

「次世代エレクトロ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

平成 21 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、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 HIO 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、5 mJ クラスの 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グループと木下グループが立ち上げ、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、藤田グループでは高繰り返し・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、永田グループと共同で 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。

H21 年度、木下 G は、高 NA コヒーレントスキャトロメリー顕微鏡検査システムの構築、ならびに、既設の実験機によるマスク評価を進めた。今年度は特にマスクパタンの 2 次元的な CD 評価のみならず、将来の可能性として 3 次元構造の構築に重点を置き、高次回折光の取り込み・解析実験を進めた。また、高次高調波安定化のため、設置された部屋の温度を安定化した。さらには、新たな研究項目として、評価用マスクの製作を追加し、仕様を大日本印刷の協力を得て決定し、製作を進めた。

永田 G では、昨年度から今年度に掛けて導入した 13 nm 高次高調波発生用のフェムト秒レーザーシステムの調整、整備、最適化および高次高調波発生用システム(集光光学系、相互作用セル、EUV 分光器)の作製、構築、動作確認をおこなった。レーザーシステムの安定性に課題を残すが、2 月初旬に 13.5 nm 近傍の発光を確認した。今後はビームロック装置を導入し励起レーザーのビーム位置の安定化を図る。

藤田 G は中心波長 607.5 nm(可視域)の出力 10 mJ、パルス幅 10 fs、繰り返し周波数 5 kHz のフェムト秒レーザーを 23 年度中期を目処に開発する。開発に必要な基盤技術、すなわち、高効率 3 倍高調波発生、白色光変換を利用したフェムト秒レーザーの波長同調、および 10 fs パルス発生技術を開発した。

§ 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リー顕微鏡(CSM)の開発
 - 1) CD 評価用 EUV マスクサンプル製作
 - 2) CSM での CD 評価アルゴリズムの開発
 - 3) CSM での欠陥検出アルゴリズムの開発

(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(大阪大学)」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

H21 年度、木下 G は、高 NA コヒーレントスキャトロメリー顕微鏡検査システム(CSM)の構築、ならびに、既設の実験機によるマスク評価を進めた。今年度は特にマスクパタンの 2 次元的な CD 評価のみならず、将来の可能性として 3 次元構造の構築に重点を置き、高次回折光の取り込み・解析実験を進めた。また、高次高調波安定化のため、設置された部屋の温度を安定化した。さらには、新たな研究項目として、評価用マスクの製作を追加し、仕様を大日本印刷の協力を得て決定し、製作を進めた。

① 測定室の温度安定化と簡易クリーンルーム化

フェムト秒レーザーのパルス幅は室温の影響が大きく、安定化させる必要がある。そこで、レーザーシステムが設置されているニュースバル実験室をパーティションで仕切り、専用の測定室とし、エアコンを追加設置することで、 $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内に温度を安定化させた。また、フェムト秒レーザーは非常に高出力であるためホコリなどによる光学素子の焼き付きが発生しやすい。そこで、クリーンユニットを設置し簡易クリーンルームとした。



図1 フェムト秒レーザーシステムと高次高調波発生チャンバー

② CD 評価用マスクの製作と寸法測定

32 nm 世代の CD 評価のためのライン&スペース(L&S)パターンを EUV ブランク上に製作した。L&S パタンのハーフピッチ(hp)は 130 nm であり、TaN 吸収体線幅を 70 nm から 140 nm と変えた縦横 18 パターンを製作した。実験機におけるコヒーレント EUV 光のマスクへの入射角は 6° であり、縦横のパターンを解析することで Shadowing 効果を評価する。図 2(a) に製作したマスクパタンの断面 SEM 写真、(b)CD-SEM 写真、(c)CD-SEM 写真の強度プロファイルを示す。

