

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「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」
研究課題「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」

研究終了報告書

研究期間 平成20年10月～平成26年3月

研究代表者：木下 博雄
(兵庫県立大学高度産業科学技術研究所、教授)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

本研究の狙いは、既存の検査・評価法では対応できない 22 nm 世代以降のマスクパタンの検査および評価法を確立することならびに実用機開発への道筋をつけることにある。具体的には、欠陥検査においては従来の真空紫外光を用いた検査では検出不可能な 20 nm 以下の欠陥の検出を可能とすること、ならびにマスクパタンの評価においては 20 nm 相当のパターン線幅 (CD) を精度 0.1 nm 以下で測長可能とすることなどを目標とした。この時の CD 検査時間を産業界からの要望に則したものの、例えば、6 インチ角ガラスマスクの 20×20 箇所の評価時間を 90 分以下とすることで産業界に有用なシステムを提供することが可能となる。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、コヒーレント光を照射したマスクのパターンに応じて発生する散乱パターンを瞳面上の CCD カメラに取り込み、その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分解能な像再生・計測法の開発を進める。検査に必要なコヒーレント EUV 光源(極端紫外線波長 13.5 nm)としては、産業利用の観点からスタンドアロン型および高出力化を目的として、高強度フェムト秒レーザーの高次高調波発生システムの開発をおこなう。

本装置コヒーレントスキャトロメリー顕微鏡(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と 13.5 nm 近傍の波長を取り出す分光系、③コヒーレント EUV スキャトロメリー顕微鏡部からなる。

本研究では、早期に実用化の見通しを得るために、上記①の光源には市販の 1 kHz、5 mJ クラスの Ti:Sapphire レーザー(波長 800 nm, 30 fs クラス)を基に、②の開発により平均出力 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、③の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①の高繰り返し・高パワーのフェムト秒レーザーを検討し、将来の高出力・高次高調波光発生に有用なシステムを開発する。

永田 G は、市販のフェムト秒レーザーシステムと高次高調波発生システムとにより高次高調波の 13.5nm コヒーレント光で当初予測の 1000 倍の平均出力 $1 \mu\text{W}$ を達成し、発散角としては、これまでに報告されたとの文献値よりも小さな 0.18 mrad を実現した。木下 G は 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 を用いパターン欠陥の検出を進めたが、当方式は微小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、大面積検査が可能はタイコグラフィ法を基にアルゴリズムを作成し、パターン欠陥検査を進めた。永田 G が開発した HHG 光を統合した CSM による像再生では、欠陥検出分解能としては、Line & space パターンの中で中心のライン 1 本が 2 nm 細くなっている欠陥検出を可能とした。また、点欠陥などのパターン中の微細な欠陥のうち、22 nm 世代マスクの Hole パタンの downsize、missing などのほか、ラインの bridge 欠陥なども検出可能とした。また、EUV 光源の出射位置の安定化を図ることで光の利用効率を大幅に改善した。これによりラインパターン中の 80 nm×160 nm の点欠陥を露光時間 1 秒で検出することに成功した。

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。さらに、当初の計画にはない、多層膜下の異物によって生じる位相欠陥の観察を行ったところ、位相情報のみの抽出に成功し、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、2011 年度より進めている EIDEC からの再委託テーマである μCSM による位相欠陥の 3 次元像再生による位相欠陥の位置と形状のキャラクタリゼーションという新たな研究テーマへの展開に繋げることができた。

(2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1. EUV マスクパターン CD 計測アルゴリズムの確立

マスク検査の基本となる CD 評価では実露光波長での評価を生かし、実効的な寸法が高速に評

価できる手法を開発した。すなわち、回折信号の0次光と±1次光を基とするCD評価アルゴリズムを作成し、汎用的なCD値の算出を可能とした。CD測定の測定再現性は0.1 nm (3σ)であり、ロードマップ値を満たすことができている。この計測法は入射角6度に起因するシャドウイング効果を含めた値となり、ウェハに転写されるパターンサイズと同等となる。これらの計測アルゴリズムやパターン観察アルゴリズムに関しては特許出願し、論文発表した。

2. EUV マスク構造の位相像測定の実現

EUV マスクにおいて利用されている吸収体は、半透明の位相物体であるため、転写特性評価には強度像だけでなく位相像が重要となる。パターン観察アルゴリズムを高度化することで、位相像も含めた評価が可能となった。さらに、位相欠陥の位相像まで評価できた。EUV マスクの位相構造操作は、これから非常に重要な分野(位相シフトマスクによる解像度&プロセス余裕度向上、位相欠陥の評価、欠陥修正などの評価)となるため、位相像観察はマスクの高度化へ向けた顕著な成果である。

3. 高次高調波コヒーレント EUV 光源の実現

市販のレーザーシステムベースのコヒーレント EUV 光源(高次高調波発生システム)を開発した。波長範囲は8~32 nm であり、次数毎のスペクトル幅は短波長側では0.1 nm を実現した。ビーム拡がり角はこれまで報告されたものの中でも最も小さい値を実現した。このことは空間的なコヒーレンスに優れた光源であることを示している。さらに励起レーザーの高出力化による、高次高調波のビーム拡がり角の低減および高出力が可能なことを示した。

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1. EUV マスク計測アルゴリズムの確立

CSM は従来のレンズを用いず、マスク上のラインアンドスペースのパタンの線幅を高精度に検査可能であることを示した。従来はCD-SEM 等を用い評価するが、本方式を用いれば測定時のアライメントやフォーカス合わせなどの手間を必要とせず、高精度に検査が可能となる。

2. EUV 領域でのコヒーレント光源の開発

3. 従来スタンドアロン型の X 線、EUV 光源などにはレーザープラズマや放電プラズマが利用されてきた。これらはいずれもインコヒーレント光でありコヒーレントスキヤトロメトリーには使用できない。一方、高次高調波は励起レーザーのコヒーレンスを維持することが可能であるため、干渉を利用した微細加工のみならず、照射された微細構造からの散乱光像を観測することにより、パタンの像再生、寸法計測などが可能である。本研究においては市販のフェムト秒レーザーシステムベースであること、新しい空間ビームセパレータを開発したこと、および EUV 光の空間的な安定性を向上したことなどにより、ターゲットまでの光学系を単純化することおよび光の利用効率を高めることが可能となった。空間的なコヒーレント光であるため、容易にサブ μm 以下に集光することが可能である。また、ビームの空間的な揺らぎをビーム径の 1/40 以下にすることも可能である。この光源は CSM のみならず微小領域での物性評価やポンププローブ法による時間変化の解析を可能とする。スタンドアロンなコヒーレント光源として認知されることにより新しい応用も生まれることが期待できる。

4. Lensless 光学系による高精度像再生の実現

将来的に光学系を通した像観察では微細化に限界が来る。本手法は、光学系を用いずとも高精度な像再生が可能であることを初めて示した。光の技術は永遠であるが、光学系による技術は加工精度などで限界をもたらす。本技術は、レンズレスであるが、Fraunhofer の結像理論に則った手法である。2 nm までの欠陥検出性能があることを確認した。

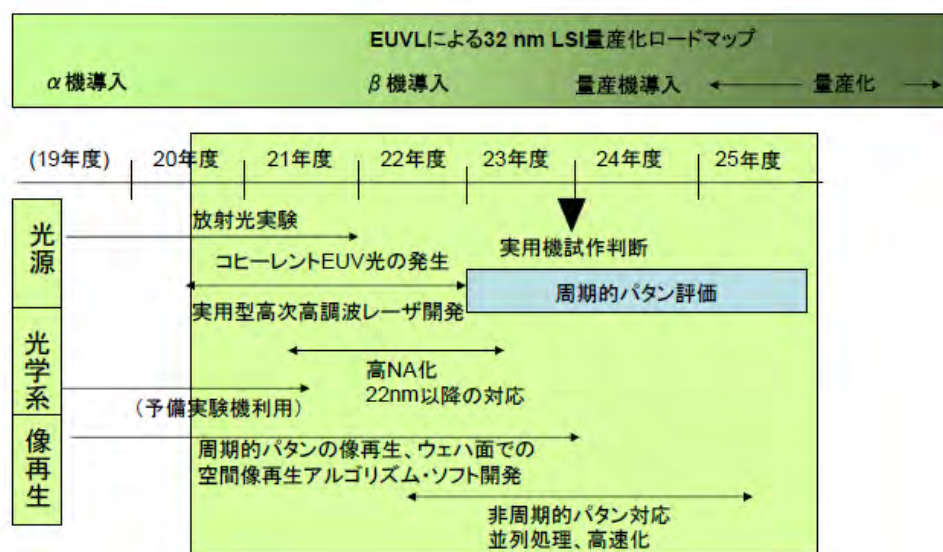
§ 2. 研究構想

(1) 当初の研究構想

本研究の狙いは、将来の 22 nm 世代以降のマスクパターン検査として、従来の真空紫外光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 0.1 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 20×20 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、コヒーレント光を照射したマスクからパターンに応じて発生する散乱パターンを瞳面上の CCD カメラに形成し、その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分解能な像再生・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る。

光源については市販の fs レーザーを H21 年度に導入し、H22,H23 に HHG 光の発生を進める。CSM 装置は H21 年度までは放射光での実験を進め、パターン CD 測定法、ならびに周期的なパターン、非周期パタンの像再生手法の確立を進める。同時に大面積 CCD カメラを H22 年度に開発し、CSM の高 NA 化装置を開発する。H24 年度に HHG と高 NACSM を結合させ、点欠陥検査を進める。

当初の20年度から25年度までの5年間の線表を示す。



光源開発に関しては、放射光に代わる実用的なコヒーレント EUV 光源としての高次高調波発生システムの開発および EUV マスク上での高出力化 1 nW の実現を目的として研究を開始した。このときの目標設計にあたり既存の研究成果をベースとしたものを想定した。

装置の実用化および研究期間の短縮のため市販のサブ TW フェムト秒 Ti:Sapphire レーザーシステムベースの高次高調波システムの開発を目指した。しかし、実際には市販のレーザーシステムの完成度に問題があり、具体的には安定性に課題があり、本格的な高次高調波発生までに2年以上の時間を要した。

高次高調波発生システムとしてはこれまでにない簡便なもの(操作および調整が容易かつ構造が単純なもの)を開発した。ただし、このシステムは汎用的な仕様を想定したものであった。初期の高次高調波発生実験において想定の結果が得られる目処がついたが同時に新しい着想につながる成果が得られた。

像再生では 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が、当方式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、大面積検査が可能はタイコグラフィー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。この手法の開発により、大面積かつ非周期パタンの像再生を可能とした。

(2)新たに追加・修正など変更した研究構想

① 中間評価で受けた指摘や助言、それを踏まえて対応した結果について

a) 現実的な欠陥の検出でのタイコグラフィーアルゴリズムの検証は？

現実的な欠陥としては、ラインアンドスペースパタンの黒欠陥、白欠陥、ブリッジ欠陥、ホールパタンではホールの欠け、ホールの繋がりなどを対象と考え、加速予算でこれらの疑似欠陥を有するマスクを作成した。SR 光での評価では、ラインアンドスペース欠陥の内の中央の 1 本のみの寸法が 10 nm~30 nm 変化するダウンサイジング欠陥の検査は可能なものの、点欠陥は光強度が不十分であったために、検査できなかった。中間評価後に HHG 光が立ち上がり、SR 光に比べて 1000 倍の高出力化が実現でき、上記の点欠陥の検査が可能となった。これらの評価は、より実用的な 2 チップ間 (Die to Die 方式) の回折パタンの比較により行うことができ、高速評価への見通しが得られた。

b) EUV マスクの検査・評価技術の実用化検証は？

コヒーレントスキャトロメトリー顕微鏡によるマスク検査は、従来の顕微鏡方式に比べ、価格も安く、かつ、高い検出分解能が得られる方式として、日立ハイテク、ニューフレア、東芝などの関係者から詳細な説明が求められ、簡便かつユニークな方式として評価を受けたものの、光源開発がネックとなって実用化への道が見つからない状況にある。最近ある企業から HHG 光による 13.5 nm 光源の開発を進めたいという話を戴き、具体的な検討を始めている。

c) 13.5nm の光源としての活用は？

現在は CSM の光源としての利用を検討しているが、例えば EUV 干渉露光用の光源としても、放射光より空間的にも時間的にも高いコヒーレンシーを有するため、大面積に 10 nm 級のパタン形成が可能である。これにより、レジスト開発を進展させることが可能となる。また、微小領域での物性評価やポンププローブ法による時間変化の解析を可能とし、計測分野での新たな展開を生む。

② 上記①以外で生まれた新たな展開について

a) 位相欠陥の検出

今回の提案では、マスクの吸収体パタンの高速 CD 評価、吸収体パタン欠陥の検出を狙いとし、システムの開発を進めてきた。しかしながら、像再生処理を進める中で、位相情報のみを個別に評価可能であることが分かり、位相欠陥の検出を進めたところ、1 μ m サイズであるが、位相情報と強度情報を取り組むことが可能となり、先に CREST で開発した反射光学系による位相欠陥観察と同等、あるいはそれ以上の解像度を得ることができた。位相情報は薄膜の厚さ情報を有することから、これを展開し、位相欠陥の 3 次元像再生を可能とした。

b) μ -CSM への展開

a) 位相欠陥の観察では、信号強度が極端に小さくなることから、1 μ m ほどの欠陥しか検出できなかった。さらなる、微細な欠陥の検出にはマスクに入射する光の強度を強めねばならない。そこで、まずはシミュレーションにより微細なビーム径での位相欠陥観察を進めたところ、100 nm~200 nm に絞ることで、数 10 nm 幅、高さ 1 nm ほどの欠陥観察が可能なが示され

た。一方、Selete では、ABI ツールにより検査した位相欠陥の大きさ、形などのキャラクタリゼーションが必要とのことで、Selete 以降新たに立ち上げられた EIDEC にて、CSM の入射光を絞った系 (これを μ -CSM と呼ぶ) の開発を進めることとなった。2011 年から装置開発を進め、昨年度末までに装置が完成し、これまでに 25 nm 幅、1.4 nm 高さの位相欠陥の形状を表す回折パタンの取得に至っている。現在、AFM との比較ならびに像再生の検討を進めている。

§ 3 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

①「木下」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
木下 博雄	兵庫県立大学高度産業科学技術研究所	教授	H20.10～
宮本 修治	同上	教授	H20.10～
渡邊 健夫	同上	准教授	H20.10～
天野 壮	同上	助教	H20.10～
橋本 智	同上	助教	H20.10～
原田 哲男	同上	助教	H20.10～
高橋 幸生	大阪大学	准教授	H21.1～
Kim Taegun	漢陽大学博士課程	研究員	H20.10～H21.06
福島 靖之	兵庫県立大学大学院工学研究科物質系工学専攻	D1～D3	H20.10～H23.3
岸本 淳生	兵庫県立大学大学院工学研究科物質系工学専攻	M2	H20.10～H21.3
大杉 真史	兵庫県立大学大学院工学研究科物質系工学専攻	M2	H20.10～H21.3
大西 竜二	兵庫県立大学大学院工学研究科物質系工学専攻	M2	H20.10～H21.3
鈴木 翔太	兵庫県立大学大学院工学研究科物質系工学専攻	M2	H20.10～H21.3
高瀬 啓	兵庫県立大学大学院工学研究科物質系工学専攻	M1～M2	H20.10～H22.3
釜地 義人	兵庫県立大学大学院工学研究科物質系工学専攻	M1～M2	H20.10～H22.3
阪上 尚規	兵庫県立大学大学院工学研究科物質系工学専攻	M1～M2	H20.10～H22.3
井口 貴文	兵庫県立大学大学院工学研究科物質系工学専攻	B4～M2	H20.10～H23.3
木村 瑛彦	兵庫県立大学大学院工学研究科電気系工学専攻	B4～M2	H20.10～H23.3
多田 将樹	兵庫県立大学大学院工学研究科物質系工学専攻	B4～M2	H21.4～H24.3
山口 裕也	兵庫県立大学大学院工学研究科物質系工学専攻	B4～M2	H21.4～H24.3
時政 明史	兵庫県立大学大学院工学研究科電気系工学専攻	B4～M2	H22.4～H25.3

吉本 真	兵庫県立大学大学院工学 研究科物質系工学専攻	B4	H22.4～H23.3
浦山 拓郎	兵庫県立大学大学院工学 研究科物質系工学専攻	B4～M2	H22.4～H25.3
中筋 正人	兵庫県立大学大学院工学 研究科物質系工学専攻	B4～M2	H22.4～H25.3
松田 直大	兵庫県立大学大学院工学 研究科物質系工学専攻	B4	H22.4～H23.3
江村 和也	兵庫県立大学大学院工学 研究科物質系工学専攻	B4～M1	H24.4～
田中 祐輔	兵庫県立大学大学院工学 研究科物質系工学専攻	B4～M1	H24.4～
九鬼 真輝	兵庫県立大学工学部応用 物質科学科	B4	H24.9～
辻川 大地	兵庫県立大学工学部応用 物質科学科	B4	H25.4～
福井 翼	兵庫県立大学工学部応用 物質科学科	B4	H25.4～
山口 太都	兵庫県立大学工学部応用 物質科学科	B4	H25.4～
谷野 寛仁	兵庫県立大学工学部応用 物質科学科	B4	H25.4～
藤野貴大	兵庫県立大学工学部応用 物質科学科	B4	H25.4～

研究項目

・コヒーレントスキャトロメリー顕微鏡の開発

②「永田」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
永田 豊	独立行政法人 理化学研究所	専任研究員	H20.10～

研究項目

・13 nm 高次高調波発生

③「藤田」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
藤田 尚徳	大阪大学 レーザー	准教授	H20.10～
河仲 準二	同上	准教授	H20.10～
椿本 孝治	同上	助教	H20.10～
吉田 英次	同上	技術専門職員	H20.10～
Ravi Bhushan	同上	研究員	H20.12～H21.3
宮永 憲明	同上	教授	H20.10～
衣笠 卓一	同上	M1	H25.4～
青野 裕次	同上	M1	H25.4～

研究項目

・高出力コヒーレントEUV光の発生

(2)国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

新しい装置の開発では、利用者を意識した進め方が重要である。性能が良くても使いづらい、コストが高いでは、どうにもならない。当初から光源には高次高調波光を用いるとしたのは、そういった背景にある。

