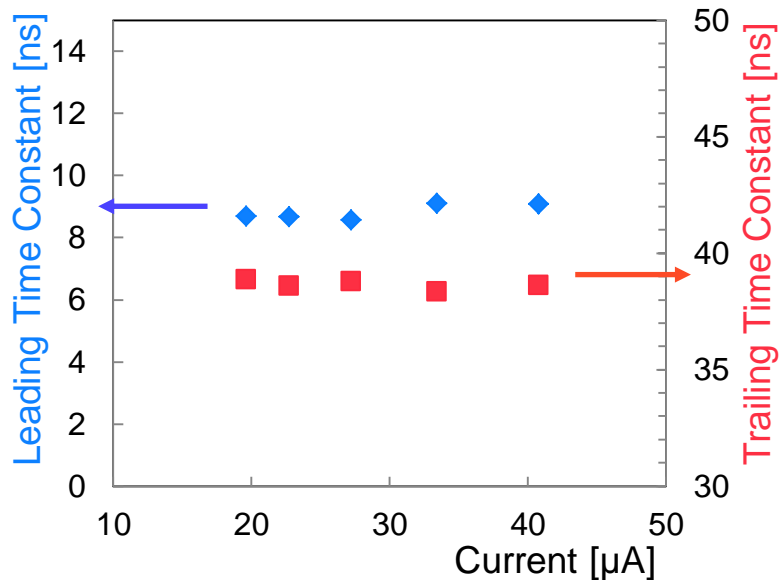
LXe温度での傾きは $0.8\%/\mu\text{A}$ 。  
( $11\text{k}\Omega$ の抵抗に相当)

一方、波形の変化はほとんど無い



MEG-II  
nominal  
beam

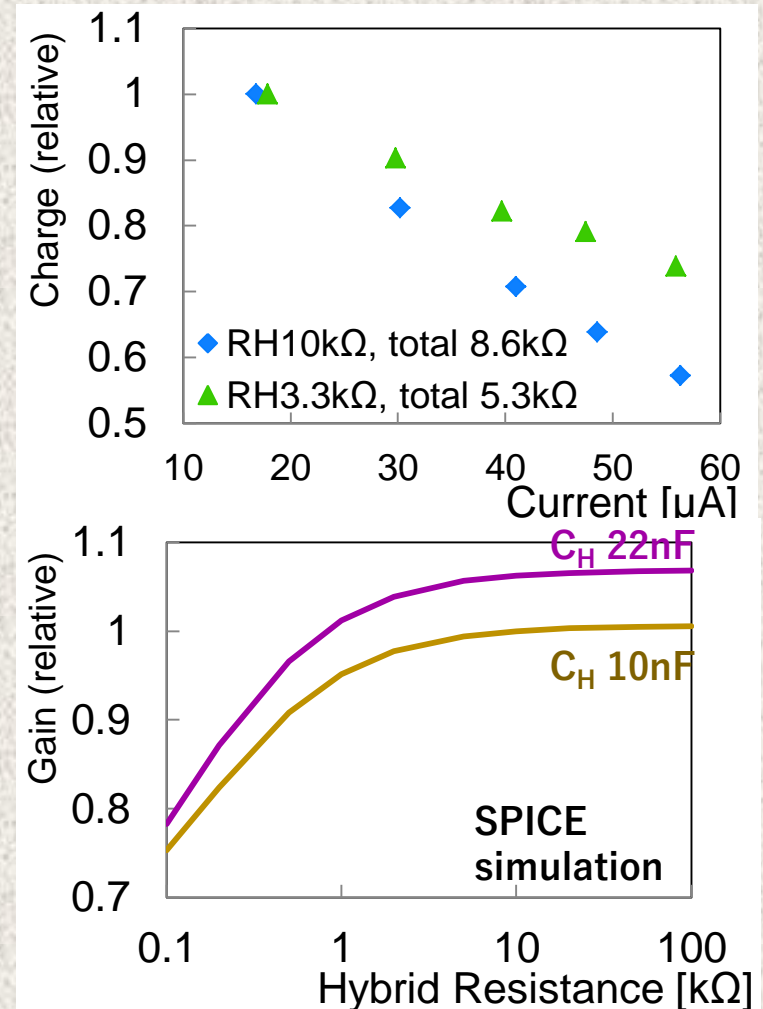
↑  
電流に対する信号電荷の変化



ビームが10%変動すると、0.2~0.3%スケールが変動することになる。分解能に比べて無視できるが、ビーム強度が不安定になるとさらに大きくなる可能性もある。

## 考えられる対策

- 抵抗 $R_H$ を小さくする
  - バイアス線のインピーダンスが低下して、測定できる電荷が下がる。  
1k $\Omega$ まで下げても、電荷の減少は軽微。
  - 電源ラインの抵抗も小さくする必要
  - 同時に $C_H$ は大きくする(10 $\rightarrow$ 22nF)
- 電源をモニターしてバイアス電圧を補正する(予備)
  - 動作は確認済。



