

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6134313号
(P6134313)

(45) 発行日 平成29年5月24日(2017.5.24)

(24) 登録日 平成29年4月28日(2017.4.28)

(51) Int.Cl.		F I			
HO 1 S	3/098	(2006.01)	HO 1 S	3/098	
HO 1 S	3/00	(2006.01)	HO 1 S	3/00	A
HO 1 S	3/139	(2006.01)	HO 1 S	3/139	
HO 1 L	21/027	(2006.01)	HO 1 L	21/30	5 3 1 S

請求項の数 7 (全 35 頁)

(21) 出願番号	特願2014-512556 (P2014-512556)	(73) 特許権者	300073919
(86) (22) 出願日	平成25年4月22日 (2013.4.22)		ギガフォトン株式会社
(86) 国際出願番号	PCT/JP2013/061783		栃木県小山市大字横倉新田400番地
(87) 国際公開番号	W02013/161760	(74) 代理人	100105212
(87) 国際公開日	平成25年10月31日 (2013.10.31)		弁理士 保坂 延寿
審査請求日	平成28年3月10日 (2016.3.10)	(72) 発明者	柳田 達哉
(31) 優先権主張番号	特願2012-103580 (P2012-103580)		栃木県小山市横倉新田400 ギガフォトン株式会社内
(32) 優先日	平成24年4月27日 (2012.4.27)	(72) 発明者	若林 理
(33) 優先権主張国	日本国(JP)		栃木県小山市横倉新田400 ギガフォトン株式会社内
(出願人による申告)平成23年度 独立行政法人新エネルギー・産業技術開発機構「次世代半導体材料・プロセス基盤(MIRA1)プロジェクト/次世代半導体材料・プロセス基盤(MIRA1)プロジェクト(石特会計)/EUV光源高信頼化技術開発」委託研究、産業技術力強化法第19条の適用を受ける特許出願		審査官	百瀬 正之

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 レーザシステム及び極端紫外光生成システム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

第1の繰り返し周波数でクロック信号を出力可能に構成されたクロック生成器と、
光共振器を含み、相対的に位相が固定された複数の縦モードで光を発振させてパルスレーザー光を出力可能に構成されたモードロックレーザー装置と、
前記光共振器の光共振器長を調整可能に構成された調整装置と、
前記モードロックレーザー装置から出力された前記パルスレーザー光の光路に配置され、前記パルスレーザー光を第1の光路と第2の光路とに分岐させるビームスプリッタと、
前記パルスレーザー光の第1の光路に配置され、前記パルスレーザー光を検出して検出信号を出力可能に構成された検出器と、
前記パルスレーザー光の第2の光路に配置され、前記パルスレーザー光をスイッチング可能に構成されたスイッチング装置と、
制御部であって、
前記クロック生成器によって出力されるクロック信号と前記検出器によって出力される検出信号とに基づいて、前記クロック信号に対して前記検出信号が所定の位相差で同期するように前記調整装置を制御可能に構成され、
前記クロック生成器によって出力されるクロック信号と、前記第1の繰り返し周波数より小さい第2の繰り返し周波数で外部装置から入力されるタイミング信号とに基づいて、前記スイッチング装置を制御可能に構成された前記制御部と、

を備え、前記クロック信号に同期して前記モードロックレーザ装置から出力されて前記第2の光路に進んだパルスレーザ光の複数のパルスの内から、前記外部装置から入力される前記タイミング信号によってパルスを選択するレーザシステム。

【請求項2】

前記スイッチング装置は、ポッケルスセルを含む再生増幅器を有しており、

前記ポッケルスセルは、前記制御部によって出力される制御信号に基づいて、その光学特性が変化するように構成され、

前記再生増幅器は、前記ポッケルスセルの光学特性の変化により、前記パルスレーザ光を所定値以上の光強度に増幅するか否かが切り替わるように構成された、
請求項1記載のレーザシステム。

10

【請求項3】

前記スイッチング装置は、光シャッタを有しており、

前記光シャッタは、前記制御部によって出力される制御信号に基づいて、前記パルスレーザ光の透過率が変化するように構成された、

請求項1記載のレーザシステム。

【請求項4】

前記クロック信号のパルス間隔と、前記タイミング信号のパルス時間幅とが実質的に等しく、

前記制御部は、前記クロック信号と前記タイミング信号との論理積に基づいて、前記スイッチング装置を制御可能に構成された、

20

請求項1記載のレーザシステム。

【請求項5】

第1の繰り返し周波数でクロック信号を出力可能に構成されたクロック生成器と、

光共振器を含み、相対的に位相が固定された複数の縦モードで光を発振させてパルスレーザ光を出力可能に構成されたモードロックレーザ装置と、

前記光共振器の光共振器長を調整可能に構成された調整装置と、

前記モードロックレーザ装置から出力された前記パルスレーザ光の光路に配置され、前記パルスレーザ光を第1の光路と第2の光路とに分岐させるビームスプリッタと、

前記パルスレーザ光の第1の光路に配置され、前記パルスレーザ光を検出して検出信号を出力可能に構成された検出器と、

30

前記パルスレーザ光の第2の光路に配置され、前記パルスレーザ光をスイッチング可能に構成されたスイッチング装置と、

前記パルスレーザ光の光路であって前記スイッチング装置の下流側に配置され、前記パルスレーザ光を内部に導入可能な位置に入射口が設けられたチャンバと、

前記チャンバに設けられ、前記チャンバ内の所定の領域にターゲット物質を供給可能に構成され、ターゲット物質の供給タイミングを示すタイミング信号を出力可能に構成されたターゲット供給装置と、

前記パルスレーザ光の光路であって前記スイッチング装置と前記所定の領域との間に配置され、前記パルスレーザ光を前記所定の領域で集光可能に構成されたレーザ光集光光学系と、

40

制御部であって、

前記クロック生成器によって出力されるクロック信号と前記検出器によって出力される検出信号とに基づいて、前記クロック信号に対して前記検出信号が所定の位相差で同期するように前記調整装置を制御可能に構成され、

前記クロック生成器によって出力されるクロック信号と、前記第1の繰り返し周波数より小さい第2の繰り返し周波数で前記ターゲット供給装置によって出力されるタイミング信号とに基づいて、前記スイッチング装置を制御可能に構成された

前記制御部と、

を備え、前記クロック信号に同期して前記モードロックレーザ装置から出力されて前記第2の光路に進んだパルスレーザ光の複数のパルスの内から、前記ターゲット供給装置によ

50

って出力される前記タイミング信号によってパルスを選択する極端紫外光生成システム。

【請求項 6】

前記ターゲット供給装置は、前記チャンバ内に供給されたターゲット物質を検出するターゲット検出器を有しており、

前記ターゲット検出器は、前記タイミング信号を出力可能に構成された、請求項 5 記載の極端紫外光生成システム。

【請求項 7】

前記クロック信号のパルス間隔と、前記タイミング信号のパルス時間幅とが実質的に等しく、

前記制御部は、前記クロック信号と前記タイミング信号との論理積に基づいて、前記スイッチング装置を制御可能に構成された、

請求項 5 記載の極端紫外光生成システム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本開示は、レーザシステム及び極端紫外光生成システムに関する。

【背景技術】

【0002】

近年、半導体プロセスの微細化に伴って、半導体プロセスの光リソグラフィにおける転写パターンの微細化が急速に進展している。次世代においては、70 nm ~ 45 nm の微細加工、さらには 32 nm 以下の微細加工が要求されるようになる。このため、例えば 32 nm 以下の微細加工の要求に応えるべく、波長 13 nm 程度の極端紫外 (EUV) 光を生成するための装置と縮小投影反射光学系とを組み合わせた露光装置の開発が期待されている。

【0003】

EUV 光生成装置としては、ターゲット物質にパルスレーザ光を照射することによって生成されるプラズマが用いられる LPP (Laser Produced Plasma) 式の装置と、放電によって生成されるプラズマが用いられる DPP (Discharge Produced Plasma) 式の装置と、シンクロトロン放射光が用いられる SR (Synchrotron Radiation) 式の装置との 3 種類の装置が提案されている。

【概要】

【0004】

本開示の 1 つの観点に係るレーザシステムは、第 1 の繰り返し周波数でクロック信号を出力可能に構成されたクロック生成器と、光共振器を含み、相対的に位相が固定された複数の縦モードで光を発振させてパルスレーザ光を出力可能に構成されたモードロックレーザ装置と、光共振器の光共振器長を調整可能に構成された調整装置と、モードロックレーザ装置から出力されたパルスレーザ光の光路に配置され、パルスレーザ光を第 1 の光路と第 2 の光路とに分岐させるビームスプリッタと、パルスレーザ光の第 1 の光路に配置され、パルスレーザ光を検出して検出信号を出力可能に構成された検出器と、パルスレーザ光の第 2 の光路に配置され、パルスレーザ光をスイッチング可能に構成されたスイッチング装置と、制御部であって、クロック生成器によって出力されるクロック信号と検出器によって出力される検出信号とに基づいて、クロック信号に対して検出信号が所定の位相差で同期するように調整装置を制御可能に構成され、クロック生成器によって出力されるクロック信号と、第 1 の繰り返し周波数より小さい第 2 の繰り返し周波数で外部装置から入力されるタイミング信号とに基づいて、スイッチング装置を制御可能に構成された制御部と、を備え、クロック信号に同期してモードロックレーザ装置から出力されて第 2 の光路に進んだパルスレーザ光の複数のパルスの内から、外部装置から入力されるタイミング信号によってパルスを選択してもよい。

【0005】

本開示の他の 1 つの観点に係る極端紫外光生成システムは、第 1 の繰り返し周波数でク

10

20

30

40

50

ロック信号を出力可能に構成されたクロック生成器と、光共振器を含み、相対的に位相が固定された複数の縦モードで光を発振させてパルスレーザ光を出力可能に構成されたモードロックレーザ装置と、光共振器の光共振器長を調整可能に構成された調整装置と、モードロックレーザ装置から出力されたパルスレーザ光の光路に配置され、パルスレーザ光を第1の光路と第2の光路とに分岐させるビームスプリッタと、パルスレーザ光の第1の光路に配置され、パルスレーザ光を検出して検出信号を出力可能に構成された検出器と、パルスレーザ光の第2の光路に配置され、パルスレーザ光をスイッチング可能に構成されたスイッチング装置と、パルスレーザ光の光路であってスイッチング装置の下流側に配置され、パルスレーザ光を内部に導入可能な位置に入射口が設けられたチャンバと、チャンバに設けられ、チャンバ内の所定の領域にターゲット物質を供給可能に構成され、ターゲット物質の供給タイミングを示すタイミング信号を出力可能に構成されたターゲット供給装置と、パルスレーザ光の光路であってスイッチング装置と上記所定の領域との間に配置され、パルスレーザ光を上記所定の領域で集光可能に構成されたレーザ光集光光学系と、制御部であって、クロック生成器によって出力されるクロック信号と検出器によって出力される検出信号とに基づいて、クロック信号に対して検出信号が所定の位相差で同期するように調整装置を制御可能に構成され、クロック生成器によって出力されるクロック信号と、第1の繰り返し周波数より小さい第2の繰り返し周波数でターゲット供給装置によって出力されるタイミング信号とに基づいて、スイッチング装置を制御可能に構成された制御部と、を備え、クロック信号に同期してモードロックレーザ装置から出力されて第2の光路に進んだパルスレーザ光の複数のパルスの中から、ターゲット供給装置によって出力されるタイミング信号によってパルスを選択してもよい。

10

20

【図面の簡単な説明】

【0008】

本開示のいくつかの実施形態を、単なる例として、添付の図面を参照して以下に説明する。

【図1】図1は、例示的なLPP式のEUV光生成システムの構成を概略的に示す。

【図2】図2は、第1の実施形態に係るEUV光生成システムの構成例を概略的に示す一部断面図である。

【図3】図3は、図2に示すプリパルスレーザ装置の構成例を概略的に示す。

【図4】図4は、図3に示すモードロックレーザ装置の構成例を概略的に示す。

30

【図5】図5は、図3に示す再生増幅器の構成例を概略的に示す。

【図6】図6は、図5に示す再生増幅器においてポッケルスセルに電圧が印加されている場合の光路を概略的に示す。

【図7】図7A～図7Eは、図3に示すプリパルスレーザ装置における各信号のタイミングチャートである。

【図8】図8は、第1の実施形態におけるメインパルスレーザ装置の構成例を概略的に示す。

【図9】図9は、第2の実施形態におけるEUV光生成システムの構成例を概略的に示す一部断面図である。

【図10】図10は、第2の実施形態におけるプリパルスレーザ装置の構成例を概略的に示す。

40

【図11】図11は、第3の実施形態におけるプリパルスレーザ装置の構成例を概略的に示す。

【図12】図12は、第4の実施形態におけるプリパルスレーザ装置の構成例を概略的に示す。

【図13】図13は、第5の実施形態におけるプリパルスレーザ装置の構成例を概略的に示す。

【図14】図14は、EUV光生成システムにおけるプリパルスレーザ光の照射条件とCEとの関係を示すグラフである。

【図15】図15Aは、EUV光生成システムにおけるプリパルスレーザ光のフルーエン

50

スとCEとの関係を示すグラフであり、図15Bは、EUV光生成システムにおけるプリパルスレーザー光の光強度とCEとの関係を示すグラフである。

【図16】図16A及び図16Bは、EUV光生成システムにおいてプリパルスレーザー光が照射されたターゲットの写真である。

【図17】図17は、図16A及び図16Bに示す写真を撮影したときの機器の配置を概略的に示す。

【図18】図18A及び図18Bは、それぞれ、図16A及び図16Bに示される拡散ターゲットを模式的に示す断面図である。

【図19】図19Aは、第6の実施形態におけるメインパルスレーザー装置の構成例を概略的に示す。図19Bは、マスターオシレータから出力されたパルスレーザー光のパルス波形のグラフである。図19Cは、波形調節器から出力されたパルスレーザー光のパルス波形のグラフである。図19Dは、増幅器PA3から出力されたパルスレーザー光のパルス波形のグラフである。

10

【図20】図20Aは、図19に示す波形調節器の構成例を概略的に示す。図20Bは、波形調節器に入力されるパルスレーザー光のパルス波形のグラフである。図20Cは、高電圧電源から出力されるパルス状の電圧の波形を示すグラフである。図20Dは、波形調節器から出力されるパルスレーザー光のパルス波形を示すグラフである。

【図21】図21は、第7の実施形態におけるメインパルスレーザー装置の構成例を概略的に示す。

【図22】図22Aは、第8の実施形態におけるメインパルスレーザー装置の構成例を概略的に示す。図22Bは、第2のマスターオシレータから出力されたパルスレーザー光のパルス波形を示すグラフである。図22Cは、第1のマスターオシレータから出力されたパルスレーザー光のパルス波形を示すグラフである。図22Dは、光路調節器から出力されたパルスレーザー光のパルス波形を示すグラフである。図22Eは、メインパルスレーザー装置から出力されたパルスレーザー光のパルス波形を示すグラフである。

20

【図23】図23Aは、第9の実施形態におけるメインパルスレーザー装置の構成例を概略的に示す。図23Bは、第2のマスターオシレータから出力されたパルスレーザー光のパルス波形を示すグラフである。図23Cは、第1のマスターオシレータから出力されたパルスレーザー光のパルス波形を示すグラフである。図23Dは、光路調節器から出力されたパルスレーザー光のパルス波形を示すグラフである。図23Eは、メインパルスレーザー装置から出力されたパルスレーザー光のパルス波形を示すグラフである。

30

【図24】図24は、第10の実施形態に係るEUV光生成システムの構成例を概略的に示す一部断面図である。

【図25】図25は、図24に示すビーム整形光学系の構成例を概略的に示す。

【図26】図26は、図24に示すビーム整形光学系の別の構成例を概略的に示す。

【図27】図27は、図24に示すビーム整形光学系のさらに別の構成例を概略的に示す。

【実施形態】

【0009】

<内容>

40

1. 概要
2. 用語の説明
3. 極端紫外光生成システムの全体説明
 - 3.1 構成
 - 3.2 動作
4. プリパルスレーザー装置を含む極端紫外光生成システム
 - 4.1 構成
 - 4.2 動作
5. プリパルスレーザー装置
 - 5.1 概略構成

