

# 電子ビームの光伝導アンテナと 電気光学結晶による測定



大阪大学産業科学研究所

菅 晃一、楊 金峰、神戸 正雄、吉田 陽一

# 内容

## 1. 背景

パルスラジオリシス、電子ビーム・テラヘルツ波の測定

## 2. 電子ビーム加速器

加速器、測定光学系

## 3. 光伝導アンテナを（PCA）用いた測定

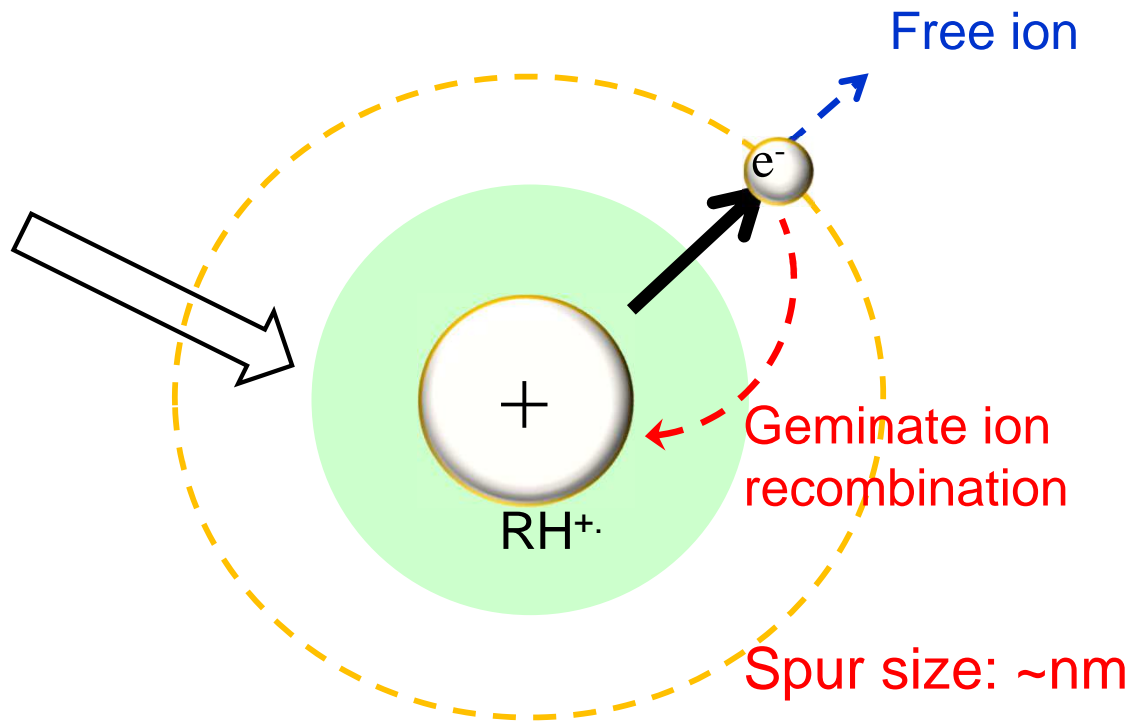
測定時間プロファイルのPCA位置依存性、電荷量依存性

## 4. 電気光学（EO）結晶を用いた測定

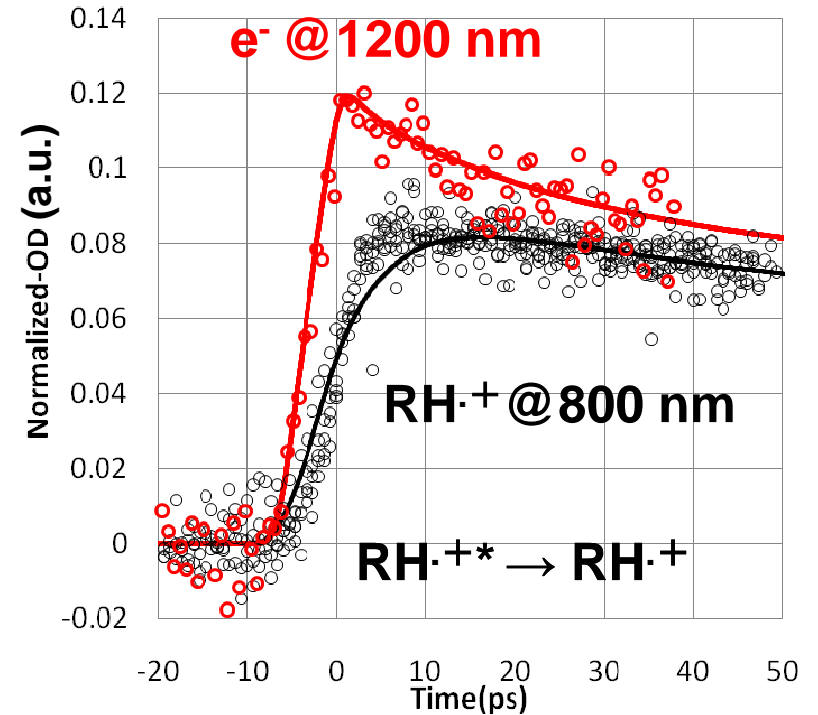
ビーム径方向電場の測定、EO結晶測定系の試験

## 5. まとめ

# パルスラジオリシス（時間分解過渡吸収分光）



量子ビーム誘起超高速反応



ドデカンにおけるカチオンラジカルと電子の時間変化

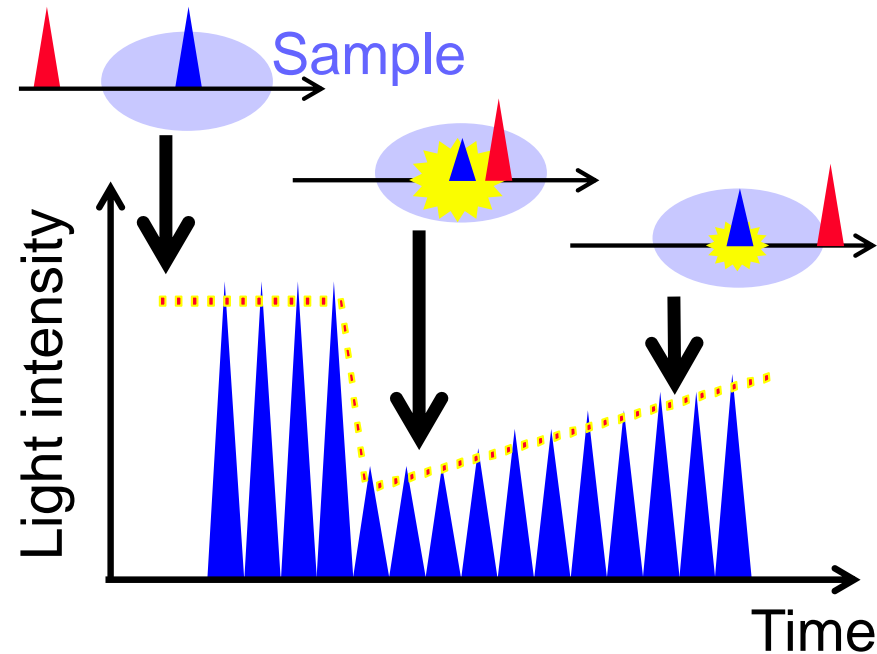
量子ビーム誘起超高速反応の解明は、その後にかかる反応解析・制御のために重要

→放射線治療、原子炉水化学、ナノファブリケーションに対する新たな知見

→短パルス電子ビームを用いて、時間分解能の向上が可能

# パルスラジオリシスによる反応解析の原理

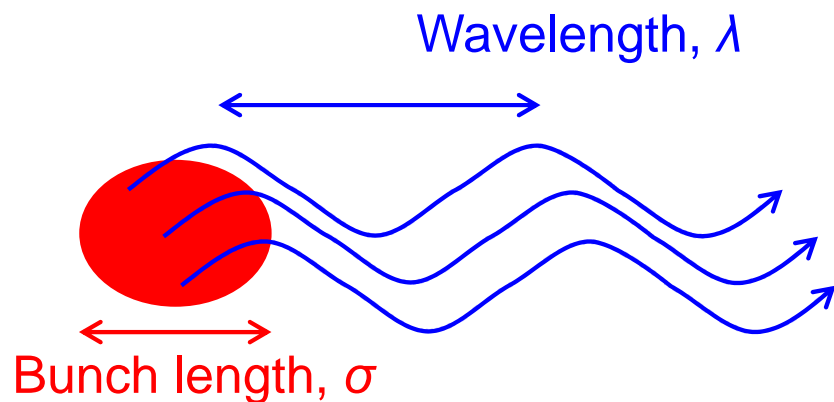
Electron bunch  
bunch      Optical pulse  
                 from laser



ストロボスコピック法を用いた  
パルスラジオリシス

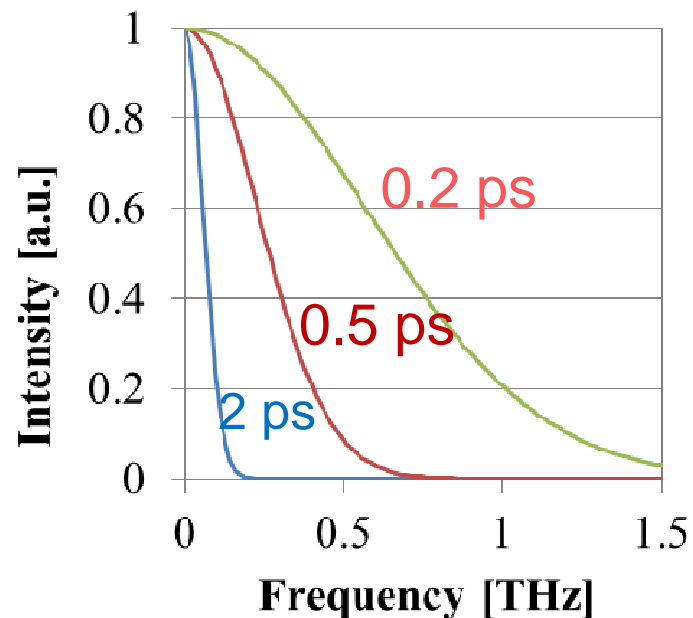
パルスラジオリシスの時間分解能を向上するためには、  
超短パルス電子ビームの発生・診断が不可欠

# 電子ビームのコヒーレント放射



コヒーレントの場合

$$\lambda > \sigma, I \propto N^2$$



バンチ形状因子,  $F_b(\omega)$

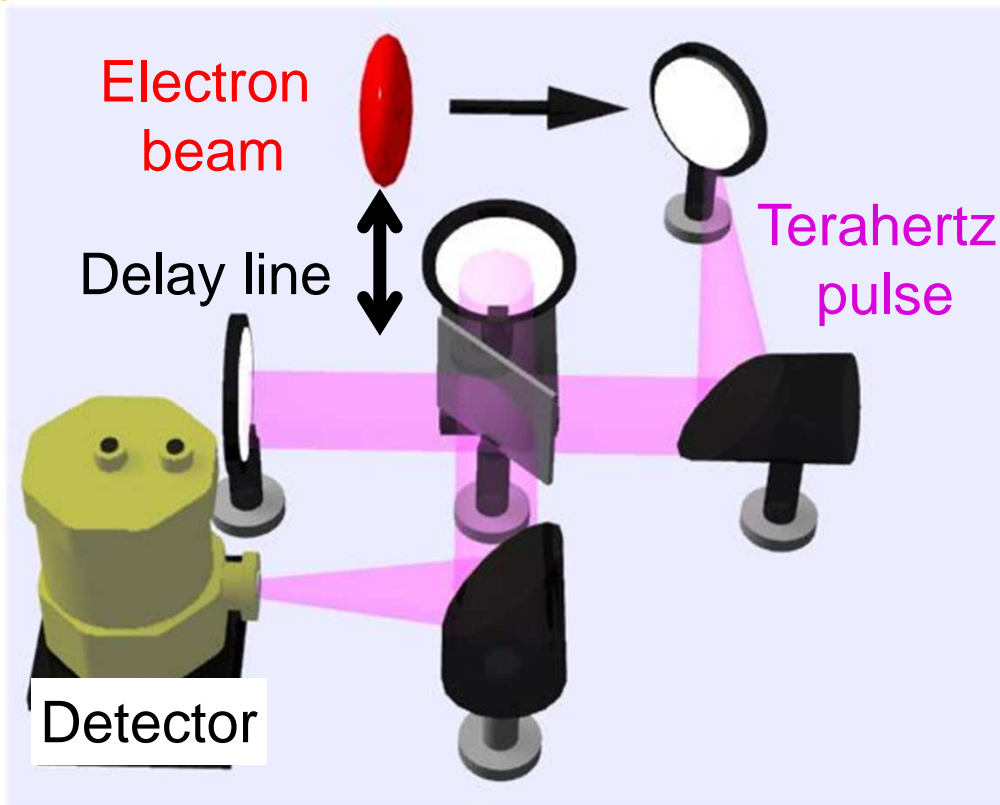
$$F_b(\omega) = \exp(-(\sigma\omega)^2)$$

@ Gaussian distribution

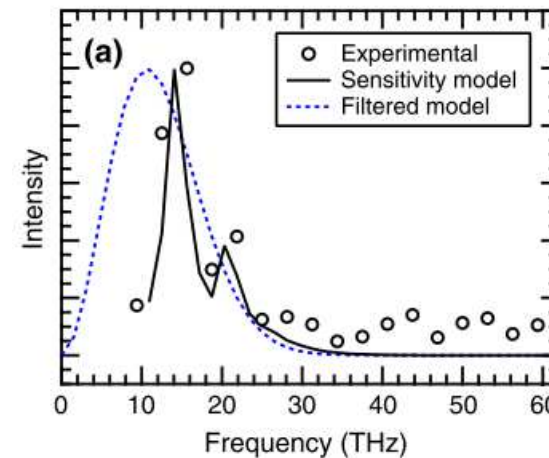
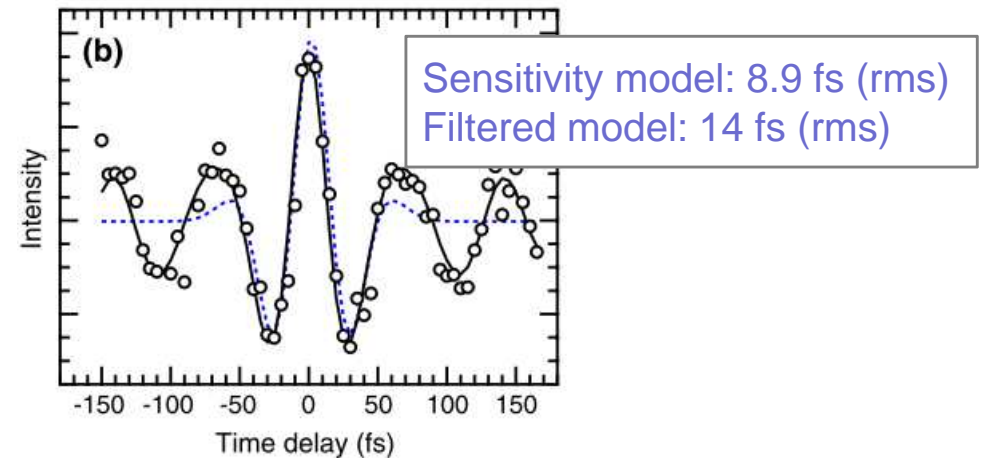
T. Takahashi et al., Phys. Rev. E 50, 4041 (1994).

