

FROB07

放射光ビームラインにおける パルス・モード計測型光位置モニタの評価

*Evaluation of a **P**ulse-**m**ode **X**-ray **B**eam **P**osition **M**onitor (PM-XBPM)
for a Synchrotron Radiation Beamline*

青柳秀樹, 大沢仁志, 小林和生, 藤田貴弘, 高橋直

Hideki Aoyagi, Hitoshi Osawa, Kazuo Kobayashi, Takahiro Fujita, Sunao Takahashi

公益財団法人高輝度光科学研究センター

Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/SPRING-8)

- ・ **背景(これまでの進捗)**
 - 従来型XBPMの限界(高周波特性に関して)
 - パルスモード型XBPMの発案・試作
 - 原理検証(@偏向電磁石ビームライン)
- ・ **耐熱性を高める改良**(for 挿入光源ビームライン)
 - 検出部の改良・構造
- ・ **評価試験**(@挿入光源ビームライン)
 - 位置感度
 - 分解能**
 - ビーム入射時のビーム変動の観測
- ・ **まとめ**

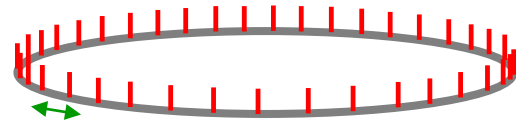
従来型 XBPM (光電子放出タイプ) は世界中の施設で使用されている。

しかし、パルス毎の振る舞いを観測することは出来なかった。

例えば、

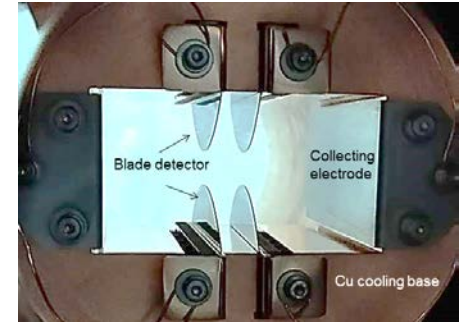
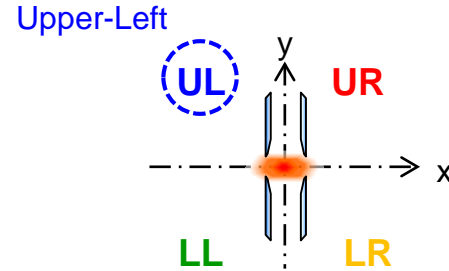
ファイリング・パターン: "203 bunches" mode (uniform filling)

バンチ間隔:
12 buckets (23.6 ns)

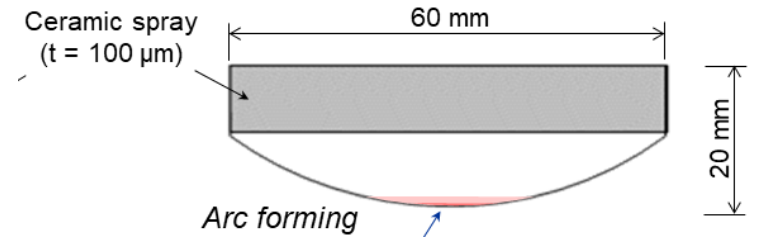
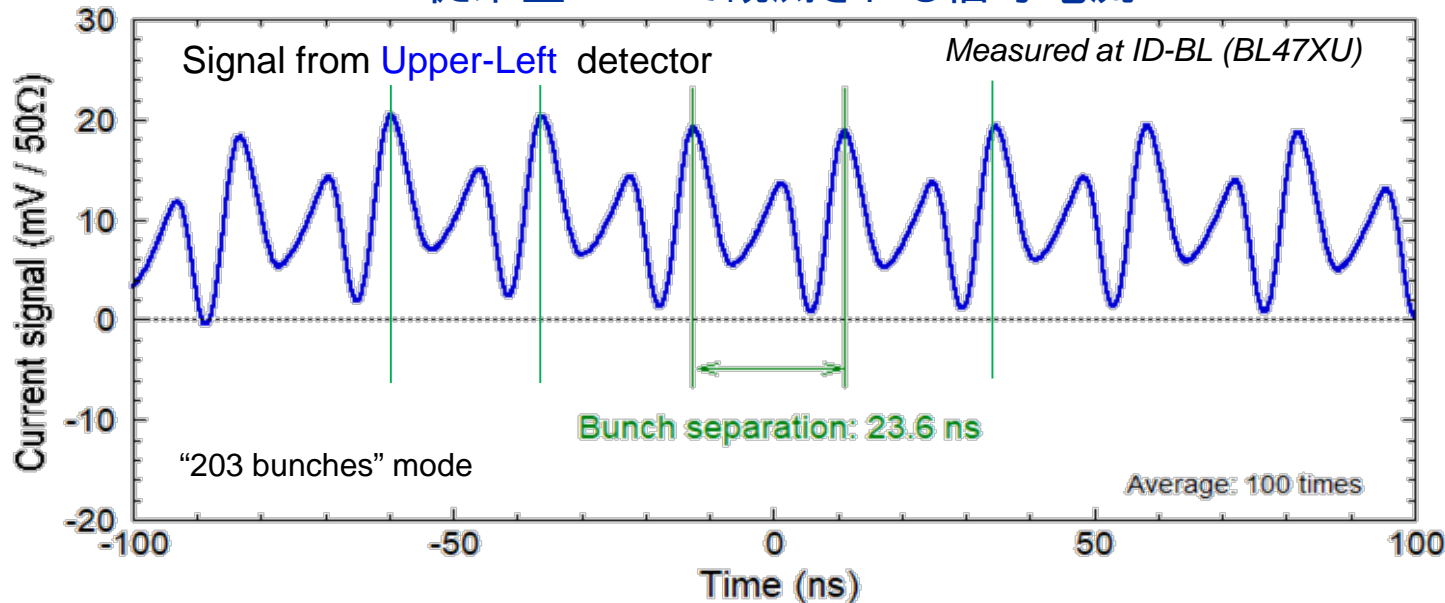


バンチ電流値:
~0.5 mA / bunch

従来型XBPM



従来型XBPMで観測される信号電流

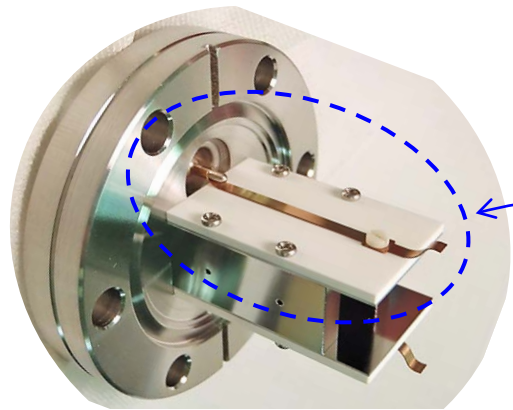


$$X (mm) = Ax \times \frac{(UR + LR) - (UL + LL)}{UL + UR + LL + LR}$$

$$Y (mm) = Ay \times \frac{(UL + UR) - (LL + LR)}{UL + UR + LL + LR}$$

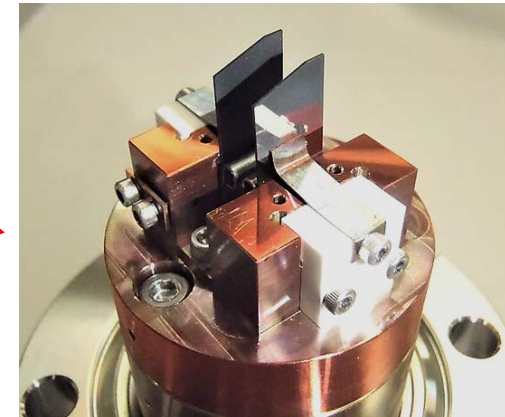
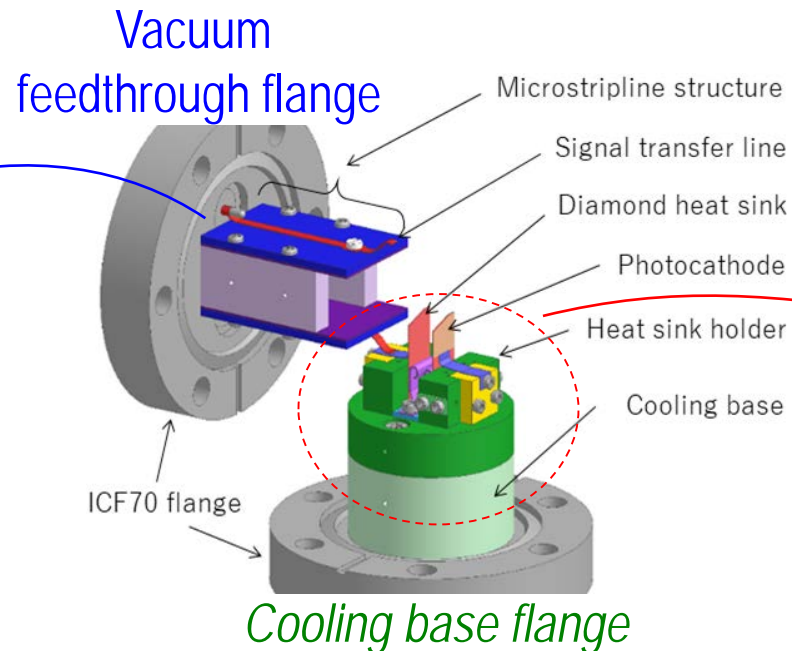
耐熱性を維持したまま高周波特性を向上させるためのポイント:

1. **インピーダンス整合 (50Ω)**: マイクロリップライン構造 を備える電流導入端子の開発
2. **浮遊容量 (短時定数) の極小化**: 検出素子 (フォトカソード) の小型化。