現在

プロトタイプ用の600個の量産が  
ちょうど終わったところ（昨日出荷された！）

2014 春-夏

600個を常温で大量検査  
うちいくつかを液体キセノン中で詳細に試験

2014 夏-秋

プロトタイプ試験の準備

2014 冬

プロトタイプでビーム試験

2015

実機建造

2016 ~

コミッショニング

MEG-II 物理run

実機的设计  
試作試験

部品の製造





MEG-II実験に向けて液体キセノン検出器の開発を行っている。

液体キセノン用のMPPCの感度について

浜松の新世代型MPPCの技術で真空紫外線感度の高いものが完成した。  
最も感度の高い方式で600個の量産を行った。

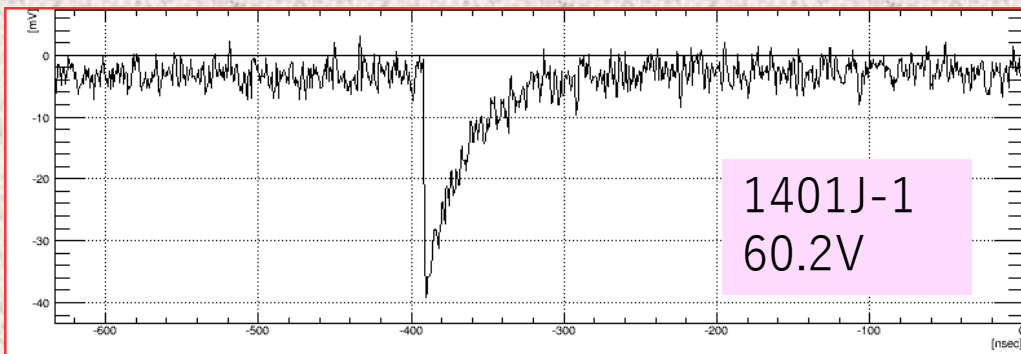
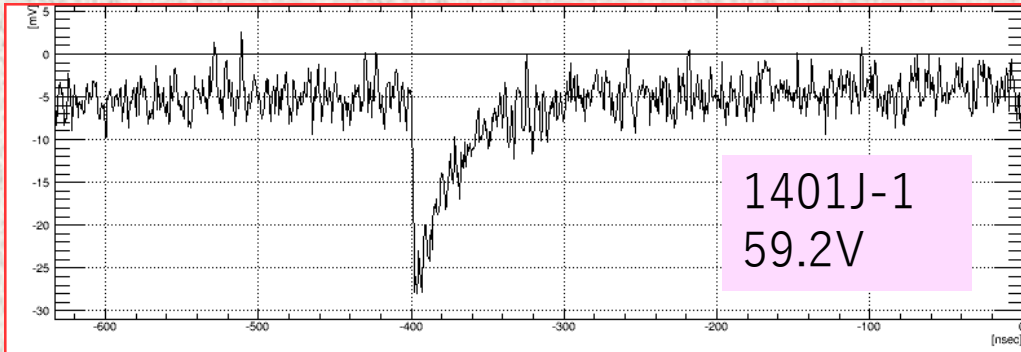
センサーのレート耐性について

大電流による電圧降下で、信号が小さくなる。波形には影響しない。  
影響は深刻ではなく、軽減することが可能。

今後

まもなくプロトタイプ用MPPCの試験。  
今年中にプロトタイプ製造、ビーム試験を予定している。

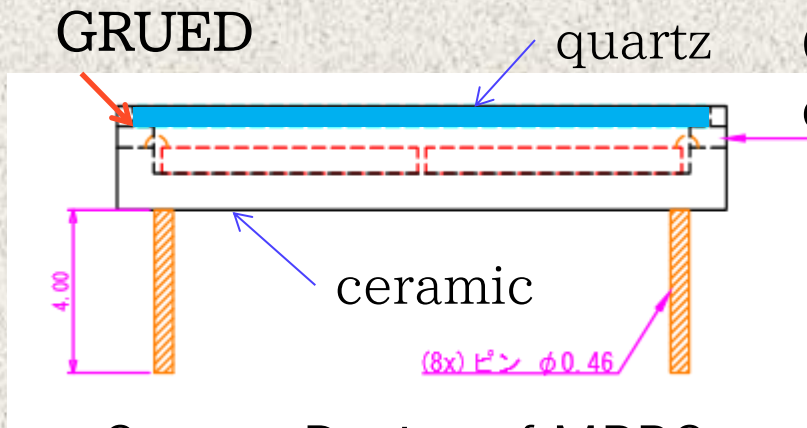
終了



<b>Vov [V]</b>	<b>2.0</b>	<b>2.5</b>	<b>3.0</b>
<b>Rise time [ns]</b>	0.67	0.63	0.60
<b>Fall time [ns]</b>	25.5	25.6	25.6

Result of waveform fitting  
for J-1 type sample

No significant difference is seen in  
different samples.



Quartz window is going to be glued on ceramic base.

- Stability against thermal cycle
  - Contamination to LXe
- are OK?

Current Design of MPPC

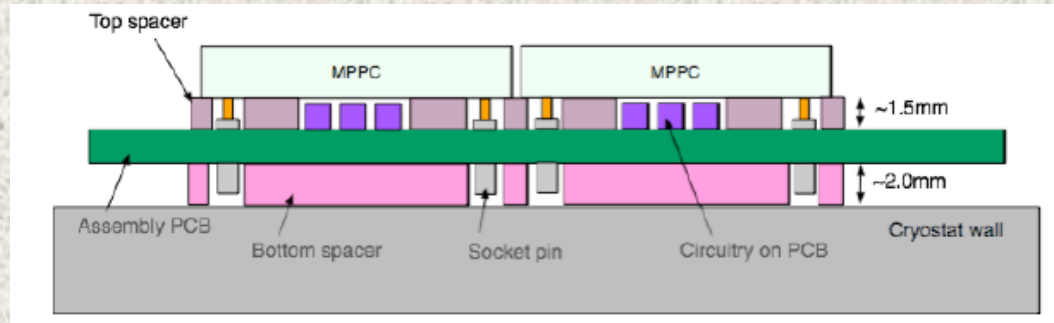
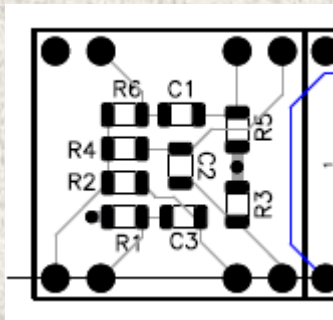
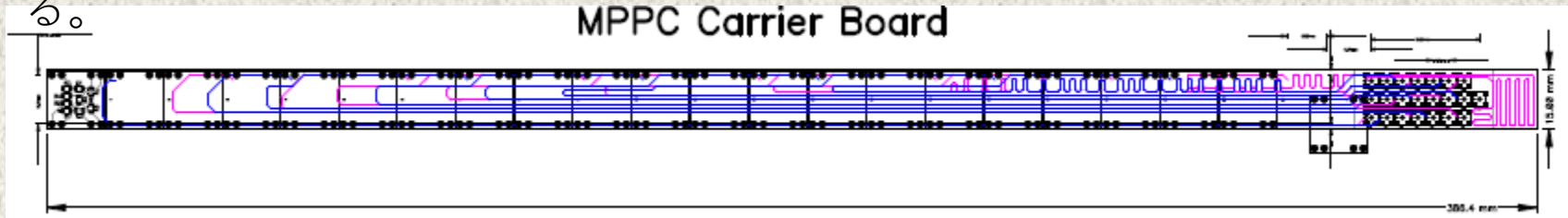


3 types ( $\times 2$  each) of samples were produced.

