

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2013 年 12 月 27 日(27.12.2013)



(10) 国際公開番号
WO 2013/190944 A1

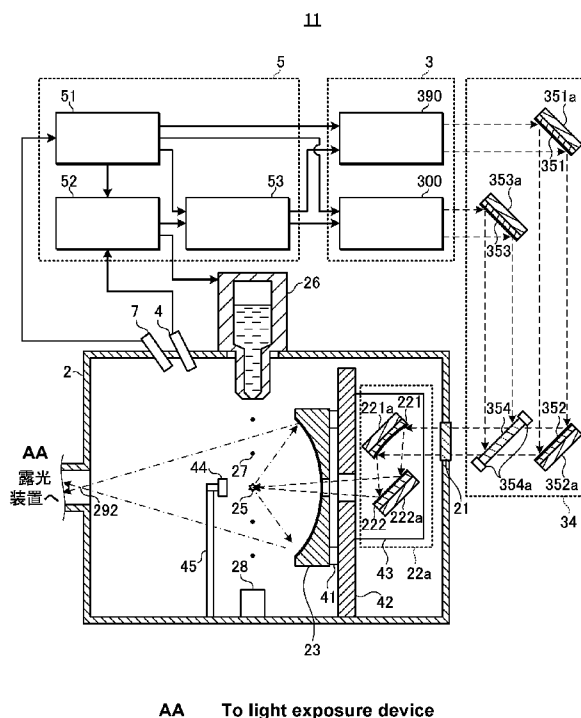
- (51) 国際特許分類:
H05G 2/00 (2006.01) *H01L 21/027* (2006.01)
G03F 7/20 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2013/064249
- (22) 国際出願日: 2013 年 5 月 22 日(22.05.2013)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2012-141079 2012 年 6 月 22 日(22.06.2012) JP
- (71) 出願人: ギガフォトン株式会社(GIGAPHOTON INC.) [JP/JP]; 〒3238558 栃木県小山市横倉新田 4 0 0 Tochigi (JP).
- (72) 発明者: 柳田 達哉(YANAGIDA Tatsuya); 〒3238558 栃木県小山市横倉新田 4 0 0 ギガフォトン株式会社内 Tochigi (JP). 溝口 計(MIZOGUCHI Hakaru); 〒3238558 栃木県小山市横倉新田 4 0 0 ギガフォトン株式会社内 Tochigi (JP). 若林 理(WAKABAYASHI Osamu); 〒3238558 栃木県小山市横倉新田 4 0 0 ギガフォトン株式会社内 Tochigi (JP).

- (74) 代理人: 宇都宮 正明, 外(UTSUNOMIYA Mas-aaki et al.); 〒1690075 東京都新宿区高田馬場 1 丁目 3 2 番 1 4 号 U Kビル 8 階 進歩国際特許事務所 Tokyo (JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーロパ (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

[続葉有]

(54) Title: EXTREME ULTRAVIOLET LIGHT GENERATION SYSTEM

(54) 発明の名称: 極端紫外光生成システム



(57) Abstract: An extreme ultraviolet light generation system configured so as to generate extreme ultraviolet light by irradiating a target with first pulse laser light and second pulse laser light to convert the target into plasma. The extreme ultraviolet light generation system may comprise: a chamber provided with at least one inlet for letting in the first pulse laser light and the second pulse laser light; a target supply device configured so as to supply a target to a predetermined area inside the chamber; a first laser device configured so as to output the first pulse laser light radiated onto the target inside the chamber, the first pulse laser light having a pulse width less than 1 ns; and a second laser device configured so as to output the second pulse laser light radiated onto the target irradiated by the first pulse laser light.

(57) 要約: 極端紫外光生成システムは、ターゲットに第1のパルスレーザー光及び第2のパルスレーザー光を照射してターゲットをプラズマ化することにより極端紫外光を生成するように構成された極端紫外光生成システムであって、第1のパルスレーザー光及び第2のパルスレーザー光を導入するための少なくとも1つの導入口が設けられたチャンバと、チャンバ内の所定の領域にターゲットを供給するように構成されたターゲット供給装置と、チャンバ内のターゲットに照射される第1のパルスレーザー光であって、1 ns未満のパルス幅を有する第1のパルスレーザー光を出力するように構成された第1のレーザー装置と、第1のパルスレーザー光を照射された

ターゲットに照射される第2のパルスレーザー光を出力するように構成された第2のレーザー装置と、を備えてもよい。



添付公開書類:

— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

明 細 書

発明の名称： 極端紫外光生成システム

技術分野

[0001] 本開示は、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つの観点に係る極端紫外光生成システムは、ターゲットに第1のパルスレーザ光及び第2のパルスレーザ光を照射してターゲットをプラズマ化することにより極端紫外光を生成するように構成された極端紫外光生成システムであって、第1のパルスレーザ光及び第2のパルスレーザ光を導入するための少なくとも1つの導入口が設けられたチャンバと、チャンバ内の所定の領域にターゲットを供給するように構成されたターゲット供給装置と、チャンバ内のターゲットに照射される第1のパルスレーザ光であって、1 ns未満のパルス幅を有する第1のパルスレーザ光を出力するように構成された第1のレーザ装置と、第1のパルスレーザ光を照射されたターゲットに

照射される第2のパルスレーザ光を出力するように構成された第2のレーザ装置と、を備えてもよい。

図面の簡単な説明

[0005] 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、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4]図4A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エンスとCEとの関係を示すグラフであり、図4Bは、EUV光生成システムにおけるプリパルスレーザ光の光強度とCEとの関係を示すグラフである。

[図5]図5A及び図5Bは、EUV光生成システムにおいてプリパルスレーザ光が照射されたターゲットの写真である。

[図6]図6は、図5A及び図5B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7]図7A及び図7Bは、それぞれ、図5A及び図5B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8]図8A～図8Cは、ターゲットにピコ秒オーダーのパルス幅を有するプリパルスレーザ光が照射された場合の拡散ターゲットの生成過程を模式的に示す断面図である。

[図9]図9A～図9Cは、ターゲットにナノ秒オーダーのパルス幅を有するプリパルスレーザ光が照射された場合の拡散ターゲットの生成過程を模式的に示す断面図である。

[図10]図10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11]図11は、図10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。

[図12]図12は、図10に示す再生増幅器の構成例を概略的に示す。

[図13]図13は、図12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14]図14A～図14Eは、図10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15]図15は、図2に示すメインパルスレーザ装置の構成例を概略的に示す。

[図16]図16は、第2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17]図17は、図16に示す遅延時間制御装置の構成例を概略的に示す。

[図18]図18は、図17に示す制御部の動作を示すフローチャートである。

実施形態

[0006] <内容>

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. プリパルスレーザ光のパラメータ
 5. 1 パルス幅とCEとの関係
 5. 2 パルス幅とフルーエンス及び光強度との関係
 5. 3 パルス幅と拡散ターゲットの状態との関係

- 5. 4 拡散ターゲットの生成過程
- 5. 5 パルス幅の範囲
- 5. 6 フルエンスの範囲
- 6. プリパルスレーザ装置
 - 6. 1 概略構成
 - 6. 2 モードロックレーザ装置
 - 6. 3 再生増幅器
 - 6. 3. 1 ポッケルスセルに電圧を印加しない場合
 - 6. 3. 2 ポッケルスセルに電圧を印加する場合
 - 6. 4 タイミング制御
 - 6. 5 レーザ媒質の例
- 7. メインパルスレーザ装置
- 8. 第2の遅延時間を制御する装置を含む極端紫外光生成システム

[0007] 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。

[0008] 1. 概要

L P P 式の E U V 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、E U V 光を含む光が放射されてもよい。放射された E U V 光は、チャンバ内に配置された E U V 集光ミラーによって集光され、露光装置等に出力されてもよい。

[0009] L P P 式の E U V 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。

[0010] 本開示の1つの観点においては、拡散ターゲットを形成するためのプリパルスレーザ光は、各パルスのパルス幅が1 ns未満、好ましくは500 ps未満、さらに好ましくは50 ps未満の短パルスとされてもよい。さらに、プリパルスレーザ光は、各パルスのフルエンスが、メインパルスレーザ光の各パルスのフルエンス以下で、且つ、 6.5 J/cm^2 以上、好ましくは 30 J/cm^2 以上、さらに好ましくは 45 J/cm^2 以上とされてもよい。

[0011] このような構成によれば、プリパルスレーザ光の各パルスのパルス幅を短くすることにより、ターゲットを細かい粒子状に破壊して拡散させ得る。これにより、拡散したターゲットにメインパルスレーザ光を照射したときに、ターゲットが効率良くプラズマ化され、CEが向上し得る。

[0012] 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。

「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微細な粒子等に拡散したターゲットを意味し得る。その拡散ターゲ

ットにはプラズマが含まれる場合がある。ドロップレット状のターゲットに比較してこの拡散ターゲットの光吸収率が高く、これにメインパルスレーザー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。

[0013] 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つのレーザーシステム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及びレーザーシステム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。

[0014] 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をパルスレーザー光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。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。

[0015] 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

をさらに含んでもよい。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。

[0016] 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の焦点を含む領域に位置するように配置されるのが好ましい。

[0017] さらに、EUV光生成装置1は、レーザ光進行方向制御装置34、レーザ光集光ミラー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。レーザ光進行方向制御装置34は、パルスレーザ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。

[0018] 3. 2 動作

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

[0019] 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、パルスレーザ光33に含まれる複数のパルスが照射されてもよい。

[0020] E U V 光生成制御装置 5 は、E U V 光生成システム 1 1 全体の制御を統括するよう構成されてもよい。E U V 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 2 7 のイメージデータ等処理してもよい。また、E U V 光生成制御装置 5 は、例えば、ターゲット 2 7 を出力するタイミング、ターゲット 2 7 の出力方向等を制御するよう構成されてもよい。さらに、E U V 光生成制御装置 5 は、例えば、レーザシステム 3 の発振タイミング、パルスレーザ光 3 2 の進行方向、パルスレーザ光 3 3 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。

[0021] 4. プリパルスレーザ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 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。図 2 に示すように、チャンバ 2 の内部には、レーザ光集光光学系 2 2 a と、E U V 集光ミラー 2 3 と、ターゲット回収部 2 8 と、E U V 集光ミラーホルダ 4 1 と、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。

[0022] 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。E U V 集光ミラー 2 3 は、E U V 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。

[0023] 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 2 2 1 a 及び 2 2 2 a 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。

[0024] 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。

。

[0025] チャンバ2には、ターゲットセンサ4と、EUV光センサ7と、ウィンドウ21と、ターゲット供給装置26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34と、EUV光生成制御装置5とが配置されてもよい。

[0026] EUV光センサ7は、プラズマ生成領域25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51へ出力してもよい。ターゲット供給装置26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52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34は、高反射ミラー351、352及び353と、ダイクロイックミラー354と、それらのミラーをそれぞれ保持するためのホルダ351a、352a、353a及び354aとを含んでもよい。

[0027] EUV光生成制御装置5は、EUVコントローラ51と、ターゲットコントローラ52と、遅延回路53とを含んでもよい。EUVコントローラ51は、ターゲットコントローラ52、遅延回路53及びレーザシステム3に制御信号を出力してもよい。

[0028] 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300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390とを含んでもよい。上述のダイクロイックミラー354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。

[0029] 4. 2 動作

ターゲットコントローラ52は、ターゲット供給装置26がターゲット27をチャンバ2内のプラズマ生成領域25に供給開始するように、ターゲット供給装置26にターゲット供給開始信号を出力してもよい。

[0030] ターゲット供給装置 26 は、ターゲットコントローラ 52 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 27 をプラズマ生成領域 25 に向けて出力してもよい。ターゲットコントローラ 52 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 53 に出力してもよい。ターゲットセンサ 4 は、ターゲット 27 がプラズマ生成領域 25 に到達する前の所定の位置を通過したタイミングを検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もよく、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 が上記所定の位置を通過した時にターゲット 27 からの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 が上記所定の位置を通過すると、光センサはターゲット 27 からの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。

[0031] 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 近傍に到達するタイミングでプリパルスレーザ光がターゲット 27 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。第 1 のタイミング信号は、ターゲット検出信号に第 1 の遅延時間を与えた信号であってもよい。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でメインパルスレーザ光が拡散ターゲット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。第 1 のタイミング信号出力から第 2 のタイミング信号出力までの時間を第 2 の遅延時間としてもよい。

[0032] 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。

[0033] 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、ウィンドウ 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、ウィンドウ 21 を介してレーザ光集光光学系 22a に入射してもよい。

[0034] 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。

[0035] 5. プリパルスレーザ光のパラメータ

5. 1 パルス幅と CE との関係

図 3 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 3 においては、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照射に対するメインパルスレーザ光照射の遅延時間を第 3 の遅延時間としてもよい。前述の通り、第 1 のタイミング信号出力から第 2 のタイミング信号出力までの時間を第 2 の遅延時間とした場合、第 3 の遅延時間は第 2 の遅延時間に依存し得る。その理由は、レーザ装置にタイミング信号が入力されてから、ターゲット物質にレーザ光が照射されるまでにシステムに依存した時間が必要となり得るためである。そこで、第 3 の遅延時間の目標値を決めて、第 3 の遅延時間がその目標値に近づくように、第 2 の遅延時間が調整されてもよい。第 3 の遅延

時間の目標値は、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までの時間を予め実測した値でもよい。また、図3においては、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 $1/e^2$ 以上の強度を有する部分の直径とする。

[0036] 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、これを溶融させて直径約 $21\ \mu\text{m}$ 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 $10\ \text{ns}$ とする場合には、Nd:YAGレーザ装置を用い、波長を $1.06\ \mu\text{m}$ とし、パルスエネルギーを $0.5\ \text{mJ} \sim 2.7\ \text{mJ}$ とした。パルス幅を $10\ \text{ps}$ 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 $1.06\ \mu\text{m}$ とし、パルスエネルギーを $0.25\ \text{mJ} \sim 2\ \text{mJ}$ 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、 $70\ \mu\text{m}$ とした。

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 $10.6\ \mu\text{m}$ とし、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装置によるメインパルスレーザ光のパルス幅は $15\ \text{ns}$ とし、集光スポット径を $300\ \mu\text{m}$ とした。

[0037] 測定結果は次の通りである。図3に示されるように、プリパルスレーザ光のパルス幅を $10\ \text{ns}$ 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、プリパルスレーザ光のパルス幅を $10\ \text{ns}$ とした場合のCEは、第3の遅延時間が $3\ \mu\text{s}$ 以上である場合に、上記組合せのそれぞれにおける最高値が得られた。

[0038] 一方、プリパルスレーザ光のパルス幅を 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、第3の遅延時間が $3\text{ }\mu\text{s}$ 未満である場合に得られた。特に、プリパルスレーザ光のパルス幅を 10 ps とし、フルーエンスを $52\text{ J}/\text{cm}^2$ とし、第3の遅延時間を $1.2\text{ }\mu\text{s}$ とした場合に、 CE 4.7% を実現した。