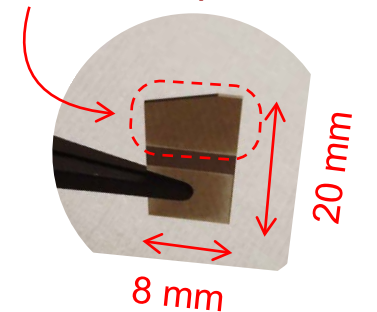
Microstripline

Vertically symmetrical structure



Photocathode:
Ti sputter deposition

$t = 1 \mu\text{m}$



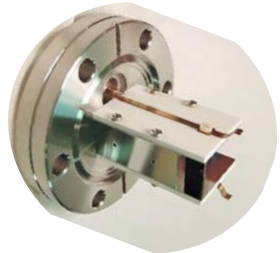
8 mm

20 mm

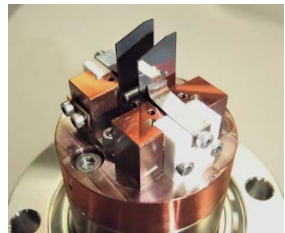
Diamond heatsink

$t = 0.3 \text{ mm}$

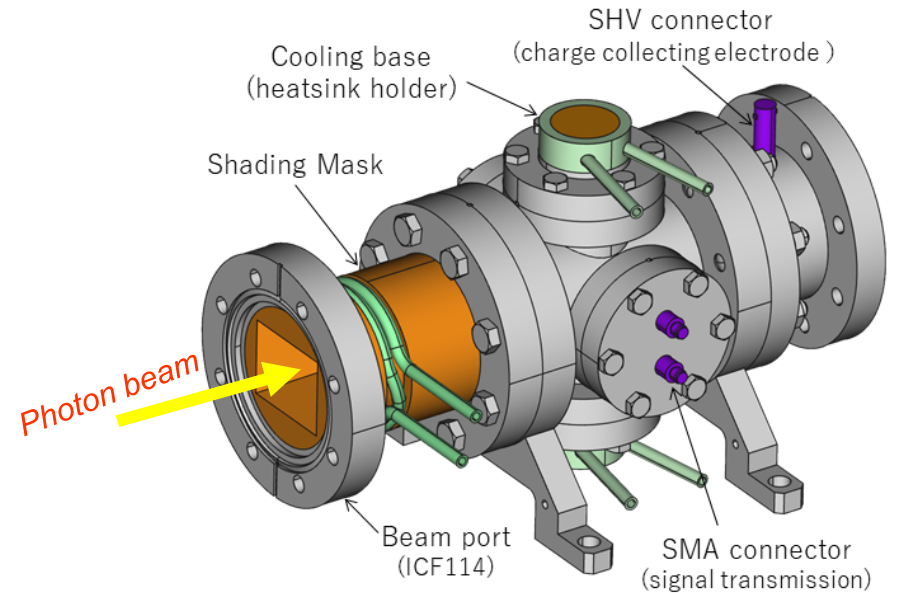
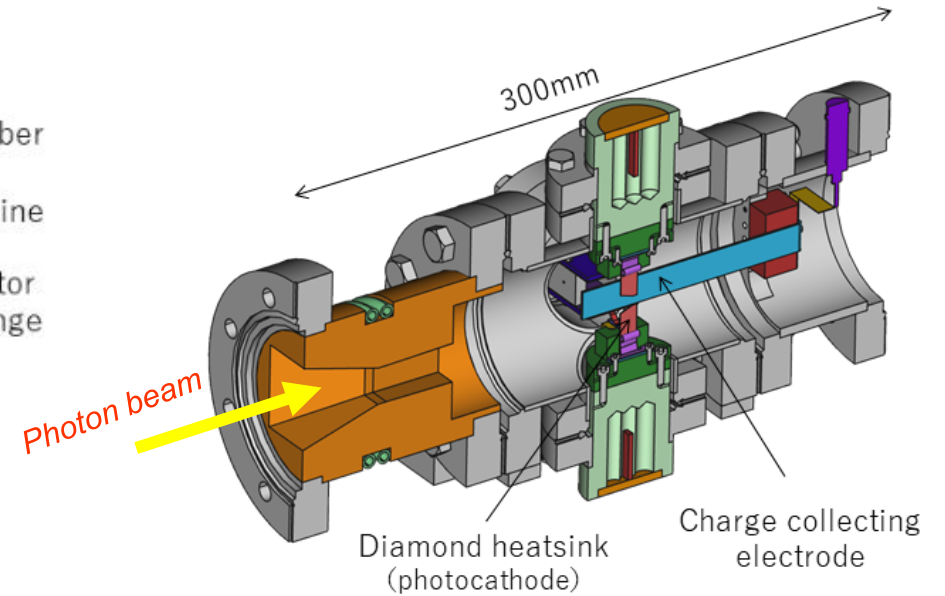
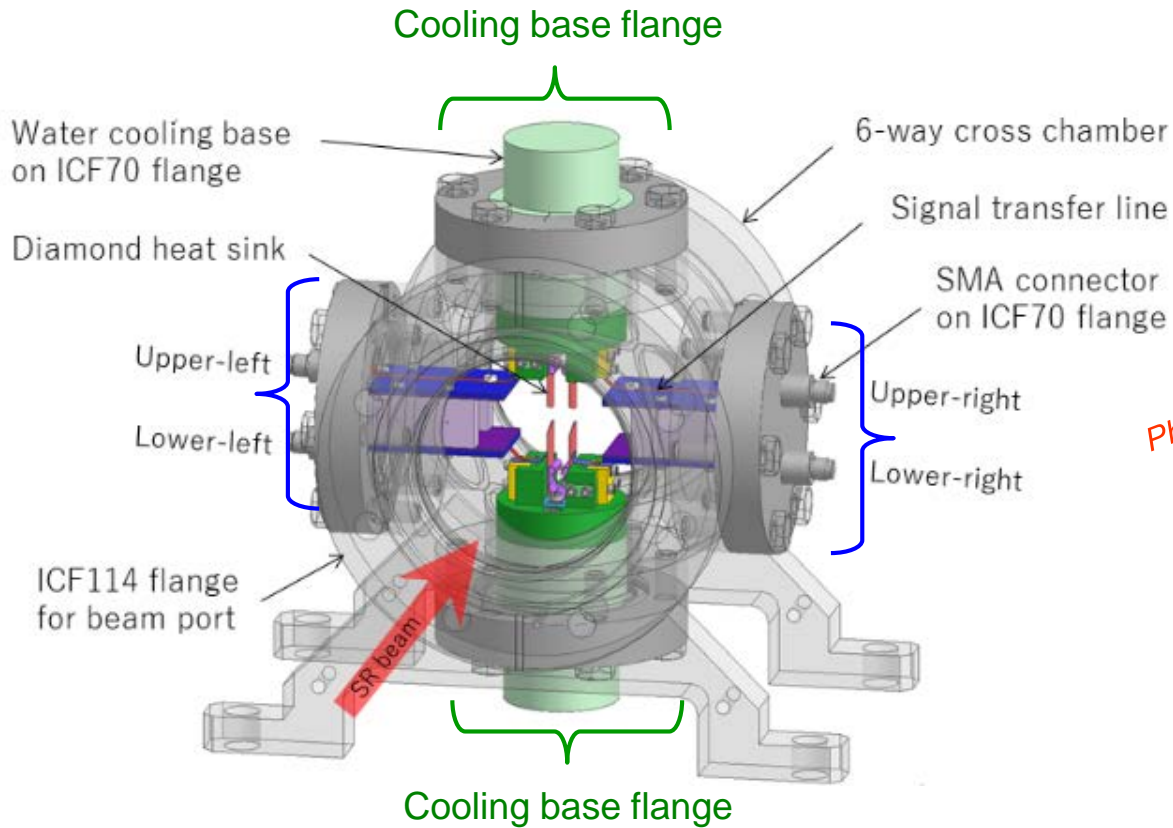
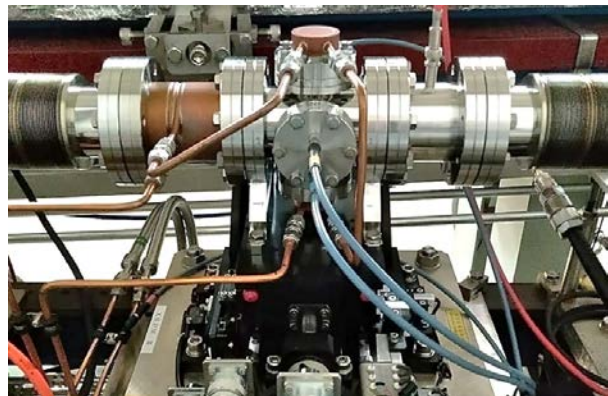
検出素子の試作機



Feedthrough flange

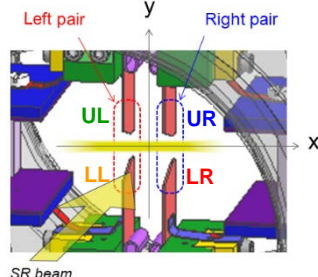
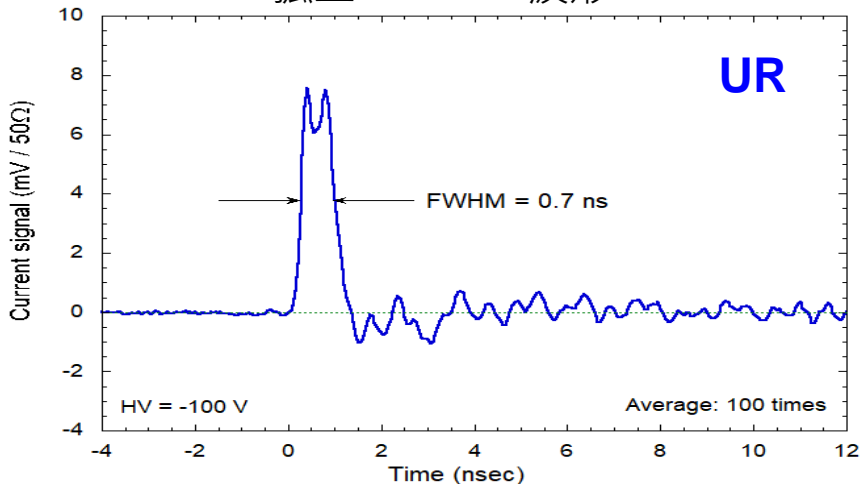


Cooling base flange

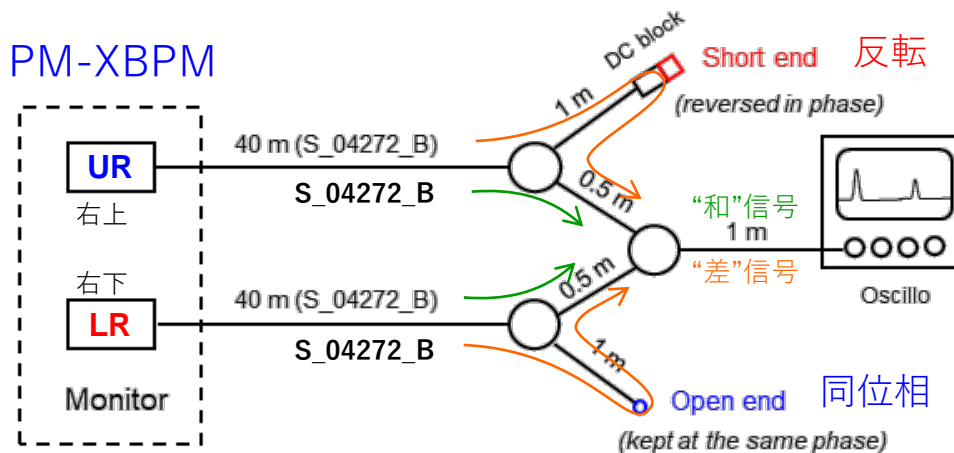


偏向電磁石ビームライン(BL02B1)で
トラブルなく3年間稼働

孤立パルスの波形

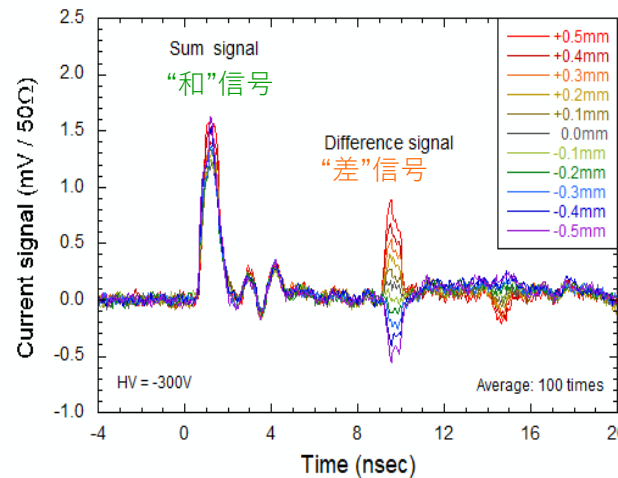
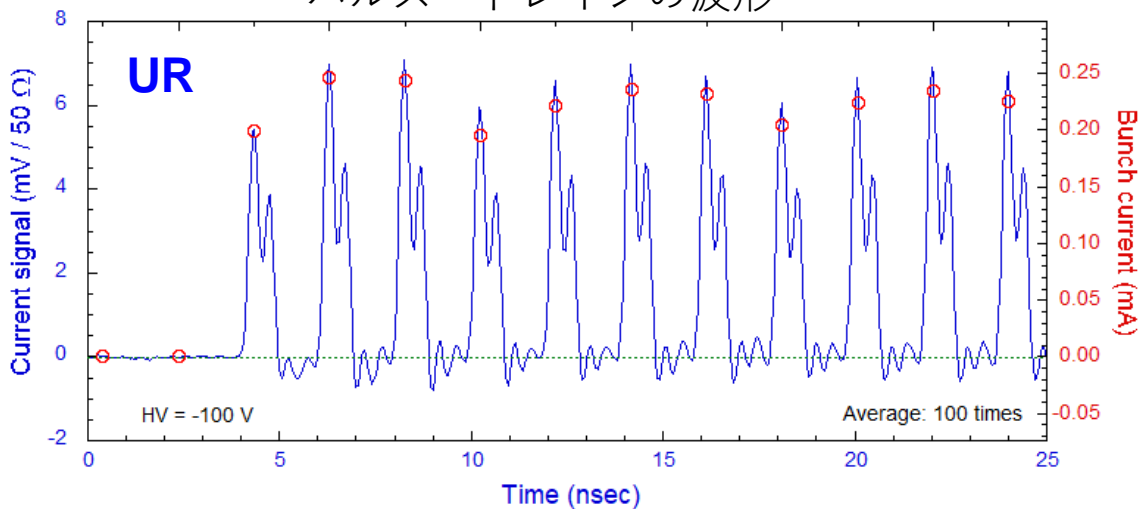


PM-XBPM

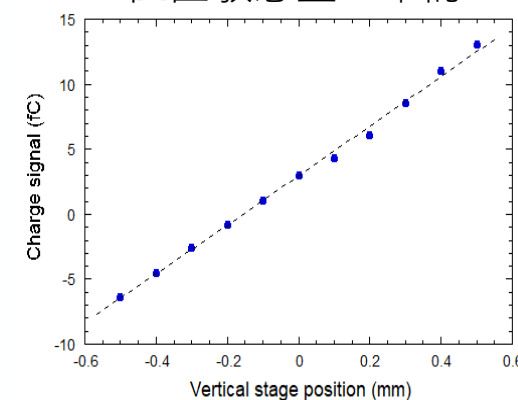


パルス波形の生信号を合成することによって位置情報が直読可能な信号を生成することができる。

パルス・トレインの波形



位置敏感型の確認



ファイリング・パターン: Full-filling (バンチ間隔: 1.96 ns)

