

(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6月14日(14.06.2018)



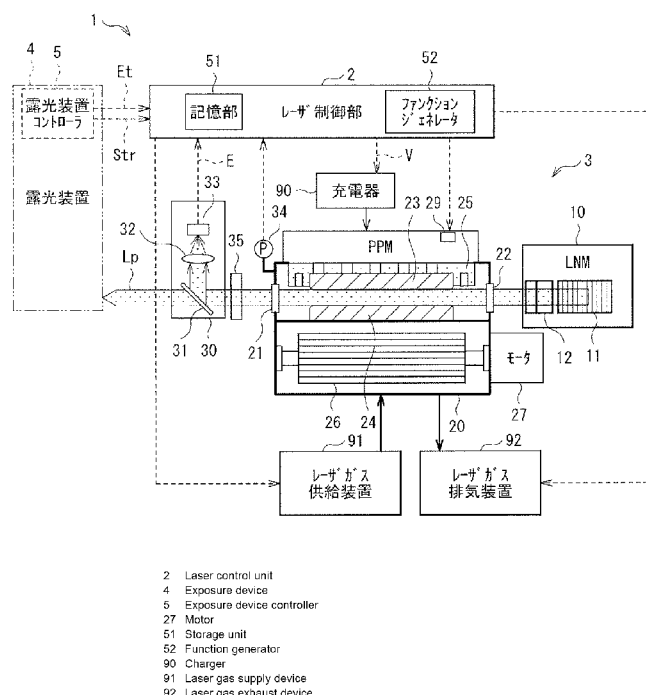
(10) 国際公開番号

WO 2018/105002 A1

- (51) 国際特許分類:
H01S 3/225 (2006.01) *H01S 3/104* (2006.01)
H01S 3/0943 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2016/086057
- (22) 国際出願日: 2016年12月5日(05.12.2016)
- (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400番地 Tochigi (JP).
- (72) 発明者: 浅山 武志 (ASAYAMA, Takeshi); 〒3238558 栃木県小山市大字横倉新田400番地 ギガフォトン株式会社内 Tochigi (JP).
- (74) 代理人: 特許業務法人つばさ国際特許事務所 (TSUBASA PATENT PROFESSIONAL CORPORATION); 〒1600022 東京都新宿区新宿1丁目15番9号 さわだビル3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, DJ, 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,

(54) Title: LASER DEVICE

(54) 発明の名称: レーザ装置



(57) **Abstract:** This laser device comprises: a laser chamber containing a pair of electrodes and emitting, at each frequency among a plurality of pulse repeat frequencies, a pulsed laser light having a pulse energy corresponding to a voltage applied between the pair of electrodes; an energy detector provided on the light path of the pulsed laser light, and detecting the pulse energy of the pulsed laser light; a voltage control unit controlling the applied voltage on the basis of a target pulse energy and the pulse energy detected by the energy detector; and a pulse energy control unit periodically varying the target



KW, 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, 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))

pulse energy at a modulation frequency corresponding to each of the plurality of pulse repeat frequencies with a reference energy serving as the center for the variation.

(57) 要約: 本開示によるレーザ装置は、一対の電極を含み、一対の電極間に印加された印加電圧に応じたパルスエネルギーを有するパルスレーザ光を、複数のパルス繰り返し周波数における各周波数で出射するレーザチャンバと、パルスレーザ光の光路上に設けられ、パルスレーザ光のパルスエネルギーを検出するエネルギー検出器と、目標パルスエネルギーとエネルギー検出器によって検出されたパルスエネルギーとに基づいて、印加電圧を制御する電圧制御部と、目標パルスエネルギーを、基準エネルギーを変動中心として、複数のパルス繰り返し周波数のそれぞれに応じた変調周波数で周期的に変動させるパルスエネルギー制御部とを備える。

明 細 書

発明の名称： レーザ装置

技術分野

[0001] 本開示は、レーザ装置に関する。

背景技術

[0002] 近年、半導体露光装置（以下、「露光装置」という）においては、半導体集積回路の微細化および高集積化につれて、解像力の向上が要請されている。このため、露光用光源から放出される光の短波長化が進められている。一般的に、露光用光源には、従来の水銀ランプに代わってガスレーザ装置が用いられる。たとえば、露光用のガスレーザ装置としては、波長248nmの紫外線のレーザ光を出力するKrFエキシマレーザ装置、ならびに波長193nmの紫外線のレーザ光を出力するArFエキシマレーザ装置が用いられる。

[0003] 次世代の露光技術としては、露光装置側の露光用レンズとウエハとの間が液体で満たされる液浸露光が実用化されている。この液浸露光では、露光用レンズとウエハとの間の屈折率が変化するため、露光用光源の見かけの波長が短波長化する。ArFエキシマレーザ装置を露光用光源として液浸露光が行われた場合、ウエハには水中における波長134nmの紫外光が照射される。この技術をArF液浸露光（又はArF液浸リソグラフィー）という。

[0004] KrFエキシマレーザ装置およびArFエキシマレーザ装置の自然発振幅は、約350～400pmと広い。そのため、KrF及びArFレーザ光のような紫外線を透過する材料で投影レンズを構成すると、色収差が発生してしまう場合がある。その結果、解像力が低下し得る。そこで、ガスレーザ装置から出力されるレーザ光のスペクトル線幅を、色収差が無視できる程度となるまで狭帯域化する必要がある。そのため、ガスレーザ装置のレーザ共振器内には、スペクトル線幅を狭帯域化するために、狭帯域化素子（エタロン、グレーティング等）を有する狭帯域化モジュール（Line Narrow Module：L

NM) が設けられる場合がある。以下では、スペクトル線幅が狭帯域化されるレーザ装置を狭帯域化レーザ装置という。

先行技術文献

特許文献

[0005] 特許文献1：特表2016-522443号公報

概要

[0006] 本開示の第1のレーザ装置は、一对の電極を含み、一对の電極間に印加された印加電圧に応じたパルスエネルギーを有するパルスレーザ光を、複数のパルス繰り返し周波数における各周波数で出射するレーザチャンバと、パルスレーザ光の光路上に設けられ、パルスレーザ光のパルスエネルギーを検出するエネルギー検出器と、目標パルスエネルギーとエネルギー検出器によって検出されたパルスエネルギーとに基づいて、印加電圧を制御する電圧制御部と、目標パルスエネルギーを、基準エネルギーを変動中心として、複数のパルス繰り返し周波数のそれぞれに応じた変調周波数で周期的に変動させるパルスエネルギー制御部とを備える。

[0007] 本開示の第2のレーザ装置は、一对の電極を含み、一对の電極間に印加された印加電圧に応じたパルスエネルギーを有するパルスレーザ光を、所定のパルス繰り返し周波数で出射するレーザチャンバと、パルスレーザ光の光路上に設けられ、パルスレーザ光のパルスエネルギーを検出するエネルギー検出器と、目標パルスエネルギーとエネルギー検出器によって検出されたパルスエネルギーとに基づいて、印加電圧を制御する電圧制御部と、目標パルスエネルギーを、複数の基準エネルギーのそれぞれを変動中心として、所定の変調周波数で周期的に変動させるパルスエネルギー制御部とを備える。

[0008] 本開示の第3のレーザ装置は、一对の電極を含み、一对の電極間に印加された印加電圧に応じたパルスエネルギーを有するパルスレーザ光を、所定のパルス繰り返し周波数で出射するレーザチャンバと、パルスレーザ光の光路上に設けられ、パルスレーザ光のパルスエネルギーを検出するエネルギー検出器と、目標パルスエネルギーとエネルギー検出器によって検出されたパルスエネルギー

とに基づいて、印加電圧を制御する電圧制御部と、目標パルスエネルギーを、複数の基準エネルギーのそれぞれを変動中心として、複数の基準エネルギーのそれぞれに応じた変調周波数で周期的に変動させるパルスエネルギー制御部とを備える。

図面の簡単な説明

[0009] 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1に係るレーザ装置の一構成例を概略的に示す。

[図2]図2は、比較例1に係るレーザ装置におけるレーザ制御部によるパルスエネルギーの制御の流れの一例を示すフローチャートである。

[図3]図3は、比較例1に係るレーザ装置におけるレーザ制御部による制御ゲインの算出処理の流れの一例を示すフローチャートである。

[図4]図4は、図3の制御ゲインの算出処理におけるゲイン発振のサブルーチンの一例を示すフローチャートである。

[図5]図5は、比較例1に係るレーザ装置におけるパルス毎のパルスエネルギーと充電電圧との計測値の第1の例を示す。

[図6]図6は、比較例1に係るレーザ装置における充電電圧の変化に対するパルスエネルギーの変化の第1の例を示す。

[図7]図7は、比較例1に係るレーザ装置におけるパルス毎のパルスエネルギーと充電電圧との計測値の第2の例を示す。

[図8]図8は、比較例1に係るレーザ装置における充電電圧の変化に対するパルスエネルギーの変化の第2の例を示す。

[図9]図9は、比較例2に係るレーザ装置の一構成例を概略的に示す。

[図10]図10は、比較例2に係るレーザ装置におけるレーザ制御部による制御ゲインの算出処理の流れの一例を示すフローチャートである。

[図11]図11は、比較例2に係るレーザ装置におけるパルス毎のパルスエネルギーと充電電圧との計測値の一例を示す。

[図12]図12は、図11におけるパルスエネルギーと充電電圧とをスペクトル

解析した結果の一例を示す。

[図13]図 1 3 は、比較例 2 に係るレーザ装置における充電電圧の変化に対するパルスエネルギーの変化の第 1 の例を示す。

[図14]図 1 4 は、比較例 2 に係るレーザ装置における充電電圧の変化に対するパルスエネルギーの変化の第 2 の例を示す。

[図15]図 1 5 は、実施形態 1 に係るレーザ装置におけるパルス毎のパルスエネルギーと充電電圧との計測値の一例を示す。

[図16]図 1 6 は、図 1 5 におけるパルスエネルギーと充電電圧とをスペクトル解析した結果の一例を示す。

[図17]図 1 7 は、実施形態 1 に係るレーザ装置におけるレーザ制御部による制御ゲインの算出処理の流れの一例を示すフローチャートである。

[図18]図 1 8 は、図 1 7 に続くフローチャートである。

[図19]図 1 9 は、図 1 8 に続くフローチャートである。

[図20]図 2 0 は、実施形態 1 に係るレーザ装置におけるレーザ制御部によるパルスエネルギーの制御の流れの一例を示すフローチャートである。

[図21]図 2 1 は、実施形態 2 に係るレーザ装置におけるパルス毎のパルスエネルギーと充電電圧との計測値の一例を示す。

[図22]図 2 2 は、図 2 1 におけるパルスエネルギーと充電電圧とをスペクトル解析した結果の一例を示す。

[図23]図 2 3 は、実施形態 2 に係るレーザ装置におけるレーザ制御部による制御ゲインの算出処理の流れの一例を示すフローチャートである。

[図24]図 2 4 は、図 2 3 に続くフローチャートである。

[図25]図 2 5 は、図 2 4 に続くフローチャートである。

[図26]図 2 6 は、実施形態 3 に係るレーザ装置におけるパルス毎のパルスエネルギーと充電電圧との計測値の一例を示す。

[図27]図 2 7 は、実施形態 3 に係るレーザ装置における単位時間毎のパルスエネルギーと充電電圧との計測値の一例を示す。

[図28]図 2 8 は、図 2 6 におけるパルスエネルギーと充電電圧とをスペクトル

解析した結果の一例を示す。

[図29]図29は、実施形態3に係るレーザ装置におけるレーザ制御部による制御ゲインの算出処理の流れの一例を示すフローチャートである。

[図30]図30は、図29に続くフローチャートである。

[図31]図31は、図30に続くフローチャートである。

[図32]図32は、実施形態3に係るレーザ装置におけるレーザ制御部によるパルスエネルギーの制御の流れの一例を示すフローチャートである。

[図33]図33は、実施形態4に係るレーザ装置におけるパルス毎のパルスエネルギーと充電電圧との計測値の一例を示す。

[図34]図34は、実施形態4に係るレーザ装置における単位時間毎のパルスエネルギーと充電電圧との計測値の一例を示す。

[図35]図35は、図33におけるパルスエネルギーと充電電圧とをスペクトル解析した結果の一例を示す。

[図36]図36は、実施形態4に係るレーザ装置におけるレーザ制御部による制御ゲインの算出処理の流れの一例を示すフローチャートである。

[図37]図37は、図36に続くフローチャートである。

[図38]図38は、図37に続くフローチャートである。

[図39]図39は、図38に続くフローチャートである。

[図40]図40は、図39に続くフローチャートである。

[図41]図41は、図40に続くフローチャートである。

[図42]図42は、図41に続くフローチャートである。

[図43]図43は、図42に続くフローチャートである。

[図44]図44は、図43に続くフローチャートである。

[図45]図45は、実施形態4に係るレーザ装置におけるレーザ制御部によるパルスエネルギーの制御の流れの一例を示すフローチャートである。

[図46]図46は、図45におけるステップS805AのサブルーチンAの一例を示すフローチャートである。

[図47]図47は、図45におけるステップS804AのサブルーチンBの一

例を示すフローチャートである。

[図48]図48は、図45におけるステップS803AのサブルーチンCの一
例を示すフローチャートである。

[図49]図49は、実施形態5に係るレーザ装置の一構成例を概略的に示す。

実施形態

[0010] <内容>

<1. 比較例> (制御ゲインを用いたエネルギー制御を行うレーザ装置)

1. 1 比較例1 (図1～図8)

1. 1. 1 比較例1の構成

1. 1. 2 比較例1の動作

1. 1. 3 比較例1の課題

1. 2 比較例2 (図9～図14)

1. 2. 1 比較例2の構成

1. 2. 2 比較例2の動作

1. 2. 2 比較例2の課題

<2. 実施形態1> (目標パルスエネルギーの値に応じた複数の制御ゲインを
用いるレーザ装置) (図15～図20)

2. 1 構成

2. 2 動作

2. 3 作用・効果

<3. 実施形態2> (目標パルスエネルギーの値と変調周波数の値とに応じた
複数の制御ゲインを用いるレーザ装置) (図21～図25)

3. 1 構成

3. 2 動作

3. 3 作用・効果

<4. 実施形態3> (パルス繰り返し周波数の値に応じた複数の制御ゲイン
を用いるレーザ装置) (図26～図32)

4. 1 構成

4. 2 動作

4. 3 作用・効果

<5. 実施形態4>（目標パルスエネルギーの値とパルス繰り返し周波数の値に応じた複数の制御ゲインを用いるレーザ装置）（図33～図48）

5. 1 構成

5. 2 動作

5. 3 作用・効果

<6. 実施形態5>（MOP Oシステムを含むレーザ装置）

6. 1 構成（図49）

6. 2 動作

6. 3 作用・効果

<7. その他>

[0011] 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。

[0012] <1. 比較例>（制御ゲインを用いたエネルギー制御を行うレーザ装置）

[1. 1 比較例1]

[1. 1. 1 比較例1の構成]

図1は、本開示の実施形態に対する比較例1に係るレーザ装置101の一構成例を概略的に示している。

[0013] 比較例1に係るレーザ装置101は、露光装置4に向けてパルスレーザ光Lpを出力するエキシマレーザ装置であってもよい。レーザ装置101は、レーザ制御部2と、レーザ発振器システム3と、レーザガス供給装置91と、レーザガス排気装置92とを備えている。

[0014] レーザ発振器システム3は、レーザ共振器と、レーザチャンバ20と、パ

ルスパワーモジュール（PPM：Pulse Power Module）28と、パルスエネルギー検出器30と、充電器90とを含んでもよい。

[0015] レーザチャンバ20は、レーザ光を透過するウィンドウ21、22と、一对の放電電極23、24と、電気絶縁部材25と、クロスフローファン（CFF）26と、モータ27と、圧力センサ34とを含んでもよい。レーザチャンバ20は、図示しない熱交換器を含んでもよい。

[0016] レーザチャンバ20は、一对の放電電極23、24間に印加された印加電圧に応じたパルスエネルギーEを有するパルスレーザ光Lpを、設定された所定のパルス繰り返し周波数Rpで出射する。一对の放電電極23、24間に印加される印加電圧は、充電器90による充電電圧Vに応じた電圧であってもよい。

[0017] レーザ共振器は、出力結合器（OC：Output Coupler）としての出力結合ミラー35と、狭帯域化モジュール（LNM：Line Narrowing Module）10とを含んでもよい。レーザ共振器には、図示しない2つのスリットが設けられていてもよい。レーザ共振器の光路上に一对の放電電極23、24の放電領域が配置されるように、レーザチャンバ20が配置されてもよい。

[0018] 狭帯域化モジュール10は、レーザ光のビームを拡大するプリズム12と、グレーティング11とを含んでもよい。プリズム12は、レーザチャンバ20から出力されたレーザ光のビームがプリズム12でビーム拡大されてグレーティング11に所定の角度で入射するように配置されてもよい。グレーティング11は、レーザ光の入射角度と回折角度とが略同じ角度となるリトロ配置であってもよい。

[0019] 出力結合ミラー35は、レーザチャンバ20内で発生したレーザ光の一部を反射し、一部を透過する多層膜がコートされた部分反射ミラーであってもよい。

[0020] パルスエネルギー検出器30は、パルスレーザ光Lpの光路上に設けられ、パルスレーザ光LpのパルスエネルギーEを検出する。パルスエネルギー検出器30は、ビームスプリッタ31と、集光レンズ32と、パルスエネルギーEを

検出する光センサ 33 とを含んでもよい。

[0021] ビームスプリッタ 31 は、出力結合ミラー 35 から出力されたパルスレーザ光 L_p の光路上に配置されていてもよい。集光レンズ 32 は、ビームスプリッタ 31 で反射されたパルスレーザ光 L_p の光路上に配置されていてもよい。光センサ 33 は、集光レンズ 32 の集光位置の近傍に配置されてもよい。

[0022] パルスパワーモジュール 28 は、一对の放電電極 23, 24 を放電させるためのスイッチ 29 を含み、電気絶縁部材 25 を介して、一方の放電電極 23 と接続されていてもよい。他方の放電電極 24 は、接地されたレーザチャンバ 20 と接続されていてもよい。パルスパワーモジュール 28 は、図示しない充電コンデンサを含んでもよい。

[0023] 充電器 90 とパルスパワーモジュール 28 は、パルスパワーモジュール 28 の図示しない充電コンデンサを充電するように、互いに電氣的に接続されていてもよい。充電器 90 は、充電電圧 V を示すデータをレーザ制御部 2 から受信してもよい。充電電圧 V は、図示しない充電コンデンサを充電する電圧であってもよい。充電電圧 V は、パルスエネルギー検出器 30 によって計測されたパルスエネルギー E に基づいて、レーザ制御部 2 によって制御されてもよい。充電電圧 V は、一对の放電電極 23, 24 間に印加する印加電圧に対応した電圧であってもよい。

[0024] レーザ制御部 2 には、露光装置 4 の露光装置コントローラ 5 から発振トリガ信号 S_{tr} と目標パルスエネルギー E_t とが入力されてもよい。レーザ制御部 2 とパルスパワーモジュール 28 は、発振トリガ信号 S_{tr} に同期して、スイッチ 29 がオン／オフされるように互いに電氣的に接続されていてもよい。

[0025] レーザ制御部 2 は、各種データを記憶する記憶部 51 を含んでもよい。記憶部 51 は、各種データとして、目標パルスエネルギー E_t 、パルスエネルギー検出器 30 によって計測されたパルスエネルギー E のデータ、充電電圧 V を示すデータ等を記憶してもよい。また、記憶部 51 は、パルスレーザ光 L

pのエネルギー制御を行うための制御ゲイン G_c と、制御ゲイン G_c の算出に用いられるパルス繰り返し周波数 R_p 、及び発振パルス数 N_p のデータとを記憶してもよい。また、記憶部51は、制御ゲイン G_c の算出に用いられるその他の設定値等のデータを記憶してもよい。

[0026] レーザ制御部2は、目標パルスエネルギー E_t と、パルスエネルギー検出器30によって検出されたパルスエネルギー E とに基づいて、一对の放電電極23, 24間に印加する印加電圧を制御する電圧制御部であってもよい。

[0027] レーザ制御部2は、制御ゲイン G_c を算出するゲイン算出部であってもよい。レーザ制御部2は、制御ゲイン G_c を用いて充電電圧 V を制御することにより、レーザチャンバ20から出力されるパルスレーザ光 L_p のエネルギー制御を行う。

[0028] レーザガス供給装置91は、レーザチャンバ20内にレーザガスを供給する図示しないガスボンベと、ガスボンベからのレーザガスの供給を制御する流量制御弁としての図示しない供給バルブとを含んでいてもよい。レーザガスは、例えば、レアガスとして Ar 又は Kr を含んでいてもよい。また、レーザガスは、例えば、ハロゲンガスとして F_2 ガスを含んでいてもよい。また、レーザガスは、例えば、バッファガスとして Ne 又は He を含んでいてもよい。また、レーザガスは、それらのガスの混合ガスを含んでいてもよい。例えば、レーザガスは、 $Ar + Ne$ 混合ガス、又は $Ar + Ne + F_2$ 混合ガスを含んでいてもよい。

[0029] レーザガス排気装置92は、レーザチャンバ20内のレーザガスを排気できるように構成されていてもよい。レーザガス排気装置92は、図示しない排気バルブと、図示しない排気ポンプとを含んでいてもよい。

[0030] [1. 1. 2 比較例1の動作]

レーザ制御部2は、露光装置4の露光装置コントローラ5から発振トリガ信号 S_{tr} と目標パルスエネルギー E_t とを受信してもよい。レーザ制御部2は、目標パルスエネルギー E_t となるように充電器90に充電電圧 V を設定してもよい。また、レーザ制御部2は、発振トリガ信号 S_{tr} に同期させてパ

ルスパワーモジュール 28 のスイッチ 29 を動作させてもよい。これにより、レーザチャンバ 20 において、一对の放電電極 23, 24 間に充電電圧 V に応じた高電圧が印加され、一对の放電電極 23, 24 間の放電領域においてレーザガスが絶縁破壊して、放電が生成され得る。その結果、レーザチャンバ 20 内においてレーザガスが励起され、レーザ共振器を構成する狭帯域化モジュール 10 と出力結合ミラー 35 との間でレーザ発振が起こり得る。出力結合ミラー 35 からは、狭帯域化モジュール 10 のプリズム 12 とグレーティング 11 とによって狭帯域化されたパルスレーザ光 L_p が出力され得る。この際、レーザ共振器内の図示しない 2 つのスリットによってレーザ発振領域が制限され得る。

[0031] なお、レーザ装置 101 は必ずしも、狭帯域化レーザ装置でなく、自然発振光を出力するレーザ装置であってもよい。例えば、狭帯域化モジュール 10 の代わりに、高反射ミラーを配置してもよい。

[0032] 出力結合ミラー 35 から出力されたパルスレーザ光 L_p は、ビームスプリッタ 31 によって一部がパルスエネルギー E を検出するためのサンプル光として、光センサ 33 に向けて反射され得る。パルスエネルギー検出器 30 は、検出したパルスエネルギー E のデータを、レーザ制御部 2 に送信してもよい。一方、ビームスプリッタ 31 を透過したパルスレーザ光 L_p は、露光装置 4 に入射し得る。

[0033] レーザ制御部 2 は、パルスレーザ光 L_p が出力された場合の充電電圧 V とパルスエネルギー E とのデータを記憶部 51 に記憶してもよい。

[0034] レーザ制御部 2 は、目標パルスエネルギー E_t と実際に出力されたパルスエネルギー E との差 ΔE に基づいて、目標パルスエネルギー E_t となるように充電電圧 V をフィードバック制御してもよい。

[0035] レーザ制御部 2 は、充電電圧 V が許容範囲の最大値より高くなったら、レーザガス供給装置 91 を制御して、所定の圧力となるまでレーザガスをレーザチャンバ 20 内に供給してもよい。また、レーザ制御部 2 は、充電電圧 V が許容範囲の最小値より低くなったら、レーザガス排気装置 92 を制御して

、所定の圧力となるまでレーザガスをレーザチャンバ20内から排気してもよい。

[0036] レーザ装置101は、制御権がレーザ装置101側にある状態で目標パルスエネルギー E_t を階段状に変化させたときの充電電圧 V とパルスエネルギー E とのデータを記憶部51に記憶してもよい。このときのパルスエネルギー E と充電電圧 V との関係 $\Delta V / \Delta E$ から、フィードバック制御で使用する制御ゲイン G_c をあらたに算出してもよい。

[0037] (比較例1におけるエネルギー制御の具体例)

放電励起式エキシマレーザの場合、充電電圧 V を高くすると、パルスエネルギー E は高くなり、充電電圧 V を低くするとパルスエネルギー E は小さくなる。この特性に従って、レーザ制御部2は、パルスレーザ光 L_p のパルスエネルギー E が目標エネルギー E_t となるように充電電圧 V を制御する。エネルギー制御で用いられる制御ゲイン G_c は、以下の式のように、レーザの特性で決定される $\Delta V / \Delta E$ と係数 G_s との積で決定される。

$$G_c = G_s \cdot \Delta V / \Delta E$$

[0038] 係数 G_s は、制御が発散しないように例えば、0.3以上、1以下の値が望ましい。制御ゲイン G_c は初期値をパラメータであらかじめ設定しておく。制御ゲイン G_c の初期値のパラメータの範囲は例えば0.1以上、2以下であってもよい。制御ゲイン G_c は、後述する図3に示すフローチャートに従って算出してもよい。

[0039] 図2は、比較例1に係るレーザ装置101におけるレーザ制御部2によるパルスエネルギー E の制御の流れの一例を示すフローチャートである。

[0040] まず、レーザ制御部2は、露光装置コントローラ5又は記憶部51から、目標パルスエネルギー E_t の読み込みを行う(ステップS101)。次に、レーザ制御部2は、レーザ発振したか否かを判断する(ステップS102)。レーザ制御部2は、レーザ発振していないと判断した場合(ステップS102; N)には、ステップS102の処理を繰り返す。

[0041] 一方、レーザ発振したと判断した場合(ステップS102; Y)には、レ

ーザ制御部2は、パルスエネルギー検出器30から、パルスエネルギーEの値を読み込む（ステップS103）。

[0042] 次に、レーザ制御部2は、パルスエネルギーEと目標パルスエネルギー E_t との比較を行う（ステップS104）。レーザ制御部2は、パルスエネルギーEと目標パルスエネルギー E_t とが略同じと判断した場合（ $E = E_t$ ）には、現在の充電電圧Vのデータをそのまま充電電圧Vのデータとして（ステップS106）、記憶部51に書き込む（ステップS108）。

[0043] 一方、レーザ制御部2は、パルスエネルギーEが目標パルスエネルギー E_t よりも小さいと判断した場合（ $E < E_t$ ）には、以下の式のように、目標パルスエネルギー E_t とパルスエネルギーEとの差（ $E_t - E$ ）に制御ゲイン G_c を乗じた値を充電電圧Vに加算し、あらたな充電電圧Vとして（ステップS105）、その充電電圧Vのデータを記憶部51に書き込む（ステップS108）。

$$V = V + (E_t - E) \cdot G_c$$

[0044] また、レーザ制御部2は、パルスエネルギーEが目標パルスエネルギー E_t よりも大きいと判断した場合（ $E > E_t$ ）には、以下の式のように、パルスエネルギーEと目標パルスエネルギー E_t との差分（ $E - E_t$ ）に制御ゲイン G_c を乗じた値を充電電圧Vから減算し、あらたな充電電圧Vとして（ステップS107）、その充電電圧Vのデータを記憶部51に書き込む（ステップS108）。

$$V = V - (E - E_t) \cdot G_c$$

[0045] 次に、レーザ制御部2は、充電電圧Vが所定の最大値 V_{max} 以上になったか否かを判断する（ステップS109）。レーザ制御部2は、充電電圧Vが所定の最大値 V_{max} 以上になっていないと判断した場合（ステップS109；N）には、ステップS101の処理に戻る。一方、充電電圧Vが所定の最大値 V_{max} 以上になったと判断した場合（ステップS109；Y）には、エネルギー制御の処理を終了する。

[0046] （比較例1における制御ゲインの算出処理の具体例）

図3は、比較例1に係るレーザ装置101におけるレーザ制御部2による制御ゲイン G_c の算出処理の流れの一例を示すフローチャートである。

[0047] 図3の処理は、例えば、露光装置4からの指示、レーザガスの交換後、又はレーザガスのガス圧調整後に行ってもよい。また、一定の期間毎に図3の処理を行ってもよい。

[0048] まず、レーザ制御部2は、露光装置コントローラ5又は記憶部51から、パルス繰り返し周波数 R_p の読み込みを行う（ステップS201）。次に、レーザ制御部2は、露光装置コントローラ5又は記憶部51から、発振パルス数 N_p の読み込みを行う（ステップS202）。発振パルス数 N_p は、例えば2000パルス以上5000パルス以下が好ましい。

[0049] 次に、レーザ制御部2は、目標パルスエネルギー E_t を基準エネルギー E_{ta} に設定する（ステップS203）。レーザ制御部2は、その設定した目標パルスエネルギー E_t を記憶部51に書き込む。次に、レーザ制御部2は、ゲイン発振の処理を行う（ステップS204）。ここでのゲイン発振の処理としては、後述する図4に示すサブルーチンに示す処理を行う。

[0050] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値 N を $N+1$ に設定する（ステップS205）。

[0051] 次に、レーザ制御部2は、パルスエネルギー検出器30から、パルスエネルギー E の値を読み込み、記憶部51に、 n 番目のパルスのパルスエネルギー E の値を E_{an} として書き込む（ステップS206）。

[0052] 次に、レーザ制御部2は、充電器90に設定した充電電圧 V の値を記憶部51から読み込み、記憶部51に、 n 番目のパルスにおける充電電圧 V の値を V_{an} として書き込む（ステップS207）。

[0053] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値 N が発振パルス数 N_p を超えたか否かを判断する（ステップS208）。レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値 N が発振パルス数 N_p を超えていないと判断した場合（ステップS208；N）には、ステップS204の処理に戻る。

[0054] 一方、パルスのカウンタ値 N が発振パルス数 N_p を超えたと判断した場合

(ステップS208; Y) には、レーザ制御部2は、以下の式のように、目標パルスエネルギー E_t を基準エネルギー E_{ta} に設定した場合における平均パルスエネルギー Ave 、 E_a と平均充電電圧 Ave 、 V_a とを計算する(ステップS209)。

$$Ave, E_a = \Sigma E_{an} / N_p$$

$$Ave, V_a = \Sigma V_{an} / N_p$$

[0055] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値 N を0に設定する(ステップS210)。次に、レーザ制御部2は、目標パルスエネルギー E_t を基準エネルギー E_{tb} に設定する(ステップS211)。レーザ制御部2は、その設定した目標パルスエネルギー E_t を記憶部51に書き込む。次に、レーザ制御部2は、ゲイン発振の処理を行う(ステップS212)。ここでのゲイン発振の処理としては、後述する図4に示すサブルーチンに示す処理を行う。

[0056] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値 N を $N+1$ に設定する(ステップS213)。

[0057] 次に、レーザ制御部2は、パルスエネルギー検出器30から、パルスエネルギー E の値を読み込み、記憶部51に、 n 番目のパルスのパルスエネルギー E の値を E_{bn} として書き込む(ステップS214)。

[0058] 次に、レーザ制御部2は、充電器90に設定した充電電圧 V の値を記憶部51から読み込み、記憶部51に、 n 番目のパルスにおける充電電圧 V の値を V_{bn} として書き込む(ステップS215)。

[0059] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値 N が発振パルス数 N_p を超えたか否かを判断する(ステップS216)。レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値 N が発振パルス数 N_p を超えていないと判断した場合(ステップS216; N) には、ステップS212の処理に戻る。

[0060] 一方、パルスのカウンタ値 N が発振パルス数 N_p を超えたと判断した場合(ステップS216; Y) には、レーザ制御部2は、以下の式のように、目標パルスエネルギー E_t を基準エネルギー E_{tb} に設定した場合における平均パルスエネルギー Ave 、 E_b と平均充電電圧 Ave 、 V_b とを計算する(ステ

ップS 2 1 7)。

$$Ave. E_b = \Sigma E_{bn} / N_p$$

$$Ave. V_b = \Sigma V_{bn} / N_p$$

[0061] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウント値Nを0に設定する（ステップS 2 1 8）。

[0062] 次に、レーザ制御部2は、以下の式のように、制御ゲインG_cの値を計算し（ステップS 2 1 9）、処理を終了する。

$$\Delta V / \Delta E = (Ave. V_b - Ave. V_a) / (Ave. E_b - Ave. E_a)$$

$$G_c = G_s \cdot \Delta V / \Delta E$$

[0063] 図4は、図3の制御ゲインの算出処理におけるゲイン発振のサブルーチンの一例を示すフローチャートである。

[0064] まず、レーザ制御部2は、記憶部51から、目標パルスエネルギーE_tの読み込みを行う（ステップS 3 0 1）。次に、レーザ制御部2は、レーザ発振したか否かを判断する（ステップS 3 0 2）。レーザ制御部2は、レーザ発振していないと判断した場合（ステップS 3 0 2 ; N）には、ステップS 3 0 2の処理を繰り返す。

[0065] 一方、レーザ発振したと判断した場合（ステップS 3 0 2 ; Y）には、レーザ制御部2は、パルスエネルギー検出器30から、パルスエネルギーEの値を読み込む（ステップS 3 0 3）。

[0066] 次に、レーザ制御部2は、パルスエネルギーEと目標パルスエネルギーE_tとの比較を行う（ステップS 3 0 4）。レーザ制御部2は、パルスエネルギーEと目標パルスエネルギーE_tとが略同じと判断した場合（E = E_t）には、現在の充電電圧Vのデータをそのまま充電電圧Vのデータとする（ステップS 3 0 6）。

[0067] 一方、レーザ制御部2は、パルスエネルギーEが目標パルスエネルギーE_tよりも小さいと判断した場合（E < E_t）には、以下の式のように、目標パルスエネルギーE_tとパルスエネルギーEとの差（E_t - E）に制御ゲインG_cの

初期値 $G_c 0$ を乗じた値を充電電圧 V に加算し、あらたな充電電圧 V とする（ステップ $S 3 0 5$ ）。

$$V = V + (E_t - E) \cdot G_c 0$$

[0068] また、レーザ制御部 2 は、パルスエネルギー E が目標パルスエネルギー E_t よりも大きいと判断した場合（ $E > E_t$ ）には、以下の式のように、パルスエネルギー E と目標パルスエネルギー E_t との差分（ $E - E_t$ ）に制御ゲイン G_c の初期値 $G_c 0$ を乗じた値を充電電圧 V から減算し、あらたな充電電圧 V とする（ステップ $S 3 0 7$ ）。

$$V = V - (E - E_t) \cdot G_c 0$$

[0069] 次に、レーザ制御部 2 は、充電電圧 V が所定の最大値 V_{max} 以上になったか否かを判断する（ステップ $S 3 0 8$ ）。レーザ制御部 2 は、充電電圧 V が所定の最大値 V_{max} 以上になっていないと判断した場合（ステップ $S 3 0 8 ; N$ ）には、その充電電圧 V のデータを記憶部 5 1 に書き込み（ステップ $S 3 1 0$ ）、ゲイン発振の処理を終了する。

[0070] 一方、充電電圧 V が所定の最大値 V_{max} 以上になったと判断した場合（ステップ $S 3 0 8 ; Y$ ）には、最大値 V_{max} を充電電圧 V として（ステップ $S 3 0 9$ ）、その充電電圧 V のデータを記憶部 5 1 に書き込み（ステップ $S 3 1 0$ ）、ゲイン発振の処理を終了する。

[0071] なお、制御ゲイン G_c の初期値 $G_c 0$ は、例えば 0.1 以上、2 以下の値であってもよい。制御ゲイン G_c を計算した後は、初期値 $G_c 0$ をその計算した値（ $G_c 0 = G_c$ ）にしてもよい。

