

(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
2018年3月15日(15.03.2018)



(10) 国際公開番号

WO 2018/047220 A1

(51) 国際特許分類:

H01L 21/268 (2006.01)

木県小山市大字横倉新田 4 0 0 番地 ギガ
フォトン株式会社内 Tochigi (JP).

(21) 国際出願番号:

PCT/JP2016/076103

(22) 国際出願日:

2016年9月6日(06.09.2016)

(25) 国際出願の言語:

日本語

(26) 国際公開の言語:

日本語

(71) 出願人: ギガフォトン株式会社(GIGAPHOTON
INC.) [JP/JP]; 〒3238558 栃木県小山市大字横
倉新田 4 0 0 番地 Tochigi (JP).

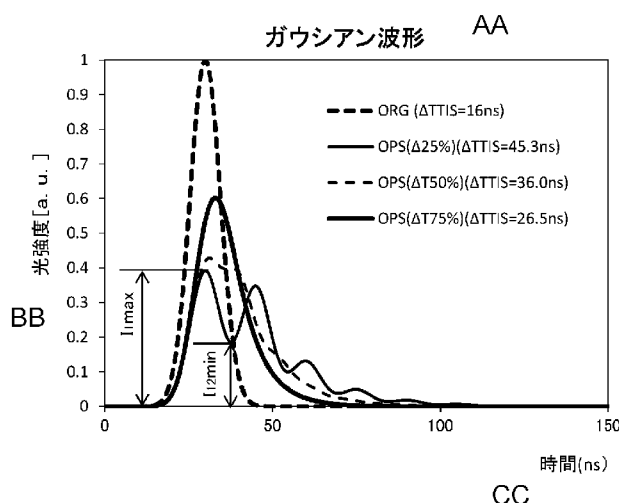
(72) 発明者: 田 中 智 史 (TANAKA, Satoshi);
〒3238558 栃木県小山市大字横倉新田 4 0 0
番地 ギガフォトン株式会社内 Tochigi (JP). 若
林 理(WAKABAYASHI, Osamu); 〒3238558 栃

(74) 代理人: 特許業務法人 小林国際特許事務所
(KYORITSU INSTITUTE); 〒1700004 東京都
豊島区北大塚 2 丁目 2 5 番 1 号 アミッ
クス大塚ビル 2 階 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, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR,
KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME,
MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO,
NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU,
RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY,

(54) Title: LASER DEVICE AND LASER ANNEAL DEVICE

(54) 発明の名称: レーザ装置およびレーザアニール装置



(57) **Abstract:** A laser device for laser annealing is provided with: A) a laser oscillator that outputs pulsed laser light; and B) an OPS device which is disposed on the optical path of the pulsed laser light output from the laser oscillator, and which includes at least one OPS for stretching the pulse time width of the incident pulsed laser light, wherein, among the OPSs, a first OPS of which a delay optical path length L that is the length of a delay optical path becomes the smallest has a delay optical path length L(1) which is in the range of the following expression (A). $\Delta T_{75\%} \times c \leq L(1) \leq \Delta T_{25\%} \times c$ Expression (A) where $\Delta T_{a\%}$ is the time full-width of the position at which the optical intensity exhibits the value of a% with respect to a peak value in the input waveform of pulsed laser light that is output from the laser oscillator and that becomes incident on the OPS device, and c is the speed of light.

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, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (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, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

- 一 国際調査報告 (条約第21条(3))

(57) 要約: レーザアニール用のレーザ装置は、以下を備える: A. パルスレーザ光を出力するレーザ発振器; 及び、B. レーザ発振器から出力されたパルスレーザ光の光路上に配置され、入射したパルスレーザ光のパルス時間幅をストレッチする少なくとも1つのOPSを含むOPS装置であって、OPSのうち、遅延光路の長さである遅延光路長Lが最小となる第1のOPSの遅延光路長L(1)が、以下の式(A)の範囲にあるOPS装置。 $\Delta T_{75\%} \times c \leq L(1) \leq \Delta T_{25\%} \times c \cdots \cdots$ 式(A) ここで、 $\Delta T_{a\%}$ は、前記レーザ発振器から出力され、前記OPS装置に入射するパルスレーザ光の入力波形において、光強度がピーク値に対してa%の値を示す位置の時間全幅であり、cは光速である。

明 細 書

発明の名称： レーザ装置およびレーザアニール装置

技術分野

[0001] 本開示は、レーザ装置およびレーザアニール装置に関する。

背景技術

[0002] ガラス基板を用いたフラットパネルディスプレイの駆動素子には薄膜トランジスタ(TFT: Thin Film Transistor)が用いられている。高精細ディスプレイの実現には、駆動力の高いTFTの作製が必要となる。TFTのチャネル材である半導体薄膜には、多結晶シリコンやIGZO (Indium gallium zinc oxide) などが用いられている。多結晶シリコンやIGZOは、アモルファスシリコンよりもキャリア移動度が高く、トランジスタのオン／オフ特性に優れている。

[0003] また、半導体薄膜は、より高機能なデバイスを実現する3D-ICへの適用も期待されている。3D-ICは、集積回路デバイスの最上層にセンサや増幅回路、CMOS回路などの能動素子を形成することにより実現される。そのため、より高品質な半導体薄膜を製造する技術が求められている。

[0004] さらに、情報端末機器の多様化にともない、小型・軽量で消費電力が少なく自由に折り

曲げが可能なフレキシブルディスプレイやフレキシブルコンピュータに対する要求が高まりつつある。そのため、PET (Polyethylene terephthalate) などのプラスチック基板上に高品質な半導体薄膜を形成する技術の確立が求められている。

[0005] ガラス基板上、集積回路上、あるいはプラスチック基板上に高品質な半導体薄膜を形成するためには、これらの基板に熱損傷を与えることなく半導体薄膜の結晶化を行う必要がある。ディスプレイに用いられるガラス基板では400℃、集積回路では400℃、プラスチック基板であるPETでは200℃以下

のプロセス温度が求められている。

[0006] 半導体薄膜の下地基板に熱損傷を与えることなく結晶化を行う技術としてレーザアニール法が用いられている。この方法では、熱拡散による基板への損傷を抑制するため、上層の半導体薄膜で吸収されるパルス紫外レーザ光が用いられる。

[0007] 半導体薄膜がシリコンである場合には、波長351nmのXeFエキシマレーザ、波長308nmのXeClエキシマレーザ、波長248nmのKrFエキシマレーザなどが用いられる。これら紫外領域のガスレーザは、固体レーザと比較してレーザ光の干渉性が低く、レーザ光照射面でのエネルギー均一性に優れ、高いパルスエネルギーで広い領域を均一にアニールできるという特徴を有する。

先行技術文献

特許文献

[0008] 特許文献1：WO2014/156818号

特許文献2：特表2008-546188号公報

特許文献3：米国特許公開2012/0260847号公報

概要

[0009] 本開示の1つの観点に係るレーザアニールに用いられるレーザ装置は、A、パルスレーザ光を出力するレーザ発振器、およびOP S装置を備える。OP S装置は、レーザ発振器から出力されたパルスレーザ光の光路上に配置され、入射した前記パルスレーザ光の一部を透過して、他の一部を、遅延光路を周回させて出力することにより、パルスレーザ光のパルス時間幅をストレッチする第1のOP Sを含むOP S装置であって、第1のOP Sの前記遅延光路の長さである遅延光路長L(1)が、以下の式(A)の範囲にある。

$$\Delta T_{75\%} \times c \leq L(1) \leq \Delta T_{25\%} \times c \cdots \cdots \text{式(A)}$$

ここで、 $\Delta T_{a\%}$ は、レーザ発振器から出力され、OP S装置に入射するパルスレーザ光の入力波形において、光強度がピーク値に対してa%の値を示す位置の時間全幅であり、cは光速である。

図面の簡単な説明

[0010] 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、比較例に係るレーザアニール装置の構成を概略的に示す。

[図2]図2は、比較例のレーザ装置の構成を概略的に示す。

[図3]図3は、O P Sの作用の説明図である。

[図4]図4は、比較例に係るO P S装置への入力波形とO P S装置からの出力波形である。

[図5]図5は、第1実施形態に係るレーザ装置の構成を示す。

[図6]図6は、パルス全幅の説明図である。

[図7]図7は、遅延光路長 $L(1)$ が $\Delta T_{75\%} \times c$ の場合のパルスレーザ光を示す。

[図8]図8は、遅延光路長 $L(2)$ が $\Delta T_{50\%} \times c$ の場合のパルスレーザ光を示す。

[図9]図9は、遅延光路長 $L(3)$ が $\Delta T_{25\%} \times c$ の場合のパルスレーザ光を示す。

[図10]図10は、ガウシアン波形の入力波形と出力波形である。

[図11]図11は、XeFエキシマレーザの入力波形と出力波形である。

[図12]図12は、第2実施形態に係る3段構成のO P S装置を有するレーザ装置を概略的に示す。

[図13]図13は、3段構成のO P S装置の作用の説明図である。

[図14]図14は、3段構成のO P S装置の出力波形である。

[図15A]図15Aは、 $L(1)$ が $\Delta T_{75\%} \times c$ の出力波形である。

[図15B]図15Bは、 $L(1)$ が $\Delta T_{50\%} \times c$ の出力波形である。

[図15C]図15Cは、 $L(1)$ が $\Delta T_{25\%} \times c$ の出力波形である。

[図16A]図16Aは、XeFエキシマレーザにおける、 $L(1)$ が $\Delta T_{75\%} \times c$ の出力波形である。

[図16B]図16Bは、XeFエキシマレーザにおける、 $L(1)$ が $\Delta T_{50\%} \times c$

の出力波形である。

[図16C]図16Cは、XeFエキシマレーザにおける、 $L(1)$ が $\Delta T_{25\%} \times c$ の出力波形である。

[図17]図17は、XeFエキシマレーザにおける、 $L(1)$ が3.5mの出力波形である。

[図18]図18は、OPS装置の段数とTISパルス時間幅の関係を示すグラフである。

[図19]図19は、複数段のOPS装置の構成図である。

[図20]図20は、第3実施形態に係るMOPA方式のレーザ装置を概略的に示す。

[図21]図21は、第3実施形態の1つの実施例の出力波形である。

[図22A]図22Aは、放電タイミング遅延時間DSDTとパルスエネルギーの関係を示すグラフである。

[図22B]図22Bは、放電タイミング遅延時間DSDTとTISパルス時間幅の関係を示すグラフである。

[図23A]図23Aは、第3実施形態において、放電タイミング遅延時間DSDT = 10nsの場合の出力波形である。

[図23B]図23Bは、第3実施形態において、放電タイミング遅延時間DSDT = 15nsの場合の出力波形である。

[図23C]図23Cは、第3実施形態において、放電タイミング遅延時間DSDT = 20nsの場合の出力波形である。

[図24]図24は、図22Bとは別の、放電タイミング遅延時間DSDTとTISパルス時間幅の関係を示すグラフである。

[図25]図25は、KrFエキシマレーザの実施例の出力波形である。

[図26]図26は、遅延光路長 $L(1)$ と光強度比 I_{mr} の関係を示すグラフである。

[図27A]図27Aは、ビームスプリッタの反射率RBを変化させた場合の出力波形である。

[図27B]図27Bは、反射率 R_B と光強度等の関係を示すグラフである。

[図27C]図27Cは、反射率 R_B とTISパルス時間幅の関係を示すグラフである。

[図28A]図28Aは、 $L(1) = \Delta T_{25\%} \times c$ 、 $L(k) = 1.8 \times L(k-1)$ の条件で遅延光路長を設定した場合の出力波形である。

[図28B]図28Bは、 $L(1) = \Delta T_{25\%} \times c$ 、 $L(k) = 2.0 \times L(k-1)$ の条件で遅延光路長を設定した場合の出力波形である。

[図28C]図28Cは、 $L(1) = \Delta T_{25\%} \times c$ 、 $L(k) = 2.2 \times L(k-1)$ の条件で遅延光路長を設定した場合の出力波形である。

[図29A]図29Aは、 $L(1) = \Delta T_{50\%} \times c$ 、 $L(k) = 1.8 \times L(k-1)$ の条件で遅延光路長を設定した場合の出力波形である。

[図29B]図29Bは、 $L(1) = \Delta T_{50\%} \times c$ 、 $L(k) = 2.0 \times L(k-1)$ の条件で遅延光路長を設定した場合の出力波形である。

[図29C]図29Cは、 $L(1) = \Delta T_{50\%} \times c$ 、 $L(k) = 2.2 \times L(k-1)$ の条件で遅延光路長を設定した場合の出力波形である。

[図30A]図30Aは、 $L(1) = \Delta T_{75\%} \times c$ 、 $L(k) = 1.8 \times L(k-1)$ の条件で遅延光路長を設定した場合の出力波形である。

[図30B]図30Bは、 $L(1) = \Delta T_{75\%} \times c$ 、 $L(k) = 2.0 \times L(k-1)$ の条件で遅延光路長を設定した場合の出力波形である。

[図30C]図30Cは、 $L(1) = \Delta T_{75\%} \times c$ 、 $L(k) = 2.2 \times L(k-1)$ の条件で遅延光路長を設定した場合の出力波形である。

[図31]図29～図30の出力波形における、OPS装置の段数とTISパルス時間幅の関係を示すグラフである。

[図32]図32は、MOPA方式のKrFエキシマレーザの出力波形である。

実施形態

[0011] <内容>

1. 概要

2. 比較例に係るレーザアニール装置

- 2. 1 レーザアニール装置の構成
- 2. 2 レーザアニール装置の動作
- 2. 3 レーザ装置の詳細
 - 2. 3. 1 光学パルスストレッチャ（O P S : Optical Pulse Stretcher）を有するレーザ装置の構成
 - 2. 3. 2 O P S の詳細
- 2. 4 課題
- 3. 第1実施形態のレーザ装置およびこれを用いるレーザアニール装置
 - 3. 1 構成
 - 3. 2 O P S 装置の作用
 - 3. 3 O P S 装置の効果
 - 3. 4 X e F エキシマレーザの実施例
 - 3. 5 その他
- 4. 第2実施形態のレーザ装置およびこれを用いるレーザアニール装置
 - 4. 1 構成
 - 4. 2 O P S 装置の作用
 - 4. 3 効果
 - 4. 4 X e F エキシマレーザの実施例 1
 - 4. 5 X e F エキシマレーザの実施例 2
 - 4. 6 変形例（第1～第n個のO P S で構成されるO P S 装置）
 - 4. 7 その他
- 5. 第3実施形態のレーザ装置およびこれを用いるレーザアニール装置
 - 5. 1 構成
 - 5. 2 動作
 - 5. 3 X e F エキシマレーザ、M O P A 方式、1 段構成のO P S 装置の実施例
 - 5. 3. 1 構成
 - 5. 3. 2 作用

5. 3. 3 効果

5. 4 放電タイミング遅延時間 $DSDT$ 、パルスエネルギー、 TIS パルス時間幅 ΔT_{TIS} の関係

5. 5 MOPA方式とOPS装置の組合せによるパルス時間幅の変動抑制

5. 5. 1 MOPA方式とOPS装置の組合せにおける出力波形

5. 5. 2 TIS パルス時間幅 ΔT_{TIS} の変動抑制の効果

5. 5. 3 その他

6. 各種条件の好ましい範囲

6. 1 遅延光路長 $L(1)$ のより好ましい範囲

6. 2 ビームスプリッタの反射率 RB の好ましい範囲

6. 3 遅延光路長 $L(1)$ の好ましい範囲

6. 4 その他

[0012] 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および動作の全てが本開示の構成およ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。

[0013] 1. 概要

本開示は、半導体薄膜の結晶化のために、半導体薄膜にパルスレーザ光を照射してアニールするレーザアニール装置に用いられる、レーザアニール用レーザ装置に関する。

[0014] 2. 比較例に係るレーザアニール装置

2. 1 レーザアニール装置の構成

図1は、比較例に係るレーザアニール装置の構成を概略的に示す。レーザアニール装置は、レーザ装置3と、アニール装置4とを備えている。レーザ装置3とアニール装置4は光路管（図示せず）によって接続されている。

- [0015] レーザ装置3は、パルス発振によるパルスレーザ光を出力するレーザ装置であり、ArF、KrF、XeClまたはXeFをレーザ媒質とするエキシマパルスレーザ装置である。ArFエキシマパルスレーザ装置の場合、パルスレーザ光の中心波長は約193.4nmである。KrFエキシマパルスレーザ装置の場合、パルスレーザ光の中心波長は約248.4nmである。XeClエキシマパルスレーザ装置の場合、パルスレーザ光の中心波長は約308nmである。XeFエキシマパルスレーザ装置の場合、パルスレーザ光の中心波長は約351nmである。
- [0016] アニール装置4は、スリット16と、高反射ミラー17と、転写光学系18と、テーブル27と、XYZステージ28と、アニール制御部32とを含んでいる。
- [0017] スリット16は、パルスレーザ光のビーム断面のうちの光強度分布が均一な領域が通過するように配置されている。高反射ミラー17は、レーザ装置3から入力されたパルスレーザ光を転写光学系18に向けて反射する。転写光学系18は、被照射物31の表面に、スリット16の転写像を結像させる光学系である。転写光学系38は、1枚の凸レンズで構成されていてもよいし、1つ又は複数の凸レンズと1つ又は複数の凹レンズとを含む光学系であってもよい。
- [0018] テーブル27は、被照射物31を支持する。被照射物31は、パルスレーザ光が照射されてアニールが行われる対象であり、本例では、TFI基板を製造するための中間生産物である。XYZステージ28は、テーブル27を支持している。XYZステージ28は、X軸方向、Y軸方向、Z軸方向に移動可能であり、テーブル27の位置を調整することにより、被照射物31の位置を調整可能である。XYZステージ28は、被照射物31の表面に対して、転写光学系18による転写像が結像するように被照射物31の位置を調整する。
- [0019] アニール制御部32は、レーザ装置3に対して、目標パルスエネルギーE_tのデータと発光トリガ信号を送信して、被照射物31に照射するパルスレー

ザ光のパルスエネルギーや照射タイミングを制御する。また、アニール制御部 32 は、XYZ ステージ 28 を制御する。

[0020] 被照射物 31 は、例えば、ガラス基板と、ガラス基板上に形成されたアモルファスシリコン膜とを含んでいる。アモルファスシリコン膜は、アモルファスシリコン (a-Si) の薄膜であり、アニールが行われる対象である。

[0021] 2. 2 レーザアニール装置の動作

アニールを行う場合には、まず、被照射物 31 が XYZ ステージ 28 にセットされる。アニール制御部 32 は、XYZ ステージ 28 を制御して、被照射物 31 の X 軸方向と Y 軸方向の位置を調整することにより、転写光学系 18 の結像位置に被照射物 31 を移動する。

[0022] 次に、アニール制御部 32 は、目標パルスエネルギー E_t のデータをレーザ装置 3 に送信する。アニール制御部 32 は、所定の繰り返し周波数で、予め設定されたパルス数に応じた数の発光トリガ信号を送信する。

[0023] レーザ装置 3 は、受信した目標パルスエネルギー E_t および発光トリガ信号に基づいて、パルスレーザ光を出力する。レーザ装置 3 が出力したパルスレーザ光は、アニール装置 4 に入力される。アニール装置 4 において、パルスレーザ光は、スリット 16 を透過して、高反射ミラー 17 で反射して転写光学系 18 に入射する。

[0024] 転写光学系 18 は、スリット 16 の転写像を被照射物 31 の表面に転写する。これにより、被照射物 31 表面のアモルファスシリコン膜に対して、パルスレーザ光が照射される。アモルファスシリコン膜に対してパルスレーザ光が照射されると、アモルファスシリコン膜は融点以上の温度に上昇して溶融する。アモルファスシリコン膜は、溶融後、再び固化する過程で結晶化する。これにより、アモルファスシリコン膜が、多結晶シリコン膜に改質される。

[0025] 2. 3 レーザ装置の詳細

2. 3. 1 光学パルスストレッチャ (OPS : Optical Pulse Stretcher) を有するレーザ装置の構成

図2は、レーザ装置3の具体的構成を示す。レーザ装置3は、レーザ発振器であるマスターオシレータMOと、OPS41と、パルスエネルギー計測部63と、シャッタ64と、レーザ制御部66とを含んでいる。

[0026] マスターオシレータMOは、レーザチャンバ71と、一对の電極72aおよび72bと、充電器73と、パルスパワーモジュール（PPM）74とを含んでいる。マスターオシレータMOは、さらに、高反射ミラー76と、出力結合ミラー77とを含んでいる。図2においては、レーザ光の進行方向及び放電方向に略垂直な方向からみたレーザチャンバ71の内部構成が示されている。

[0027] レーザチャンバ71は、上述のレーザ媒質が封入されるチャンバである。一对の電極72aおよび72bは、レーザ媒質を放電により励起するための電極として、レーザチャンバ71内に配置されている。レーザチャンバ71には開口が形成され、この開口を電気絶縁部78が塞いでいる。電極72aは電気絶縁部78に支持され、電極72bはリターンプレート71dに支持されている。このリターンプレート71dは図示しない配線でレーザチャンバ71の内面と接続されている。電気絶縁部78には、導電部78aが埋め込まれている。導電部78aは、パルスパワーモジュール74から供給される高電圧を電極72aに印加する。

[0028] 充電器73は、パルスパワーモジュール74の中の図示しない充電コンデンサに所定の電圧で充電する直流電源装置である。パルスパワーモジュール74は、例えば、レーザ制御部66によって制御されるスイッチ74aを含んでいる。スイッチ74aがOFFからONになると、パルスパワーモジュール74は、充電器73に保持されていた電気エネルギーからパルス状の高電圧を生成し、この高電圧を一对の電極72aおよび72b間に印加する。

[0029] 一对の電極72aおよび72b間に高電圧が印加されると、一对の電極72aおよび72b間が絶縁破壊され、放電が起こる。この放電のエネルギーにより、レーザチャンバ71内のレーザ媒質が励起されて高エネルギー準位に移行する。励起されたレーザ媒質が、その後低エネルギー準位に移行するとき、

そのエネルギー準位差に応じた光を放出する。

[0030] レーザチャンバ71の両端にはウインドウ71aおよび71bが設けられている。レーザチャンバ71内で発生した光は、ウインドウ71aおよび71bを介してレーザチャンバ71の外部に出射する。

[0031] 高反射ミラー76は、レーザチャンバ71のウインドウ71aから出射された光を高い反射率で反射してレーザチャンバ71に戻す。出力結合ミラー77は、レーザチャンバ71のウインドウ71bから出力される光のうちの一部を透過させて出力し、他の一部を反射させてレーザチャンバ71内に戻す。

[0032] 従って、高反射ミラー76と出力結合ミラー77とで、光共振器が構成される。レーザチャンバ71から出射した光は、高反射ミラー76と出力結合ミラー77との間で往復し、電極72aと電極72bとの間のレーザゲイン空間を通過する度に増幅される。増幅された光の一部が、出力結合ミラー77を介して、パルスレーザ光として出力される。

[0033] OPS41は、OPS装置を構成する。OPS装置は、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一部を透過させ、他の一部を、遅延光路を周回させて出力することにより、パルスレーザ光のパルス時間幅をストレッチする。本例のOPS装置は、1個のOPS41で構成される。OPS41は、マスターオシレータMOの後段に配置されている。OPS41は、ビームスプリッタ42と、第1～第4の凹面ミラー51～54とを含んでいる。

[0034] ビームスプリッタ42は、部分反射ミラーであり、例えば、パルスレーザ光を高透過するCaF₂基板にパルスレーザ光が部分反射する膜をコートして形成される。ビームスプリッタ42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上に配置されている。ビームスプリッタ42は、入射したパルスレーザ光の一部を透過させ、他の一部を反射させる。

[0035] 第1～第4の凹面ミラー51～54は、パルスレーザ光のパルス時間幅をストレッチするための遅延光路を構成している。第1～第4の凹面ミラー5

1～54は、全て同じ曲率半径 r の鏡面を有する。第1および第2の凹面ミラー51, 52は、ビームスプリッタ42で反射された光が、第1の凹面ミラー51で反射され、第2の凹面ミラー52に入射するように配置されている。第3および第4の凹面ミラー53, 54は、第2の凹面ミラー52で反射された光が、第3の凹面ミラー53で反射され、さらに第4の凹面ミラー54で反射され、再びビームスプリッタ42に入射するように配置されている。

[0036] ビームスプリッタ42と第1の凹面ミラー51との間の距離、および第4の凹面ミラー54とビームスプリッタ42との間の距離は、それぞれ曲率半径 r の半分、すなわち、 $r/2$ である。また、第1の凹面ミラー51と第2の凹面ミラー52との間の距離、第2の凹面ミラー52と第3の凹面ミラー53との間の距離、および第3の凹面ミラー53と第4の凹面ミラー54との間の距離は、それぞれ曲率半径 r と同じである。

[0037] 第1～第4の凹面ミラー51～54は、全て同じ焦点距離 F を有する。焦点距離 F は、曲率半径 r の半分、すなわち、 $F = r/2$ である。したがって、第1～第4の凹面ミラー51～54により構成される遅延光路の長さである遅延光路長 L は、焦点距離 F の8倍である。すなわち、OPS41は、 $L = 8F$ の関係を有する。

[0038] 遅延光路を周回せずにOPS41から出力されるパルスレーザ光と、遅延光路を周回した後に出力されるパルスレーザ光との間には、第1～第4の凹面ミラー51～54によって形成される遅延光路長 L に応じた時間差が生じる。これにより、OPS41は、パルスレーザ光のパルス時間幅を伸張する。

[0039] パルスエネルギー計測部63は、OPS41を通過したパルスレーザ光の光路に配置されている。パルスエネルギー計測部63は、例えば、ビームスプリッタ63aと、集光光学系63bと、光センサ63cとを含んでいる。

[0040] ビームスプリッタ63aは、OPS41を通過したパルスレーザ光を高い透過率でシャッタ64に向けて透過させるとともに、パルスレーザ光の一部

を集光光学系 6 3 b に向けて反射する。集光光学系 6 3 b は、ビームスプリッタ 6 3 a によって反射された光を光センサ 6 3 c の受光面に集光する。光センサ 6 3 c は、受光面に集光されたパルスレーザ光のパルスエネルギーを検出し、検出されたパルスエネルギーのデータをレーザ制御部 6 6 に出力する。

[0041] レーザ制御部 6 6 は、アニール制御部 3 2 との間で各種信号を送受信する。例えば、レーザ制御部 6 6 は、アニール制御部 3 2 から、発光トリガ信号、目標パルスエネルギー E_t のデータ等を受信する。また、レーザ制御部 6 6 は、充電器 7 3 に対して充電電圧の設定信号を送信したり、パルスパワーモジュール 7 4 に対してスイッチ ON 又は OFF の指令信号を送信したりする。

[0042] レーザ制御部 6 6 は、パルスエネルギー計測部 6 3 からパルスエネルギーのデータを受信する。レーザ制御部 6 6 は、このパルスエネルギーのデータを参照して充電器 7 3 の充電電圧を制御する。充電器 7 3 の充電電圧を制御することにより、パルスレーザ光のパルスエネルギーが制御される。さらに、レーザ制御部 6 6 は、発光トリガ信号に対して所定の一定の時間で放電させるように、設定された充電電圧値に応じて、発光トリガ信号のタイミングを補正する。

[0043] シャッタ 6 4 は、パルスエネルギー計測部 6 3 のビームスプリッタ 6 3 a を透過したパルスレーザ光の光路に配置されている。レーザ制御部 6 6 は、レーザ発振の開始後、パルスエネルギー計測部 6 3 から受信するパルスエネルギーと目標パルスエネルギー E_t との差が許容範囲内となるまでの間は、シャッタ 6 4 を閉じるように制御する。レーザ制御部 6 6 は、パルスエネルギー計測部 6 3 から受信するパルスエネルギーと目標パルスエネルギー E_t との差が許容範囲内になったら、シャッタ 6 4 を開くように制御する。レーザ制御部 6 6 は、シャッタ 6 4 の開閉信号と同期して、パルスレーザ光の発光トリガ信号の受け付けが可能となったことを表す信号を、アニール制御部 3 2 に送信する。

[0044] 2. 3. 2 OPS の詳細

図3に示すように、マスターオシレータMOから出力されたパルスレーザ光PLは、OP S 4 1内のビームスプリッタ4 2に入射する。ビームスプリッタ4 2に入射したパルスレーザ光PLのうち一部は、ビームスプリッタ4 2を透過し、遅延光路を周回していない0周回光PS₀としてOP S 4 1から出力される。

[0045] ビームスプリッタ4 2に入射したパルスレーザ光PLのうち、ビームスプリッタ4 2により反射された反射光は、遅延光路に進入し、第1の凹面ミラー5 1と第2の凹面ミラー5 2とにより反射される。ビームスプリッタ4 2における反射光の光像は、第1および第2の凹面ミラー5 1, 1 2 bにより、等倍の第1の転写像として結像される。そして、第3の凹面ミラー5 3と第4の凹面ミラー5 4とによって、等倍の第2の転写像が、ビームスプリッタ4 2の位置に結像する。

[0046] 第2の転写像としてビームスプリッタ4 2に入射した光の一部は、ビームスプリッタ4 2により反射され、遅延光路を1回周回した1周回光PS₁としてOP S 4 1から出力される。この1周回光PS₁は、0周回光PS₀から遅延時間DTだけ遅れて出力される。このDTは、 $DT = L / c$ と表される。ここで、cは光速である。

[0047] 第2の転写像としてビームスプリッタ4 2に入射した光のうち、ビームスプリッタ4 2を透過した透過光は、再び遅延光路に進入し、第1～第4の凹面ミラー5 1～1 2 dにより反射されて、再びビームスプリッタ4 2に入射する。ビームスプリッタ4 2により反射された反射光は、遅延光路を2回周回した2周回光PS₂としてOP S 4 1から出力される。この2周回光PS₂は、1周回光PS₁から遅延時間DTだけ遅れて出力される。

[0048] この後、光の遅延光路の周回が繰り返されることにより、OP S 4 1からは、3周回光PS₃、4周回光PS₄、・・・と、順にパルス光が出力される。また、OP S 4 1から出力されるパルス光は、ビームスプリッタ4 2の透過または反射を繰り返す度に減衰するため、遅延光路の周回数が多くなるほど光強度が低下する。

[0049] 図3に示すように、パルスレーザ光 PL が $OPS41$ に入射した結果、パルスレーザ光 PL は、時間差を有する複数のパルス光 $PS_0, PS_1, PS_2, \dots$ に分解されて出力される。 $OPS41$ から出射するパルスレーザ光 PT は、パルスレーザ光 PL が $OPS41$ により分解されてなる複数の周回光 PS_i ($i = 0, 1, 2, \dots$) が合成されたものである。ここで、 i は遅延光路の周回数を表す。

[0050] 上記説明から明らかなとおり、 $OPS41$ の遅延光路長 L とは、パルスレーザ光が $OPS41$ に入射した場合に、 $OPS41$ から分解されて順次出力される1つのパルス光（周回光 PS ）とその次に出力されるパルス光（周回光 PS ）との光路長の差である。

[0051] 図4は、マスターオシレータ MO から出力され $OPS41$ に入射するパルスレーザ光 PL の入力波形と、 $OPS41$ によってパルス時間幅がストレッチされた後のパルスレーザ光 PT の出力波形とを示すグラフである。グラフの縦軸は光強度 [$a. u.$] であり、横軸は時間 [ns] である。光強度 [$a. u.$] は、元波形のピーク値を1として規格化した値である。図4において、波線で示すグラフがパルスレーザ光 PL の入力波形 ORG であり、ストレッチ前の元波形である。入力波形 ORG は、実機で計測した元波形のデータをプロットしたものである。対して、実線で示すグラフは、入力波形 ORG に基づいてシミュレーションを行ったパルスレーザ光の出力波形 OPS である。出力波形 OPS のシミュレーションにおいて、比較例に係る $OPS41$ の条件は、遅延光路長 $L = 14 m$ であり、ビームスプリッタ42の反射率 $R = 60\%$ である。

[0052] 入力波形 ORG の TIS パルス時間幅 ΔT_{TIS} が約 $19.0 ns$ であるのに対して、ストレッチ後の出力波形 OPS は、 TIS パルス時間幅 ΔT_{TIS} が約 $55.0 ns$ に伸びている。

[0053] ここで、 TIS パルス時間幅 ΔT_{TIS} は、パルス時間幅 ΔT を表す1つの指標であり、下式(1)によって定義される。ここで、 t は時間である。 $I(t)$ は、時間 t における光強度である。パルス時間幅の指標として TIS パル