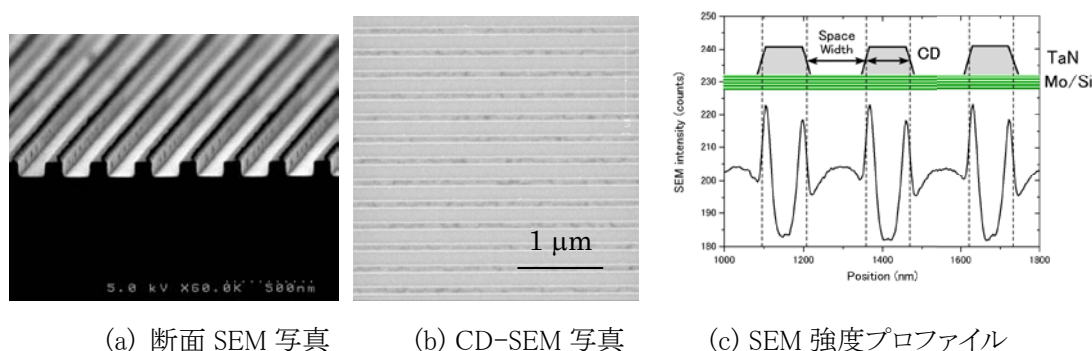


図2 CD 評価サンプル例 hp 130 nm、CD 106.7 nm、Horizontal Line & Space

図2(a)に示す断面写真より、TaN 吸収体の断面形状は矩形に近く Mo/Si 部分が平坦なパターン形成できた。パターン上部に黒い再堆積が確認されるが、吸収体の膜厚(77 nm)に対しては十分薄く回折には影響がないと考えられる。図2(b)の CD-SEM 写真より吸収体線幅の CD 値を求めたが、再堆積した TaN 吸収体部分が通常とは逆に黒く、信号強度が低くなり、CD-SEM の CD 評価機能では評価できなかった。このため、図2(c)に示すように CD 解析は SEM 写真に対して測長プログラム SuMMIT を用い、プロファイルに変換し傾斜部分における 50%のスレッショールドを CD 値とした。その他のパターンについても同様に CD を評価し、CSM 実験機での測定結果と比較した。また、22 nm 世代用の hp 90 nm パターンについても同様に製作・評価した。

③ CSM 実験機での CD 評価

CSM 実験機において試作したマスクの L&S パターンにコヒーレント光を照射し、0 次、 ± 1 次、 ± 2 次回折光を CCD カメラで記録した。L&S パタンの線幅により各回折強度は敏感に変化するため、回折強度より反射領域幅を求めることができる。製作した EUV マスクは 32 nm 世代用の hp 130 nm であり、反射領域幅(スペース)を変化させた L&S パターンである。以下では 0 次光と 1 次光による CD 評価について述べる。

a) イメージ CD 評価

縦と横の L&S に対する ± 1 次光の回折強度を図3に示す。測定時の強度ばらつきを補正するため、0 次光強度により規格化した。横軸は CD-SEM で測定した反射領域幅である。

反射領域幅が広くなるに従い、強度比が線形に減少しており、CD-SEM 測定値と CSM 測定値には良い相関があった。また、パターン方向と入射面が垂直となる縦の L&S パターンは、Shadowing の影響により横の L&S パターンに比べ 0 次光強度が減少した。