[0072] 図 5 は、比較例 1 に係るレーザ装置 1 0 1 におけるパルス毎のパルスエネルギー E と充電電圧 V との計測値の第 1 の例を示している。図 6 は、比較例 1 に係るレーザ装置 1 0 1 における充電電圧 V の変化に対するパルスエネルギー E の変化の第 1 の例を示している。図 5 において、横軸はパルスレーザ光 L_p のパルス番号、縦軸はパルスエネルギー E （mJ）及び充電電圧 V （kV）を示す。図 6 において、横軸は充電電圧 V （kV）、縦軸はパルスエネルギー E （mJ）を示す。

[0073] 図5の例では、図3のステップS209で計算される平均パルスエネルギー $Ave. E_a$ は9 mJ、平均充電電圧 $Ave. V_a$ は19 kVとなっている。また、図3のステップS217で計算される平均パルスエネルギー $Ave. E_b$ は11 mJ、平均充電電圧 $Ave. V_b$ は23 kVとなっている。

[0074] 図6における直線の傾き $\Delta E / \Delta V$ の逆数は、図3のステップS219で計算される $\Delta V / \Delta E$ に相当する。図6に示したように、傾き $\Delta E / \Delta V$ と、実際の充電電圧 V とパルスエネルギー E との関係曲線 $V-E$ とには、ずれが生じ得る。また、傾き $\Delta E / \Delta V$ はパルスエネルギー E のばらつきに応じて、変化し得る。このため、図3のステップS209で計算される $\Delta V / \Delta E$ にもずれが生じ、制御ゲイン G_c の算出精度が悪くなり得る。

[0075] 図7は、比較例1に係るレーザ装置101におけるパルス毎のパルスエネルギー E と充電電圧 V との計測値の第2の例を示している。図8は、比較例1に係るレーザ装置101における充電電圧 V の変化に対するパルスエネルギー E の変化の第2の例を示している。図7において、横軸はパルスレーザ光 L_p のパルス番号、縦軸はパルスエネルギー E (mJ) 及び充電電圧 V (kV) を示す。図8において、横軸は充電電圧 V (kV)、縦軸はパルスエネルギー E (mJ) を示す。

[0076] 比較例1に係るレーザ装置101において、例えば以下のように、目標パルスエネルギー E_t の値に応じた複数の制御ゲイン G_{ca} 、 G_{cb} を算出してもよい。

$$E_t \leq 10 : G_{ca} = G_s \cdot \Delta V_a / \Delta E_a$$

$$E_t > 10 : G_{cb} = G_s \cdot \Delta V_b / \Delta E_b$$

[0077] 例えば図7に示したように、レーザ装置101において、3段階に分けてゲイン発振を行い、平均パルスエネルギーと平均充電電圧とをそれぞれ3つつ計算するようにしてもよい。この場合、図8における直線の傾き $\Delta E_a / \Delta V_a$ の逆数 ($\Delta V_a / \Delta E_a$) に基づいて制御ゲイン G_{ca} が計算され得る。また、図8における直線の傾き $\Delta E_b / \Delta V_b$ の逆数 ($\Delta V_b / \Delta E_b$) に基づいて制御ゲイン G_{cb} が計算され得る。

[0078] [1. 1. 3 比較例1の課題]

以上のように、比較例1に係るレーザ装置101では、充電電圧 V とパルスエネルギー E とを階段状に変化させて、制御ゲイン G_c を算出する。この場合、パルスエネルギー E のばらつきに応じて、算出精度が悪くなり得る。制御ゲイン G_c の算出精度を改善するために、制御ゲイン G_c を算出する際のパルス数を増やして平均化を実施すると、算出時間が増加し得る。このため、短時間で精度よく制御ゲイン G_c を算出することができる技術の開発が望まれる。

[0079] [1. 2 比較例2]

[1. 2. 1 比較例2の構成]

図9は、比較例2に係るレーザ装置1の一構成例を概略的に示している。

[0080] 比較例2に係るレーザ装置1は、比較例1に係るレーザ装置101におけるレーザ制御部2に、ファンクションジェネレータ52を追加した構成となっている。

[0081] 後述するように、レーザ装置1では、レーザ制御部2が制御ゲイン G_c の算出処理を行う際に、ファンクションジェネレータ52によって、目標パルスエネルギー E_t を、所定の基準エネルギーを変動中心として、変調周波数 F_m で周期的に変動させる処理を行う。

[0082] ファンクションジェネレータ52の機能は、ハードウェアで実現してもよいし、ファンクションジェネレータ52の機能に相当するプログラムをレーザ制御部2が実行することにより実現してもよい。

[0083] その他の構成は、比較例1に係るレーザ装置101と略同様であってもよい。

[0084] [1. 2. 2 比較例2の動作]

レーザ装置1では、制御権がレーザ装置1側にある状態で目標パルスエネルギー E_t を変調周波数 F_m で周期的に変動させたときのパルスエネルギー E と充電電圧 V とのデータを記憶部51に記憶する。レーザ装置1では、記憶されたパルスエネルギー E と充電電圧 V とのデータ列に対してスペクトル解析を

行う。ここで、スペクトル解析はフーリエ解析、離散的フーリエ解析、又は高速フーリエ解析などを用いてもよい。レーザ装置 1 では、変調周波数 F_m のパルスエネルギー E の振幅成分 I_e と、充電電圧 V の振幅成分 I_v とを算出する。レーザ装置 1 では、このときの振幅成分 I_e と振幅成分 I_v との関係 I_v / I_e に基づいて、制御ゲイン G_c を算出する。以下、図 10 を参照して、具体的な算出処理を説明する。

[0085] (比較例 2 における制御ゲインの算出処理の具体例)

図 10 は、比較例 2 に係るレーザ装置 1 におけるレーザ制御部 2 による制御ゲイン G_c の算出処理の流れの一例を示すフローチャートである。

[0086] 図 10 の処理は、例えば、露光装置 4 からの指示、レーザガスの交換後、又はレーザガスのガス圧調整後に行ってもよい。また、一定の期間毎に図 10 の処理を行ってもよい。

[0087] まず、レーザ制御部 2 は、露光装置コントローラ 5 又は記憶部 51 から、パルス繰り返し周波数 R_p の読み込みを行う（ステップ S401）。次に、レーザ制御部 2 は、露光装置コントローラ 5 又は記憶部 51 から、発振パルス数 N_p の読み込みを行う（ステップ S402）。発振パルス数 N_p は、例えば 400 パルス以上 1500 パルス以下が好ましい。発振パルス数 N_p は、512 パルス、1024 パルスなど、2 の累乗がより好ましい。

[0088] 次に、レーザ制御部 2 は、目標パルスエネルギー E_t を基準エネルギー E_{ta} に設定する（ステップ S403）。レーザ制御部 2 は、その設定した目標パルスエネルギー E_t を記憶部 51 に書き込む。

[0089] 次に、レーザ制御部 2 は、ファンクションジェネレータ 52 によって、以下の式のように、目標パルスエネルギー E_t を、基準エネルギー E_{ta} を変動中心として、周期的に変動させる（ステップ S404）。 F_{ma} は、目標パルスエネルギー E_t の変調周波数である。 R_p / F_{ma} は整数が望ましい。 R_p / F_{ma} の範囲は 4 以上、10 以下が望ましい。振幅 ΔI_e の範囲は 0.5 mJ 以上、2 mJ 以下が望ましい。振幅 ΔI_e は、基準エネルギー E_{ta} に対する比率で決定してもよい。例えば、 $\Delta I_e = E_{ta} \cdot (5\% \sim 10\%)$ と

してもよい。

$$E_{t} = E_{t a} + \Delta I_{e} \cdot \sin (N \cdot 2 \cdot \pi \cdot F_{m a} / R_{p})$$

[0090] 次に、レーザ制御部2は、ゲイン発振の処理を行う（ステップS405）。ここでのゲイン発振の処理は、例えば図4に示すサブルーチンと略同様であってもよい。

[0091] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値NをN+1に設定する（ステップS406）。

[0092] 次に、レーザ制御部2は、パルスエネルギー検出器30から、パルスエネルギーEの値を読み込み、記憶部51に、n番目のパルスのパルスエネルギーEの値をE_{a n}として書き込む（ステップS407）。

[0093] 次に、レーザ制御部2は、充電器90に設定した充電電圧Vの値を記憶部51から読み込み、記憶部51に、n番目のパルスにおける充電電圧Vの値をV_{a n}として書き込む（ステップS408）。

[0094] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値Nが発振パルス数N_pを超えたか否かを判断する（ステップS409）。レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値Nが発振パルス数N_pを超えていないと判断した場合（ステップS409；N）には、ステップS404の処理に戻る。

[0095] 一方、パルスのカウンタ値Nが発振パルス数N_pを超えたと判断した場合（ステップS409；Y）には、レーザ制御部2は、記憶されたパルスエネルギーEと充電電圧Vとのデータ列に対して、スペクトル解析を実行し、パルスエネルギーEの変調周波数F_{m a}における振幅成分I_{e a}と、充電電圧Vの変調周波数F_{m a}における振幅成分I_{v a}とを求める（ステップS410）。スペクトル解析は、フーリエ変換、離散フーリエ変換、又は高速フーリエ変換などを用いてもよい。

[0096] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値Nを0に設定する（ステップS411）。

[0097] 次に、レーザ制御部2は、以下の式のように、制御ゲインG_cの値を計算し（ステップS412）、処理を終了する。係数G_sは、制御が発散しない

ように例えば、0.3以上、1以下の値が望ましい。

$$G_c = G_s \cdot \Delta V / \Delta E = G_s \cdot I_{va} / I_{ea}$$

[0098] 図11は、比較例2に係るレーザ装置1におけるパルス毎のパルスエネルギーEと充電電圧Vとの計測値の一例を示している。図12は、図11におけるパルスエネルギーEと充電電圧Vとをスペクトル解析した結果の一例を示している。図11において、横軸はパルスレーザ光Lpのパルス番号、縦軸はパルスエネルギーE (mJ)、又は充電電圧V (kV)を示す。比較例2では、パルス繰り返し周波数Rpは一定なので、図11の横軸は時間に相当する。図12において、横軸は周波数(Hz)、縦軸は振幅値を示す。

[0099] 図10のステップS410でのスペクトル解析の処理により、例えば図12に示したような振幅成分Iea, Ivaが求められる。

[0100] その他の動作は、比較例1に係るレーザ装置101と略同様であってもよい。

[0101] [1.2.2 比較例2の課題]

図13は、比較例2に係るレーザ装置1における充電電圧Vの変化に対するパルスエネルギーEの変化の第1の例を示している。図14は、比較例2に係るレーザ装置1における充電電圧Vの変化に対するパルスエネルギーEの変化の第2の例を示している。図13及び図14において、横軸は充電電圧V (kV)、縦軸はパルスエネルギーE (mJ)を示す。図14には、パルス繰り返し周波数Rp = 4000Hz発振時の特性と、Rp = 6000Hz発振時の特性とを示す。

[0102] 図13及び図14における直線の傾き $\Delta E / \Delta V$ の逆数は、図3のステップS412で計算される制御ゲインGcにおける I_{va} / I_{ea} に相当する。

[0103] 図13に示したように、パルスエネルギーEの値によって傾き $\Delta E / \Delta V$ が異なるので、ある1つの目標パルスエネルギーEtに基づいて制御ゲインGcを算出した場合、エネルギー制御の精度が悪くなり得る。このため、目標パルスエネルギーEtの値に応じた複数の制御ゲインGcを算出することが望まし

い。

[0104] また、図 13 に示したように、パルス繰り返し周波数 R_p の値によって、傾き $\Delta E / \Delta V$ が異なるので、ある 1 つのパルス繰り返し周波数 R_p に基づいて制御ゲイン G_c を算出した場合、エネルギー制御の精度が悪くなり得る。このため、複数のパルス繰り返し周波数 R_p の値に応じた複数の制御ゲイン G_c を算出することが望ましい。

[0105] < 2. 実施形態 1 > (目標パルスエネルギーの値に応じた複数の制御ゲインを用いるレーザ装置)

次に、本開示の実施形態 1 に係るレーザ装置について説明する。なお、以下では上記比較例に係るレーザ装置の構成要素と略同じ部分については、同一符号を付し、適宜説明を省略する。

[0106] [2. 1 構成]

実施形態 1 に係るレーザ装置は、上記比較例 2 に係るレーザ装置 1 と略同様に、比較例 1 に係るレーザ装置 101 におけるレーザ制御部 2 に、ファンクションジェネレータ 52 を追加した構成であってもよい。

[0107] 実施形態 1 に係るレーザ装置は、上記比較例 2 に係るレーザ装置 1 に対して、レーザ制御部 2 によるエネルギー制御の処理と、制御ゲイン G_c の算出処理とが異なっている。

[0108] 実施形態 1 に係るレーザ装置では、レーザ制御部 2 は、目標パルスエネルギー E_t を、複数の基準エネルギーのそれぞれを変動中心として、所定の変調周波数で周期的に変動させるパルスエネルギー制御部であってもよい。複数の基準エネルギーは、例えば E_{ta} , E_{tb} , E_{tc} であってもよい。所定の変調周波数は例えば F_{ma} であってもよい。

[0109] また、レーザ制御部 2 は、複数の基準エネルギーのそれぞれに対応する複数の制御ゲイン、例えば G_{ca} , G_{cb} , G_{cc} を算出するゲイン算出部であってもよい。

[0110] ゲイン算出部としてのレーザ制御部 2 は、目標パルスエネルギー E_t を複数の基準エネルギーのそれぞれを変動中心として所定の変調周波数で周期的に変

動させた場合におけるパルスエネルギー E の振幅成分を算出してもよい。また、レーザ制御部2は、目標パルスエネルギー E_t を複数の基準エネルギーのそれぞれを変動中心として所定の変調周波数で周期的に変動させた場合における一対の放電電極23, 24間に印加する印加電圧に対応する充電電圧 V の振幅成分を算出してもよい。算出されるパルスエネルギー E の振幅成分は、例えば I_{ea} , I_{eb} , I_{ec} であってもよい。算出される充電電圧 V の振幅成分は、例えば I_{va} , I_{vb} , I_{vc} であってもよい。そして、レーザ制御部2は、パルスエネルギー E の振幅成分と充電電圧 V の振幅成分とに基づいて、複数の制御ゲインを算出してもよい。

[0111] また、レーザ制御部2は、目標パルスエネルギー E_t 、及びパルスエネルギー検出器30によって検出されたパルスエネルギー E に加えてさらに、複数の制御ゲインに基づいて、一対の放電電極23, 24間に印加する印加電圧に対応する充電電圧 V を制御する電圧制御部であってもよい。

[0112] その他の構成は、上記比較例に係るレーザ装置と略同様であってもよい。

[0113] [2.2 動作]

レーザ制御部2は、目標パルスエネルギー E_t を、複数の基準エネルギー E_{ta} , E_{tb} , E_{tc} のそれぞれを変動中心として、所定の変調周波数 F_{ma} で周期的に変動させることにより、複数の制御ゲイン G_{ca} , G_{cb} , G_{cc} を算出してもよい。これにより、例えば以下のように、制御ゲイン G_c として、目標パルスエネルギー E_t の値に応じた複数の制御ゲイン G_{ca} , G_{cb} , G_{cc} を算出してもよい。例えば基準エネルギー E_{ta} に基づいて制御ゲイン G_{ca} を算出してもよい。例えば基準エネルギー E_{tb} に基づいて制御ゲイン G_{cb} を算出してもよい。例えば基準エネルギー E_{tc} に基づいて制御ゲイン G_{cc} を算出してもよい。各基準エネルギー E_{ta} , E_{tb} , E_{tc} の大小関係は、 $E_{ta} < E_{tb} < E_{tc}$ であってもよい。なお、以下に示す目標パルスエネルギー E_t の設定値は一例であり、以下に示す値に限定されない。

$$E_t \leq 9.5 : G_{ca} = G_s \cdot I_{va} / I_{ea}$$

$$9.5 < E_t \leq 10.5 : G_{cb} = G_s \cdot I_{vb} / I_{eb}$$

$$10.5 < E_t : G_{cc} = G_s \cdot I_{vc} / I_{ec}$$

[0114] (実施形態1における制御ゲインの算出処理の具体例)

図15は、実施形態1に係るレーザ装置におけるパルス毎のパルスエネルギーEと充電電圧Vとの計測値の一例を示している。図16は、図15におけるパルスエネルギーEと充電電圧Vとをスペクトル解析した結果の一例を示している。図15において、横軸はパルスレーザ光Lpのパルス番号、縦軸はパルスエネルギーE (mJ)、又は充電電圧V (kV)を示す。実施形態1では、パルス繰り返し周波数Rpは一定なので、図15の横軸は時間に相当する。図16において、横軸は周波数(Hz)、縦軸は振幅値を示す。

[0115] 図17は、実施形態1に係るレーザ装置におけるレーザ制御部2による制御ゲインGcの算出処理の流れの一例を示すフローチャートを示している。図18は、図17に続くフローチャートである。図19は、図18に続くフローチャートである。

[0116] 図17～図19の処理では、スペクトル解析により、例えば図16に示したようなパルスエネルギーEの振幅成分Ie (Iea, Ieb, Iec)と、充電電圧Vの振幅成分Iv (Iva, Ivb, Ivc)とを算出してもよい。

[0117] 図17～図19の処理は、例えば、露光装置4からの指示、レーザガスの交換後、又はレーザガスのガス圧調整後に行ってもよい。また、一定の期間毎に処理を行ってもよい。

[0118] 図17に示したように、まず、レーザ制御部2は、露光装置コントローラ5又は記憶部51から、パルス繰り返し周波数Rpの読み込みを行う(ステップS401A)。次に、レーザ制御部2は、露光装置コントローラ5又は記憶部51から、発振パルス数Npの読み込みを行う(ステップS402A)。発振パルス数Npは、例えば400パルス以上1500パルス以下が好ましい。発振パルス数Npは、512パルス、1024パルスなど、2の累乗がより好ましい。

[0119] 次に、レーザ制御部2は、目標パルスエネルギーEtを基準エネルギーEta

に設定する（ステップS403A）。レーザ制御部2は、その設定した目標パルスエネルギー E_t を記憶部51に書き込む。

[0120] 次に、レーザ制御部2は、ファンクションジェネレータ52によって、以下の式のように、目標パルスエネルギー E_t を、基準エネルギー E_{ta} を変動中心として、周期的に変動させる（ステップS404A）。 F_{ma} は、目標パルスエネルギー E_t の変調周波数である。 R_p / F_{ma} は整数が望ましい。 R_p / F_{ma} の範囲は4以上、10以下が望ましい。振幅 ΔI_e の範囲は0.5mJ以上、2mJ以下が望ましい。振幅 ΔI_e は、基準エネルギー E_{ta} に対する比率で決定してもよい。例えば、 $\Delta I_e = E_{ta} \cdot (5\% \sim 10\%)$ としてもよい。 R_p は例えば6000Hzであってもよい。 F_{ma} は例えば1200Hzであってもよい。

$$E_t = E_{ta} + \Delta I_e \cdot \sin(N \cdot 2 \cdot \pi \cdot F_{ma} / R_p)$$

[0121] 次に、レーザ制御部2は、ゲイン発振の処理を行う（ステップS405A）。ここでのゲイン発振の処理は、例えば図4に示すサブルーチンと略同様であってもよい。

[0122] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウント値 N を $N+1$ に設定する（ステップS406A）。

[0123] 次に、レーザ制御部2は、パルスエネルギー検出器30から、パルスエネルギー E の値を読み込み、記憶部51に、 n 番目のパルスのパルスエネルギー E の値を E_{an} として書き込む（ステップS407A）。

[0124] 次に、レーザ制御部2は、充電器90に設定した充電電圧 V の値を記憶部51から読み込み、記憶部51に、 n 番目のパルスにおける充電電圧 V の値を V_{an} として書き込む（ステップS408A）。

[0125] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウント値 N が発振パルス数 N_p を超えたか否かを判断する（ステップS409A）。レーザ制御部2は、パルスのカウント値 N が発振パルス数 N_p を超えていないと判断した場合（ステップS409A；N）には、ステップS404Aの処理に戻る。

[0126] 一方、パルスのカウント値 N が発振パルス数 N_p を超えたと判断した場合

(ステップS 4 0 9 A ; Y) には、レーザ制御部 2 は、記憶されたパルスエネルギーEと充電電圧Vとのデータ列に対して、スペクトル解析を実行し、パルスエネルギーEの変調周波数F m aにおける振幅成分I e aと、充電電圧Vの変調周波数F m aにおける振幅成分I v aとを求める(ステップS 4 1 0 A)。スペクトル解析は、フーリエ変換、離散フーリエ変換、又は高速フーリエ変換などを用いてもよい。

[0127] 次に、レーザ制御部 2 は、パルスのカウンタ値Nを0に設定する(ステップS 4 1 1 A)。

[0128] 次に、レーザ制御部 2 は、以下の式のように、制御ゲインG cの値G c aを計算し(ステップS 4 1 2 A)、図 1 8 の処理に進む。係数G sは、制御が発散しないように例えば、0. 3 以上、1 以下の値が望ましい。

$$G c a = G s \cdot \Delta V / \Delta E = G s \cdot I v a / I e a$$

[0129] 図 1 8 の処理では、まず、レーザ制御部 2 は、露光装置コントローラ 5 又は記憶部 5 1 から、パルス繰り返し周波数R pの読み込みを行う(ステップS 4 0 1 B)。次に、レーザ制御部 2 は、露光装置コントローラ 5 又は記憶部 5 1 から、発振パルス数N pの読み込みを行う(ステップS 4 0 2 B)。発振パルス数N pは、例えば4 0 0 パルス以上1 5 0 0 パルス以下が好ましい。発振パルス数N pは、5 1 2 パルス、1 0 2 4 パルスなど、2 の累乗がより好ましい。

[0130] 次に、レーザ制御部 2 は、目標パルスエネルギーE tを基準エネルギーE t bに設定する(ステップS 4 0 3 B)。レーザ制御部 2 は、その設定した目標パルスエネルギーE tを記憶部 5 1 に書き込む。

[0131] 次に、レーザ制御部 2 は、ファンクションジェネレータ 5 2 によって、以下の式のように、目標パルスエネルギーE tを、基準エネルギーE t bを変動中心として、周期的に変動させる(ステップS 4 0 4 B)。F m aは、目標パルスエネルギーE tの変調周波数である。R p / F m aは整数が望ましい。R p / F m aの範囲は4 以上、1 0 以下が望ましい。振幅Δ I eの範囲は0. 5 m J 以上、2 m J 以下が望ましい。振幅Δ I eは、基準エネルギーE t bに

対する比率で決定してもよい。例えば、 $\Delta I_e = E_{tb} \cdot (5\% \sim 10\%)$ としてもよい。 R_p は例えば6000Hzであってもよい。 F_{ma} は例えば1200Hzであってもよい。

$$E_t = E_{tb} + \Delta I_e \cdot \sin(N \cdot 2 \cdot \pi \cdot F_{ma} / R_p)$$

[0132] 次に、レーザ制御部2は、ゲイン発振の処理を行う（ステップS405B）。ここでのゲイン発振の処理は、例えば図4に示すサブルーチンと略同様であってもよい。

[0133] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウント値NをN+1に設定する（ステップS406B）。

[0134] 次に、レーザ制御部2は、パルスエネルギー検出器30から、パルスエネルギーEの値を読み込み、記憶部51に、n番目のパルスのパルスエネルギーEの値を E_{bn} として書き込む（ステップS407B）。

[0135] 次に、レーザ制御部2は、充電器90に設定した充電電圧Vの値を記憶部51から読み込み、記憶部51に、n番目のパルスにおける充電電圧Vの値を V_{bn} として書き込む（ステップS408B）。

[0136] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウント値Nが発振パルス数 N_p を超えたか否かを判断する（ステップS409B）。レーザ制御部2は、パルスのカウント値Nが発振パルス数 N_p を超えていないと判断した場合（ステップS409B；N）には、ステップS404Bの処理に戻る。

[0137] 一方、パルスのカウント値Nが発振パルス数 N_p を超えたと判断した場合（ステップS409B；Y）には、レーザ制御部2は、記憶されたパルスエネルギーEと充電電圧Vとのデータ列に対して、スペクトル解析を実行し、パルスエネルギーEの変調周波数 F_{ma} における振幅成分 I_{eb} と、充電電圧Vの変調周波数 F_{ma} における振幅成分 I_{vb} とを求める（ステップS410B）。スペクトル解析は、フーリエ変換、離散フーリエ変換、又は高速フーリエ変換などを用いてもよい。

[0138] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウント値Nを0に設定する（ステップS411B）。

[0139] 次に、レーザ制御部 2 は、以下の式のように、制御ゲイン G_c の値 G_{cb} を計算し（ステップ S 4 1 2 B）、図 1 9 の処理に進む。係数 G_s は、制御が発散しないように例えば、0.3 以上、1 以下の値が望ましい。

$$G_{cb} = G_s \cdot \Delta V / \Delta E = G_s \cdot I_{vb} / I_{eb}$$

[0140] 図 1 9 の処理では、まず、レーザ制御部 2 は、露光装置コントローラ 5 又は記憶部 5 1 から、パルス繰り返し周波数 R_p の読み込みを行う（ステップ S 4 0 1 C）。次に、レーザ制御部 2 は、露光装置コントローラ 5 又は記憶部 5 1 から、発振パルス数 N_p の読み込みを行う（ステップ S 4 0 2 C）。発振パルス数 N_p は、例えば 4 0 0 パルス以上 1 5 0 0 パルス以下が好ましい。発振パルス数 N_p は、5 1 2 パルス、1 0 2 4 パルスなど、2 の累乗がより好ましい。

[0141] 次に、レーザ制御部 2 は、目標パルスエネルギー E_t を基準エネルギー E_{tc} に設定する（ステップ S 4 0 3 C）。レーザ制御部 2 は、その設定した目標パルスエネルギー E_t を記憶部 5 1 に書き込む。

[0142] 次に、レーザ制御部 2 は、ファンクションジェネレータ 5 2 によって、以下の式のように、目標パルスエネルギー E_t を、基準エネルギー E_{tc} を変動中心として、周期的に変動させる（ステップ S 4 0 4 C）。 F_{ma} は、目標パルスエネルギー E_t の変調周波数である。 R_p / F_{ma} は整数が望ましい。 R_p / F_{ma} の範囲は 4 以上、1 0 以下が望ましい。振幅 ΔI_e の範囲は 0.5 mJ 以上、2 mJ 以下が望ましい。振幅 ΔI_e は、基準エネルギー E_{tc} に対する比率で決定してもよい。例えば、 $\Delta I_e = E_{tc} \cdot (5\% \sim 10\%)$ としてもよい。 R_p は例えば 6 0 0 0 Hz であってもよい。 F_{ma} は例えば 1 2 0 0 Hz であってもよい。

$$E_t = E_{tc} + \Delta I_e \cdot \sin(N \cdot 2 \cdot \pi \cdot F_{ma} / R_p)$$

[0143] 次に、レーザ制御部 2 は、ゲイン発振の処理を行う（ステップ S 4 0 5 C）。ここでのゲイン発振の処理は、例えば図 4 に示すサブルーチンと略同様であってもよい。

[0144] 次に、レーザ制御部 2 は、パルスのカウンタ値 N を $N + 1$ に設定する（ス

テップS406C)。

[0145] 次に、レーザ制御部2は、パルスエネルギー検出器30から、パルスエネルギーEの値を読み込み、記憶部51に、n番目のパルスのパルスエネルギーEの値を E_{cn} として書き込む(ステップS407C)。

[0146] 次に、レーザ制御部2は、充電器90に設定した充電電圧Vの値を記憶部51から読み込み、記憶部51に、n番目のパルスにおける充電電圧Vの値を V_{cn} として書き込む(ステップS408C)。

[0147] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値Nが発振パルス数 N_p を超えたか否かを判断する(ステップS409C)。レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値Nが発振パルス数 N_p を超えていないと判断した場合(ステップS409C; N)には、ステップS404Cの処理に戻る。

[0148] 一方、パルスのカウンタ値Nが発振パルス数 N_p を超えたと判断した場合(ステップS409C; Y)には、レーザ制御部2は、記憶されたパルスエネルギーEと充電電圧Vとのデータ列に対して、スペクトル解析を実行し、パルスエネルギーEの変調周波数 F_{ma} における振幅成分 I_{ec} と、充電電圧Vの変調周波数 F_{ma} における振幅成分 I_{vc} とを求める(ステップS410C)。スペクトル解析は、フーリエ変換、離散フーリエ変換、又は高速フーリエ変換などを用いてもよい。

[0149] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値Nを0に設定する(ステップS411C)。

[0150] 次に、レーザ制御部2は、以下の式のように、制御ゲイン G_c の値 G_{cc} を計算し(ステップS412C)、処理を終了する。係数 G_s は、制御が発散しないように例えば、0.3以上、1以下の値が望ましい。

$$G_{cc} = G_s \cdot \Delta V / \Delta E = G_s \cdot I_{vc} / I_{ec}$$

[0151] (実施形態1におけるエネルギー制御の具体例)

図20は、実施形態1に係るレーザ装置におけるレーザ制御部2によるパルスエネルギーEの制御の流れの一例を示すフローチャートである。

[0152] まず、レーザ制御部2は、露光装置コントローラ5又は記憶部51から、

目標パルスエネルギー E_t の読み込みを行う（ステップ S 5 0 1）。

[0153] 次に、レーザ制御部 2 は、目標パルスエネルギー E_t が複数の制御ゲイン G_{ca} , G_{cb} , G_{cc} のいずれに対応するか判断する（ステップ S 5 0 2）。制御ゲイン G_{ca} , G_{cb} , G_{cc} は、上述の図 1 7～図 1 9 に示すフローチャートに従って算出してもよい。

[0154] レーザ制御部 2 は、目標パルスエネルギー E_t が所定の値以下の場合、例えば $E_t \leq (E_{ta} + E_{tb}) / 2$ であると判断した場合には、制御ゲイン G_c の値を G_{ca} とする（ステップ S 5 0 3）。

[0155] レーザ制御部 2 は、目標パルスエネルギー E_t が所定の範囲の場合、例えば $(E_{ta} + E_{tb}) / 2 < E_t \leq (E_{tb} + E_{tc}) / 2$ であると判断した場合には、制御ゲイン G_c の値を G_{cb} とする（ステップ S 5 0 4）。

[0156] レーザ制御部 2 は、目標パルスエネルギー E_t が所定の値を超えた場合、例えば $(E_{tb} + E_{tc}) / 2 < E_t$ であると判断した場合には、制御ゲイン G_c の値を G_{cc} とする（ステップ S 5 0 5）。

[0157] 次に、レーザ制御部 2 は、レーザ発振したか否かを判断する（ステップ S 5 0 6）。レーザ制御部 2 は、レーザ発振していないと判断した場合（ステップ S 5 0 6 ; N）には、ステップ S 5 0 6 の処理を繰り返す。

[0158] 一方、レーザ発振したと判断した場合（ステップ S 5 0 6 ; Y）には、レーザ制御部 2 は、パルスエネルギー検出器 3 0 から、パルスエネルギー E の値を読み込む（ステップ S 5 0 7）。

[0159] 次に、レーザ制御部 2 は、パルスエネルギー E と目標パルスエネルギー E_t との比較を行う（ステップ S 5 0 8）。レーザ制御部 2 は、パルスエネルギー E と目標パルスエネルギー E_t とが略同じと判断した場合（ $E = E_t$ ）には、現在の充電電圧 V のデータをそのまま充電電圧 V のデータとして（ステップ S 5 1 0）、記憶部 5 1 に書き込む（ステップ S 5 1 2）。

[0160] 一方、レーザ制御部 2 は、パルスエネルギー E が目標パルスエネルギー E_t よりも小さいと判断した場合（ $E < E_t$ ）には、以下の式のように、目標パルスエネルギー E_t とパルスエネルギー E との差（ $E_t - E$ ）に制御ゲイン G_c を

乗じた値を充電電圧 V に加算し、あらたな充電電圧 V として（ステップ $S509$ ）、その充電電圧 V のデータを記憶部 51 に書き込む（ステップ $S512$ ）。

$$V = V + (E_t - E) \cdot G_c$$

[0161] また、レーザ制御部 2 は、パルスエネルギー E が目標パルスエネルギー E_t よりも大きいと判断した場合（ $E > E_t$ ）には、以下の式のように、パルスエネルギー E と目標パルスエネルギー E_t との差分（ $E - E_t$ ）に制御ゲイン G_c を乗じた値を充電電圧 V から減算し、あらたな充電電圧 V として（ステップ $S511$ ）、その充電電圧 V のデータを記憶部 51 に書き込む（ステップ $S513$ ）。

$$V = V - (E - E_t) \cdot G_c$$

[0162] 次に、レーザ制御部 2 は、充電電圧 V が所定の最大値 V_{max} 以上になったか否かを判断する（ステップ $S513$ ）。レーザ制御部 2 は、充電電圧 V が所定の最大値 V_{max} 以上になっていないと判断した場合（ステップ $S513; N$ ）には、ステップ $S501$ の処理に戻る。一方、充電電圧 V が所定の最大値 V_{max} 以上になったと判断した場合（ステップ $S513; Y$ ）には、エネルギー制御の処理を終了する。

[0163] その他の動作は、上記比較例に係るレーザ装置と略同様であってもよい。

[0164] [2. 3 作用・効果]

実施形態 1 のレーザ装置によれば、目標パルスエネルギー E_t の値に応じた複数の制御ゲイン G_{ca} 、 G_{cb} 、 G_{cc} を算出するようにしたので、目標パルスエネルギー E_t を変更した場合におけるパルスエネルギー E の制御の精度が改善され得る。

[0165] なお、以上の実施形態 1 の説明では、レーザ制御部 2 が、 3 つの制御ゲイン G_{ca} 、 G_{cb} 、 G_{cc} を算出し、それら 3 つの制御ゲイン G_{ca} 、 G_{cb} 、 G_{cc} に基づいて、エネルギー制御を行う例を述べたが、制御ゲイン G_c を算出する数は 3 つに限らず、 2 又は 4 以上の数であってもよい。レーザ制御部 2 は、 2 又は 4 以上の制御ゲイン G_c に基づいて、エネルギー制御を行っ

てもよい。

[0166] <3. 実施形態2> (目標パルスエネルギーの値と変調周波数の値とに応じた複数の制御ゲインを用いるレーザ装置)

次に、本開示の実施形態2に係るレーザ装置について説明する。なお、以下では上記比較例、又は実施形態1に係るレーザ装置の構成要素と略同じ部分については、同一符号を付し、適宜説明を省略する。

[0167] [3. 1 構成]

実施形態2に係るレーザ装置は、上記比較例2に係るレーザ装置1と略同様に、比較例1に係るレーザ装置101におけるレーザ制御部2に、ファンクションジェネレータ52を追加した構成であってもよい。

[0168] 実施形態2に係るレーザ装置は、上記比較例2に係るレーザ装置1に対して、レーザ制御部2によるエネルギー制御の処理と、制御ゲイン G_c の算出処理とが異なっている。

[0169] 実施形態2に係るレーザ装置では、レーザ制御部2は、目標パルスエネルギー E_t を、複数の基準エネルギーのそれぞれを変動中心として、複数の基準エネルギーのそれぞれに応じた変調周波数で周期的に変動させるパルスエネルギー制御部であってもよい。複数の基準エネルギーは、例えば E_{ta} , E_{tb} , E_{tc} であってもよい。複数の基準エネルギーのそれぞれに応じた変調周波数は、例えば F_{ma} , F_{mb} , F_{mc} であってもよい。

[0170] また、レーザ制御部2は、複数の基準エネルギーのそれぞれに対応する複数の制御ゲイン、例えば G_{ca} , G_{cb} , G_{cc} を算出するゲイン算出部であってもよい。

