

FEASIBILITY STUDY OF SINGLE-SHOT REAL-TIME NON-DISTRACTIVE THREE-DIMENSIONAL BUNCH CHARGE DISTRIBUTION MONITOR

H. Tomizawa ^{#A)}, S. Matsubara ^{A)}, H. Dewa ^{A)}, A. Mizuno ^{A)}, T. Taniuchi ^{A)}, K. Yanagida ^{A)}, H. Hanaki ^{A)},
T. Ishikawa ^{B)}, N. Kumagai ^{B)}, A. Maekawa ^{C)}, K. Lee ^{C)}, and M. Uesaka ^{C)},
^{A)} JASRI/SPring-8, 1-1-1, Kouto, Sayo, Hyogo, 679-5198, Japan
^{B)} RIKEN/SPring-8, 1-1-1, Kouto, Sayo, Hyogo, 679-5148, Japan
^{C)} The University of Tokyo, Ibaraki-ken, Japan

Abstract

In linac-based high brightness light sources, it is necessary for high precision experiments to characterize the light emission bunch by bunch. It is essential for precise characterizations of X-ray FEL's beam to monitor ever-changing charge distribution of electron bunch by single-shot measurement with high resolutions. Therefore, a single-shot and non-destructive 3D bunch charge distribution (BCD) monitor was developed to characterize longitudinal and transverse BCDs simultaneously. It is based on Electro-Optical (EO) multiple sampling with a manner of spectral decoding. For the transverse detection, eight EO-crystals surround the beam axis azimuthally, and a linear-chirped probe laser pulse with a hollow shape and spirally temporal shift, passes through the EO-crystals. The polarization axis of the probe laser is radially distributed as well as the Coulomb field of the electron bunches. Since the signal intensity encoded at each crystal depends on the strength of the Coulomb field at each point, the longitudinal BCDs are encoded as independent intensity modulations at eight different wavelength regions. The encoded information of 3D BCDs is decoded by a multichannel spectrometer with an eight-branched fiber-optic input. We report the principle and the first experimental results of the novel 3D-BCD monitor with ZnTe EO-crystals. As future development directions, we are preparing a conerefringent probe laser with Kerr-EO amorphous for precise detections of transverse BCDs and a broadband laser probe pulse (> 400 nm @ 800 nm) with an organic DAST EO-crystal to realize a temporal resolution of < 30 fs.

シングルショット・リアルタイム・非破壊型 3次元バンチ形状モニターの実証試験結果

1. はじめに

SPring-8 サイトでは、X線自由電子レーザー (XFEL) の建設が 2010 年度に完了する。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に必須とされるため、実績のある LOLA 空洞^[1] (RF ディフレクター) を用いたバンチ内電荷分布構造の計測を準備している。しかし、この計測システムは設置予定の 1.3 GeV のエネルギー領域においても、5 m の長さを空洞自身に要し、さらにその数 m 下流にスクリーンを設置して計測しなければならない。コンパクト性を重んじている日本の XFEL 計画においては、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実現可能な技術を並行して開発しておく必要がある。同時に、非破壊でシングルショット計測が可能なモニターが望ましいことは言うまでもない。

以前からテラヘルツ分野では、ZnTe 結晶などのポッケルス効果 (1 次の電気光学 (EO) 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) とする。1 ps 程度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。このような背景から、電子ビームバンチがトランスバース方向に放射状に放つ電界により EO 結晶を同時に通過するプローブ光 (レーザーパルス) の偏光にそのリターデーションとして電子ビームバンチ情報を書き込み (エンコード)、それを強度変調に変換するなどして分光器等でバンチ情報を読み出す (デコード) 方法として応用できる。近年、欧米の加速器研究施設では非破壊でシングルショット計測可能な方法として盛んに研究開発されている。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、従来の EOS では無機結晶の ZnTe が主に使用されており、現実的な厚さ $300 \mu\text{m}$ の場合で時間分解能が 110 fs (FWHM)^[2,3] と、結晶自身の時間応答性により制限されている (Temporal Decoding 法による計測結果)。ところで簡便な EOS の計測方法には、プローブ光の線形チャープしたスペクトル上に電子ビームのバンチ時間構造を書き込む方法があり、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、自己相関法などを利用したデコーディング方法は Temporal Decoding 法と呼ばれている。

