

Non-destructive single-shot 3-D electron bunch monitor with EO spectral decoding

Hiromitsu Tomizawa^{1,A)}, Hirofumi Hanaki^{A)}, Tetsuya Ishikawa^{B)}

^{A)} Accelerator Division, Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/SPring-8)

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

^{B)} The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN/SPring-8 Harima)

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

Abstract

We are developing a 3-D electron bunch monitor based on EO sampling, using yearlong stable femtosecond laser source of SPring-8 RF gun. Our developing single-shot bunch monitor can characterize the 3-D (both longitudinal (1D) and transverse (2D)) distribution and position of an electron bunch with femtosecond resolution. This non-destructive monitor can be used as an electron energy chirping monitor in a dispersive region for X-FEL commissioning. The probe laser for spectral decoding EO sampling is prepared as radial polarized and completely linearly chirped broad-bandwidth (~500nm) supercontinuum generation. The EO-probe is made of 8 EO-crystals with assembling each EO-optical axes along radial beam axes. The linearly chirped probe laser is longitudinally sifted in 8 transverse sectors for spectral decoding. We are planning to use organic polymer film as a femtosecond resolution EO-probe instead of crystals. This 3-D bunch monitor with spectrograph detects and analyzes the Coulomb field of electron bunches as longitudinally spectral decoding and transversely multi-pole expansion.

非破壊・シングルショット・フェムト秒分解バンチ内3次元電荷分布モニター

1. はじめに

SPring-8サイトでは、XFEL建設が2010年度完成を目指して開始されている。フェムト秒の時間分解能のバンチ長モニターがコミッションングに必要とされ、実績のあるLOLA空洞^[1]等のRFディフレクターを用いたバンチ内構造の計測が予定されている。しかし、1GeV程度のエネルギー領域でも、この計測システムでは数メートルの長さを空洞自身に要し、さらに計測するには数m下流で行わなければならない。コンパクト性を重んじている理研XFELにおいては、よりコンパクトなフェムト秒バンチ長モニターが望ましく、アンジュレータ直前の8GeV領域での計測も現実的なスケールで可能としたい。

以前からテラヘルツ分野では、ZnTeなどのポッケルス効果を利用して、サブピコ秒の時間分解能でのパルス長計測が行われてきた。この方法をEOS (Electro optical sampling) と言う。1ps以下の電子ビームバンチのクーロン電場の変化は、周波数領域でいうとテラヘルツに対応する。加速器分野でもこのような背景から、各国で盛んに極短バンチ長を計測する方法として開発されている。この方法の優れているところは、サブピコ秒の分解能での計測が可能で、レーザー光をプローブとして用いるために時間ジッターがフェムト秒で計測可能なことである。しかし、ZnTeなどの無機結晶を使った諸外国の開発では時間応答が110fsに制限されている。

ところで簡便なEOSの計測方法には、プローブ光

のチャープスペクトルに電子ビームのバンチ時間構造を焼き付ける方法があり、Spectral Decoding法と言われている。これに対し、従来のフェムト秒レーザーのパルス計測に用いられている、自己相関法などはTemporal Decoding法と分類される。

Spectral Decoding法は高繰返しでもシングルショット可能、微弱光でも簡便に分光計測できる方法にもかかわらず、隣り合う波長の干渉効果により信号パルスが鈍ってしまうことが知られている。一般にこの時間分解能は、フーリエ限界パルス幅 t_0 とチャープパルス幅 t_c の幾何平均 $\sqrt{t_0 t_c}$ 程度で与えられる。このため、時間分解能に優れたTemporal Decoding法が精密計測に用いられる傾向にある。

しかしながら、我々はこのSpectral Decoding法の簡便さに着目し、電子ビームのトランスバース方向の電荷分布もシングルショット計測可能なものがないかを検討した。Temporal Decoding法は校正方法としてのみ用い、AO変調器を使ったSPIDER計測を検討する。さらに長足の発展を遂げているスーパーコンティニューム発生技術の利用を視野に入れ、500nmに及ぶスーパーコンティニューム光源を矩形リニアチャープ化し、可変円環ラジアル偏光に変換する光学系を発明した^[2]。この光源を用いると、フェムト秒時間分解でバンチスライス内のトランスバース方向の電荷分布の広がりも含めたシングルショット計測の可能性が出てきたので報告する。

