収束電子線を用いた断面プロファイル計測システムの開発

DEVELOPMENT OF THE CROSS-SECTIONAL PROFILE MEASUREMENT SYSTEM USING A FOCUSED ELECTRON BEAM

高橋孝[#, A)], 五十嵐大裕 [A)], 太田昇吾 [A)], 坂上和之 [B)], 遠藤彰 [A)], 鷲尾方一 [A)]
Takashi Takahashi [#, A)], Daisuke Igarashi[A)], Syogo Ota[A)], Kazuyuki Sakaue[B)], Akira Endo[A)], Masakazu Washio[A)]
[A)] Research Institute for Science and Engineering, Waseda University
[B)] Waseda Institute for Advanced Study, Waseda University

Abstract

Nowadays high-power lasers are used in the various fields. For example, EUV (Extreme Ultraviolet) lithography uses LPP (Laser Produced Plasma) method, which applies a high-power laser to Sn droplets for generating plasma. The cross-section profile at the convergent point is very important for the EUV stability. However, the laser power is so high that the existing measurement methods can't directly measure. Therefore, we propose the direct cross-sectional profile measurement system using a focused electron beam generated by an S-band Cs-Te photo-cathode rf-gun. The number of the inverse Compton scattered photon is proportional to the number of the electron and photon at the interaction point. Thus, scanning the high-power laser using a tightly focused electron beam, we can obtain the one-dimensional profile from the scattered photon distribution. When we measure the one-dimensional profile from various angles and use CT (Computed Tomography) image reconstruction method, we can also get its two-dimensional profile. In this conference, we report the wire profile measurement as preliminary experiment, the laser profile measurement and future prospects.

1. はじめに

高強度レーザーの利用は様々な分野で行われている。例えば次世代の半導体露光装置として期待されているEUV（Extreme Ultraviolet）露光装置は、EUV 光発生に高強度レーザーを Sn の液滴に照射しプラズマを発生させる LPP（Laser Produced Plasma）法が用いられている（Figure 1）。この高強度レーザーのスポットでの断面プロファイルは EUV 光発生において重要であるが、高強度レーザーの断面プロファイルを直接測定する方法は未だ確立されていない。そこで我々は光陰極高周波電子銃から得られる収束電子線を用いた逆コンプトン散乱による高強度レーザーの直接プロファイル計測法を提案した[1,2,3]。本研究は逆コンプトン散乱光の検出とレーザーの 1 次元プロファイル取得を目的としている。

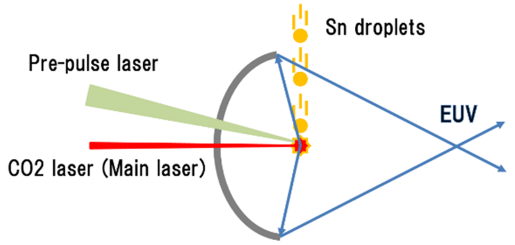

Figure 1: LPP method for generating EUV.

逆コンプトン散乱を用いた直接プロファイル計測法の模式図を Figure 2 に示す。逆コンプトン散乱光量は相互作用している領域の電子ビームの電荷量とレーザーの光子数に比例するので、十分に収束された電子ビームでレーザーをスキャンすれば散乱光分布からレーザーの 1 次元プロファイルを得ることができる。この 1 次元プロファイルをあらゆる角度から取得し、CT（Computed Tomography）画像再構成法を用いれば 2 次元のレーザープロファイルも可能である。

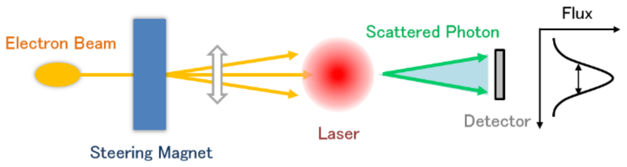

Figure 2: Direct cross-sectional profile measurement system.