Spectral Decoding 法は高繰返しでもシングルショット計測可能、微弱光でも簡便に分光器でデコーディングできる優れた方法にもかかわらず、その時間分解能の制限から超高速計測には Temporal Decoding 法が広く使われている。一方、時間分解能よりもリアルタイム性が重視される電子ビームのジッター・トレンド計測においては、Spectral Decoding 法が使われている^[3]。ここで Spectral Decoding 法で時間分解能が制限されるのは、EO 信号がエンコードされる時間領域でのスペクトル帯域が、一般的なフェムト秒 Ti:Sa レーザをプローブ光に用いると制限され、200~300 fs 以下の信号パルスになると鈍ってしまうためである。この時間分解能は一般に、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 法の簡便さとリアルタイム計測の可能性に着目し、プローブ光の開発による時間分解能の向上と、同時に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できないかを検討した。SPring-8 XFEL においてバンチ圧縮後の 30 fs (FWHM) の電子ビームバンチを計測するには、 t_0 が 2.5 fs (スペクトル幅: 400 nm; 中心波長: 800 nm) を原理限界として、タイミング・ジッターが許容できる t_c を 400 fs とすると、時間分解能は約 30 fs に達することが可能である。この 3次元 EO サンプリングを実現するために、フォトニック結晶ファイバーを用いた帯域 400 nm に及ぶスーパーコンティニューム光源を、各種レーザ制御技術により、線形チャープでスペクトル強度分布を矩形化するとともに、円環ラジアル偏光に変換する光学システムを発明した^[4]。

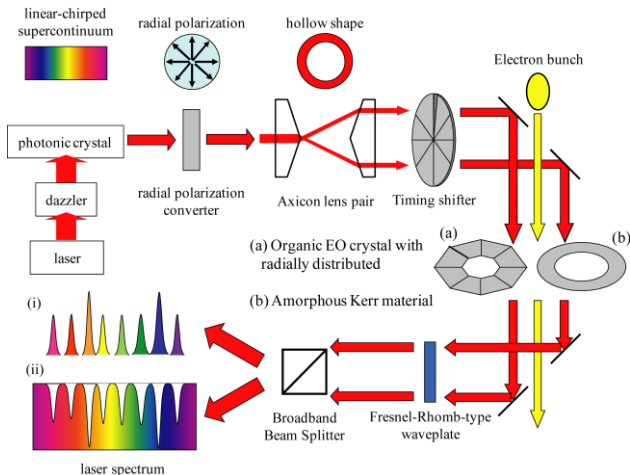


図 1 : 3次元バンチ内電荷分布モニター素子の構成

EO 素子において、電子ビーム通過時にプローブ光の偏光に起きたリターデーションを偏光スプリッターで互いに直交する偏光成分に分離することで、スペクトル強度変調として分光器でデコーディングが可能になる。このモニターでは、8 個の信号を単一のファイバー分光器 (HR4000; Ocean Optics) に 8 分岐入力ファイバーを通して同時計測するため、図中の (ii) のスペクトルでは S/N が悪化する。そのため、(i) のスペクトルを使用する。

このプローブ光源を用いた図 1 に示すモニター素子を 3 つ組み合わせると 3次元バンチ形状モニター^[5]を構成する。本報告では、主に RF 電子銃からの電子ビームバンチを用いた 3次元 EO サンプリングの実証試験結果^[6]について述べる。また、フェムト秒時間分解でバンチスライス (ここでは、スライスとは EOS の時間分解能で定義されるもの) 内のトランスバース方向の電荷分布も含めたシングルショット計測のための光学素子開発の現状も合わせて報告する。

2. SPring-8 フォトカソード試験施設での 3D-EOS モニター実証試験システム

2006 年当時の SPring-8 サイト内で、レーザ光源を安定に供給できる加速器施設がフォトカソード試験施設のみであったため、本施設で 3次元 EO サンプリングの原理実証試験をフォトカソード照射用の光源レーザから分岐したプローブ光源で実施することにした。2009 年までに開発導入された自動アライメント・システム (Advanced Tactical Aligner (ATA))^[7]により、同時多目的最適化が可能になり、図 2 に示すような EO サンプリング用のプローブ光源を含めた各種レーザ光源の配給基盤が整備された。

