

低電圧高ゲインを目指した TGV μ -PIC の開発



阿部光 (京都大学 宇宙線研究室)

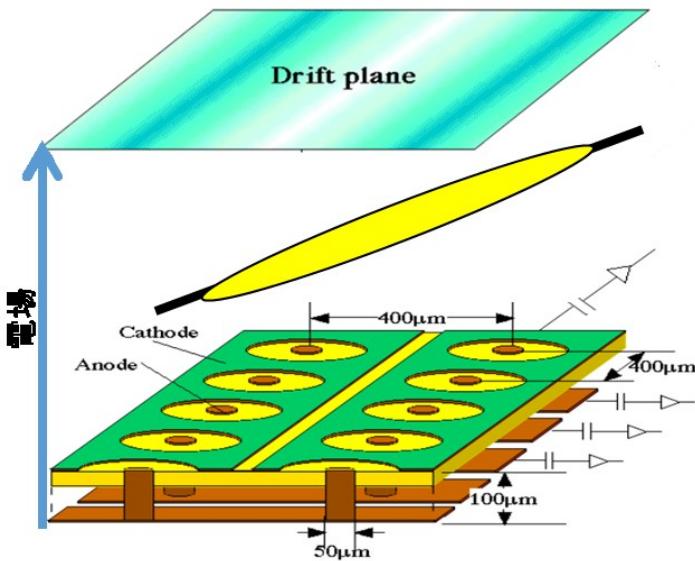
谷森達, 高田淳史, 水村好貴, 古村翔太郎, 岸本哲朗, 竹村泰斗, 吉川慶, 中増勇真,
中村優太, 谷口幹幸, 小野坂健, 斎藤要, 水本哲矢, 園田真也(京都大理),
Parker Joseph(クロス東海), 身内賢太朗(神戸大学), 澤野達哉(金沢大数物),

目次

- μ-PICのイントロダクション
- TGV(Through Glass Via)μ-PICの動作試験
 - ◆ ^{55}Fe の信号とスペクトル
 - ◆ゲインカーブ
- 3軸μ-PIC のGarfield++でのシミュレーション
 - ◆ジオメトリパラメータとガスゲイン
 - ◆各ストリップの信号分配
- まとめ

μ -PICとその応用

Micro Pixel Chamber (μ -PIC)



- ▶ 2次元ガスイメージング検出器
- ▶ プリント基板技術で製作
- ▶ ピクセル間隔 : 400 μm
- ▶ 個々のピクセルでガス増幅
- ▶ 大面積 : 10×10 cm² and 30×30 cm²
- ▶ 大きな增幅率 : max ~15000
- ▶ 高い位置分解能 : RMS ~120 μm
- ▶ 均一な応答 : RMS ~5% (10×10 cm²)
- ▶ 1ヶ月を超える連続安定動作が可
(@ gain ~6000)

μ -PIC応用

✓ MeVガンマ線望遠鏡

Electron-Tracking Compton Cammera (ETCC)

μ -PIC + 位置検出型シンチレーターアレイ

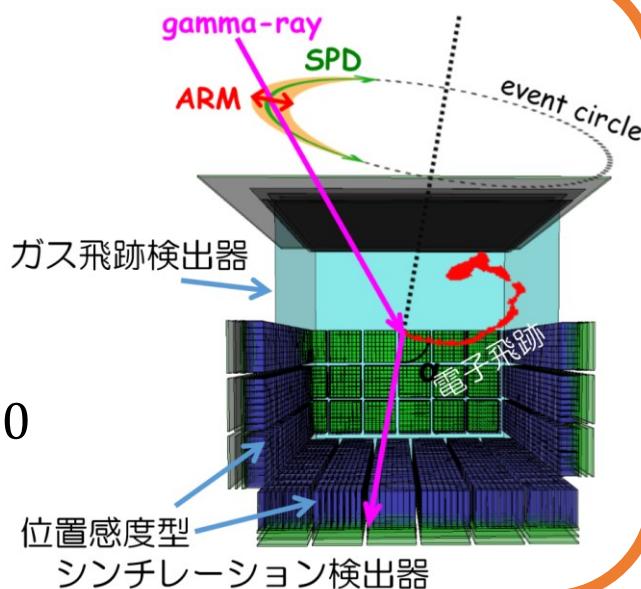
[要求①]電子飛跡決定精度の向上

[要求②] μ -PIC単体での電子検出

(GEMなし):ゲイン 15,000

✓ 中性子イメージング検出器

[要求] 位置分解能 < 90 μm



μ -PICへの要求

①飛跡決定精度の向上

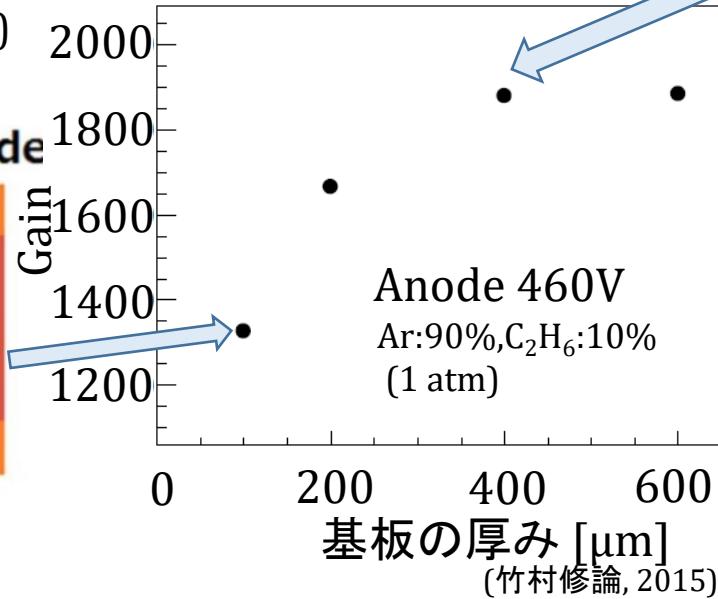
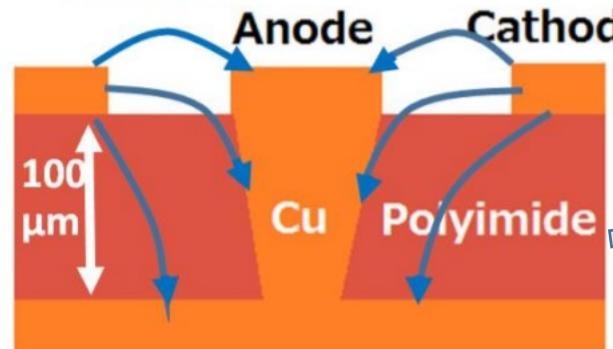
- 高空間分解能→ピクセル間隔を狭める
- 3軸での信号読み出し⇒講演の後半

②低電圧で高ゲイン

- アスペクト比(Anode柱高さ/Anode直径)の増加

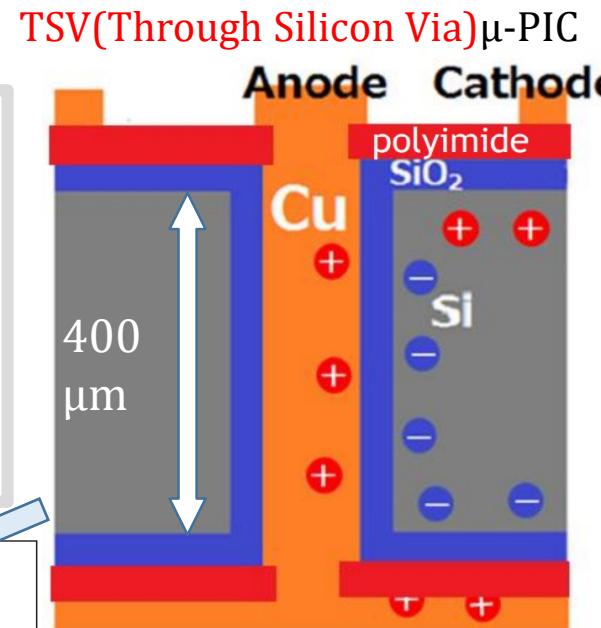
従来の μ -PIC(プリント基板技術)

電気力線



プリント基板技術の限界:

- 基板を厚くするとアノードが太くなる
- 作成精度は~10 μm
- 実現可能なアノード直径は 50 μm
→ 電極の間隔はアノード直径が律速



ゲイン向上に至った
初めての根本的構造変更
(T. Takemura et al, 2018)