国内では極端紫外線リソグラフィ開発を進めている、Selete、EIDEC とは、開発当初から議論に加わって戴いており、とくに、HOYA、DNPと意見交換を進めてきた。CSMを使ったパタン評価を希望している企業はインテル、東芝が位相シフトマスク、信越がペリクル越しでのパタン評価、EIDEC、DNP では実マスクの評価である。幾つかについてはすでに評価を進め、有効性を確認している。毎年 3 月に、産業利用報告会を姫路で開催しており、多くのユーザを取り込めるよう議論を行っている。

§ 4 研究実施内容及び成果

4.1 コヒーレントスキャトロメトリー顕微鏡(CSM)の開発 (兵庫県立大学 木下グループ)

(1)研究実施内容及び成果

木下グループでは大きく分けて①スキャトロメトリー光学系の開発と、②像再生アルゴリズムの開発の2つを行った。各項目について個別に報告する。

研究項目①：スキャトロメトリー光学系の開発

<研究のねらい>

高次高調波 EUV 光源に接続する高分解能なスキャトロメトリー光学系を構築し、スタンドアロンでのマスク計測装置を実現する。

<研究実施方法>

永田グループが開発する高次高調波 EUV 光源は放射光施設ニュースバル内に設置している。よって、木下グループがニュースバルにて光学系を構築し、永田グループの光源に接続する(図1)。集光鏡や位置検出方式などの要素技術の開発は、ニュースバル放射光に接続した実験機を用いた。

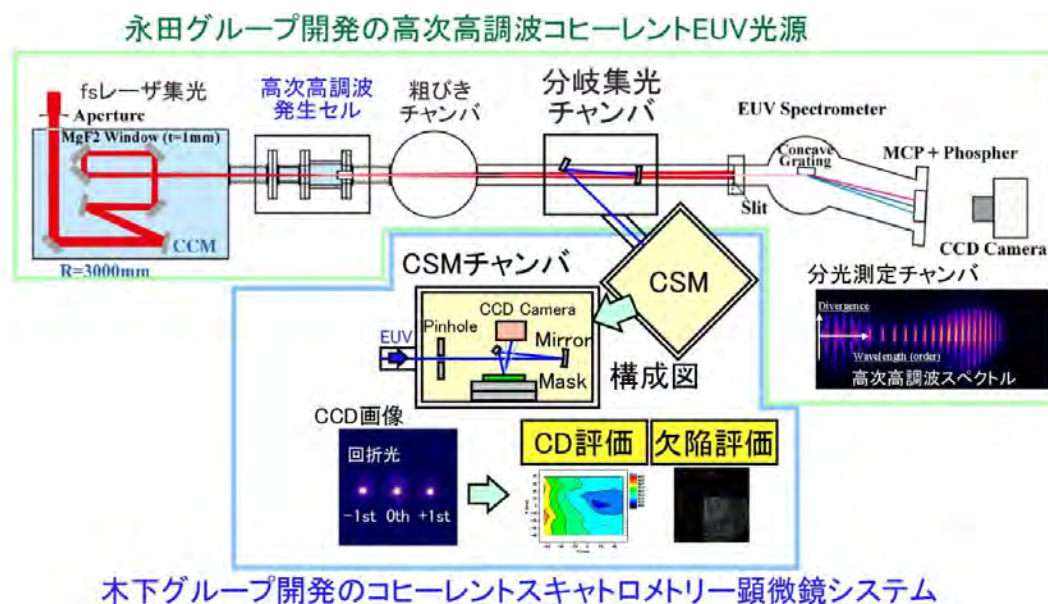


図1. 高次高調波コヒーレント EUV 光源を採用した C S Mシステム.

本研究で構築した C S M 光学系の内部写真と構成図を図 2 (a), (b) に示す。高次高調波発生装置の EUV 光源像を分岐集光チャンバ中の凹面鏡と平面鏡により C S M チャンバ入り口のピンホール上に投影する。光学素子はすべて Mo/Si 多層膜でコートされており、波長 13.5 nm の EUV 光を反射する。振り分けの凹面鏡は X 軸ステージ位置により、光路を分光器チャンバと CSM チャンバに切り替える。また、高次高調波 EUV 光と同軸上には波長 800 nm の桁違いに強い基本波 (6W) があるため、EUV のみを切り出すため光路上に厚さ 200 nm の Zr フィルターを 2 枚挿入し、迷光を完全に防いでいる。基本波は桁違いに強いので、そのまま Zr フィルターに照射すると熱負荷により壊れてしまう。そこで、永田グループが開発したピンホールによる減光機構 (特願 2012-060637, 「減光機構」) により、2 桁程度減光することで、Zr フィルターによる迷光カットを利用可能とした。

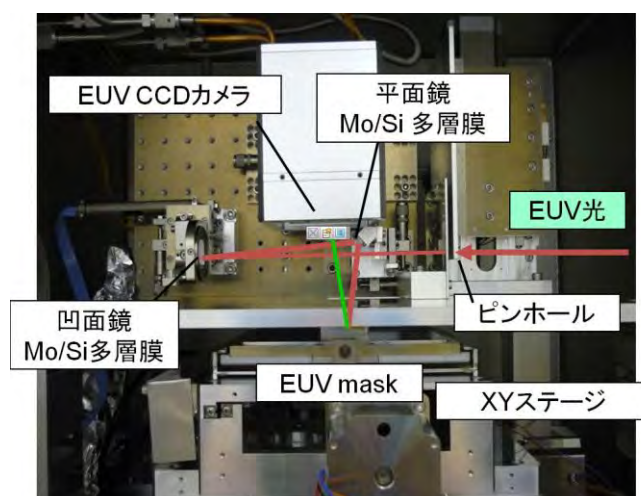
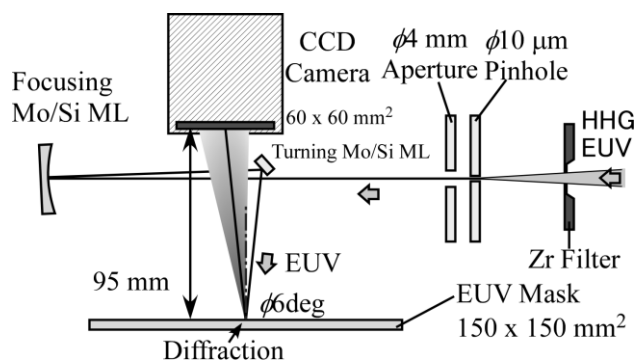


図 2. (a) C S M 光学系の内部写真



(b) C S M 光学系の構成図.

さらに、 $\phi 10 \mu\text{m}$ ピンホールからの EUV 光を再度凹面鏡と平面鏡を利用して、EUV マスクパターン上に投影し、マスクパターンからの回折光を CCD チップサイズが 60 mm 角の面積 CCD カメラで記録する。実際に初めて記録した EUV 光のファーストライトを図 3 に示す。被照射マスクにはパタンのない領域を用いており、ピンホールからの回折環が放射光での測定と同等あるいはそれ以上の品質で記録されている。

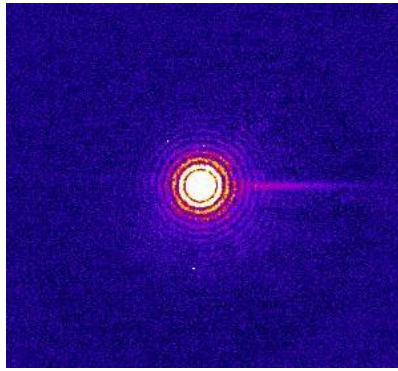


図 3．高次高調波 EUV 光の正反射光のファーストライト．

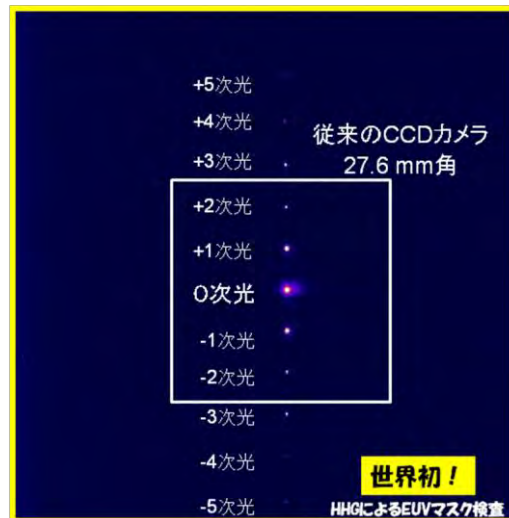


図 4．高次高調波 CSM による EUV マスク上のラインパターン観察像．

また、図 4 には EUV マスク上の hp 32 nm 世代用のラインパターンを観察した結果を示す。図中の白線で囲った部分が従来の市販の CCD カメラで観察される領域であり、最大± 2 次光まで記録できる。今回開発した 60 mm 角の大面积 CCD カメラでは最大± 5 次光まで記録可能であり、より微細な構造まで評価可能となった。60 mm 角は現状で手に入る EUV 直接検出可能な CCD チップとしては最大サイズである。暗電流のばらつきを評価し、CCD 全面が-40 度に冷却できたことを確認できた。

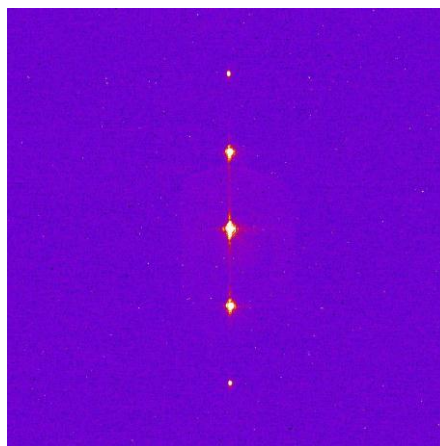


図 5．L/S パタン中の欠陥からの回折光の CCD 画像．

図5にはL/Sパターン中の線欠陥の観察結果を示す。L/Sパターンの回折光と、それを貫く欠陥からの線状の回折光が記録できた。このように、高次高調波を光源に採用したスタンドアロンでの測定を実現できた。EUVリソグラフィーでの量産が目前に迫った今、産業界から強く求められているスタンドアロンシステムを開発できたことは非常に大きな成果といえる。

また、測定位置の検出には数mm程の視野での観察が必要となる。このため、平行光をCSMに入射し、EUV光の影絵で評価する手法を開発した(図6)。まずは放射光実験機での実験を進め、高次高調波システムに適用した。このため、加速資金で分岐集光チャンバを製作し、凹面鏡での集光機構とMCPチャンバへの振り分けに加えて、平面鏡を挿入した。平面鏡で反射することで集光されていない光をCSMチャンバへ導入可能であり、放射光実験機と同様な広視野の影絵にて位置を導出することが可能である。図6の測定例では、3mm×2mmの領域が観察されているのが分かる。EUVは波長が短いため、回折角が小さく10μm程度の構造まで識別できる。

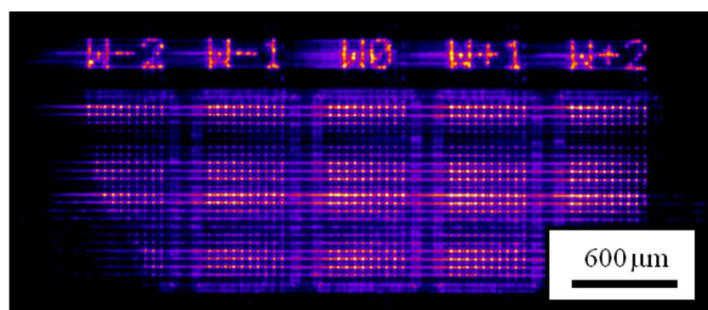


図6．EUV影絵による広視野観察図．

CSMは基板からの散乱光を直接記録するため、基板粗さ評価にも利用可能である。つまり、CSMでは平行に近い光をマスクに入射し、反射光と散乱光を2次元検出器で記録するため、露光波長に対する粗さのパワースペクトル情報を直接得ることができる。例えば、2005年製と2009年製のマスク基板からの反射光をCSMで記録した回折画像を図7に示す。中心部分の明るい部分は正反射光であり、その周囲が基板粗さにより発生した散乱光(スペックル)である。2005年製マスクではスペックルが記録されており、2009年製マスクではスペックルは記録されておらず、基板粗さが改善したことがわかる。より、照射強度を増やし、中心の反射光を抑えることで基板の粗さ評価に適用可能である。

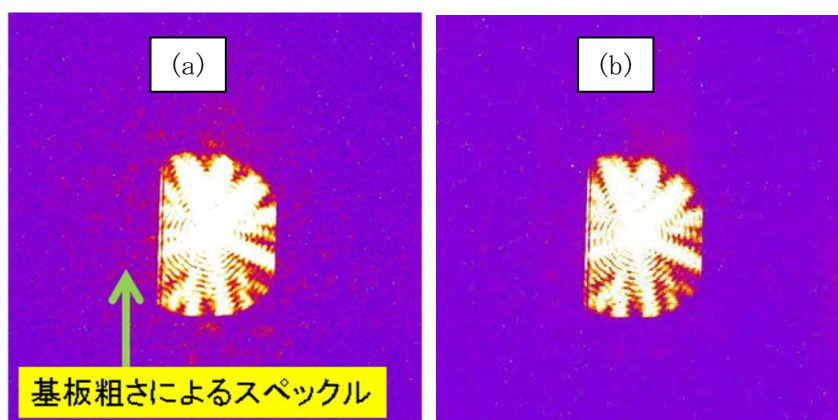


図7．基板からの散乱光 (a) 2005年製マスク基板、(b) 2009年製マスク基板．中心部分は正反射光であり、周辺部分に散乱光(スペックル)が記録されている。

最終年度には光伝送系を変更し、高次高調波光の利用効率の大幅増加を図った。4.2節でも詳しく述べるが、励起レーザー光の焦点位置(EUV光の出射位置)における位置安定性はEUV光の光源サイズ(FWHM) 30 μm に対して、rms 値で縦 7 μm 、横 5 μm と大きかった。そのため、図8左に示すように、中間集光点に $\phi 10 \mu\text{m}$ のピンホールを設置した2段伝送系を取っていた。マスク上の照射位置はピンホールの位置に対応し、光源位置がふらついても変化しない。しかし、ピンホールにおける光の透過光量が非常に低く、ピンホールのみで透過光量が1%以下となる問題があった。具体的には 80 nm $\times$ 160 nm の吸収体欠陥を検出するために必要な露光時間は1,000秒と長い時間を要した。

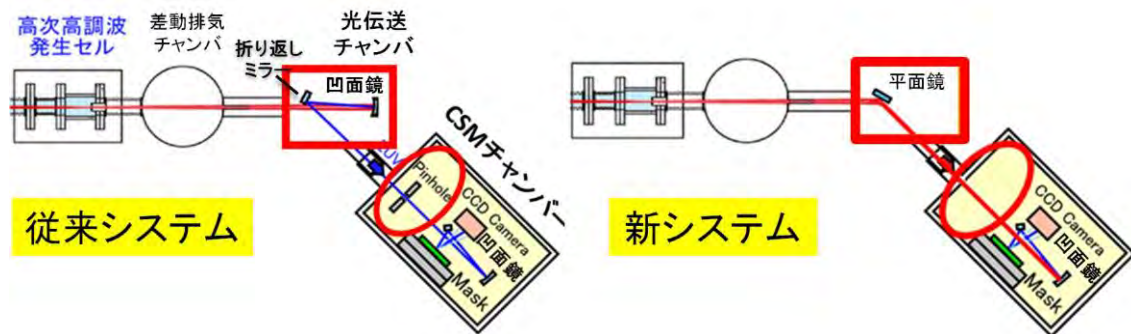


図8. 光伝送系の改良の概念図。左が従来の2段伝送系、右が新たな1段伝送系。

光源位置の大きな変動の原因はレーザー自体の安定性や、チャンバ架台の振動、ガス圧力変化に伴うチャンバ変形であった。そこで、ビーム位置安定化機構の導入や、真空チャンバ内の光学台の設置法の改善、石定盤や新規架台の導入によりビーム位置の安定性を縦 0.3 μm 、横 0.5 μm と大幅に改善した。光源位置が安定したため、高次高調波光のマスク上への伝送系を図8右に示す1段伝送系に改良した。

伝送系を1段に変更した結果、マスク上の照射光量は従来システムの約 80 倍の 18 nWまで向上した。また、マスク上の集光サイズは $\phi 5 \mu\text{m}$ と小さく絞ることができ、微小欠陥に対する検出感度の向上が期待される。詳細は4.2 節で述べるが、この改良により前述の 80 nm $\times$ 160 nm の吸収体欠陥を検出するために必要な露光時間を1 秒と 1/1000に大幅短縮することに成功した。露光時間の短縮により暗電流ノイズが大幅に軽減した。また、照射領域の縮小により欠陥由来の回折光強度と周期パターン由来の干渉光強度の比が小さくなった。これらによって欠陥由来の回折光パターンが鮮明に観察することができた。

研究項目②：像再生アルゴリズムの開発

<研究のねらい>

EUV マスクを計測評価するための像再生アルゴリズムの確立を目的とした。

<究実施方法>

マスク計測アルゴリズムに関しては、放射光施設ニュースパルのCSM実験機にて得られたデータを元に開発した。計測アルゴリズムとしては以下の5つを開発した。1: Critical Dimension (CD) 測長アルゴリズム、2: 周期的パタンの像再生アルゴリズム、3: 非周期的パタンの像再生アルゴリズム、4: 欠陥検出アルゴリズム、5: 位相像観察。

<研究内容>

1. CD 測長アルゴリズム

CSM では実露光波長での回折光が得られるため、CD 値も実露光波長、実露光条件での値として評価すべきである。そこで、パタンが結像した場合の像強度プロファイルを、CSM で記録した回折強度より導出し、CD 評価に用いた。このようなパタン像(イメージ)より導出する手法は Chris Mack がイメージ CD として提案した手法であり、実効的な線幅を導出することができる。

L/Sパタンの場合、CSMでは図9に示す回折画像が記録される。図で用いたパタンのサイズは22 nm 世代用の 88 nm L/S である。中心に正反射した0次光、左右に±1次回折光が記録されている。露光機の場合、これらが取り込まれ、ウェハ上にはほぼ無収差で結像される。よって、各回折次数の強度を評価し、相対的な位相情報が得られれば、回折光の干渉から導出した式 (1)に従い、結像強度プロファイルを計算できる。式 (1)は強度プロファイルの計算式であり、 $I(x)$ は導出する結像強度、 u_0 は0次光強度、 u_{-1} 、 u_{+1} は±1次光の強度である。また、 p はパタンのピッチで、 x は結像位置である。

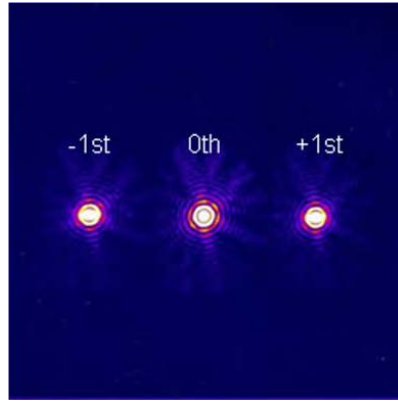


図9. 88 nm L/S パタンからの回折光強度画像.

