

「次世代エレクトロニクスデバイスの創出に資する
革新材料・プロセス研究」
平成20年度採択研究代表者

H24 年度 実績報告

木下博雄

兵庫県立大学・高度産業科学技術研究所・教授

コヒーレント EUV 光を用いた極微パターン構造計測技術の開発

§1. 研究実施体制

(1) 「木下」グループ

- ① 研究分担グループ長： 兵庫県立大学・教授・木下博雄
- ② 研究項目
 - ・コヒーレントスキヤトロメトリー顕微鏡の開発

(2) 「永田」グループ

- ① 研究分担グループ長： 理化学研究所・専任研究員・永田豊
- ② 研究項目
 - ・13 nm 高次高調波発生

(3) 「藤田」グループ

- ① 研究分担グループ長： 大阪大学・准教授・藤田尚徳
- ② 研究項目
 - ・高出力コヒーレント EUV 光の発生
 - 1) 高平均出力 fs レーザーの開発
 - 2) 高安定・高効率高次高調波光の発生

§ 2. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(3-1)に対応する)

概要

本 CREST 研究は 2008 年より開始した。当初は放射光 (SR) を光源として、装置を構成し、X 線回折顕微法でよく用いられている像再生アルゴリズム HIO を用い、パタン欠陥の検出を進めた。HIO は微細な生物試料観察には適したアルゴリズムであるが、マスク検査のような大面積には適さない。そこで、大面積検査が可能なタイコグラフィ法を基にアルゴリズムを作成し、パタン欠陥検査を進めた。この結果、Line & space パタンの中の 1 本のラインが細くなっている欠陥検出 (2nm) が可能となった。また、マスクパタンの CD 評価もマスク全面で 0.1nm (rms) の精度で評価が可能となった。しかし、点欠陥などのパタン中の微細な欠陥は SR 光の強度では観察できなかった。そこで、並行して高次高調波 (HHG) 光によるコヒーレント光源の開発を進めていたが、昨年度までに発散角 0.17mrad という、世界最高の値を得、出力パワーも SR の 10 の 6 乗倍の 1 μ W のフルコヒーレント光を得た。しかしながら、ビーム安定性に問題が残った。今年度ビーム安定性の改善を図り、点欠陥の観察が可能となった。また、タイコグラフィ法の改良アルゴリズムを開発し、像再生精度の向上を図った。さらに、当初計画にはない、多層膜下の異物によって生じる位相欠陥の観察を試み、位相欠陥の 3 次元的な像再生を実現した。これらの成果は、昨年度より進めている NEDO の再委託テーマである μ CSM による位相欠陥の 3 次元像再生への見通しを明らかにした。以下に個別の成果を述べる。

○像再生アルゴリズムの改良と位相像評価

本年度、改良アルゴリズムを採用し、周期・非周期パタンの位相分布も同時に像再生できた。また、位相欠陥の像を再生し、その位相分布を導出できた。これらの位相情報は従来の EUV 領域の顕微鏡では得られておらず、露光機シミュレーションによる転写特性評価を可能にする。具体的には以下である。

平成 22 年度に報告したように、これまで像再生アルゴリズムには CSM に適したタイコグラフィ法を採用している。タイコグラフィ法ではサンプルの位置をずらしながら複数回照明光を照射し、それぞれの回折強度を記録する。ここで、照明形状はあらかじめ導出しており、各照明領域は重なっている。記録した回折強度に対して拘束条件を課したフーリエ変換と逆フーリエ変換による反復計算を適用し、徐々に位相回復する。図 1 (a)にこれまでのアルゴリズムで像再生した結果を示す。十字パターンのおおよその構造は再構築できているが、左右の構造が非対称になり、像再生精度が低かった。本年度、改良タイコグラフィ法を適用し、同じパターンを像再生した結果を図 1 (b)に示す。対称な十字パターンが像再生でき、元パターンに忠実な形状となった。具体的なアルゴリズムの改良点は、像再生に利用する照明形状も反復計算時に最適化を図っている。これにより照明形状導出時の誤差を低減でき、像再生精度を飛躍的に向上できた。(§ 3-1 論文 No.4)