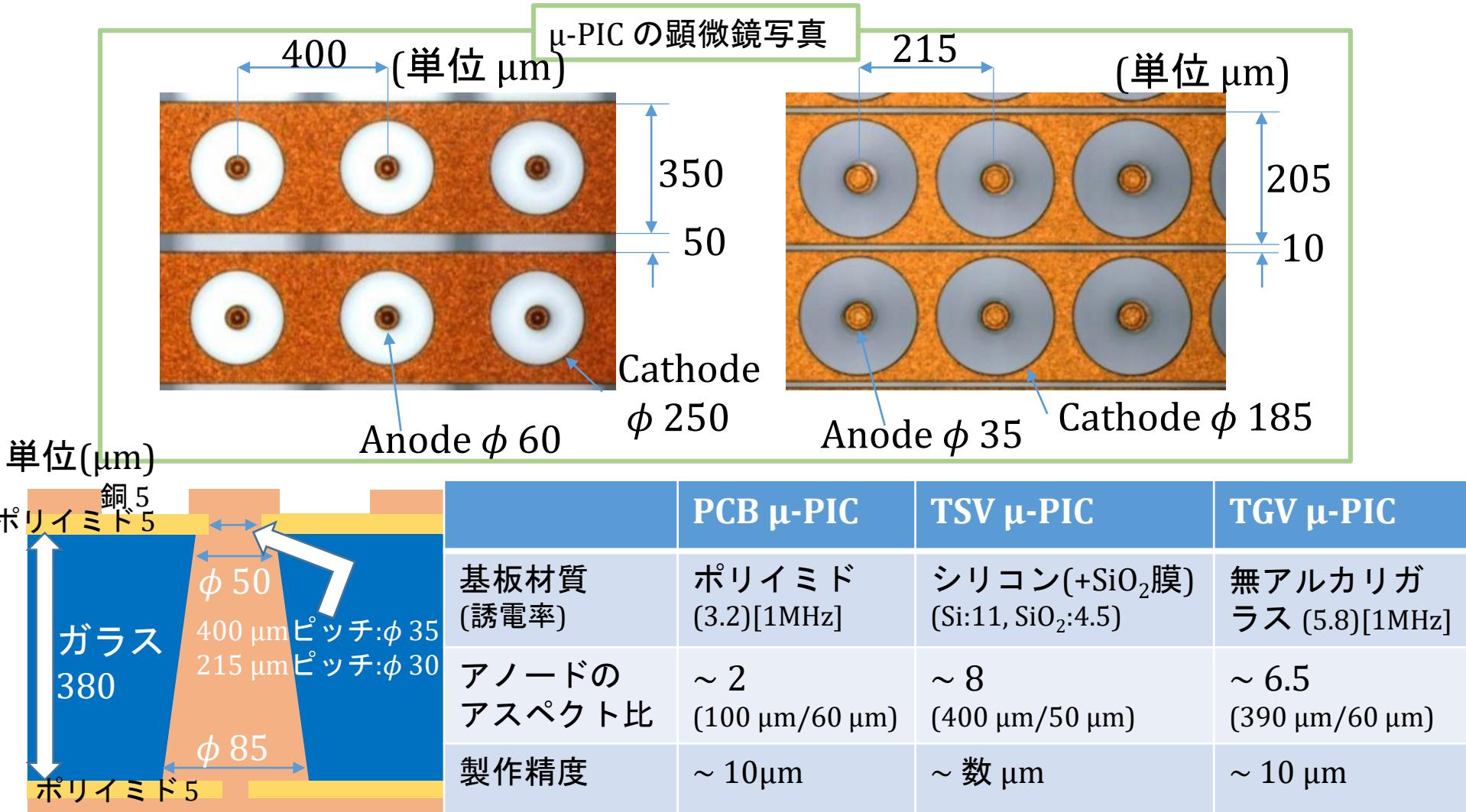
TSV μ -PICの不確定要素

- Anode柱側面に形成された SiO_2 層の厚み
- 半導体内の電荷移動による電場の効果

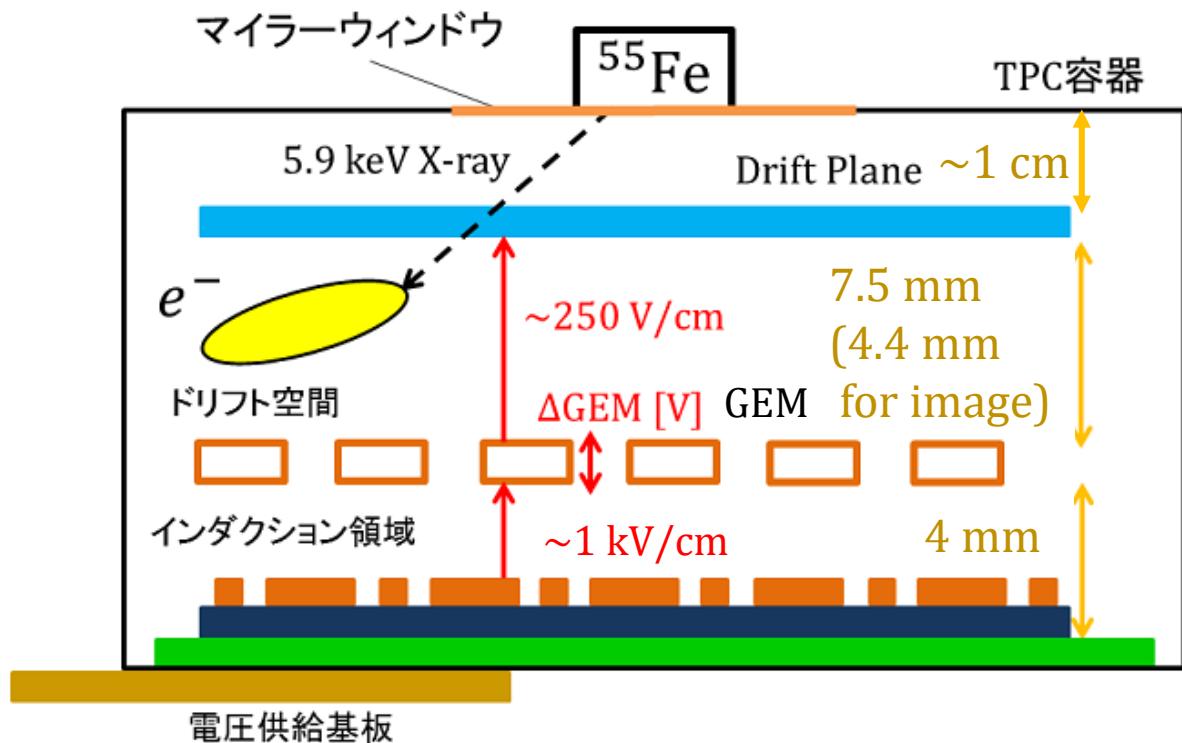
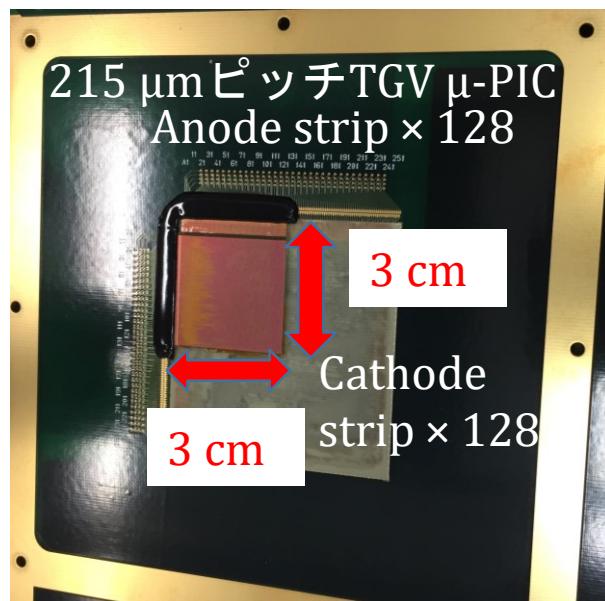
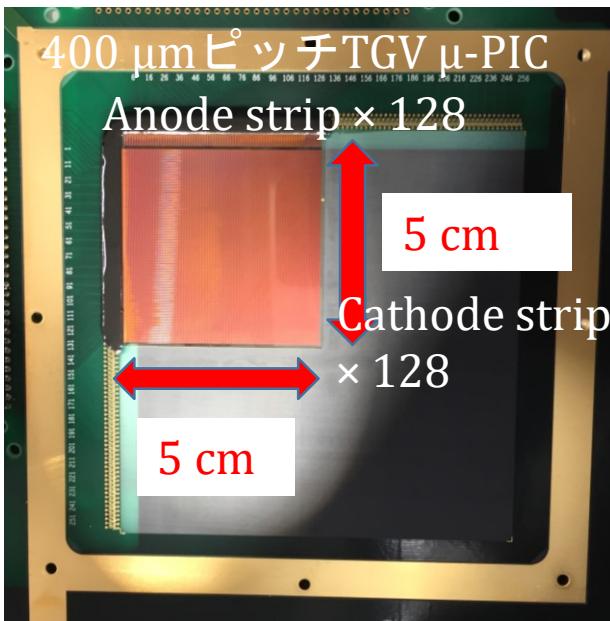
高アスペクト比のアノード形成可能な
絶縁体の基板による μ -PIC

ガラス基板を使ったμ-PIC(TGV μ-PIC)

- ・大日本印刷と共同で開発
- ・TGV(Through Glass Via)技術により高アスペクト比のAnode形成が可能
- ・ピッチ間隔400 μm(5 cm角)、215 μm(3 cm角)の2種類の素子を製作