ス時間幅 ΔT_{TIS} を用いることにより、1つのピークを有する入力波形ORGと、複数のピークを有するストレッチ後の出力波形OPSとのパルス時間幅を比較することができる。

[0054] [数1]

$$\Delta T_{TIS} = \frac{\left[\int I(t) dt \right]^2}{\int I(t)^2 dt} \dots (1)$$

[0055] 2. 4 課題

レーザアニールによってアモルファスシリコン膜を結晶化して生成される多結晶シリコン膜は、多数の結晶により構成されるが、各結晶の粒径が大きいことが好ましい。これは、例えば、多結晶シリコン膜をTF Tのチャンネルに用いる場合において、各結晶の粒径が大きい程、チャンネル内における結晶間の界面の数が小さくなり、界面で生じるキャリアの散乱が減少するためである。すなわち、多結晶シリコン膜の各結晶の粒径が大きい程、キャリア移動度が高く、TF Tのスイッチング特性が向上する。

[0056] このように、多結晶シリコンの結晶の粒径を大きくするには、レーザアニールの際のアモルファスシリコンの溶融状態が持続する時間を長くして、アモルファスシリコンの固化時間を長くすることが効果的であることが知られている。そのためには、アモルファスシリコンに照射されるパルスレーザ光のパルス時間幅を伸ばす必要がある。

[0057] また、図4の出力波形OPSに示したように、OPS 41によってパルス時間幅をストレッチすると、ストレッチ後のパルスレーザ光の出力波形は複数の周回光PSを合成した波形となるため、光強度のピークが複数生じる場合が多い。この場合には、単純に出力波形のパルス時間幅を伸ばすだけでなく、出力波形において1つ目のピークと2つ目のピークの光強度の落ち込みが少ない方が結晶の粒径を大きくする効果が高いことが実験により検証されている。この理由は、出力波形において、1つ目のピークと2つ目のピークの谷間において光強度の落ち込みが大きいと、谷間の区間において溶融状態

のアモルファスシリコンが放熱により冷却され、パルスレーザ光の照射中において再凝固する可能性があるためと考えられる。

[0058] また、出力波形において、3つ目以降のピークが生じる場合があるが、3つ目以降のピークは、2つ目までのピークに対して光強度の減衰が大きいいため、ピーク後の光強度の落ち込みの程度は比較的小さくなる。そのため、再凝固を抑制して結晶の粒径を大きくする効果を得るためには、1つ目と2つ目のピーク間の谷間の光強度の落ち込みをできるだけ抑えることが重要となる。

[0059] ここで、出力波形において、再凝固の原因となる光強度の落ち込みの程度を表す指標として、光強度比 I_{mr} を次の式(2)によって定義する。

$$I_{mr} = I_{12min} / I_{1max} \times 100 \cdots \text{式(2)}$$

光強度 I_{1max} は、図4に示すように、出力波形OPSにおいて、1つ目のピークにおける光強度のピーク値である最大値であり、光強度 I_{12min} は、1つ目と2つ目のピーク間の谷間の光強度の最小値である。すなわち、光強度比 I_{mr} は、1つ目のピークの光強度に対する、1つ目と2つ目のピーク間の谷間の光強度の割合を示す。

[0060] 図4に示す出力波形OPSにおいては、1つ目と2つ目のピーク間の間隔が広く、谷間の光強度 I_{12min} はほぼ0である。したがって、出力波形OPSの光強度比 I_{mr} は0%となる。

[0061] このように、レーザアニールにおいて、パルスレーザ光のパルス時間幅を伸ばしても、光強度比 I_{mr} が小さいと、溶融状態のアモルファスシリコンの再凝固が生じて、多結晶シリコンの結晶の粒径が大きくなりにくいという課題があった。

[0062] 3. 第1実施形態のレーザ装置およびこれを用いるレーザアニール装置

3. 1 構成

図5は、第1実施形態に係るレーザアニール装置の構成を概略的に示す。第1実施形態のレーザアニール装置は、図1を参照しながら説明した比較例のレーザアニール装置のレーザ装置3に代えて、レーザ装置3Aを備えてい

る。第1実施形態のレーザ装置3Aと、比較例に係るレーザ装置3との相違点は、OPS41に代えて、OPS41Aが設けられている点である。OPS41Aは、請求項における第1のOPSに相当する。第1実施形態のレーザ装置3Aにおいては、1つのOPS41AによってOPS装置が構成される。他の構成は、レーザ装置3と同様であるので、同一の構成については同一の符号を付して説明を省略し、以下、相違点を中心に説明する。

[0063] OPS41Aは、OPS41と同様に、ビームスプリッタ42と、第1～第4の凹面ミラー51A～54Aで構成されるが、OPS41よりも遅延光路長Lが短い。具体的には、OPS41Aの第1～第4の凹面ミラー51A～54Aの焦点距離Fは、比較例に係るOPS41の第1～第4の凹面ミラー51～54の焦点距離Fよりも短い。上述のとおり、遅延光路が第1～第4の4枚の凹面ミラー51A～54Aで構成される場合、遅延光路長 $L = 8F$ である。OPS41Aは、OPS41よりも、第1～第4の凹面ミラー51A～54Aの焦点距離Fが短く、かつ、各凹面ミラー51A～54Aの配置間隔も焦点距離Fに応じた間隔になっているため、OPS41よりも遅延光路長Lが短い。

[0064] OPS41Aは第1のOPSに相当するため、OPS41Aの遅延光路長Lを $L(1)$ とすると、遅延光路長 $L(1)$ は、次式(3)に示す範囲に設定されている。

$$\Delta T_{75\%} \times c \leq L(1) \leq \Delta T_{25\%} \times c \cdots \cdots \text{式(3)}$$

ここで、 $\Delta T_{a\%}$ は、マスターオシレータMO（レーザ発振器に相当）から出力され、OPS41A（第1のOPSを有するOPS装置に相当）に入射するパルスレーザ光のパルス時間幅である。 $\Delta T_{a\%}$ は、TISパルス時間幅 ΔT_{TIS} と同様に、パルスレーザ光のパルス時間幅を表す指標の1つであるが、TISパルス時間幅 ΔT_{TIS} と異なり、次のように定義される。

[0065] 図4において示したとおり、マスターオシレータMOから出力され、OPS41Aに入射するパルスレーザ光の入力波形ORGは、1つのピークを有する。 $\Delta T_{a\%}$ は、図6に示すように、入力波形ORGにおいて、それぞれ、光

強度がピーク値に対して $a\%$ の値を示す位置の時間全幅である。式 (3) において、 c は光速である。特に、 $\Delta T_{50\%}$ は、入力波形 ORG において、光強度がピーク値に対して 50% の値を示す位置の時間全幅であり、いわゆる半値全幅 (FWHM: Full Width at Half Maxim) である。以下、 $\Delta T_{a\%}$ を、 TIS パルス時間幅 ΔT_{TIS} と区別するため、パルス全幅と呼ぶ。

[0066] 図 6 に示す入力波形 ORG は、マスターオシレータ MO が出力されるパルス波形がガウシアン波形であると仮定して算出したものである。本例の入力波形 ORG のパルス時間幅の具体的な値を例示すると次のとおりである。半値全幅であるパルス全幅 $\Delta T_{50\%}$ は 10.6 ns である。パルス全幅 $\Delta T_{75\%}$ および $\Delta T_{25\%}$ は、それぞれ、パルス全幅 $\Delta T_{75\%} = 6.8 \text{ ns}$ 、パルス全幅 $\Delta T_{25\%} = 1.5 \text{ ns}$ である。また、 TIS パルス時間幅 $\Delta T_{TIS} = 1.6 \text{ ns}$ である。

[0067] 3.2 OPS 装置の作用

図 7 に示すグラフは、 $OPS41A$ の遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{75\%} \times c$ とした場合のストレッチ後の出力波形 OPS を示す。図 7 に示すとおり、遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{75\%} \times c$ とすると、 $OPS41A$ から出力される各周回光 PS の時間差がパルス全幅 $\Delta T_{75\%}$ となる。光速 $c = 0.3 \text{ m/ns}$ として計算する。パルス全幅 $\Delta T_{75\%} = 6.8 \text{ ns}$ の場合は、遅延光路長 $L(1) = 2.04 \text{ m}$ である。

[0068] ビームスプリッタ 42 の反射率は約 60% に設定されている。そのため、0 周回光 PS_0 はビームスプリッタ 42 を透過して出力されるため、光強度のピーク値は、元波形のピーク値を 1 とすると、 0.4 (約 40%) に減衰する。1 周回光 PS_1 は、ビームスプリッタ 42 で 1 回反射して遅延光路に進入し、もう 1 回反射して出力されるので、光強度のピーク値は、 $0.6 \times 0.6 = 0.36$ (約 36%) に減衰する。同様に、2 周回光 PS_2 の光強度のピーク値は、 $0.6 \times 0.4 \times 0.6 = 0.144$ (約 14.4%) に減衰し、3 周回光 PS_3 の光強度のピーク値は、 $0.6 \times 0.4 \times 0.4 \times 0.6 = 0.0576$ (約 5.76%) に減衰する。

[0069] 図 8 に示すグラフは、 $OPS41A$ の遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{50\%} \times c$ とし

た場合のストレッチ後の出力波形OPSを示す。図9に示すグラフは、OPS41Aの遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{25\%} \times c$ とした場合のストレッチ後の出力波形OPSを示す。図8に示すとおり、遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{50\%} \times c$ とすると、OPS41Aから出力される各周回光PSの時間差がパルス全幅 $\Delta T_{50\%}$ となる。図9に示すとおり、遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{25\%} \times c$ とすると、OPS41Aから出力される各周回光PSの時間差がパルス全幅 $\Delta T_{25\%}$ となる。各周回光PSの光強度は、図7のグラフと同様である。

[0070] パルス全幅 $\Delta T_{50\%} = 10.6 \text{ ns}$ の場合は、遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{50\%} \times c = 10.6 \text{ ns} \times 0.3 \text{ m/ns} = 3.18 \text{ m}$ であり、パルス全幅 $\Delta T_{25\%} = 15 \text{ ns}$ の場合は、遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{50\%} \times c = 15 \text{ ns} \times 0.3 \text{ m/ns} = 4.5 \text{ m}$ である。

[0071] 図7～図9において、 $\Delta T_{75\%}$ の出力波形OPS、 $\Delta T_{50\%}$ の出力波形OPSおよび $\Delta T_{25\%}$ の出力波形OPSは、各周回光PSを分割した状態の波形で示される。図10において、 $\Delta T_{75\%}$ の出力波形OPS、 $\Delta T_{50\%}$ の出力波形OPSおよび $\Delta T_{25\%}$ の出力波形OPSは、各周回光PSを合成した状態の波形で示される。図10において、入力波形ORGは太い波線で示し、 $\Delta T_{75\%}$ の出力波形OPSは太い実線で示し、 $\Delta T_{50\%}$ の出力波形OPSは細い波線で示し、 $\Delta T_{25\%}$ の出力波形OPSは細い実線で示す。

[0072] 図10の各出力波形OPSに基づいてTISパルス時間幅 ΔT_{TIS} を計算すると、 $\Delta T_{75\%}$ の出力波形OPSの場合は、 $\Delta T_{\text{TIS}} = 26.5 \text{ ns}$ となり、 $\Delta T_{50\%}$ の出力波形OPSの場合は、 $\Delta T_{\text{TIS}} = 36.0 \text{ ns}$ となり、 $\Delta T_{25\%}$ の出力波形OPSの場合は、 $\Delta T_{\text{TIS}} = 45.3 \text{ ns}$ となる。入力波形ORGは $\Delta T_{\text{TIS}} = 16 \text{ ns}$ であるため、OPS41Aを用いることにより、各出力波形OPSはパルス時間幅が伸びている。

[0073] TISパルス時間幅 ΔT_{TIS} について各出力波形OPSを比較すると、 $\Delta T_{25\%}$ の出力波形OPSのTISパルス時間幅 ΔT_{TIS} が 45.3 ns で最大となり、 $\Delta T_{75\%}$ の出力波形OPSのTISパルス時間幅 ΔT_{TIS} が 26.5 ns で最小となる。

- [0074] $\Delta T_{25\%}$ の出力波形O P Sは、3つの出力波形の中で最長の遅延光路長L（1）に設定された場合の波形である。そのため、 $\Delta T_{25\%}$ の出力波形O P Sにおいては、各周回光P Sの時間差が最大となるため、他の出力波形O P SよりもT I Sパルス時間幅 ΔT_{TIS} が伸びる。その反面、各周回光P Sの時間差が大きいため、他の出力波形O P Sと比較して、ピーク間の谷間が生じやすい。
- [0075] 対して、 $\Delta T_{75\%}$ の出力波形O P Sは、最短の遅延光路長L（1）に設定された場合の出力波形である。そのため、各周回光P Sの時間差が最小となる。 $\Delta T_{75\%}$ の出力波形O P Sは、 $\Delta T_{25\%}$ の出力波形O P Sと反対に、他の出力波形よりも、ピーク間の谷間は生じにくい、T I Sパルス時間幅 ΔT_{TIS} は最小となる。遅延光路長（1）が中間の長さの $\Delta T_{50\%}$ の出力波形O P SのT I Sパルス時間幅 ΔT_{TIS} は、36.0 nsで中間の値となる。
- [0076] また、光強度比I m rについて各出力波形O P Sを比較すると、次のことがわかる。まず、遅延光路長L（1）が最小の条件となる、 $\Delta T_{75\%}$ の出力波形O P Sでは、ピークが1つとなるため、ピーク間の谷間が無い。そのため、1つ目のピークの光強度の最大値である I_{1max} と谷間の光強度の最小値である I_{12min} が一致し、 $\Delta T_{75\%}$ の出力波形O P Sの光強度比I m r（= I_{12min} / I_{1max} 、上記式（2）参照）は100%となる。遅延光路長L（1）が中間の条件となる、 $\Delta T_{50\%}$ の出力波形O P Sについても、ピーク間の谷間は僅かであるため、 $\Delta T_{50\%}$ の出力波形O P Sの光強度比I m rも約90%以上の値を示す。
- [0077] これに対して、遅延光路長L（1）が最大の条件となる、 $\Delta T_{25\%}$ の出力波形O P Sは、1つ目のピークと2つ目のピークが明確に存在している。しかし、図4に示した比較例と比較して、ピーク間の谷間の光強度の落ち込みが少ない。具体的には、 $\Delta T_{25\%}$ の出力波形O P Sの光強度比I m rは、約47.6%である。
- [0078] 図10に示すように、第1実施形態に係る各出力波形O P SのT I Sパルス時間幅 ΔT_{TIS} は、入力波形O R Gよりも伸びているが、図4に示した比較例に係る出力波形O P SのT I Sパルス時間幅 ΔT_{TIS} である55 nsよりも短い

。しかし、第1実施形態に係る各出力波形OPSの光強度比 I_{mr} は、図4に示した比較例と比べて高い。

[0079] 3.3 OPS装置の効果

以上で説明したとおり、第1のOPSおよびOPS装置に相当するOPS41Aの遅延光路長 $L(1)$ を、 $\Delta T_{75\%} \times c \leq L(1) \leq \Delta T_{25\%} \times c$ （上記式(3)）の範囲とすることで、光強度の落ち込みを抑制できる。すなわち、光強度比 I_{mr} を高くしながら、パルス時間幅を伸ばすことができる。この結果、パルスレーザ光の照射中において、溶融状態のアモルファスシリコンの再凝固が抑制されて、多結晶シリコンの結晶の粒径を大きくする効果が得られる。

[0080] 3.4 XeFエキシマレーザの実施例

図11は、マスターオシレータMOのレーザ媒質としてXeFを使用したXeFエキシマレーザに係る実施例のグラフを示す。本実施例において、マスターオシレータMOから出力され、OPS41Aに入射するパルスレーザ光の入力波形は、図11に示す入力波形X-ORGである。図11において、各出力波形X-OPSは、図10に示した各出力波形OPSと同様に、入力波形X-ORGのパルス全幅に基づいてOPS41Aの遅延光路長 $L(1)$ を設定して、計算した出力波形である。

[0081] 図11において細い実線で示される $\Delta T_{25\%}$ の出力波形X-OPSは、入力波形X-ORGのパルス全幅 $\Delta T_{25\%}$ に応じた遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{25\%} \times c$ とした場合の出力波形である。入力波形X-ORGにおいて、パルス全幅 $\Delta T_{25\%} = 14.2 \text{ ns}$ であるので、遅延光路長 $L(1)$ は、 $L(1) = \Delta T_{25\%} \times c = 14.2 \text{ ns} \times 0.3 \text{ m/ns} = 4.26 \text{ m}$ である。

[0082] 図11において細い波線で示される $\Delta T_{50\%}$ の出力波形X-OPSは、入力波形X-ORGのパルス全幅 $\Delta T_{50\%}$ に応じた遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{50\%} \times c$ とした場合の出力波形である。入力波形X-ORGにおいて、パルス全幅 $\Delta T_{50\%} = 9.7 \text{ ns}$ であるので、遅延光路長 $L(1)$ は、 $L(1) = \Delta T_{50\%} \times c = 9.7 \text{ ns} \times 0.3 \text{ m/ns} = 2.91 \text{ m}$ である。

[0083] 図11において太い実線で示される $\Delta T_{75\%}$ の出力波形X-OPSは、入力波形X-ORGのパルス全幅 $\Delta T_{75\%}$ に応じた遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{75\%} \times c$ とした場合の出力波形である。入力波形X-ORGにおいて、パルス全幅 $\Delta T_{75\%} = 4.4 \text{ ns}$ であるので、遅延光路長 $L(1)$ は、 $L(1) = \Delta T_{75\%} \times c = 4.4 \text{ ns} \times 0.3 \text{ m/ns} = 1.32 \text{ m}$ である。

[0084] TISパルス時間幅 ΔT_{TIS} は、入力波形X-ORGにおいて $\Delta T_{\text{TIS}} = 19 \text{ ns}$ である。 $\Delta T_{25\%}$ の出力波形X-OPSにおいて $\Delta T_{\text{TIS}} = 45.6 \text{ ns}$ である。 $\Delta T_{50\%}$ の出力波形X-OPSにおいて $\Delta T_{\text{TIS}} = 37.8 \text{ ns}$ であり、 $\Delta T_{75\%}$ の出力波形X-OPSにおいて $\Delta T_{\text{TIS}} = 25.7 \text{ ns}$ である。一方、図11において、 $\Delta T_{25\%}$ の出力波形X-OPSは、各出力波形X-OPSの中で1つ目と2つ目のピーク間の光強度の落ち込みが最大となる。この $\Delta T_{25\%}$ の出力波形X-OPSにおいても、図4に係る比較例と比較して、ピーク間の光強度の落ち込みは抑制されている。具体的には、 $\Delta T_{25\%}$ の出力波形X-OPSの光強度比 I_{mr} は約42.6%であり、図4に係る比較例と比較して、光強度比 I_{mr} が高い。

[0085] このように、XeFエキシマレーザの実施例においても、OPS41Aの遅延光路長 $L(1)$ を、 $\Delta T_{75\%} \times c \leq L(1) \leq \Delta T_{25\%} \times c$ （上記式(3)）の範囲とすることで、光強度比 I_{mr} を高くしながら、パルス時間幅を伸ばすことができる。この結果、パルスレーザ光の照射中において、熔融状態のアモルファスシリコンの再凝固が抑制されて、多結晶シリコンの結晶の粒径を大きくする効果が得られる。

[0086] 3.5 その他

第1実施形態のレーザアニール装置において、OPS41Aによって構成されるOPS装置が、マスターオシレータMOとパルスエネルギー計測部63の間に配置されている例で説明したが、OPS装置は他の位置に配置されてもよい。例えば、OPS装置は、レーザ装置3に配置されていなくてもよく、レーザ装置3とアニール装置4の間のパルスレーザ光の光路上に配置してもよい。また、OPS装置は、例えば、アニール装置4のスリット16（図

1 参照)の前段位置など、アニール装置4の内部に配置されてもよい。

[0087] 4. 第2実施形態のレーザ装置およびこれを用いるレーザアニール装置

4. 1 構成

図12は、第2実施形態に係るレーザアニール装置の構成を概略的に示す。第2実施形態のレーザアニール装置は、図5に示す第1実施形態のレーザアニール装置のレーザ装置3Aに代えて、レーザ装置3Bを備えている。第2実施形態のレーザ装置3Bと、第1実施形態に係るレーザ装置3Aとの相違点は、OPS装置に含まれるOPS41Aの数であり、第2実施形態のレーザ装置3Bは、OPS41Aが複数設けられている。第2実施形態のレーザ装置3BのOPS装置は、第1のOPS41A1、第2のOPS41A2および第3のOPS41A3を含み、3つのOPS41AでOPS装置が構成される。他の構成は、第1実施形態のレーザ装置3Aと同様であるので、同一の構成については同一の符号を付して説明を省略し、以下、相違点を中心に説明する。

[0088] 第1～第3のOPS41A1、41A2、41A3は、パルスレーザ光の光路上に直列に配置されている。第1のOPS41A1は、ビームスプリッタ42と、第1～第4の凹面ミラー51A1～54A1で構成される。第2のOPS41A2は、ビームスプリッタ42と、第1～第4の凹面ミラー51A2～54A2で構成される。第3のOPS41A3は、ビームスプリッタ42と、第1～第4の凹面ミラー51A3～54A3で構成される。第1のOPS41A1の遅延光路長 $L(1)$ 、第2のOPS41A2の遅延光路長 $L(2)$ および第3のOPS41A3の遅延光路長 $L(3)$ の中で、遅延光路長 $L(1)$ が最も短く、遅延光路長 $L(3)$ が最長である。すなわち、遅延光路長 $L(1) < 遅延光路長L(2) < 遅延光路長L(3)$ という関係を満たす。

[0089] 遅延光路長 $L(1)$ の範囲は、第1実施形態のOPS41Aと同様であり、 $\Delta T_{75\%} \times c \leq L(1) \leq \Delta T_{25\%} \times c$ (上記式(3))の範囲に設定されている。遅延光路長 $L(2)$ および遅延光路長 $L(3)$ は、遅延光路長 $L(1)$

を基準に設定される。遅延光路長 $L(2)$ は遅延光路長 $L(1)$ の2倍、すなわち、遅延光路長 $L(2) = 2 \times L(1)$ に設定される。遅延光路長 $L(3)$ は、遅延光路長 $L(2)$ を基準にして、遅延光路長 $L(2)$ の2倍、すなわち、遅延光路長 $L(3) = 2 \times L(2)$ に設定される。

[0090] このように、第1のOPS41A1に加えて、第2～第 n のOPS41A n を含む n 個のOPSでOPS装置を構成する場合において、第 k のOPS41A k の遅延光路長 $L(k)$ は、下式(4)に示す条件を満たすように設定されることが好ましい。

$$L(k) = 2 \times L(k-1) \cdots \text{式(4)}$$

ここで、 $k = 2$ 以上 n 以下である。 n は2以上の整数である。

[0091] 第1のOPS41A1の遅延光路長 $L(1)$ は、第1～第4の凹面ミラー51A1～54A1の焦点距離 F および焦点距離 F に応じた配置間隔の選択により設定される。第2のOPS41A2の遅延光路長 $L(2)$ は、第1～第4の凹面ミラー51A2～54A2の焦点距離 F および焦点距離 F に応じた配置間隔の選択により設定される。第3のOPS41A3の遅延光路長 $L(3)$ は、第1～第4の凹面ミラー51A3～54A3の焦点距離 F および焦点距離 F に応じた配置間隔の選択により設定される。

[0092] 4. 2 OPS装置の作用

図13は、第1～第3の3段のOPS41A1～41A3を使用した場合の出力波形OPSの推移を示す。図13において、第1のOPS41A1の遅延光路長 $L(1)$ は、入力波形ORGのパルス全幅 $\Delta T_{75\%} \times c$ に設定されている。そのため、第1のOPS41A1に入力波形ORGが入射すると、遅延光路を経由せずに出力する0周回光 PS_0 に続いて、 $\Delta T_{75\%}$ の間隔を開けて、1周回光 PS_1 、2周回光 $PS_2 \cdots$ とパルス光が出力される。これらの周回光 PS が合成されて、入力波形ORGの出力波形OPS1となる。

[0093] 次に、出力波形OPS1に含まれる、0周回光 PS_0 が第2のOPS41A2に入射すると、これがさらに0周回光 PS_0 、1周回光 PS_1 、2周回光 $PS_1 \cdots$ に分解されて、出力波形OPS2として出力される。ただし、第2の

OPS 4 1 A 2 の遅延光路長 $L(2) = 2 \times L(1)$ であるため、第 2 の OPS 4 1 から出力される周回光 PS の時間差は、 $2 \times \Delta T_{75\%}$ となる。

[0094] 図 1 3 において、出力波形 OPS 2 は、入力波形 ORG の出力波形 OPS 1 に含まれる周回光 PS のうち、0 周回光 PS_0 の入力に対する出力波形である。煩雑化を避けるため、図 1 3 において図示は省略するが、当然ながら、入力波形 ORG の出力波形 OPS 1 に含まれる 1 周回光 PS_1 、2 周回光 PS_2 …… も第 2 の OPS 4 1 A 2 に順次入力される。これらに対する、1 周回光 PS_1 の出力波形 OPS 2、2 周回光 PS_2 の出力波形 OPS 2 …… も第 2 の OPS 4 1 A 2 から出力される。

[0095] 次に、出力波形 OPS 2 に含まれる、0 周回光 PS_0 が第 3 の OPS 4 1 A 3 に入射すると、これがさらに 0 周回光 PS_0 、1 周回光 PS_1 、2 周回光 PS_2 …… に分解されて、出力波形 OPS 3 として出力される。ただし、第 3 の OPS 4 1 A 3 の遅延光路長 $L(3) = 2 \times L(2) = 4 \times L(1)$ であるため、第 3 の OPS 4 1 から出力される周回光 PS の時間差は、 $4 \times \Delta T_{75\%}$ となる。

[0096] また、図 1 3 に示す出力波形 OPS 3 は、出力波形 OPS 2 に含まれる周回光 PS のうち、0 周回光 PS_0 の入力に対する出力波形である。図示は省略するが、第 2 の OPS 4 1 A 2 と同様に、出力波形 OPS 2 に含まれる 1 周回光 PS_1 、2 周回光 PS_2 …… も第 3 の OPS 4 1 A 3 に順次入力される。これらに対する、1 周回光 PS_1 の出力波形 OPS 3、2 周回光 PS_2 の出力波形 OPS 3 …… も第 3 の OPS 4 1 A 3 から出力される。

[0097] このような 0 周回光 PS_0 の出力波形 OPS 3、1 周回光 PS_1 の出力波形 OPS 3、2 周回光 PS_2 の出力波形 OPS 3 …… を合成した波形が、第 1 ～ 第 3 の OPS 4 1 A 1 ～ 4 1 A 3 で構成される OPS 装置から出力される出力波形となる。この出力波形は、図 1 4 に示す $\Delta T_{75\%}$ の出力波形 OPS 1 2 3 となる。

[0098] 図 1 5 A ～ 図 1 5 C に示すグラフは、図 1 2 に示す第 2 実施形態のレーザーアニール装置において、ガウシアン波形と仮定した入力波形 ORG と、この

入力波形ORGに基づいて計算された、遅延光路長 $L(1)$ とOPS41Aの数を変化させた場合の出力波形OPSを示す。

[0099] 図15Aに示すグラフは、第1のOPS41A1の遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{75\%} \times c$ とした場合の出力波形OPSである。入力波形ORGにおいて、パルス全幅 $\Delta T_{75\%} = 6.8 \text{ ns}$ であるので、遅延光路長 $L(1)$ は、 $L(1) = \Delta T_{75\%} \times c = 6.8 \text{ ns} \times 0.3 \text{ m/ns} = 2.04 \text{ m}$ に設定される。第2のOPS41A2の遅延光路長 $L(2)$ は、 $L(2) = 2 \times L(1) = 2 \times 2.04 \text{ m} = 4.08 \text{ m}$ に設定される。第3のOPS41A3の遅延光路長 $L(3)$ は、 $L(3) = 4 \times L(1) = 4 \times 2.04 \text{ m} = 8.16 \text{ m}$ に設定される。

[0100] 図15Bに示すグラフは、遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{50\%} \times c$ とした場合の出力波形OPSである。入力波形ORGにおいて、パルス全幅 $\Delta T_{50\%} = 10.6 \text{ ns}$ であるので、遅延光路長 $L(1)$ は、 $L(1) = \Delta T_{50\%} \times c = 10.6 \text{ ns} \times 0.3 \text{ m/ns} = 3.18 \text{ m}$ に設定される。第2のOPS41A2の遅延光路長 $L(2)$ は、 $L(2) = 2 \times L(1) = 2 \times 3.18 \text{ m} = 6.36 \text{ m}$ に設定される。第3のOPS41A3の遅延光路長 $L(3)$ は、 $L(3) = 2 \times L(2) = 4 \times 6.36 \text{ m} = 12.72 \text{ m}$ に設定される。

[0101] 図15Cに示すグラフは、遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{25\%} \times c$ とした場合の出力波形OPSである。入力波形ORGにおいて、パルス全幅 $\Delta T_{25\%} = 15 \text{ ns}$ であるので、遅延光路長 $L(1)$ は、 $L(1) = \Delta T_{25\%} \times c = 15 \text{ ns} \times 0.3 \text{ m/ns} = 4.5 \text{ m}$ に設定される。第2のOPS41A2の遅延光路長 $L(2)$ は、 $L(2) = 2 \times L(1) = 2 \times 4.5 \text{ m} = 9.0 \text{ m}$ に設定される。第3のOPS41A3の遅延光路長 $L(3)$ は、 $L(3) = 2 \times L(2) = 4 \times 9.0 \text{ m} = 18 \text{ m}$ に設定される。

[0102] 図15A～図15Cにおいて、太い波線で示す入力波形ORGは共通であり、入力波形ORGのTISパルス時間幅 $\Delta T_{TIS} = 16 \text{ ns}$ である。

[0103] 図15Aに示すグラフにおいて、太い実線で示す出力波形OPS1は、第1実施形態と同様に、第1のOPS41A1を1つだけ有する1段構成のO

OPS装置の出力波形である。細い波線で示す出力波形OPS12は、第1のOPS41A1と第2のOPS41A2を直列に配置した2段構成のOPS装置の出力波形である。細い実線で示す出力波形OPS123は、図12に示すように、第1～第3のOPS41A1～41A3を直列に配置した3段で構成されるOPS装置の出力波形であり、図14に示す出力波形と同じである。

[0104] 図15Aに示す $\Delta T_{75\%}$ の場合の各出力波形OPSにおいて、TISパルス時間幅 ΔT_{TIS} は、1段構成のOPS装置の出力波形OPS1において $\Delta T_{TIS} = 27.2 \text{ ns}$ である。2段構成のOPS装置の出力波形OPS12においては、 $\Delta T_{TIS} = 52.5 \text{ ns}$ である。3段構成のOPS装置の出力波形OPS123においては、 $\Delta T_{TIS} = 103.8 \text{ ns}$ である。いずれの出力波形OPSのパルス時間幅も、入力波形ORGのTISパルス時間幅 ΔT_{TIS} である 16 ns よりも長い。また、 $\Delta T_{75\%}$ の場合の各出力波形OPS1、OPS12、OPS123において、1つ目と2つ目のピーク間の光強度の落ち込みがほとんど無いため、図4に示した比較例よりも、光強度比 I_{mr} は高い。

[0105] 図15Bに示す $\Delta T_{50\%}$ の場合の各出力波形OPSにおいて、図15Aと同様に、太い実線で示す出力波形OPS1は、第1のOPS41A1のみの1段構成のOPS装置の出力波形である。細い波線で示す出力波形OPS12は、第1のOPS41A1および第2のOPS41A2の2段構成のOPS装置の出力波形である。細い実線で示す出力波形OPS123は、第1～第3のOPS41A1～41A3の3段構成のOPS装置の出力波形である。

[0106] 図15Bに示す $\Delta T_{50\%}$ の場合の各出力波形OPSにおいて、TISパルス時間幅 ΔT_{TIS} は、出力波形OPS1において $\Delta T_{TIS} = 36.2 \text{ ns}$ である。出力波形OPS12において $\Delta T_{TIS} = 77.3 \text{ ns}$ であり、出力波形OPS123において $\Delta T_{TIS} = 155.9 \text{ ns}$ となる。いずれの出力波形OPSのパルス時間幅も、入力波形ORGのTISパルス時間幅 ΔT_{TIS} である 16 ns よりも長い。また、 $\Delta T_{50\%}$ の場合の各出力波形OPS1、OPS12、OPS123において、1つ目と2つ目のピーク間の光強度の落ち込みは、図4に示した比