50

- 5.2 モードロックレーザ装置
- 5.3 再生増幅器
 - 5.3.1 ポッケルスセルに電圧を印加しない場合
 - 5.3.2 ポッケルスセルに電圧を印加する場合
- 5.4 タイミング制御
- 6. メインパルスレーザ装置
- 7. その他
 - 7.1 タイミング信号の変形例
 - 7.2 プリパルスレーザ装置の変形例(1)
 - 7.3 プリパルスレーザ装置の変形例(2)
 - 7.4 プリパルスレーザ装置の変形例(3)
 - 7.5 プリパルスレーザ光のパルス幅
 - 7.6 メインパルスレーザ装置の変形例(1)
 - 7.7 メインパルスレーザ装置の変形例(2)
 - 7.8 メインパルスレーザ装置の変形例(3)
 - 7.9 メインパルスレーザ装置の変形例(4)
 - 7.10 メインパルスレーザ光の光強度分布

10

【0010】

以下、本開示の実施形態について、図面を参照しながら詳しく説明する。以下に説明される実施形態は、本開示のいくつかの例を示すものであって、本開示の内容を限定するものではない。また、各実施形態で説明される構成及び動作の全てが本開示の構成及び動作として必須であるとは限らない。なお、同一の構成要素には同一の参照符号を付して、重複する説明を省略する。

20

【0011】

1. 概要

LPP式のEUV光生成装置においては、レーザシステムから出力されるパルスレーザ光を、チャンバ内に供給されるドロップレット状のターゲットに集光して照射することにより、ターゲット物質をプラズマ化してもよい。プラズマからは、EUV光を含む光が放射されてもよい。放射されたEUV光は、チャンバ内に配置されたEUV集光ミラーによって集光され、露光装置等にも出力されてもよい。

30

【0012】

LPP式のEUV光生成装置において、ドロップレット状のターゲットにプリパルスレーザ光を照射してターゲットを拡散させ、拡散ターゲットを形成した後、この拡散ターゲットにメインパルスレーザ光を照射する場合がある。このように、拡散ターゲットにメインパルスレーザ光を照射すれば、ターゲット物質が効率良くプラズマ化され得る。これによれば、パルスレーザ光のエネルギーからEUV光のエネルギーへの変換効率(Conversion Efficiency: CE)が向上し得る。本発明者らは、ターゲットを拡散させるためのプリパルスレーザ光は、そのパルス幅が数十ピコ秒以下の短パルスとされるのが望ましいことを発見した。

40

【0013】

パルス幅の短いパルスレーザ光を出力する装置として、モードロックレーザ装置が考えられる。モードロックレーザ装置は、相対的に位相が固定された複数の縦モードでレーザ光を発振させ得る。そして、それらの縦モードが合波された出力光は、パルス幅の短いパルスレーザ光となり得る。しかしながら、モードロックレーザ装置がパルスレーザ光の各パルスを出力するタイミングは、1つ前のパルスを出力したタイミングと、当該モードロックレーザ装置の光共振器長に応じた繰り返し周波数とに依存し得る。従って、所望のタイミングで各パルスが出力されるようにモードロックレーザ装置を制御することは容易ではない。このため、チャンバ内に供給されるドロップレット状のターゲットにプリパルスレーザ光を照射することが困難な場合がある。なお、繰り返し周波数は、1秒あたりの発振パルス数であってよい。

50

【 0 0 1 4 】

本開示の1つの観点においては、レーザシステムがクロック生成器を備え、クロック生成器によって出力されるクロック信号にモードロックレーザ装置が同期するように、モードロックレーザ装置の光共振器長を調整してもよい。さらに、上記クロック生成器によって出力されるクロック信号とターゲット供給装置によって出力されるタイミング信号とに基づいて、モードロックレーザ装置から出力されるパルスレーザ光をスイッチングしてもよい。モードロックレーザ装置から出力されるパルスレーザ光の繰り返し周波数は、タイミング信号の繰り返し周波数より高くてもよく、例えば100MHz程度でもよい。タイミング信号は、ターゲット供給装置によるターゲットの供給タイミングに一定の遅延時間を与えた信号であってもよい。このタイミング信号の繰り返し周波数は、例えば100kHz程度でもよい。

10

【 0 0 1 5 】

このような構成によれば、タイミング信号に応じてパルスレーザ光のスイッチングをするので、ターゲットが所定の領域を通過するタイミングに合わせて、当該所定の領域にパルスレーザ光を照射することができる。また、クロック信号にモードロックレーザ装置を同期させ、且つ、当該クロック信号に基づいたタイミングでパルスレーザ光のスイッチングをするので、パルスレーザ光に含まれる所望数のパルスのみを、ターゲットに照射し得る。パルスレーザ光に含まれる所望数のパルスは、例えば、所望の1パルスであってもよい。

【 0 0 1 6 】

20

2.用語の説明

「パルスレーザ光」は、複数のパルスを含むレーザ光を意味し得る。

「レーザ光」は、パルスレーザ光に限らずレーザ光一般を意味し得る。

「ターゲット物質」は、パルスレーザ光が照射されることによってプラズマ化し、そのプラズマからEUV光を放射し得るスズ、ガドリニウム、テルビウム等の物質を意味し得る。

「ターゲット」は、ターゲット供給装置によってチャンバ内に供給され、パルスレーザ光が照射される、微小量のターゲット物質を含む塊を意味し得る。特に、「ドロップレット状のターゲット」というときは、微小量の溶融したターゲット物質がチャンバ内に放出され、当該ターゲット物質の表面張力によってほぼ球状となったものを意味し得る。

30

「拡散ターゲット」は、ターゲットにプリパルスレーザ光が照射されたことにより拡散したターゲットを意味し得る。この拡散ターゲットにメインパルスレーザ光が照射されることにより、ターゲットを効率良くプラズマ化し得る。

【 0 0 1 7 】

3.極端紫外光生成システムの全体説明

3.1 構成

図1に、例示的なLPP式のEUV光生成システム11の構成を概略的に示す。EUV光生成装置1は、少なくとも1つのレーザシステム3と共に用いられてもよい。本願においては、EUV光生成装置1及びレーザシステム3を含むシステムを、EUV光生成システム11と称する。図1に示し、かつ、以下に詳細に説明するように、EUV光生成装置1は、チャンバ2及びターゲット供給装置26を含んでもよい。チャンバ2は、密閉可能であってもよい。ターゲット供給装置26は、例えば、チャンバ2の壁を貫通するように取り付けられてもよい。ターゲット供給装置26から供給されるターゲット物質の材料は、スズ、テルビウム、ガドリニウム、リチウム、キセノン、又は、それらの内のいずれか2つ以上の組合せを含んでもよいが、これらに限定されない。

40

【 0 0 1 8 】

チャンバ2の壁には、少なくとも1つの貫通孔が設けられてもよい。その貫通孔には、ウインドウ21が設けられてもよく、ウインドウ21をパルスレーザ光32が透過してもよい。チャンバ2の内部には、例えば、回転楕円面形状の反射面を有するEUV集光ミラー23が配置されてもよい。EUV集光ミラー23は、第1及び第2の焦点を有し得る。

50

EUV集光ミラー23の表面には、例えば、モリブデンとシリコンとが交互に積層された多層反射膜が形成されてもよい。EUV集光ミラー23は、例えば、その第1の焦点が、プラズマ生成領域25に位置し、その第2の焦点が、中間集光点(IF)292に位置するように配置されるのが好ましい。EUV集光ミラー23の中央部には、パルスレーザー光33を通過させるための貫通孔24が設けられてもよい。

【0019】

EUV光生成装置1は、EUV光生成制御装置5及びターゲットセンサ4をさらにも含む。ターゲットセンサ4は、撮像機能を有してもよく、ターゲットの存在、軌道、位置、速度等を検出してもよい。

【0020】

さらに、EUV光生成装置1は、チャンバ2の内部と露光装置6の内部とを連通させる接続部29を含んでもよい。接続部29内部には、アパーチャが形成された壁291が設けられてもよい。壁291は、そのアパーチャがEUV集光ミラー23の第2の焦点に位置するように配置されるのが好ましい。

【0021】

さらに、EUV光生成装置1は、レーザー光進行方向制御装置34、レーザー光集光ミラー22、ターゲット27を回収するためのターゲット回収部28等を含んでもよい。レーザー光進行方向制御装置34は、パルスレーザー光の進行方向を規定するための光学系と、この光学系の配置、姿勢等を調節するためのアクチュエータとを備えてもよい。

【0022】

3.2 動作

図1を参照に、レーザーシステム3から出力されたパルスレーザー光31は、レーザー光進行方向制御装置34を経て、パルスレーザー光32としてウインドウ21を透過して、チャンバ2内に入射してもよい。パルスレーザー光32は、少なくとも1つのレーザー光路に沿ってチャンバ2内に進み、レーザー光集光ミラー22で反射されて、パルスレーザー光33として少なくとも1つのターゲット27に照射されてもよい。

【0023】

ターゲット供給装置26は、ターゲット27をチャンバ2内のプラズマ生成領域25に向けて出力するよう構成されてもよい。ターゲット27には、パルスレーザー光33に含まれる少なくとも1つのパルスが照射されてもよい。パルスレーザー光33が照射されたターゲット27はプラズマ化し、そのプラズマから放射光251が放射され得る。放射光251に含まれるEUV光252は、EUV集光ミラー23によって選択的に反射されてもよい。EUV集光ミラー23によって反射されたEUV光252は、中間集光点292を通過して露光装置6に出力されてもよい。なお、1つのターゲット27に、パルスレーザー光33に含まれる複数のパルスが照射されてもよい。

【0024】

EUV光生成制御装置5は、EUV光生成システム11全体の制御を統括するよう構成されてもよい。EUV光生成制御装置5は、ターゲットセンサ4によって撮像されたターゲット27のイメージデータ等処理してもよい。また、EUV光生成制御装置5は、例えば、ターゲット27を出力するタイミング、ターゲット27の出力方向等を制御するよう構成されてもよい。さらに、EUV光生成制御装置5は、例えば、レーザーシステム3の発振タイミング、パルスレーザー光32の進行方向、パルスレーザー光33の集光位置等を制御するよう構成されてもよい。上述の様々な制御は単なる例示に過ぎず、必要に応じて他の制御が追加されてもよい。

【0025】

4. プリパルスレーザー装置を含む極端紫外光生成システム

4.1 構成

図2は、第1の実施形態に係るEUV光生成システム11の構成例を概略的に示す一部断面図である。図2に示すように、チャンバ2の内部には、レーザー光集光光学系22aと、EUV集光ミラー23と、ターゲット回収部28と、EUV集光ミラーホルダ41と、

10

20

30

40

50

プレート 4 2 及び 4 3 と、ビームダンプ 4 4 と、ビームダンプ支持部材 4 5 とが設けられてもよい。

【 0 0 2 6 】

チャンバ 2 にプレート 4 2 が固定され、プレート 4 2 にプレート 4 3 が固定されてもよい。EUV 集光ミラー 2 3 は、EUV 集光ミラーホルダ 4 1 を介してプレート 4 2 に固定されてもよい。

【 0 0 2 7 】

レーザ光集光光学系 2 2 a は、軸外放物面ミラー 2 2 1 及び平面ミラー 2 2 2 と、それらのミラーをそれぞれ保持するためのホルダとを含んでもよい。軸外放物面ミラー 2 2 1 及び平面ミラー 2 2 2 は、それぞれのミラーで反射されたパルスレーザ光がプラズマ生成領域 2 5 で集光するような位置及び姿勢となるように、それぞれのホルダを介してプレート 4 3 に固定されてもよい。

【 0 0 2 8 】

ビームダンプ 4 4 は、パルスレーザ光の光路の延長線上に位置するように、ビームダンプ支持部材 4 5 を介してチャンバ 2 に固定されてもよい。ターゲット回収部 2 8 は、ターゲット 2 7 の軌道の延長線上に配置されてもよい。

【 0 0 2 9 】

チャンバ 2 には、ターゲットセンサ 4 と、EUV 光センサ 7 と、ウインドウ 2 1 と、ターゲット供給装置 2 6 とが取り付けられてもよい。チャンバ 2 の外部には、レーザ光進行方向制御装置 3 4 と、EUV 光生成制御装置 5 とが配置されてもよい。

【 0 0 3 0 】

EUV 光センサ 7 は、プラズマ生成領域 2 5 において発生した EUV 光の光強度を検出して検出信号を EUV コントローラ 5 1 へ出力してもよい。ターゲット供給装置 2 6 は、ターゲットを一定の時間間隔で出力し続ける装置でもよいし、ターゲットコントローラ 5 2 から受信するトリガ信号に応じたタイミングで一滴一滴のターゲットを出力するオンデマンド式の装置でもよい。レーザ光進行方向制御装置 3 4 は、高反射ミラー 3 5 1、3 5 2 及び 3 5 3 と、ダイクロイックミラー 3 5 4 と、それらのミラーをそれぞれ保持するためのホルダとを含んでもよい。

【 0 0 3 1 】

EUV 光生成制御装置 5 は、EUV コントローラ 5 1 と、ターゲットコントローラ 5 2 と、遅延回路 5 3 とを含んでもよい。EUV コントローラ 5 1 は、ターゲットコントローラ 5 2、遅延回路 5 3 及びレーザシステム 3 に制御信号を出力してもよい。

【 0 0 3 2 】

EUV 光生成システム 1 1 に含まれるレーザシステム 3 は、プリパルスレーザ光を出力するプリパルスレーザ装置 3 0 0 と、メインパルスレーザ光を出力するメインパルスレーザ装置 3 9 0 とを含んでもよい。上述のダイクロイックミラー 3 5 4 は、プリパルスレーザ光に含まれる波長成分を高い反射率で反射し、メインパルスレーザ光に含まれる波長成分を高い透過率で透過させるコーティングを有し、ビームコンバイナとして機能してもよい。

【 0 0 3 3 】

4 . 2 動作

ターゲットコントローラ 5 2 は、ターゲット供給装置 2 6 がターゲット 2 7 をチャンバ 2 内のプラズマ生成領域 2 5 に供給開始するように、ターゲット供給装置 2 6 にターゲット供給開始信号を出力してもよい。

【 0 0 3 4 】

ターゲット供給装置 2 6 は、ターゲットコントローラ 5 2 からのターゲット供給開始信号を受信して、ドロップレット状のターゲット 2 7 をプラズマ生成領域 2 5 に向けて出力してもよい。ターゲットコントローラ 5 2 は、ターゲットセンサ 4 によるターゲット検出信号を受信し、その信号を遅延回路 5 3 に出力してもよい。ターゲットセンサ 4 は、ターゲット 2 7 がプラズマ生成領域 2 5 に到達する前の所定の位置を通過したタイミングを検

10

20

30

40

50

出するセンサであってもよい。例えば、ターゲットセンサ 4 は図示しない照明装置及び光センサを含んでいてもよい。照明装置は例えばレーザ装置であってよく、レーザ装置は上記所定の位置に CW レーザ光を照射するように配置されてもよい。光センサはターゲット 27 が通過した時に CW レーザ光をターゲット 27 が反射した反射光を検出する位置に配置されてもよい。ターゲット 27 がプラズマ生成領域に到達する前の所定の位置を通過すると、光センサはターゲット 27 による反射光を検出することによってターゲット 27 の通過タイミングを検出し、ターゲット検出信号を出力し得る。

【0035】

遅延回路 53 は、入力されたターゲット検出信号に所定の遅延時間を与えてタイミング信号を出力してもよい。遅延回路 53 は、ターゲット 27 がプラズマ生成領域 25 に到達するタイミングにおいてプリパルスレーザ光がプラズマ生成領域 25 に照射されるように、第 1 のタイミング信号をプリパルスレーザ装置 300 に出力してもよい。また、遅延回路 53 は、プリパルスレーザ光を照射されたターゲットが拡散して所定の拡散径に達するタイミングにおいてメインパルスレーザ光がプラズマ生成領域 25 に照射されるように、第 2 のタイミング信号をメインパルスレーザ装置 390 に出力してもよい。

10

【0036】

プリパルスレーザ装置 300 は、遅延回路 53 からの第 1 のタイミング信号に応じてプリパルスレーザ光を出力してもよい。メインパルスレーザ装置 390 は、遅延回路 53 からの第 2 のタイミング信号に応じてメインパルスレーザ光を出力してもよい。

【0037】

プリパルスレーザ装置 300 から出力されたプリパルスレーザ光は、高反射ミラー 353 及びダイクロイックミラー 354 によって反射されて、ウインドウ 21 を介してレーザ光集光光学系 22a に入射してもよい。メインパルスレーザ装置 390 から出力されたメインパルスレーザ光は、高反射ミラー 351 及び高反射ミラー 352 によって反射され、ダイクロイックミラー 354 を透過して、ウインドウ 21 を介してレーザ光集光光学系 22a に入射してもよい。