2. 金属ワイヤの断面プロファイル測定

2.1 ビームラインセットアップ

高強度レーザーの直接プロファイル計測の予備実験として、レーザーの代わりに金属ワイヤを用いた断面プロファイル計測を行った。電子ビームがワイヤに衝突すると制動放射光が発生する。その光量はワイヤの厚さに依るので、レーザーの場合と同じように制動放射光分布から金属ワイヤの断面プロファイルを得ることができる。ワイヤスキャンのビームラインと電子ビームのパラメータを Figure 3、Table 1 に示す。UV レーザーは垂直に入射され、加速された電子バンチは 2 つのソレノイド電磁石によって収束され金属ワイヤと衝突する。衝突後、電子ビームはもう1 つのソレノイド電磁石で発散を抑制されながらダンプまで導かれる。衝突点直前に設置されたステアリング電磁石を用いて電子ビームを走査することができ、衝突で生じた制動放射光は光電子増倍管（PMT）によって計測される。

taka-taka@suou.waseda.jp

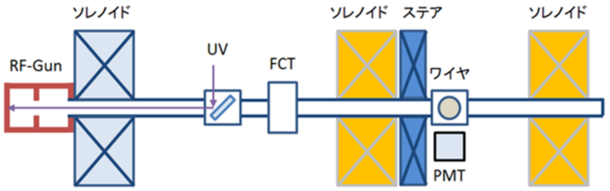

Figure 3: Beamline for wire scan.

Table 1: Parameters of Electron Beam

Energy	4 MeV
Charge	70 pC
Beam size (rms)	50 µm

2.2 1 次元プロファイルと再構成画像

Figure 4 に円形ワイヤの 1 次元プロファイル測定結果を示す。

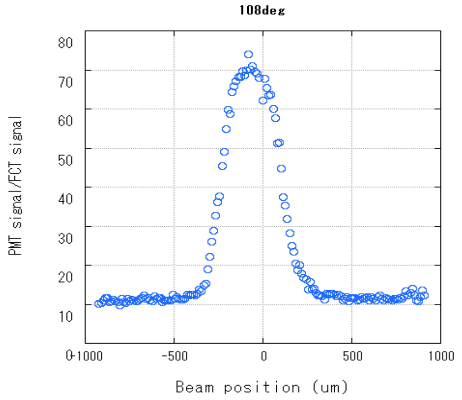

Figure 4: One-dimensional profile of the round wire.

電荷量と PMT シグナルにはほぼ線形の関係があるので、電荷量の揺れの影響を抑えるために PMT シグナルを電荷量で割った値をプロットしている。このグラフから円形ワイヤに対応した 1 次元プロファイルが得られていることが分かる。次にこの 1 次元プロファイルを 45 アングルから取得し、CT 画像再構成法を用いて再構成した画像を Figure 5 に示す。この画像は一般的なフィルタである Ramp フィルタを用いて再構成している。また実験で用いた円形ワイヤの断面をレーザー顕微鏡で撮影した画像を Figure 6 に示す。再構成画像は円の形状を再現することができており、円形ワイヤの断面とほぼ一致していると言える。

2.3 フィルタによる比較

CT 画像再構成法には画像を鮮明にするためのフィルタが存在し、これを用いた画像の比較を行った。今回は Ramp フィルタ、Shepp フィルタ、Chesler フィルタの 3 種類を用いて再構成を行った。Ramp フィルタは最も単純なフィルタであり

$$G_R(z) = |z| \qquad (1)$$

で表される。高周波成分を増強し画像を鮮鋭にするが、同時に高周波ノイズも増強する。Shepp フィルタはデータ

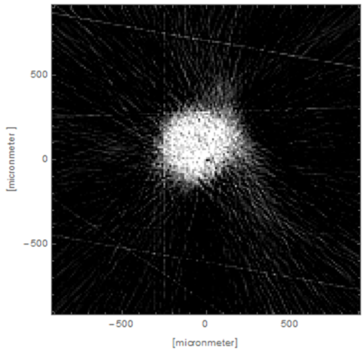

Figure 5: Two-dimensional profile of the round wire by CT method.

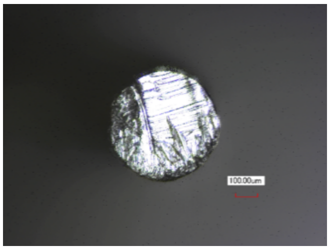

Figure 6: Cross-sectional image of the round wire.