[0039] 以上の結果から、プリパルスレーザ光のパルス幅は、 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、最大の CE を得るための第3の遅延時間が短かった。従って、プリパルスレーザ光のパルス幅が、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 光を生成するのにも有利であることがわかった。

[0040] また、図3に示された結果から、プリパルスレーザ光のパルス幅をピコ秒オーダーとし、フルーエンスを $13\text{ J}/\text{cm}^2 \sim 52\text{ J}/\text{cm}^2$ とする場合には、第3の遅延時間は、以下の範囲とするのが好ましい。

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

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

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

[0041] 5.2 パルス幅とフルーエンス及び光強度との関係

図4A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スと CE との関係を示すグラフである。図4Aにおいて、横軸は、プリパルスレーザ光のフルーエンス (J/cm^2) を示し、縦軸は、 CE (%) を示す。プリパルスレーザ光のパルス幅を 10 ps 、 10 ns 、 15 ns とした場合のそれぞれにおいて、第3の遅延時間を種々設定して CE を測定し、最適な第3の遅延時間における 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3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装置を用いた。

[0042] その結果、プリパルスレーザ光のパルス幅を 10 ps 、 10 ns 、 15 ns とした場合のいずれにおいても、プリパルスレーザ光のフルーエンスを高くするに伴い CE は増大するが、それぞれ所定のフルーエンスを超えると 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、低いフルーエンスでも比較的 CE が高いことがわかった。さらに、パルス幅を 10 ps とする場合に、フルーエンスを 2.6 J/cm^2 から 6.5 J/cm^2 にすると、 CE が急激に上昇し、フルーエンスを 6.5 J/cm^2 以上にすると、フルー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。

[0043] 図 4 B は、EUV 光生成システム 11 におけるプリパルスレーザ光の光強度と CE との関係を示すグラフである。図 4 B において、横軸は、プリパルスレーザ光の光強度 (W/cm^2) を示し、縦軸は、 CE (%) を縦軸を示す。光強度は、図 4 A の結果から算出した。なお、光強度とは、パルスレーザ光のフルーエンスを、半値全幅で規定されるパルス幅で除算した値とする。

[0044] その結果、プリパルスレーザ光のパルス幅を 10 ps 、 10 ns 、 15 ns とした場合のいずれにおいても、プリパルスレーザ光の光強度を高くすると CE は増大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 が高いことがわかった。さらに、パルス幅を 10 ps とする場合には、光強度を $2.6 \times 10^{11}\text{ W/cm}^2$ から $5.6 \times 10^{11}\text{ W/cm}^2$ の範囲にすると、 CE が急激に上昇し、光強度を $5.6 \times 10^{11}\text{ W/cm}^2$ 以上にすると、さらに高い CE が得られることがわかった。

[0045] 以上の通り、ターゲットにピコ秒オーダーのパルス幅を有するプリパルスレーザ光を照射して拡散ターゲットを形成し、拡散ターゲットにメインパルスレーザ光を照射することにより、 CE を向上し得る。

[0046] 5. 3 パルス幅と拡散ターゲットの状態との関係

図5 A及び図5 Bは、EUV光生成システム11においてプリパルスレーザ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5 A及び図5 Bは、第3の遅延時間として、最大のCEが得られた遅延時間において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光は照射していない。図5 Aは、プリパルスレーザ光のパルス幅を10 psとし、フルエンスを3通り設定した場合のそれぞれにおいて撮影したものである。つまり、図3の説明の通り、図5 Aは、第3の遅延時間1.2 μ s程度でフルエンス52 J/cm²の場合、第3の遅延時間1.1 μ s程度でフルエンス26 J/cm²の場合、第3の遅延時間1.3 μ s程度でフルエンス13 J/cm²の場合でのそれぞれにおいて拡散ターゲットを撮影したものである。図5 Bは、プリパルスレーザ光のパルス幅を10 nsとし、フルエンスを2通り設定した場合のそれぞれにおいて撮影したものである。つまり、図5 Bは、第3の遅延時間3 μ sでフルエンス70 J/cm²の場合、第3の遅延時間5 μ sでフルエンス26 J/cm²の場合でのそれぞれにおいて拡散ターゲットを撮影したものである。図5 A及び図5 Bのいずれにおいても、プリパルスレーザ光の進行光路に対して60度の方向と90度の方向とから、拡散ターゲットを撮影した。撮影機器の配置は後に説明される。

[0047] 拡散ターゲットの直径D_tは、プリパルスレーザ光のパルス幅が10 psである場合には360 μ m～384 μ mであり、プリパルスレーザ光のパルス幅が10 nsである場合には325 μ m～380 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光の集光スポット径である300 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光の集光スポット径は、1/e²幅の値であるため、メインパルスレーザ光は拡散ターゲットの直径が400 μ m程度でも拡散ターゲットの大部分に照射され得る。

[0048] また、プリパルスレーザ光のパルス幅が10 psである場合の方が、パル

ス幅が 10 ns である場合よりも短時間で、拡散ターゲットの直径 D_t がメインパルスレーザ光の集光スポット径である $300\text{ }\mu\text{m}$ と同等となった。すなわち、パルス幅が 10 ps である場合の方が、パルス幅が 10 ns である場合よりも拡散ターゲットの拡散スピードが速いことがわかった。

[0049] 図6は、図5A及び図5B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6に示すように、プリパルスレーザ光の進行光路に対して 60 度の方向と 90 度の方向とにそれぞれカメラC1及びC2を配置し、ターゲットを基準としてカメラC1及びC2の位置と反対側の位置にそれぞれフラッシュランプL1及びL2を配置した。

[0050] 図7A及び図7Bは、それぞれ、図5A及び図5B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。プリパルスレーザ光のパルス幅を 10 ps 程度のピコ秒オーダーとした場合、図5A及び図7Aに示されるように、ターゲットは、プリパルスレーザ光の進行方向であるZ方向側には円環状に拡散し、プリパルスレーザ光の進行方向と逆側である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T1と、第1の部分T1に隣接しターゲットがド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大きく、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大きかった。

[0051] 一方、プリパルスレーザ光のパルス幅を 10 ns 程度のナノ秒オーダーとした場合、図5B及び図7B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光の進行方向であるZ方向側に拡散した。

[0052] プリパルスレーザ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。図4 Aに示したように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、プリパルスレーザ光のフルエンスが低くても高いCEが得られる原因の一つとして、このようなターゲットの拡散過程の相違があると推定される。

[0053] また、プリパルスレーザ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、拡散ターゲットに含まれるターゲット物質の微粒子の粒径が小さかった。ターゲットを多数の小さな粒径の微粒子に分散させた場合、相対的にターゲットの表面積が増大し得る。このため、ターゲットに照射されるレーザ光の吸収が多くなると推測し得る。従って、プリパルスレーザ光のパルス幅がピコ秒オーダーである場合の方が、拡散ターゲットにメインパルスレーザ光を照射したときに、ターゲットが効率良くプラズマ化され得る。このことが、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を得られた原因の一つであると推定される。

[0054] 5. 4 拡散ターゲットの生成過程

図8 A～図8 Cは、ターゲットにピコ秒オーダーのパルス幅を有するプリパルスレーザ光が照射された場合の拡散ターゲットの生成過程を模式的に示す断面図である。図8 Aは、ターゲットにピコ秒オーダーのパルス幅を有するプリパルスレーザ光の照射開始からピコ秒オーダーの時間が経過した時点において推定されるターゲットの状態を示す。図8 Bは、ターゲットにピコ秒オーダーのパルス幅を有するプリパルスレーザ光の照射開始からナノ秒オーダーの時間が経過した時点において推定されるターゲットの状態を示す。図8 Cは、ターゲットにピコ秒オーダーのパルス幅を有するプリパルスレーザ光の照射開始から約1 μ sの時間が経過した時点における拡散ターゲット

の状態を図 7 A に基づいて示す。

[0055] 図 8 A に示すように、ドロップレット状のターゲットにプリパルスレーザー光が照射されると、ターゲット表面にプリパルスレーザー光のエネルギーの一部が吸収され得る。その結果、プリパルスレーザー光が照射されたターゲット表面からほぼ垂直にターゲットの外側に向かうイオンや原子等の噴射を伴う、レーザアブレーションが発生し得る。これにより、プリパルスレーザー光が照射されたターゲット表面に対して垂直かつターゲット内部に向かって、レーザアブレーションによる反作用が働き得る。

[0056] このプリパルスレーザー光は、例えば、 6.5 J/cm^2 以上のフルーエンスを有し、ピコ秒オーダーの時間内でターゲット照射を終了し得るので、図 4 B に示したように時間あたりにターゲットへ照射される光のエネルギーが大きい。従って、強力なレーザアブレーションが短時間で発生し得る。このため、レーザアブレーションによる反作用も大きく、ターゲットの内部に衝撃波が発生するものと推測される。

[0057] 衝撃波は、プリパルスレーザー光が照射されたターゲットの表面に対してほぼ垂直に進行するので、ドロップレット状のターゲットのほぼ中心に集束し得る。衝撃波の波面は、当初、ターゲットの表面とほぼ平行なほぼ半球面状であり得る。衝撃波が集束するに伴って、エネルギーが集中し、集中したエネルギーが一定の大きさを超えると、ドロップレット状のターゲットの破壊が始まり得る。

[0058] ターゲットの破壊は、集束することによってエネルギーが一定の大きさを超えた衝撃波の、ほぼ半球面状の波面から始まるものと推測される。このことが、図 8 C に示すように、ターゲットがプリパルスレーザー光の入射側にドーム型に拡散した理由であると考えられる。

[0059] 図 8 A において、衝撃波がドロップレット状のターゲットの中心にまで集束すると、エネルギーが最も集中し、ターゲットの残りの部分も一気に破壊され得る。このことが、図 8 C に示すように、ターゲットがプリパルスレーザー光の進行方向側に円環状に拡散した理由であると考えられる。

[0060] また、図 8 A においては、強力なレーザアブレーションが発生していると推測されるが、レーザアブレーションが発生している時間は僅かであり、衝撃波がターゲットの中心に到達するまでの時間も短いと推測される。そして、図 8 B に示すように、おそらくナノ秒オーダーの時間が経過した時にはターゲットが破壊され始めていると推測される。このことが、図 8 C に示すように、ターゲットの重心がプリパルスレーザ光の照射前の位置からあまり移動していない理由であると推測される。

[0061] 図 9 A ～図 9 C は、ターゲットにナノ秒オーダーのパルス幅を有するプリパルスレーザ光が照射された場合の拡散ターゲットの生成過程を模式的に示す断面図である。図 9 A は、ターゲットにナノ秒オーダーのパルス幅を有するプリパルスレーザ光の照射開始からピコ秒オーダーの時間が経過した時点において推定されるターゲットの状態を示す。図 9 B は、ターゲットにナノ秒オーダーのパルス幅を有するプリパルスレーザ光の照射開始からナノ秒オーダーの時間が経過した時点において推定されるターゲットの状態を示す。図 9 C は、ターゲットにナノ秒オーダーのパルス幅を有するプリパルスレーザ光の照射開始から数 μ s の時間が経過した時点における拡散ターゲットの状態を図 7 B に基づいて示す。

[0062] 図 9 A に示すように、ドロップレット状のターゲットにプリパルスレーザ光が照射されると、ターゲット表面にプリパルスレーザ光のエネルギーの一部が吸収され得る。その結果、プリパルスレーザ光が照射されたターゲット表面からほぼ垂直に、ターゲット物質のイオンや原子等の噴射を伴う、レーザアブレーションが発生し得る。これにより、プリパルスレーザ光が照射されたターゲット表面に対してほぼ垂直かつターゲット内部に向かって、レーザアブレーションによる反作用が働き得る。

[0063] このプリパルスレーザ光は、10 ns 程度のナノ秒オーダーのパルス幅を有している。このプリパルスレーザ光は、上述のピコ秒オーダーのパルス幅を有するプリパルスレーザ光と同等のフルエンスを有し得るが、ナノ秒オーダーの時間にわたって照射されるので、図 4 B に示したように時間あたり

にターゲットへ照射される光のエネルギーは小さい。

[0064] ターゲットを構成する液体のスズ中における音速 V は、約 2500 m/s であり得る。ドロップレット状のターゲットの直径 D が $21 \mu\text{m}$ であるとする、プリパルスレーザ光を照射されたターゲット表面からターゲットの中心まで音波が伝わる時間 T_s は、次のように算出し得る。

$$\begin{aligned} T_s &= (D/2) / V \\ &= (21 \times 10^{-6} / 2) / 2500 \\ &= 4.2 \text{ ns} \end{aligned}$$

[0065] 図3～図6を用いて説明した測定において、プリパルスレーザ光のフルエンスは、ドロップレット状のターゲットの全体をレーザアブレーションによってイオンや原子等として気化するほどの大きさには設定されていない。従って、ターゲットに 10 ns のパルス幅を有するプリパルスレーザ光を照射した結果、 10 ns の時間内に、プリパルスレーザ光の進行方向に沿ったターゲットの厚みが $21 \mu\text{m}$ 以上減少することはないと考えられる。すなわち、レーザアブレーションによる反作用に押されてターゲットの厚みが減少する速度は、液体のスズ中における音速を超えないと考えられる。従って、ターゲットの内部に、衝撃波は殆ど発生していないと推測される。

[0066] このようなナノ秒オーダーのパルス幅を有するプリパルスレーザ光が照射されたターゲットは、図9Bに示すように、ナノ秒オーダーの時間にわたってレーザアブレーションによる反作用が働き、扁平形状のほぼ円板状に変形し得る。そして、レーザアブレーションによる反作用に起因してターゲットを変形させる力が表面張力に勝ると、ターゲットは破壊され得る。以上のことが、図9Cに示すように、ターゲットが円板状又は円環状に拡散した理由であると考えられる。

[0067] また、前述のように、ターゲットにはナノ秒オーダーの時間にわたってレーザアブレーションによる反作用が働くと推測される。このターゲットは、ピコ秒オーダーのパルス幅を有するプリパルスレーザ光が照射された場合と比べて、約 1000 倍の時間にわたって、レーザアブレーションによる反作

用を受けて加速され得ることになる。このことが、図9Cに示すように、ターゲットの重心がプリパルスレーザ光の進行方向側に移動した理由であると推測される。

[0068] 5. 5 パルス幅の範囲

上述の通り、ターゲットにピコ秒オーダーのパルス幅を有するプリパルスレーザ光を照射した場合には、ターゲットの内部に衝撃波が形成され、ターゲットがその中心付近から破壊されると推測され得る。一方、ターゲットにナノ秒オーダーのパルス幅を有するプリパルスレーザ光を照射した場合には、衝撃波の形成は抑制され、ターゲットがその表面から破壊されると推測され得る。