20

【0038】

レーザ光集光光学系 22a に入射したプリパルスレーザ光及びメインパルスレーザ光は、軸外放物面ミラー 221 及び平面ミラー 222 によって反射されて、プラズマ生成領域 25 に導かれてもよい。プリパルスレーザ光が照射されたターゲット 27 は拡散し、拡散ターゲットとなり得る。メインパルスレーザ光は、この拡散ターゲットに照射され、ターゲットをプラズマ化し得る。

30

【0039】

5. プリパルスレーザ装置

5.1 概略構成

図 3 は、図 2 に示すプリパルスレーザ装置 300 の構成例を概略的に示す。プリパルスレーザ装置 300 は、クロック生成器 301 と、モードロックレーザ装置 302 と、光共振器長調整ドライバ 303 と、パルスレーザ光検出器 304 と、再生増幅器 305 と、励起用電源 306 と、制御部 310 とを含んでもよい。

【0040】

クロック生成器 301 は、例えば繰り返し周波数を 100 MHz とするクロック信号を出力してもよい。モードロックレーザ装置 302 は、相対的に位相が固定された複数の縦モードでレーザ光を発振させて、例えば繰り返し周波数を 100 MHz 程度とするパルスレーザ光を出力してもよい。モードロックレーザ装置 302 は、後述の光共振器を含んでもよく、その光共振器長は、光共振器長調整ドライバ 303 によって調整可能であってもよい。

40

【0041】

モードロックレーザ装置 302 から出力されるパルスレーザ光の光路には、ビームスプリッタ 307 が配置されてもよい。ビームスプリッタ 307 によって 2 つの光路に分岐されたパルスレーザ光の一方の光路には、パルスレーザ光検出器 304 が配置されてもよい

50

。パルスレーザ光検出器 304 は、パルスレーザ光を検出して検出信号を出力してもよい。

【0042】

再生増幅器 305 は、ビームスプリッタ 307 によって分岐されたパルスレーザ光の他方の光路に配置されてもよい。再生増幅器 305 は、光共振器を含んでもよく、その光共振器内でパルスレーザ光を複数回往復させて増幅し、パルスレーザ光が所定回数往復したタイミングで増幅されたパルスレーザ光を取り出す装置であってもよい。再生増幅器 305 の光共振器内にはレーザ媒質（後述）が配置され、このレーザ媒質を励起するためのエネルギーが、励起用電源 306 を介して与えられてもよい。再生増幅器 305 は、内部にポッケルスセル（後述）を含んでもよい。

10

【0043】

制御部 310 は、位相調整部 311 と、AND 回路 312 とを含んでもよい。位相調整部 311 は、クロック生成器 301 によって出力されるクロック信号と、パルスレーザ光検出器 304 によって出力される検出信号とに基づいて、光共振器長調整ドライバ 303 をフィードバック制御してもよい。

【0044】

また、制御部 310 は、クロック生成器 301 によって出力されるクロック信号と、上述の遅延回路 53 からのタイミング信号とに基づいて、再生増幅器 305 を制御してもよい。遅延回路 53 からのタイミング信号は、上述の第 1 のタイミング信号であってよい。具体的には、AND 回路 312 が、クロック信号とタイミング信号との AND 信号を生成し、この AND 信号に基づいて再生増幅器 305 内のポッケルスセルを制御してもよい。

20

【0045】

5.2 モードロックレーザ装置

図 4 は、図 3 に示すモードロックレーザ装置 302 の構成例を概略的に示す。モードロックレーザ装置 302 は、平面ミラー 320 と可飽和吸収体ミラー 321 との間に、レーザ結晶 322 と、凹面ミラー 323 と、平面ミラー 324 と、出力結合ミラー 325 と、凹面ミラー 326 とが、この順に平面ミラー 320 側から配置された光共振器を含んでもよい。この光共振器の光路は紙面にほぼ平行でもよい。さらに、モードロックレーザ装置 302 は、光共振器の外部からレーザ結晶 322 に励起光 E1 を出力する励起光源 327 を含んでもよい。励起光源 327 は、励起光 E1 を発生するレーザダイオードを含んでもよい。

30

【0046】

平面ミラー 320 は、励起光源 327 からの励起光 E1 に含まれる波長成分を高い透過率で透過させ、レーザ結晶 322 からの放出光に含まれる波長成分を高い反射率で反射するミラーでもよい。レーザ結晶 322 は、励起光 E1 を受けて励起されて誘導放出を行うレーザ媒質であり、例えば、Nd:YVO₄ (neodymium-doped yttrium orthovanadate) の結晶であってもよい。レーザ結晶 322 から放出される光は、複数の縦モード（周波数成分）を含んでもよい。さらに、このレーザ結晶 322 はレーザ光の入射角度がブリュースタ角となるように配置されてもよい。

【0047】

凹面ミラー 323 と、平面ミラー 324 と、凹面ミラー 326 とは、レーザ結晶 322 から放出された光をそれぞれ高い反射率で反射してもよい。出力結合ミラー 325 は、光共振器内で増幅されたレーザ光の一部を、光共振器の外部に向けて透過させ、残りの一部を、光共振器内でさらに増幅されるように反射してもよい。出力結合ミラー 325 からは進行方向の異なる第 1 の光と第 2 の光とが光共振器の外部に透過してもよい。第 1 の光は平面ミラー 324 からの反射光のうち出力結合ミラー 325 を透過した光である。第 2 の光は凹面ミラー 326 からの反射光のうち出力結合ミラー 325 を透過した光である。第 1 の光の光路には、上述のビームスプリッタ 307 が配置されてもよい。第 2 の光の光路には、図示しないレーザダンパが配置されてもよい。

40

【0048】

50

可飽和吸収体ミラー 3 2 1 は、ミラー基板に反射層と可飽和吸収体層とがこの順で積層されたミラーでもよい。可飽和吸収体ミラー 3 2 1 においては、入射光が所定の閾値より弱い間は可飽和吸収体層が入射光を吸収し、入射光がその閾値以上に強くなると、可飽和吸収体層が入射光を高い透過率で透過させて、反射層が入射光を反射してもよい。これにより、複数の縦モードの光の位相がそろったタイミングで瞬間的に強度が高くなった光のみが、可飽和吸収体ミラー 3 2 1 によって反射され得る。

【 0 0 4 9 】

こうして、複数の縦モードの光の位相が相対的に固定されたパルス光が、光共振器内を往復することにより、増幅され得る。この状態はモードロックと呼ばれる場合がある。増幅されたパルス光は出力結合ミラー 3 2 5 からパルスレーザ光として周期的に出力され得る。このパルスレーザ光の繰り返し周波数は、光が光共振器内を一往復する時間の逆数に相当し得る。例えば、光共振器長 $L = 1.5 \text{ m}$ 、光速 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ とすると、繰り返し周波数 f は、次式の通り、 100 MHz となり得る。

$$\begin{aligned} f &= c / (2L) \\ &= (3 \times 10^8) / (2 \times 1.5) \\ &= 100 \text{ MHz} \end{aligned}$$

この出力されるパルスレーザ光は、レーザ結晶 3 2 2 がブリュースタ角で図 4 のように配置されている場合、紙面に対して平行な直線偏光となり得る。

【 0 0 5 0 】

可飽和吸収体ミラー 3 2 1 は、ミラーホルダに支持され、このミラーホルダが、リニアステージ 3 2 8 によって光の進行方向に沿って移動可能であってもよい。光の進行方向は、図中の左右方向であってよい。リニアステージ 3 2 8 は、上述の光共振器長調整ドライバ 3 0 3 によって駆動可能であってもよい。可飽和吸収体ミラー 3 2 1 が光の進行方向に沿って移動させられることにより、光共振器長が調整され、パルスレーザ光の繰り返し周波数が調整されてもよい。

【 0 0 5 1 】

上述のように、位相調整部 3 1 1 は、クロック生成器 3 0 1 によって出力されるクロック信号と、パルスレーザ光検出器 3 0 4 によって出力される検出信号とに基づいて、光共振器長調整ドライバ 3 0 3 を制御してもよい。具体的には、位相調整部 3 1 1 は、クロック信号と検出信号との位相差を検出し、クロック信号と検出信号とが一定の遅延時間をもって同期するように、光共振器長調整ドライバ 3 0 3 を制御してもよい。クロック信号と検出信号との遅延時間については、図 7 A 及び図 7 B を参照しながら後述する。

【 0 0 5 2 】

5.3 再生増幅器

図 5 は、図 3 に示す再生増幅器 3 0 5 の構成例を概略的に示す。再生増幅器 3 0 5 は、平面ミラー 3 3 4 と凹面ミラー 3 3 5 との間に、レーザ結晶 3 3 6 と、凹面ミラー 3 3 7 と、平面ミラー 3 3 8 と、偏光ビームスプリッタ 3 3 9 と、ポッケルスセル 3 4 0 と、 $\lambda/4$ 波長板 3 4 1 とが、この順に平面ミラー 3 3 4 側から配置された光共振器を含んでもよい。例えば、再生増幅器 3 0 5 の光共振器は、上述のモードロックレーザ装置 3 0 2 の光共振器よりも短い光共振器長を有してもよい。さらに、再生増幅器 3 0 5 は、光共振器の外部からレーザ結晶 3 3 6 に励起光 E 2 を出力する励起光源 3 4 2 を含んでもよい。励起光源 3 4 2 は、励起光 E 2 を発生するレーザダイオードを含んでもよい。また、再生増幅器 3 0 5 は、偏光ビームスプリッタ 3 3 0 と、ファラデー光アイソレータ 3 3 1 と、平面ミラー 3 3 2 と、平面ミラー 3 3 3 とを含んでもよい。さらに、レーザ結晶 3 3 6 はレーザ光の入射角度がブリュースタ角となるように配置されてもよい。ファラデー光アイソレータ 3 3 1 は、図示しないファラデーローテータと図示しない $\lambda/2$ 波長板を含んでもよい。

【 0 0 5 3 】

平面ミラー 3 3 4 は、励起光源 3 4 2 からの励起光 E 2 に含まれる波長成分を高い透過率で透過させ、レーザ結晶 3 3 6 からの放出光に含まれる波長成分を高い反射率で反射す

10

20

30

40

50

るミラーでもよい。レーザ結晶 336 は、励起光 E2 を受けて励起されるレーザ媒質であり、例えば、Nd : YAG (neodymium-doped yttrium aluminum garnet) の結晶であってもよい。励起光 E2 を受けて励起されたレーザ結晶 336 に、モードロックレーザ装置 302 から出力された種光が入射すると、誘導放出によって種光が増幅され得る。

【0054】

5.3.1 ポッケルスセルに電圧を印加しない場合

偏光ビームスプリッタ 330 は、モードロックレーザ装置 302 から出力されたパルスレーザ光 B1 の光路に配置されてもよい。偏光ビームスプリッタ 330 は、パルスレーザ光 B1 が入射する面が紙面に対して垂直に配置されてもよい。偏光ビームスプリッタ 330 は、紙面に平行な方向に直線偏光したパルスレーザ光 B1 を高い透過率で透過させてもよい。偏光ビームスプリッタ 330 は、後述のように、紙面に垂直な方向に直線偏光したパルスレーザ光 B29 を高い反射率で反射してもよい。

10

【0055】

ファラデー光アイソレータ 331 は、図中下側から偏光ビームスプリッタ 330 を透過したパルスレーザ光 B2 の光路に配置されてもよい。ファラデー光アイソレータ 331 は、図中下側から入射した直線偏光のパルスレーザ光 B2 の偏光面を 90 度回転させてパルスレーザ光 B3 として透過させてもよい。また、ファラデー光アイソレータ 331 は、後述のように、図中上側に相当する逆方向から入射するパルスレーザ光 B28 の偏光面を回転させずに、偏光ビームスプリッタ 330 に向けて透過させてもよい。

【0056】

平面ミラー 332 は、ファラデー光アイソレータ 331 を透過したパルスレーザ光 B3 の光路に配置されてもよい。平面ミラー 332 は、パルスレーザ光 B3 を高い反射率で反射してもよい。平面ミラー 333 は、平面ミラー 332 によって反射されたパルスレーザ光 B4 を高い反射率で反射してもよい。

20

【0057】

光共振器内に配置された偏光ビームスプリッタ 339 は、平面ミラー 333 によって反射されたパルスレーザ光 B5 の光路上に位置していてもよい。偏光ビームスプリッタ 339 は、パルスレーザ光 B5 が入射する面が紙面に対して垂直に配置されてもよく、パルスレーザ光 B5 は、偏光ビームスプリッタ 339 の図中右側の面に入射してもよい。偏光ビームスプリッタ 339 は、紙面に垂直な方向に直線偏光したパルスレーザ光 B5 を高い反射率で反射し、パルスレーザ光 B6 として光共振器内に導いてもよい。偏光ビームスプリッタ 339 は、後述のように、紙面に平行な方向に直線偏光したパルスレーザ光 B11 等を高い透過率で透過させてもよい。

30

【0058】

ポッケルスセル 340 と、 $\lambda/4$ 波長板 341 と、凹面ミラー 335 とは、偏光ビームスプリッタ 339 からみて図中右側の光路に配置されていてもよい。平面ミラー 334 と、レーザ結晶 336 と、凹面ミラー 337 と、平面ミラー 338 とは、偏光ビームスプリッタ 339 からみて図中左側の光路に配置されていてもよい。

【0059】

ポッケルスセル 340 は、高電圧電源 343 によって電圧を印加可能であってもよい。ポッケルスセル 340 は、高電圧電源 343 によって電圧が印加されていない状態においては、偏光ビームスプリッタ 339 によって反射されたパルスレーザ光 B6 の偏光面を回転させずにパルスレーザ光 B7 として透過させてもよい。なお、ポッケルスセル 340 に高電圧電源 343 が電圧を印加していない状態は「電圧が OFF」と称し、高電圧電源 343 が電圧を印加している状態は「電圧が ON」と称する。

40

【0060】

$\lambda/4$ 波長板 341 は、パルスレーザ光 B7 が入射する面が紙面に対して垂直な状態で配置されてもよい。更に、 $\lambda/4$ 波長板 341 の結晶の光学軸が、入射光軸に垂直な面内において、紙面に対して 45 度傾いた状態となるよう、 $\lambda/4$ 波長板 341 が配置されてもよい。 $\lambda/4$ 波長板 341 に入射するパルスレーザ光 B7 は、上記結晶の光学軸に平行

50

な第1の偏光成分と、上記結晶の光学軸とパルスレーザー光B7の進行方向との両方に垂直な第2の偏光成分とを有し得る。第1の偏光成分と第2の偏光成分との合成ベクトルの方向は、パルスレーザー光B7の偏光面に沿った方向と一致し、その方向は紙面に垂直な方向であり得る。

【0061】

1/4波長板341は、第1の偏光成分と第2の偏光成分とを互いに異なる光路で透過させる複屈折作用を有してもよい。その結果、1/4波長板341は、ポッケルスセル340を透過したパルスレーザー光B7を、第1の偏光成分の位相に対して第2の偏光成分の位相を1/4波長分ずらして透過させてもよい。凹面ミラー335は、1/4波長板341を透過したパルスレーザー光B8を高い反射率で反射してもよい。凹面ミラー335によって反射されたパルスレーザー光B9は、1/4波長板341を再び透過するので、第1の偏光成分の位相に対して第2の偏光成分の位相がさらに1/4波長分ずらされてもよい。つまり、パルスレーザー光B7は、1/4波長板341を2回透過することにより、第1の偏光成分の位相に対して第2の偏光成分の位相が合計で1/2波長分ずらされてもよい。その結果、紙面に垂直な方向に直線偏光したパルスレーザー光B7は、その偏光面が90度回転し、紙面に平行な方向に直線偏光したパルスレーザー光B10としてポッケルスセル340に入射し得る。

10

【0062】

ポッケルスセル340は、上述の通り、高電圧電源343による電圧が印加されていない状態においては、入射光の偏光面を回転させないで透過させ得る。従って、ポッケルスセル340を透過したパルスレーザー光B11は、紙面に平行な方向に直線偏光した状態で偏光ビームスプリッタ339に入射し得る。偏光ビームスプリッタ339は、紙面に平行な方向に直線偏光したパルスレーザー光B11を高い透過率で透過させてもよい。

20

【0063】

平面ミラー338は、偏光ビームスプリッタ339を透過したパルスレーザー光B12を高い反射率で反射してもよい。凹面ミラー337は、平面ミラー338によって反射されたパルスレーザー光B13を高い反射率で反射してもよい。レーザー結晶336は、凹面ミラー337によって反射された種光としてのパルスレーザー光B14を増幅して透過させてもよい。

