

# レーザーフォトカソード RF 電子銃による高品質ピコ秒電子パルスの発生

楊 金峰<sup>1</sup>、酒井文雄、岡田康弘、萬雅史、柳田達哉、遠藤彰

住友重機械工業株式会社

〒188-8585 東京都西東京市谷戸町 2-1-1

## 概要

逆コンプトン散乱フェムト秒X線発生装置用高輝度電子源としてレーザーフォトカソードRF電子銃の開発を行った。電子ビームの発生にはピコ秒Nd:YAGレーザーの4倍波紫外光を用いた。発生した電子は直線加速器によって最大14MeVまで加速され、エミッタンス、エネルギー分散、空間的、時間的安定度等の特性の計測を行った。また、測定結果から空間電荷効果と加速RFによるエミッタンスの増大及びカソード熱エミッタンスの評価を行った。発生した高品質電子線パルスはテラワットフェムト秒レーザー光パルスと90度に衝突させ、2.3keV、270フェムト秒のX線発生に成功した。

## 1. はじめに

レーザーフォトカソード RF 電子銃は、次世代電子陽電子リニアコライダー、自由電子レーザー (FEL)、レーザー加速、逆コンプトン散乱による超短パルス X 線発生などの分野で、低エミッタンス短パルス電子線源として期待されている。特に、次世代の光源として SASE と呼ばれるシングルパスの FEL<sup>[1]</sup>では、パルス幅が 3ps 以下、電荷量が 1nC/pulse 以上、規格化エミッタンスが  $2\pi$  mm-mrad 以下の高品質電子ビームが要求されている。また、逆レーザーコンプトン散乱による高輝度超短パルス X 線の発生にも、短パルス低エミッタンスの電子ビームが必要である。

フォトカソード RF 電子銃から発生する電子ビームのエミッタンス ( $\epsilon_n$ ) は、空間電荷効果によるエミッタンス ( $\epsilon_{sc}$ )、空洞内の加速 RF によるエミッタンス ( $\epsilon_{rf}$ )、カソードの熱エミッタンス ( $\epsilon_{th}$ ) などの要因から定まる。

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

RF 電子銃では、カソードから発生する光電子の初期速度が低いと空間電荷効果が支配している。ビームの分布が空間的、時間的に Gaussian 分布であると仮定した場合、線形的な空間電荷効果によるエミッタンスは次の式で表せる<sup>[2]</sup>。

$$\epsilon_{sc} \approx \frac{\pi}{4} \frac{1}{ak} \frac{1}{\sin \phi_0} \frac{I}{I_A} \frac{\sigma_z}{(3\sigma_x + 5\sigma_z)} \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_x$  と  $\sigma_z$  はそれぞれ電子ビームのサイズとパルス幅であり、 $I = Q/\sigma_z$  は電子ビームのピーク電流である。 $I_A = 17\text{kA}$ 、 $\phi_0$  はレーザーの入射位相で

ある。また、 $\alpha = eE_0/2mc^2k$ 、 $E_0$  は RF の最大加速電場強度であり、 $k = 2\pi/\lambda_{rf}$ 、 $\lambda_{rf}$  は加速 RF の波長である。一方、加速 RF によるエミッタンスの増大は、次のように表せる。

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

カソードの熱エミッタンス<sup>[3]</sup>は、カソード表面の仕事関数 ( $\psi_0$ ) とレーザー光子エネルギー ( $E_\gamma$ ) の差、RF の Schottky 効果、カソードの温度 ( $T$ ) などに依存し、次の式で表せる。

$$\epsilon_{th} = \frac{R_0}{2} \left[ \frac{2[E_\gamma - (\psi_0 - \sqrt{\beta_\gamma E_0 \sin \phi_0})]}{mc^2} + \frac{k_B T}{mc^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

ここで、 $E_\gamma$  はレーザー光のビームサイズであり、 $\beta_\gamma$  はカソード表面の field enhancement factor である。 $R_0$  はレーザーのスポットサイズである。銅カソードにおいては、入射レーザー光は Nd:YAG レーザーの第 4 高調波 ( $E_\gamma = 4.66\text{eV}$ ) とし、最大加速電場は 100MV/m、レーザービームサイズは 3mm とした時、カソードの熱エミッタンスの上限値は  $\epsilon_{th} = 0.6\pi$  mm-mrad ( $\beta_\gamma = 1$ ) と計算される。

