

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. 研究実施の概要

本研究の狙いは、将来の 32 nm 世代での極端紫外線露光用マスクパターンならびに 22 nm 世代のパターン検査として、従来の真空紫外光 (DUV) を用いた検査では検出不可能な 20 nm 以下の欠陥検査、ならびに 20 nm 相当のパターン線幅 (CD) を精度 0.01 nm 以下にて測長し、この時の CD 検査時間を、例えば、6 インチ角ガラスマスクの 20x20 箇所での評価を 90 分以下で可能とする産業界に有用なシステムを提供することにある。そこで、本研究では従来の顕微光学系によらない新しい検査法として、光学の原理原則に立ち返り、結像レンズによらず、瞳面上に形成される回折パターンを計算機上で処理する方法により、これまでの微細化のパラダイムでは実現不可能な高精度な計測法の開発を進める。光源には産業利用の観点からスタンドアロン型とし、極短パルスレーザーの高次高調波成分から 13.5 nm の極端紫外光を発生させ、用いる。

本装置コヒーレントスキャトロメトリ顕微鏡 (CSM) は、①フェムト秒レーザーシステム、②高次高調波発生システム、③13.5 nm 近傍の波長を取り出す分光系、④コヒーレント EUV スキャトロメトリ顕微鏡部からなる。高次高調波の励起光源にはテーブルトップのフェムト秒サブテラワットレーザーを用い、Ne ガスなどで満たしたガスセル中で高次高調波を発生させ、Mo/Si 多層膜鏡などにより 13.5 nm 近傍のコヒーレント EUV 光を取り出す。

ここで得られたコヒーレントな EUV 光はシャッター、フィルター (Zr/Si)、ピンホールを経て、EUV マスクを6度の入射角度で照射し、反射回折した像を X 線 CCD カメラで検出する。

回折された光は EUV マスクのパターンに応じた回折の複素振幅を示すが、CCD カメラ上では回折パターンの強度分布のみ得られ、位相は直接測定できない。このため、CCD で得られた 2 次元の回折強度データを像再生アルゴリズムを用いて計算機上で繰り返し逆フーリエ変換・フーリエ変換を施し、求められた複素振幅から位相情報を回復させることにより、高精度な像の再構成を

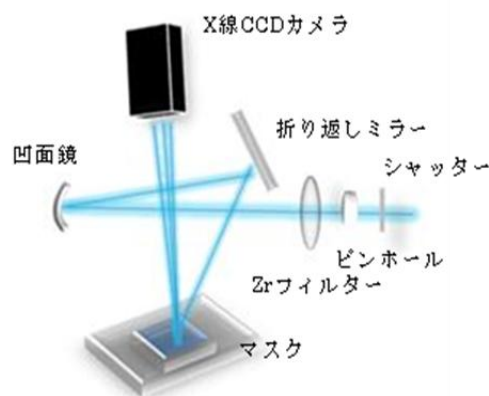


図1. CSM 顕微鏡部概要

行う。これにより、マスク上の寸法計測、パタン欠陥検査、さらには、回折情報を基にマスクパタンの3次元像再生を進める。

本研究では、3年間で実用化の見通しを得るために、市販の1 kHz、6 mJのTi:Sapphireレーザー(波長800 nm、30 fsクラス)を基に、発生点で平均出力1 μ W、計測点で1 nWの高次高調波システムを永田チームと木下チームが立ち上げ、計測システムと結合し、実用システムとしての特性を把握する。さらに、阪大では高繰り返し・高パワーのフェムト秒レーザー(波長607.5 nm、5-10 fs)を開発し、理研と共同で13.5 nmで50 μ Wクラスの世界最大出力で、高効率かつ実用的な高次高調波の発生を最終年度前までに実現し、計測システムによる評価を進める。

H22年度、木下Gは、昨年度末に大日本印刷が製作したプログラム欠陥を有するEUVマスクの評価と、像再生アルゴリズムの検討を進めた。また、パタン寸法(CD)評価では、同様に大日本印刷が製作した32nm世代と22nm世代のマスク面上のCD分布を測定し、150mm角全面でCD-SEMとの良い相関を得た。L/Sパタンの繰り返し測定再現性は0.1 nm(3 σ)が得られ、ITRSロードマップ要求を満たした。欠陥評価ではhp 22 nm世代用のL/Sパタン中の最小2 nmのCD error欠陥を検出した。像再生アルゴリズムとしてCSMに最適なタイログラフィーを採用し、非周期構造やCD欠陥の像再生を実現した。

