

フェムト秒時間分解電子顕微鏡におけるビームダイナミクスの研究

BEAM DYNAMICS STUDY IN FEMTOSECOND TIME-RESOLVED ELECTRON MICROSCOPY

李亮^{#,A)}, 仲西琢己^{A)}, 楊金峰^{A)}, 吉田陽一^{A)}
 Liang Li^{#,A)}, Takumi Nakanishi^{A)}, Jinfeng Yang^{A)}, Yoichi Yoshida^{A)}
^{A)} The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

Abstract

A Time-resolved electron microscopy with photocathode RF gun is being developed in ISIR to observe the fundamental dynamics processes in matter occurring on femtosecond time scales over nanometer spatial dimensions. To achieve high spatial and temporal resolution, a high-brightness electron beam with low-emittance and low-energy-spread is required. In this study, we aim to model the space charge effect of femtosecond electron beam in RF gun using General Particle Tracer (GPT) simulation, and estimate the thermal emittance in RF gun and the increase of emittance due to RF. The beam characteristics (beam emittance, pulse width, energy spread, etc.) depending on the size of laser beam spot and the electron bunch charge were calculated. In this paper, we report the results of simulation and compare those with the preliminary experimental result.

1. はじめに

物質における高速の構造変化の解明は、材料の創製、新しいデバイスの開発において非常に重要である。ナノメートルの空間とフェムト秒の時間領域で引き起こる高速構造変化を直接的に追跡するためには、フェムト秒時間分解電子顕微鏡の開発が非常に重要である。現在の時間分解電子顕微鏡の研究では加速電圧が低いため、空間電荷効果による電子線パルス幅やエネルギー分散が増大し、ピコ秒もしくはフェムト秒短パルス電子線の発生が困難である。そのため、時間分解能は 10 ナノ秒にしか至っていない状況である。

阪大産研では、ナノメートル空間分解能とフェムト秒時間分解能を持つ時間分解電子顕微鏡装置の開発目標を置いた。そして、昨年に空間電荷効果などの問題を克服するフォトカソード高周波(RF)電子銃を用いた時間分解電子顕微鏡の実証機を製作した。時間分解電子顕微鏡はフォトカソード RF 電子銃とソレノイドレンズ、コンデンサレンズ、対物レンズ、中間レンズ、投影レンズとイメージ記録システムから構成される。イメージの記録には 1024×1024pixel の CCD カメラを用いた。RF 電子銃は 1.6 セルであり、空洞に 2856MHz の高周波を用いる。本実証機における 10nm の空間分解能を得るために、0.1mm-mrad の電子ビームを発生する必要がある。電子ビームエネルギーの分散については、試料に依存するが、通常は 10^{-4} であれば、測定可能と考えられる。イメージ計測には、十分の解像度を得るために 1 ピコセルあたり約 100 個の電子の入射が必要であり、1000×1000pixel の CCD カメラを利用する場合、パルスあたりの電子数は 10^7 - 10^8 である。

[#] liliang@sanken.osaka-u.ac.jp

本研究では、General Particle Tracer(GPT)を用いて、この高品質の電子ビームを発生するために、RF 電子銃と電子顕微鏡内にビーム輸送における空間電荷効果を計算し、RF 電子銃における熱エミッタンス、RF と空間電荷効果によるエミッタンスの増大を定量化した。

2. RF 電子銃におけるビームダイナミクスモデル

ビームエミッタンスは高輝度電子ビームの発生に対する最も重要なパラメーターの一つであり、式 1 示すように、熱エミッタンス(ϵ_{th})、RF によるエミッタンス(ϵ_{rf})、空間電荷効果によるエミッタンス(ϵ_{sc})により求められる。

$$\epsilon = \sqrt{\epsilon_{th}^2 + \epsilon_{rf}^2 + \epsilon_{sc}^2} \quad (1)$$

さらに、各エミッタンスについて KIM 氏^[1]と Travier 氏^[2]のモデルが挙げられた。式 2 に空間電荷効果によるエミッタンスの関係式を示す。

$$\epsilon_{x,z}^{sc} = \frac{\pi}{4} \frac{1}{\alpha k} \frac{1}{\sin \phi_0} \frac{I}{I_A} \mu_{x,z} (A) \quad (2)$$

