

Several remarks on state-of-the-art femtosecond bunch length measurements for the temporal resolution limitations

Hiromitsu Tomizawa

Japan Synchrotron Radiation Research Institute

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

Abstract

Recently, femtosecond temporal resolution is strongly required for electron bunch measurements, because X-FELs have been stated to build in the world. Normally, in the accelerator field, femtosecond streak cameras are used in the study of ultra-short bunch, using with Cherenkov or OTR monitors. I describe here the temporal resolution limits of a femtosecond streak camera (HAMAMATSU, FESCA 200) with some remarks on the wavelength dependence of temporal resolution. Using 100-fs laser pulse of the fundamental, SHG and THG of Ti:Sapphire laser, the temporal resolution of ~ 300 fs (FWHM) at 800nm, ~ 500 fs at 400nm, and ~ 600 fs at 266nm were achieved. I am planning to use organic polymer film as a femtosecond resolution (~ 30 fs) EO-probe instead of crystals. The temporal resolution of spectral decoding EO sampling is limited by temporal response of EO material and spectral bandwidth of the probe laser.

昨今のフェムト秒バンチ長計測の問題点とその諸相 (ストリークカメラの時間分解能の波長依存性を中心に)

1. はじめに

1.1 フェムト秒バンチ長計測の昨今の状況

フェムト秒電子バンチ生成の要求が加速器業界にも高まって久しい。特に最近、X線自由電子レーザー建設の国際的な競争が本格化したことから、フェムト秒時間分解能でのバンチ長計測可能なモニターの要求が高まっている。ところが、その電子バンチをフェムト秒時間分解能で計測する方法は極めて限定されている。フェムト秒電子バンチの時間情報を反映するコヒーレント放射を利用する計測では、強度が十分でその波長域で利用できる非線形現象があれば、フェムト秒レーザーの高速パルス計測技術が活用できる。しかし実際にはチェレンコフ光や遷移放射(OTR)などのインコヒーレント光をフェムト秒ストリークカメラで計測するのが一般的である。この通常用いられる手法では、フェムト秒ストリークカメラに時間分解能の波長依存性があることを見落としがちで、誤った計測が後を絶たない。このようなことが起こる背景には、時間分解能の限界で計測しようとする、光量的に量子ゆらぎのある領域でシングルショット計測することになり、計測のパラツキの範囲内で時間分解能を超える値が計測されてしまうことも一因であろう。したがって、測定系の計測波長域における時間分解能の下限値を厳密に評価しておくべきである。Fesca200 (C6138)の時間分解能には波長依存性があり、波長800nmで300fsの分解能(FWHM)があるシステムでも、残念ながら400nmでは500fsと時間分解能が悪化してしまう[1]。

1.2 加速器分野でのストリークカメラによるフェムト秒バンチ計測の問題

例として、FELのnonlinear higher harmonicsに関するストリークカメラ計測と理論との相違を挙げる。High gain single-pass FELにおいて、FEL基本波およびmicro bunchingが成長するにつれ、higher harmonics成分のFELが励起される。このnonlinear higher harmonicsの縦方向のパルス幅は、FEL基本波よりも短くなる(harmonic numberが上がるにつれ、パルス幅は短くなる)と考えられているが、Seeded FELのnonlinear higher harmonicsをストリークカメラで計測したところ、逆の結果になった。つまり、harmonic numberが上がるに従い(波長が短くなるに従い)、パルス幅は長く観測された[2]。このような矛盾が生じたのは、同論文[2]でも議論しているように、ストリークカメラの時間分解能に波長依存性があるためである。

また、平成18年度の西川賞が「フェムト秒・低エミッタンス電子ビームの発生」に与えられている。このバンチ長計測はチェレンコフ光(480 nm)をFesca200で計測し、98fs (r. m. s.) と確認したとするものである[3]。先に述べたようにこのようなパルス幅はこの波長領域では計測できるはずはない。論文[3]ではパルス幅をシミュレーションと比較するためにr. m. s. で表現しているので、FWHMと比較する時は2.35倍しないとイケない(98fs (r. m. s.) は231fs (FWHM)に換算されることに注意すること)。

本報告ではこの問題に超高速計測の観点から焦点を当て、ストリークカメラの時間分解能に関して詳細に検討を加え、フェムト秒電子パンチ形状計測について考察する。

2. フェムト秒ストリークカメラの時間分解能 (入射光量が大きくない時)