較例の出力波形OPSと比較して抑制されており、光強度比 I_{mr} は高くなっている。

[0107] 図15Cに示す $\Delta T_{25\%}$ の場合の各出力波形OPSにおいて、図15A、Bと同様に、太い実線で示す出力波形OPS1は、1段構成のOPS装置の出力波形である。細い波線で示す出力波形OPS12は、2段構成のOPS装置の出力波形である。細い実線で示す出力波形OPS123は、3段構成のOPS装置の出力波形である。

[0108] 図15Cに示す $\Delta T_{25\%}$ の場合の各出力波形OPSにおいて、TISパルス時間幅 ΔT_{TIS} は、出力波形OPS1において $\Delta T_{TIS} = 45.3 \text{ ns}$ である。出力波形OPS12において $\Delta T_{TIS} = 101.6 \text{ ns}$ であり、出力波形OPS123において $\Delta T_{TIS} = 209.7 \text{ ns}$ となる。いずれの出力波形OPSのパルス時間幅も、入力波形ORGのTISパルス時間幅 ΔT_{TIS} である 16 ns よりも長い。また、 $\Delta T_{25\%}$ の場合の各出力波形OPS1、OPS12、OPS123において、1つ目と2つ目のピーク間の光強度の落ち込みは、図4に示した比較例の出力波形OPSと比較して抑制されており、光強度比 I_{mr} は高くなっている。

[0109] 4.3 効果

以上説明したとおり、図15A～図15Cに示すように、各出力波形OPS123は、図4に示した比較例の出力波形OPSよりも、光強度比 I_{mr} を高くしながら、パルス時間幅を伸ばすことができる。

[0110] また、第1実施形態に係るOPS装置は、第1のOPSに相当する1つのOPS41Aで構成される1段構成のOPS装置である。これに対して、第2実施形態に係るOPS装置は、第1のOPS41A1に加えて、第2および第3のOPS41A2、41A3を含む3段構成のOPS装置である。第2実施形態に係るOPS装置は、こうした3段構成のOPS41A1～41A3で構成されているため、第1実施形態と比較して、さらに、光強度比 I_{mr} を高くしながら、パルス時間幅を伸ばすことができる。

[0111] また、図15A～図15Cのグラフを比較すると、次のことがわかる。O

PS装置を複数段のOPS41Aで構成する場合において、第1のOPS41A1の遅延光路長 $L(1)$ が短いほど、光強度の落ち込みは抑制される。遅延光路長 $L(1)$ は、図15Aのパルス全幅 $\Delta T_{75\%}$ の場合が最短となる。しかし、その一方で、TISパルス時間幅 ΔT_{TIS} は短くなる。また、図15A～図15Cの各出力波形OPS1、OPS12、OPS123に示すとおり、OPS41Aの数が増えるほど、光強度の落ち込みは抑制され、TISパルス時間幅 ΔT_{TIS} も長くなる。ただし、OPS41Aの数が増えるほど、光強度は減衰する。

[0112] 第1～第3のOPS41A1～41A3の各遅延光路長 $L(1) \sim L(3)$ は、 $L(1)$ 、 $L(2) = 2 \times L(1)$ 、 $L(3) = 2 \times L(2)$ となっており、 $L(k) = 2 \times L(k-1)$ （上記式(4)）の条件を満たすように設定されている。遅延光路長 $L(k)$ を本例のように設定することで、比較的少ないOPSの数で、光強度比 I_{mr} を高くしながら、パルス時間幅を伸ばすことができる。OPSの数の増加も抑制されるため、光強度の減衰も抑制される。

[0113] 第1のOPS41A1の遅延光路長 $L(1)$ やOPS41Aの数は、マスターオシレータMOが出力する入力波形ORGの光強度、アニール装置4において必要なパルスレーザ光の光強度やパルス時間幅等を考慮して適宜選択される。

[0114] 4. 4 XeFエキシマレーザの実施例1

図16A～図16Cは、マスターオシレータMOのレーザ媒質としてXeFを使用したXeFエキシマレーザに係る実施例1のグラフを示す。本実施例1において、マスターオシレータMOから出力され、第1のOPS41Aに入射するパルスレーザ光の入力波形は、図11と同様の入力波形X-ORGである。

[0115] 図16A～図16Cのグラフにおいて、図15A～図15Cのグラフと異なる点は、入力波形ORGが、レーザ媒質としてXeFを使用した実機で測定した入力波形X-ORGに変更されている点である。入力波形X-ORG

としたことにより、当然ながら、図16A～図16Cの出力波形X-OPS 1、X-OPS 12、X-OPS 123は、図15A～図15Cの出力波形から変化している。図16A～図16Cは、それ以外のグラフの線種や条件等の組合せは、図15A～図15Cと同様である。

[0116] 図16Aに示すグラフは、第1のOPS 41A1の遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{75\%} \times c$ とした場合の出力波形X-OPSである。入力波形X-ORGにおいて、パルス全幅 $\Delta T_{75\%} = 4.4 \text{ ns}$ であるので、遅延光路長 $L(1)$ は、 $L(1) = \Delta T_{75\%} \times c = 4.4 \text{ ns} \times 0.3 \text{ m/ns} = 1.32 \text{ m}$ に設定される。第2のOPS 41A2の遅延光路長 $L(2)$ は、 $L(2) = 2 \times L(1) = 2 \times 1.32 \text{ m} = 2.64 \text{ m}$ に設定される。第3のOPS 41A3の遅延光路長 $L(3)$ は、 $L(3) = 2 \times L(2) = 2 \times 2.64 \text{ m} = 5.28 \text{ m}$ に設定される。

[0117] 図16Bに示すグラフは、遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{50\%} \times c$ とした場合の出力波形X-OPSである。入力波形X-ORGにおいて、パルス全幅 $\Delta T_{50\%} = 9.7 \text{ ns}$ であるので、遅延光路長 $L(1)$ は、 $L(1) = \Delta T_{50\%} \times c = 9.7 \text{ ns} \times 0.3 \text{ m/ns} = 2.91 \text{ m}$ に設定される。第2のOPS 41A2の遅延光路長 $L(2)$ は、 $L(2) = 2 \times L(1) = 2 \times 2.91 \text{ m} = 5.82 \text{ m}$ に設定される。第3のOPS 41A3の遅延光路長 $L(3)$ は、 $L(3) = 2 \times L(2) = 2 \times 5.82 \text{ m} = 11.64 \text{ m}$ に設定される。

[0118] 図16Cに示すグラフは、遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{25\%} \times c$ とした場合の出力波形OPSである。入力波形ORGにおいて、パルス全幅 $\Delta T_{25\%} = 14.2 \text{ ns}$ であるので、遅延光路長 $L(1)$ は、 $L(1) = \Delta T_{25\%} \times c = 14.2 \text{ ns} \times 0.3 \text{ m/ns} = 4.26 \text{ m}$ に設定される。第2のOPS 41A2の遅延光路長 $L(2)$ は、 $L(2) = 2 \times L(1) = 2 \times 4.26 \text{ m} = 8.52 \text{ m}$ に設定される。第3のOPS 41A3の遅延光路長 $L(3)$ は、 $L(3) = 2 \times L(2) = 2 \times 8.52 \text{ m} = 17.04 \text{ m}$ に設定される。

[0119] 図16A～図16Cにおいて、入力波形X-ORGのTISパルス時間幅 $\Delta T_{\text{TIS}} = 19 \text{ ns}$ である。

[0120] 図16Aに示す $\Delta T_{75\%}$ の場合の各出力波形において、図15Aと同様に、太い実線で示す出力波形X-OPS1は、第1のOPS41A1のみの1段構成のOPS装置の出力波形である。細い波線で示す出力波形X-OPS12は、第1のOPS41A1および第2のOPS41A2の2段構成のOPS装置の出力波形である。細い実線で示す出力波形X-OPS123は、第1～第3のOPS41A1～41A3の3段構成のOPS装置の出力波形である。

[0121] 図16Aに示す $\Delta T_{75\%}$ の場合の各出力波形において、TISパルス時間幅 ΔT_{TIS} は、出力波形X-OPS1において $\Delta T_{TIS}=26.4\text{ ns}$ である。出力波形X-OPS12において $\Delta T_{TIS}=41.2\text{ ns}$ であり、出力波形X-OPS123において $\Delta T_{TIS}=72.4\text{ ns}$ である。いずれの出力波形OPSのパルス時間幅も、入力波形X-ORGのTISパルス時間幅 ΔT_{TIS} である 19 ns よりも長い。また、 $\Delta T_{75\%}$ の場合の各出力波形X-OPS1、X-OPS12、X-OPS123において、1つ目と2つ目のピーク間の光強度の落ち込みがほとんど無いため、図4に示した比較例よりも、光強度比 I_{mr} は改善されている。

[0122] 図16Bに示す $\Delta T_{50\%}$ の場合の各出力波形において、図15Bと同様に、太い実線で示す出力波形X-OPS1は、1段構成のOPS装置の出力波形である。細い波線で示す出力波形X-OPS12は、2段構成のOPS装置の出力波形である。細い実線で示す出力波形X-OPS123は、3段構成のOPS装置の出力波形である。

[0123] 図16Bに示す $\Delta T_{50\%}$ の場合の各出力波形において、TISパルス時間幅 ΔT_{TIS} は、出力波形X-OPS1において $\Delta T_{TIS}=38.4\text{ ns}$ である。出力波形X-OPS12において $\Delta T_{TIS}=73.9\text{ ns}$ であり、出力波形X-OPS123において $\Delta T_{TIS}=145.6\text{ ns}$ である。いずれの出力波形X-OPSのパルス時間幅も、入力波形X-ORGのTISパルス時間幅 ΔT_{TIS} である 19 ns よりも長い。また、 $\Delta T_{50\%}$ の場合の各出力波形X-OPS1、X-OPS12、X-OPS123において、1つ目と2つ目のピーク間の光強度の

落ち込みは、図4に示した比較例の出力波形OPSおよび図11に示した第1実施形態の出力波形X-OPSと比較して抑制されており、光強度比 I_{mr} は改善されている。

[0124] 図16Cに示す $\Delta T_{25\%}$ の場合の各出力波形において、図15Cと同様に、太い実線で示す出力波形X-OPS1は、1段構成のOPS装置の出力波形である。細い波線で示す出力波形X-OPS12は、2段構成のOPS装置の出力波形である。細い実線で示す出力波形X-OPS123は、3段構成のOPS装置の出力波形である。

[0125] 図16Cに示す $\Delta T_{25\%}$ の場合の各出力波形において、TISパルス時間幅 ΔT_{TIS} は、出力波形X-OPS1において $\Delta T_{TIS} = 46.3 \text{ ns}$ である。出力波形X-OPS12において $\Delta T_{TIS} = 98 \text{ ns}$ であり、出力波形X-OPS123において $\Delta T_{TIS} = 198.8 \text{ ns}$ である。いずれの出力波形X-OPSのパルス時間幅も、入力波形X-ORGのTISパルス時間幅 ΔT_{TIS} である 19 ns よりも長い。また、 $\Delta T_{25\%}$ の場合の各出力波形X-OPS1、X-OPS12、X-OPS123において、1つ目と2つ目のピーク間の光強度の落ち込みは、図4に示した比較例の出力波形OPSおよび図11に示した第1実施形態の出力波形X-OPSと比較して抑制されており、光強度比 I_{mr} は改善されている。

[0126] 図16A～図16Cに示したXeFエキシマレーザの実施例1においても、図15A～図15Cの実施形態と同様の効果（上記4.3参照）が得られる。

[0127] 4.5 XeFエキシマレーザの実施例2

図17に示すXeFエキシマレーザの実施例2は、遅延光路長 $L(1)$ 、 $L(2)$ 、 $L(3)$ の設定が、XeFエキシマレーザの実施例1と異なる。その他のレーザアニール装置の構成は同様である。

[0128] 本実施例2において、第1のOPS41A1の遅延光路長 $L(1)$ は、 $L(1) = 3.5 \text{ m}$ に設定されている。第2のOPS41A2の遅延光路長 $L(2)$ は、 $L(2) = 2 \times L(1) = 2 \times 3.5 \text{ m} = 7 \text{ m}$ に、第3のOPS

4 1 A 3 の遅延光路長 $L(3)$ は、 $L(3) = 2 \times L(2) = 2 \times 7 \text{ m} = 14 \text{ m}$ に、それぞれ設定されている。こうした遅延光路長 L の設定値は、遅延光路を構成する第 1 ～ 第 4 の凹面ミラー 5 1 A ～ 5 4 A として、比較的入手しやすい凹面ミラーの焦点距離 F に合わせて、遅延光路を構成した場合の値である。

[0129] 図 1 6 A ～ 1 6 C に示した実施例 1 の遅延光路長 $L(1)$ は、入力波形 $X-ORG$ のパルス全幅 $\Delta T_{25\%}$ を使用した場合は、 $\Delta T_{25\%} \times c = 14.2 \text{ ns} \times 0.3 \text{ m/ns} = 4.26 \text{ m}$ であり、パルス全幅 $\Delta T_{50\%}$ を使用した場合は、 $\Delta T_{50\%} \times c = 9.7 \text{ ns} \times 0.3 \text{ m/ns} = 2.91 \text{ m}$ である。本実施例 2 の遅延光路長 $L(1) = 3.5 \text{ m}$ という設定値は、入力波形 $X-ORG$ のパルス全幅 $\Delta T_{25\%}$ を使用した場合とパルス全幅 $\Delta T_{50\%}$ を使用した場合の間の値である。

[0130] 図 1 7 に示す $L(1) = 3.5 \text{ m}$ の場合のグラフにおいて、太い実線で示す出力波形 $X-OPS1$ は、第 1 の $OPS41A1$ のみの 1 段構成の OPS 装置の出力波形である。細い波線で示す出力波形 $X-OPS12$ は、第 1 の $OPS41A1$ および第 2 の $OPS41A2$ の 2 段構成の OPS 装置の出力波形である。細い実線で示す出力波形 $X-OPS123$ は、第 1 ～ 第 3 の $OPS41A1 \sim 41A3$ の 3 段構成の OPS 装置の出力波形である。

[0131] 図 1 7 に示す $L(1) = 3.5 \text{ m}$ の場合のグラフにおいて、 TIS パルス時間幅 ΔT_{TIS} は、出力波形 $X-OPS1$ において $\Delta T_{TIS} = 42.1 \text{ ns}$ である。出力波形 $X-OPS12$ において $\Delta T_{TIS} = 85.4 \text{ ns}$ であり、出力波形 $X-OPS123$ において $\Delta T_{TIS} = 170.8 \text{ ns}$ である。いずれの出力波形 $X-OPS$ のパルス時間幅も、入力波形 $X-ORG$ の TIS パルス時間幅 ΔT_{TIS} である 19 ns よりも長い。また、 $L(1) = 3.5 \text{ m}$ の場合の各出力波形 $X-OPS1$ 、 $X-OPS12$ 、 $X-OPS123$ において、1 つ目と 2 つ目のピーク間の光強度の落ち込みは、図 4 に示した比較例の出力波形 OPS および図 1 1 に示した第 1 実施形態の出力波形 $X-OPS$ と比較して抑制されており、光強度比 Imr は改善されている。より具体的には、実施例 2 の光

強度比 I_{mr} は約 50% 以上である。

[0132] 図 18 に示すグラフは、横軸に OPS の段数を、縦軸に TIS パルス時間幅 ΔT_{TIS} をとったグラフであり、OPS の段数に応じた TIS パルス時間幅 ΔT_{TIS} の変化を示す。太い波線で示すグラフ $G\Delta T_{25\%}$ は、図 16C に示した $\Delta T_{25\%}$ の場合の各出力波形 X-OPS1、X-OPS12、X-OPS123 のそれぞれの TIS パルス時間幅 ΔT_{TIS} である、46.3 ns、98 ns、198.8 ns をプロットしたものである。太い実線で示すグラフ $G3.5m$ は、図 17 に示した本実施例の各出力波形 X-OPS1、X-OPS12、X-OPS123 のそれぞれの TIS パルス時間幅 ΔT_{TIS} である、42.1 ns、85.4 ns、170.8 ns をプロットしたものである。

[0133] 細い波線で示すグラフ $G\Delta T_{50\%}$ は、図 16B に示した $\Delta T_{50\%}$ の場合の各出力波形 X-OPS1、X-OPS12、X-OPS123 のそれぞれの TIS パルス時間幅 ΔT_{TIS} である、38.4 ns、73.9 ns、145.6 ns をプロットしたものである。細い実線で示すグラフ $G\Delta T_{75\%}$ は、図 16C に示した $\Delta T_{75\%}$ の場合の各出力波形 X-OPS1、X-OPS12、X-OPS123 のそれぞれの TIS パルス時間幅 ΔT_{TIS} である、26.4 ns、41.2 ns、72.4 ns をプロットしたものである。

[0134] 図 18 に示す各グラフ G から明らかなように、第 1 の OPS 41A1 の遅延光路長 $L(1)$ が長いほど、また、OPS の段数が多いほど、TIS パルス時間幅 ΔT_{TIS} を長くすることができる。図 18 に示す各グラフ G の比較により、グラフ $G3.5m$ に示される本実施例 2 の特性が、グラフ $G\Delta T_{50\%}$ に示される、図 16B の出力波形 X-OPS の特性と、グラフ $G\Delta T_{25\%}$ に示される、図 16C の出力波形 X-OPS の特性の間に位置することが明瞭に把握することができる。また、本実施例 2 においても、図 15A～図 15C の実施形態と同様の効果（上記 4.3 参照）が得られる。

[0135] 4.6 変形例（第 1～第 n 個の OPS で構成される OPS 装置）

図 19 に示す OPS 装置 141 のように、複数段構成の OPS 装置を使用する場合は、OPS の数は 3 つに限らず、2 つ以上の第 1～第 n 個の OPS

で構成されていけばよい。本例において、OPS装置141は、第1のOPS41A1、第2のOPS41A2、・・・第kのOPS41Ak、・・・および第nのOPS41Anのn個のOPSで構成される。

[0136] 図19のOPS装置141において、第1のOPS41A1の遅延光路長 $L(1)$ は、図12に示した3段構成のOPS装置と同様に、 $\Delta T_{75\%} \times c \leq L(1) \leq \Delta T_{25\%} \times c$ （上記式(C)）の範囲に設定される。また、上記3段構成のOPS装置の各例において示したとおり、第1のOPS41A1に加えて、第2～第nのOPS41Anのn個のOPSでOPS装置を構成する場合には、第kのOPS41Akの遅延光路長 $L(k)$ は、 $L(k) = 2 \times L(k-1)$ （上記式(4)）の条件を満たすように設定することが好ましい。ここで、 $k = 2$ 以上 n 以下であり、 n は2以上の整数である。追加するOPS41Aの遅延光路長 L を長くすることで、第1のOPS41A1と同じ遅延光路長 $L(1)$ のOPS41Aを追加する場合と比較して、パルス時間幅を伸ばす効果が大きい。

[0137] 4. 7 その他

複数段構成のOPS装置を使用する場合において、上記例では、第1～第n個のOPS41Aは、レーザ発振器であるマスターオシレータMO側から、遅延光路長 L が短い順番で配置されている。しかし、複数のOPS41Aは、遅延光路長 L が短い順番で配置しなくてもよい。例えば、遅延光路長 L が長い順番で配置してもよいし、第2のOPS41A2、第1のOPS41A1、第3のOPS41A3のように、遅延光路長 L の順番とは無関係に配置してもよい。複数のOPS41Aがどのような順番で配置されていても、パルス時間幅を伸ばす効果や光強度比 I_{mr} を改善する効果は、同じである。

[0138] ただし、メンテナンス性の観点からは、マスターオシレータMO側から、遅延光路長 L が短い順番で配置されていることが好ましい。というのも、マスターオシレータMO側に近いOPS41Aほど、光強度が高いパルスレーザ光が入射するため、その分、ビームスプリッタ42や各凹面ミラー51

A～5 4 Aなどの光学素子の劣化が早いと考えられる。そして、遅延光路長Lが短いほど、OPS 4 1 Aのサイズは小さく、交換がしやすい。逆に遅延光路長Lが長いほど、OPS 4 1 Aのサイズが大きくなり、交換がしにくい。そのため、マスターオシレータMO側から、遅延光路長Lが短い順番でOPS 4 1 Aを配置することで、遅延光路長Lが長くサイズの大きなOPS 4 1 Aの耐用期間を相対的に延ばすことができる。これにより、サイズが大きく交換がしにくいOPS 4 1 Aの交換回数を相対的に減らすことができる。

[0139] また、第1のOPS 4 1 Aに加えて、第2～第nの複数のOPS 4 1 Aを追加する場合には、上記実施形態のように、第1のOPS 4 1 Aの遅延光路長L(1)よりも長い遅延光路長Lを有するOPS 4 1 Aを追加することが好ましい。L(1)よりも短い遅延光路長を有するOPS 4 1 Aを設けた場合、光強度の落ち込みを減らす効果は期待できる。しかし、L(1)よりも長い遅延光路長LのOPSを設ける場合と比べて、パルス時間幅を伸長する効果は得にくい。OPS 4 1 Aの数が増えるほど、光強度が減衰する。できるだけ少ない数のOPSで高い効果を得るために、OPSを追加する場合は、L(1)よりも遅延光路長Lが長いOPSを追加することが好ましい。

[0140] 5. 第3実施形態のレーザ装置およびこれを用いるレーザアニール装置

5. 1 構成

図20は、第3実施形態に係るレーザアニール装置の構成を概略的に示す。第3実施形態のレーザアニール装置は、図12に示す第2実施形態のレーザアニール装置のレーザ装置3Bに代えて、レーザ装置3Cを備えている。第3実施形態のレーザ装置3Cと、第2実施形態に係るレーザ装置3Bとの相違点は、レーザ装置3Cは、レーザ発振器であるマスターオシレータMOに加えて、増幅器PAを有している点である。このようなレーザ装置3Cは、MOPA方式とも呼ばれる。レーザ装置3CのOPS装置141は、レーザ装置3Bと同様の3段構成のOPS装置である。他の構成は、第2実施形態のレーザ装置3Bと同様であるので、同一の構成については同一の符号を付して説明を省略し、以下、相違点を中心に説明する。

[0141] 増幅器 P A は、マスターオシレータ M O の出力結合ミラー 7 7 から出力されたパルスレーザ光の光路に配置されている。増幅器 P A は、マスターオシレータ M O と同様に、レーザチャンバ 7 1 と、一对の電極 7 2 a および 7 2 b と、充電器 7 3 と、パルスパワーモジュール (P P M) 7 4 と、を含んでいる。これらの構成は、マスターオシレータ M O に含まれているものと同様である。増幅器 P A は、マスターオシレータ M O と異なり、高反射ミラー 7 6 および出力結合ミラー 7 7 を含まない。増幅器 P A のウィンドウ 7 1 a に入射したパルスレーザ光は、電極 7 2 a と電極 7 2 b との間のレーザゲイン空間を 1 回通過して、ウィンドウ 7 1 b から出力される。マスターオシレータ M O から出力されたパルスレーザ光は、増幅器 P A で増幅された後、 O P S 装置 1 4 1 に入射する。

[0142] マスターオシレータ M O および増幅器 P A は、それぞれ、レーザチャンバ 7 1 に設けられたウィンドウ 7 1 e と、放電センサ 8 1 とを有している。ウィンドウ 7 1 e は、レーザチャンバ 7 1 内の放電光を放電センサ 8 1 に向けて出力する。各放電センサ 8 1 は、放電光を受光してレーザチャンバ 7 1 内で放電が生じたことを検出し、検出信号をレーザ制御部 6 6 に送信する。

[0143] 5. 2 動作

レーザ制御部 6 6 は、アニール装置 4 から発光トリガ信号を受信すると、マスターオシレータ M O から出力されたパルスレーザ光が増幅器 P A で増幅されるように、マスターオシレータ M O と増幅器 P A のそれぞれのスイッチ 7 4 a をオンするタイミングを制御する。レーザ制御部 6 6 は、マスターオシレータ M O および増幅器 P A のそれぞれのレーザチャンバ 7 1 の放電タイミングを各放電センサ 8 1 からの検出信号に基づいて検出する。

[0144] ここで、マスターオシレータ M O の放電タイミングと増幅器 P A の放電タイミングの時間差を放電タイミング遅延時間 D S D T と定義する。レーザ制御部 6 6 は、放電センサ 8 1 によって計測した放電タイミング遅延時間 D S D T が所定の値に近づくように、マスターオシレータ M O および増幅器 P A の各スイッチ 7 4 a のオンのタイミングを制御する。

[0145] これにより、マスターオシレータMOから出力されたパルスレーザ光が増幅器PA内の電極72aおよび72b間を通過するのと同期して、増幅器PA内で放電が生成され、レーザガスが生じて、パルスレーザ光が増幅される。増幅されたパルスレーザ光は、増幅器PAから出力し、OPS装置141に入射する。パルスレーザ光は、OPS装置141においてパルス時間幅がストレッチされる。

[0146] 5.3 XeFエキシマレーザ、MOPA方式、1段構成のOPS装置の実施例

5.3.1 構成

図21は、MOPA方式のレーザ装置3Cにおいて、レーザ媒質としてXeFを使用するXeFエキシマレーザの実施例を示す。本例において、OPS装置141は、第1のOPS41A1のみで構成される1段構成のOPS装置である。

[0147] 5.3.2 作用

レーザ装置3Cにおいて、OPS装置141に入射するパルスレーザ光の入力波形MP-ORGは、増幅器PAで増幅されたパルスレーザ光の出力波形である。後述するようにMOPA方式においては、放電タイミング遅延時間DSDTの変動に応じてTISパルス時間幅 ΔT_{TIS} が変動する。本例は、放電タイミング遅延時間DSDT=15nsの場合の入力波形MP-ORGに基づいて計算した出力波形MP-OPSを示す。本例の入力波形MP-ORGにおいて、TISパルス時間幅 $\Delta T_{TIS}=24.6\text{ ns}$ である。

[0148] 図21において細い実線で示される出力波形MP-OPSは、入力波形MP-ORGのパルス全幅 $\Delta T_{25\%}$ に応じた遅延光路長 $L(1)=\Delta T_{25\%}\times c$ とした場合の出力波形である。入力波形MP-ORGにおいて、パルス全幅 $\Delta T_{25\%}=19.8\text{ ns}$ であるので、遅延光路長 $L(1)$ は、 $L(1)=\Delta T_{25\%}\times c=19.8\text{ ns}\times 0.3\text{ m/ns}=5.95\text{ m}$ となる。ここで、 $L(1)$ の計算過程において小数点第3位を端数処理している。

[0149] 図21において細い波線で示される出力波形MP-OPSは、入力波形M

P-ORGのパルス全幅 $\Delta T_{50\%}$ に応じた遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{50\%} \times c$ とした場合の出力波形である。入力波形MP-ORGにおいて、パルス全幅 $\Delta T_{50\%} = 13.7 \text{ ns}$ であるので、遅延光路長 $L(1)$ は、 $L(1) = \Delta T_{50\%} \times c = 13.7 \text{ ns} \times 0.3 \text{ m/ns} = 4.11 \text{ m}$ となる。

[0150] 図21において太い実線で示される出力波形MP-OPSは、入力波形MP-ORGのパルス全幅 $\Delta T_{75\%}$ に応じた遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{75\%} \times c$ とした場合の出力波形である。入力波形MP-ORGにおいて、パルス全幅 $\Delta T_{75\%} = 8 \text{ ns}$ であるので、遅延光路長 $L(1)$ は、 $L(1) = \Delta T_{75\%} \times c = 8 \text{ ns} \times 0.3 \text{ m/ns} = 2.40 \text{ m}$ となる。

[0151] 5.3.3 効果

図21において、TISパルス時間幅 ΔT_{TIS} は、入力波形MP-ORGにおいて $\Delta T_{TIS} = 24.6 \text{ ns}$ 、 $\Delta T_{25\%}$ の出力波形MP-OPSにおいて $\Delta T_{TIS} = 61.4 \text{ ns}$ 、 $\Delta T_{50\%}$ の出力波形MP-OPSにおいて $\Delta T_{TIS} = 51.2 \text{ ns}$ 、 $\Delta T_{75\%}$ の出力波形MP-OPSにおいて $\Delta T_{TIS} = 38.3 \text{ ns}$ である。一方、図21において、 $\Delta T_{25\%}$ の出力波形MP-OPSは、各出力波形X-OPSの中で1つ目と2つ目のピーク間の光強度の落ち込みが最大となる。この $\Delta T_{25\%}$ の出力波形MP-OPSにおいても、図4に係る比較例と比較して、ピーク間の光強度の落ち込みは抑制されている。 $\Delta T_{25\%}$ の出力波形MP-OPSの光強度比 I_{mr} は約38%以上であり、図4に係る比較例と比較して、光強度比 I_{mr} が改善している。

[0152] このように、MOPA方式のXeFエキシマレーザの実施例においても、第1のOPS41A1の遅延光路長 $L(1)$ を、 $\Delta T_{75\%} \times c \leq L(1) \leq \Delta T_{25\%} \times c$ （上記式(3)）の範囲とすることで、光強度比 I_{mr} を改善しながら、パルス時間幅を伸ばすことができる。この結果、パルスレーザ光の照射中のアモルファスシリコンの再凝固を抑制して、アモルファスシリコンの熔融状態を長く維持できる。これにより、多結晶シリコンの結晶の粒径が大きくなり得る。

[0153] また、MOPA方式においては、増幅器PAを有することで、マスターオ

シレータMOのみの場合と比べて、パルスレーザ光が増幅されるため、パルスレーザ光のパルスエネルギーが高くなる。パルスレーザ光のパルスエネルギーが高くなる分、レーザアニールにおいて、パルスレーザ光の照射中に溶融されたアモルファスシリコンが再凝固するのをさらに抑制することができる。これにより、多結晶シリコンの結晶の粒径を大きくする効果がより向上する。

[0154] 5. 4 放電タイミング遅延時間DSDT、パルスエネルギー、TISパルス時間幅 ΔT_{TIS} の関係

図22Aのグラフは、MOPA形式のレーザ装置3Cにおいて、放電タイミング遅延時間DSDTとパルスエネルギーの関係を示す。図22Bのグラフは、MOPA形式のレーザ装置3Cにおいて、放電タイミング遅延時間DSDTとTISパルス時間幅 ΔT_{TIS} の関係を示す。TISパルス時間幅 ΔT_{TIS} は、マスターオシレータMOから出力された後、増幅器PAで増幅されたパルスレーザ光の出力波形のTISパルス時間幅 ΔT_{TIS} である。

[0155] 図22Aに示すように、パルスエネルギーが最大となる放電タイミング遅延時間DSDTは、15nsであり、パルスエネルギーの変動が許容できる放電タイミング遅延時間DSDTの範囲は10ns～20nsである。一方、図22Bに示すように、放電タイミング遅延時間DSDTが10ns～20nsの範囲では、増幅器PAで増幅されたパルスレーザ光の出力波形のTISパルス時間幅 ΔT_{TIS} は、22.1ns～28.1nsの範囲で変動し得る。

[0156] 5. 5 MOPA方式とOPS装置の組合せによるパルス時間幅の変動抑制

5. 5. 1 MOPA方式とOPS装置の組合せにおける出力波形

図23A～図23Cは、MOPA方式のレーザ装置3Cにおいて、放電タイミング遅延時間DSDTが変動した場合のOPS装置141からの出力波形の変化を示す。本例は、レーザ媒質としてXeFを使用するXeFエキシマレーザの実施例である。

[0157] 図23Aは、放電タイミング遅延時間DSDT=10nsの場合の入力波

形MP-ORGに基づいて計算した出力波形MP-OPSを示す。DSDT = 10 ns の場合の入力波形MP-ORGにおいて、TISパルス時間幅 $\Delta T_{TIS} = 22.1 \text{ ns}$ である。