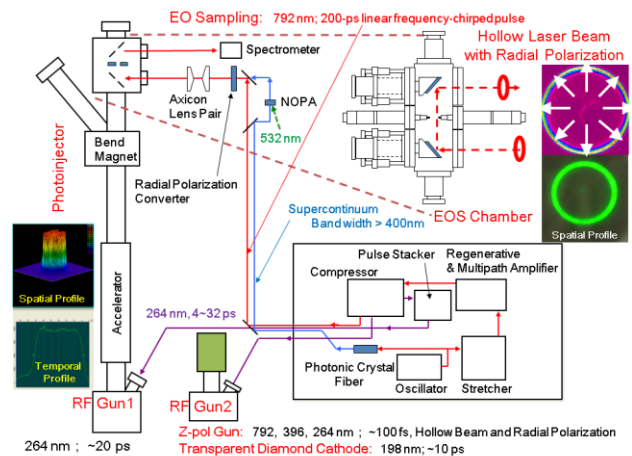


図 2 : フォトカソード試験施設のレーザ配給構成

Ti:Sa レーザの基本波 (792 nm)、2 倍波 (SHG: 396 nm)、3 倍波 (THG: 264 nm)、白色レーザを単一のレーザ光源から供給する光源基盤として整備した (ただし、矩形スペクトルの白色増幅レーザ光源部のみ開発中)。

図 2 で本実証実験に関係するものは、フォトカソード光源の 3次元パルス整形した THG とコンプレッサーからの 0 次光 (線形チャープパルス: 200 ps (FWHM)) のみである。本試験加速器の電子ビームバンチ長は 10 ps (FWHM) 程度であるので、本試験には十分と判断し、既存の基盤光源をプローブ光として用いた。本プローブ光が $t_0 = 40$ fs、 $t_c = 200$ ps であるから、時間分解能は約 3 ps となる。尚、信号パルスのピーク位置分解能は、分光器の分解能とチャープ条件 (図 4 (d)) から 1.2 ps である。

図 3 の左側から Ti:Sa レーザの基本波 (792 nm; 200 ps) を直線偏光にして入射する。波長板 ($\lambda/2$

板)は、各 E0 素子通過後に控える検光子 (ポラライザー) とセットで調整し、電子ビームがない時に分光器で検出される光量が最小になるように設定する (クロスニコル配置)。図 1 の (b) のポッケルス結晶を使用する 3 次元 EOS の場合、複数の E0 素子が電子ビームのトランスバース方向にラジアル状に配置されるため、実際のプローブ光はラジアル偏光板とアキシコンレンズ対で円環状のラジアル偏光ビームにして入射される。図 4 に示すように、各 E0 結晶において信号がエンコーディングされる波長域が異なるように、円環ビームはその円周に亘ってラジアル状にタイミングをシフトさせるための制御板 (実効的な光路長を調整) を必要とする。

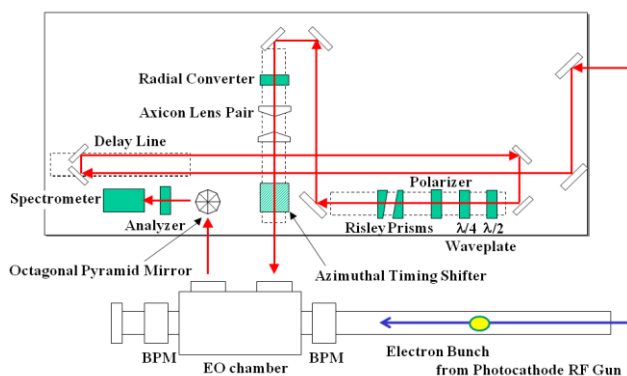


図 3: 3 次元 EOS の実験セットアップ

図中の Risley Prism 対は、自動アライメント・システム (ATA)^[7]において、分光器での光量を検光子なしの状態 で最大化するためのアクチュエータとして機能する。