モニター筐体を垂直に走査

挿入光源ビームラインでの運用のためにより確かな耐熱性が必要と考えた。

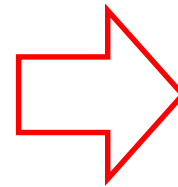
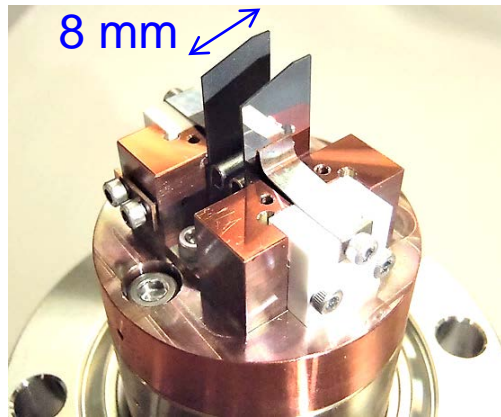
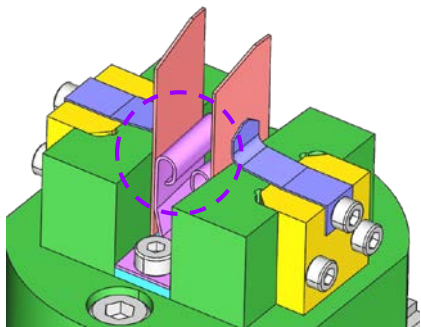
	光軸中心の 最大パワー密度	実際に照射される パワー密度
BM-BL	1.5 kW/mrad ²	~0.1 W/mm ²
ID-BL	~500 kW/mrad ²	< ~25 W/mm ²

BM-BL: *Bending Magnet Beam Line*

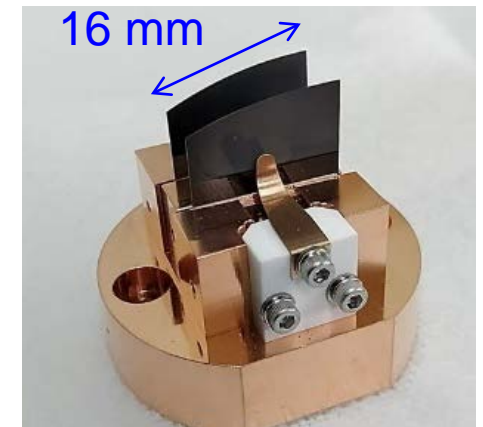
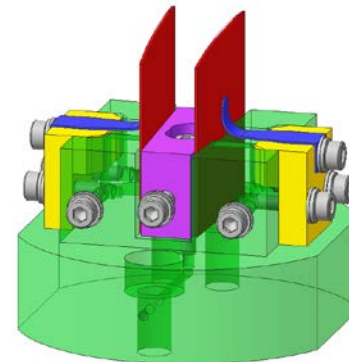
ID-BL: *Insertion Device Beam Line*

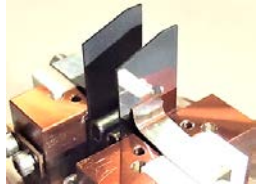
1. 検出素子の光軸方向の長さを2倍 (冷却面積の増加)
2. くさび型プラグでしっかり固定 (熱伝達率の向上)

初号機



改良型





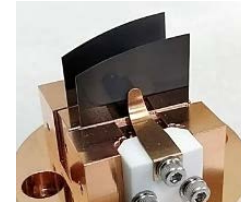
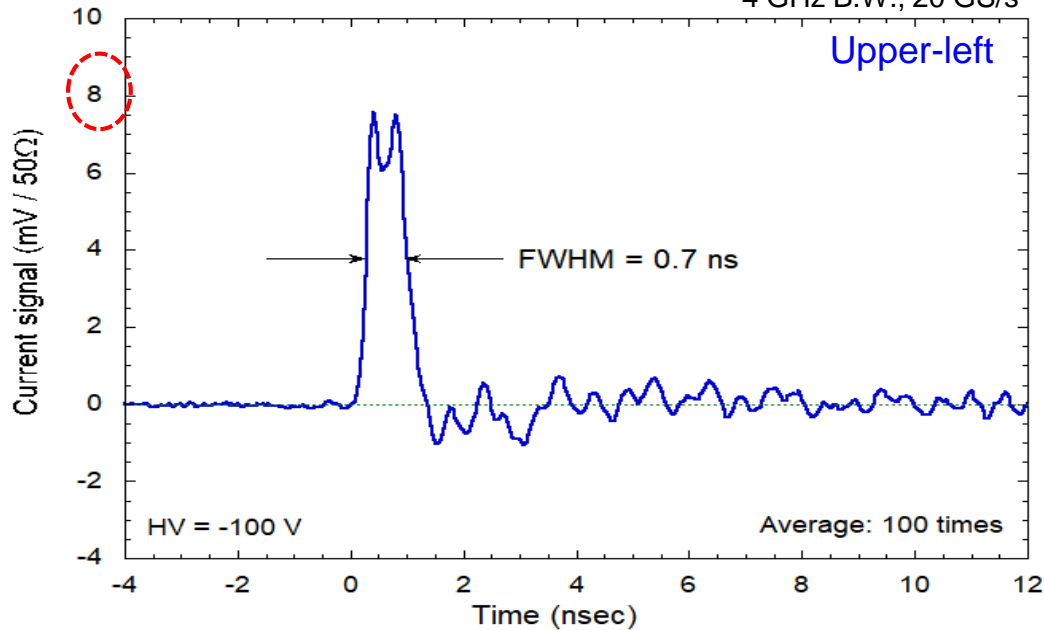
初号機

Tested at **BM-BL** (BL02B1)

3.0 mA / bunch

PRAB 24, 032803

4 GHz B.W., 20 GS/s

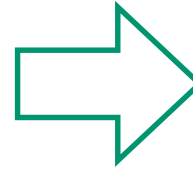
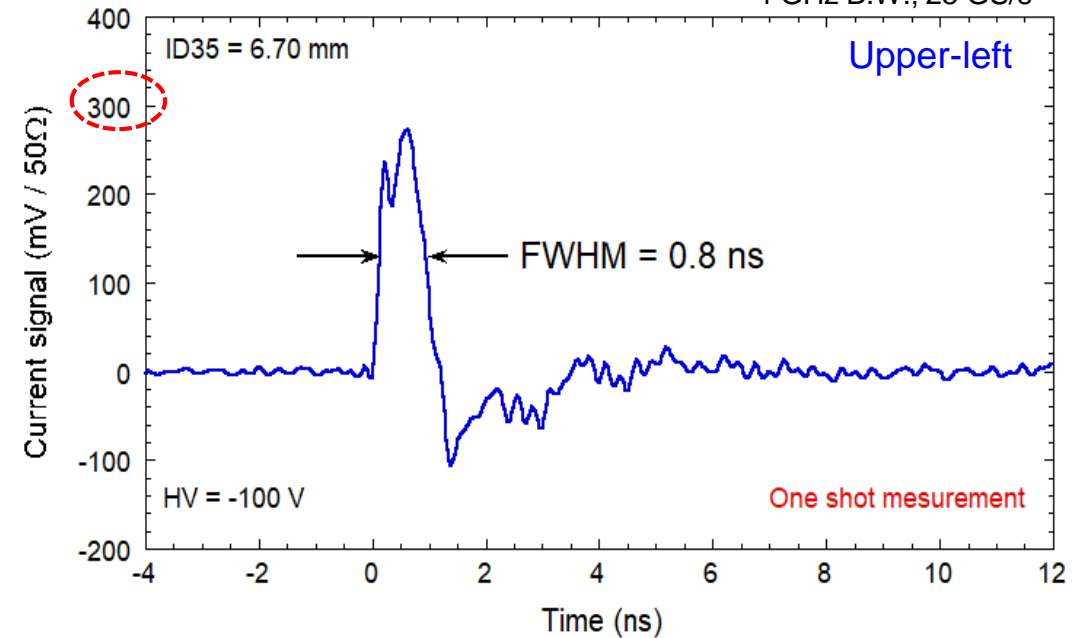


改良型

Tested at **ID-BL** (BL35XU)

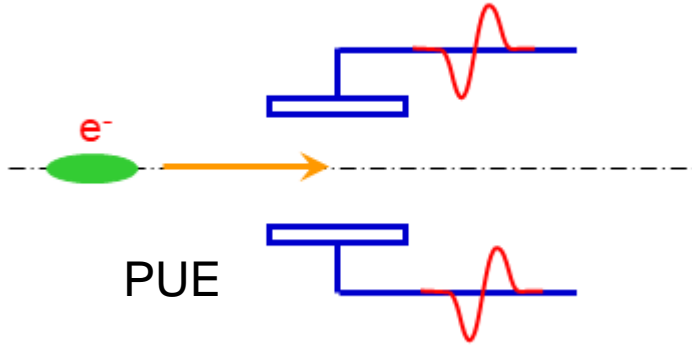
1.6 mA / bunch

4 GHz B.W., 25 GS/s



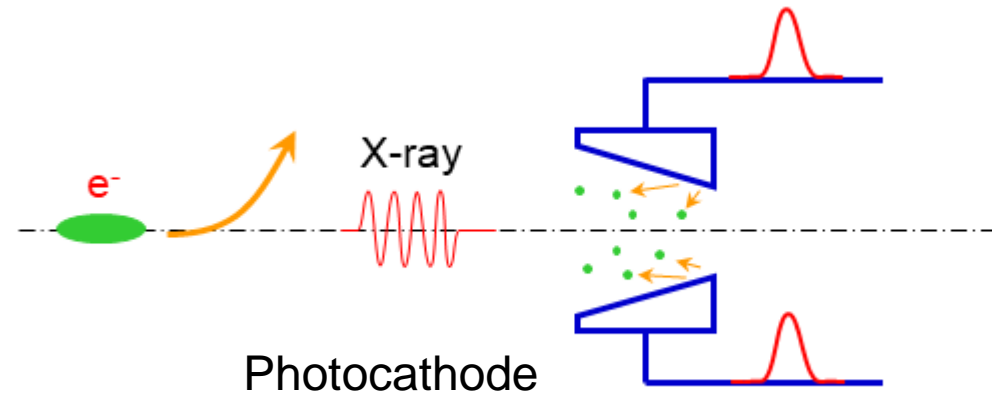
- 波形に変化はなく、基本性能は維持されている。
 - 電流信号の増加は、分解能に有利に働く。
- ID-BLでも、パルスモード計測が期待できる。

rf-BPM



両極性信号

PM-XBPM



単極性信号

PM-XBPMは、

- 信号処理系を簡素化できる。(ただし、現状では、専用 fast-ADC は未達)
- 従来型XBPMとして動作可能である。(既存のI-V変換器をそのまま使用できる。)

ユーザー運転中は従来型として使用するので、二刀流であることが大事！

ID-BLにおける

評価試験

位置感度

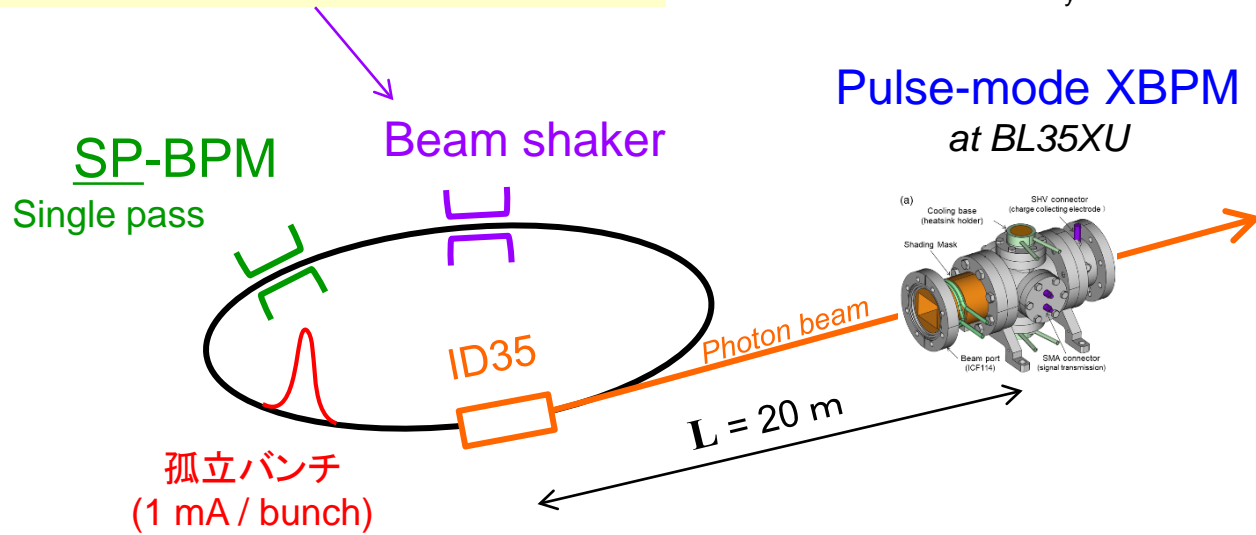
分解能

ビーム入射時のビーム変動の観測

ビームに**摂動**を与えて、PM-XBPMのデータを SP-BPMのデータから算出される振幅と比較

RFKO (RF Knockout)
で定常摂動を励起

摂動周波数:
Horz : 28.9 kHz ($v_x = 41.1382$)
Vert: 60.0kHz ($v_y = 19.3257$)