[0171] ゲイン算出部としてのレーザ制御部2は、目標パルスエネルギー E_t を複数の基準エネルギーのそれぞれを変動中心として、複数の基準エネルギーのそれぞれに応じた変調周波数で周期的に変動させた場合におけるパルスエネルギー E の振幅成分を算出してもよい。また、レーザ制御部2は、目標パルスエネルギー E_t を複数の基準エネルギーのそれぞれを変動中心として、複数の基準エネルギーのそれぞれに応じた変調周波数で周期的に変動させた場合における一対

の放電電極 23, 24 間に印加する印加電圧に対応する充電電圧 V の振幅成分を算出してもよい。算出されるパルスエネルギー E の振幅成分は、例えば I_{ea} , I_{eb} , I_{ec} であってもよい。算出される充電電圧 V の振幅成分は、例えば I_{va} , I_{vb} , I_{vc} であってもよい。そして、レーザ制御部 2 は、パルスエネルギー E の振幅成分と充電電圧 V の振幅成分とに基づいて、複数の制御ゲインを算出してもよい。

[0172] その他の構成は、上記比較例、又は実施形態 1 に係るレーザ装置と略同様であってもよい。

[0173] [3. 2 動作]

レーザ制御部 2 は、目標パルスエネルギー E_t を、複数の基準エネルギー E_{ta} , E_{tb} , E_{tc} のそれぞれを変動中心として、複数の基準エネルギー E_{ta} , E_{tb} , E_{tc} のそれぞれに応じた変調周波数 F_{ma} , F_{mb} , F_{mc} で周期的に変動させることにより、複数の制御ゲイン G_{ca} , G_{cb} , G_{cc} を算出してもよい。これにより、例えば以下のように、制御ゲイン G_c として、目標パルスエネルギー E_t の値と変調周波数の値とに応じた複数の制御ゲイン G_{ca} , G_{cb} , G_{cc} を算出してもよい。例えば基準エネルギー E_{ta} と変調周波数 F_{ma} とに基づいて制御ゲイン G_{ca} を算出してもよい。例えば基準エネルギー E_{tb} と変調周波数 F_{mb} とに基づいて制御ゲイン G_{cb} を算出してもよい。例えば基準エネルギー E_{tc} と変調周波数 F_{mc} とに基づいて制御ゲイン G_{cc} を算出してもよい。各基準エネルギー E_{ta} , E_{tb} , E_{tc} の大小関係は、 $E_{ta} < E_{tb} < E_{tc}$ であってもよい。各変調周波数 F_{ma} , F_{mb} , F_{mc} の大小関係は、 $F_{ma} > F_{mb} > F_{mc}$ であってもよい。なお、以下に示す目標パルスエネルギー E_t の設定値は一例であり、以下に示す値に限定されない。

$$E_t \leq 9.5 : G_{ca} = G_s \cdot I_{va} / I_{ea}$$

$$9.5 < E_t \leq 10.5 : G_{cb} = G_s \cdot I_{vb} / I_{eb}$$

$$10.5 < E_t : G_{cc} = G_s \cdot I_{vc} / I_{ec}$$

[0174] (実施形態 2 における制御ゲインの算出処理の具体例)

図 2 1 は、本開示の実施形態 2 に係るレーザ装置におけるパルス毎のパルスエネルギー E と充電電圧 V との計測値の一例を示している。図 2 2 は、図 2 1 におけるパルスエネルギー E と充電電圧 V とをスペクトル解析した結果の一例を示している。図 2 1 において、横軸はパルスレーザ光 L_p のパルス番号、縦軸はパルスエネルギー E (mJ)、又は充電電圧 V (kV) を示す。実施形態 2 では、パルス繰り返し周波数 R_p は一定なので、図 2 1 の横軸は時間に相当する。図 2 2 において、横軸は周波数 (Hz)、縦軸は振幅値を示す。

[0175] 図 2 3 は、実施形態 2 に係るレーザ装置におけるレーザ制御部 2 による制御ゲイン G_c の算出処理の流れの一例を示すフローチャートを示している。図 2 4 は、図 2 3 に続くフローチャートである。図 2 5 は、図 2 4 に続くフローチャートである。

[0176] 図 2 3 ~ 図 2 5 の処理では、スペクトル解析により、例えば図 2 2 に示したようなパルスエネルギー E の振幅成分 I_e (I_{ea} , I_{eb} , I_{ec}) と、充電電圧 V の振幅成分 I_v (I_{va} , I_{vb} , I_{vc}) とを算出してもよい。

[0177] 図 2 3 ~ 図 2 5 の処理は、例えば、露光装置 4 からの指示、レーザガスの交換後、又はレーザガスのガス圧調整後に行ってもよい。また、一定の期間毎に処理を行ってもよい。

[0178] 図 2 3 に示したように、まず、レーザ制御部 2 は、露光装置コントローラ 5 又は記憶部 5 1 から、パルス繰り返し周波数 R_p の読み込みを行う (ステップ S 6 0 1 A)。次に、レーザ制御部 2 は、露光装置コントローラ 5 又は記憶部 5 1 から、発振パルス数 $N_p = N_{pa}$ の読み込みを行う (ステップ S 6 0 2 A)。発振パルス数 N_{pa} は、例えば 4 0 0 パルス以上 1 5 0 0 パルス以下が好ましい。発振パルス数 N_{pa} は、5 1 2 パルス、1 0 2 4 パルスなど、2 の累乗がより好ましい。

[0179] 次に、レーザ制御部 2 は、目標パルスエネルギー E_t を基準エネルギー E_{ta} に設定する (ステップ S 6 0 3 A)。レーザ制御部 2 は、その設定した目標

パルスエネルギー E_t を記憶部 51 に書き込む。

- [0180] 次に、レーザ制御部 2 は、ファンクションジェネレータ 52 によって、以下の式のように、目標パルスエネルギー E_t を、基準エネルギー E_{ta} を変動中心として、周期的に変動させる（ステップ S604A）。 F_{ma} は、基準エネルギー E_{ta} に対応する目標パルスエネルギー E_t の変調周波数である。 R_p / F_{ma} は整数が望ましい。 R_p / F_{ma} の範囲は 4 以上、10 以下が望ましい。振幅 ΔI_e の範囲は 0.5 mJ 以上、2 mJ 以下が望ましい。振幅 ΔI_e は、基準エネルギー E_{ta} に対する比率で決定してもよい。例えば、 $\Delta I_e = E_{ta} \cdot (5\% \sim 10\%)$ としてもよい。 R_p は例えば 6000 Hz であってもよい。 F_{ma} は例えば 1200 Hz であってもよい。

$$E_t = E_{ta} + \Delta I_e \cdot \sin(N \cdot 2 \cdot \pi \cdot F_{ma} / R_p)$$

- [0181] 次に、レーザ制御部 2 は、ゲイン発振の処理を行う（ステップ S605A）。ここでのゲイン発振の処理は、例えば図 4 に示すサブルーチンと略同様であってもよい。

- [0182] 次に、レーザ制御部 2 は、パルスのカウンタ値 N を $N+1$ に設定する（ステップ S606A）。

- [0183] 次に、レーザ制御部 2 は、パルスエネルギー検出器 30 から、パルスエネルギー E の値を読み込み、記憶部 51 に、 n 番目のパルスのパルスエネルギー E の値を E_{an} として書き込む（ステップ S607A）。

- [0184] 次に、レーザ制御部 2 は、充電器 90 に設定した充電電圧 V の値を記憶部 51 から読み込み、記憶部 51 に、 n 番目のパルスにおける充電電圧 V の値を V_{an} として書き込む（ステップ S608A）。

- [0185] 次に、レーザ制御部 2 は、パルスのカウンタ値 N が発振パルス数 $N_p = N_{pa}$ を超えたか否かを判断する（ステップ S609A）。レーザ制御部 2 は、パルスのカウンタ値 N が発振パルス数 $N_p = N_{pa}$ を超えていないと判断した場合（ステップ S609A；N）には、ステップ S604A の処理に戻る。

- [0186] 一方、パルスのカウンタ値 N が発振パルス数 $N_p = N_{pa}$ を超えたと判断

した場合（ステップS 6 0 9 A ; Y）には、レーザ制御部 2 は、図 2 4 の処理に進む。

[0187] 図 2 4 の処理では、まず、レーザ制御部 2 は、露光装置コントローラ 5 又は記憶部 5 1 から、パルス繰り返し周波数 R_p の読み込みを行う（ステップ S 6 0 1 B）。次に、レーザ制御部 2 は、露光装置コントローラ 5 又は記憶部 5 1 から、発振パルス数 $N_p = N_{pb}$ の読み込みを行う（ステップ S 6 0 2 B）。発振パルス数 N_{pb} は、例えば 4 0 0 パルス以上 1 5 0 0 パルス以下が好ましい。発振パルス数 N_{pb} は、5 1 2 パルス、1 0 2 4 パルスなど、2 の累乗がより好ましい。

[0188] 次に、レーザ制御部 2 は、目標パルスエネルギー E_t を基準エネルギー E_{tb} に設定する（ステップ S 6 0 3 B）。レーザ制御部 2 は、その設定した目標パルスエネルギー E_t を記憶部 5 1 に書き込む。

[0189] 次に、レーザ制御部 2 は、ファンクションジェネレータ 5 2 によって、以下の式のように、目標パルスエネルギー E_t を、基準エネルギー E_{tb} を変動中心として、周期的に変動させる（ステップ S 6 0 4 B）。 F_{mb} は、基準エネルギー E_{tb} に対応する目標パルスエネルギー E_t の変調周波数である。 R_p / F_{mb} は整数が望ましい。 R_p / F_{mb} の範囲は 4 以上、1 0 以下が望ましい。振幅 ΔI_e の範囲は 0. 5 mJ 以上、2 mJ 以下が望ましい。振幅 ΔI_e は、基準エネルギー E_{tb} に対する比率で決定してもよい。例えば、 $\Delta I_e = E_{tb} \cdot (5\% \sim 10\%)$ としてもよい。 R_p は例えば 6 0 0 0 Hz であってもよい。 F_{mb} は例えば 1 0 0 0 Hz であってもよい。

$$E_t = E_{tb} + \Delta I_e \cdot \sin(N \cdot 2 \cdot \pi \cdot F_{mb} / R_p)$$

[0190] 次に、レーザ制御部 2 は、ゲイン発振の処理を行う（ステップ S 6 0 5 B）。ここでのゲイン発振の処理は、例えば図 4 に示すサブルーチンと略同様であってもよい。

[0191] 次に、レーザ制御部 2 は、パルスのカウンタ値 N を $N + 1$ に設定する（ステップ S 6 0 6 B）。

[0192] 次に、レーザ制御部 2 は、パルスエネルギー検出器 3 0 から、パルスエネル

ギEの値を読み込み、記憶部51に、n番目のパルスのパルスエネルギーEの値を E_{bn} として書き込む（ステップS607B）。

[0193] 次に、レーザ制御部2は、充電器90に設定した充電電圧Vの値を記憶部51から読み込み、記憶部51に、n番目のパルスにおける充電電圧Vの値を V_{bn} として書き込む（ステップS608B）。

[0194] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値Nが発振パルス数 $N_p = N_{pb}$ を超えたか否かを判断する（ステップS609B）。レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値Nが発振パルス数 $N_p = N_{pb}$ を超えていないと判断した場合（ステップS609B；N）には、ステップS604Bの処理に戻る。

[0195] 一方、パルスのカウンタ値Nが発振パルス数 $N_p = N_{pb}$ を超えたと判断した場合（ステップS609B；Y）には、レーザ制御部2は、図25の処理に進む。

[0196] 図25の処理では、まず、レーザ制御部2は、露光装置コントローラ5又は記憶部51から、パルス繰り返し周波数 R_p の読み込みを行う（ステップS601C）。次に、レーザ制御部2は、露光装置コントローラ5又は記憶部51から、発振パルス数 $N_p = N_{pc}$ の読み込みを行う（ステップS602C）。発振パルス数 N_{pc} は、例えば400パルス以上1500パルス以下が好ましい。発振パルス数 N_{pc} は、512パルス、1024パルスなど、2の累乗がより好ましい。

[0197] 次に、レーザ制御部2は、目標パルスエネルギー E_t を基準エネルギー E_{tc} に設定する（ステップS603C）。レーザ制御部2は、その設定した目標パルスエネルギー E_t を記憶部51に書き込む。

[0198] 次に、レーザ制御部2は、ファンクションジェネレータ52によって、以下の式のように、目標パルスエネルギー E_t を、基準エネルギー E_{tc} を変動中心として、周期的に変動させる（ステップS604C）。 F_{mc} は、基準エネルギー E_{tc} に対応する目標パルスエネルギー E_t の変調周波数である。 R_p / F_{mc} は整数が望ましい。 R_p / F_{mc} の範囲は4以上、10以下が望ま

しい。振幅 ΔI_e の範囲は 0.5 mJ 以上、 2 mJ 以下が望ましい。振幅 ΔI_e は、基準エネルギー E_{tc} に対する比率で決定してもよい。例えば、 $\Delta I_e = E_{tc} \cdot (5\% \sim 10\%)$ としてもよい。 R_p は例えば 6000 Hz であってもよい。 F_{mc} は例えば 600 Hz であってもよい。

$$E_t = E_{tc} + \Delta I_e \cdot \sin(N \cdot 2 \cdot \pi \cdot F_{mc} / R_p)$$

[0199] 次に、レーザ制御部2は、ゲイン発振の処理を行う（ステップS605C）。ここでのゲイン発振の処理は、例えば図4に示すサブルーチンと略同様であってもよい。

[0200] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値 N を $N+1$ に設定する（ステップS606C）。

[0201] 次に、レーザ制御部2は、パルスエネルギー検出器30から、パルスエネルギー E の値を読み込み、記憶部51に、 n 番目のパルスのパルスエネルギー E の値を E_{cn} として書き込む（ステップS607C）。

[0202] 次に、レーザ制御部2は、充電器90に設定した充電電圧 V の値を記憶部51から読み込み、記憶部51に、 n 番目のパルスにおける充電電圧 V の値を V_{cn} として書き込む（ステップS608C）。

[0203] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値 N が発振パルス数 $N_p = N_{pc}$ を超えたか否かを判断する（ステップS609C）。レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値 N が発振パルス数 $N_p = N_{pc}$ を超えていないと判断した場合（ステップS609C； N ）には、ステップS604Cの処理に戻る。

[0204] 一方、パルスのカウンタ値 N が発振パルス数 $N_p = N_{pc}$ を超えたと判断した場合（ステップS609C； Y ）には、レーザ制御部2は、記憶されたパルスエネルギー E と充電電圧 V とのデータ列に対して、スペクトル解析を実行し、複数の変調周波数 F_{ma} 、 F_{mb} 、 F_{mc} におけるそれぞれのパルスエネルギー E の振幅成分 I_{ea} 、 I_{eb} 、 I_{ec} と、複数の変調周波数 F_{ma} 、 F_{mb} 、 F_{mc} におけるそれぞれの充電電圧 V の振幅成分 I_{va} 、 I_{vb} 、 I_{vc} とをまとめて求める（ステップS610C）。スペクトル解析は、

フーリエ変換、離散フーリエ変換、又は高速フーリエ変換などを用いてもよい。

[0205] 次に、レーザ制御部 2 は、パルスのカウント値 N を 0 に設定する（ステップ S 6 1 1 C）。

[0206] 次に、レーザ制御部 2 は、以下の式のように、複数の制御ゲイン G_c の値 G_{ca} , G_{cb} , G_{cc} をまとめて計算し（ステップ S 6 1 2 C）、処理を終了する。係数 G_s は、制御が発散しないように例えば、0.3 以上、1 以下の値が望ましい。

$$G_{ca} = G_s \cdot \Delta V / \Delta E = G_s \cdot I_{va} / I_{ea}$$

$$G_{cb} = G_s \cdot \Delta V / \Delta E = G_s \cdot I_{vb} / I_{eb}$$

$$G_{cc} = G_s \cdot \Delta V / \Delta E = G_s \cdot I_{vc} / I_{ec}$$

[0207] （実施形態 2 におけるエネルギー制御の具体例）

実施形態 2 におけるエネルギー制御は、図 20 に示した制御と略同様であってもよい。図 20 の制御を行うに際し、制御ゲイン G_{ca} , G_{cb} , G_{cc} を、上述の図 23～図 25 に示すフローチャートに従って算出してもよい。

[0208] その他の動作は、上記比較例、又は実施形態 1 に係るレーザ装置と略同様であってもよい。

[0209] [3. 3 作用・効果]

実施形態 2 のレーザ装置によれば、目標パルスエネルギー E_t の値に応じた複数の制御ゲイン G_{ca} , G_{cb} , G_{cc} を算出するようにしたので、目標パルスエネルギー E_t を変更した場合におけるパルスエネルギー E の制御の精度が改善され得る。この際、目標パルスエネルギー E_t の値を変えた際のパルスエネルギー E の振幅成分 I_e と充電電圧 E の振幅成分 I_v とを、最後にまとめてスペクトル解析を行うことで求めることができるので、複数の制御ゲイン G_{ca} , G_{cb} , G_{cc} を算出するのに要する処理時間を短縮し得る。

[0210] なお、以上の実施形態 2 の説明では、レーザ制御部 2 が、3 つの制御ゲイン G_{ca} , G_{cb} , G_{cc} を算出し、それら 3 つの制御ゲイン G_{ca} , G_{cb} , G_{cc} に基づいて、エネルギー制御を行う例を述べたが、制御ゲイン G_c

を算出する数は3つに限らず、2又は4以上の数であってもよい。レーザ制御部2は、2又は4以上の制御ゲイン G_c に基づいて、エネルギー制御を行ってもよい。

[0211] その他の作用・効果は、上記比較例、又は実施形態1に係るレーザ装置と略同様であってもよい。

[0212] <4. 実施形態3> (パルス繰り返し周波数の値に応じた複数の制御ゲインを用いるレーザ装置)

次に、本開示の実施形態3に係るレーザ装置について説明する。なお、以下では上記比較例、実施形態1、又は実施形態2に係るレーザ装置の構成要素と略同じ部分については、同一符号を付し、適宜説明を省略する。

[0213] [4. 1 構成]

実施形態3に係るレーザ装置は、上記比較例2に係るレーザ装置1と略同様に、比較例1に係るレーザ装置101におけるレーザ制御部2に、ファンクションジェネレータ52を追加した構成であってもよい。

[0214] 実施形態3に係るレーザ装置は、上記比較例2に係るレーザ装置1に対して、レーザ制御部2によるエネルギー制御の処理と、制御ゲイン G_c の算出処理とが異なっている。

[0215] 実施形態3に係るレーザ装置では、レーザ制御部2は、目標パルスエネルギー E_t を、所定の基準エネルギーを変動中心として、複数のパルス繰り返し周波数のそれぞれに応じた変調周波数で周期的に変動させるパルスエネルギー制御部であってもよい。所定の基準エネルギーは、例えば E_{ta} であってもよい。複数のパルス繰り返し周波数は、例えば R_{pa} , R_{pb} , R_{pc} であってもよい。複数のパルス繰り返し周波数のそれぞれに応じた変調周波数は、例えば F_{ma} , F_{mb} , F_{mc} であってもよい。

[0216] また、レーザ制御部2は、複数のパルス繰り返し周波数のそれぞれに対応する複数の制御ゲイン、例えば G_{ca} , G_{cb} , G_{cc} を算出するゲイン算出部であってもよい。

[0217] ゲイン算出部としてのレーザ制御部2は、目標パルスエネルギー E_t を所定

の基準エネルギーを変動中心として、複数のパルス繰り返し周波数のそれぞれに応じた変調周波数で周期的に変動させた場合におけるパルスエネルギー E の振幅成分を算出してもよい。また、レーザ制御部 2 は、目標パルスエネルギー E_t を所定の基準エネルギーを変動中心として、複数のパルス繰り返し周波数のそれぞれに応じた変調周波数で周期的に変動させた場合における一对の放電電極 23, 24 間に印加する印加電圧に対応する充電電圧 V の振幅成分を算出してもよい。算出されるパルスエネルギー E の振幅成分は、例えば I_{ea} , I_{eb} , I_{ec} であってもよい。算出される充電電圧 V の振幅成分は、例えば I_{va} , I_{vb} , I_{vc} であってもよい。そして、レーザ制御部 2 は、パルスエネルギー E の振幅成分と充電電圧 V の振幅成分とに基づいて、複数の制御ゲインを算出してもよい。

[0218] レーザチャンバ 20 は、一对の放電電極 23, 24 間に印加された印加電圧に応じたパルスエネルギー E を有するパルスレーザ光 L_p を、複数のパルス繰り返し周波数における各周波数で出射してもよい。

[0219] その他の構成は、上記比較例、実施形態 1、又は実施形態 2 に係るレーザ装置と略同様であってもよい。

[0220] [4. 2 動作]

レーザ制御部 2 は、目標パルスエネルギー E_t を、所定の基準エネルギー E_{ta} を変動中心として、複数のパルス繰り返し周波数 R_{pa} , R_{pb} , R_{pc} のそれぞれに応じた変調周波数 F_{ma} , F_{mb} , F_{mc} で周期的に変動させることにより、複数の制御ゲイン G_{ca} , G_{cb} , G_{cc} を算出してもよい。これにより、例えば以下のように、制御ゲイン G_c として、複数のパルス繰り返し周波数 R_{pa} , R_{pb} , R_{pc} に応じた複数の制御ゲイン G_{ca} , G_{cb} , G_{cc} を算出してもよい。例えばパルス繰り返し周波数 R_{pa} に応じた変調周波数を F_{ma} とし、パルス繰り返し周波数 R_{pb} に応じた変調周波数を F_{mb} とし、パルス繰り返し周波数 R_{pc} に応じた変調周波数を F_{mc} としてもよい。各変調周波数 F_{ma} , F_{mb} , F_{mc} の大小関係は、 $F_{ma} > F_{mb} > F_{mc}$ であってもよい。各パルス繰り返し周波数 R_{pa} , R_{pb}

b, $R_{p c}$ の大小関係は、 $R_{p a} > R_{p b} > R_{p c}$ であってもよい。パルス繰り返し周波数 $R_{p a}$ は、例えば6000Hzであってもよい。パルス繰り返し周波数 $R_{p b}$ は、例えば5000Hzであってもよい。パルス繰り返し周波数 $R_{p c}$ は、例えば3000Hzであってもよい。なお、ここで挙げた複数のパルス繰り返し周波数 $R_{p a}$, $R_{p b}$, $R_{p c}$ の値は一例であり、これらの値に限定されない。

$$R_{p a} : G_{c a} = G_s \cdot I_{v a} / I_{e a}$$

$$R_{p b} : G_{c b} = G_s \cdot I_{v b} / I_{e b}$$

$$R_{p c} : G_{c c} = G_s \cdot I_{v c} / I_{e c}$$

[0221] (実施形態3における制御ゲインの算出処理の具体例)

図26は、本開示の実施形態3に係るレーザ装置におけるパルス毎のパルスエネルギーEと充電電圧Vとの計測値の一例を示している。図27は、実施形態3に係るレーザ装置における単位時間毎のパルスエネルギーEと充電電圧Vとの計測値の一例を示す。図28は、図26におけるパルスエネルギーEと充電電圧Vとをスペクトル解析した結果の一例を示している。図26において、横軸はパルスレーザ光 L_p のパルス番号、縦軸はパルスエネルギーE (mJ)、又は充電電圧V (kV)を示す。図27は、図26の横軸を時間に換算した計測値を示している。図28において、横軸は周波数(Hz)、縦軸は振幅値を示す。

[0222] 図29は、実施形態3に係るレーザ装置におけるレーザ制御部2による制御ゲイン G_c の算出処理の流れの一例を示すフローチャートを示している。図30は、図29に続くフローチャートである。図31は、図30に続くフローチャートである。

[0223] 図29～図31の処理では、スペクトル解析により、例えば図28に示したようなパルスエネルギーEの振幅成分 I_e ($I_{e a}$, $I_{e b}$, $I_{e c}$)と、充電電圧Vの振幅成分 I_v ($I_{v a}$, $I_{v b}$, $I_{v c}$)とを算出してもよい。

[0224] 図29～図31の処理は、例えば、露光装置4からの指示、レーザガスの

交換後、又はレーザガスのガス圧調整後に行ってもよい。また、一定の期間毎に処理を行ってもよい。

[0225] 図29に示したように、まず、レーザ制御部2は、露光装置コントローラ5又は記憶部51から、パルス繰り返し周波数 $R_p = R_{pa}$ の読み込みを行う（ステップS701A）。次に、レーザ制御部2は、露光装置コントローラ5又は記憶部51から、発振パルス数 N_p の読み込みを行う（ステップS702A）。発振パルス数 N_p は、例えば400パルス以上1500パルス以下が好ましい。発振パルス数 N_p は、512パルス、1024パルスなど、2の累乗がより好ましい。

[0226] 次に、レーザ制御部2は、目標パルスエネルギー E_t を基準エネルギー E_{ta} に設定する（ステップS703A）。レーザ制御部2は、その設定した目標パルスエネルギー E_t を記憶部51に書き込む。

[0227] 次に、レーザ制御部2は、ファンクションジェネレータ52によって、以下の式のように、目標パルスエネルギー E_t を、基準エネルギー E_{ta} を変動中心として、周期的に変動させる（ステップS704A）。 F_{ma} は、パルス繰り返し周波数 R_{pa} に対応する目標パルスエネルギー E_t の変調周波数である。 R_{pa}/F_{ma} は整数が望ましい。 R_{pa}/F_{ma} の範囲は4以上、10以下が望ましい。振幅 ΔI_e の範囲は0.5mJ以上、2mJ以下が望ましい。振幅 ΔI_e は、基準エネルギー E_{ta} に対する比率で決定してもよい。例えば、 $\Delta I_e = E_{ta} \cdot (5\% \sim 10\%)$ としてもよい。 R_{pa} は例えば6000Hzであってもよい。 F_{ma} は例えば1200Hzであってもよい。

$$E_t = E_{ta} + \Delta I_e \cdot \sin(N \cdot 2 \cdot \pi \cdot F_{ma} / R_{pa})$$

[0228] 次に、レーザ制御部2は、ゲイン発振の処理を行う（ステップS705A）。ここでのゲイン発振の処理は、例えば図4に示すサブルーチンと略同様であってもよい。

[0229] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値 N を $N+1$ に設定する（ステップS706A）。

[0230] 次に、レーザ制御部2は、パルスエネルギー検出器30から、パルスエネルギーEの値を読み込み、記憶部51に、n番目のパルスのパルスエネルギーEの値をE_{a n}として書き込む（ステップS707A）。

[0231] 次に、レーザ制御部2は、充電器90に設定した充電電圧Vの値を記憶部51から読み込み、記憶部51に、n番目のパルスにおける充電電圧Vの値をV_{a n}として書き込む（ステップS708A）。

[0232] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値Nが発振パルス数N_pを超えたか否かを判断する（ステップS709A）。レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値Nが発振パルス数N_pを超えていないと判断した場合（ステップS709A；N）には、ステップS704Aの処理に戻る。

[0233] 一方、パルスのカウンタ値Nが発振パルス数N_pを超えたと判断した場合（ステップS709A；Y）には、レーザ制御部2は、記憶されたパルスエネルギーEと充電電圧Vとのデータ列に対して、スペクトル解析を実行し、パルスエネルギーEの変調周波数F_{m a}における振幅成分I_{e a}と、充電電圧Vの変調周波数F_{m a}における振幅成分I_{v a}とを求める（ステップS710A）。スペクトル解析は、フーリエ変換、離散フーリエ変換、又は高速フーリエ変換などを用いてもよい。

[0234] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値Nを0に設定する（ステップS711A）。

[0235] 次に、レーザ制御部2は、以下の式のように、制御ゲインG_cの値G_{c a}を計算し（ステップS712A）、図30の処理に進む。係数G_sは、制御が発散しないように例えば、0.3以上、1以下の値が望ましい。

$$G_{c a} = G_s \cdot \Delta V / \Delta E = G_s \cdot I_{v a} / I_{e a}$$

[0236] 図30の処理では、まず、レーザ制御部2は、露光装置コントローラ5又は記憶部51から、パルス繰り返し周波数R_p=R_{p b}の読み込みを行う（ステップS701B）。次に、レーザ制御部2は、露光装置コントローラ5又は記憶部51から、発振パルス数N_pの読み込みを行う（ステップS702B）。発振パルス数N_pは、例えば400パルス以上1500パルス以下

が好ましい。発振パルス数 N_p は、512パルス、1024パルスなど、2の累乗がより好ましい。

[0237] 次に、レーザ制御部2は、目標パルスエネルギー E_t を基準エネルギー E_{ta} に設定する（ステップS703B）。レーザ制御部2は、その設定した目標パルスエネルギー E_t を記憶部51に書き込む。

[0238] 次に、レーザ制御部2は、ファンクションジェネレータ52によって、以下の式のように、目標パルスエネルギー E_t を、基準エネルギー E_{ta} を変動中心として、周期的に変動させる（ステップS704B）。 F_{mb} は、パルス繰り返し周波数 R_{pb} に対応する目標パルスエネルギー E_t の変調周波数である。 R_{pb}/F_{mb} は整数が望ましい。 R_{pb}/F_{mb} の範囲は4以上、10以下が望ましい。振幅 ΔI_e の範囲は0.5mJ以上、2mJ以下が望ましい。振幅 ΔI_e は、基準エネルギー E_{ta} に対する比率で決定してもよい。例えば、 $\Delta I_e = E_{ta} \cdot (5\% \sim 10\%)$ としてもよい。 R_{pb} は例えば5000Hzであってもよい。 F_{mb} は例えば1000Hzであってもよい。

$$E_t = E_{ta} + \Delta I_e \cdot \sin(N \cdot 2 \cdot \pi \cdot F_{mb} / R_{pb})$$

[0239] 次に、レーザ制御部2は、ゲイン発振の処理を行う（ステップS705B）。ここでのゲイン発振の処理は、例えば図4に示すサブルーチンと略同様であってもよい。

[0240] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値 N を $N+1$ に設定する（ステップS706B）。

[0241] 次に、レーザ制御部2は、パルスエネルギー検出器30から、パルスエネルギー E の値を読み込み、記憶部51に、 n 番目のパルスのパルスエネルギー E の値を E_{bn} として書き込む（ステップS707B）。

[0242] 次に、レーザ制御部2は、充電器90に設定した充電電圧 V の値を記憶部51から読み込み、記憶部51に、 n 番目のパルスにおける充電電圧 V の値を V_{bn} として書き込む（ステップS708B）。

[0243] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値 N が発振パルス数 N_p を超

えたか否かを判断する（ステップS 7 0 9 B）。レーザ制御部 2 は、パルスのカウンタ値Nが発振パルス数N_pを超えていないと判断した場合（ステップS 7 0 9 B；N）には、ステップS 7 0 4 Bの処理に戻る。

[0244] 一方、パルスのカウンタ値Nが発振パルス数N_pを超えたと判断した場合（ステップS 7 0 9 B；Y）には、レーザ制御部 2 は、記憶されたパルスエネルギーEと充電電圧Vとのデータ列に対して、スペクトル解析を実行し、パルスエネルギーEの変調周波数F_{m b}における振幅成分I_{e b}と、充電電圧Vの変調周波数F_{m b}における振幅成分I_{v b}とを求める（ステップS 7 1 0 B）。スペクトル解析は、フーリエ変換、離散フーリエ変換、又は高速フーリエ変換などを用いてもよい。

[0245] 次に、レーザ制御部 2 は、パルスのカウンタ値Nを0に設定する（ステップS 7 1 1 B）。

[0246] 次に、レーザ制御部 2 は、以下の式のように、制御ゲインG_cの値G_{c b}を計算し（ステップS 7 1 2 B）、図 3 1 の処理に進む。係数G_sは、制御が発散しないように例えば、0.3以上、1以下の値が望ましい。

$$G_{c b} = G_s \cdot \Delta V / \Delta E = G_s \cdot I_{v b} / I_{e b}$$

[0247] 図 3 1 の処理では、まず、レーザ制御部 2 は、露光装置コントローラ 5 又は記憶部 5 1 から、パルス繰り返し周波数R_p=R_{p c}の読み込みを行う（ステップS 7 0 1 C）。次に、レーザ制御部 2 は、露光装置コントローラ 5 又は記憶部 5 1 から、発振パルス数N_pの読み込みを行う（ステップS 7 0 2 C）。発振パルス数N_pは、例えば400パルス以上1500パルス以下が好ましい。発振パルス数N_pは、512パルス、1024パルスなど、2の累乗がより好ましい。

[0248] 次に、レーザ制御部 2 は、目標パルスエネルギーE_tを基準エネルギーE_{t a}に設定する（ステップS 7 0 3 C）。レーザ制御部 2 は、その設定した目標パルスエネルギーE_tを記憶部 5 1 に書き込む。

[0249] 次に、レーザ制御部 2 は、ファンクションジェネレータ 5 2 によって、以下の式のように、目標パルスエネルギーE_tを、基準エネルギーE_{t a}を変動中

心として、周期的に変動させる（ステップS704C）。Fmcは、パルス繰り返し周波数Rpcに対応する目標パルスエネルギーEtの変調周波数である。Rpc/Fmcは整数が望ましい。Rpc/Fmcの範囲は4以上、10以下が望ましい。振幅Δleの範囲は0.5mJ以上、2mJ以下が望ましい。振幅Δleは、基準エネルギーEtaに対する比率で決定してもよい。例えば、 $\Delta le = Eta \cdot (5\% \sim 10\%)$ としてもよい。Rpcは例えば3000Hzであってもよい。Fmcは例えば600Hzであってもよい。

$$Et = Eta + \Delta le \cdot \sin(N \cdot 2 \cdot \pi \cdot Fmc / Rpc)$$

[0250] 次に、レーザ制御部2は、ゲイン発振の処理を行う（ステップS705C）。ここでのゲイン発振の処理は、例えば図4に示すサブルーチンと略同様であってもよい。

[0251] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値NをN+1に設定する（ステップS706C）。

[0252] 次に、レーザ制御部2は、パルスエネルギー検出器30から、パルスエネルギーEの値を読み込み、記憶部51に、n番目のパルスのパルスエネルギーEの値をEcnとして書き込む（ステップS707C）。

[0253] 次に、レーザ制御部2は、充電器90に設定した充電電圧Vの値を記憶部51から読み込み、記憶部51に、n番目のパルスにおける充電電圧Vの値をVcnとして書き込む（ステップS708C）。

[0254] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値Nが発振パルス数Npを超えたか否かを判断する（ステップS709C）。レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値Nが発振パルス数Npを超えていないと判断した場合（ステップS709C；N）には、ステップS704Cの処理に戻る。

[0255] 一方、パルスのカウンタ値Nが発振パルス数Npを超えたと判断した場合（ステップS709C；Y）には、レーザ制御部2は、記憶されたパルスエネルギーEと充電電圧Vとのデータ列に対して、スペクトル解析を実行し、パルスエネルギーEの変調周波数Fmcにおける振幅成分leと、充電電圧Vの変調周波数Fmcにおける振幅成分lvとを求める（ステップS710

C)。スペクトル解析は、フーリエ変換、離散フーリエ変換、又は高速フーリエ変換などを用いてもよい。

[0256] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウント値Nを0に設定する（ステップS711C）。

[0257] 次に、レーザ制御部2は、以下の式のように、制御ゲインG_cの値G_{cc}を計算し（ステップS712C）、処理を終了する。係数G_sは、制御が発散しないように例えば、0.3以上、1以下の値が望ましい。

$$G_{cc} = G_s \cdot \Delta V / \Delta E = G_s \cdot I_{vc} / I_{ec}$$

[0258] （実施形態3におけるエネルギー制御の具体例）

図32は、実施形態3に係るレーザ装置におけるレーザ制御部2によるパルスエネルギーの制御の流れの一例を示すフローチャートを示している。

[0259] まず、レーザ制御部2は、露光装置コントローラ5又は記憶部51から、パルス繰り返し周波数R_pの読み込みを行う（ステップS800）。

[0260] 次に、レーザ制御部2は、露光装置コントローラ5又は記憶部51から、目標パルスエネルギーE_tの読み込みを行う（ステップS801）。

[0261] 次に、レーザ制御部2は、パルス繰り返し周波数R_pが複数の制御ゲインG_{ca}、G_{cb}、G_{cc}のいずれに対応するか判断する（ステップS802）。制御ゲインG_{ca}、G_{cb}、G_{cc}は、上述の図29～図31に示すフローチャートに従って算出してもよい。