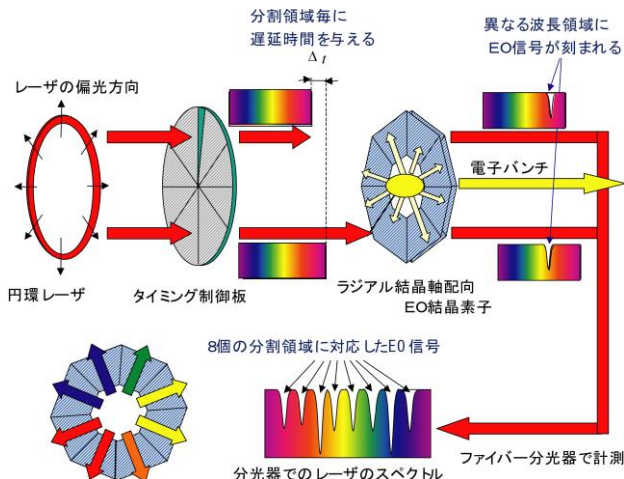


図 4: トランスバース方向の電荷分布シングルショット計測のためのタイミング・シフト

円環・ラジアル偏光レーザーによって、複数の E0 結晶を同時にプローブする。タイミング制御板 (各領域ごとに光学長を変化) を用いることで、各 E0 信号を異なる波長領域に書き込む。各波長域にエンコードされた信号の強度比から、電子ビームバンチがトランスバース方向に放射する電界強度分布を分かる。この電界強度分布を多点同時計測 (図では 8 点) することで、電子ビームのトランスバース方向の電荷分布を知ることができる。さらに、レーザーのスペクトルを矩形化することで、リアルタイム (計算処理による補正不要) 計測が可能になる。

この原理実証試験では、10 ps の電子ビームバンチを計測するため、フェムト秒バンチ計測の時とは異なり、最低 10 ps の時間ディレイを各結晶に対応したエンコーディング領域間に付ける必要がある。そのため、本試験用のタイミング制御板 (12 cm のロッド形状) を図 5 に示すように 8 種類の光学ガラスを組み合わせて制作した。光学ガラスはプローブ光の波長帯での分散特性がフラットなもので、屈折率の差が 0.02 以上になる (各領域間の時間差が 10 ps 以上になる) ように選択した。ストリークカメラでの計測で、実際に設計通りのタイミング・シフトが円環ビームの円周に沿って各領域間で生じていることを確認した。円周方向に隣り合うガラス材料の屈折率差は可能な限り小さく抑えるとともに、対向するガラス材料は屈折率の差が 0.04 以上 (対向する領域間の時間差が 20 ps 以上) になるように考慮して配置した。また、ガラス接合は光学接着剤を用い、各ガラス間の中間的な屈折率のものを選択して接着した。これは円環ビームがガラス接合面からの回折にすることより崩れていくことを最小限に留め、1~2 m 程度の伝搬距離であるならば計測に支障がないようにするためである。図 3 に示すように、E0 チャンバーを出た直後にある八角錐状の金コート・ピラミッドミラーに垂直に射ち下すことにより、円環ビームの 8 領域を水平方向に放射状に分離する。それぞれ、各検光子を通過直後に 8 分岐ファイバーで一つにまとめてファイバー分光器に送る構成にした。この構成により、伝搬距離を最小限に抑えけるとともに、計測の S/N を悪化させる回折光をはじめとした迷光を遮光することに成功した。

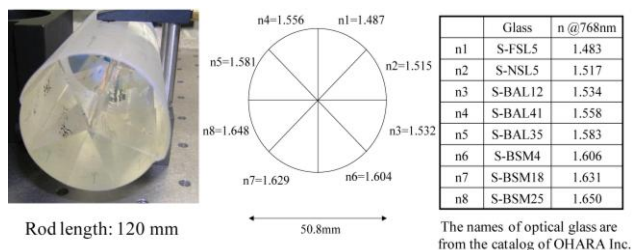


図 5: タイミング制御板 (タイミング・シフター)

異なるガラス材料によって光学長を調整することで、各領域間に 10 ps 以上の時間遅延を与える設計にした。

このプローブ光源装置の構成で、対向する E0 結晶のペアをそれぞれ ZnTe, GaP, DAST 結晶^[8]にし、E0 チェンバー内に設置して各種 E0 結晶の試験も合わせて行えるようにした。加速器での EOS としては、ZnTe と GaP 結晶については実績がある。後述するが、DAST 結晶は有機非線形結晶であり、テラヘルツ分野では注目されているが、まだ加速器の EOS としては実績がない。今回使用した DAST 結晶は (独) 理化学研究所 テラヘルツ光源研究チーム^[9]で作って頂いたものを南出泰亜先生のご厚意によりご提供頂いたものである。予備試験を実施し、DAST 結晶が超高真空に耐えられるか、放射線によるカラーセンターなどのダメージ損傷が起きないかを試験し、どちらの観点でも問題がないことを確認した。

