

DEVELOPMENTS OF COMPONENTS FOR FEMTO-SECOND REAL-TIME BUNCH SHAPE MONITOR

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

^{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

^{C)} RIKEN

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5148

Abstract

For the stable SASE operation in XFEL/SPring-8, we have developed the optical components especially for three-dimensional femto-second bunch shape monitor based on Electro-Optic detection as non-destructive real-time single-shot measurements. This bunch shape monitor requires a supercontinuum laser pulse (> 400 nm bandwidth), the optical components for such a laser pulse, and an organic EO material. We report the details of developing status of these components for this bunch shape monitor.

フェムト秒リアルタイム電子バンチ形状モニタ用の要素技術開発

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 $\mu\text{mm-mrad}$)・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望まれる。そのために我々は現在、電気光学(EO: Electro-Optic)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(詳細は文献^[2-4]を参照)。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が可能である^[5]ことであるので、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。これまでにEO効果を用いたバンチ形状計測では120 fs (FWHM)程度の時間分解能が報告されており^[6]、我々は白色レーザー (波長帯域: 600 - 1100 nm) や有機EO結晶を用いることで時間分解能の更なる向上を行う。同時に、横方向の電荷分布計測のために、プローブレーザーをその波長帯域を保持したままでラジアル偏光化する^[7]。

この計測体系では、上述のように白色レーザーをラジアル偏光状態を保持して伝送する必要があるため、広帯域(600 - 1100 nm)に渡って使用可能な光学素子 (ミラー、波長板、ビームスプリッタなど) が不可欠となる。このため、これまでに広帯域で使用可能な波長板やビームスプリッタの新規開発を行ってきた。ここでは、EO効果を用いた3次元バンチ形状計測に必要な光学素子及び有機EO結晶の特性評価を行った結果を報告する。

2. 3次元バンチ形状計測の構成要素

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 (文献^[4]の図1を参照) の特長は、①高時間分解能化のために白色・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。3次元バンチ形状計測では、上記のような白色・ラジアル偏光・線形チャープ・矩形スペクトルのレーザーパルスに対応した光学系が必要とされる。以下に各光学素子の特性評価の結果を報告する。

2.2 EO結晶の透過率測定

EO効果を用いたバンチ形状計測において一般的に使用されているZnTeやGaPなどの無機EO結晶は、それぞれ6 THz、11 THz付近にフォノン吸収が存在する。このため、100 fs以下の極短電子バンチの場合、クーロン電場が結晶中を伝播する際に電場波形が大きく崩れることになる。100 fs (FWHM)のパルス幅を持つクーロン電場が結晶に入射した場合、結晶伝播中における電場波形の計算結果を図1に示す。1 mm厚のZnTe及びGaPを伝播した場合、クーロン電場の形状は崩れ、パルス幅は半値全幅でそれぞれ370 fsと210 fsにまで伸張する。30 fs (FWHM)の電子バンチを計測する場合には、0 - 30 THzの広帯域で吸収のないEO結晶が必要である。その候補として我々は、有機EO結晶であるDAST結晶の使用を検討している。日本が世界に先駆けて開発したDAST

結晶は20 THz以上の広帯域THz生成源としての報告例があり^[8]、極短バンチ形状計測への応用が期待される。そこで、可視領域ではフォトニック結晶ファイバレーザーである白色レーザー光源(SC450, Fianium)を、THz領域では遠赤外分光器を用いて、DAST結晶(0.1 mm厚)の可視・THz領域での透過率測定を行った。白色光源の波長範囲は450 - 2400 nmであるが、今回使用した分光器のCCDカメラ(PIXIS100, Princeton Instruments)の感度特性から、本計測での長波長側の上限は1000 nm程度となる。透過率測定の結果を図2に示す。600 nm以上の可視領域では透過率60%以上でフラットな透過特性を持っていることが分かる。THz領域では今回の計測では0 - 10 THzの低周波数領域では計測する結晶のサイズが小さいために有意な透過率測定を行うことが出来なかったが、15 - 25 THzの周波数領域では透過率が20%程度であることが分かった。今後はDAST結晶に関して0 - 10 THz領域での透過率測定も再度行うと共に、他のEO結晶についても同様の測定を行い、極短電子バンチの計測に使用可能な結晶の選定を行う予定である。