[0262] レーザ制御部2は、パルス繰り返し周波数R_pが所定の値を超えた場合、例えば $(R_{pb} + R_{pa}) / 2 < R_p$ であると判断した場合には、制御ゲインG_cの値をG_{ca}とする（ステップS803）。

[0263] レーザ制御部2は、目標パルスエネルギーE_tが所定の範囲の場合、例えば $(R_{pc} + R_{pb}) / 2 < R_p \leq (R_{pb} + R_{pa}) / 2$ であると判断した場合には、制御ゲインG_cの値をG_{cb}とする（ステップS804）。

[0264] レーザ制御部2は、パルス繰り返し周波数R_pが所定の値以下の場合、例えば $R_p \leq (R_{pc} + R_{pb}) / 2$ であると判断した場合には、制御ゲインG_cの値をG_{cc}とする（ステップS805）。

[0265] 次に、レーザ制御部2は、レーザ発振したか否かを判断する（ステップS806）。レーザ制御部2は、レーザ発振していないと判断した場合（ステップS806；N）には、ステップS806の処理を繰り返す。

[0266] 一方、レーザ発振したと判断した場合（ステップS806；Y）には、レーザ制御部2は、パルスエネルギー検出器30から、パルスエネルギーEの値を読み込む（ステップS807）。

[0267] 次に、レーザ制御部2は、パルスエネルギーEと目標パルスエネルギー E_t との比較を行う（ステップS808）。レーザ制御部2は、パルスエネルギーEと目標パルスエネルギー E_t とが略同じと判断した場合（ $E = E_t$ ）には、現在の充電電圧Vのデータをそのまま充電電圧Vのデータとして（ステップS810）、記憶部51に書き込む（ステップS812）。

[0268] 一方、レーザ制御部2は、パルスエネルギーEが目標パルスエネルギー E_t よりも小さいと判断した場合（ $E < E_t$ ）には、以下の式のように、目標パルスエネルギー E_t とパルスエネルギーEとの差（ $E_t - E$ ）に制御ゲイン G_c を乗じた値を充電電圧Vに加算し、あらたな充電電圧Vとして（ステップS809）、その充電電圧Vのデータを記憶部51に書き込む（ステップS812）。

$$V = V + (E_t - E) \cdot G_c$$

[0269] また、レーザ制御部2は、パルスエネルギーEが目標パルスエネルギー E_t よりも大きいと判断した場合（ $E > E_t$ ）には、以下の式のように、パルスエネルギーEと目標パルスエネルギー E_t との差分（ $E - E_t$ ）に制御ゲイン G_c を乗じた値を充電電圧Vから減算し、あらたな充電電圧Vとして（ステップS811）、その充電電圧Vのデータを記憶部51に書き込む（ステップS813）。

$$V = V - (E - E_t) \cdot G_c$$

[0270] 次に、レーザ制御部2は、充電電圧Vが所定の最大値 V_{max} 以上になったか否かを判断する（ステップS813）。レーザ制御部2は、充電電圧Vが所定の最大値 V_{max} 以上になっていないと判断した場合（ステップS8

13 ; N) には、ステップ S801 の処理に戻る。一方、充電電圧 V が所定の最大値 V_{max} 以上になったと判断した場合 (ステップ S813 ; Y) には、エネルギー制御の処理を終了する。

[0271] その他の動作は、上記比較例、実施形態 1、又は実施形態 2 に係るレーザ装置と略同様であってもよい。

[0272] [4. 3 作用・効果]

実施形態 3 のレーザ装置によれば、複数のパルス繰り返し周波数 R_{pa} , R_{pb} , R_{pc} に応じた複数の制御ゲイン G_{ca} , G_{cb} , G_{cc} を算出するようにしたので、パルス繰り返し周波数 R_p を変更した場合におけるパルスエネルギー E の制御の精度が改善され得る。

[0273] なお、以上の実施形態 3 の説明では、レーザ制御部 2 が、3 つのパルス繰り返し周波数 R_{pa} , R_{pb} , R_{pc} に基づいて、3 つの制御ゲイン G_{ca} , G_{cb} , G_{cc} を算出する例を述べたが、パルス繰り返し周波数 R_p の数は、2 又は 4 以上の数であってもよい。算出する制御ゲイン G_c の数は、それら複数のパルス繰り返し周波数 R_p の数に応じて 2 又は 4 以上の数であってもよい。レーザ制御部 2 は、2 又は 4 以上の制御ゲイン G_c に基づいて、エネルギー制御を行ってもよい。

[0274] その他の作用・効果は、上記比較例、実施形態 1、又は実施形態 2 に係るレーザ装置と略同様であってもよい。

[0275] <5. 実施形態 4> (目標パルスエネルギーの値とパルス繰り返し周波数の値とに応じた複数の制御ゲインを用いるレーザ装置)

次に、本開示の実施形態 4 に係るレーザ装置について説明する。なお、以下では上記比較例、実施形態 1、実施形態 2、又は実施形態 3 に係るレーザ装置の構成要素と略同じ部分については、同一符号を付し、適宜説明を省略する。

[0276] [5. 1 構成]

実施形態 4 に係るレーザ装置は、上記比較例 2 に係るレーザ装置 1 と略同様に、比較例 1 に係るレーザ装置 101 におけるレーザ制御部 2 に、ファン

クションジェネレータ 52 を追加した構成であってもよい。

[0277] 実施形態 4 に係るレーザ装置は、上記比較例 2 に係るレーザ装置 1 に対して、レーザ制御部 2 によるエネルギー制御の処理と、制御ゲイン G_c の算出処理とが異なっている。

[0278] 実施形態 4 に係るレーザ装置では、レーザ制御部 2 は、目標パルスエネルギー E_t を、複数の基準エネルギーのそれぞれを変動中心として、複数のパルス繰り返し周波数のそれぞれに応じた変調周波数で周期的に変動させるパルスエネルギー制御部であってもよい。複数の基準エネルギーは、例えば E_{ta} , E_{tb} , E_{tc} であってもよい。複数のパルス繰り返し周波数は、例えば R_{pa} , R_{pb} , R_{pc} であってもよい。複数のパルス繰り返し周波数のそれぞれに応じた変調周波数は、例えば F_{ma} , F_{mb} , F_{mc} であってもよい。

[0279] また、レーザ制御部 2 は、複数の基準エネルギーのそれぞれと複数のパルス繰り返し周波数のそれぞれとに対応する複数の制御ゲイン、例えば G_{caa} , G_{cba} , G_{cca} , G_{cab} , G_{cbb} , G_{cac} , G_{cbc} , G_{ccc} を算出するゲイン算出部であってもよい。

[0280] ゲイン算出部としてのレーザ制御部 2 は、目標パルスエネルギー E_t を複数の基準エネルギーのそれぞれを変動中心として、複数のパルス繰り返し周波数のそれぞれに応じた変調周波数で周期的に変動させた場合におけるパルスエネルギー E の振幅成分を算出してもよい。また、レーザ制御部 2 は、目標パルスエネルギー E_t を複数の基準エネルギーのそれぞれを変動中心として、複数のパルス繰り返し周波数のそれぞれに応じた変調周波数で周期的に変動させた場合における一対の放電電極 23, 24 間に印加する印加電圧に対応する充電電圧 V の振幅成分を算出してもよい。算出されるパルスエネルギー E の振幅成分は、例えば I_{eaa} , I_{eab} , I_{eac} , I_{eba} , I_{ebb} , I_{ebc} , I_{eca} , I_{ecb} , I_{ecc} であってもよい。算出される充電電圧 V の振幅成分は、例えば I_{vaa} , I_{vab} , I_{vac} , I_{vba} , I_{vbb} , I_{vbc} , I_{vca} , I_{vcb} , I_{vcc} であってもよい。そして、レーザ制御部 2 は、パルスエネルギー E の振幅成分と充電電圧 V の振幅成分とに

基づいて、複数の制御ゲインを算出してもよい。

[0281] レーザチャンバ20は、一对の放電電極23, 24間に印加された印加電圧に応じたパルスエネルギーEを有するパルスレーザ光Lpを、複数のパルス繰り返し周波数における各周波数で出射してもよい。

[0282] その他の構成は、上記比較例、実施形態1、実施形態2、又は実施形態3に係るレーザ装置と略同様であってもよい。

[0283] [5. 2 動作]

レーザ制御部2は、目標パルスエネルギー E_t を、複数の基準エネルギー E_{ta} , E_{tb} , E_{tc} のそれぞれを変動中心として、複数のパルス繰り返し周波数 R_{pa} , R_{pb} , R_{pc} のそれぞれに応じた変調周波数 F_{ma} , F_{mb} , F_{mc} で周期的に変動させることにより、複数の制御ゲイン G_{caa} , G_{cba} , G_{cca} , G_{cab} , G_{cbb} , G_{cac} , G_{cbc} , G_{ccc} を算出してもよい。これにより、例えば以下のように、制御ゲイン G_c として、目標パルスエネルギー E_t の値とパルス繰り返し周波数の値とに応じた複数の制御ゲイン G_{caa} , G_{cba} , G_{cca} , G_{cab} , G_{cbb} , G_{cac} , G_{cbc} , G_{ccc} を算出してもよい。例えば基準エネルギー E_{ta} に基づいて制御ゲイン G_{caa} , G_{cba} , G_{cca} を算出してもよい。例えば基準エネルギー E_{tb} に基づいて制御ゲイン G_{cab} , G_{cbb} , G_{ccb} を算出してもよい。例えば基準エネルギー E_{tc} に基づいて制御ゲイン G_{cac} , G_{cbc} , G_{ccc} を算出してもよい。各基準エネルギー E_{ta} , E_{tb} , E_{tc} の大小関係は、 $E_{ta} < E_{tb} < E_{tc}$ であってもよい。また、例えばパルス繰り返し周波数 R_{pa} に応じた変調周波数を F_{ma} とし、パルス繰り返し周波数 R_{pb} に応じた変調周波数を F_{mb} とし、パルス繰り返し周波数 R_{pc} に応じた変調周波数を F_{mc} としてもよい。各変調周波数 F_{ma} , F_{mb} , F_{mc} の大小関係は、 $F_{ma} > F_{mb} > F_{mc}$ であってもよい。各パルス繰り返し周波数 R_{pa} , R_{pb} , R_{pc} の大小関係は、 $R_{pa} > R_{pb} > R_{pc}$ であってもよい。パルス繰り返し周波数 R_{pa} は、例えば6000 Hzであってもよい。パルス繰り返し周波数 R_{pb} は、例えば5000 Hz

zであってもよい。パルス繰り返し周波数R p cは、例えば3 0 0 0 H zであってもよい。なお、ここで挙げた複数のパルス繰り返し周波数R p a, R p b, R p cの値は一例であり、これらの値に限定されない。また、以下に示す目標パルスエネルギーE tの設定値は一例であり、以下に示す値に限定されない。

$$R p a, E t \leq 9.5 : G c a a = G s \cdot I v a a / I e a a$$

$$R p b, E t \leq 9.5 : G c b a = G s \cdot I v b a / I e b a$$

$$R p c, E t \leq 9.5 : G c c a = G s \cdot I v c a / I e c a$$

$$R p a, 9.5 < E t \leq 10.5 : G c a b = G s \cdot I v a b / I e a b$$

$$R p b, 9.5 < E t \leq 10.5 : G c b b = G s \cdot I v b b / I e b b$$

$$R p c, 9.5 < E t \leq 10.5 : G c c b = G s \cdot I v c b / I e c b$$

$$R p a, 10.5 < E t : G c a c = G s \cdot I v a c / I e a c$$

$$R p b, 10.5 < E t : G c b c = G s \cdot I v b c / I e b c$$

$$R p c, 10.5 < E t : G c c c = G s \cdot I v c c / I e c c$$

[0284] (実施形態4における制御ゲインの算出処理の具体例)

図33は、本開示の実施形態4に係るレーザ装置におけるパルス毎のパルスエネルギーEと充電電圧Vとの計測値の一例を示している。図34は、実施形態4に係るレーザ装置における単位時間毎のパルスエネルギーEと充電電圧Vとの計測値の一例を示す。図35は、図33におけるパルスエネルギーEと充電電圧Vとをスペクトル解析した結果の一例を示している。図33において、横軸はパルスレーザ光L pのパルス番号、縦軸はパルスエネルギーE (m J)、又は充電電圧V (k V)を示す。図34は、図33の横軸を時間に換算した計測値を示している。図35において、横軸は周波数(H z)、縦軸は振幅値を示す。

[0285] 図36は、実施形態4に係るレーザ装置におけるレーザ制御部による制御ゲインの算出処理の流れの一例を示すフローチャートを示している。図37は、図36に続くフローチャートである。図38は、図37に続くフローチャートである。図39は、図38に続くフローチャートである。図40は、

図39に続くフローチャートである。図41は、図40に続くフローチャートである。図42は、図41に続くフローチャートである。図43は、図42に続くフローチャートである。図44は、図43に続くフローチャートである。

[0286] 図36～図44の処理では、スペクトル解析により、例えば図35に示したようなパルスエネルギー E の振幅成分 le ($leaa$, $leab$, $leac$, $leba$, $lebb$, $lebc$, $leca$, $lecb$, $lecc$) と、充電電圧 V の振幅成分 lv ($lvaa$, $lvab$, $lvac$, $lvba$, $lvbb$, $lvbc$, $lvca$, $lvcb$, $lvcc$) とを算出してもよい。

[0287] 図36～図44の処理は、例えば、露光装置4からの指示、レーザガスの交換後、又はレーザガスのガス圧調整後に行ってもよい。また、一定の期間毎に処理を行ってもよい。

[0288] 図36に示したように、まず、レーザ制御部2は、露光装置コントローラ5又は記憶部51から、パルス繰り返し周波数 $R_p = R_{pa}$ の読み込みを行う(ステップS901A)。次に、レーザ制御部2は、露光装置コントローラ5又は記憶部51から、発振パルス数 N_p の読み込みを行う(ステップS902A)。発振パルス数 N_p は、例えば400パルス以上1500パルス以下が好ましい。発振パルス数 N_p は、512パルス、1024パルスなど、2の累乗がより好ましい。

[0289] 次に、レーザ制御部2は、目標パルスエネルギー E_t を基準エネルギー E_{ta} に設定する(ステップS903A)。レーザ制御部2は、その設定した目標パルスエネルギー E_t を記憶部51に書き込む。

[0290] 次に、レーザ制御部2は、ファンクションジェネレータ52によって、以下の式のように、目標パルスエネルギー E_t を、基準エネルギー E_{ta} を変動中心として、周期的に変動させる(ステップS904A)。 F_{ma} は、パルス繰り返し周波数 R_{pa} に対応する目標パルスエネルギー E_t の変調周波数である。 R_{pa}/F_{ma} は整数が望ましい。 R_{pa}/F_{ma} の範囲は4以上、10以下が望ましい。振幅 Δle の範囲は0.5mJ以上、2mJ以下が望ま

しい。振幅 ΔI_e は、基準エネルギー E_{ta} に対する比率で決定してもよい。例えば、 $\Delta I_e = E_{ta} \cdot (5\% \sim 10\%)$ としてもよい。 R_{pa} は例えば6000Hzであってもよい。 F_{ma} は例えば1200Hzであってもよい。

$$E_t = E_{ta} + \Delta I_e \cdot \sin(N \cdot 2 \cdot \pi \cdot F_{ma} / R_{pa})$$

[0291] 次に、レーザ制御部2は、ゲイン発振の処理を行う（ステップS905A）。ここでのゲイン発振の処理は、例えば図4に示すサブルーチンと略同様であってもよい。

[0292] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値 N を $N+1$ に設定する（ステップS906A）。

[0293] 次に、レーザ制御部2は、パルスエネルギー検出器30から、パルスエネルギー E の値を読み込み、記憶部51に、 n 番目のパルスのパルスエネルギー E の値を E_{an} として書き込む（ステップS907A）。

[0294] 次に、レーザ制御部2は、充電器90に設定した充電電圧 V の値を記憶部51から読み込み、記憶部51に、 n 番目のパルスにおける充電電圧 V の値を V_{an} として書き込む（ステップS908A）。

[0295] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値 N が発振パルス数 N_p を超えたか否かを判断する（ステップS909A）。レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値 N が発振パルス数 N_p を超えていないと判断した場合（ステップS909A； N ）には、ステップS904Aの処理に戻る。

[0296] 一方、パルスのカウンタ値 N が発振パルス数 N_p を超えたと判断した場合（ステップS909A； Y ）には、レーザ制御部2は、記憶されたパルスエネルギー E と充電電圧 V とのデータ列に対して、スペクトル解析を実行し、パルスエネルギー E の変調周波数 F_{ma} における振幅成分 I_{eaa} と、充電電圧 V の変調周波数 F_{ma} における振幅成分 I_{vaa} とを求める（ステップS910A）。スペクトル解析は、フーリエ変換、離散フーリエ変換、又は高速フーリエ変換などを用いてもよい。

[0297] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値 N を0に設定する（ステッ

プ S 9 1 1 A)。

[0298] 次に、レーザ制御部 2 は、以下の式のように、制御ゲイン G_c の値 G_{ca} を計算し (ステップ S 9 1 2 A)、図 3 7 の処理に進む。係数 G_s は、制御が発散しないように例えば、0.3 以上、1 以下の値が望ましい。

$$G_{ca} = G_s \cdot \Delta V / \Delta E = G_s \cdot I_{va} / I_{ea}$$

[0299] 図 3 7 の処理では、まず、レーザ制御部 2 は、露光装置コントローラ 5 又は記憶部 5 1 から、パルス繰り返し周波数 $R_p = R_{pa}$ の読み込みを行う (ステップ S 9 0 1 B)。次に、レーザ制御部 2 は、露光装置コントローラ 5 又は記憶部 5 1 から、発振パルス数 N_p の読み込みを行う (ステップ S 9 0 2 B)。発振パルス数 N_p は、例えば 4 0 0 パルス以上 1 5 0 0 パルス以下が好ましい。発振パルス数 N_p は、5 1 2 パルス、1 0 2 4 パルスなど、2 の累乗がより好ましい。

[0300] 次に、レーザ制御部 2 は、目標パルスエネルギー E_t を基準エネルギー E_{tb} に設定する (ステップ S 9 0 3 B)。レーザ制御部 2 は、その設定した目標パルスエネルギー E_t を記憶部 5 1 に書き込む。

[0301] 次に、レーザ制御部 2 は、ファンクションジェネレータ 5 2 によって、以下の式のように、目標パルスエネルギー E_t を、基準エネルギー E_{tb} を変動中心として、周期的に変動させる (ステップ S 9 0 4 B)。 F_{ma} は、パルス繰り返し周波数 R_{pa} に対応する目標パルスエネルギー E_t の変調周波数である。 R_{pa} / F_{ma} は整数が望ましい。 R_{pa} / F_{ma} の範囲は 4 以上、1 0 以下が望ましい。振幅 ΔI_e の範囲は 0.5 mJ 以上、2 mJ 以下が望ましい。振幅 ΔI_e は、基準エネルギー E_{tb} に対する比率で決定してもよい。例えば、 $\Delta I_e = E_{tb} \cdot (5\% \sim 10\%)$ としてもよい。 R_{pa} は例えば 6 0 0 0 Hz であってもよい。 F_{ma} は例えば 1 2 0 0 Hz であってもよい。

$$E_t = E_{tb} + \Delta I_e \cdot \sin(N \cdot 2 \cdot \pi \cdot F_{ma} / R_{pa})$$

[0302] 次に、レーザ制御部 2 は、ゲイン発振の処理を行う (ステップ S 9 0 5 B)。ここでのゲイン発振の処理は、例えば図 4 に示すサブルーチンと略同様

であってもよい。

[0303] 次に、レーザ制御部 2 は、パルスのカウンタ値 N を $N + 1$ に設定する（ステップ S 9 0 6 B）。

[0304] 次に、レーザ制御部 2 は、パルスエネルギー検出器 3 0 から、パルスエネルギー E の値を読み込み、記憶部 5 1 に、 n 番目のパルスのパルスエネルギー E の値を $E b n$ として書き込む（ステップ S 9 0 7 B）。

[0305] 次に、レーザ制御部 2 は、充電器 9 0 に設定した充電電圧 V の値を記憶部 5 1 から読み込み、記憶部 5 1 に、 n 番目のパルスにおける充電電圧 V の値を $V b n$ として書き込む（ステップ S 9 0 8 B）。

[0306] 次に、レーザ制御部 2 は、パルスのカウンタ値 N が発振パルス数 $N p$ を超えたか否かを判断する（ステップ S 9 0 9 B）。レーザ制御部 2 は、パルスのカウンタ値 N が発振パルス数 $N p$ を超えていないと判断した場合（ステップ S 9 0 9 B ; N ）には、ステップ S 9 0 4 B の処理に戻る。

[0307] 一方、パルスのカウンタ値 N が発振パルス数 $N p$ を超えたと判断した場合（ステップ S 9 0 9 B ; Y ）には、レーザ制御部 2 は、記憶されたパルスエネルギー E と充電電圧 V とのデータ列に対して、スペクトル解析を実行し、パルスエネルギー E の変調周波数 $F m a$ における振幅成分 $I e a b$ と、充電電圧 V の変調周波数 $F m a$ における振幅成分 $I v a b$ とを求める（ステップ S 9 1 0 B）。スペクトル解析は、フーリエ変換、離散フーリエ変換、又は高速フーリエ変換などを用いてもよい。

[0308] 次に、レーザ制御部 2 は、パルスのカウンタ値 N を 0 に設定する（ステップ S 9 1 1 B）。

[0309] 次に、レーザ制御部 2 は、以下の式のように、制御ゲイン $G c$ の値 $G c a b$ を計算し（ステップ S 9 1 2 B）、図 3 8 の処理に進む。係数 $G s$ は、制御が発散しないように例えば、0.3 以上、1 以下の値が望ましい。

$$G c a b = G s \cdot \Delta V / \Delta E = G s \cdot I v a b / I e a b$$

[0310] 図 3 8 の処理では、まず、レーザ制御部 2 は、露光装置コントローラ 5 又は記憶部 5 1 から、パルス繰り返し周波数 $R p = R p a$ の読み込みを行う（

ステップS901C)。次に、レーザ制御部2は、露光装置コントローラ5又は記憶部51から、発振パルス数 N_p の読み込みを行う（ステップS902C）。発振パルス数 N_p は、例えば400パルス以上1500パルス以下が好ましい。発振パルス数 N_p は、512パルス、1024パルスなど、2の累乗がより好ましい。

[0311] 次に、レーザ制御部2は、目標パルスエネルギー E_t を基準エネルギー E_{tc} に設定する（ステップS903C）。レーザ制御部2は、その設定した目標パルスエネルギー E_t を記憶部51に書き込む。

[0312] 次に、レーザ制御部2は、ファンクションジェネレータ52によって、以下の式のように、目標パルスエネルギー E_t を、基準エネルギー E_{tc} を変動中心として、周期的に変動させる（ステップS904C）。 F_{ma} は、パルス繰り返し周波数 R_{pa} に対応する目標パルスエネルギー E_t の変調周波数である。 R_{pa}/F_{ma} は整数が望ましい。 R_{pa}/F_{ma} の範囲は4以上、10以下が望ましい。振幅 ΔI_e の範囲は0.5mJ以上、2mJ以下が望ましい。振幅 ΔI_e は、基準エネルギー E_{tc} に対する比率で決定してもよい。例えば、 $\Delta I_e = E_{tc} \cdot (5\% \sim 10\%)$ としてもよい。 R_{pa} は例えば6000Hzであってもよい。 F_{ma} は例えば1200Hzであってもよい。

$$E_t = E_{tc} + \Delta I_e \cdot \sin(N \cdot 2 \cdot \pi \cdot F_{mc} / R_{pc})$$

[0313] 次に、レーザ制御部2は、ゲイン発振の処理を行う（ステップS905C）。ここでのゲイン発振の処理は、例えば図4に示すサブルーチンと略同様であってもよい。

[0314] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値 N を $N+1$ に設定する（ステップS906C）。

[0315] 次に、レーザ制御部2は、パルスエネルギー検出器30から、パルスエネルギー E の値を読み込み、記憶部51に、 n 番目のパルスのパルスエネルギー E の値を E_{cn} として書き込む（ステップS907C）。

[0316] 次に、レーザ制御部2は、充電器90に設定した充電電圧 V の値を記憶部

51から読み込み、記憶部51に、n番目のパルスにおける充電電圧Vの値を V_{cn} として書き込む（ステップS908C）。

[0317] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値Nが発振パルス数 N_p を超えたか否かを判断する（ステップS909C）。レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値Nが発振パルス数 N_p を超えていないと判断した場合（ステップS909C；N）には、ステップS904Cの処理に戻る。

[0318] 一方、パルスのカウンタ値Nが発振パルス数 N_p を超えたと判断した場合（ステップS909C；Y）には、レーザ制御部2は、記憶されたパルスエネルギーEと充電電圧Vとのデータ列に対して、スペクトル解析を実行し、パルスエネルギーEの変調周波数 F_{ma} における振幅成分 I_{eac} と、充電電圧Vの変調周波数 F_{ma} における振幅成分 I_{vac} とを求める（ステップS910C）。スペクトル解析は、フーリエ変換、離散フーリエ変換、又は高速フーリエ変換などを用いてもよい。

[0319] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値Nを0に設定する（ステップS911C）。

[0320] 次に、レーザ制御部2は、以下の式のように、制御ゲイン G_c の値 G_{cac} を計算し（ステップS912C）、図39の処理に進む。係数 G_s は、制御が発散しないように例えば、0.3以上、1以下の値が望ましい。

$$G_{cac} = G_s \cdot \Delta V / \Delta E = G_s \cdot I_{vac} / I_{eac}$$

[0321] 図39の処理では、まず、レーザ制御部2は、露光装置コントローラ5又は記憶部51から、パルス繰り返し周波数 $R_p = R_{pb}$ の読み込みを行う（ステップS901D）。次に、レーザ制御部2は、露光装置コントローラ5又は記憶部51から、発振パルス数 N_p の読み込みを行う（ステップS902D）。発振パルス数 N_p は、例えば400パルス以上1500パルス以下が好ましい。発振パルス数 N_p は、512パルス、1024パルスなど、2の累乗がより好ましい。

[0322] 次に、レーザ制御部2は、目標パルスエネルギー E_t を基準エネルギー E_{ta} に設定する（ステップS903D）。レーザ制御部2は、その設定した目標

パルスエネルギー E_t を記憶部 51 に書き込む。

- [0323] 次に、レーザ制御部 2 は、ファンクションジェネレータ 52 によって、以下の式のように、目標パルスエネルギー E_t を、基準エネルギー E_{ta} を変動中心として、周期的に変動させる（ステップ S904D）。 F_{mb} は、パルス繰り返し周波数 R_{pb} に対応する目標パルスエネルギー E_t の変調周波数である。 R_{pb}/F_{mb} は整数が望ましい。 R_{pb}/F_{mb} の範囲は 4 以上、10 以下が望ましい。振幅 ΔI_e の範囲は 0.5 mJ 以上、2 mJ 以下が望ましい。振幅 ΔI_e は、基準エネルギー E_{ta} に対する比率で決定してもよい。例えば、 $\Delta I_e = E_{ta} \cdot (5\% \sim 10\%)$ としてもよい。 R_{pb} は例えば 5000 Hz であってもよい。 F_{mb} は例えば 1000 Hz であってもよい。

$$E_t = E_{ta} + \Delta I_e \cdot \sin(N \cdot 2 \cdot \pi \cdot F_{mb} / R_{pb})$$

- [0324] 次に、レーザ制御部 2 は、ゲイン発振の処理を行う（ステップ S905D）。ここでのゲイン発振の処理は、例えば図 4 に示すサブルーチンと略同様であってもよい。

- [0325] 次に、レーザ制御部 2 は、パルスのカウンタ値 N を $N+1$ に設定する（ステップ S906D）。

- [0326] 次に、レーザ制御部 2 は、パルスエネルギー検出器 30 から、パルスエネルギー E の値を読み込み、記憶部 51 に、 n 番目のパルスのパルスエネルギー E の値を E_{an} として書き込む（ステップ S907D）。

- [0327] 次に、レーザ制御部 2 は、充電器 90 に設定した充電電圧 V の値を記憶部 51 から読み込み、記憶部 51 に、 n 番目のパルスにおける充電電圧 V の値を V_{an} として書き込む（ステップ S908D）。

- [0328] 次に、レーザ制御部 2 は、パルスのカウンタ値 N が発振パルス数 N_p を超えたか否かを判断する（ステップ S909D）。レーザ制御部 2 は、パルスのカウンタ値 N が発振パルス数 N_p を超えていないと判断した場合（ステップ S909D；N）には、ステップ S904D の処理に戻る。

- [0329] 一方、パルスのカウンタ値 N が発振パルス数 N_p を超えたと判断した場合

(ステップS909D; Y)には、レーザ制御部2は、記憶されたパルスエネルギーEと充電電圧Vとのデータ列に対して、スペクトル解析を実行し、パルスエネルギーEの変調周波数Fmbにおける振幅成分Iebaと、充電電圧Vの変調周波数Fmbにおける振幅成分Ivbaとを求める(ステップS910D)。スペクトル解析は、フーリエ変換、離散フーリエ変換、又は高速フーリエ変換などを用いてもよい。

[0330] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値Nを0に設定する(ステップS911D)。

[0331] 次に、レーザ制御部2は、以下の式のように、制御ゲインGcの値Gcbaを計算し(ステップS912D)、図40の処理に進む。係数Gsは、制御が発散しないように例えば、0.3以上、1以下の値が望ましい。

$$Gcba = Gs \cdot \Delta V / \Delta E = Gs \cdot Ivba / Ieba$$

[0332] 図40の処理では、まず、レーザ制御部2は、露光装置コントローラ5又は記憶部51から、パルス繰り返し周波数Rp=Rpbの読み込みを行う(ステップS901E)。次に、レーザ制御部2は、露光装置コントローラ5又は記憶部51から、発振パルス数Npの読み込みを行う(ステップS902E)。発振パルス数Npは、例えば400パルス以上1500パルス以下が好ましい。発振パルス数Npは、512パルス、1024パルスなど、2の累乗がより好ましい。

[0333] 次に、レーザ制御部2は、目標パルスエネルギーEtを基準エネルギーEtbに設定する(ステップS903E)。レーザ制御部2は、その設定した目標パルスエネルギーEtを記憶部51に書き込む。

[0334] 次に、レーザ制御部2は、ファンクションジェネレータ52によって、以下の式のように、目標パルスエネルギーEtを、基準エネルギーEtbを変動中心として、周期的に変動させる(ステップS904E)。Fmbは、パルス繰り返し周波数Rpbに対応する目標パルスエネルギーEtの変調周波数である。Fmbは、パルス繰り返し周波数Rpbに対応する目標パルスエネルギーEtの変調周波数である。Rpb/Fmbは整数が望ましい。Rpb/Fm

bの範囲は4以上、10以下が望ましい。振幅 ΔI_e の範囲は0.5mJ以上、2mJ以下が望ましい。振幅 ΔI_e は、基準エネルギー E_{tb} に対する比率で決定してもよい。例えば、 $\Delta I_e = E_{tb} \cdot (5\% \sim 10\%)$ としてもよい。 R_{pb} は例えば5000Hzであってもよい。 F_{mb} は例えば1000Hzであってもよい。

$$E_t = E_{tb} + \Delta I_e \cdot \sin(N \cdot 2 \cdot \pi \cdot F_{mb} / R_{pb})$$

[0335] 次に、レーザ制御部2は、ゲイン発振の処理を行う（ステップS905E）。ここでのゲイン発振の処理は、例えば図4に示すサブルーチンと略同様であってもよい。

[0336] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウント値NをN+1に設定する（ステップS906E）。

[0337] 次に、レーザ制御部2は、パルスエネルギー検出器30から、パルスエネルギーEの値を読み込み、記憶部51に、n番目のパルスのパルスエネルギーEの値を E_{bn} として書き込む（ステップS907E）。

[0338] 次に、レーザ制御部2は、充電器90に設定した充電電圧Vの値を記憶部51から読み込み、記憶部51に、n番目のパルスにおける充電電圧Vの値を V_{bn} として書き込む（ステップS908E）。

[0339] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウント値Nが発振パルス数 N_p を超えたか否かを判断する（ステップS909E）。レーザ制御部2は、パルスのカウント値Nが発振パルス数 N_p を超えていないと判断した場合（ステップS909E；N）には、ステップS904Eの処理に戻る。

[0340] 一方、パルスのカウント値Nが発振パルス数 N_p を超えたと判断した場合（ステップS909E；Y）には、レーザ制御部2は、記憶されたパルスエネルギーEと充電電圧Vとのデータ列に対して、スペクトル解析を実行し、パルスエネルギーEの変調周波数 F_{mb} における振幅成分 I_{ebb} と、充電電圧Vの変調周波数 F_{mb} における振幅成分 I_{vbb} とを求める（ステップS910E）。スペクトル解析は、フーリエ変換、離散フーリエ変換、又は高速フーリエ変換などを用いてもよい。

[0341] 次に、レーザ制御部 2 は、パルスのカウンタ値 N を 0 に設定する（ステップ S 9 1 1 E）。

[0342] 次に、レーザ制御部 2 は、以下の式のように、制御ゲイン G_c の値 G_{cb} を計算し（ステップ S 9 1 2 E）、図 4 1 の処理に進む。係数 G_s は、制御が発散しないように例えば、0.3 以上、1 以下の値が望ましい。

$$G_{cb} = G_s \cdot \Delta V / \Delta E = G_s \cdot I_{vb} / I_{eb}$$

[0343] 図 4 1 の処理では、まず、レーザ制御部 2 は、露光装置コントローラ 5 又は記憶部 5 1 から、パルス繰り返し周波数 $R_p = R_{pb}$ の読み込みを行う（ステップ S 9 0 1 F）。次に、レーザ制御部 2 は、露光装置コントローラ 5 又は記憶部 5 1 から、発振パルス数 N_p の読み込みを行う（ステップ S 9 0 2 F）。発振パルス数 N_p は、例えば 4 0 0 パルス以上 1 5 0 0 パルス以下が好ましい。発振パルス数 N_p は、5 1 2 パルス、1 0 2 4 パルスなど、2 の累乗がより好ましい。

[0344] 次に、レーザ制御部 2 は、目標パルスエネルギー E_t を基準エネルギー E_{tc} に設定する（ステップ S 9 0 3 F）。レーザ制御部 2 は、その設定した目標パルスエネルギー E_t を記憶部 5 1 に書き込む。

[0345] 次に、レーザ制御部 2 は、ファンクションジェネレータ 5 2 によって、以下の式のように、目標パルスエネルギー E_t を、基準エネルギー E_{tc} を変動中心として、周期的に変動させる（ステップ S 9 0 4 F）。 F_{mb} は、パルス繰り返し周波数 R_{pb} に対応する目標パルスエネルギー E_t の変調周波数である。 R_{pb} / F_{mb} は整数が望ましい。 R_{pb} / F_{mb} の範囲は 4 以上、1 0 以下が望ましい。振幅 ΔI_e の範囲は 0.5 mJ 以上、2 mJ 以下が望ましい。振幅 ΔI_e は、基準エネルギー E_{tc} に対する比率で決定してもよい。例えば、 $\Delta I_e = E_{tc} \cdot (5\% \sim 10\%)$ としてもよい。 R_{pb} は例えば 5 0 0 0 Hz であってもよい。 F_{mb} は例えば 1 0 0 0 Hz であってもよい。

$$E_t = E_{tc} + \Delta I_e \cdot \sin(N \cdot 2 \cdot \pi \cdot F_{mb} / R_{pb})$$