永田Gでは、テーブルトップサイズの高出力フェムト秒Ti:Sapphireレーザーシステムを用いて高次高調波発生を行い、現在CSM用光源として利用している放射光のサンプル上での波長13.5 nmのコヒーレント成分の平均出力1.2 pWの約1000倍以上の出力を実現することを目的として研究を進めている。励起レーザーシステムの安定動作および最適化により中心波長796 nmでパルス幅32 fs、エネルギー6 mJ/pulse(6 W)、エネルギー変動1%以下(rms)を実現し、高次高調波発生をおこなった。その結果、f/125の集光光学系を用いて励起レーザーをネオンガス(圧力10 kPa)中に集光することで、13.5 nm高次高調波のビーム拡がり角として0.17 mradを実現した。この値はこれまで報告された高次高調波発生の中でもっとも小さな値であり、加えて13.5 nm高次高調波のビーム全体の空間コヒーレンスがレーザーと同等であることを示す。この結果により、これまでに無い簡便かつ高スループットの13.5 nm高次高調波利用システムの構築が可能となった。今後、高次高調波発生ラインにCSM装置を組み込み動作検証を行っていく。

藤田Gは熱発生の少ないOPCPA(Optical Parametric Chirp Pulse Amplification)を用いた高平均出力fsレーザーの開発を実施した。分散補償モード同期ファイバー発振器により32 fsの安定な超短パルス種光源を開発した。Nd:YAGレーザーの2倍高調波励起によるOPCPAでは、励起光である2倍高調波のビーム品質がOPCPAの利得に大きく影響することが分かった。Nd:YAGレーザーにSBS位相共役鏡を導入し基本波及び2倍高調波のビーム品質を改善した。OPCPAの高出力化を実施している。

§ 2. 研究実施体制

(1)「木下」グループ

① 研究分担グループ長:木下 博雄 (兵庫県立大学、教授)

② 研究項目

コヒーレントスキャ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:永田 豊 (理化学研究所、専任研究員)

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:藤田 尚徳 (大阪大学、准教授)

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

§ 3. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(4-1)に対応する)

(1) 木下グループ

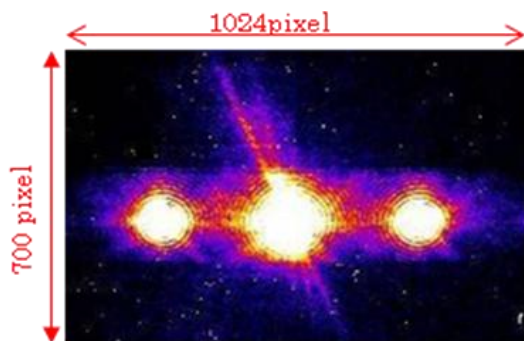
昨年度末に購入した EUV マスクの評価と、像再生アルゴリズムの検討を進めた。CSM の測定方法を検証するため、放射光施設 NewSUBARU に設置した CSM 実験機で測定している。

① 散乱光除去による回折パタンの改善

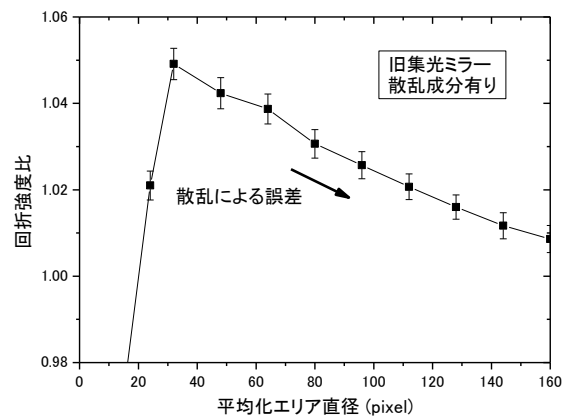
半導体において CD 値が不均一であるとデバイスの電気特性に影響を与える。図 2(a)に CSM で測定した 88nmL/S パターンからの回折光を示す。中心の回折光が0次光であり、その横に±1次光が記録されている。この回折光によるパターン像の強度プロファイルは式(1)で与えられる。

$$I(x) = \left| u_0 + u_{-1} e^{\frac{-2\pi x_i}{p}} + u_{+1} e^{\frac{+2\pi x_i}{p}} \right|^2 \quad \text{式(1)}$$

