

加速器科学・放射線科学

研究代表者 鷲尾 方一
(先進理工学部 応用物理学科 教授)

1. 研究課題

我々は加速器から得られる高品質電子ビームを用いて半導体リソグラフィーや、産業に資する新材料に関する研究を行っている。

パーソナルコンピュータや携帯端末の性能を決定している集積回路は、基板（ウェハ）に微細な回路パターンを転写するリソグラフィー技術により作製されている。本研究において対象としている次世代リソグラフィーに利用される光源として、EUV（Extreme Ultra Violet）光があるが、この光源開発について民間企業との共同研究を実施してきた。

現在、大強度の EUV 光源や加工技術の確立が急がれるなかで、我々は特に、Sn ドロプレットに CO₂ レーザーを集光して EUV 光を発生（LPP 法）させる際のレーザー集光プロファイルの計測について研究を続けてきた。

一方、我々の持つ物質と放射線の相互作用に関する詳細な知見をもとに、放射線施設などの多様な場所において使用可能な高い耐放射線性を持つゴム等の素材開発にも取り組んでいる。（4.2 参照）

本稿では、この中でも先端的なリソグラフィー技術への新たな計測システムについて報告する。

2. 主な研究成果

EUV リソグラフィー高度化のためのレーザープロファイル計測技術

レーザーコンプトン散乱法による高強度レーザーの集光点における直接評価技術を開発している。レーザーコンプトン散乱法は高エネルギーの電子ビームによってレーザー光を散乱させる技術で、高強度のレーザーでも非破壊で計測することが可能である。特に、現在目的としている 10 μm の波長のレーザーに対して、電子線をこれより小さく収束することが容易であることから、集束電子線を用いて集光点を直接評価する。実際に使用されるレーザーパワー 20kW を超えるような高出力 CO₂ レーザーでは、光学系への熱負荷による変形などが危惧されており、高強度集光点ではシミュレーションによる予測との差異が予想される。そこで集光点プロファイルを直接計測することで集光に関する最適化が可能となる。また、電子線の走査を多方向から行うことによって CT 法によるレーザースポットの 2D イメージの取得も視野に入れることが可能である。2015 年度においては、CT 手法の原理実証として疑似的に金属ワイヤをレーザーに見立てた断面プロファイルの計測、及びレーザーコンプトン散乱法によるプロファイル計測を目的とし、研究開発を行った。

2-1 金属ワイヤを用いた CT 手法による断面計測の実証

実験セットアップ

以前の報告と重複する部分もあるため、要点のみを示す。まず、以下の図 1 に集束電子線と金属

ワイヤ(及びレーザー光)の衝突点付近のセットアップ図を示す。

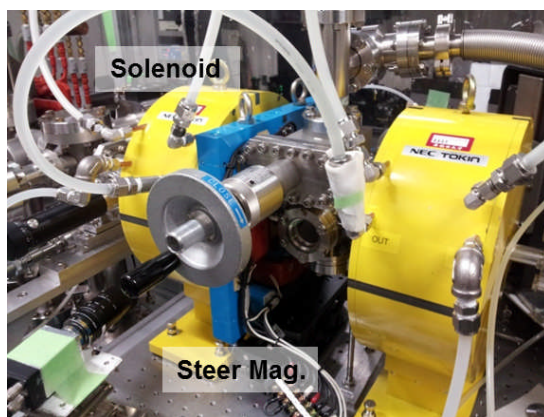


図 1 : 衝突点付近のセットアップ

黄色の円形の電磁石が電子線用の強集束レンズとなっており、これを用いて電子線を集束する。電子線は左から右に進行し、1つ目のレンズ直後のステアリング電磁石(青色)によって走査される。衝突点は2つのレンズの中央に置かれており、真空窓が配置されているのが確認できる。以下の図に現在達成している電子線のサイズ計測結果と走査の様子を示す。