摂動振幅はiGp12 (Dimtel社製) のDAC出力で調整した。

SP-BPM で振幅 $100 \mu\text{m}$ が観測される時を、仮に
“nominal kick power **100%**” 定義する。

Photon beam position amplitude (y_{XBPM}) at PM-XBPM can be calculated by SP-BPM measurement data (y_{BPM}).

$$\text{SP-BPM: } y_{\text{BPM}} = \sqrt{\varepsilon\beta_{\text{BPM}}} \cos \omega_{\beta}t \quad (1)$$

$$\text{ID35: } y_{\text{ID}} = \sqrt{\varepsilon\beta_{\text{ID}}} \cos(\omega_{\beta}t + \theta) \quad (2)$$

From Eq. (2), PM-XBPM,

$$\begin{aligned} y_{\text{XBPM}} &= y_{\text{ID}} + \mathbf{L} \times y'_{\text{ID}} \\ &= \sqrt{\varepsilon\beta_{\text{ID}}} \cos(\omega_{\beta}t + \theta) - \mathbf{L} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\beta_{\text{ID}}}} \{ \alpha_{\text{ID}} \cos(\omega_{\beta}t + \theta) + \sin(\omega_{\beta}t + \theta) \} \end{aligned} \quad (3)$$

From Eq. (3) / (1)

$$\frac{|y_{\text{XBPM}}|}{|y_{\text{BPM}}|} = \frac{\sqrt{\left(\sqrt{\beta_{\text{ID}}} - \frac{\alpha_{\text{ID}}L}{\sqrt{\beta_{\text{ID}}}}\right)^2 + \frac{L^2}{\beta_{\text{ID}}}}}{\sqrt{\beta_{\text{BPM}}}} = 3.90 / 1.90 \quad (\text{hor. / ver.})$$

$$\beta_{\text{BPM}} = 31.32 / 5.73 \quad (\text{hor. / ver.})$$

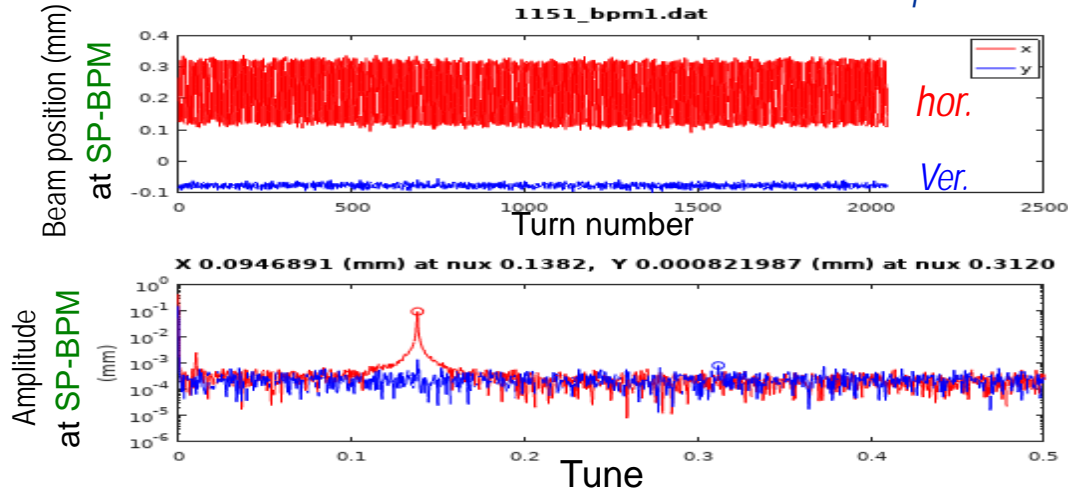
$$\alpha_{\text{ID}} = -1.195 \times 10^{-5} / 4.61 \times 10^{-6} \quad (\text{hor. / ver.})$$

$$\beta_{\text{XBPM}} = 31.16 / = 5.04 \quad (\text{hor. / ver.})$$

$$\mathbf{L} = 20.3 \text{ m (distance from the ID to PM-XBPM)}$$

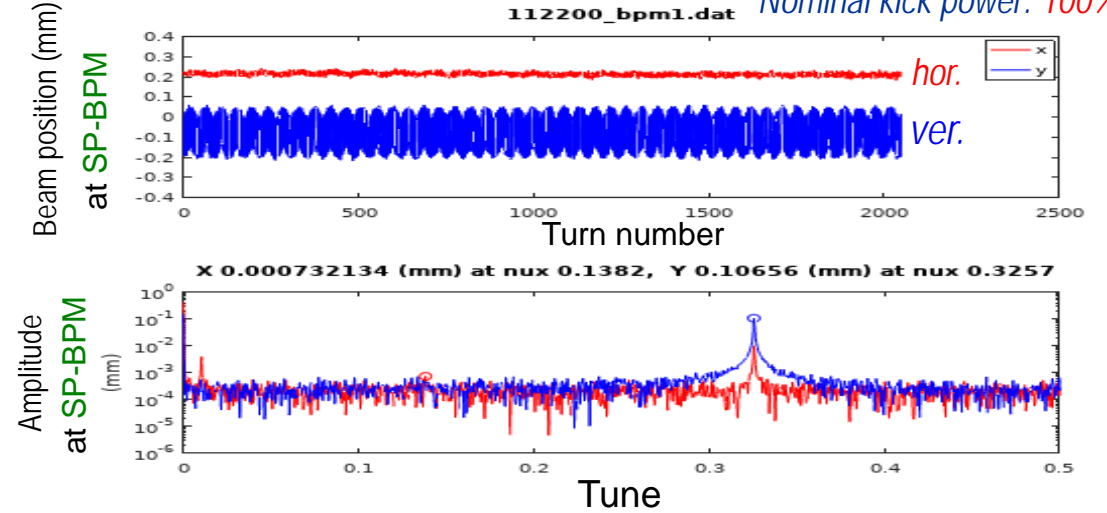
水平方向の摂動を与えた場合

Nominal kick power: 100%

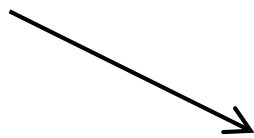


垂直方向の摂動を与えた場合

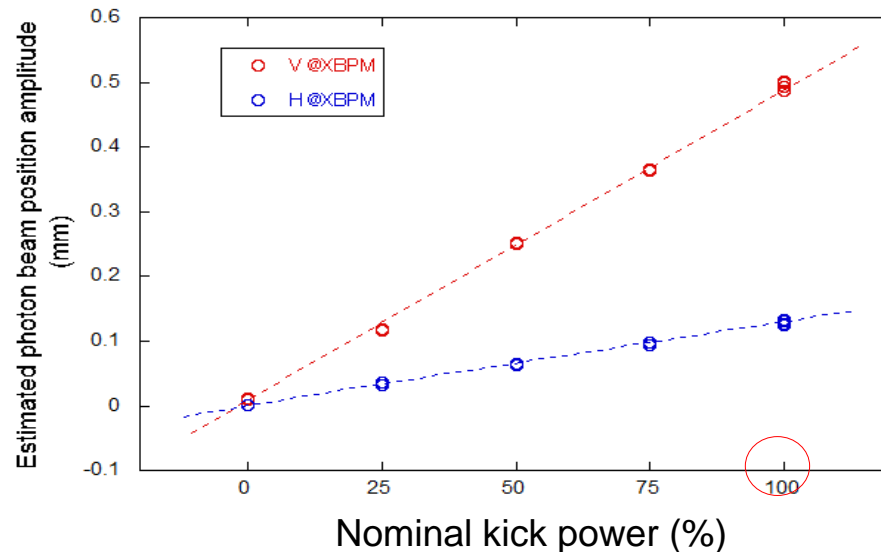
Nominal kick power: 100%

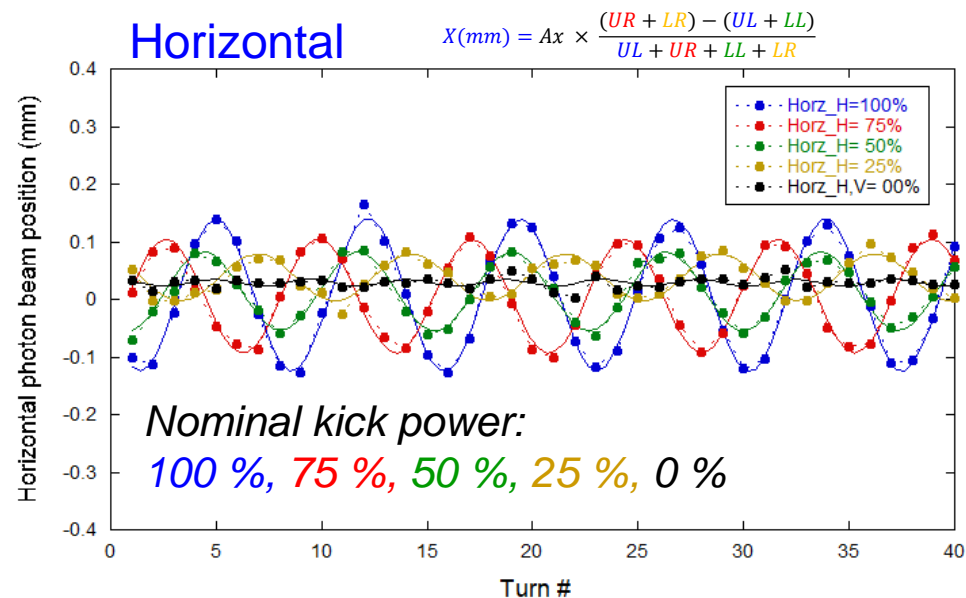
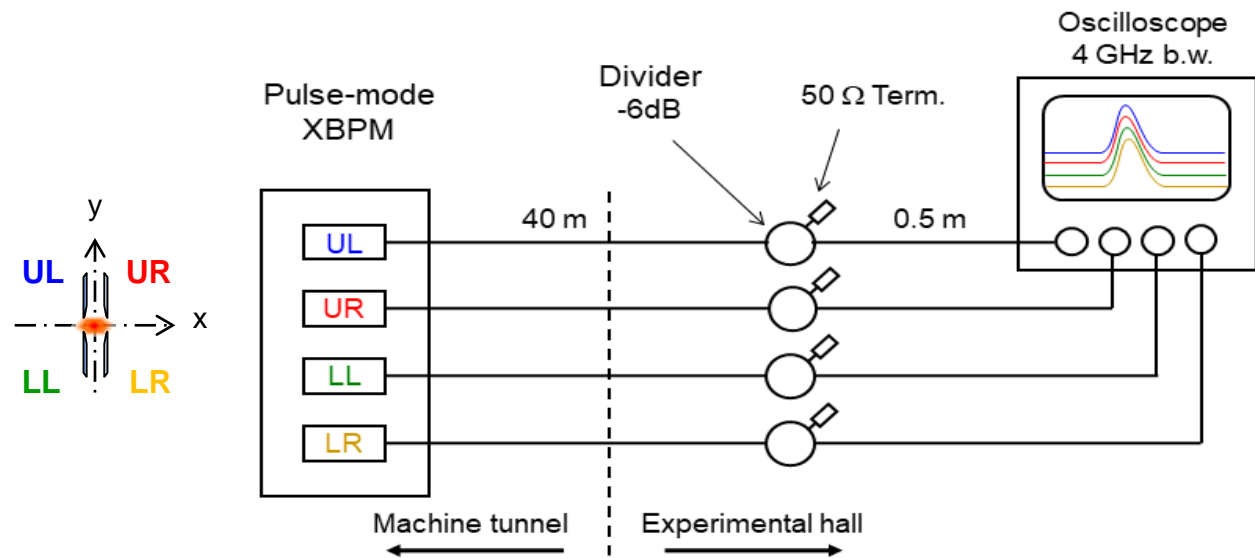