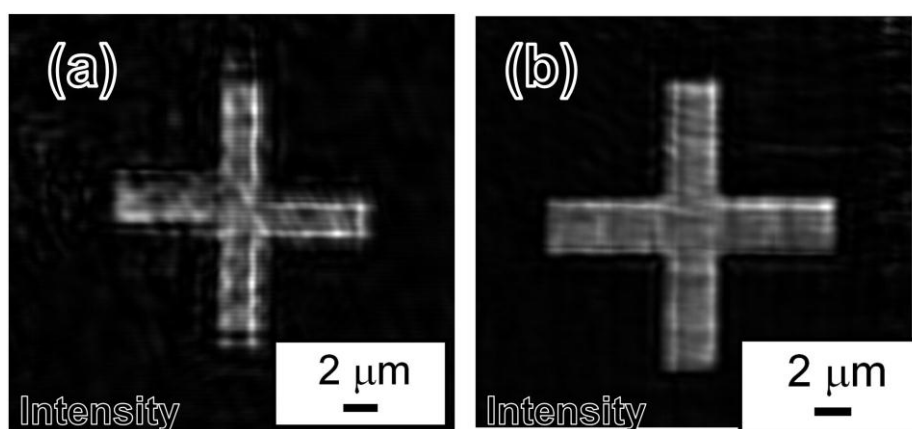


図 1. 十字パタンの再生像。(a) アルゴリズム改良前。(b) アルゴリズム改良後。

像再生アルゴリズムでは、CSM で記録された回折画像(周波数空間の強度情報)に対して、反復計算により周波数空間の位相情報を再構築し、図 1 に示すような実空間の強度像を得る。このとき、CSM では実空間の位相情報も同時に像再生され、位相像も得られる。これは従来の強度像を観察する顕微鏡とは異なり、CSM の大きな特徴である。図 1 (b)で再生した十字パタンの振幅と位相像を図 2 に示す。周辺の吸収体と十字パターン部では 145° 位相が変化しており、計算値と良く一致した。

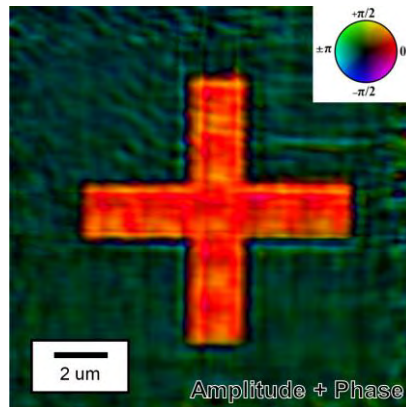


図 2. 十字パタンの振幅と位相像。
振幅は明度、位相は彩度で表示している。

また、図 3(a)には十字パターンと同じマスク上の 88 nm ラインパタンの振幅と位相の再生像を示す。図 3(b)にはパターン部分の位相と強度プロファイルを示した。位相はライン部分とスペース部分で 145° の位相差となり、吸収体が同じ厚さである十字パタンの結果と一致した。よって、88 nm ラインと非常に小さな構造中の位相まで精度良く再生できた。

近年、EUV リソグラフィにおいても位相を利用して、プロセスウィンドウを拡大する位相シフトマスクが提案されている。こうした EUV リソグラフィの開発状況のなかで、CSM は位相シフト効果を評価できるため、位相観察顕微鏡として種々の位相シフトマスクへの適用が可能である。