[0069] このような推測に基づいて、プリパルスレーザ光によって衝撃波を発生させてターゲットを破壊するための条件は、以下のように規定し得る。

まず、EUV光を生成するためのドロップレット状のターゲットの直径Dは、 $10\mu\text{m} \sim 40\mu\text{m}$ であってもよい。

[0070] ターゲットの直径Dが $40\mu\text{m}$ である場合、ターゲットの表面から中心まで音波が到達する時間 T_s は、以下のように導かれる。

$$\begin{aligned} T_s &= (D/2) / V \\ &= (40 \times 10^{-6} / 2) / 2500 \\ &= 8 \text{ ns} \end{aligned}$$

[0071] プリパルスレーザ光のパルス幅 T_p は、ターゲットの表面から中心まで音波が到達する時間 T_s よりも十分小さいことが好ましい。そのような短い時間内に、ある程度のフルエンスを有するプリパルスレーザ光をターゲットに照射することにより、衝撃波を形成し、ターゲットを微細な粒子に破壊し得る。そこで、係数Kを定義する。係数Kは、ターゲットの表面から中心まで音波が到達する時間 T_s よりも十分小さい値として好ましいパルス幅 T_p を決定する係数である。式1に示すように、ターゲットの表面から中心まで音波が到達する時間 T_s に係数Kを乗算した値よりも小さい値が、プリパルスレーザ光のパルス幅 T_p として好ましい。

$$T_p < K \cdot T_s \quad \dots \text{ (式1) }$$

係数Kは、例えば、 $K = 1 / 8$ でもよい。また、 $K = 1 / 16$ が好ましい。
また、 $K = 1 / 160$ がより好ましい。

[0072] ターゲットの直径Dが $40 \mu\text{m}$ である場合、プリパルスレーザ光のパルス幅 T_p として好ましい値は、(式1)から以下のように導かれる。

$K = 1 / 8$ の場合は、 $T_p < 1 \text{ ns}$ でもよい。

より好ましくは、 $K = 1 / 16$ とし、 $T_p < 500 \text{ ps}$ でもよい。

より好ましくは、 $K = 1 / 160$ とし、 $T_p < 50 \text{ ps}$ でもよい。

[0073] 5. 6 フルーエンスの範囲

図4Aを再び参照すると、ピコ秒オーダーのパルス幅を有するプリパルスレーザ光のフルーエンスを $6.5 \text{ J} / \text{cm}^2$ 以上とした場合には、最適な第3の遅延時間でメインパルスレーザ光を照射すると、3.5%以上のCEが得られことが判る。同様に、フルーエンスを $30 \text{ J} / \text{cm}^2$ 以上とした場合には、4%以上のCEが得られることが判る。同様に、フルーエンスを $45 \text{ J} / \text{cm}^2$ 以上とした場合には、4.5%以上のCEが得られることが判る。従って、ピコ秒オーダーのパルス幅を有するプリパルスレーザ光のフルーエンスは、 $6.5 \text{ J} / \text{cm}^2$ 以上とすることが好ましく、 $30 \text{ J} / \text{cm}^2$ 以上とすることがより好ましく、 $45 \text{ J} / \text{cm}^2$ 以上とすることがさらに好ましい。

[0074] ターゲットにピコ秒オーダーのパルス幅を有するプリパルスレーザ光を照射したときに、ターゲットに吸収されるエネルギー E_d は、以下の式で近似され得る。

$$E_d \doteq F \cdot A \cdot \pi \cdot (D / 2)^2$$

ここで、Fはプリパルスレーザ光のフルーエンスである。Aはターゲットによるプリパルスレーザ光の吸収率である。ターゲットを液体のスズとし、プリパルスレーザ光の波長を $1.06 \mu\text{m}$ とすると、Aは約16%である。Dはドロップレット状のターゲットの直径である。

[0075] 一方、ターゲットの質量mは以下の式で求められる。

$$m = \rho \cdot (4\pi / 3) \cdot (D / 2)^3$$

ここで、 ρ はターゲットの密度であり、ターゲットを液体のスズとすると、約 6.94 g/cm^3 である。

[0076] 次に、ターゲットの単位質量に対して、吸収されるプリパルスレーザ光のエネルギー $E_d p$ は、以下の（式 2）で求められる。

$$\begin{aligned} E_d p &= E_d / m \\ &\doteq (3/2) \cdot F \cdot A / (\rho D) \quad \dots \text{（式 2）} \end{aligned}$$

[0077] 従って、ターゲットが液体のスズの場合で、3.5%のCEが得られるようプリパルスレーザ光のフルーエンス F を 6.5 J/cm^2 とした場合に、ターゲットの単位質量に対して吸収されるエネルギー $E_d p$ は、（式 2）より、次のように求められる。

$$\begin{aligned} E_d p &\doteq (3/2) \times 6.5 \times 0.16 / (6.94 \times 21 \times 10^{-4}) \\ &\doteq 107 \text{ J/g} \end{aligned}$$

[0078] 同様に、4%のCEが得られるようプリパルスレーザ光のフルーエンス F を 30 J/cm^2 とした場合に、ターゲットの単位質量に対して吸収されるエネルギー $E_d p$ は、次のように求められる。

$$\begin{aligned} E_d p &\doteq (3/2) \times 30 \times 0.16 / (6.94 \times 21 \times 10^{-4}) \\ &\doteq 494 \text{ J/g} \end{aligned}$$

[0079] 同様に、4.5%のCEが得られるようプリパルスレーザ光のフルーエンス F を 45 J/cm^2 とした場合に、ターゲットの単位質量に対して吸収されるエネルギー $E_d p$ は、次のように求められる。

$$\begin{aligned} E_d p &\doteq (3/2) \times 45 \times 0.16 / (6.94 \times 21 \times 10^{-4}) \\ &\doteq 741 \text{ J/g} \end{aligned}$$

[0080] さらに、（式 2）から、プリパルスレーザ光のフルーエンス F と、ターゲットの単位質量に対して吸収されるエネルギー $E_d p$ との関係は、以下のようになる。

$$F \doteq (2/3) E_d p \cdot \rho \cdot D / A$$

[0081] 従って、任意のターゲットで、3.5%のCEが得られるようにするため

のプリパルスレーザ光のフルーエンス F は、上述のエネルギー E_d の値を用いて、次のように求められる。

$$\begin{aligned} F &\doteq (2/3) \times 107 \cdot \rho \cdot D/A \\ &\doteq 71.3 (\rho \cdot D/A) \end{aligned}$$

[0082] 同様に、任意のターゲットで、4%のCEが得られるようにするためのプリパルスレーザ光のフルーエンス F は、次のように求められる。

$$\begin{aligned} F &\doteq (2/3) \times 494 \cdot \rho \cdot D/A \\ &\doteq 329 (\rho \cdot D/A) \end{aligned}$$

[0083] 同様に、任意のターゲットで、4.5%のCEが得られるようにするためのプリパルスレーザ光のフルーエンス F は、次のように求められる。

$$\begin{aligned} F &\doteq (2/3) \times 741 \cdot \rho \cdot D/A \\ &\doteq 494 (\rho \cdot D/A) \end{aligned}$$

[0084] 従って、プリパルスレーザ光のフルーエンス F の値は、これらの値以上とすることが望ましい。また、プリパルスレーザ光のフルーエンス F の値は、メインパルスレーザ光のフルーエンスの値以下であってもよい。メインパルスレーザ光のフルーエンスは、例えば、 $150 \text{ J/cm}^2 \sim 300 \text{ J/cm}^2$ であってもよい。

[0085] 6. プリパルスレーザ装置

6. 1 概略構成

上述のように、ターゲットを拡散させるためのプリパルスレーザ光は、そのパルス幅がピコ秒オーダーの短パルスとされるのが望ましい。

[0086] 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、それらの縦モードの光が重なり合うことにより、パルス幅の短いパルスレーザ光が出力され得る。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。そこで、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タイミング制御を実現するために、プリパルスレーザ装置は以下の構成を備えてもよい。

[0087] 図10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。

[0088] クロック生成器301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。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100MHz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。

[0089] 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。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。

[0090] 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。

[0091] 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。

[0092] 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、図 2 の説明で述べた遅延回路 53 から出力される第 1 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。具体的には、AND 回路 312 が、クロック信号と第 1 のタイミング信号との AND 信号を生成し、この AND 信号によって再生増幅器 305 内のポッケルスセルを制御してもよい。

[0093] 6. 2 モードロックレーザ装置

図 11 は、図 10 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。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 を導入するための励起光源 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。

[0094] 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。

- [0095] 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、レーザ結晶３２２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、レーザ結晶３２２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の光及び第２の光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。
- [0096] 可飽和吸収体ミラー３２１は、ミラー基板上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３２１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ほぼ吸収し、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３２１によって反射され得る。
- [0097] 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３２５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 $L = 1.5 \text{ m}$ 、真空中の光速 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 、光路内の屈折率を１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。なお、光路内の屈折率は真空中の光速を光路内の物質中の光速で除算した値であってよい。

$$f = c / (2L)$$

$$= (3 \times 10^8) / (2 \times 1.5)$$

$$= 100 \text{ MHz}$$

この出力されるパルスレーザ光は、レーザ結晶 322 がブリュースタ角で図 11 のように配置されているので、偏光面が紙面に平行な直線偏光となり得る。

[0098] 可飽和吸収体ミラー 321 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 328 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 328 は、上述の光共振器長調整ドライバ 303 によって駆動可能であってもよい。可飽和吸収体ミラー 321 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。

[0099] 上述のように、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 を制御してもよい。具体的には、位相調整部 311 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 303 を制御してもよい。クロック信号と検出信号との一定の遅延時間を第 4 の遅延時間とする。第 4 の遅延時間については、図 14A 及び図 14B を参照しながら後述する。

[0100] 6. 3 再生増幅器

図 12 は、図 10 に示す再生増幅器 305 の構成例を概略的に示す。再生増幅器 305 は、平面ミラー 334 と凹面ミラー 335 との間に、レーザ結晶 336 と、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、 $\lambda/4$ 波長板 341 とが、この順に平面ミラー 334 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 305 の光共振器は、上述のモードロックレーザ装置 302 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 305 は、

光共振器の外部からレーザ結晶 336 に励起光 E2 を導入するための励起光源 342 を含んでもよい。励起光源 342 は、励起光 E2 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 305 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、平面ミラー 332 と、平面ミラー 333 とを含んでもよい。ファラデー光アイソレータ 331 は、図示しないファラデーローテータと図示しない $\lambda/2$ 波長板とを含んでもよい。

[0101] 平面ミラー 334 は、励起光源 342 からの励起光 E2 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 336 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 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。さらに、レーザ結晶 336 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。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。

[0102] 6. 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。

[0103] 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 B 28 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。

[0104] 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 B 3 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 B 3 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 B 4 を高い反射率で反射してもよい。

[0105] 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 B 5 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 B 5 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 B 5 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 B 5 を高い反射率で反射し、パルスレーザ光 B 6 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 B 11 等を高い透過率で透過させてもよい。

[0106] 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。

[0107] 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 B 6 の偏光面を回転させずにパルスレーザ光 B 7 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。

[0108] $\lambda/4$ 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な第 1 の偏光成分と、上記結晶の光学軸とパルスレーザ光 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。

[0109] $\lambda/4$ 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、 $\lambda/4$ 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、 $\lambda/4$ 波長板 341 を透過したパルスレーザ光 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光 B9 は、 $\lambda/4$ 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、パルスレーザ光 B7 は、 $\lambda/4$ 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光 B10 としてポッケルスセル 340 に入射し得る。

[0110] 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光 B 11 を高い透過率で透過させてもよい。

[0111] 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光 B 12 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光 B 13 を高い反射率で反射してもよい。レーザ結晶 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光 B 14 を増幅して透過させてもよい。

[0112] 平面ミラー 334 は、レーザ結晶 336 によって増幅されてレーザ結晶 336 を透過したパルスレーザ光 B 15 を高い反射率で反射し、パルスレーザ光 B 16 としてレーザ結晶 336 に入射させてもよい。レーザ結晶 336 によって再び増幅されたパルスレーザ光 B 17 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、パルスレーザ光 B 21 として $\lambda/4$ 波長板 341 に入射してもよい。パルスレーザ光 B 21 は $\lambda/4$ 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 $\lambda/4$ 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光 B 24 となり得る。パルスレーザ光 B 24 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、パルスレーザ光 B 26 として光共振器の外部に出力されてもよい。

[0113] パルスレーザ光 B 26 は、平面ミラー 333 と平面ミラー 332 とを介して、パルスレーザ光 B 28 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光 B 28 を、その偏光面を回転させずに、パルスレーザ光 B 29 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光 B 29 を高い反射率で反射してもよい。

[0114] 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光 B 30 は、図 2 に示したレーザ光集光光学系 22a を介してプラズマ生成領域 25 に

導かれてもよい。ただし、再生増幅器 305 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 B30 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。

[0115] 6. 3. 2 ポッケルスセルに電圧を印加する場合

高電圧電源 343 は、一度ポッケルスセル 340 を透過したパルスレーザ光 B11 の 1 つのパルスが、次にパルスレーザ光 B20 としてポッケルスセル 340 に入射するまでの間のタイミングで、ポッケルスセル 340 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 340 は、高電圧電源 343 によって電圧が印加されている状態においては、 $\lambda/4$ 波長板 341 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。

[0116] 図 13 は、図 12 に示す再生増幅器 305 においてポッケルスセル 340 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 B20 は、ポッケルスセル 340 及び $\lambda/4$ 波長板 341 をそれぞれ 2 回透過する過程で、パルスレーザ光 Ba1、Ba2、Ba3、Ba4 として示す光路を経て、パルスレーザ光 B11 として戻ってきてもよい。 $\lambda/4$ 波長板 341 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 340 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 B11 は、その偏光面の向きがパルスレーザ光 B20 と同じであり得る。従って、パルスレーザ光 B11 は、偏光ビームスプリッタ 339 を再び透過して、レーザ結晶 336 によって増幅され得る。ポッケルスセル 340 に高電圧電源 343 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。

[0117] 増幅動作が繰り返された後、高電圧電源 343 は、一度ポッケルスセル 340 を透過したパルスレーザ光 B11 が、次にパルスレーザ光 B20 としてポッケルスセル 340 に入射するまでの間のタイミングで、ポッケルスセル 340 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 34

0は、上述の通り、図12のように高電圧電源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くてもよい。従って、このときポッケルスセル340に図中左側から入射したパルスレーザ光B20は、図12のパルスレーザ光B21、B22、B23、B24として、 $\lambda/4$ 波長板341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B25として偏光ビームスプリッタ339に図中右側から入射し、光共振器の外部に出力され得る。