縦軸は、SP-BPMのデータから算出したPM-XBPMの
設置場所での放射光ビームの振幅



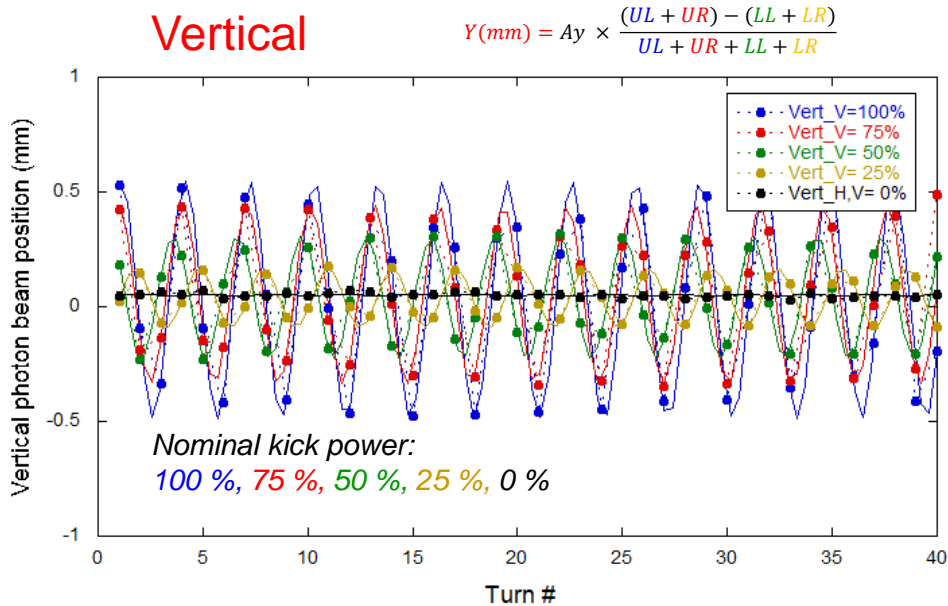
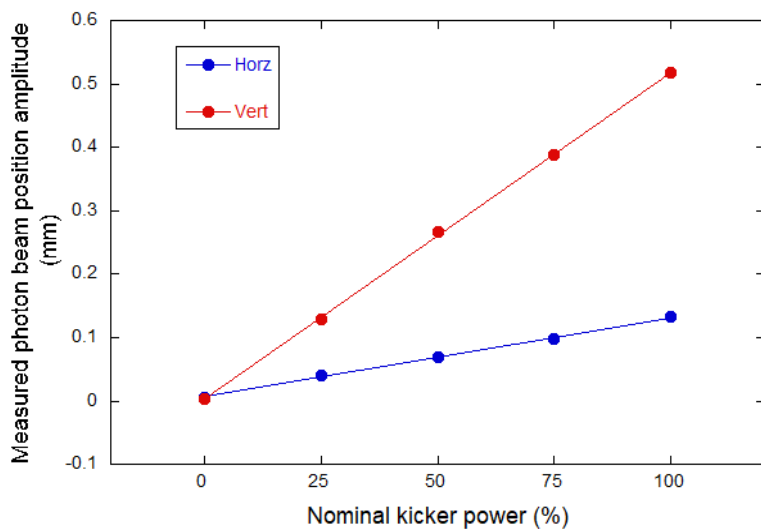
算出した放射光ビームの振幅は、
DAC出力値に対して比例関係を持つ



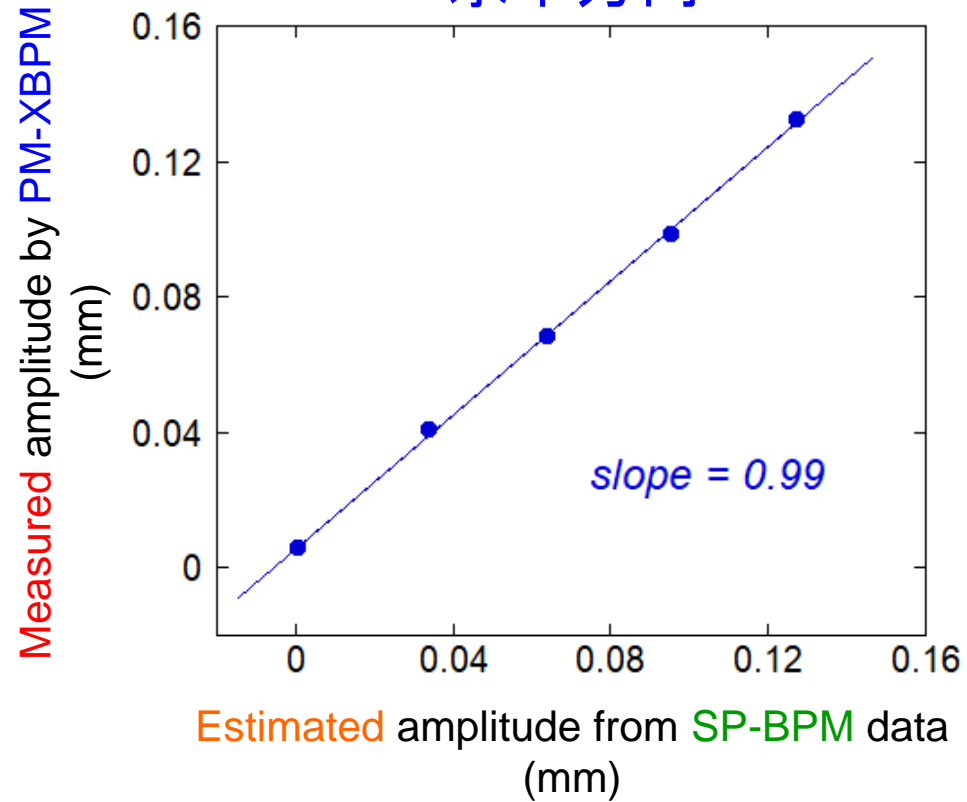


縦軸は、PM-XBPMの実測値

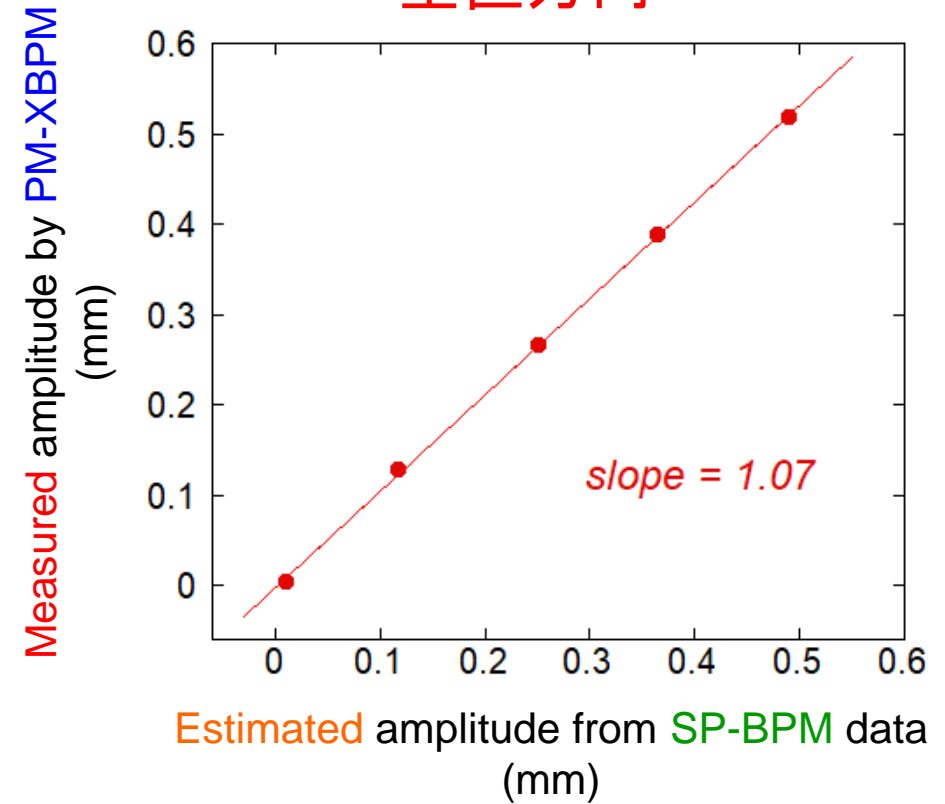
実測した放射光ビームの
振幅は、DAC出力値に対
して比例関係を持つ。



水平方向



垂直方向



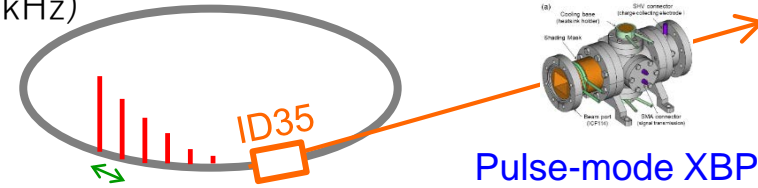
水平方向、垂直方向ともに実用上十分な位置感度を確認した。

バンチ電流毎の分解能を評価

0.5 mA, 1 mA, 2 mA, 3 mA, 4 mA, 5 mA /bunch

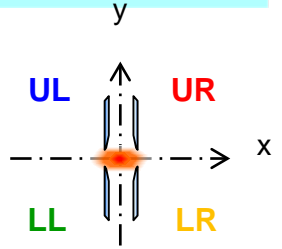
摂動を与えず、安定して周回するバンチを測定して、PM-XBPMの出力値の**RMS値**を分解能として評価した。

周回時間 :
4.8 ms (208 kHz)



Pulse-mode XBPM
at BL35XU

HV = +300 V

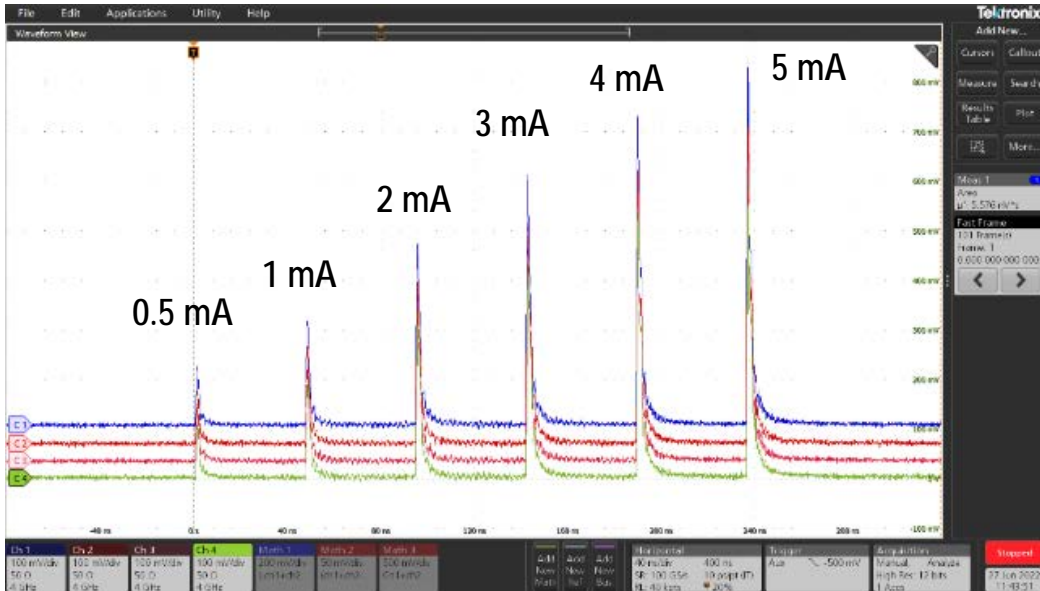


バンチ間隔:
24 buckets (47.2 ns)

ID gap = 9.6 mm

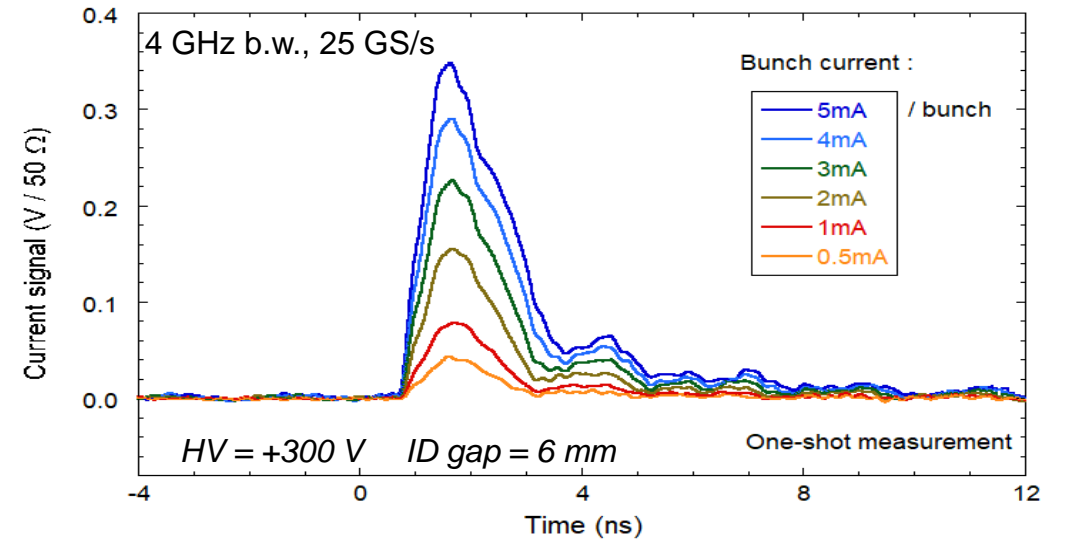
オシロスコープの画像 (one shot)