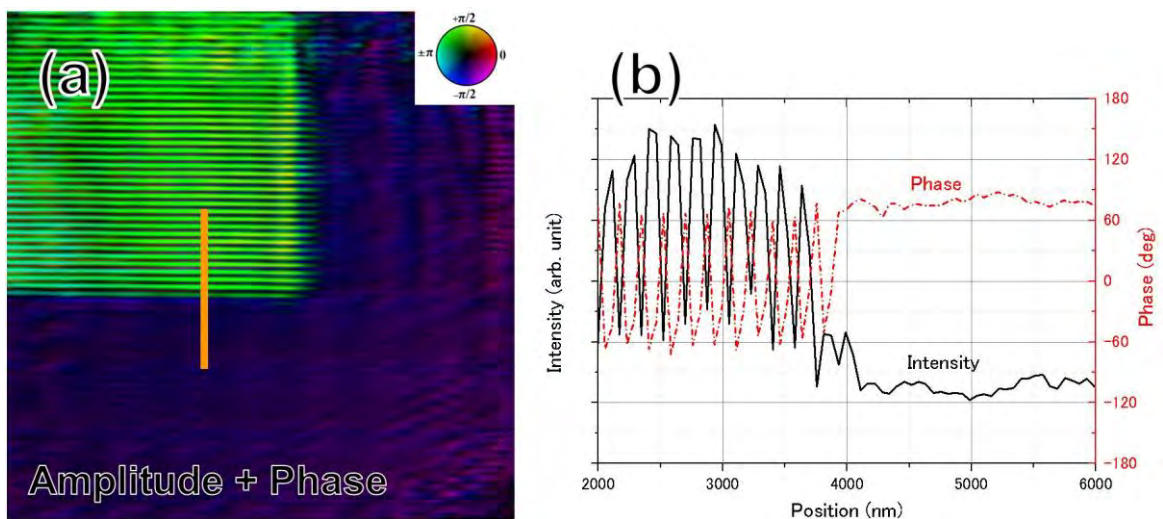


図 3. 88 nm L/S パタンの(a) 振幅・位相像。(b) オレンジ線部分の強度と位相プロファイル。

○位相欠陥の位相像再生

前節で紹介した改良アルゴリズムを用いて、今回の CREST の当初計画外ではあるが位相欠陥の観察を進めた。観察結果の像再生を図 4(a)に示す。この位相欠陥は多層膜下にバンプ構造を形成している。図中強度は明度、位相は彩度で表示している。また、このプログラム位相欠陥は AFM 測定結果より、多層膜表面で $1\ \mu\text{m}$ 角で高さ $6.2\ \text{nm}$ の構造が並んでいる。同サンプルを、結像型の顕微鏡である EUV 顕微鏡で観察した欠陥像を図 4(b)に示す。強度像としては CSM での像再生結果と従来型の顕微鏡と同じ形状が再生できた。また、強度情報に加えて CSM では位相情報も再生できており、位相欠陥の端の形状だけでなく、3次元的な形状（位相形状）を評価可能である。

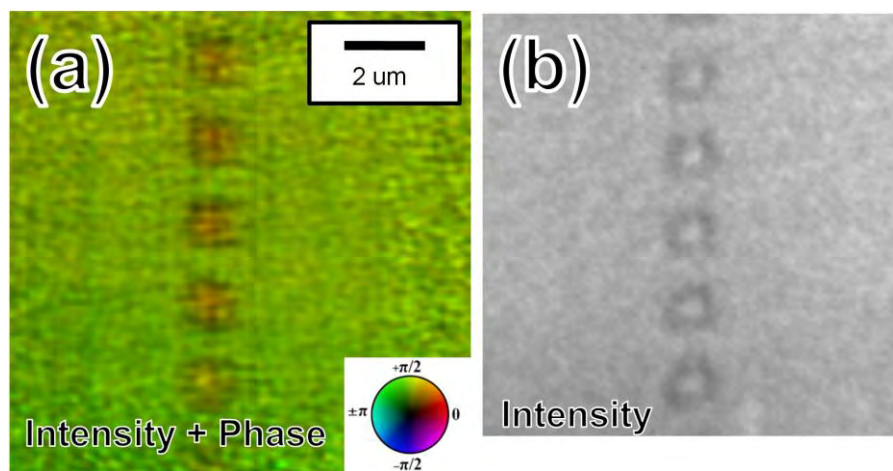


図 4. $1\ \mu\text{m}$ 角のプログラム位相欠陥像。(a) CSM, (b) EUV 顕微鏡。

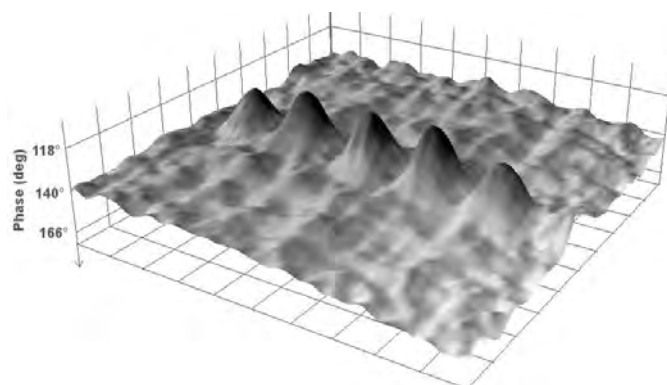


図 5. $1\ \mu\text{m}$ 角のプログラム位相欠陥の位相分布の 3次元表示。

CSM で評価した位相情報を図 5 に三次元的に示す。位相差より導出した欠陥の高さは $6.1\ \text{nm}$ であり、AFM 測定結果と良く一致した。この位相欠陥の EUV での位相情報は欠陥の転写特性や、欠陥修正のシミュレーションに必須の情報である。

この欠陥の位相像観察の成果により、本研究課題より派生し、11 年度 NEDO プロジェクトへ採択されたマイクロ CSM による三次元像再生の見通しを明らかにできた。