¹ E-mail: hiro@spring8.or.jp

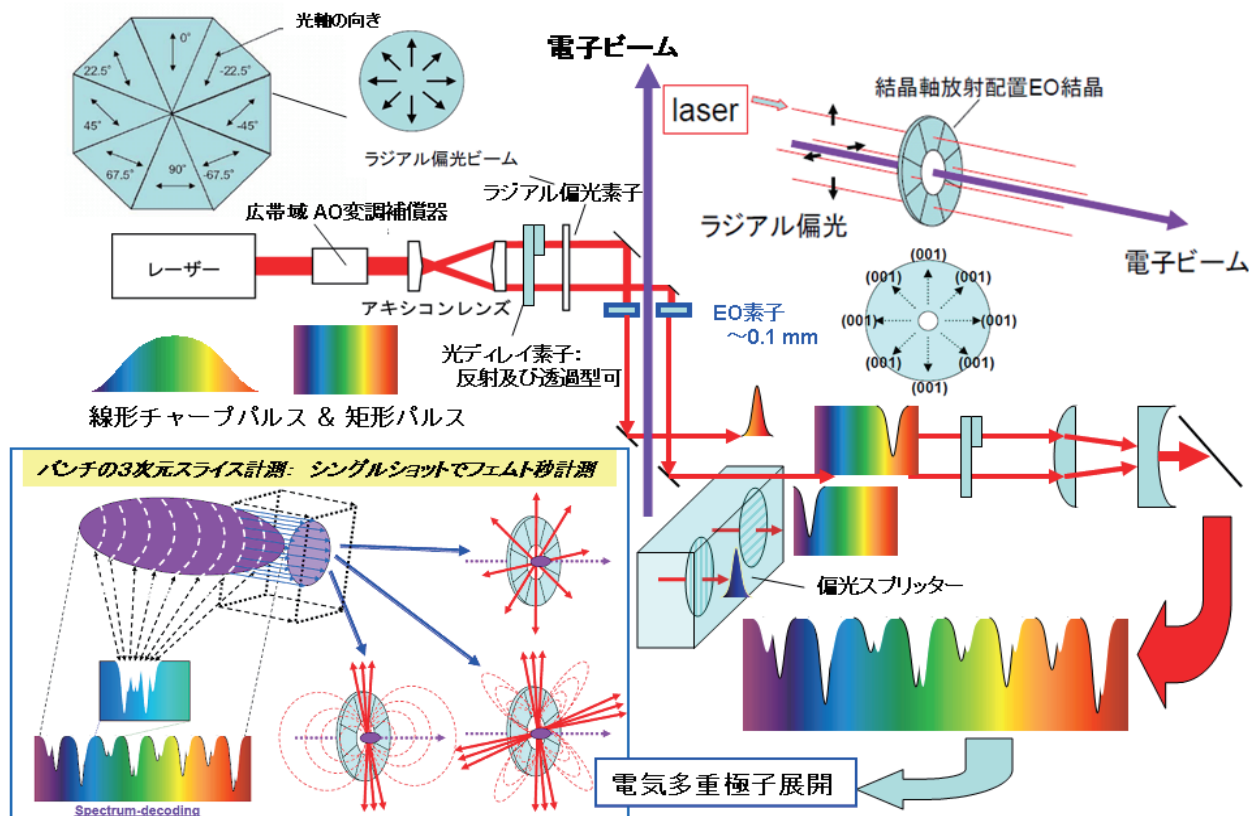


図1：3次元バンチ構造モニターの原理とレーザー光学系

2. 3次元バンチ構造モニターの構成

2.1 円環ラジアル偏光プローブレザー光学系

円環ラジアル偏光とその光学系の詳しい説明は、本研究会別論文^[3]を参照して戴きたい。文献^[3]と異なるところは、ブロードバンド対応で光ディレイ素子を必要とするのみである。この光ディレイ素子は図1のように透過型でも図5、6のように反射型でもよいが重要なことは、チャープパルスが螺旋状に時間的に段階的にシフトし、波長が8方向にシフトしていることである。白色光のラジアル偏光の簡便な発生方法として、分割波長板^[3] (図1左上)や、液晶を用いた方法 (450~1700nmで使用可能)がある。図2は後者でラジアル偏光を生成した例である。このプローブレザーが電子ビームバンチと同時にEOSプローブ素子を通ると、偏光が変化する。これを図1右下のように偏光スプリッターで分岐し、一方を分光計測する。我々は、短パルスに切り出された方の光をファイバー増幅し、ユーザ実験用のタイミング光源とすることも検討している。