- Silicone type A
- Silicone type B
- Conductive epoxy

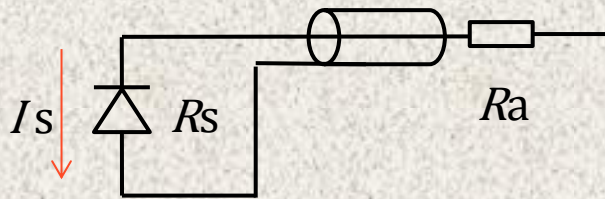


MPPC取付基板の設計、PSIの技術者との協力による。

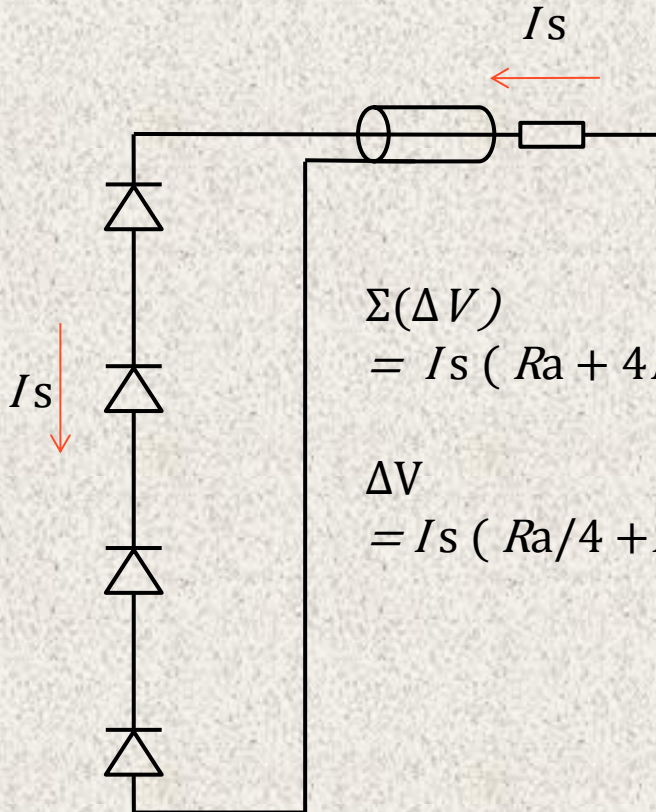


基板を検出器に取り付ける方式についても検討中。

# How current flows

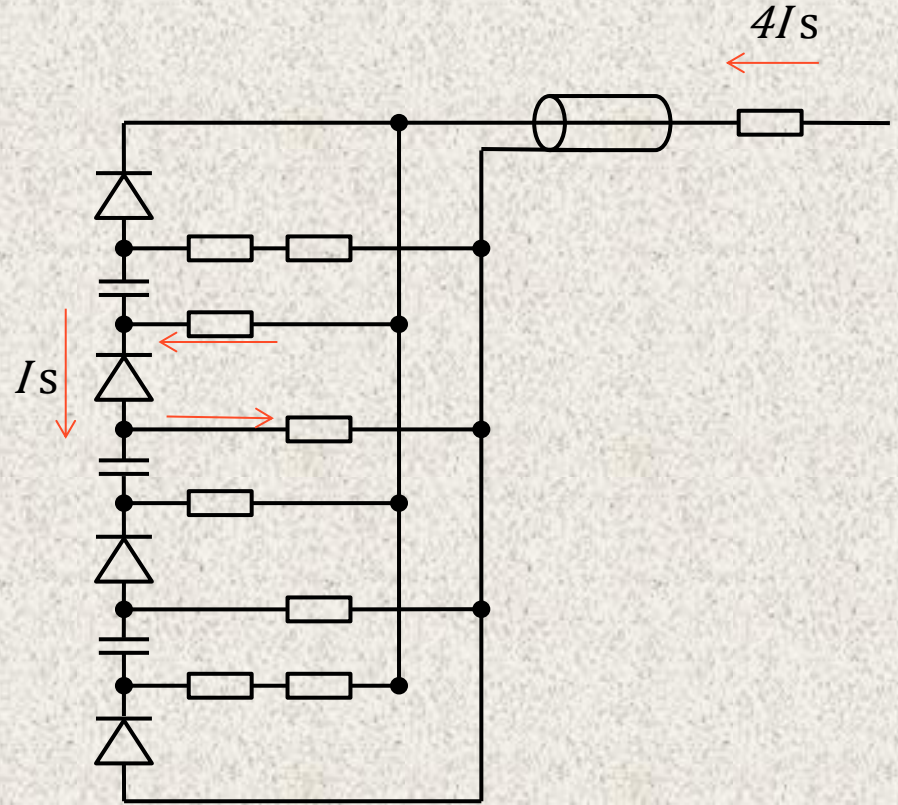


$$\Delta V = I_s (R_a + R_s)$$



$$\begin{aligned} \Sigma(\Delta V) &= I_s (R_a + 4R_s) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta V &= I_s (R_a/4 + R_s) \end{aligned}$$