ここで、 u_0 は 0 次回折光振幅、 u_{+1} 、 u_{-1} は 1 次回折光振幅、 x は干渉縞生成位置、 p はパターンピッチを示す。これまでの CD 評価では、ピーク付近の 64pixel を空間積分し回折強度としていた。しかし、中心付近に線状の散乱光も記録され、バックグラウンド成分となっていた。図 2(b)に積分範囲の直径の変化による 0 次光と 1 次光の強度比の変動を示す。CD 値は回折強度比より導出するため、積分範囲によらず一定である必要がある。エラーバーは 20 回測定での 3σ の値を表す。横軸の積分範囲直径を変化させると、散乱光の影響で強度比が変化し CD 値が変化してしまう。サンプルやピンホールを交換してもこの散乱光は残っており、光学系からの散乱光であると考えられる。そこで、凹面鏡ガラス基板を表面粗さ 0.7 nm 以上(rms)の基板から 0.15 nm 以下(rms)の基板に交換した。交換後の CSM データ(図 3(a))より中心付近の散乱を抑えることができ、回折環のコントラストも向上できた。図 3(b)に新しい基板での回折光強度比を示す。強度比は積分範囲によらず一定となり、積分範囲によらず一定の強度を求めることができる。その結果として、新ミラーにより CD 測定の測定再現性を 0.3 nm(3σ)から 0.1 nm(3σ)に向上することに成功した。



(a) 回折パターン



(b) 積分範囲に対する回折強度変化

図 2. 凹面鏡改良前の回折パターンと積分範囲での回折強度変化

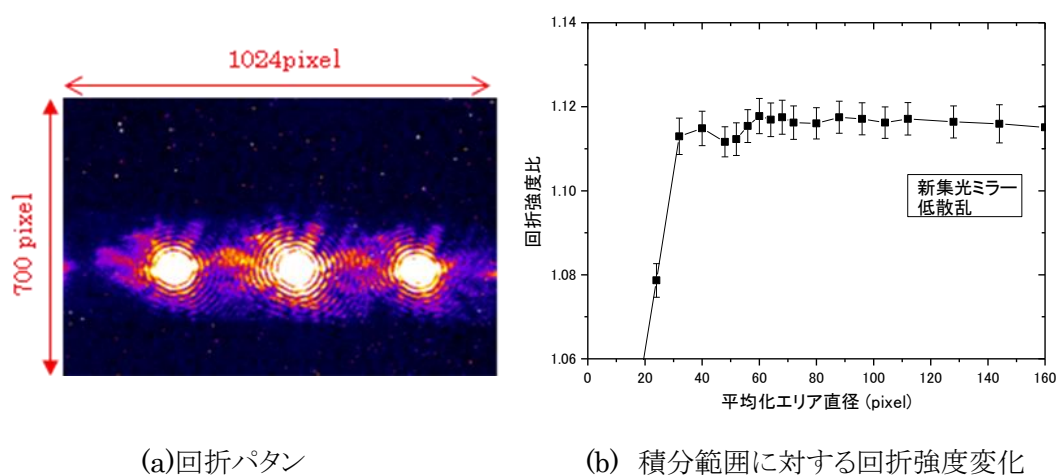


図 3. 凹面鏡改良後の回折パターンと積分範囲での回折強度変化

② パターン寸法(CD)評価

CSM にて hp 22 nm 世代用の EUV マスクの CD 分布を評価し、その結果を従来の CD 評価装置である CD-SEM での測定値と比較した。評価マスクは 150 mm 角のガラス基板上で、88 nm L/S パターンが 13 mm ステップで 11×11 個配置されている。図 4 に CSM での分布測定結果を示す。各点での測定時間は 20 秒、測定位置のみ調整しており、その他のフォーカス調整などはない。図 5 に CSM 測定結果と CD-SEM 測定結果の相関を示す。CSM と CD-SEM 測定結果の関係は線形であり、非常に良い相関がある。測定再現性は 20 秒で 0.3 nm(3σ)、100 秒で 0.1 nm(3σ)が得られた。