- 1 psの逆数 : 1 THz
- 短パルス電子ビームほど、高周波の電磁波を放射

# 背景～干渉計を用いた電子ビームパルス幅測定～



Measurement of coherent transition radiation (CTR) using Michelson interferometer  
Beam splitter: HRSi  
Detector: Bolometer, MCT detector



Interferogram measured by mercury cadmium telluride (MCT) detector  
I. Nozawa et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 17, 072803 (2014).

時間領域測定 of 拡張

# 内容

## 1. 背景

パルスラジオリシス、電子ビーム・テラヘルツ波の測定

## 2. 電子ビーム加速器

加速器、測定光学系

## 3. 光伝導アンテナを（PCA）用いた測定

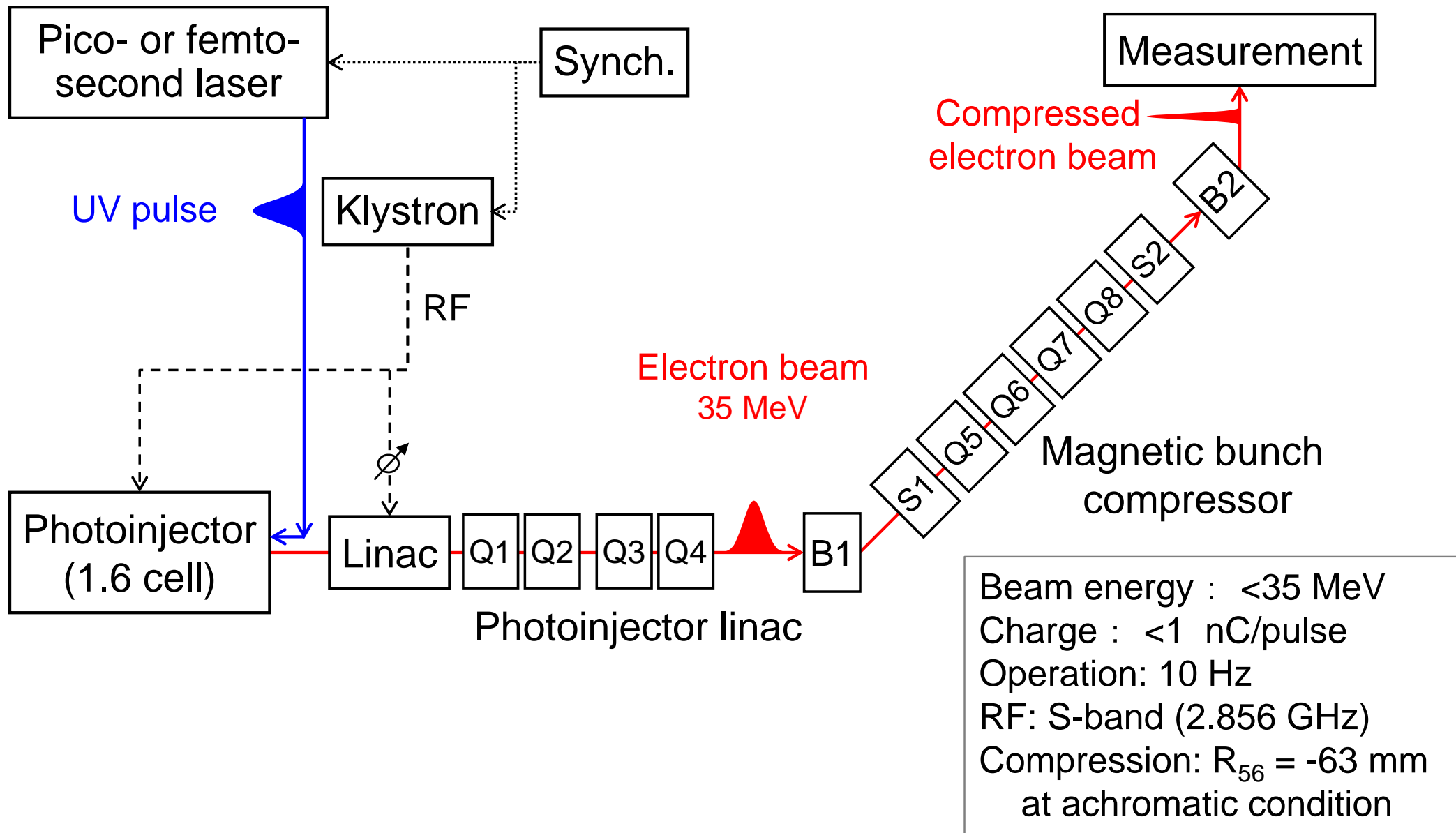
測定時間プロファイルのPCA位置依存性、電荷量依存性

## 4. 電気光学（EO）結晶を用いた測定

ビーム径方向電場の測定、EO結晶測定系の試験

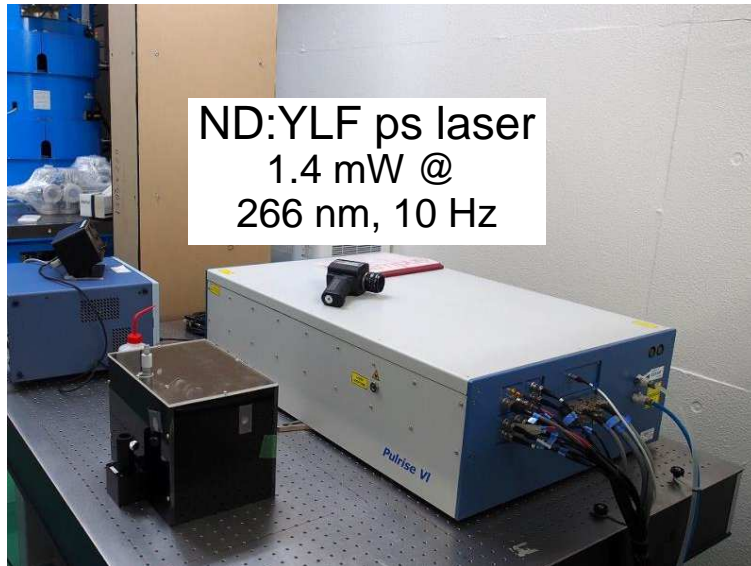
## 5. まとめ

# Sバンドフォトカソード高周波電子銃加速器

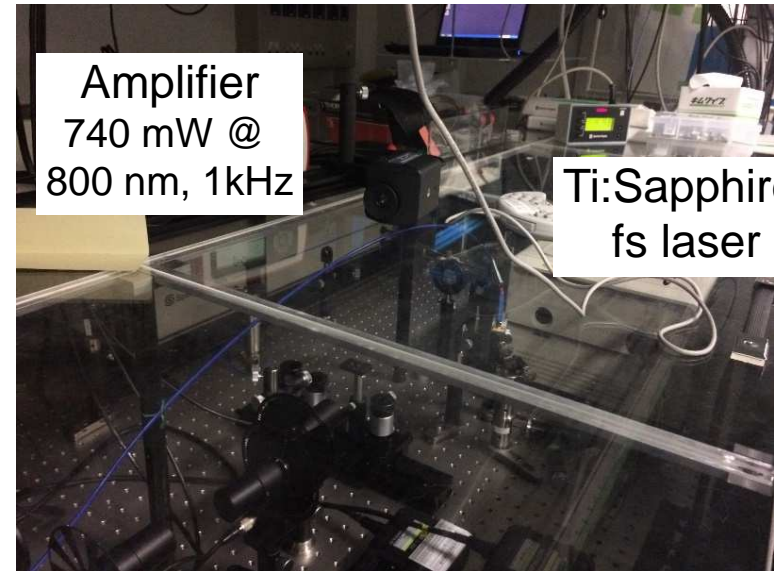




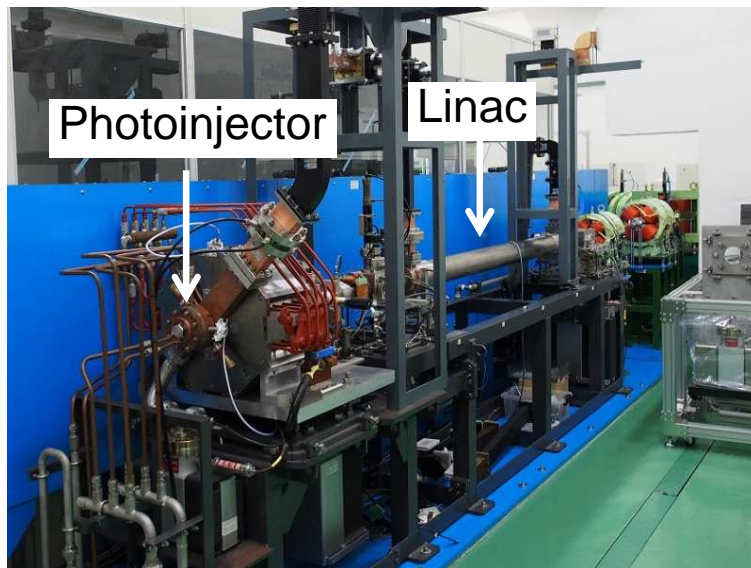
# 加速器の写真



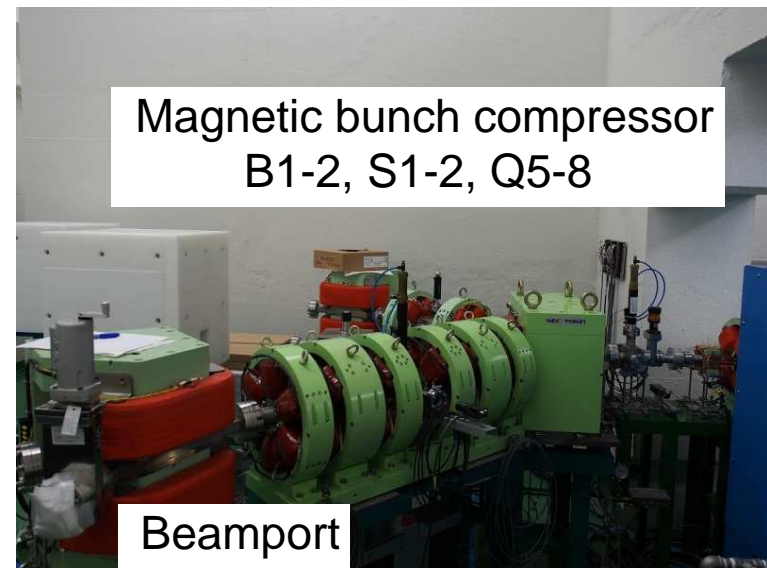
Picosecond laser



Femtosecond laser



Accelerator



Magnetic bunch compressor

# 内容

## 1. 背景

パルスラジオリシス、電子ビーム・テラヘルツ波の測定