[0118] なお、図13のようにポッケルスセル340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302から出力されたパルスレーザ光B1は、偏光面が紙面に垂直な方向に直線偏光したパルスレーザ光B6としてポッケルスセル340に入射し得る。ポッケルスセル340に電圧が印加されている間は、パルスレーザ光B6は、 $\lambda/4$ 波長板341及びポッケルスセル340を透過しながら、パルスレーザ光Ba5、Ba6、Ba7、Ba8として示す光路を経て、パルスレーザ光B25として戻ってきてもよい。このとき、パルスレーザ光B25は、その偏光面がパルスレーザ光B6と同じであり得る。従って、このパルスレーザ光B25は、偏光面が紙面に垂直な直線偏光であるパルスレーザ光として偏光ビームスプリッタ339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B26として光共振器の外部に出力され得る。

[0119] 高電圧電源343がポッケルスセル340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第1の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312から、再生増幅器305に含まれる電圧波形生成回路344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。第1のタイミング信号と、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 14C～図 14E を参照しながら後述する。

[0120] 6. 4 タイミング制御

図 14A～図 14E は、図 10 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 14A 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、繰り返し周波数を 100 MHz としてもよい。この場合、パルスの発生間隔は 10 ns となり得る。

[0121] 図 14B 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 100 MHz 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 14A に示すクロック信号との位相差を調整し得る。これにより、パルスレーザ光の検出信号が図 14A に示す例えば 100 MHz のクロック信号に対して、例えば 5 ns の第 4 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。

[0122] 図 14C は、遅延回路 53 から出力される第 1 の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 から出力される第 1 のタイミング信号は、ターゲットセンサ 4 によるターゲット検出信号に第 1 の遅延時間を与えた信号であってもよい。第 1 の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、100 kHz 程度であってもよい。第 1 のタイミング信号のパルス幅は、図 14A 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、第1のタイミング信号のパルス幅は、例えば10 nsであってよい。

[0123] 図14D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、クロック信号と第1のタイミング信号との論理積をとった信号であってもよい。第1の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、第1のタイミング信号の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のパルスにほぼ同期して生成され得る。

[0124] 図14E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300 ns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1 mの場合、光速 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ のパルスレーザ光が光共振器内を50往復する時間は、300 ns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。

[0125] 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からのパルスレーザ光とが第4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がポッケルスセル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。

[0126] 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 $30\text{ m/s} \sim 60\text{ m/s}$ 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 10 ns の時間内に、 $0.3\text{ }\mu\text{m} \sim 0.6\text{ }\mu\text{m}$ 移動し得る。ドロップレット状のターゲットの直径が $20\text{ }\mu\text{m}$ 程度であれば、 10 ns 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。

[0127] 6. 5 レーザ媒質の例

上述の例では、モードロックレーザ装置 302 に含まれるレーザ結晶 322 として $\text{Nd} : \text{YVO}_4$ の結晶を用い、再生増幅器 305 に含まれるレーザ結晶 336 として $\text{Nd} : \text{YAG}$ の結晶を用いた場合について説明したが、本開示はこれに限定されない。

例えば、モードロックレーザ装置 302 及び再生増幅器 305 のいずれにも、レーザ結晶として $\text{Nd} : \text{YAG}$ の結晶を用いてもよい。

また、例えば、モードロックレーザ装置 302 及び再生増幅器 305 のいずれかまたは両方に、レーザ結晶として $\text{Ti} : \text{サファイア}$ (Titanium-doped Sapphire) の結晶を用いてもよい。

また、例えば、モードロックレーザ装置 302 及び再生増幅器 305 のいずれかまたは両方に、レーザ結晶としてルビー結晶を用いてもよい。

また、例えば、モードロックレーザ装置 302 及び再生増幅器 305 のいずれかまたは両方に、レーザ媒質として色素セルを用いてもよい。

また、例えば、モードロックレーザ装置 302 及び再生増幅器 305 のいずれかまたは両方に、レーザ媒質として $\text{Nd}^{3+} : \text{ガラス}$ (triply ionized neodymium-doped glass) を用いてもよい。

[0128] 7. メインパルスレーザ装置

図 15 は、図 2 に示す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。

[0129] マスターオシレータ MO は、 CO_2 ガスをレーザ媒質として用いた CO_2 レ

ーザ装置であってもよいし、 CO_2 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 CO_2 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いてもよい。なお、以下の説明において CO_2 ガスをレーザ媒質とする場合、 CO_2 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。

[0130] 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、第2の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からの第2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。

[0131] 8. 第2の遅延時間を制御する装置を含む極端紫外光生成システム

図16は、第2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。第2の実施形態に係るEUV光生成システム11は、ビームスプリッタ61及び62と、光センサ63及び64と、遅延時間計測部65とを含んでもよい。また、EUV光生成システム11は、図2に示す遅延回路53の代わりに、遅延時間制御装置50を含んでもよい。他の点については第1の実施形態と同様でよい。

[0132] ビームスプリッタ61は、ダイクロイックミラー354とレーザ光集光光学系22aとの間のプリパルスレーザ光及びメインパルスレーザ光の光路に

配置されてもよい。ビームスプリッタ 6 1 には、プリパルスレーザ光及びメインパルスレーザ光を高い透過率で透過させ、プリパルスレーザ光及びメインパルスレーザ光の各残りの一部を反射する膜がコーティングされていてもよい。

[0133] ビームスプリッタ 6 2 は、ビームスプリッタ 6 1 によって反射されたプリパルスレーザ光及びメインパルスレーザ光の光路に配置されてもよい。ビームスプリッタ 6 2 には、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膜がコーティングされていてもよい。

[0134] 光センサ 6 3 は、ビームスプリッタ 6 2 によって反射されたプリパルスレーザ光の光路に配置されてもよい。光センサ 6 4 は、ビームスプリッタ 6 2 を透過したメインパルスレーザ光の光路に配置されてもよい。光センサ 6 3 及び 6 4 は、ビームスプリッタ 6 2 からの光路長が互いに等しい位置に配置されてもよい。光センサ 6 3 は、プリパルスレーザ光を検出して、検出信号を出力してもよい。光センサ 6 3 は、例えば、波長 $1.06\ \mu\text{m}$ のプリパルスレーザ光を検出する高速のフォトダイオードを含んでもよい。光センサ 6 4 は、メインパルスレーザ光を検出して、検出信号を出力してもよい。光センサ 6 4 は、例えば、波長 $10.6\ \mu\text{m}$ のメインパルスレーザ光を検出する高速の熱電素子を含んでもよい。

[0135] 遅延時間計測部 6 5 は、光センサ 6 3 及び 6 4 に対してそれぞれ信号線によって接続されていてもよい。遅延時間計測部 6 5 は、光センサ 6 3 及び 6 4 によってそれぞれ出力された各検出信号を受信し、各検出信号を受信したタイミングに基づいて、プリパルスレーザ光の出力に対するメインパルスレーザ光の出力の第 3 の遅延時間 δT を計測してもよい。遅延時間計測部 6 5 は、計測された第 3 の遅延時間 δT のデータを、遅延時間制御装置 5 0 に出力してもよい。

[0136] 図 1 7 は、図 1 6 に示す遅延時間制御装置等の構成例を概略的に示す。遅延時間制御装置 5 0 は、遅延回路 5 3 と、制御部 5 4 とを含んでもよい。遅

延回路 53 は、ターゲットコントローラ 52 から出力されたターゲット検出信号に第 1 の遅延時間を与えて第 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、第 1 のタイミング信号に対して第 2 の遅延時間 δT_o を有する第 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。第 2 の遅延時間 δT_o は可変であってもよい。

[0137] 制御部 54 は、EUV コントローラ 51 から、第 3 の遅延時間の目標値 δT_t のデータを受信してもよい。また、制御部 54 は、遅延時間計測部 65 から、計測された第 3 の遅延時間 δT のデータを受信してもよい。制御部 54 は、第 3 の遅延時間 δT とその目標値 δT_t との差に基づいて、第 2 の遅延時間 δT_o を変更するように、遅延回路 53 を制御してもよい。

[0138] 図 18 は、図 17 に示す制御部の動作を示すフローチャートである。制御部 54 は、第 3 の遅延時間 δT とその目標値 δT_t との差に基づいて、以下のように遅延回路 53 をフィードバック制御してもよい。

[0139] まず、制御部 54 は、遅延パラメータ α の初期値のデータを、EUV コントローラ 51 から受信してもよい (S1)。遅延パラメータ α の初期値は、例えば、以下の式で算出される値であってもよい。

$$\alpha = (L_m - L_p) / c$$

ここで、 L_m は、図 15 におけるメインパルスレーザ装置 390 のマスターオシレータ MO からプラズマ生成領域 25 までのメインパルスレーザ光の光路長でもよい。 L_p は、図 10 におけるプリパルスレーザ装置 300 の再生増幅器 305 からプラズマ生成領域 25 までのプリパルスレーザ光の光路長でもよい。 c は、光速であり、 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ であってもよい。

[0140] メインパルスレーザ装置 390 は、プリパルスレーザ光より高エネルギーのメインパルスレーザ光を出力するために、プリパルスレーザ装置 300 よりも多くの増幅器を含み得る。従って、メインパルスレーザ光の光路長 L_m がプリパルスレーザ光の光路長 L_p よりも長く、遅延パラメータ α の値は 0 より大きい値であり得る。

[0141] 次に、制御部54は、第3の遅延時間の目標値 δT_t のデータを、EUVコントローラ51から受信してもよい（S2）。次に、制御部54は、目標値 δT_t から遅延パラメータ α を減算することにより、第2の遅延時間 δT_o を算出してもよい（S3）。次に、制御部54は、算出された第2の遅延時間 δT_o のデータを遅延回路53に送信してもよい（S4）。

[0142] 次に、制御部54は、プリパルスレーザ装置300及びメインパルスレーザ装置390が発振したか否かを判定してもよい（S5）。これらのレーザ装置の両方又は何れかが発振していない場合（S5：NO）、これらのレーザ装置が発振するまで待機してもよい。これらのレーザ装置が発振した場合（S5：YES）、処理をS6に進めてもよい。

[0143] S6において、制御部54は、遅延時間計測部65から、計測された第3の遅延時間 δT のデータを受信してもよい。次に、制御部54は、以下の式によって、第3の遅延時間 δT とその目標値 δT_t との差 ΔT を算出してもよい（S7）。

$$\Delta T = \delta T - \delta T_t$$

[0144] 次に、制御部54は、遅延パラメータ α に、第3の遅延時間 δT とその目標値 δT_t との差 ΔT を加算することにより、遅延パラメータ α の値を更新してもよい（S8）。すなわち、例えば第3の遅延時間 δT がその目標値 δT_t より長かった（ $\Delta T > 0$ ）場合に、第2の遅延時間 ΔT_o が短くなるように、遅延パラメータ α の値を、 ΔT だけ大きくしてもよい。

[0145] 次に、制御部54は、遅延回路53のフィードバック制御を中止するか否かを判定してもよい（S9）。例えば、EUVコントローラ51からの制御信号により、パルスレーザ光の出力を中止するときは、遅延回路53のフィードバック制御を中止してもよい。あるいは、上述のS2～S8の処理を複数回繰り返した結果、EUV光の出力エネルギーが所定値以上となった場合には、遅延回路53のフィードバック制御を中止し、第2の遅延時間 δT_o の値を固定してEUV光が生成されてもよい。遅延回路53のフィードバック制御を中止しない場合は（S9：NO）、上述のS2に戻って第3の遅延

B時間の目標値 δT_t のデータを受信し、遅延回路 53 をフィードバック制御してもよい。遅延回路 53 のフィードバック制御を中止する場合は (S9 : YES)、本フローチャートの処理を終了してもよい。

[0146] 以上のように、計測された第3の遅延時間 δT に基づいて遅延回路 53 をフィードバック制御することにより、第3の遅延時間 δT を高精度に安定化させ得る。これにより、拡散ターゲットに対して最適な第3の遅延時間でメインパルスレーザ光を照射し、CEを向上し得る。また、第2の遅延時間 δT_o を固定した場合に何らかの要因で第3の遅延時間 δT が変動する場合でも、フィードバック制御することにより、第3の遅延時間 δT を安定化させ得る。

[0147] 第2の実施形態においては、計測された第3の遅延時間に基づいて遅延回路をフィードバック制御してもよいが、これに限らず、第3の遅延時間を計測しなくてもよい。例えば、上述の遅延パラメータ α の初期値と、上述の目標値 δT_t とから、第2の遅延時間 δT_o を算出し、この第2の遅延時間 δT_o の値を用いて遅延回路 53 を制御してもよい。

[0148] 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。

[0149] 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。

請求の範囲

[請求項1]

ターゲットに第1のパルスレーザ光及び第2のパルスレーザ光を照射してターゲットをプラズマ化することにより極端紫外光を生成するように構成された極端紫外光生成システムであって、

前記第1のパルスレーザ光及び前記第2のパルスレーザ光を導入するための少なくとも1つの導入口が設けられたチャンバと、

前記チャンバ内の所定の領域にターゲットを供給するように構成されたターゲット供給装置と、

前記チャンバ内のターゲットに照射される前記第1のパルスレーザ光であって、1 ns未満のパルス幅を有する前記第1のパルスレーザ光を出力するように構成された第1のレーザ装置と、

前記第1のパルスレーザ光を照射されたターゲットに照射される前記第2のパルスレーザ光を出力するように構成された第2のレーザ装置と、

を備える極端紫外光生成システム。

[請求項2]

ターゲットに第1のパルスレーザ光及び第2のパルスレーザ光を照射してターゲットをプラズマ化することにより極端紫外光を生成するように構成された極端紫外光生成システムであって、

前記第1のパルスレーザ光及び前記第2のパルスレーザ光を導入するための少なくとも1つの導入口が設けられたチャンバと、

前記チャンバ内の所定の領域にターゲットを供給するように構成されたターゲット供給装置と、

前記チャンバ内のターゲットに照射される前記第1のパルスレーザ光であって、500 ps未満のパルス幅を有する前記第1のパルスレーザ光を出力するように構成された第1のレーザ装置と、

前記第1のパルスレーザ光を照射されたターゲットに照射される前記第2のパルスレーザ光を出力するように構成された第2のレーザ装置と、

を備える極端紫外光生成システム。

[請求項3]

ターゲットに第1のパルスレーザ光及び第2のパルスレーザ光を照射してターゲットをプラズマ化することにより極端紫外光を生成するように構成された極端紫外光生成システムであって、

前記第1のパルスレーザ光及び前記第2のパルスレーザ光を導入するための少なくとも1つの導入口が設けられたチャンバと、

前記チャンバ内の所定の領域にターゲットを供給するように構成されたターゲット供給装置と、

前記チャンバ内のターゲットに照射される前記第1のパルスレーザ光であって、50 ps未満のパルス幅を有する前記第1のパルスレーザ光を出力するように構成された第1のレーザ装置と、

前記第1のパルスレーザ光を照射されたターゲットに照射される前記第2のパルスレーザ光を出力するように構成された第2のレーザ装置と、

を備える極端紫外光生成システム。

[請求項4]