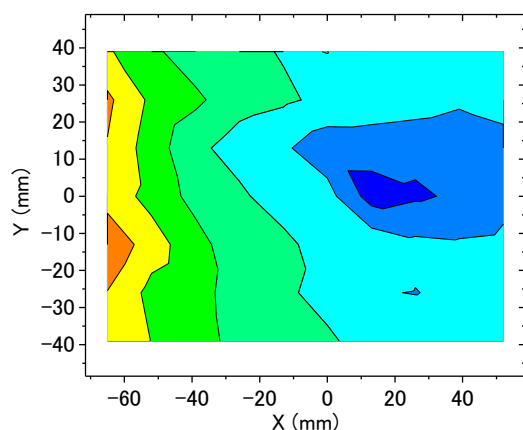


図 4. CSM での CD 分布測定結果

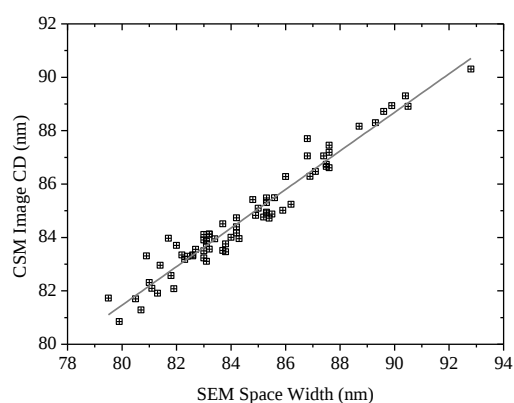


図 5. CSM と CD-SEM 測定結果相関

③ 欠陥検出

周期パターン中の吸収体プログラム欠陥の評価を進めた。評価パターンの CD-SEM 画像を図 6 に示す。88 nm L/S パターン中 1 本の吸収体が 2~40 nm 細い CD error 欠陥である。図 7 は 30 nm サイズ欠陥からの回折光の CCD 画像であり、周期パターンの ± 1 次光と 0 次光の間に欠陥からの

回折光を検出できている。評価を進め、2 nm の欠陥サイズまで CCD 画像上で検出できた。

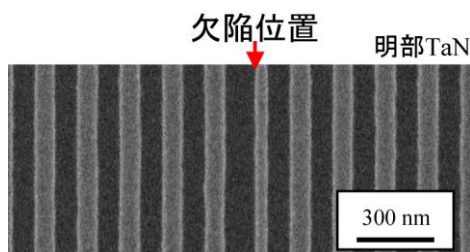


図 6. L/S パタン中の線幅欠陥の SEM 画像

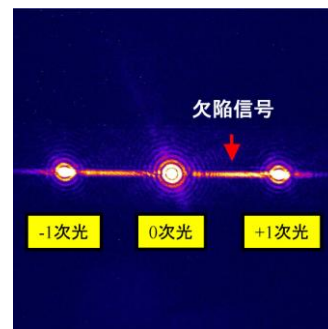


図 7. CSM での周期パタンと欠陥の信号

④ 像再生アルゴリズム検討

CSM の CCD カメラには回折光の強度情報のみが記録されており、位相情報を計算により回復することで実空間のパタン像を得る。従来用いた位相回復アルゴリズムである HIO アルゴリズムは照明光に対して十分小さい試料を前提としており、CSM にはマッチしていなかった。今回、CSM の照明形状と EUV マスクパタンに最適なアルゴリズムとしてタイコグラフィーを適用した[1]。図 8 にタイコグラフィーの概略を示す。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。タイコグラフィーでは照明の強度分布を計算に取り込んでいるため、CSM のように照明がパタン領域に対して小さく、強度が周辺で弱くても像再生が可能である。