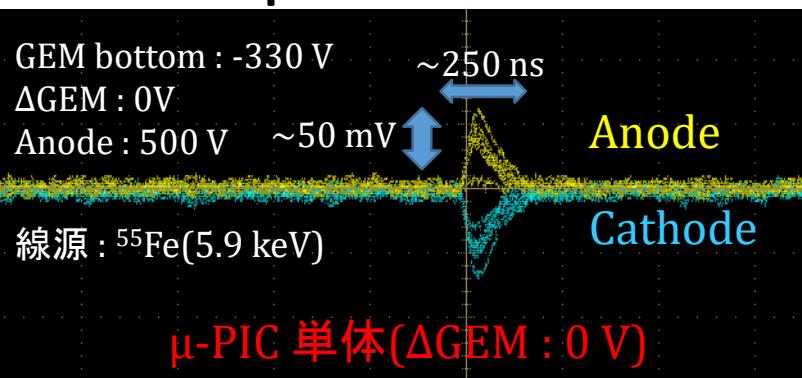


測定用セットアップ



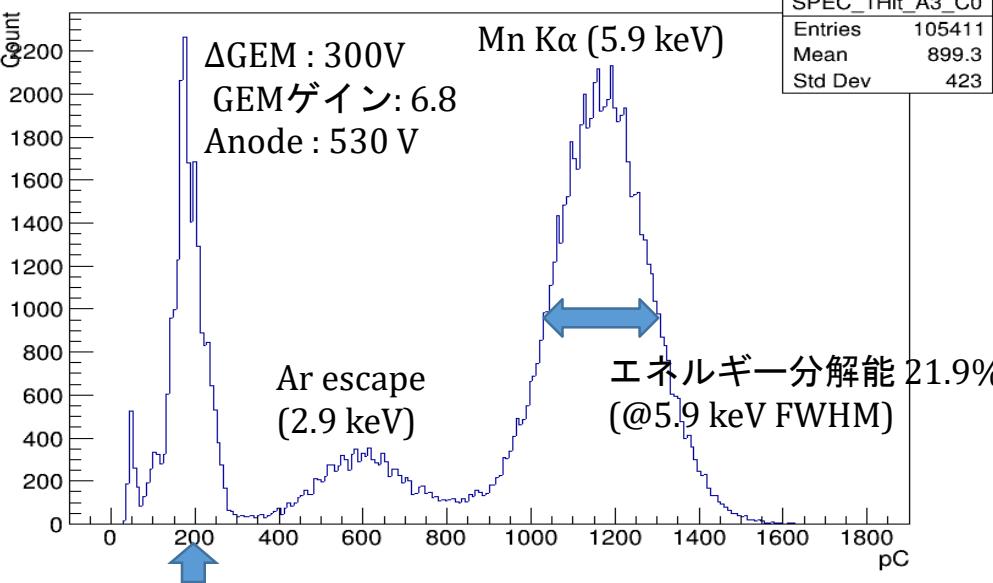
- ◆ TGV μ -PICをTPC容器へと導入
- ◆ μ -PICからの信号は電圧供給基板を通して読み出し基板へ
- ◆ 封入ガス : Ar : C₂H₆ = 90:10 (1atm)

400μm ピッチ TGV μ-PIC 動作試験



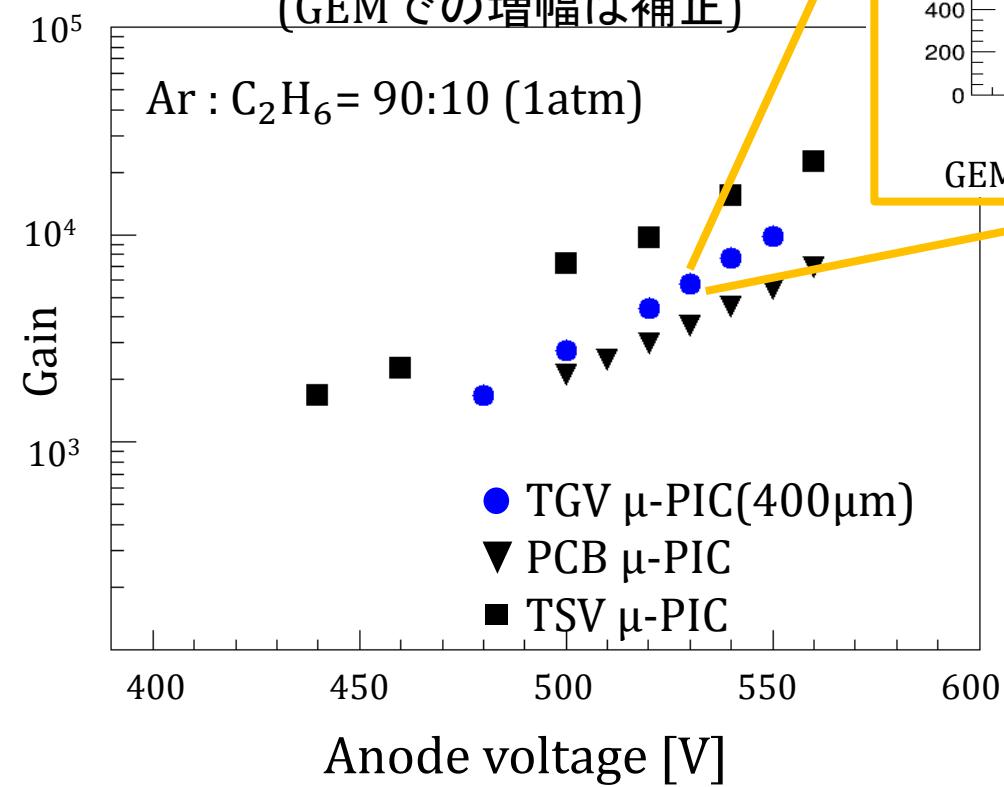
ある領域(2.5 cm × 2.5 cm)でのスペクトル

SPEC_1Hit_A3_C0	
Entries	105411
Mean	899.3
Std Dev	423



μ -PICのゲインカーブ
(GEMでの增幅は補正)

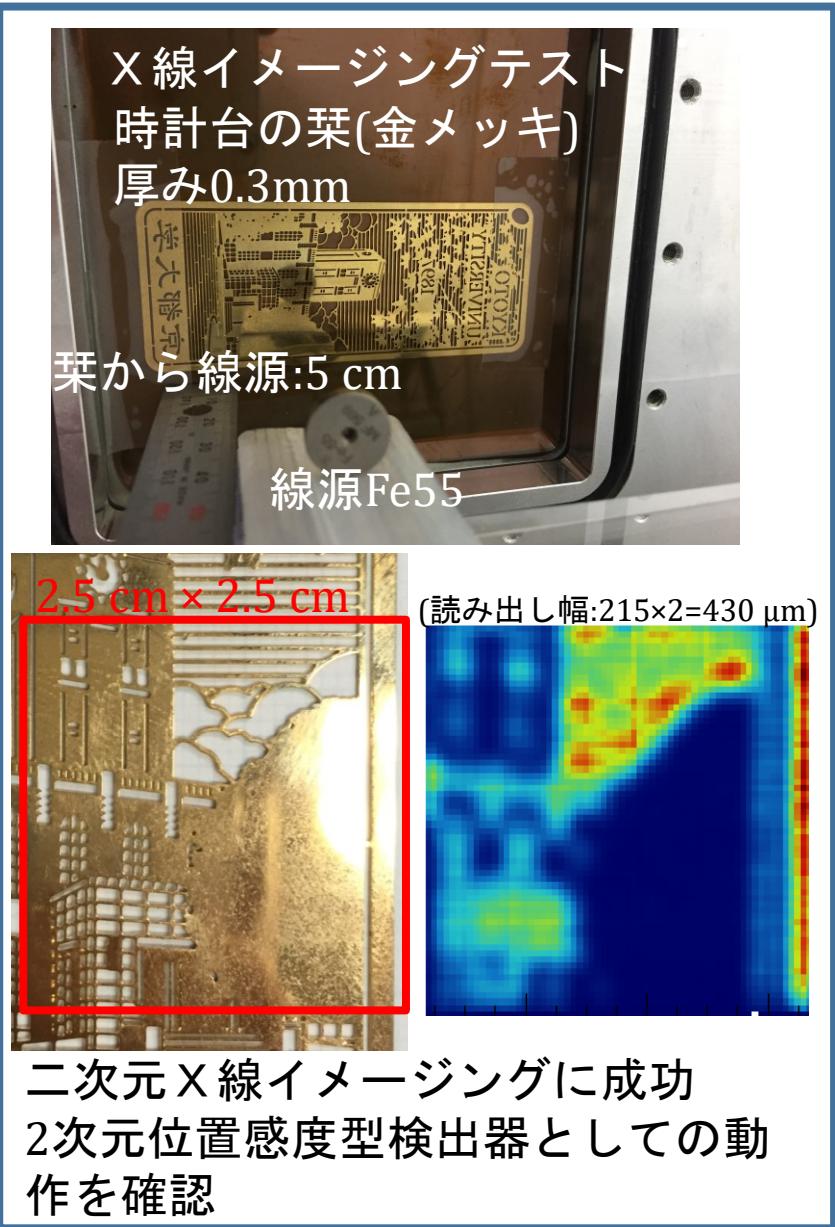
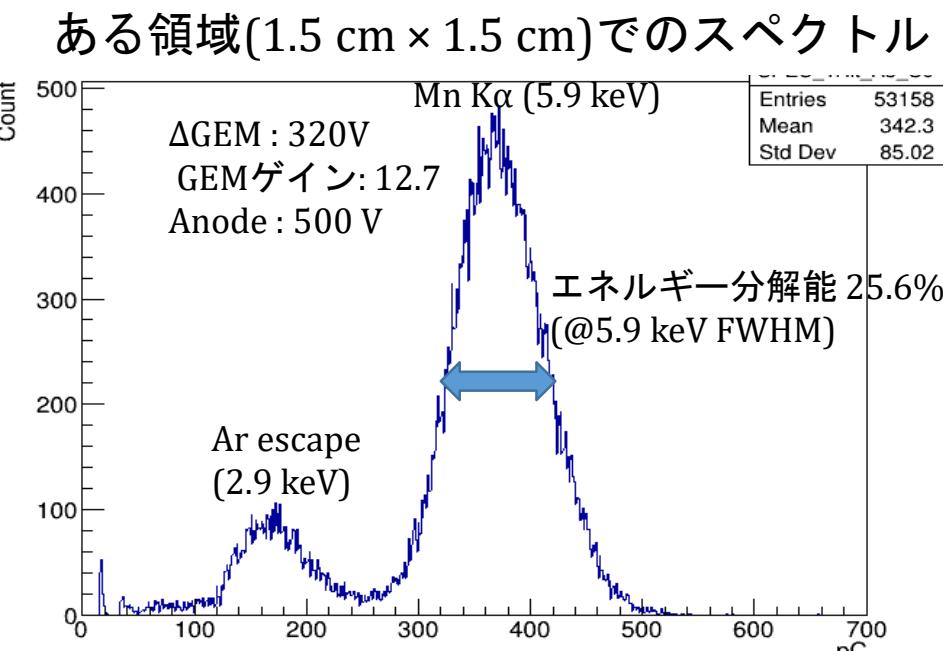
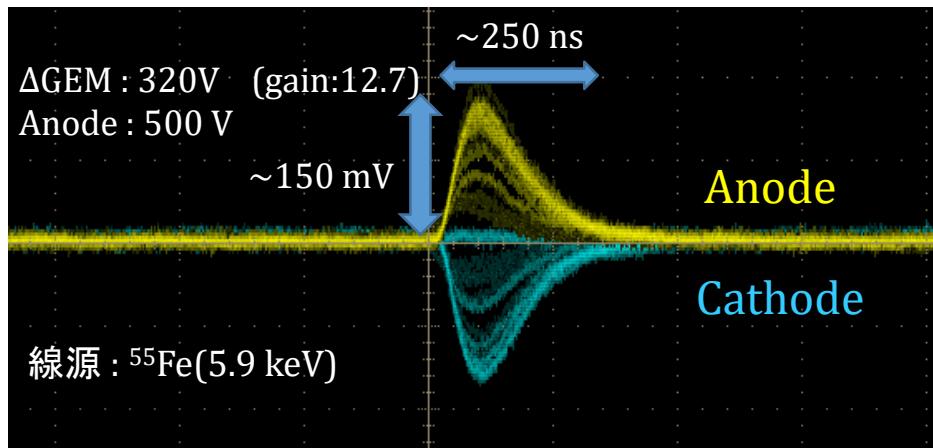
Ar : C₂H₆ = 90:10 (1atm)