前記第1のレーザ装置は、前記第2のパルスレーザ光のフルーエンスより小さく且つ $6.5 \text{ J} / \text{cm}^2$ 以上のフルーエンスを有する前記第1のパルスレーザ光を出力するように構成された、
請求項1～3の何れか一項記載の極端紫外光生成システム。

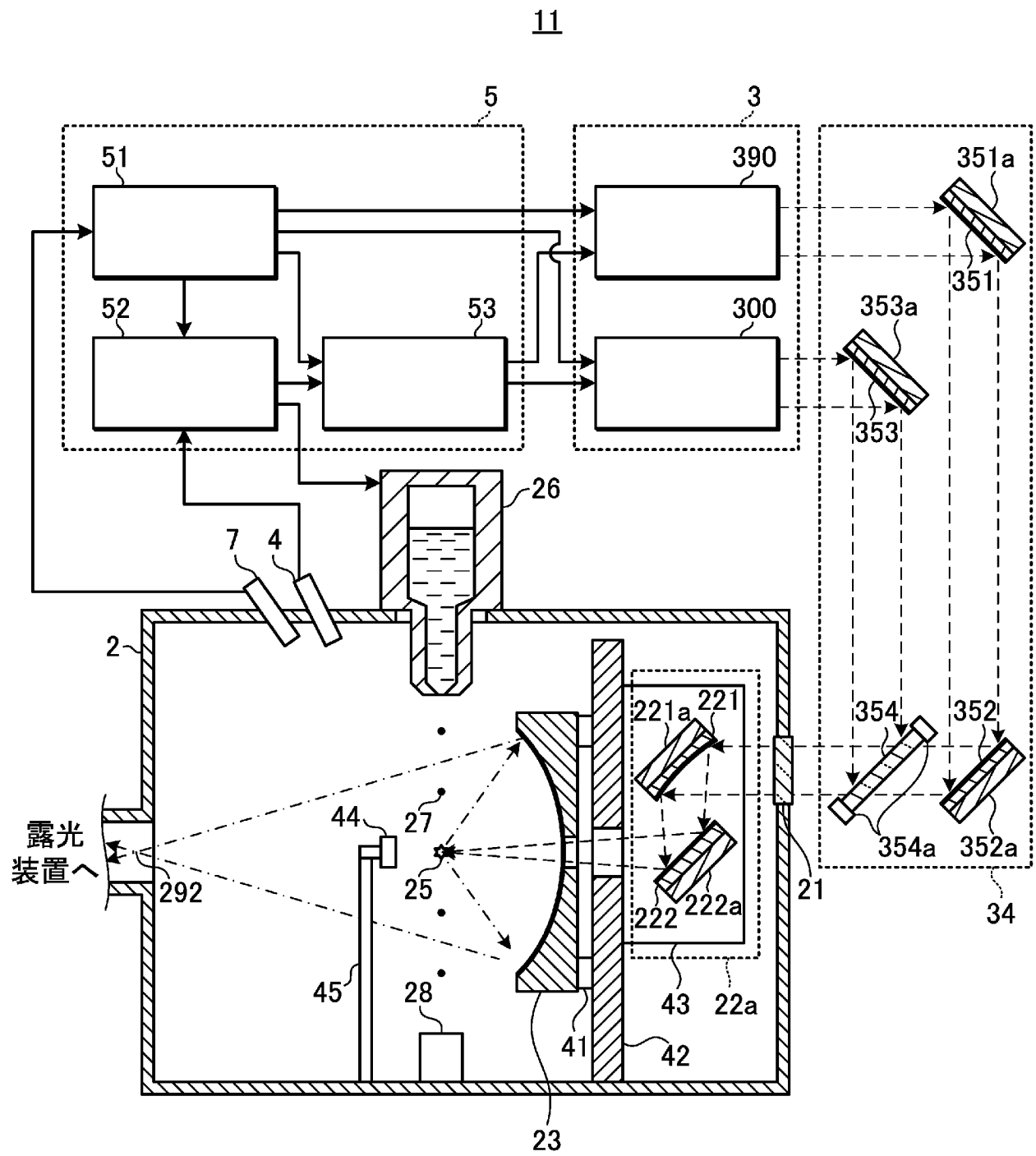
[請求項5]

前記第1のレーザ装置は、前記第2のパルスレーザ光のフルーエンスより小さく且つ $30 \text{ J} / \text{cm}^2$ 以上のフルーエンスを有する前記第1のパルスレーザ光を出力するように構成された、
請求項1～3の何れか一項記載の極端紫外光生成システム。

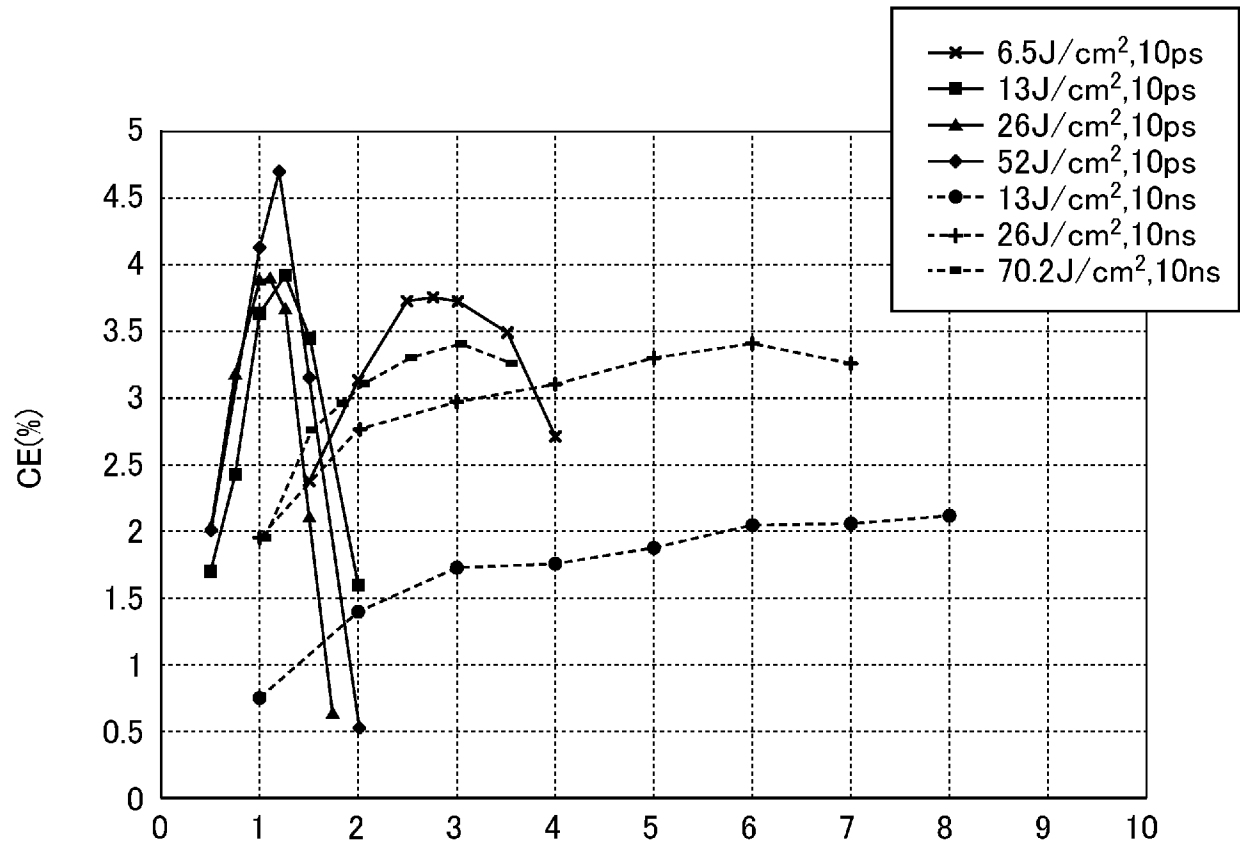
[請求項6]

前記第1のレーザ装置は、前記第2のパルスレーザ光のフルーエンスより小さく且つ $45 \text{ J} / \text{cm}^2$ 以上のフルーエンスを有する前記第1のパルスレーザ光を出力するように構成された、
請求項1～3の何れか一項記載の極端紫外光生成システム。

[図2]



[図3]



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4]

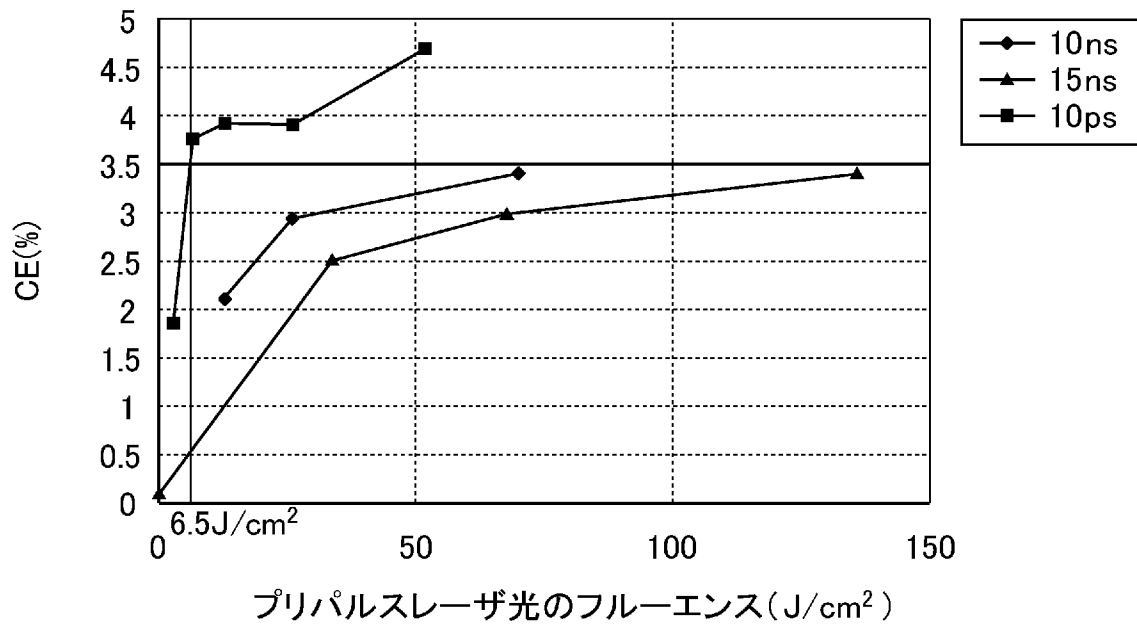


図 4A

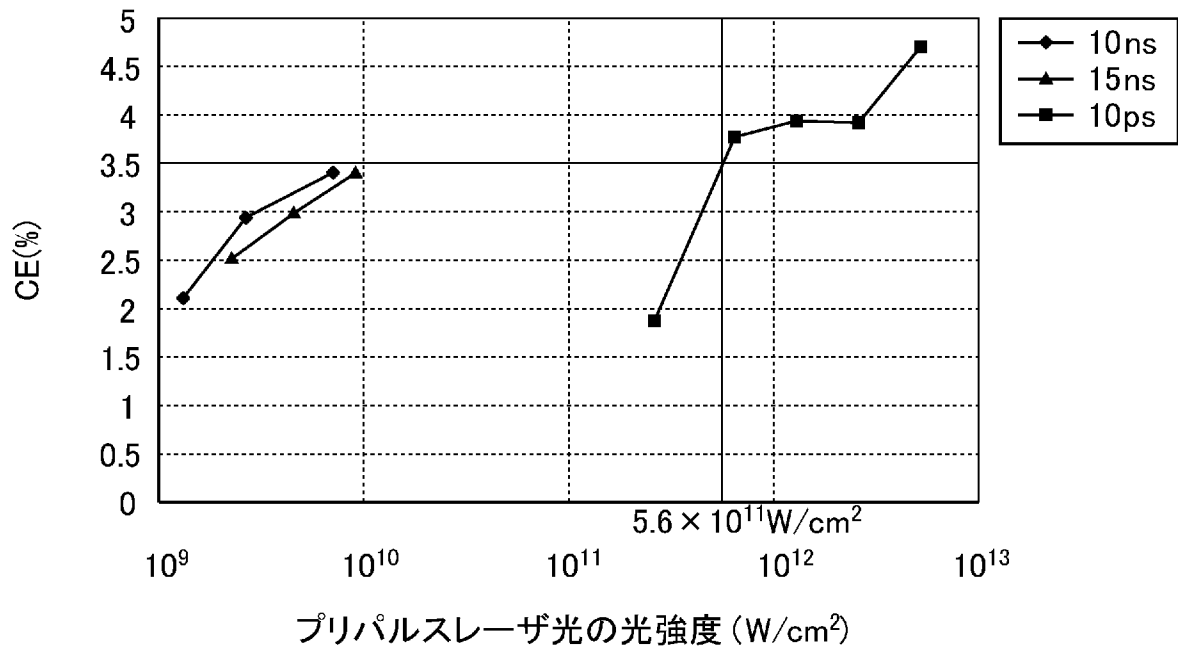


図 4B

[図5]

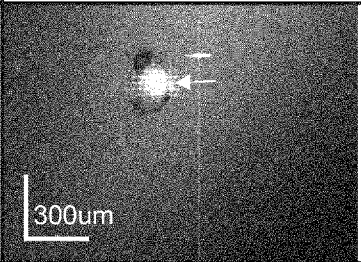
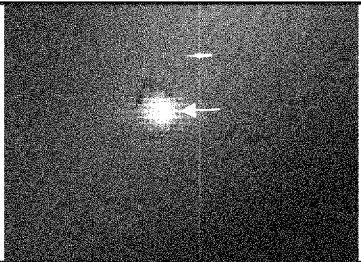
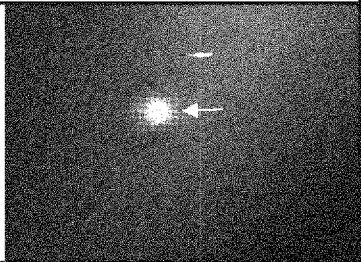
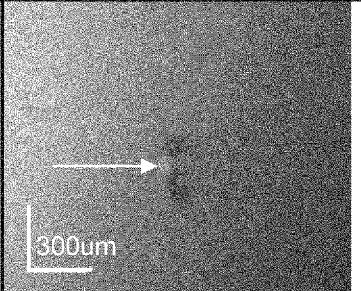
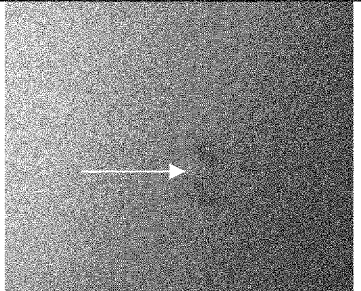
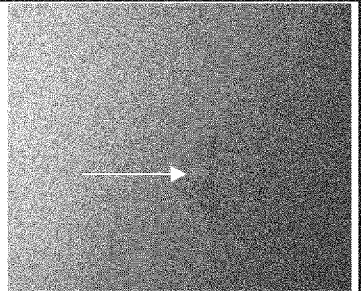
パルス幅10ps			
	52J/cm ² , 1.2 μ s	26J/cm ² , 1.1 μ s	13J/cm ² , 1.3 μ s
	CE 4.7%	CE 3.9%	CE 3.9%
60deg view			
90deg view			
Dt	384 μ m	360 μ m	365 μ m