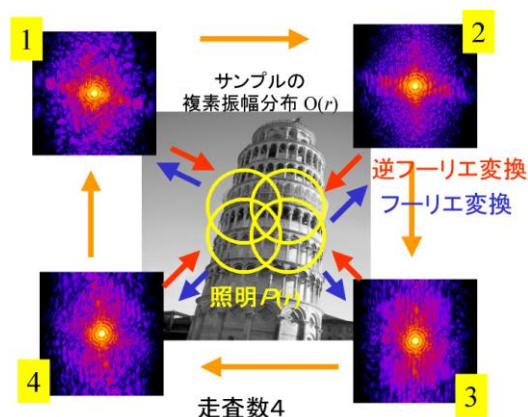


図 8. タイコグラフィーによる像再生アルゴリズムの概略図

図 9 に実際に像再生したパタン像を示す。(a)では周期的な 88 nm L/S パタンと、非周期的な端の構造が再生できている。(b)は十字パタン、(c)は前節で検出した L/S パタン中の一本の CD error 欠陥である。なお、計算に用いた照明光形状は EUV マスク上の既知のパタン形状を用いて像再生している。このようにタイコグラフィーにより非周期的な構造も像再生でき、欠陥もパタン像として像再生できた。また、位相物体も測定し、位相情報も含めてパタン像として評価できた。

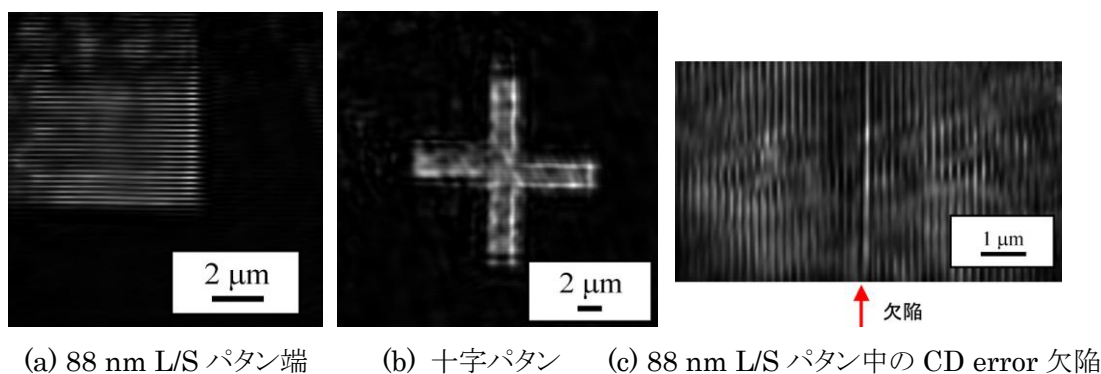


図 9. EUV マスク上のパタンのタイコグラフィーによる像再生結果

[1] J. M. Rodenburg et. al., Appl. Phys. Lett. **85** (2004) 4795.

⑤ 大面積 X 線 CCD カメラの導入

新たに導入した大面積 X 線 CCD カメラの感度と読み出しノイズ、暗電流ノイズを評価した。本機は全体を真空中に設置可能であり、検出器面積は 60 mm × 60 mm と現在入手可能な CCD チップとしては最大である。このため大面積での EUV 回折光の直接記録を実現でき、CSM の分解能と検出効率を飛躍的に向上可能である。