○周期パタン中の点欠陥の検出

これまでに放射光 CSM、高次高調波 CSM システムの両方で、周期パタン中の L/S パタンの線欠陥は 2 nm まで検出できた。しかし、パタンの一部が欠損、付着した孤立の点欠陥は検出できなかった。この原因として、SR 光の場合は光強度が低いことが挙げられた。そこで、HHG 光による検査を進めたが、回折光の広がりがかぶってしまったためと予想された。図 6(a)に従来の条件で hp 180 nm ホールパタンを観察した回折画像を示す。中心に 0 次光が記録され、その周辺に回折光が記録されている。各回折光それぞれが広がりを持っている。この回折光広がりには $\phi 10 \mu\text{m}$ の入射ピンホールで生じる Fraunhofer 回折の回折環と、集光ミラーや折り返しミラーからの散乱光が主成分である。そこで、図 7 に示すように折り返しミラーの下流に $\phi 300 \mu\text{m}$ のピンホールを設置し、これらの迷光成分を除去した。迷光除去後の回折光画像を図 6(b)に示す。ピンホールにより迷光成分が除去された。

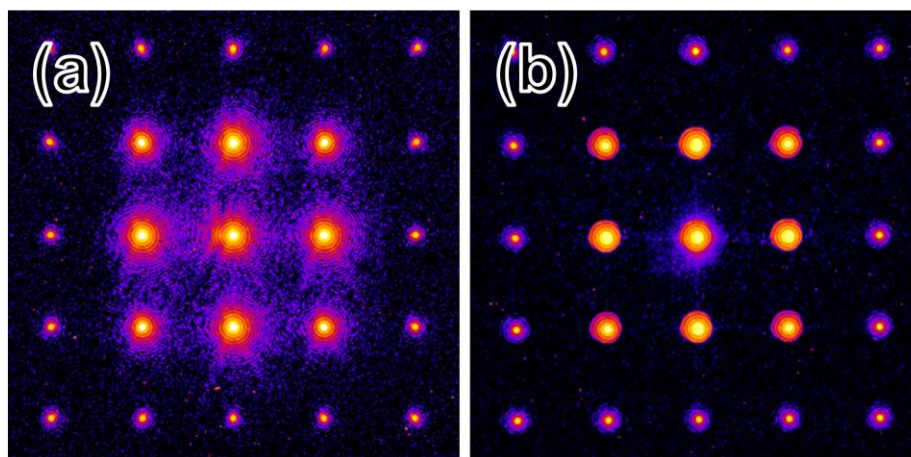


図 6. hp 180 nm ホールパタンからの回折光画像。強度ログ表示。±5.5° の取り込み角度範囲を表示。(a) 回折環遮光用ピンホールなし。(b) あり。

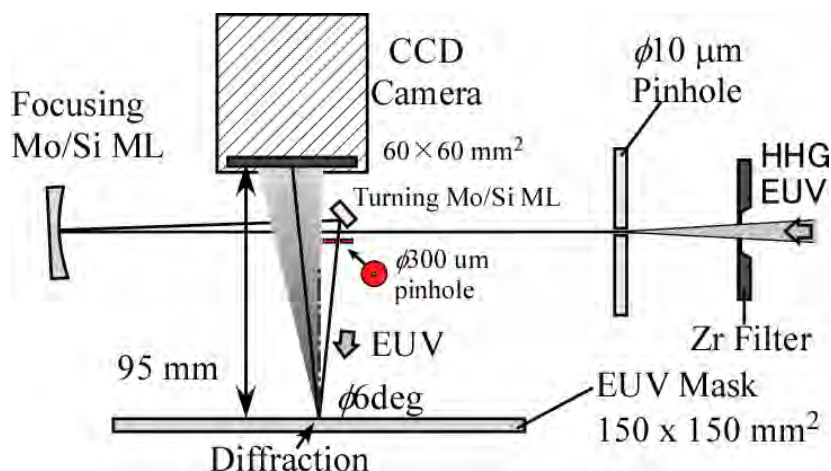


図 7. 高次高調波を光源とした CSM 光学系と、回折広がり遮光用ピンホール（赤色）の設

置の概要図。折り返しミラー下流にピンホールを設置し、回折広がりや散乱光をカットした

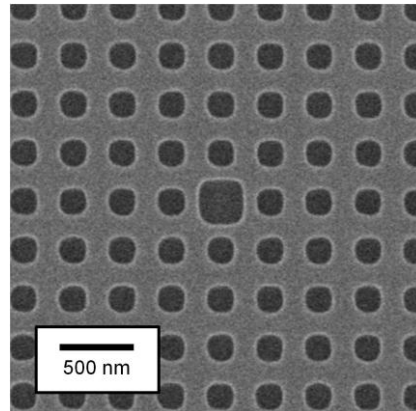


図 8. CSM で観察した hp 180 nm のホールパターン中のオーバーサイズ点欠陥の SEM 画像。周期パターン中のホールひとつが 70% (120 nm) オーバーサイズしている。