ここで、 $\alpha = eE_0/2mc^2k$ 、 m は電子質量、 c は光速、 e は電子の電荷、 E_0 は最大加速電場、 $k = 2\pi/\lambda$ 、 $I = Q/\sigma_z$ 、 $I_A = 17000A$ 、 Q は電荷量、 σ_z はパルス幅である。電子パルスの時間分布は正規分布の場合、 $\mu_{x,z}(A) = \sigma_z/(3\sigma_x + 5\sigma_z)$ 、 σ_x は電子ビームのサイズである。

RF 電子銃における RF 効果によるエミッタンスは次の式に表れる。

$$\epsilon_x^{rf} = \frac{\alpha k^3 \sigma_x^2 \sigma_z^2}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

熱エミッタンスによるエミッタンスは次の式に表れる。

$$\varepsilon_{th} = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{E_k}{m_0 c^2}} \quad (4)$$

ここで、 D はカソードでのレーザーの直径であり、 E_k はカソードから発生した電子の初期運動エネルギーである。無酸素銅カソードと Ti:Sapphire レーザーの 3 倍波を用いた時、実験で求められた $E_k = 0.26\text{eV}$ であった^[3,4]。

エネルギー分散に関しては、次の式に表れる。

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{2f\sigma_b}{n+0.5} \quad (5)$$

ここで、 f は加速 RF の周波数であり、 n は RF 電子銃におけるフルセルの個数である。本研究では、 $n = 1$ であった。

以上のモデルに関しては、ピコ秒電子パルスのビームダイナミクスによく検証されたが、フェムト秒電子パルスの発生には、検証例がまだ少ない。

3. GPT シミュレーションによるフェムト秒電子のビームダイナミクス

3.1 ビームエミッタンス

図 1 にビームの規格化エミッタンスと電荷量の依存性のシミュレーション結果を示す。シミュレーションの条件として、RF 電子銃内の最大加速電場は 100MV/m 、レーザーのパルス幅は 100fs 、カソードに照射するレーザースポット直径は 1mm 、RF 位相は 30° であった。シミュレーションにおいてソレノイドを使わずに、カソードから 1m 離れた場所でエミッタンスをプロットした。空間電荷効果によるエミッタンス増大を分析するため、次式を用いてフィッティングした。

$$\varepsilon = \sqrt{a^2 + (bQ)^2} \quad (6)$$

ここで、第 1 項は $a = \sqrt{\varepsilon_m^2 + \varepsilon_r^2}$ であり、第 2 項は空間電荷効果によるエミッタンスである。フィッティン

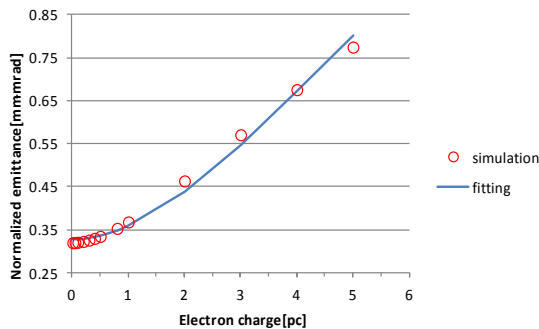


Figure 1: Simulation results of transverse emittance versus bunch charge. The parameters: 100fs (laser pulse width), 1mm (laser spot diameter), 30° (laser injection phase), 100MV/m (peak electric field).

グの結果により、熱エミッタンスと RF によるエミッタンスの和は $a=0.33\text{mm-mrad}$ であり、空間電荷効果によるエミッタンス増大は、 $b=0.15\text{mm-mrad/pc}$ であった。

図 2 にビームの規格化エミッタンスとカソードに照射するレーザースポット直径の依存性のシミュレーション結果を示す。RF の位相は 30° を固定して、電荷量は 0.1pC であった。熱エミッタンスによるエミッタンス増大を分析するため、次の式を用いてデータをフィッティングした。

$$\varepsilon = \sqrt{(aD^2)^2 + \left(\frac{b}{2D + \sigma_z}\right)^2 + (cD)^2} \quad (7)$$