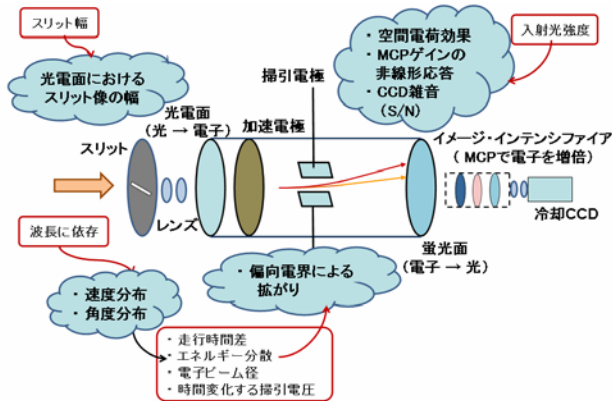


図1 フェムト秒ストリークカメラの構造と時間分解能を決定する各種要因

2.1 空間分解能に起因する時間拡がり (スリット幅に依存する時間分解能)

ストリークカメラで計測する時には、まずは最初にフォーカスモード (掃引電圧を印加しない) でスリット像を確認する。スリット幅を狭めていった時に、その像幅が示す最小値 (チャンネル数) が時間分解能を決定する一つの因子である。実際の時間分解能はこれより悪化するため、原理上この値以下の分解能で計測不可能である。SPring8のFesca200では、波長650nmの時に7.85ch (FWHM) なので最速レンジの20psでは0.15psに相当する。次節に述べるように、この値が波長が短くなるに従い大きくなってしまふ。さらに、ストリークモードでの計測時には偏向電界による拡がりにより、時間分解能が悪化する。

2.2 光電子の初速度分布に起因する時間拡がり (入射光の波長に依存する時間分解能)

ストリークカメラでは、光電面で入射光を受光して電子に変換後に加速される (この加速エネルギーを上げることでFesca200は時間分解能の悪化を相対的に低減している)。フォトカソード電子銃と原理的に同じで、波長が短くなると熱エミッタンスが増大するので蛍光面での拡がりが大きくなる。要するに光電面の仕事関数と入射光子エネルギーとの差が大きくなると、偏向電界が無い場合でもスリット像の最小幅が大きくなる。SPring8のFesca200では波長250nmの場合は、10.96ch (FWHM) であるので最速レンジでは0.21ps相当である。先述の波長650nmの場合と比較すると、スリット像幅の最小値が大きくなり時間分解能が悪化しているのが分かる。

2.3 偏向電界に起因する走行拡がり (ストリークモード時、特に最速レンジで発生する時間拡がり)

時間的に同時刻に同じ速度で空間的に距離 $2R$ 離れた2つの電子を考え、それぞれの電子が蛍光面上に到達するまでに時間差がつくことを図2に示す。電子1は加速電極に対して正電位を印加する電極側であるため加速され、電子2は逆に減速されるために偏向電極に突入する時刻が異なってくる。さらに偏向電極に印加する掃引電圧は鋸波状に時間的に変化するので、電子1と2では偏向電極間でトータルとして受ける力の差異が、電子ビームの空間的な拡がりが大きくなると無視できなくなる。特に最速レンジでは、掃引電圧が大きくなるためにこの効果による時間分解能の悪化が大きくなる。実際にはこれに加えて光電子に初速度分布があるため (赤外光よりも短い波長を入射した場合など) に、ストリークモードの最速レンジでは次章に示すように時間分解能が大きく悪化する。

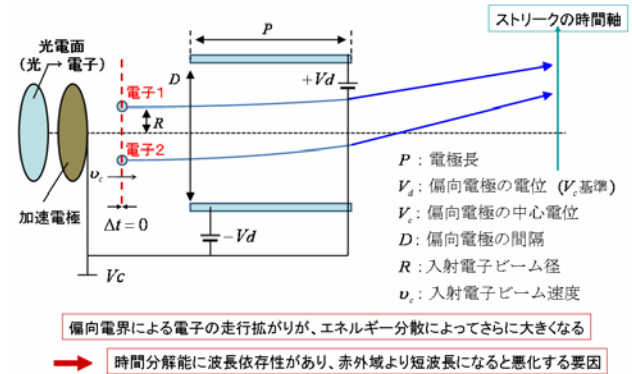


図2 偏向電界に起因する走行拡がり (ストリークモード時に起こる時間分解能の悪化)