[0346] 次に、レーザ制御部 2 は、ゲイン発振の処理を行う（ステップ S 9 0 5 F）

）。ここでのゲイン発振の処理は、例えば図4に示すサブルーチンと略同様であってもよい。

[0347] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値NをN+1に設定する（ステップS906F）。

[0348] 次に、レーザ制御部2は、パルスエネルギー検出器30から、パルスエネルギーEの値を読み込み、記憶部51に、n番目のパルスのパルスエネルギーEの値をEcnとして書き込む（ステップS907F）。

[0349] 次に、レーザ制御部2は、充電器90に設定した充電電圧Vの値を記憶部51から読み込み、記憶部51に、n番目のパルスにおける充電電圧Vの値をVcnとして書き込む（ステップS908F）。

[0350] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値Nが発振パルス数Npを超えたか否かを判断する（ステップS909F）。レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値Nが発振パルス数Npを超えていないと判断した場合（ステップS909F；N）には、ステップS904Fの処理に戻る。

[0351] 一方、パルスのカウンタ値Nが発振パルス数Npを超えたと判断した場合（ステップS909F；Y）には、レーザ制御部2は、記憶されたパルスエネルギーEと充電電圧Vとのデータ列に対して、スペクトル解析を実行し、パルスエネルギーEの変調周波数Fmbにおける振幅成分Iebcと、充電電圧Vの変調周波数Fmcにおける振幅成分Ivbcとを求める（ステップS910F）。スペクトル解析は、フーリエ変換、離散フーリエ変換、又は高速フーリエ変換などを用いてもよい。

[0352] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値Nを0に設定する（ステップS911F）。

[0353] 次に、レーザ制御部2は、以下の式のように、制御ゲインGcの値Gcbcを計算し（ステップS912F）、図42の処理に進む。係数Gsは、制御が発散しないように例えば、0.3以上、1以下の値が望ましい。

$$G_{cbc} = G_s \cdot \Delta V / \Delta E = G_s \cdot I_{vbc} / I_{ebc}$$

[0354] 図42の処理では、まず、レーザ制御部2は、露光装置コントローラ5又

は記憶部51から、パルス繰り返し周波数 $R_p = R_{pc}$ の読み込みを行う（ステップS901G）。次に、レーザ制御部2は、露光装置コントローラ5又は記憶部51から、発振パルス数 N_p の読み込みを行う（ステップS902G）。発振パルス数 N_p は、例えば400パルス以上1500パルス以下が好ましい。発振パルス数 N_p は、512パルス、1024パルスなど、2の累乗がより好ましい。

[0355] 次に、レーザ制御部2は、目標パルスエネルギー E_t を基準エネルギー E_{ta} に設定する（ステップS903G）。レーザ制御部2は、その設定した目標パルスエネルギー E_t を記憶部51に書き込む。

[0356] 次に、レーザ制御部2は、ファンクションジェネレータ52によって、以下の式のように、目標パルスエネルギー E_t を、基準エネルギー E_{ta} を変動中心として、周期的に変動させる（ステップS904G）。 F_{mc} は、パルス繰り返し周波数 R_{pc} に対応する目標パルスエネルギー E_t の変調周波数である。 R_{pc}/F_{mc} は整数が望ましい。 R_{pc}/F_{mc} の範囲は4以上、10以下が望ましい。振幅 ΔI_e の範囲は0.5mJ以上、2mJ以下が望ましい。振幅 ΔI_e は、基準エネルギー E_{ta} に対する比率で決定してもよい。例えば、 $\Delta I_e = E_{ta} \cdot (5\% \sim 10\%)$ としてもよい。 R_{pc} は例えば3000Hzであってもよい。 F_{mc} は例えば600Hzであってもよい。

$$E_t = E_{ta} + \Delta I_e \cdot \sin(N \cdot 2 \cdot \pi \cdot F_{mc} / R_{pc})$$

[0357] 次に、レーザ制御部2は、ゲイン発振の処理を行う（ステップS905G）。ここでのゲイン発振の処理は、例えば図4に示すサブルーチンと略同様であってもよい。

[0358] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値 N を $N+1$ に設定する（ステップS906G）。

[0359] 次に、レーザ制御部2は、パルスエネルギー検出器30から、パルスエネルギー E の値を読み込み、記憶部51に、 n 番目のパルスのパルスエネルギー E の値を E_{an} として書き込む（ステップS907G）。

[0360] 次に、レーザ制御部2は、充電器90に設定した充電電圧 V の値を記憶部

51から読み込み、記憶部51に、n番目のパルスにおける充電電圧Vの値を V_{an} として書き込む（ステップS908G）。

[0361] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値Nが発振パルス数 N_p を超えたか否かを判断する（ステップS909G）。レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値Nが発振パルス数 N_p を超えていないと判断した場合（ステップS909G；N）には、ステップS904Gの処理に戻る。

[0362] 一方、パルスのカウンタ値Nが発振パルス数 N_p を超えたと判断した場合（ステップS909G；Y）には、レーザ制御部2は、記憶されたパルスエネルギーEと充電電圧Vとのデータ列に対して、スペクトル解析を実行し、パルスエネルギーEの変調周波数 F_{mc} における振幅成分 I_{eca} と、充電電圧Vの変調周波数 F_{mc} における振幅成分 I_{vca} とを求める（ステップS910G）。スペクトル解析は、フーリエ変換、離散フーリエ変換、又は高速フーリエ変換などを用いてもよい。

[0363] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値Nを0に設定する（ステップS911G）。

[0364] 次に、レーザ制御部2は、以下の式のように、制御ゲイン G_c の値 G_{cca} を計算し（ステップS912G）、図43の処理に進む。係数 G_s は、制御が発散しないように例えば、0.3以上、1以下の値が望ましい。

$$G_{cca} = G_s \cdot \Delta V / \Delta E = G_s \cdot I_{vca} / I_{eca}$$

[0365] 図43の処理では、まず、レーザ制御部2は、露光装置コントローラ5又は記憶部51から、パルス繰り返し周波数 $R_p = R_{pc}$ の読み込みを行う（ステップS901H）。次に、レーザ制御部2は、露光装置コントローラ5又は記憶部51から、発振パルス数 N_p の読み込みを行う（ステップS902H）。発振パルス数 N_p は、例えば400パルス以上1500パルス以下が好ましい。発振パルス数 N_p は、512パルス、1024パルスなど、2の累乗がより好ましい。

[0366] 次に、レーザ制御部2は、目標パルスエネルギー E_t を基準エネルギー E_{tb} に設定する（ステップS903H）。レーザ制御部2は、その設定した目標

パルスエネルギー E_t を記憶部 51 に書き込む。

- [0367] 次に、レーザ制御部 2 は、ファンクションジェネレータ 52 によって、以下の式のように、目標パルスエネルギー E_t を、基準エネルギー E_{tb} を変動中心として、周期的に変動させる（ステップ S904H）。 F_{mc} は、パルス繰り返し周波数 R_{pc} に対応する目標パルスエネルギー E_t の変調周波数である。 R_{pc}/F_{mc} は整数が望ましい。 R_{pc}/F_{mc} の範囲は 4 以上、10 以下が望ましい。振幅 ΔI_e の範囲は 0.5 mJ 以上、2 mJ 以下が望ましい。振幅 ΔI_e は、基準エネルギー E_{tb} に対する比率で決定してもよい。例えば、 $\Delta I_e = E_{tb} \cdot (5\% \sim 10\%)$ としてもよい。 R_{pc} は例えば 3000 Hz であってもよい。 F_{mc} は例えば 600 Hz であってもよい。

$$E_t = E_{tb} + \Delta I_e \cdot \sin(N \cdot 2 \cdot \pi \cdot F_{mc} / R_{pc})$$

- [0368] 次に、レーザ制御部 2 は、ゲイン発振の処理を行う（ステップ S905H）。ここでのゲイン発振の処理は、例えば図 4 に示すサブルーチンと略同様であってもよい。

- [0369] 次に、レーザ制御部 2 は、パルスのカウンタ値 N を $N+1$ に設定する（ステップ S906H）。

- [0370] 次に、レーザ制御部 2 は、パルスエネルギー検出器 30 から、パルスエネルギー E の値を読み込み、記憶部 51 に、 n 番目のパルスのパルスエネルギー E の値を E_{bn} として書き込む（ステップ S907H）。

- [0371] 次に、レーザ制御部 2 は、充電器 90 に設定した充電電圧 V の値を記憶部 51 から読み込み、記憶部 51 に、 n 番目のパルスにおける充電電圧 V の値を V_{bn} として書き込む（ステップ S908H）。

- [0372] 次に、レーザ制御部 2 は、パルスのカウンタ値 N が発振パルス数 N_p を超えたか否かを判断する（ステップ S909H）。レーザ制御部 2 は、パルスのカウンタ値 N が発振パルス数 N_p を超えていないと判断した場合（ステップ S909H；N）には、ステップ S904H の処理に戻る。

- [0373] 一方、パルスのカウンタ値 N が発振パルス数 N_p を超えたと判断した場合（ステップ S909H；Y）には、レーザ制御部 2 は、記憶されたパルスエ

エネルギーEと充電電圧Vとのデータ列に対して、スペクトル解析を実行し、パルスエネルギーEの変調周波数F_{mc}における振幅成分I_{ecb}と、充電電圧Vの変調周波数F_{mc}における振幅成分I_{vcb}とを求める（ステップS910H）。スペクトル解析は、フーリエ変換、離散フーリエ変換、又は高速フーリエ変換などを用いてもよい。

[0374] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値Nを0に設定する（ステップS911H）。

[0375] 次に、レーザ制御部2は、以下の式のように、制御ゲインG_cの値G_{cb}を計算し（ステップS912H）、図44の処理に進む。係数G_sは、制御が発散しないように例えば、0.3以上、1以下の値が望ましい。

$$G_{ccb} = G_s \cdot \Delta V / \Delta E = G_s \cdot I_{vcb} / I_{ecb}$$

[0376] 図44の処理では、まず、レーザ制御部2は、露光装置コントローラ5又は記憶部51から、パルス繰り返し周波数R_p=R_{pc}の読み込みを行う（ステップS901I）。次に、レーザ制御部2は、露光装置コントローラ5又は記憶部51から、発振パルス数N_pの読み込みを行う（ステップS902I）。発振パルス数N_pは、例えば400パルス以上1500パルス以下が好ましい。発振パルス数N_pは、512パルス、1024パルスなど、2の累乗がより好ましい。

[0377] 次に、レーザ制御部2は、目標パルスエネルギーE_tを基準エネルギーE_{tc}に設定する（ステップS903I）。レーザ制御部2は、その設定した目標パルスエネルギーE_tを記憶部51に書き込む。

[0378] 次に、レーザ制御部2は、ファンクションジェネレータ52によって、以下の式のように、目標パルスエネルギーE_tを、基準エネルギーE_{tc}を変動中心として、周期的に変動させる（ステップS904I）。F_{mc}は、パルス繰り返し周波数R_{pc}に対応する目標パルスエネルギーE_tの変調周波数である。R_{pc}/F_{mc}は整数が望ましい。R_{pc}/F_{mc}の範囲は4以上、10以下が望ましい。振幅ΔI_eの範囲は0.5mJ以上、2mJ以下が望ましい。振幅ΔI_eは、基準エネルギーE_{tc}に対する比率で決定してもよい。

例えば、 $\Delta I_e = E_{tc} \cdot (5\% \sim 10\%)$ としてもよい。 R_{pc} は例えば3000Hzであってもよい。 F_{mc} は例えば600Hzであってもよい。

$$E_t = E_{tc} + \Delta I_e \cdot \sin(N \cdot 2 \cdot \pi \cdot F_{mc} / R_{pc})$$

[0379] 次に、レーザ制御部2は、ゲイン発振の処理を行う（ステップS9051）。ここでのゲイン発振の処理は、例えば図4に示すサブルーチンと略同様であってもよい。

[0380] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値NをN+1に設定する（ステップS9061）。

[0381] 次に、レーザ制御部2は、パルスエネルギー検出器30から、パルスエネルギーEの値を読み込み、記憶部51に、n番目のパルスのパルスエネルギーEの値を E_{cn} として書き込む（ステップS9071）。

[0382] 次に、レーザ制御部2は、充電器90に設定した充電電圧Vの値を記憶部51から読み込み、記憶部51に、n番目のパルスにおける充電電圧Vの値を V_{cn} として書き込む（ステップS9081）。

[0383] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値Nが発振パルス数 N_p を超えたか否かを判断する（ステップS9091）。レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値Nが発振パルス数 N_p を超えていないと判断した場合（ステップS9091；N）には、ステップS9041の処理に戻る。

[0384] 一方、パルスのカウンタ値Nが発振パルス数 N_p を超えたと判断した場合（ステップS9091；Y）には、レーザ制御部2は、記憶されたパルスエネルギーEと充電電圧Vとのデータ列に対して、スペクトル解析を実行し、パルスエネルギーEの変調周波数 F_{mc} における振幅成分 I_{ecc} と、充電電圧Vの変調周波数 F_{mc} における振幅成分 I_{vcc} とを求める（ステップS9101）。スペクトル解析は、フーリエ変換、離散フーリエ変換、又は高速フーリエ変換などを用いてもよい。

[0385] 次に、レーザ制御部2は、パルスのカウンタ値Nを0に設定する（ステップS9111）。

[0386] 次に、レーザ制御部2は、以下の式のように、制御ゲイン G_c の値 G_{cc}

を計算し（ステップS 9 1 2 1）、処理を終了する。係数G sは、制御が発散しないように例えば、0.3以上、1以下の値が望ましい。

$$G_{ccc} = G_s \cdot \Delta V / \Delta E = G_s \cdot I_{vcc} / I_{ecc}$$

[0387]（実施形態4におけるエネルギー制御の具体例）

図45は、実施形態4に係るレーザ装置におけるレーザ制御部2によるパルスエネルギーEの制御の流れの一例を示すフローチャートを示している。図46は、図45におけるステップS 8 0 5 AのサブルーチンAの一例を示している。図47は、図45におけるステップS 8 0 4 AのサブルーチンBの一例を示している。図48は、図45におけるステップS 8 0 3 AのサブルーチンCの一例を示している。

[0388] まず、レーザ制御部2は、露光装置コントローラ5又は記憶部51から、パルス繰り返し周波数R pの読み込みを行う（ステップS 8 0 0 A）。

[0389] 次に、レーザ制御部2は、露光装置コントローラ5又は記憶部51から、目標パルスエネルギーE tの読み込みを行う（ステップS 8 0 1 A）。

[0390] 次に、レーザ制御部2は、パルス繰り返し周波数R pの値を判断する（ステップS 8 0 2 A）。

[0391] レーザ制御部2は、パルス繰り返し周波数R pが所定の値を超えた場合、例えば $(R_{pb} + R_{pa}) / 2 < R_p$ であると判断した場合には、図48のサブルーチンCの処理を行う（ステップS 8 0 3 A）。

[0392] レーザ制御部2は、目標パルスエネルギーE tが所定の範囲の場合、例えば $(R_{pc} + R_{pb}) / 2 < R_p \leq (R_{pb} + R_{pa}) / 2$ であると判断した場合には、図47のサブルーチンBの処理を行う（ステップS 8 0 4 A）。

[0393] レーザ制御部2は、パルス繰り返し周波数R pが所定の値以下の場合、例えば $R_p \leq (R_{pc} + R_{pb}) / 2$ であると判断した場合には、図46のサブルーチンAの処理を行う（ステップS 8 0 5 A）。

[0394] 次に、レーザ制御部2は、レーザ発振したか否かを判断する（ステップS 8 0 6 A）。レーザ制御部2は、レーザ発振していないと判断した場合（ステップS 8 0 6 A ; N）には、ステップS 8 0 6 Aの処理を繰り返す。

[0395] 一方、レーザ発振したと判断した場合（ステップS806A；Y）には、レーザ制御部2は、パルスエネルギー検出器30から、パルスエネルギーEの値を読み込む（ステップS807A）。

[0396] 次に、レーザ制御部2は、パルスエネルギーEと目標パルスエネルギー E_t との比較を行う（ステップS808A）。レーザ制御部2は、パルスエネルギーEと目標パルスエネルギー E_t とが略同じと判断した場合（ $E = E_t$ ）には、現在の充電電圧Vのデータをそのまま充電電圧Vのデータとして（ステップS810A）、記憶部51に書き込む（ステップS812A）。

[0397] 一方、レーザ制御部2は、パルスエネルギーEが目標パルスエネルギー E_t よりも小さいと判断した場合（ $E < E_t$ ）には、以下の式のように、目標パルスエネルギー E_t とパルスエネルギーEとの差（ $E_t - E$ ）に制御ゲイン G_c を乗じた値を充電電圧Vに加算し、あらたな充電電圧Vとして（ステップS809A）、その充電電圧Vのデータを記憶部51に書き込む（ステップS812A）。

$$V = V + (E_t - E) \cdot G_c$$

[0398] また、レーザ制御部2は、パルスエネルギーEが目標パルスエネルギー E_t よりも大きいと判断した場合（ $E > E_t$ ）には、以下の式のように、パルスエネルギーEと目標パルスエネルギー E_t との差分（ $E - E_t$ ）に制御ゲイン G_c を乗じた値を充電電圧Vから減算し、あらたな充電電圧Vとして（ステップS811A）、その充電電圧Vのデータを記憶部51に書き込む（ステップS813A）。

$$V = V - (E - E_t) \cdot G_c$$

[0399] 次に、レーザ制御部2は、充電電圧Vが所定の最大値 V_{max} 以上になったか否かを判断する（ステップS813A）。レーザ制御部2は、充電電圧Vが所定の最大値 V_{max} 以上になっていないと判断した場合（ステップS813A；N）には、ステップS801の処理に戻る。一方、充電電圧Vが所定の最大値 V_{max} 以上になったと判断した場合（ステップS813A；Y）には、エネルギー制御の処理を終了する。

[0400] 図46は、図45におけるステップS805AのサブルーチンAの一例を示している。

[0401] サブルーチンAでは、まず、レーザ制御部2は、目標パルスエネルギー E_t が複数の制御ゲイン G_{caa} , G_{cab} , G_{cac} のいずれに対応するか判断する（ステップS10A）。制御ゲイン G_{caa} , G_{cab} , G_{cac} は、上述の図36～図38に示すフローチャートに従って算出してもよい。

[0402] レーザ制御部2は、目標パルスエネルギー E_t が所定の値以下の場合、例えば $E_t \leq (E_{ta} + E_{tb}) / 2$ であると判断した場合には、制御ゲイン G_c の値を G_{caa} とする（ステップS11A）。

[0403] レーザ制御部2は、目標パルスエネルギー E_t が所定の範囲の場合、例えば $(E_{ta} + E_{tb}) / 2 < E_t \leq (E_{tb} + E_{tc}) / 2$ であると判断した場合には、制御ゲイン G_c の値を G_{cab} とする（ステップS12A）。

[0404] レーザ制御部2は、目標パルスエネルギー E_t が所定の値を超えた場合、例えば $(E_{tb} + E_{tc}) / 2 < E_t$ であると判断した場合には、制御ゲイン G_c の値を G_{cac} とする（ステップS13A）。

[0405] 図47は、図45におけるステップS804AのサブルーチンBの一例を示している。

[0406] サブルーチンBでは、まず、レーザ制御部2は、目標パルスエネルギー E_t が複数の制御ゲイン G_{cba} , G_{cbb} , G_{cbc} のいずれに対応するか判断する（ステップS10B）。

[0407] 制御ゲイン G_{cba} , G_{cbb} , G_{cbc} は、上述の図39～図41に示すフローチャートに従って算出してもよい。

[0408] レーザ制御部2は、目標パルスエネルギー E_t が所定の値以下の場合、例えば $E_t \leq (E_{ta} + E_{tb}) / 2$ であると判断した場合には、制御ゲイン G_c の値を G_{cba} とする（ステップS11B）。

[0409] レーザ制御部2は、目標パルスエネルギー E_t が所定の範囲の場合、例えば $(E_{ta} + E_{tb}) / 2 < E_t \leq (E_{tb} + E_{tc}) / 2$ であると判断した場合には、制御ゲイン G_c の値を G_{cbb} とする（ステップS12B）。

[0410] レーザ制御部2は、目標パルスエネルギー E_t が所定の値を超えた場合、例えば $(E_{tb} + E_{tc}) / 2 < E_t$ であると判断した場合には、制御ゲイン G_c の値を G_{cbc} とする（ステップS13B）。

[0411] 図48は、図45におけるステップS803AのサブルーチンCの一例を示している。

[0412] サブルーチンCでは、まず、レーザ制御部2は、目標パルスエネルギー E_t が複数の制御ゲイン G_{cca} , G_{ccb} , G_{ccc} のいずれに対応するか判断する（ステップS10C）。制御ゲイン G_{cca} , G_{ccb} , G_{ccc} は、上述の図42～図44に示すフローチャートに従って算出してもよい。

[0413] レーザ制御部2は、目標パルスエネルギー E_t が所定の値以下の場合、例えば $E_t \leq (E_{ta} + E_{tb}) / 2$ であると判断した場合には、制御ゲイン G_c の値を G_{cca} とする（ステップS11C）。

[0414] レーザ制御部2は、目標パルスエネルギー E_t が所定の範囲の場合、例えば $(E_{ta} + E_{tb}) / 2 < E_t \leq (E_{tb} + E_{tc}) / 2$ であると判断した場合には、制御ゲイン G_c の値を G_{ccb} とする（ステップS12C）。

[0415] レーザ制御部2は、目標パルスエネルギー E_t が所定の値を超えた場合、例えば $(E_{tb} + E_{tc}) / 2 < E_t$ であると判断した場合には、制御ゲイン G_c の値を G_{ccc} とする（ステップS13C）。

[0416] その他の動作は、上記比較例、実施形態1、実施形態2、又は実施形態3に係るレーザ装置と略同様であってもよい。

[0417] [5. 3 作用・効果]

実施形態4のレーザ装置によれば、制御ゲイン G_c を、複数のパルス繰り返し周波数 R_{pa} , R_{pb} , R_{pc} と目標パルスエネルギー E_t の値とに応じて複数、算出するようにしたので、パルス繰り返し周波数 R_p と目標パルスエネルギー E_t とを変更した場合におけるパルスエネルギー E の制御の精度が改善され得る。

[0418] なお、以上の実施形態4の説明では、レーザ制御部2が、3つのパルス繰り返し周波数 R_{pa} , R_{pb} , R_{pc} と3つの基準エネルギー E_{ta} , E_{tb}

、 $E_t c$ とに基づいて、9つの制御ゲイン G_c を算出する例を述べたが、パルス繰り返し周波数 R_p 及び基準エネルギー E_t の数はそれぞれ、2又は4以上の数であってもよい。算出する制御ゲイン G_c の数は、それらパルス繰り返し周波数 R_p 及び基準エネルギー E_t の数に応じて9以外の数であってもよい。

[0419] その他の作用・効果は、上記比較例、実施形態1、実施形態2、又は実施形態3に係るレーザ装置と略同様であってもよい。

[0420] <6. 実施形態5> (MOPシステムを含むレーザ装置)

次に、本開示の実施形態5に係るレーザ装置について説明する。なお、以下では上記比較例、実施形態1、実施形態2、実施形態3、又は実施形態4に係るレーザ装置の構成要素と略同じ部分については、同一符号を付し、適宜説明を省略する。

[0421] [6. 1 構成]

上記比較例及び、実施形態1～4では、シングルチャンバ方式のレーザ装置を例に説明したが、実施形態1～4の技術は、シングルチャンバ方式以外のレーザ装置にも適用し得る。例えば、実施形態1～4の技術は、マスタオシレータ(MO)と増幅器とを含むレーザシステムに適用し得る。例えば、マスタオシレータと、増幅器としてのパワーオシレータ(PO)とを含むMOPシステムに適用してもよい。

[0422] 図49は、本開示の実施形態5に係るレーザ装置1Aの一構成例を概略的に示している。

[0423] 実施形態5に係るレーザ装置1Aは、マスタオシレータ6と、パワーオシレータ7とを含んでいる。マスタオシレータ6は、レーザ光の波長やスペクトル線幅等の光品位を決定する。パワーオシレータ7は、マスタオシレータ6から出力されたパルスレーザ光 L_p を増幅する。パワーオシレータ7は、増幅したパルスレーザ光 L_p を露光装置4に向けて出力する。

[0424] マスタオシレータ6とパワーオシレータ7との間には、マスタオシレータ6から出力されたパルスレーザ光 L_p をパワーオシレータ7に導くための光

学系として、反射ミラー 37, 38 が配置されていてもよい。

- [0425] マスタオシレータ 6 は、比較例 2 に係るレーザ装置 1 と略同様に、レーザ共振器と、レーザチャンバ 20 と、パルスパワーモジュール 28 と、パルスエネルギー検出器 30 とを備えていてもよい。
- [0426] パワーオシレータ 7 は、レーザチャンバ 20 A と、パルスパワーモジュール 28 A と、パルスエネルギー検出器 30 A と、出力結合器としての出力結合ミラー 35 A と、部分反射ミラー 36 とを備えていてもよい。
- [0427] レーザチャンバ 20 A は、レーザチャンバ 20 と略同様に、レーザ光を透過するウインドウ 21 A, 22 A と、一对の放電電極 23 A, 24 A と、圧力センサ 34 A とを含んでいてもよい。
- [0428] レーザチャンバ 20 A は、レーザチャンバ 20 と略同様に、図示しないクロスフローファン、モータ、及び熱交換器等を含んでいてもよい。
- [0429] レーザチャンバ 20 A は、一对の放電電極 23 A, 24 A の間に印加された印加電圧に応じたパルスエネルギー E を有するパルスレーザ光 L_p を、設定された所定のパルス繰り返し周波数 R_p で出射する。一对の放電電極 23 A, 24 A の間に印加される印加電圧は、充電器 90 による充電電圧 V に応じた電圧であってもよい。
- [0430] 出力結合ミラー 35 A と部分反射ミラー 36 とにはそれぞれ、パルスレーザ光 L_p の一部を反射し、一部を透過する多層膜がコートされていてもよい。出力結合ミラー 35 A と部分反射ミラー 36 とによって、パワーオシレータ 7 のレーザ共振器が構成されてもよい。レーザ共振器の光路上に一对の放電電極 23 A, 24 A の放電領域が配置されるように、レーザチャンバ 20 A が配置されてもよい。
- [0431] パルスエネルギー検出器 30 A は、出力結合ミラー 35 A から出力されたパルスレーザ光 L_p の光路上に設けられ、パルスレーザ光 L_p のパルスエネルギー E を検出する。パルスエネルギー検出器 30 A は、ビームスプリッタ 31 A と、集光レンズ 32 A と、パルスエネルギー E を検出する光センサ 33 A とを含んでいてもよい。

- [0432] ビームスプリッタ 31 A は、出力結合ミラー 35 A から出力されたパルスレーザ光 L_p の光路上に配置されていてもよい。集光レンズ 32 A は、ビームスプリッタ 31 A で反射されたパルスレーザ光 L_p の光路上に配置されていてもよい。光センサ 33 A は、集光レンズ 32 A の集光位置の近傍に配置されていてもよい。
- [0433] パルスパワーモジュール 28 A は、一对の放電電極 23 A, 24 A を放電させるためのスイッチ 29 A を含み、図示しない電気絶縁部材を介して、一方の放電電極 23 A と接続されていてもよい。他方の放電電極 24 A は、接地されたレーザチャンバ 20 A と接続されていてもよい。パルスパワーモジュール 28 A は、図示しない充電コンデンサを含んでいてもよい。
- [0434] 充電器 90 とパルスパワーモジュール 28 A は、パルスパワーモジュール 28 A の図示しない充電コンデンサを充電するように、互いに電氣的に接続されていてもよい。充電器 90 は、充電電圧 V を示すデータをレーザ制御部 2 から受信してもよい。充電電圧 V は、図示しない充電コンデンサを充電する電圧であってもよい。充電電圧 V は、パルスエネルギー検出器 30 A によって計測されたパルスエネルギー E に基づいて、レーザ制御部 2 によって制御されてもよい。充電電圧 V は、一对の放電電極 23 A, 24 A の間に印加する印加電圧に対応した電圧であってもよい。
- [0435] レーザ制御部 2 には、露光装置 4 の露光装置コントローラ 5 から発振トリガ信号 S_{tr} と目標パルスエネルギー E_t とが入力されてもよい。レーザ制御部 2 とパルスパワーモジュール 28 A は、発振トリガ信号 S_{tr} に同期して、スイッチ 29 A がオン／オフされるように互いに電氣的に接続されていてもよい。
- [0436] レーザ制御部 2 は、目標パルスエネルギー E_t と、マスタオシレータ 6 のパルスエネルギー検出器 30 によって検出されたパルスエネルギー E とに基づいて、マスタオシレータ 6 における一对の放電電極 23, 24 間に印加する印加電圧を制御する電圧制御部であってもよい。また、レーザ制御部 2 は、目標パルスエネルギー E_t と、パルスエネルギー検出器 30 によって検出されたパル

スエネルギーEとに基づいて、パワーオシレータ7のパルスエネルギー検出器30Aによって検出されたパルスエネルギーEとに基づいて、パワーオシレータ7における一对の放電電極23A, 24Aの間に印加する印加電圧を制御する電圧制御部であってもよい。

[0437] レーザ制御部2は、マスタオシレータ6とパワーオシレータ7とのそれぞれにおける制御ゲイン G_c を算出するゲイン算出部であってもよい。レーザ制御部2は、マスタオシレータ6とパワーオシレータ7とのそれぞれに対して、それぞれの制御ゲイン G_c を用いて充電電圧Vを制御することにより、マスタオシレータ6とパワーオシレータ7とのそれぞれから出力されるパルスレーザ光 L_p のエネルギー制御を行う。

[0438] レーザガス供給装置91は、レーザチャンバ20とレーザチャンバ20Aとのそれぞれの内部にレーザガスを供給する図示しないガスボンベと、ガスボンベからのレーザガスの供給を制御する流量制御弁としての図示しない供給バルブとを含んでいてもよい。

[0439] レーザガス排気装置92は、レーザチャンバ20とレーザチャンバ20Aとのそれぞれの内部のレーザガスを排気できるように構成されていてもよい。レーザガス排気装置92は、図示しない排気バルブと、図示しない排気ポンプとを含んでいてもよい。

[0440] その他の構成は、上記比較例、実施形態1、実施形態2、実施形態3、又は実施形態4に係るレーザ装置と略同様であってもよい。

[0441] [6. 2 動作]

マスタオシレータ6とパワーオシレータ7とのそれぞれについて、上記実施形態1、実施形態2、実施形態3、又は実施形態4に係るレーザ装置と略同様にして制御ゲイン G_c を算出してもよい。マスタオシレータ6とパワーオシレータ7とのそれぞれについて算出された制御ゲイン G_c に基づいて、マスタオシレータ6とパワーオシレータ7とのそれぞれについて、上記実施形態1、実施形態2、実施形態3、又は実施形態4に係るレーザ装置と略同様にしてエネルギー制御を実施してもよい。

[0442] その他の動作は、上記比較例、実施形態 1、実施形態 2、実施形態 3、又は実施形態 4 に係るレーザ装置と略同様であってもよい。

[0443] [6. 3 作用・効果]

実施形態 5 のレーザ装置によれば、マスタオシレータと増幅器とを含むレーザシステムにおいて、マスタオシレータと増幅器とのそれぞれにおけるパルスエネルギー E の制御の精度が改善され得る。

[0444] その他の作用・効果は、上記比較例、実施形態 1、実施形態 2、実施形態 3、又は実施形態 4 に係るレーザ装置と略同様であってもよい。

[0445] < 7. その他 >

上記の説明は、制限ではなく単なる例示を意図している。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。

[0446] 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不定冠詞「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] 一対の電極を含み、前記一対の電極間に印加された印加電圧に応じたパルスエネルギーを有するパルスレーザ光を、複数のパルス繰り返し周波数における各周波数で出射するレーザチャンバと、
前記パルスレーザ光の光路上に設けられ、前記パルスレーザ光のパルスエネルギーを検出するエネルギー検出器と、
目標パルスエネルギーと前記エネルギー検出器によって検出されたパルスエネルギーとに基づいて、前記印加電圧を制御する電圧制御部と、
前記目標パルスエネルギーを、基準エネルギーを変動中心として、前記複数のパルス繰り返し周波数のそれぞれに応じた変調周波数で周期的に変動させるパルスエネルギー制御部と
を備える
レーザ装置。

[請求項2] 請求項1に記載のレーザ装置であって、
前記複数のパルス繰り返し周波数は、第1のパルス繰り返し周波数と、第2のパルス繰り返し周波数とを含み、
前記変調周波数は、前記第1のパルス繰り返し周波数に応じた第1の変調周波数と、前記第2のパルス繰り返し周波数に応じた第2の変調周波数とを含み、
前記第1のパルス繰り返し周波数を R_{pa} 、前記第2のパルス繰り返し周波数を R_{pb} 、
前記第1の変調周波数を F_{ma} 、前記第2のパルス繰り返し周波数に応じた第2の変調周波数を F_{mb} としたとき、
 $R_{pa} > R_{pb}$
 $F_{ma} > F_{mb}$
を満たす。

[請求項3] 請求項1に記載のレーザ装置であって、
前記複数のパルス繰り返し周波数のそれぞれに対応する複数の制御

ゲインを算出するゲイン算出部、をさらに備える。

[請求項4]

請求項3に記載のレーザ装置であって、

前記電圧制御部は、前記目標パルスエネルギー、及び前記エネルギー検出器によって検出された前記パルスエネルギーに加えてさらに、前記複数の制御ゲインに基づいて、前記印加電圧を制御する。

[請求項5]

請求項3に記載のレーザ装置であって、

前記ゲイン算出部は、

前記目標パルスエネルギーを前記変調周波数で周期的に変動させた場合における前記パルスエネルギーの振幅成分と前記印加電圧の振幅成分とを算出し、

前記パルスエネルギーの振幅成分と前記印加電圧の振幅成分とに基づいて、前記複数の制御ゲインを算出する。

[請求項6]

請求項1に記載のレーザ装置であって、

前記パルスエネルギー制御部は、前記目標パルスエネルギーを、複数の前記基準エネルギーのそれぞれを変動中心として周期的に変動させる。

[請求項7]

請求項6に記載のレーザ装置であって、

前記複数の基準エネルギーは、第1の基準エネルギーと、第2の基準エネルギーとを含み、

前記複数のパルス繰り返し周波数は、第1のパルス繰り返し周波数と、第2のパルス繰り返し周波数とを含み、

前記変調周波数は、前記第1のパルス繰り返し周波数に応じた第1の変調周波数と、前記第2のパルス繰り返し周波数に応じた第2の変調周波数とを含み、

前記第1の基準エネルギーを $E_{t a}$ 、前記第2の基準エネルギー $E_{t b}$ 、

前記第1のパルス繰り返し周波数を $R_{p a}$ 、前記第2のパルス繰り返し周波数を $R_{p b}$ 、

前記第1の変調周波数を $F_{m a}$ 、前記第2のパルス繰り返し周波数

に応じた第2の変調周波数を F_{mb} としたとき、

$$E_{ta} < E_{tb}$$

$$R_{pa} > R_{pb}$$

$$F_{ma} > F_{mb}$$

を満たす。

[請求項8] 請求項6に記載のレーザ装置であって、
前記複数の基準エネルギーのそれぞれに対応する複数の制御ゲインを算出するゲイン算出部、をさらに備える。

[請求項9] 請求項8に記載のレーザ装置であって、
前記電圧制御部は、前記目標パルスエネルギー、及び前記エネルギー検出器によって検出された前記パルスエネルギーに加えてさらに、前記複数の制御ゲインに基づいて、前記印加電圧を制御する。