ここで、第 1 項は RF によるエミッタンス、第 2 項は空間電荷効果によるエミッタンス、第 3 項は熱エミッタンスである。 $\sigma_z = 100\text{fs}$ はパルス幅である。フィッティングの結果、 $a < 0.001\text{mm-mrad}$ 、 $b = 0.018\text{mm-mrad}$ 、 $c = 0.32\text{mm-mrad}$ と得られた。RF によるエミッタンスが非常に小さく、レーザースポットサイズを変えた時の空間電荷効果によるその増大 (0.018mm-mrad) も小さいことが分かった。ここで求められた熱エミッタンスは図 1 から得られた熱エミッタンスと RF によるエミッタンスの和とほぼ一致することから、図 1 での RF によるエミッタンスが小さいと考えられる。

図 3 にビームの規格化エミッタンスと RF 位相の依存性のシミュレーション結果を示す。カソードに照射するレーザースポット直径は 0.1mm であった。RF 位相によるエミッタンス増大を分析するため、次式を用いた。

$$\varepsilon = \sqrt{a^2 + \left(\frac{b}{\sin \phi_0}\right)^2 + (c \sin \phi_0)^2} \quad (8)$$

ここで、第 1 項は熱エミッタンス、第 2 項は空間電荷効果によるエミッタンス、第 3 項は RF 効果によるエミッタンスである。モデルフィッティングの結果、KIM 氏のモデルと GPT シミュレーションの結果

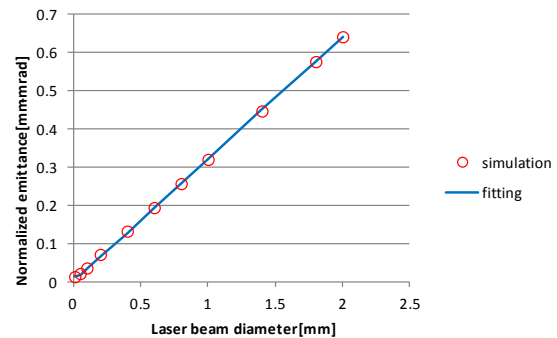


Figure 2: Simulation results of transverse emittance versus laser spot diameter. The parameters: 100fs (laser pulse width), 30° (laser injection phase), 100MV/m (peak electric field) and 0.1pC (electron charge).

果が良く一致することから、このモデルがフェムト秒電子ビームの発生に適用できると考えられる。RF の位相が 20° 以上の時、RF によるエミッタンスが支配し、 20° 以下の時は空間電荷効果によるエミッタンスが支配する。また、熱エミッタンスはこの条件で $0.034\text{mm}\cdot\text{mrad}$ となり、式 7 から計算した結果 (0.1mm のとき $0.032\text{mm}\cdot\text{mrad}$) と一致した。

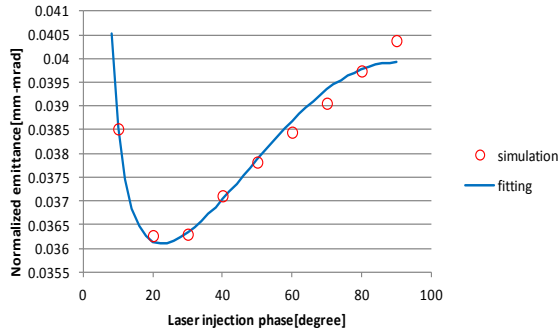


Figure 3: Simulation results of transverse emittance versus laser injection phase. The parameters: 100fs (laser pulse width), 0.1mm (laser spot diameter), 100MV/m (peak electric field) and 0.1pC (electron charge).

3.2 ビームパルス幅

図 4 にビームパルス幅と電荷量の依存性のシミュレーション結果を示す。シミュレーションの条件として、RF 電子銃内の最大加速電場は 100MV/m、レーザーのパルス幅は 100fs、カソードに照射するレーザースポット直径は 1mm、RF 位相は 30° であった。空間電荷効果によるパルス幅の増大は線形的であり、増大量は $6.97\text{fs}/\text{pC}$ であった。また、100fs 程度の電子パルスの発生には大きな問題はないことが分かった。電荷量がゼロの時のパルス幅は図 5 に示すように RF 電子銃内 RF 圧縮による初期パルス幅(54fs)である。