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

この式から計算したパタン像の強度プロファイルを図 10 に示す。CD 値が 64 nm、88 nm、112 nm の場合の3つのプロファイル像を示しており、CD 値によりピーク強度と半値幅が異なる。実際のプロセスではレジスト感度とドーズによって、レジストの線幅が決まる。つまり、図中に青線で示したような強度閾値(I_{th})があり、それ以上となる強度領域がレジストパタンとして露光される。そこで、この強度閾値で決まる幅をイメージ CD として定義する。本研究においては、CD-SEM での CD 測定値が 88 nm であるパタンにおいて、イメージ CD も 88 nm となるように強度閾値を設定し、CD 値のばらつきを評価している。

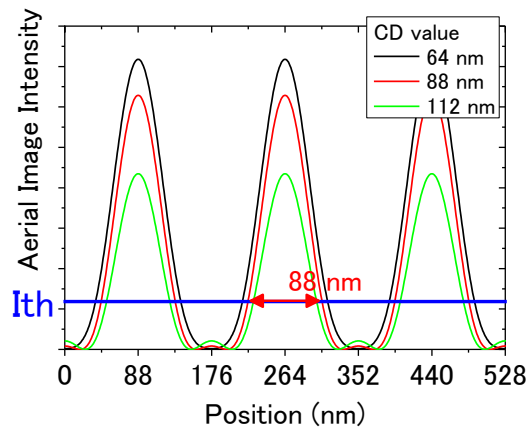


図 10. 回折光強度から計算したパタン像の強度プロファイル。

図 11 に CSM で測定した 6025 基板上の 22 nm 世代 L/S パタンの CD 測長結果を示す。(a)に CSM で測定した CD 分布を示しており、電子線描画やエッチングプロセスにより生じたばらつきを評価できている。また、(b)に示したように、CD-SEM 測定結果との相関は線形で、非常に良い相関が得られた。なお、この全面測定において、CSM ではフォーカス位置出しなどの微調はしておらず、パタン位置へ移動後に回折強度をそのまま測定している。測定再現性は ITRS ロードマップ要求の 0.65 nm (3σ) に対して、CSM では繰り返し測定で 0.13 nm (3σ) を得た。

このように CSM での CD 測長は、調整がほとんど必要なく簡便で、チャージアップなどの影響がなく、実効的な線幅を再現性よく評価することができる。よって、今後の EUV マスク評価に非常に有用であり、マスク CD 計測の標準的なツールとなり得る。

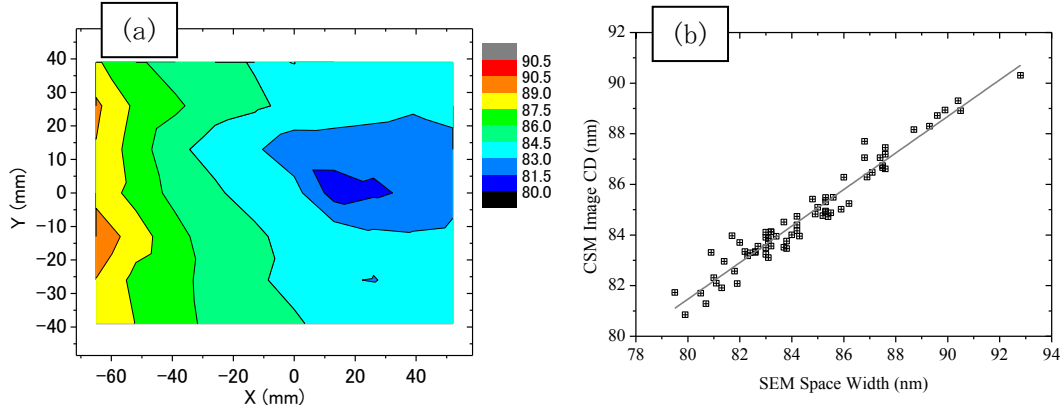


図 11. (a) 6025 基板上の CD 分布の評価結果、(b) CSM 測定値の CD-SEM 測定値との相関

2&3. 周期的パタンの像再生アルゴリズムと非周期的パタンの像再生アルゴリズム

本研究を開始する前に先行研究で周期的パタンの像再生アルゴリズムは、HIO アルゴリズムを利用していた。HIO アルゴリズムはあるエリアを照射した回折画像1枚に対して、拘束条件を課した反復計算を適用し、記録されない位相情報を回復する。しかし、元々は大きな照明光に対して微小なサンプルの測定をするために開発されたアルゴリズムであり、CSM のようなパタンの一部を照明する構成では像再生が難しかった。具体的には周期的パタンは再生できていたが、パタンの端や、孤立パタンの像再生は難しかった。

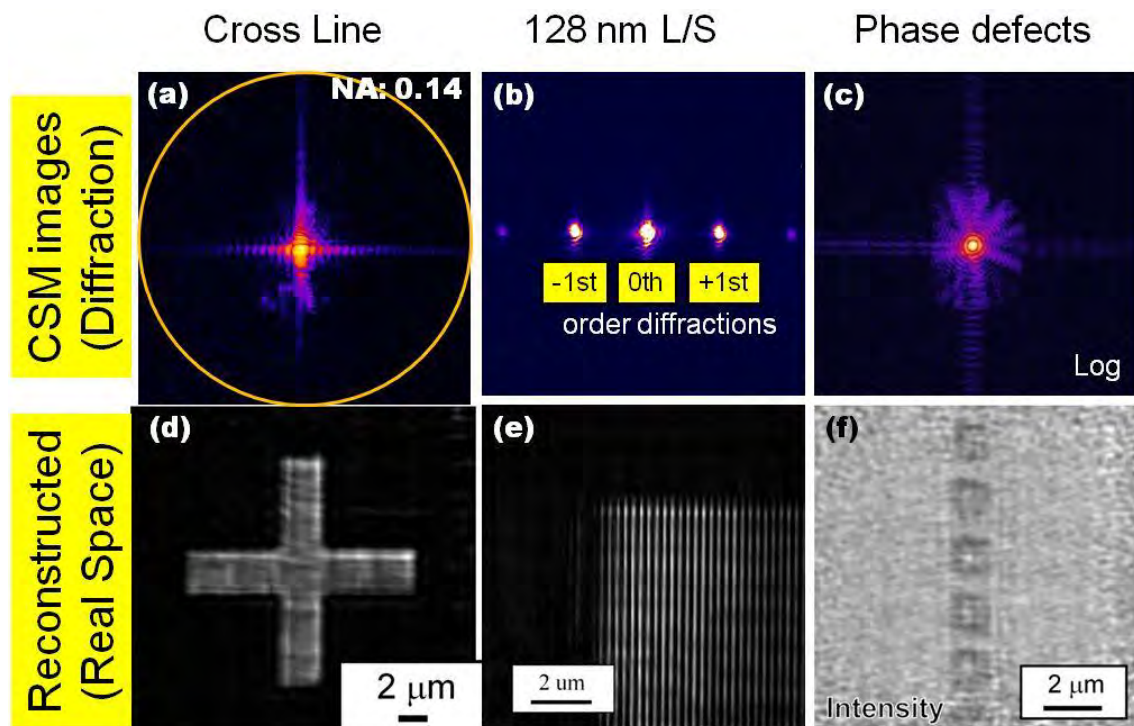


図 12. CSMにて記録した3種類のマスクパタンからの回折画像((a)~(c))とその強度像再生結果((d)~(f))。十字パタン(a)(d)、128 nm 線幅のライン&スペース(L/S)パタン(b)(e)、1 μm □の位相欠陥(c)(f)。

そこで、大きなパタンに対する測定アルゴリズムとして開発されている「タイコグラフィー」をマスク検査に適用し、EUV マスクパタンの像再生方法として開発した。タイコグラフィーでは、照射位置をずらした複数枚の回折画像を反復計算に用いる。各照明領域が重なるようにずらし、重なった領域は同じものであるという拘束条件を利用して像再生する。

実際のパタンの観察結果を図 12 に示す。回折画像を(a)(b)(c)に示す。タイコグラフィーにより像再生した非周期的なパタンを図 12(d)~(f)に示す。パタン上の5 x 5点など25点以上において、照射位置をずらしながら回折画像を記録しており、図 12 には代表的な1点の回折画像を示している。(d)は十字形状の孤立パタンであり、(e)は128 nm L/Sパタンの端部分を観察している。(f)は位相欠陥を観察した欠陥であり、このように、非周期的な形状や、周期形状の端部分を観察でき、CSMがパタン計測にも適用できることが示せた。

4. 欠陥検出アルゴリズム

CSMを用いて128 nm L/S中のプログラム欠陥を観察した。図 13(a)のCD-SEM画像に示すように、周期的なL/Sパタン中の1本の吸収体が20 nm 細い線欠陥である。(b)はCSMで観察した回折画像であり、L/Sパタンによる回折光を貫く形で、欠陥からの回折信号がはっきりと記録されている。このように周期パタンからの回折光に加えて、欠陥からの回折光が記録される。2 nm の欠陥サイズまで検出できている。

欠陥位置を特定するため、タイコグラフィーによる像再生をした結果を図 13(c)に示す。周期的なパタン中に線欠陥が白く再生されている。しかし、周期パタンが乱れており、他にも欠陥があるように見える。そこで、周期パタン成分を除去して像再生した結果を(d)に示している。線欠陥部分が白くはっきりと検出されており、CSMによって欠陥位置を特定することができた。

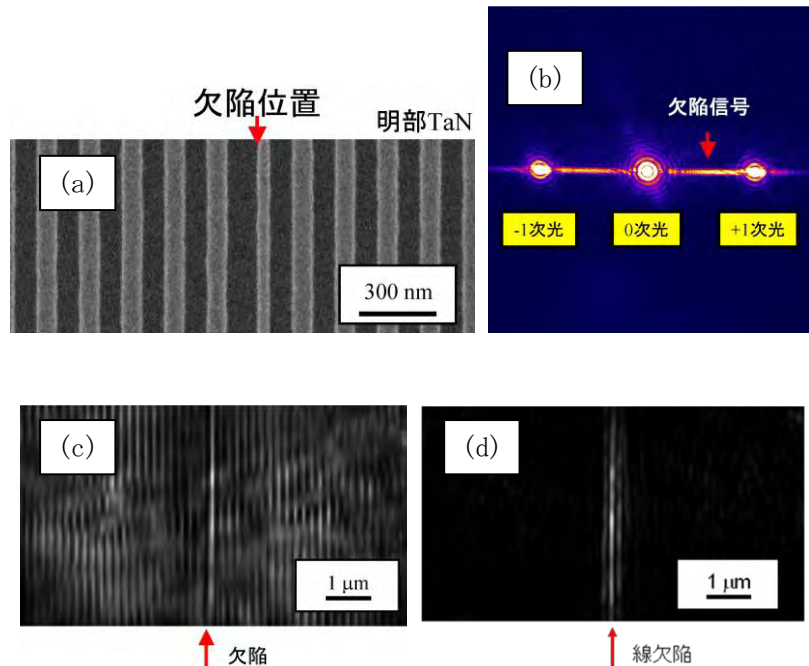


図 13. CSM による 88 nm L/S 中のプログラム欠陥検査結果。(a) 欠陥の CD-SEM 画像。(b) CSM で欠陥を検出した回折画像。(c) 像再生により得られた欠陥像。(d) 周期パターン成分を除去した欠陥像。

○周期パターン中の点欠陥の検出

パターンの一部が欠損、付着した孤立の点欠陥の検出をすすめた。放射光を利用した場合は時間あたりの照射光量の低さとコヒーレンスの不足により点欠陥は検出できなかった。高次高調波を用いることで十分なコヒーレンスが得られたため点欠陥の検出が可能となったが光源の空間的なゆらぎ等のため利用効率が極端に低く検出に1,000秒程度の時間を要した。そこで4.1節で述べた1段光伝送系を用いて図14(a)に示す点欠陥の検出を進めた。この欠陥は128 nm L/Sパターン中に一部80 nm×160 nmの出っ張りが存在する吸収体欠陥である。

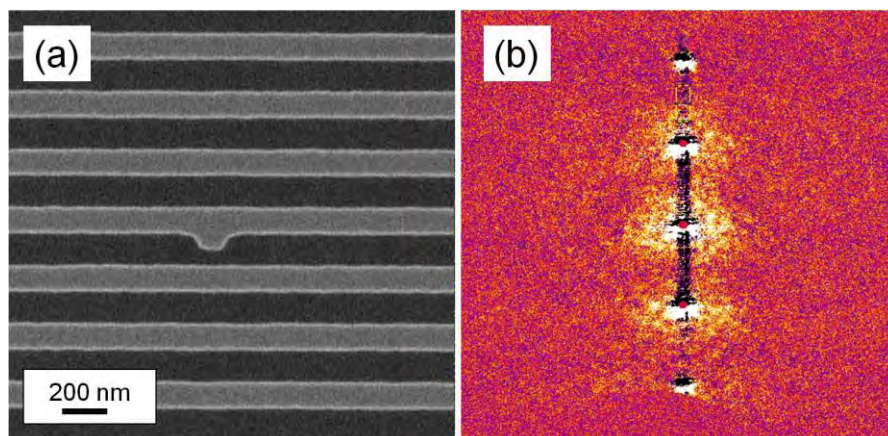


図 14. (a)測定した吸収体点欠陥の SEM 画像。(b) CSM による観察結果。欠陥部分の信号と無欠陥部分の信号の差分を表示している。

この欠陥を CSM にて測定した結果を図 14(b)に示す。測定時間は 1 秒である。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、わずか 1 秒の露光時間にて点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、パターン中の点欠陥を検出できることを実証できた。今後はより小さな欠陥の検証を進める。また、マスク上での照明光をより小さく絞ることで短時間での計測およびコントラストの改善が実現される。照射サイズを現状の $\phi 5\ \mu\text{m}$ よりも小さくすることで、さらに微細な欠陥の検出を目指す。

5. 位相像観察

EUV リソグラフィにおけるマスクの吸収体には TaN (窒化タンタル) が利用されるが、TaN は EUV に対して完全な吸収体ではなく、半透明な位相物体である。例えば一般的に用いられる 70 nm 厚さの TaN 膜を 2 回 EUV 光が透過する場合を考える。強度透過率は 0.3% 程度であるが、振幅透過率は 6% で干渉するには十分な振幅があり、位相に至っては 180 度以上変化する。よって、TaN のパタンされた部分と、非パタン部分 (反射領域) の干渉は無視できず、大きな影響を与える。逆にこの位相差を利用し、吸収体の位相差を 180 度丁度に制御することでプロセスウィンドウを広げる減衰型位相シフトマスクも開発が進んでいる。さらに、EUV マスクは Mo/Si 多層膜の上に吸収体でパタンが配置された 3 次元構造となっており、反射型であることと併せて非常に複雑な位相応答を示す。そのため、露光機での転写特性をシミュレーションするため、実際にパタン構造の位相分布を観察することへの要望が非常に大きくなっている。

前述の非周期パタンの像再生アルゴリズムでは、強度像の観察結果について述べた。実空間の強度像は、回折画像 (周波数空間の強度像) をもとにタイコグラフィアルゴリズムでの反復計算にて導出している。この反復計算は記録されない周波数空間の位相情報を、拘束条件を利用して回復している。結果的に 周波数空間の強度情報と位相情報が得られるため、実空間の強度情報と位相情報も同時に得ることができる。 様々なパタンの位相像について観察した結果を示す。

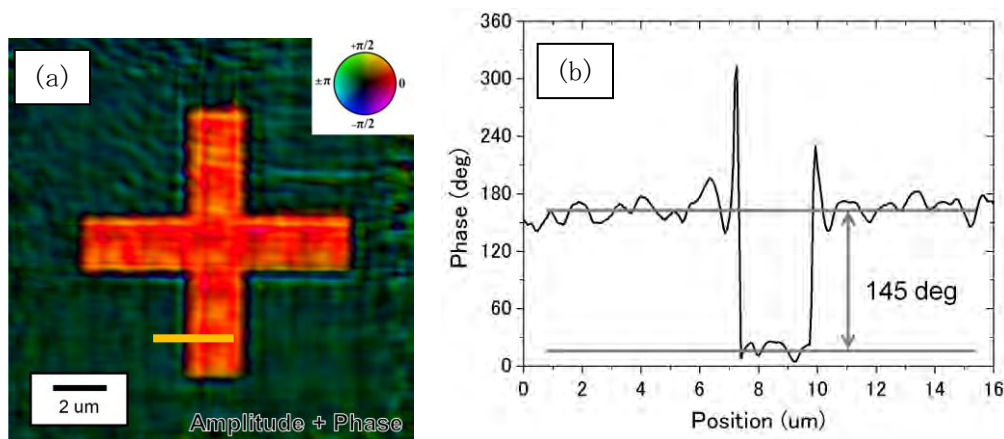


図 15. 十字パタンの (a) 振幅強度+位相像と、(b) その位相プロファイル。

明度が振幅強度、色 (色相) が位相に対応している。

図 15(a) には十字パタンの振幅と位相の再生像を示す。十字の反射領域と周辺の吸収体領域の位相差がはっきりと観察できている。図 15(b) にはオレンジ線で示したパタ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、吸収体構造から計算される値と一致した。

微細パタンの観察結果（強度像、振幅+位相像）を図 16 に示す。88 nm L/S パタと 128 nm L/S パタンの角部分を観察している。十字パタンと同様に、吸収体と反射領域の位相分布が可視化できた。EUV 光の入射方向は図の右から左方向であり、入射光に対して 88 nm と 128 nm L/S パタンではパタン方向が異なる。つまり、88 nm L/S パタンではパタン方向と入射方向が平行であり、影（Shadowing 効果）が発生しない。一方の 128 nm L/S パタンではパタン方向と入射方向が直交しており、Shadowing 効果が生じる。この違いを議論するため、図 17 に位相と強度プロファイルを示す。(a) 88 nm L/S パタンの Shadowing 効果なしでは、パタン中の吸収体と周辺の吸収体の位相は同等であり、反射領域に対して 145° の位相差である。よって、十字パタンと同様に吸収体構造から予想される値と同様である。一方、(b) 128 nm L/S パタンの Shadowing 効果ありでは、パタン中の吸収体位相と周辺の吸収体位相が大きく異なる。Shadowing 効果によるパタン中の位相変化を初めて観察できた。