[0158] 図23Aにおいて、太い実線で示す出力波形MP-OPS1の条件および計算結果は次のとおりである。

(1) OPS装置の段数：1段構成

(2) 遅延光路長 $L(1) = 3.5 \text{ m}$

(3) TISパルス時間幅 $\Delta T_{TIS} = 45.8 \text{ ns}$

ここで、DSDT = 10 ns の場合の入力波形MP-ORGのパルス全幅 $\Delta T_{25\%} = 16.4 \text{ ns}$ 、パルス全幅 $\Delta T_{50\%} = 12 \text{ ns}$ 、パルス全幅 $\Delta T_{75\%} = 7.6 \text{ ns}$ である。 $\Delta T_{25\%} \times c = 4.92 \text{ m}$ 、 $\Delta T_{75\%} \times c = 2.28 \text{ m}$ である。したがって、遅延光路長 $L(1)$ の設定値 3.5 m は、 $\Delta T_{75\%} \times c \leq L(1) \leq \Delta T_{25\%} \times c$ の条件を満たす。

[0159] 図23Aにおいて、細い波線で示す出力波形MP-OPS12の条件および計算結果は次のとおりである。

(1) OPS装置の段数：2段構成

(2) 遅延光路長 $L(1) = 3.5 \text{ m}$

遅延光路長 $L(2) = 2 \times L(1) = 2 \times 3.5 \text{ m} = 7 \text{ m}$

(3) TISパルス時間幅 $\Delta T_{TIS} = 89.0 \text{ ns}$

[0160] 図23Aにおいて、細い実線で示す出力波形MP-OPS123の条件および計算結果は次のとおりである。

(1) OPS装置の段数：3段構成

(2) 遅延光路長 $L(1) = 3.5 \text{ m}$

遅延光路長 $L(2) = 2 \times L(1) = 2 \times 3.5 \text{ m} = 7 \text{ m}$

遅延光路長 $L(3) = 2 \times L(2) = 2 \times 7 \text{ m} = 14 \text{ m}$

(3) TISパルス時間幅 $\Delta T_{TIS} = 166.8 \text{ ns}$

[0161] 図23Bは、放電タイミング遅延時間DSDT = 15 ns の場合の入力波形MP-ORGに基づいて計算した出力波形MP-OPSを示す。DSDT

= 15 ns の場合の入力波形 MP-ORG において、TIS パルス時間幅 $\Delta T_{TIS} = 24.6 \text{ ns}$ である。

[0162] 図 23B において、太い実線で示す出力波形 MP-OPS1 の条件および計算結果は次のとおりである。

(1) OPS 装置の段数：1 段構成

(2) 遅延光路長 $L(1) = 3.5 \text{ m}$

(3) TIS パルス時間幅 $\Delta T_{TIS} = 46.8 \text{ ns}$

ここで、 $DSDT = 15 \text{ ns}$ の場合の入力波形 MP-ORG のパルス全幅 $\Delta T_{25\%} = 19.8 \text{ ns}$ 、パルス全幅 $\Delta T_{50\%} = 13.7 \text{ ns}$ 、パルス全幅 $\Delta T_{75\%} = 8 \text{ ns}$ である。 $\Delta T_{25\%} \times c = 19.8 \text{ ns} \times 0.3 \text{ m/ns} = 5.95 \text{ m}$ 、 $\Delta T_{75\%} \times c = 8 \text{ ns} \times 0.3 \text{ m/ns} = 2.40 \text{ m}$ である。したがって、遅延光路長 $L(1)$ の設定値 3.5 m は、 $\Delta T_{75\%} \times c \leq L(1) \leq \Delta T_{25\%} \times c$ の条件を満たす。

[0163] 図 23B において、細い波線で示す出力波形 MP-OPS12 の条件および計算結果は次のとおりである。

(1) OPS 装置の段数：2 段構成

(2) 遅延光路長 $L(1) = 3.5 \text{ m}$

遅延光路長 $L(2) = 2 \times L(1) = 2 \times 3.5 \text{ m} = 7 \text{ m}$

(3) TIS パルス時間幅 $\Delta T_{TIS} = 89.5 \text{ ns}$

[0164] 図 23B において、細い実線で示す出力波形 MP-OPS123 の条件および計算結果は次のとおりである。

(1) OPS 装置の段数：3 段構成

(2) 遅延光路長 $L(1) = 3.5 \text{ m}$

遅延光路長 $L(2) = 2 \times L(1) = 2 \times 3.5 \text{ m} = 7 \text{ m}$

遅延光路長 $L(3) = 2 \times L(2) = 2 \times 7 \text{ m} = 14 \text{ m}$

(3) TIS パルス時間幅 $\Delta T_{TIS} = 166.6 \text{ ns}$

[0165] 図 23C は、放電タイミング遅延時間 $DSDT = 20 \text{ ns}$ の場合の入力波形 MP-ORG に基づいて計算した出力波形 MP-OPS を示す。 $DSDT$

= 20 ns の場合の入力波形 MP-ORG において、TIS パルス時間幅 $\Delta T_{TIS} = 28.1 \text{ ns}$ である。

[0166] 図 23C において、太い実線で示す出力波形 MP-OPS1 の条件および計算結果は次のとおりである。

(1) OPS 装置の段数：1 段構成

(2) 遅延光路長 $L(1) = 3.5 \text{ m}$

(3) TIS パルス時間幅 $\Delta T_{TIS} = 48.3 \text{ ns}$

ここで、 $DSDT = 20 \text{ ns}$ の場合の入力波形 MP-ORG のパルス全幅 $\Delta T_{25\%} = 24.4 \text{ ns}$ 、パルス全幅 $\Delta T_{50\%} = 18.4 \text{ ns}$ 、パルス全幅 $\Delta T_{75\%} = 10.8 \text{ ns}$ である。 $\Delta T_{25\%} \times c = 7.32 \text{ m}$ 、 $\Delta T_{75\%} \times c = 3.24 \text{ m}$ である。したがって、遅延光路長 $L(1)$ の設定値 3.5 m は、 $\Delta T_{75\%} \times c \leq L(1) \leq \Delta T_{25\%} \times c$ の条件を満たす。

[0167] 図 23C において、細い波線で示す出力波形 MP-OPS12 の条件および計算結果は次のとおりである。

(1) OPS 装置の段数：2 段構成

(2) 遅延光路長 $L(1) = 3.5 \text{ m}$

遅延光路長 $L(2) = 2 \times L(1) = 2 \times 3.5 \text{ m} = 7 \text{ m}$

(3) TIS パルス時間幅 $\Delta T_{TIS} = 90.7 \text{ ns}$

[0168] 図 23C において、細い実線で示す出力波形 MP-OPS123 の条件および計算結果は次のとおりである。

(1) OPS 装置の段数：3 段構成

(2) 遅延光路長 $L(1) = 3.5 \text{ m}$

遅延光路長 $L(2) = 2 \times L(1) = 2 \times 3.5 \text{ m} = 7 \text{ m}$

遅延光路長 $L(3) = 2 \times L(2) = 2 \times 7 \text{ m} = 14 \text{ m}$

(3) TIS パルス時間幅 $\Delta T_{TIS} = 167.8 \text{ ns}$

[0169] 5.5.2 TIS パルス時間幅 ΔT_{TIS} の変動抑制の効果

図 22B に示したように、MOPA 方式の場合、放電タイミング遅延時間 $DSDT$ が $10 \text{ ns} \sim 20 \text{ ns}$ の間で変動すると、増幅器 PA から出力される

パルスレーザ光の出力波形のTISパルス時間幅 ΔT_{TIS} は、 $22.1\text{ ns} \sim 28.1\text{ ns}$ の範囲で変動する。増幅器PAから出力されるパルスレーザ光の出力波形は、図23A～図23Cにおける、OPS装置141に対する入力波形MP-ORGに相当する。すなわち、OPS装置141に入射前の入力波形MP-ORGは、放電タイミング遅延時間DSDTの変動に応じてTISパルス時間幅 ΔT_{TIS} も、約 6 ns の範囲で変動する。

[0170] 図24は、図23A～図23Cの各出力波形MP-OPSのTISパルス時間幅 ΔT_{TIS} に基づいて、放電タイミング遅延時間DSDTと、1段構成、2段構成および3段構成の各OPS装置を使用した場合のTISパルス時間幅 ΔT_{TIS} との関係を示したものである。図24において、菱形マークでプロットしたMP-ORGのグラフTISは、入力波形MP-ORGのTISパルス時間幅 ΔT_{TIS} の $22.1\text{ ns} \sim 28.1\text{ ns}$ の範囲の変動を示したものである。

[0171] 図24において、MP-OPS1のグラフTISは1段構成のOPS装置を使用した場合のTISパルス時間幅 ΔT_{TIS} の変動を示す。1段構成のOPS装置を使用した場合において、TISパルス時間幅 ΔT_{TIS} は、 $45.8\text{ ns} \sim 48.3\text{ ns}$ の範囲で変動する。しかし、TISパルス時間幅 ΔT_{TIS} の変動幅は約 2.5 ns であり、変動幅が約 6 ns のMP-ORGのグラフTISと比較して、放電タイミング遅延時間DSDTの変動に起因する、TISパルス時間幅 ΔT_{TIS} の変動が抑制される。

[0172] 図24において、MP-OPS12のグラフTISは2段構成のOPS装置を使用した場合のTISパルス時間幅 ΔT_{TIS} の変動を示す。2段構成のOPS装置を使用した場合において、TISパルス時間幅 ΔT_{TIS} は、 $89.0\text{ ns} \sim 90.7\text{ ns}$ の範囲で変動する。TISパルス時間幅 ΔT_{TIS} の変動幅は約 1.7 ns であり、変動幅が約 6 ns のMP-ORGのグラフTISと比較して、放電タイミング遅延時間DSDTの変動に起因する、TISパルス時間幅 ΔT_{TIS} の変動が抑制される。

[0173] 図24において、MP-OPS123のグラフTISは3段構成のOPS

装置を使用した場合のTISパルス時間幅 ΔT_{TIS} の変動を示す。3段構成のOPS装置を使用した場合において、TISパルス時間幅 ΔT_{TIS} は、166.8 ns～167.8 nsの範囲で変動する。TISパルス時間幅 ΔT_{TIS} の変動幅は約1 nsであり、変動幅が約6 nsのMP-ORGのグラフTISと比較して、放電タイミング遅延時間DSDTの変動に起因する、TISパルス時間幅 ΔT_{TIS} の変動が抑制される。

[0174] このように放電タイミング遅延時間DSDTの変動に起因するTISパルス時間幅 ΔT_{TIS} の変動が抑制されるので、MOPA方式において放電タイミング遅延時間DSDTが変動した場合でも、多結晶シリコンの結晶の粒径の変動を抑制することができる。

[0175] 5. 5. 3 その他

図23A～図23Cのすべての出力波形MP-OPSにおいて、光強度比Imrは50%以上である。このため、MOPA方式とOPS装置を組み合わせた本例においても、光強度比Imrを改善しつつ、パルス時間幅を伸ばすことができる。これにより、多結晶シリコンの粒径を大きくする効果も期待できる。

[0176] 6. 各種条件の好ましい範囲

6. 1 遅延光路長L(1)のより好ましい範囲

図25は、第3実施形態に示すレーザ装置3Cのレーザ媒質としてKrFを使用した、MOPA方式のKrFエキシマレーザの実施例を示す。図25は、入力波形KrMP-ORGに基づいて計算した出力波形KrMP-OPSを示す。第1のOPSの遅延光路長L(1)は、 $\Delta T 75\% \times c \leq L(1) \leq \Delta T 25\% \times c$ (式(3))の範囲で設定される。

図25において、入力波形KrMP-ORGの条件は次のとおりである。

(1) 放電タイミング遅延時間DSDT = 20 ns

(2) TISパルス時間幅 ΔT_{TIS} = 29.3 ns

(3) パルス全幅 $\Delta T_{25\%}$ = 21.6 ns

パルス全幅 $\Delta T_{50\%}$ = 12.4 ns

パルス全幅 $\Delta T_{75\%} = 5.2 \text{ ns}$

[0177] 図25において、 $\Delta T_{25\%}$ の場合の出力波形K r M P - O P Sの算出条件及び計算結果は次のとおりである。

(1) O P S装置の段数：1段構成

(2) 遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{25\%} \times c = 21.6 \text{ ns} \times 0.3 \text{ m/ns} = 6.48 \text{ m}$

(3) T I Sパルス時間幅 $\Delta T_{TIS} = 67.4 \text{ ns}$

[0178] 図25において、 $\Delta T_{50\%}$ の場合の出力波形K r M P - O P Sの算出条件及び計算結果は次のとおりである。

(1) O P S装置の段数：1段構成

(2) 遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{50\%} \times c = 12.4 \text{ ns} \times 0.3 \text{ m/ns} = 3.72 \text{ m}$

(3) T I Sパルス時間幅 $\Delta T_{TIS} = 51.8 \text{ ns}$

[0179] 図25において、 $\Delta T_{75\%}$ の場合の出力波形K r M P - O P Sの算出条件及び計算結果は次のとおりである。

(1) O P S装置の段数：1段構成

(2) 遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{75\%} \times c = 5.2 \text{ ns} \times 0.3 \text{ m/ns} = 1.56 \text{ m}$

(3) T I Sパルス時間幅 $\Delta T_{TIS} = 38.4 \text{ ns}$

[0180] 図25に示す、すべての出力波形K r M P - O P Sにおいて、光強度比 I_{mr} は約36%以上となった。T I Sパルス時間幅 ΔT_{TIS} は、 $\Delta T_{75\%}$ の出力波形K r M P - O P Sにおいて38.4 ns、 $\Delta T_{50\%}$ の出力波形K r M P - O P Sにおいて51.8 ns、 $\Delta T_{25\%}$ の出力波形K r M P - O P Sにおいて67.4 nsとなる。各出力波形K r M P - O P Sは、入力波形K r M P - O R Gの29.3 nsに対してパルス時間幅が長い。このように、光強度比 I_{mr} を改善しつつ、パルス時間幅を伸ばすことができる。パルスレーザ光の照射中において溶融状態のアモルファスシリコンの再凝固が抑制されて、多結晶シリコンの粒径を大きくする効果が期待できる。

[0181] 図26は、遅延光路長 $L(1)$ と光強度比 I_{mr} の関係を示すグラフである。図26に示すグラフは、図25に示す入力波形 $Kr-ORG$ のパルス全幅に応じた遅延光路長 $L(1)$ を変化させた場合において、各遅延光路長 $L(1)$ に応じた出力波形 $Kr-OPS$ の光強度比 I_{mr} をプロットしたものである。

[0182] 図26に示すグラフにおいて、光強度比 I_{mr} が50%以上100%未満の遅延光路長 $L(1)$ の範囲は、 $2m < L(1) \leq 4.5m$ となる。遅延光路長 $L(1)$ がこの範囲であれば、50%以上の光強度比 I_{mr} を確保しつつ、 TIS パルス時間幅 ΔT_{TIS} を伸ばすことができる。

[0183] 図3に示したとおり、 OPS において、各周回光 PS は、遅延光路長 L に応じた遅延時間 DT だけ遅延しながら順次出力される。上述のとおり、遅延光路長 L と遅延時間 DT の関係は、 $DT = L/c$ である。そうすると、 $2m < L(1) \leq 4.5m$ の範囲に応じた遅延時間 DT の範囲は、 $2m/c < DT \leq 4.5m/c$ であり、 $6.67ns < DT \leq 15ns$ となる。

[0184] この範囲を、図25に示す入力波形 $KrMP-OPS$ のパルス全幅に換算して、遅延光路長 $L(1)$ の範囲を求めると、下式(5)になる。

$$\Delta T_{65\%} \times c \leq L(1) \leq \Delta T_{40\%} \times c \cdots \text{式(5)}$$

遅延光路長 $L(1)$ が、式(5)の条件を満たす範囲にあれば、50%以上の光強度比を維持しながら、パルス時間幅を伸ばすことができる。このため、遅延光路長 $L(1)$ は、上記式(3)の条件を満たす範囲であることに加えて、式(5)の条件を満たす範囲であることがさらに好ましい。

[0185] 6.2 ビームスプリッタの反射率 RB の好ましい範囲

図27Aに示すグラフは、MOPA方式の KrF エキシマレーザを例に、ビームスプリッタの反射率を変化させた場合の出力波形 $KrMP-OPS$ の変化を示す。図27Aに示す入力波形 $KrMP-ORG$ は、 KrF エキシマレーザに係る実機で計測したデータに基づく波形である。入力波形 $KrMP-ORG$ は、放電タイミング遅延時間 $DSDT = 20ns$ の場合の入力波形であり、 TIS パルス時間幅 $\Delta T_{TIS} = 29.3ns$ である。

[0186] 出力波形 $K_{rMP-OPS}$ は、入力波形 $K_{rMP-ORG}$ に基づいて算出した波形である。各出力波形 $K_{rMP-OPS}$ の算出条件および計算結果は次のとおりである。

(1) OPS 装置の段数：1 段構成

(2) 遅延光路長 $L(1) = \text{入力波形 } K_{rMP-ORG} \text{ のパルス全幅 } \Delta T_{50\%} \times C = 12.4 \text{ ns} \times 0.3 \text{ m/ns} = 3.72 \text{ m}$

(3) ビームスプリッタの反射率 R_B

出力波形 $K_{rMP-OPS}$ 50% の反射率 $R_B = 50\%$

出力波形 $K_{rMP-OPS}$ 60% の反射率 $R_B = 60\%$

出力波形 $K_{rMP-OPS}$ 70% の反射率 $R_B = 70\%$

[0187] 図 27B は、図 27A の出力波形 $K_{rMP-OPS}$ に基づいて算出した、反射率 R_B と、光強度の最大値および光強度比との関係を示すグラフである。図 27C は、図 27A の出力波形 $K_{rMP-OPS}$ に基づいて算出した、反射率 R_B と、TIS パルス時間幅 ΔT_{TIS} との関係を示すグラフである。

[0188] 図 27A に示すように、各出力波形 $K_{rMP-OPS}$ は、反射率 R_B が高いほど、出力波形 $K_{rMP-OPS}$ の 1 つ目のピーク値が低下し、反対に 2 つ目のピーク値が上昇する。1 つ目と 2 つ目のピーク間の谷間の光強度は、反射率 R_B が高いほど低下する。

[0189] 図 27B に示すように、反射率 R_B の変化に応じた、各出力波形 $K_{rMP-OPS}$ の光強度最大値の変化を示すグラフは、下に凸な曲線となり、反射率 $R_B = 55\%$ が極小値となる。図 27A および図 27B に示すように、反射率 R_B が 55% より低い場合は、1 つ目のピークが最大値となり、反射率 R_B が 55% より高い場合は、2 つ目のピークが最大値となる。

[0190] 一方、図 27B に示すように、出力波形 $K_{rMP-OPS}$ は、反射率 R_B が 30% ~ 70% の範囲では、反射率 R_B が変化しても、光強度比 I_{mr} は殆ど変化しない。また、図 27C に示すように、TIS パルス時間幅 ΔT_{TIS} と反射率 R_B との関係を示すグラフは、上に凸な曲線となり、TIS パルス時間幅 ΔT_{TIS} が最大となる反射率 R_B は約 55% である。

[0191] 反射率 $R_B = 40\% \sim 65\%$ の範囲では、 TIS パルス時間幅 ΔT_{TIS} が 50 ns 以上となっている。また、反射率 $40\% \sim 65\%$ の範囲では、図27Bに示すように、光強度比 I_{mr} は約 57% 以上を維持している。出力波形 $K_r - OPS$ の最大値も 0.5 前後で推移している。図27Cに示すように、 TIS パルス時間幅 ΔT_{TIS} は 55 ns 以上を維持しており、大きな変化はない。

[0192] したがって、ビームスプリッタ42の反射率 R_B は、下式(6)の範囲であることが好ましい。

$$40\% \leq R_B \leq 65\% \cdots \text{式(6)}$$

[0193] 6.3 遅延光路長 $L(1)$ の好ましい範囲

図28～図30は、MOPA方式の $K_r F$ エキシマレーザを例に、遅延光路長 L および OPS 装置の段数を変化させた場合の出力波形 $K_r MP - OPS$ を示す。図28～図30に示す入力波形 $K_r MP - ORG$ は、図27Aに示した入力波形 $K_r MP - ORG$ と同様に、放電タイミング遅延時間 $DSDT = 20\text{ ns}$ の場合の入力波形であり、 TIS パルス時間幅 $\Delta T_{TIS} = 29.3\text{ ns}$ である。

[0194] 図28A～図28Cは、第1の OPS 41A1の遅延光路長 $L(1)$ をパルス全幅 $\Delta T_{25\%} \times c$ に設定した場合の出力波形 $K_r MP - OPS$ である。図28A～図28Cにおいて、第2および第3の OPS 41A2、41A3の遅延光路長 $L(2)$ 、 $L(3)$ を設定する際の基準となる前段の遅延光路長 $L(k-1)$ に対して、掛ける係数を変化させている。図28Aのグラフの係数は 1.8 、図28Bのグラフの係数は 2.0 、図28Cのグラフの係数は 2.2 である。

[0195] 図28Aにおける、 $\Delta T_{25\%}$ の各出力波形 $K_r MP - OPS$ の算出条件および計算結果は、次のとおりである。

A1: $\Delta T_{25\%}$ の出力波形 $K_r MP - OPS1$

(1) OPS 装置の段数: 1段構成

(2) 遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{25\%} \times c = 19.8\text{ ns} \times 0.3\text{ m/ns} =$

6. 4 8 m

(3) T I S パルス時間幅 $\Delta T_{TIS} = 67.4 \text{ ns}$

A 2 : $\Delta T_{25\%}$ の出力波形 K r M P - O P S 1 2、係数 = 1. 8

(1) O P S 装置の段数 : 2 段構成

(2) 遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{25\%} \times c = 6.48 \text{ m}$

遅延光路長 $L(2) = 1.8 \times L(1) = 1.8 \times 6.48 \text{ m} = 11.66 \text{ m}$

1. 6 6 m

(3) T I S パルス時間幅 $\Delta T_{TIS} = 135.6 \text{ ns}$

A 3 : $\Delta T_{25\%}$ の出力波形 K r M P - O P S 1 2 3、係数 = 1. 8

(1) O P S 装置の段数 : 3 段構成

(2) 遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{25\%} \times c = 6.48 \text{ m}$

遅延光路長 $L(2) = 1.8 \times L(1) = 11.66 \text{ m}$

遅延光路長 $L(3) = 1.8 \times L(2) = 1.8 \times 11.66 \text{ m} = 21.0 \text{ m}$

2 1 m

(3) T I S パルス時間幅 $\Delta T_{TIS} = 252.8 \text{ ns}$

[0196] 図 2 8 B における、 $\Delta T_{25\%}$ の各出力波形 K r M P - O P S の算出条件および計算結果は、次のとおりである。

B 1 : $\Delta T_{25\%}$ の出力波形 K r M P - O P S 1

(1) O P S 装置の段数 : 1 段構成

(2) 遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{25\%} \times c = 6.48 \text{ m}$

(3) T I S パルス時間幅 $\Delta T_{TIS} = 67.4 \text{ ns}$

B 2 : $\Delta T_{25\%}$ の出力波形 K r M P - O P S 1 2、係数 = 2. 0

(1) O P S 装置の段数 : 2 段構成

(2) 遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{25\%} \times c = 6.48 \text{ m}$

遅延光路長 $L(2) = 2.0 \times L(1) = 2.0 \times 6.48 \text{ m} = 12.96 \text{ m}$

2. 9 6 m

(3) T I S パルス時間幅 $\Delta T_{TIS} = 138.3 \text{ ns}$

B 3 : $\Delta T_{25\%}$ の出力波形 K r M P - O P S 1 2 3、係数 = 2. 0

(1) OPS装置の段数：3段構成

(2) 遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{25\%} \times c = 6.48 \text{ m}$

遅延光路長 $L(2) = 2.0 \times L(1) = 12.96 \text{ m}$

遅延光路長 $L(3) = 2.0 \times L(2) = 2.0 \times 12.96 \text{ m} = 25.92 \text{ m}$

(3) TISパルス時間幅 $\Delta T_{\text{TIS}} = 265.7 \text{ ns}$

[0197] 図28Cにおける、 $\Delta T_{25\%}$ の各出力波形K r M P - O P Sの算出条件および計算結果は、次のとおりである。

C1： $\Delta T_{25\%}$ の出力波形K r M P - O P S 1

(1) OPS装置の段数：1段構成

(2) 遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{25\%} \times c = 6.48 \text{ m}$

(3) TISパルス時間幅 $\Delta T_{\text{TIS}} = 67.4 \text{ ns}$

C2： $\Delta T_{25\%}$ の出力波形K r M P - O P S 12、係数=2.2

(1) OPS装置の段数：2段構成

(2) 遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{25\%} \times c = 6.48 \text{ m}$

遅延光路長 $L(2) = 2.2 \times L(1) = 2.2 \times 6.48 \text{ m} = 14.26 \text{ m}$

(3) TISパルス時間幅 $\Delta T_{\text{TIS}} = 147 \text{ ns}$

C3： $\Delta T_{25\%}$ の出力波形K r M P - O P S 123、係数=2.2

(1) OPS装置の段数：3段構成

(2) 遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{25\%} \times c = 6.48 \text{ m}$

遅延光路長 $L(2) = 2.2 \times L(1) = 14.26 \text{ m}$

遅延光路長 $L(3) = 2.2 \times L(2) = 2.2 \times 14.26 \text{ m} = 31.26 \text{ m}$

(3) TISパルス時間幅 $\Delta T_{\text{TIS}} = 313.6 \text{ ns}$

[0198] 図28A～図28Cに示す遅延光路長 $L(1)$ 、 $L(2)$ 、 $L(3)$ の範囲であれば、1段～3段構成のOPS装置のいずれを使用しても、光強度の落ち込みを抑制して比較的高い値で光強度比 I_{mr} を維持することができる

。また、図28の例において、 $L(1)$ 、 $L(2) = 1.8 \times L(1)$ 、 $L(3) = 1.8 \times L(2)$ の条件で、3段構成のOPS装置を用いれば、TISパルス時間幅 ΔT_{TIS} を252.8 nsまで伸ばすことができる。また、 $L(1)$ 、 $L(2) = 2.2 \times L(1)$ 、 $L(3) = 2.2 \times L(2)$ の条件では、3段構成のOPS装置を用いれば、TISパルス時間幅 ΔT_{TIS} を313.6 nsまで伸ばすことができる。

[0199] 図29A～図29Cは、第1のOPS41A1の遅延光路長 $L(1)$ をパルス全幅 $\Delta T_{50\%} \times c$ に設定した場合の出力波形K rMP-OPSである。図28A～図28Cと同様に、図29Aのグラフの係数は1.8、図29Bのグラフの係数は2.0、図29Cのグラフの係数は2.2である。

[0200] 図29Aにおける、 $\Delta T_{50\%}$ の各出力波形K rMP-OPSの算出条件および計算結果は、次のとおりである。

A1： $\Delta T_{50\%}$ の出力波形K rMP-OPS1

(1) OPS装置の段数：1段構成

(2) 遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{50\%} \times c = 12.4 \text{ ns} \times 0.3 \text{ m/ns} = 3.72 \text{ m}$

(3) TISパルス時間幅 $\Delta T_{TIS} = 51.8 \text{ ns}$

A2： $\Delta T_{50\%}$ の出力波形K rMP-OPS12、係数=1.8

(1) OPS装置の段数：2段構成

(2) 遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{50\%} \times c = 3.72 \text{ m}$

遅延光路長 $L(2) = 1.8 \times L(1) = 1.8 \times 3.72 \text{ m} = 6.7 \text{ m}$

(3) TISパルス時間幅 $\Delta T_{TIS} = 90.1 \text{ ns}$

A3： $\Delta T_{50\%}$ の出力波形K rMP-OPS123、係数=1.8

(1) OPS装置の段数：3段構成

(2) 遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{50\%} \times c = 3.72 \text{ m}$

遅延光路長 $L(2) = 1.8 \times L(1) = 6.7 \text{ m}$

遅延光路長 $L(3) = 1.8 \times L(2) = 1.8 \times 6.7 \text{ m} = 12$

m

(3) T I S パルス時間幅 $\Delta T_{TIS} = 158.6 \text{ ns}$

[0201] 図 29B における、 $\Delta T_{50\%}$ の各出力波形 K r M P - O P S の算出条件および計算結果は、次のとおりである。

B 1 : $\Delta T_{50\%}$ の出力波形 K r M P - O P S 1

(1) O P S 装置の段数 : 1 段構成

(2) 遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{50\%} \times c = 3.72 \text{ m}$

(3) T I S パルス時間幅 $\Delta T_{TIS} = 51.8 \text{ ns}$

B 2 : $\Delta T_{50\%}$ の出力波形 K r M P - O P S 12、係数 = 2.0

(1) O P S 装置の段数 : 2 段構成

(2) 遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{50\%} \times c = 3.72 \text{ m}$

遅延光路長 $L(2) = 2.0 \times L(1) = 2.0 \times 3.72 \text{ m} = 7$

. 44 m

(3) T I S パルス時間幅 $\Delta T_{TIS} = 93.8 \text{ ns}$

B 3 : $\Delta T_{50\%}$ の出力波形 K r M P - O P S 123、係数 = 2.0

(1) O P S 装置の段数 : 3 段構成

(2) 遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{50\%} \times c = 3.72 \text{ m}$

遅延光路長 $L(2) = 2.0 \times L(1) = 7.44 \text{ m}$

遅延光路長 $L(3) = 2.0 \times L(2) = 2.0 \times 7.44 \text{ m} = 1$

4. 88 m

(3) T I S パルス時間幅 $\Delta T_{TIS} = 176.5 \text{ ns}$

[0202] 図 29C における、 $\Delta T_{50\%}$ の各出力波形 K r M P - O P S の算出条件および計算結果は、次のとおりである。

C 1 : $\Delta T_{50\%}$ の出力波形 K r M P - O P S 1

(1) O P S 装置の段数 : 1 段構成

(2) 遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{50\%} \times c = 3.72 \text{ m}$

(3) T I S パルス時間幅 $\Delta T_{TIS} = 51.8 \text{ ns}$

C 2 : $\Delta T_{50\%}$ の出力波形 K r M P - O P S 12、係数 = 2.2

(1) O P S 装置の段数：2 段構成

(2) 遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{50\%} \times c = 3.72 \text{ m}$

遅延光路長 $L(2) = 2.2 \times L(1) = 2.2 \times 3.72 \text{ m} = 8$

. 18 m

(3) T I S パルス時間幅 $\Delta T_{TIS} = 99.7 \text{ ns}$

C 3 : $\Delta T_{50\%}$ の出力波形 K r M P - O P S 1 2 3、係数 = 2.2

(1) O P S 装置の段数：3 段構成

(2) 遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{50\%} \times c = 3.72 \text{ m}$

遅延光路長 $L(2) = 2.2 \times L(1) = 8.18 \text{ m}$

遅延光路長 $L(3) = 2.2 \times L(2) = 2.2 \times 8.18 = 18$

m

(3) T I S パルス時間幅 $\Delta T_{TIS} = 205.4 \text{ ns}$

[0203] 図 29 A ~ 図 29 C に示す遅延光路長 $L(1)$ 、 $L(2)$ 、 $L(3)$ の範囲であれば、1 段 ~ 3 段構成の O P S 装置のいずれを使用しても、光強度の落ち込みを抑制して比較的高い値で光強度比 I_{mr} を維持することができる。また、図 29 の例において、 $L(1)$ 、 $L(2) = 1.8 \times L(1)$ 、 $L(3) = 1.8 \times L(2)$ の条件で、3 段構成の O P S 装置を用いれば、T I S パルス時間幅 ΔT_{TIS} を 158.6 ns まで伸ばすことができる。また、 $L(1)$ 、 $L(2) = 2.2 \times L(1)$ 、 $L(3) = 2.2 \times L(2)$ の条件では、3 段構成の O P S 装置を用いれば、T I S パルス時間幅 ΔT_{TIS} を 205.4 ns まで伸ばすことができる。

[0204] 図 30 A ~ 図 30 C は、第 1 の O P S 4 1 A 1 の遅延光路長 $L(1)$ をパルス全幅 $\Delta T_{75\%} \times c$ に設定した場合の出力波形 K r M P - O P S である。図 28 A ~ 図 28 C と同様に、図 30 A のグラフの係数は 1.8、図 30 B のグラフの係数は 2.0、図 30 C のグラフの係数は 2.2 である。

[0205] 図 30 A における、 $\Delta T_{75\%}$ の各出力波形 K r M P - O P S の算出条件および計算結果は、次のとおりである。

A 1 : $\Delta T_{75\%}$ の出力波形 K r M P - O P S 1

(1) OPS装置の段数：1段構成

(2) 遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{75\%} \times c = 5.2 \text{ ns} \times 0.3 \text{ m/ns} = 1.54 \text{ m}$