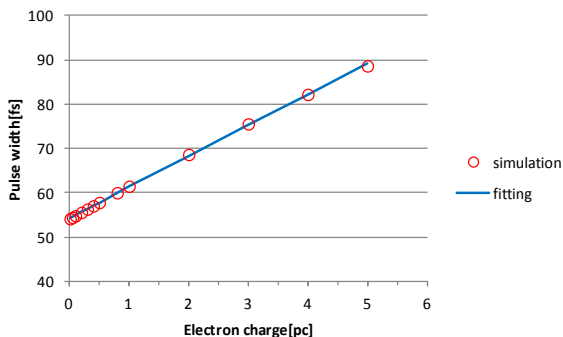


Figure 4: Simulation results of pulse width versus bunch charge. The parameters: 100fs (laser pulse width), 1mm (laser spot diameter), 30° (laser injection phase), 100MV/m (peak electric field).

図 5 にビーム電荷量 0.1pC を用いた時ビームパルス幅と RF 位相の依存性のシミュレーション結果を示す。RF 位相が 60° の時、電子ビームのパルス幅 (100fs) と入射レーザーのパルス幅と同じである。RF 位相が 60° より小さくなると、ビームが RF 効果によって圧縮され、パルス幅が短くなる。RF 位相が 60° より大きくなると、空間電荷効果と RF 効果によってビームパルス幅を増大することが分かった。

ス幅と RF 位相の依存性のシミュレーション結果を示す。RF 位相が 60° の時、電子ビームのパルス幅 (100fs) と入射レーザーのパルス幅と同じである。RF 位相が 60° より小さくなると、ビームが RF 効果によって圧縮され、パルス幅が短くなる。RF 位相が 60° より大きくなると、空間電荷効果と RF 効果によってビームパルス幅を増大することが分かった。

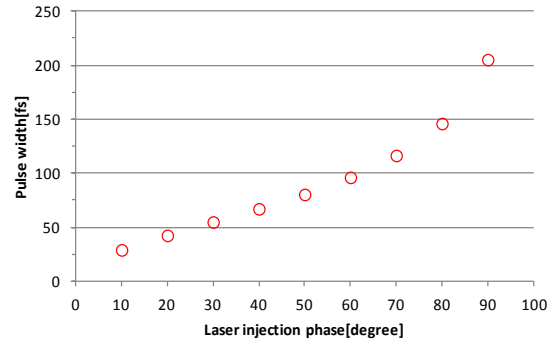


Figure 5: Simulation results of pulse width versus laser injection phase. The parameters: 100fs (laser pulse width), 1mm (laser spot diameter), 100MV/m (peak electric field) and 0.1pC (electron charge).

3.3 エネルギー分散

図 6 にレーザースポット直径が 1mm の時、ビームエネルギー分散と電荷量の依存性のシミュレーション結果を示す。フィッティングは下に示すような式を用いた。

$$\frac{\Delta E}{E} = \sqrt{a^2 + (bQ)^2} \quad (9)$$

ここで、 a は電子ビームの初期エネルギー分散であり、加速 RF 位相とレーザーパルス幅に依存する。フィッティングの結果により、初期エネルギー分散は $a=10^{-4}$ と得られた。また、空間電荷効果によるエネルギー分散の増大が $b=2.5 \times 10^{-4}/\text{pC}$ であった。

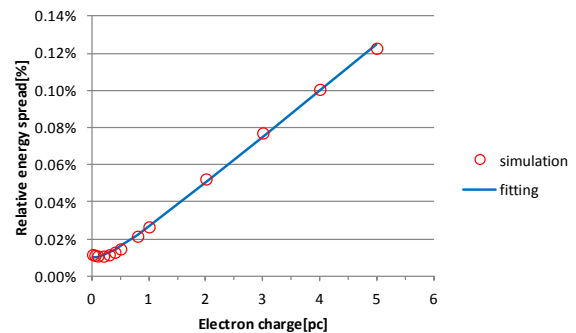


Figure 6: Simulation results of energy spread versus bunch charge. The parameters: 100fs (laser pulse width), 1mm (laser spot diameter), 30° (laser injection phase), 100MV/m (peak electric field).