TGV μ-PIC 単体で初めて
X線の検出に成功

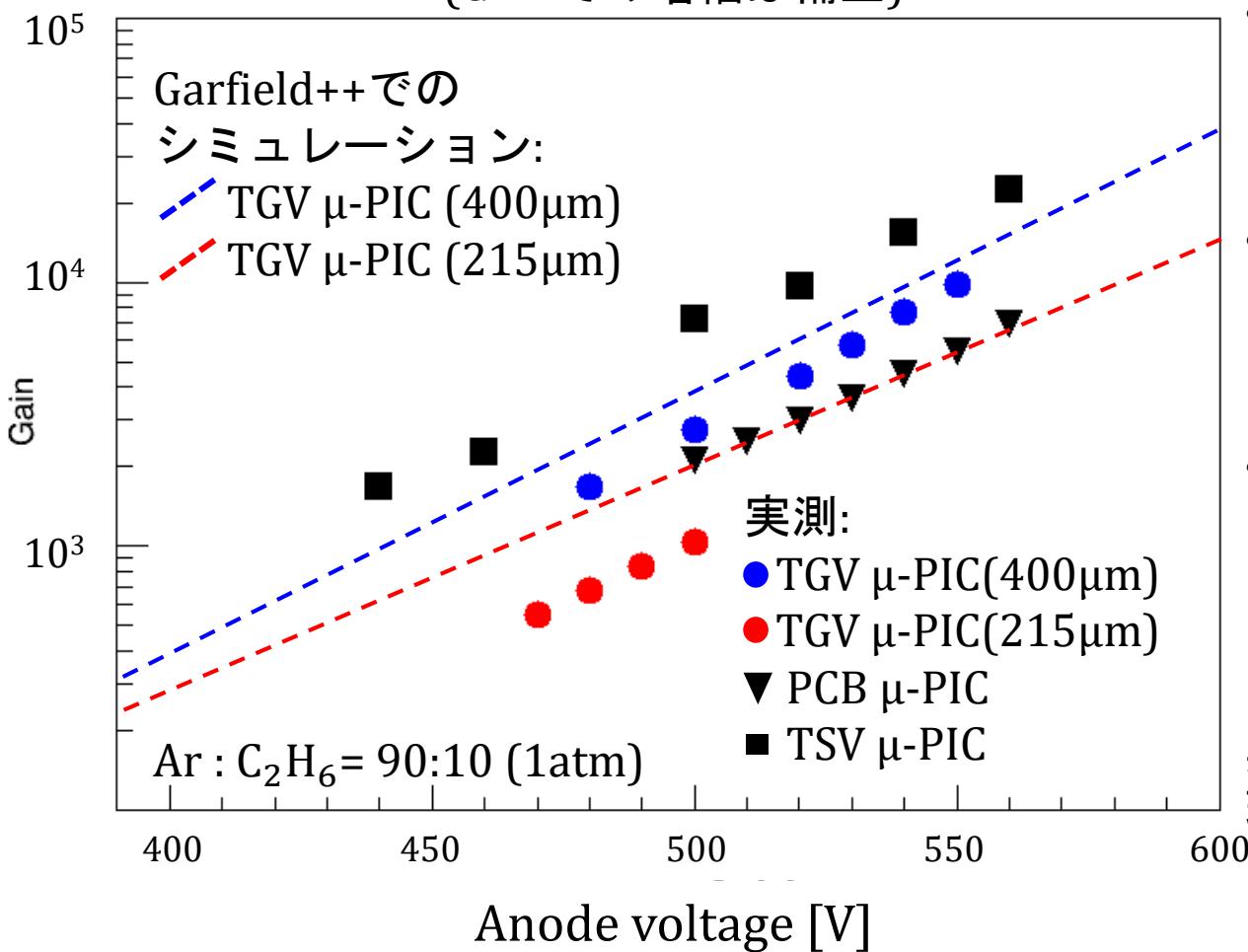
PCB μ-PIC と同程度のゲイン

215μmピッチ TGV μ-PIC 動作試験



ゲインカーブ

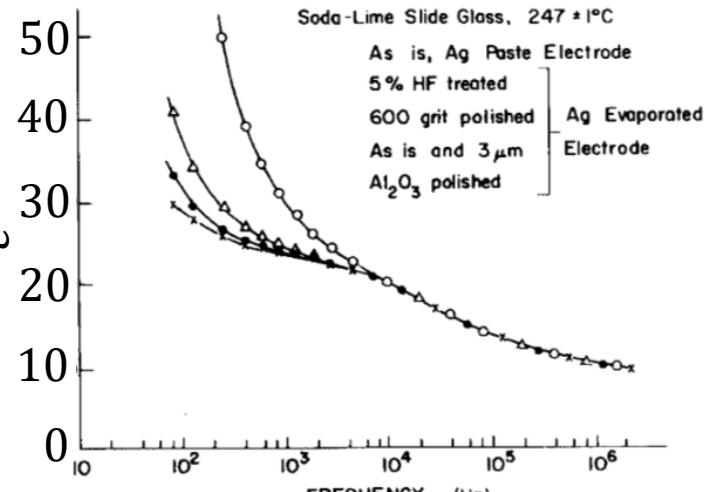
μ -PICのゲインカーブ
(GEMでの増幅は補正)



- 215 μ mピッチのゲインは400 μ mピッチの~40%(@anode 480V)
 - 400 μ m, 215 μ mピッチともに、実測値が計算値を下回っている
 - 目標：ゲイン 15,000
安定動作は達成されていない
- シミュレーション値と実測値の乖離については現在調査中

ガラス誘電率とゲインの関係

ガラスの誘電率特性(低周波)



ソーダ石灰ガラス(247°C)の
電極分極効果

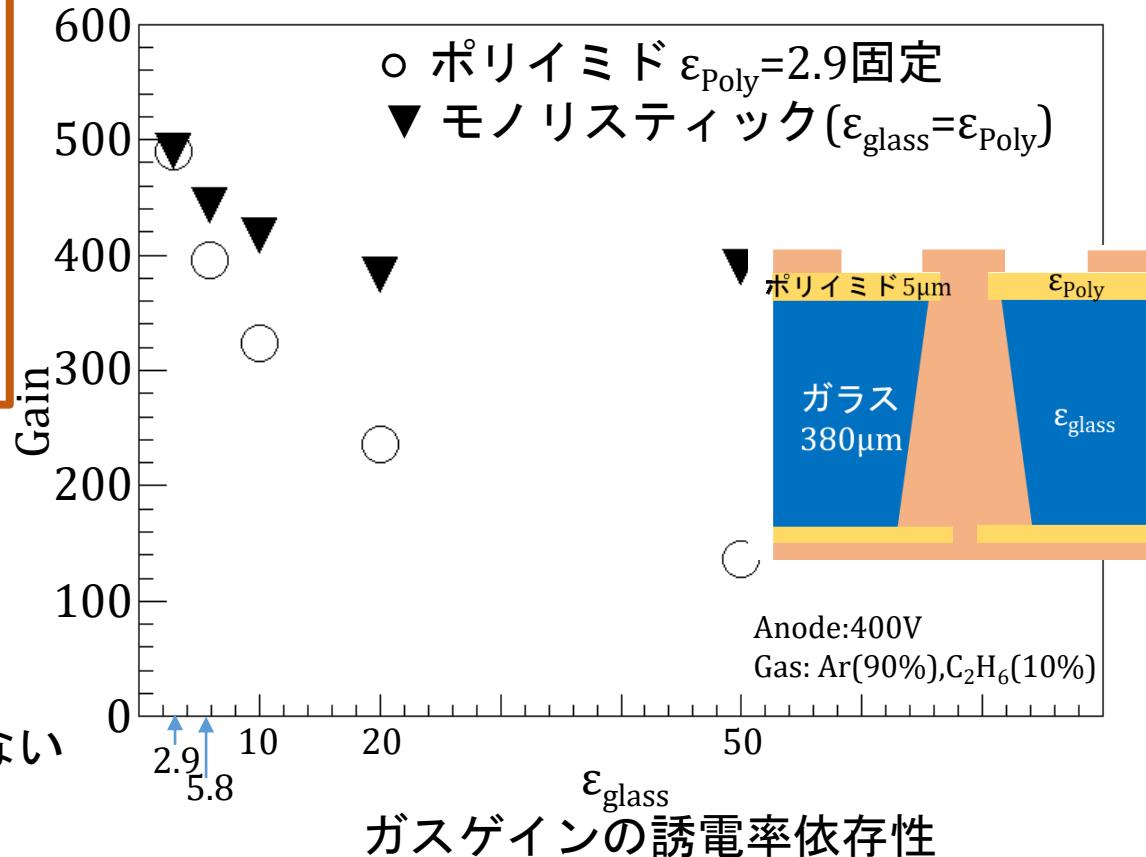
(C. Kim & M. Tomozawa, 1975)

