

LONGITUDINAL/TRANSVERSE MODULATION OF ELECTRON BEAM

K. Kan, J. Yang, H. Kobayashi, T. Kondoh, K. Norizawa, A. Ogata, Y. Yoshida

The Institute of Scientific and Industrial Research (ISIR), Osaka University, 8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047, Japan

Abstract

We report about longitudinal/transverse modulation of electron beam for equivalent velocity spectroscopy (EVS) in pulse radiolysis. In the modulation, the distribution of electron is tilted along both the transverse and longitudinal directions. The longitudinal/transverse modulation using a photocathode RF gun linac was studied using simulation.

電子ビームの縦・横方向分布変調の研究

1. はじめに

阪大産研では、レーザーフォトカソード RF 電子銃、S-バンド加速管、磁気パルス圧縮器を導入し、数 100 フェムト秒の時間分解能をもつフェムト秒パルスラジオリシスの開発に成功した。パルスラジオリシスは、量子ビームにより誘起される中間活性種の時間挙動を時間分解で追跡することができ、量子ビーム誘起による初期過程を観測するための非常に強力な方法である。ストロボスコピック法を用いたパルスラジオリシスの時間分解能は、電子線のパルス幅、分析光のパルス幅、両者の時間ジッター、サンプルセルにおける時間分解能に依存する。電子線のパルス幅については、フォトカソード RF 電子銃と磁気パルス圧縮器を用いて最短 98 フェムト秒の電子線パルスの発生に成功した[1]。その結果、フェムト秒電子線パルス幅、フェムト秒分析光(レーザー)パルス幅、両者の時間ジッターによる時間分解能の合計は、サンプルセル長を変化させた測定により、210 フェムト秒と得られ[2]、パルスラジオリシスの時間分解能は、フェムト秒に達した。

そこで、本研究では、パルスラジオリシスの時間分解能を向上するために、サンプルセルにおける時間分解能劣化を低減するための研究を行った。サンプルセルにおける時間分解能は、媒質中における電子ビームと分析光の速度差に由来し、本来はセル長に依存している。セル長を短くすることで、時間分解能劣化を低減することができるが、パルスラジオリシスの信号強度も弱くなり、測定が困難になるこ

とが問題となっている。しかし、そのような問題を解決するために開発された、図 1 に示すような、等加速度分光法 (equivalent velocity spectroscopy, EVS)[3] と呼ばれる手法では、時間分解能と信号強度の問題を同時に解決することができる。等加速度分光法では、サンプルセルに斜めから分析光を入射し、軸(進行)方向と径方向に変調されて傾きをもった電子ビームを用いる。しかし、サンプルセルにおける時間分解能劣化を 0 にするためには、正確な傾きの角度をもつ電子ビームを入射し、かつ、傾きの法線方向の分布幅も同時に短くしなければならない。たとえば水(屈折率: 1.33)の場合、 41° の傾きが必要となる。そのために、本研究では、正確な傾きと短い分布幅を同時に満たす電子ビームを生成するために、電子ビームトラッキングコード PARMELA を用いた計算を行った。

2. フォトカソード RF 電子銃ライナック

図 2 に、計算におけるフォトカソード RF 電子銃ライナックの概略を示す。本ライナックは、フォトカソード RF 電子銃、加速管、磁気パルス圧縮器から構成される。本研究では、従来までは直入射であった、電子ビーム生成用ピコ秒レーザーを斜めから入射する検討を行った。斜めから入射することにより、径方向に対する軸方向に傾きをもったピコ秒電子ビームを生成可能である。RF 電子銃には 68° のレーザー入射ポートを備えており、 43° の傾きをもつ電子ビームを生成可能である。電子銃で発生した電子ビームは、加速管において加速およびエネルギー変調される。このとき、加速管における加速 RF の特性から、図 2 に示すように、同じ径方向の位置でも軸方向のエネルギー変調が起こることが予想される。このときに、前方の電子が後方の電子よりもエネルギーが高くなるように、エネルギー変調を行う。最後に、磁気パルス圧縮を通るときに、高いエネルギーをもつ電子は外側を通り、低いエネルギーをもつ電子は内側を通り、エネルギーに応じたパス差が生じ、フェムト秒電子線パルスに圧縮することが可能となる。このとき、圧縮器前の 4 極電磁石 (Q1, Q2) の磁場強度を調整することにより、傾きの角度を変化させることが可能となる。

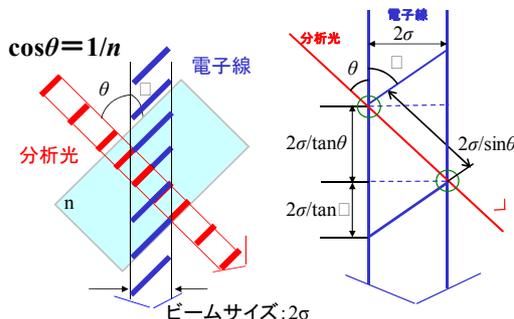


図 1 : 等加速度分光法 の概念

計算では、電子ビームトラッキングコード PARMELA を用いた。空間電荷効果は、3次元で非対称な電子ビーム分布となるため、spch3d (3次元メッシュ) ルーチンにより PIC (particle-in-cell) の計算を行った。