これにより、入射レーザー光ビームサイズを大きく或いはパルス幅を長くすることにより空間電荷によるエミッタンスの増大を抑えることができる。しかし、加速 RF によるエミッタンスの増大が生じる。また、RF 電場強度を高くすることにより空間電荷効果と加速 RF によるエミッタンスの増大を抑えることができるが、Schottky 効果によるカソードの熱エミッタンスは、増加していく。

我々は、低エミッタンスの電子ビームを発生するために米国 BNL と日本 KEK との共同開発のもとに高精度のフォトカソード RF 電子銃を開発した。本 RF 電子銃の主構造は S-バンド 1.6セルとなっている。これにより空洞内の RF 収束力を強くなり、また、セル長を長くすることによりセルとセルの間の iris での電場強度 (発散力の効果) も弱くなる。従って、ビームの Divergence を小さくすることもでき、エミッタンスの増大を抑えることができる。また、空洞の iris でのピーク電場強度を弱くなるため、iris の表面から発生する暗電流を低減することもできる。さらに、空間電荷効果によるエミッタンスの増大を抑えるために、RF 電子銃の出口にエミッタンス補正用の高精度ソレノイド電磁石が取り付けられている。

<sup>1</sup> E-mail: jnf\_yang@shi.co.jp

## 2. 高品質電子ビーム発生装置

図1にレーザーフォトカソード RF 電子銃を用いた高品質電子パルス発生装置を示す。

フォトカソードの光源としては、全固体ピコ秒レーザーを用いた。この光源は、モードロック Nd:YAG 発振器と、再生増幅器から構成される。モードロック発振器の発振周波数 (119MHz) は、発振器のキャビティー長さをフィードバック制御することによって、電子線の加速 RF (2856MHz) と高精度に同期するようにはかれている。再生増幅器から出力エネルギー3mJ まで増幅された光パルスは、非線形結晶によって4倍波 (266nm) を発生し、カソードに照射される。

RF 電子銃から発生した電子パルスは、長さ 70cm の小型S-バンド定在波ライナックを用いて14MeV まで加速される。ライナックと RF 電子銃には、同一くライストロンから2分配された RF パワーがそれぞれ供給される。ライナックと RF 電子銃に供給される RF ピークパワーは6MW で、パルス幅は3 $\mu$ s である。ライナックの下流に2組のトリップレット Q 電磁石を取り付けて電子ビームを収束させる。収束させた電子ビームをテラワットフェムト秒レーザー光パルスと 90 度に衝突させ、コンプトン X 線を発生する。発生した X 線の強度は、下流にビームライン上に設置されたマイクロチャンネルプレート (MCP) を用いて測定した。

電子ビームの診断では、エミッタンスの測定は Q 電磁石とビームプロファイルモニターを用いて行い、加速エネルギーとエネルギー分散の測定は 90 度偏向電磁石と幅 2mm のスリットの組み合わせによって行った。

## 3. 実験結果

### 3.1 カソード量子効率と暗電流

本実験では、フォトカソードとして、無酸素銅を用いた。図2 (a) に、RF 電子銃に RF ピークパワー 6MW (ピーク電場が 100 MV/m に相当する) を入力

したときの銅フォトカソードの量子効率の測定結果を示す。測定結果により、入射レーザーパルスエネルギーが 60 $\mu$ J (レーザービーム直径:3mm) までは電荷量とレーザーパルスエネルギーとの関係は線形性を持ち、この時の銅カソードの量子効率は  $1.5 \times 10^{-4}$  と得られた。また、レーザーパルスエネルギーが 60 $\mu$ J 以上になると、空間電荷の制限により、電荷量は飽和して行くことが分かった。電荷量を増加するためには、加速電界を強くし、又はレーザービームサイズを大きくして空間電荷の制限を上げる必要がある。

RF 電子銃では、レーザー光をカソードに照射していない時でもフィールドエミッションによる暗電流が発生する。その暗電流の電流値は、入力 RF パワー (電界強度)、カソードと空洞の表面状態などに関係している。図2 (b)に、RF 電子銃に入力する RF パワーを変えた時、発生する暗電流の測定値を示す。入力 RF ピークパワーが 6MW の時、暗電流は 0.5nC/pulse と測定され、そのパルス幅は RF のパルス幅と同じで 3 $\mu$ s であった。