【0064】

平面ミラー334は、レーザー結晶336によって増幅されてレーザー結晶336を透過したパルスレーザー光B15を高い反射率で反射し、パルスレーザー光B16としてレーザー結晶336に入射させてもよい。レーザー結晶336によって再び増幅されたパルスレーザー光B17は、凹面ミラー337と、平面ミラー338と、偏光ビームスプリッタ339と、ポッケルスセル340とを介して、パルスレーザー光B21として1/4波長板341に入射してもよい。パルスレーザー光B21は1/4波長板341を透過し、凹面ミラー335によって反射されて再び1/4波長板341を透過することにより、その偏光面が90度回転し、紙面に垂直な方向に直線偏光したパルスレーザー光B24となり得る。パルスレーザー光B24は、ポッケルスセル340を透過した後、偏光ビームスプリッタ339によって高い反射率で反射され、パルスレーザー光B26として光共振器の外部に出力されてもよい。

30

40

【0065】

パルスレーザー光B26は、平面ミラー333と平面ミラー332とを介して、パルスレーザー光B28としてファラデー光アイソレータ331に図中上側から入射してもよい。ファラデー光アイソレータ331は、図中上側から入射した直線偏光のパルスレーザー光B28を、その偏光面を回転させずに、パルスレーザー光B29として透過させてもよい。偏光ビームスプリッタ330は、紙面に垂直な方向に直線偏光したパルスレーザー光B29を高い反射率で反射してもよい。

【0066】

偏光ビームスプリッタ330によって反射されたパルスレーザー光B30は、図2に示し

50

たレーザ光集光光学系 2 2 a を介してプラズマ生成領域 2 5 に導かれてもよい。ただし、再生増幅器 3 0 5 の光共振器内を一往復しただけで出力された、このパルスレーザ光 B 3 0 は、仮にターゲットに照射されても、ターゲットを拡散させず、ターゲットをプラズマ化もしない程度の弱い強度を有していてもよい。

【 0 0 6 7 】

5 . 3 . 2 ポッケルスセルに電圧を印加する場合

高電圧電源 3 4 3 は、一度ポッケルスセル 3 4 0 を透過したパルスレーザ光 B 1 1 の 1 つのパルスが、次にパルスレーザ光 B 2 0 としてポッケルスセル 3 4 0 に入射するまでの間のタイミングで、ポッケルスセル 3 4 0 に印加する電圧を OFF から ON にしてもよい。ポッケルスセル 3 4 0 は、高電圧電源 3 4 3 によって電圧が印加されている状態において、 $\lambda/4$ 波長板 3 4 1 と同様に、入射光を、第 1 の偏光成分の位相に対して第 2 の偏光成分の位相を $1/4$ 波長分ずらして透過させてもよい。

10

【 0 0 6 8 】

図 6 は、図 5 に示す再生増幅器 3 0 5 においてポッケルスセル 3 4 0 に電圧が印加されている場合の光路を概略的に示す。このとき、パルスレーザ光 B 2 0 は、ポッケルスセル 3 4 0 及び $\lambda/4$ 波長板 3 4 1 をそれぞれ 2 回透過して (パルスレーザ光 B a 1、B a 2、B a 3、B a 4)、パルスレーザ光 B 1 1 として戻ってきてもよい。 $\lambda/4$ 波長板 3 4 1 を 2 回透過することで偏光面が 90 度回転し、且つ、電圧が印加されているポッケルスセル 3 4 0 を 2 回透過することでさらに偏光面が 90 度回転したパルスレーザ光 B 1 1 は、その偏光面の向きがパルスレーザ光 B 2 0 と同じであり得る。従って、パルスレーザ光 B 1 1 は、偏光ビームスプリッタ 3 3 9 を再び透過して、レーザ結晶 3 3 6 によって増幅され得る。ポッケルスセル 3 4 0 に高電圧電源 3 4 3 による電圧が印加されている間、この増幅動作が繰り返され得る。

20

【 0 0 6 9 】

増幅動作が繰り返された後、高電圧電源 3 4 3 は、一度ポッケルスセル 3 4 0 を透過したパルスレーザ光 B 1 1 が、次にパルスレーザ光 B 2 0 としてポッケルスセル 3 4 0 に入射するまでの間のタイミングで、ポッケルスセル 3 4 0 に印加する電圧を ON から OFF にしてもよい。ポッケルスセル 3 4 0 は、上述の通り、図 5 のように高電圧電源 3 4 3 による電圧が印加されていない状態においては、入射光の偏光面を回転させなくてもよい。従って、このときポッケルスセル 3 4 0 に図中左側から入射したパルスレーザ光 B 2 0 は、図 5 のパルスレーザ光 B 2 1、B 2 2、B 2 3、B 2 4 として、 $\lambda/4$ 波長板 3 4 1 を 2 回透過することによって、その偏光面が 90 度だけ回転し得る。よって、増幅動作が繰り返された後のパルスレーザ光は、紙面に垂直な方向に直線偏光した状態で、パルスレーザ光 B 2 5 として偏光ビームスプリッタ 3 3 9 に図中右側から入射し、光共振器の外部に出力され得る。

30

【 0 0 7 0 】

なお、図 6 のようにポッケルスセル 3 4 0 に電圧が印加されて増幅動作が繰り返されている間、新たにモードロックレーザ装置 3 0 2 から出力されたパルスレーザ光 B 1 は、紙面に垂直な方向に直線偏光したパルスレーザ光 B 6 としてポッケルスセル 3 4 0 に入射し得る。ポッケルスセル 3 4 0 に電圧が印加されている間は、パルスレーザ光 B 6 は、 $\lambda/4$ 波長板 3 4 1 及びポッケルスセル 3 4 0 を透過しながら、パルスレーザ光 B a 5、B a 6、B a 7、B a 8 として示す光路を経て、パルスレーザ光 B 2 5 として戻ってきてもよい。このとき、パルスレーザ光 B 2 5 は、その偏光面がパルスレーザ光 B 6 と同じであり得る。従って、このパルスレーザ光 B 2 5 は、紙面に垂直な方向に直線偏光したまま偏光ビームスプリッタ 3 3 9 に図中右側から入射し、一度も増幅されることなく、パルスレーザ光 B 2 6 として光共振器の外部に出力され得る。

40

【 0 0 7 1 】

高電圧電源 3 4 3 がポッケルスセル 3 4 0 に印加する電圧を ON / OFF するタイミングは、上述のクロック信号とタイミング信号との AND 信号によって決定されてもよい。AND 信号は、AND 回路 3 1 2 から、再生増幅器 3 0 5 に含まれる電圧波形生成回路 3

50

44に供給されてもよい。電圧波形生成回路344は、AND信号をトリガとして電圧波形を生成し、この電圧波形を高電圧電源343に供給してもよい。高電圧電源343は、この電圧波形に従ってパルス状の電圧を生成し、この電圧をポッケルスセル340に印加してもよい。タイミング信号と、AND信号と、電圧波形生成回路344による電圧波形とについては、図7C～図7Eを参照しながら後述する。

【0072】

5.4 タイミング制御

図7A～図7Eは、図3に示すプリパルスレーザ装置300における各信号のタイミングチャートである。図7Aは、クロック生成器301から出力されるクロック信号のタイミングチャートである。クロック生成器301から出力されるクロック信号は、例えば、
10
繰り返し周波数を100MHzとしてもよい。この場合、パルスの発生間隔は10nsとなり得る。

【0073】

図7Bは、パルスレーザ光検出器304から出力される検出信号のタイミングチャートである。パルスレーザ光検出器304から出力される検出信号の繰り返し周波数は、モードロックレーザ装置302から出力されるパルスレーザ光の繰り返し周波数に依存し得る。モードロックレーザ装置302から出力されるパルスレーザ光の繰り返し周波数は、モードロックレーザ装置302の光共振器長を調整することによって、調整され得る。このパルスレーザ光は、例えば、繰り返し周波数が100MHz程度であってもよい。パルスレーザ光の繰り返し周波数を微調整することによって、図7Aに示すクロック信号との位
20
相差を調整し得る。これにより、パルスレーザ光の検出信号が図7Aに示す例えば100MHzのクロック信号に対して、例えば5nsの一定の遅延時間をもって同期するように、モードロックレーザ装置302がフィードバック制御されてもよい。

【0074】

図7Cは、遅延回路53から出力されるタイミング信号のタイミングチャートである。上述のように、遅延回路53から出力されるタイミング信号は、ターゲットセンサ4によるターゲット検出信号に所定の遅延時間を与えた信号であってもよい。タイミング信号の繰り返し周波数は、ターゲット供給装置26によるターゲット出力の繰り返し周波数に依存し得る。ターゲット供給装置26によるターゲット出力の繰り返し周波数は、例えば、
30
100kHz程度であってもよい。タイミング信号のパルス幅は、図7Aに示すクロック信号のパルスの発生間隔と同等の時間幅とされてもよい。よって、タイミング信号のパルス幅は、例えば10nsであってもよい。

【0075】

図7Dは、AND回路312から出力されるAND信号のタイミングチャートである。AND回路312から出力されるAND信号は、クロック信号とタイミング信号との論理積によって生成される信号であってもよい。タイミング信号のパルス幅が、クロック信号の発生間隔と同等の時間幅とされた場合には、タイミング信号の1つのパルスに対して、AND信号の1つのパルスが生成され得る。このAND信号は、クロック信号の複数のパルスのうちの一部分のパルスにほぼ同期して生成され得る。

【0076】

図7Eは、電圧波形生成回路344から出力される電圧波形のタイミングチャートである。電圧波形生成回路344から出力される電圧波形は、AND回路312からAND信号が出力されたときに、AND信号にほぼ同期して生成されてもよい。この電圧波形は、例えば、パルス幅が300nsのパルスであってもよい。例えば、再生増幅器305の光共振器長が1mの場合、光速 3×10^8 m/sのパルスレーザ光が光共振器内を50往復する時間は、300nsであり得る。このように電圧波形のパルス幅を設定することにより、パルスレーザ光を再生増幅器305の光共振器内で何回往復させて出力するかを設定し得る。

【0077】

以上のタイミング制御によれば、クロック信号とモードロックレーザ装置302からの
50

パルスレーザ光とが一定の遅延時間をもって同期し、且つ、AND信号がクロック信号の複数のパルスのうちの一部のパルスに同期し得る。これにより、パルスレーザ光が再生増幅器305の光共振器内の特定の区間を伝搬している間に、高電圧電源343がポッケルセル340に印加する電圧を切り替えることができる。従って、モードロックレーザ装置302から出力されたパルスレーザ光に含まれる所望のパルスのみを所望の強度に増幅し、ターゲットに照射することができる。

【0078】

また、以上のタイミング制御によれば、モードロックレーザ装置302によるパルスの発生間隔に応じた分解能で、再生増幅器305から出力されるパルスの発生タイミングを制御し得る。例えば、ターゲット供給装置26から出力されて30m/s～60m/sの速度でチャンバ2内を移動するターゲットは、モードロックレーザ装置302によるパルスの発生間隔である10nsの時間内に、0.3μm～0.6μm移動し得る。ドロップレット状のターゲットの直径が20μm程度であれば、10nsという分解能は、ターゲットにパルスレーザ光を照射するのに十分であり得る。

【0079】

6. メインパルスレーザ装置

図8は、第1の実施形態におけるメインパルスレーザ装置390の構成例を概略的に示す。メインパルスレーザ装置390は、マスターオシレータMOと、複数の増幅器PA1、PA2及びPA3と、制御部391とを含んでもよい。

【0080】

マスターオシレータMOは、CO₂ガスをレーザ媒質として用いたCO₂レーザ装置であってもよいし、CO₂レーザの波長域で発振する量子カスケードレーザ装置であってもよい。複数の増幅器PA1、PA2及びPA3は、マスターオシレータMOから出力されるパルスレーザ光の光路に直列に配置されてもよい。複数の増幅器PA1、PA2及びPA3は、それぞれ、例えばCO₂ガスをレーザ媒質として収容したレーザチャンバと、レーザチャンバ内に配置された図示しない少なくとも一対の電極と、図示しない少なくとも一対の電極間に電圧を印加する電源とを含んでもよい。なお、以下の説明においてCO₂ガスをレーザ媒質とする場合、CO₂ガスを窒素、ヘリウム、ネオン、キセノンあるいはその他のガスによって希釈して利用してもよい。

【0081】

制御部391は、EUVコントローラ51からの制御信号に基づいて、マスターオシレータMOと、複数の増幅器PA1、PA2及びPA3とを制御してもよい。制御部391は、遅延回路53からのタイミング信号をマスターオシレータMOに出力してもよい。遅延回路53からのタイミング信号は、上述の第2のタイミング信号であってよい。マスターオシレータMOは、タイミング信号の各パルスをトリガとして、パルスレーザ光の各パルスを出力してもよい。これらのパルスレーザ光は、複数の増幅器PA1、PA2及びPA3によって増幅されてもよい。これにより、メインパルスレーザ装置390は、遅延回路53からのタイミング信号と同期して、メインパルスレーザ光を出力してもよい。

【0082】

7. その他

7.1 タイミング信号の変形例

図9は、第2の実施形態におけるEUV光生成システム11の構成例を概略的に示す一部断面図である。第2の実施形態においては、EUV光生成制御装置5aが、クロック生成器54aと、分周器55aとを含んでもよい。

【0083】

クロック生成器54aは、例えば繰り返し周波数を100MHzとするクロック信号を出力してもよい。分周器55aは、クロック生成器54aによるクロック信号に基づいて、当該クロック信号の繰り返し周波数より小さい繰り返し周波数を有する第3のタイミング信号を出力してもよい。分周器55aは、図示しないカウンタ回路を含んでもよく、クロック信号に含まれるパルスを一定数カウントするごとに、上記第3のタイミング信号を

10

20

30

40

50

出力してもよい。

【 0 0 8 4 】

ターゲットコントローラ 5 2 a は、図示しない位相調整部を含んでもよい。この位相調整部は、ターゲットセンサ 4 によるターゲット検出信号と、分周器 5 5 a からの第 3 のタイミング信号との位相差を検出してもよい。そして、位相調整部は、ターゲット検出信号と第 3 のタイミング信号とが所定の位相差で同期するように、ターゲット供給装置 2 6 をフィードバック制御してもよい。

【 0 0 8 5 】

プリパルスレーザ装置 3 0 0 a には、遅延回路 5 3 からではなく、分周器 5 5 a から、上記第 3 のタイミング信号が出力されてもよい。メインパルスレーザ装置 3 9 0 には、第 3 のタイミング信号に一定の遅延時間を与えた第 4 のタイミング信号が、遅延回路 5 3 から出力されてもよい。

10

【 0 0 8 6 】

図 1 0 は、第 2 の実施形態におけるプリパルスレーザ装置 3 0 0 a の構成例を概略的に示す。第 2 の実施形態においては、クロック信号は図 9 の E U V 光生成制御装置 5 a のクロック生成器 5 4 a から供給されるので、プリパルスレーザ装置 3 0 0 a にはクロック生成器が含まれていなくてもよい。また、図 3 の A N D 回路 3 1 2 はなくてもよく、A N D 回路 3 1 2 からの A N D 信号の代わりに、分周器 5 5 a からの第 3 のタイミング信号によって、再生増幅器 3 0 5 内のポッケルスセルが制御されてもよい。再生増幅器 3 0 5 内のポッケルスセルは、第 3 のタイミング信号に対して一定の遅延時間をもって制御されてもよい。その他の点は第 1 の実施形態と同様でもよい。

20

【 0 0 8 7 】

第 2 の実施形態によれば、クロック信号とモードロックレーザ装置 3 0 2 からのパルスレーザ光とが一定の遅延時間をもって同期し得る。また、ターゲット供給装置 2 6 が、第 3 のタイミング信号と同期するように制御され得る。さらに、再生増幅器 3 0 5 内のポッケルスセルが、第 3 のタイミング信号に対して一定の遅延時間をもって制御され得る。この第 3 のタイミング信号は、クロック信号に基づいて分周器 5 5 a から出力されたものであるので、クロック信号の複数のパルスのうちの一部分のパルスに同期し得る。従って、第 1 の実施形態と同様に、モードロックレーザ装置 3 0 2 から出力されたパルスレーザ光に含まれる所望のパルスのみを所望の強度に増幅し、ドロップレット状のターゲットに照射することができる。

30

【 0 0 8 8 】

7 . 2 プリパルスレーザ装置の変形例 (1)