- ϵ_{glass} が大きいほどゲインが下がる
 - アノード近傍の誘電率不連続面はゲインを下げる
- 現在ポリイミド膜のない
ガラスμ-PICを製作中

無アルカリガラス $\epsilon = 5.8$ [1 MHz]

シミュレーションパラメータとして
現実を反映していない可能性

仮説: 無アルカリガラス $\epsilon_{\text{DC}} > \epsilon_{1\text{MHz}}$



電子飛跡決定精度向上を目指した 3軸 μ -PIC

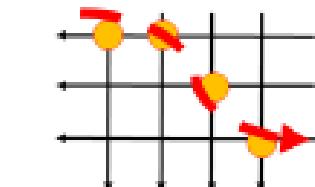
Garfield++シミュレーション

3軸読み出し可能なμ-PIC(3軸 μ-PIC)

➤ Anode+Cathode +3軸目

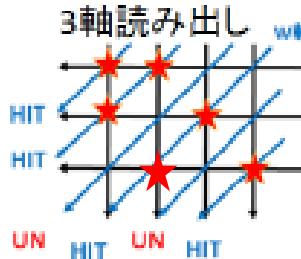
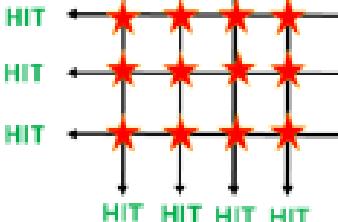
➤ 飛跡の不確定性を排除し、位置決定精度を上げることで高角度分解能化を目指す

真の電子飛跡



通常の10 cm角μ-PICに対して、
➤ pixel読み出し : 256×256 ch
➤ strip読み出し : 256+256 ch

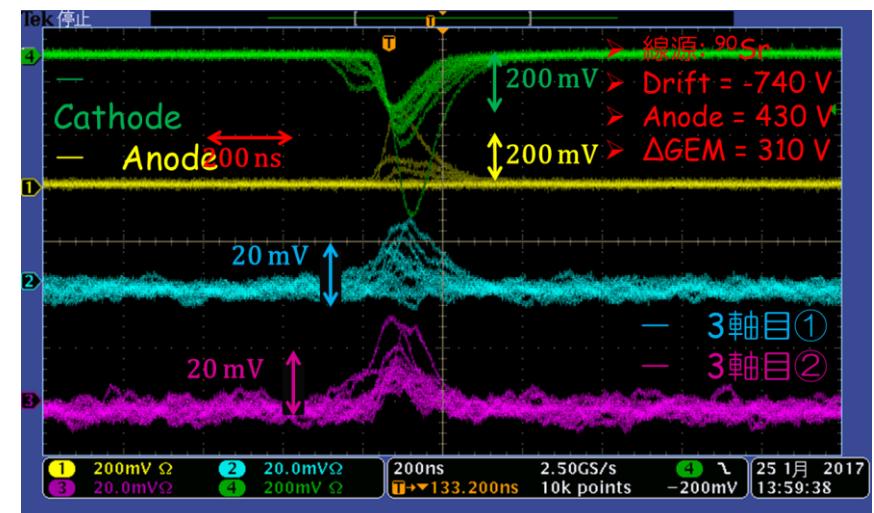
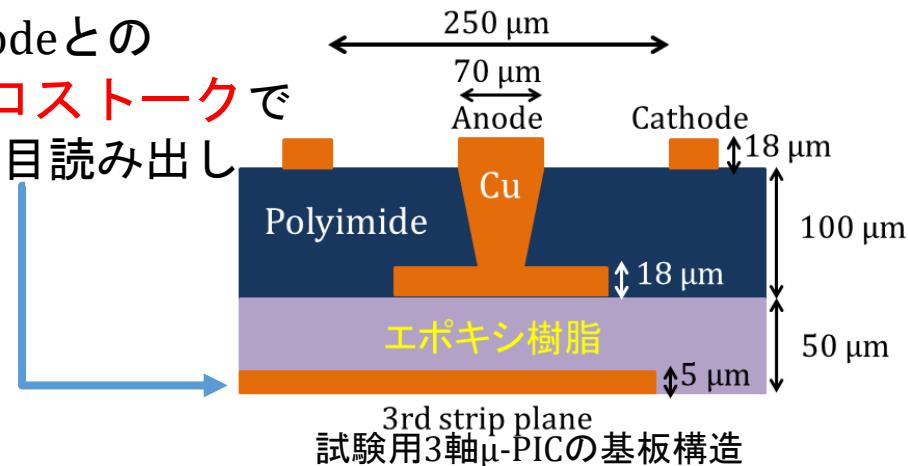
2軸読み出し



- 製造方法 : プリント基板(PCB)
- μ-PICの検出領域 : $7.5 \times 7.5 \text{ cm}^2$
- ピクセルピッチ : 400 μm

試験用3軸 μ-PICを作製(2017年谷口講演)

Anodeとの
クロストークで
3軸目読み出し



試験用3軸μ-PICのオシロ波形

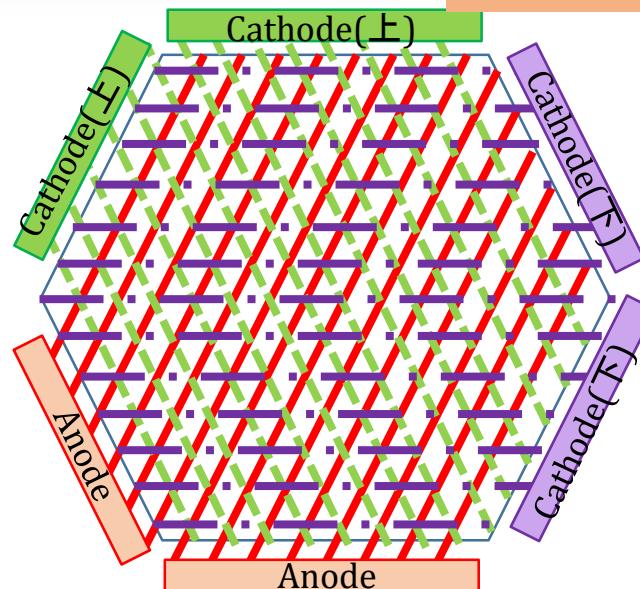
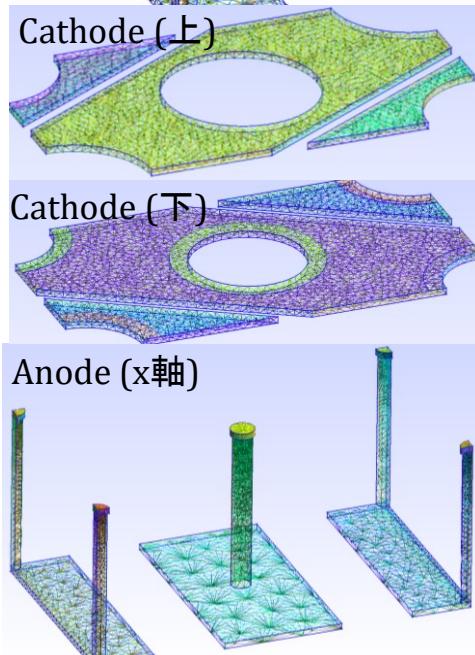
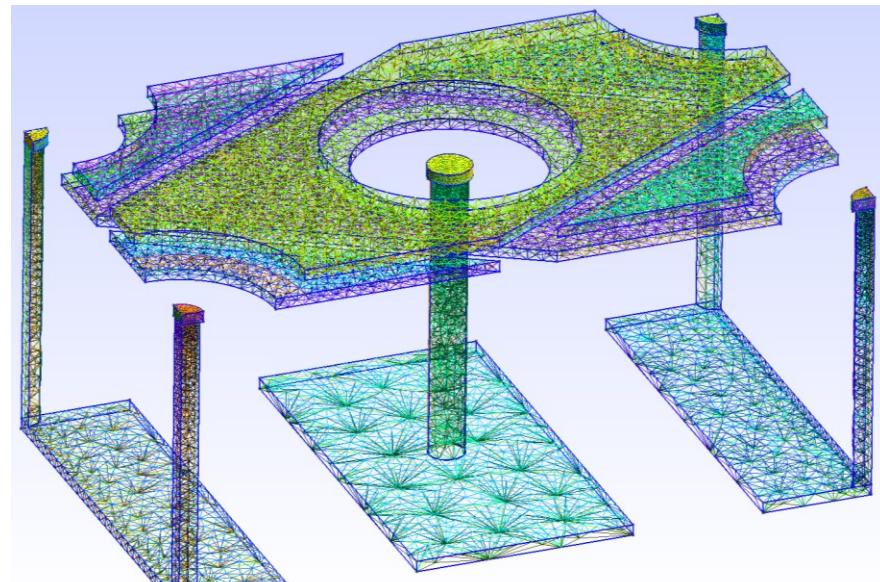
3軸目の信号を確認。ただし、Anode,Cathodeの1/10 Cathodeを二つに分けた読み出すには増幅率の大きな3軸用のアンプが必要