図 5A

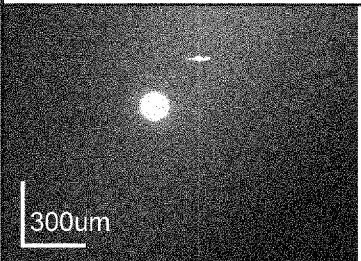
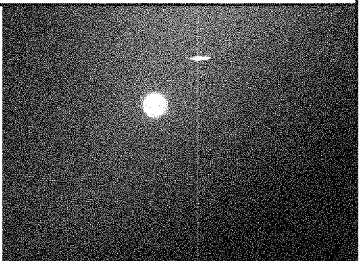
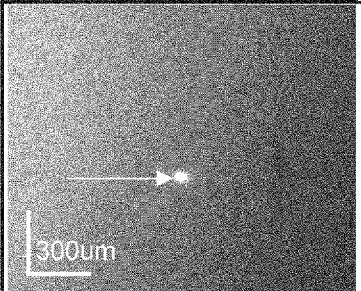
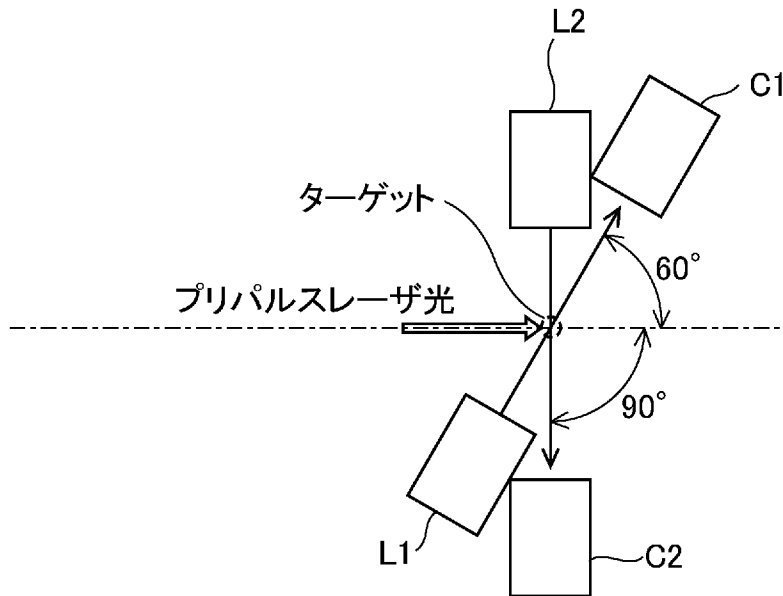
パルス幅10ns		
	70J/cm ² , 3 μ s	26J/cm ² , 5 μ s
	CE 3.4%	CE 2.9%
60deg view		
90deg view		
Dt	380 μ m	325 μ m

図 5B

[図6]



[図7]

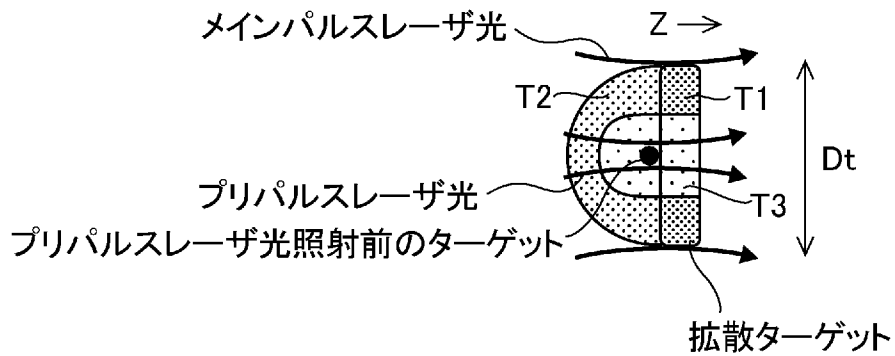


図 7A

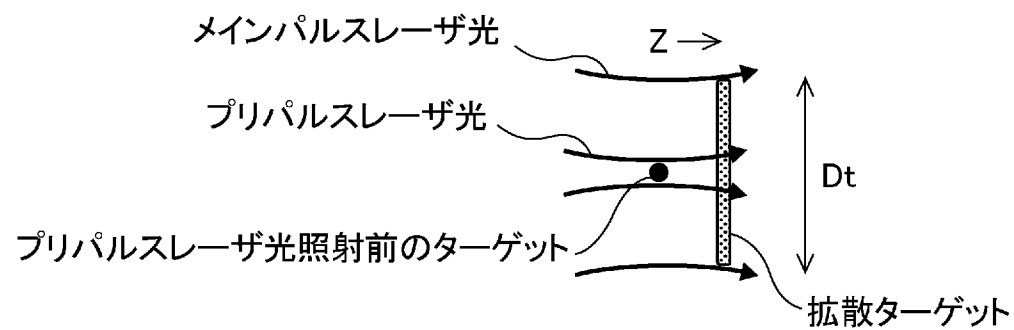


図 7B

[図8]

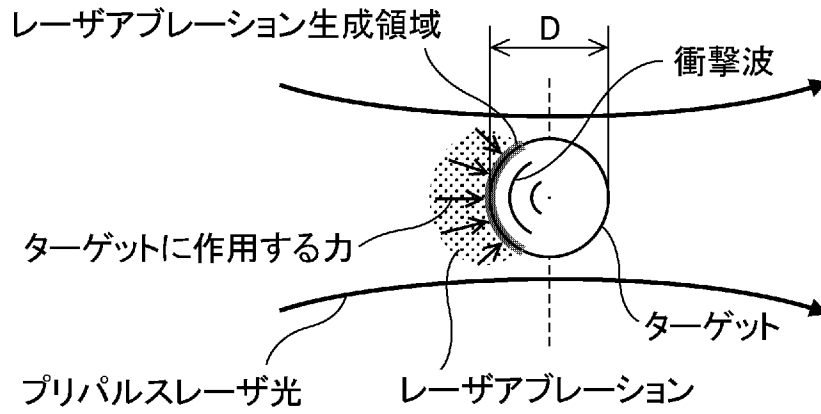


図 8A

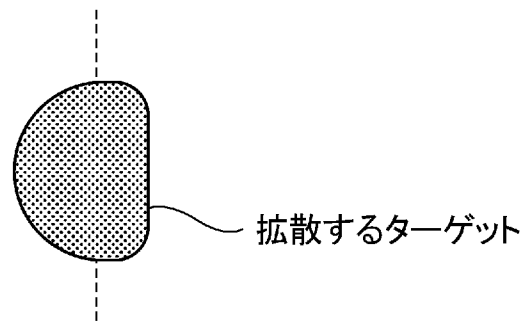


図 8B

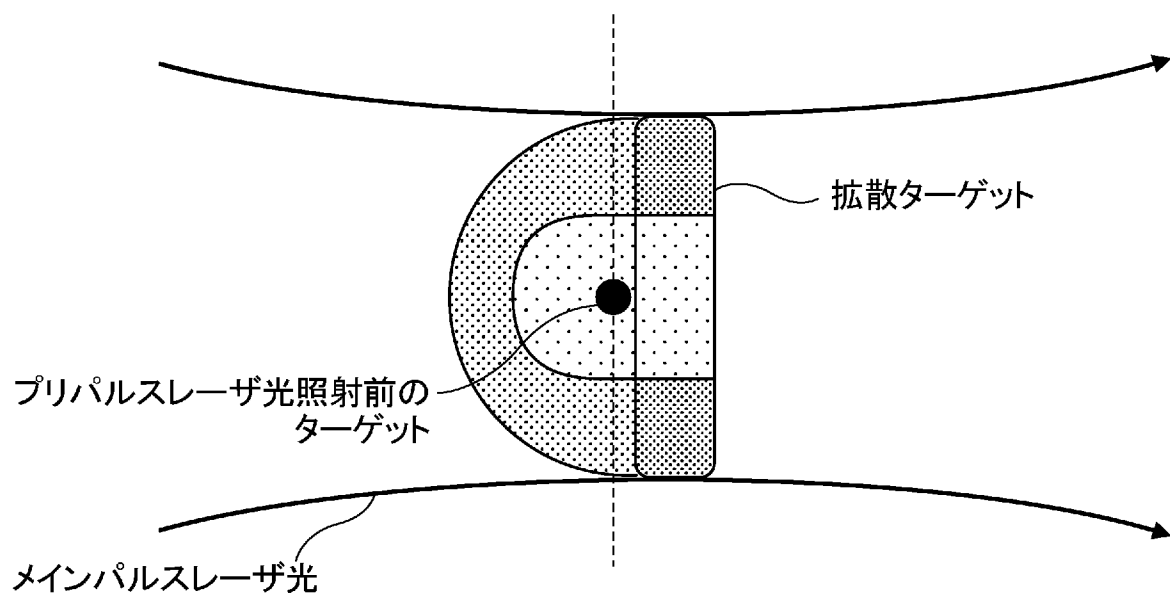


図 8C

[図9]