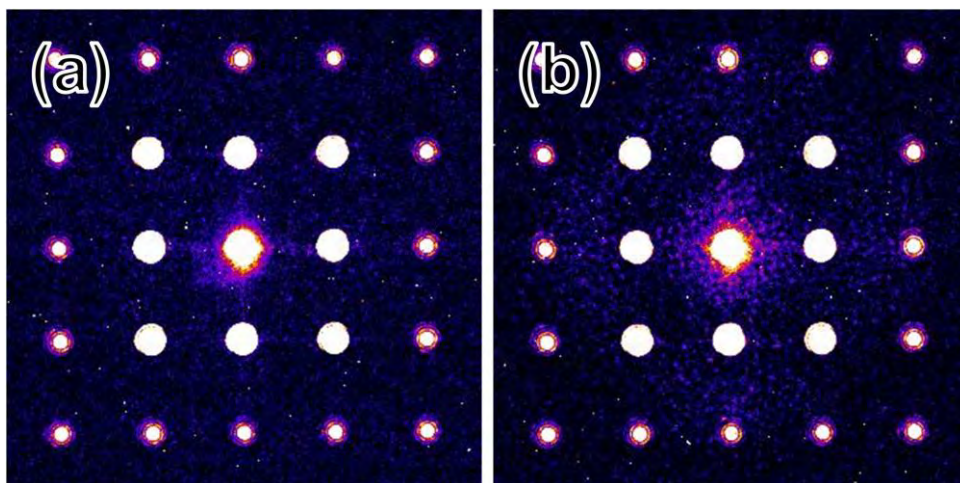


図 9. CSM の回折画像。観察サンプルは図 8 のホールパターン、(a)欠陥なし、(b)オーバーサイズ欠陥有り。

観察したプログラム欠陥マスクの SEM 画像を図 8 に示す。Hp 180 nm のホールパターン中の 1 つのホールが 70% (120 nm) オーバーサイズした点欠陥である。図 9(a)に欠陥なしのホールパターン部分、図 9(b)に欠陥ありのホールパターン部分を CSM にて観察した回折画像を示す。

図 9(b)の中心の 0 次光の周辺に広がった回折信号が点欠陥からの回折信号で有り、欠陥を検出できている。よって、高次高調波コヒーレント EUV 光源として利用した CSM において、点欠陥を検出できることを実証できた。 今後は、より欠陥の回折信号を増加させ、パターンも含めた欠陥の形状解析を進めたい。

2-2. 永田グループ：

永田グループは本年度、高次高調波光源の実用化に向けた高度化に取り組んだ。本研究において高次高調波の役割は長時間にわたり安定的に高出力のコヒーレント EUV 光を提供することである。励起レーザーの出力は一定であるので EUVL マスク上でのフルエンス増大には高次高調波の発生条件の最適化とともにビームの空間的な安定性向上が必要となる。高次高調波の発生条件の最適化でもっとも重要な点は位相整合の取り方であり、集光光学系の **F-number** に合わせて励起レーザー用アパーチャサイズとガス圧力を制御する必要がある。今回アパーチャを電動タイプに変えたところ励起レーザーのビーム径($1/e^2$)12 mm に対して口径 15~17mm のときに 0.1mm 以下の精度で調整することで高次高調波スペクトル強度分布の再現性が得られた。このことによりガスの圧力制御と合わせ高次高調波のスペクトル強度分布やビーム拡がり角を細かく制御することが可能となった。現状では最小のビーム拡がり角に対して 3 倍程度まではビーム拡がり角の制御が可能である。また、励起レーザー集光用ミラーの曲率半径を 3m から 3.5m, 4m に変更して位相整合条件の最適化を図った。その結果、曲率半径 3.5m のミラーの使用時に 13.5 nm 高次高調波出力が 3 倍以上増大した(図 10 参照)。またビーム拡がり角として 0.15 mrad を実現した。さらに、曲率半径 4m のミラーの使用時には出力増大はほとんどないもののビーム拡がり角 0.12mrad を実現した。このとき観測された高次高調波スペクトルは長波長側の強度が高く明らかに短波長の高次高調波を発生させるにはレーザー強度が足りないことを示していた。実験条件数は少ないもののビーム拡がり角は曲率半径にほぼ反比例することを確認した。また、励起レーザーのパルスエネルギー増加による高出力化のスケールアップが成り立つことを確認した。