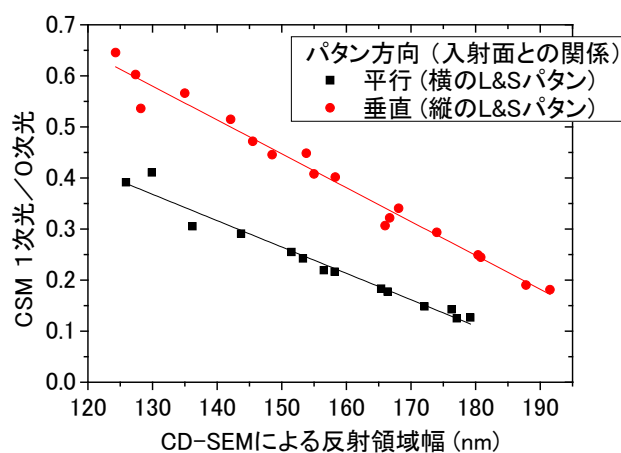


図3. CSM 実験機で測定した 1 次光強度の反射領域幅依存性

CSM 実験機で測定した回折強度に対して、本手法にて Image CD を計算した結果と CD-SEM との相関を図 4 に示す。

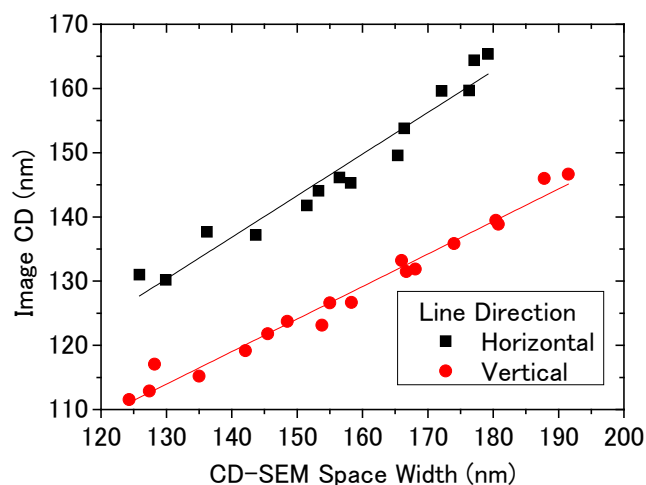


図 4 32 nm 世代マスクの L&S パターン測定結果。0 次光と 1 次光強度より求めた Image CD と CD-SEM との比較結果。

縦軸の回折強度より求めた Image CD と横軸の CD-SEM 測定値には非常によい相関があり、回折強度から CD 値を導出できた。パターン方向がビーム入射方向と平行と垂直な場合では、16 nm ほ

ど Image CD が小さかった。このように吸収体パターンによる Shadowing 効果が測定できており、幾何学的に予想される 16 nm と一致した。

同様に 22 nm 世代用のハーフピッチ 90 nm のパターンについて Image CD を測定した。その結果を図 5 に示す。32 nm 世代用と同様に Image CD と CD-SEM 測定結果には良い相関がある。よって、CSM 実験機において目標とする 22 nm 世代の CD 評価ができた。しかしながら、Shadowing 効果は 1:1 L&S パタンにおいて 7.5 nm であり、32 nm 世代での 16 nm とは異なる値となった。これは吸収体パターン形状が Shadowing 効果に影響を与えたためと考えられ、吸収体形状の評価が必要である。例えば吸収体の両端がスロープとなっている場合、スロープの傾きによって Shadowing される領域幅は幾何学的に変化すると予測される。高次回折パターンとの比較など更なる検討を進める。

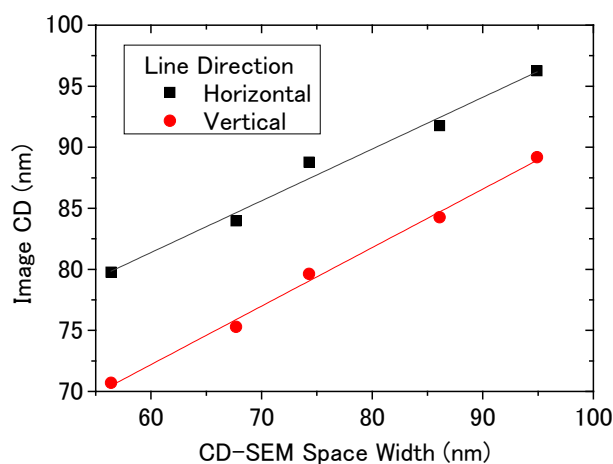


図 5. 22 nm 世代マスクの L&S パタン測定結果、0 次光と 1 次光強度より求めた Image CD と CD-SEM との比較結果

b) パタン領域内の CD 均一性評価

CSM 実験機を用いて CD 均一性を評価した。測定に使用したパターンはハーフピッチ 130 nm の L&S パタンである。パタン領域サイズは 50 μm 角であり、4 μm ステップで回折強度を記録した。得られた Image CD 分布を図 6 に示す。

