

DESIGN OF FEMTO-SECOND REAL-TIME BUNCH SHAPE MONITOR BASED ON EO DETECTION

Akira Maekawa^{A)}, Mitsuru Uesaka^{A)}, Hiromitsu Tomizawa^{B)}

^{A)} Nuclear Professional School, University of Tokyo
2-22 Shirakata-Shirane, Naka, Ibaraki, 319-1188

^{B)} JASRI

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198

Abstract

In XFEL/SPring-8, it requires ultrashort electron bunches and their transportation to the undulator section. For the stable SASE operation, we have been developing three-dimensional femto-second bunch shape monitor based on Electro-Optic detection as non-destructive real-time single-shot measurements. We utilize a supercontinuum laser pulse with more than 400 nm bandwidth and an organic EO material for femto-second temporal resolution and radially polarized hollow laser beam for the three-dimensional measurements. We report the details of the concept and numerical estimations of this bunch shape monitor and developing status for the components of this monitor.

EO計測によるフェムト秒リアルタイム電子ビームバンチ形状モニタの 設計開発

1. はじめに

現在SPring-8敷地内において、X線自由電子レーザー (XFEL) が建設中である^[1]。X線レーザー発振のためには低エミッタンス (~ 1 pmm-mrad) ・極短バンチ(半値全幅で ~ 30 fs)の電子バンチが必要とされており、安定なX線レーザー発振のためにはバンチ長を運転中に計測して最適化することが必要不可欠である。サブピコ秒のバンチ長計測手法として通常の電子加速器で広く用いられているストリークカメラでは、時間分解能が波長700 nm以上の入射光を使用した場合でも300 fs (FWHM)であり、実際の測定では他の要因により分解能は更に悪化することが知られている^[2]。このため、XFEL/SPring-8ではRFデフレクタによるバンチ長 (又は形状) 計測を行う予定である^[3,4]。これは100 fs以下の極短バンチ測定として信頼性及び精度の高い測定であるが、破壊型のモニタであるためにX線レーザー運転中に使用することは出来ない。

その他のバンチ長 (形状) 計測手法として近年注目を浴びているのが、非線形結晶の電気光学効果 (EO Effect: Electro-Optic Effect)を用いた計測手法である^[5]。電子ビーム軸近傍にEO結晶を配置すると、電子バンチの作るクーロン電場が印加された時に結晶中の屈折率分布が変化する。電子バンチとタイミングを同期させてレーザープローブパルスを経晶に入射することで、結晶中の屈折率分布の変化に応じてレーザー偏光状態が変化する。後段で偏光子を使うことで電子バンチ形状と同等のパルス形状を持つレーザーパルスが切り出される。このレーザーパルス強度分布(temporal decoding)、もしくは線形チャープレーザーパルスを用いる場合はスペクトル分布(spectral decoding)を測定することでバンチ形状を得

ることが出来る。

EO効果によるバンチ形状計測の特長は、非破壊計測であることとシングルショット計測^[6]が可能であることであり、XFELにおいてビーム調整中に使用できるモニタとして有用である。我々は現在、EO効果を用いたバンチ形状計測の高時間分解能化および横方向電荷分布の同時計測を可能にするフェムト秒電子バンチの3次元形状電荷分布計測体系の設計開発を行っている。ここでは、この計測手法の概要と数値計算による見積を中心に報告する。(主要構成要素の開発状況については文献^[7]を参照)

2. 3次元電子バンチ形状計測体系

2.1 計測体系の概要

フェムト秒電子バンチの3次元形状計測体系図を図1に示す。この計測体系の特長は、①高時間分解能化のため、白色・線形チャープ矩形レーザーパルス (バンド幅 400 nm) および有機EO結晶を用いること、②3次元バンチ形状計測 (縦方向・横方向電荷分布の同時計測) を行うために、円環・ラジアル偏光・矩形レーザーによって電子ビーム軸周囲に複数配置したEO結晶を同時にプローブすること、の2点である^[8]。更に、上記に挙げた白色・線形チャープ・ラジアル偏光・矩形レーザーのスペクトル・偏光状態を保持しつつ伝送する光学系およびスペクトル整形と補償のためのAO変調器によって構築される。