図 1 1 は、第 3 の実施形態におけるプリパルスレーザ装置 3 0 0 b の構成例を概略的に示す。第 3 の実施形態におけるプリパルスレーザ装置 3 0 0 b は、第 1 の実施形態におけるプリパルスレーザ装置の図 5 におけるポッケルスセル 3 4 0 を含む図 3 の再生増幅器 3 0 5 の代わりに、光シャッタ 3 1 3 と、増幅器 3 1 4 とを含んでもよい。その他の点は第 1 の実施形態と同様でもよい。

【 0 0 8 9 】

光シャッタ 3 1 3 は、電圧波形生成回路と、高電圧電源と、ポッケルスセルと、偏光子と (いずれも図示せず) を含んでもよい。電圧波形生成回路は、A N D 回路 3 1 2 からの A N D 信号をトリガとして電圧波形を生成し、この電圧波形を高電圧電源に供給してもよい。高電圧電源は、この電圧波形に従ってパルス状の電圧を生成し、光シャッタ 3 1 3 に含まれるポッケルスセルに印加してもよい。

40

【 0 0 9 0 】

光シャッタ 3 1 3 に含まれるポッケルスセルは、高電圧電源によって電圧が印加されているときと印加されていないときとで、ポッケルスセルを透過するパルスレーザ光の偏光面を変化させてもよい。偏光子は、ポッケルスセルを透過するパルスレーザ光の偏光面の向きに応じて、偏光面が第 1 の向きを有する場合にはパルスレーザ光を透過させ、偏光面が第 2 の向きを有する場合にはパルスレーザ光を反射又は吸収してもよい。

50

【 0 0 9 1 】

増幅器 3 1 4 は、光ファイバを含む光ファイバ増幅器であってもよい。増幅器 3 1 4 は、イッテルビウム (Y b) がドープされた図示しない光ファイバと、レーザダイオード等の図示しない励起光源とを含んでもよい。増幅器 3 1 4 は、光シャッタ 3 1 3 を透過したパルスレーザ光の光路に配置され、光シャッタ 3 1 3 を透過したパルスレーザ光を増幅してもよい。

【 0 0 9 2 】

第 3 の実施形態によっても、モードロックレーザ装置から出力される複数のパルスのうちから所望のパルスを選択して増幅することにより、パルスレーザ光をターゲットに照射し得る。

10

【 0 0 9 3 】

7 . 3 プリパルスレーザ装置の変形例 (2)

図 1 2 は、第 4 の実施形態におけるプリパルスレーザ装置 3 0 0 c の構成例を概略的に示す。第 4 の実施形態におけるプリパルスレーザ装置 3 0 0 c は、モードロックレーザ装置 3 0 2 c と、光シャッタ 3 1 3 と、増幅器 3 1 4 と、第 1 の非線形結晶 3 1 5 と、第 2 の非線形結晶 3 1 6 とを含んでもよい。その他の点は第 3 の実施形態と同様でよく、図 1 1 に示した、クロック生成器 3 0 1 と、光共振器長調整ドライバ 3 0 3 と、パルスレーザ光検出器 3 0 4 と、励起用電源 3 0 6 と、ビームスプリッタ 3 0 7 と、制御部 3 1 0 とを含んでもよい。

【 0 0 9 4 】

モードロックレーザ装置 3 0 2 c は、イッテルビウムがドープされたガラスをレーザ媒質とし、例えば繰り返し周波数を 1 0 0 M H z 程度とするパルスレーザ光を発振させて出力してもよい。モードロックレーザ装置 3 0 2 c は、波長 $\lambda_1 = 1 0 4 0 \text{ nm}$ でパルス幅 1 0 0 p s のパルスレーザ光を出力してもよい。

20

【 0 0 9 5 】

光シャッタ 3 1 3 及び増幅器 3 1 4 は、第 3 の実施形態において説明したものと同様でもよい。光シャッタ 3 1 3 は、モードロックレーザ装置 3 0 2 c から出力されたパルスレーザ光の透過及び遮断を制御してもよい。増幅器 3 1 4 は、光シャッタ 3 1 3 を透過したパルスレーザ光を増幅してもよい。

【 0 0 9 6 】

第 1 の非線形結晶 3 1 5 は、ニオブ酸リチウム (L i N b O ₃) の結晶であってもよい。第 1 の非線形結晶 3 1 5 は、増幅器 3 1 4 によって増幅されたパルスレーザ光の光路に配置されてもよい。第 1 の非線形結晶 3 1 5 は、光パラメトリック発振によって、波長 λ_1 のパルスレーザ光を、波長 $\lambda_2 = 1 6 8 0 \text{ nm}$ のパルスレーザ光と、波長 $\lambda_3 = 2 7 3 0 \text{ nm}$ のパルスレーザ光とに変換し得る。ここで、 $1 / \lambda_1 = 1 / \lambda_2 + 1 / \lambda_3$ の関係となり得る。

30

【 0 0 9 7 】

第 2 の非線形結晶 3 1 6 は、セレン化カドミウム (C d S e) の結晶であってもよい。第 2 の非線形結晶 3 1 6 は、第 1 の非線形結晶 3 1 5 によって変換された波長 λ_2 のパルスレーザ光の光路に配置されてもよい。第 2 の非線形結晶 3 1 6 は、光パラメトリック発振によって、波長 λ_2 のパルスレーザ光を、波長 $\lambda_4 = 1 0 6 0 0 \text{ nm}$ のパルスレーザ光と、波長 $\lambda_5 = 1 9 9 6 . 4 \text{ nm}$ のパルスレーザ光とに変換し得る。ここで、 $1 / \lambda_2 = 1 / \lambda_4 + 1 / \lambda_5$ の関係となり得る。

40

【 0 0 9 8 】

これにより、波長 $\lambda_4 = 1 0 6 0 0 \text{ nm}$ のパルスレーザ光を出力光として取り出すことができる。この波長 λ_4 は、C O ₂ レーザ装置によるパルスレーザ光の波長とほぼ同一であり得る。従って、図 8 におけるメインパルスレーザ装置 3 9 0 として C O ₂ レーザ装置を用いた場合に、メインパルスレーザ光とプリパルスレーザ光とを共通のレンズで集光したとしても、色収差を抑制して集光点の位置をほぼ同じにすることができる。

【 0 0 9 9 】

50

7.4 プリパルスレーザ装置の変形例(3)

図13は、第5の実施形態におけるプリパルスレーザ装置300dの構成例を概略的に示す。第5の実施形態におけるプリパルスレーザ装置300dは、モードロックレーザ装置302dと、再生増幅器305dとを含んでもよい。その他の点は第1の実施形態と同様でよく、図3に示した、クロック生成器301と、光共振器長調整ドライバ303と、パルスレーザ光検出器304と、励起用電源306と、ビームスプリッタ307と、制御部310とを含んでもよい。

【0100】

モードロックレーザ装置302dは、CO₂レーザ発振器であってもよい。モードロックレーザ装置302dは、高反射ミラー361と出力結合ミラー362との間に、レーザチャンバ363と、可飽和吸収セル364とが、この順に高反射ミラー361側から配置された光共振器を含んでもよい。レーザチャンバ363内には、一对の電極365が配置されるとともに、CO₂ガスがレーザ媒質として収容されてもよい。一对の電極365には、図示しない電源により電圧を印加可能であってもよい。

10

【0101】

再生増幅器305dは、一对の高反射ミラー371及び372の間に、レーザチャンバ373と、偏光ビームスプリッタ339と、ポッケルスセル340と、λ/4波長板341とが、この順に高反射ミラー371側から配置された光共振器を含んでもよい。レーザチャンバ373内には、一对の電極375が配置されるとともに、CO₂ガスがレーザ媒質として収容されてもよい。一对の電極375には、図示しない励起用電源により電圧を印加可能であってもよい。また、再生増幅器305dは、偏光ビームスプリッタ330と、ファラデー光アイソレータ331とを含んでもよい。

20

【0102】

レーザチャンバ363内の全ガス圧及びレーザチャンバ373内の全ガス圧は、いずれも、3atm以上、10atm以下の範囲に制御されてもよい。このようなガス圧にすることにより、レーザ媒質としてのCO₂ガスにより増幅可能な波長幅が広がるので、複数の縦モードで光を発振させ、パルス幅が1ps~200ps程度のパルスレーザ光を生成し得る。

【0103】

7.5 プリパルスレーザ光のパルス幅

図14は、EUV光生成システム11におけるプリパルスレーザ光の照射条件とCEとの関係を示すグラフである。図14において、横軸は、プリパルスレーザ光に対するメインパルスレーザ光の遅延時間(μs)を示し、縦軸は、メインパルスレーザ光のエネルギーからEUV光のエネルギーへの変換効率すなわちCE(%)を示す。プリパルスレーザ光の半値全幅で規定されるパルス幅とエネルギー密度の指標としてフルエンスとの組合せを7通り設定し、それぞれの組合せについて、測定を行い、その結果を折れ線で示した。なお、フルエンスとは、パルスレーザ光のエネルギーを、集光スポット径内の面積で除算した値とする。なお、集光スポット径は、集光点の強度分布において、ピーク強度の1/e²以上の強度を有する部分の直径とする。

30

【0104】

測定条件の詳細は次の通りである。ターゲット物質としてスズ(Sn)を用い、これを溶解して直径約21μmのドロップレット状のターゲットとした。

プリパルスレーザ装置としては、パルス幅を10nsとする場合には、Nd:YAGレーザ装置を用い、波長を1.06μmとし、パルスエネルギーを0.5mJ~2.7mJとした。パルス幅を10psとする場合には、マスターオシレータとしてNd:YVO₄の結晶を含むモードロックレーザ装置を用い、再生増幅器としてNd:YAGの結晶を含むレーザ装置を用い、波長を1.06μmとし、パルスエネルギーを0.25mJ~2mJとした。これらのプリパルスレーザ装置によるプリパルスレーザ光の集光スポット径は、70μmとした。

40

メインパルスレーザ装置としては、CO₂レーザ装置を用い、波長を10.6μmとし

50

、パルスエネルギーを $135 \text{ mJ} \sim 170 \text{ mJ}$ とした。このメインパルスレーザー装置によるメインパルスレーザー光のパルス幅は 15 ns とし、集光スポット径を $300 \mu\text{m}$ とした。

【0105】

測定結果は次の通りである。図14に示されるように、プリパルスレーザー光のパルス幅を 10 ns とした場合のCEは、最高でも3.5%に達することはなかった。また、プリパルスレーザー光のパルス幅を 10 ns とした場合のCEは、プリパルスレーザー光に対するメインパルスレーザー光の遅延時間が $3 \mu\text{s}$ 以上の場合に、上記組合せのそれぞれにおける最高値が得られた。

【0106】

一方、プリパルスレーザー光のパルス幅を 10 ps とした場合のCEは、上記組合せのそれぞれにおける最高値が、いずれも3.5%を超えた。これらの最高値は、プリパルスレーザー光に対するメインパルスレーザー光の遅延時間が $3 \mu\text{s}$ 未満の場合に得られた。特に、プリパルスレーザー光のパルス幅を 10 ps とし、フルエンスを 52 J/cm^2 とし、プリパルスレーザー光に対するメインパルスレーザー光の遅延時間を $1.2 \mu\text{s}$ とした場合に、CE 4.7%を実現した。

【0107】

以上の結果から、プリパルスレーザー光のパルス幅は、 10 ns 程度のナノ秒オーダーである場合よりも、 10 ps 程度のピコ秒オーダーである場合の方が、格段にCEを向上し得ることがわかった。また、プリパルスレーザー光のパルス幅が、ナノ秒オーダーである場合よりも、ピコ秒オーダーである場合の方が、最高のCEを得るためのプリパルスレーザー光に対するメインパルスレーザー光の遅延時間が短かった。従って、プリパルスレーザー光のパルス幅が、ナノ秒オーダーである場合よりも、ピコ秒オーダーである場合の方が、高い繰り返し周波数でEUV光を生成するのに有利であることがわかった。

【0108】

また、図14に示された結果から、プリパルスレーザー光のパルス幅をピコ秒オーダーとし、フルエンスを $13 \text{ J/cm}^2 \sim 52 \text{ J/cm}^2$ とする場合には、プリパルスレーザー光に対するメインパルスレーザー光の遅延時間は、以下の範囲とするのが好ましい。

$0.5 \mu\text{s}$ 以上、 $1.8 \mu\text{s}$ 以下、

より好ましくは、 $0.7 \mu\text{s}$ 以上、 $1.6 \mu\text{s}$ 以下、

さらに好ましくは、 $1.0 \mu\text{s}$ 以上、 $1.4 \mu\text{s}$ 以下。

【0109】

図15Aは、EUV光生成システム11におけるプリパルスレーザー光のフルエンスとCEとの関係を示すグラフである。図15Aにおいて、横軸は、プリパルスレーザー光のフルエンス (J/cm^2) を示し、縦軸は、CE (%) を示す。プリパルスレーザー光のパルス幅を 10 ps 、 10 ns 、 15 ns とした場合のそれぞれにおいて、プリパルスレーザー光に対するメインパルスレーザー光の遅延時間を種々設定してCEを測定し、最適な遅延時間におけるCEのみをプロットした。なお、パルス幅を 10 ps 又は 10 ns とする場合の結果の一部については、図14の結果を流用した。また、パルス幅を 15 ns とする場合については、パルス幅を 10 ns とする場合と同様のプリパルスレーザー装置を用いた。

【0110】

その結果、プリパルスレーザー光のパルス幅を 10 ps 、 10 ns 、 15 ns とした場合のいずれにおいても、プリパルスレーザー光のフルエンスの増加に伴いCEは増大するが、それぞれ所定のフルエンスを超えるとCEが飽和する傾向にあることがわかった。また、パルス幅を 10 ns 又は 15 ns とする場合よりも、パルス幅を 10 ps とする場合の方が、CEが高く、低いフルエンスでも比較的CEが高いことがわかった。さらに、パルス幅をピコ秒オーダーとする場合に、フルエンスを 2.6 J/cm^2 から 6.5 J/cm^2 の範囲にすると、CEが急激に上昇し、フルエンスを 6.5 J/cm^2 以上になると、フルエンスの上昇に対するCEの上昇の割合が小さくなることがわかった。

10

20

30

40

50

【 0 1 1 1 】

図 1 5 B は、E U V 光生成システム 1 1 におけるプリパルスレーザー光の光強度と C E との関係を示すグラフである。図 1 5 B において、横軸は、プリパルスレーザー光の光強度 ($W / c m ^ 2$) を示し、縦軸は、C E (%) を示す。光強度は、図 1 5 A の結果から算出した。なお、光強度とは、パルスレーザー光のフルエンスを、半値全幅で規定するパルス幅で除算した値とする。

【 0 1 1 2 】

その結果、プリパルスレーザー光のパルス幅を 1 0 p s、1 0 n s、1 5 n s とした場合のいずれにおいても、プリパルスレーザー光の光強度を高くすると C E は増大する傾向にあることがわかった。また、パルス幅をナノ秒オーダーとする場合よりも、パルス幅をピコ秒オーダーとする場合の方が、C E が高いことがわかった。さらに、パルス幅をピコ秒オーダーとする場合には、光強度を $2 . 6 \times 1 0 ^ { 1 1 } W / c m ^ 2$ から $5 . 6 \times 1 0 ^ { 1 1 } W / c m ^ 2$ の範囲にすると、C E が急激に上昇し、光強度を $5 . 6 \times 1 0 ^ { 1 1 } W / c m ^ 2$ 以上にすると、さらに高い C E が得られることがわかった。

【 0 1 1 3 】

以上の結果によれば、第 1 ~ 第 5 の実施形態におけるプリパルスレーザー装置を用いることにより、パルス幅の短いプリパルスレーザー光をターゲットに照射することができ、C E を向上することが期待される。

【 0 1 1 4 】

図 1 6 A 及び図 1 6 B は、E U V 光生成システム 1 1 においてプリパルスレーザー光がドロップレット状のターゲットに照射された後の拡散ターゲットの写真である。図 1 6 A 及び図 1 6 B は、プリパルスレーザー光に対するメインパルスレーザー光の遅延時間として、最大の C E が得られた遅延時間において撮影したものである。つまり、図 1 6 A は、プリパルスレーザー光の照射後 3 μ s 未満のタイミングで拡散ターゲットを撮影したものであり、図 1 6 B は、プリパルスレーザー光の照射後 3 μ s 以上のタイミングで拡散ターゲットを撮影したものである。なお、ターゲットの拡散状態を観測するために、メインパルスレーザー光は照射していない。図 1 6 A は、プリパルスレーザー光のパルス幅を 1 0 p s とし、フルエンスを 3 通り設定した場合の写真である。図 1 6 B は、プリパルスレーザー光のパルス幅を 1 0 n s とし、フルエンスを 2 通り設定した場合の写真である。図 1 6 A 及び図 1 6 B のいずれにおいても、プリパルスレーザー光の進行方向に対して 6 0 度の方向と 9 0 度の方向とから、拡散ターゲットを撮影した。