尚、EO 結晶を除く図 3 の光学系全体で偏光の消光比は 3 桁を確保するようにした（結晶の品質により消光比に与える影響が異なるため、ここでは除外して記述するが、実際の EOS 計測では EO 結晶を含めた消光比が重要になる）。

3. 3次元バンチ形状モニター（マルチEOS）の原理実証試験の結果と考察

3.1 単一のEO結晶での実験結果

最初に、プローブ光に円環ラジアル偏光・線形チャープ・レーザパルスを用い、単一のEO結晶のみによる試験をおこなった。電子ビーム試験は以下の条件（ZnTe 結晶の場合のみを示す）で実施した。

- フォトカソード入射用レーザパルス幅：20 ps（矩形）
- ビームエネルギー：24 MeV
- ビームチャージ量：0.85 ~ 1.4 nC（ビーム直径：2~4 mm）
- EOプローブレザ：パルス幅 20 nm（FWHM）
- パルス幅 200 ps（FWHM）
- EO結晶：10 mm x 11 mm x 1 mm(t)のZnTe
- ビーム軸-結晶間の距離：4 mm
- （ビーム軸から4~5 mmの場所でプローブ（円環幅：1 mm））

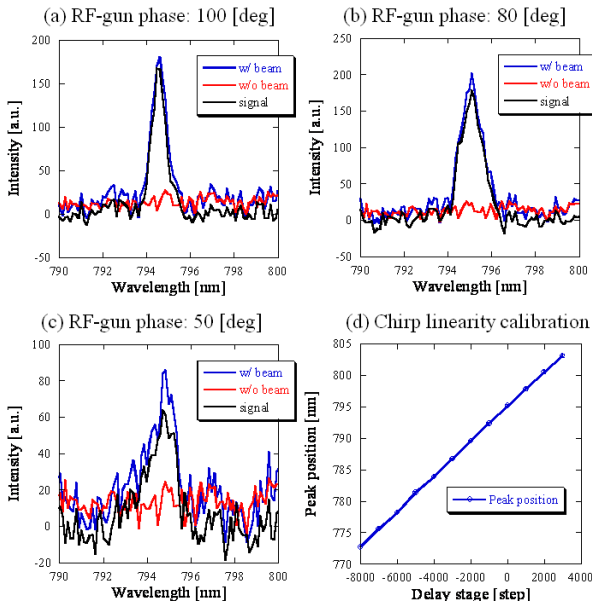


図 6：円環プローブレザによる単一EO結晶による電子ビームバンチ形状計測結果

バンチ長（FWHM）は、図（d）から 9.58 ps/nm で校正。加速管では RF のトップに乗せて計測。（a）6.13 ps（0.85 nC）、（b）10.8 ps（1.22 nC）（c）11.5 ps（0.95 nC）

試験としてチャンバー内に設置した 3 種類の EO 結晶（ZnTe, GaP, DAST 結晶）のうち、ZnTe 結晶のみで EO 信号の確認ができた。他の 2 つの結晶で EO 信号の確認ができなかった理由は不明であるが、ZnTe 以外の結晶では、偏光の消光比の悪化が見られた。今回の電子ビームではピーク電界強度が低いので数度のリターデーションを計測する必要性があり、結晶での消光比の悪化（光学的な均一性など）が原因で信号確認ができなかった可能性が考えられ

る。この実験に先立つ、通常のガウシアンビーム・プローブ光による EOS 試験でも ZnTe のみでしか信号確認ができていない。

ZnTe で EOS 計測した電子ビームバンチを図 6 に示す。プローブ・レーザパルスのチャープが正であるため、波長が長い側が時間的にバンチの先頭側になる。ここで、電子バンチの先頭がカソードから出る瞬間の時刻 t を 0 とし、RF のカソード表面電界 E を $E = E_0 \cos(\omega t - \theta)$ と定義したときの θ を初期 RF 位相とする。フォトカソード RF 電子銃の初期 RF 位相 θ を 100° から 50° まで変化させた時に、バンチ形状が変化する様子（テールを引いていく様子）が計測できている（シミュレーションとも一致）。プローブ光が線形チャープしていることから、波長は時間に比例するはずであるが、実際のプローブ光での検証が必要である。図 3 の光ディレイ路をステップング・モーターで移動させて測定した校正曲線を図 6 の（d）に示す。1 nm が 9.58 ps に相当する比例関係（線形チャープ）になっていることを確認した。