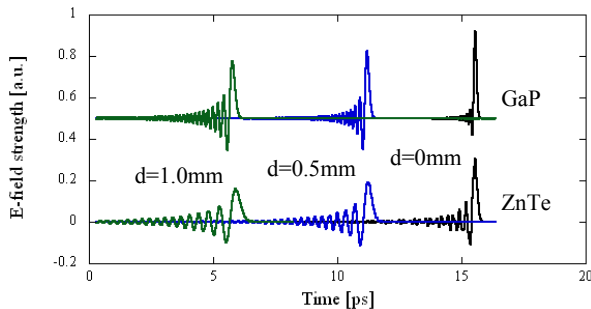


図1 EO結晶伝播中のクーロン電場波形。dは結晶中での伝搬距離を示す。

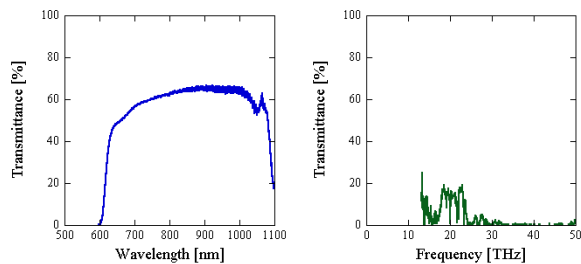


図2 0.1 mm厚DAST結晶の可視領域(左)とTHz領域(右)での透過率測定結果。

2.3 DAZZLERによる白色光の矩形スペクトル化

EO効果を用いたバンチ形状計測(Spectral decoding)での時間分解能は、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。従って、30 fs (FWHM)の極短電子バンチの計測のためには、400 nm以上のバンド幅を持つ白色レーザーが必要となる。更に、3次元バンチ形状計測では電子ビーム軸周囲に配置した複数のEO結晶で得られたEO信号間の強度比によって横方

向電荷分布の検出を行う。このため、3次元形状計測をリアルタイムで行うためには白色光が線形チャープかつ矩形スペクトルである必要がある。

そこで、600 - 1100 nmの広帯域で使用可能なAO変調器(DAZZLER, UWB-650-1100, FASTLITE)を用いて白色光の矩形スペクトル化を行った。結果を図3に示す。光源は、前節で用いたものと同じ白色レーザーを使用した。分光器はシングルショット計測が可能なファイバ分光器(HR4000, Ocean Optics)を使用した。半値全幅で100 nm程度であったスペクトルを、DAZZLERによって300 nm以上のバンド幅を持つ矩形スペクトルへと整形することが出来た。今後はFROGおよび分光ストリークカメラを用いて線形チャープの精密計測を行う。

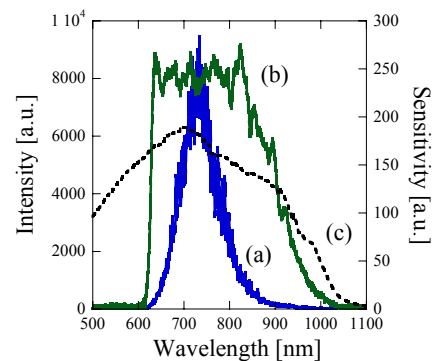


図3 DAZZLERによる矩形スペクトル化。(a)整形前スペクトル、(b)整形後スペクトル [×20]、(c)分光器の感度曲線。

2.4 ミラーの反射率測定

白色光を伝送するためのミラーとしては、350 - 1100 nmの波長域で使用可能な広帯域ミラー(BBDS-PM-1037-C, CVI)と金属ミラーを使用する。特に、真空チャンバ中で用いるミラーとしては、チャージアップの影響を避けるために非磁性SUS (SUS316L)基板上に金属コーティングした全金属ミラーを用いる。全金属ミラーの面粗さ・面精度はZygoで計測を行い、ミラー中心(φ20 mm)での面粗さはアルミミラーの場合 $R_a = 9.88$ nm、金ミラーの場合 $R_a = 7.63$ nm、面精度はアルミミラーの場合73.82 nm (PV)、金ミラーの場合55.22 nm (PV)と計測された。

前節までに使用したものと同様の白色レーザー光源を用いて、広帯域ミラーおよび金属ミラーの反射

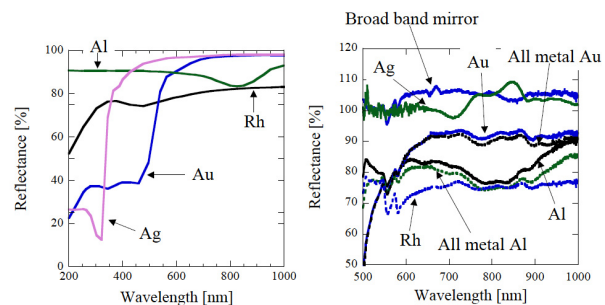


図4 金属ミラー等の反射率。(左)計算値、(右)測定値。

率を測定した。測定結果及び計算値を図4に示す。本章の測定では光を積分球(FOIS-1, Ocean Optics)に入射し、ファイバを用いて分光器へと導いてスペクトルを計測している。しかし反射率測定では、透過率測定とは異なり、計測対象の有無によって光軸が変化し、それに伴って積分球の位置も変える必要があるため、反射率の絶対値に多少誤差が生じることになる。したがって、広帯域ミラー及び銀ミラーについては100%を超える反射率となってしまうが、波長依存性は概ね計算値と一致している。全金属ミラーについても、通常のガラス基板の金属蒸着ミラーの反射率と同等の波長依存性を持つことを確認した。