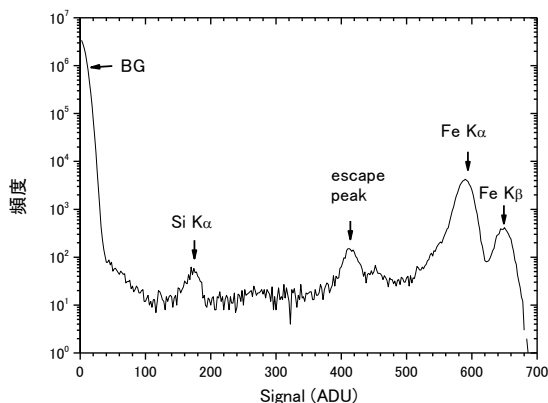


図 10. Fe55 線源による感度評価結果

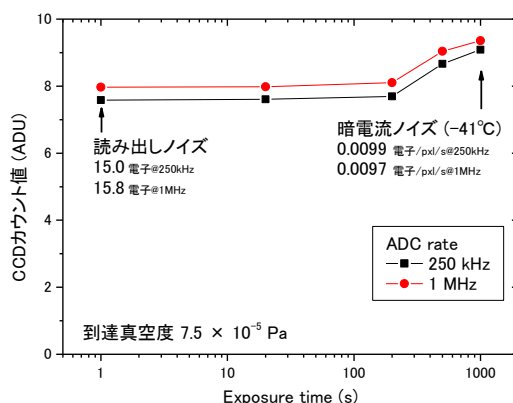


図 11. 読み出しノイズと暗電流ノイズ評価結果

図 10 は Fe55 標準 X 線源からの Fe K α 線の測定結果である。5.8 keV の Fe K α 線が CCD カメラの検出面に入射すると1620個の電子を生成するため、CCD カメラの実際の感度を測定できる。CCD カメラ画像より頻度を計算しており、Fe K α 線は590 Analog digital unit (ADU)の信号となった。よって感度は 2.8 電子で 1 ADU である。また、読み出しノイズと暗電流ノイズを評価するため、測定時間を 1～1000 秒と変えたダークフレームを測定した。CCD チップの冷却温度は-41°C である。測定結果を図 11 に示す。読み出しノイズは 15 電子(1 σ)であった。暗電流ノイズは 0.01 電子／ピクセル／秒(1 σ)となり、低ノイズが実現できた。暗電流ノイズは全面でほぼ同じ程度であり、60 mm 角と大面積なチップの均一な冷却ができています。

(2) 永田グループ

CSM による EUV リソグラフィ用マスク検査装置の実用化を目的として研究を進めており、その中でコヒーレント EUV 光源の小型化、高出力化を行っている。具体的にはテーブルトップサイズの高強度フェムト秒 Ti:Sapphire レーザーシステムを用いて高次高調波発生を行い、現在使用している放射光のサンプル上でのコヒーレント成分の平均出力 1.2pW の約千倍にあたる 1 nW 以上を実現することを目的として研究を進めている。

昨年度は励起レーザーシステムの最適化によりレーザーの中心波長 796 nm においてパルス幅 32 fs、平均出力 6W (6 mJ/pulse、1 kHz)を実現した。また、新たに設計した半差動排気セルを利用した高次高調波発生システム(図 12)を用いて 13 nm (59 次高調波)の発生をおこなった。集光光学系から高次高調波出射用ピンホールまではすべて非線形ガスで充填しており出射用ピンホール付近の狭い領域で高次高調波が発生する。

発生した高調波は分光面に MCP と蛍光面を用いた EUV 分光器を用いて可視化を行い、蛍光像を CCD カメラを用いて計測した。

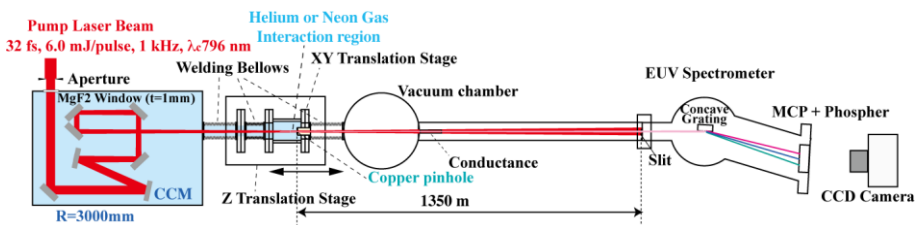


図 12. 13 nm 高次高調波発生システム概略

本年度においてはさらなるレーザーの安定動作およびビーム品質の向上を図り、これを用いて 13 nm 高次高調波の発生条件の最適化をおこなった。主な課題として 13 nm 高次高調波の高出力化、および高コヒーレンス化に注目して研究を進めた。

高次高調波発生は高次の波長変換法であり、高コヒーレンス化はビーム拡がり角の縮小と同じ意味を持つ。初期の実験ではビーム拡がり角をもっとも小さくする条件での 13 nm 高次高調波の出力は、波長 30 nm (27 次高調波)付近の数十分の一程度と低い値であったが、励起レーザーシステムの見直しと集光光学系の最適化により高出力化を進めた。非線形媒質としてヘリウムを例にとると、波長 8 nm 付近までの高次高調波を発生させる条件でのみビーム拡がり角の小さなビームを発生させることが可能ながわかったため、焦点での集光強度を $1 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ 以上とする条件で可能な限り f-number の小さな集光光学系を用いて 13 nm 高次高調波の発生条件の最適化をおこなった。その結果、f/125 の集光光学系を用いた時に、もっとも強い 13 nm 高次高調波を発生させることに成功した。図 13 にこのとき観測された高次高調波スペクトルのヘリウムガス圧力依存性を示す。この圧力依存性から励起レーザー光と非線形媒質のおよその有効相互作用長を見積もったところ 20 mm 以上となった。この条件では波長 10 nm 付近の高次高調波がもっとも強くなっているが、13 nm 高次高調波の出力がもっとも高い圧力 17 kPa では、より高次の次数の方が位相不整合量が小さかったことが原因と考えられる。なお、このときの 13 nm 高次高調波のビーム拡がり角は 0.25 mrad であった。もっとも初期の f/85 の集光光学系を用いた実験結

