

# レーザーコンプトン散乱を用いた高強度レーザーの直接プロファイル計測

## DIRECT DIAGNOSTIC TECHNIQUE OF HIGH-INTENSITY LASER PROFILE BASED ON LASER-COMPTON SCATTERING

吉田靖史<sup>#</sup>, 佐藤令, 野々村洸, 坂上和之, 遠藤彰, 鷲尾方一

Yasufumi Yoshida <sup>#</sup>, Ryo Sato, KoNonomura, Kazuyuki Sakaue, Akira Endo, Masakazu Washio  
 Research Institute for Science and Engineering, Waseda University (RISE)

### Abstract

A high-intensity laser is essential for plasma generation for EUV (Extreme Ultraviolet) lithography, which is studied as the next generation of ultra-fine semiconductor lithography. Nevertheless, there is no way to directly measure profile of high-intensity laser at the present day. Therefore, we have been developing a method for measuring high-intensity laser profile based on the laser-Compton scattering using Cs-Te photo cathode RF-Gun at Waseda University. Specifically, laser profile is obtained by scanning the electron beam which is focused to about 10 $\mu$ m by solenoid lens. We have simulated beam size focused by solenoid lens using tracking code GPT (General Particle Tracer) and optimized the beam parameter to obtain beam size of 10 $\mu$ m. Then, we have installed solenoid lens and generated focused beam. We measured beam size using radiochromic film called GAFCHROMIC dosimetry film type HD-810. In this conference, we will report the result of GPT simulations, beam size measurements, the present progress and future prospects.

### 1. はじめに

波長 13.5nm の EUV(ExtremeUltraviolet)光は、次世代を担う半導体露光用光源として期待されている。EUV 光生成法のひとつに LPP(Laser Produced Plasma)法というものがある。これは、高強度 CO<sub>2</sub> レーザーをスズ微小液滴と衝突させて生じたスズプラズマを用いて EUV 光を生成する手法である[1]。EUV 光の生成効率と安定性を向上させるためには、レーザーのスポットでのプロファイルを計測しつつ精密なアライメントをおこなう事がきわめて重要となる。しかし、このような高強度レーザーのスポットでのプロファイルを直接計測する手法は現在存在していない。代替的にレンズで拡大したプロファイルを計測したり、レーザー光の一部のみを取り出して計測したりしているのが現状であるが、スポットでの実際のプロファイルを再現できているとはいえない。

そこで我々は、早稲田大学所有の Cs-Te フォトカソード RF-Gun を用いたレーザーコンプトン散乱による高強度レーザープロファイルの直接計測手法を提案し、その原理実証に向けて研究を開始した。10  $\mu$  m 程度に収束した電子ビームと高強度レーザーを衝突させレーザーコンプトン散乱光を発生させるのだが、そのときの散乱光量はレーザー光強度に依存するため、収束した電子ビームを走査しながら散乱光強度分布を取得することでレーザープロファイルが得られるという原理である(レーザーワイヤーの逆手法ともいえる)。レーザープロファイル取得方法の概念図を Fig.1 に示す。レーザー強度が高強度になればなるほど得られる散乱光量は多くなるため、この手法は特に高強度レーザーのプロファイル計測に

適しているといえる。さらに、レーザープロファイルを回転させながら、もしくは電子ビーム自身を回転させながら、衝突させ、取得した散乱光分布を CT と同様の処理をすることで、2次元のレーザープロファイルを取得することも可能となる。

本研究の原理実証のためには、(1)ソレノイド電磁石を用いた強収束電子ビーム生成、(2)電子ビーム走査系、(3)散乱光の検出系(CT システム)の開発が必要である。本稿では強収束電子ビーム生成系の開発とビームサイズ測定について述べる。

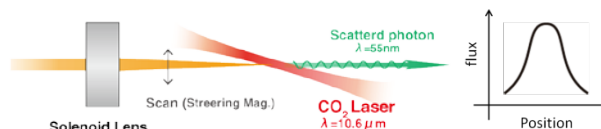


Figure 1: Schematic drawing of direct diagnostic technique of laser.