## 2. 電子ビーム加速器

加速器、測定光学系

## 3. 光伝導アンテナを（PCA）用いた測定

測定時間プロファイルのPCA位置依存性、電荷量依存性

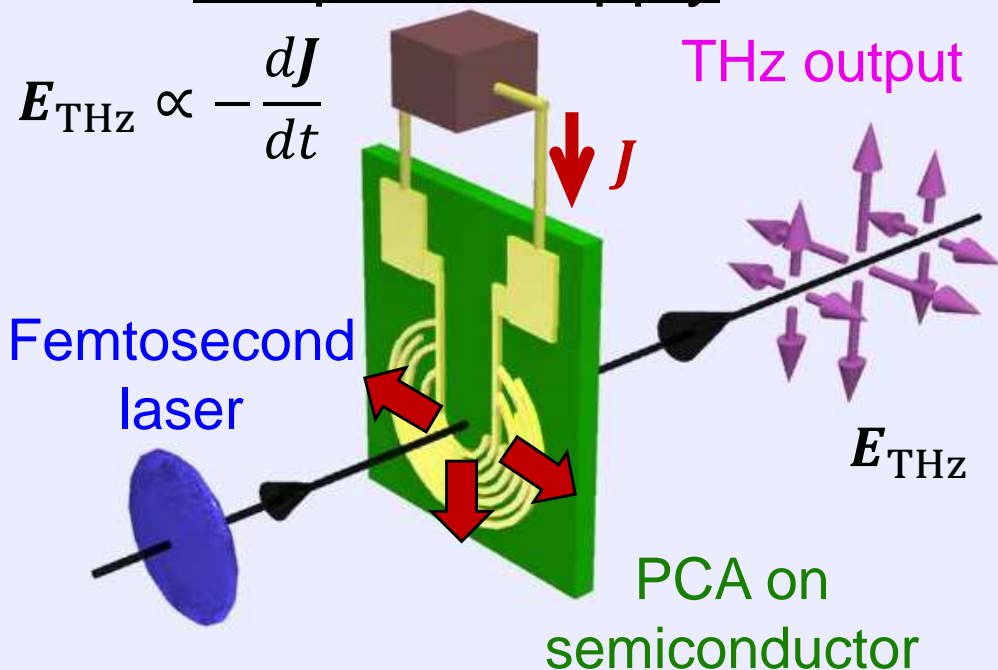
## 4. 電気光学（EO）結晶を用いた測定

ビーム径方向電場の測定、EO結晶測定系の試験

## 5. まとめ

# ラジアル偏光特性を有する光伝導アンテナ (PCA)

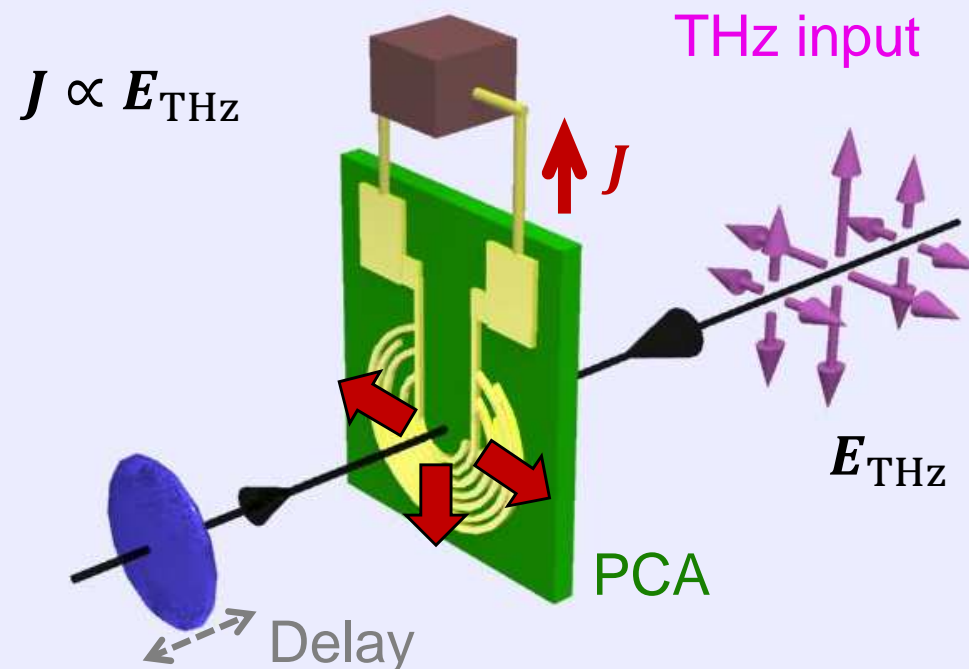
DC power supply



テラヘルツ波を発生する場合

大口径PCA製作とテラヘルツ波発生  
K. Kan et al., Appl. Phys. Lett. 102, 221118 (2013).

Ammeter



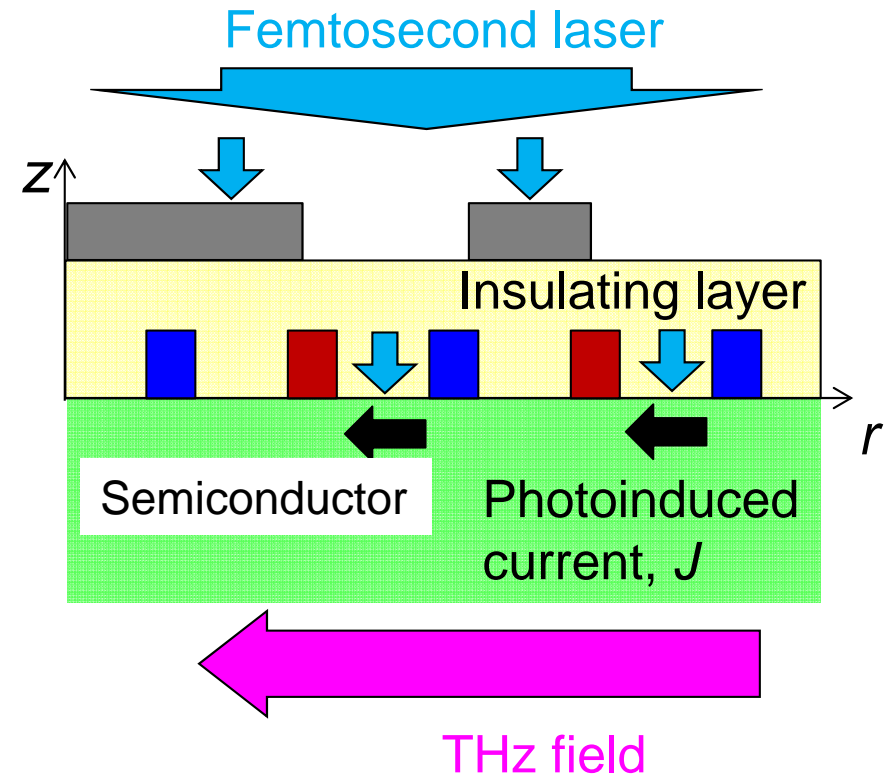
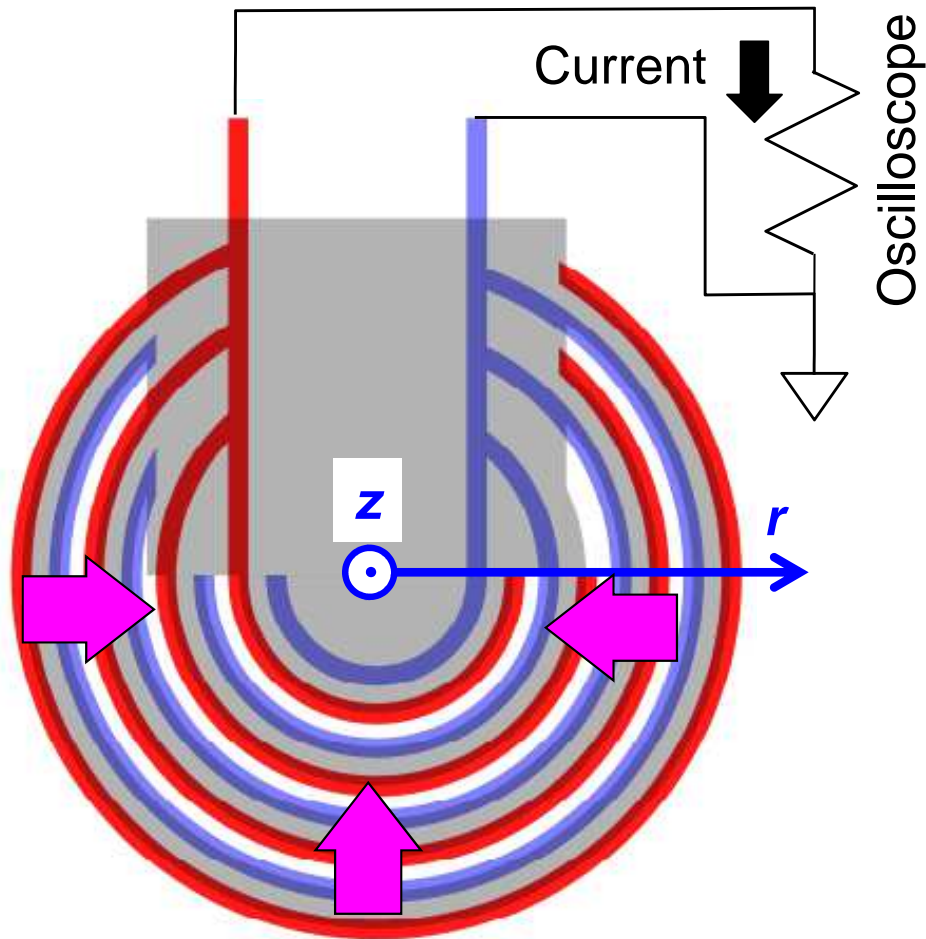
テラヘルツ波を検出する場合

大口径PCAによるCTR計測  
K. Kan et al., Proc. NAPAC2016, Chicago, 1279–1281 (2016).

ラジアル偏光テラヘルツ波を検出できれば、

- 簡便な時間領域のビーム診断
- テラヘルツ強度分布の偏心の診断

# PCAの電極と信号

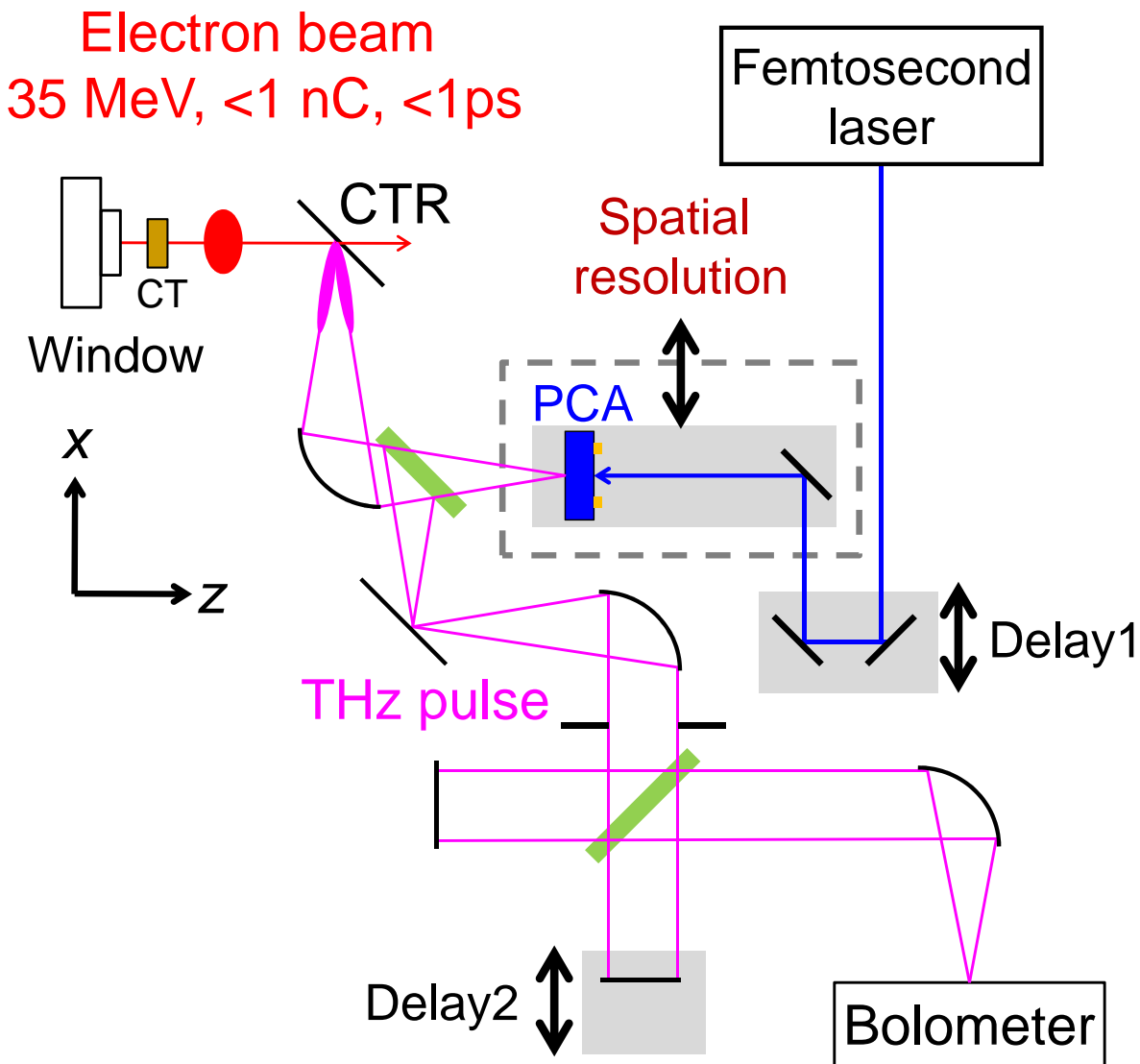


Cross section of PCA

Electrodes (red&blue) and photomask (grey) on PCA for inward THz field (purple)

- Inward THz electric field lead to inward photoinduced current.
- Inward THz electric field results in positive signal in oscilloscope signal.