従来の Shadowing 効果は、影による線幅の変化だけが考えられていたが、本結果より反射位相変化による転写特性への影響が大きいことがわかった。このように微細パタン中の位相分布を測定できることが大きな特徴となる。

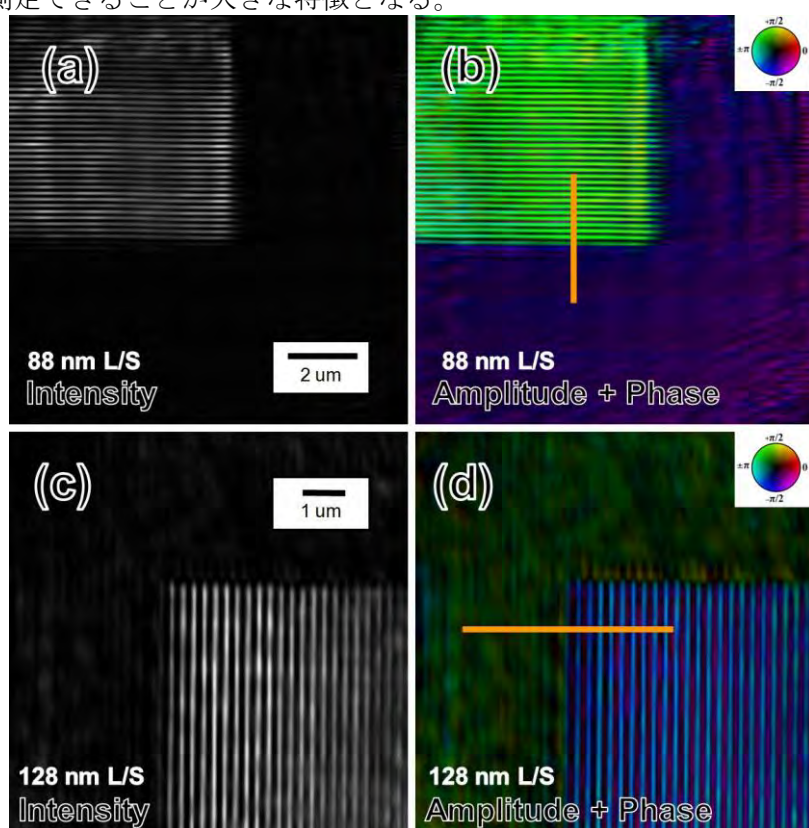


図 16. L/S パタンの強度像と、その振幅+位相像。(a) (b) 88 nm L/S パタン、Shadowing なし。(c) (d) 128 nm L/S パタン、Shadowing あり。

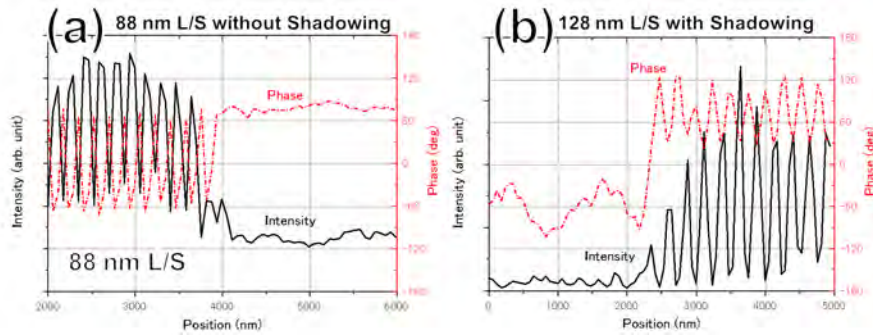


図 17. 位相と強度プロファイル。図 16 のオレンジ線部分。(a) 88 nm L/S パターン、Shadowing なし。(b) 128 nm L/S パターン、Shadowing あり。

○位相欠陥の位相像再生

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 18(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 18(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。

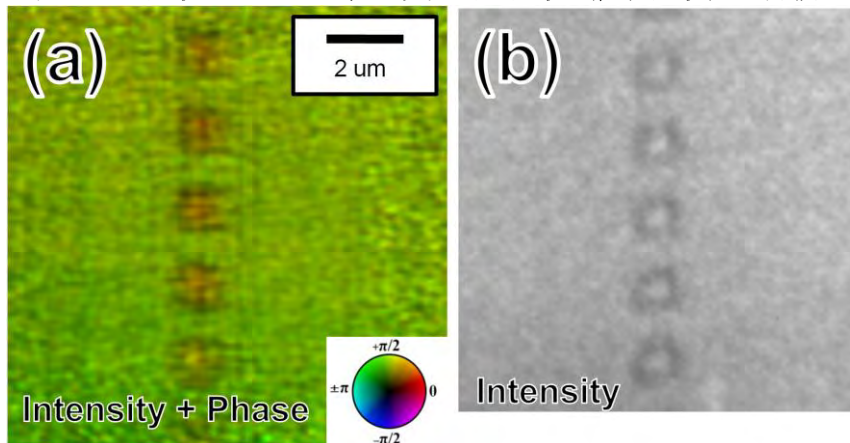


図 18. $1\ \mu\text{m}$ 角のプログラム位相欠陥像。(a) CSM, (b) EUV 顕微鏡。

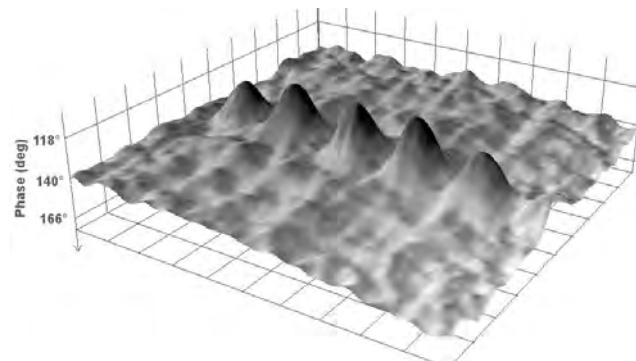


図 19. $1\ \mu\text{m}$ 角のプログラム位相欠陥の位相分布の 3 次元表示。

CSM で評価した位相情報を図 19 に 3 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。

4. 2 13 nm 高次高調波発生(理化学研究所 永田グループ)

(1)研究実施内容及び成果

<研究背景>

放射光に代わるスタンドアロンなコヒーレント EUV 光源として高次高調波発生システムの開発をおこなった。高次高調波発生法ではテーブルトップサイズの高強度フェムト秒レーザーパルスと希ガスとの高次の非線形効果を利用することで 1keV 領域までの高輝度コヒーレント光を発生させることが可能である。また、波長変換法であるため適切な位相整合を実現することにより、励起レーザーと同等のコヒーレンスを実現することが可能である。一般にはあまり知られていない光源であることもあり、ほとんどの場合は高強度フェムト秒レーザーシステムの開発者自身が高次高調波発生システムの高度化を実現してきた。これにより、高出力化やアト秒パルスの発生などが実現されてきた。一方、その応用としては EUV 領域での非線形光学や分子動力学を始めとしたアト秒サイエンスなど科学研究分野のものがほとんどとなっている。これらの研究では、研究者自身が目的に合わせて開発した励起レーザーシステムが利用されている。一方、市販のレーザーシステムを用いても高次高調波発生は可能ではあるが優れたコヒーレンスを有する高次高調波発生を発生させることは困難である。そのため応用研究のほとんどは分光学的な分野の研究に限定されていた。今現在でもその状況に大きな変化はない。

<研究目的>

本研究では CSM 装置全体の実用化を見据えて、容易に入手可能な市販のレーザーシステムベースのコヒーレント高次高調波発生システムの開発をおこなった。位相整合条件を始めとする発生条件の最適化により空間的にフルコヒーレントな EUV 光を発生させ、その出力として EUV マスク上での光量として放射光の 1000 倍に相当する 1nW を得ることを目標として研究をすすめた。

<研究内容>

○励起レーザーシステムの選定

励起レーザーシステムとしては安定動作が可能でフィードバック制御なども可能となる 1kHz 以上のシステムが望ましい。一方で波長 13.5 nm の高次高調波を発生させるために 10^{15} W/cm² 以上の集光強度が必要である。さらにコヒーレント高次高調波を発生させるためにはルーズフォーカシングが必要である。これらの観点から研究開始当初においてもっとも適した市販のレーザーシステムとして Spitfire Pro 6W を導入することとした。レーザーの主な仕様は繰り返し 1 kHz、パルスエネルギー 6 mJ、パルス幅 40 fs 以下、ビームの空間安定性 10 μ rad(rms)以下である。

○高次高調波発生システムの開発

レーザーの仕様が決定したところで実際の高次高調波発生システムの設計製作を開始した。コンセプトは取り扱いが容易で汎用性が高いシステムの開発であった。ここで汎用性とはコヒーレント高次高調波を発生可能な既存の手法全てに対応可能なシステムのことを意味している。その中でももっとも調整が容易な半差動排気セルを用いた方式で高次高調波発生システムの構築をおこなった。本システムで特質すべき点は相互作用領域となるセル部分を透明なアクリルチューブで製作して大気中に設置したことである。これにより従来法と比較してシステムの調整が格段に容易となった。

高次高調波発生システムの全体図を図 20 に示す。光学定盤上に設置した励起レーザーシステムにより発生した励起レーザー光は集光チャンバー手前に設置したアパーチャの中心を通ったのち、厚さ 1mm の MgF₂ 窓を介して集光用の真空チャンバー内に導入した。励起レーザー光は凹面鏡で集光しつつ、チャンバー内をとり回して最終的に相互作用セルの出力側のピンホール用銅板へと導いた。この銅板自体には初期状態でピンホールは開いていない。レーザー光自身で開けることで初期のビーム位置の調整を不要とした。集光チャンバーからこの銅板までは非線形媒質として用いたヘリウムガスで満たされており、ピンホールを介して真空側と分離されている。高次高調波は励起レーザー光と同軸に発生するため、励起レーザー光の光軸上に EUV 分光器のスリットの中心が来るように、励起レーザーの角度調整をおこなった。分光器は一般的なデザインのものを用い

た。入射スリットを透過した光は溝間隔 1200 本/mm の 3 度入射の不等間隔平面結像型を用いて MCP(Micro channel plate)上に結像した。この光は MCP によって光電変換された後、高電圧を印加した MCP で増幅され、蛍光面に当たることで光として観測された。このとき水平面内には高次高調波のスペクトルが縦方向には波長ごとの空間強度分布が現れる。有効径 40 mm の MCP を利用したため波長 6~35 nm のスペクトルが同時に観測された。蛍光面上での像は冷却型の CCD カメラを用いて観測した。当初、高次高調波の出射側のピンホールから分光器のスリットまでの距離は 1.35 m であったがその後、CSM システム導入のため 2.7 m に変更した。

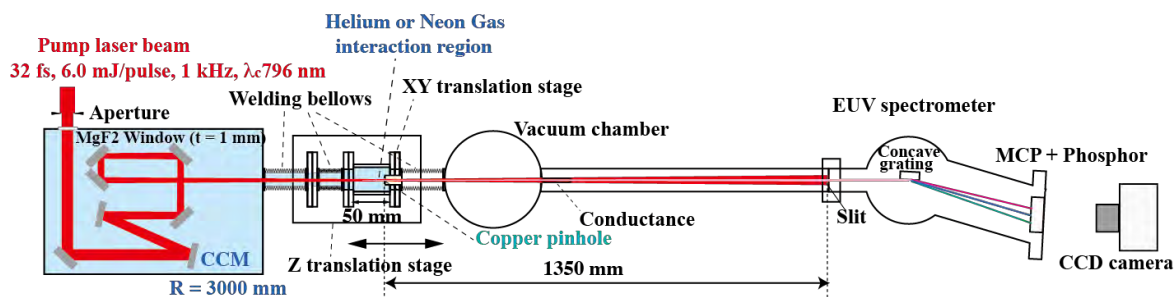


図 20. 高次高調波発生システム全体図

○コヒーレント高次高調波の発生

高次高調波発生は理論的な解析が進んでおり、光子のエネルギーが約 $I_p + 3.2 U_p$ を超える領域で急激に変換効率が減少することがわかっている(カットオフ)。ここで I_p (eV)は原子のイオン化エネルギーであり U_p (eV)はポンデラモートイプエネルギーと呼ばれ、レーザー光の交番電界によって原子が得るエネルギーであり、レーザーの波長の 2 乗とレーザー強度の積に比例する。また、高次高調波発生は主に位相整合条件の異なる 2 つの電子波束の軌道から発生することが明らかとなっている。これらはその軌道の長さから”Short Trajectory”および”Long Trajectory”と呼ばれている。これらの軌道はカットオフ近傍で一つの軌道となる。

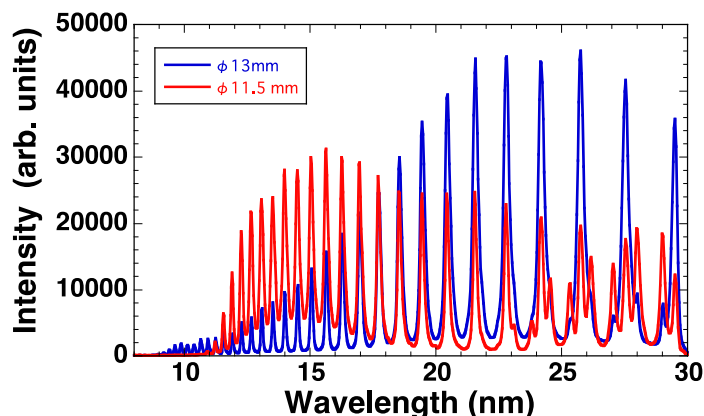


図 21. 高次高調波のスペクトル強度分布のアパーチャサイズ依存性

同時に光の空間的、時間的なコヒーレンスもこれらの軌道によって異なる。コヒーレント光の発生に関しては”Short Trajectory”から発生した高次高調波が最も優れた特性を有する。一方でカットオフ近傍では高次高調波の高出力化が容易である。他方、非線形ガス媒質中での高強度レーザー光の伝搬にはベッセルビームが適していることもわかっている。そのため一般的な研究ではアパーチャを用いてビームの強度分布をトップハット形状に近づけることで非線形媒質中でのビームの伝搬を改善するとともに、集光強度を最適化して目的とする波長がカットオフよりも長波長となるように調整することが多い。

本研究においても初期の実験で得られた結果はほぼ予想通りのものであった。ヘリウムガスの圧

力を一定として、ビームサイズのみをアパーチャで変化させた時に観測されたスペクトルを図 21 に示す。励起レーザーのビームサイズ(強度が $1/e^2$ となる直径)は 12 mm であった。この図から明らかにビームサイズを小さく最適化することで波長 13.5 nm 付近の高次高調波の強度が数倍に増大していることがわかる。ここ考慮したのはこのまま既存の手法で研究を進めて良いかどうかである。考えるきっかけとなったのは図 21 でビームサイズ 13 mm のときに観測された高次高調波のビーム拡がり角である。13.5 nm 高次高調波のビーム拡がり角はアパーチャの口径 11.5 mm, 13 mm でそれぞれ 1.3 mrad, 0.5 mrad であった。アパーチャの口径をビームサイズより大きくした条件では短波長側の高次高調波の出力はビーム拡がり角まで考慮するとビームサイズを小さくした時と比較して数十分の 1 以下であるものの、波長 9 nm 以下まで波長とともに緩やかにビーム拡がり角が減少することが確認された。ビーム拡がり角が小さいことは空間コヒーレン스에優れた光であることを意味している。また時間的なコヒーレンスも "Short Trajectory" の領域で発生させたほうが優れたものとなる。しかし、既存の研究報告ではアパーチャサイズをビーム径以上としてコヒーレント光を発生させたものはない。そこで新しい手法でビーム拡がり角の減少を実現したときの利点を考えたところ、高次高調波の実用化につながる新しい空間ビームセパレータの着想を得た。そこでビーム拡がり角の小さな高次高調波の出力を増大させかつ単一モードの強度分布を実現ことに注力して研究を進めた。当初はアパーチャ径の拡大にともない高次高調波の空間強度分布が悪化していた。しかし、レーザシステムの調整による最適化および集光光学系の最適化、光学系の配置の見直し等を経て、大きなアパーチャ径でビーム拡がり角の小さなガウシアン強度分布の高次高調波発生に成功した。かなり細かな調整が必要となるためアパーチャ部分は電動のアイリスに置き換えたが 0.1mm 以下の刻みでも明らかなスペクトルの変化が観測された。アパーチャ径を 14.5 mm としてヘリウムガスの圧力のみを変化させた時に観測されたスペクトルを図 22(a)にとガスの圧力 17.6kPa のときに観測された高次高調波の空間強度分布を図 22(b)に示す。

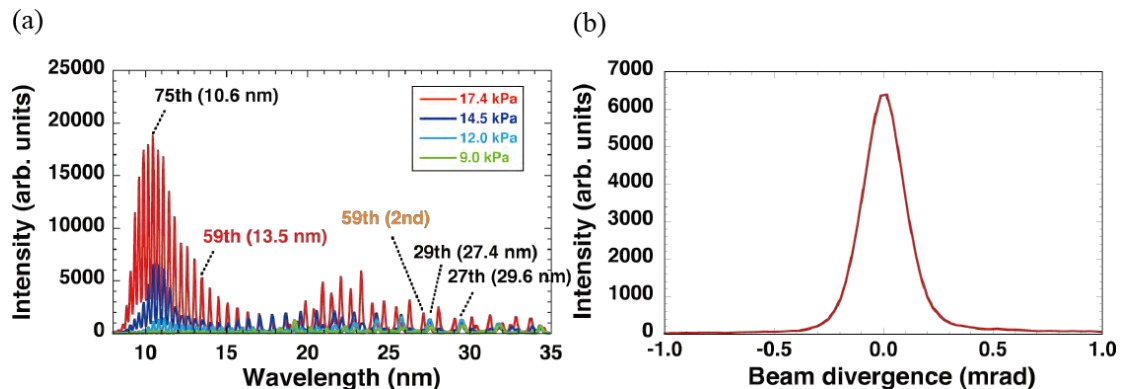


図 22. (a) 高次高調波のスペクトル強度分布のガス圧力依存性 (b) 59 次高調波の強度分布

ヘリウムガスの圧力を 9kPa から 17.6 kPa に変更したときのスペクトル強度分布に着目すると波長 30 nm 付近の高次高調波の強度はほぼ一定なのに対して波長 11 nm を中心とした波長域では強度が数十倍以上になっていることがわかる。この結果は高次高調波発生における位相整合条件が適切に取れていることを示している。13.5 nm の高次高調波の空間強度分布はほぼ完璧なガウシアン型となっており、ビーム拡がり角は 0.18 mrad であった。この結果からビームの出射側ピンホールでのビーム半径($1/e^2$)は 24 μ m と計算される。スペクトル幅は 0.1 nm 以下であることを確認した。これは高次高調波ビームの転送に利用した Mo/Si 多層膜鏡のトータルのスペクトル幅 0.3 nm よりも狭い。CSM の CCD カメラの NA 全域に有効な干渉像を与えるのに十分な時間コヒーレンスを持っている。