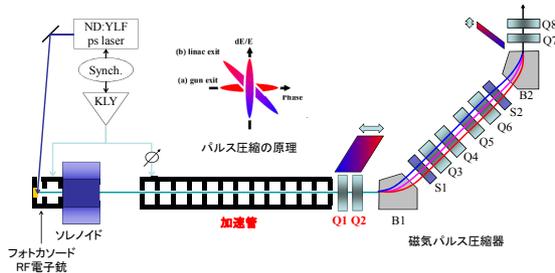


図2：フォトカソードRF電子銃ライナック

3. 計算結果

図3に、カソードにおける初期分布を示す。電子ビーム生成用ピコ秒レーザーを 68° の角度から照射した場合に得られる電子ビームの分布を示す。水平 (x) -垂直 (y) 方向の投影分布は、斜めの入射を行っているため、楕円の分布 (ビームプロファイル) を仮定した。また、水平 (x) -軸 (z, 進行) 方向の分布は、水平位置によってレーザー到達時刻が異なるため、傾いた分布になることを仮定した。

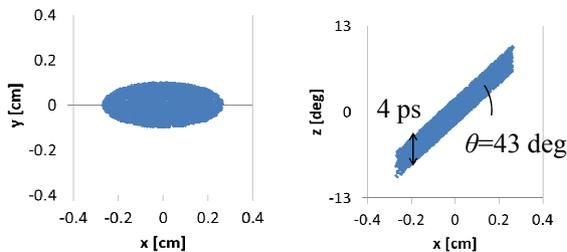


図3：(左) 水平 - 垂直方向の投影分布。(右) 水平-軸 (進行) 方向分布の傾き。

図4に、圧縮器出口における電子ビームの分布特性 (水平方向に対する軸方向分布の傾き、傾きに法線方向の分布幅) の計算結果を示す。電荷量は 0.1 nC とした。いずれの図も、加速管における加速位相依存性であり、エネルギー分散が最小となる加速位相は 280 である。また、凡例は圧縮器前の4極電磁石の磁場強度を変えた時の値を示す。つまり、4極電磁石の収束力により、圧縮器出口におけるビーム径も変化することになる。まず、傾きについては、4極電磁石の収束力に大きく依存することが分かった。これは、同じ縦方向に幅を持つ電子ビームが圧

縮器出口に分布するとすれば、ビーム径が変化すると傾きが変化することを示している。また、分布幅については、4極電磁石の収束力が弱い時は、加速位相： 296 の時に最小となった。これまでに、電子ビーム生成用レーザーを垂直から入射した場合に圧縮後のパルス幅が最小となる加速位相も 296 前後であり、非常に近い値であることが分かった。その理由として、水平と進行方向に傾いた電子ビームを加速管によるエネルギー変調をした場合、加速管の加速RFの特性上、同じ水平の位置でも進行方向にエネルギー変調が行われていることが予想される。その結果、同じ水平方向の位置ごとに、進行方向に沿ってパルス圧縮が起こったと考えられる。

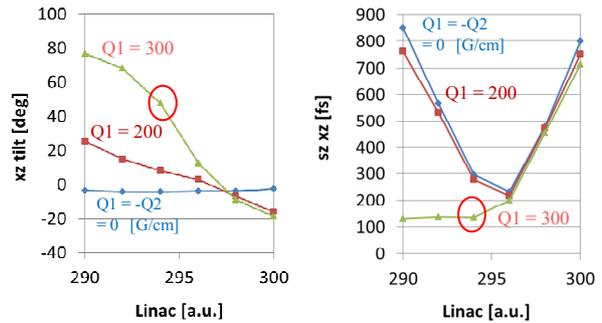


図4：(左) 傾き (右) 分布幅の加速管加速位相依存性。凡例：圧縮器前の4極電磁石の磁場強度変化

また、図5に、電荷量： 0.1 nC のとき、傾き： 48° 、分布幅： 130 fs の電子ビームの例を示す (図4中の赤丸で示された条件)。直線は、最小二乗法により得られた直線であるが、不均一な分布が予想される。今後、6極電磁石を用いた高次補正の検討を行う予定である。

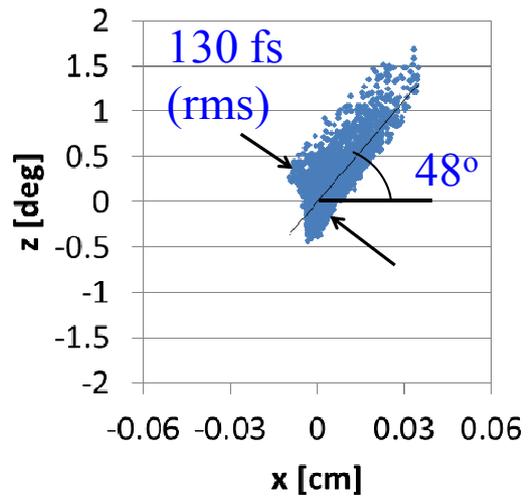


図5：傾きと分布幅を同時に満たす電子ビーム

4. まとめ

フォトカソード RF 電子銃加速器における電子ビームの縦・横方向分布変調の計算を行った。レーザー斜め入射、加速位相と電磁石の最適化により、電荷量：0.1 nC のとき、傾き：48°、分布幅：130 fs の電子ビームを発生可能であることが示された。今後、ストリークカメラを用いた分布計測を予定している。等価速度分光法の実現により、さらに時間分解能を向上したパルスラジオリシスの開発が期待される。

参考文献

- [1] J. Yang et al., Nucl. Instr. and Meth. A 556, 52 (2006).
- [2] J. Yang et al., Nucl. Instr. and Meth. A 637, s24 (2011).
- [3] J. Yang et al., Radiat. Phys. Chem. 78, 1664 (2009).