図2：ラジアル偏光素子 (左右で偏光子を90度回転)

2.2 矩形リニアチャープ発生白色光源

最近では白色レーザー光源装置を市販で購入できるようになったが、本研究ではフォトニック結晶ファイバーを使用したスーパーコンティニューム光源をフェムト秒レーザーを使って自作することにした。この広帯域光源 (650~1100nm) の1~4次分散まで補償可能なAO変調器 (DAZZLER:UWB650-1100) で矩形リニアチャープを実現する。そのための基礎実験をTi:Saレーザーで実施したので4章で後述する。

2.3 ラジアル結晶軸配向EOSプローブ素子

10fsオーダーの応答性のある素子の材料として、有機材料に着目している。有機分子には π 電子が存在するため高速応答することが予想され、実際に我々が有望視しているポリジアセチレン誘導体では30fs以下の応答性が確認されている^[4]。これらの有機材料での放射線によるカラーセンター形成などでブロードバンド性が損なわれないように配慮しなければならない。

3. EOSバンチモニターの分解能について

3.1 ビームの縦方向の時間分解能

プローブレザー光によって決まる時間分解能はフーリエ限界パルス幅 t_o とチャープパルス幅 t_c の幾何平均 $\sqrt{t_o t_c}$ 程度で決まるので、可能な限り波長帯域が広いものとしなければならない。同時に、チャープパルス幅も計測する電子ビームバンチ幅をカバーする程度に短くする必要がある。ここで t_o

を2.5fs, t_c を160fsとすると分解能は20fsとなる。

一方、プローブする位置による分解能の限界も存在する。電子ビームバンチからプローブ位置までの距離を r , ローレンツ因子を γ , 光速を c とすると、時間分解能 τ は $\tau = r/\gamma c$ で与えられる。 r が1cmで8GeVで計測すると、時間分解能は約2fsとなる。

他にも、E0素子材料の屈折率によるプローブ光の電子ビームに対する遅れなどがある。

3.2 ビームの横方向広がり分解能

図1の左下にあるように、横方向の広がり多重局展開から計測する。詳しい解析方法は、多重極BPMの文献^[6]を参照のこと。正確に横方向の広がりを計測するには、両端にビームの重心を決めるためのBPMが別途必要である(図6参照)。

4. 矩形チャープ生成試験結果

リニアチャープパルスを矩形化しておく、ビームの縦方向の構造を分光器で複雑な解析なしで計測できるので便利である。長期安定化されたSpring-8 RF電子銃用光源レーザー^[6]のシード光スペクトルをDAZZLERにより、増幅器のスペクトル狭帯域化の補償と高次分散補償を行った。リニアチャープパルス(図3)を簡便に矩形化(図4)ができた。計測は分光ストリークカメラにて行った。