### 2. ビームサイズシミュレーション

#### 2.1 フォトカソード RF-Gun システム

早稲田大学所有のフォトカソード RF-Gun は、Sバンドの BNL タイプ 1.6cell 型空洞である。低エミッタンスという特徴があり、本研究のように小さいサイズのビームを生成するのに適した電子銃である。カソードは Cs-Te を使用しており、IR レーザーを波長変換や増幅を経て得られた UV レーザーをカソードに入射することで電子を放出させている。RF-Gun システムの各パラメータを Table 1 に示す。ビームラインの概要図を Fig. 2 に示す。ビームライン中のソレノイド電磁石 1 はエミッタンス補正に、ソレノイド電磁石 2 は電子ビーム強収束のために使用される。

<sup>#</sup>yasushi@fuji.waseda.jp

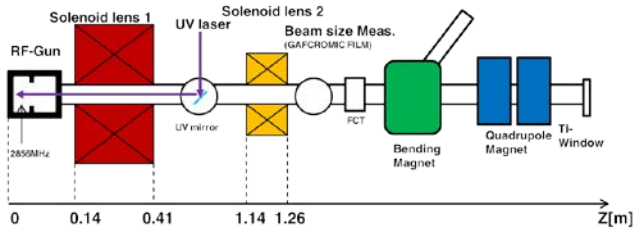


Figure 2: Beam line layout.

Table 1: The parameter of RF-Gun System

レーザー波長	262[nm]
カソード材質	Cs-Te
共振周波数	2856[MHz]
電荷量	~1 [nC/bunch]
最大バンチ数	100[bunches]
最大エネルギー	~5[MeV]

我々は、電子ビームトラッキングコード GPT(General Particle Tracer) [2]を用いて強収束電磁石を用いた際のビームサイズをシミュレーションした。カソード位置を  $z=0$  m, ソレノイド電磁石 1 を  $z=0.15$  m, ソレノイド電磁石を  $z=1.14$ m として計算をしている。ビーム進行方向に対する規格化エミッタンスとビームサイズ変化のシミュレーション結果を Fig.3 に示す。各パラメータは table2 の値を用いた。ソレノイド電磁石 1 がエミッタンス補正に、ソレノイド電磁石 2 がビームサイズの強収束に用いられていることが分かる。

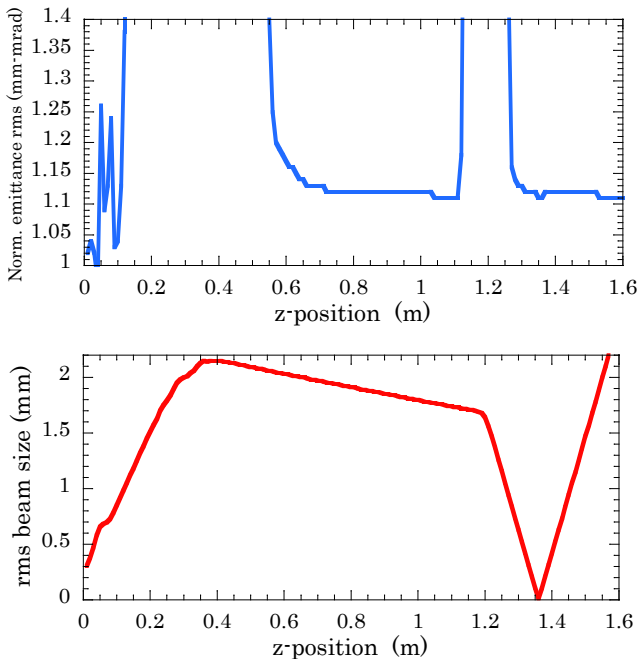


Figure 3: Simulated normalized emittance (upper plot) and rms beam size (bottom plot) along the beam line.

Table 2: Parameters of this simulation

粒子数	1000
スペースチャージモデル	3D
電荷量	50 [pC/bunch]
カソード電場強度	100[MV/m]
初期バンチ長	4.25 [ps]
入射レーザーサイズ(rms)	0.3 [mm]
ソレノイド電磁石1の磁場強度	0.13 [T]
ソレノイド電磁石2の磁場強度	0.5 [T]

### 2.2 ソレノイド電磁石 2 磁場強度とビームサイズ

ソレノイド電磁石 2 の磁場強度を変えたときのビームサイズの変化をシミュレーションした。その結果を Fig.4 に示す。ただし、ビームサイズが最小となるように、磁場強度毎  $z$  位置を最適化している。磁場強度を上げるほどビームサイズを小さく収束できることが分かる。