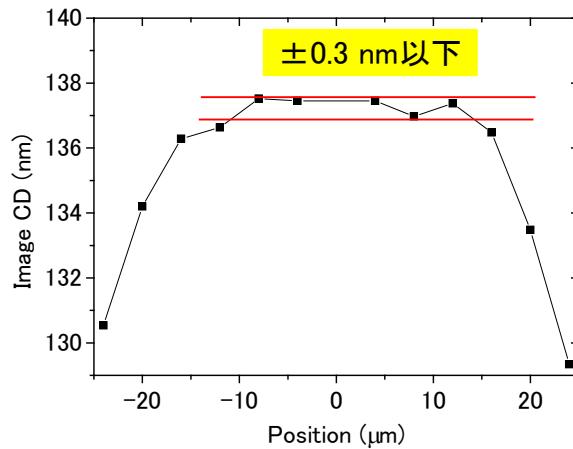


図6 32 nm 世代用 L&S パタン領域内測定均一性評価結果

横軸は測定位置でありパタン領域の周辺部 10 μm は、描画に利用した電子線リソグラフィ装置の近接効果により CD が小さくなっている。中心領域では $\pm 0.3\text{ nm}$ 以下の CD 均一性が得られた。このことから、CSM 実験機を用いて 0.1 nm オーダーの CD 均一性の評価を実現できた。

c) CD 測定時間の短縮

これまでの CSM 実験機での CD 評価の照射時間は 60 秒と長く、十分な S/N で測定していた。マスク全面検査のためには、より高速化し、短時間での CD 評価が必要である。今回、CCD の測定モードとピーク強度評価方法を最適化することで照射時間を 2 秒まで短縮できた。具体的には CCD カメラのビニング (CCD カメラの読み出しを複数ピクセルまとめて一度に読み出すこと) を 4×4 にすることで読み出しノイズを低減し、回折光の積分強度を計算することでノイズを平滑化した。

図 7 に Image CD の照射時間とビニング依存性を示す。同一サンプル同一点において照射時間は 500 秒から 1 秒と減らして測定した。図のように照射時間が短くなるに従い S/N が悪くなり、長時間露光時の Image CD 値から大きく変動している。CCD ピクセルをビニングしない条件 (図中黒線 1×1) では、露光時間 10 秒で 1 nm 以上誤差が生じた。しかし、 4×4 のビニング条件 (図中緑線 4×4) では露光時間 2 秒まで再現性 $\pm 0.3\text{ nm}$ 以内に抑えられた。よって、現在のシステムではビニングとデータ処理により 2 秒で高精度に CD を測定できる。また、現在開発中のフェムト秒レーザーによる高次高調波を用いたシステムでは照射光量は 1000 倍となり、1 領域の CD 測定時間 2 ms と非常に高速な CD 評価が可能となる。このように高速な測定が可能な場合、CCD カメラの読み出し速度も重要となる。複数ピクセルを一度に読み出すビニングは S/N 向上だけでなく、読み出し回数の減少が可能であり、最短時間と誤差との間でのピクセル数の最適化を進める。また、1 ショットの高速化のみならず、全ショットでの高速計測には真空中内でのステージの位置決め速度の向上も重要となるなど、ハード面が課題となる。

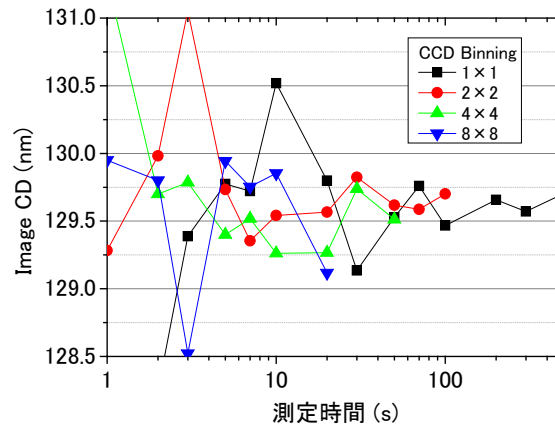


図 7 照射時間と CCD ビニングによる回折強度測定再現性検証

④ EUV 極微パタン構造計測技術評価用マスクの検討

新たな研究項目として、評価用マスクの製作を追加し、CD 評価用マスク、欠陥検査用マスクなど 5 枚のマスクの製作を大日本印刷の協力の下に進めた。これらのマスクを用いた評価を早急に進め、検査アルゴリズムを確定する。