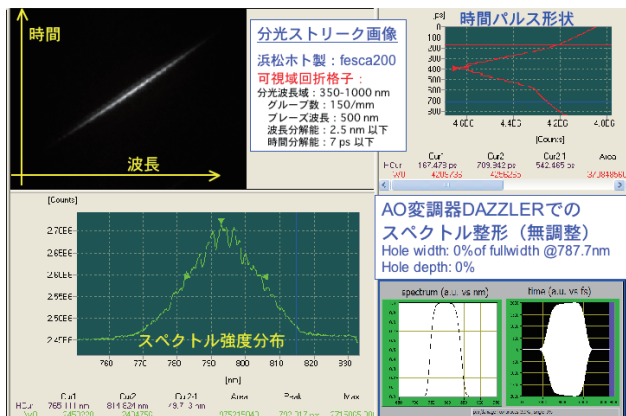


図3: AO変調器での整形なし

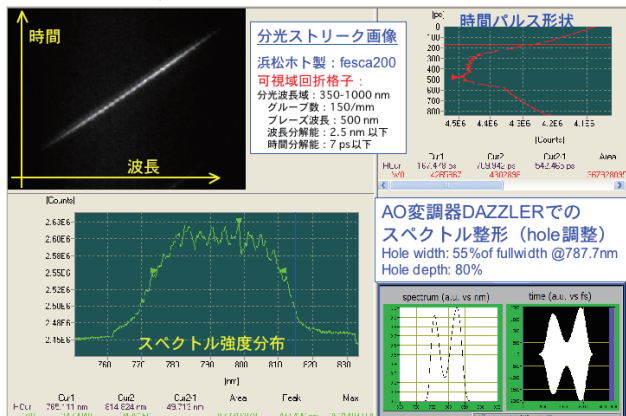


図4: AO変調器でのスペクトル矩形整形(シードレーザーのスペクトル中央に窪みを作るように変調)

4. EOSモニターチェンバー

このEOS 3次元バンチ形状モニターは、図5の横方向の広がりを計測するモニターの両端を、ビーム重心を決めるための図6のBPMモニターで挟んで用いる。これで全長が数十cmである。図中の螺旋階段ミラーは、あくまでも光学要素の機能としての記述したものである。Spectral Decoding計測の場合は、出射側ミラーにこのような構造は特に必要はない。

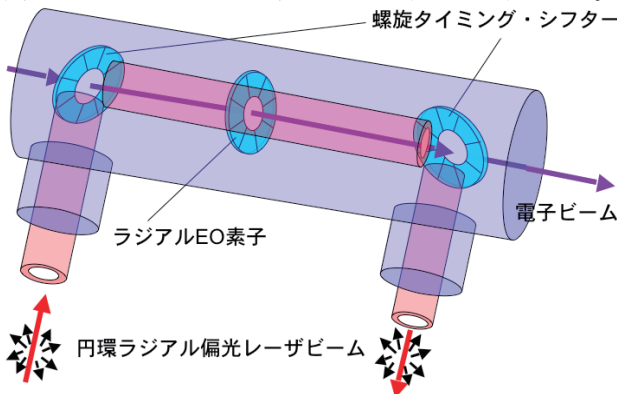


図5: 3次元バンチ形状モニター仕様のチェンバー

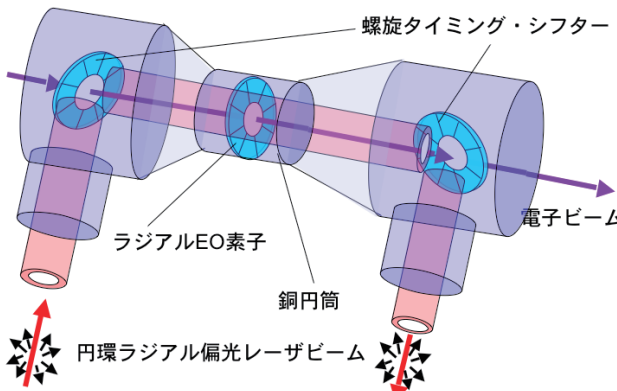


図6: BPMとして用いる場合のEOSチェンバー

5. まとめ

今回、EOSを利用した3次元バンチモニターの提案と進展の状況の概略を報告した。E0有機材料に関しては未知数であるが、原理的にはモニター全体として20fsの分解能を達成する見込みがある。

参考文献

- [1] R. Akre, et al., Proc. of EPAC2002, Paris, France, 2002, 1882-1884.
- [2] 出願番号: 特願2007-133046; 発明者: 富澤宏光
- [3] 富澤博光, 小林実, Proc. of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Wako, Japan, 2007, to be published.
- [4] Hattori T. and Kobayashi T., Chem. Phys. Lett., 113, 1987, 230.
- [5] T. Suwada, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.40, 2001, 890-897.
- [6] Tomizawa, et al. Russian Journal of Quantum Electronics, 2007, 697-705.