[請求項10] 請求項8に記載のレーザ装置であって、
前記ゲイン算出部は、
前記目標パルスエネルギーを前記複数の基準エネルギーのそれぞれを変動中心として前記変調周波数で周期的に変動させた場合における前記パルスエネルギーの振幅成分と前記印加電圧の振幅成分とを算出し、
前記パルスエネルギーの振幅成分と前記印加電圧の振幅成分とに基づいて、前記複数の制御ゲインを算出する。

[請求項11] 一対の電極を含み、前記一対の電極間に印加された印加電圧に応じたパルスエネルギーを有するパルスレーザ光を、所定のパルス繰り返し周波数で出射するレーザチャンバと、
前記パルスレーザ光の光路上に設けられ、前記パルスレーザ光のパルスエネルギーを検出するエネルギー検出器と、
目標パルスエネルギーと前記エネルギー検出器によって検出された前記パルスエネルギーとに基づいて、前記印加電圧を制御する電圧制御部と、
前記目標パルスエネルギーを、複数の基準エネルギーのそれぞれを変動

中心として、所定の変調周波数で周期的に変動させるパルスエネルギー制御部と

を備える

レーザ装置。

[請求項12] 請求項11に記載のレーザ装置であって、
前記複数の基準エネルギーのそれぞれに対応する複数の制御ゲインを算出するゲイン算出部、をさらに備える。

[請求項13] 請求項12に記載のレーザ装置であって、
前記電圧制御部は、前記目標パルスエネルギー、及び前記エネルギー検出器によって検出された前記パルスエネルギーに加えてさらに、前記複数の制御ゲインに基づいて、前記印加電圧を制御する。

[請求項14] 請求項12に記載のレーザ装置であって、
前記ゲイン算出部は、
前記目標パルスエネルギーを前記複数の基準エネルギーのそれぞれを変動中心として前記所定の変調周波数で周期的に変動させた場合における前記パルスエネルギーの振幅成分と前記印加電圧の振幅成分とを算出し、
前記パルスエネルギーの振幅成分と前記印加電圧の振幅成分とに基づいて、前記複数の制御ゲインを算出する。

[請求項15] 一対の電極を含み、前記一対の電極間に印加された印加電圧に応じたパルスエネルギーを有するパルスレーザ光を、所定のパルス繰り返し周波数で出射するレーザチャンバと、
前記パルスレーザ光の光路上に設けられ、前記パルスレーザ光のパルスエネルギーを検出するエネルギー検出器と、
目標パルスエネルギーと前記エネルギー検出器によって検出された前記パルスエネルギーとに基づいて、前記印加電圧を制御する電圧制御部と、
前記目標パルスエネルギーを、複数の基準エネルギーのそれぞれを変動

中心として、前記複数の基準エネルギーのそれぞれに応じた変調周波数で周期的に変動させるパルスエネルギー制御部と

を備える

レーザ装置。

[請求項16]

請求項15に記載のレーザ装置であって、

前記複数の基準エネルギーは、第1の基準エネルギーと、第2の基準エネルギーとを含み、

前記変調周波数は、前記第1の基準エネルギーに応じた第1の変調周波数と、前記第2の基準エネルギーに応じた第2の変調周波数を含み、

前記第1の基準エネルギーを E_{ta} 、前記第2の基準エネルギー E_{tb}

、

前記第1のパルス繰り返し周波数を R_{pa} 、前記第2のパルス繰り返し周波数を R_{pb} 、

前記第1の変調周波数を F_{ma} 、前記第2のパルス繰り返し周波数に応じた第2の変調周波数を F_{mb} としたとき、

$E_{ta} < E_{tb}$

$F_{ma} > F_{mb}$

を満たす。

[請求項17]

請求項15に記載のレーザ装置であって、

前記複数の基準エネルギーのそれぞれに対応する複数の制御ゲインを算出するゲイン算出部、をさらに備える。

[請求項18]

請求項17に記載のレーザ装置であって、

前記電圧制御部は、前記目標パルスエネルギー、及び前記エネルギー検出器によって検出された前記パルスエネルギーに加えてさらに、前記複数の制御ゲインに基づいて、前記印加電圧を制御する。

[請求項19]

請求項17に記載のレーザ装置であって、

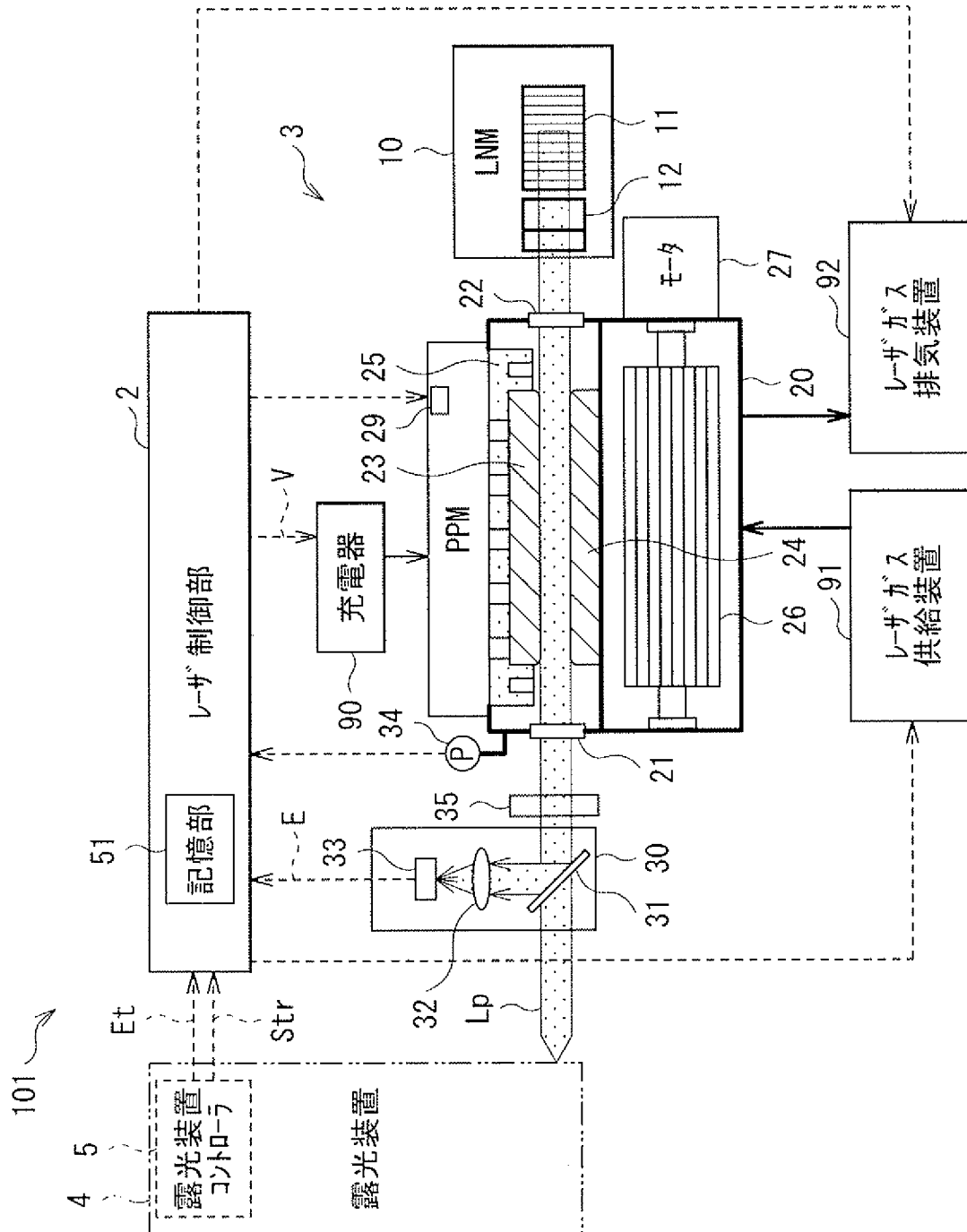
前記ゲイン算出部は、

前記目標パルスエネルギーを前記複数の基準エネルギーのそれぞれを変

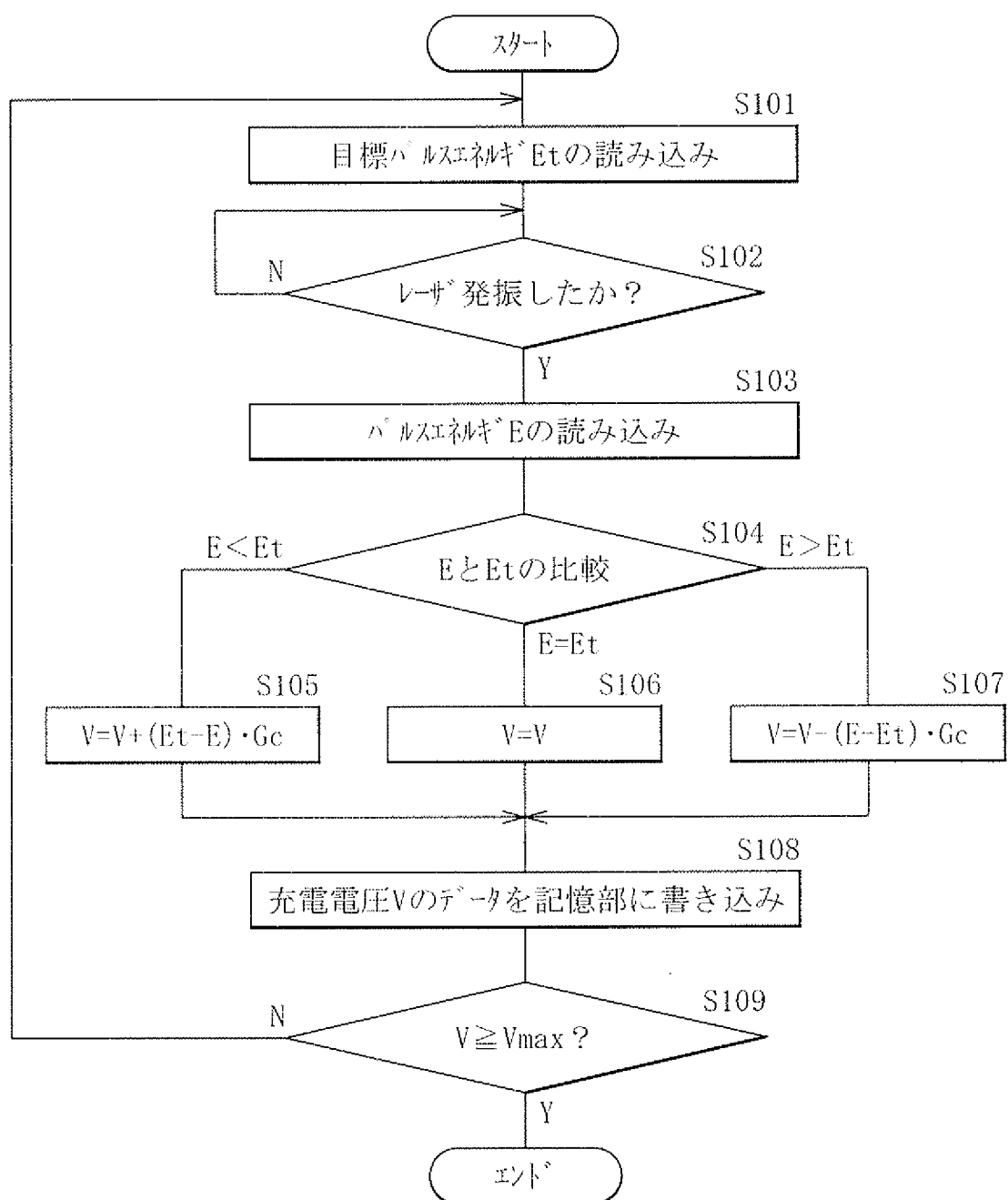
動中心として前記変調周波数で周期的に変動させた場合における前記パルスエネルギーの振幅成分と前記印加電圧の振幅成分とを算出し、

前記パルスエネルギーの振幅成分と前記印加電圧の振幅成分とに基づいて、前記複数の制御ゲインを算出する。

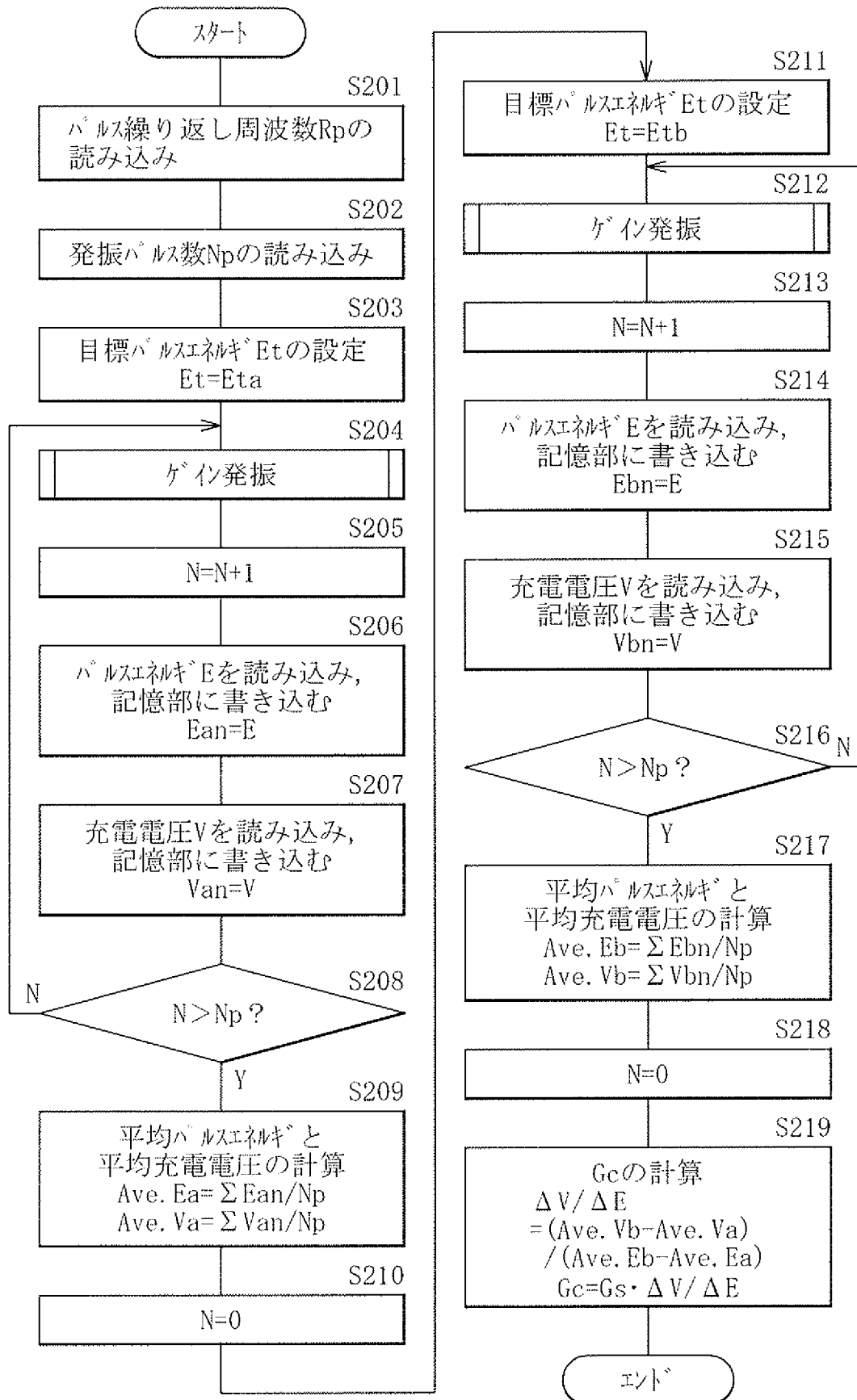
[図1]



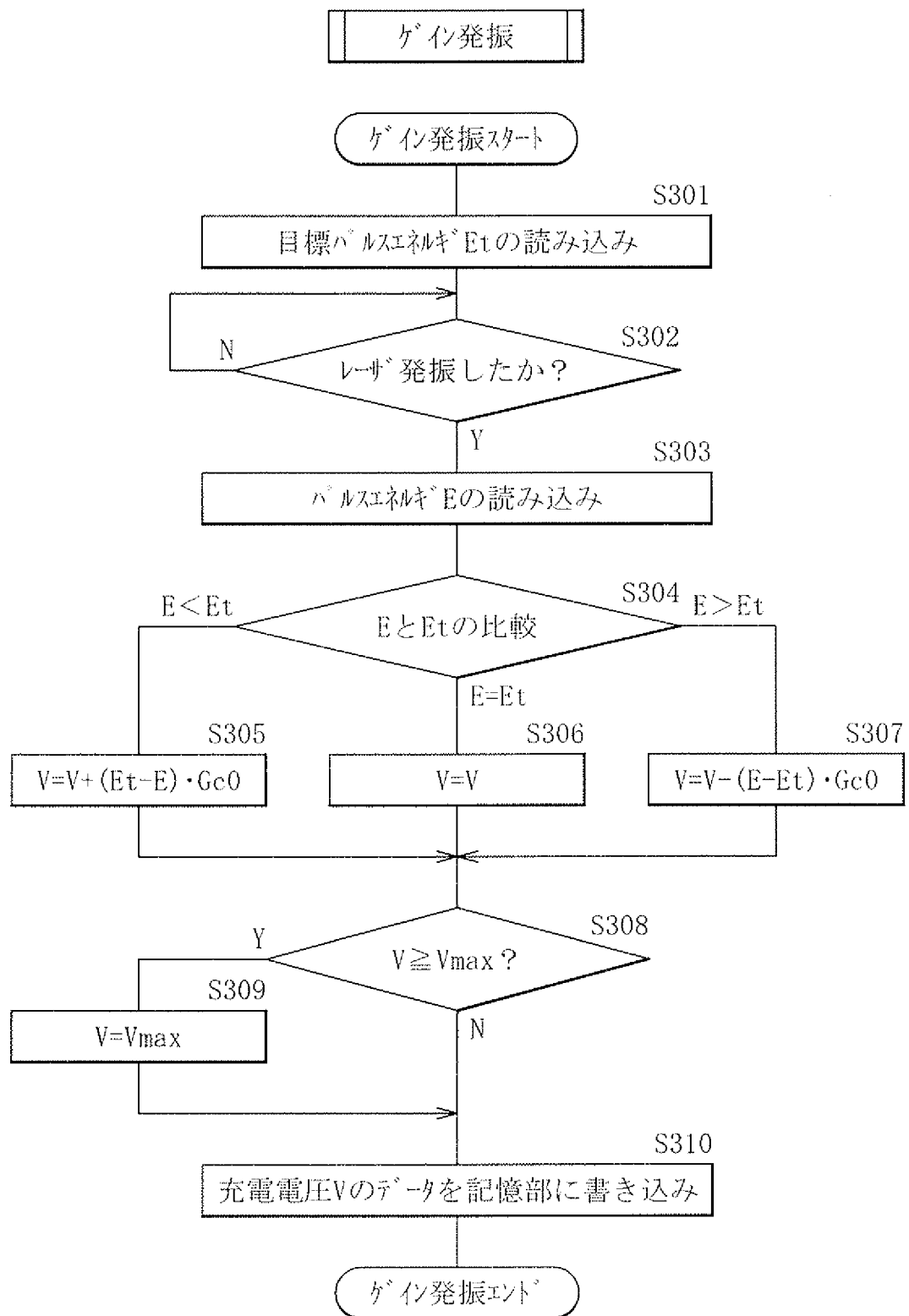
[図2]



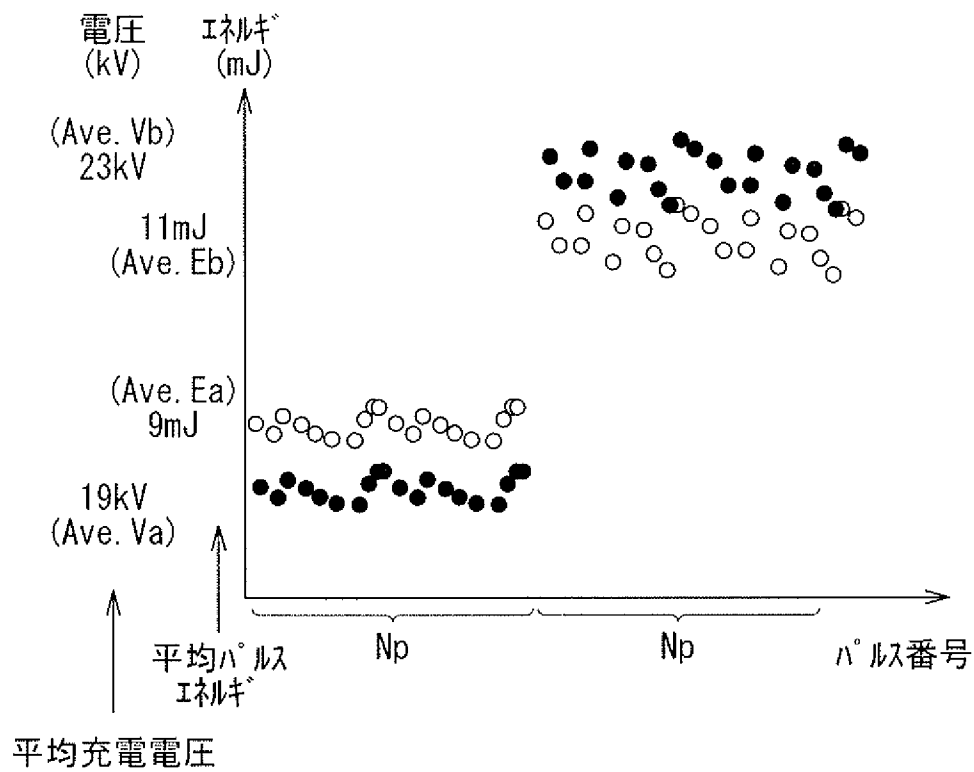
[図3]



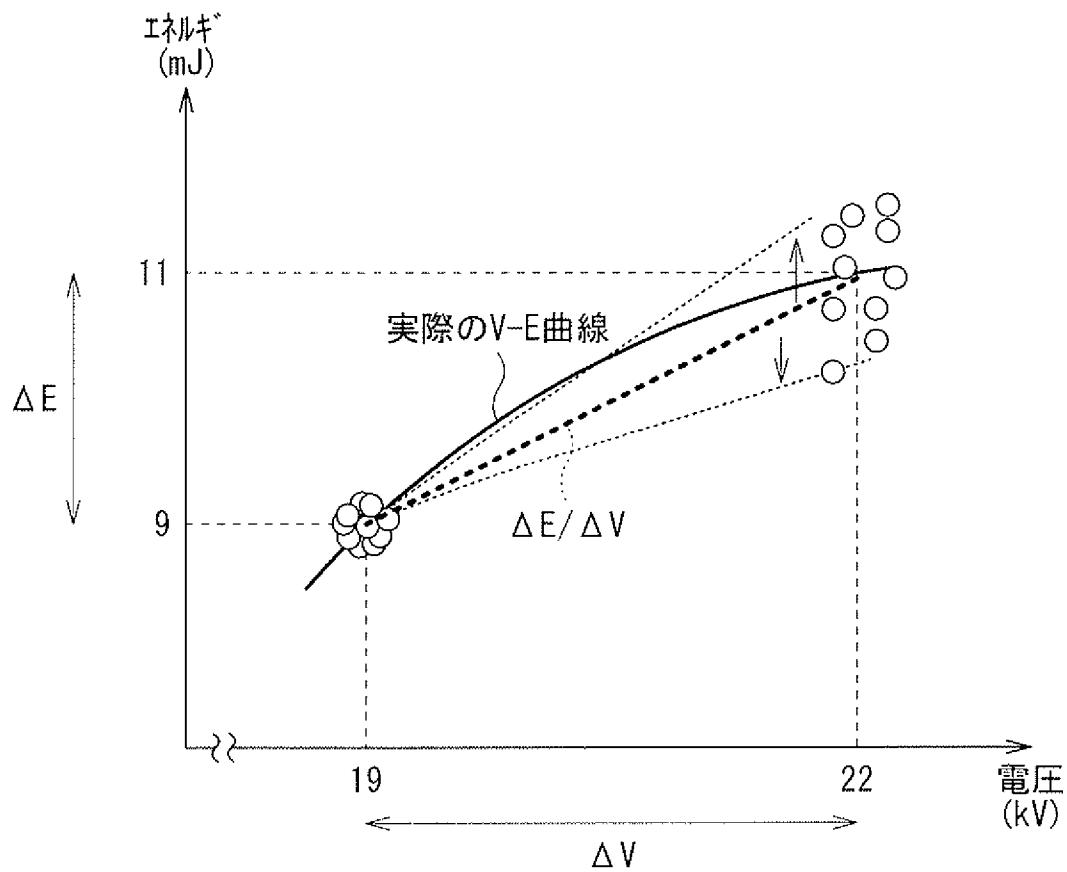
[図4]



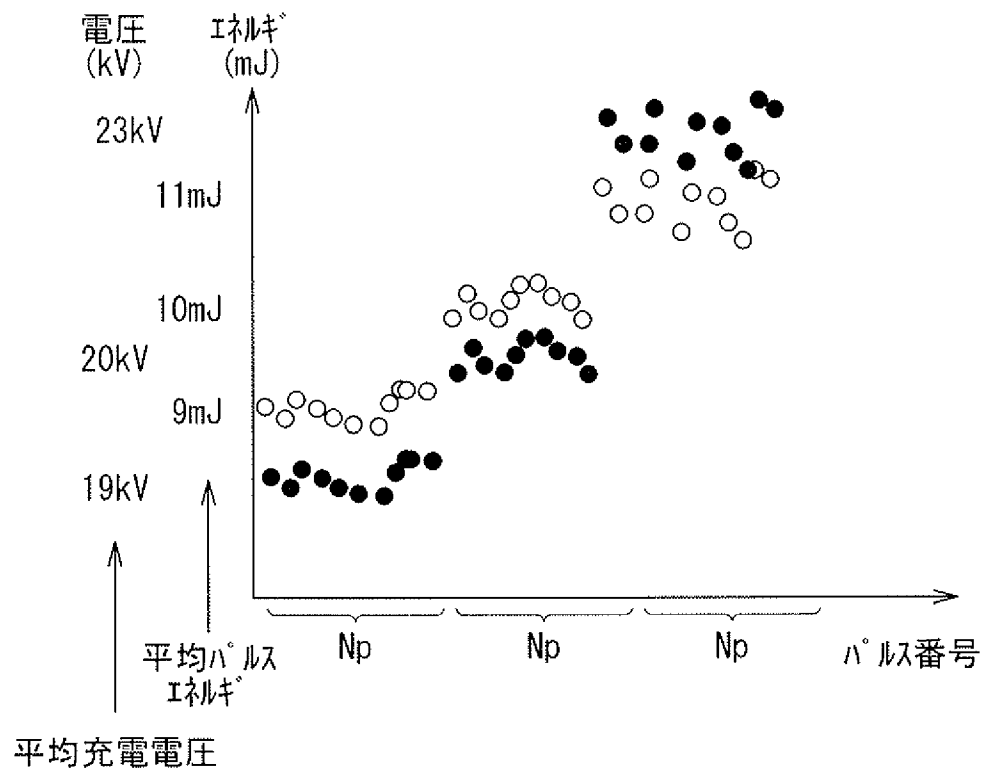
[図5]



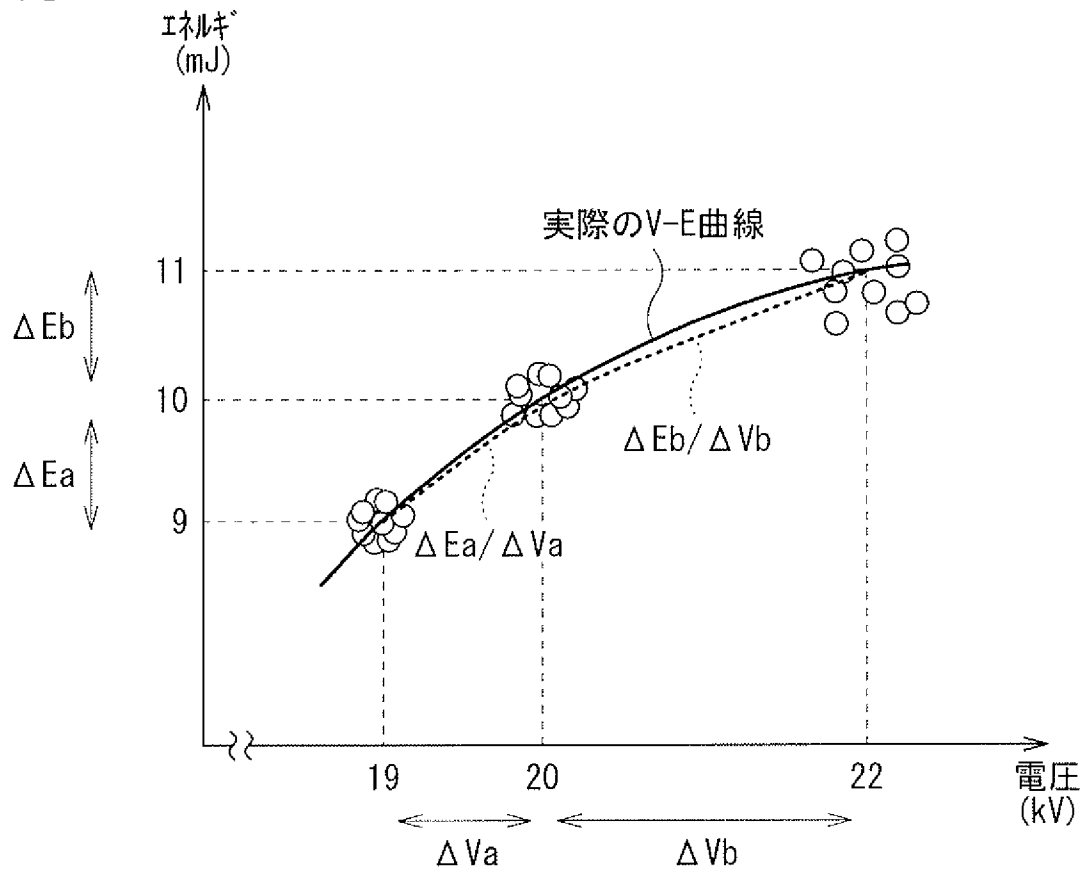
[図6]



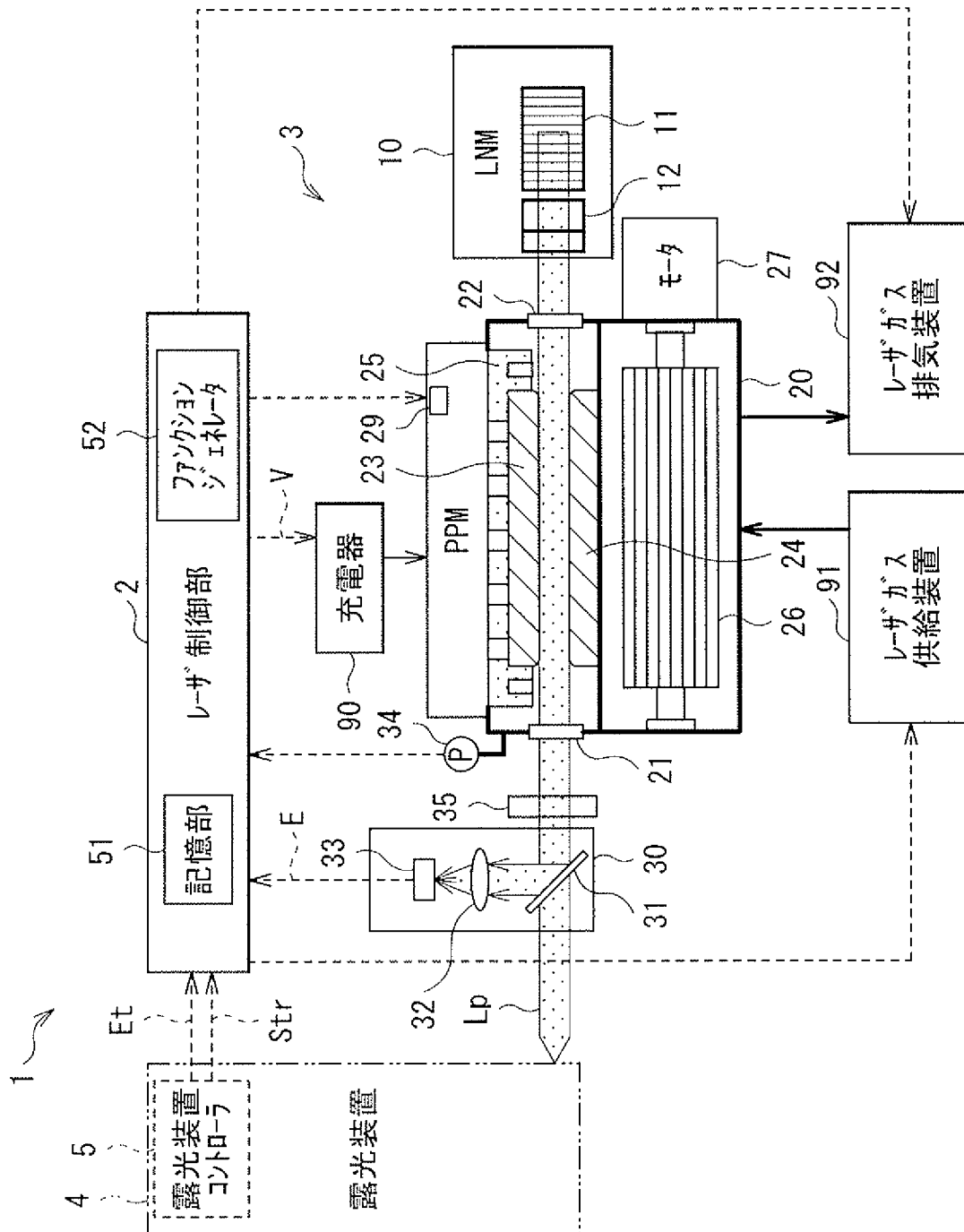
[図7]