2.4 その他の時間分解能の悪化要因

上述した時間分解能悪化の3大要因以外にも、内部の反射光学系の非点収差や入射スリットでの回折拡がり等があるが10fs程度なので無視してよい。しかし、シェーディング (システム全体の感度むら) は時間分解能に大きく影響を与える可能性があり、使用波長で実験前に毎回測定し感度にむらがない領域で計測評価すべきである。その他のストリーク外部の影響として、チェレンコフ光などの発光点から入射スリットまで結像 (イメージング) する光学系全体の収差でも時間分解能は悪化する。

これまでは最小の時間分解能を扱うという観点から入射光量が抑えた場合について述べてきた。ここで入射光量を増やしていった場合のことを考える。ストリークカメラのダイナミックレンジの定義は、検出下限の光量からだんだん光量を増やしていき、計測されるパルス幅が空間電荷効果で広がってその時間分解能の1.2倍のパルス幅となったときの光量と検出下限の光量の比である。Fesca200のダイナミックレンジのカタログ値は10である。このダイナミックレンジを越えて、さらに入射光量を増やして

いくとMCPの同一または隣接するチャンネルに同時に複数個の電子が飛び込むことによる増倍率の非線形性が現われ、システムとしての入出力特性の線形性 ($\gamma = 1$) が成立しなくなる。この入出力応答の線形性の下限値はCCDの読出しノイズである。

3. 最速レンジでのフェムト秒ストリークカメラの最小時間分解能の波長依存性

3.1 波長800nm、パルス幅100fsのレーザによるFesca200のインパルス応答（最小時間分解能計測）

図3に示す波長800nmでの計測データを見れば分かるように、入射光量が増えると主に空間電荷効果でパルス幅が増大し時間分解能の悪化がみられる。有意なパルス幅を議論するためには、光電面で発生する光電子が100個程度の領域で計測するのが妥当である。この波長800nmでの最小時間分解能は300fsとなる。この計測データから前述のダイナミックレンジを大雑把に計算すると、最小パルスのカウント数(約4,000倍に増倍後のINTENSITY)を30,000カウント、FESCAの最小時間分解能300fsの1.2倍つまり360fs(FWHM)時のカウント値を200,000とするとダイナミックレンジは6.7である。ここでいう量子ゆらぎの領域というのは物理的にポアソン分布をしているはずの領域であるという意味であって、実際の計測ではMCPの増倍ゆらぎによる影響が支配的である場合が多く、入射光量を絞った場合はCCDのノイズが支配的な場合もある。

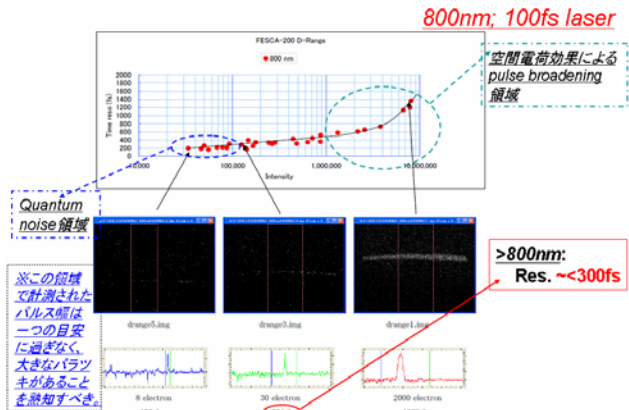


図3 C6138における波長800nmのダイナミックレンジ (データに関しては文献[1]参照)

3.2 波長400nm、パルス幅100fsのレーザによるFesca200のインパルス応答（最小時間分解能計測）

図3と図4から波長800nmと比べると波長が短くなることでバラツキが大きくなっていることが分かる。このようにバラツキの大きい領域が広がるとダイナミックレンジが狭くなる。本来はバラツキが大きいと有意なパルス幅を評価できないが、波長400nmの最小時間分解能を評価すると500fs程度に悪化していると言える。光電面での電子の初期エネルギー

分布が大きくなるため、時間分解能が悪くなる。Fesca200におけるストリークモード時の最小時間分解能(FWHM)は、入射波長が400nmでは500fs、266nmでは600fsというのが浜松ホトニクス社の参考値データ[1]である。実際に私が263nmで計測した結果では、最小の時間分解能は700fsであった。