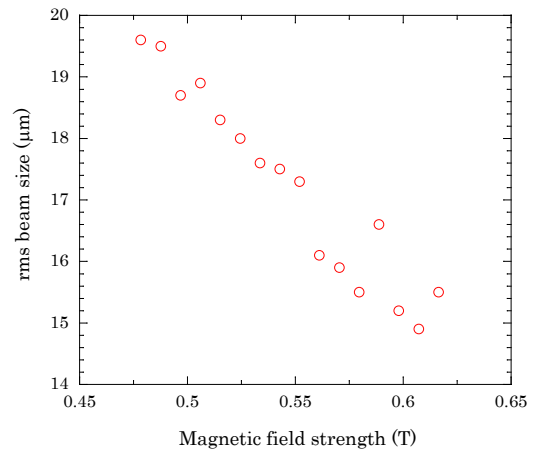


Figure 4: Calculated results of rms beam size vs magnetic field strength of solenoid lens 2.

### 2.3 電荷量とビームサイズ

電子ビームの電荷量を変化させた時の規格化エミッタンスとビームサイズのシミュレーションをおこなった。その結果を Fig.5 に示す。ただし、各パラメータは焦点距離にてビームサイズが最小になるように最適化している。シミュレーションから電荷量を 50pC にすることでビームサイズ  $\sigma = 10 \mu\text{m}$  を達成できることがわかった。

電荷量を小さくするほどビームサイズを小さくすることは可能であるが、その分レーザーコンプトン散乱で得られる光子数は減少してしまいレーザープロファイルを取得できなくなる懸念がある。打開策として、計測ターゲットのレーザー1 パルスに対して複数バンチの電子ビームを衝突させることを予定している。

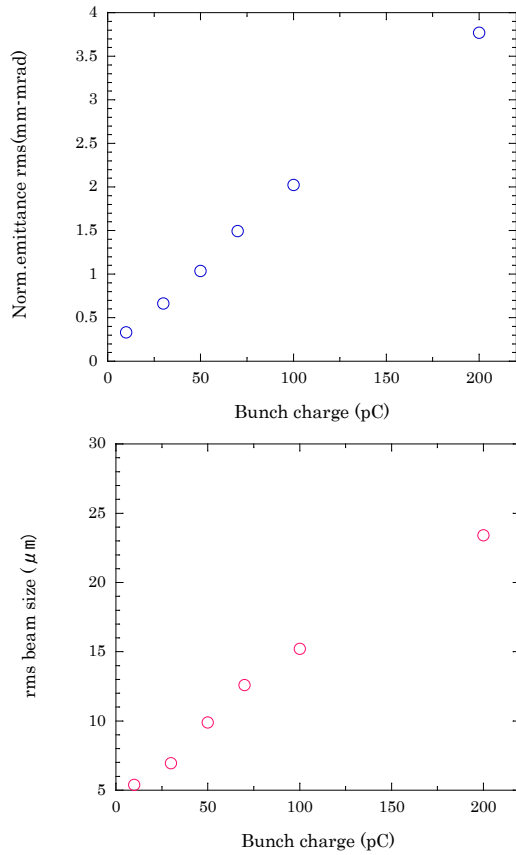


Figure 5: Simulated the dependence of normalized emittance (upper plot) and rms beam size on charge of electron beam (bottom plot).

### 3. ビームサイズ計測

#### 3.1 GAFCHROMIC FILM

低エネルギーで低電荷量のビームサイズを精度良く計測する為に、我々はフィルム照射によるビームサイズ計測をおこなった。使用したフィルムはISP社のGAFCHROMIC rtdeHD-810 [3]で、照射される線量に応じて青く呈色する特徴がある。フィルムに電子が入射したときの散乱による拡がりをもンテカルロシミュレーションコードEGS5にて調べた。その結果、厚さ $6.5\mu\text{m}$ の感光層ではほぼ拡がらないことがわかった。電子の散乱に起因するにじみによるビームサイズへの影響はなく、ファイルを使った計測は微小なサイズを計測するのに適した方法であることがわかる。

フィルムは直線導入器に固定しビームライン中に挿入することで照射をした。照射したフィルムは冷却CCDカメラを用いて光学密度(O.D.)を高精度に取得し解析した。さらに、あらかじめ取得しておいた検量線(Fig.6)を用いてO.D.を吸収線量に変換しビームサイズを解析した。

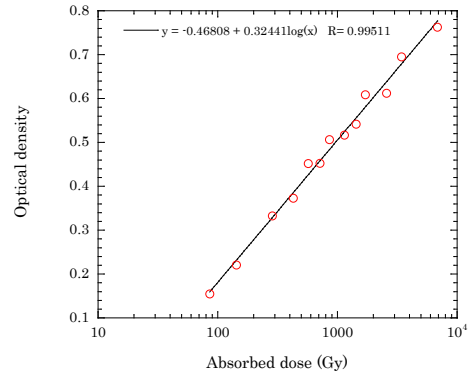


Figure 6: The calibration curve of HD-810 film.