2.5 光学素子の透過率測定

EO計測では通常、波長板や偏光子によってレーザー偏光状態の調整を行う。3次元バンチ形状計測では、フェムト秒の時間分解能達成のために白色レーザーを用いる。このため、広帯域(600 - 1100 nm)で使用可能な波長板及び偏光子として、フレネルロム型波長板及び広帯域偏光ビームスプリッタ(分離角106度、消光比1000:1)を新規開発した。フレネルロム素子の断面図を図5に示す。これは全反射時にP偏光とS偏光との間に波長に関係なく $\lambda/8$ の位相差が生じることを利用した光学素子である。従って $\lambda/2$ 波長板の場合4回、 $\lambda/4$ 波長板の場合2回全反射することで、所定の位相差を与える。また、 $\lambda/2$ 波長板では素子間の接合にオプティカルコンタクトを用いているため、高強度レーザーパルスでも使用可能である。バンチ形状計測で使用するこれら

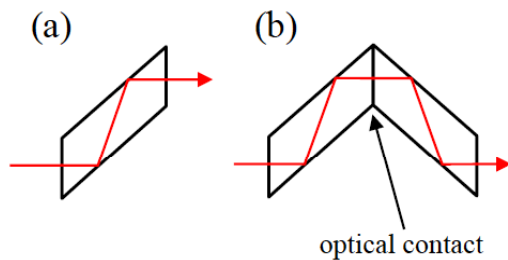


図5 フレネルロム素子。(a) $\lambda/4$ 波長板、(b) $\lambda/2$ 波長板。

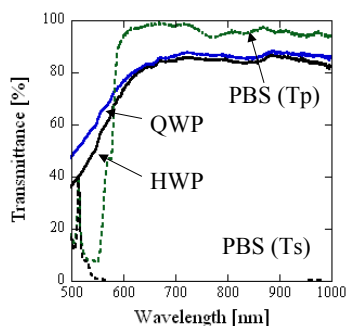


図6 光学素子の透過率測定結果。HWP: フレネルロム型 $\lambda/2$ 波長板、QWP: フレネルロム型 $\lambda/4$ 波長板、PBS: 偏光ビームスプリッタ (Tp: P偏光透過率、Ts: S偏光透過率)

光学素子の透過特性を前節までと同様に計測した。結果を図6に示す。600 nm以上の波長帯域でフラットな透過特性を持っていることを確認することが出来た。

2.6 円錐屈折によるフレネルロム素子の特性評価

フレネルロム素子の回転によって偏光状態が設計通りに変化しているか確認するために、円錐屈折を利用してフレネルロム波長板出射後の偏光状態を計測した。円錐屈折とは、2軸性の複屈折結晶の光軸(2つの光軸の内、任意の軸)に沿って円偏光(または非偏光)を入射した際に、光が結晶内で円錐状に広がるように屈折し、結晶出射後に円環状のプロファイルが生成される現象である。これは1軸性の複屈折結晶への入射光が常光線と異常光線とに分離するのと同様に、光の偏光方向によって結晶中での伝搬方向が変化するために起こる。

本節の計測では、2軸性結晶として $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ を使用した。 $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ は350 - 5500 nmの広帯域で透明であるため、白色レーザーパルスの偏光状態の計測方法としての利用を考案した。この場合、 $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ の光軸に沿ってレーザーを集光させつつ結晶に入射すると、入射光が非偏光もしくは円偏光の場合は円環状の、直線偏光の場合は三日月状のプロファイルが集光点において生成される^[9]ため、偏光状態の判別が可能である。