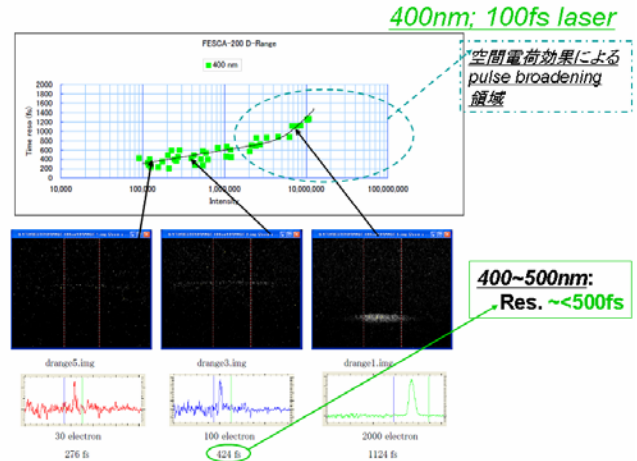


図4 C6138における波長400nmのダイナミックレンジ (データに関しては文献[1]参照)

4. まとめと考察

以上、フェムト秒ストリークカメラの特性として入射波長に対する時間分解能の依存性があることを見てきた。Fesca200におけるストリークモード時の最小時間分解能(FWHM)は、入射波長が800nmでは300fsであるが、400nmでは500fs、266nmでは600fsと時間分解能が悪化してしまう[1]。このことを念頭におくと、480nmのチェレンコフ光を用いてFesca200により、98fs (r. m. s.) 即ち231fs (FWHM)を計測することは、単に測定のパラツキの為せる業としか言いようがない。この計測系のバラツキは、量子ゆらぎやMCPの増倍ゆらぎ(入射光量を極端に落とした場合はCCDのノイズが支配的な場合もある)などの各種ゆらぎの中で、ショット毎にストリーク像が変動していることに起因する。要するに積算して統計性を上げないことには有意なパルス幅を議論できない。

しかし、今度はジッターにより積算したパルス幅が太ってしまう。ストリークカメラの解析ソフトにはジッター補正という複数枚取ったストリーク像に対して、それぞれの重心位置を基準に各イメージを重ねて積算画像とする機能がある。しかし、カウントされた個々の点像の輝度がMCPの増倍ゆらぎにより揺らいでいる状態なので、計測された個々のストリーク像の重心も統計的に揺らぐため、積算したパルス幅は太ってしまう。ここで一つの解決策として、私が行っているジッター補正可能な積算方法を紹介する。測定パルスを強度に極端な差をつけたダブルパルスにして計測する方法である。複屈折結晶を用

いてストリークの時間レンジ幅に入る程度に時間ディレイをつけて生成する。このダブルパルスのうち強度の強い方は時間軸上のストリーク像の重心を精度よく決定するための参照光として用いる。強度の弱い方は狭いダイナミックレンジに収まるので、統計性を上げて積算してパルス形状を計測することができる。

しかし、これでもX線自由電子レーザーで要求される100fs以下のパルス幅の評価はできない。RF Deflectorによる計測がSpring-8 XFEL計画では採用されており、時間分解能は数フェムト秒[4]になる予定である。しかし、このような大きな計測システムは小型加速器では導入不可能であろう。そのために現在、有機EO結晶によるEOサンプリング[5]を検討している。もし実現すれば30fs (FWHM)の時間分解能が可能になり、非破壊のフェムト秒バンチ長モニターが出来るかもしれない。

最後に、フェムト秒ストリークカメラであるが、この計測器は正しく使えば素晴らしい装置である。本報告の時間分解能の議論はこの装置を開発された土屋裕氏の博士論文[6]を精読し参考にさせて頂いたが、波長依存性も含めて厳密に議論されている。時間分解能の限界に迫る計測をするのに、計測機器の原理を理解せずにデータを出すことは、使用者側の責任の範疇であると言いたい。最近では素晴らしい高機能の解析ソフト付の計測機器が各種出ているようだが、その解析ソフトから吐き出される結果を鵜呑みにせず、生データを物理的な考察をもって自分自身で解析してみる作業は、どの時代においても科学者に必要とされるのではないだろうか。それが真実を追い求める者の姿であると私は考える。

参考文献

- [1] <http://jp.hamamatsu.com/resources/products/sys/pdf/jpn/c6138.pdf>
- [2] T. Watanabe et al., Proc. of FEL 2005 (2005), pp.98-101.
- [3] J. Yang et al., Proc. of PAC 2005 (2005) pp1546- 1548.
- [4] H. Ego and Y. Otake, Proc. of EPAC 2008 (2008), pp.1098-1100.
- [5] H. Tomizawa et al, Proc. of FEL 2007 (2007) pp.472-474
- [6] 土屋裕、「超高速ストリークカメラシステムの研究」、博士論文、昭和60年6月