○空間ビームセパレータの開発

高次高調波発生法はコヒーレント EUV 光を発生させる優れた手法であるが、高次高調波が高強度の励起レーザー光と同軸に伝搬することが問題となる場合が多い。これは励起レーザー光の強度が集光点から数 m 離れた位置でも $\text{sub-TW}/\text{cm}^2$ であり、EUV 光用の薄膜フィルタや Mo/Si 多層膜鏡などのレーザー損傷しきい値よりも十倍以上高いことによる。もちろん EUV 光用オプティクスを相互作用領域から十分離れたところに設置することで損傷を回避することは可能である。しかし、装置全体が大型化するため現実的ではない。従来は励起レーザー光の波長に対して屈折率が高くブリュースタ角が大きいもののなかから、その角度において EUV 光の反射率が高い媒質を基板上に成膜または基板として用いることで励起光の低減を実現してきた。しかしこの方法ではオプティクスの配置に制約が大きく、複雑な測定系ではアライメントが困難になるなどの問題が生じる。そこで高次高調波のビーム拡がり角が励起レーザーのそれと比較して 20 分の 1 以下であることを利用した新しい空間ビームセパレータを開発した。図 23 に空間ビームセパレータの概念図を示す。実際には励起レーザーの光軸上に金属製のピンホールを配置しただけの簡単な構成ではあるが、その直径を高次高調波のビームサイズの約 1.5 倍とすることで励起レーザー光の透過エネルギーは約 100 分の 1 まで低下した。にもかかわらず 13.5 nm 高次高調波の透過率は約 98%と非常に高い。

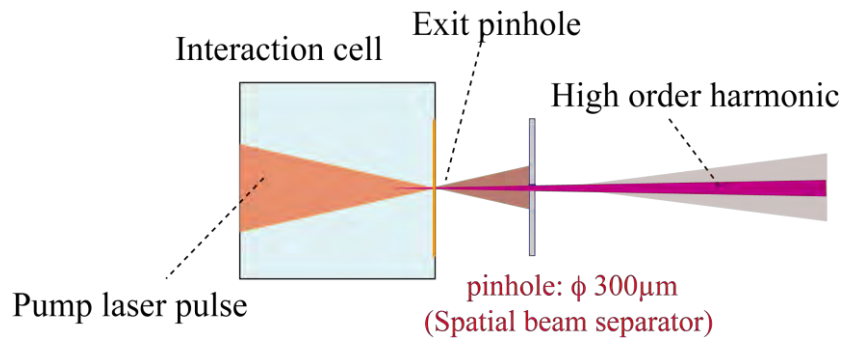


図 23. 空間ビームセパレータ 概念図

この方式は光軸が変化しないためアライメントが容易である。またそれ以外にも多数の利点がある。まず波長や偏光に依存しない。レーザー損傷しきい値が高く非常に安価である。加えてもう一つ重要な点は励起レーザー光がこのピンホールで再度回折されるためビームスポットの位置が実質的にこのピンホールの位置となることである。励起レーザーと高次高調波のビームスポットの位置が異なることから高次高調波を集光したとき、集光点でのビームサイズが大きく異なる。結果として計測時における励起レーザー光の影響を大幅に低減することが可能となる。さらに高次高調波自身にも利点がある。高次高調波の空間強度分布はガウシアン分布となっているが実際にはごくわずかに外側に広がる成分が存在する。これは位相整合の取れていない”Long Trajectory”で発生したものと思われるが計測においてはコントラストを下げる要因となりうる。ピンホールでカットしたほうが良い結果が得られると考えられ

高次高調波の出力はこのビームセパレータの後に Zr フィルターを挿入した後、Zr フィルターを付けたフォトダイオードを用いて計測した。この値からスペクトル強度分布とフィルター透過率等を用いて出力を評価した。その結果 13.5 nm 高次高調波の出力は 50 nW であることがわかった。この値から 13.5 nm の高次高調波をカットオフ領域で最適化したときの出力は約 1 μW と見積もられた。13.5 nm 高次高調波の時間的、空間的コヒーレンスが十分であることは CSM による欠陥検出において証明済みである。

○ビーム位置安定化システムの導入

高次高調波は空間的にフルコヒーレント光を発生させることも可能であり、この場合は出力すべてを CSM を含めた各種の干渉計測等に利用することが可能である。しかし、これはビームの照射位置でのビームサイズと比較してビームの空間的な揺らぎが十分小さいという条件を満たしたときに限られる。CSMでは高次高調波ビームをEUVマスク上に転送して利用するため、少なくとも高次高調波の出力端でのビーム揺らぎがビームのサイズと比較して十分に小さいことが必要条件である。ビーム揺らぎは励起レーザーの空間的な揺らぎとして評価可能である。励起レーザーの空間的な揺らぎは主にレーザーシステム、オプティクス、外部環境による振動、空調、温度および圧力変動などに依存する。本研究では EUV マスク上でのビーム揺らぎがビーム径よりも大きいことが観測された。そのため、EUV マスク上での光の照射領域を限定するために CSM の入射側に直径 10 μm のピンホールを設置した。理論的にはこれより大きくても問題ない。しかし周期構造からの干渉光の強度は照射領域に含まれる周期構造数の 2 乗に比例して増大するため、照射領域が広がると EUV マスクの周期構造に由来する干渉光強度のみが増加する。その結果、微細な欠陥からの回折光強度との強度比が CCD カメラのダイナミックレンジを大幅に上回ってしまう。このため、大きな径のピンホールを使用することはできない。高次高調波をこのピンホール上へ転送する際の倍率は等倍とした。そのため、ビーム径は 24 μm のままである。そのため、高次高調波のピンホールの透過率は最大で 7%となる。実際にはビームの長周期の揺らぎの影響もあったため実際のスループットは 1%以下に制限された。

また、これにより EUV マスク上でのビームの強度分布がトップハット状のものとなった。ビーム形状はフーリエ変換における窓関数に相当するものであるため、トップハットビーム照射では干渉像のメインのシグナルの周りのサイドロブを増大させてしまう。このサイドロブの強度は欠陥由来の回折光強度よりもはるかに強い。そのために点欠陥の検査では CSM 内に照射光の空間強度分布を滑らかにするために追加でピンホールを設置した。しかし、理想的にはガウシアンビーム照射が望ましい。ビームの重心位置の揺らぎを高次高調波のビーム径よりも十分に小さくすることができれば CSM の入射側のピンホールは不要となり、測定光量が 2 桁以上増大する。そこで励起レーザー光のビーム位置揺らぎを低減するためにビーム安定化装置を導入した。この装置はビームの位置検出用の PSD(Position sensitive detector) 2 個、光軸調整用の 2 個のピエゾ素子を取り付けたオプティカルホルダー 2 組および制御用のコントローラで構成されている。ビームの位置および角度の変位をそれぞれ計測して変位量が最小となるようにピエゾ素子を制御する方式のものである。図 24 は図 20 の真空チャンバーに取り付けたターボ分子ポンプを停止させた状態で計測したときのビームの集光位置での重心の変位である。時間は 1 時間計測した。その結果、励起レーザーの集光点での位置揺らぎとして垂直方向 0.72 $\mu\text{m}(\text{rms})$ 、水平方向 0.68 $\mu\text{m}(\text{rms})$ を実現した。図 24(a)は励起レーザービームの重心の揺らぎを表しており、図 24(b)はその揺らぎを X-Y プロットしたものに揺らぎのヒストグラムを追加したものである。なお、焦点位置での位置の揺らぎ $\cdot r[\text{m}]$ は集光前のレーザー光の角度揺らぎ $\cdot \cdot \cdot [\text{rad}]$ とほぼ比例する。集光距離を $f[\text{m}]$ とすると位置揺らぎの量は $\Delta r \approx f \Delta \theta$ と表すことができる。図中の点線および曲線はそれぞれ 13.5 nm 高次高調波のビーム径および強度プロファイルを仮想表示したものである。この図からの明らかな通り、励起レーザービームの重心の揺らぎは 13.5 nm 高次高調波のビーム径と比較して十分に小さくなっている。相互作用セルと真空チャンバーは同一の架台に取り付けられていたためターボ分子ポンプの動作中は垂直方向の変位 0.82 $\mu\text{m}(\text{rms})$ に増大した。これらの値自体は高次高調波のビーム径よりも十分小さなものである。しかし、励起レーザーの集光用のチャンバーおよび CSM にビームを振り分けるためのチャンバーはどちらも角型で上側の蓋は取り外し可能なタイプであるため内部の圧力変化に伴う変形および振動の影響でビームの重心が変位する問題が残された。

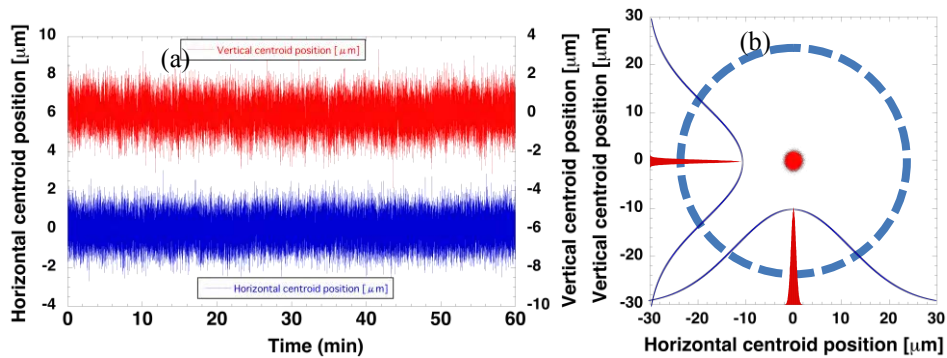


図 24 ビーム安定化装置利用時の励起レーザーの集光点でのビームの位置揺らぎ

○ビーム位置安定化機構の改善

集光光学系および分岐チャンバー内の光学系はチャンバー内部に直接取り付けられたブレッドボード上に設置していたため振動や変形の影響を直接受けていた。この変位は垂直方向で特に顕著でレーザーによる変位よりも大きく長時間のビームのドリフトの大きな原因となっていた。さらに、チャンバーの変形に由来するビームの位置変位は収束するまで数時間を有するものであった。そのため、前述のビーム位置安定化のみではビーム照射位置が長時間ドリフトしてしまうため EUV マスク上のスキャンができない問題があった。そこで最終年度は圧力変化に伴うチャンバーの変形を由来とするビームの角度変位を大幅に小さくするための対策を施した。基本的な対策は光学系配置用のブレッドボードを真空チャンバーと独立させて固定することである。具体的には次のように改善した。まず、真空チャンバー下のスチールの架台上に石定盤を設置した。次に定盤上に太いボルトを立てその上部に真空チャンバーを固定した。その上で石定盤に取り付けた立てた真空フランジ上に立てたポールによってチャンバー内部のブレッドボードを支持した。このポールは溶接ベローズを介して真空チャンバー内に導入した。真空チャンバー自体の変形はそのまま発生するが石定盤はほぼ変形しないため問題はない。他の架台にも同様の対策を施して圧力変化に伴うビームの変位の低減を図った。ビーム位置安定化装置(Aligna)は前年度までに使用していたものと同じではあるが配置を見なおした。

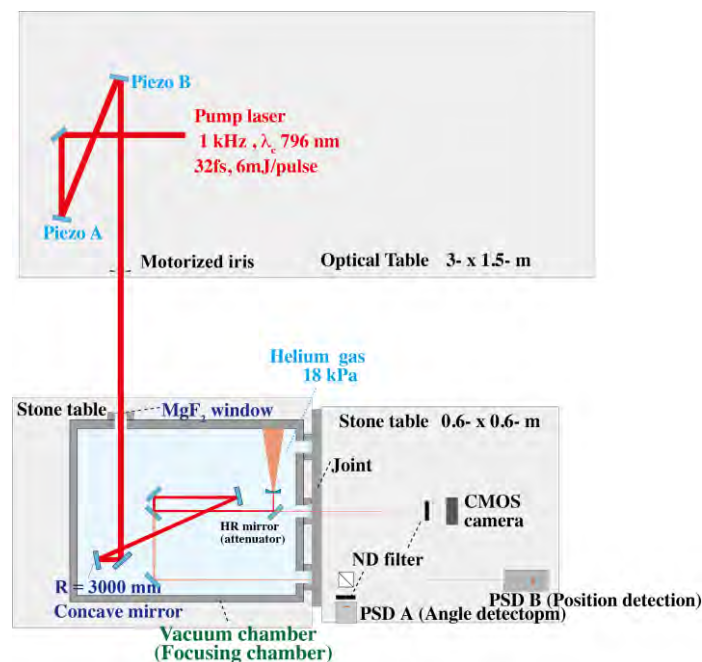


図 25 ビーム位置安定化装置配置図

Aligna を含む光学系の配置を図 25 に示す。問題を切り分けるため、まずアライメント用に使用した He-Ne レーザーを用いてビーム位置安定化システム全体の評価を行った。その結果、垂直方向、水平方向とも角度変位は $0.1 \mu\text{rad}$ 以下に抑えることができた。Aligna はその特性上 cw レーザーの方が安定しやすい面があるがその点を考慮してもこの値は励起レーザーの安定性評価時の値よりもはるかに小さい。このことはビーム変位の主な原因は真空チャンバーの変形と励起レーザーに由来する変位であることを示している。そこで実際に集光用チャンバー内部の圧力を 100 kPa (大気圧)から 18 kPa (高次高調波発生用)に変化させたときの励起レーザーの角度変位を計測した。Aligna 動作時において真空排気直後の変位量は水平方向、垂直方向それぞれ $4.0, 0.3 \mu\text{m}$ であった。収束するまでに 1.5 時間ほどかかったもののその間の変位量はそれぞれ $0.6, 2.1 \mu\text{m}$ であった。

実際の運用時の集光チャンバーの圧力変化は 0 kPa (真空)から 18 kPa であるため圧力変化に伴う変位は、計測した変位量の $1/5$ 以下となることが予測される。ビームサイズと比較してほぼ無視できる値である。次に He ガスの圧力 18 kPa 時に Aligna を動作させてビーム位置安定性を測定した。その結果、水平方向、垂直方向のビームの角度変位はそれぞれ $0.45, 0.2 \mu\text{rad}$ となった。垂直方向の角度揺らぎは対策前の半分以下となったが水平方向の揺らぎはほとんど変化しなかった。このことはチャンバーの変形に起因する揺らぎの増大はほとんど垂直方向に限られることを示している。Aligna の動作周波数は $50 \sim 400 \text{ Hz}$ の範囲で測定を行ったが 50 Hz のときに若干揺らぎが大きくなった以外はほぼ同じ結果となった。残る原因として考えられるのは励起レーザー由来の揺らぎである。そこで揺らぎの原因について検証した結果、励起レーザー自体の励起に使用した YLF レーザーの冷却用のチラーの脈動がもっとも大きな原因であることがわかった。根本的な対策には費用と時間がかかるため、荷重による制振のみで振動対策を施した。その結果、最終的なビーム位置変位を水平、垂直方向に対してそれぞれ $0.49, 0.31 \mu\text{m}$ (角度変位: $0.33, 0.21 \mu\text{rad}$)に低減させることに成功した(図 26)。このとき励起レーザーの集光径は $75 \mu\text{m}$ であった。また、この位置での高次高調波のビーム径は約 $24 \mu\text{m}$ と見積もられる。このことは光源サイズと比較してビームの位置揺らぎは非常に小さいことを示している。そこでこのシステムを用いて高次高調波の光学転送系を 1 段のみとして 4.1 の点欠陥検出実験をおこなった。

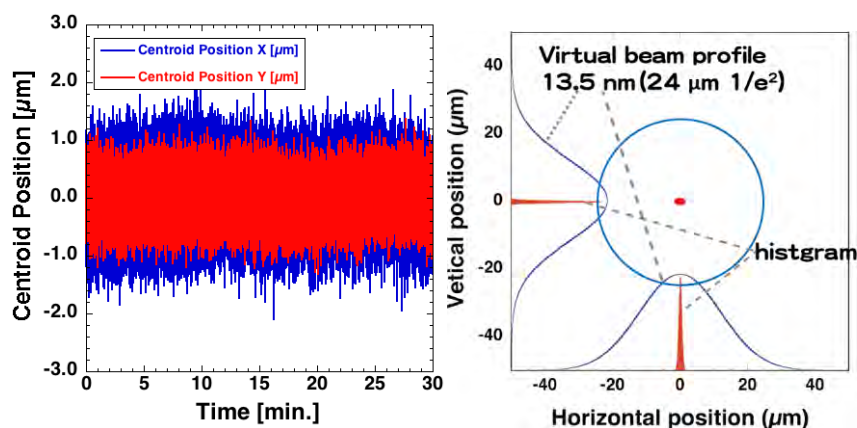


図 26 チャンバー変形対策後の励起レーザーの集光点でのビームの位置揺らぎ

外部の状況としては本研究成果は研究者のみならず企業の方にも興味をお持ち頂いている。さらに現在は市販のレーザーシステムでも 12 mJ/pulse , 1 kHz のものが開発されている。本研究の成果を応用することで 4 倍以上の高次高調波出力と 0.12 mrad 以下のビーム拡がり角が実現することが期待される。実用的な極短パルスコヒーレント EUV 光源として認知されていくことで新たな需要を喚起するものと期待している。

4. 3 高出力コヒーレント EUV 光の発生(大阪大学 藤田グループ)

(1)研究実施内容及び成果

コヒーレント EUV 光源の発生には、超短パルスレーザーによる高次高調波発生法を用いる。図 27 に全体システム図を示す。超短パルスレーザーの種光には Yb ドープパルスファイバーレーザー発振器により発生させた超短パルス(数十 fs)レーザーを用いる。種光をパルスストレッチ後、光パラメトリック増幅(OPCPA)を行い、再び圧縮する。最終的には出力数 mJ、パルス幅数十 fs、繰り返し 5~10 kHz の超短パルスレーザー光を発生させる予定である。現在、出力 17 W、1 パルスエネルギー 6.1 mJ、パルス幅 220 fs を得ている。