果と比較すると、13 nm 高次高調波の蛍光面上での強度は約 5000 倍、エネルギーは約 1000 倍となった。各種のパラメータの最適化により高次高調波の平均出力の増大とビーム拡がり角の縮小を同時に実現することに成功した。

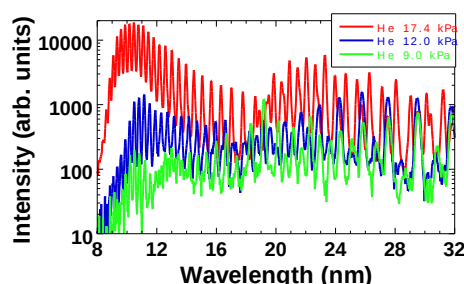


図 13. 高次高調波スペクトルのヘリウムガス圧力依存性

また、同様にネオンガスを用いて 13 nm 高次高調波の高出力化のための最適化実験を行った。圧力 10 kPa でもっとも強度が高くなった。エネルギーはヘリウムのとときと比較して半分弱となったものの空間強度分布(図 14)でのビーム拡がり角 0.17 mrad が実現されたことが確認された。高次高調波の空間強度分布はガウシアン形状でありビーム拡がり角とエミッタンス保存から横コヒーレンス長(出射点で強度が $1/e^2$ となる半径)が計算される。これはビーム拡がり角 0.25 mrad、0.17 mrad に対してそれぞれ 17 μm 、25 μm である。高次高調波の双極子モーメントの励起レーザー依存性から見積もられる高次高調波のスポットサイズは、励起レーザーのスポットサイズの 1/3 以下となり、この場合 30 μm 以下となる。仮に高次高調波のスポットサイズを最大値の 30 μm としてもビーム品質を表す M^2 はそれぞれ 1.8、1.2 以下となる。この数値は通常のレーザーと同程度の値であり、空間コヒーレンスもレーザーと同等であることが予想される。

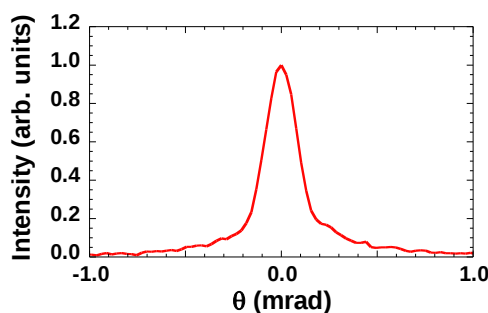


図 14. ネオンガス中で発生した 13 nm 高次高調波の空間強度分布

今回得られたビーム拡がり角 0.17 mrad はこれまで報告された中での最小値である。例えば理研において開発した高次高調波発生システムでは、励起レーザーのエネルギーとして今回のものより 1 桁以上大きな 200 mJ/pulse、26 fs の Ti:Sapphire レーザーを用い、より焦点距離の長い (5 m) 集光光学系での位相整合が可能だったにも関わらずビーム拡がり角は 0.3 mrad であった。このことから、今回の成果が市販のレーザーシステムを用いていることから、汎用性に優れた、特筆すべき成果である。また別の見方をしても励起レーザー光との 13nm 高次高調波のビーム拡がり角の比率は最大で 24 であった。これは励起レーザー光と高次高調波を空間的に分離するための新しい簡便な方式を実現させる重要な成果である。