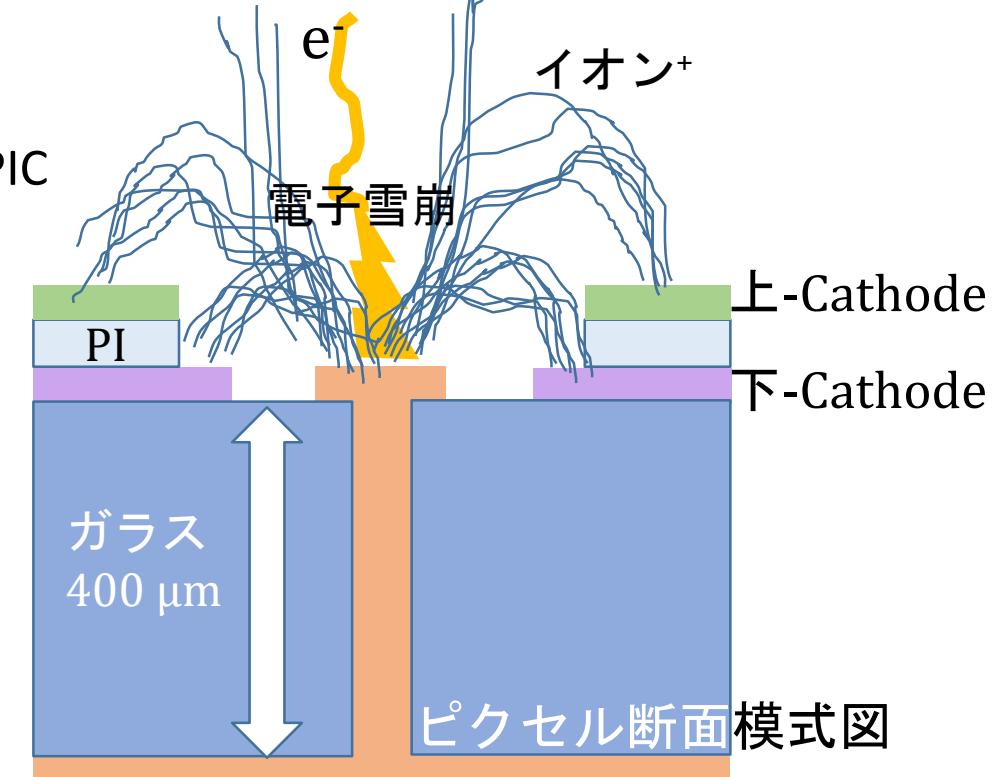
Cathodeを二つに分けた電極構造

新3軸μ-PIC

Cathodeを分割・立体交差した3軸μ-PIC



読み出しストリップの概観



- 各ストリップのなす角120度
- ピクセル配列は最密充填
六角形μ-PIC

- ✓ 電子雪崩は起こるのか?
- ✓ 狹い通りカソード信号は分割されるのか?

✓ 電子雪崩は起こるのか?

ジオメトリパラメータと ゲインの関係

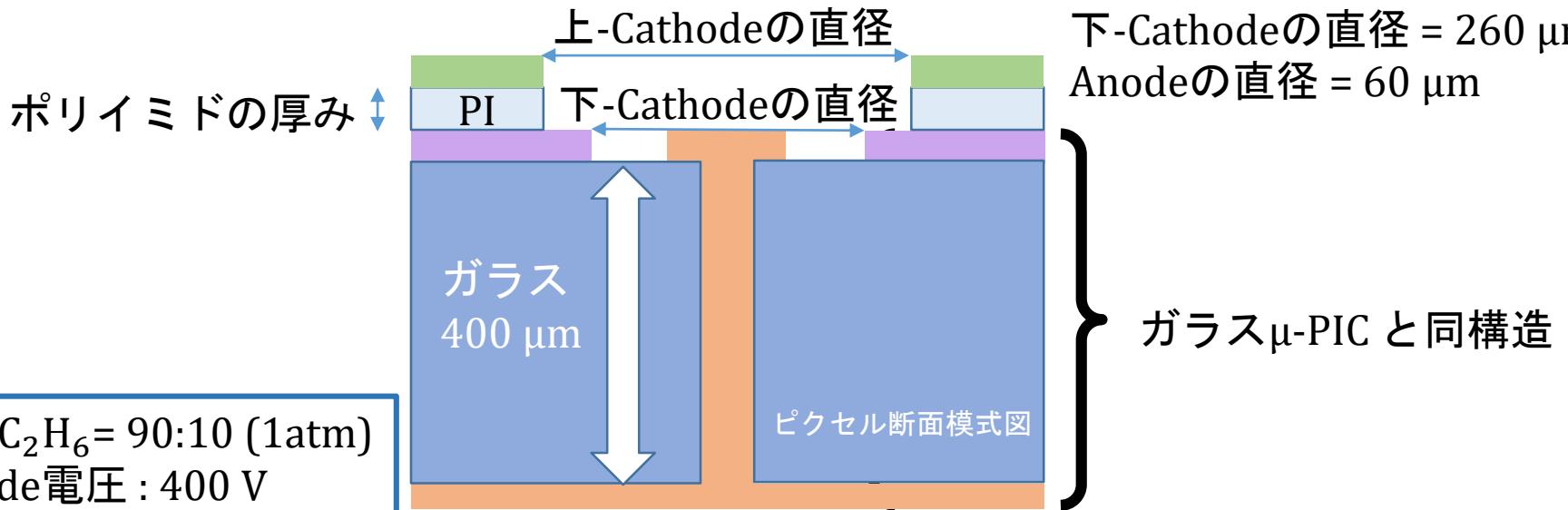
変化させたパラメータ:

上-Cathodeの直径

上、下-Cathode間のポリイミドの厚み

放電耐性を考えて
Anode, 下-Cathodeの直径は
現行のμ-PIC の値で固定

下-Cathodeの直径 = 260 μm
Anodeの直径 = 60 μm

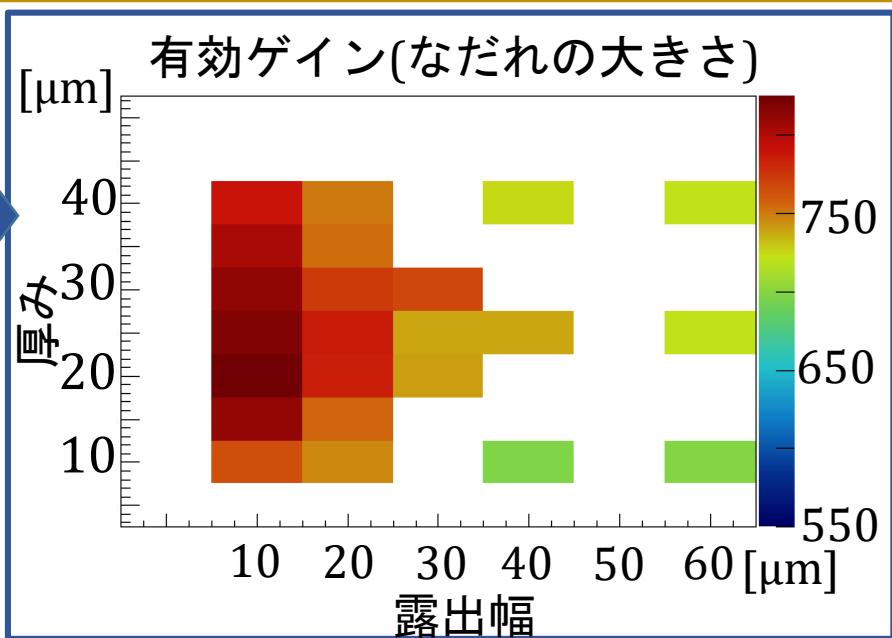
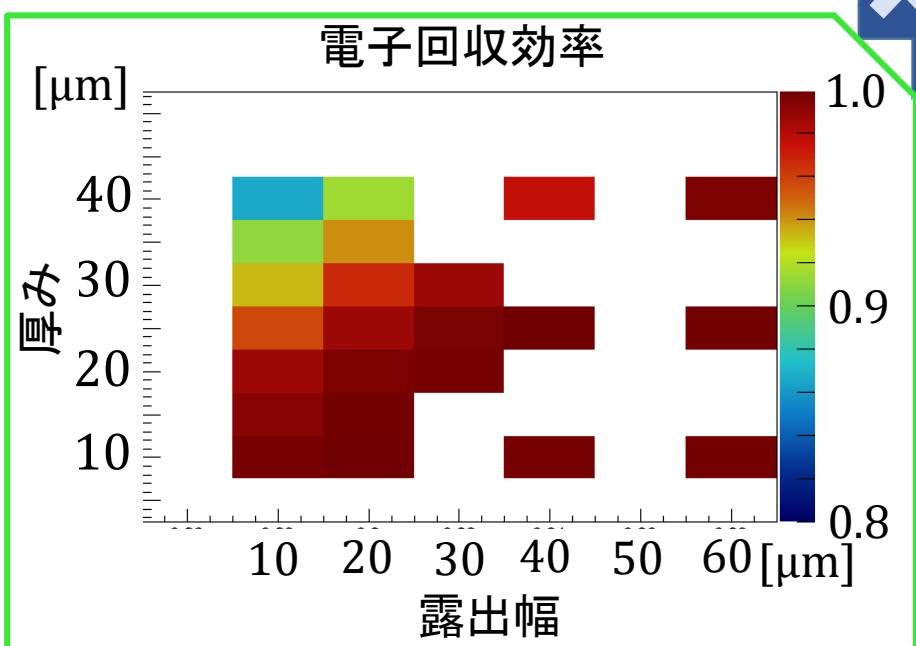
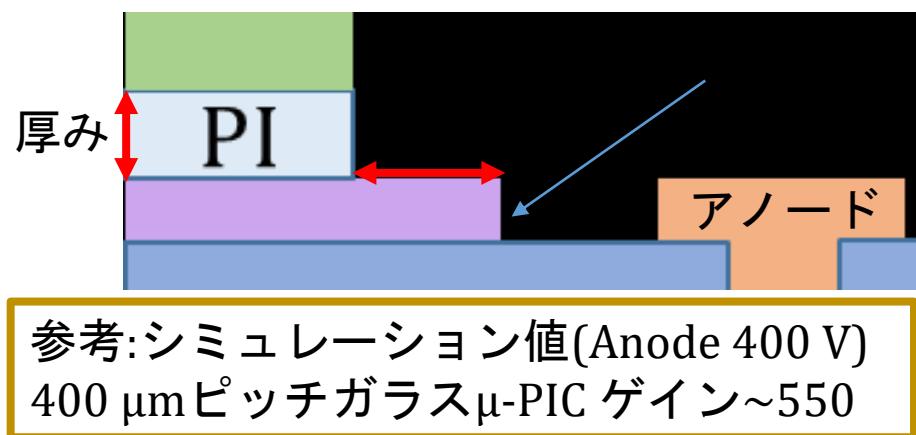
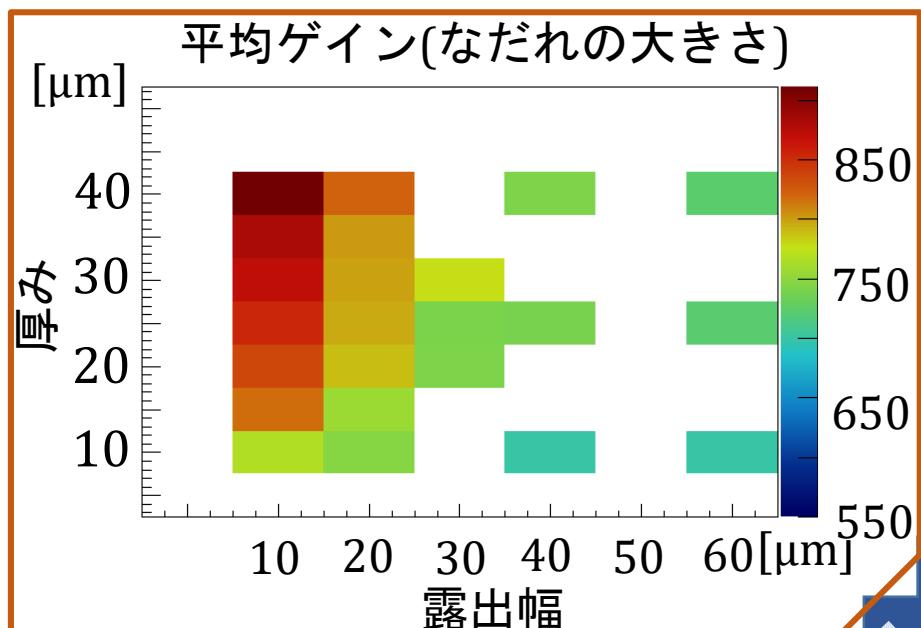


Ar : C₂H₆ = 90:10 (1atm)

Anode電圧 : 400 V

Cathode間電位差なし

ジオメトリパラメータとゲインの関係



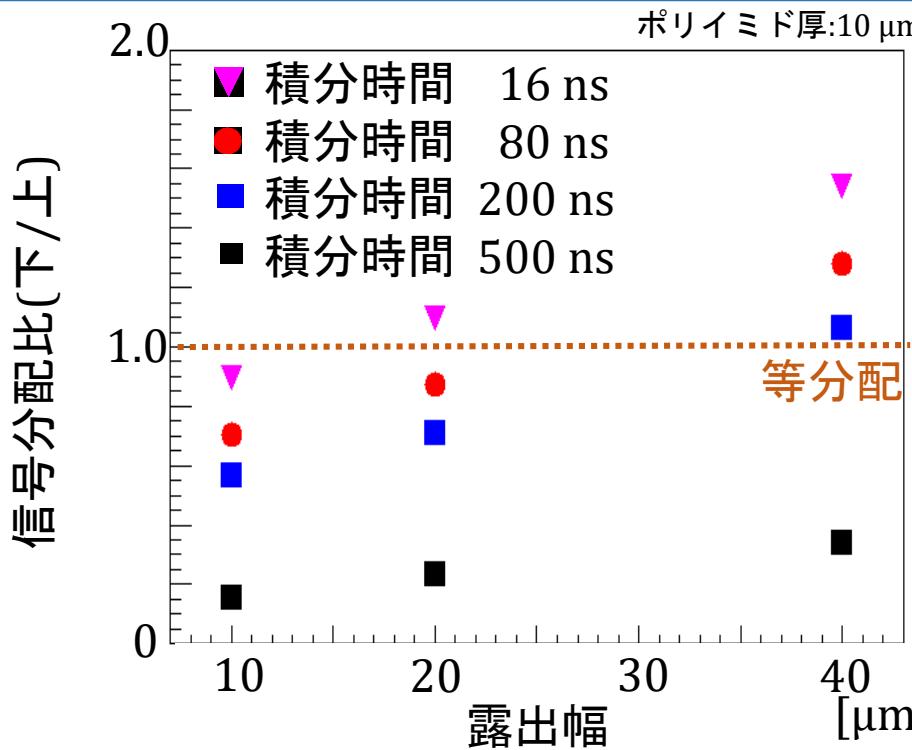
パラメータを変えても、電子雪崩は起り電子は增幅された。
有効ゲイン(=平均ゲイン×回収効率)は露出幅小ゲイン大

✓ カソード信号は分割されるのか?