#### 3.2 ビームサイズ計測

ソレノイド電磁石 2 の磁場強度を変化させた時のビームサイズを GAFCHROMIC FILM を用いて計測した。電荷量は  $50\text{pC}$  としておこなった。フィルムで撮影したビームプロファイルを Fig.7 に、ビームサイズの結果を Fig.8 にそれぞれ示す。約  $\sigma = 20\mu\text{m}$  程度までビームを収束することに成功した。本実験時には暗電流の寄与が大きく、それを低減させるために通常運転やシミュレーション時の値である  $4.4\text{MeV}$  から  $3.5\text{MeV}$  程度まで落として測定せざるを得なかった。そのため、シミュレーションの結果よりもやや大きめなビームサイズとなっている。

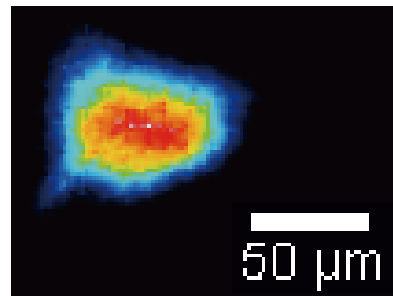


Figure 7: The focused beam profile measured by GAFCHROMIC FILM.

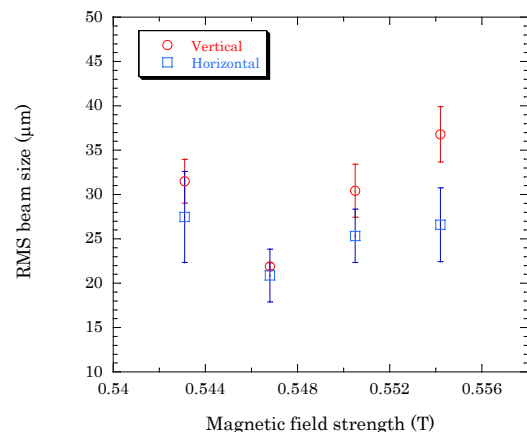


Figure 8: Measured rms beam sizes with various magnetic field strength.

#### 4. まとめと今後の予定

レーザーコンプトン散乱を用いた高強度レーザープロファイルの直接計測手法を提案し、その原理実証を開始した。GPT によるシミュレーションの結果から、強収束ソレノイド電磁石を用いることで電荷量 50pC/bunch でビームサイズを  $\sigma = 10 \mu\text{m}$  にできることを示した。GAFCHROMIC FILM を用いたビームサイズの実測では、 $\sigma = 20 \mu\text{m}$  程度を達成した。

今後はまず、金属ワイヤを疑似レーザーと見立ててそのプロファイルを計測し収束系の評価をおこなう。また、50pC 程度の小さな電荷量でも十分な散乱光子数を得るために、1 つのレーザーパルスに対し複数パルスの電子ビームを衝突できるようにする。さらに、CT 技術を用いた 2 次元のプロファイルを取得する計画である

#### 参考文献

- [1] A. Endo, "High Average Power Pulsed CO2 Laser for Short Wavelength Light Sources" InTech (2012); [http://cdn.intechopen.com/pdfs/32635/InTech-High\\_average\\_power\\_pulsed\\_co2\\_laser\\_for\\_short\\_wavelength\\_light\\_sources.pdf](http://cdn.intechopen.com/pdfs/32635/InTech-High_average_power_pulsed_co2_laser_for_short_wavelength_light_sources.pdf)
- [2] General Particle Tracer; <http://www.pulsar.nl/gpt/>
- [3] International Specialty Products (ISP), "Technical Report GAFCHROMIC HD-810 radiochromic dosimetry film and D-200 pre-formatted dosimeters; Configuration specifications and performance data"; [http://online1.ispcorp.com/\\_layouts/Gafchromic/content/products/hd810/pdf/conspefo.pdf](http://online1.ispcorp.com/_layouts/Gafchromic/content/products/hd810/pdf/conspefo.pdf)