【 0 1 1 5 】

拡散ターゲットの直径 D_t は、プリパルスレーザー光のパルス幅が 1 0 p s である場合には 3 6 0 μ m ~ 3 8 4 μ m であり、プリパルスレーザー光のパルス幅が 1 0 n s である場合には 3 2 5 μ m ~ 3 8 0 μ m であった。つまり、拡散ターゲットの直径 D_t は、メインパルスレーザー光の集光スポット径である 3 0 0 μ m に対して多少大きくなった。しかし、メインパルスレーザー光の集光スポット径は $1 / e ^ 2$ 幅の値であるため、メインパルスレーザー光は拡散ターゲットの径が 4 0 0 μ m 程度でも拡散ターゲットの大部分に照射され得る。

【 0 1 1 6 】

図 1 7 は、図 1 6 A 及び図 1 6 B に示す写真を撮影したときの機器の配置を概略的に示す。図 1 7 に示すように、プリパルスレーザー光の進行方向に対して 6 0 度の方向と 9 0 度の方向とにそれぞれカメラ C 1 及び C 2 を配置し、ターゲットを基準としてカメラ C 1 及び C 2 の位置と反対側の位置にそれぞれフラッシュランプ L 1 及び L 2 を配置した。

【 0 1 1 7 】

図 1 8 A 及び図 1 8 B は、それぞれ、図 1 6 A 及び図 1 6 B に示される拡散ターゲットを模式的に示す断面図である。プリパルスレーザー光のパルス幅をピコ秒オーダーとした場合、図 1 6 A 及び図 1 8 A に示されるように、ターゲットは、プリパルスレーザー光の進行方向である Z 方向側には円環状に拡散し、プリパルスレーザー光の進行方向と逆側であるプリパルスレーザー光入射側にはドーム型に拡散した。より詳しくは、拡散ターゲットは、ターゲットが円環状に拡散した第 1 の部分 T 1 と、第 1 の部分 T 1 に隣接しターゲットがド

10

20

30

40

50

ーム型に拡散した第2の部分T2と、第1の部分T1及び第2の部分T2に囲まれた第3の部分T3とを有していた。第1の部分T1は第2の部分T2よりターゲット物質の密度が高く、第2の部分T2は第3の部分T3よりターゲット物質の密度が高かった。

【0118】

一方、プリパルスレーザー光のパルス幅をナノ秒オーダーとした場合、図16B及び図18Bに示されるように、ターゲットは、円盤状又は円環状に拡散した。また、この拡散ターゲットは、プリパルスレーザー光が照射される前のターゲットの位置よりもプリパルスレーザー光の進行方向であるZ方向側に拡散した。

【0119】

プリパルスレーザー光のパルス幅がナノ秒オーダーである場合には、ターゲットへの入熱がナノ秒オーダーの時間にわたって生じ得る。その時間内に、ターゲット内部にも熱が伝達され、ターゲットの一部がアブレーションにより蒸発したり、アブレーションの反作用によりそのターゲットがレーザー光の進行方向に拡散したりするものと考えられる。これに対し、プリパルスレーザー光のパルス幅がピコ秒オーダーである場合には、ターゲット内部に熱が伝達されるよりも前に、瞬間的にドロップレット状のターゲットを破壊できるものと考えられる。このようなターゲットの拡散過程の相違が、パルス幅をナノ秒オーダーとする場合よりもピコ秒オーダーとする場合の方が高いCEが得られる原因の一つであると推定される。

【0120】

7.6 メインパルスレーザー装置の変形例(1)

図19Aは、第6の実施形態におけるメインパルスレーザー装置390aの構成例を概略的に示す。第6の実施形態におけるメインパルスレーザー装置390aは、マスターオシレータMOと増幅器PA1との間に、波形調節器392を含んでもよい。また、メインパルスレーザー装置390aは、増幅器PA3から出力されたメインパルスレーザー光の光路に配置されたビームスプリッタ394を含んでもよい。さらに、メインパルスレーザー装置390aは、ビームスプリッタ394によって分岐された2つの光路のうちの、一方の光路に配置されたパルス波形検出器393を含んでもよい。

【0121】

図19Bは、マスターオシレータMOから出力され図19Aに破線XIXBで示されたパルスレーザー光のパルス波形のグラフである。図19Cは、波形調節器392から出力され図19Aに破線XIXCで示されたパルスレーザー光のパルス波形のグラフである。図19Dは、増幅器PA3から出力され図19Aに破線XIXDで示されたパルスレーザー光のパルス波形のグラフである。なお、以下の実施形態の説明では、パルスレーザー光のパルス波形のグラフの縦軸は相対強度であり、パルス波形の代表的なピーク値によって規格化されている。

【0122】

波形調節器392は、マスターオシレータMOから出力されたパルスレーザー光の波形を調節してもよい。例えば、波形調節器392は、図19Bに示すパルス波形のパルスレーザー光を入力して、図19Cに示す波形のように調節されたパルス波形のパルスレーザー光を出力してもよい。図19Cに示すパルス波形のパルスレーザー光は複数の増幅器によって増幅され、例えば増幅器PA3から図19Dに示すパルス波形のパルスレーザー光として出力されてもよい。図19Cに示すように、波形調節器392から出力されるメインパルスレーザー光のパルス波形は、光強度が低い第1段階と、第1段階から急峻に光強度が増大してピーク値に達する第2段階と、第2段階の終わりから光強度が減少する第3段階とを含んでもよい。ターゲットにプリパルスレーザー光を照射して拡散ターゲットとした後、上記のようなパルス波形のメインパルスレーザー光を拡散ターゲットに照射することにより、CEが向上し得る。上記第1段階における光強度の積分値をEpdとし、第1段階から第3段階までを含むパルス波形全体の光強度の積分値をEtotとしたときに、そのエネルギー比をRとすると、 $R = E_{pd} / E_{tot}$ と表せる。その場合、CEをより向上するため、Rは好ましくは1% $R > 7.5\%$ 、さらに、好ましくは2% $R > 5\%$ の範囲であつてもよ

10

20

30

40

50

い。CEが最大となるRは3.5%とすることが望ましい。制御部391は、パルス波形検出器393によって検出されたメインパルスレーザ光のパルス波形に基づいて、波形調節器392を制御してもよい。その他の点は図8を用いて説明した第1の実施形態と同様でもよい。

【0123】

図20Aは、図19Aに示す波形調節器392の構成例を概略的に示す。波形調節器392は、遅延回路381と、電圧波形生成回路382と、高電圧電源383と、ポッケルスセル384と、偏光子386とを含んでもよい。

【0124】

ポッケルスセル384は、電気光学結晶を挟んで対向する位置に設けられた一对の電極385を含んでもよい。マスターオシレータMOから出力されたパルスレーザ光は、一对の電極385の間を透過してもよい。ポッケルスセル384は、一对の電極385間に電圧が印加されたときに、パルスレーザ光の偏光面を90度回転させて透過させてもよい。ポッケルスセル384は、一对の電極385間に電圧が印加されていないときに、パルスレーザ光の偏光面を回転させずに透過させてもよい。

【0125】

偏光子386は、紙面に平行な方向に直線偏光したパルスレーザ光を、増幅器PA1に向けて高い透過率で透過させてもよい。偏光子386は、紙面に垂直な方向に直線偏光したパルスレーザ光を高い反射率で反射してもよい。

【0126】

遅延回路381は、図19Aにおける遅延回路53からマスターオシレータMOに出力されるタイミング信号に対して所定の遅延時間を与えた信号を、電圧波形生成回路382に出力してもよい。電圧波形生成回路382は、遅延回路381からの信号をトリガとして電圧波形を生成し、この電圧波形を高電圧電源383に供給してもよい。高電圧電源383は、この電圧波形に基づいたパルス状の電圧を生成し、この電圧をポッケルスセル384の一对の電極385間に印加してもよい。

【0127】

図20Bは、図20Aに破線XXBで示され波形調節器392に入力されるパルスレーザ光のパルス波形のグラフである。マスターオシレータMOから出力されて波形調節器392に入力されるパルスレーザ光は、紙面に対して垂直な方向に直線偏光していてもよく、各パルスレーザ光のパルス幅は、20nsであってもよい。各パルスレーザ光のパルス波形は、光強度が増大する第1段階と、光強度がピーク値に達する第2段階と、第2段階の終わりから光強度が減少する第3段階とを含んでもよい。

【0128】

図20Cは、高電圧電源383から出力され図20Aに破線XXCで示される配線を伝搬するパルス状の電圧の波形を示すグラフである。高電圧電源383から出力されるパルス状の電圧の波形は、その前半部において比較的低い電圧値Pを有し、後半部において比較的高い電圧値Phを有する波形であってもよい。電圧の波形の前半部から後半部に移行するタイミングは、図20Bに示すパルスレーザ光のパルス波形におけるピークのタイミングに合わせられてもよい。電圧の波形の前半部はおよそ20nsの時間を有し、後半部もおよそ20nsの時間を有していてもよい。

【0129】

図20Dは、波形調節器392から出力され図20Aに破線XXDで示されるパルスレーザ光のパルス波形を示すグラフである。図20Cに示す電圧がポッケルスセル384に印加されると、パルスレーザ光のパルス波形の前半部においては、紙面に平行な偏光成分の少ないパルスレーザ光が、後半部においては、紙面に平行な偏光成分の多いパルスレーザ光が、それぞれポッケルスセル384を透過し得る。従って、パルスレーザ光のパルス波形の前半部においては、マスターオシレータMOから出力されたパルスレーザ光のごく一部が偏光子386を透過し、後半部においては、マスターオシレータMOから出力されたパルスレーザ光の大部分が偏光子386を透過し得る。これにより、波形調節器392

10

20

30

40

50

から出力されるパルスレーザー光は、光強度が低い第1段階と、第1段階から急峻に光強度が増大してピーク値に達する第2段階と、第2段階の終わりから光強度が減少する第3段階とを含み得る。第1段階における光強度の積分値 E_{pd} と、第1段階から第3段階を含むパルス波形全体の光強度の積分値 E_{to} との比率 R は、高電圧電源 383 が生成する図 20C に示すような電圧波形によって調整し得る。高電圧電源 383 が生成する電圧波形は、遅延回路 381 によって設定される遅延時間と、電圧波形生成回路 382 が出力する電圧値とによって制御するようにしてもよい。

【0130】

7.7 メインパルスレーザー装置の変形例(2)

図 21 は、第7の実施形態におけるメインパルスレーザー装置 390b の構成例を概略的に示す。第7の実施形態におけるメインパルスレーザー装置 390b は、マスターオシレータ MO と増幅器 PA1 との間に、高反射ミラー 467 と、可飽和吸収体セル 397 とを含んでもよい。また、メインパルスレーザー装置 390b は、電圧波形生成回路 395 と、高電圧電源 396 とを含んでもよい。

10

【0131】

メインパルスレーザー装置 390b に含まれるマスターオシレータ MO は、高反射ミラー 461 及び 462 の間に、レーザーチャンバ 463 と、偏光子 466 と、ポッケルスセル 464 とが、この順に高反射ミラー 461 側から配置された光共振器を含んでもよい。レーザーチャンバ 463 内には、一对の電極 465 が配置されるとともに、 CO_2 ガスがレーザー媒質として収容されてもよい。

20

【0132】

マスターオシレータ MO は、一对の電極 465 間に発生させる放電によってレーザーチャンバ 463 内のレーザー媒質を励起し、高反射ミラー 461 及び 462 の間でレーザー光を往復させることによって増幅してもよい。高反射ミラー 461 及び 462 の間で往復するレーザー光は、紙面に平行な方向に直線偏光していてもよい。偏光子 466 は、紙面に平行な方向に直線偏光したレーザー光を高い透過率で透過させてもよい。

【0133】

ポッケルスセル 464 には、電圧波形生成回路 395 によって生成された電圧波形に基づいて高電圧電源 396 が出力する、パルス状の電圧が印加されてもよい。ポッケルスセル 464 は、電圧が印加されると、入射したレーザー光を、第1の偏光成分の位相に対して第2の偏光成分の位相を $1/4$ 波長分ずらして透過させてもよい。ポッケルスセル 464 を図中左側から右側に透過し、高反射ミラー 462 によって反射されて、ポッケルスセル 464 を図中右側から左側に透過したレーザー光は、第1の偏光成分の位相に対して第2の偏光成分の位相が合計で $1/2$ 波長分ずらされてもよい。そして、このレーザー光は、紙面に垂直な方向に直線偏光したレーザー光として偏光子 466 に入射してもよい。偏光子 466 は、紙面に垂直な方向に直線偏光したレーザー光を反射し、マスターオシレータ MO から出力してもよい。

30

【0134】

ここで、高電圧電源 396 によってポッケルスセル 464 に印加されるパルス状の電圧の波形は、図 20C に示したパルス状の電圧の波形と同様に、その前半部において比較的低い電圧値を有し、後半部において比較的高い電圧値を有してもよい。これにより、波形の前半部においては、紙面に垂直な偏光成分の少ないレーザー光が、後半部においては、紙面に垂直な偏光成分の多いレーザー光が、それぞれポッケルスセル 464 を透過し得る。これにより、偏光子 466 によって反射されるパルスレーザー光のパルス波形は、光強度が低い第1段階と、第1段階から急峻に光強度が増大してピーク値に達する第2段階と、第2段階の終わりから光強度が減少する第3段階とを含み得る。第1段階における光強度の積分値 E_{pd} と、第1段階から第3段階を含むパルス波形全体の光強度の積分値 E_{to} との比率 R は、図 20C に示す電圧波形によって調整し得る。

40

【0135】

高反射ミラー 467 は、偏光子 466 によって反射されたパルスレーザー光の光路に配置

50

され、パルスレーザー光を可飽和吸収体セル 397 に向けて高い反射率で反射してもよい。可飽和吸収体セル 397 は、例えばガス状の可飽和吸収体を内部に收容していてもよく、入射光が弱い間は可飽和吸収体が入射光を吸収し、入射光が強くなると、可飽和吸収体が入射光を透過させてもよい。高反射ミラー 467 によって反射されたパルスレーザー光は、可飽和吸収体セル 397 を透過することにより、パルスレーザー光の波形における上述の比率 R が小さくなり得る。可飽和吸収体セル 397 の内部の可飽和吸収体ガスの濃度あるいは圧力を高くしたり、可飽和吸収体セル 397 の光路長を長くしたりすれば、上述の比率 R を一層小さくし得る。

その他の点は図 19A を用いて説明した第 6 の実施形態と同様でもよい。

【0136】

7.8 メインパルスレーザー装置の変形例(3)

図 22A は、第 8 の実施形態におけるメインパルスレーザー装置 390c の構成例を概略的に示す。第 8 の実施形態におけるメインパルスレーザー装置 390c は、第 1 及び第 2 のマスターオシレータ MO1 及び MO2 を含んでもよい。メインパルスレーザー装置 390c は、さらに、遅延回路 398 と光路調節器 399 とを含んでもよい。その他の点は図 19A を用いて説明した第 6 の実施形態と同様でもよい。

【0137】

第 1 のマスターオシレータ MO1 は、遅延回路 53 からのタイミング信号と同期して、第 1 のパルスレーザー光を出力してもよい。遅延回路 398 は、遅延回路 53 からのタイミング信号に一定の遅延時間を与えた信号を出力してもよい。第 2 のマスターオシレータ MO2 は、遅延回路 398 から出力された信号に同期して、第 2 のパルスレーザー光を出力してもよい。光路調節器 399 は、第 1 及び第 2 のマスターオシレータ MO1 及び MO2 からそれぞれ出力されたパルスレーザー光の光路を合わせて、増幅器 PA1 に向けて出力してもよい。光路調節器 399 は、ハーフミラーやグレーティングによって構成されてもよい。

【0138】

図 22B は、第 2 のマスターオシレータ MO2 から出力され図 22A に破線 XXII B で示されたパルスレーザー光のパルス波形を示すグラフである。図 22C は、第 1 のマスターオシレータ MO1 から出力され図 22A に破線 XXII C で示されたパルスレーザー光のパルス波形を示すグラフである。説明のため、図 22C のグラフにおける縦軸は、図 22B に示すパルスレーザー光のピーク値で規格化してある。第 1 のマスターオシレータ MO1 から出力されるパルスレーザー光は、第 2 のマスターオシレータ MO2 から出力されるパルスレーザー光よりも小さいピーク強度を有していてもよい。第 2 のマスターオシレータ MO2 から出力されるパルスレーザー光は、第 1 のマスターオシレータ MO1 から出力されるパルスレーザー光に対して一定の遅延時間を有していてもよい。