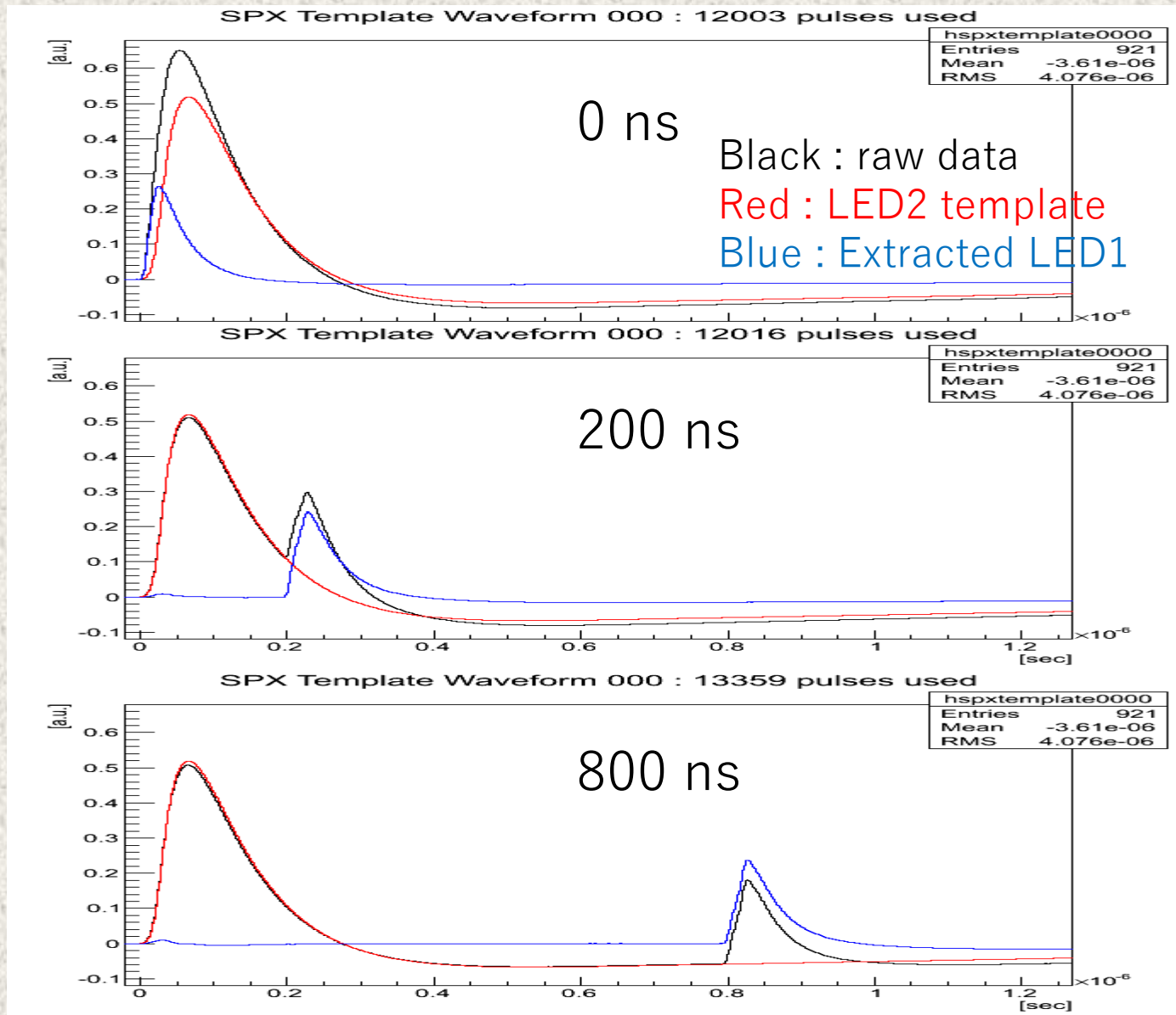


$$\begin{aligned} \Delta V &= 4I_s R_a + I_s (R_s + R_h) \\ &= 4I_s (R_a + (R_s + R_h) / 4) \end{aligned}$$

# Time dependent voltage drop 1

19

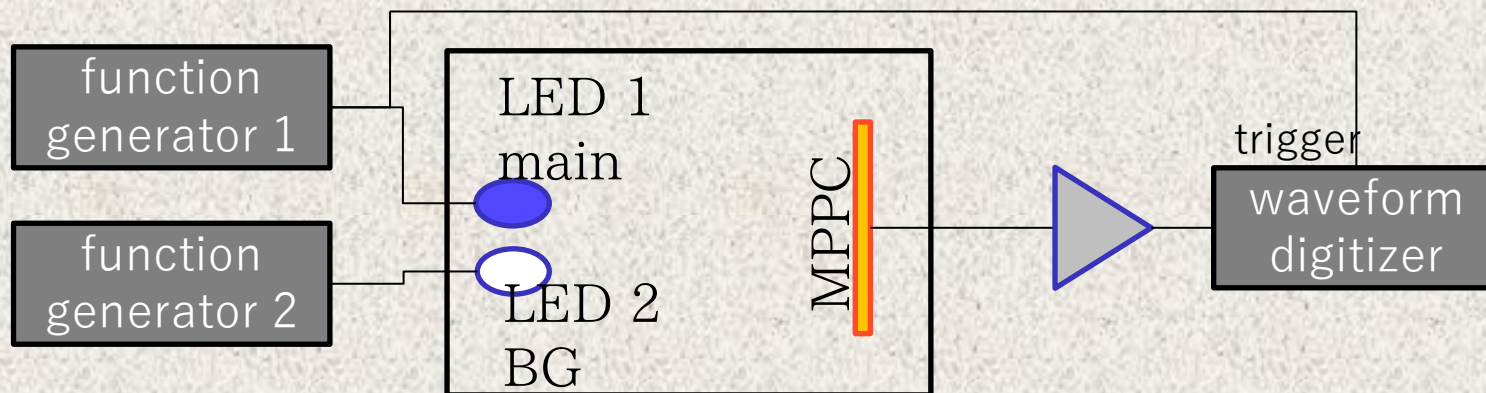
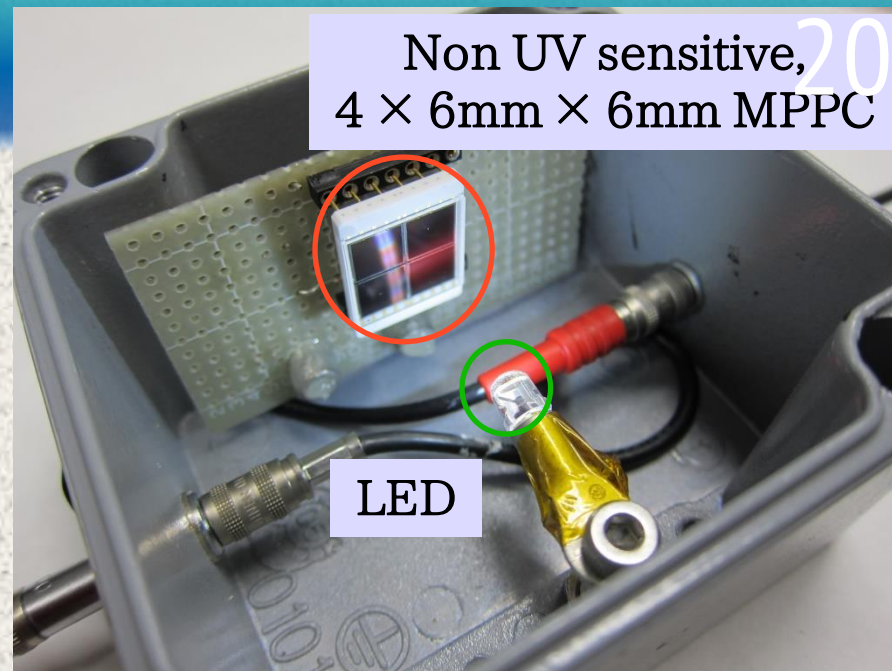
In order to see the time-dependent effect, we used correlated LED1 & LED2 with different delay time.