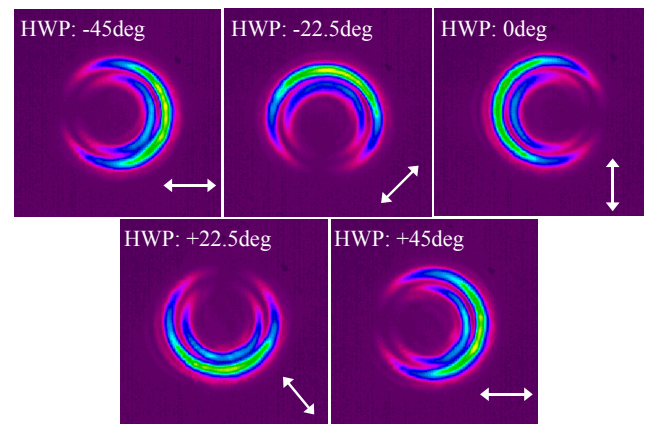


図7 円錐屈折によるフレネルロム型 $\lambda/2$ 波長板(HWP)の特性評価。図中の角度はHWPの回転角を、矢印はHWPへの入射偏光状態を示す。

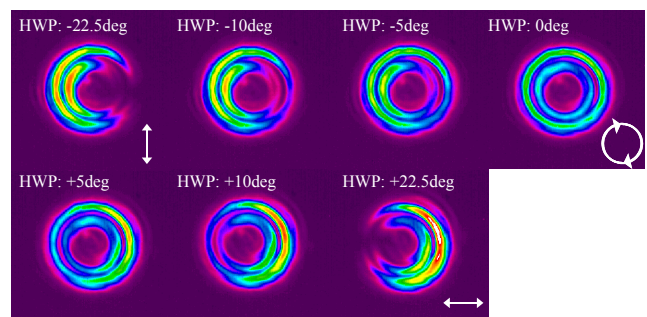


図8 円錐屈折によるフレネルロム型 $\lambda/4$ 波長板(QWP)の特性評価。図中の角度はHWPの回転角を、矢印はQWPへの入射偏光状態を示す。

図7に、 $\lambda/2$ 波長板の特性評価の結果を示す。レーザー光源には、前節までに用いた白色光源を用いた。図7は使用した白色光を、波長範囲を限定せずにトータルで計測した結果である。今回用いたCCDカメラ (Model4800, Cohu) は400 – 1000 nmの波長帯域で使用可能である (感度のピークは720 nm)。バンドパスフィルタによって600 – 800 nmの波長範囲を50 nmのバンド幅毎に限定した計測も行っており、図7と同様の結果が得られている。波長板の回転角が0度のときに垂直偏光のレーザーが2軸性結晶に入射される。波長板を-45度から+45度へと回転させると、結晶への入射偏光軸は水平偏光から垂直偏光へと半時計回りに回転していき、+45度るとき再び水平偏光となる。このとき、三日月状の出射プロファイルも偏光軸の回転と同様に半時計回りに回転し、+45度るときに丁度一回転する様子が確認できる。同様に、 $\lambda/4$ 波長板の特性評価の結果を図8に示す。図5に示したように、 $\lambda/4$ 波長板は入射光と出射光の光軸がずれるため、 $\lambda/4$ 波長板を回転させて偏光状態を調整することは実際の実験では困難である。ここでは $\lambda/4$ 波長板の前に $\lambda/2$ 波長板を置き、 $\lambda/4$ 波長板への入射偏光軸を調整することで円偏光レーザーを生成した。円偏光レーザー ($\lambda/2$ 波長板の回転角が0度の場合) を結晶に入射した場合、図8の左図のように円環状プロファイルが確認された。 $\lambda/2$ 波長板を回転させると入射レーザーは楕円偏光となり、結晶からの出射プロファイルは三日月状へと近づく。 $\lambda/2$ 波長板の角度を ± 22.5 度にすると結晶への入射偏光状態は直線偏光となり、図7と同様の三日月状プロファイルが確認できる。以上より、フレネルロム素子によって設計通りに偏光状態が変化していることを、円錐屈折を利用することで確認することが出来た。

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。計測体系に必要なEO結晶や光学素子の透過率測定、ミラーの反射率測定、DAZZLERによる白色光の矩形スペクトル化、円錐屈折を利用したフレネルロム素子の広帯域での特性評価を行い、それぞれ600 – 1000 nmの波長帯域において設計性能を確保していることを確認した。

今後はEO結晶の透過率測定を進めると共に、レーザー励起THz源を用いてEO検出を行い、EO結晶の電気光学効果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。また、FROGや分光ストリークカメラによる計測を行うことで、DAZZLERによる白色光の線形チャープ・矩形化を行う。最終的に、これら要素技術を組み合わせることで3次元バンチ形状計測実験を行う予定である。

参考文献

- [1] T. Shintake, Proc. of EPAC 08, Genova, Italy (2008) 136
- [2] H. Tomizawa et al., Proc. of FEL 07, Novosibirsk, Russia (2007) 472
- [3] A. Maekawa et al., Phys. Rev. ST-AB, submitted
- [4] A. Maekawa et al., Proc. of 6th PASJ, Tokai (2009) TOBDB03
- [5] I. Wilke et al., Phys. Rev. Lett. 88 (2002) 124801
- [6] G. Berden, et al., Phys. Rev. Lett., 99 (2007) 164801
- [7] A. Maekawa et al., Proc. of FEL08, Gyeongju, Korea (2008) 435
- [8] Y. Takahashi et al., J. Photochem. Photobiol. A: Chem. 183 (2006) 247
- [9] T. K. Kalkandjiev et al., SPIE 6994 (2008) 69940B