ガウシアンビームではビーム拡がり角の縮小はスポットサイズの増大と同意義であるため励起レーザーの空間的な揺らぎが同じであれば高次高調波を同じスポットサイズに集光した時の揺らぎは小さくなる。現行の装置では高次高調波の出力端のピンホールイメージを CSM のピンホール(直径 10 μ m)に等倍で転送している。そのためビームの空間的揺らぎはマスクへの照射光量の減少につながる。そこで、高次高調波の空間的な揺らぎの低減を目的として励起レーザーに対してビームロックシステムを導入した。最初に装置評価のため光学定盤上で励起レーザーのビームロックをおこなった。このとき角度(集光位置)検出用 PSD の手前にビームスプリッターを挿入してビームを分岐した。

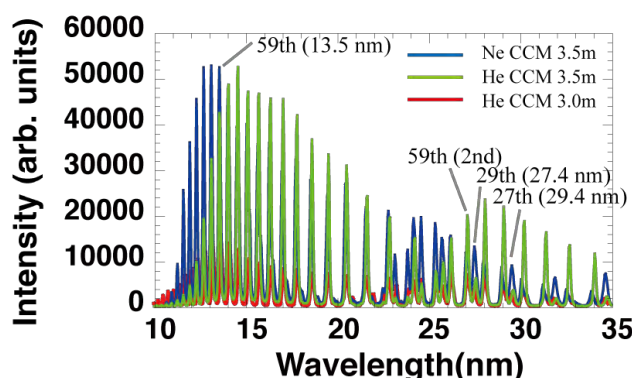


図 10. 高次高調波のスペクトル強度の集光ミラー依存性.

その焦点位置に CMOS カメラをおいてビームの重心を測定することで角度揺らぎの評価をおこなった。その結果ビーム揺らぎとして縦方向、横方向にそれぞれ $0.57 \mu\text{m}$ (rms), $0.42 \mu\text{m}$ (rms)を得た。さらにビーム位置安定化用 piezoアクチュエータは光学定盤上に設置した状態で位置検出用および角度検出用 PSD を励起レーザー集光用チャンバーに取り付けて仮想焦点位置でのビームロックを試みた。このとき実際の焦点位置との誤差を最小とするため最後の折り返しミラーの透過光を使用してビームロックをおこなった。このとき角度検出用 PSD 上でビーム揺らぎとして縦方向、横方向とも $0.6 \mu\text{m}$ (rms)を得た。

高次高調波は空間的にコヒーレントであるためビーム径に対してビーム揺らぎが十分小さければ CSM への入射用ピンホールを必要としない。出射口でのイメージを非球面ミラーなどで直接 EUVL マスク上に縮小結像させれば使用するミラーは 1 枚のみとなりスループットが大幅に向上する。さらに、ピンホールを使用したときに発生するベッセルビームのリングも発生しないため欠陥検出にも有効である。

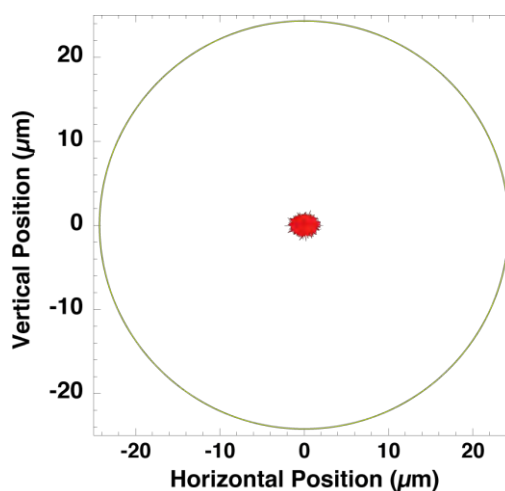


図 11. 励起レーザー光の重心の XY プロットおよび仮想の高次高調波スポットサイズ。

2-3. 藤田グループ

超短パルスレーザーの最適化・高出力化（高出力励起光・超短パルスシード光・OPCPA等）を実施した。

① OPCPA 励起光の短パルス化

kW 級 YAG レーザーの高出力高効率波長変換を実施した。SBS 位相共役鏡による励起光パルスの高ビーム品質化、短パルス化を実施した。図 12 に、励起光とシード光のパルス波形を示す。SBS 位相共役鏡にテーラードパルスを導入することにより、パルス幅 500ps (FWHM) 以下の短パルス化に成功した。これにより、励起光のピーク強度が高められ、OPCPA の利得が大幅に改善された。また、シード光と励起光の時間マッチングが改善され、OPCPA の高出力化が進展した。