# 測定方法

別々のファンクションジェネレーターで2つのLEDを発光させる。一方を測定用のメイン、もう一方をバックグラウンド用とする。

トリガーはメインの発光と同期した信号を用いる。それぞれのファンクションジェネレーターのタイミングは非同期。



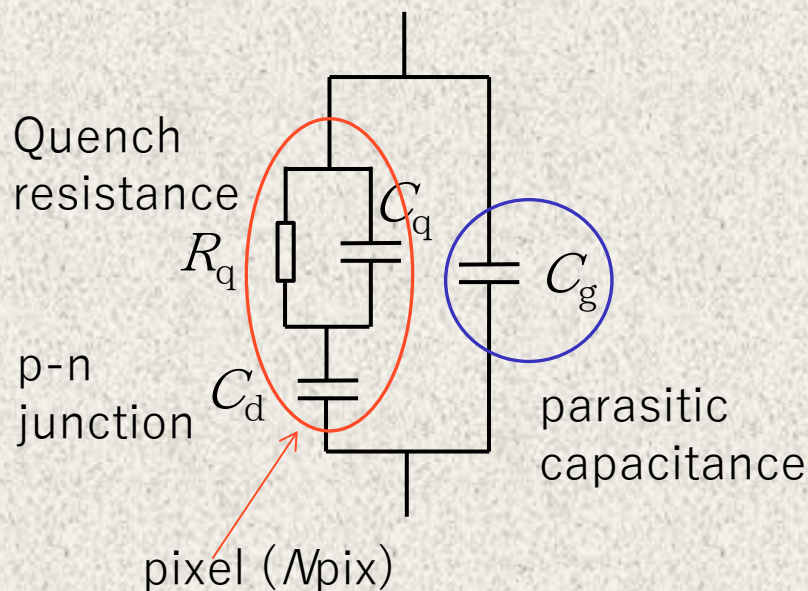
メインLEDパルスの電荷量を、BG光の強度、頻度を変えながら測定した。



Understanding of inside circuit parameter is needed to simulate our package design and connection.



Circuit parameter measurement with LCR meter (HIOKI 3532-50)