# コヒーレント遷移放射の測定光学系

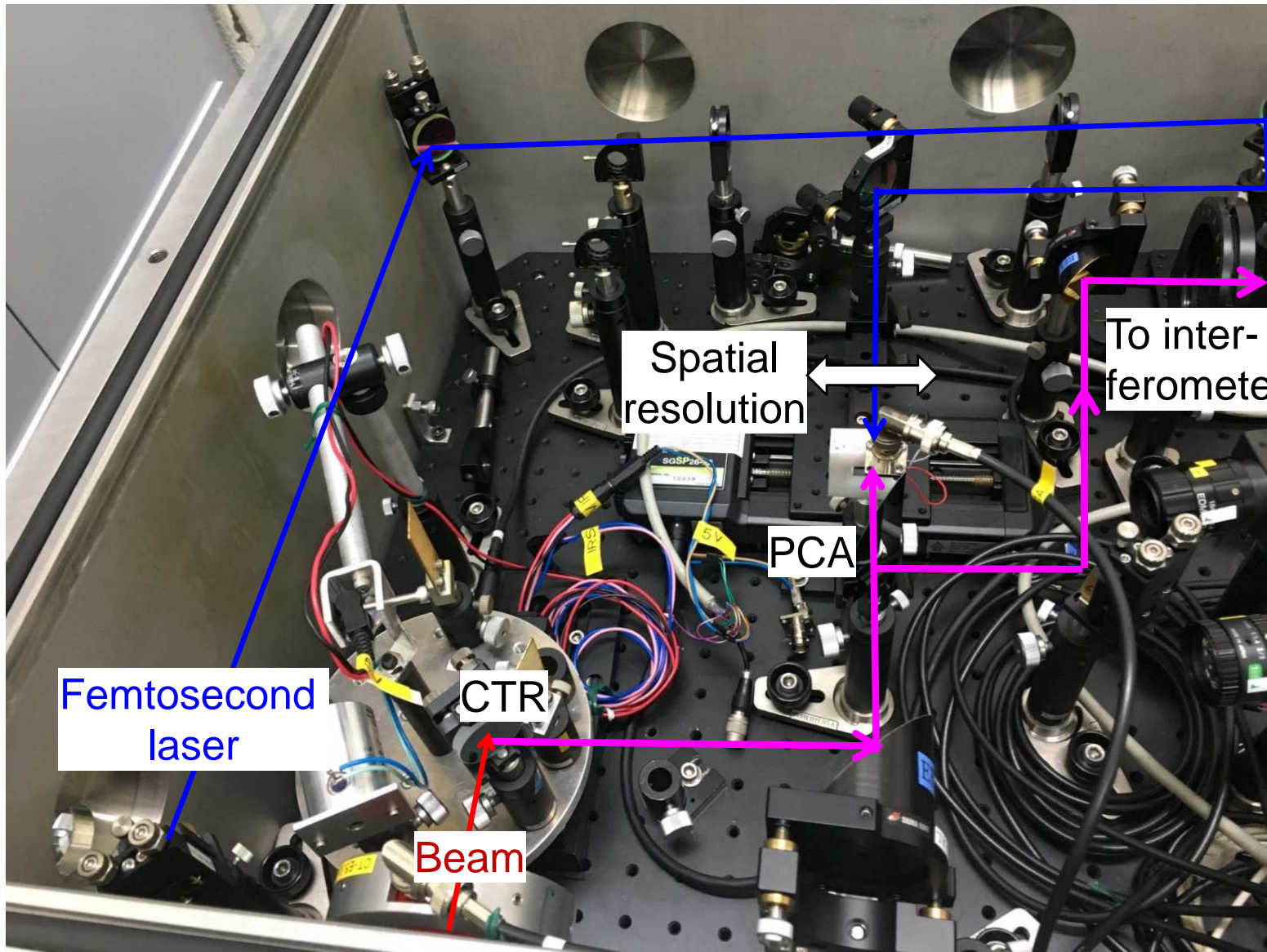


- 時間z分解、PCAの移動による空間x分解
- 結像光学系（2倍の焦点距離の位置にCTRとPCA）
- 大口径光伝導アンテナ（PCA）9 mm直径
- 干渉計と同時測定も可能

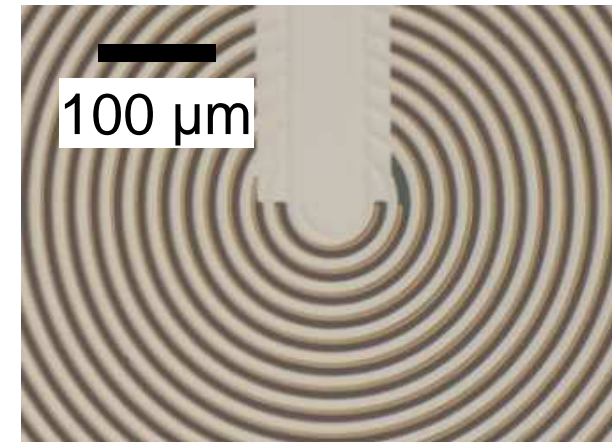
→位置x依存性、電荷量依存性を測定

テラヘルツ波の時間・空間分解計測

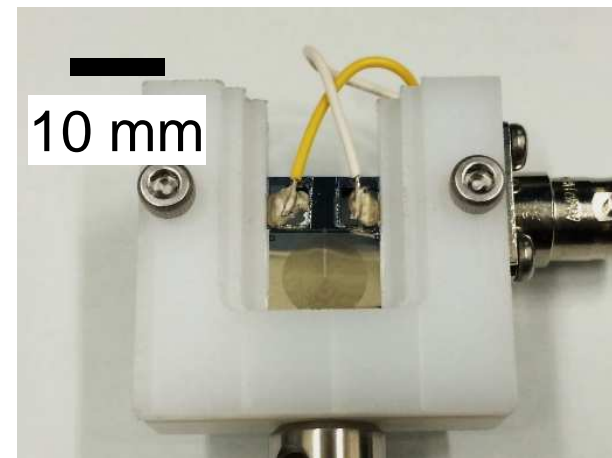
# 測定光学系等の写真



光学系



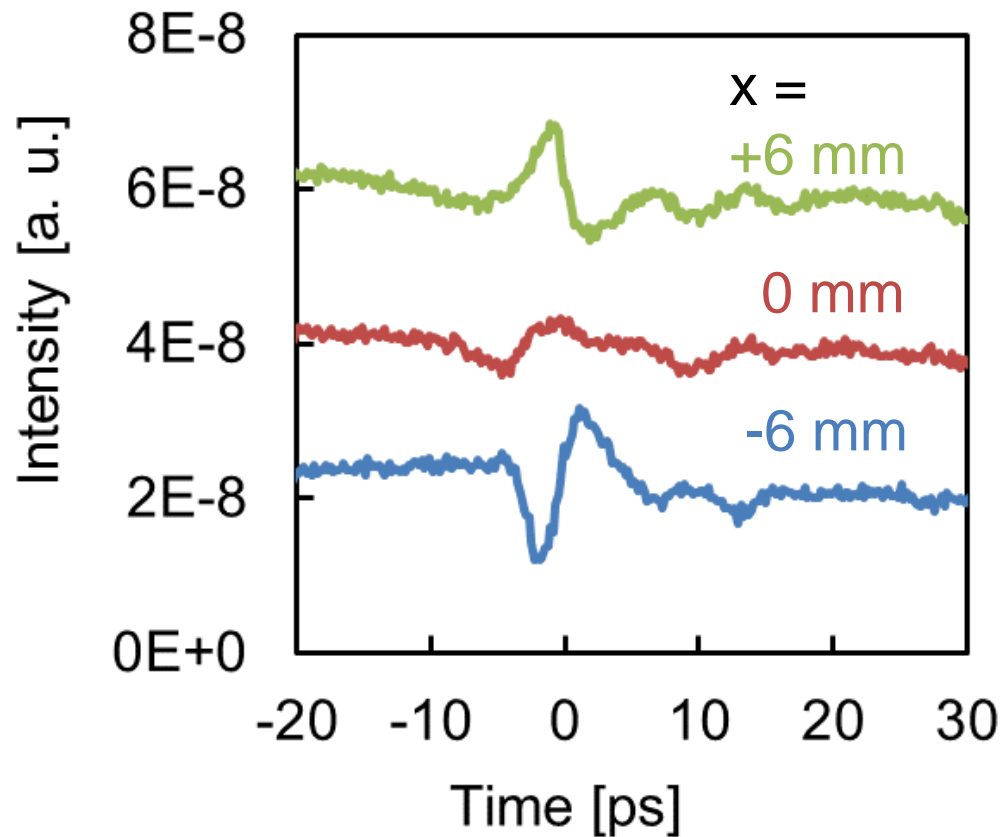
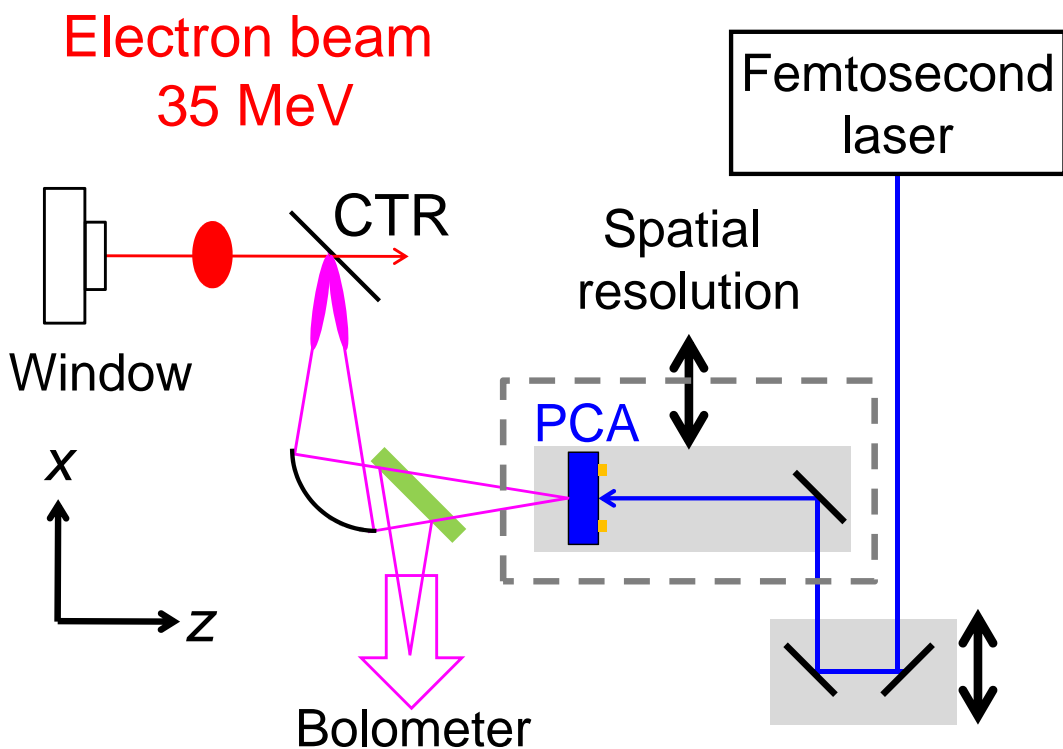
PCAの電極



PCAの治具

PCA 9 mm直径でテラヘルツ電場を観測

# 位置依存性～波形～



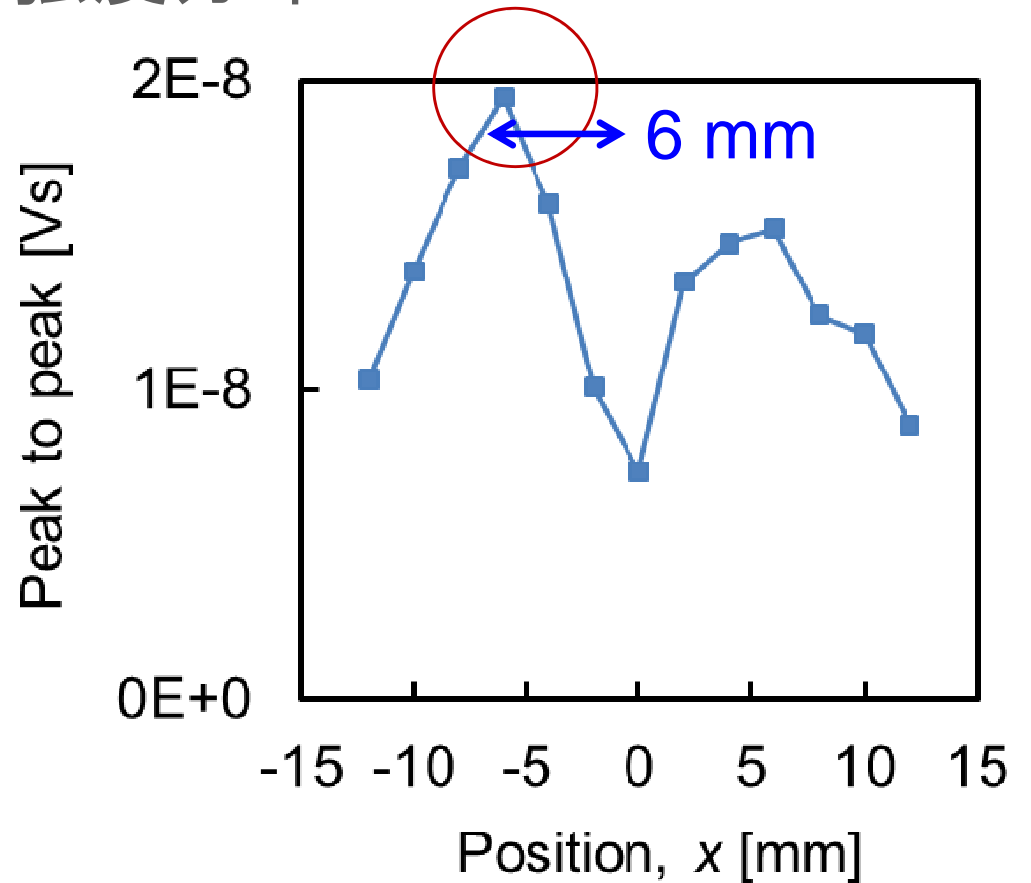
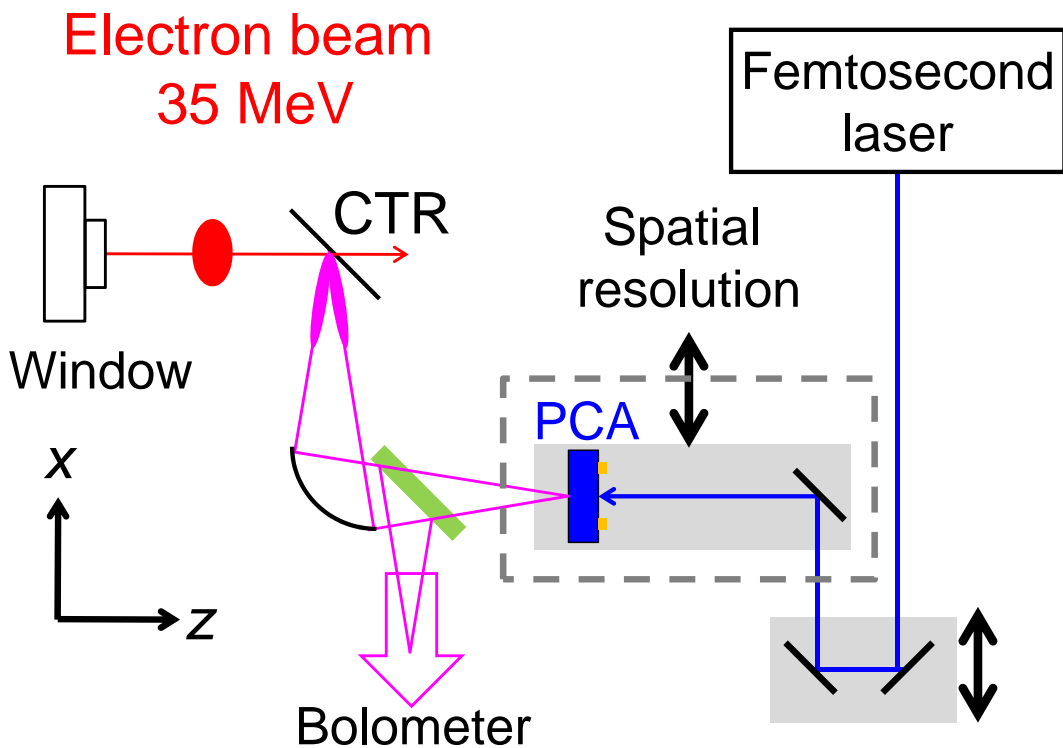
テラヘルツ波の時間・空間分解計測