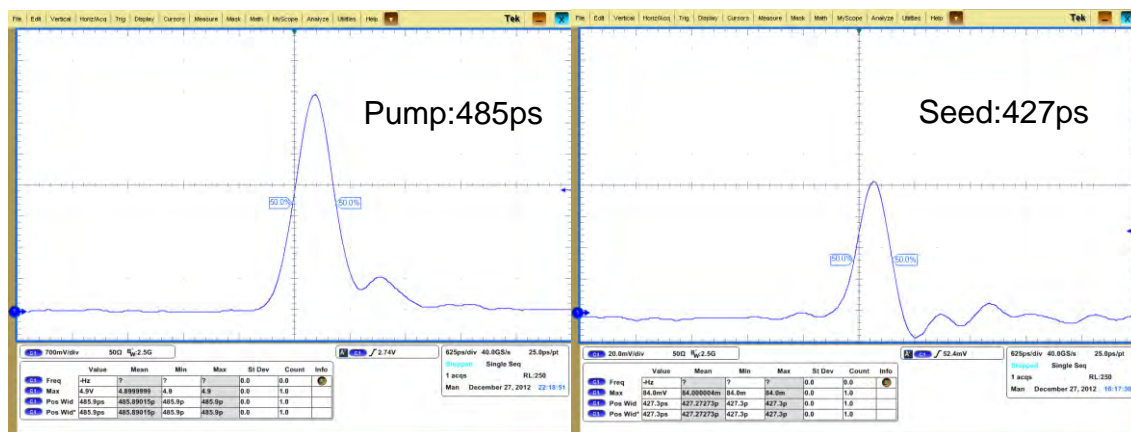


図 12. 励起光とシード光のパルス波形.

② OPCPA 増幅

シード光源である分散補償モード同期ファイバー発振器の最適化を実施し、図 13 に示す発振スペクトルとパルス波形を得た。励起波長を 975nm から 915nm に変更し、発振スペクトル幅を 140nm まで拡大し、ファイバー発振器では世界最短の 21.6fs パルスの発生に成功した（§ 3-1 論文 No. 3）。975nm 励起の場合は、図 13 で見られる 960-1000nm 領域のスペクトルが得られないことに対し、915nm 励起では、960-1000nm 領域と 1040-1080nm 領域の両方のスペクトルが得られている。パルス波形の計測結果は、フーリエ変換限界に比べてペダスタル成分は大きいですが、パルス幅は良く一致した。これより、スペクトル位相制御が十分に働いていると考えられる。

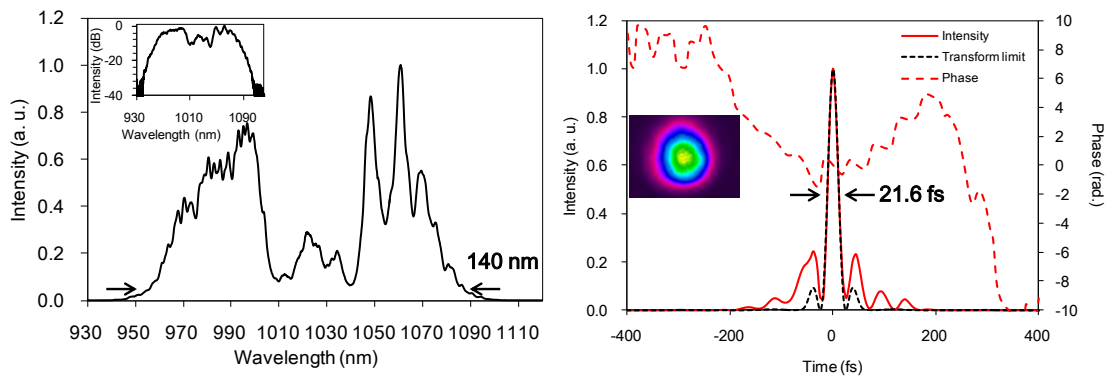


図 13. シード光のスペクトルとパルス波形.