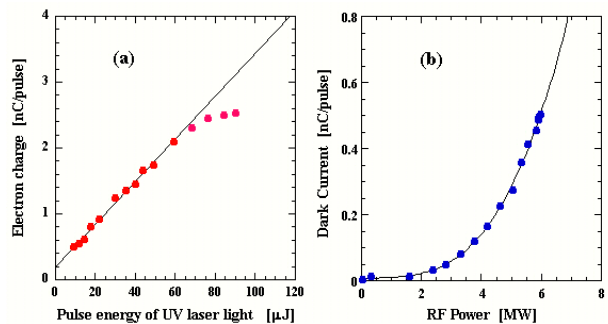


図2：銅カソードの量子効率と暗電流の測定結果

### 3.2 エネルギー分散

図3 (a)にレーザーの入射位相を変化したとき、RF 電子銃出口での電子ビームのエネルギーとビームがライナックで14MeV まで加速された後のエネルギー分散の測定結果を示す。本 RF 電子銃では、出力ビームの最大エネルギーは 3.5MeV と得られた。また、エネルギー分散が最小になるレーザーの入射位相は

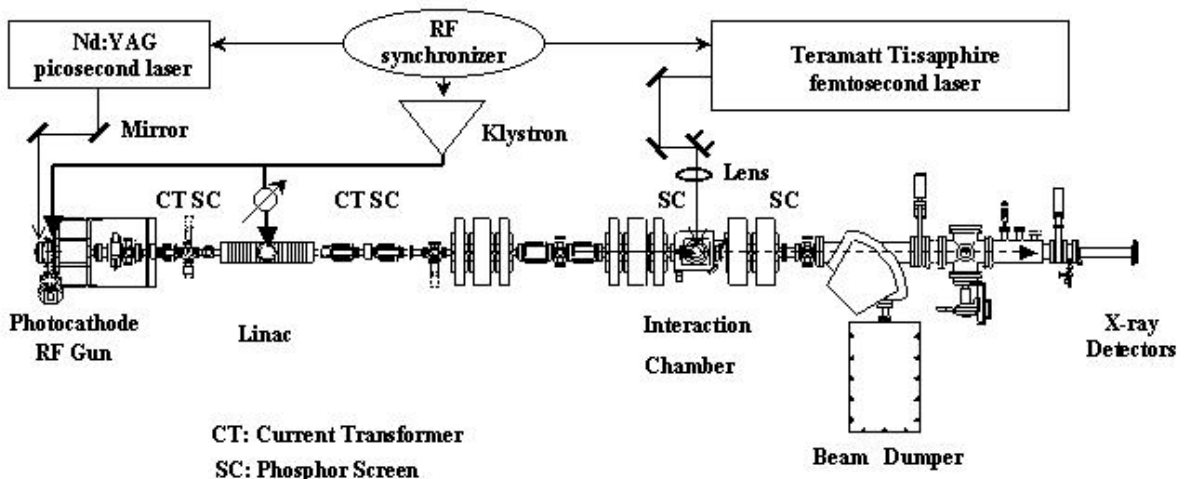


図1：レーザーフォトカソード RF 電子銃を用いた高品質電子パルス発生装置

30° であった。本測定では、ライナックの RF 位相はエネルギー分散が最小になるように設定した。

次にレーザー強度を変えて電子パルスの電荷量を変化させ、空間電荷効果によるエネルギー分散の増加を測定した。その結果を図 3 (b) に示す。本実験により、電荷量は 2nC/pulse 以下の時、空間電荷効果によるエネルギー分散の増加は小さく、電荷量が 0nC の時のエネルギー分散は、約 0.2%(rms) であると示された。

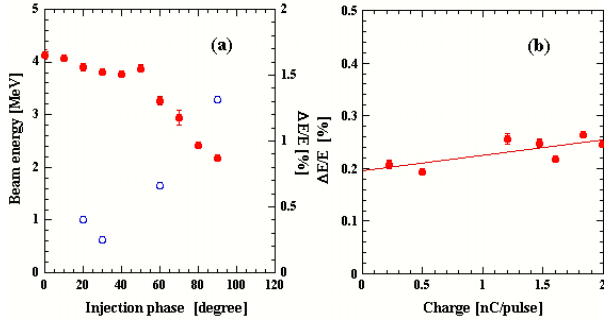


図 3 : ビームのエネルギーとエネルギー分散の測定結果

### 3.3 エミッタンス

RF 電子銃では、入力 RF パワーを一定にしてもレーザー入射位相を高くすることによって実効的な加速電界強度が高くなり、式(4)に示すように Schottky 効果によるエミッタンスは増加していく。図 4 (a) に、電荷量を 0.6nC/pulse に固定し、レーザーの入射位相を変えてビームのエミッタンスの測定結果を示す。また、レーザー入射位相を変えることによって電子パルス長が変化し (RF のバンチング効果)、加速 RF によるエミッタンス ( $\epsilon_{rf} \propto \sigma_z^2$ ) も変化する。その効果も本測定に含まれている。