★CD 評価用マスク 2 枚

6025 基板 (FN0.5 μm) に Mo/Si 多層膜を形成し、Capping Layer、TaBN 吸収体 70 nm を形成したサンプル上、11×11 ヶ所に以下のパタンを作成した。

(a) ライン系マスク

- ・パタン種類 ; 縦、横ラインアンドスペース 2 水準
- ・Target 寸法=hp ; 20、22、24、28、32、45、60nm@1X 7 水準
- ・マスクバイアス ; -3、-2、-1、0、+1、+2、+3 7 水準
- ・パタン密度;1:1、1:2 line/Space、1:4 line/Space 5 水準 合計 490 パタン

(b)ホール系マスク

- ・パタン種類 ; 縦、横繰り返しホール
- ・Target 寸法=hp ; 20、22、24、28、32、45、60 nm@1X 7 水準
- ・マスクバイアス ; -3、-2、-1、0、+1、+2、+3 7 水準
- ・パタン密度;1:1、1:2(xy/x/y、)、1:4(xy/x/y、) 7 水準 合計 343 パタン

★欠陥検査用マスク 2 枚

6025 基板 (FN0.2 μm) に Mo/Si 多層膜を形成し、Capping Layer、TaBN 吸収体 51 nm を形成したサンプル上に以下のパタンを作成した。

(a) ライン系設計欠陥マスク

- ・パタン種類 ; 縦、横ラインアンドスペース 2 水準

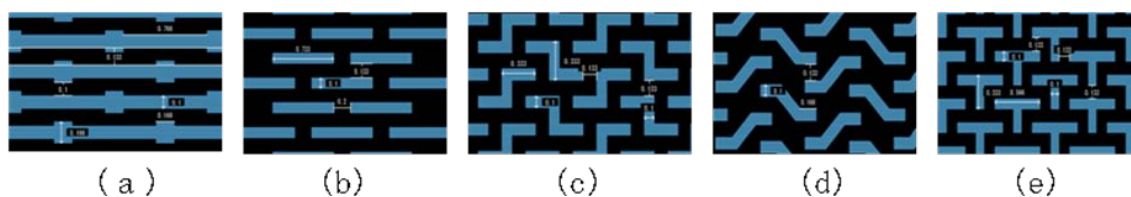
・Target 寸法; 22、32 nm@1X	2 水準	
・パターン密度;1:1、1:4 (トーン L、S)	2 水準	
・欠陥種類 ; 黒欠陥、白欠陥	10 水準	
・欠陥サイズ	20 水準	合計 1600 パタン

(b) ホール系設計欠陥マスク

・パターン種類 ;ホールパターン	1 水準	
・Target 寸法; 28、45 nm@1X	2 水準	
・パターン密度;1:1、1:4	2 水準	
・欠陥種類 ; 黒欠陥、白欠陥	9 水準	
・欠陥サイズ	20 水準	合計 720 パタン

★ Die/Die 検査マスクデバイスライクパターン 1 枚

・パターンは SEMIP23-200、P5-P10 に準拠したものとし、図 8 に示す 5 種の縦、横配列パターンを、欠陥有りと無しのパターンを Die/Die で形成した。目標パターン寸法は 22 nm ノードと 32 nm ノードの 2 種とした。



面の位相速度変化によるGouy Phaseとガス密度に比例する位相を最適化する必要がある。Gouy Phaseは励起レーザーのスポットサイズと集光点からの距離の関数であるため、励起レーザーの非点収差がなくスポットサイズが同じであることが望ましい。また、励起レーザーによる非線形媒質のトンネルイオン化は自由電子による位相不整合量を増大させるため、パルス幅は可能な限り短いことが望ましい。また、CSMの光源として利用することを考えた場合、さらにビームの空間的な安定性も必要となる。これらの点を考慮した上で実験を進めた。