の間隔 δ を用いて

$$G_S(z) = \frac{|\sin(\pi\delta z)|}{\pi\delta} \qquad (2)$$

と表される。Ramp フィルタよりも高周波成分を抑制するフィルタとなっている。Chesler フィルタは

$$G_C(z) = \frac{|z|}{2}\{1 + \cos(2\pi\delta z)\} \qquad (3)$$

で表され Shepp フィルタよりもさらに高周波成分を抑制するフィルタとなっている。

以上のフィルタを用いて再構成した画像を Figure 7 から Figure 9 に示す。Ramp、Shepp、Chesler の順にワイヤ周りの細かい線が薄くなっている。これは高周波成分を抑制したことで高周波成分に含まれるノイズが軽減されたためだと考えられる。しかし逆に Ramp、Shepp、Chesler の順にワイヤの輪郭がぼやけてしまっていることも分かる。したがってノイズを軽減しつつ、画像のシャープさを維持するには Shepp フィルタが最適だと結論付けられる。

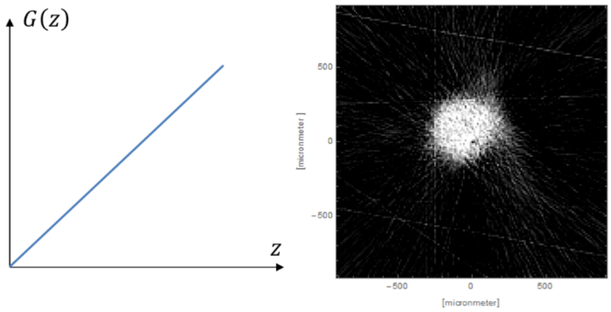

Figure 7: Ramp filter.

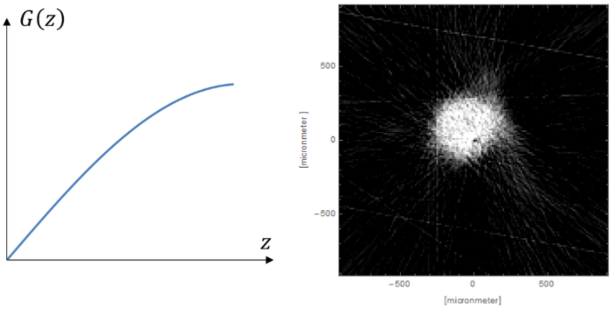

Figure 8: Shepp filter.

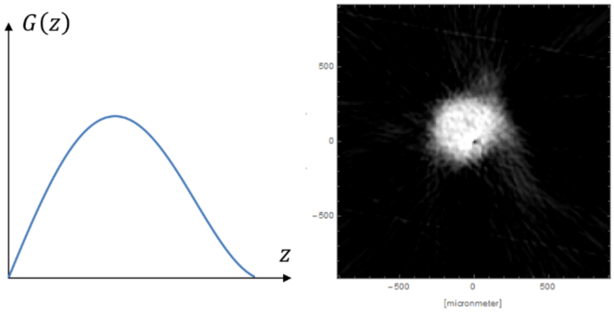

Figure 9: Chesler filter.

3. 高強度レーザーの１次元プロファイル測定

3.1 ビームラインセットアップ

高強度レーザーを用いた逆コンプトン散乱実験におけるビームラインを Figure 10 に示す。また電子ビームとレーザーのパラメータを Table 2 に示す。

UV レーザーは斜めから入射され、加速された電子バンチは 2 つのソレノイド電磁石を用いて収束され衝突チャンバーへと輸送される。衝突チャンバーを通過した電子ビームはもう 1 つのソレノイド電磁石で発散を抑制されながら偏向電磁石によって曲げられ、ダンプまで導かれる。衝突点直前に設置されたステアリング電磁石を用いて電子ビームを走査することができ、衝突で生じた逆コンプトン散乱光は 0.92m 後方に設置された MCP（Micro-Channel Plate）に入射する。衝突用レーザーには CO_2 レーザーを用いており、ミラーによって輸送され、衝突チャンバー直前のレンズで収束され電子ビームと衝突する。このレンズはステージによって上下に移動できるようになっており、これによって CO_2 レーザーの位置を微調整することができる。

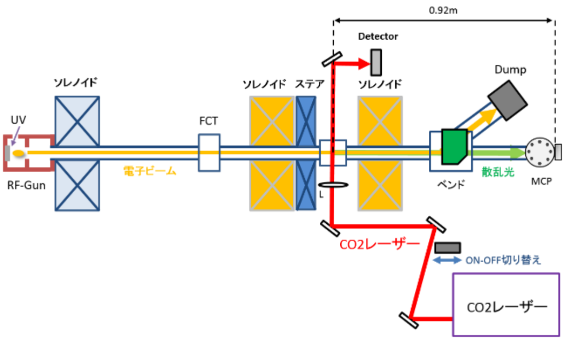

Figure 10: Beamline for Laser profile measurement.