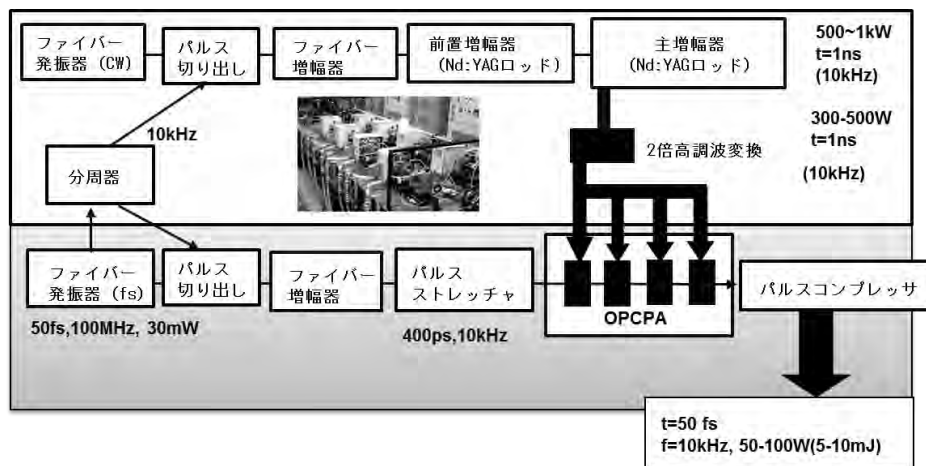


図 27. 高平均出力超短パルスレーザーの構成

図 27 に示すように、レーザーシステムは、超短パルスレーザーシステム(種光部、OPCPA 部、パルス圧縮部)、および OPCPA の励起用高繰り返し緑色レーザーから構成される。2 つのシステムのレーザーパルスを同期するために種光の発振器信号を分周し、励起用レーザーの切り出し用信号として用いている。

種光システムには Yb ドープのシングルモードファイバーを用いた。図 28 に発振器の構成を示す。発振器はリング構造をしており、ファイバー内での分散を外部に設けた回折格子ペアにより補償している。出力されたレーザー光を透過型回折格子により圧縮して得られたパルス波形を図 29 に示す。出力 30 mW、繰り返し 97 MHz、パルス幅、29.4 fs が得られている。

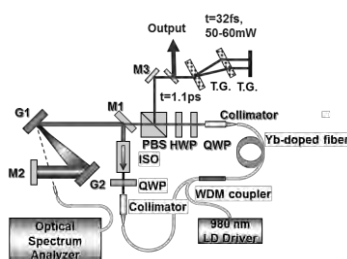


図 28. シード光の発振器構成

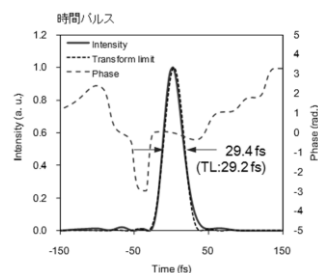


図 29. シード光のパルス波形

次に、励起用高平均出力緑色レーザーの全体構成を図 30 に示す。緑色レーザーは半導体レーザー (LD) 励起 Nd:YAG レーザーシステムの出力を、LBO 結晶を使って 2 倍高調波に変換する構成になっている。フロントエンドにはレーザー光の安定供給と制御性を考慮して、CW 発振ファイバー発振器とファイバー増幅器を用いている。発振器から出た光は種光からの同期信号をもとにして、

位相変調器と任意波形発生器により 15 ns 程度のパルスに切り出される。切り出されたパルス光は、コア径 30 ミクロンの Yb ドープ LMA (Large Mode Area) ファイバーにより 20 mW まで増幅された後、直径 2 mm と 4 mm の LD 励起 Nd:YAG 増幅器により 10 W レベルまで増幅される。その後、4 台の 7/10 mm ϕ コンポジットロッド増幅器と誘導ブリルアン散乱位相共役鏡 (SBS-PCM) で構成された主増幅器列により 500 W まで増幅される。段間にはスペーシャルフィルターを配置し、熱レンズ補償とイメージ転送を行い、ビーム品質の劣化を抑制している。波長変換には、長さ 15 mm のタイプ I 位相整合の LBO 結晶を用いた。LBO 結晶はペルチェ素子により一定温度に保たれている。高効率・高出力波長変換の実験結果を図 31 に示す。15 ns, 10 kHz の条件で、効率 65 %、240 W 出力が得られた。

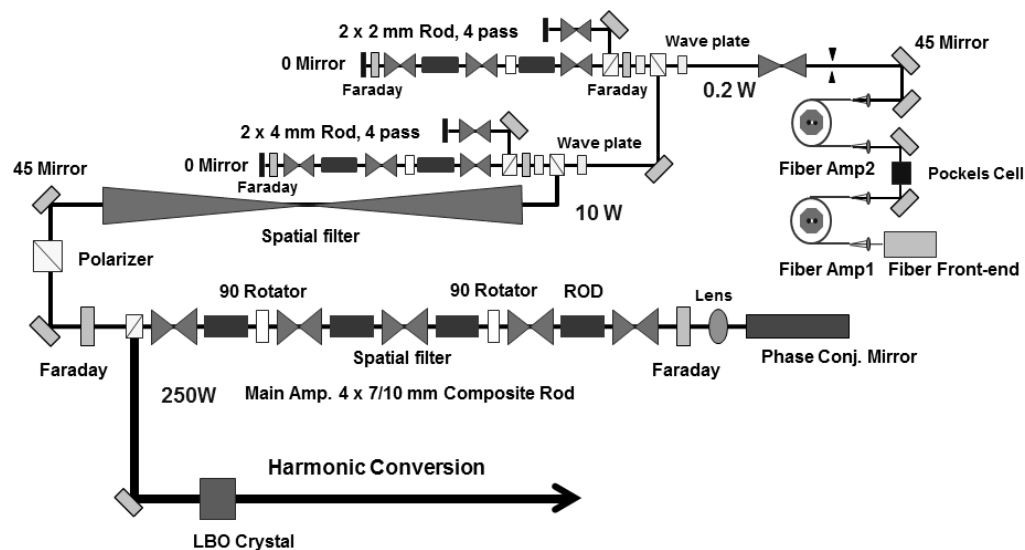


図 30. 励起用高繰り返しレーザー装置の構成

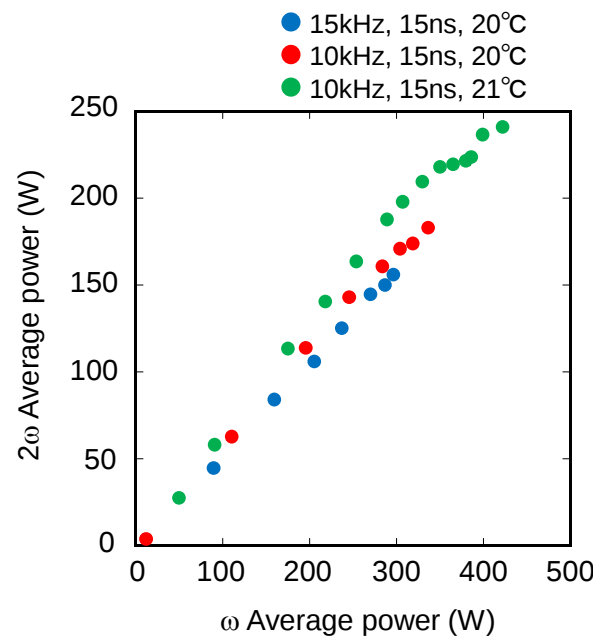


図 31. 2 倍高調波出力

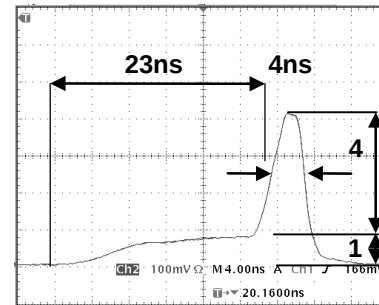


図 32. SBS-PCM の入射波形

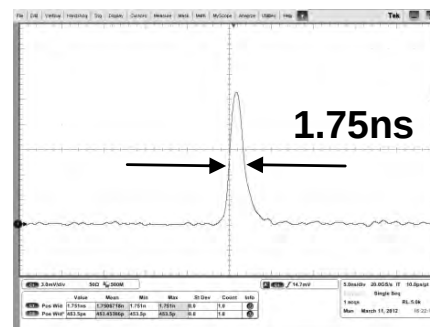


図 33. SBS-PCM の反射波形

OPCPA の光変換効率を上げるためには、種光と励起光との時間マッチングが重要である。これまでの実験では SBS-PCM の音波の成長時間のために、励起光のパルス幅を短くすることが困難であった。我々は、この問題を解決するために、SBS-PCM に入射するパルスの波形の前部に長パルス部を設けることにより、2 ns 以下のパルスの発生に成功した。図 32 に入射レーザー光の典型的なパルス波形を、図 33 に反射後のパルス波形を示す。パルス波形は振幅の小さな長パルスと振幅の大きい短パルスを合成したものになっている。ロングパルス部を反射に必要な格子形成に用いることで短パルス部を効率よく反射することが可能になる。長パルス部と短パルス部の振幅比を 1 対 4 にし、短パルス部を 4 ns とした場合に、反射パルスとして 1.75 ns のパルスを得ることができた。この技術を発展させ 500 ps のパルス発生にも成功した。

図 34 に OPCPA の光学配置を示す。増幅にはタイプ I の BBO 結晶を用いている。結晶はペルチエ素子による冷却を行い、21.5 °C に保つように設定した。増幅は 3 段構成とし、それぞれ、1 段目は 15 mm、2 段目は 15 mm、3 段目は 15 mm の長さの結晶を使っている。励起は 3 段を 1 つの励起光で行うようにした。段間には励起光用にスペーシャルフィルターを挿入し、励起光についてののみイメージ転送を行っている。図 35 に励起光のパルス波形を示す。励起光のパルス幅は、SBS-PCM に入射するパルスを最適化することで、485 ps にまで短パルス化している。

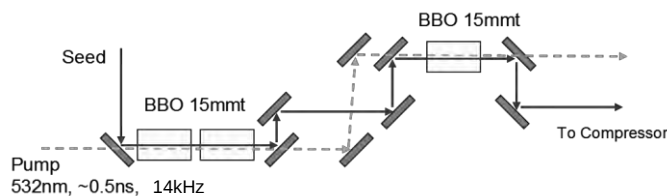


図 34. OPCPA の光学配置

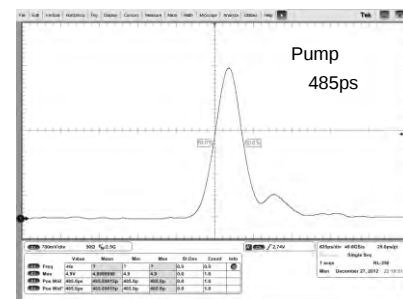


図 35. 励起光のパルス波形

図 36 に種光の増幅前後のスペクトル、および OPG (Optical Parametric Generation) のスペクトルを示している。パルスストレッチ直後は 40 nm のスペクトル幅を持っているが、増幅により 30 nm に狭帯化している。これは、種光のストレッチに対して励起光のパルス幅が短い事による。また、スペクトル中央部が大きく盛り上がったスペクトル形状は、おおよそ、励起パルスの時間波形を映している。種光を遮断した場合の、OPG のスペクトル波形と増幅後のスペクトルを比べて OPG が十分に抑制されていることが判る。逆に、種光のストレッチに対して励起光のパルス幅が長い場合には、スペクトルの狭帯化は防止できるが、OPG の抑制が困難になる。時間領域での種光と励起パルスの重なりを考慮した増幅が重要である。図 37 はパルス圧縮後のパルス波形を示している。計測には、FROG を用いた。フーリエ限界 50 fs に対し、220 fs まで圧縮することができた。

図 38 は励起光パワーと OPCPA の出力特性を示している。500 ps 励起の場合、励起光パワーが 46 W の時に OPCPA 出力が 10 W となった。出力はレーザー損傷と励起光パルスの高出力時の長パルス化により制限された。繰返しは 14.12 kHz であり、28 % の Duty 運転を行った。1 パルスエネルギーは励起光の Duty を考慮すると、2.5 mJ となる。さらなる高出力化のため、励起光の長パルス化と種光のストレッチ幅の拡大を実施し、典型的なパルス幅は両者ともに 1.5 ns とした。1.5 ns 励起の場合、OPCPA 利得の減少を考慮し、増幅段数を 3 段から 5 段に増加した。励起光パワーが 70 W の時に OPCPA 出力 17 W を得た。このときの、スペクトル幅は 50 nm であり、フーリエ限界で 30 fs の圧縮パルスを得ることができる。繰返しは 10 kHz と、Duty 28 % より、1 パルスエネルギーは 6.1 mJ となる。

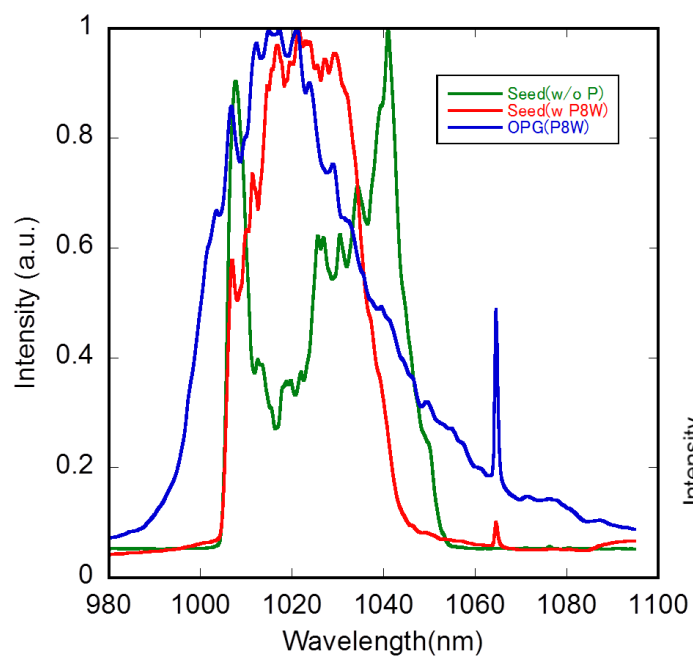


図 36. 種光・増幅光・OPG のスペクトル

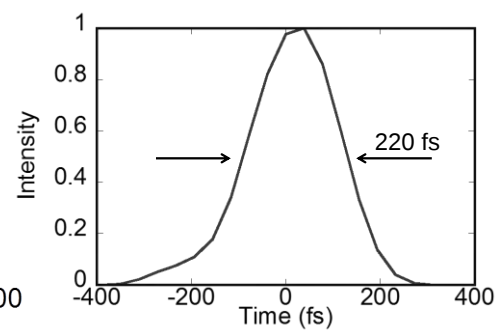


図 37. 圧縮パルス波形

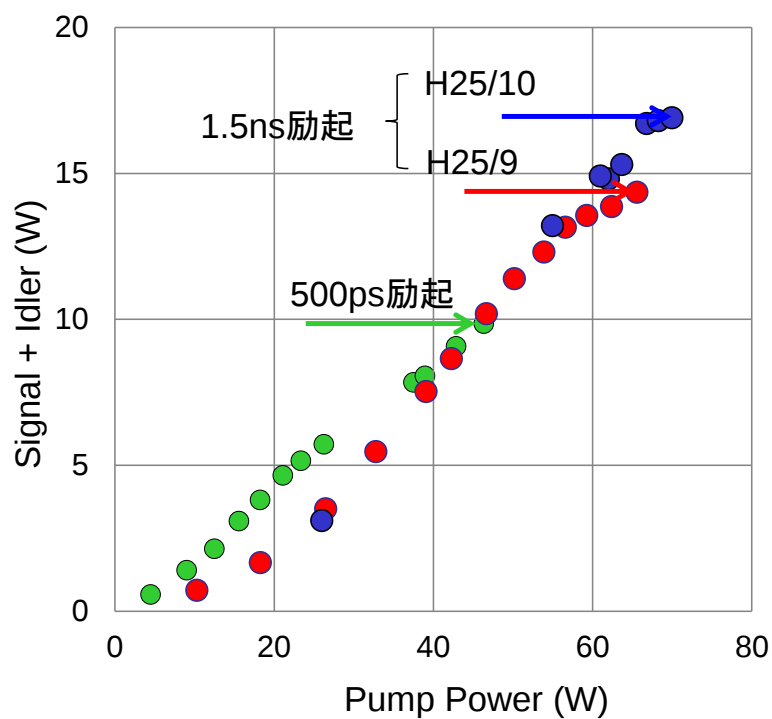


図 38. OPCPA 増幅出力結果

§ 5 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 1件、国際(欧文)誌 16件)

1. T. Harada, J. Kishimoto, T. Watanabe, H. Kinoshita and D.G. Lee, "Mask observation results using a coherent extreme ultraviolet scattering microscope at NewSUBARU", J. Vac. Sci. Technol. B **27**, (2009) 3203.
2. H.Yoshida, T.Hatae, H.Fujita, M.Nakatsuka, S.Kitamura, "A high-energy 160-ps pulse generation by stimulated Brillouin scattering from heavy fluorocarbon liquid at 1064 nm wavelength", Opt. Exp. Vol.**17**, No.16 (2009) pp13654-13662.
3. T. Kurita, K. Sueda, K. Tsubakimoto, N. Miyanaga "Experimental demonstration of spatially coherent beam combining using optical parametric amplification", Optics Express, Vol. **18**, No. 14, pp.14541-14546, 2010.
4. Hiroo Kinoshita, Tetsuo Harada, Masato nakasuji, Yutaka Nagata, and Takeo Watanabe, "Development of coherent scatterometry microscope", Microelectronic Engineering, Vol. **88** (2011) pp. 2000 - 2003.
5. Tetsuo Harada, Masato Nakasuji, Teruhiko Kimura, Yutaka Nagata, Takeo Watanabe, and Hiroo Kinoshita, "The coherent EUV scatterometry microscope for actinic mask inspection and metrology", Proc. SPIE **8081** (2011) 80810K.
6. Tetsuo Harada, Masato Nakasuji, Masaki Tada, Yutaka Nagata, Takeo Watanabe, and Hiroo Kinoshita, "Critical Dimension Measurement of an Extreme-Ultraviolet Mask Utilizing Coherent Extreme-Ultraviolet Scatterometry Microscope at NewSUBARU", Jpn. J. Appl. Phys. **50** (2011) 06GB03.
7. H. Yoshida, K. Tsubakimoto, Y. Fujimoto, K. Mikami, H. Fujita, N. Miyanaga, H. Nozawa, H. Yagi, T. Yanagitani, Y. Nagata, and H. Kinoshita, "Optical properties and Faraday effect of ceramic terbium gallium garnet for a room temperature Faraday rotator", Opt. Exp. Vol. **19**, No. 16 (2011) pp15181-15187.
8. Tetsuo Harada¹, Masato Nakasuji¹, Teruhiko Kimura¹, Takeo Watanabe¹, Hiroo Kinoshita¹, Yutaka Nagata² (1 Univ. of Hyogo, 2 RIKEN), "Imaging of extreme-ultraviolet mask patterns using coherent extreme-ultraviolet scatterometry microscope based on coherent diffraction imaging," J. Vac. Sci. Technol. B **29** (2011) 06F503, DOI: 10.1116/1.3657525.
9. Takashi Kurita, Hidetsugu Yoshida, Hiroaki Furuse, Toshiyuki Kawashima and Noriaki Miyanaga, "Dispersion compensation in an Yb-doped fiber oscillator for generating transform-limited, wing-free pulses", Optics Express, Vol. **19**, No. 25, pp.25199-25205, 2011, DOI: 10.1364/OE.19.025199.
10. 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)
11. 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)
12. 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)
13. 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**, 06GB02, 2013.
 14. H. Kinoshita, T. Watanabe, T. Harada, and Y. Nagata, "Recent Activities on EUVL in NewSUBARU", J. Appl. Phys. **52**, 06GA01, 2013.
 15. Tetsuo Harada, Masato Nakasuji, Yutaka Nagata, Takeo Watanabe, Hiroo Kinoshita, "Phase Imaging of EUV Masks using a Lensless EUV Microscope," SPIE Proc., **8701**, 870119, 2013.
 16. 永田 豊, 原田 哲男, 渡邊 健夫, 緑川 克美, 木下 博雄, "コヒーレント EUV 光源を用いた EUVL マスクの欠陥検", 電気学会論文誌 A, 133 (10), pp.509-518 (2013).
 17. Yutaka Nagata, Tetsuo Harada, Masato Nakasuji, Hiroo Kinoshita, Katsumi Midorikawa, "Development of coherent EUV scatterometry microscope with high-order harmonic for EUV mask inspection," Proc. SPIE **8849**, 88914, 2013.