Tektronix MSO64B
4 GHz B.W., 25 GS/s

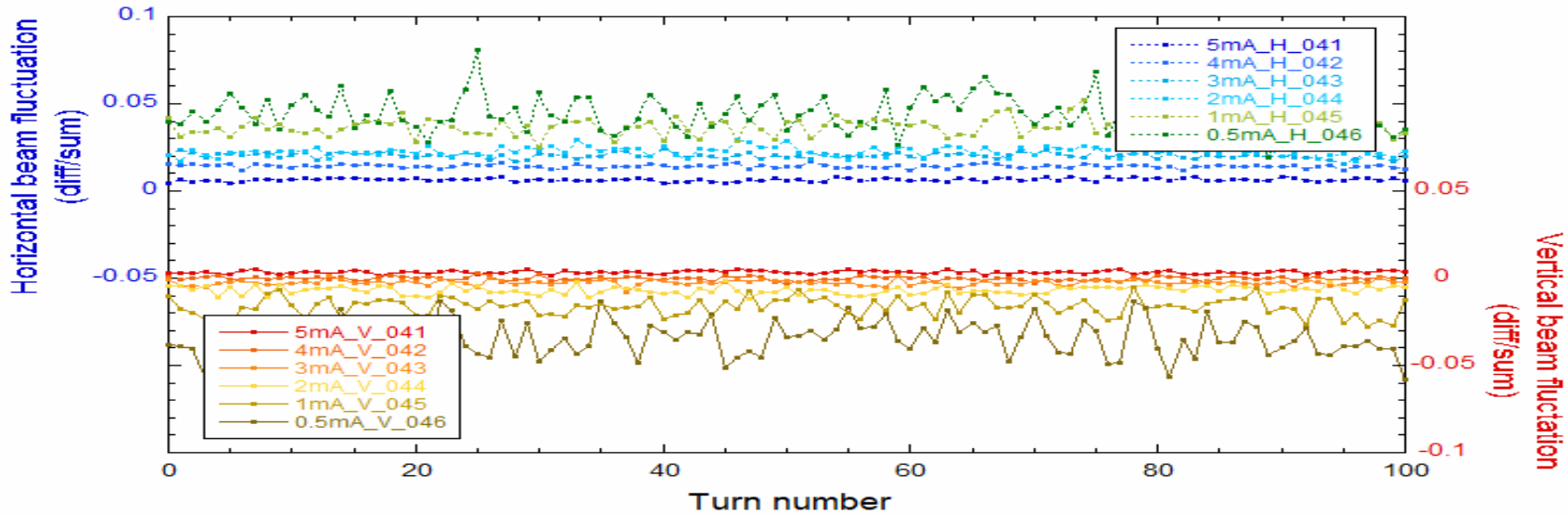


UL
UR
LL
LR

UL (左上) の検出素子の波形

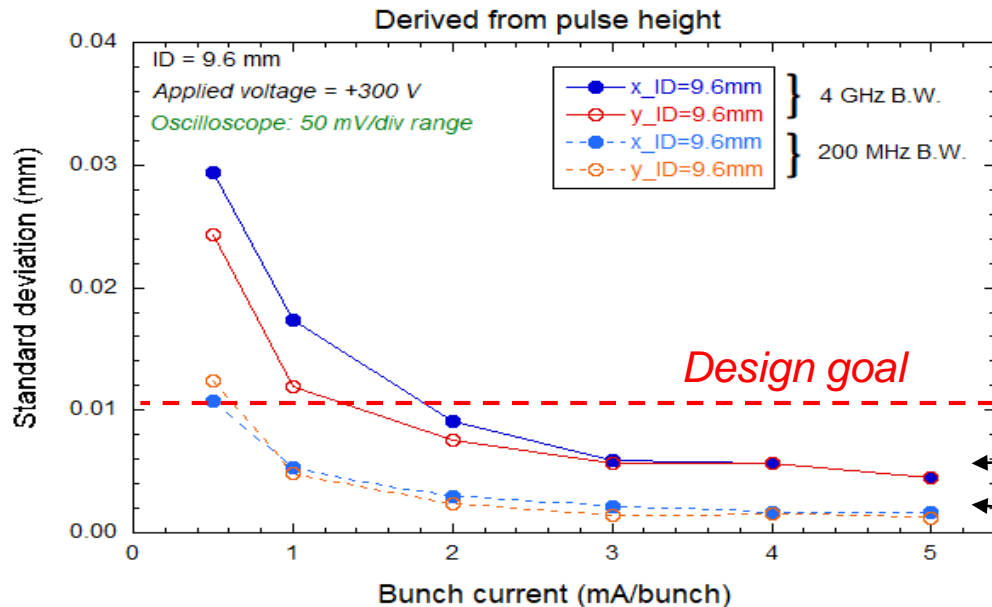


高いバンチ電流値の波形も相似形であることは、正しい位置信号を出力させるための必要条件



$$\frac{Diff}{Sum}(X) = \frac{(UR + LR) - (UL + LL)}{UL + UR + LL + LR}$$

$$\frac{Diff}{Sum}(y) = \frac{(UL + UR) - (LL + LR)}{UL + UR + LL + LR}$$



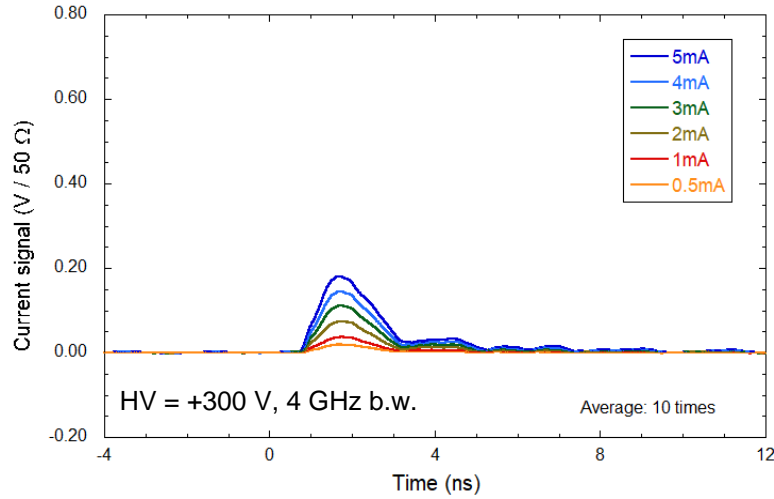
バンチ電流 (>2 mA/bunch) が大きい場合、設計目標の分解能 (10 mm) に到達している。

バンチ電流が低い場合でも、オシロスコープの帯域やレンジを最適化することにより、10mmの分解能を達成することができる。

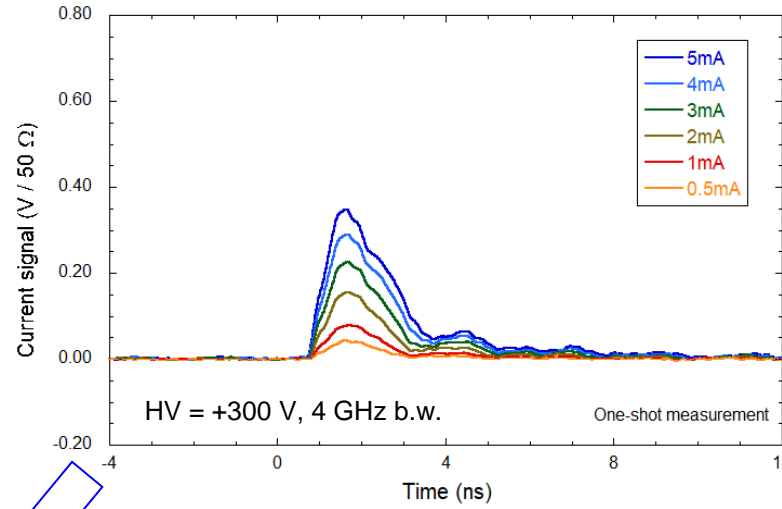
H: 4.5 μm std, V: 4.5 μm std in 4 GHz b.w.

H: 1.7 μm std, V: 1.2 μm std in 200 MHz b.w.

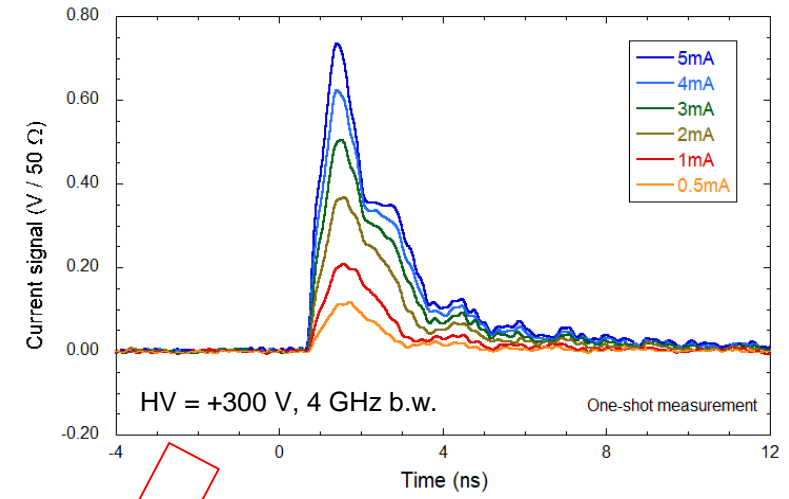
ID gap = 12.0 mm



ID gap = 9.6 mm

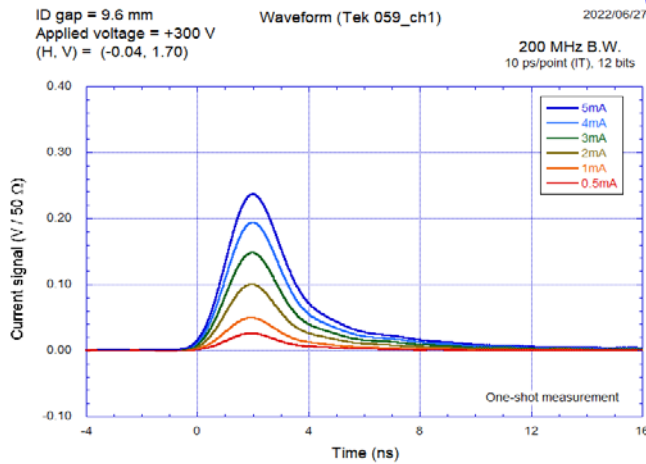


ID gap = 6.7 mm

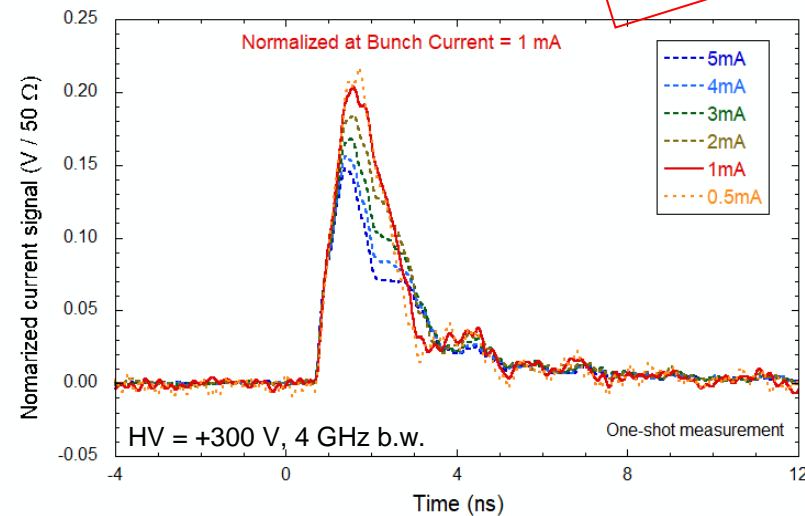


Narrow band filtered

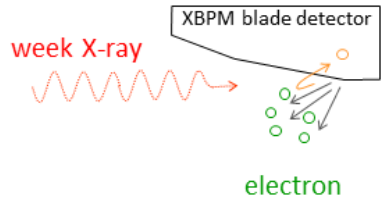
Normalized



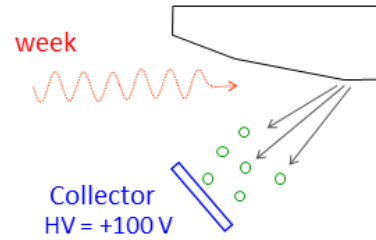
cf: Waveform in **200 MHz** b.w.