レーザアブレーション生成領域

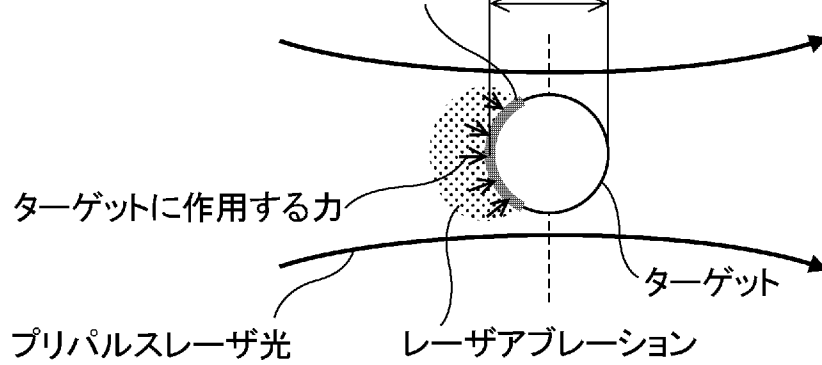


図 9A

レーザアブレーション生成領域

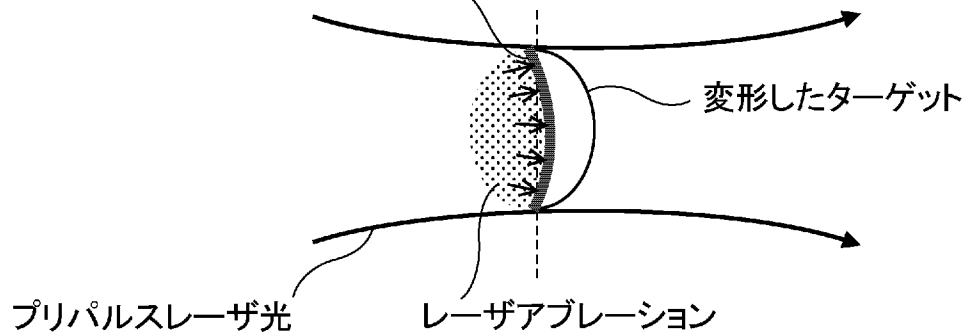


図 9B

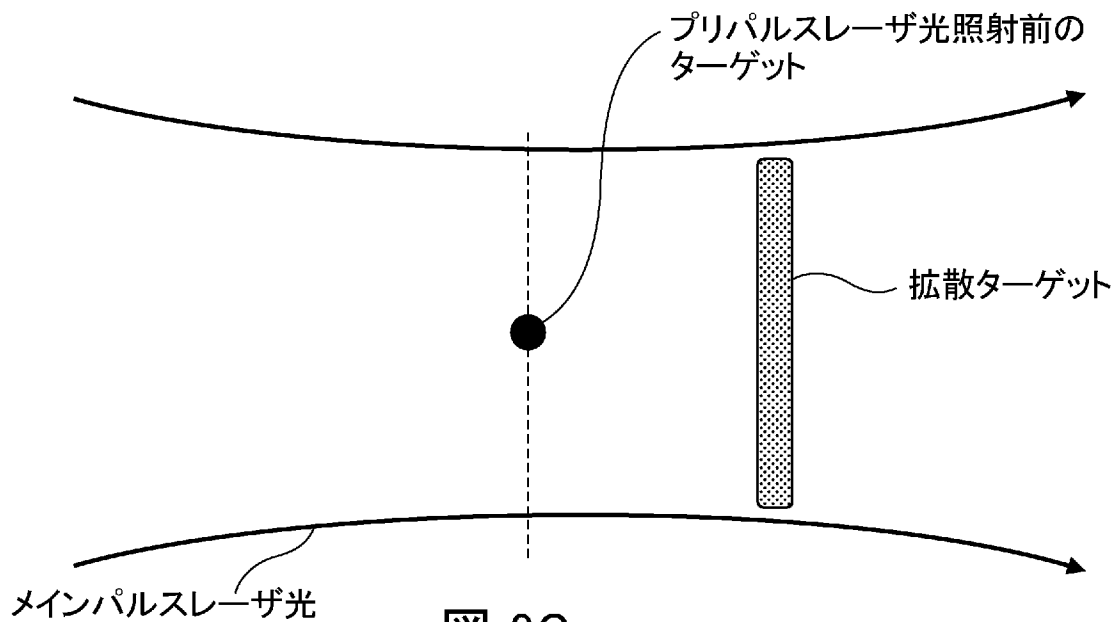
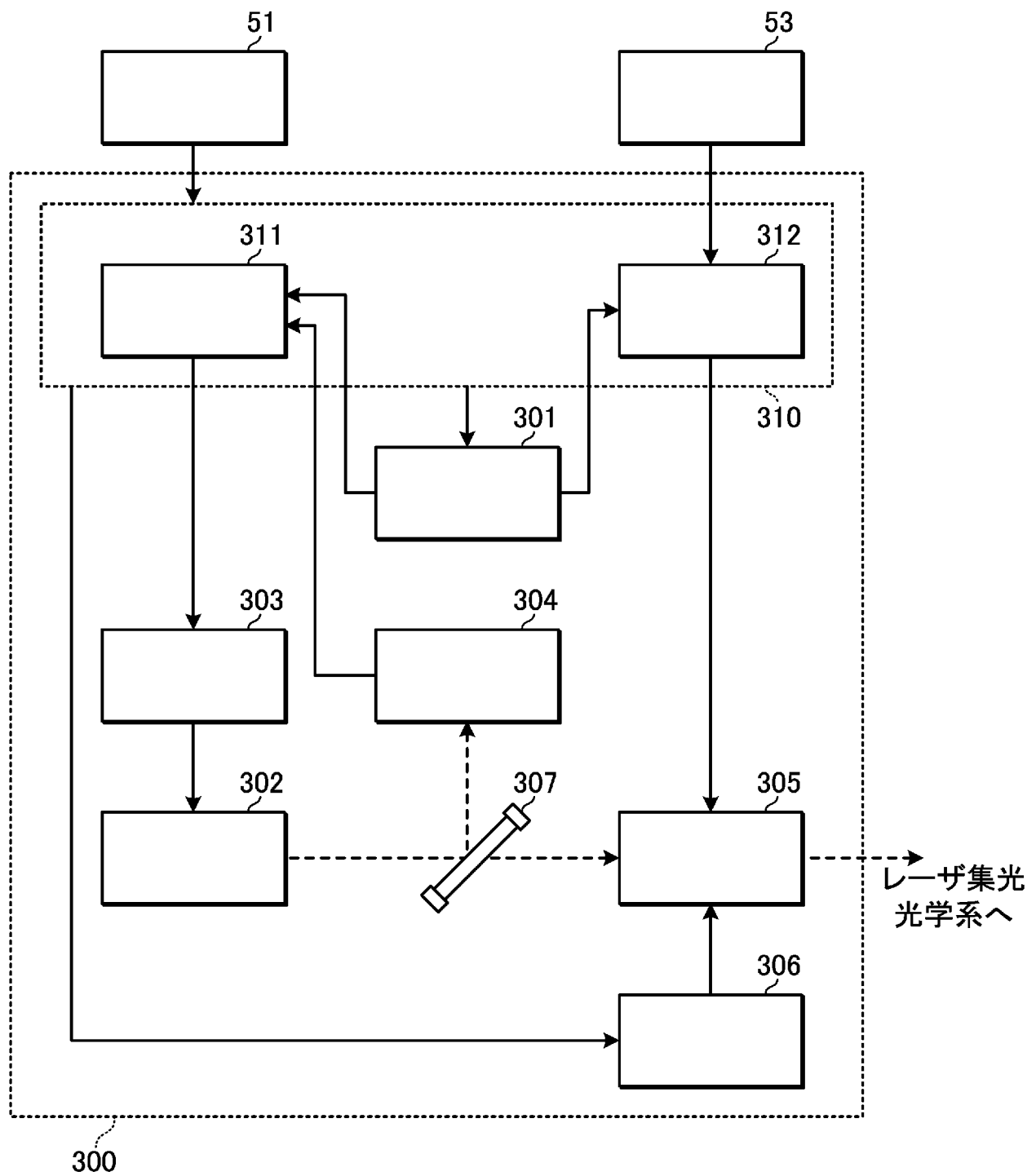
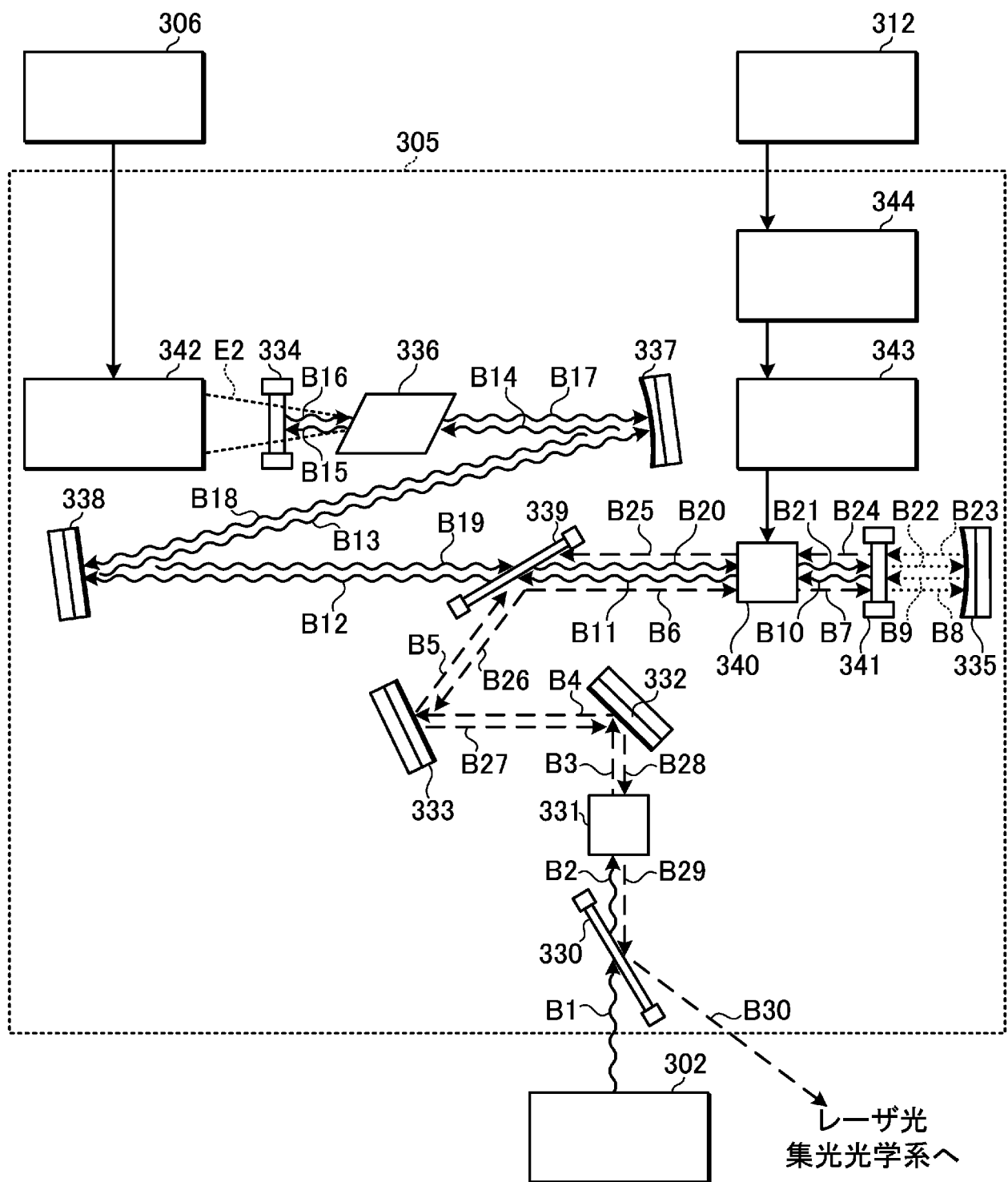


図 9C

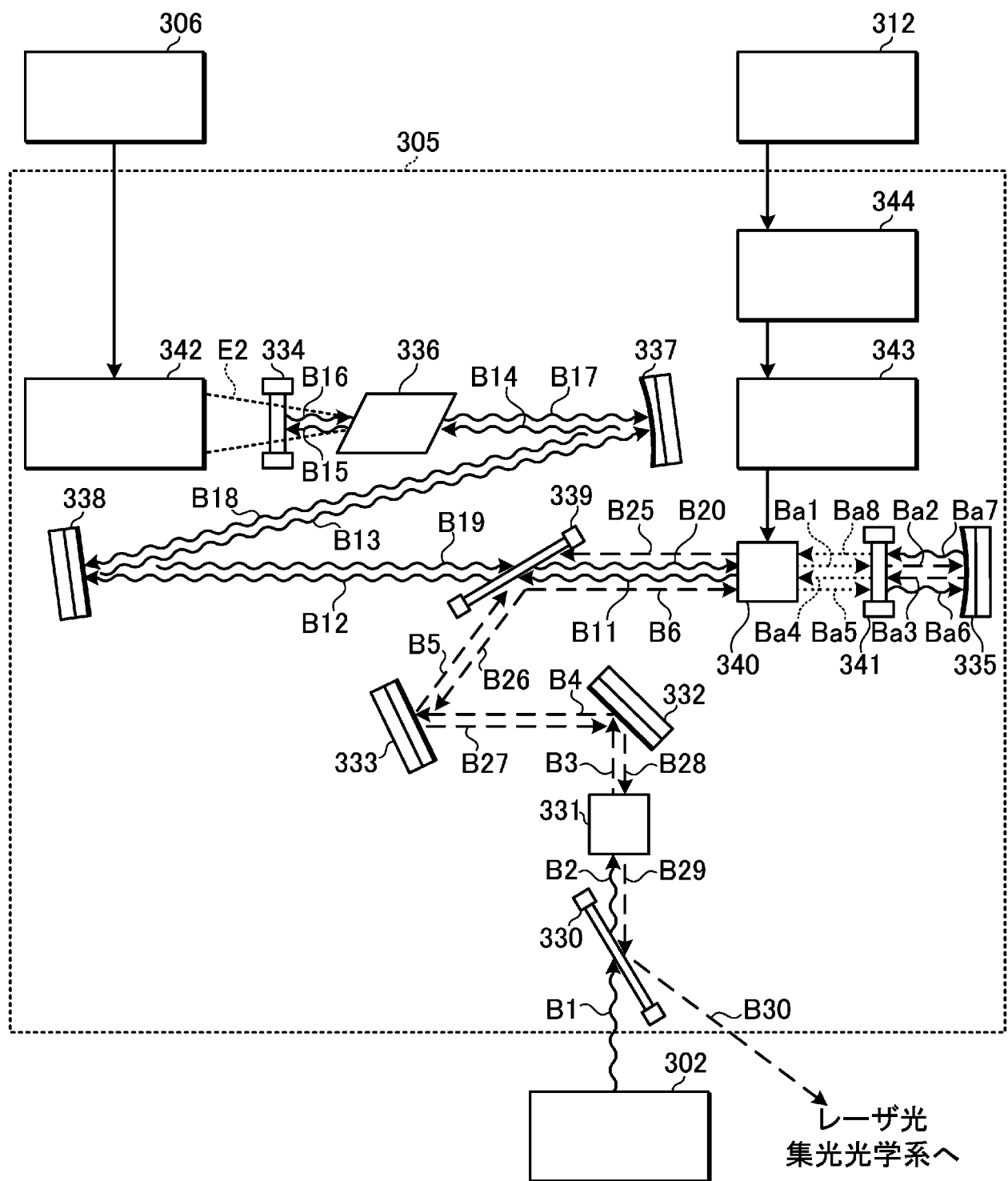
[図10]



[図12]



[図13]



[図14]