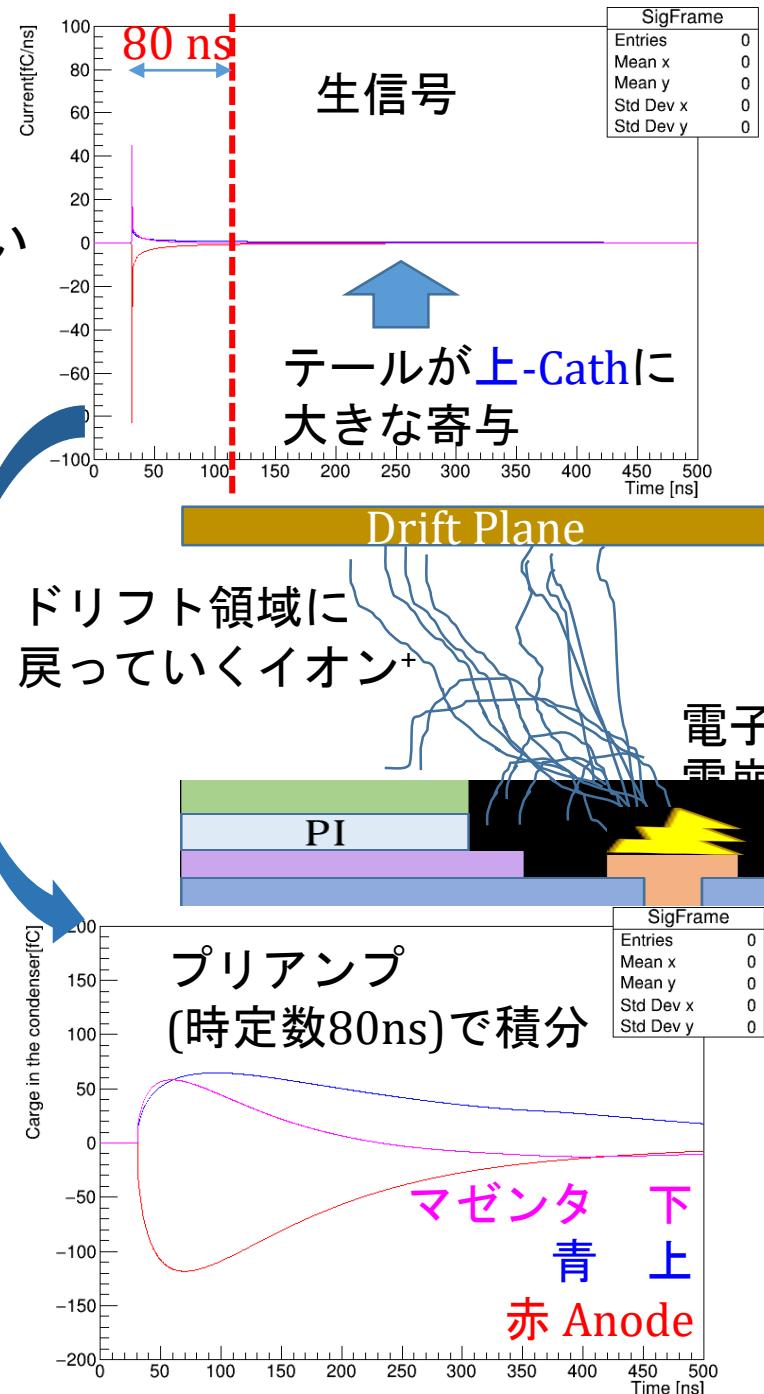
上,下-Cathodeの信号分配

上,下-Cathodeの信号の大きさが同じくらい
⇒同じアンプで読み出せるので(経済的に)うれしい

信号の大きさの比の平均値vs下-Cathの露出幅



時定数~80 nsで信号を切れば、
おおむねどの露出幅でも
同じアンプで読み出せる



まとめ

ガラスμ-PIC

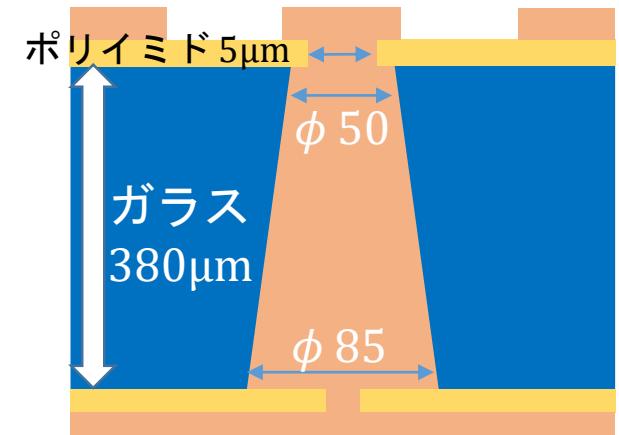
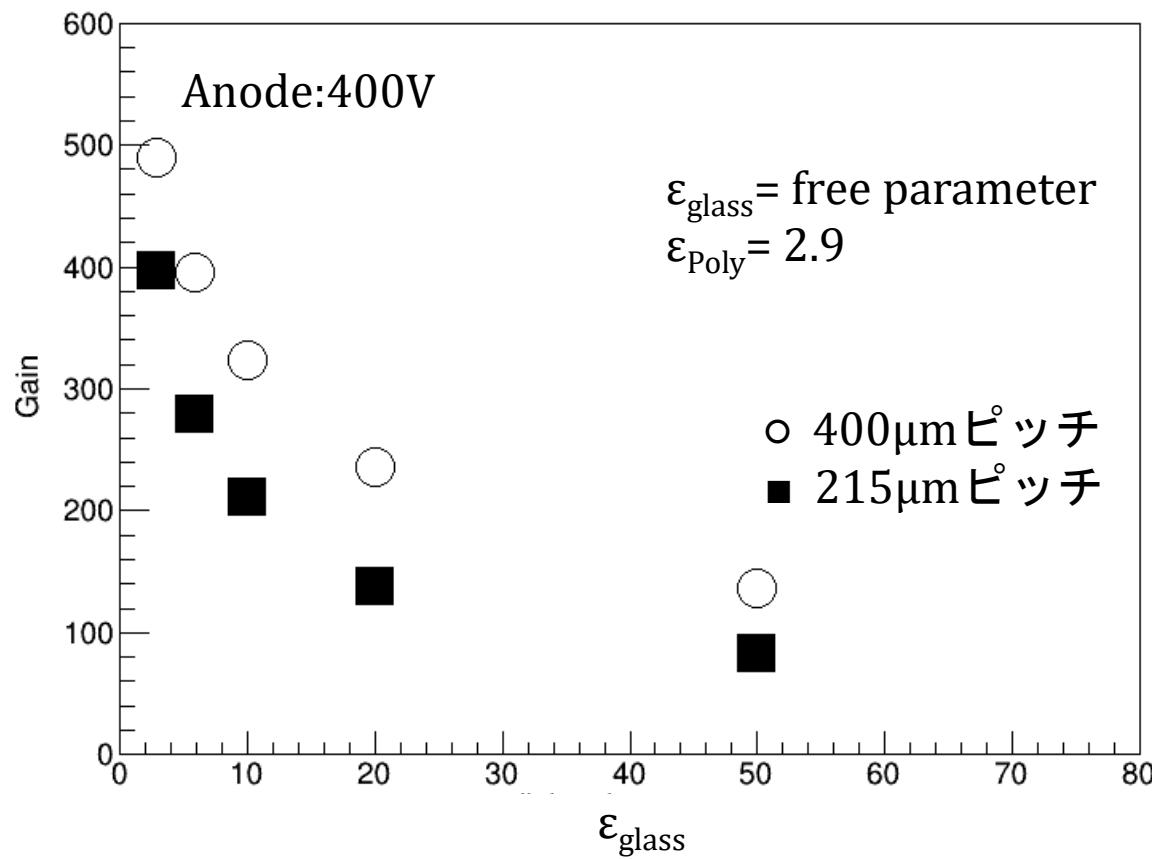
- TGV技術を使った、ガラス基板のμ-PIC(pitch 400 μm, 215 μm)を大日本印刷と共同開発。
- Fe55を使った動作試験を行い、両素子でX線信号を確認。
- 215 μmピッチTGV μ-PICでX線イメージング試験を行い、**2次元位置感度型検出器として動作**することを確認。
- シミュレーション値との乖離の原因としてガラスの誘電率に注目し、ポリイミド膜のないガラスμ-PICを製作中(2019年1月完成予定)

3軸μ-PIC

- Cathodeを分割し、電子雪崩で生じるイオン・電子による**誘導電荷を直接信号としてみる3軸μ-PICを考案**。
- 電子雪崩シミュレーションを行い、ジオメトリパラメータの変化に対する**電子雪崩生成の冗長性を確認**。
- 下-Cathodeの露出幅が小さいほど、ファクターレベルでゲインが上がる。
- 各ストリップへの信号分配を計算し、**積分時間~80 nsの回路**を組み込めば、**製作精度限界(~10 μm)**まで露出幅を小さくしても、同じアンプで読み出せる程度に信号は分配される。
- 試作機作成に向け、製作プロセスも含めて大日本印刷と協議中。

ガラス基板の誘電率とゲインの関係

ガラス誘電率とゲインの関係

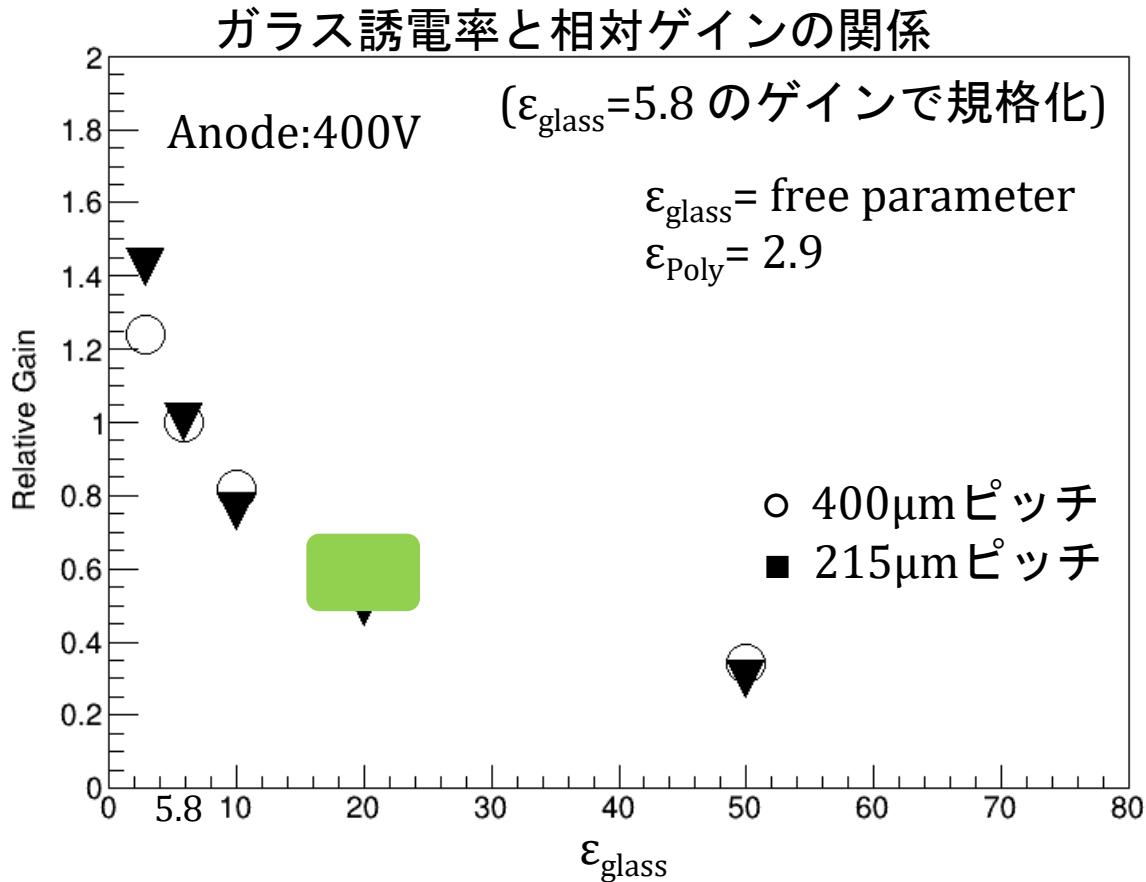


誘電率↑でゲイン↓の傾向

ゲインの降下を説明するのか?

ゲイン降下と実効的な誘電率

- 400μmピッチ: 実測値 ÷ シミュレーション値($\epsilon_{\text{glass}}=5.8, \epsilon_{\text{Poly}}=2.9$) ~ 0.7
- 215μmピッチ: 実測値 ÷ シミュレーション値($\epsilon_{\text{glass}}=5.8, \epsilon_{\text{Poly}}=2.9$) ~ 0.5



ゲイン降下を説明するのは

領域 ⇒ $\epsilon_{\text{glass}} \sim 20$ 前後

誘電率の大きな差が与える
電場構造への影響は？