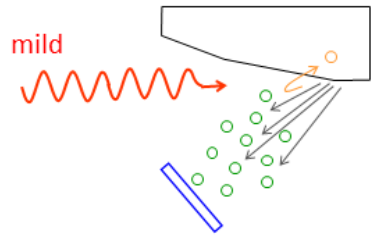
Case 1: Weak X-ray



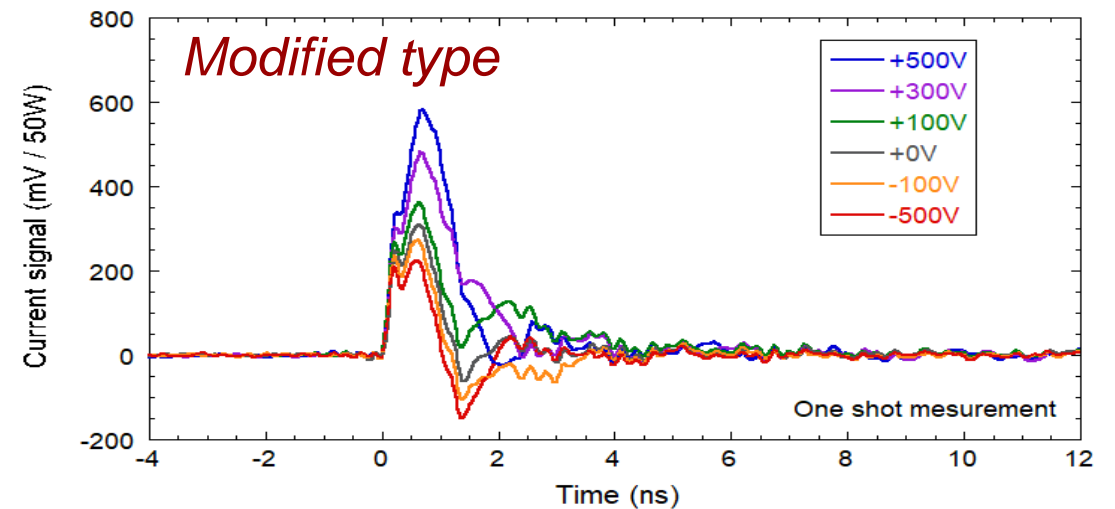
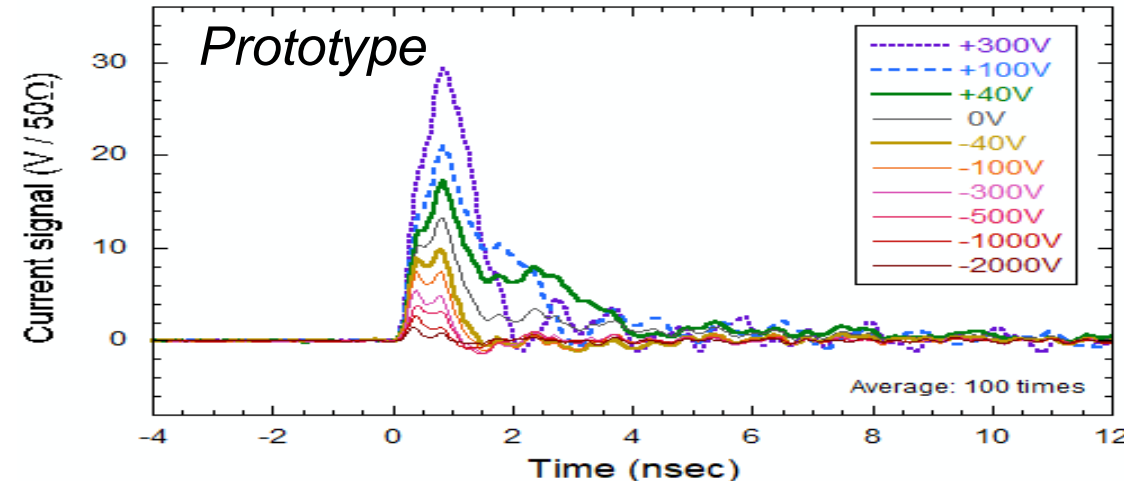
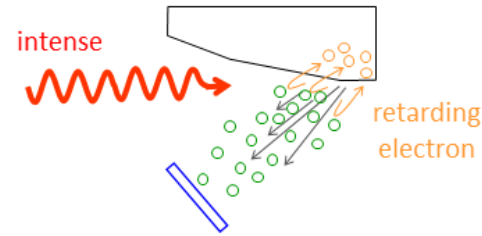
Case 2: Weak X-ray and collector



Case 3: Mild X-ray and collector



Case 4: Intense X-ray and collector

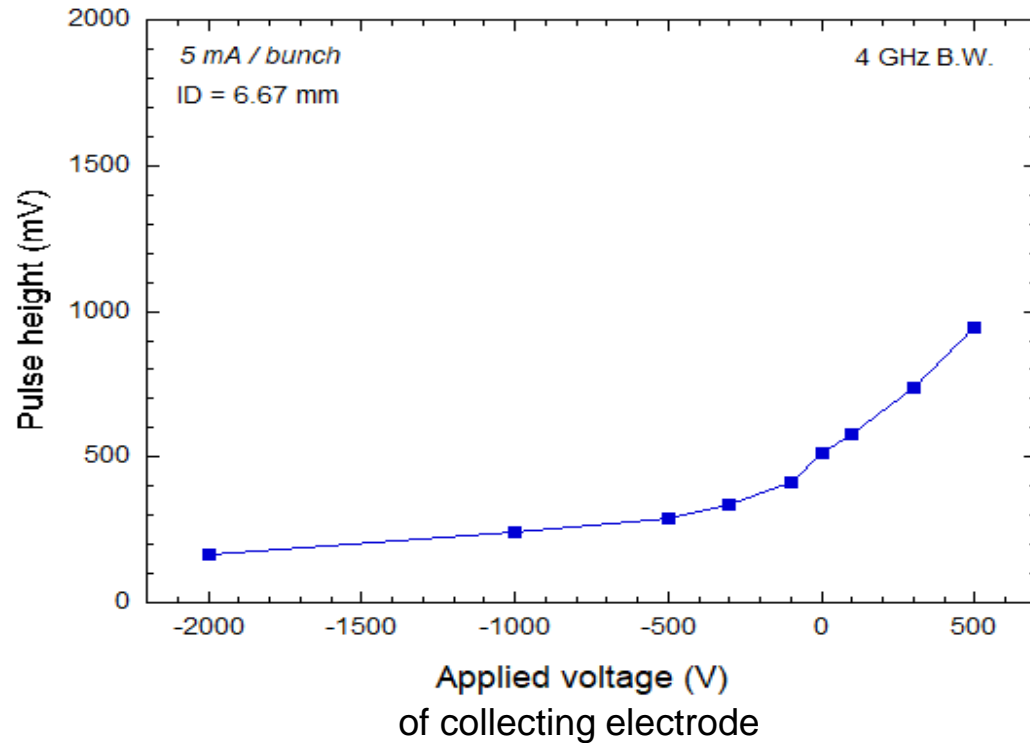


Two measures to avoid the space charge effect:

(1) Applied voltage of the photoelectron collecting electrodes. (HV = +100V -> +500V)

(2) Insertion devise (ID) gaps for fixed point observations (FPO). (Wider gap)

Pulse height



パルス波高 (信号量) は、光電子収集電極の印加電圧に大きく依存する。

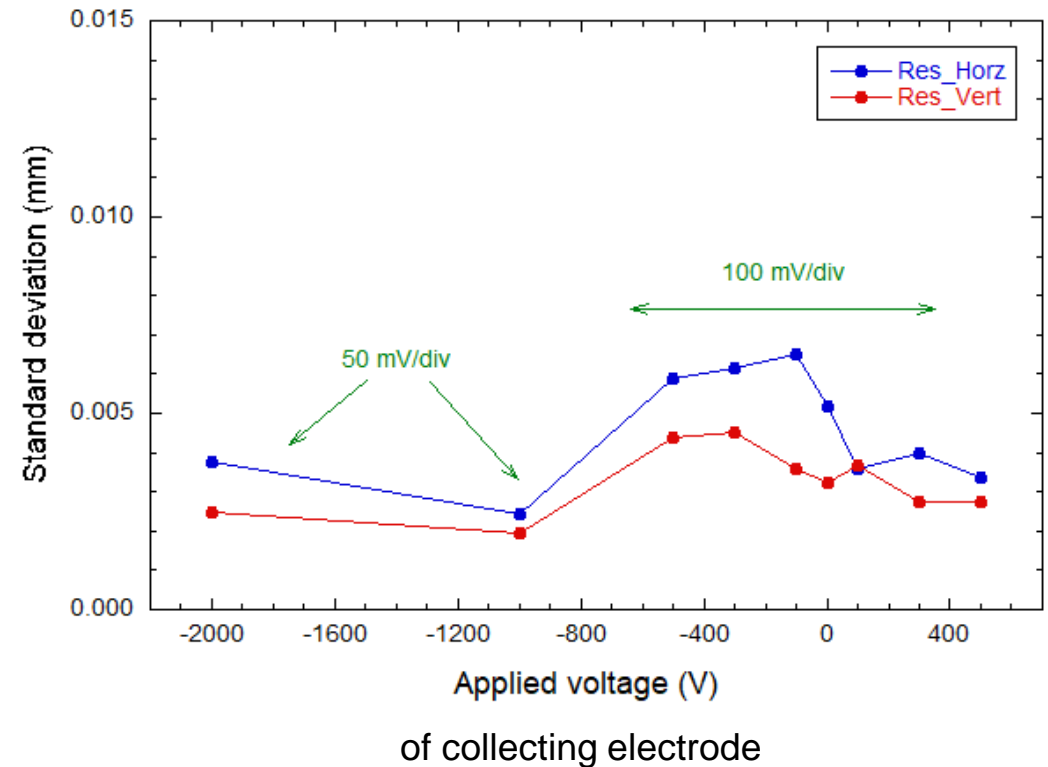
Standard deviation

2022/07/23

ID = 6.668 mm

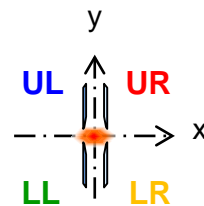
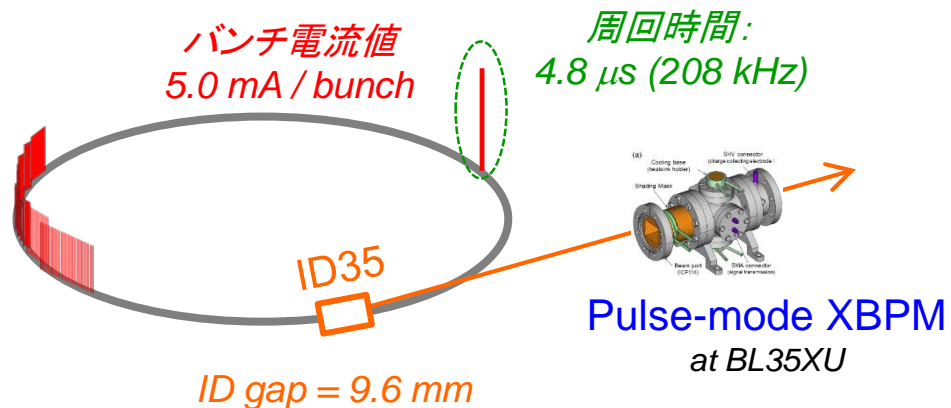
 Applied voltage: variable
(H, V) = (-0.04, 1.70)

Area (Integral)