**equivalent circuit model of MPPC**

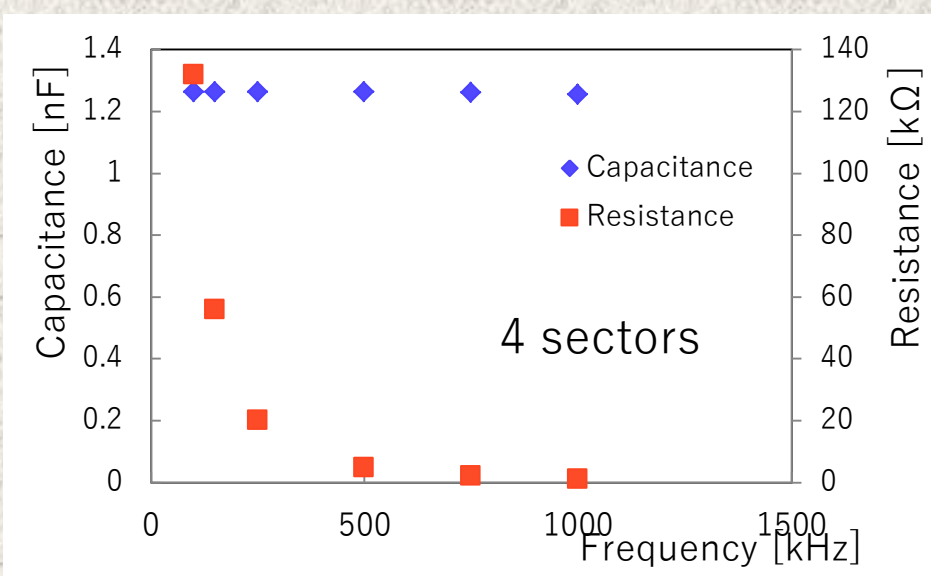
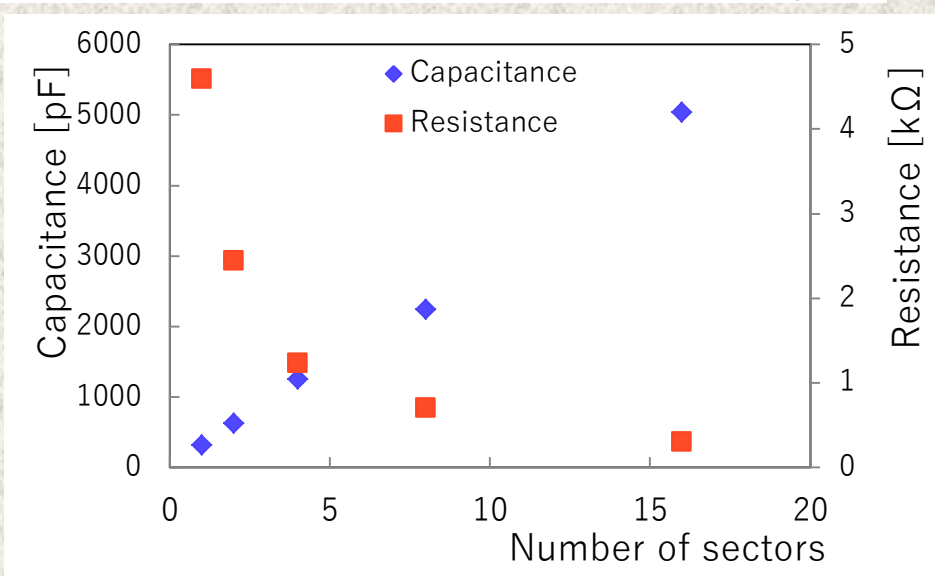
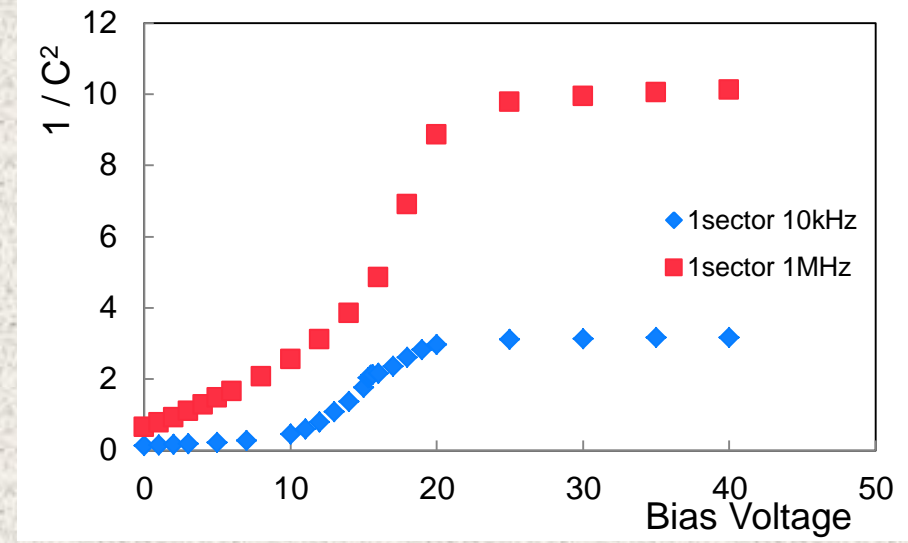
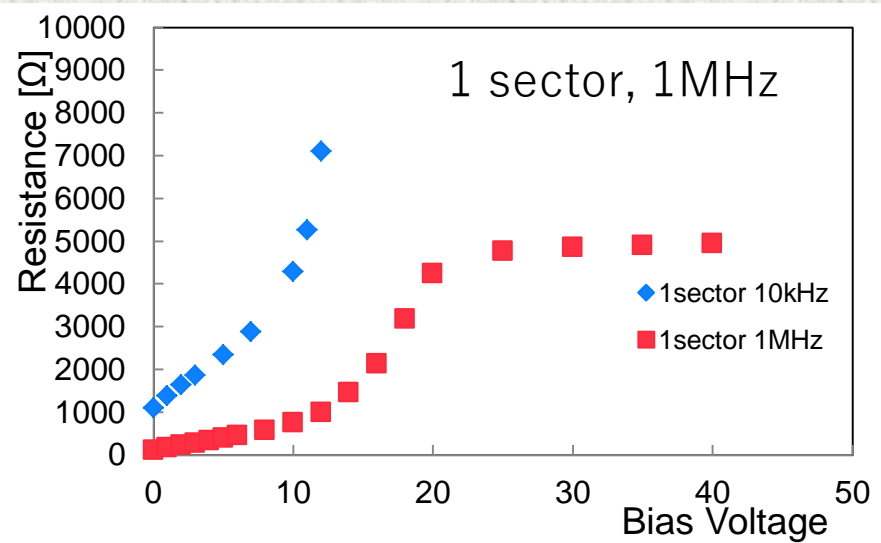
$$C_d = \sqrt{\frac{1 + \omega^2 (C_d + C_q)^2 R_q^2}{\omega^2 N_{pix} R_q}} G_\omega$$

$$C_g = C_\omega - N_{pix} C_d + \frac{\omega^2 C_d^2 R_q^2 N_{pix} (C_d + C_q)}{1 + R_q^2 (C_d + C_q)^2}$$

used equations to reconstruct inside parameter from measurement

Stefan Seifert et al, IEEE transactions on nuclear science  
VOL. 56, NO. 6, December 2009

Result of  $16 \times 3\text{mm}$ ,  $50\mu\text{m}$  pitch, monolithic array MPPC