高次高調波発生システムに関しては設計通りの動作を確認している。しかし、励起レーザーシステムに関しては、初期インストールおよび基本設計に問題があり、オシレータおよび増幅器の再設置およびパルス伸張器、増幅装置等の再設定、調整を行っている。現状で非点収差が大きく、レーザーシステムの調整が必要である。さらに、光軸そのものが日々ずれており実験を行うための安定な状態を保つことができていない。

光軸が大きくずれない条件を各種調整により見出し、出力 6W に関しては 1 週間程度、パルス幅に関しても 32 fs を安定に得られた。また、短い時間内では約 100 μm に集光した励起レーザーの空間的な揺らぎが 1.6 μm (rms 値)であることを確認した。

現状では励起レーザーの安定性は十分では無いものの、数十分程度であればほぼ安定しており高次高調波を発生させるために十分な値となった。そこで励起レーザーのスペクトルの中心波長を796nmとして、平均出力6W (6mJ/pulse)、パルス幅 38 fsの条件で高次高調波の発生実験を開始した。位相整合条件を満たすためには非線形ガスの圧力と励起レーザーの集光が最も重要となる。この実験では非線形媒質としてはHeガスを用いた。集光点付近に差動排気用のピンホールを置き、集光光学系側を定常圧力約 1kPaとした。集光には凹面ミラーを用いて入射角を調整することにより非点収差の影響を抑えた。さらにミラーの曲率半径を変えて実験を行った。その結果、凹面ミラーの曲率半径が2.5mのとき、顕著に高次高調波の出力の増加が認められた。さらに励起レーザーの非線形媒質中での伝搬を制御するために励起レーザービームの口径をアパーチャを用いて制限することで位相整合のとれる波長を制御した。図9(a)はアパーチャの直径をビーム径($1/e^2$)と同程度にしたときの高次高調波出力の分光器の蛍光面でのイメージ画像である。図9(b)に高次高調波のスペクトルの強度分布および59次(13.5nm) 高調波のビームプロファイルを示す。ビーム広がり角は約0.6mradであり、この結果より有効相互作用長が20mm程度となっていることがわかった。この結果はほぼ予測通りの位相整合条件が満たされていることを表している。さらにアパーチャの径を制御することにより、59次高調波の高出力化および100次以上の高調波の位相整合を実現した。このときの高次高調波のイメージ画像を図10(a), (b)に強度プロファイルを図10(c)に示す。59次高調波の強度を高くした条件ではアパーチャ径を絞ることで強度を最適化したものの位相整合距離自体は減少したためビーム広がり角が若干大きくなった。アパーチャを用いることの本质は励起レーザービームが高密度媒質中で伝搬しやすいようにビームプロファイルをフラットトップに近づけることにある。アパーチャのみの制御ではエネルギーの損失を伴うため特定波長の出力を最適化することは難しい。そこで今後は形状可変鏡を用いることでビーム波面の位相を制御し59次高調波の出力およびコヒーレンスの最適化を図る。また、CSMにビームを提供するため