【0139】

図 22D は、光路調節器 399 から出力され図 22A に破線 XXII D で示されたパルスレーザー光のパルス波形を示すグラフである。図 22E は、メインパルスレーザー装置 390c から出力され図 22A に破線 XXII E で示されたパルスレーザー光のパルス波形を示すグラフである。第 1 及び第 2 のマスターオシレータ MO1 及び MO2 からそれぞれ出力されたパルスレーザー光の光路を合わせることに、これらの図に示すようなパルス波形を有するパルスレーザー光が出力され得る。これらのパルス波形は、光強度が低い第 1 段階と、第 1 段階から急峻に光強度が増大してピーク値に達する第 2 段階と、第 2 段階の終わりから光強度が減少する第 3 段階とを含み得る。第 1 段階における光強度の積分値 E_{pd} と、第 1 段階から第 3 段階を含むパルス波形全体の光強度の積分値 E_{to} との比率 R は、第 1 及び第 2 のマスターオシレータ MO1 及び MO2 からそれぞれ出力されたパルスレーザー光の強度によって調整し得る。

【0140】

7.9 メインパルスレーザー装置の変形例(4)

図 23A は、第 9 の実施形態におけるメインパルスレーザー装置 390d の構成例を概略

10

20

30

40

50

的に示す。図 2 3 B は、第 2 のマスターオシレータ M O 2 から出力され図 2 3 A に破線 X X I I I B で示されたパルスレーザ光のパルス波形を示すグラフである。図 2 3 C は、第 1 のマスターオシレータ M O 1 から出力され図 2 3 A に破線 X X I I I C で示されたパルスレーザ光のパルス波形を示すグラフである。図 2 3 D は、光路調節器 3 9 9 a から出力され図 2 3 A に破線 X X I I I D で示されたパルスレーザ光のパルス波形を示すグラフである。図 2 3 E は、メインパルスレーザ装置 3 9 0 d から出力され図 2 3 A に破線 X X I I I E で示されたパルスレーザ光のパルス波形を示すグラフである。また、図 2 3 C のグラフにおける縦軸は、図 2 3 B に示すパルスレーザ光のピーク値で規格化してある。第 9 の実施形態におけるメインパルスレーザ装置 3 9 0 d は、光路調節器 3 9 9 a の配置が、図 2 2 A を用いて説明した第 8 の実施形態における光路調節器 3 9 9 の配置と異なってもよい。その他の点は第 8 の実施形態と同様でもよい。

10

【 0 1 4 1 】

第 2 のマスターオシレータ M O 2 から出力されたパルスレーザ光は、光路調節器を経ずに、増幅器 P A 1 に直接導かれてもよい。光路調節器 3 9 9 a は、複数の増幅器の間の光路に配置されてもよく、例えば増幅器 P A 2 と増幅器 P A 3 との間の光路に配置されてもよい。光路調節器 3 9 9 a は、増幅器 P A 1 及び P A 2 によって増幅されたパルスレーザ光を増幅器 P A 3 に向けて透過させてもよい。また、光路調節器 3 9 9 a は、第 1 のマスターオシレータ M O 1 から出力されたパルスレーザ光を、増幅器 P A 3 に向けて反射してもよい。これにより、第 2 のマスターオシレータ M O 2 から出力されたパルスレーザ光と、第 1 のマスターオシレータ M O 1 から出力されたパルスレーザ光との光路が合わせられてもよい。例えば、M O 1 と M O 2 から出力されるパルスレーザ光の波長はそれぞれ 9 . 3 μ m と 1 0 . 6 μ m であってもよい。この場合の、光路調節器 3 9 9 a は波長 9 . 3 μ m の光を高反射し、波長 1 0 . 6 μ m の光を高透過するダイクロイックミラーであってもよい。図 2 3 E に示すように、第 9 の実施形態も第 8 の実施形態と同様のパルス波形を備えたパルスレーザ光を出力し得る。また、第 9 の実施形態も第 1 及び第 2 のマスターオシレータ M O 1 及び M O 2 からそれぞれ出力されたパルスレーザ光の強度によって比率 R を調整し得る。

20

【 0 1 4 2 】

7 . 1 0 メインパルスレーザ光の光強度分布

図 2 4 は、第 1 0 の実施形態に係る E U V 光生成システム 1 1 の構成例を概略的に示す一部断面図である。第 1 0 の実施形態においては、メインパルスレーザ装置 3 9 0 によって出力されるメインパルスレーザ光の光路に、メインパルスレーザ光の集光点における光強度分布を整形するビーム整形光学系 4 0 0 が配置されてもよい。その他の点は図 2 を用いて説明した第 1 の実施形態と同様でもよい。

30

【 0 1 4 3 】

ビーム整形光学系 4 0 0 は、プラズマ生成領域 2 5 におけるメインパルスレーザ光のビーム断面が所望の光強度分布となるように設計された光学系であってもよい。プラズマ生成領域 2 5 は、所望のタイミングにおける拡散ターゲットの位置と一致してよい。ビーム整形光学系 4 0 0 の具体的な構成について、図 2 5 ~ 図 2 7 を参照しながら説明する。

【 0 1 4 4 】

図 2 5 は、図 2 4 に示すビーム整形光学系 4 0 0 の構成例を概略的に示す。ビーム整形光学系 4 0 0 は、回折光学素子 4 0 0 a を含んでもよい。回折光学素子 4 0 0 a は、例えば、表面に入射光を回折させるための微小な凹凸が形成され、メインパルスレーザ光の波長に対して透過性のある材料によって形成された板材によって構成されてもよい。回折光学素子 4 0 0 a の凹凸パターンは、回折光を集光光学系によって集光した場合に集光点において光強度分布を均一化させるように設計されてもよい。回折光学素子 4 0 0 a から出力された回折光は、レーザ光集光光学系 2 2 a を用いて集光されてもよい。これにより、トップハット型の光強度分布を有するメインパルスレーザ光が、拡散ターゲットに照射され得る。

40

【 0 1 4 5 】

50

図26は、図24に示すビーム整形光学系400の別の構成例を概略的に示す。ビーム整形光学系400は、位相シフト光学系400bを含んでもよい。位相シフト光学系400bは、例えば、中央部を周辺部より肉厚とし、メインパルスレーザー光の波長に対して透過性のある材料によって形成された板材によって構成されてもよい。位相シフト光学系400bは、その中央部を透過する光と周辺部を透過する光との間に位相差を与えてもよい。これにより、光強度分布がガウス分布である入射光が、エアリー関数に近似した電界強度分布を有する光に変換されて、位相シフト光学系400bから出力され得る。

【0146】

そして、例えば、レーザー光集光光学系22aの後焦点の位置が拡散ターゲットの位置と一致するようにレーザー光集光光学系22aを配置し、当該レーザー光集光光学系22aの前焦点の位置に位相シフト光学系400bを配置してもよい。これにより、エアリー関数をフーリエ変換したトップハット型の光強度分布を有するメインパルスレーザー光が、拡散ターゲットに照射され得る。発明者らは、ピコ秒オーダーのパルス幅を有するパルスレーザー光によって生成された拡散ターゲットは、図18Aに示したようにT1の領域のターゲット密度が高い形状をしているという知見を得ている。そのため、メインパルスレーザー光の集光形状をトップハットの形状とし、集光スポット径と拡散ターゲットの径を略一致させることで、CEが向上し得る。

【0147】

図27は、図24に示すビーム整形光学系400のさらに別の構成例を概略的に示す。ビーム整形光学系400は、アキシコンレンズ400cを含んでもよい。アキシコンレンズ400cは、円錐形のレンズであってもよく、その回転対称軸がメインパルスレーザー光の進行方向と実質的に一致するように配置されてもよい。アキシコンレンズ400cに入射したレーザービームは、アキシコンレンズ400cの回転対称軸に対して軸対称に、かつ回転対称軸からの距離に関わらず一定の角度で屈折して、アキシコンレンズ400cから出射し得る。

【0148】

アキシコンレンズ400cから出射したメインパルスレーザー光は、レーザー光集光光学系22aによって、レーザー光集光光学系22aの主面から焦点距離fの位置において集光し得る。この集光位置における光強度分布は、中央部に低強度領域を有する円環状の分布となり得る。この集光位置においてメインパルスレーザー光が拡散ターゲットに照射され得る。発明者らは、ピコ秒オーダーのパルス幅を有するパルスレーザー光によって生成された拡散ターゲットは、図18Aに示したようにT1の領域のターゲット密度が高い形状をしているという知見を得ている。そのため、メインパルスレーザー光の集光形状を円環状の形状とし、円環状の形状の外側の径と拡散ターゲットの径を略一致させることで、CEが向上し得る。

【0149】

上記の説明は、制限ではなく単なる例示を意図したものである。従って、添付の特許請求の範囲を逸脱することなく本開示の実施形態に変更を加えることができることは、当業者には明らかであろう。

【0150】

本明細書及び添付の特許請求の範囲全体で使用される用語は、「限定的でない」用語と解釈されるべきである。例えば、「含む」又は「含まれる」という用語は、「含まれるものとして記載されたものに限定されない」と解釈されるべきである。「有する」という用語は、「有するものとして記載されたものに限定されない」と解釈されるべきである。また、本明細書及び添付の特許請求の範囲に記載される修飾句「1つの」は、「少なくとも1つ」又は「1又はそれ以上」を意味すると解釈されるべきである。