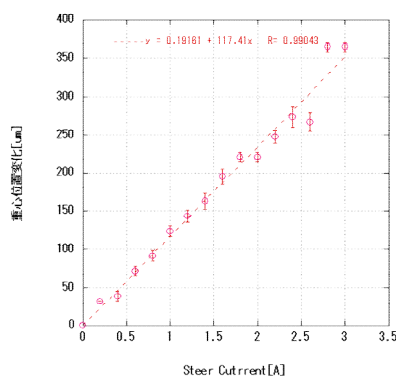
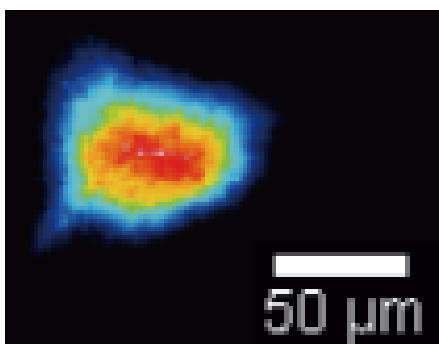


図 2 : 集束電子線プロフィール(左) 電子線走査(右)

図 2 の左図から、全幅で $50 \mu\text{m}$ 程度、rms で $20 \mu\text{m}$ の電子線が得られている。右図には横軸にステアリング電磁石の電流値を変化させた際のビーム位置の走査の様子を示している。2.5A で約 $300 \mu\text{m}$ 、最大±5A 印加することが可能であるため、十分な走査量を確保することができていることがわかる。

金属ワイヤの断面プロフィール計測試験

前述のセットアップを用いて、金属ワイヤの断面計測を行った。金属ワイヤにはアルミニウムの約 $450 \mu\text{m}$ の円形のワイヤを用いている。まず以下に 1次元プロフィールの計測結果を示す。

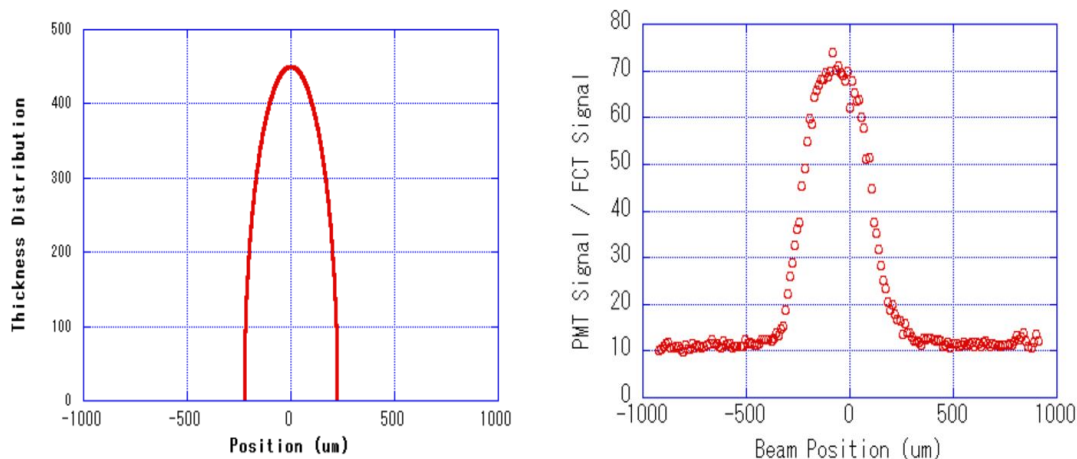


図 3(左)円形のワイヤの1次元プロファイルの計算値 (右)計測したワイヤの1次元プロファイル

図 3(左)は円形を想定した際の1次元プロファイルの計算値を示している。(右)の測定結果と比較すると、サイズは非常に良く一致していることがわかる。両脇の裾の部分計算と比較して少し『キレ』が悪くなっているのは、電子線のプロファイルの大きさに由来するものと考えている。このような1次元プロファイルを金属ワイヤを回転させながら取得し、CT手法を用いて再構成することで断面のプロファイルを得ることができる。以下にその再構成結果と顕微鏡で撮影したワイヤ断面の画像を示す。