2.2 時間分解能の見積

本計測体系では、プローブとして線形チャープレーザーを使用し、EO結晶後のスペクトルを計測することでバンチ形状のシングルショット計測を行

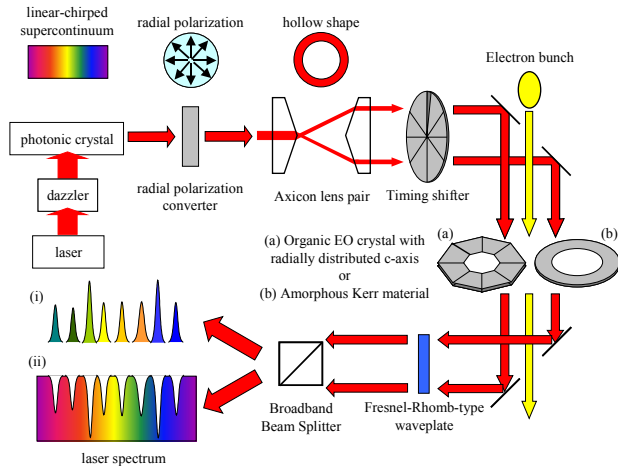


図1 3次元バンチ形状計測体系

う (Spectral decoding方式を採用)。この場合、時間分解能はレーザーのフーリエ限界パルス幅 τ_0 とチャープパルス幅 τ_c を用いて

$$T_{laser} \approx \sqrt{\tau_0 \tau_c}$$

で表わされる。これはレーザーの時間幅とバンド幅との間の不確定性関係から決まる制約である。半値全幅で30 fsの時間分解能を達成するためには、矩形チャープパルス幅を500 fsとすると、400 nm程度のバンド幅 (中心波長800 nm) を持つ白色レーザーパルスが必要となる。

その他に時間分解能を制限する要因として、EO結晶の周波数特性が挙げられる。具体的には①THz帯でのフォノン吸収によって、非線形結晶中を伝播する電子バンチのクーロン電場波形が崩れること、②可視領域内、およびTHz帯と可視領域間での屈折率の波長分散によるEO信号パルスの伸張、によるものである。EO計測ではZnTeやGaPなどの無機結晶が広く使われているが、ZnTeは5 THz、GaPは11 THzにそれぞれフォノン吸収があるために、時間分解能は最高でも120 fs (FWHM)程度に制限されることが報告されている^[9]。そこで我々は、DASTなどの有機EO結晶の適用を考えている。日本が開発したDASTは20 THz以上の広帯域THz生成源としての報告例があり^[10]、極短バンチ形状計測への適用が期待される。

上述したように、Spectral decodingで30 fsの時間分解能を達成するためには400 nmのバンド幅を持つ白色レーザーが必要である。一方、白色レーザーを使用した場合には波長分散による時間分解能悪化の影響を強く受けることとなる。そこで、白色レーザーの使用が時間分解能に与える影響について数値計算による見積を行った。本節の数値計算では、EO結晶として可視・THz領域で屈折率が既知であるGaP (厚さ100 μm) を仮定した。バンチ長100 fsの電子バンチ (ガウス分布) によって生成されるクーロン電場の結晶伝播中における電場波形を図2に示す。プローブレーザーのバンド幅は400 nmとし、パルス幅が500 fsとなるようにGDD (群遅延分散: Group Delay Dispersion) を-400fs²加えた。11 THzでの吸収の影響により、クーロン電場波形の形状が崩れる様子

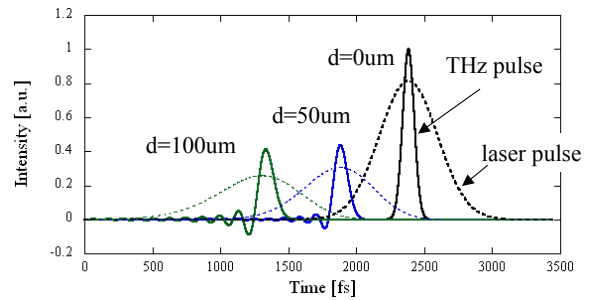


図2 100 μm 厚GaP中を伝播するクーロン電場 (THz波)波形 (実線) とバンド幅400 nmのレーザー電場波形 (点線)