(3) 藤田グループ

超短パルスレーザーの最適化(高出力励起光・超短パルス種光・OPCPA 等)を実施した。

① OPCPA 励起光の高出力・高ビーム品質化

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を実施した。図 15 に、従来のミラーを使った場合と SBS 位相共役ミラーを使った場合のビーム品質(近視野像・遠視野像・中間像)を示す。SBS 位相共役鏡の導入により、ビーム品質は従来の 3.5 倍の回折限界から 1.2 倍の回折限界へと改善した。また、高調波変換において従来の 30%から 50%を超える変換効率が得られ、平均 240 W を達成した。(図 16)

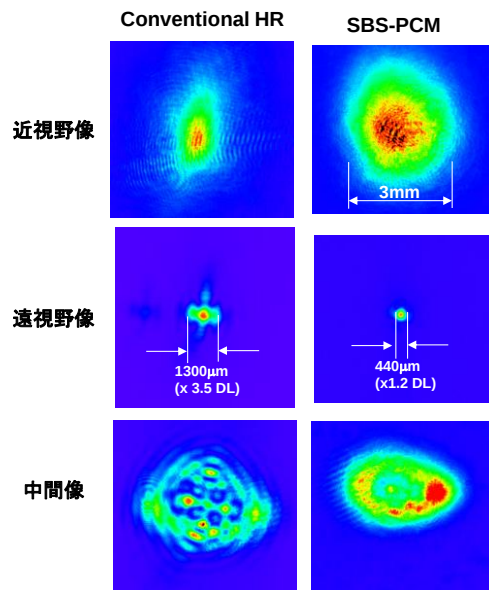


図 15. SBS 位相共役鏡によるビーム品質の改善

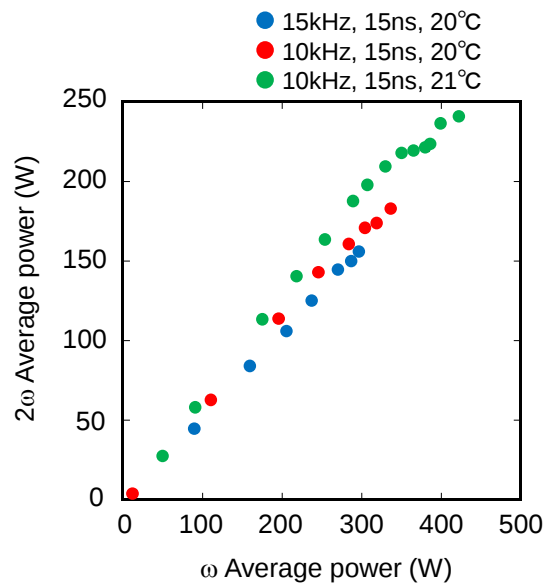


図 16. 2 倍高調波変換結果

② OPCPA 増幅・パルス圧縮の最適化

種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 17 に示すように 32fs パルスを達成した。平成 21 年度に開発した OPCPA 増幅・パルス圧縮の最適化を進めている。励起光である 2 倍高調波のビーム品質が OPCPA の利得に大きく影響することが分かった。励起光のビーム品質を改善し、OPCPA の高出力化を進めている。

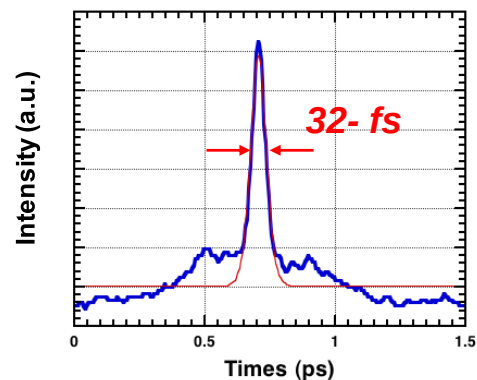


図 17. 種光源のパルス波形

③ 高次高調波発生実験の開始

高繰り返し超短パルスレーザーシステムを用いた高次高調波発生実験の準備を進めている。

§ 4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

1. T. Kurita, K. Sueda, K. Tsubakimoto, N. Miyana "Experimental demonstration of spatially coherent beam combining using optical parametric amplification", Optics Express, Vol. 18, No. 14, pp.14541-14546, 2010 (DOI:10.1364/OE.18.014541)

(4-2) 知財出願

- ① 平成22年度特許出願件数(国内 2 件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 2 件)