(2)その他の著作物(総説、書籍など)

1. 吉田英次、椿本孝治、藤田尚徳、宮永憲明、「パルス動作 Yb 添加大口径ファイバーレーザーの高ピーク、高平均出力のための主技術と近年の進展」、レーザー研究, Vol. **38**, No. 11, pp. 849-857, 2010.
2. 吉田英次、「高ピーク、高平均出力パルス動作 Yb ファイバーレーザーの進展」、O plus E, Vol. **32**, No. 11, pp.1287-1293, 2010.
3. 木下博雄, 「ナノデバイス量産に向けた極端紫外線リソグラフィ技術の開発」, 応用物理 **81**, pp. 391-395, 2012.
4. 渡邊健夫, 原田哲男, 木下博雄, 「EUV リソグラフィ研究開発センターにおけるリソグラフィ開発」, クリーンテクノロジー2012 年 6 月号, 2012.
5. Tetsuo Harada, Takeo Watanabe, Hiroo Kinoshita, "Coherent scatterometry microscope for extreme-UV mask inspection," SPIE Newsroom, 2013. DOI: 10.1117/2.1201311.005039

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演(国内会議 7件、国際会議 10件)

1. 中筋正人、木村瑛彦、多田将樹、原田哲男、渡邊健夫、木下博雄(兵庫県立大学)、コヒーレントスキヤトロメトリー顕微鏡によるEUVマスク上のプログラム欠陥観察結果、第 58 回応用物理学関係連合講演会、神奈川工科大学、2011/03/24.
2. H. Fujita^{1,2}, R. Bhushan¹, K. Iyama¹, K. Tsubakimoto^{1,2}, H. Yoshida^{1,2}, N. Miyanaga^{1,2}, and M. Nakatsuka¹, (1 ILE Osaka U., 2 JST CREST), "High Average Power Short Pulse Laser for Generation of Coherent 13.5 nm Light", The 3rd International Conference on Laser Peening, Osaka, Japan, 2011/10/11-14.
3. 木下博雄(兵庫県立大学), 極端紫外線リソグラフィー(EUVL)の現状, 第11回X線結像光学シンポジウム, 東北大学, 2011/11/4.
4. 原田哲男¹, 中筋正人¹, 渡邊健夫¹, 永田豊², 木下博雄¹, (1 兵庫県立大学, 2 理研), コヒーレントスキヤトロメトリー顕微鏡による EUV マスク検査, 第11回X線結像光学シンポジウム, 東北大学, 2011/11/4.
5. Tetsuo Harada, Masato Nakasuji, Takeo Watanabe, Yutaka Nagata, Hiroo Kinoshita, "Development of standalone coherent EUV scatterometry microscope with high-harmonic-generation EUV source", Photomask Japan 2012, Pacifico Yokohama, Kanagawa, Japan, 2012/4/19
6. Hiroo Kinoshita, Tetsuo Harada, Yutaka Nagata, Mitunori Toyoda, and Takeo

- Watanabe, “Development of Actinic Mask Inspection Systems”, 2012 International Workshop on EUV Lithography, Maui, Hawaii, USA, 2012/6/6.
7. Yutaka Nagata, Tetsuo Harada, Masato Nakasuji, Hiroo Kinoshita, and Katsumi Midorikawa, “Development of highly spatial-coherent, 13.5-nm high-order harmonics for EUVL mask inspection using Coherent EUV Scatterometry Microscope”, IEEE Photonics Conference 2012, California, USA, Sep. 21-24, ThCC3, 2012.
 8. Hiroo Kinoshita, Takeo Watanabe, Tetsuo Harada, “Recent Activities on EUVL in NewSUBARU”, Micro Nano Conference 2012, Oriental Hotel, Hyogo, Japan, 2012/11/1.
 9. 永田豊、原田哲男、木下博雄、緑川克美、“コヒーレント EUV スキャトロメトリー顕微鏡用光源としての 13.5nm 高次高調波発生システムの開発、レーザー学会業績賞・奨励賞受賞記念講演、姫路、2013 年 1 月。
 10. H. Fujita^{1,2}, K. Tsubakimoto^{1,2}, H. Yoshida^{1,2}, N. Miyanaga^{1,2}, Y. Nagata^{2,3}, and H. Kinoshita^{2,4}, (1: Institute of Laser Engineering, Osaka Univ., 2: JST CREST, 3: RIKEN, 4: Univ. of Hyogo), Development of High Power OPCPA System Pumped by Nd:YAG Laser System, 8th International Work Shop on SBS and Nonlinear Optics, Daejeon Korea, H25 年 8 月 20 日。
 11. Y. Nagata, T. Harada, M. Nakasuji, H. Kinoshita, and K. Midorikawa, “Development of coherent EUV scatterometry microscope with high-order harmonics for EUV mask inspection”, SPIE 2013 Optics + Photonics, 8849-40, San Diego, USA, 2013/08/25.
 12. Hiroo Kinoshita, Tetsuo Harada, Yutaka Nagata, Takeo Watanabe, and Katsumi Midorikawa, “Development of a Coherent EUV Scatterometry Microscope,” the 2013 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), San Jose, USA, 2013/06/14.
 13. Tetsuo Harada, Yutaka Nagata, Takeo Watanabe, Hiroo Kinoshita, "Development of Coherent EUV Scatterometry Microscope with High-Order-Harmonic EUV source," The 12th Symposium on X-ray Imaging Optics, Osaka, 2013/11/18.
 14. 原田哲男、渡邊健夫、木下博雄、「回折顕微鏡を用いた EUV リソグラフィマスク観察」、先端計測シンポジウム、仙台、2014/1/29.
 15. 永田豊、「CREST 研究: EUV マスク検査用テーブルトップコヒーレント光源の開発」、先端技術セミナー、姫路、2014/3/11.
 16. 原田哲男、渡邊健夫、木下博雄、「放射光による新しい 3 次元形状評価技術」、平成 25 年度 文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業 微細構造解析プラットフォーム 第 2 回利用研究セミナー、姫路、2014/3/12.
 17. 原田哲男、渡邊健夫、木下博雄、「EUV 光利用による EUV マスク検査技術」、第 61 回応用物理学会春季学術講演会、青山学院大学相模原キャンパス、神奈川、2014/3/18.

② 口頭発表(国内会議32件、国際会議12件)

1. 岸本淳生、原田哲男、李 東根、渡邊健夫、木下博雄(兵庫県立大学)、“コヒーレントスキャトロメトリー顕微鏡による EUV 用マスクパターン観察”、第 56 回応用物理学関係連合講演会 1p-ZR-7、筑波大学、2009/4/1.
2. 吉田英次、椿本孝治、藤田尚徳、宮永憲明、中塚正大、井澤靖和(阪大レーザー研)、高ピーク、高平均出力 Yb 添加大口径ファイバーレーザーシステム、第 56 回応用物理学関係連合報告会 1pZN6、筑波大学、2009/4/1.
3. H. Fujita^{1, 2}, K. Tsubakimoto^{1, 2}, H. Yoshida^{1, 2}, R. Bhushan², N. Miyanaga^{1, 2}, and M. Nakatsuka¹ (1 ILE Osaka U., 2 JST CREST); High Repetition and High Average Power Solid-State Laser for EUV Lithography; CLEO Europe 2009, CA5.2; Munich, Germany, 2009/6/16.

4. Hiroo Kinoshita¹, Nagata Yutaka², Tetsuo Harada¹, and Takeo Watanabe¹ 1LASTI, University of Hyogo, 2RIKEN, “Development of ultra-fine structure metrology system using coherent EUV source”, EUVL Workshop, Hawaii, 2009/6/13-17.
5. 吉田英次^{1,2}, 椿本孝治^{1,2}, 藤田尚徳^{1,2}, 宮永憲明^{1,2}, 波多江仰紀³ (1 阪大レーザー研、2 CREST、3 原研那珂研); 誘導ブリルアン散乱を用いたパルス圧縮器の開発; 第70回応用物理学会学術講演会 10aV11; 富山; 2009/9/10.
6. 深町 遼、椿本孝治、吉田英次、藤田尚徳、宮永憲明、白神宏之 (阪大レーザー研); 極端紫外光発生用レーザーのための高ピーク高平均出力緑色励起レーザーの開発; 第70回応用物理学会学術講演会 10pV7; 富山; 2009/9/10.
7. 吉田英次¹, 椿本孝治¹, 藤田尚徳¹, 宮永憲明¹, 永田豊², 木下博雄³ (1 阪大レーザー研、2 理研、3 兵庫県立大学), 「高ピーク, 高平均出力Yb添加大口径ファイバーレーザーの開発」、レーザー学会学術講演会第30回年次大会、大阪千里ライフセンター、2010/2/2-4.
8. 小澤 諭、吉田英次、藤田尚徳、椿本孝治、白神宏之、安原亮、川嶋利幸、菅博文 (阪大レーザー研), 「液体表面冷却スプリットディスク増幅器の開発」、レーザー学会学術講演会第30回年次大会、大阪千里ライフセンター、2010/2/2-4.
9. 吉田英次¹, 古瀬浩章¹, 椿本孝治¹, 藤田尚徳¹, 河仲準二¹, 宮永憲明¹, 永田豊², 木下博雄³ (1 阪大レーザー研、2 理研、3 兵庫県立大学), 「高出力、短パルスYbファイバーレーザーシステム」、第57回応用物理学関係連合講演会、東海大学、2010/3/17-20.
10. 小澤 諭、吉田英次、藤田尚徳、椿本孝治、白神宏之、安原 亮、川嶋利幸、菅 博文 (阪大レーザー研), 「液体冷却スプリットディスク増幅器の開発」、第57回応用物理学関係連合講演会、東海大学、2010/3/17-20.
11. 椿本孝治¹, 吉田英次¹, 藤田尚徳¹, 宮永憲明¹, 永田 豊², 木下博雄³, (1 阪大レーザー研、2 理研、3 兵庫県立大学), 「高平均出力コヒーレントEUV光源の開発」、レーザー学会第401回研究会「高機能固体レーザーとその応用」、大阪千里ライフセンター、2010/7/16.
12. Hidetsugu Yoshida, Koji Tsubakimoto, Hisanori Fujita, Noriaki Miyanaga, Masahiro Nakatsuka, Takaki Hatae, Shigeru Kitamura (ILE Osaka), “Generation of a few hundred ps pulse by stimulated Brillouin scattering- phase conjugation mirror”, 5th Stimulated Brillouin Scattering-Phase Conjugation Mirror Workshop, Chiba Univ, JAPAN, 2010/8/25-27.
13. H. Fujita, K. Tsubakimoto, H. Yoshida, N. Miyanaga, and M. Nakatsuka (ILE Osaka), “High Repetition and High Average Power Short Pulse Laser for Generation of Coherent 13.5 nm Light”, 5th Stimulated Brillouin Scattering-Phase Conjugation Mirror Workshop, Chiba Univ, JAPAN, 2010/8/25-27.
14. 原田哲男、中筋正人、多田将樹、渡邊健夫、木下博雄 (兵庫県立大学)、コヒーレントスキヤトロメトリー顕微鏡によるCD評価、第71回応用物理学会学術講演会、長崎大学、2010/9/14.
15. 中筋正人、原田哲男、多田将樹、渡邊健夫、木下博雄 (兵庫県立大学)、コヒーレントスキヤトロメトリー顕微鏡によるEUVマスク上のプログラム欠陥観察結果、第71回応用物理学会学術講演会、長崎大学、2010/9/14.
16. 永田豊¹, 原田哲男², 木下博雄², 緑川克美¹ (1 理研、2 兵庫県立大学)、極微パターン構造計測のためのコヒーレント13nm高次高調波光源の開発I、第71回応用物理学会学術講演会、長崎大学、2010/9/14.
17. 吉田英次¹, 古瀬浩章¹, 椿本孝治¹, 藤田尚徳¹, 河仲準二¹, 宮永憲明¹, 永田豊², 木下博雄³ (1 阪大レーザー研、2 理研、3 兵庫県立大学), 「高平均出力

短パルスレーザー用 Yb ファイバーシステム」、第 71 回応用物理学会学術講演会、長崎大学、2010/9/14-17.

18. 椿本孝治 1、吉田英次 1、藤田尚徳 1、宮永憲明 1、永田 豊 2、木下博雄 3(1 阪大レーザー研、2 理研、3 兵庫県立大学)、「高平均出力極短パルスレーザーの開発」、第 71 回応用物理学会学術講演会、長崎大学、2010/9/14-17.
19. Tetsuo Harada, Masato Nakasuji, Masaki Tada, Takeo Watanabe, Hiroo Kinoshita (Univ of Hyogo), "Critical Dimension Evaluation of an EUV Mask utilizing the Coherent EUV Scatterometry Microscope", MNC2010, Kokura, JAPAN, 2010/11/10.
20. 原田哲男、中筋正人、木村瑛彦、渡邊健夫、木下博雄(兵庫県立大学)、コヒーレントスキヤトロメトリー顕微鏡によるタイコグラフィーでのEUVマスクパタン像再生、第24回日本放射光学会年会、つくば国際会議場、2011/01/09.
21. 吉田英次 1、椿本孝治 1、藤田尚徳 1、宮永憲明 1、波多江仰紀 1、永田豊 2、木下博雄 3(1 阪大レーザー研、2 理研、3 兵庫県立大学)、「高平均出力レーザー用誘導ブリルアン散乱位相共役鏡の開発」、レーザー学会学術講演会第 31 回年次大会、電気通信大学、2011/1/9-10.
22. H. Yoshida¹, K. Tsubakimoto¹, H. Fujita¹, N. Miyanaga¹, Y. Nagata², H. Kinoshita³ (1 ILE Osaka, 2 RIKEN, 3 Univ. of Hyogo), "A femtosecond ytterbium fiber laser system of OPCPA system for the generation of the coherent 13.5 nm light", 4th Asian Workshop on Generation and Applications of Coherent XUV and X-ray Radiation, POSTECH, Korea, 2011/1/20-22.
23. H. Fujita¹, K. Tsubakimoto¹, H. Yoshida¹, N. Miyanaga¹, M. Nakatsuka¹, Y. Nagata², H. Kinoshita³ (1 ILE Osaka, 2 RIKEN, 3 Univ. of Hyogo), "High average power short pulse laser for the generation of the coherent 13.5 nm light", 4th Asian Workshop on Generation and Applications of Coherent XUV and X-ray Radiation, POSTECH, Korea, 2011/1/20-22.
24. 永田豊 1、原田哲男 2、木下博雄 2、緑川克美 1(1 理研、2 兵庫県立大学)、極微パタン構造計測のためのコヒーレント 13nm 高次高調波光源の開発 II、第 58 回応用物理学関係連合講演会、神奈川工科大学、2011/3/24.
25. 椿本孝治 1、吉田英次 1、藤田尚徳 1、宮永憲明 1、永田豊 2、木下博雄 3(1 阪大レーザー研、2 理研、3 兵庫県立大学)、「高平均出力超短パルスレーザーの開発 III」、第 58 回応用物理学関係連合講演会、神奈川工科大学、2011/3/24-27.
26. H. Yoshida¹, K. Tsubakimoto¹, H. Fujita¹, N. Miyanaga¹, Y. Nagata², H. Kinoshita³ (1 ILE Osaka, 2 RIKEN, 3 Univ. of Hyogo), "Stimulated Brillouin-scattering via phase-conjugation-mirror for high-average-power Nd:YAG laser systems", CLEO Europe-EQEC 2011, ICM - International Congress Centre, Munich, Germany, 2011/5/22-26.
27. H. Yoshida¹, K. Tsubakimoto¹, Y. Fujimoto¹, H. Fujita¹, N. Miyanaga¹, H. Nozawa¹, H. Yagi¹, T. Yanagitanli, Y. Nagata², H. Kinoshita³ (1 ILE Osaka, 2 RIKEN, 3 Univ. of Hyogo), "Optical properties and Faraday effects on terbium gallium garnet ceramics for Faraday rotator", CLEO Europe-EQEC 2011, 22-26 May 2011, ICM - International Congress Centre, Munich, Germany. ICM - International Congress Centre, Munich, Germany, 2011/5/22-26.
28. 吉田英次 1、椿本孝治 1、藤本靖 1、三上勝大 1、藤田尚徳 1、宮永憲明 1、八木秀喜 1、野沢星輝 1、柳谷高公 1、永田豊 2、木下博雄 3 (1 阪大レーザー研、2 理研、3 兵庫県立大学)、「ファラデー素子用 TGG セラミックの開発」、第 72 回応用物理学会学術講演会、山形大学、2011/8/29-9/1.
29. 椿本孝治 1、吉田英次 1、藤田尚徳 1、宮永憲明 1、永田豊 2、木下博雄 2 (1