図 7 にビームエネルギー分散とレーザーパルス幅

の依存性のシミュレーション結果を示す。レーザーパルス幅によるエネルギー分散の増大を分析するため、次式を用いてフィッティングした。

$$\frac{\Delta E}{E} = \sqrt{a^2 + \left(\frac{b}{\sigma_b}\right)^2 + (c\sigma_b)^2} \quad (10)$$

ここで、第1項はRFによる初期エネルギー分散、第2項は空間電荷効果によるエネルギー分散の増大、第3項はRF効果によるエネルギー分散の増大である。シミュレーションでは、レーザーサイズが1mm、電荷量が0.1pCであった。レーザーのパルス幅は50fs以下になると、空間電荷効果によるエネルギー分散の増大が少し増大し、50fs以上においてRFによるエネルギー分散が増大することが分かった。また、データのフィッティングにより、初期エネルギー分散は $a=1 \times 10^{-4}$ 、空間電荷効果によるエネルギー分散は $b=5 \times 10^{-4}$ 、RF効果によるエネルギー分散の増大は $c=4.1 \times 10^{-7}$ であることが分かった。

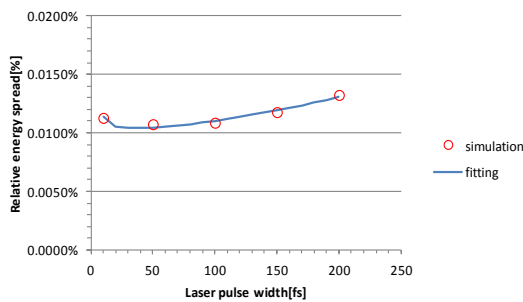


Figure 7: Simulation results of energy spread versus laser pulse width. The parameters: 1mm (laser spot diameter), 30° (laser injection phase), 100MV/m (peak electric field) and 0.1pC (electron charge).

図8にビームエネルギー分散とRF位相の依存性のシミュレーション結果を示す。RF位相が 40° 以上の場合、空間電荷効果によるエネルギー分散は増大し、RF位相が 40° 以下の場合、目標値の 10^{-4} の低エネルギー分散の電子ビームが発生できることが分かった。

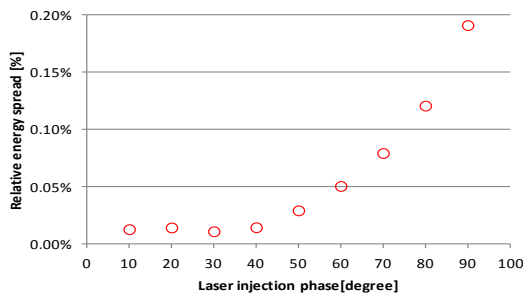


Figure 8: Simulation results of energy spread versus laser injection phase. The parameters: 100fs (laser pulse width), 1mm (laser spot diameter), 100MV/m (peak electric field) and 0.1pC (electron charge).

4. まとめ

本研究では、GPTシミュレーションを用いてRF電子銃における熱エミッタンス、RFによるエミッタンス、空間電荷効果によるエミッタンスやパルス幅、エネルギー分散を計算し、モデルした。その結果、熱エミッタンスによるエミッタンス増大は0.32mm-mrad/mm、空間電荷効果によるエミッタンス増大は0.15mm-mrad/pC、RFによるエミッタンス増大は0.02mm-mradであることが分かった。空間電荷効果によるパルス幅とエネルギー分散の増大は、それぞれ7fs/pCと 2.5×10^{-4} /pCであった。時間分解電子顕微鏡における実験では、0.3pCの時、0.3mm-mradであり、GPT計算値と同程度であった。そして、電荷量が0.5pCに抑え、カソードでのレーザー直径を0.2mmに集光した場合、目標値であるエミッタンス0.1mm-mrad、エネルギー分散 10^{-4} の電子ビームが発生できることが分かった。

参考文献

- [1] Kwang-Je KIM, "RF AND SPACE-CHARGE EFFECTS IN LASER-DRIVEN RF ELECTRON GUNS", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A275 (1989)201-218, North-Holland Amsterdam.
- [2] Christian Travier, "An Introduction to photo-injector design", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A340 (1994)26-39, North-Holland.
- [3] Jinfeng Yang, et al, "100-femtosecond MeV electron source for ultrafast electron diffraction", Radiation Physics and Chemistry 78 (2009) 1106-1111.
- [4] Jinfeng Yang, et al., "フェムト秒時間分解 MeV 電子顕微鏡の開発".