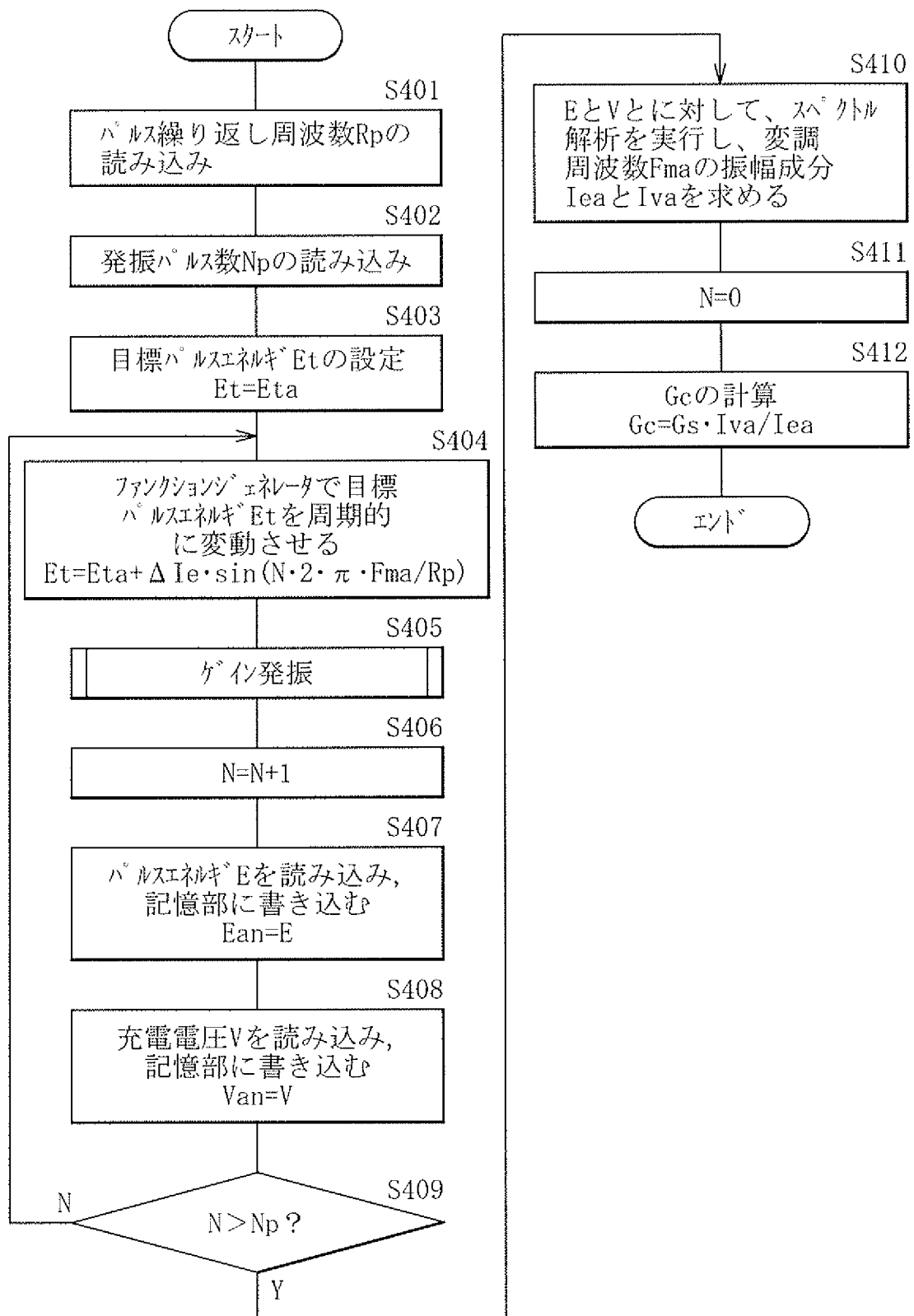
[図8]



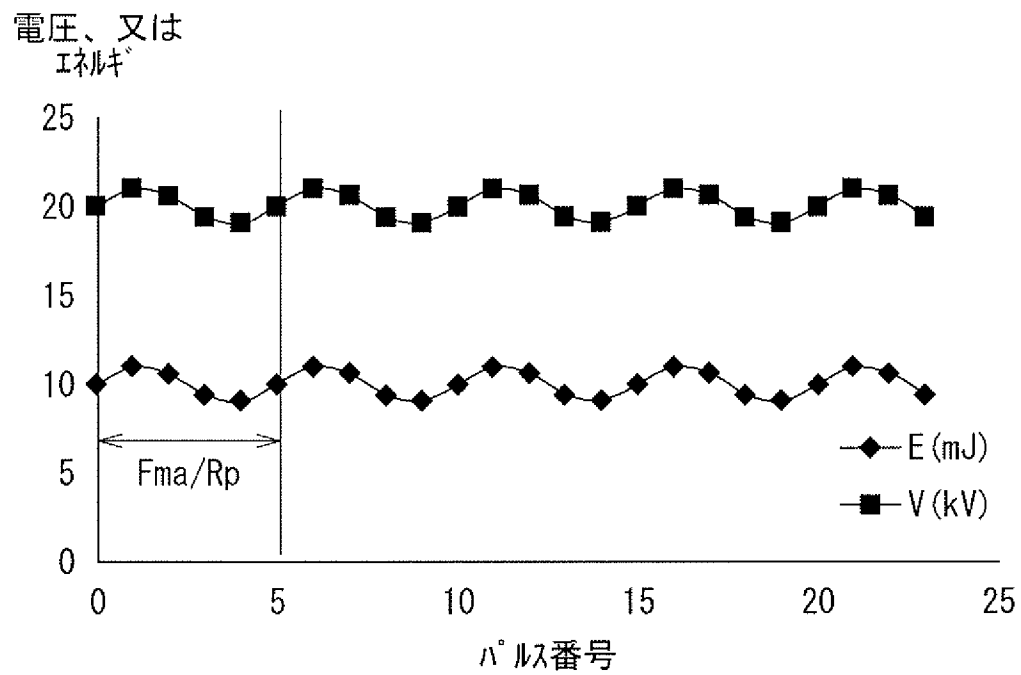
[図9]



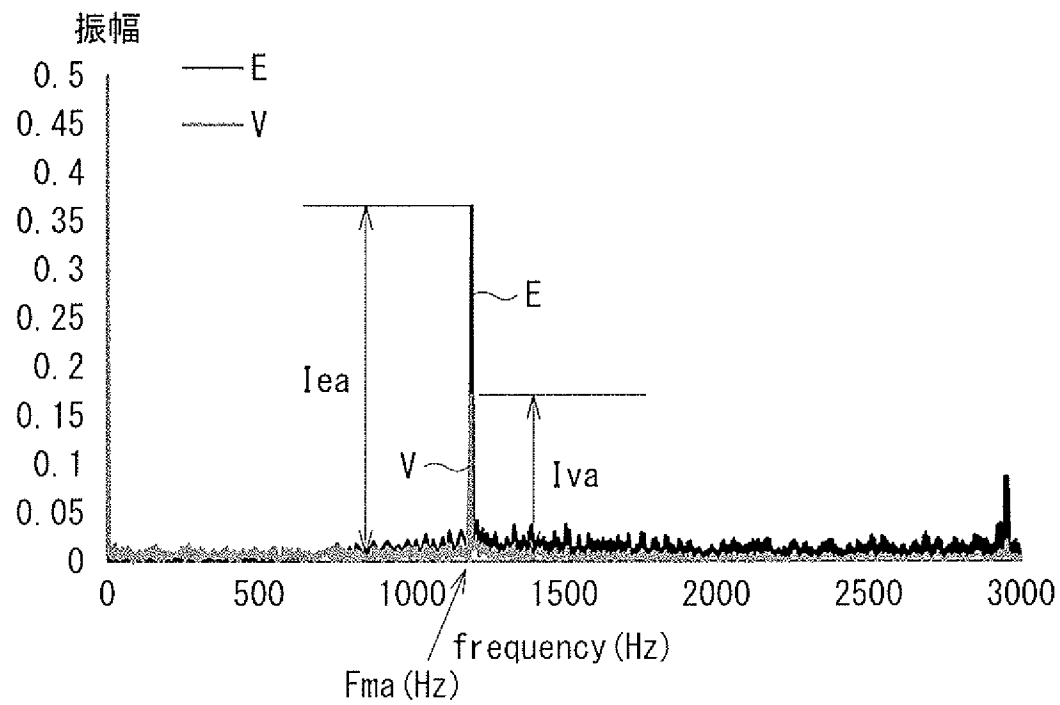
[図10]



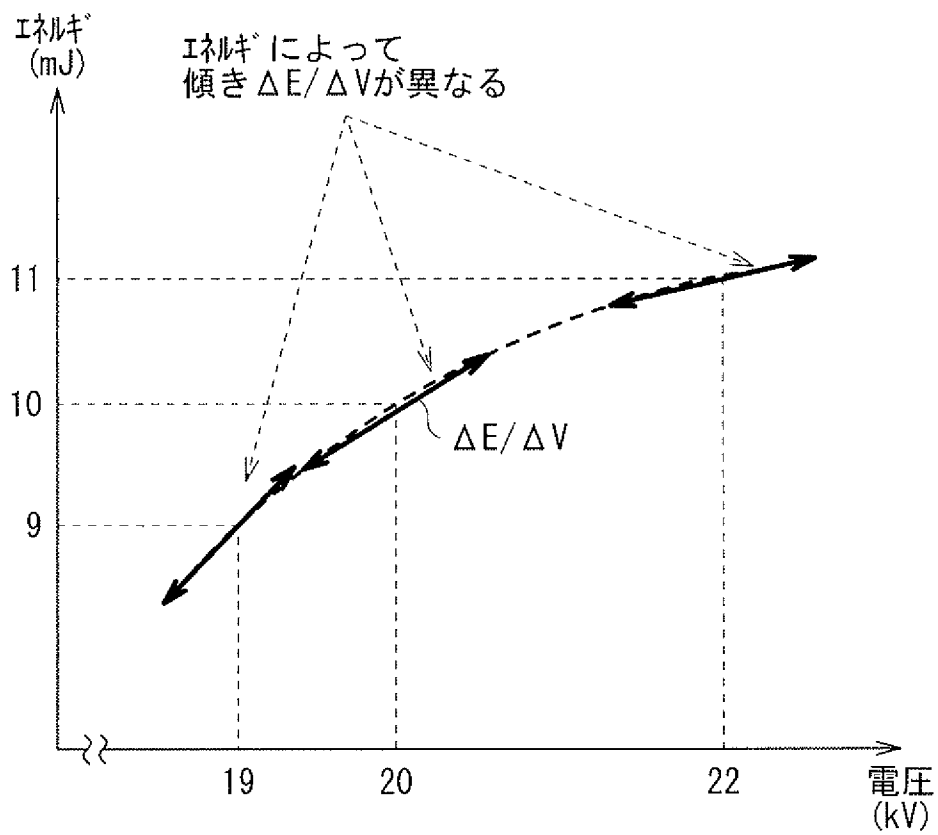
[図11]



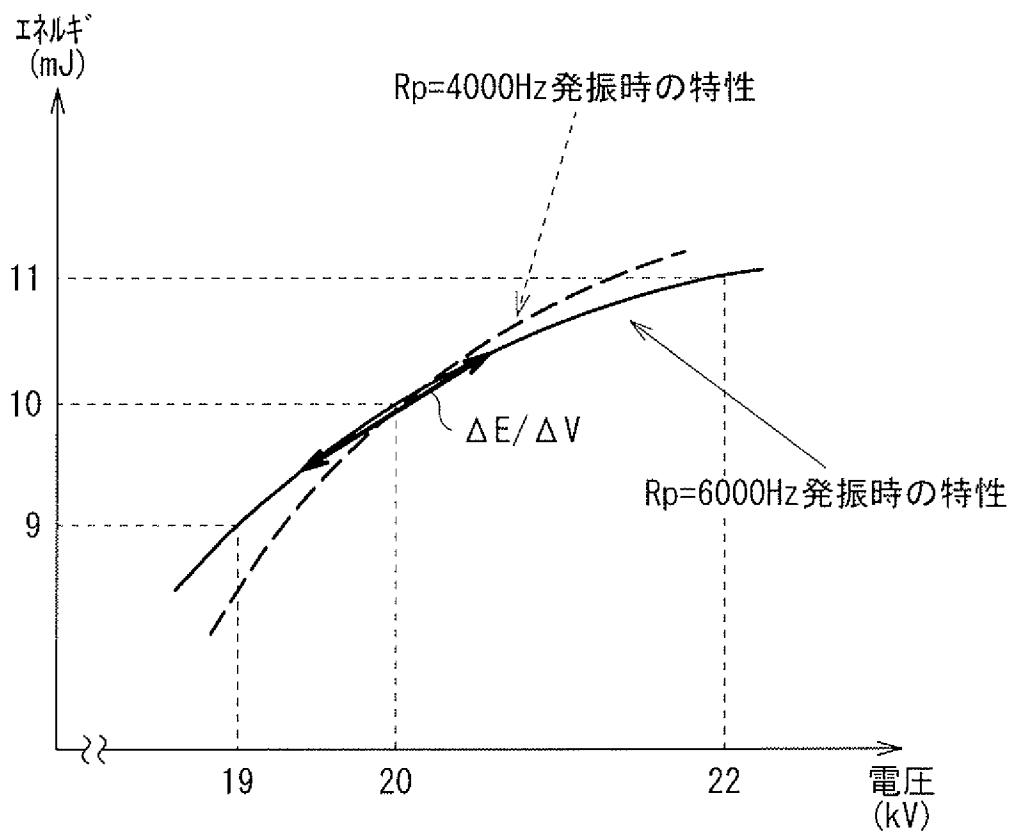
[図12]



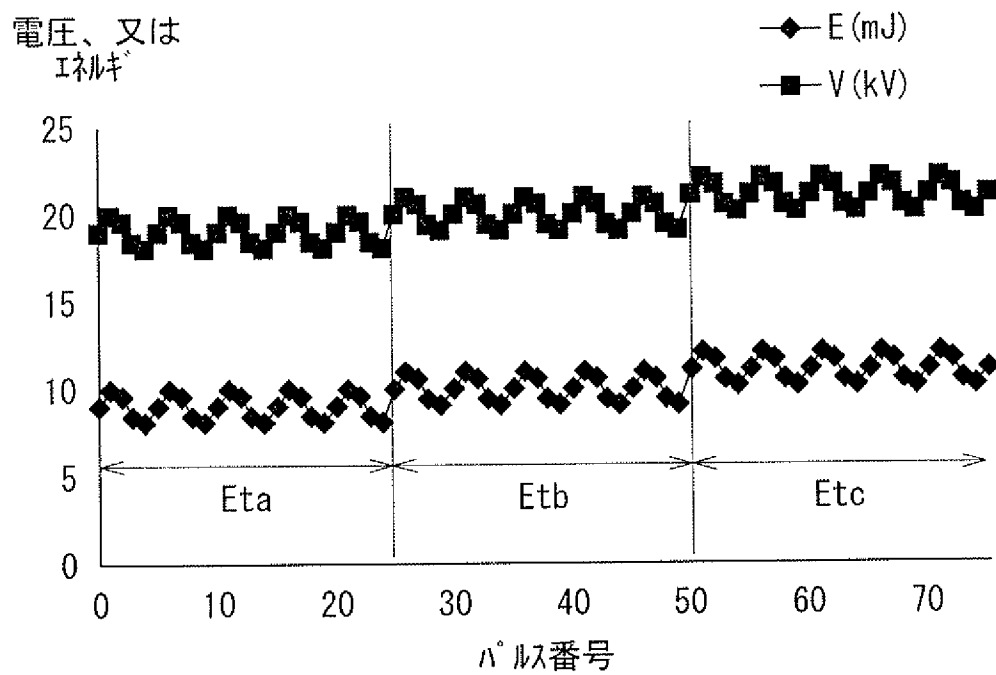
[図13]



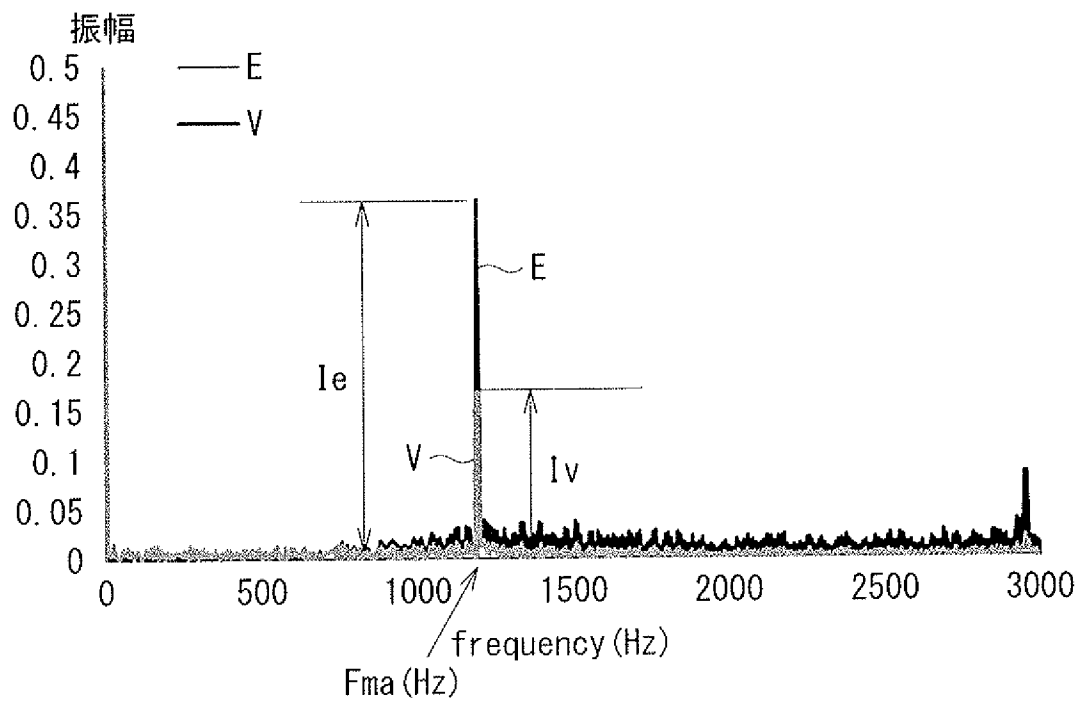
[図14]



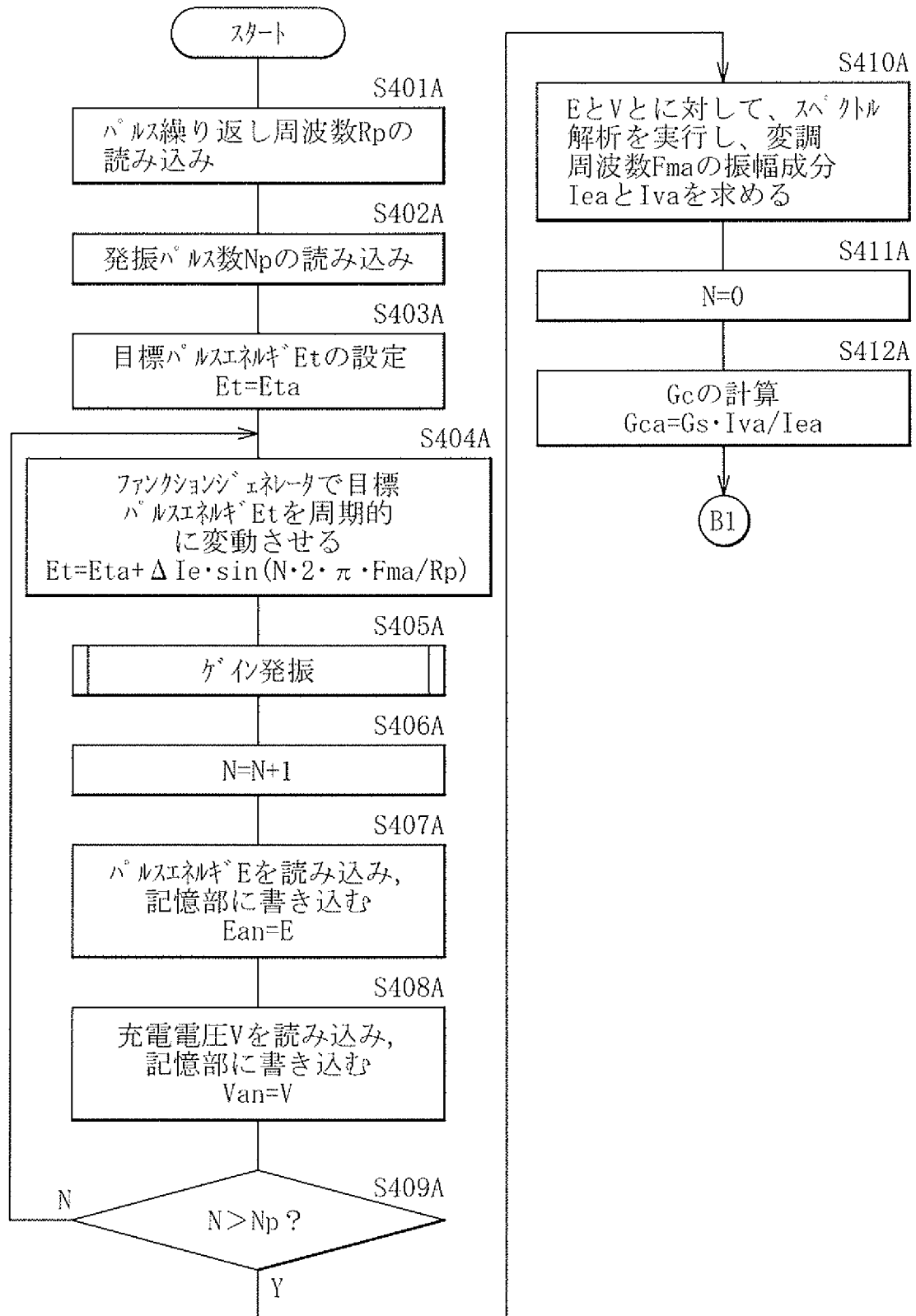
[図15]



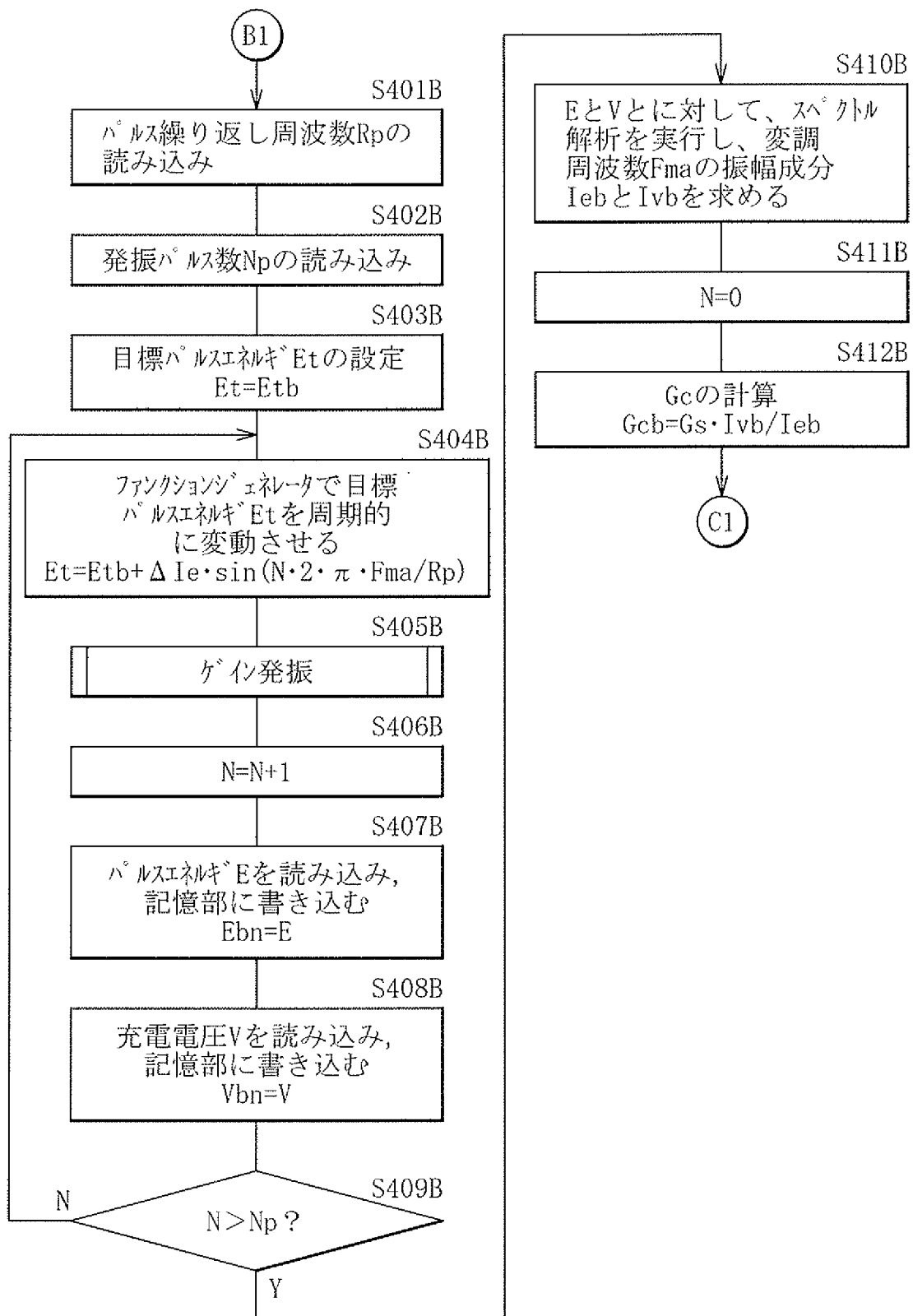
[図16]



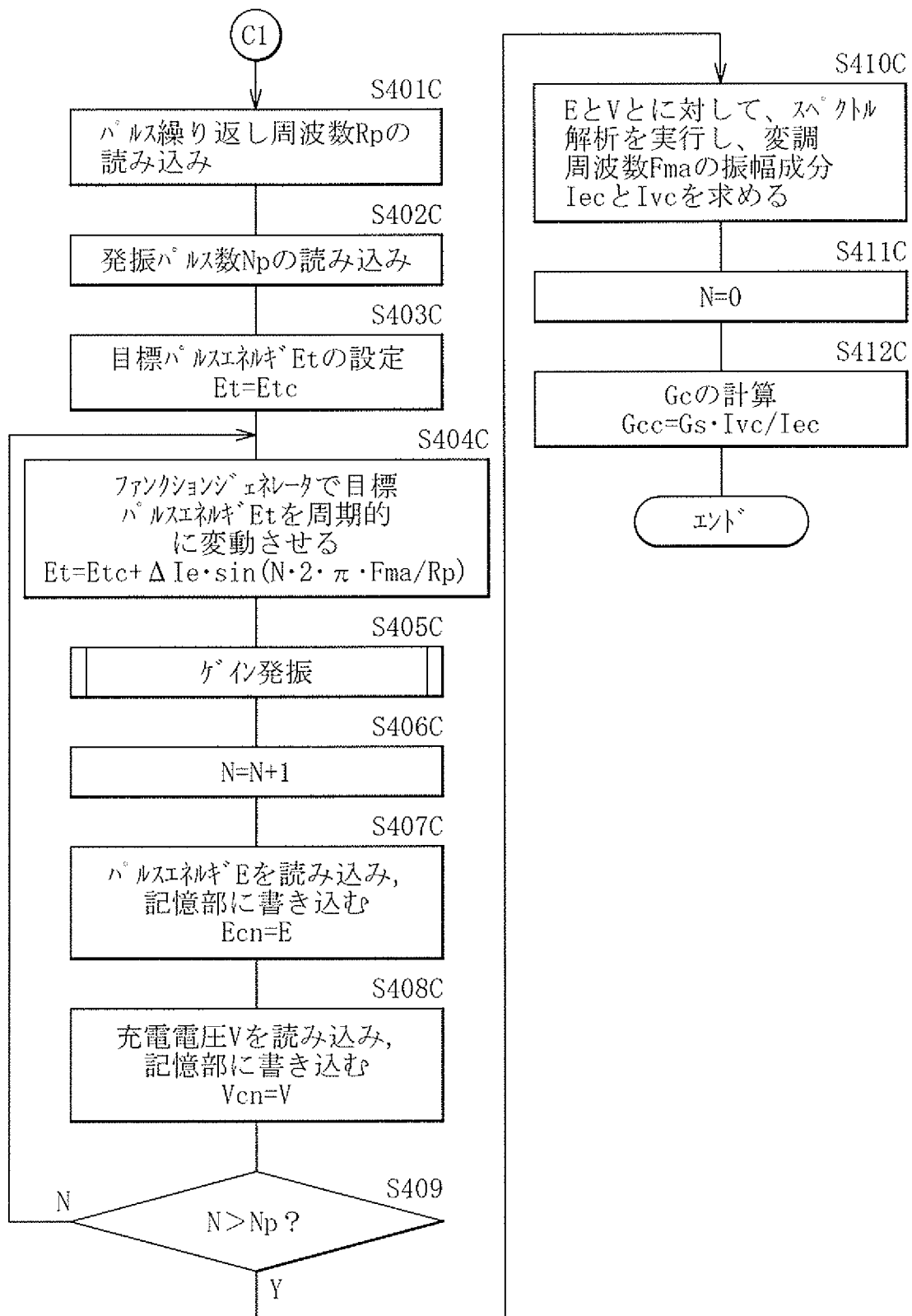
[図17]



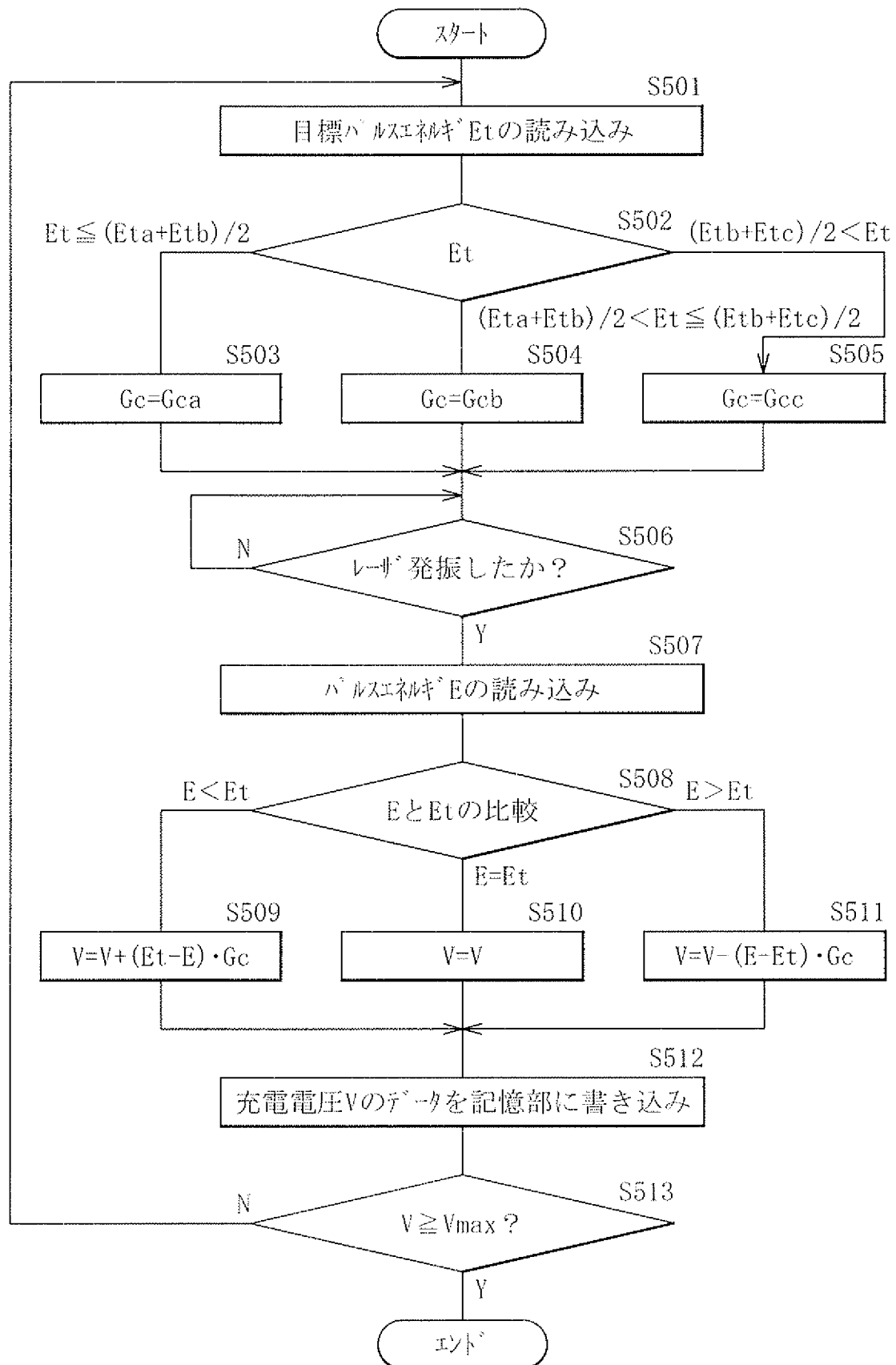
[図18]



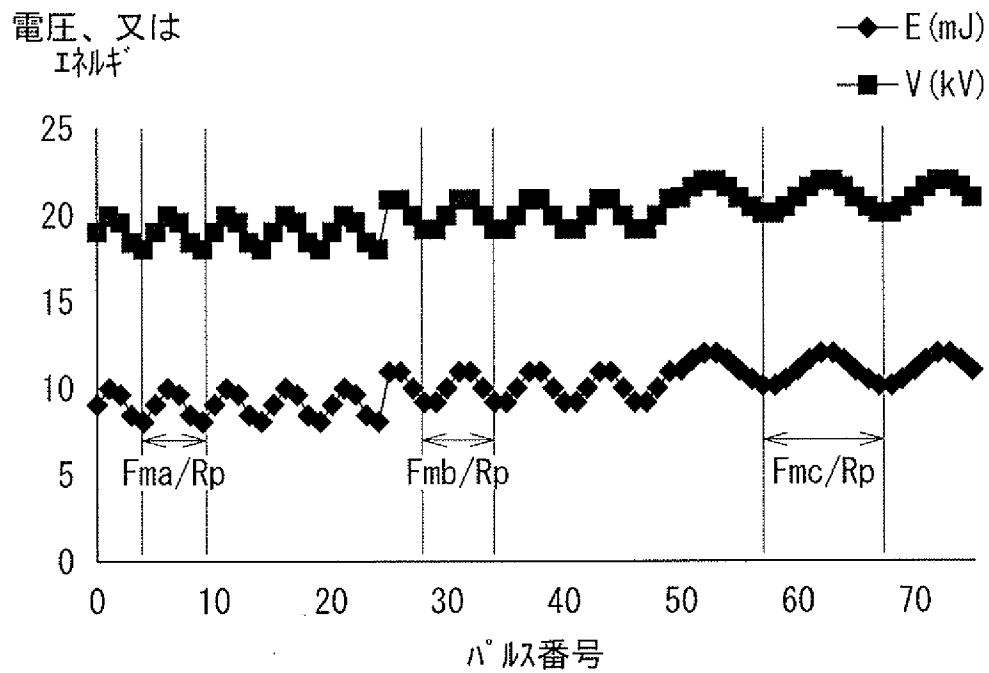
[図19]



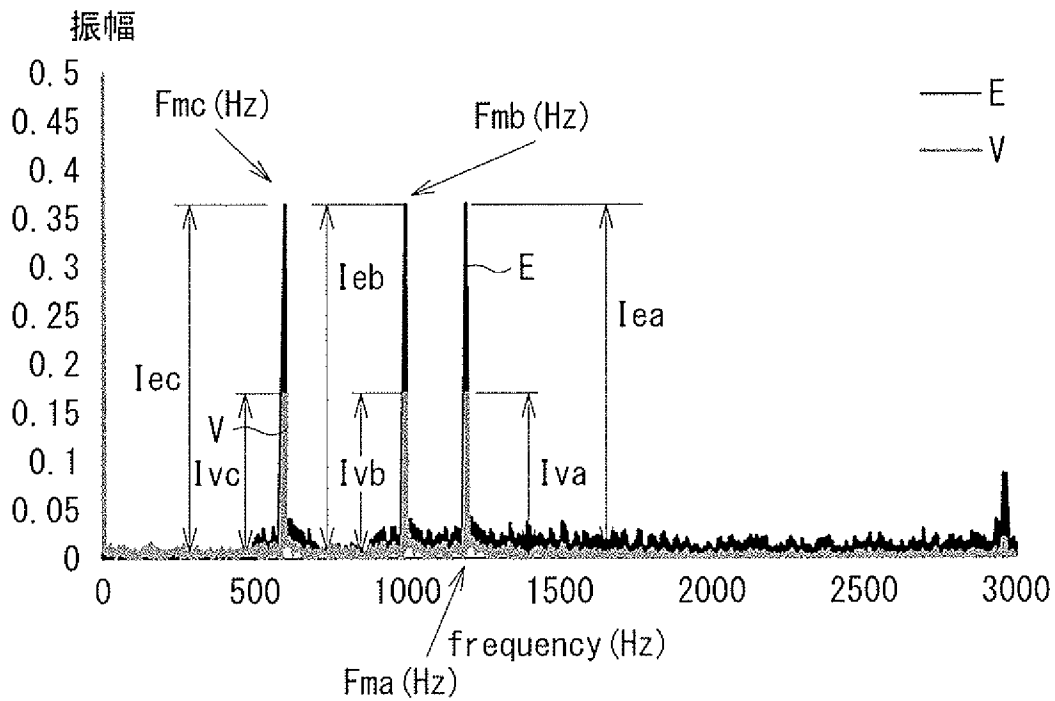
[図20]