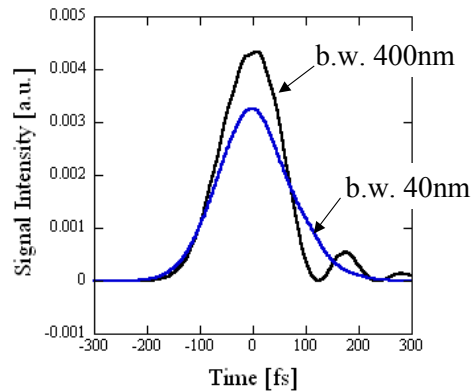


図3 EO信号パルスの計算結果。プローブレーザーのバンド幅が40 nmの場合 (実線) と400 nmの場合 (点線)。

が見られる。100 μm 伝播後、クーロン電場の時間幅は120 fs (FWHM)程度にまで伸びている。このときに得られるEO信号パルスの計算結果を図3に示す。プローブレーザーのバンド幅が40 nmの場合 (パルス幅は500 fsとなるようにGDDを-4200 fs²加えた)、EO信号は163 fs (FWHM)程度まで伸張する。一方、バンド幅400 nmの白色レーザーを用いた場合には、EO信号は135 fs (FWHM)であり、時間分解能が改善していることが分かる。これ以上の時間分解能の達成のためにはGaPより広帯域で使用可能なEO結晶が必要となるが、100 fs程度までの時間分解能は白色レーザーを用いることで達成可能であることが分かった。

2.3 横方向分布計測の見積

電子ビームのつくるクーロン電場はビーム軸を中心に放射状に広がっている。従って、EO結晶軸が放射状となるように (但しカーEOの場合は必要ない) EO結晶素子をビーム軸周囲に複数配置し、ラジアル偏光のプローブパルスを用いることで、複数のEO結晶素子で同時にプローブすることが出来る。それぞれの結晶で得られるEO信号強度は各結晶素子での電場強度に依存するため、電子バンチの横方向電荷分布の対称性の崩れ (偏芯や非対称性) をEO信号強度の変調として計測することが可能となる。この3次元形状計測では積算ではなくスライス毎の横方向電荷分布の計測が可能であることもこの

計測手法の特長であり、SASEの安定発振のためのモニタとして重要である。

電子バンチの横方向電荷分布をどこまで計測できるか数値計算による見積を行った。電子バンチのパラメータはXFELでの値である、エネルギー8 GeV、電荷量100 pC、バンチ長30 fs (ガウス分布) に設定した。横方向電荷分布を検出するためには、EO結晶素子をビーム軸に可能な限り近づける必要がある。バンチ形状計測を行うアンジュレータ直前では、アンジュレータ磁石のダメージを防ぐためにビームハローは取り除かれているため、ハローによるEO結晶の損傷は考慮する必要がない。そこで計測点をビーム軸から2 mmとした。このとき、クーロン電場強度は98 MV/m程度に達する。このような高強度の電場の場合には、1次のEO効果であるポッケルス効果だけではなく、2次のEO効果であるカー効果も支配的となる。通常为非線形結晶だと両者の効果が分離できないために正確な計測が困難となるが、EO素子がアモルファスの場合にはポッケルス効果は存在しないので、高精度の計測が可能である。アモルファスを用いたカーEO計測の場合、得られるEO信号強度は

$$I_s = I_0 \sin^2\left(\frac{\pi n_2 E^2}{\lambda} L\right)$$

である。但しここで n_2 は非線形屈折率であり、一般的に 10^{-20} から 10^{-22} の値をとる。

図4に横方向電荷分布計測に関する数値計算の結果を示す。40 μm のビームサイズの電子ビームが10 μm 横方向に偏芯した場合、各結晶で得られるEO信号間で最大10%程度の強度差が生じることとなり、実際の実験で検出が可能であると見積られる。一方、楕円形状の場合はビームサイズが150 μm 以上でなければ大きな強度変調として検出できない。XFELのアンジュレータ直前でのビームサイズは40 μm 程度であると予想されており、この条件では偏芯の影響が支配的である。この3次元形状計測で電子ビームの横方向非対称性を計測する際には、電子ビーム軸に沿って3箇所EO効果による3次元バンチ形状計測を行い、上流・下流の計測点で積算及