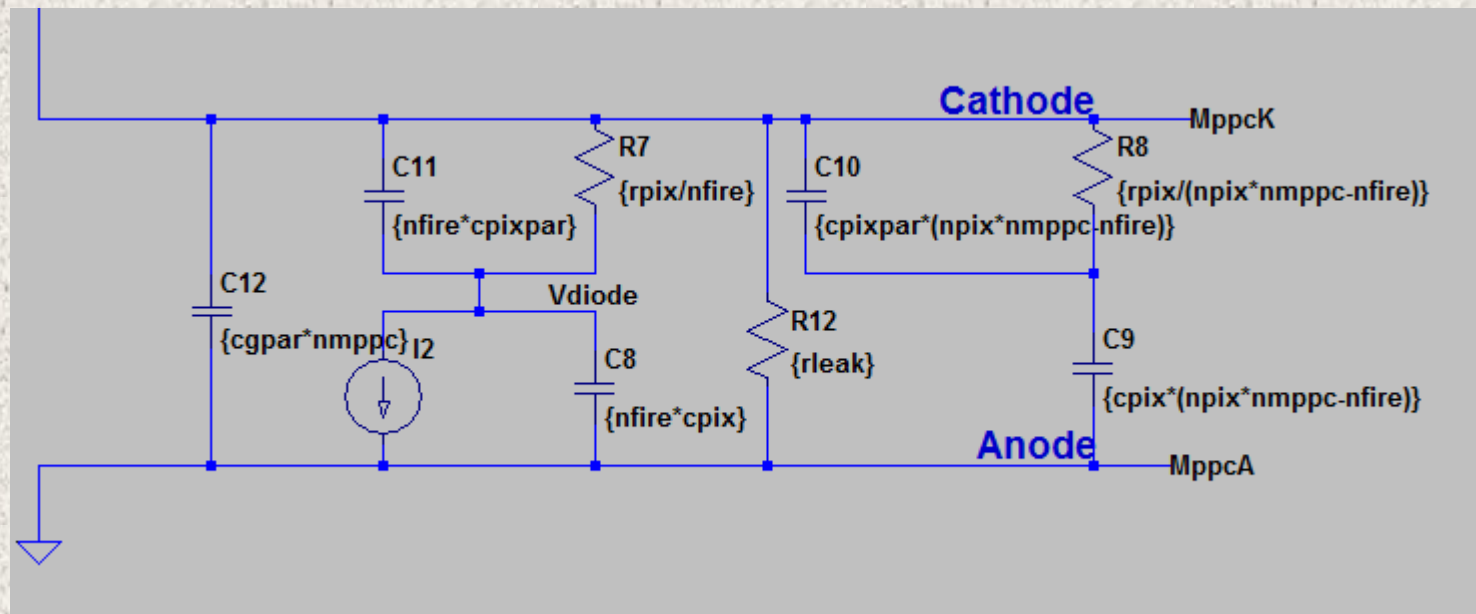


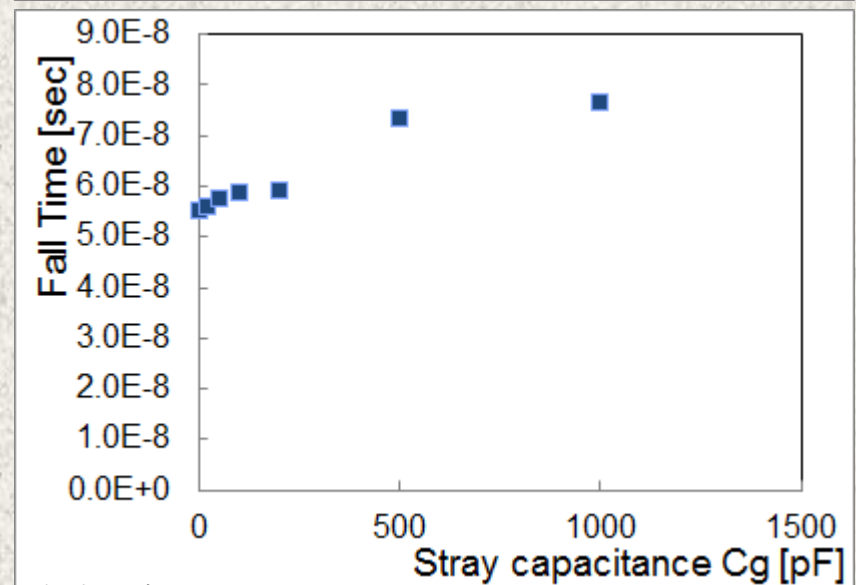
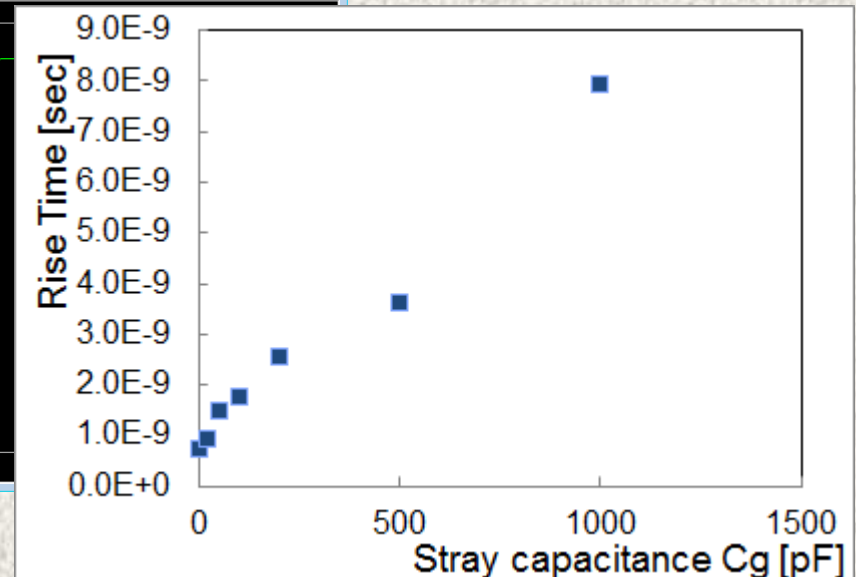
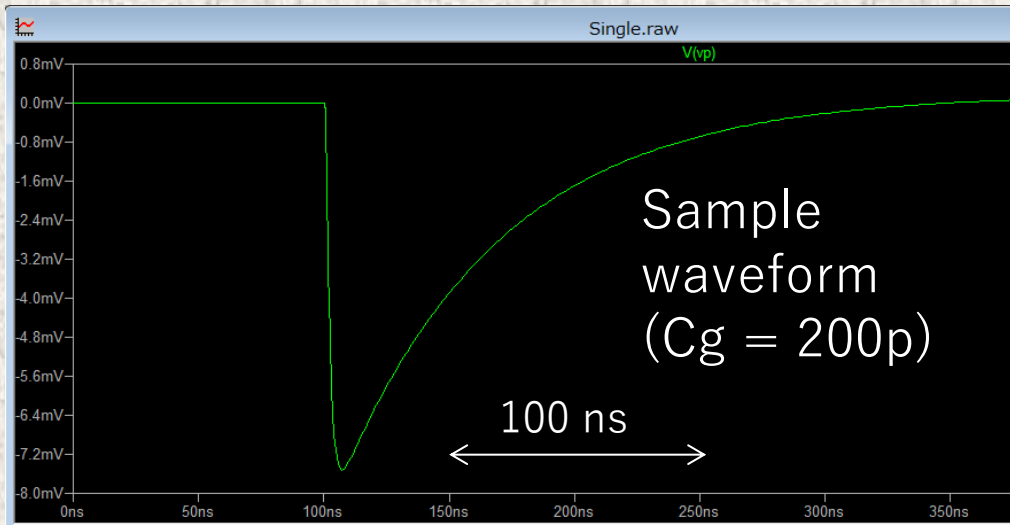
Parameters for 50 $\mu$ m, 6mm square MPPC