3.2 対向ペアのEO結晶（2個のZnTe）での実験結果

対向する 2 つの ZnTe 結晶に対応する、円環プローブ光のディレイさせる光学ガラスに n_2 と n_8 （図 5 参照）を使用した場合の計測結果を図 7 に示す。実験に用いたビームチャージ量は 1.3 nC であった。また、信号パルス（i）と（ii）のピーク間の時間差は約 110 ps（11 nm）であった。

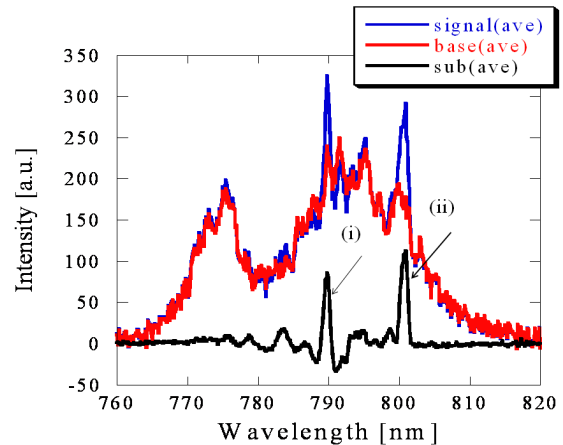


図 7：円環プローブレザによる対向するEO結晶ペアによる電子ビームバンチ形状計測結果

電子ビーム（1.3 nC）のバンチ長（FWHM）は（i）10.7 ps、（ii）11.8 ps（校正曲線は図 6 のものを使用）。

3.3 同時計測 2 信号の変動解析と考察

図 7 の信号パルス（i）と（ii）それぞれのピーク強度の短期変動（rms）は 12% と 13% であった。この時の信号パルスピーク強度の比（ii）/（i）の変動は 13%、和（i）+（ii）の変動が 10% であった。比（ii）/（i）はチャージ量の変動を取り除いた他の変動要因が 13% あることを示している。その他のうちの 1 つは和（i）+（ii）が示すレーザの強度分布の変動と考えられる。レーザ強度分布の変動は、円環ビームの強度ムラ、およびスペクトル強度分布の変化が光

源変動要因として考えられ、ファイバー分光器へのカップリング時の振動による検出強度の変動が測定器側の要因として挙げられる。これらをまとめて、レーザ強度変動と呼び、和(i)+(ii)の変動そのものであるとシンプルに考えて10%だとする。他に残る唯一の変動要因は、プローブレザと電子ビームの相対的位置変動（ただし、2つのE0結晶を結んだ線上に射影した相対的位置変動である）と考えられるので、この変動は8%と計算される。もし、この要因を電子ビームの位置変動であるとし、光源レーザのフォトカソード上の位置変動のみに依ると仮定すると、E0結晶位置で $80\mu\text{m}$ (rms)となる。カソード位置でのレーザのポインティングは $30\mu\text{m}$ (rms)以下であることを考え合わせると、プローブ光の変動要因は無視できないと推察される。

4. 実証結果のまとめと今後の計画

4.1 実験結果のまとめ

本実証試験により複数のE0結晶を配置して、単一のレーザ光で同時にプローブするEOSが可能であることを世界で初めて提唱^[5]し、且つ実証した。しかし、実用に耐える3次元EOSで電子ビームバンチ内の3次元的な電荷分布を高分解能で実現するには以下に述べる項目について改善・検討の必要がある。