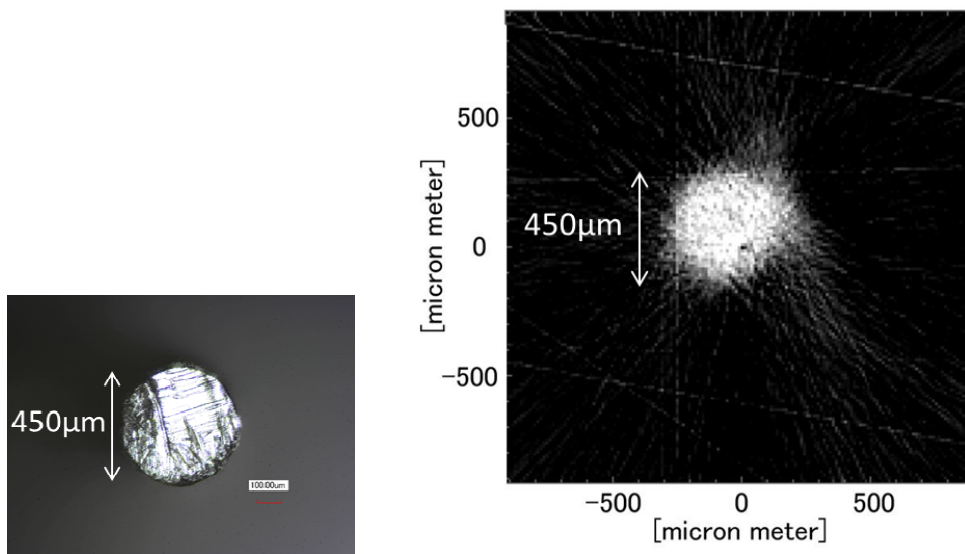


図 4 : (左)顕微鏡によるワイヤ断面写真(右)CT法によって再構成したワイヤ断面計測結果
再構成に用いた角度の情報不十分であるため、やや不鮮明な部分も残っているが、左右を比較して大きさなど非常に良い一致をしていることがわかる。

3. 共同研究者

大島明博 (理工研 招聘研究員、大阪大学・産業科学研究所特任研究員)

坂上和之 (高等研・助教)

保坂 勇志 (先進理工学研究科・共同原子力専攻・助手)

田川精一（研究院、招聘研究教授、大阪大学・産業科学研究所特任教授）

伊藤 政幸（理工学研究所・招聘研究員）

三浦 喬晴（理工学研究所・招聘研究員）

佐々木 隆（理工学研究所・招聘研究員）

4. 研究業績

4.1 学術論文

Determination of the polarization states of an arbitrary polarized terahertz beam: Vectorial vortex analysis, Toshitaka Wakayama, Takeshi Higashiguchi, Hiroki Oikawa, Kazuyuki Sakaue, Masakazu Washio, Motoki Yonemura, Toru Yoshizawa, J. Scott Tyo, and Yukitoshi Otani, Scientific Reports 5, Article number: 9416 1-9, doi:10.1038/srep09416

4.2 総説・著書

早稲田理工 PLUS2015、pp26-28

4.3 講演

五十嵐大裕他、レーザーコンプトン散乱による EUV 光発生と大強度レーザープロファイル計測への応用、次世代レーザー技術と EUV・軟 X 線光源に関する研究会、蔵王、1 月

坂上和之他、レーザーパルス蓄積共振器開発、次世代レーザー技術と EUV・軟 X 線光源に関する研究会、蔵王、1 月

坂上和之他、Recent progress in photo-cathode rf electron gun as a pulsed radiation source ICRR、京都、5 月

五十嵐大裕他、集束電子ビームを用いた高強度レーザーのプロファイル測定、日本物理学会年次大会、仙台、3 月

高橋孝 逆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システムの開発、ビーム物理研究会 2015 年 11 月 東海村

4.4 受賞・表彰

高橋孝 日本原子力学会フェロー賞 (2016 年 3 月)

4.5 学会および社会的活動

日本放射線化学会 副会長

日本放射線研究連合 (JARR) 副会長

日本アイソトープ協会 理事

5. 研究活動の課題と展望

今回の結果から、次世代リソグラフィ技術に資する新しい計測法について、その原理実証を行うことができ、新しいステップへの展開が期待される。各種産業への新しい実用化技術について一層の支援が期待できる。