Param	$C\omega$	$R\omega$	$Cd + Cq$	$Rq$
Value	1254 pF	1.236 k $\Omega$	102 fF	132 k $\Omega$

Cd	Cq	Cg
104 fF	-2 (?) fF	880 pF

Estimated parameters are used in SPICE simulations. Only Cq (parralel C to quench resistance) shows strange value. I use a value in another paper (2fF).



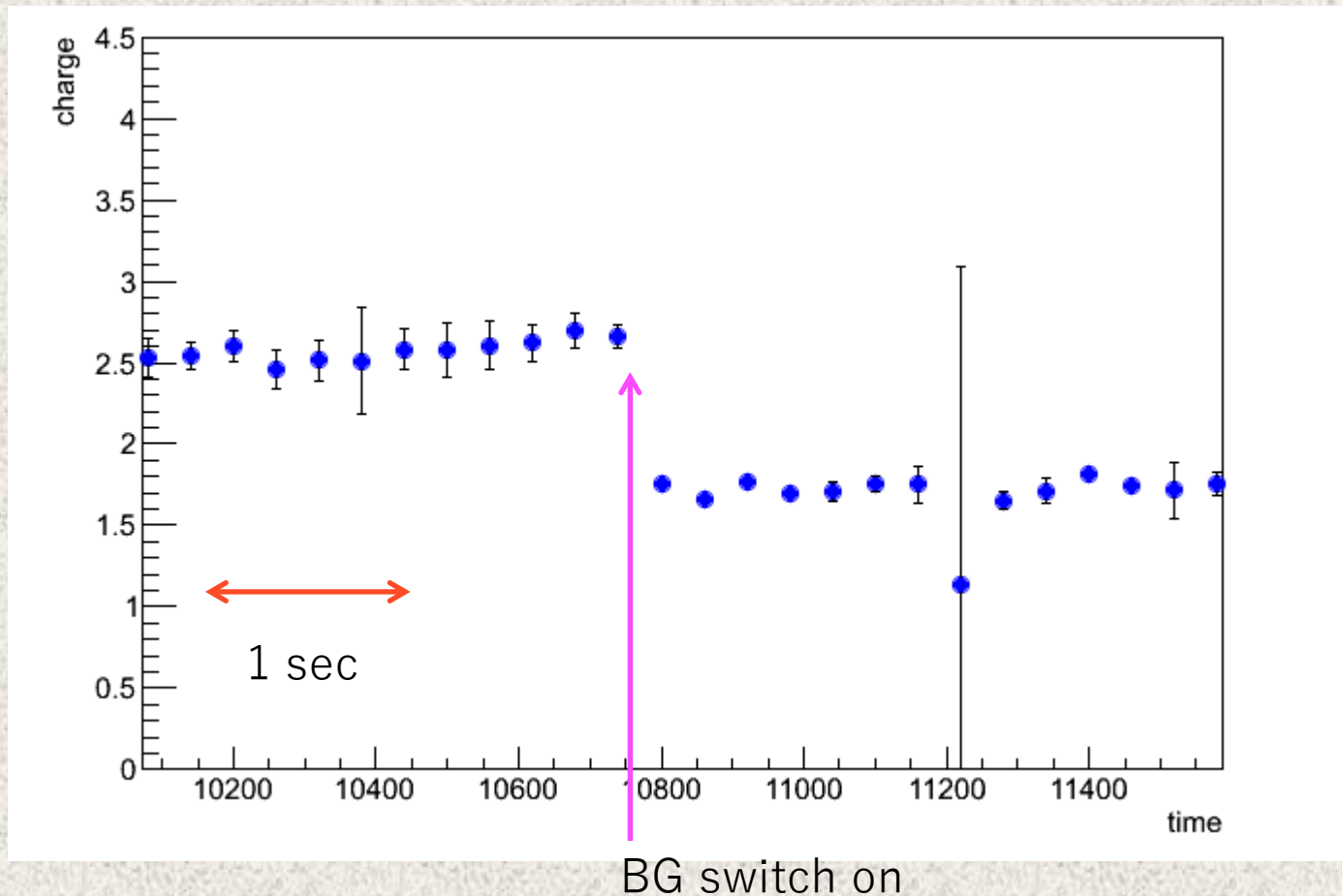


Simulated waveform is consistent to measurement.

Leading time = 2ns  
Falling time = 50 ns

Now extending this to series connection.





No significant slow (sec~min scale) response were seen.

# RH by SPICE simulation

26