- 分光器の暗電流ノイズが ± 20 counts (E0信号強度の20%)あるため、冷却型分光器を使用して暗電流を抑制する必要がある。暗電流を一桁減らせば、S/Nは0.2%になる。このとき、XFELでは信号強度が一桁強いので結晶をビーム軸から1cm以内に置けば、ビーム位置の空間分解能は $20\mu\text{m}$ 程度の精度で計測可能。
- 円環プローブレザの強度ムラ、スペクトル強度分布変化など、現状ではまだリアルタイム性に問題あり。プローブ光はスペシャル・フィルターなどにより高品質化が必要。
- ラジアル偏光の純度（消光比に関係）がまだ足りない。既に全体の消光比が5桁の光学系をこの対策として開発。E0結晶の品質（偏光特性を含めた光学的均一性）が課題。
- 時間分解能で30 fs (FWHM)を切るには、プローブレザと電子ビームのタイミング・ジッターが60 fs (rms)以下（8信号同時計測では20 fs以下）を要求。ただし、対応できる高速応答のE0結晶（材料開発）が必要。
- トランスバースの電荷分布形状計測は現状の8個のポッケルスE0結晶では、簡単なビームの対称性を議論する程度。外形を把握するには連続点で計測が必須。そのためにはカー効果（2次の電気光学（EO）効果）を利用する必要がある（図1の(a)）。カー効果は電界の自乗に比例するため、アモルファスを用いることで最低次のEO効果として利用可能。XFELでは信号強度が一桁以上強いので、カー効果によるEO信号は十分に観測されると予想する。

以上で述べた項目で、時間およびトランスバース方向の分解能の向上に関する開発計画を述べる。

4.2 時間分解能をフェムト秒に上げるための開発

10 fs オーダーの応答性のある素子の材料として、有機材料がある。有機分子には π 電子が存在するために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(DAST)では30 fs以下の応答性が確認されている^[8]。ZnTeやGaPと比較して、非線形係数が高く、広帯域(1-30 THz)で使用可能であるため、フェムト秒の高時間分解能化が可能になると期待される。さらに高速応答可能な、カー効果のアモルファスなどの材料探索が必要である。他のアプローチとして、実績のあるE0結晶を薄くする方法がある。厚さ $50\mu\text{m}$ のGaPであれば、80 fs (FWHM)の時間分解能が期待できる。

有機材料では特に、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る可能性がある。ビーム実験で用いたDASTに、可視光領域での変化はなかった。しかし、テラヘルツ領域での光学特性の変化も合わせて考慮しなければならない。

4.3 トランスバース方向の分解能向上への開発

フェムト秒時間分解能に対応したトランスバース方向の電荷分布形状計測には、円錐屈折現象^[10]を用いたプローブ光を用いることを計画している。円錐屈折とは二軸性の複屈折結晶を用いて、そのC軸に垂直方向に通常のガウシアンビームを入射すると、円錐状に立体的に屈折してコリメートされた円環ビームを生成できる。偏光方向を回転しながら、スパイラル状に時間シフトして円弧を描く。ブロードバンド・レーザに $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ を用いて円錐屈折ビームの発生実験を行い、その特異的な偏光特性を調べている^[11]。疑似シュテルン・ゲルラッハ装置^[12]を構成してエンコーディングし、干渉計を用いたホログラフィックなスペクトログラフ^[13]によりデコーディングする方法を検討している。

参考文献

- [1] H. Ego, et al., *Proc. of EPAC 08*, Genova, Italy, 2008, 1098.
- [2] G. Berden et al., *Phys. Rev. Lett.* 99, 2007, 164801.
- [3] B. Steffen, FLS workshop, Hamburg, 18.05.2006.
- [4] H. Tomizawa, Japan Patent Application No: 2007-133046.
- [5] H. Tomizawa, et al., *Proc. of FEL 2007*, Novosibirsk, Russia, 2007, 472.
- [6] H. Tomizawa, et al., *Proc. of IPAC 10*, Kyoto, Japan 2010, 963.
- [7] H. Tomizawa, *Synchrotron Radiation in Natural Science Vol. 9, No. 1-2* (2010) 24.
- [8] Hattori T, et al., *Chem. Phys. Lett.*, 113, 1987, 230.
- [9] http://www.riken.go.jp/r-world/info/release/news/2009/09/09_02.html
- [10] M.V. Berry, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 6, 2004, 289.
- [11] S. Matsuura, et al., *Proc. of FEL 2009*, Liverpool, UK, 2009, 269.
- [12] ファインマン物理学 V. 「量子力学」, R. ファインマン著, 砂川重信訳, 岩波書店, p97-115
- [13] H. Tomizawa, et al., *Applied Surface Science* 235/1-2, (2003) 214.