にビームロック装置を導入し励起レーザーのビーム位置の安定化を図る。

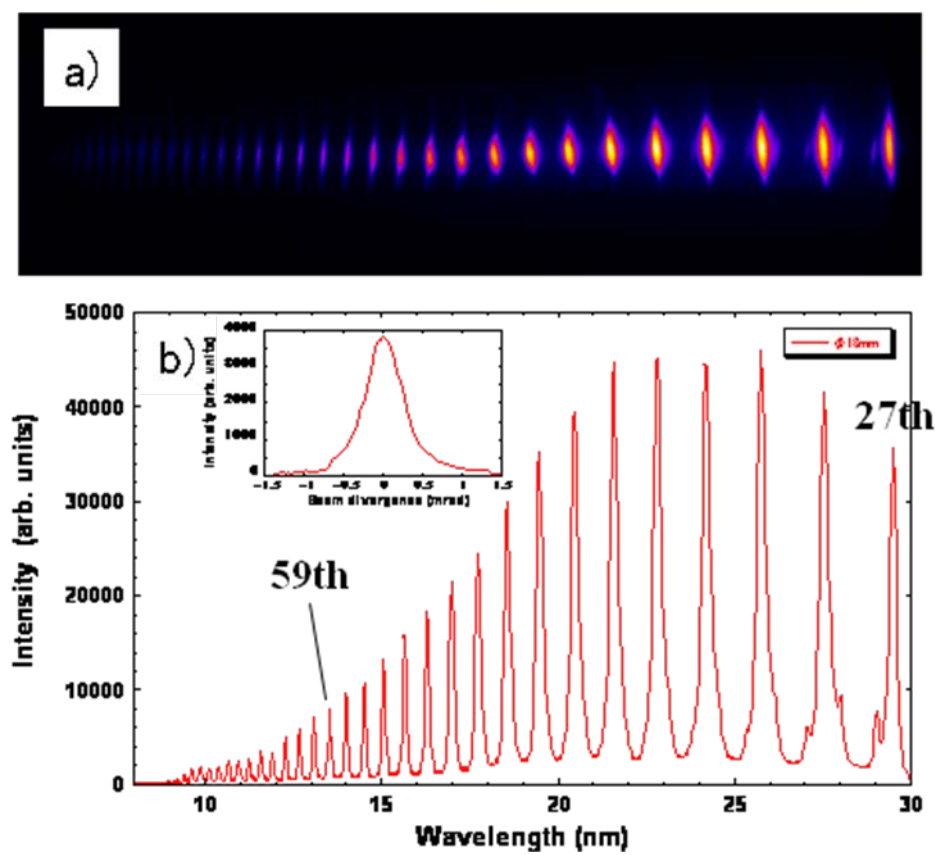


図9 (a)高次高調波イメージ、(b)高次高調波強度分布

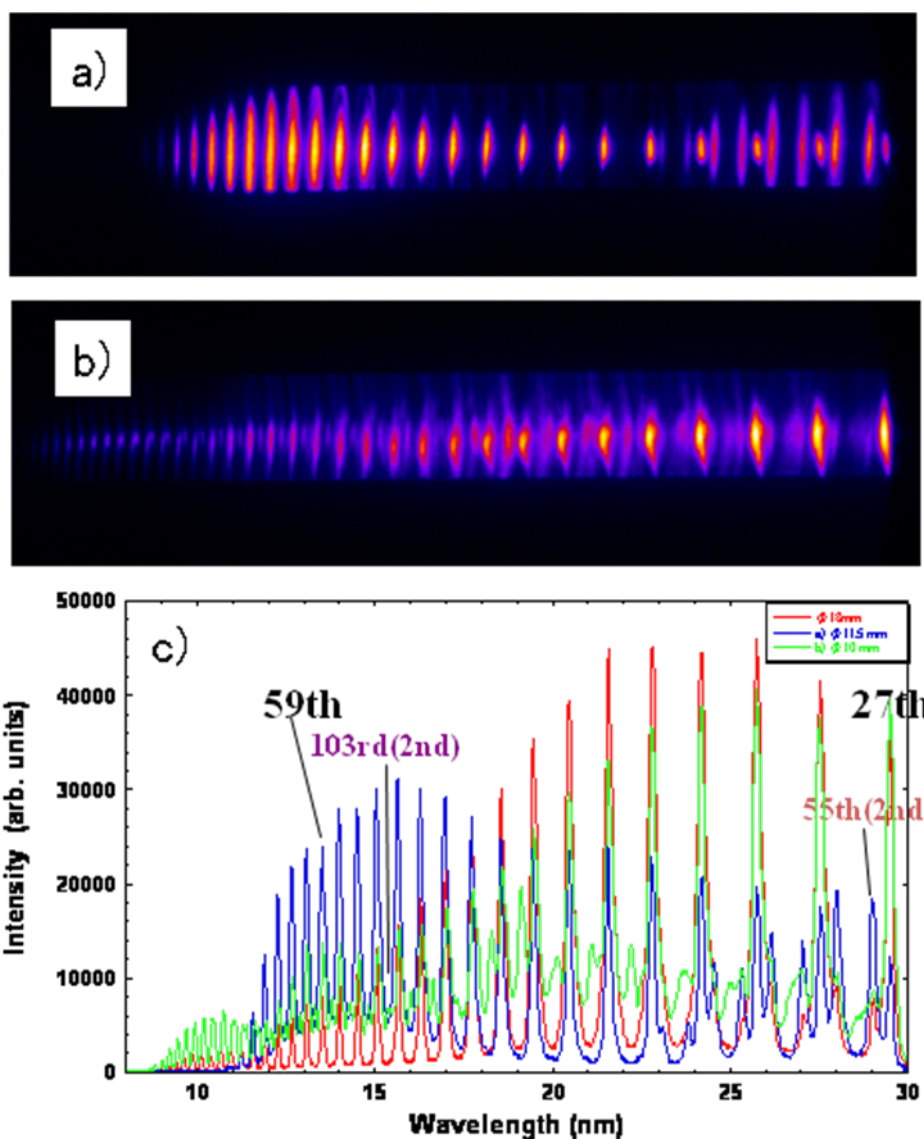


図10(a),(b)高次高調波イメージ、(c)高次高調波強度分布

(3) 大阪大学藤田グループ

① 高出力励起光の開発

- kW 級 YAG レーザーによる高出力高効率波長変換を実施した。今年度の目標高調波出力 100 W に対し、KTP 結晶を用いて変換効率 31% 平均出力 140 W を得た。さらに、冷却機構を改善した結晶ホルダーを製作し、変換効率・出力パワーの増大を図っている。
- 数十ナノ秒パルスを kW 級 YAG レーザーシステムで増幅した後、誘導ブリルアン散乱により百ピコ秒程度までパルス圧縮することは、OPCPA の高効率化に貢献することが期待される。今年度、緩和時間の短い FC-40 媒質を用いて、160 ps の世界最短の SBS パルス圧縮を達成した。(Opt. Exp. Vol.17, (2009) pp13654-13662)