(3) TISパルス時間幅 $\Delta T_{\text{TIS}} = 38.4 \text{ ns}$

A2: $\Delta T_{75\%}$ の出力波形 KrMP-OPS12、係数 = 1.8

(1) OPS装置の段数：2段構成

(2) 遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{75\%} \times c = 1.54 \text{ m}$

遅延光路長 $L(2) = 1.8 \times L(1) = 1.8 \times 1.54 \text{ m} = 2.77 \text{ m}$

(3) TISパルス時間幅 $\Delta T_{\text{TIS}} = 51.8 \text{ ns}$

A3: $\Delta T_{75\%}$ の出力波形 KrMP-OPS123、係数 = 1.8

(1) OPS装置の段数：3段構成

(2) 遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{75\%} \times c = 1.54 \text{ m}$

遅延光路長 $L(2) = 1.8 \times L(1) = 2.77 \text{ m}$

遅延光路長 $L(3) = 1.8 \times L(2) = 1.8 \times 2.77 \text{ m} = 4.99 \text{ m}$

(3) TISパルス時間幅 $\Delta T_{\text{TIS}} = 77.2 \text{ ns}$

[0206] 図30Bにおける、 $\Delta T_{75\%}$ の各出力波形 KrMP-OPSの算出条件および計算結果は、次のとおりである。

B1: $\Delta T_{75\%}$ の出力波形 KrMP-OPS1

(1) OPS装置の段数：1段構成

(2) 遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{75\%} \times c = 1.54 \text{ m}$

(3) TISパルス時間幅 $\Delta T_{\text{TIS}} = 38.4 \text{ ns}$

B2: $\Delta T_{75\%}$ の出力波形 KrMP-OPS12、係数 = 2.0

(1) OPS装置の段数：2段構成

(2) 遅延光路長 $L(1) = \Delta T_{50\%} \times c = 1.54 \text{ m}$

遅延光路長 $L(2) = 2.0 \times L(1) = 2.0 \times 1.54 \text{ m} = 3.08 \text{ m}$

$$(3) \text{ TISパルス時間幅 } \Delta T_{\text{TIS}} = 53.9 \text{ ns}$$

B3 : $\Delta T_{75\%}$ の出力波形 KrMP-OPS123、係数 = 2.0

(1) OPS装置の段数 : 3段構成

$$(2) \text{ 遅延光路長 } L(1) = \Delta T_{75\%} \times c = 1.54 \text{ m}$$

$$\text{遅延光路長 } L(2) = 2.0 \times L(1) = 3.08 \text{ m}$$

$$\text{遅延光路長 } L(3) = 2.0 \times L(2) = 2.0 \times 3.08 \text{ m} = 6$$

. 16 m

$$(3) \text{ TISパルス時間幅 } \Delta T_{\text{TIS}} = 87.7 \text{ ns}$$

[0207] 図30Cにおける、 $\Delta T_{75\%}$ の各出力波形 KrMP-OPSの算出条件および計算結果は、次のとおりである。

C1 : $\Delta T_{75\%}$ の出力波形 KrMP-OPS1

(1) OPS装置の段数 : 1段構成

$$(2) \text{ 遅延光路長 } L(1) = \Delta T_{75\%} \times c = 1.54 \text{ m}$$

$$(3) \text{ TISパルス時間幅 } \Delta T_{\text{TIS}} = 38.4 \text{ ns}$$

C2 : $\Delta T_{75\%}$ の出力波形 KrMP-OPS12、係数 = 2.2

(1) OPS装置の段数 : 2段構成

$$(2) \text{ 遅延光路長 } L(1) = \Delta T_{75\%} \times c = 1.54 \text{ m}$$

$$\text{遅延光路長 } L(2) = 2.2 \times L(1) = 2.2 \times 1.54 \text{ m} = 3$$

. 39 m

$$(3) \text{ TISパルス時間幅 } \Delta T_{\text{TIS}} = 56.1 \text{ ns}$$

C3 : $\Delta T_{75\%}$ の出力波形 KrMP-OPS123、係数 = 2.2

(1) OPS装置の段数 : 3段構成

$$(2) \text{ 遅延光路長 } L(1) = \Delta T_{75\%} \times c = 1.54 \text{ m}$$

$$\text{遅延光路長 } L(2) = 2.2 \times L(1) = 3.39 \text{ m}$$

$$\text{遅延光路長 } L(3) = 2.2 \times L(2) = 2.2 \times 3.39 = 7.$$

45 m

$$(3) \text{ TISパルス時間幅 } \Delta T_{\text{TIS}} = 98.4 \text{ ns}$$

[0208] 図30A～図30Cに示す遅延光路長 $L(1)$ 、 $L(2)$ 、 $L(3)$ の範

囲であれば、1段～3段構成のOPS装置のいずれを使用しても、光強度の落ち込みを抑制して比較的高い値で光強度比 I_{mr} を維持することができる。また、図30の例において、 $L(1)$ 、 $L(2) = 1.8 \times L(1)$ 、 $L(3) = 1.8 \times L(2)$ の条件で、3段構成のOPS装置を用いれば、TISパルス時間幅 ΔT_{TIS} を77.2 nsまで伸ばすことができる。また、 $L(1)$ 、 $L(2) = 2.2 \times L(1)$ 、 $L(3) = 2.2 \times L(2)$ の条件では、3段構成のOPS装置を用いれば、TISパルス時間幅 ΔT_{TIS} を98.4 nsまで伸ばすことができる。

[0209] 図31は、図28～図30に示した例のOPS装置の各態様とTISパルス時間幅 ΔT_{TIS} との関係を示す。ここで、OPS装置の各態様とは、OPS装置の段数や遅延光路長 L 等である。遅延光路長 $L(1)$ が $\Delta T_{75\%} \times c \leq L(1) \leq \Delta T_{25\%} \times c$ の範囲に設定されている場合において、グラフ $K_{rMP-OPS1}$ で示される1段構成のOPS装置では、TISパルス時間幅 ΔT_{TIS} は、38.4 ns～67.4 nsの範囲でストレッチされる。同様に、グラフ $K_{rMP-OPS12}$ で示される2段構成のOPS装置では、TISパルス時間幅 ΔT_{TIS} は、51.8 ns～147 nsの範囲でストレッチされる。同様に、グラフ $K_{rMP-OPS123}$ で示される3段構成のOPS装置では、TISパルス時間幅 ΔT_{TIS} は、77.2 ns～313.6 nsの範囲でストレッチされる。

[0210] 図29～図31で示した遅延光路長 $L(1)$ 、 $L(2)$ 、 $L(3)$ の範囲であれば、光強度の落ち込みを抑制して、比較的高い光強度比 I_{mr} を維持しつつ、TISパルス時間幅 ΔT_{TIS} を伸ばすことができる。図29～図31で示した遅延光路長 $L(1)$ 、 $L(2)$ 、 $L(3)$ の条件は、下式(7)で示される。

OPS装置が第1のOPSに加えて直列に配置された第2～第 n のOPSを含む場合において、

第 k のOPSの遅延光路長 $L(k)$ は、以下の式(7)に示す条件を満たす。

$$1. 8 \times L(k-1) \leq L(k) \leq 2.2 \times L(k-1) \cdots \text{式 (7)}$$

ここで、 $k = 2$ 以上 n 以下である。

[0211] 式 (7) のように遅延光路長 L を設定することで、光強度の落ち込みを抑制して比較的高い光強度比 I_{mr} を確保しつつ、 TIS パルス時間幅 ΔT_{TIS} を伸ばすことができる。ただし、上記式 (4) で示したとおり、 $L(k) = 2 \times L(k-1)$ の条件を満たすように遅延光路長 L を設定することがより好ましい。というのも、遅延光路長 $L(k)$ が、基準となる遅延光路長 $L(1)$ の整数倍で規定した方が、設計や凹面ミラーの調達の一やすさなどの点でメリットが期待できるからである。

[0212] 6. 4 その他

図 3 2 は、遅延光路長 $L(1)$ 、 $L(2)$ 、 $L(3)$ を、式 (4) の条件を満たすように設定した、MOPA 方式の KrF エキシマレーザの実施例である。KrMP-ORG は、放電タイミング遅延時間 $DSDT = 15 \text{ ns}$ の場合の波形である。

[0213] 入力波形 KrMP-ORG において、 $\Delta T_{75\%} = 5.2 \text{ ns}$ 、 $\Delta T_{25\%} = 19.8 \text{ ns}$ であるので、 $\Delta T_{75\%} \times c = 1.54 \text{ m}$ 、 $\Delta T_{25\%} \times c = 6.48 \text{ m}$ となる。したがって、 $L(1) = 3.5 \text{ m}$ という設定値は、 $\Delta T_{75\%} \times c \leq L(1) \leq \Delta T_{25\%} \times c$ (式 (3)) の条件を満たす。

[0214] $L(2)$ および $L(3)$ は、 $L(2) = 2 \times L(1) = 2 \times 3.5 \text{ m} = 7 \text{ m}$ 、 $L(3) = 2 \times L(2) = 2 \times 7 \text{ m} = 14 \text{ m}$ に設定されており、式 (4) の $L(k) = 2 \times L(k-1)$ の条件を満たしている。

[0215] 図 3 2 に示すように、1 段構成の OPS 装置を使用した出力波形 KrMP-ORG1、2 段構成の OPS 装置を使用した出力波形 KrMP-ORG12、3 段構成の OPS 装置を使用した出力波形 KrMP-ORG123 のいずれも、図 4 に係る比較例と比べて、1 つ目と 2 つ目のピーク間の光強度の落ち込みが抑制されている。光強度比 I_{mr} は 50% 以上である。3 段構成の OPS 装置を使用した場合には、出力波形 KrMP-ORG123 に示す

ように、T I Sパルス時間幅 ΔT_{TIS} を、入力波形K r - O R Gの29.3 nsから168.6 nsまで伸ばすことができる。これにより、比較的高い光強度比I m rを維持しながら、T I Sパルス時間幅 ΔT_{TIS} を伸ばすことができる。

[0216] 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各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。

[0217] 本明細書およ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、本明細書およ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] レーザアニールに用いられるレーザ装置は、以下を備える：
- A. パルスレーザ光を出力するレーザ発振器；
- B. 前記レーザ発振器から出力された前記パルスレーザ光の光路上に配置され、入射した前記パルスレーザ光の一部を透過して、他の一部を、遅延光路を周回させて出力することにより、前記パルスレーザ光のパルス時間幅をストレッチする第1のOP Sを含むOP S装置であって、前記第1のOP Sの前記遅延光路の長さである遅延光路長 L (1) が、以下の式 (A) の範囲にあるOP S装置。
- $$\Delta T_{75\%} \times c \leq L (1) \leq \Delta T_{25\%} \times c \cdots \cdots \text{式 (A)}$$
- ここで、 $\Delta T_{a\%}$ は、前記レーザ発振器から出力され、前記OP S装置に入射するパルスレーザ光の入力波形において、光強度がピーク値に対して $a\%$ の値を示す位置の時間全幅であり、 c は光速である。
- [請求項2] 請求項1に記載のレーザ装置であって、
- 前記第1のOP Sの前記遅延光路長 L (1) は、以下の式 (B) の範囲にある。
- $$\Delta T_{65\%} \times c \leq L (1) \leq \Delta T_{40\%} \times c \cdots \cdots \text{式 (B)}$$
- [請求項3] 請求項1に記載のレーザ装置であって、
- 前記OP S装置は、前記第1のOP Sに加えて、前記第1のOP Sに直列に配置された第2から第 n のOP Sを含み、
- 第 k のOP Sの遅延光路長 L (k) は、以下の式 (C) に示す条件を満たす。
- $$1.8 \times L (k-1) \leq L (k) \leq 2.2 \times (k-1) \cdots \cdots \text{式 (C)}$$
- ここで、 $k = 2$ 以上 n 以下である。
- [請求項4] 請求項3に記載のレーザ装置であって、
- 前記遅延光路長 L (k) は、以下の式 (D) に示す条件を満たす。
- $$L (k) = 2 \times L (k-1) \cdots \cdots \text{式 (D)}$$

- [請求項5] 請求項1に記載のレーザ装置であって、
前記第1のO P Sは、前記パルスレーザ光の一部を透過して、他の一部を前記遅延光路に向けて反射するビームスプリッタを含んでおり、前記ビームスプリッタの反射率は、40%以上65%以下の範囲内である。
- [請求項6] 請求項3に記載のレーザ装置であって、
前記第1から第nのO P Sは、前記レーザ発振器側から、前記遅延光路長が短い順番で配置されている。
- [請求項7] 請求項1に記載のレーザ装置であって、以下をさらに含む：
C. 前記レーザ発振器と前記O P S装置との間の光路上に配置される増幅器。
- [請求項8] 請求項7に記載のレーザ装置であって、
前記第1のO P Sの前記遅延光路長 $L(1)$ は、以下の式(B)の範囲にある。
$$\Delta T_{65\%} \times c \leq L(1) \leq \Delta T_{40\%} \times c \cdots \cdots \text{式(B)}$$
- [請求項9] 請求項7に記載のレーザ装置であって、
前記O P S装置は、前記第1のO P Sに加えて、前記第1のO P Sに直列に配置された第2から第nのO P Sを含み、
第kのO P Sの遅延光路長 $L(k)$ は、以下の式(C)に示す条件を満たす。
$$1.8 \times L(k-1) \leq L(k) \leq 2.2 \times (k-1) \cdots \cdots \text{式(C)}$$

ここで、 $k=2$ 以上 n 以下である。
- [請求項10] 請求項9に記載のレーザ装置であって、
前記遅延光路長 $L(k)$ は、以下の式(D)に示す条件を満たす。
$$L(k) = 2 \times L(k-1) \cdots \cdots \text{式(D)}$$
- [請求項11] 前記請求項7に記載のレーザ装置であって、
前記第1のO P Sは、前記パルスレーザ光の一部を透過して、他の

一部を前記遅延光路に向けて反射するビームスプリッタを含んでおり、前記ビームスプリッタの反射率は、40%以上65%以下の範囲内である。

[請求項12] 請求項9に記載のレーザ装置であって、
前記第1から第nのO P Sは、前記レーザ発振器側から、前記遅延光路長Lが短い順番で配置されている。

[請求項13] レーザアニール装置は、以下を備える：
A. パルスレーザ光を出力するレーザ発振器を含むレーザ装置；
B. 前記レーザ発振器から出力された前記パルスレーザ光の光路上に配置され、入射した前記パルスレーザ光の一部を透過して、他の一部を、遅延光路を周回させて出力することにより、前記パルスレーザ光のパルス時間幅をストレッチする第1のO P Sを含むO P S装置であって、前記第1のO P Sの前記遅延光路の長さである遅延光路長L(1)が、以下の式(A)の範囲にあるO P S装置；及び
C. 前記O P S装置によりストレッチされた前記パルスレーザ光を用いて半導体薄膜をアニールするアニール装置。

$$\Delta T_{75\%} \times c \leq L(1) \leq \Delta T_{25\%} \times c \cdots \cdots \text{式(A)}$$

ここで、 $\Delta T_{a\%}$ は、前記レーザ発振器から出力され、前記O P S装置に入射するパルスレーザ光の入力波形において、光強度がピーク値に対してa%の値を示す位置の時間全幅であり、cは光速である。

[請求項14] 請求項13に記載のレーザアニール装置であって、
前記第1のO P Sの前記遅延光路長L(1)は、以下の式(B)の範囲にある。

$$\Delta T_{65\%} \times c \leq L(1) \leq \Delta T_{40\%} \times c \cdots \cdots \text{式(B)}$$

[請求項15] 請求項13に記載のレーザアニール装置であって、
前記O P S装置は、前記第1のO P Sに加えて、前記第1のO P Sに直列に配置された第2から第nのO P Sを含み、
第kのO P Sの遅延光路長L(k)は、以下の式(C)に示す条件

を満たす。

$$1. \ 8 \times L(k-1) \leq L(k) \leq 2. \ 2 \times (k-1) \cdots \text{式 (C)}$$

ここで、 $k = 2$ 以上 n 以下である。

[請求項16] 請求項15に記載のレーザアニール装置であって、
前記遅延光路長 $L(k)$ は、以下の式 (D) に示す条件を満たす。

$$L(k) = 2 \times L(k-1) \cdots \text{式 (D)}$$

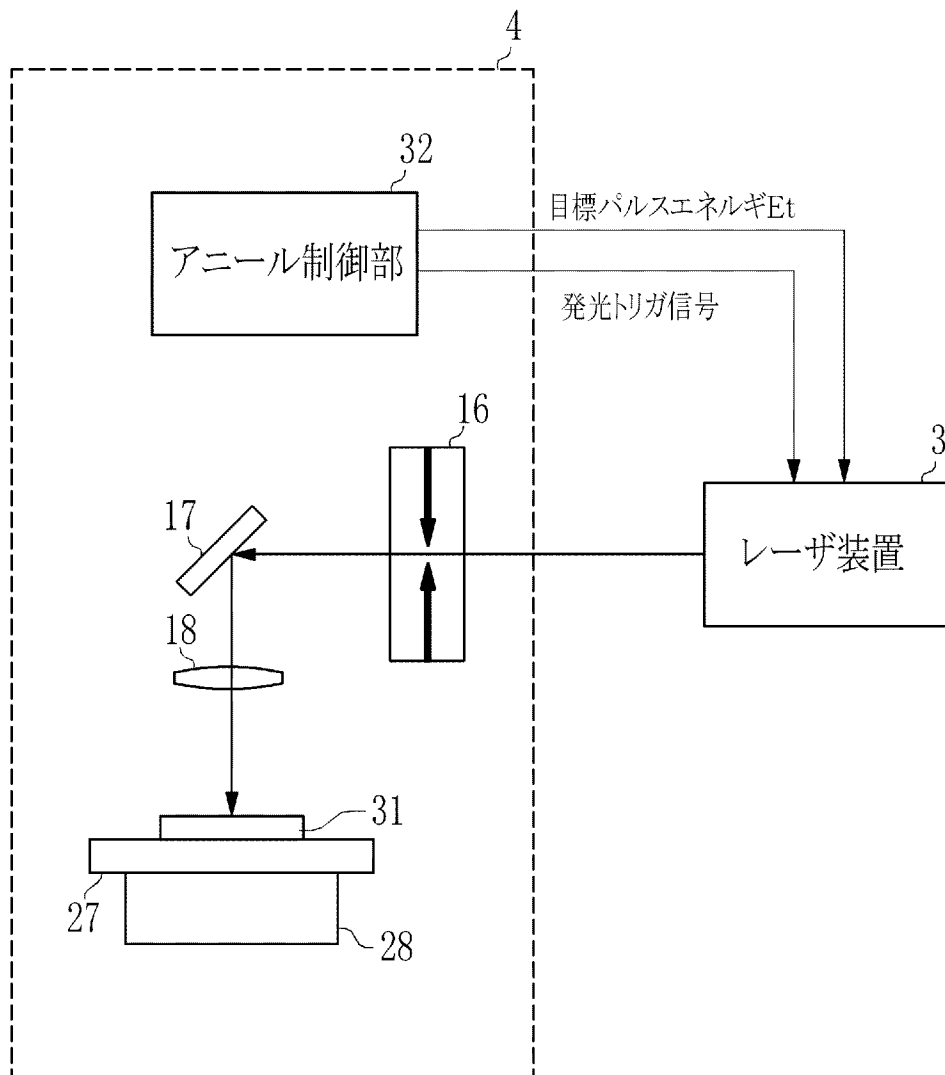
[請求項17] 請求項13に記載のレーザアニール装置であって、
前記第1のOP Sは、前記パルスレーザ光の一部を透過して、他の一部を前記遅延光路に向けて反射するビームスプリッタを含んでおり、前記ビームスプリッタの反射率は、40%以上65%以下の範囲内である。

[請求項18] 請求項15に記載のレーザアニール装置であって、
前記第1から第 n のOP Sは、前記レーザ発振器側から、前記遅延光路長が短い順番で配置されている。

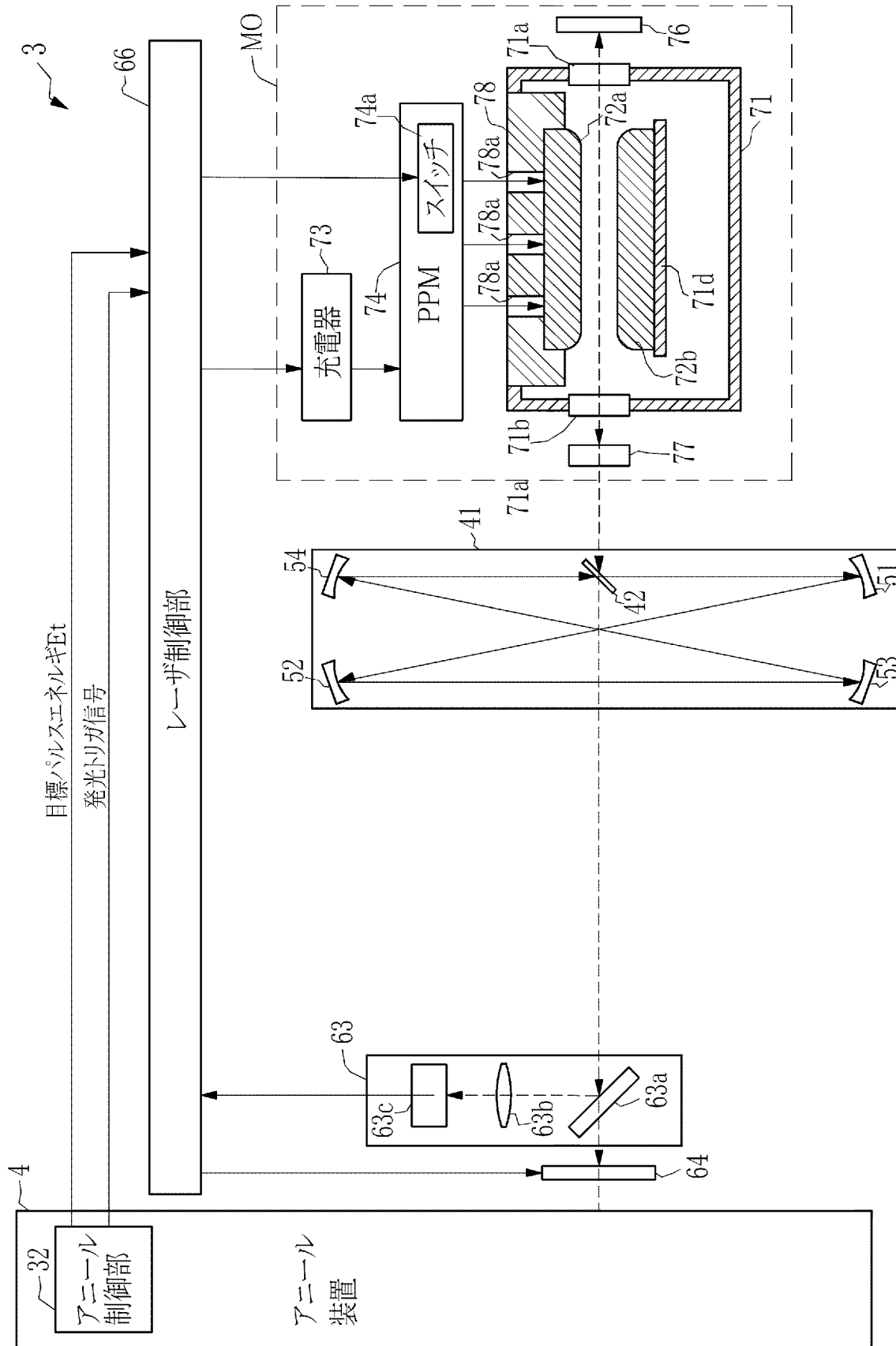
[請求項19] 請求項13に記載のレーザアニール装置であって、以下をさらに含む：

D. 前記レーザ発振器と前記OP S装置との間の光路上に配置される増幅器。

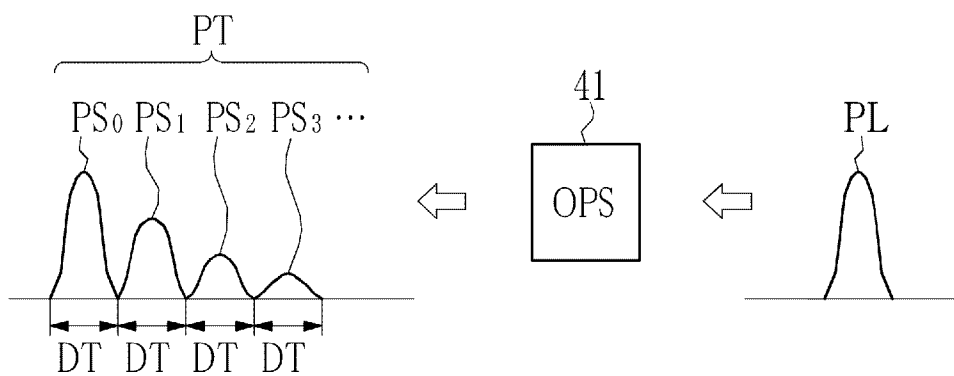
[図1]



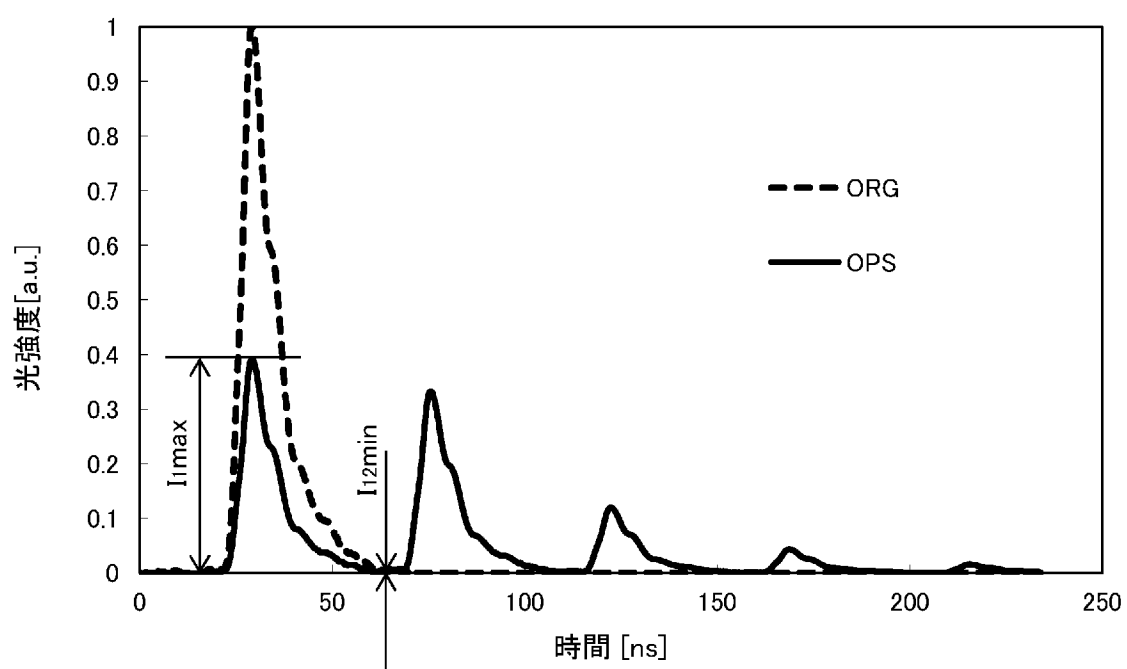
[図2]



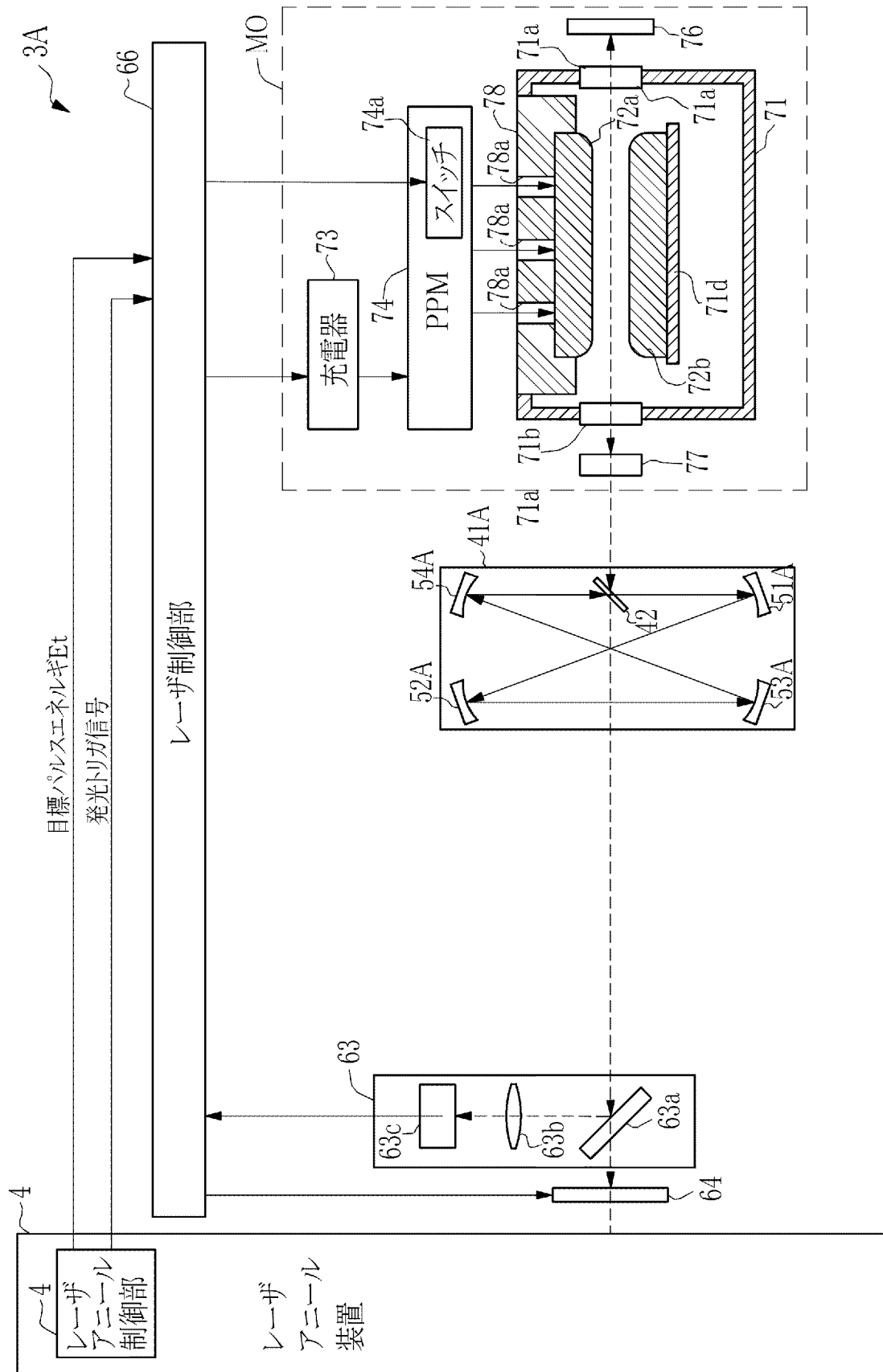
[図3]



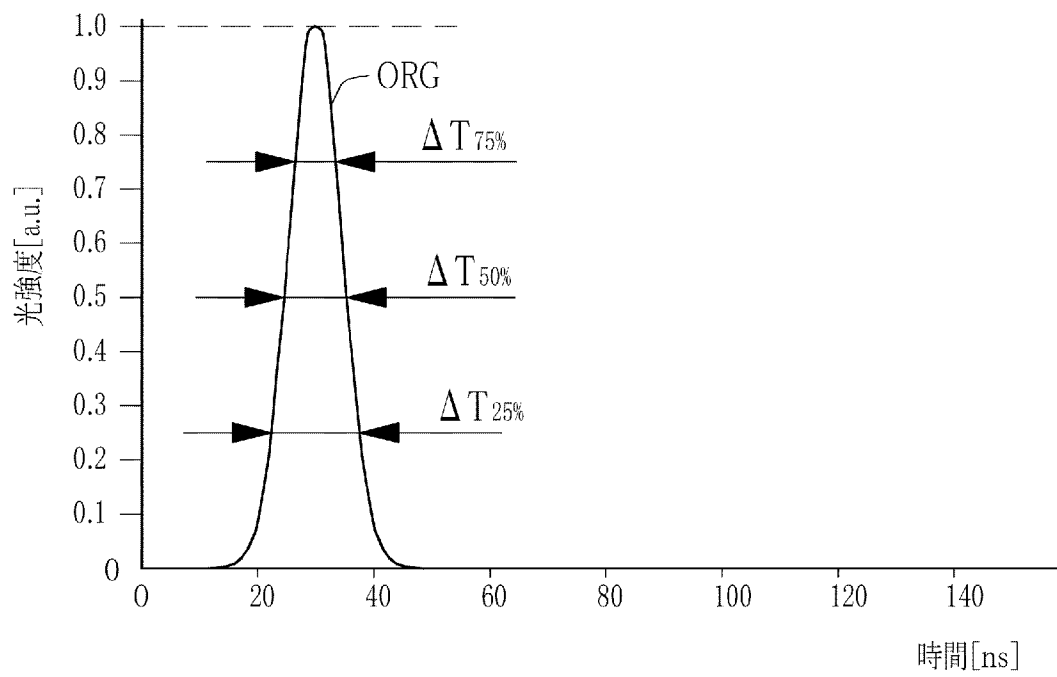
[図4]