PCAのx方向の位置を移動させて、  
時間領域測定 of 光学遅延を掃引。

位置による電場波形の違い  
Q400pC, IR280μJ, <100Pa  
Avg5, 0.2 ps, 270 pts

- 位置により極性が反転
  - 中心は弱い？
- Peak to peak値で比較

# 位置依存性～強度分布～



テラヘルツ波の時間・空間分解計測

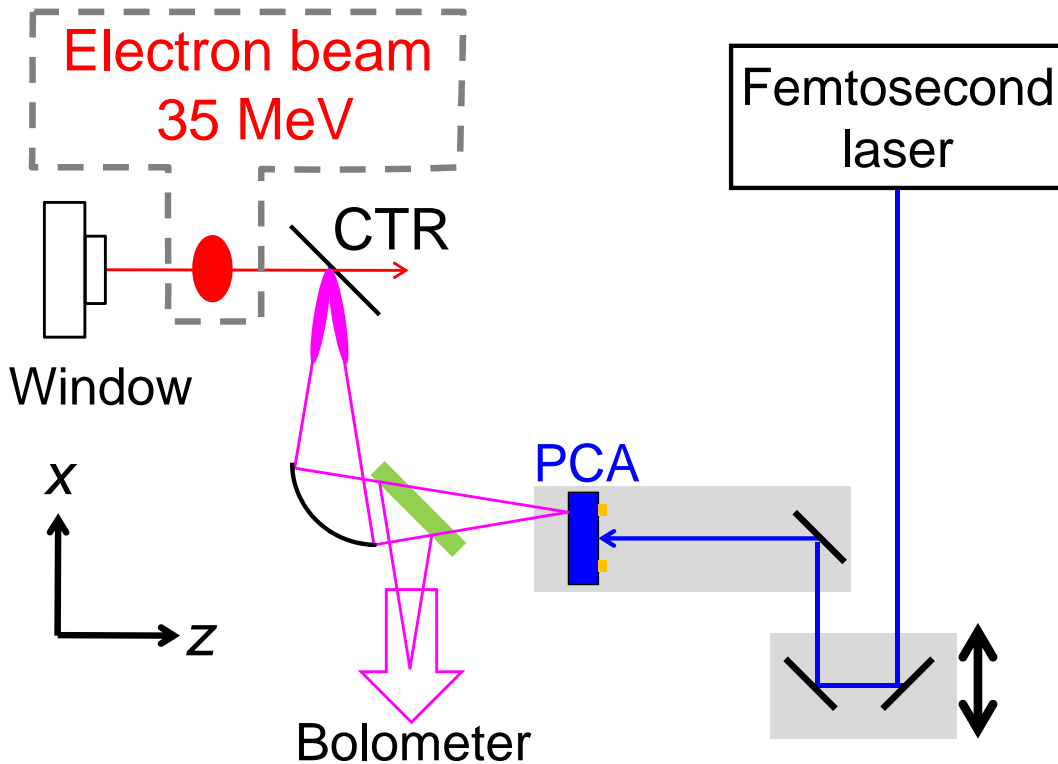
Peak-to-peak値の位置依存性

PCAのx方向の位置を移動させて、  
時間領域測定 of 光学遅延を掃引。

- パルス電場が大きい位置の間隔: 12 mm
- x = -6 mm で測定を継続

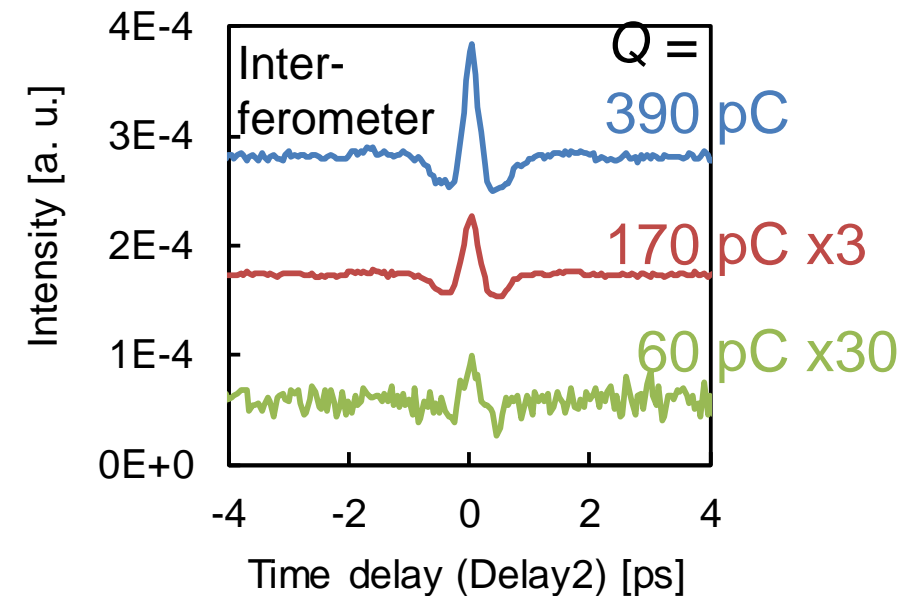
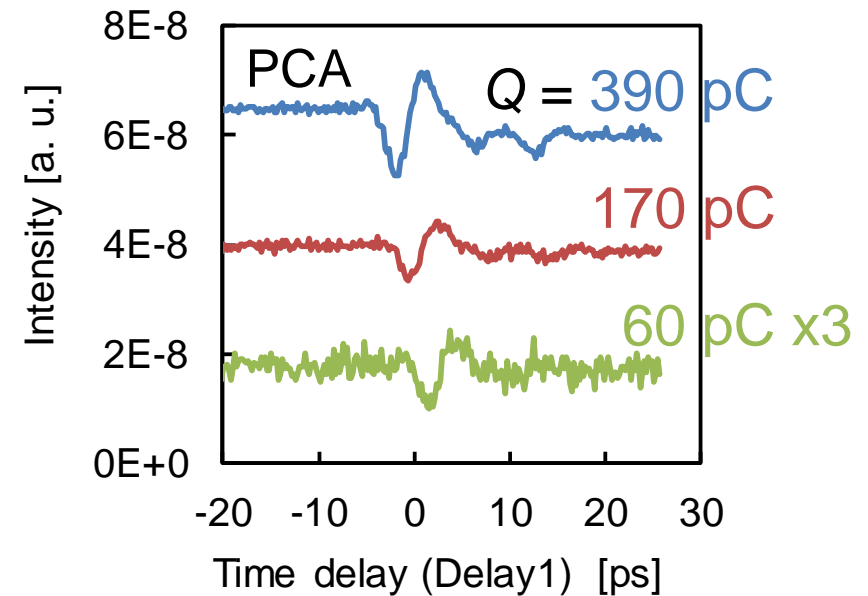


# 電荷量依存性 (PCAと干渉計)



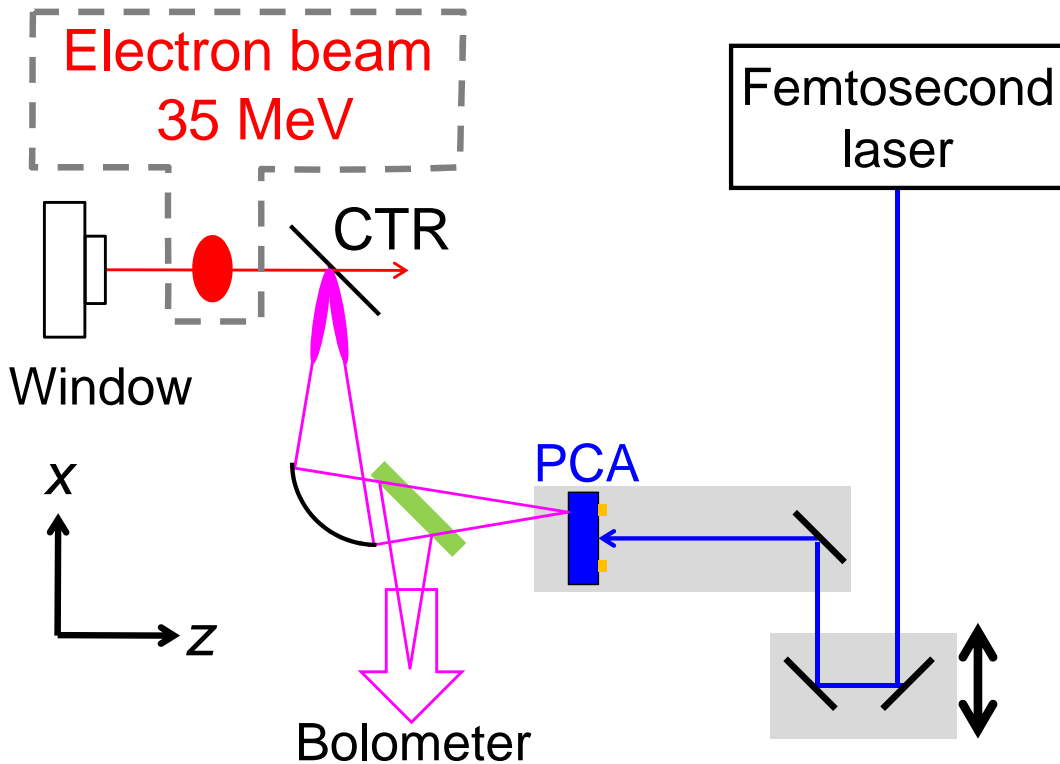
テラヘルツ波の時間・空間分解計測  
電荷量を変化させて波形を計測

- PCAの信号強度  $\propto$  電場  
 $\propto$  (エネルギー)<sup>0.5</sup>  $\propto$  電荷量
- ボロメータの信号強度  
 $\propto$  エネルギー  $\propto$  電荷量<sup>2</sup>