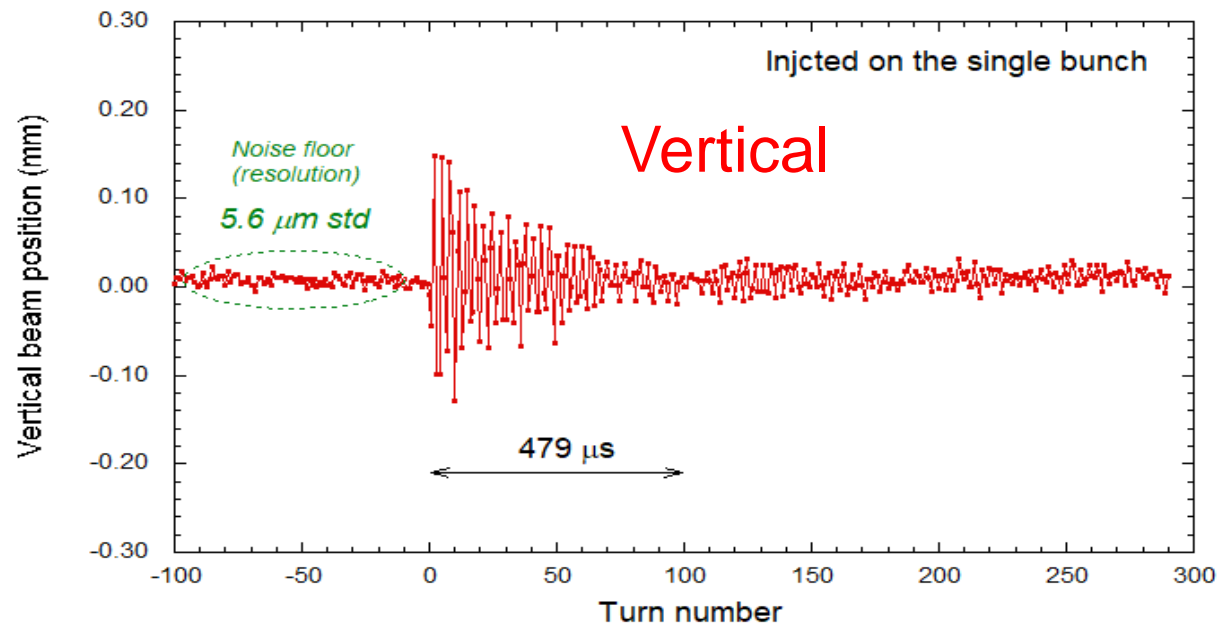
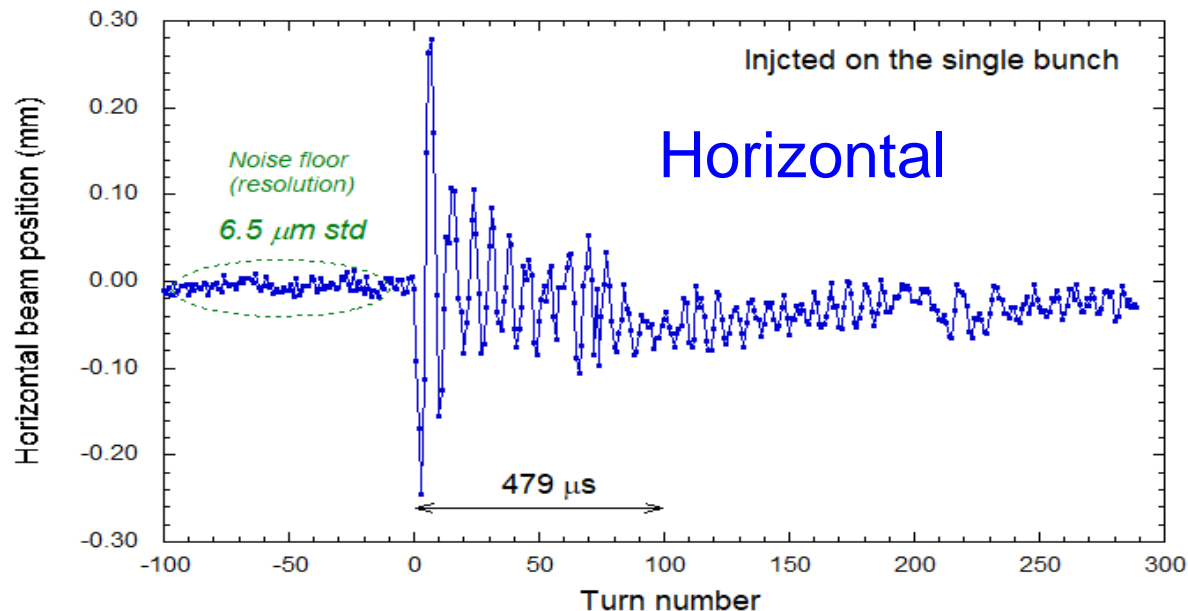
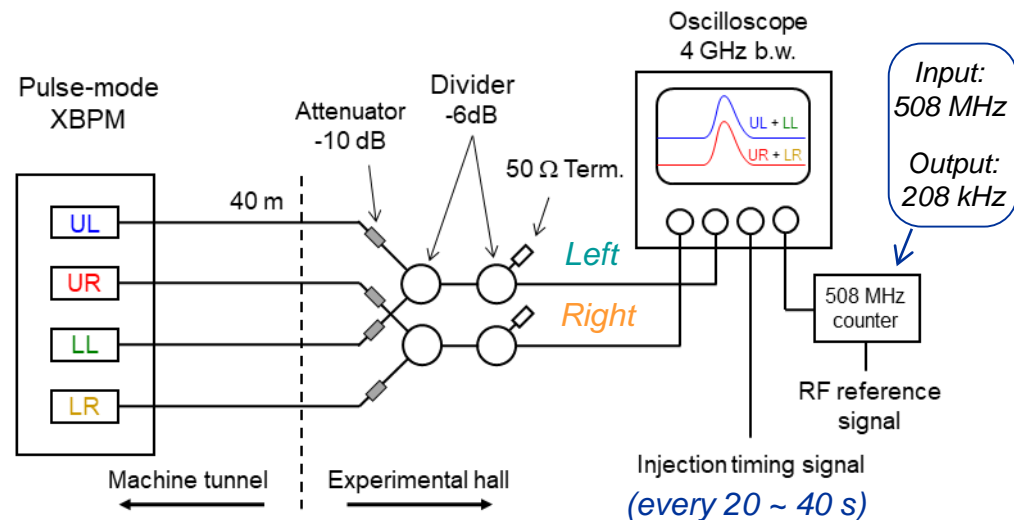


信号量が小さくても、オシロのレンジを調整すれば、分解能は低く抑えられる。

“11/29-bunches + 1 bunch” mode with **top-up injection**

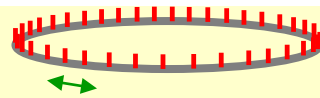


測定用結線図(水平方向)



ファイリング・パターン: "203 bunches" mode (uniform filling)

バンチ間隔: 12 buckets (23.6 ns) ~0.5 mA / bunch

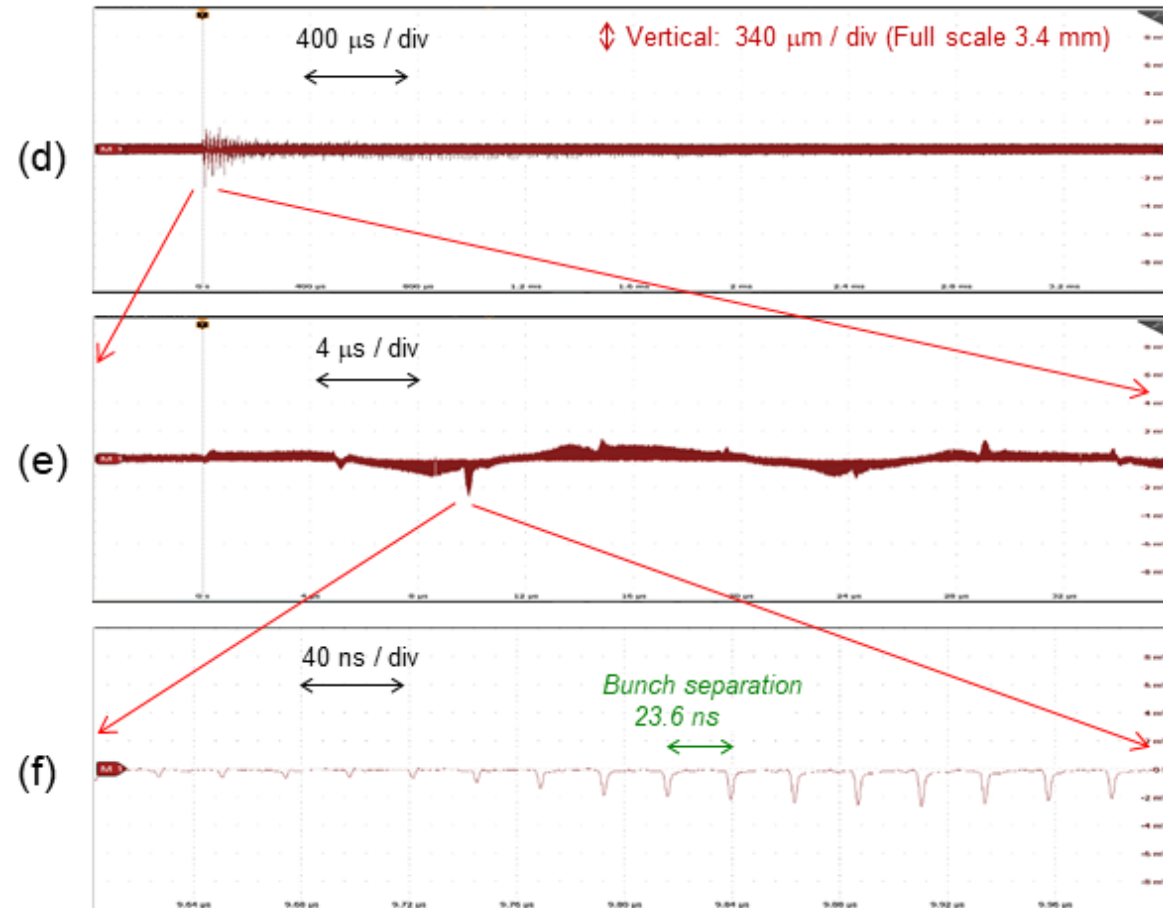
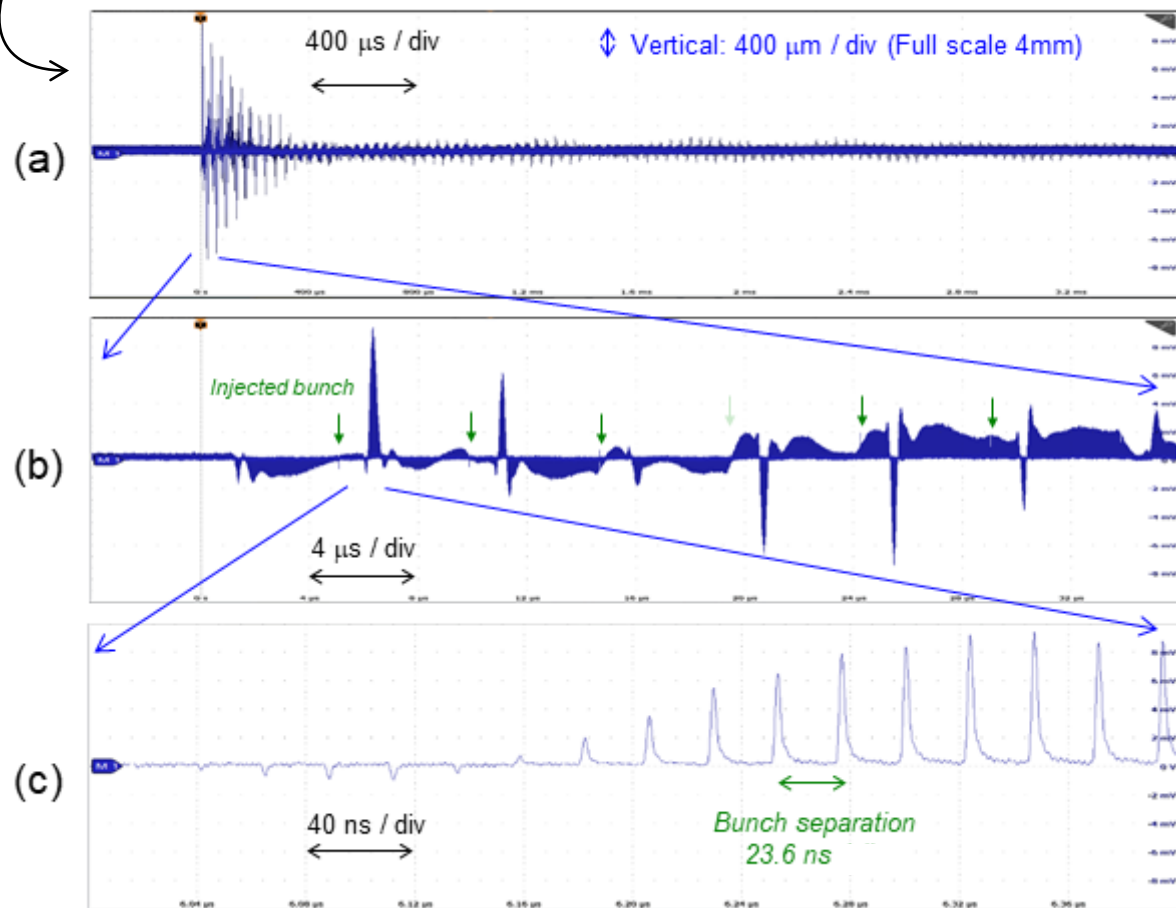


前ページと同じ結線で
オシロ内部機能の
LPF (200 MHz) を使用

縦軸: 差/和

Horizontal

Vertical



今回初めて、ID-BLで放射光ビームのパルス毎の測定に成功した。

1. パルス・モード計測型光位置モニタ(PM-XBPM)の初号機を改良して、耐熱性の向上を図った。(ID-BLで安心して使えるようにするため)
2. ID-BL(BL35XU)にて評価試験を実施
 - 耐久性： OK (厳しい熱負荷条件下で1年問題なく稼働)
 - 位置感度： 実用上十分な応答を確認 (但し、補正係数が数%のズレ)
 - 分解能： $<10 \mu\text{m}$ RMS (設計目標値を達成)
 - 入射時の振動観測： ID-BLで、初めてパルス毎の測定に成功

<今後の課題>

- 動作条件の最適化(XBPMの印加電圧、オシロの帯域など)
- 信号処理(高速ADC)システムの構築(実効的な分解能は信号処理系に依存)
- そのためには、ビームラインの利用側と協議して仕様を固める