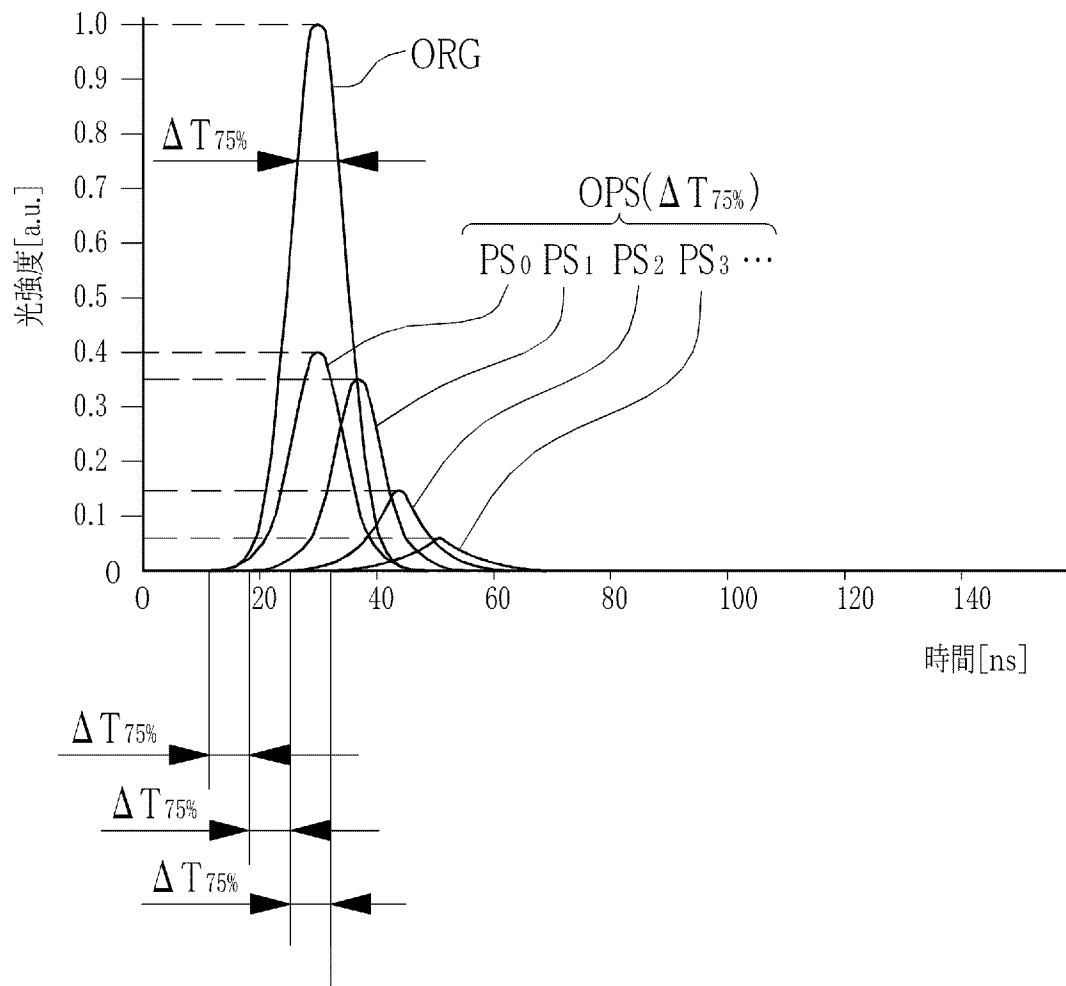
[図5]



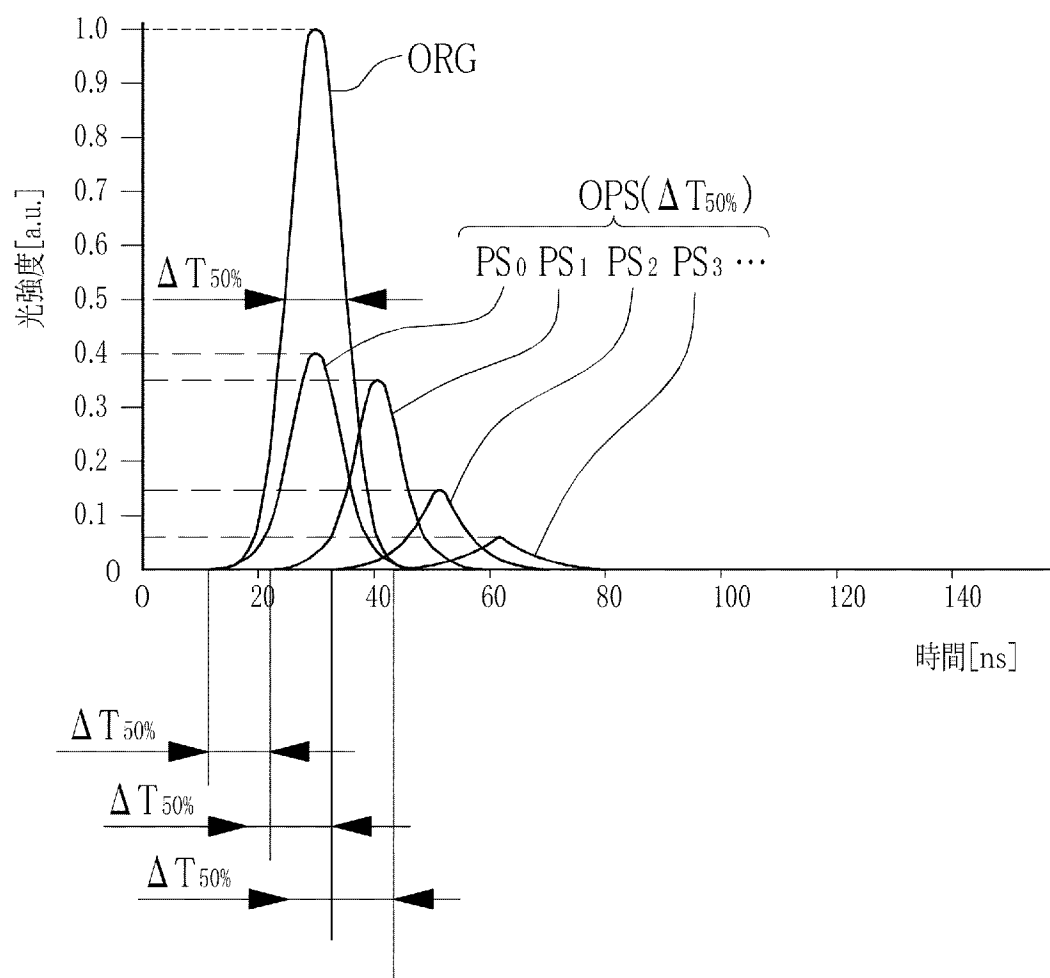
[図6]



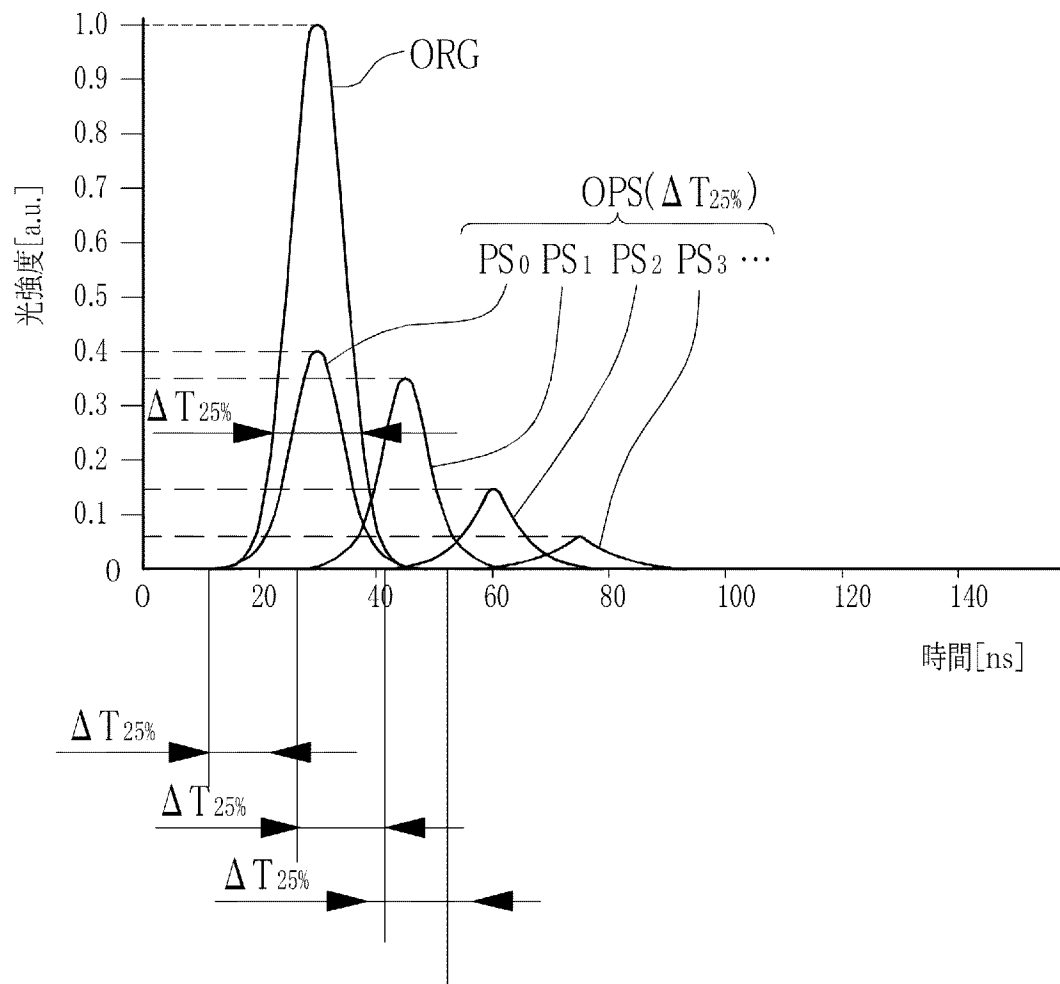
[図7]



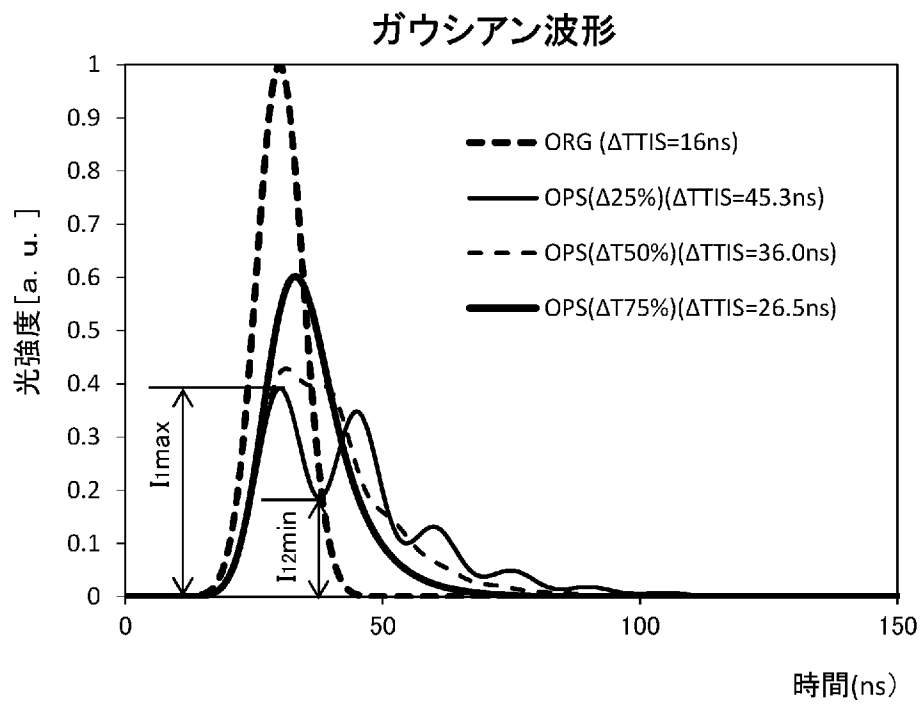
[図8]



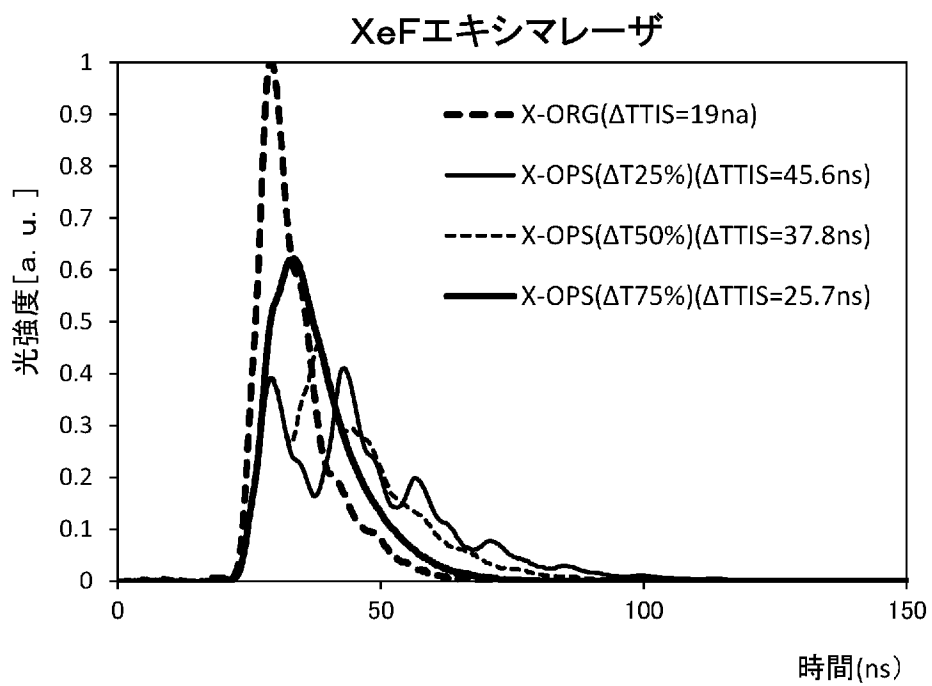
[図9]



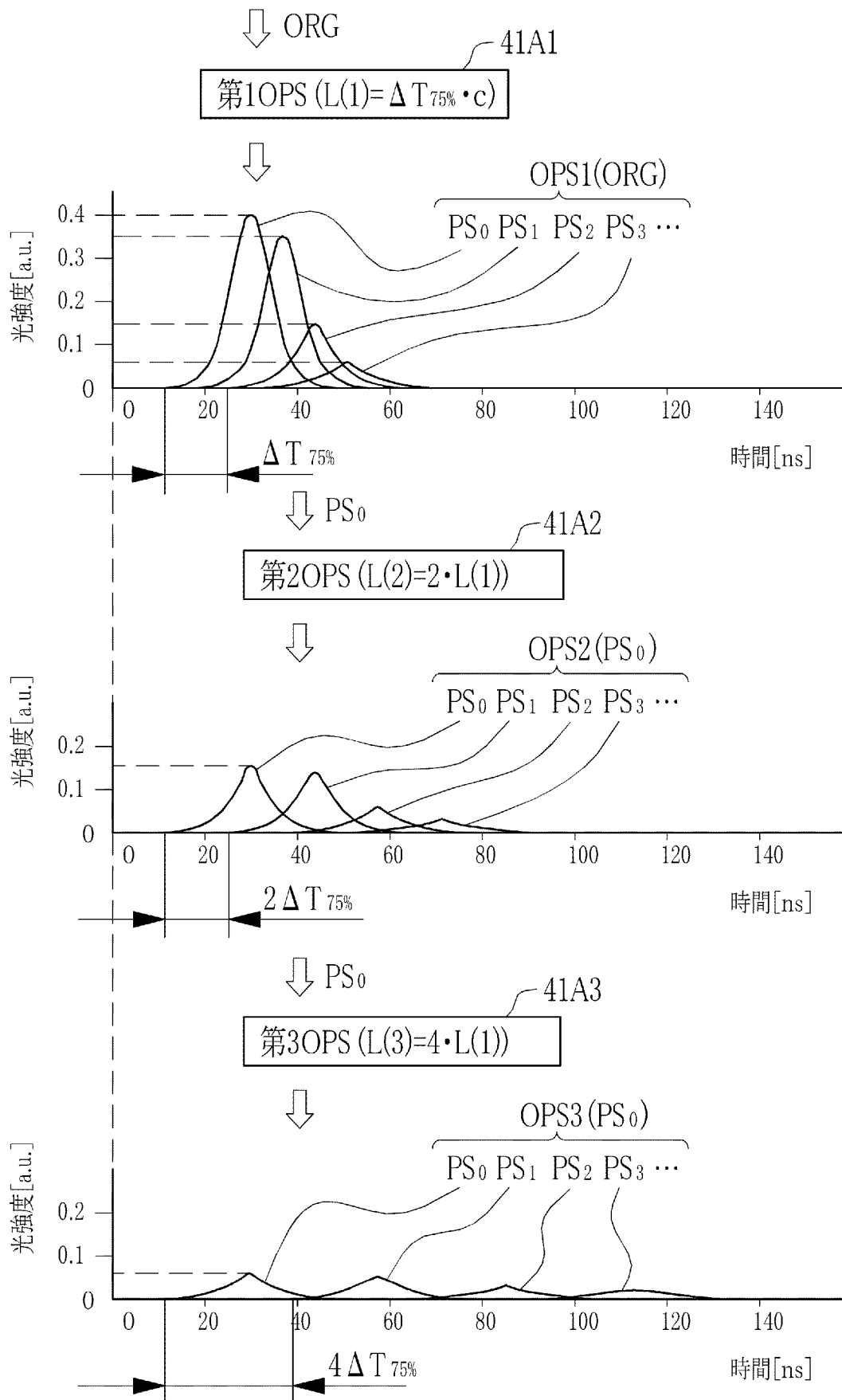
[図10]



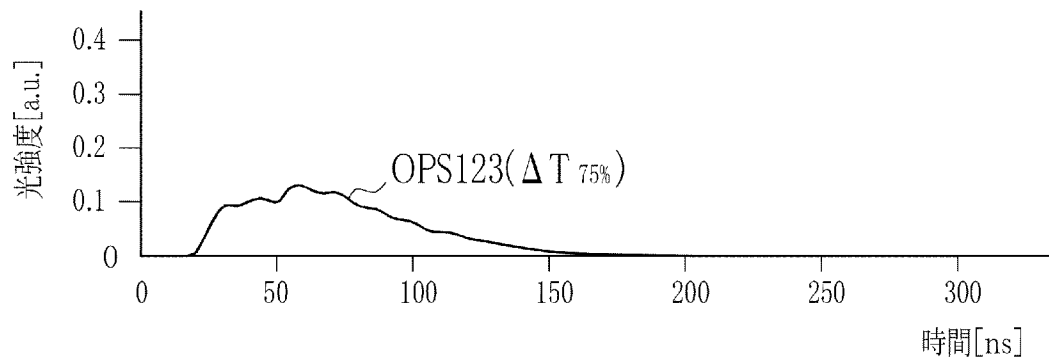
[図11]



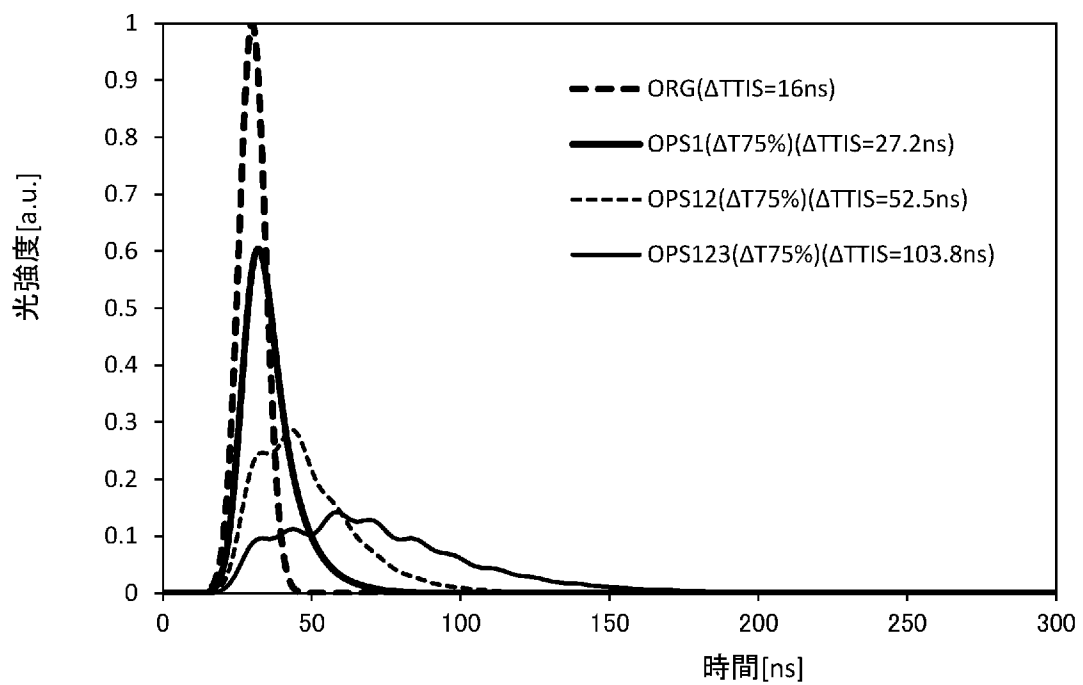
[図13]



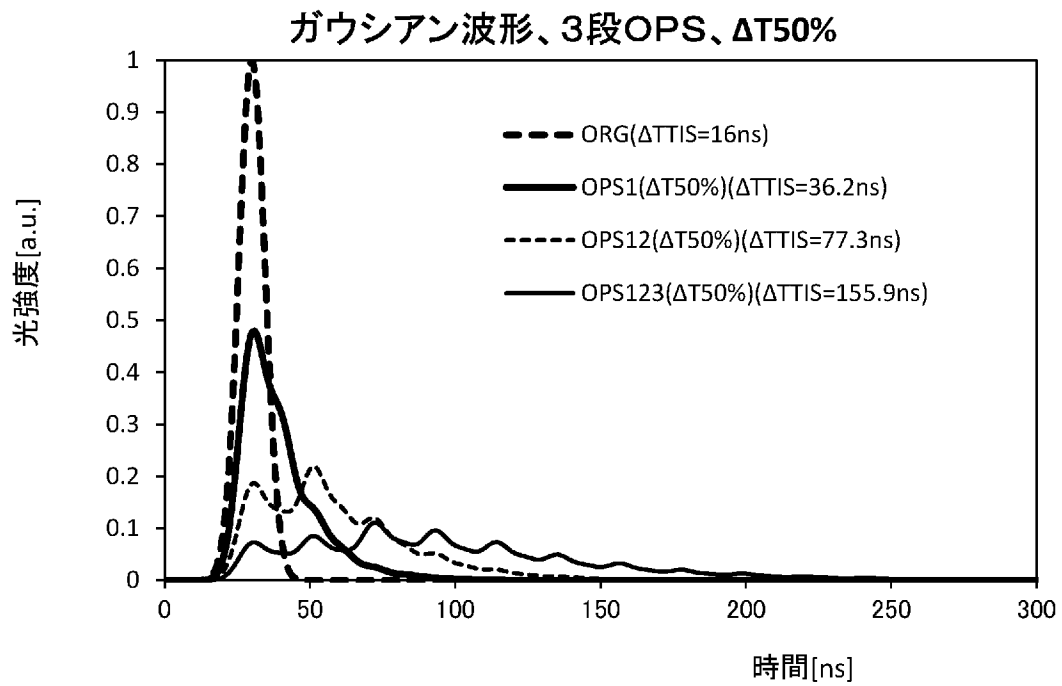
[図14]



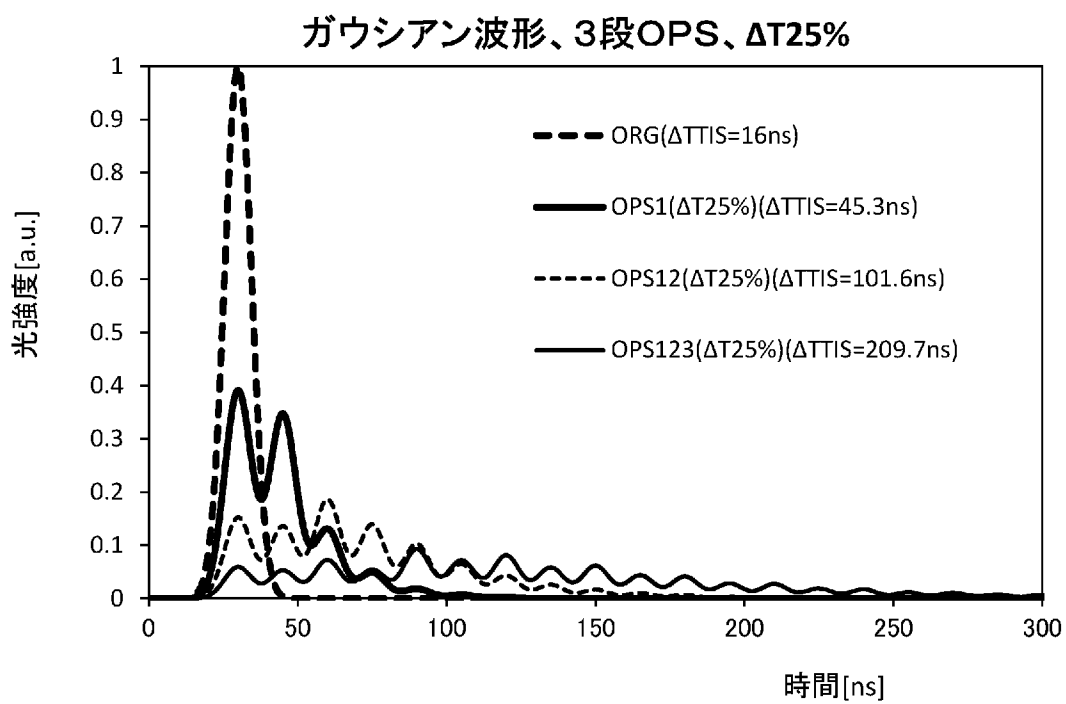
[図15A]

ガウシアン波形、3段OPS、 $\Delta T_{75\%}$ 

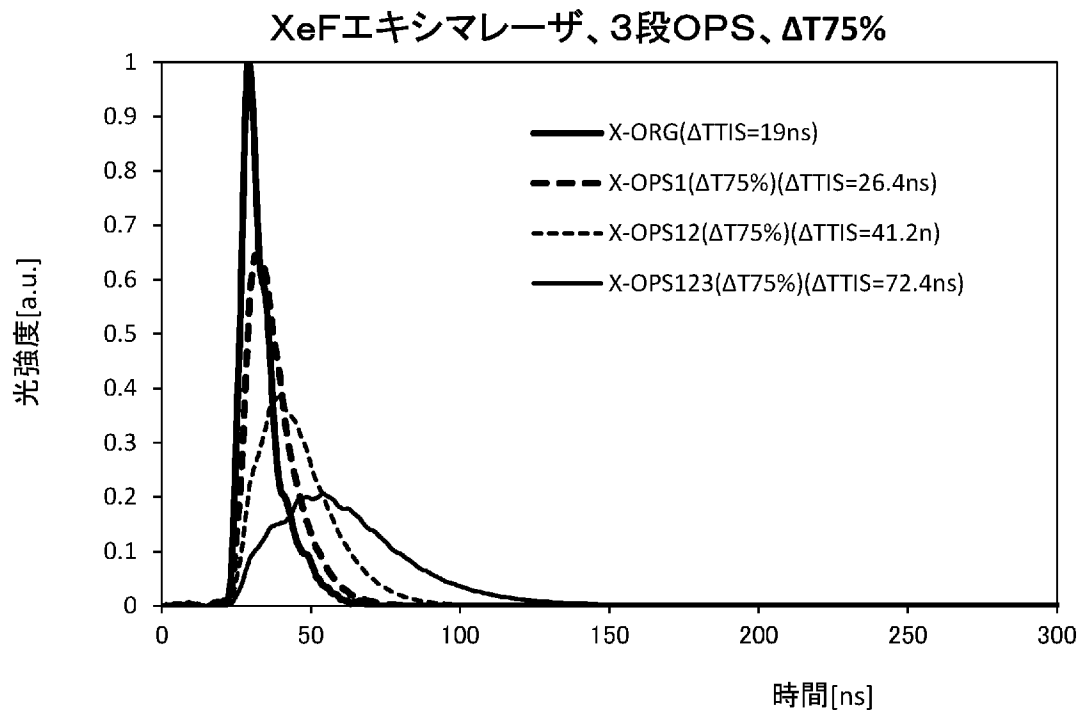
[図15B]



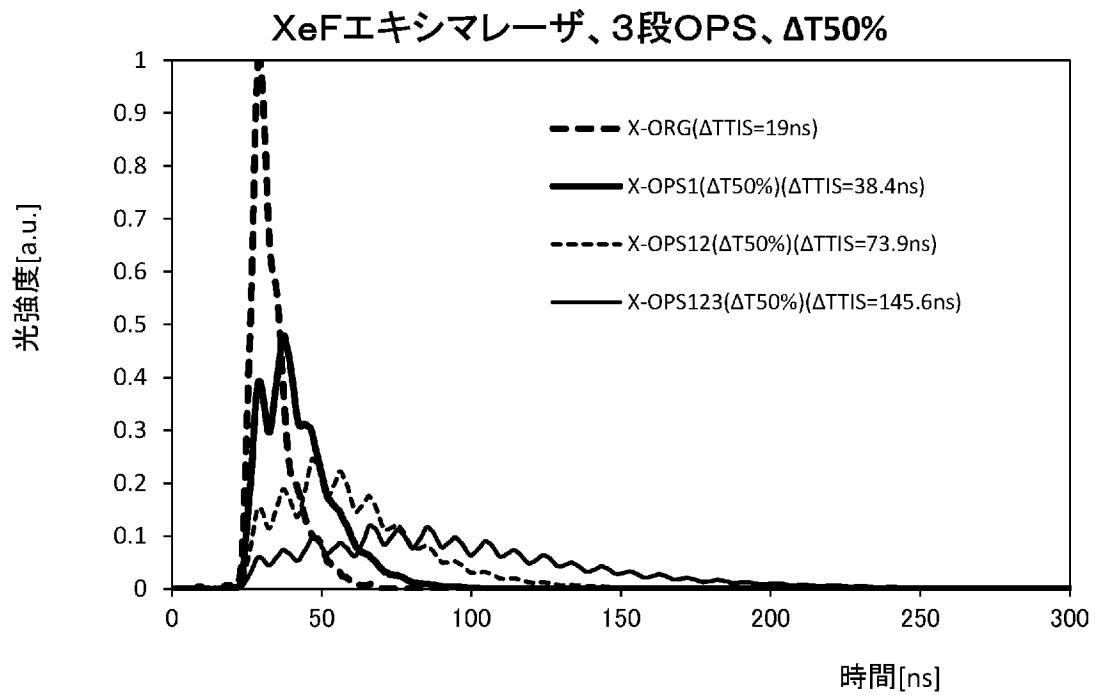
[図15C]