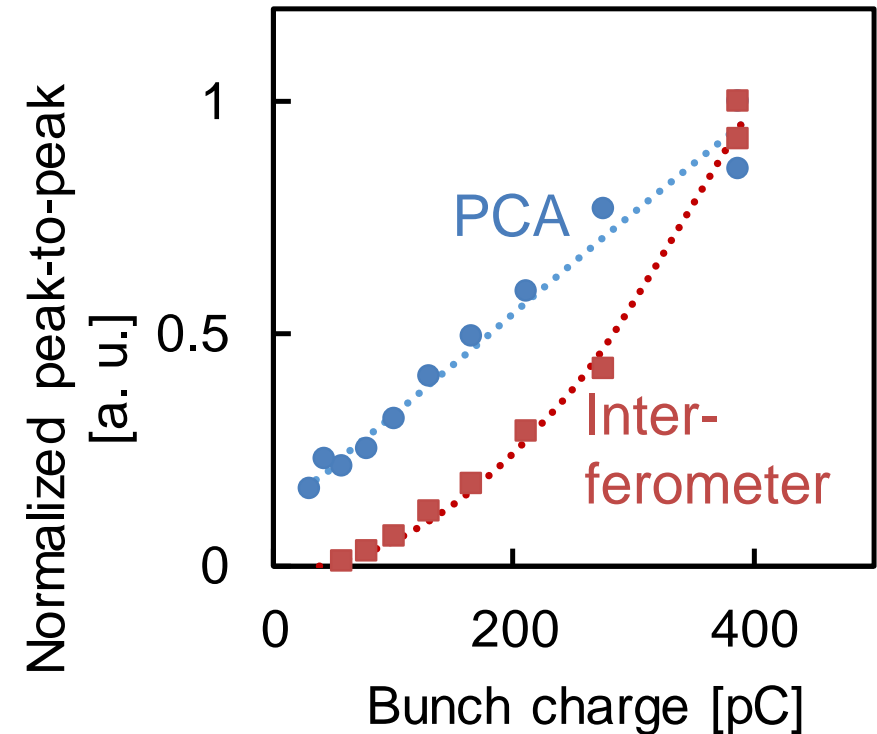
電荷量による波形の違い  
IR280  $\mu$ J, x-6mm

# 電荷量依存性 (PCAと干渉計)



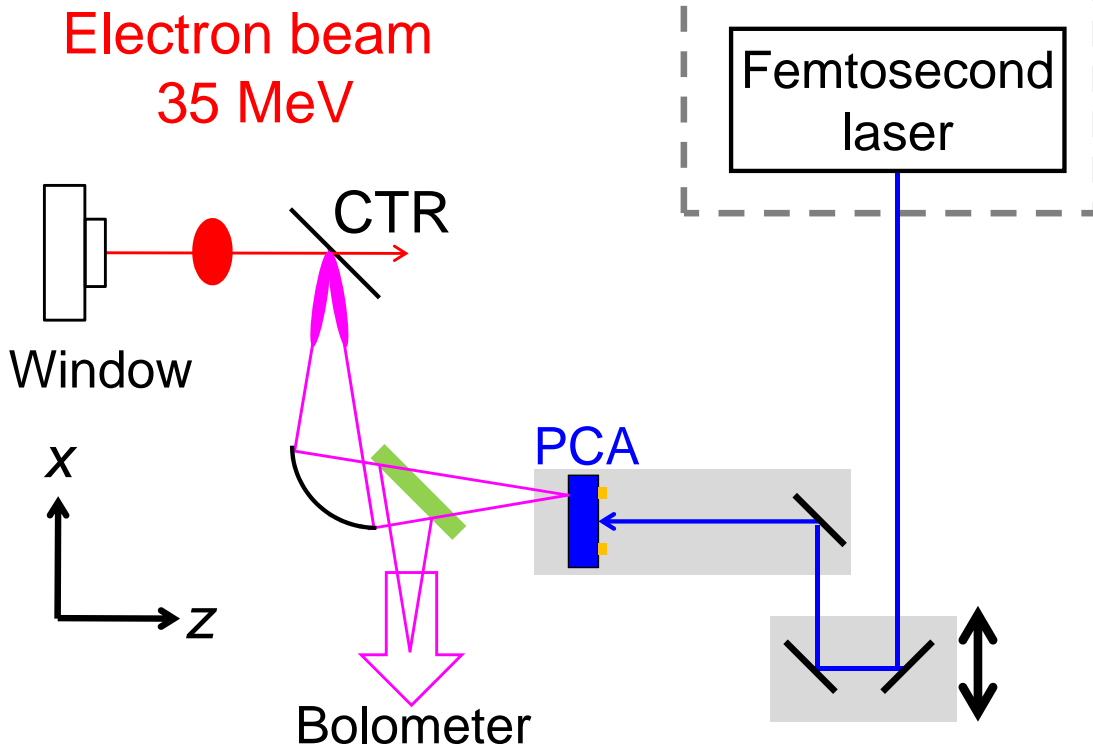
テラヘルツ波の時間・空間分解計測  
電荷量を変化させて波形を計測

- PCAの信号強度  $\propto$  電場  
 $\propto$  (エネルギー)<sup>0.5</sup>  $\propto$  電荷量
- ボロメータの信号強度  
 $\propto$  エネルギー  $\propto$  電荷量<sup>2</sup>



電荷量依存性

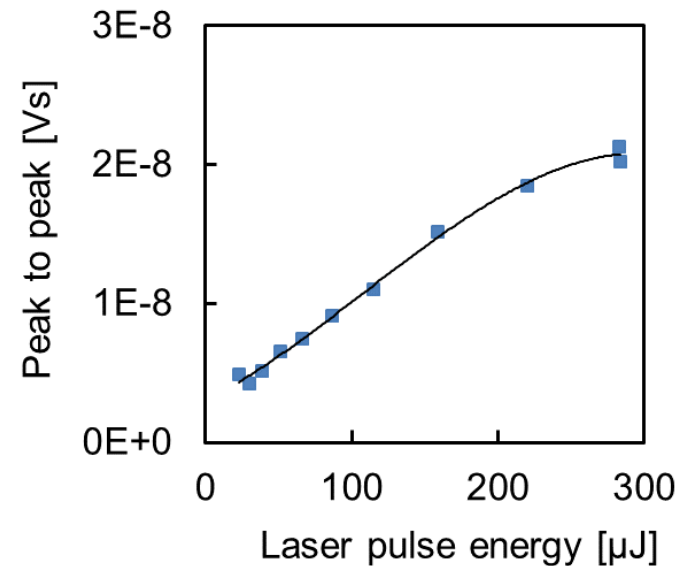
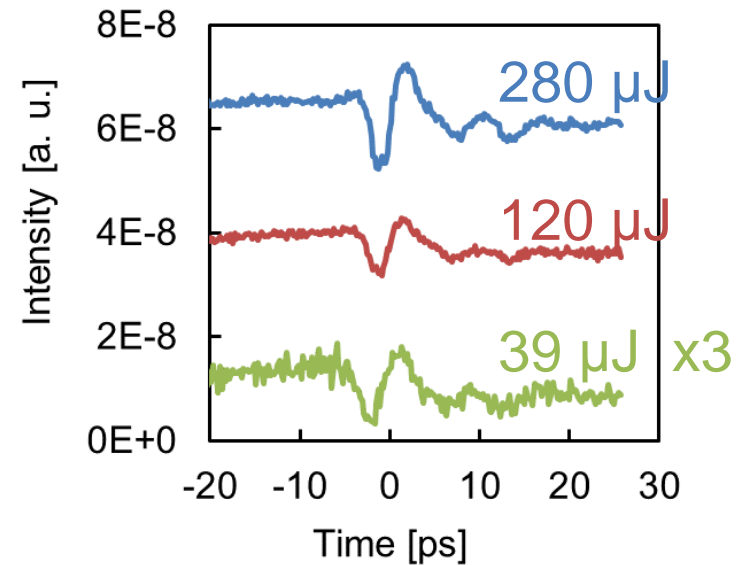
# レーザー光強度依存性



テラヘルツ波の時間・空間分解計測

PCAを駆動するレーザー光強度を  
NDフィルターにより調整。

PCA上の光キャリアの生成のためには、  
>100  $\mu\text{J}$ のパルスエネルギーが好ましい



レーザー光強度依存性  
Q380pC, x-6mm

# 内容

## 1. 背景

パルスラジオリシス、電子ビーム・テラヘルツ波の測定

## 2. 電子ビーム加速器

加速器、測定光学系

## 3. 光伝導アンテナを（PCA）用いた測定

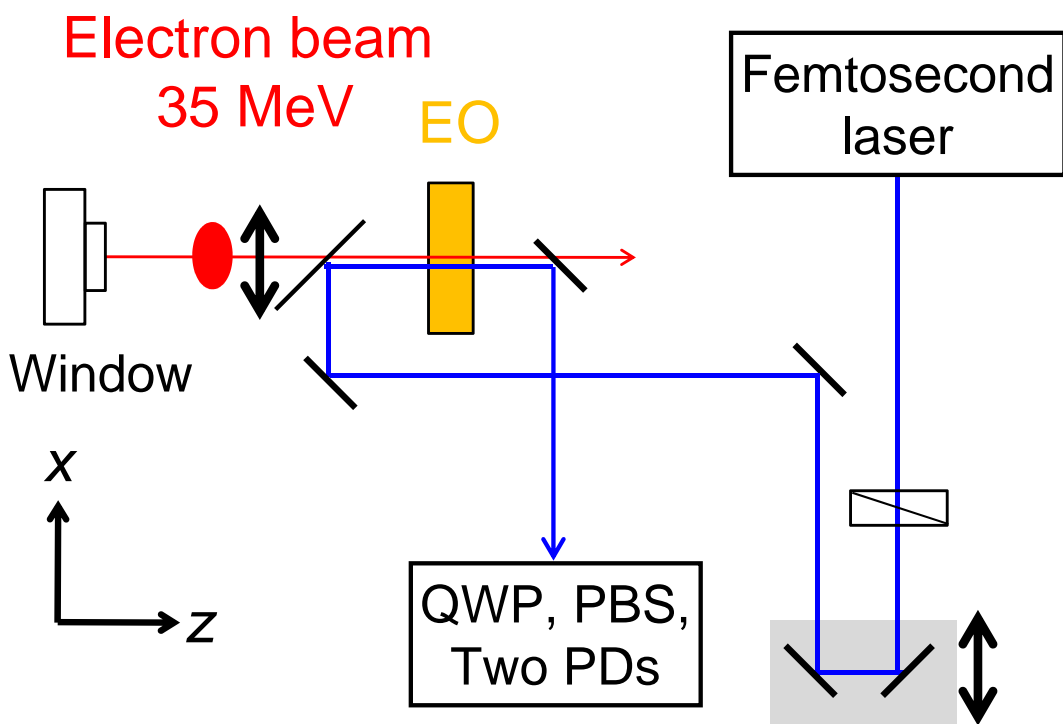
測定時間プロファイルのPCA位置依存性、電荷量依存性

## 4. 電気光学（EO）結晶を用いた測定

ビーム径方向電場の測定、EO結晶測定系の試験

## 5. まとめ

# 電気光学 (EO) 結晶による自由空間径方向電場の測定



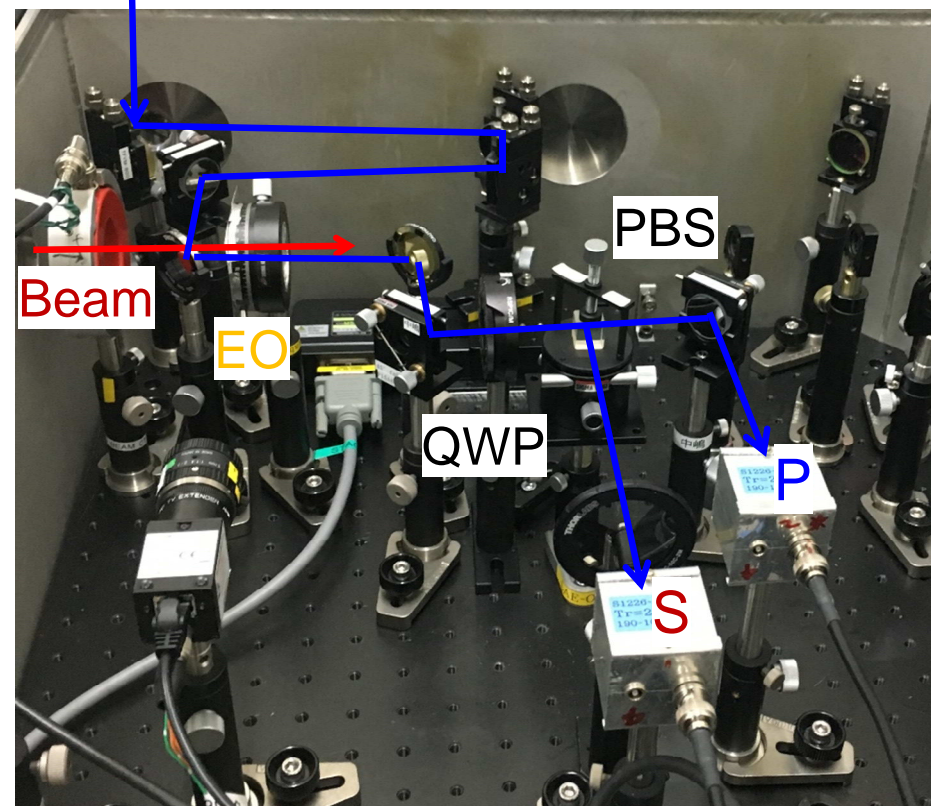
電子ビームの位置を変化させて、  
バランス検出

ZnTe(110) t1 mm

Laser <1 mm (FWHM)

Beam <3 mm (FWHM)

Femtosecond  
laser



光検出器PおよびS成分を検出

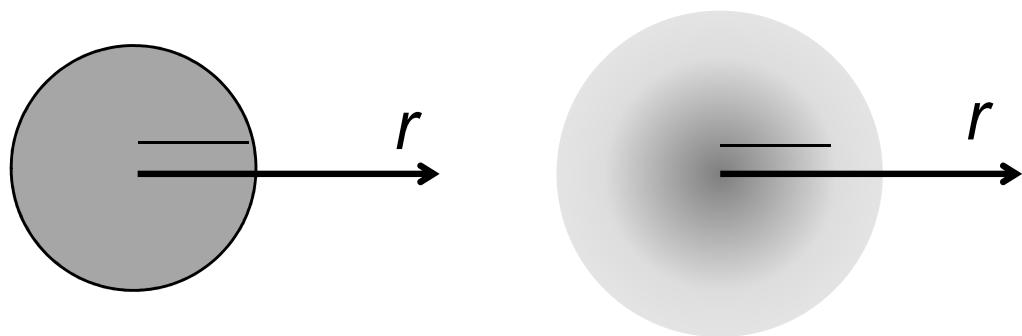
# 球対称電荷が発生する径方向 $r$ 電場

$$\nabla \cdot \epsilon_0 E = \rho$$

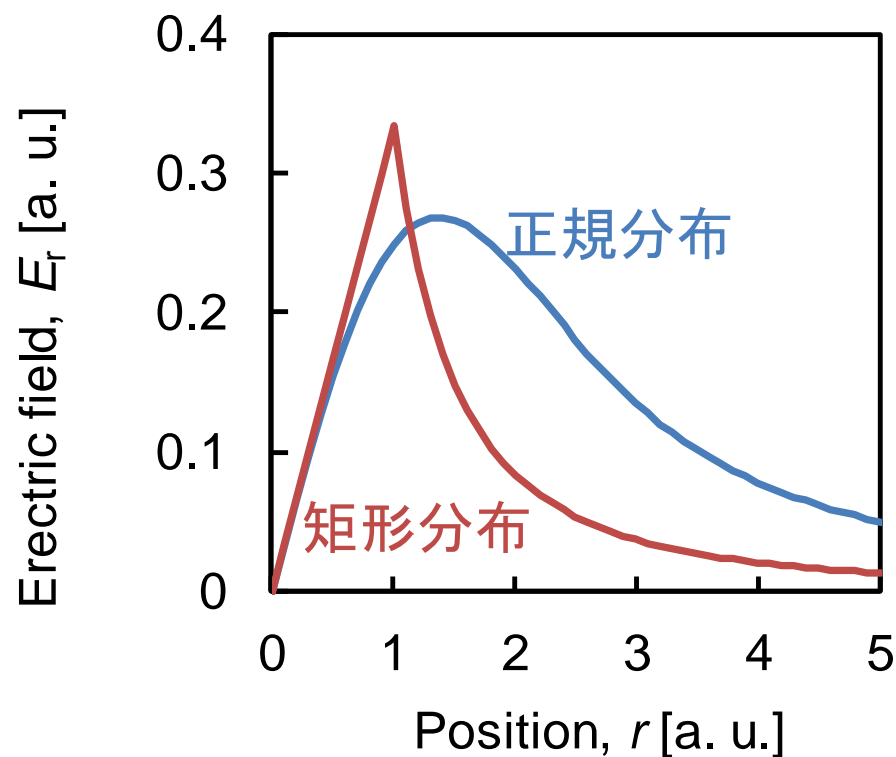
$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \epsilon_0 E(r)) = \rho(r)$$

$$\rho(r) = C \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_r^2}\right)$$

$$\therefore E(r) = \frac{C}{\epsilon_0 r^2} \left\{ \frac{\sqrt{2\pi}}{2} \sigma_r^3 \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{2}r}{2\sigma_r}\right) - \sigma_r^2 r \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_r^2}\right) \right\}$$