励起光に対する OPCPA 出力を図 14 に示す。46W の励起時に 9.8W の出力を得た。このときのシード光、シグナル光、およびシード光を遮断したときの OPG (Optical Parametric Generation) のスペクトルを図 15 に示す。緑線のシード光のスペクトルは 1005 – 1050nm であるのに対し、赤線のシグナル光のスペクトルは 1005- 1040nm と長波長側が少し欠けている。青色のシード光を遮断したときの OPG のスペクトルのピークは 1015nm であり、シード光に対し短波長側に利得のピークが調整されている。1064nm の鋭いピークは縮退点である。もし、OPG のスペクトルのピークをシード光の中心に調整した場合は、縮退点のピークが上昇し、赤線のシグナル光においてもわずかに見えているピークが大幅に上昇した。図 15 の調整においては、シード光を入射した場合は、縮退点を含めて十分に OPG を抑制できていると思われる。アイドラー光は分光器の感度の問題で計測されていないが、OPCPA 出力の半分程度と評価されるため、シグナル光の出力は、46W の励起時に 5W (1.25mJ/pulse) 程度と評価できる。

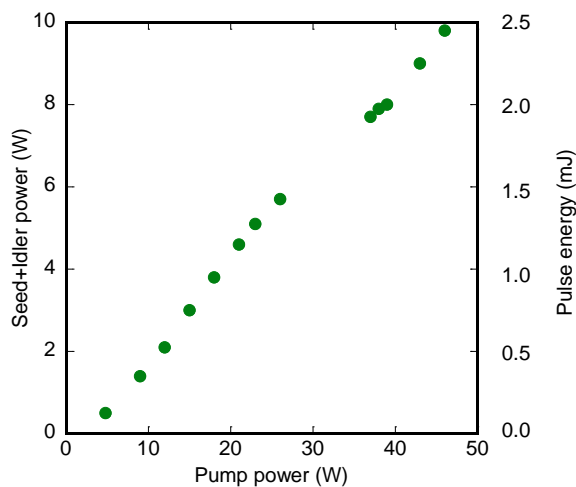


図 14. OPCPA 出力.

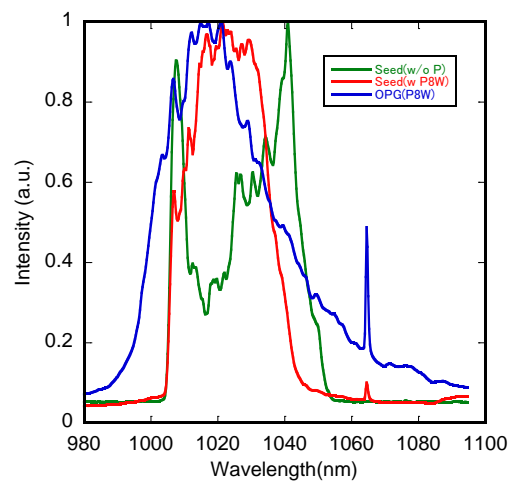


図 15. スペクトル波形.

§3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

1. Masato Nakasuji, Akifumi Tokimasa, Tetsuo Harada, Yutaka Nagata, Takeo Watanabe, Katsumi Midorikawa, Hiroo Kinoshita, “Development of Coherent Extreme-Ultraviolet Scatterometry Microscope with High-Order Harmonic Generation Source for Extreme-Ultraviolet,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **51**, 06FB09, 2012. (DOI: 10.1143/JJAP.51.06FB09)
2. Tetsuo Harada, Masato Nakasuji, Takeo Watanabe, Yutaka Nagata, Hiroo Kinoshita, “Development of standalone coherent EUV scatterometry microscope with high-harmonic-generation EUV source”, *SPIE Proc.* **8441**, 8441-2, 2012. (DOI: 10.1117/12.952477) (Invited paper)
3. Takashi Kurita, Hidetsugu Yoshida, Toshiyuki Kawashima and Noriaki Miyanaga, “Generation of sub-7-cycle optical pulses from a mode-locked ytterbium-doped single-mode fiber oscillator pumped by polarization-combined 915 nm laser diodes”, *Optics Letters*, Vol. 37, No. 19, pp3972-3974, 2012 (DOI:10.1364/OL.37.003972)
4. Tetsuo Harada, Masato Nakasuji, Yutaka Nagata, Takeo Watanabe, Hiroo Kinoshita, “Phase Imaging of Extreme-Ultraviolet Mask using Coherent Extreme-Ultraviolet Scatterometry Microscope”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **52**, 2013. (Accepted).
5. H. Kinoshita, T. Watanabe, T. Harada, and Y. Nagata, “Recent Activities on EUVL in NewSUBARU”, *J. Appl. Phys.* **52**, 2013. (Accepted).

(3-2) 知財出願

- ① 平成 24 年度特許出願件数(国内 0 件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 4 件)