エネルギー分散が最小になるようにレーザー入射位相 (30°) を固定し、電荷量を変化させて空間電荷効果によるエミッタンスの増大を測定した。得られたビームのエミッタンスと電荷量の依存性を図 4 (b) に示す。本エミッタンス測定では、エミッタンスが最小になるようにソレノイド電磁石の磁場強度とライナックの RF 位相を調整した。空間電荷によるビームサイズとパルス幅の変動を無視すると、電荷量とエミッタンスの関係は、式 (5) のように表せる。

$$\epsilon_n = \sqrt{aQ^2 + \epsilon_0^2} \quad (5)$$

ここで、 $\epsilon_0$  は電荷量が 0nC の時のエミッタンスであり、加速 RF によるエミッタンスとカソード熱エミッタンスの和を表す。式 (5) を用いて測定したエミッタンスのデータをフィッティングし、本実験条件下では、電荷量が 0nC の時のエミッタンスは  $\epsilon_0 = 1.4 \pi$  mm-mrad と得られた。

### 3.4 空間的と時間的の安定度

逆レーザーコンプトン散乱による高輝度超短パルス X 線の発生には、低エミッタンスの電子ビームだけではなく、空間的、時間的に安定したビームが要求される。本実験では、ビームのポインティングス

タビリティとビームサイズの変動の測定には厚さ 200 $\mu$ m のデマルケストビームプロファイルモニターを用い、時間安定度の測定には高速ストリークカメラを用いた。その結果、ビーム径を 100 $\mu$ m(rms) に収束したときのポインティングスタビリティとビームサイズの変動はそれぞれ 6 $\mu$ m と 3 $\mu$ m であった。

電子パルスと電子発生用レーザーパルス間の時間ジッタは 0.9ps(rms) と得られ、レーザーコンプトン散乱による X 線発生時の、電子パルスと X 線発生用 Ti:Sapphire フェムト秒レーザーパルス間の時間ジッタは 1.2ps(rms) と得られた。

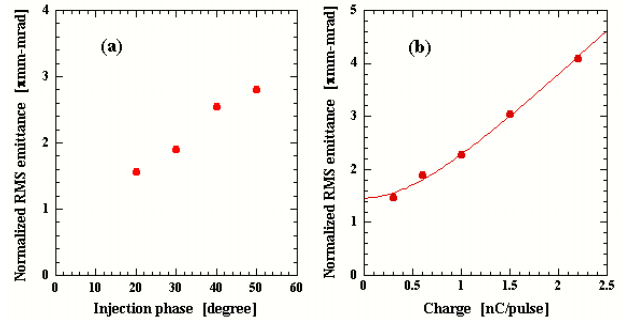


図 4 : ビームエミッタンスの測定結果

## 4. まとめ

逆コンプトン散乱によるフェムト秒 X 線発生を目指して、高輝度電子源として高精度レーザーフォトカソード RF 電子銃を製作した。RF 電子銃から発生した電子ビームはライナックを用いて最大 14MeV まで加速され、エミッタンス、エネルギー分散、空間的と時間的な安定度の測定を行った。また、エミッタンスと電荷量、レーザー入射位相の依存性の測定結果から空間電荷効果と加速 RF によるエミッタンスの増大及びカソード熱エミッタンスの評価を行った。得られた高品質電子線パルスを 100 $\mu$ m (rms) に収束し、20 $\mu$ m に集光された 100 フェムト秒の Ti:Sapphire レーザー光パルス (パルスエネルギー: 100mJ) と 90 度に衝突させ、2.3keV、270 フェムト秒の X 線発生に成功した。X 線強度は電子ビームの電荷量が 1nC/pulse の時、 $10^4$ /pulse であり、X 線強度の安定度は 25% と得られた。

今後は、Schottky 効果によるエミッタンスの増加を低減するために Ti:Sapphire レーザーの 3 倍波紫外光 ( $E_\gamma = 4.65$ eV) を利用し、更に空間電荷によるエミッタンスの増加を抑えるためにレーザーパルスをフラットトップに波形整形して低エミッタンス電子ビーム発生を行う予定である。

本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) から研究を委託された技術研究組合・フェムト秒テクノロジー研究機構 (FESTA) の研究の一環として行ったものである。

## 参考文献

- [1] M. Babzien, et al., Physical Review E **57**, 6093(1998).
- [2] K-J. Kim, Nucl. Instr. And Meth. A **275**, 201(1989).
- [3] T. Srinivasan-Rao, J. Fischer and T. Tsang, J. Appl. Phys. **65**, 3291(1991).