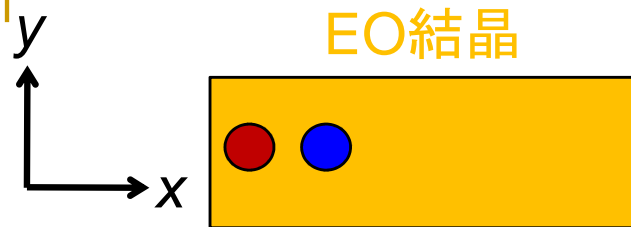


電荷分布（矩形と正規分布）

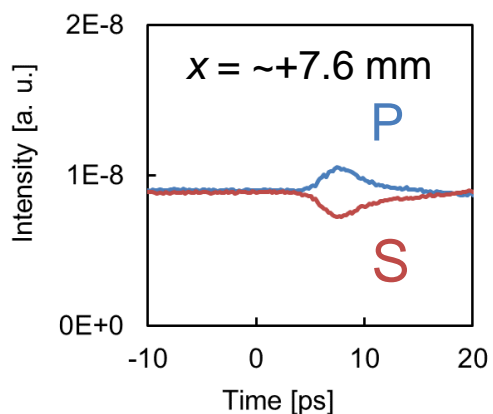
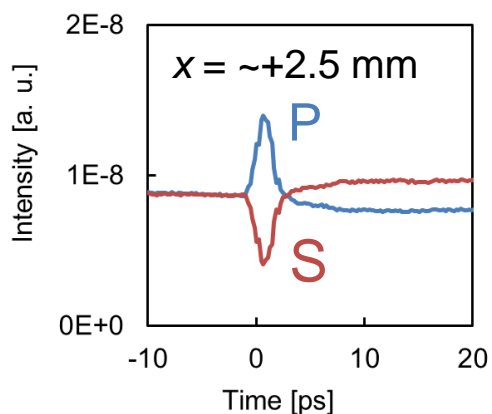
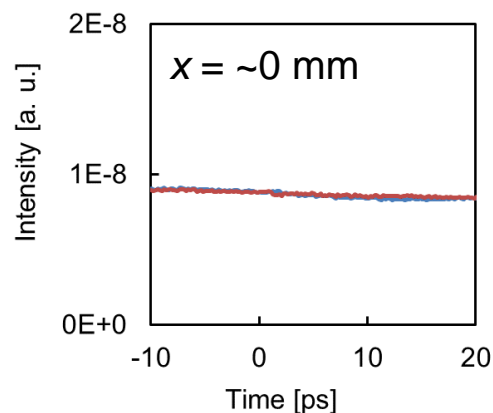
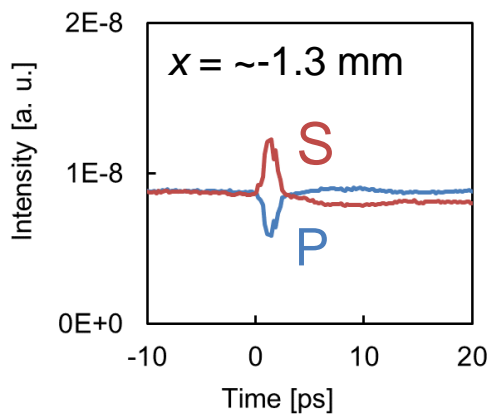


電場の位置依存性  
 正規分布の場合、緩やかな電  
 荷密度・電場の変化

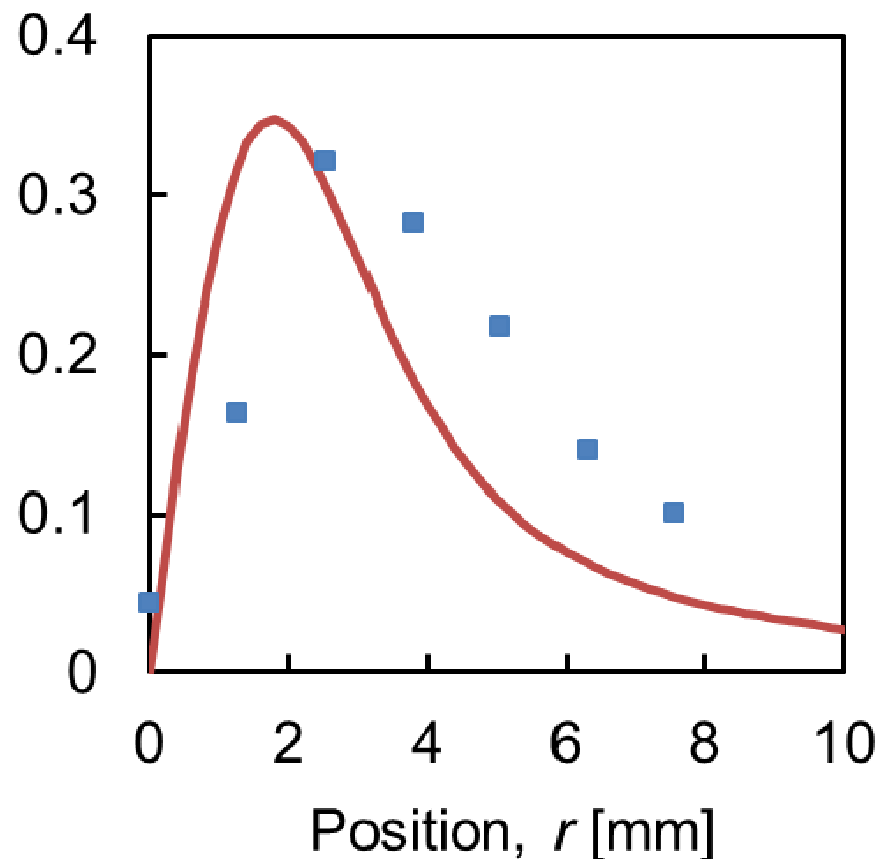
# 電場のビーム位置依存性



レーザー  
電子ビーム



P only or field [a. u.]



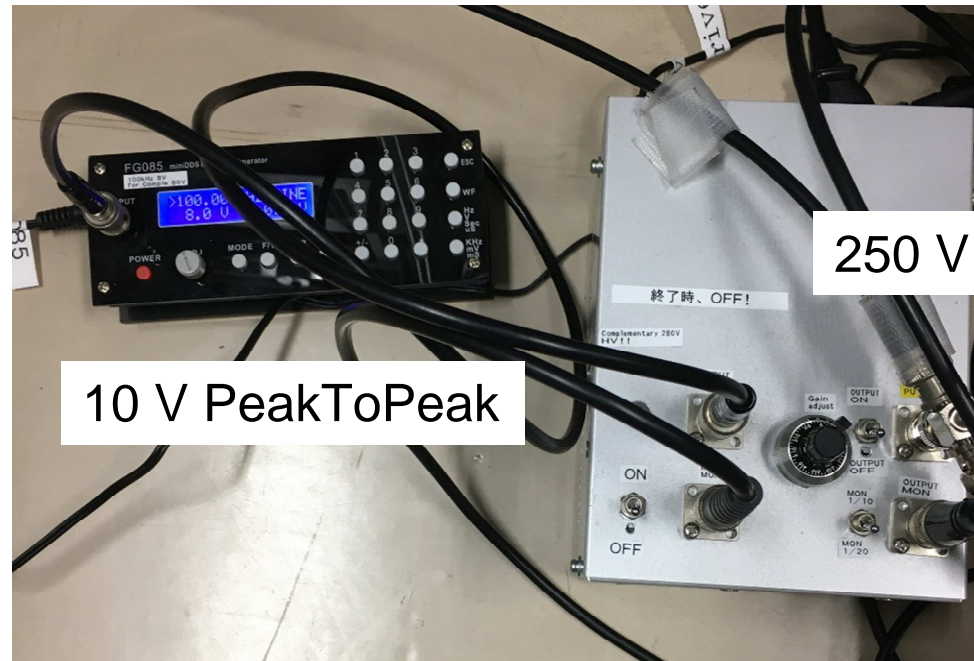
P成分のみと電場分布モデルと比較

- PとS成分がビーム位置で極性反転
- 離れると電場の時間幅は長くなる？

# 径方向の電場測定の見証

- 自由空間を走るビームの径方向電場は測定可能であった
  - 本研究では、ZnTe(100)を用いた軸方向電場の検出には至っていない
- 解釈や方法

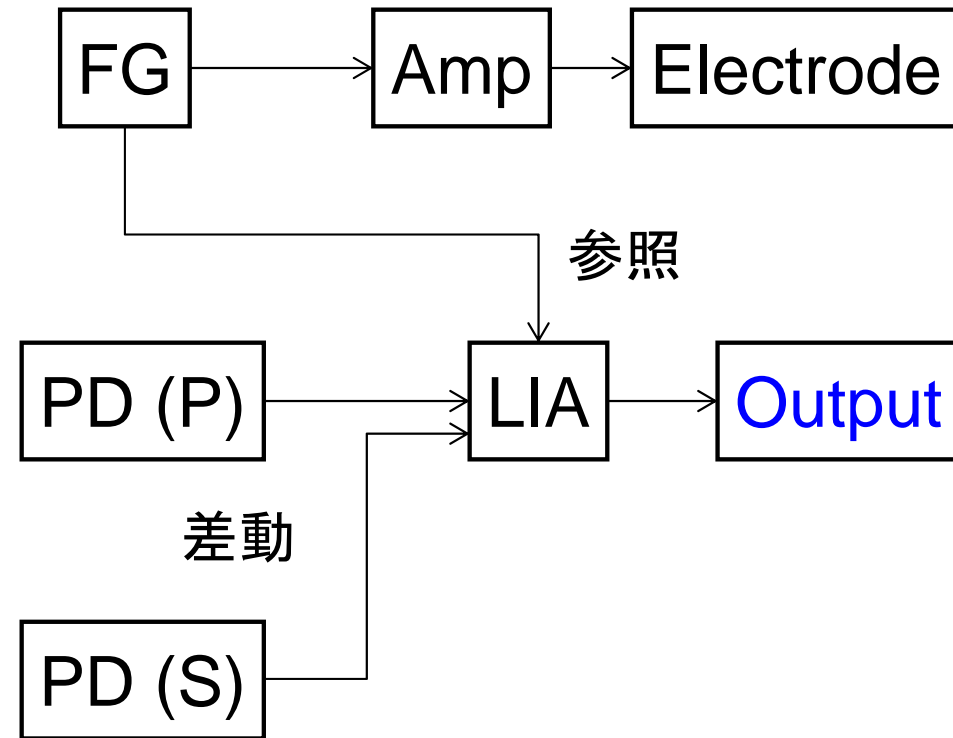
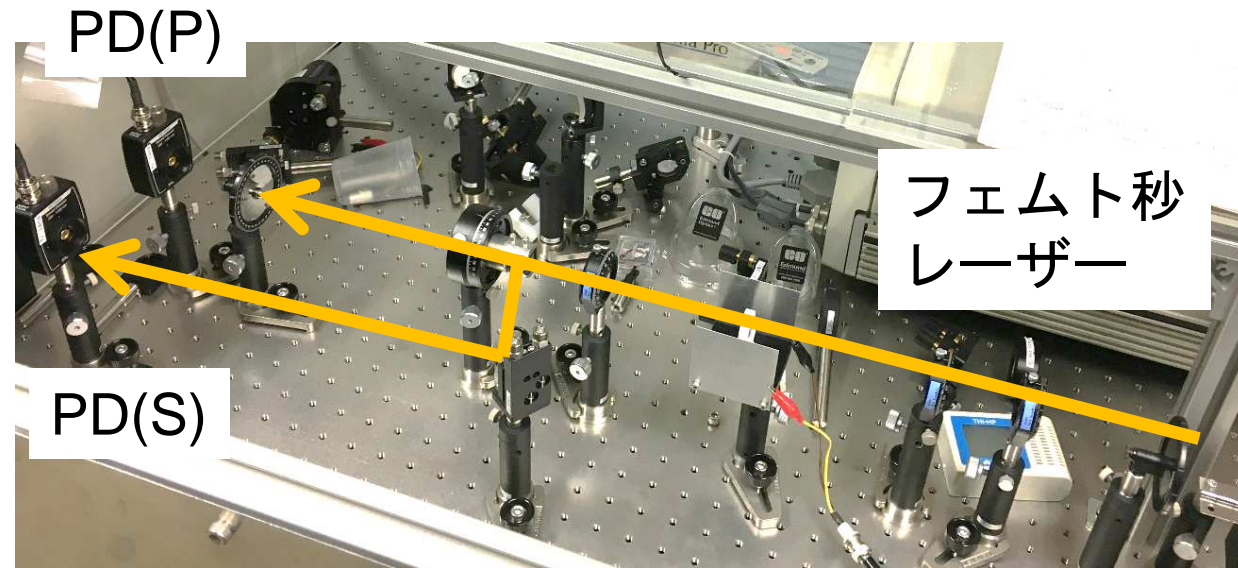
- 軸方向電場は径方向より弱い？ → 計算
- EO結晶の配置や光学系の問題？ → 既知の電場で効率を推定、系の最適化