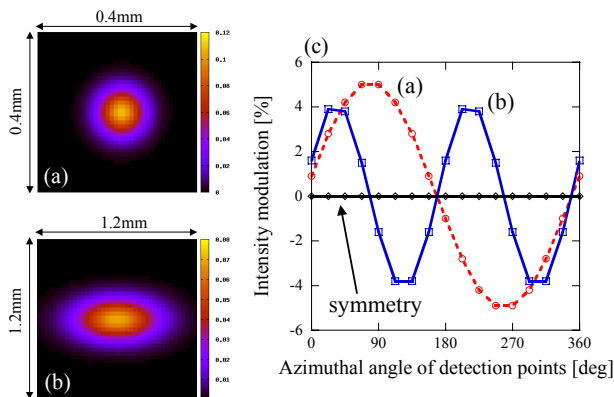


図4 数値計算による横方向電荷分布計測の見積。(a)10 μm の偏芯がある場合、(b)楕円形状の場合、(c)それぞれの場合のEO信号強度の変調。

びスライス毎の偏芯の有無を計測して電子ビーム軸及び形状の調整を行い、中央の計測点での偏芯を最小化する。これにより、横方向の非対称性の計測が可能となる。

2.4 エネルギーチャープ計測の見積

偏向電磁石で曲げられた後の電子バンチを3次元形状計測することで、スライス毎のエネルギー分布、すなわちエネルギーチャープ計測が可能となる。図5にエネルギーチャープ計測の数値計算による見積の結果を示す。この計算では、前節で仮定したパラメータに加えて、エネルギー分散0.4%、 β_x : 15 m、 η : 0.6 mを仮定した。検出点はビームが結晶に衝突しないよう、ビーム軸から15 mm離れた地点に設定した。図5に示すように、各点で計測されるEO信号強度間の変調が、エネルギー分散及び中心エネルギーが変化した場合に検出できる。エネルギー分散の場合は設計値である0.4%が0.8%に増加(もしくは0.2%に減少)することが、中心エネルギーの場合は $\pm 0.05\%$ の変化が3次元形状計測で検出可能であることが分かった。偏向電磁石の前後で3次元形状計測することで、電子バンチの空間分布及びエネルギーチャープをシングルショットで計測することが出来る。

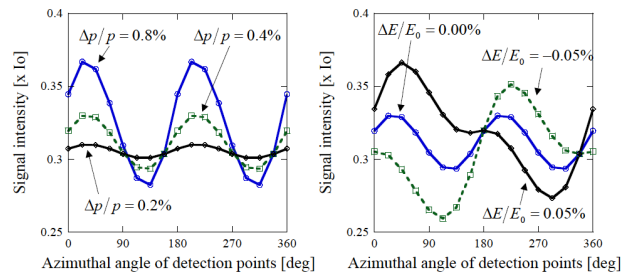


図5 エネルギーチャープ計測の見積。(左) エネルギー分散が変化した場合。(右) 中心エネルギーが変化した場合。

3. まとめと今後の予定

電気光学効果を用いたフェムト秒電子バンチの3次元形状計測体系の設計開発を行っている。時間分解能や横方向分布計測について数値計算による見積を行い、白色レーザーを用いることで時間分解能が改善すること、3次元形状計測によって横方向電荷密度分布やエネルギーチャープのシングルショット計測が可能であることを確認した。

今後はレーザー励起THz源を用いてEO結晶の特性評価を行うことで、極短バンチ形状計測に使用可能な結晶の選定を進めるとともに、フォトカソードRF電子銃からの電子ビームを用いた3次元バンチ形状計測試験を行う。最終的に100 fs (FWHM)以下の世界最小の時間分解能を実現するためには他の計測手法によるクロスチェックが必要である。ストリークカメラは先に述べたように分解能の点で用いることは出来ない。しかし、XFEL/SPring-8ではRF

デフレクタがあるので、これを用いることでEO効果によるバンチ形状計測の時間分解能のチェックを行う予定である。

参考文献

- [1] T. Shintake, Proc. of EPAC 08, Genova, Italy (2008) 136
- [2] H. Tomizawa, Proc. of 5th PASJ, Higashi-hiroshima (2008) 129
- [3] O. H. Altenmueller et al., Rev. Sci. Instr., 35 (1964) 438
- [4] H. Ego et al., Proc. of EPAC 08, Genova, Italy (2008) 1098
- [5] X. Yan et al., Phys. Rev. Lett. 85 (2000) 3404
- [6] I. Wilke et al., Phys. Rev. Lett. 88 (2002) 124801
- [7] A. Maekawa et al., Proc. of 6th PASJ, Tokai (2009) WPBDA39
- [8] H. Tomizawa et al., Proc. of FEL 07, Novosibirsk, Russia (2007) 472
- [9] G. Berden, et al., Phys. Rev. Lett., 99 (2007) 164801
- [10] Y. Takahashi et al., J. Photochem. Photobiol. A: Chem. 183 (2006) 247