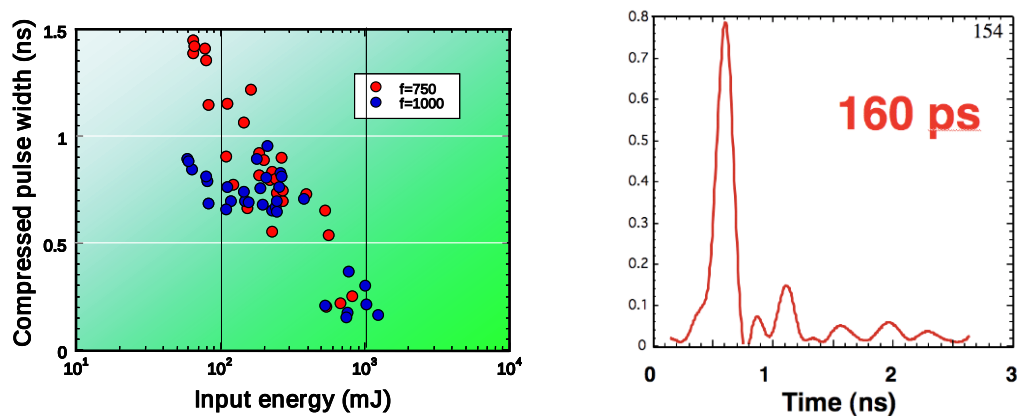


図 11 誘導ブリルアン散乱によるパルス圧縮結果

② 超短パルス種光の開発

- ・平成 20 年度に開発した短パルスファイバーレーザーの高性能化を図り、60 fs から 33 fs までの短パルス化の見通しを得た。
- ・各種ファイバー・非線形結晶を用いて、白色種光(中心波長 $\sim$ 600nm、スペクトル幅 $\sim$ 200nm)の発生実験を開始した。

③ 超短パルスレーザーシステム

- ・多段の OPCPA 増幅部の設計を完了し、部品の発注を終えた。
- ・回折格子型および正分散型のパルス圧縮器の設計を完了し、部品の発注を終えた。

§ 4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

● 論文詳細情報

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、 3203 (2009).DOI:10.1116/1.3258633
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. DOI:10.1364/OE.17.013654