ファンクションジェネレータ（左、10 V PeakToPeak）と増幅器（右、250 V PeakToPeak）、正弦波、 $\leq 100$  kHz



# 電場による偏光変化の測定

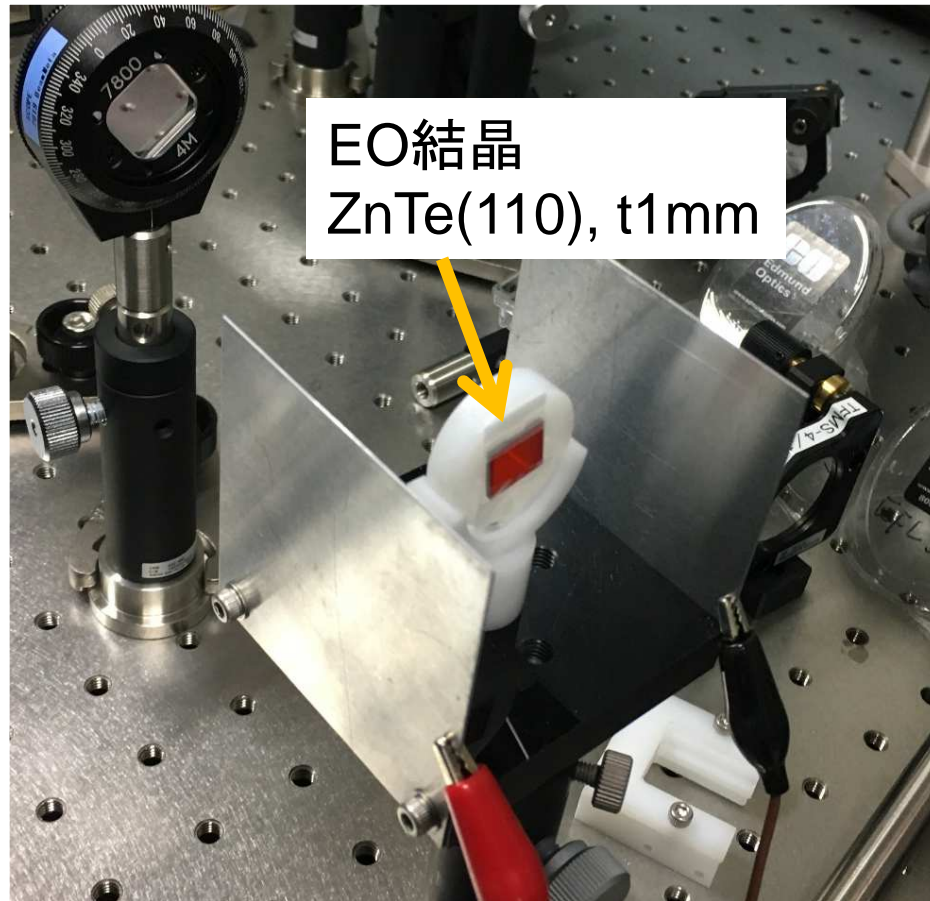


## 光学系

ND、2分の1波長板、偏光子、4分の1波長板、  
EO結晶、グランレーザー、PとS偏光成分、  
ZnTe(110), t1mm

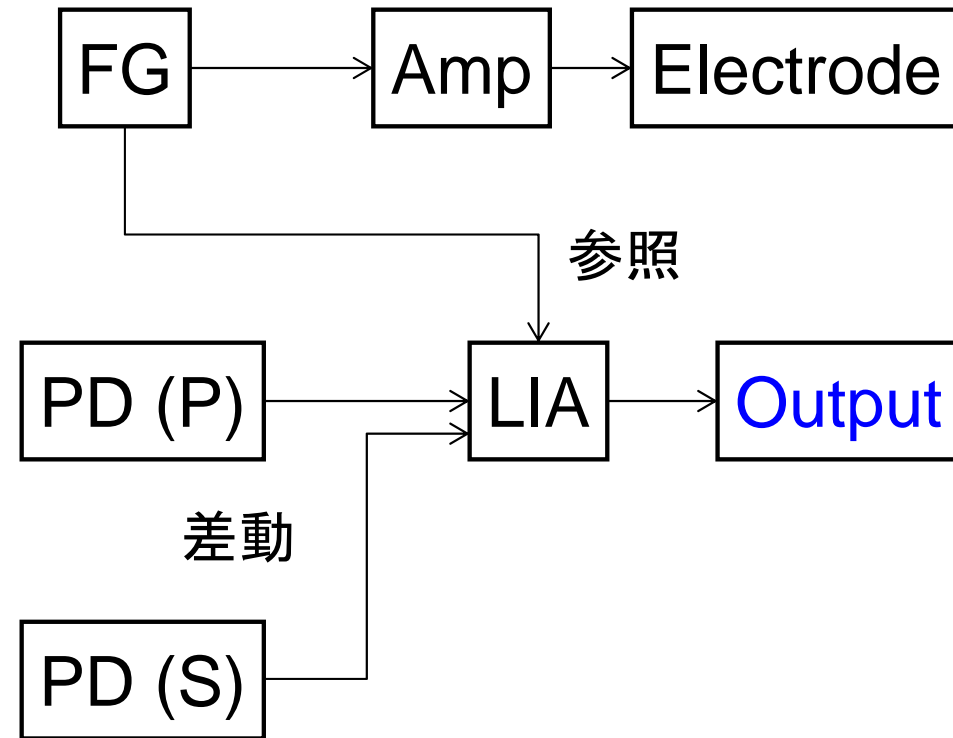
電極に電圧をかけて、  
ロックインアンプ出力の  
電圧依存性を見ればよい

# 電場による偏光変化の測定



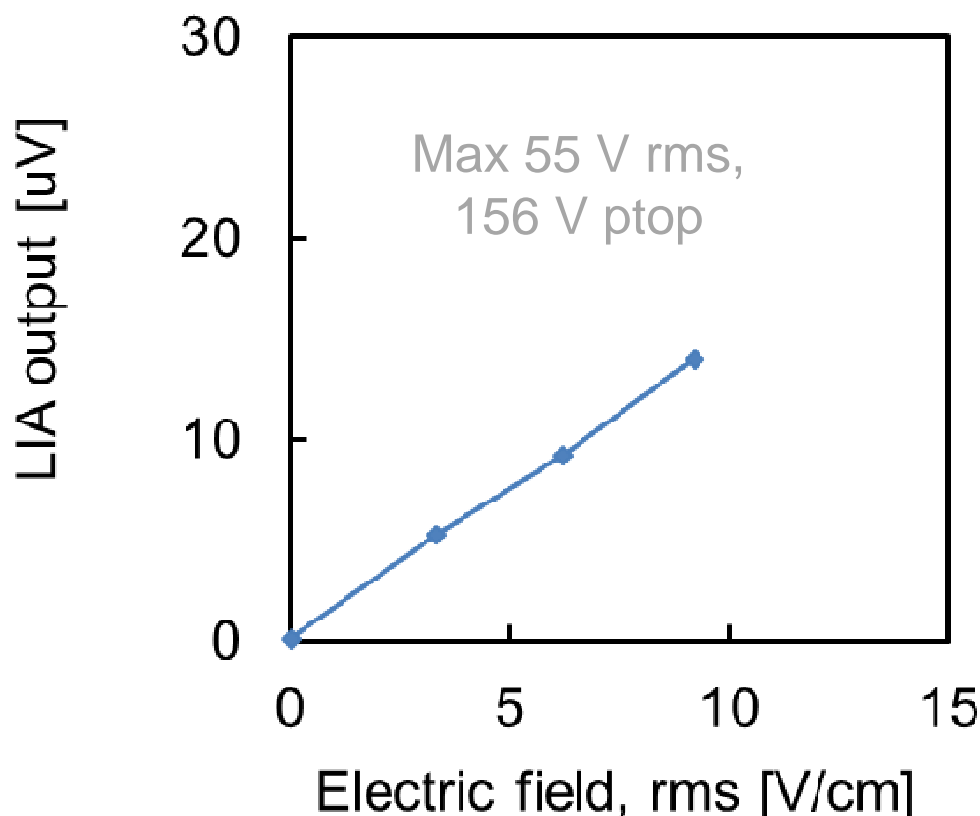
## 光学系

ND、2分の1波長板、偏光子、4分の1波長板、  
EO結晶、グランレーザー、PとS偏光成分、  
ZnTe(110), t1mm

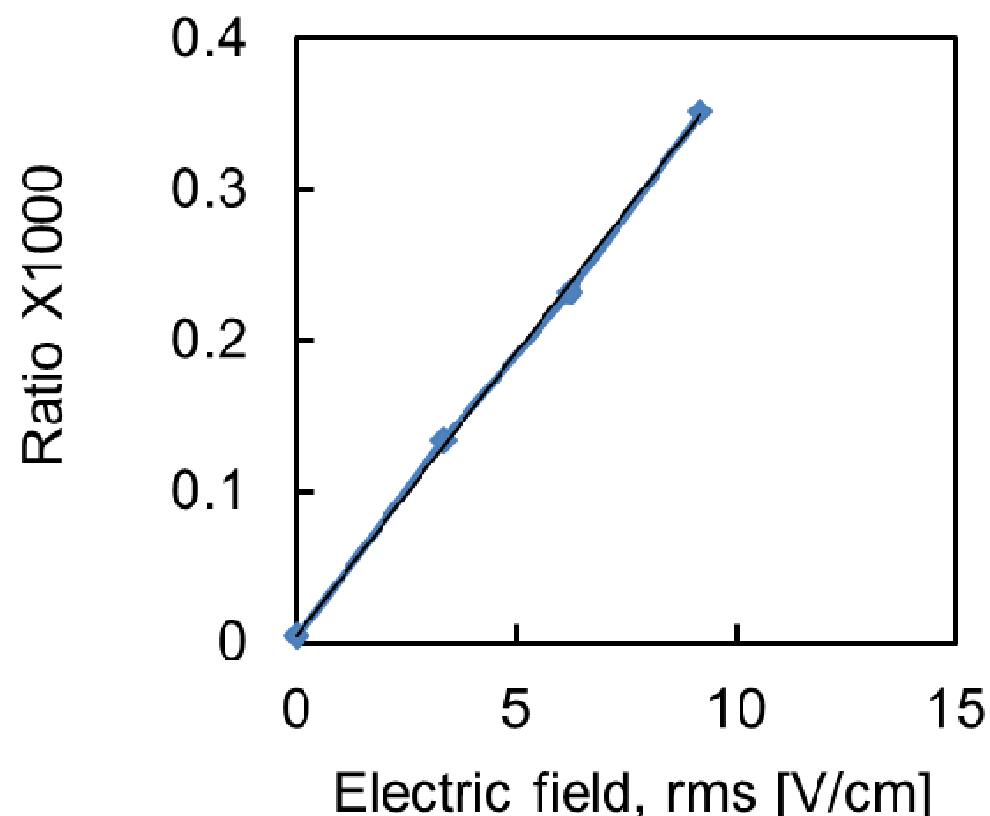


電極に電圧をかけて、  
ロックインアンプ出力の  
電圧依存性を見ればよい

## 偏光の変化の電場依存性 (ポッケルス効果)



偏光の変化の電圧依存性  
(電極間6 cm、PD 40 mV)



偏光の変化の割合  
(PD強度で除算)

- 10 V/cm = 1 kV/m で  $\sim 0.4/1000 = 4 \times 10^{-4}$  の変化
- 2.5 kV/cm = 250 kV/m で  $\sim 10\% = 0.1$  の変化 → 電子ビームの電場?
- 本系の検出限界 :  $< \text{数 V/cm} = < \text{数 } 100 \text{ V/m}$

# 内容

## 1. 背景

パルスラジオリシス、電子ビーム・テラヘルツ波の測定

## 2. 電子ビーム加速器

加速器、測定光学系

## 3. 光伝導アンテナを（PCA）用いた測定

測定時間プロファイルのPCA位置依存性、電荷量依存性

## 4. 電気光学（EO）結晶を用いた測定

ビーム径方向電場の測定、EO結晶測定系の試験

## 5. まとめ

## まとめ

35 MeV、>1 ps、400 pCの電子ビームについて、PCAとEO結晶による測定を行っている。

- PCAによるCTRの測定

~10 mm径のテラヘルツ電場分布、電荷量依存性：PCAの信号強度  $\propto$  電場  $\propto$  電荷量<sup>1</sup>

- EO結晶による自由空間を走る電子ビームの測定

径方向電場の測定、クーロン場の広がり、EO結晶のポッケルス効果を実験的に推定→軸方向電場測定に応用

本研究は、科研費(25870404, 26249146, 15H05565, 17H01374)、基礎科学研究助成(住友財団)による支援を受けました。

EO・電子ビーム測定については、太田雅人氏、中嶋誠博士、坂和洋一博士、有川安信博士、清水智貴氏（阪大レーザー研）に協力頂きました。

ご清聴ありがとうございました。