- 阪大レーザー研、2 理研、3 兵庫県立大学)、「高平均出力超短パルスレーザーの開発Ⅳ」、第 72 回応用物理学会学術講演会、山形大学、2011/8/29-9/1.
30. 永田豊 1, 原田哲男 2, 木下博雄 2, 緑川克美 1, (1 理研, 2 兵庫県立大学), “コヒーレント EUV スキャトロメトリー顕微鏡用光源としての 13.5-nm 高次高調波発生システムの開発”, レーザー励起 X 線源とその応用研究会, 熱海, 2011/12/8.
31. 藤田尚徳 1, 椿本孝治 1, 吉田英次 1, 宮永憲明 1, 永田豊 2, 木下博雄 3 (1 大阪大学, 2 理研, 3 兵庫県立大学), 「コヒーレント EUV 光発生用高出力超短パルスレーザー」、レーザー学会第 420 回研究会、KKR ホテル熱海、2011/12/8.
32. 永田豊 1, 原田哲男 2, 中筋正人 2, 木下博雄 2, 緑川克美 1 (1 理研, 2 兵庫県立大学), 「極微パタン構造計測のためのコヒーレント 13 nm 高次高調波光源の開発Ⅳ」、第 59 回応用物理学関係連合講演会、早稲田大学、2012/3/15-18.
33. 中筋正人 1, 時政明史 1, 原田哲男 1, 永田豊 2, 渡邊健夫 1, 緑川克美 2, 木下博雄 1 (1 兵庫県立大学, 2 理研), 「EUV マスク検査のための高次高調波コヒーレントスキャトロメトリー顕微鏡の開発」、第 59 回応用物理学関係連合講演会、早稲田大学、2012/3/15-18.
34. 椿本孝治 1, 吉田英次 1, 藤田尚徳 1, 宮永憲明 1, 永田豊 2, 木下博雄 3 (1 大阪大学, 2 理研, 3 兵庫県立大学), 「高平均出力極端パルスレーザーの開発Ⅴ」、第 59 回応用物理学関係連合講演会、早稲田大学、2012/3/15-18.
35. H.Fujita, K. Iyama, R. Bhushan, H.Yoshida, K.Tsubakimoto, and N.Miyanaga, “High-repetition and High-average-power Nd:YAG Active Mirror Amplifier Pumped by High Power LDs”, 8th Asian Pacific Laser Symposium, Huanshan, China, May 27-30, 2012
36. Tetsuo Harada, Masato Nakasuji, Takeo Watanabe, Hiroo Kinoshita, Yutaka Nagata, “Development of Standalone Coherent EUV Scatterometry Microscope for EUV Mask Observation”, EIPBN2012, Hilton Waikoloa Village, Hawaii, USA, 2012/05/30.
37. 椿本孝治、吉田英次、藤田尚徳、宮永憲明、木下博雄、「極端紫外光発生のための高平均出力短パルスレーザーの開発」、レーザー学会第 427 回研究会「高機能固体レーザーとその応用」、ホテル阪急エキスポパーク、平成 24 年 7 月 13 日.
38. 椿本孝治、吉田英次、藤田尚徳、宮永憲明、永田豊、木下博雄、「高平均出力超短パルスレーザーの開発Ⅵ」、第 73 回応用物理学会学術講演会、愛媛大学、平成 24 年 9 月 11-14 日
39. 椿本孝治、吉田英次、藤田尚徳、宮永憲明、永田豊、木下博雄、「高平均出力超短パルスレーザーの開発Ⅶ」、第 60 回応用物理学春季学術講演会、神奈川工科大学、2013/3/28.
40. 中筋正人、九鬼真輝、原田哲男、永田豊、渡邊健夫、緑川克美、木下博雄、「高次高調波を用いたコヒーレントスキャトロメトリー顕微鏡によるパタン欠陥の観察」、第 60 回応用物理学春季学術講演会、神奈川工科大学、2013/3/28
41. 永田豊、原田哲男、中筋正人、緑川克美、「極微パタン構造計測のためのコヒーレント 13nm 高次高調波光源の開発Ⅴ」、第 60 回応用物理学春季学術講演会、神奈川工科大学、2013/3/28
42. 椿本孝治、吉田英次、藤田尚徳、宮永憲明、木下博雄、(大阪大学レーザーエネルギー学研究センター、兵庫県立大学)、超短パルス、高平均出力固体レーザー装置の開発、レーザー学会 445 回研究会、吹田、H25 年 7 月 16 日
43. Hiroo Kinoshita, Tetsuo Harada, Yutaka Nagata, Takeo Watanabe, Katsumi Midorikawa, “Development of a Coherent EUV Scatterometry Microscope”, MNE2013, London, 2013/9/19.
44. 衣笠卓一、椿本孝治、吉田英次、藤田尚徳、宮永憲明、(大阪大学レーザーエネルギー学研究センター)、位相差制御によるコヒーレントビーム結合技術の開

③ ポスター発表（国内会議13件、国際会議 6件）

1. Junki Kishimoto, Tetsuo Harada, Takeo Watanabe, Hiroo Kinoshita and Dong Gun Lee (Univ. of Hyogo), "Mask Observation Result using Coherent EUV Scattering Microscopy at New SUBARU", EIPBN 53rd, Marco Island, USA, 2009/5/27.
2. H. Yoshida¹, H. Fujita¹, M. Nakatsuka¹, T. Hatae², and S. Kitamura² (1 ILE Osaka U., 2 JAEA Naka) ; A 160 ps Pulse Generation by Stimulated Brillouin Scattering Phase Conjugation Mirror at 1064 nm Wavelength; CLEO Europe 2009, CD.P.5; Munich, Germany; 2009/6/16.
3. H. Yoshida, K. Tsubakimoto, H. Fujita, N. Miyanaga, and M. Nakatsuka (ILE Osaka U.) ; 68- μ m Core Multimode Fiber with Second Air-hole Cladding Structure; CLEO Europe 2009, CJ.P.4; 2009/6/18.
4. Hiroo Kinoshita, Nagata Yutaka, Tetsuo Harada, Takeo Watanabe, Dongun Lee, "Development of Ultra-Fine Structure Metrology System using Coherent EUV Source", EUVL Symposium in Prague, 2009/10/18-21.
5. 木下博雄、多田将樹、山口裕也、原田哲男、渡邊健夫、"EUV マスク欠陥検査用 EUV コヒーレント顕微鏡の開発" X 線結像光学シンポジウム、つくば国際会議場、2009/11/6-7.
6. T. Harada, J. Kishimoto, T. Watanabe and H. Kinoshita, "Critical Dimension Measurement of an EUV Mask using by a Coherent EUV Scattering Microscope at NewSUBARU", 23rd International Microprocesses and Nanotechnology Conference, Sapporo, Japan, 2009/11/18.
7. 中筋正人、多田将樹、原田哲男、渡邊健夫、木下博雄(兵庫県立大学)、コヒーレントスキャトロメリー顕微鏡によるCD評価、第24回日本放射光学会年会、つくば国際会議場、2011/01/10.
8. 木村瑛彦、中筋正人、原田哲男、渡邊健夫、木下博雄(兵庫県立大学)、タイコグラフィにおける像再生条件の最適化、第24回日本放射光学会年会、つくば国際会議場、2011/01/10.
9. T. Harada, M. Nakasuji, T. Kimura, T. Watanabe, and H. Kinoshita (Univ. of Hyogo), "Imaging of EUV-Mask Patterns using the Coherent Scatterometry Microscope based on a Coherent Diffraction Imaging", EIPBN 55th, Las Vegas, USA, 2011/5/31.
10. 中筋正人、木村瑛彦、原田哲男、渡邊健夫、木下博雄(兵庫県立大学)、コヒーレントスキャトロメリー顕微鏡による EUV マスク検査、精密工学会 2011 年度関西地方定期学術講演会、兵庫県立大学、兵庫、2011/6/30.
11. 永田豊¹、原田哲男²、木下博雄²、緑川克美¹(¹ 理研、² 兵庫県立大学)、極微パタン構造計測のためのコヒーレント13nm 高次高調波光源の開発 III、第72回応用物理学術講演会、山形大学、2011/8/30.
12. Masato Nakasuji¹, Akifumi Tokimasa¹, Tetsuo Harada¹, Yutaka Nataga², Takeo Watanabe¹, Katsumi Midorikawa², Hiroo Kinoshita¹ (1 Univ. of Hyogo, 2 RIKEN), "Development of Coherent EUV Scatterometry Microscope with High-order Harmonic Generation Source for EUV Mask Inspection and Metrology," MNC2011, Kyoto, Japan, 2011/10/26.
13. 中筋正人¹、原田哲男¹、永田豊²、時政明史¹、渡邊健夫¹、緑川克美²、木下博雄¹(¹ 兵庫県立大学、² 理研)、"EUV マスク検査のための高次高調波コヒーレントスキャトロメリー顕微鏡の開発", 第25回放射光学会年会放射光科学合同シンポジウム、2012/1/9.
14. H. Yoshida, K. Tsubakimoto, H. Fujita, N. Miyanaga, T. Yamamura, M. Ishikawa, T. Sakagawa², M. Tsukamoto, "High-peak and high-average-power polarization-maintained Yb-doped PCF fiber laser system", Advance Lasers and Photon Source 2012, Yokohama, Japan, Apr. 25-27, 2012

15. K. Tsubakimoto, H. Yoshida, H. Fujita, N. Miyanaga, Y. Nagata, H. Kinoshita, "240W, 10kHz Green Laser from Harmonic Converted Nd:YAG MOPA", Advanced Lasers and Photon Sources 2012, Yokohama, Japan, Apr. 25-27, 2012
16. H. Yoshida, K. Tsubakimoto, H. Fujita, N. Miyanaga, T. Yamamura, M. Ishikawa, T. Sakagawa, M. Tsukamoto, "High-average-power nanosecond pulse generation in polarization-maintained Yb-doped PCF fiber laser systems", 5th EPS-QEOD EUROPHOTON CONFERENCE, Stockholm, Sweden, Aug. 26-31, 2012
17. Tetsuo Harada, Masato Nakasuji, Takeo Watanabe, Yutaka Nagata, Hiroo Kinoshita, "Development of Coherent EUV Scatterometry Microscope with High Harmonic Generation EUV Source", EUVL Symposium 2012, Brussels, Belgium, 2012/10/1.
18. Tetsuo Harada, Masato Nakasuji, Yutaka Nagata, Takeo Watanabe, Hiroo Kinoshita, "Phase Imaging of EUV Mask using Coherent EUV Scatterometry Microscope", Micro Nano Conference 2012 (MNC2012), Oriental Hotel, Hyogo, Japan, 2012/11/1.
19. K. Tsubakimoto^{1,4}, H. Yoshida^{1,4}, H. Fujita^{1,4}, N. Miyanaga^{1,4}, Y. Nagata^{2,4}, H. Kinoshita^{3,4}, (1:Institute of Laser Engineering, Osaka Univ., 2:RIKEN, 3:Univ. of Hyogo, 4:JST CREST), Development of high averaged power ultra-short pulse laser system, The 2nd Advanced Lasers and Photon Sources, 横浜、H25 年 4 月 25 日

(4)知財出願

①国内出願 (5件)

1. 発明の名称「パタン幅測定装置」、発明者「木下博雄、渡邊健夫」、出願人「木下博雄、渡邊健夫」、出願番号「特願 2008-6615」、**特許化、特許番号「特許 5279280」。**
2. 発明の名称「パタン幅測定装置」、発明者「原田哲男、木下博雄、渡邊健夫」、出願人「兵庫県」、出願番号「特願 2010-192518」。
3. 発明の名称「形状測定装置」、発明者「原田哲男、木下博雄、渡邊健夫」、出願人「兵庫県」、出願番号「特願 2010-265143」。
4. 発明の名称「欠陥特性評価装置」、発明者「原田哲男、木下博雄、臼井洋一、渡邊健夫」、出願人「兵庫県」、出願番号「特願 2011-153900」。
5. 発明の名称「減光機構」、発明者「永田豊、原田哲男、木下博雄、渡邊健夫」、出願人「兵庫県」、出願番号「特願 2012-060637」。

②海外出願 (0件)

③その他の知的財産権

なし

(5)受賞・報道等

①受賞

1. Hiroo Kinoshita (Univ. of Hyogo), Lifetime Achievement Award (2009 International Workshop on EUV Lithography), Contribution to Extreme Ultraviolet Lithography, 2009/7/15.
2. 木下博雄 (兵庫県立大学)、第 4 回 (2010 年度) 応用物理学会フェロー表彰、極端紫外線リソグラフィ技術の先駆的研究開発。
3. 木下博雄 (兵庫県立大学)、平成 22 年度兵庫県科学賞、工学分野。
4. 木下博雄 (兵庫県立大学)、第 10 回 (平成 22 年度) 山崎貞一賞、半導体及び半導体装置分野、極端紫外線リソグラフィ技術の先駆的研究と工業化への継続的貢献。

5. 中筋正人（兵庫県立大学）、第 29 回応用物理学会講演奨励賞、コヒーレントスキヤトロメトリー顕微鏡による EUV マスク上のプログラム欠陥観察結果（2011. 3. 24）
6. 木下博雄（兵庫県立大学）、平成 23 年度文部科学大臣表彰科学技術賞（研究部門）、極端紫外線リソグラフィ技術の先駆的研究。
7. 永田豊，レーザー学会第 36 回奨励賞，” コヒーレント EUV スキヤトロメトリー顕微鏡用光源としての 13.5nm 高次高調波発生システムの開発”，2012. 5
8. 木下博雄，OSA Joseph Fraunhofer Award/Robert M. Burley Prize, 2012. 10

②マスコミ(新聞・TV等)報道

平成 22 年 10 月 1 日 神戸新聞 「極端紫外線リソグラフィ研究開発センターの設立」

平成 23 年 5 月 29 日 神戸新聞 「播磨びと わが道 県立大教授 木下博雄さん」

④ その他

(6)成果展開事例

①実用化に向けての展開

本研究課題で開発した位相測定技術と集光技術と組み合わせ発展させ、欠陥特性評価に特化した新たな測定系を提案し、特許を出願した。(出願特許名「欠陥特性評価装置」、「特願 2011-153900」) 本特許の新しい評価装置について、NEDO から委託を受けている EUVL 基盤開発センター (EIDEC) に研究提案をした。結果として、再委託研究「マイクロコヒーレントスキヤトロメトリー顕微鏡による EUV マスク上の極微欠陥特性評価」として採択された。

②社会還元的な展開活動

1. イノベーションジャパン 2010、東京国際フォーラム、2009/9/16-9/18、ポスター展示。
2. イノベーションジャパン 2010、東京国際フォーラム、2010/9/29-10/2、ポスター展示 & 新技術説明会。
3. SPRing-8 産業報告会、東京ステーションカンファレンス、2010/11/5、口頭発表。
4. 兵庫県立大学新技術説明会、JST ホール、2010/12/16、口頭発表。
5. イノベーションジャパン 2011、東京国際フォーラム、2011/9/21-9/22、ポスター展示 & 新技術説明会。
6. イノベーションジャパン 2013、東京ビッグサイト、2013/8/29-8/30、ポスター展示 & ショートプレゼンテーション
7. nano tech 2014 第 13 回国際ナノテクノロジー総合展・技術会議、東京ビッグサイト、2014/1/29 - 1/31、ポスター展示。

§ 6. 研究期間中の活動

6. 1 主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2009 年 3 月 12 日	先端リソグラフィフォーラム	イーグレひめじ	150 人	リソグラフィに関するシンポジウム

2010 年 9 月 10 日	EUV リソグラフィシンポジウム	東京国際 フォーラム	200 人	EUV リソグラフィ関係シンポジウム
2011/11/18	NewSUBARU シンポジウム 2011	TKP 東京駅 八重洲カン ファレンスセ ンター	119 人	ニュースバル放射光施設での産業利用を含めた研究活動を広く紹介する
H24. 4. 26	EUVL 産業利用報告会	兵庫県立大 学産学連携 機構会議室	30 人	ニュースバルにおける EUV リソグラフィ研究者による報告会
H24. 9. 5	チーム内ミーティング	兵庫県立大 学ニュース バル放射光 施設	5 名	木下・永田・藤田グループでの研究打合せ
H24. 11. 22	NewSUBARU シンポジウム 2012	東京ステー ションコン ファレンス	140 名	ニュースバル放射光施設での産業利用を含めた研究活動を広く紹介する
H25. 3. 14	EUVL 産業利用報告会	兵庫県立大 学産学連携 機構会議室	35 人	ニュースバルにおける EUV リソグラフィ研究者による報告会
H25. 3. 10	EUVL 産業利用報告会	兵庫県立大 学産学連携 機構会議室	36 人	ニュースバルにおける EUV リソグラフィ研究者による報告会

§ 7. 最後に

今回の CSM は、従来の光学系を用いない、古くて新しい光学概念を導入したものであり、開発当初からどこまで、理論通り進むのか楽しみなテーマであった。そして、この方式が今後の光学系の限界を打破する技術と考え、それを実証できたことの喜びを感じている。

高次高調波は理化学研究所の緑川研究室がすでに自前の装置で 13.5nm を発生させており、実現性については何の疑いもなく、進めた。しかしながら、これこそ、理論と経験がものを言う世界で、永田研究員の努力には改めて敬意を表する。彼なしでは、ここまでの高効率な EUV 光の発生も発散角の小さなシステムは実現できなかったと考えている。Samsung のグループが同様なシステムを開発していると聞くと、恐らく、パワー、発散角などでは比較にならないと考えている。

全体のプログラムの中では、阪大藤田 G の成果が当初計画を変更し、さらにレーザー開発のみの結果となったことは残念である。しかしながら、この手の研究開発ではすべてがうまく行くとはいえず、失敗に終わった理由である当初計画では予期せぬ光学結晶の熱の問題については、結果を公開し、今後の開発につなげてほしい。

成果のわりには高効率に予算を執行し、成果を挙げられたと自負している。これは、個々の研究者の実力が高く、自らで設計し、部品を購入し、組み建て、新規な物を作り上げた結果である。