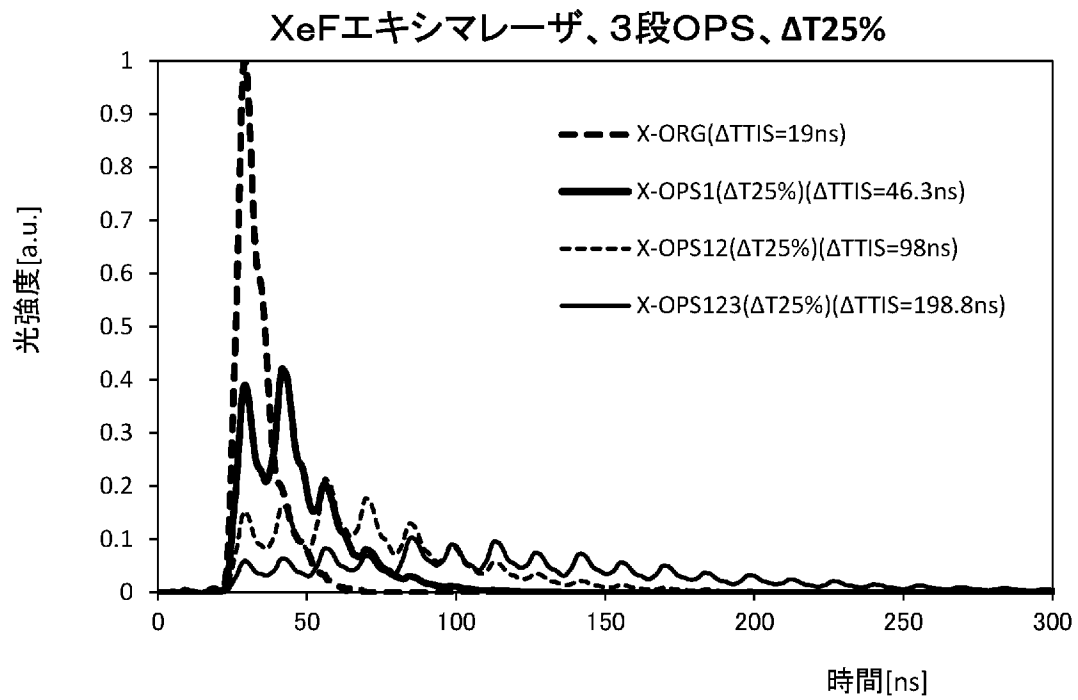
[図16A]



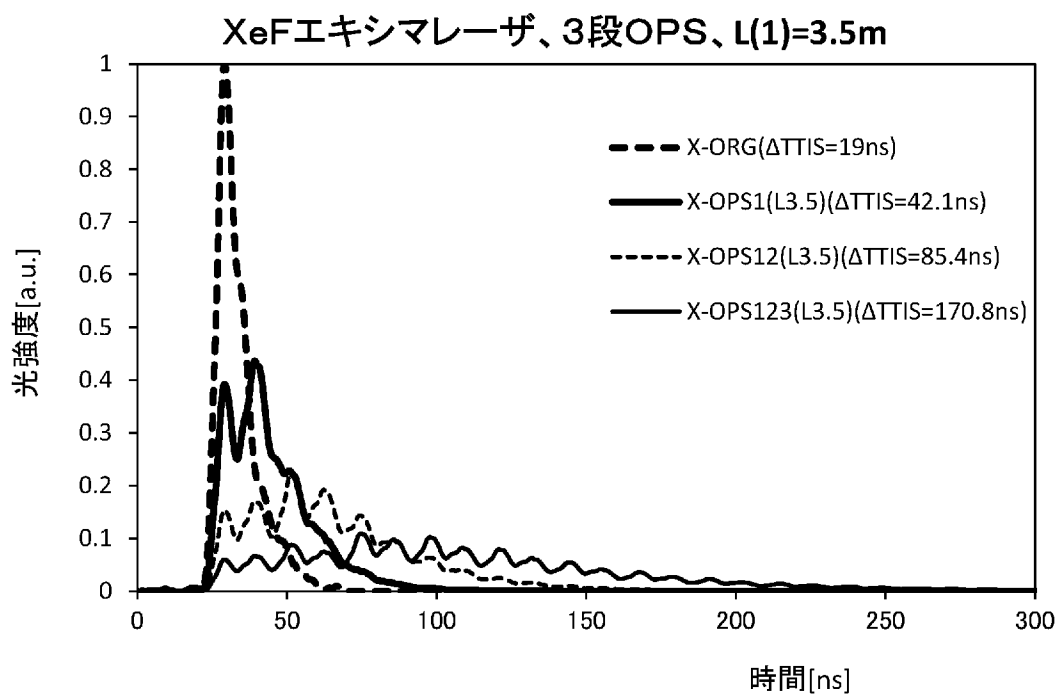
[図16B]



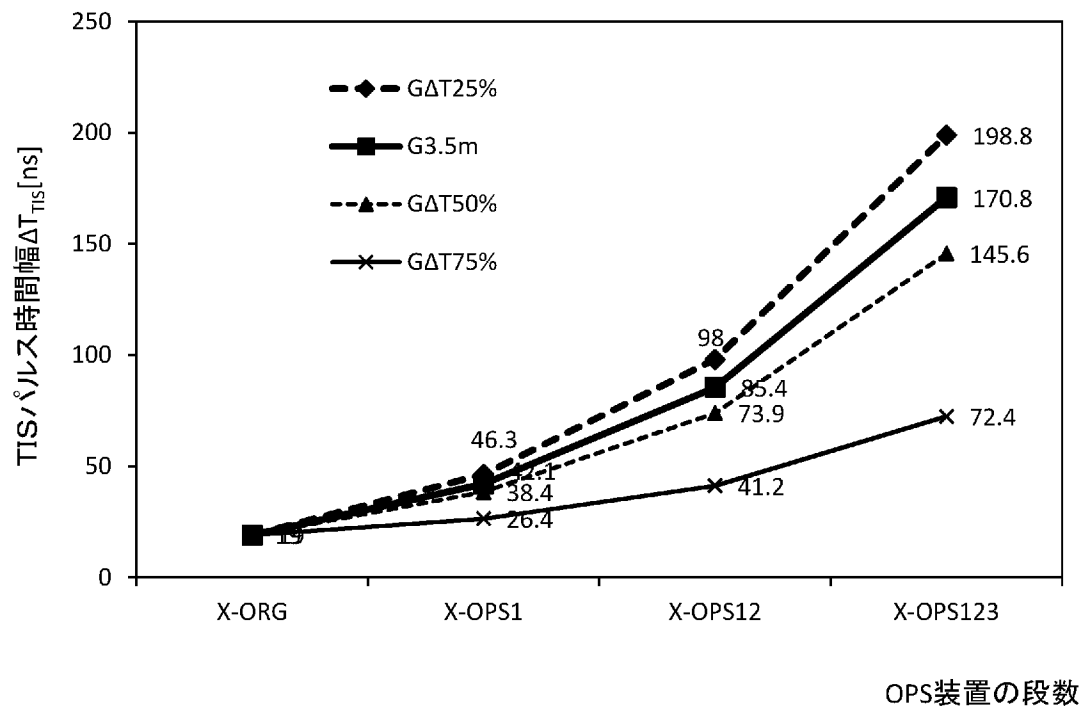
[図16C]



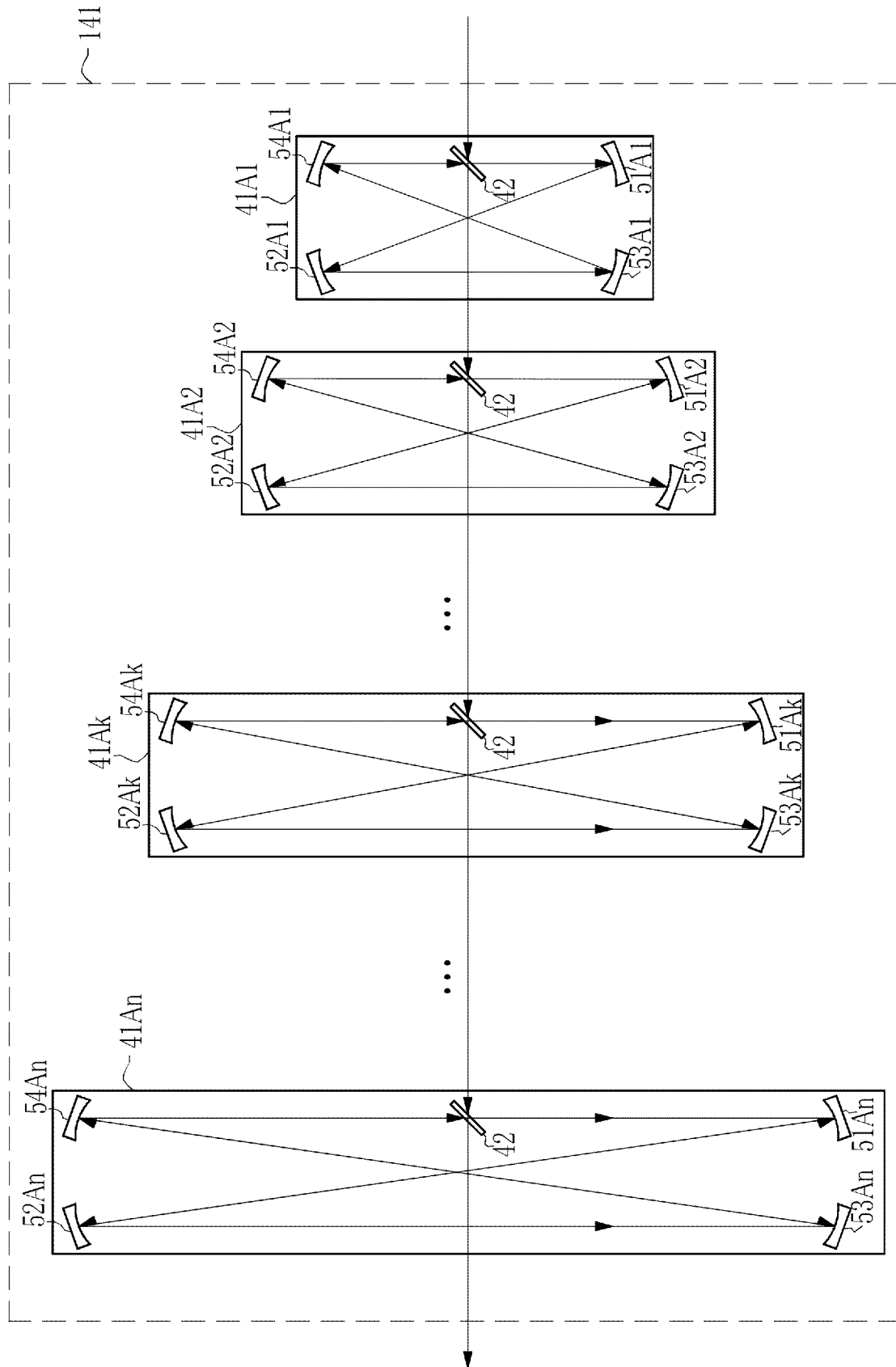
[図17]



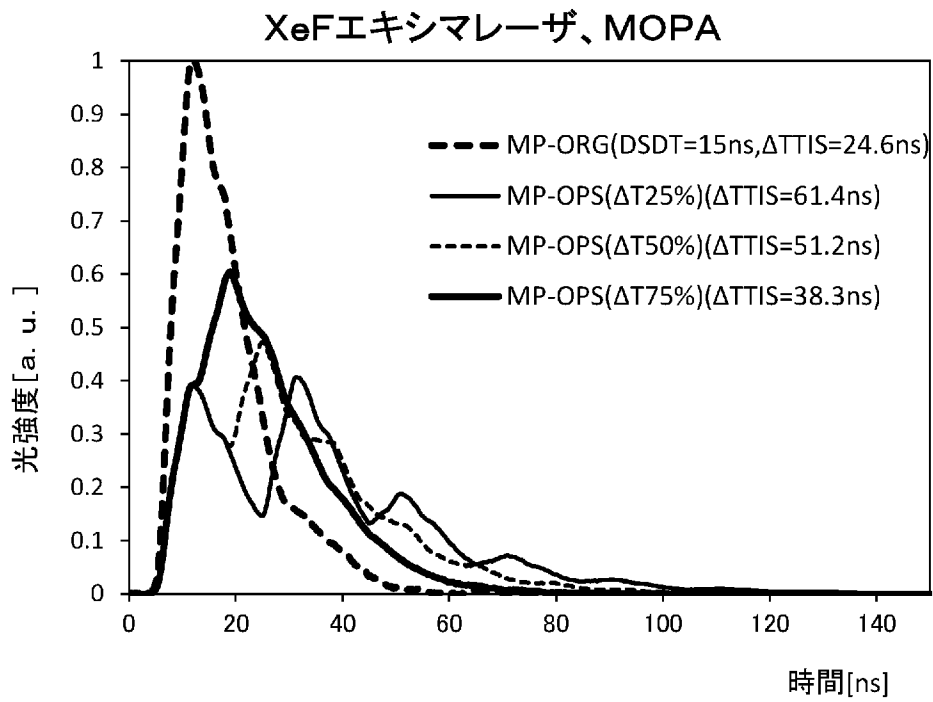
[図18]



[図19]

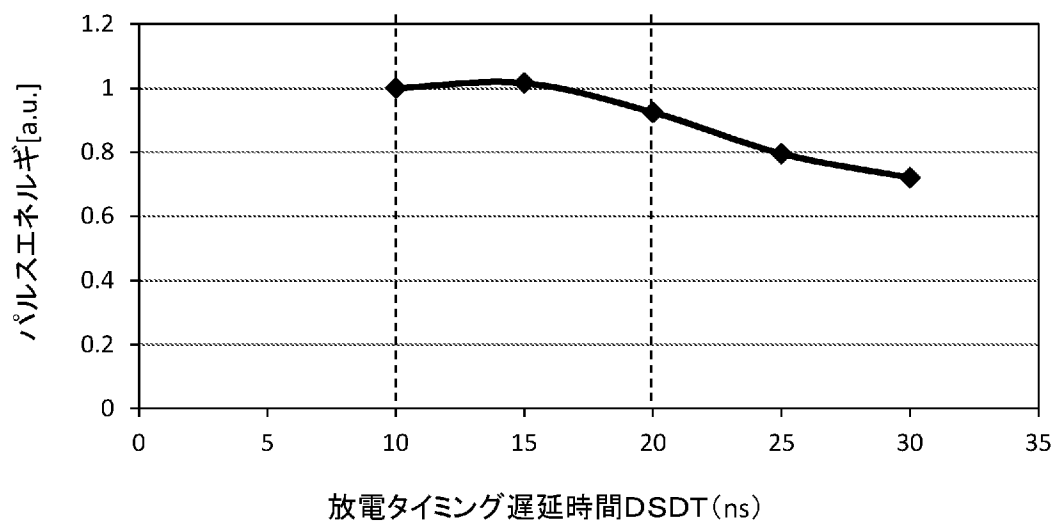


[図21]

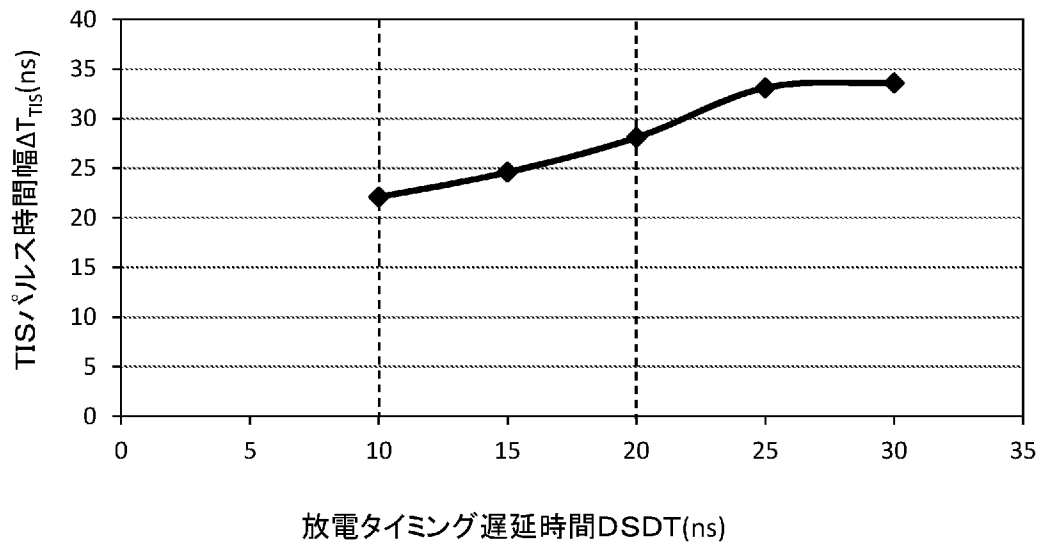


[図22A]

放電タイミング遅延時間DSDTとパルスエネルギーの関係

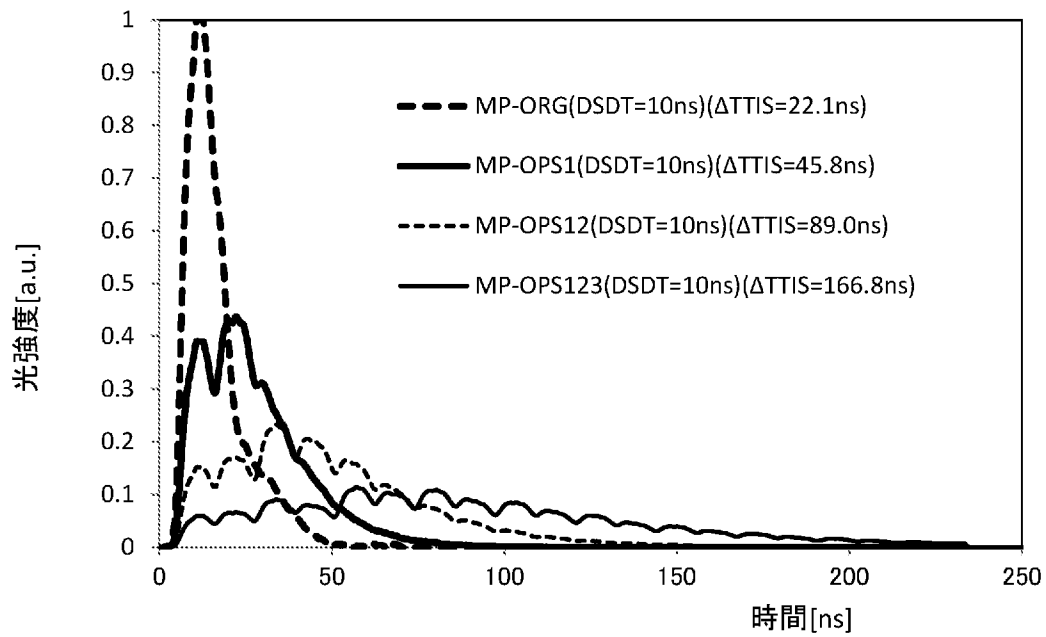


[図22B]

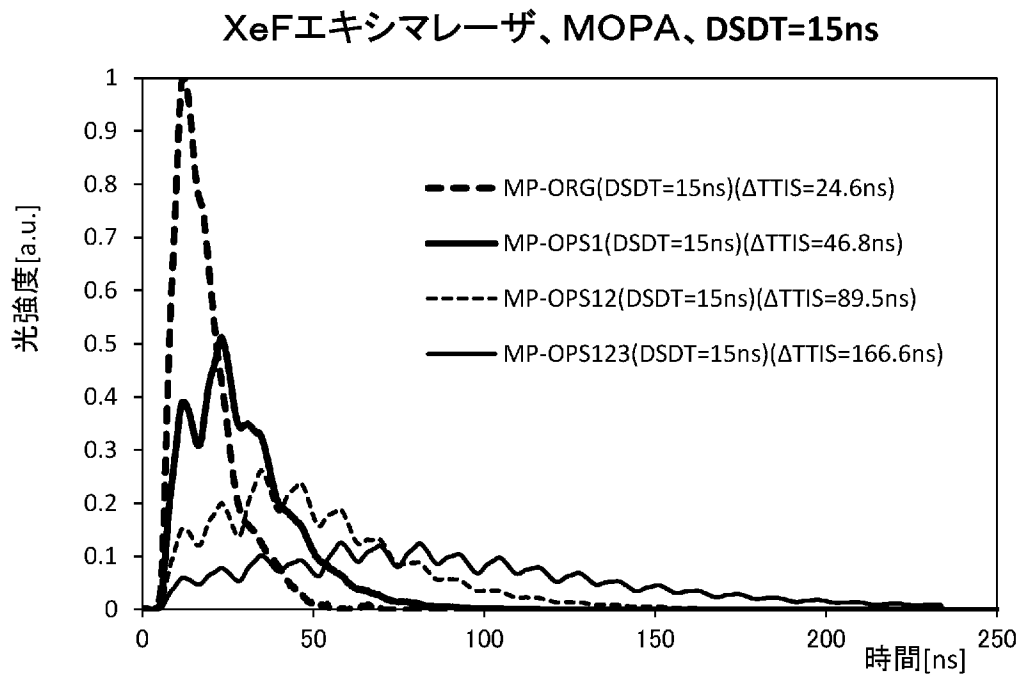
放電タイミング遅延時間DSDTとTISパルス時間幅 ΔT_{TIS} の関係

[図23A]

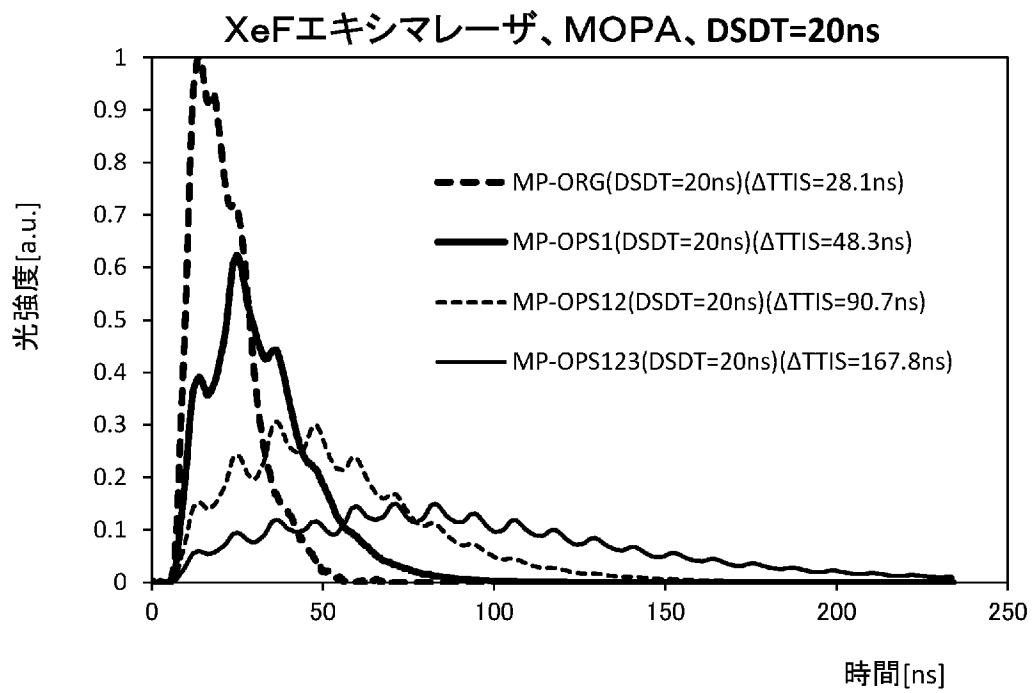
XeFエキシマレーザ、MOPA、DSDT=10ns



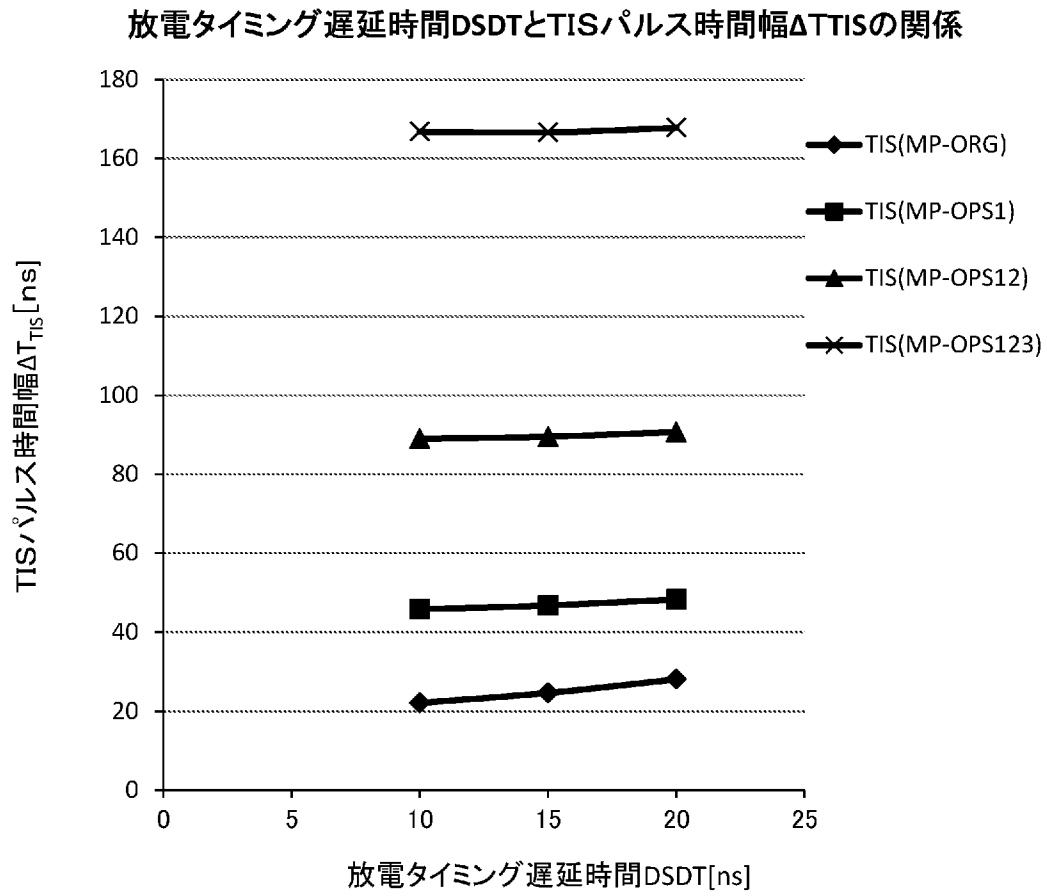
[図23B]



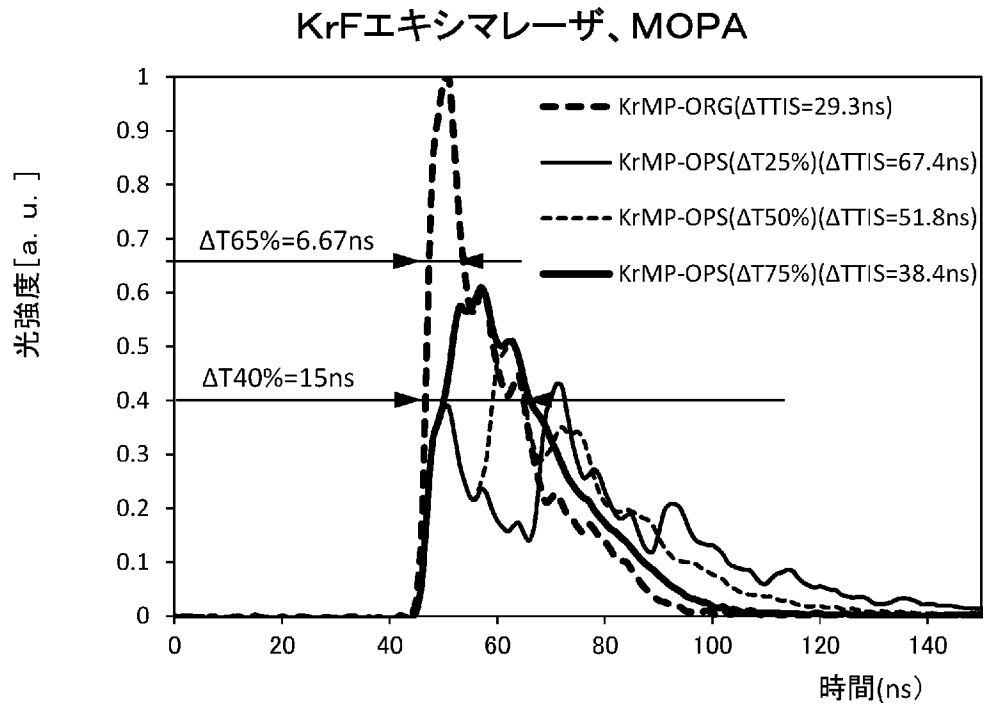
[図23C]



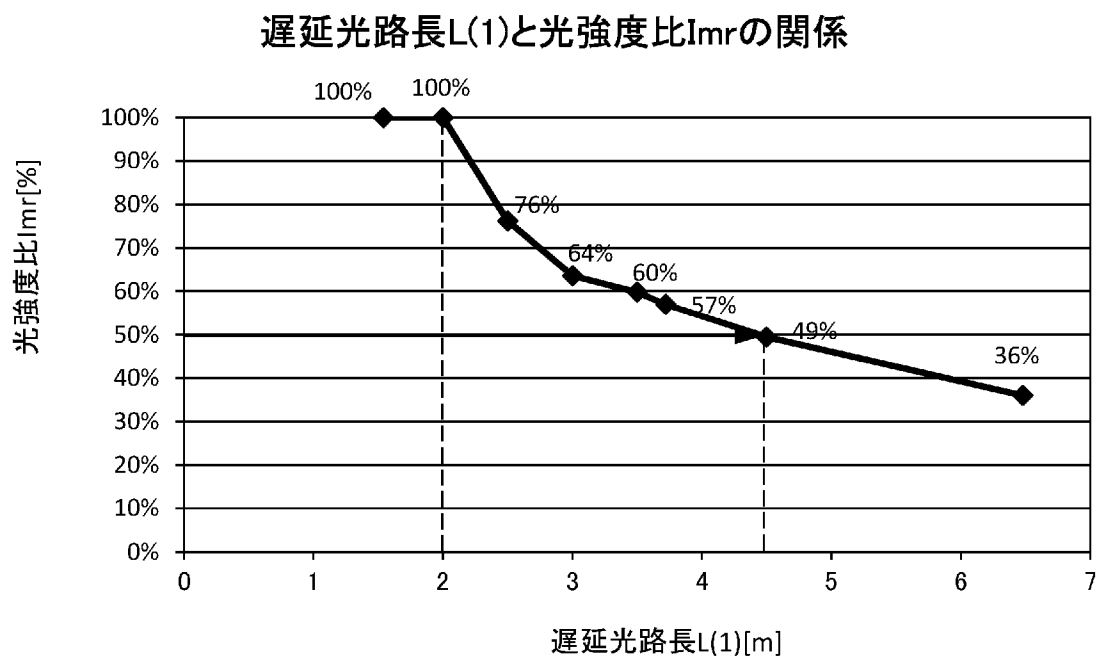
[図24]



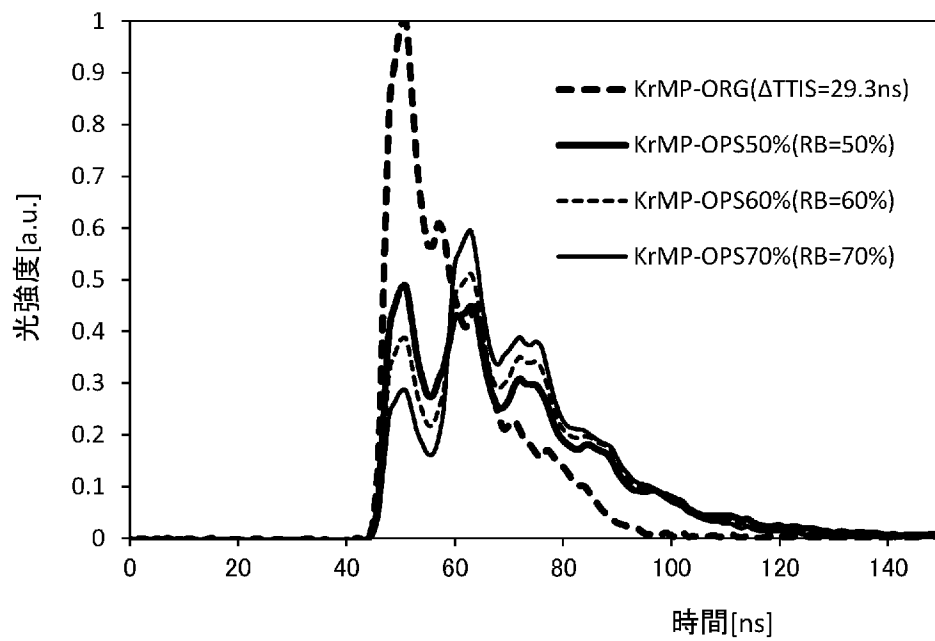
[図25]