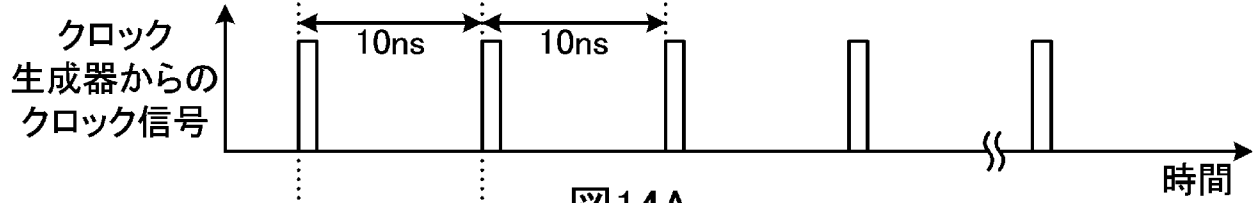


図14A

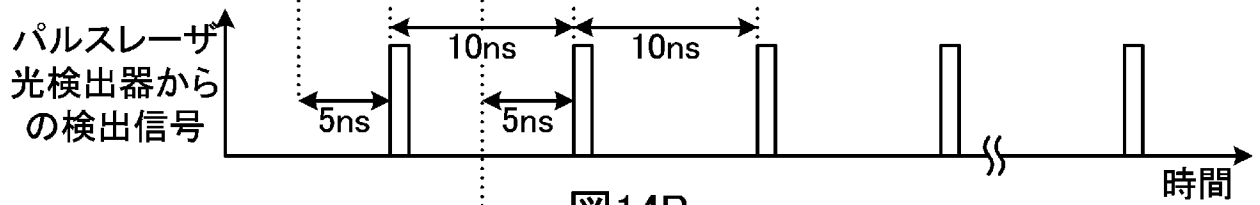


図14B

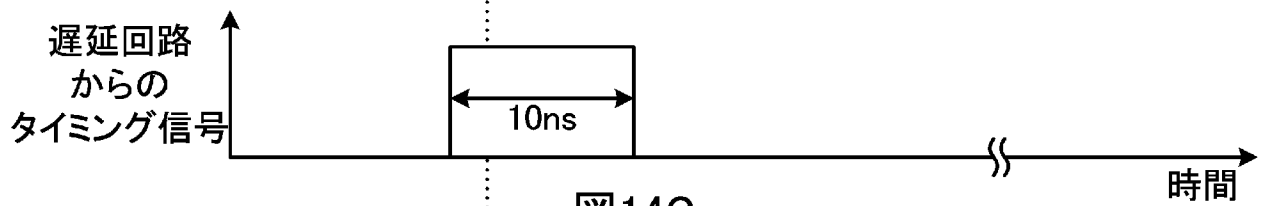


図14C



図14D

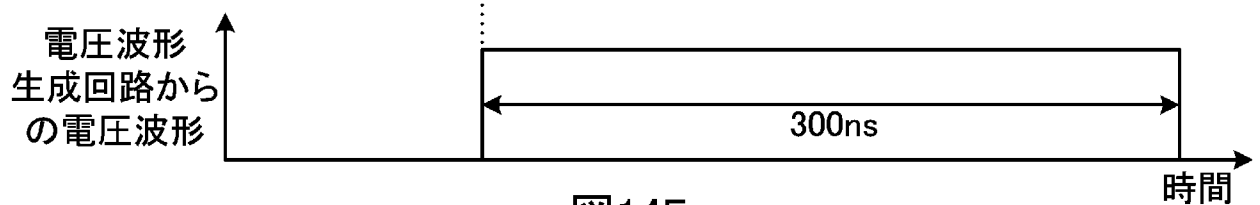
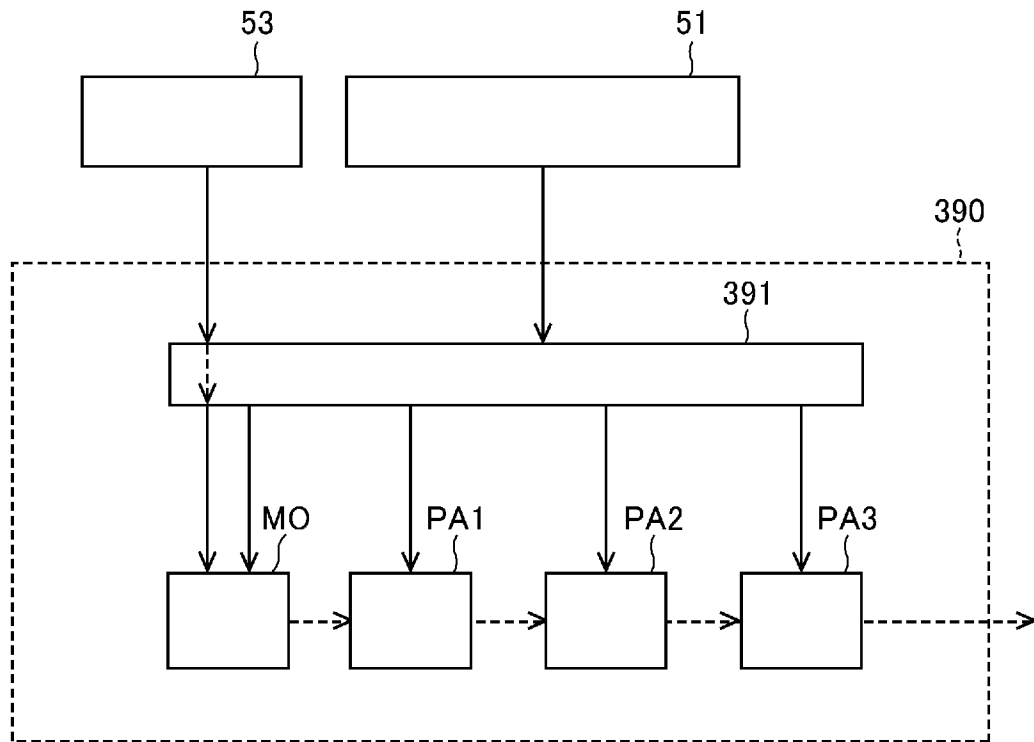
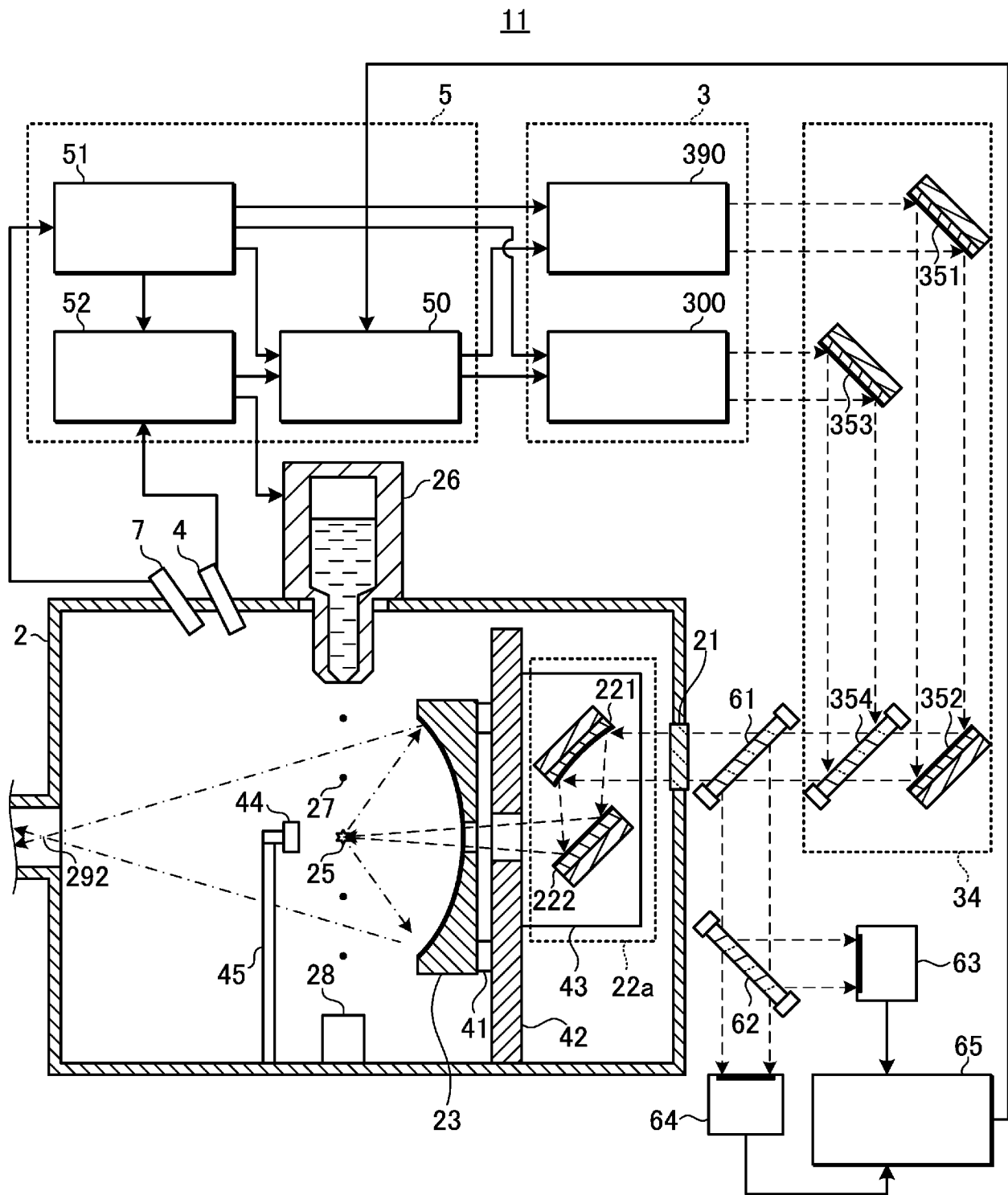


図14E

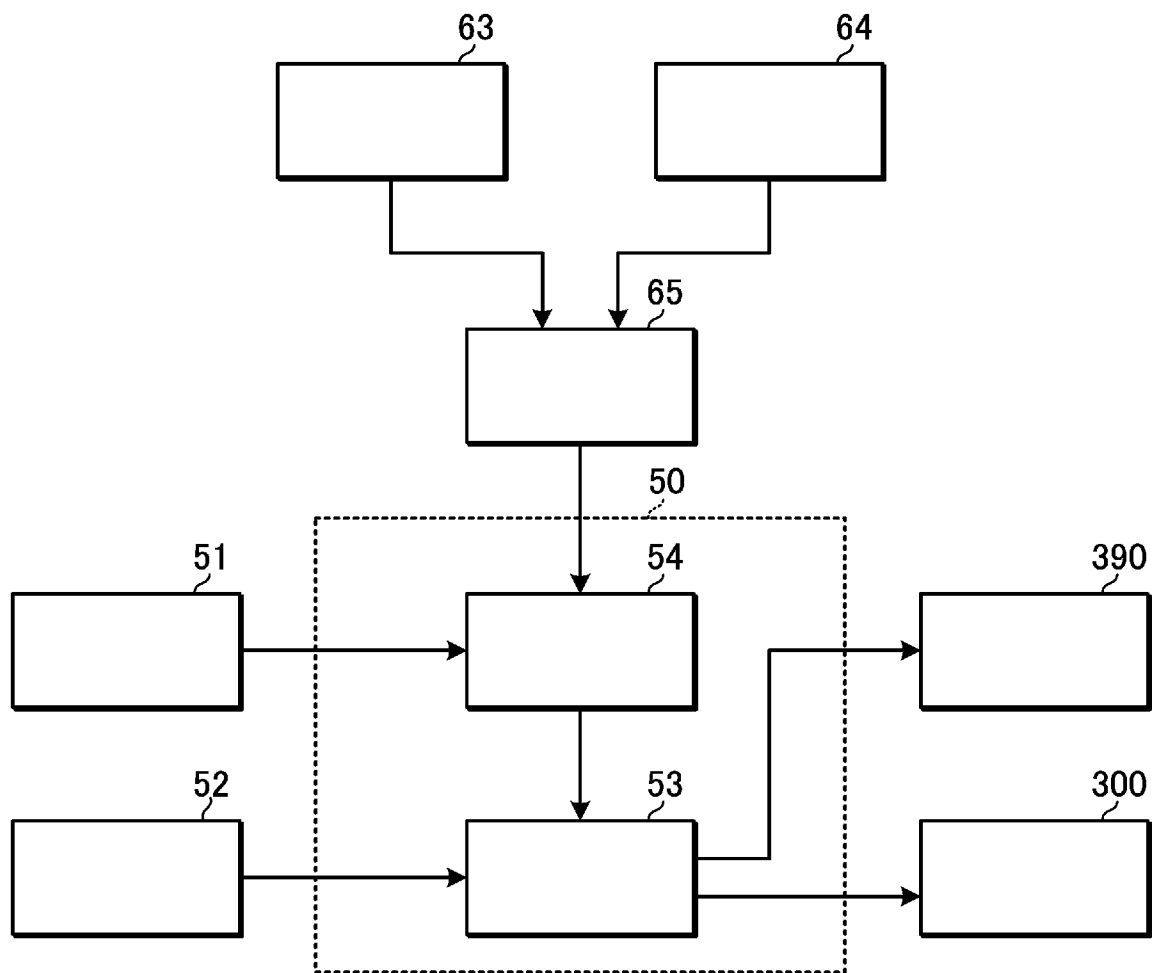
[図15]



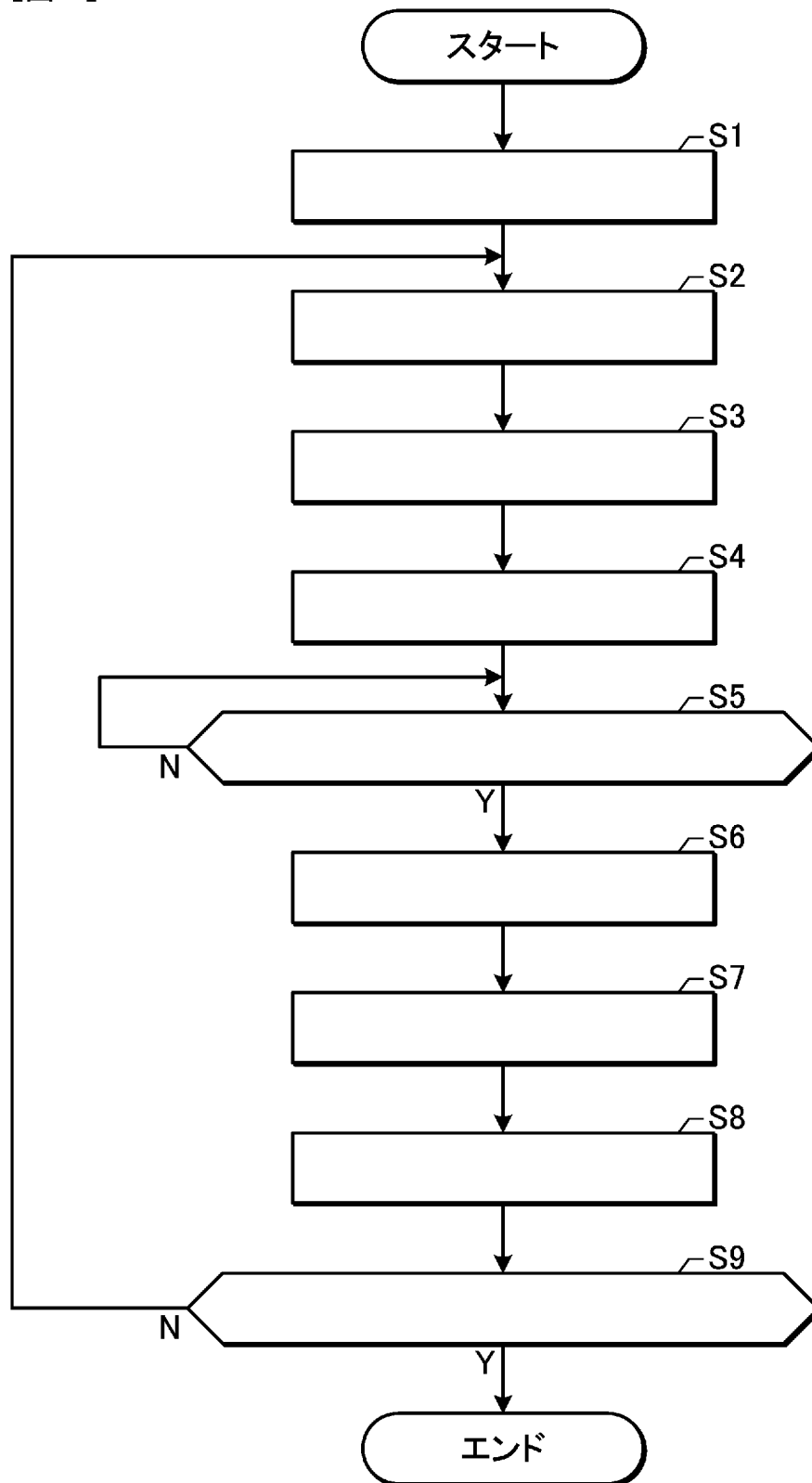
[図16]



[図17]



[図18]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2013/064249

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H05G2/00(2006.01)i, G03F7/20(2006.01)i, H01L21/027(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H05G2/00, G03F7/20, H01L21/027

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2013
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2013	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2013

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y	WO 2011/122397 A1 (Gigaphoton Inc.), 06 October 2011 (06.10.2011), paragraphs [0108] to [0112] & JP 2012-169241 A & US 2012/0305811 A1 & EP 2563099 A	1, 2 3-6
Y A	JP 2010-103499 A (Komatsu Ltd.), 06 May 2010 (06.05.2010), paragraphs [0082] to [0085] & US 2010/0090133 A1	3 1, 2, 4-6
Y A	JP 2008-204752 A (Komatsu Ltd.), 04 September 2008 (04.09.2008), paragraph [0032] & US 2008/0197298 A1	4-6 1-3

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
11 June, 2013 (11.06.13)

Date of mailing of the international search report
18 June, 2013 (18.06.13)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. H05G2/00(2006.01)i, G03F7/20(2006.01)i, H01L21/027(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. H05G2/00, G03F7/20, H01L21/027

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1 9 2 2 - 1 9 9 6 年
日本国公開実用新案公報	1 9 7 1 - 2 0 1 3 年
日本国実用新案登録公報	1 9 9 6 - 2 0 1 3 年
日本国登録実用新案公報	1 9 9 4 - 2 0 1 3 年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
X Y	WO 2011/122397 A1（ギガフォトン株式会社）2011.10.06, 第108 - 112段落 & JP 2012-169241 A & US 2012/0305811 A1 & EP 2563099 A	1, 2 3-6
Y A	JP 2010-103499 A（株式会社小松製作所）2010.05.06, 第82-8 5段落 & US 2010/0090133 A1	3 1, 2, 4-6
Y A	JP 2008-204752 A（株式会社小松製作所）2008.09.04, 第32段落 & US 2008/0197298 A1	4-6 1-3

C欄の続きにも文献が列挙されている。

パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

11.06.2013

国際調査報告の発送日

18.06.2013

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（I S A / J P）

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

後藤 順也

2Q

3101

電話番号 03-3581-1101 内線 3292