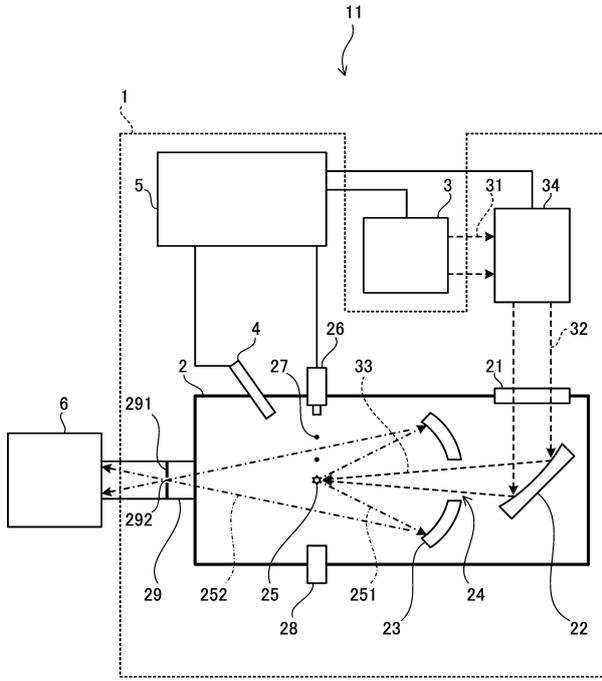
10

20

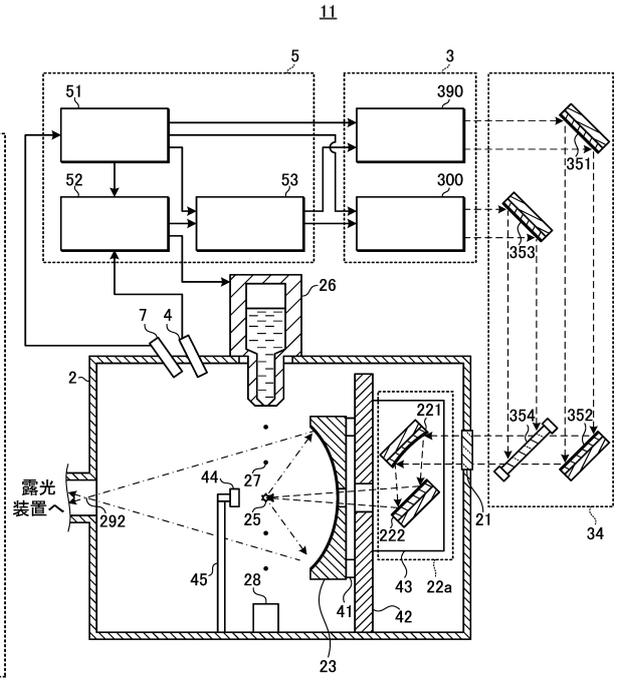
30

40

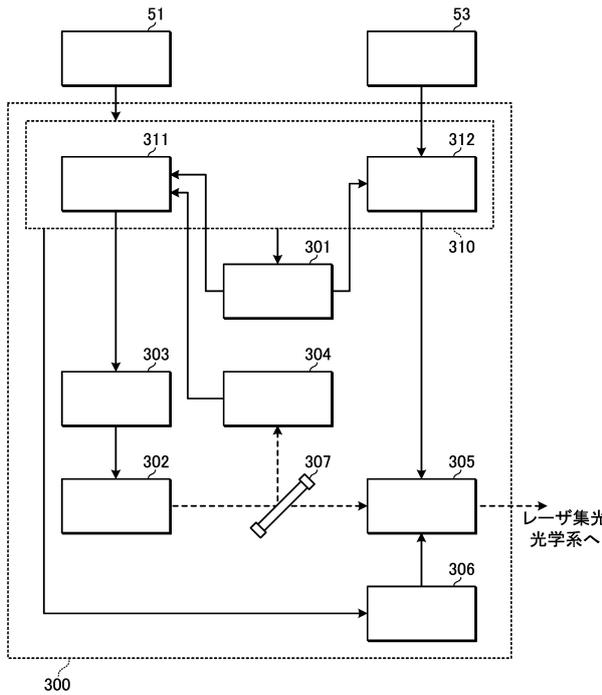
【図1】



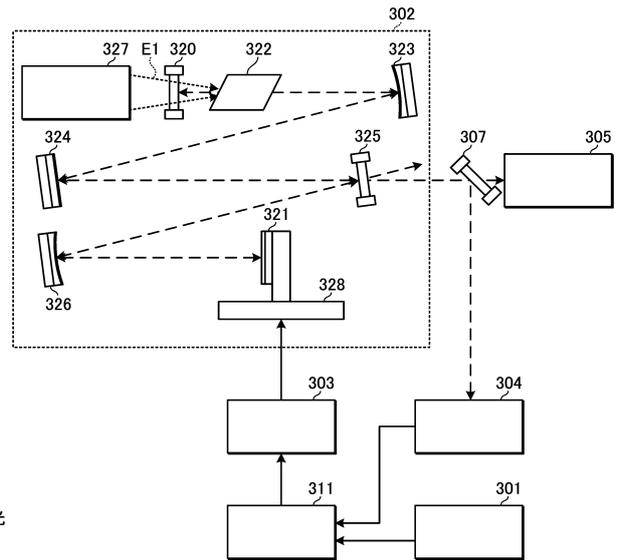
【図2】



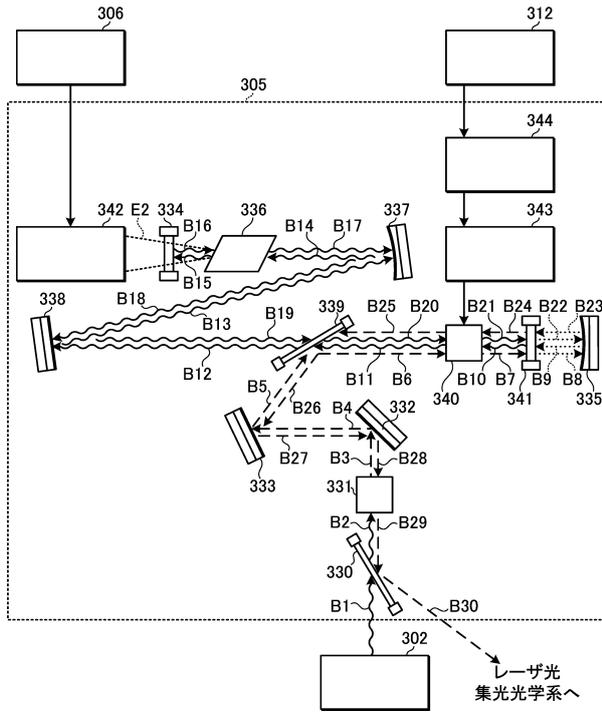
【図3】



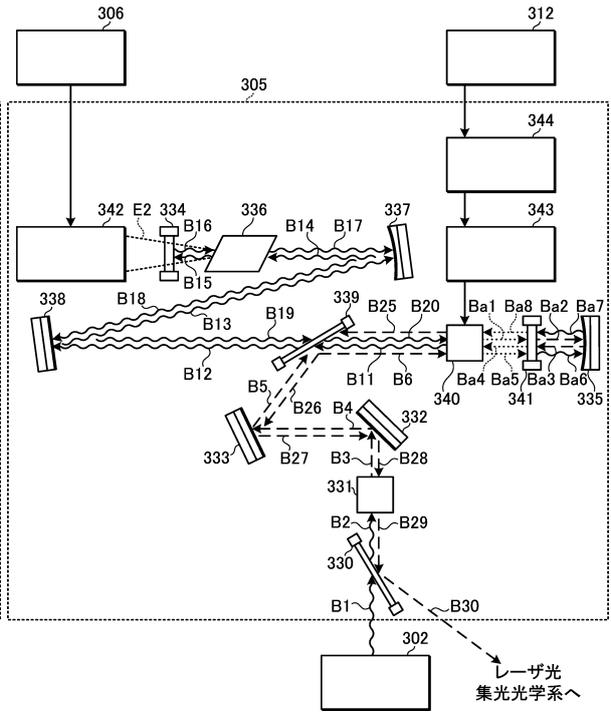
【図4】



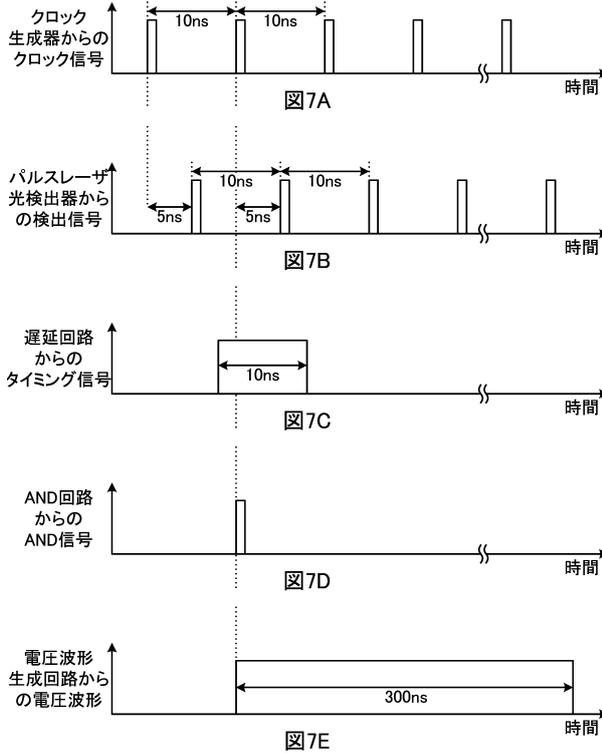
【図5】



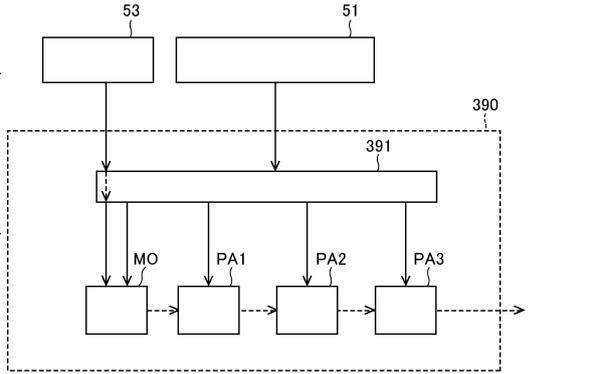
【図6】



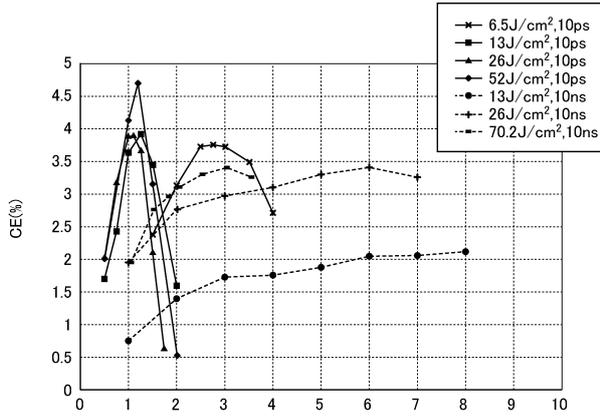
【図7】



【図8】



【 図 1 4 】



プリパルスレーザー光に対するメインパルスレーザー光の遅延時間(μs)

【 図 1 5 】

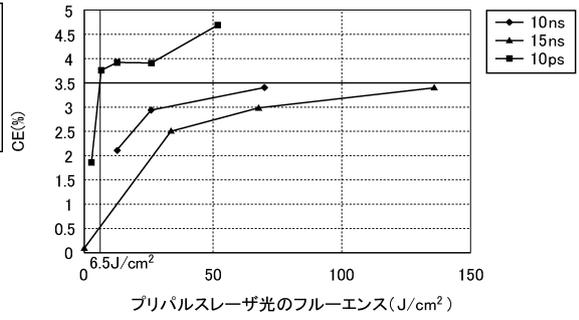


図 15A

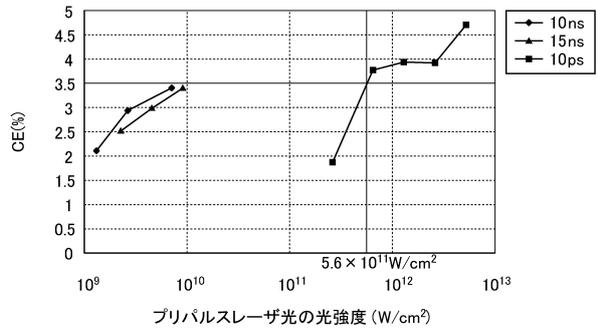


図 15B

【 図 1 6 】

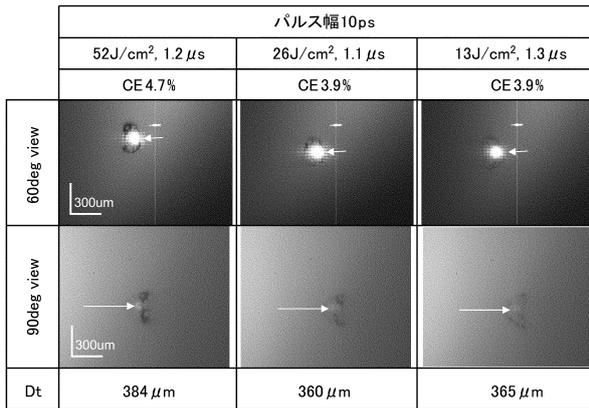


図 16A

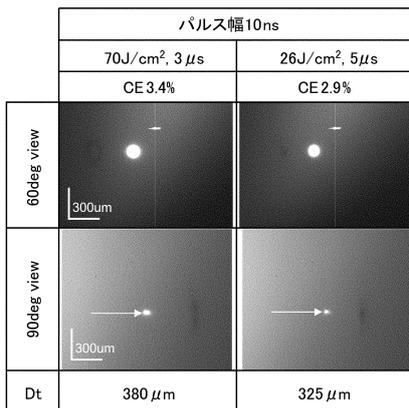
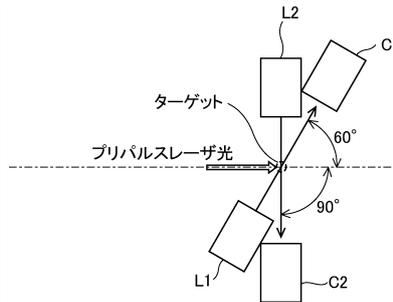


図 16B

【 図 1 7 】



【 図 1 8 】

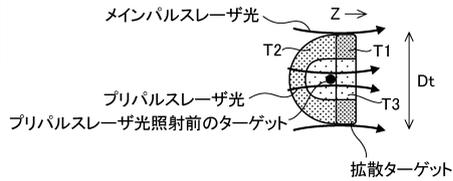


図 18A

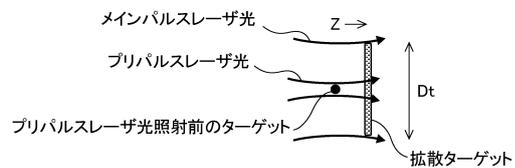


図 18B

【図19】

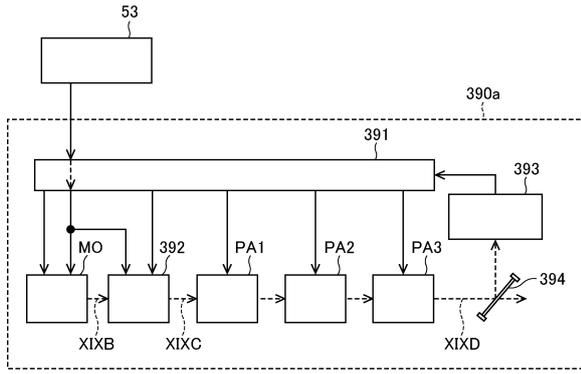


図 19A

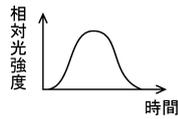


図 19B

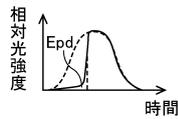


図 19C

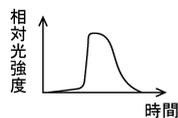


図 19D

【図21】

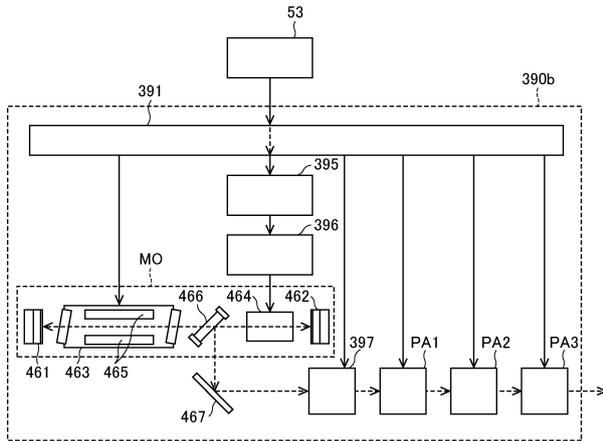


図 21A

【図20】

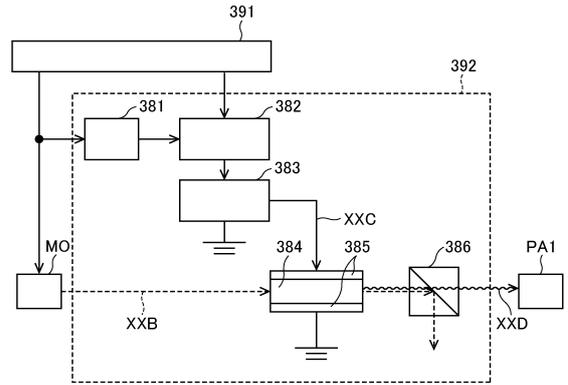


図 20A

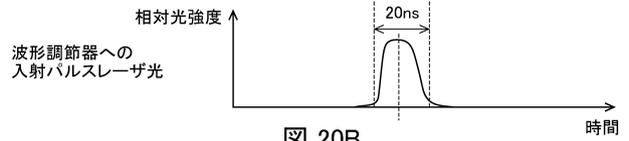


図 20B

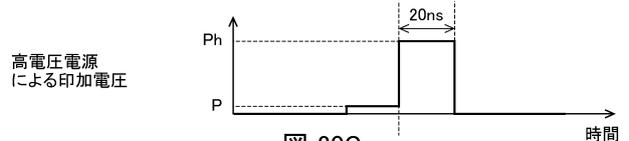


図 20C

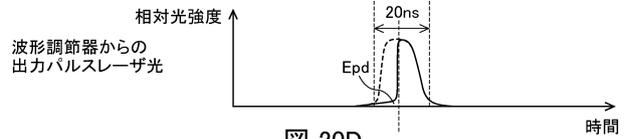


図 20D

【図22】

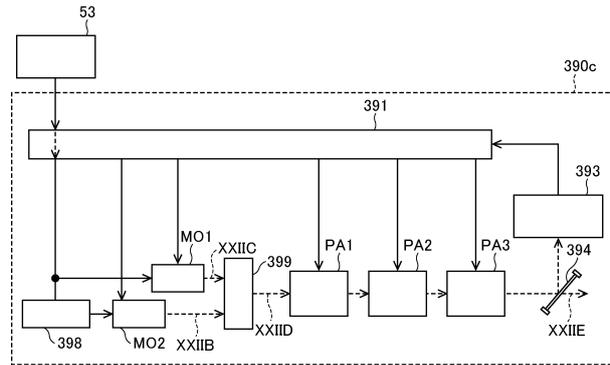


図 22A

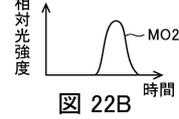


図 22B

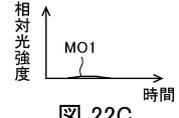


図 22C

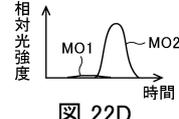


図 22D

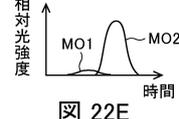


図 22E

【図23】

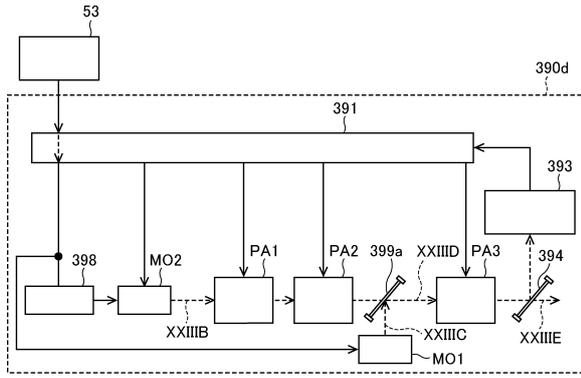


図23A

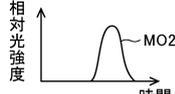


図23B

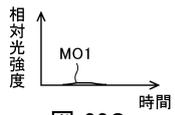


図23C

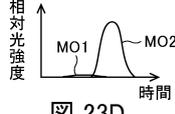


図23D

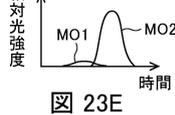
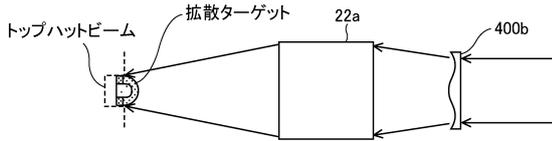
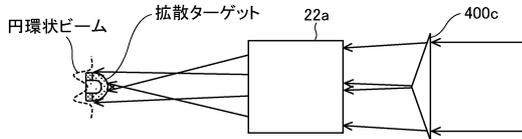


図23E

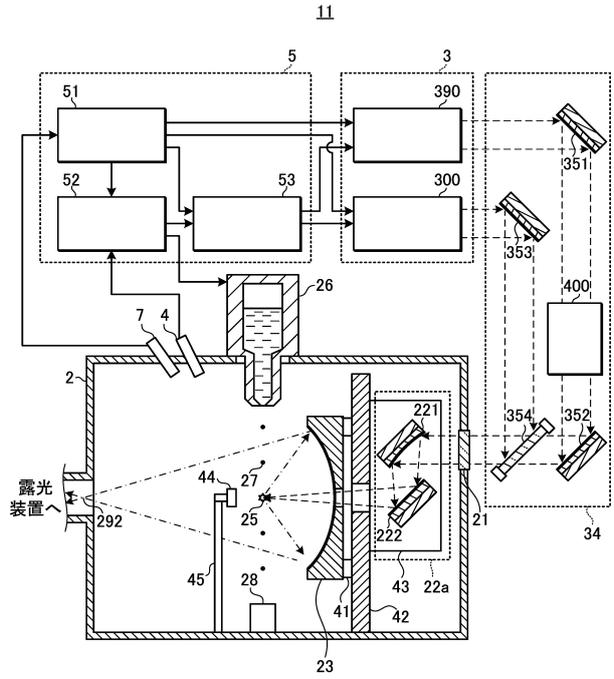
【図26】



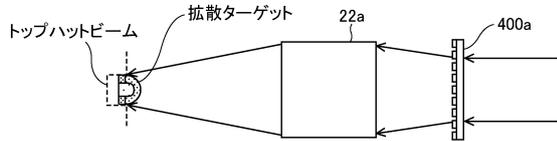
【図27】



【図24】



【図25】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開2006-128157(JP,A)
特開2008-270549(JP,A)
特開2003-255282(JP,A)
特開昭62-011285(JP,A)
特開2010-226096(JP,A)
特開2009-105006(JP,A)
特開2011-181691(JP,A)
特開2007-305777(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01S 3/00-3/30
H01L 21/027