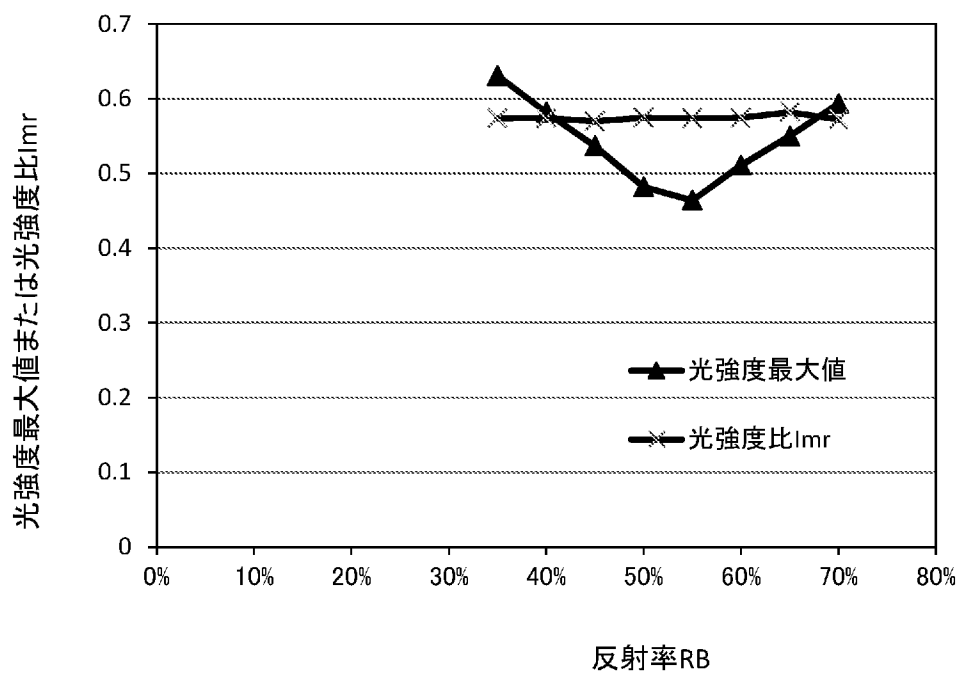
[図26]



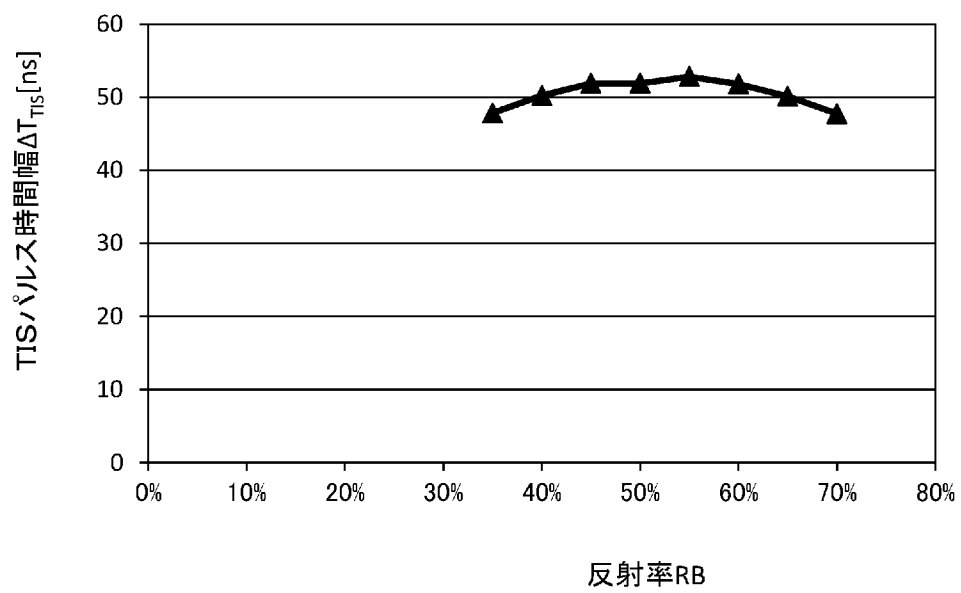
[図27A]



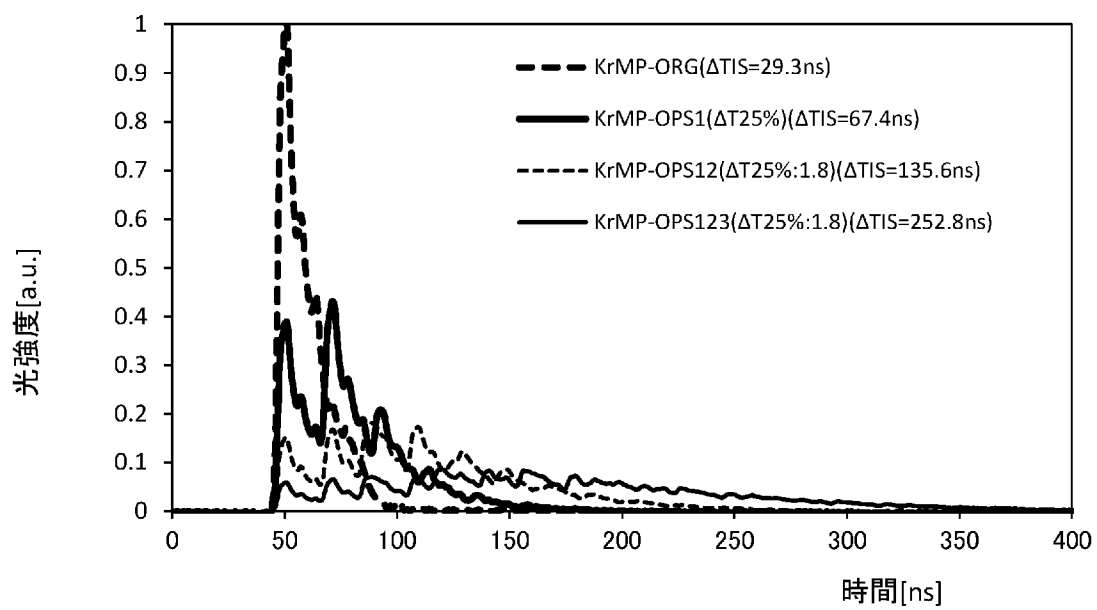
[図27B]



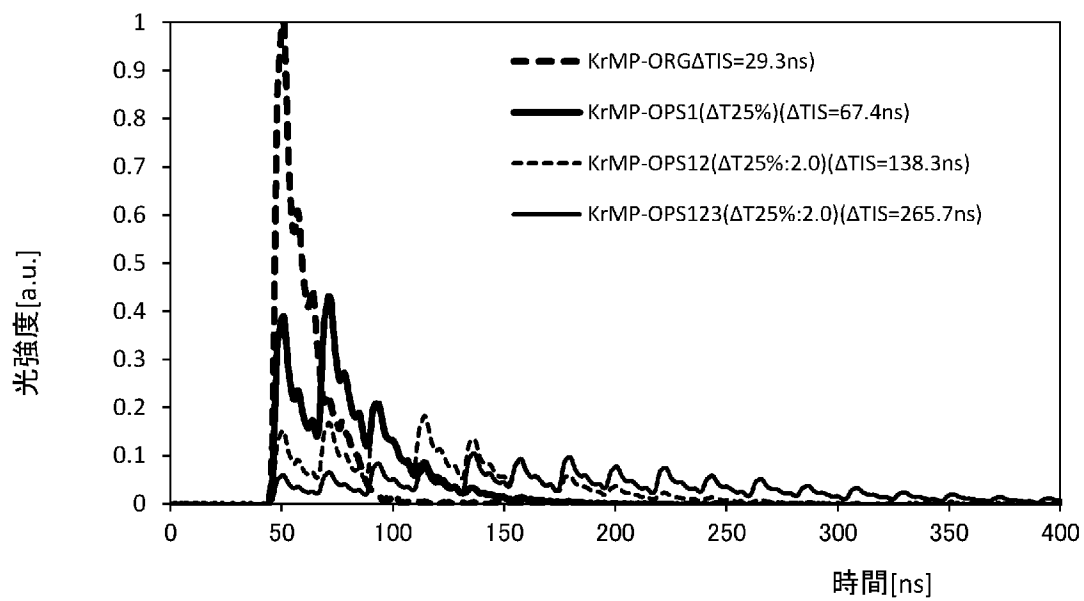
[図27C]



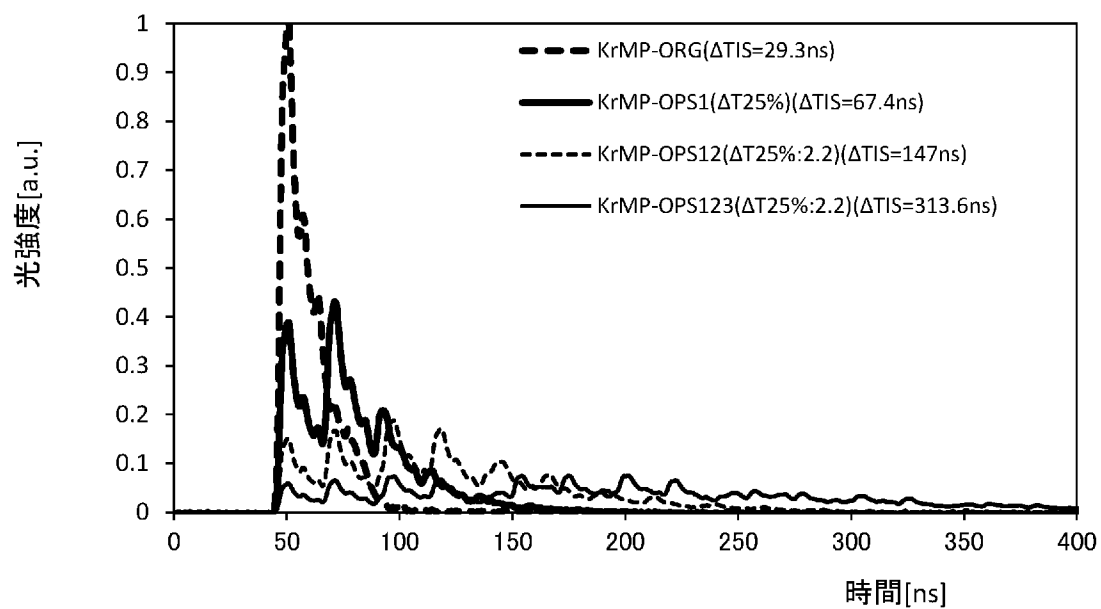
[図28A]



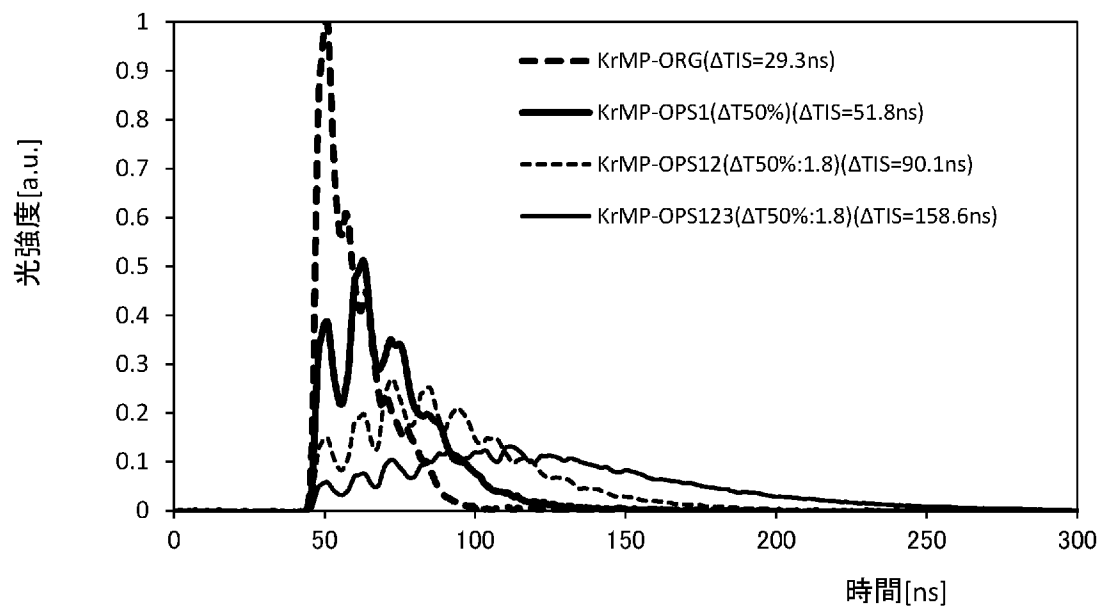
[図28B]



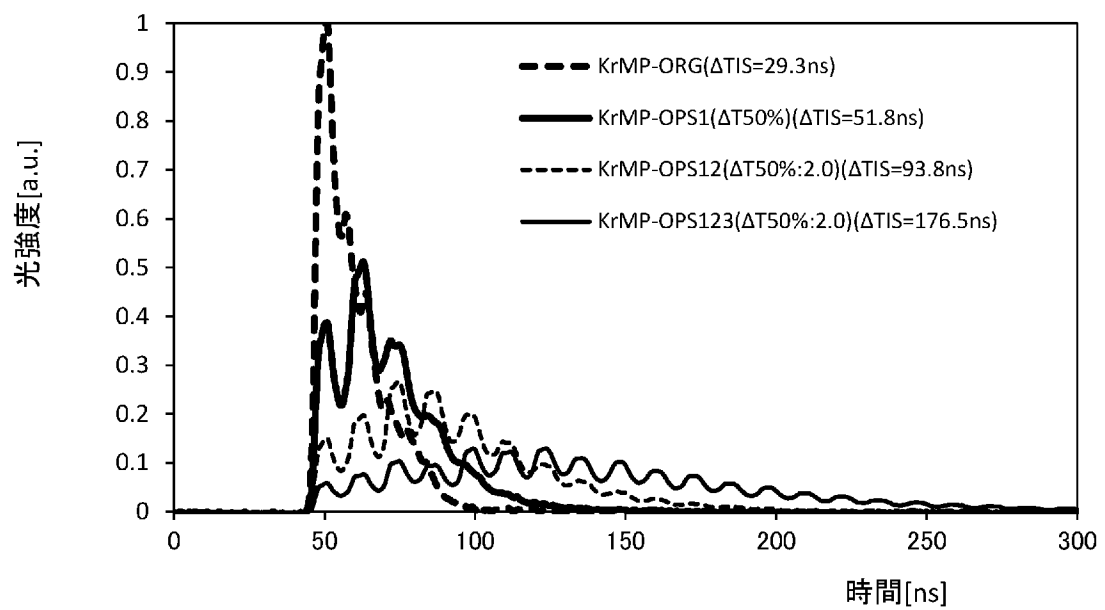
[図28C]



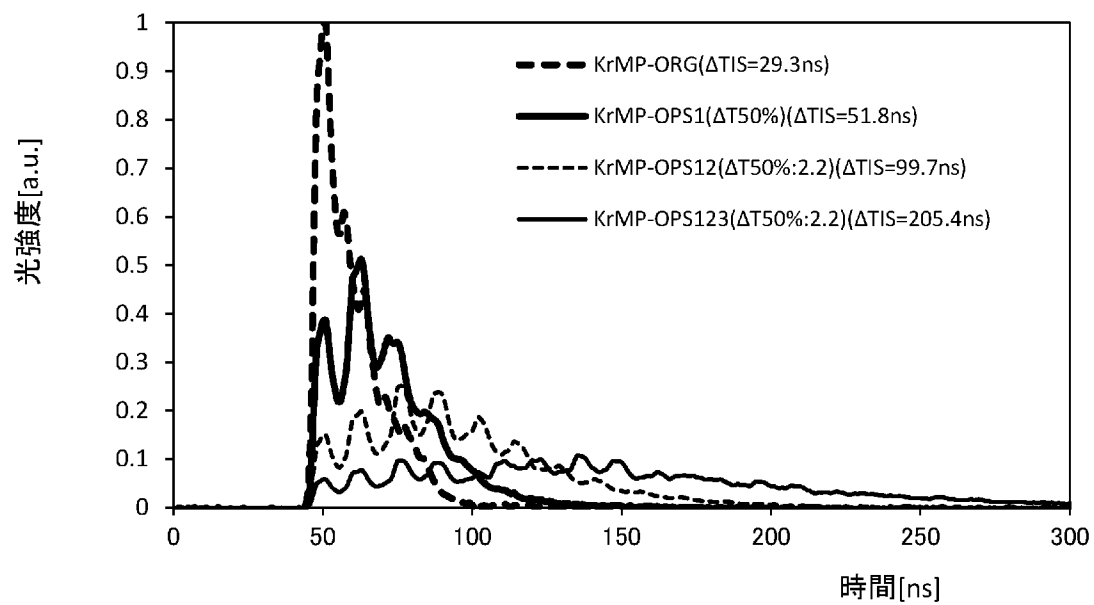
[図29A]



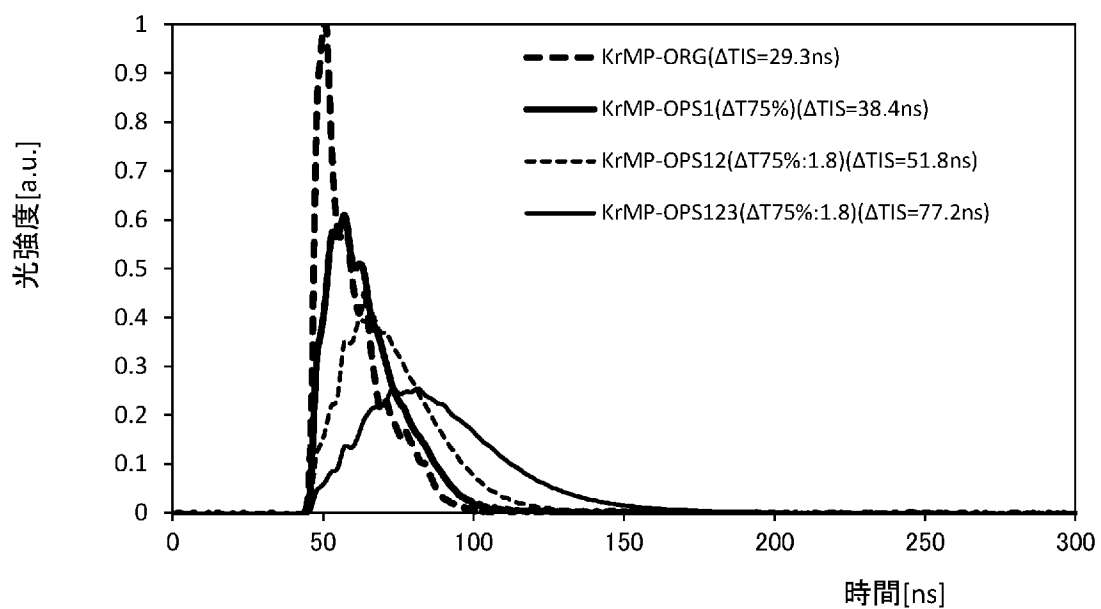
[図29B]



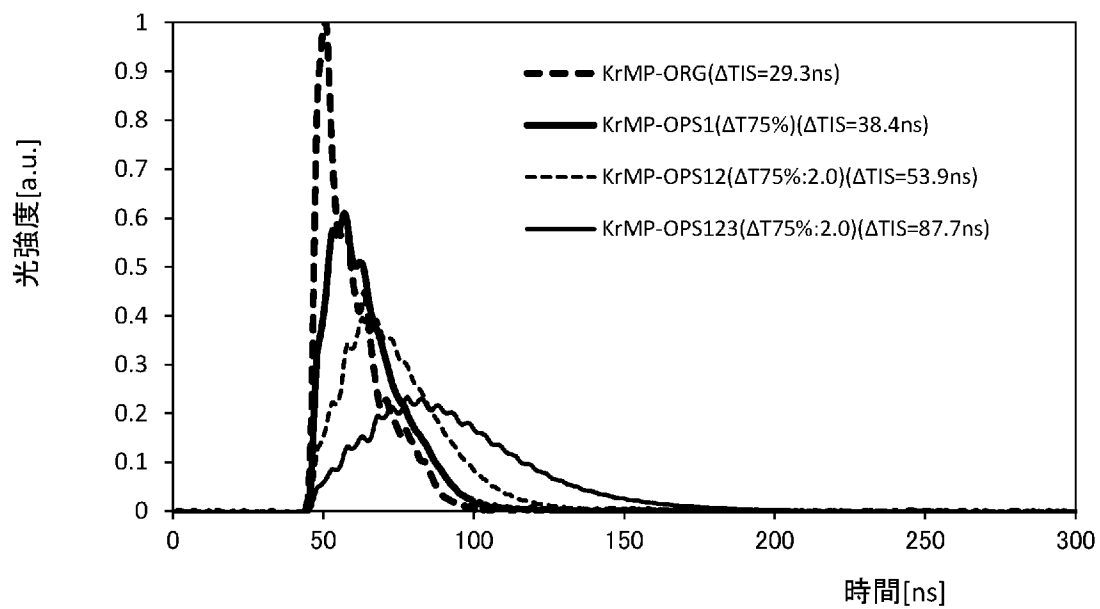
[図29C]



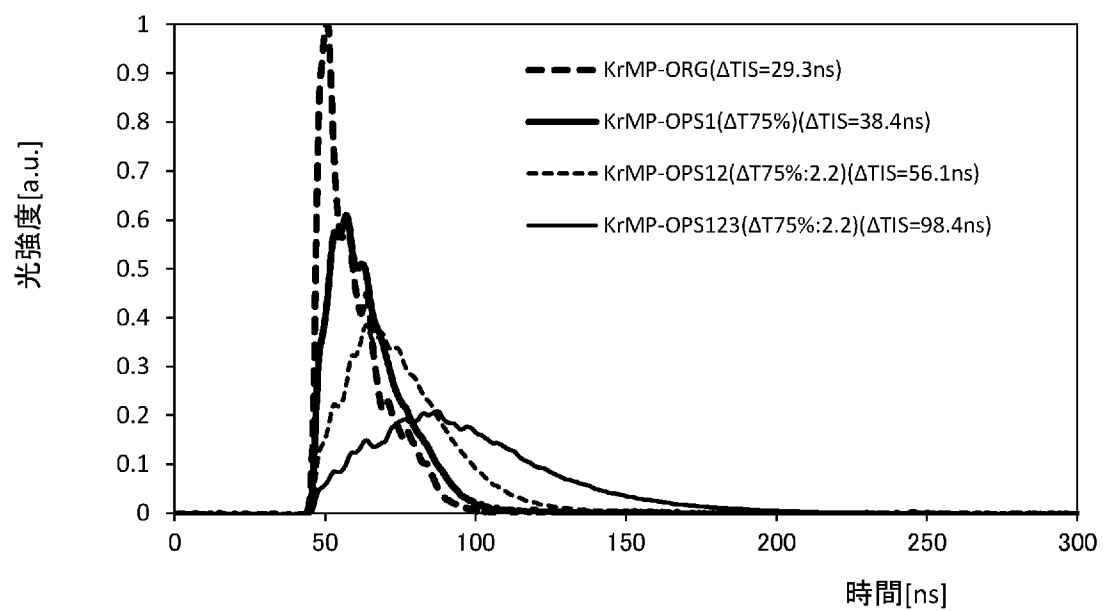
[図30A]



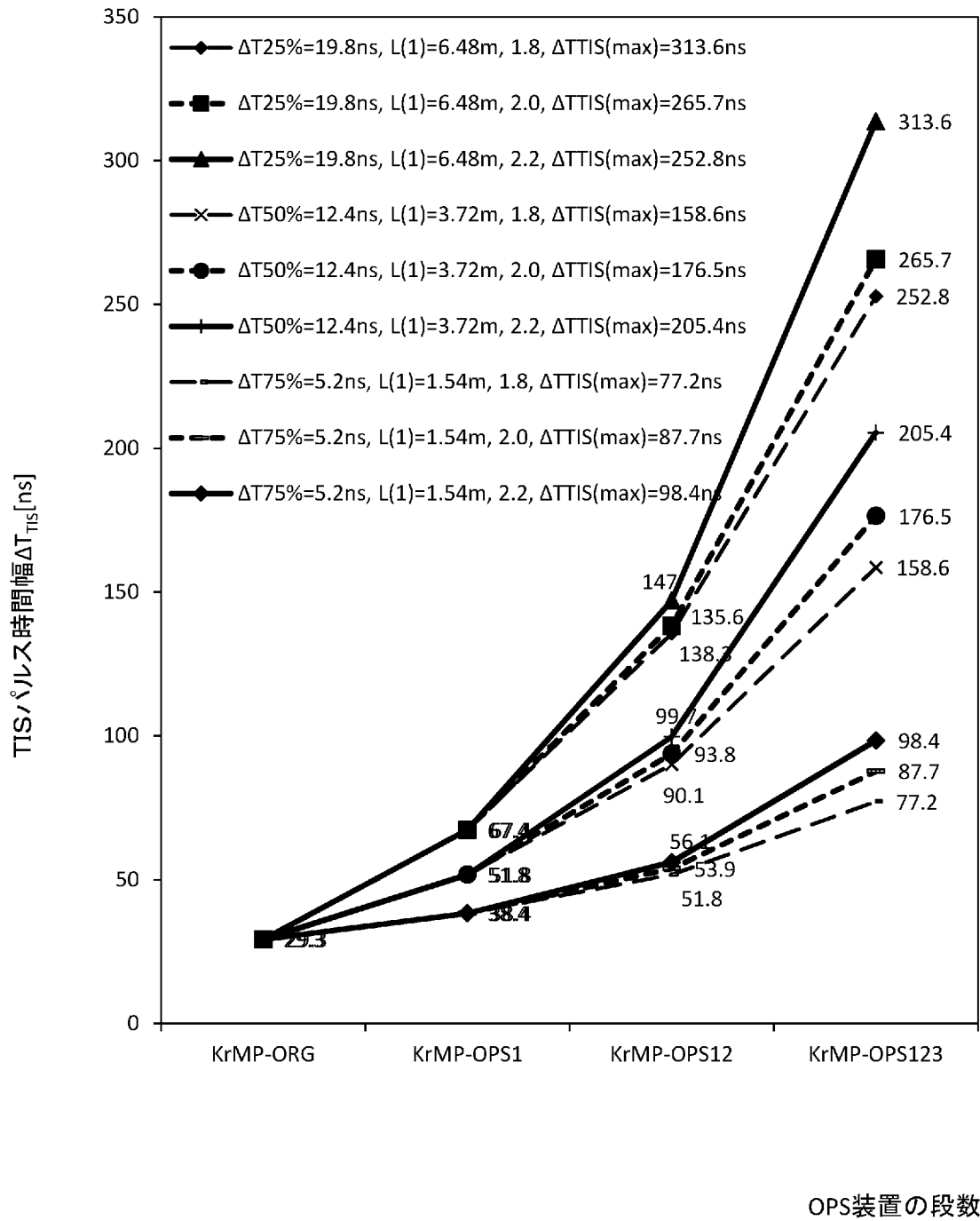
[図30B]



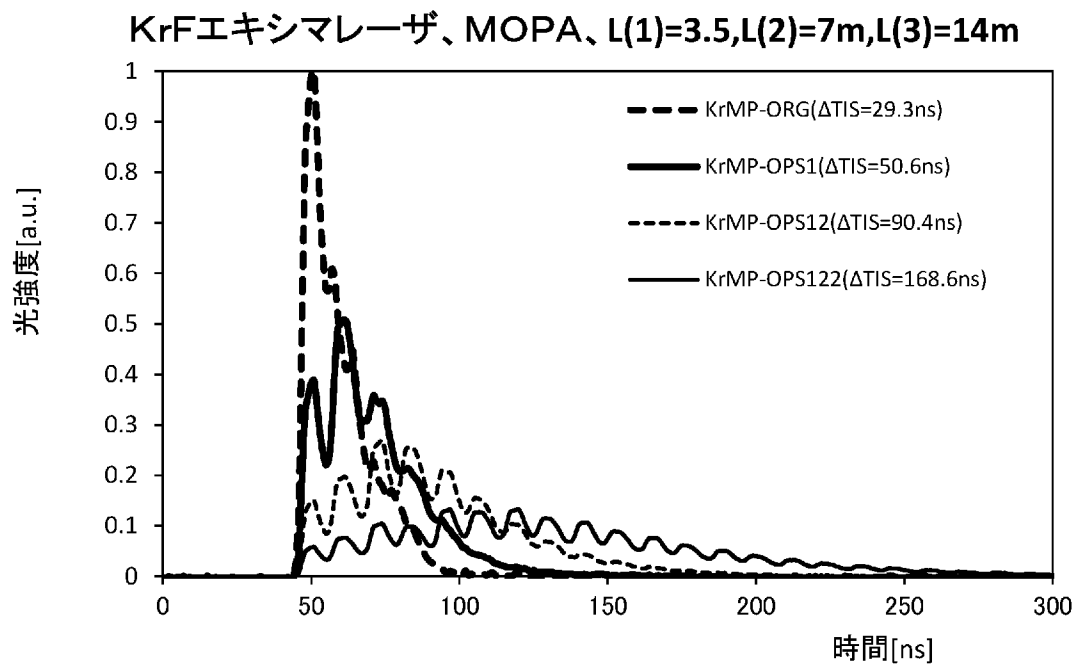
[図30C]



[図31]



[図32]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2016/076103

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER H01L21/268 (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) H01L21/268		
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 1996-2016 Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2016 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2016		
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	WO 2014/156818 A1 (Kyushu University), 02 October 2014 (02.10.2014), claims; paragraphs [0009], [0028] to [0102], [0134] to [0139]; fig. 2 to 7, 11 to 12, 14 & US 2016/0035603 A1 claims; paragraphs [0034], [0053] to [0126], [0159] to [0164]; fig. 2 to 7, 11 to 12, 14 & KR 10-2015-0133697 A	1-19
A	JP 2008-546188 A (Saima Inc.), 18 December 2008 (18.12.2008), & US 2005/0259709 A1 & WO 2006/127891 A2	1-19
A	US 2012/0260847 A1 (VAN DER WILT Paul Christiaan), 18 October 2012 (18.10.2012), & WO 2012/140122 A1 & TW 201247947 A	1-19
☒ 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 30 November 2016 (30.11.16)		Date of mailing of the international search report 13 December 2016 (13.12.16)
Name and mailing address of the ISA/ Japan Patent Office 3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915, Japan		Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2016/076103

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2014-525141 A (Applied Materials Inc.), 25 September 2014 (25.09.2014), & US 2012/0325784 A1 & WO 2012/177743 A2 & EP 2724364 A2 & TW 201303977 A & CN 103597587 A & KR 10-2014-0039300 A	1-19

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. H01L21/268 (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. H01L21/268

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	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2016年
日本国実用新案登録公報	1996-2016年
日本国登録実用新案公報	1994-2016年

国際調査で利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	WO 2014/156818 A1（国立大学法人九州大学）2014.10.02, 請求の範囲, 段落【0009】、【0028】-【0102】、【0134】-【0139】、第2-7, 11-12, 14 図 & US 2016/0035603 A1, 請求の範囲, 段落【0034】、【0053】-【0126】、【0159】-【0164】、第2-7, 11-12, 14 図 & KR 10-2015-0133697 A	1-19
A	JP 2008-546188 A（サイマー インコーポレイテッド）2008.12.18, & US 2005/0259709 A1 & WO 2006/127891 A2	1-19

☒ 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

30.11.2016

国際調査報告の発送日

13.12.2016

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）

桑原 清

電話番号 03-3581-1101 内線 3559

50

9375

C (続き) . 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
A	US 2012/0260847 A1 (VAN DER WILT Paul Christiaan) 2012.10.18, & WO 2012/140122 A1 & TW 201247947 A	1 - 19
A	JP 2014-525141 A (アプライド マテリアルズ インコーポレイテ ッド) 2014.09.25, & US 2012/0325784 A1 & WO 2012/177743 A2 & EP 2724364 A2 & TW 201303977 A & CN 103597587 A & KR 10-2014-0039300 A	1 - 19