Table 2: Parameters of Electron Beam and Laser.

Electron beam	
Energy	4 MeV
Charge	70 pC
Beam size (rms)	50 µm
Laser	
Energy	800 mJ/pulse
Pulse length (FWHM)	70 ns
Spot size	117 µm

衝突チャンバーを通過した CO_2 レーザーはディテクターに入射する。また光路の途中にステージに乗せたダンプを設置し、これを出し入れすることによってレーザーの ON、OFF が切り替えられるようになっている。

4.2 1 次元プロファイル測定

逆コンプトン散乱光シグナルの測定結果を Figure 11 に示す。測定方法は電子ビームと CO_2 レーザーの衝突毎に MCP によって得られるシグナルをオシロスコープで読み取り、レーザーの ON、OFF でのシグナルの変化を見た。

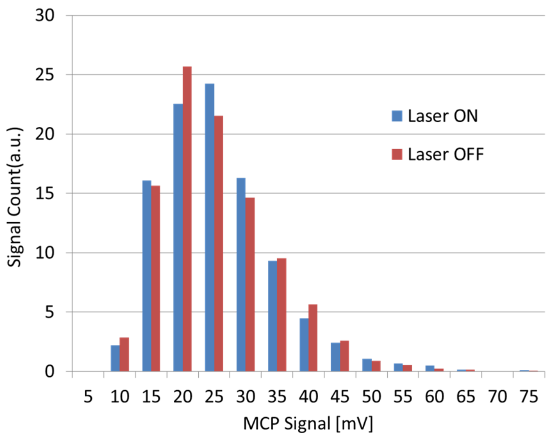

Figure 11: Measurement result of the inverse Compton scattered photon signal.

グラフの横軸は MCP のシグナル、縦軸はカウント数を全体のカウント数で割って正規化した値である。このグラフよりレーザーの ON、OFF でヒストグラムのピーク位置が移動していることから逆コンプトン散乱光が検出できていることが分かる。

次にレンズを動かして 1 次元プロファイルを測定した結果を Figure 12 に示す。グラフの横軸はレーザーの位置、縦軸は 15~35mV にある Laser ON の平均値を Laser OFF の平均値で割った値である。このグラフからある程度の外形は分かるものの、正確なレーザープロファイル取得には至らなかった。原因としてはビームロス等によるバックグラウンドがシグナルに対して大きいことなどが考えられる。

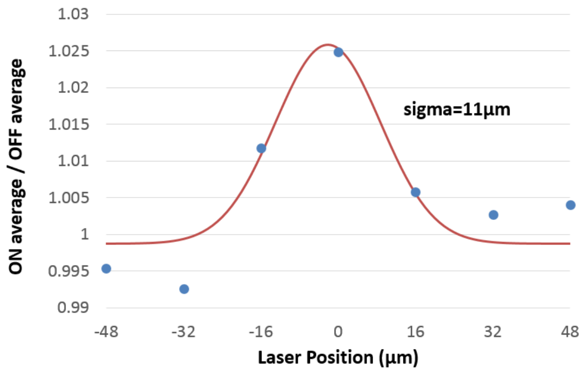

Figure 12: Measurement result of the One-dimensional Laser profile.

4. まとめと今後

収束電子ビームを用いて、金属ワイヤ及び高強度レーザーのプロファイル測定を行った。金属ワイヤプロファイル測定は二次元断面画像再構成に成功し、プロファイル計測法の原理実証に成功した。また、フィルタを駆使することでノイズの軽減が確認され、さらなる改善が見られた。

レーザープロファイル測定では逆コンプトン散乱光の検出には至ったが、ガウス関数の形をした一次元プロファイル測定には至らなかった。今後は電子ビーム調整の最適化を行い、バックグラウンドを減らすとともにレーザーの増強等も考慮に入れ、詳細な 1 次元プロファイル取得を目指す予定である。

参考文献

[1] D. Igarashi *et al.*, Proceedings of IPAC2016, THPOW057 (2016); http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ipac2016/papers/thpow057.pdf
[2] R. Sato *et al.*, Proceedings of IPAC2014, WEPRO116 (2014); http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/IPAC2014/papers/wepro116.pdf
[3] Y. Yoshida *et al.*, Proceedings of IPAC2013, THPWA013 (2013); http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/ipac2013/papers/thpwa013.pdf