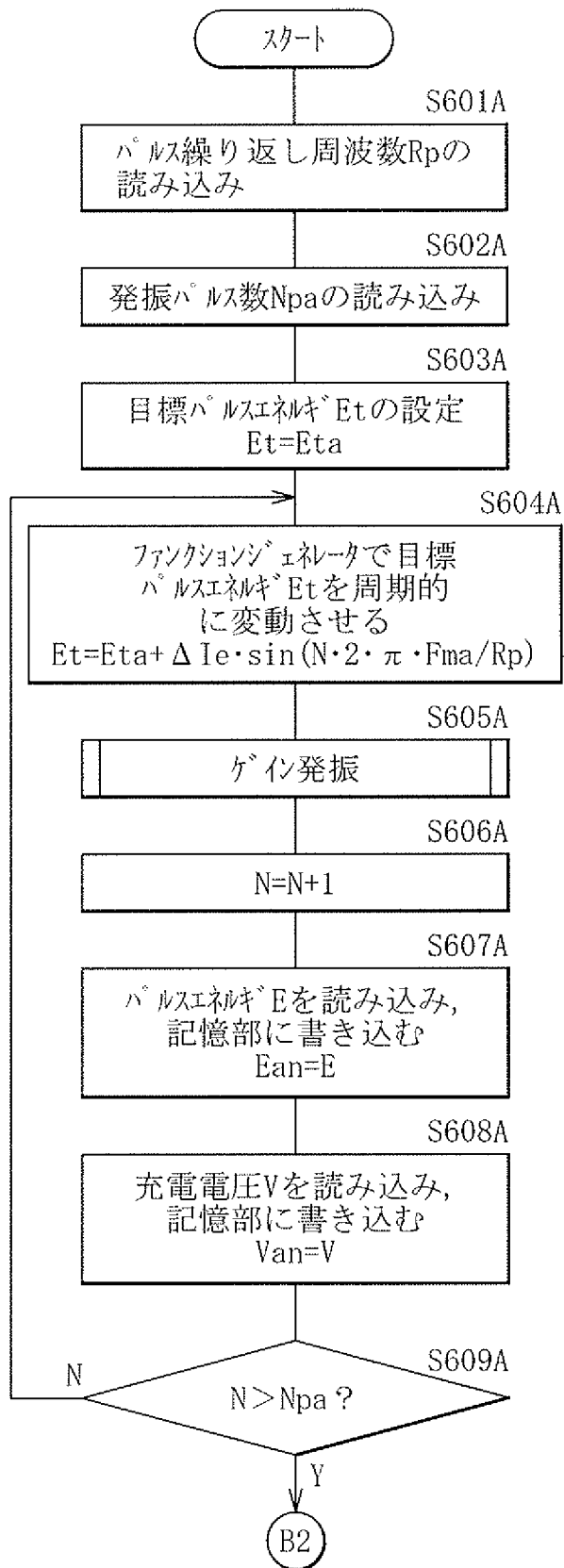
[図21]



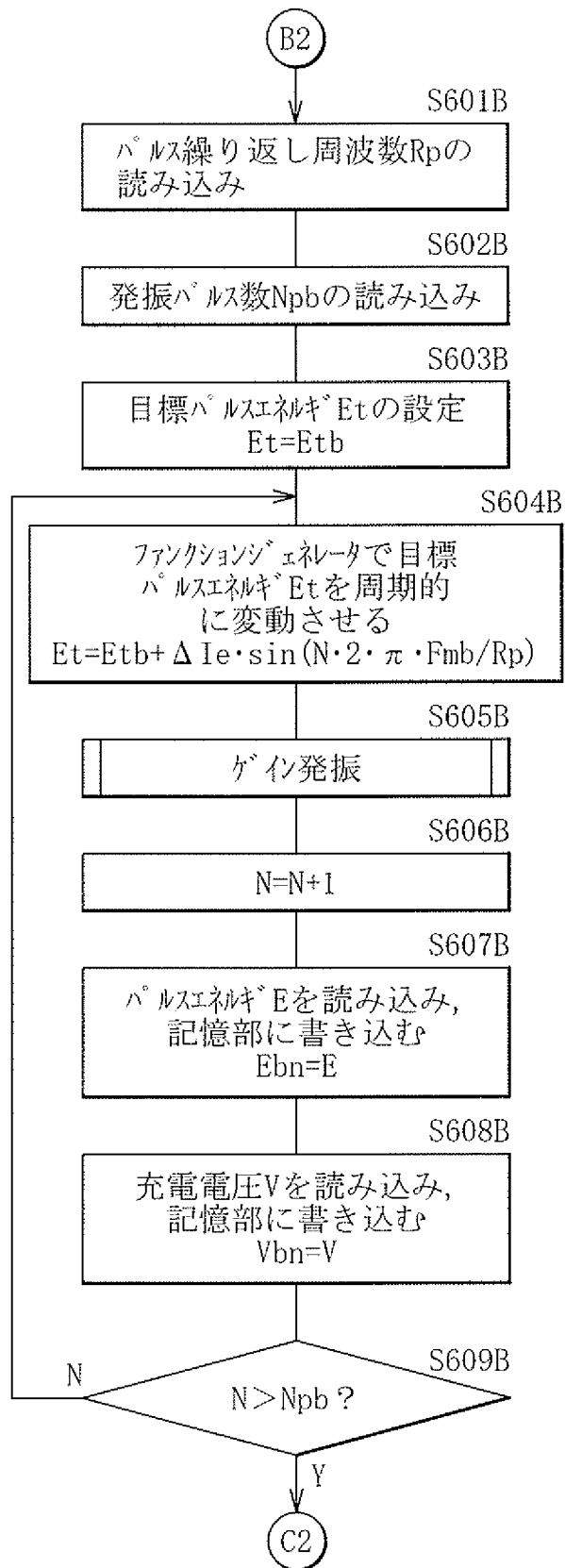
[図22]



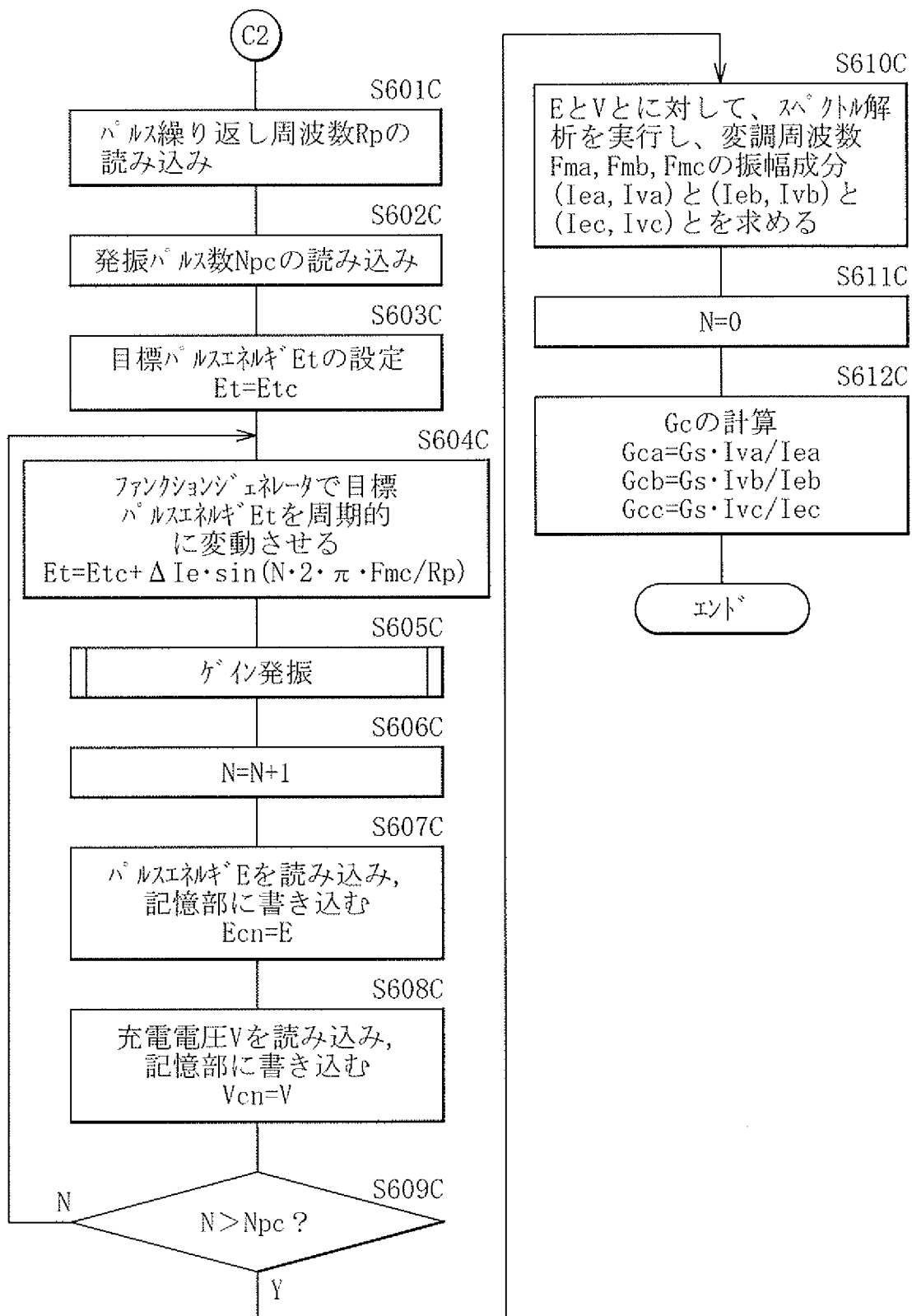
[図23]



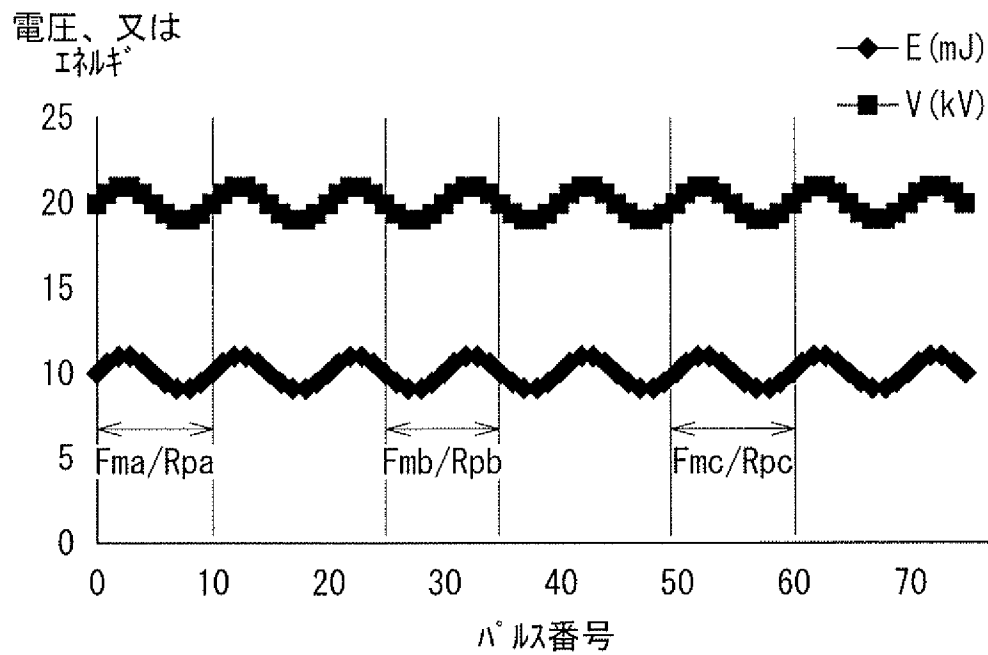
[図24]



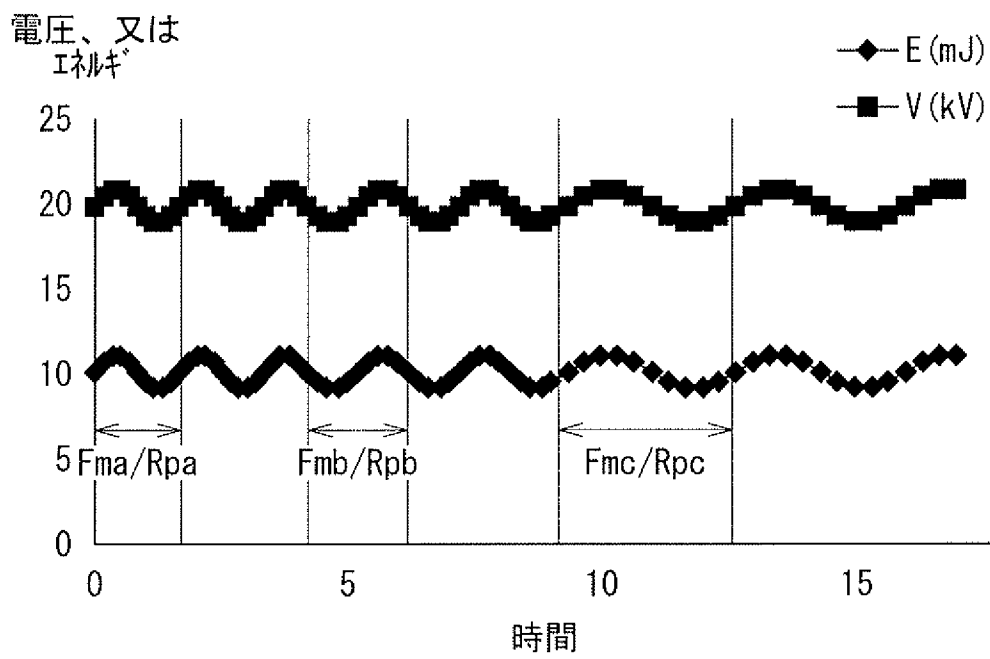
[図25]



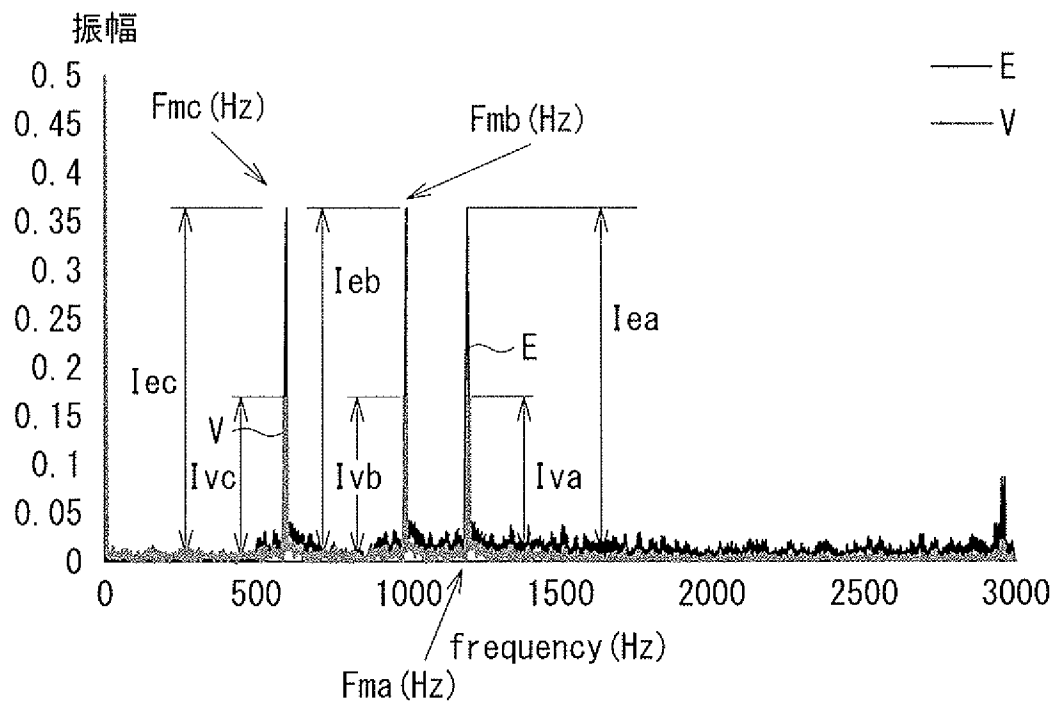
[図26]



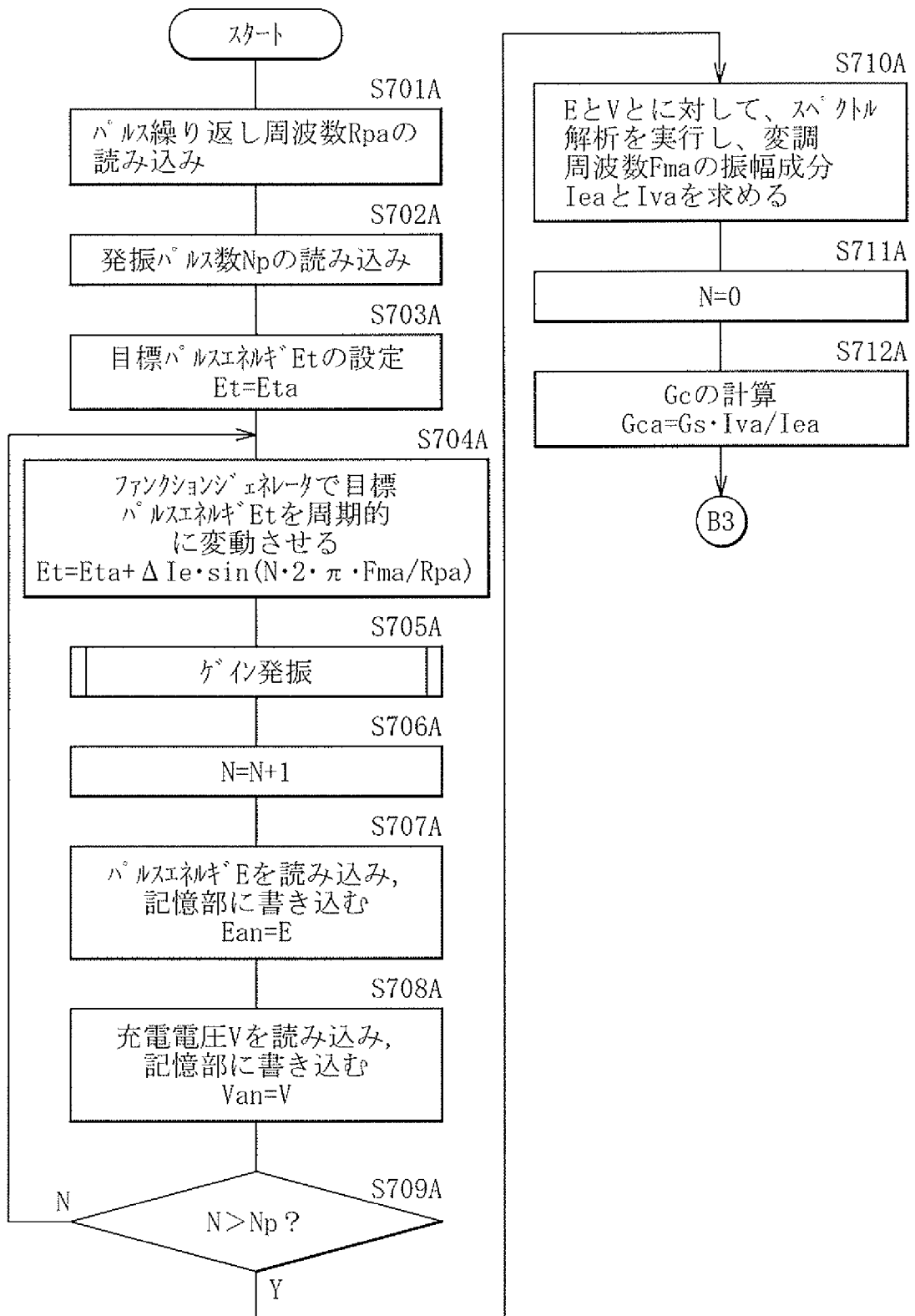
[図27]



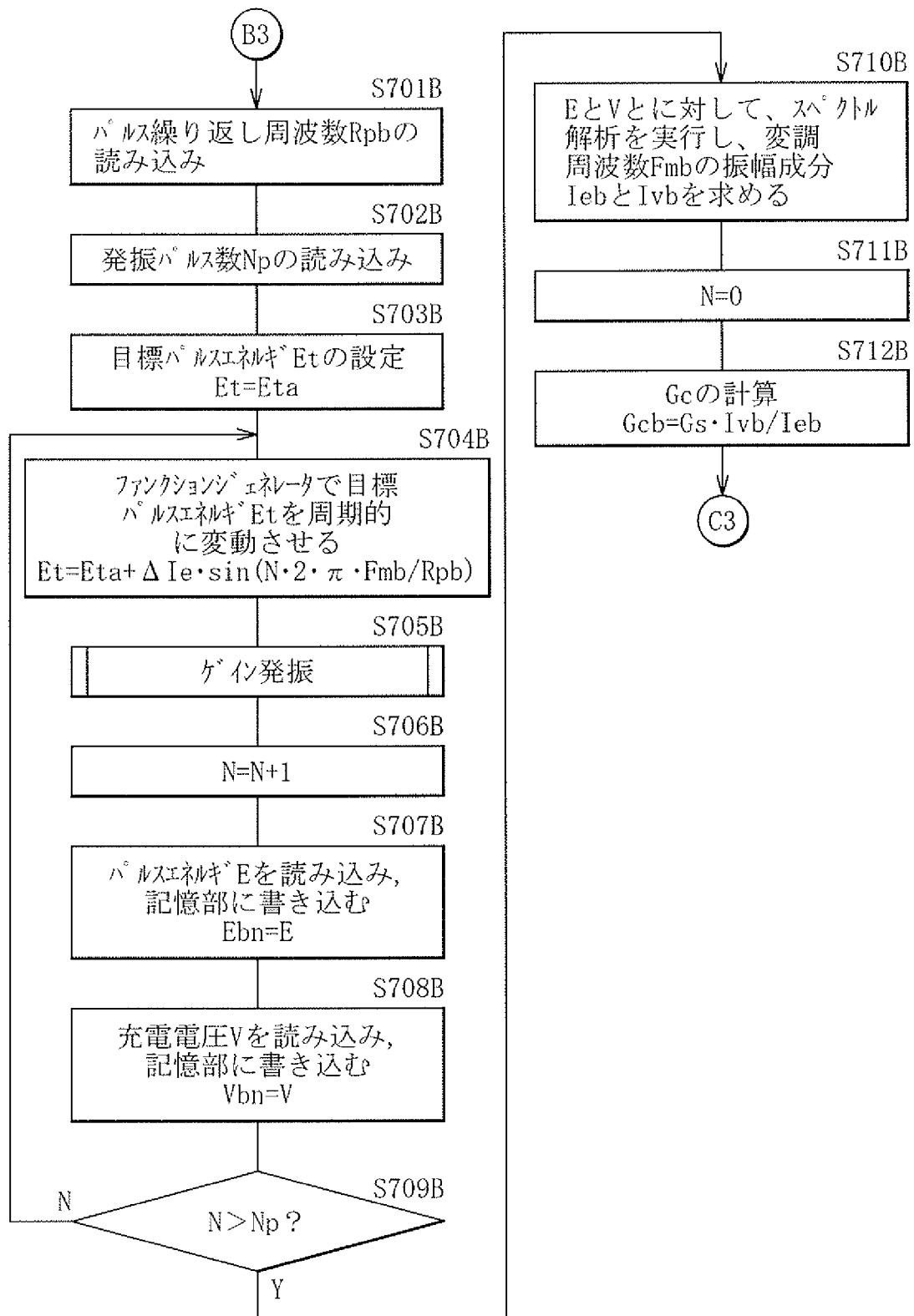
[図28]



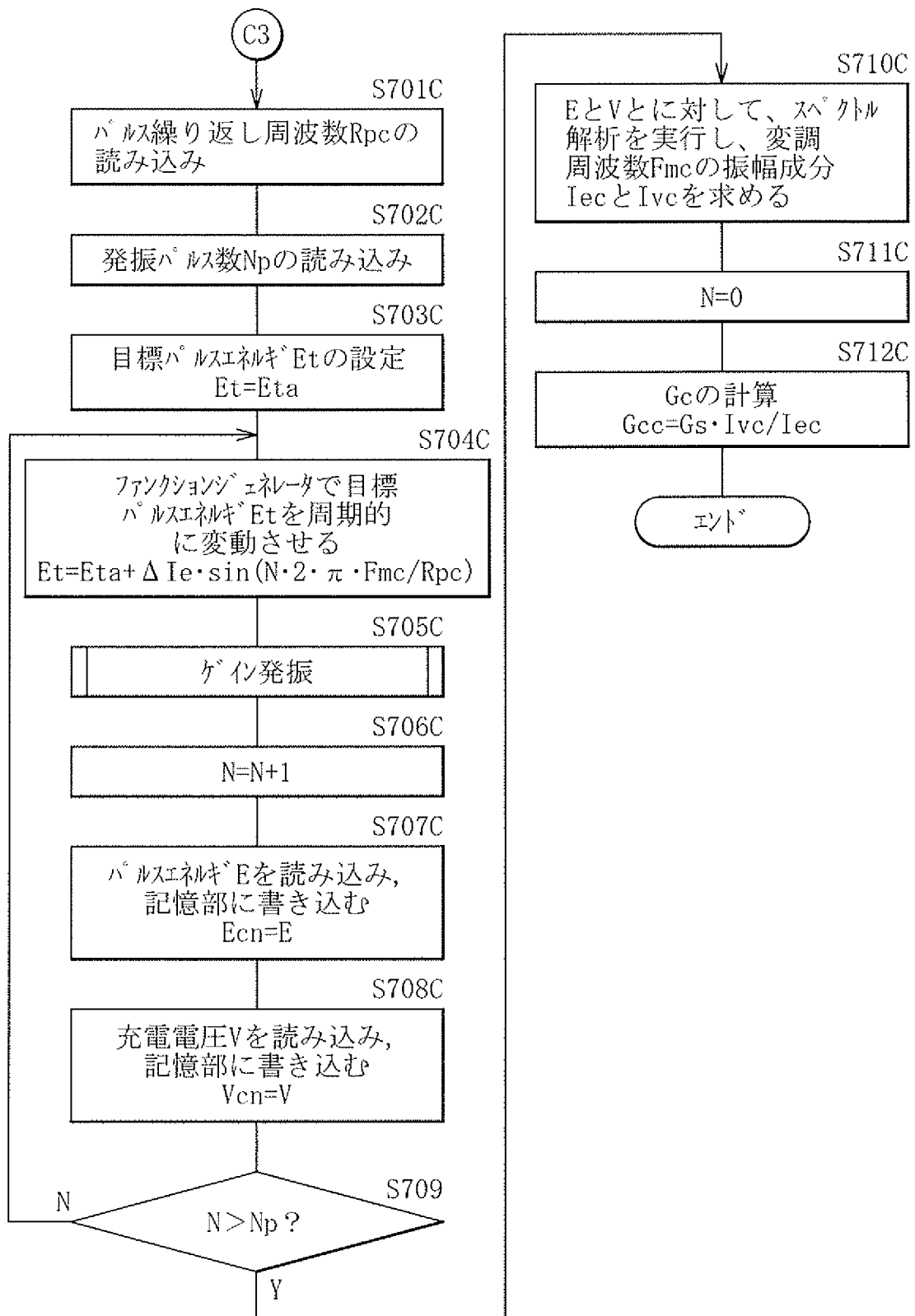
[図29]



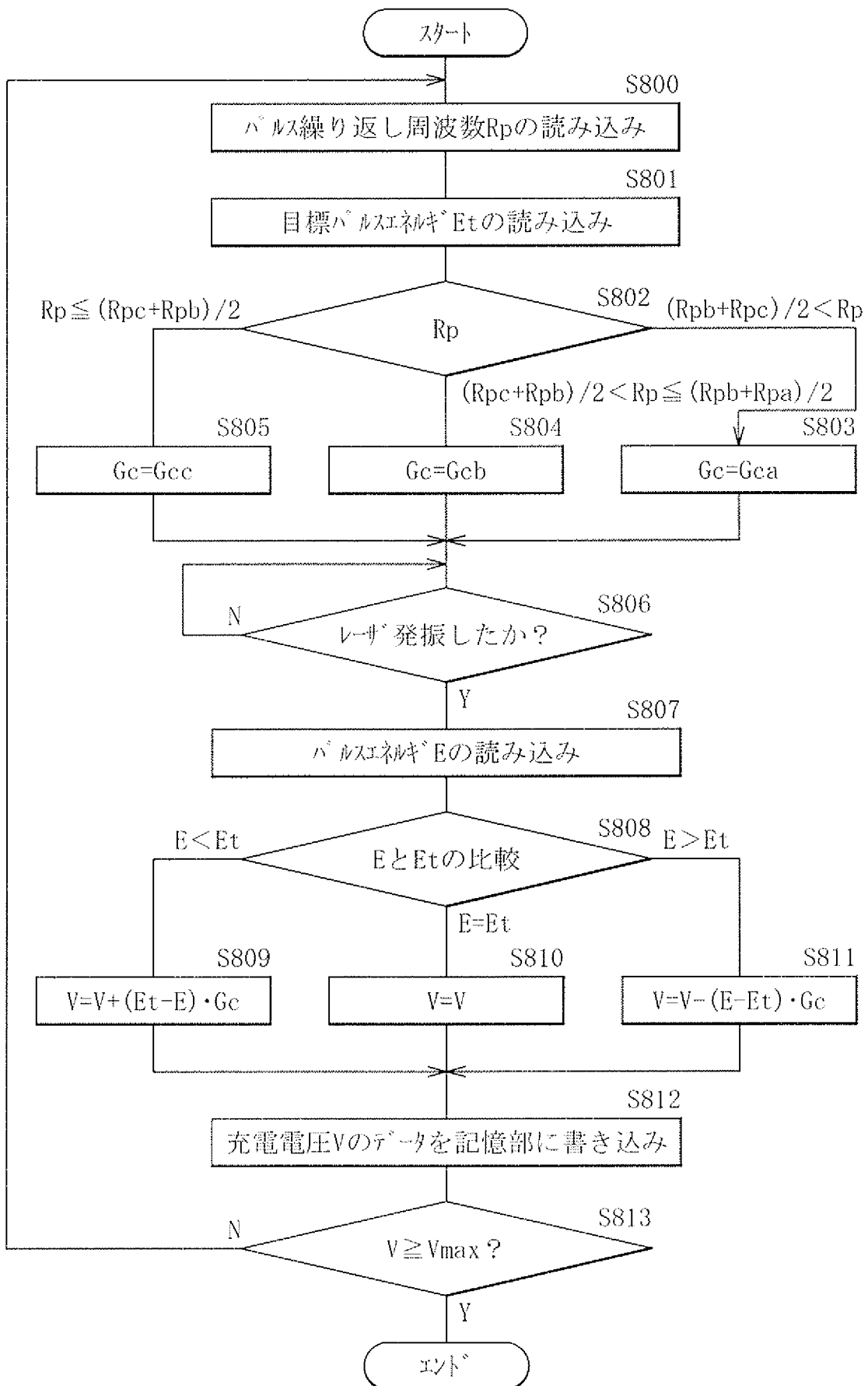
[図30]



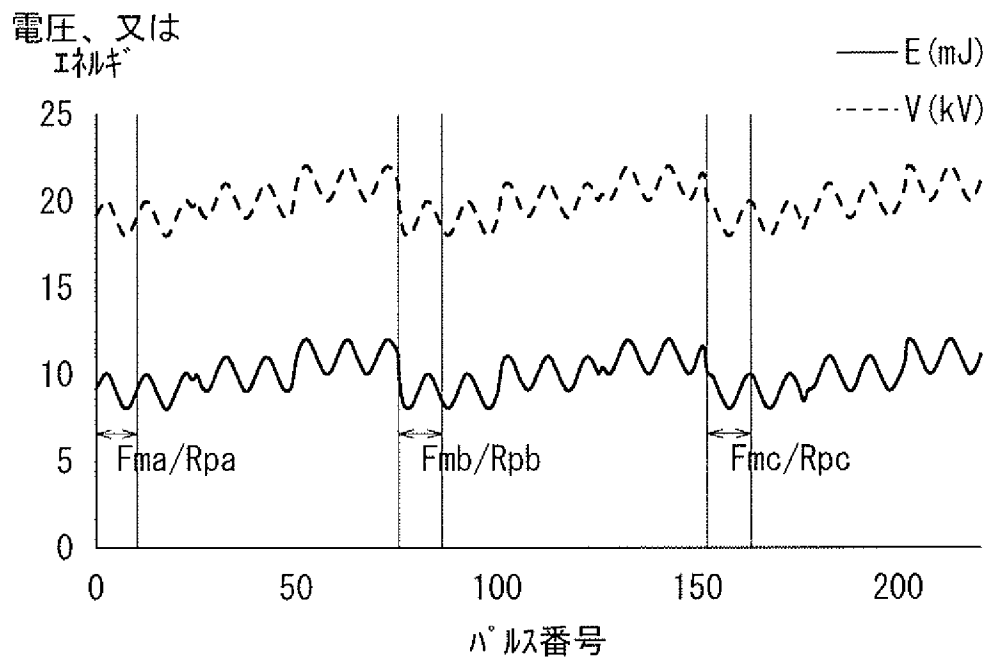
[図31]



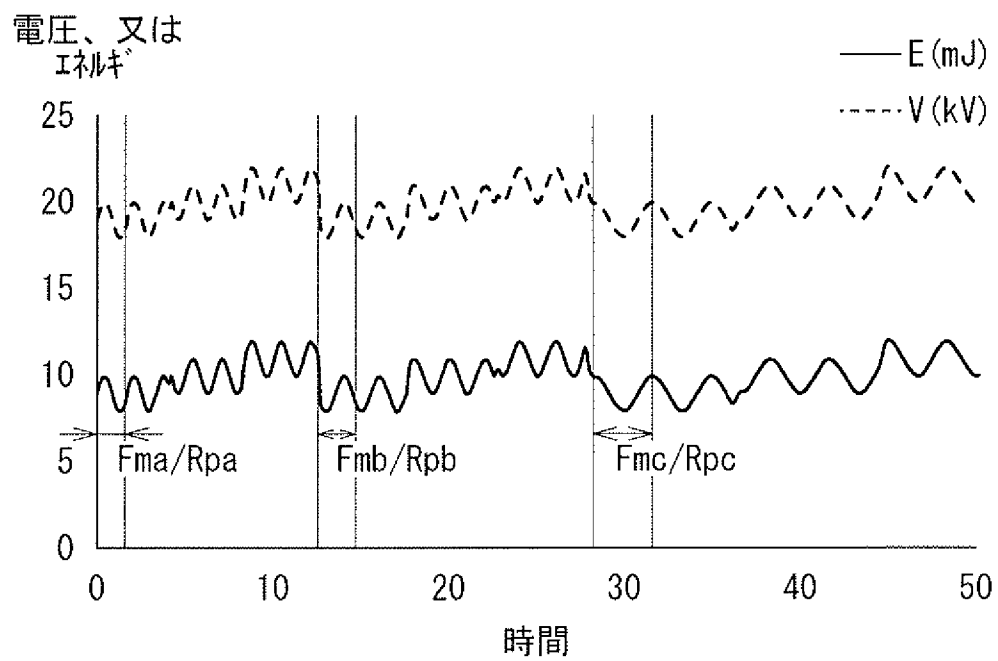
[図32]



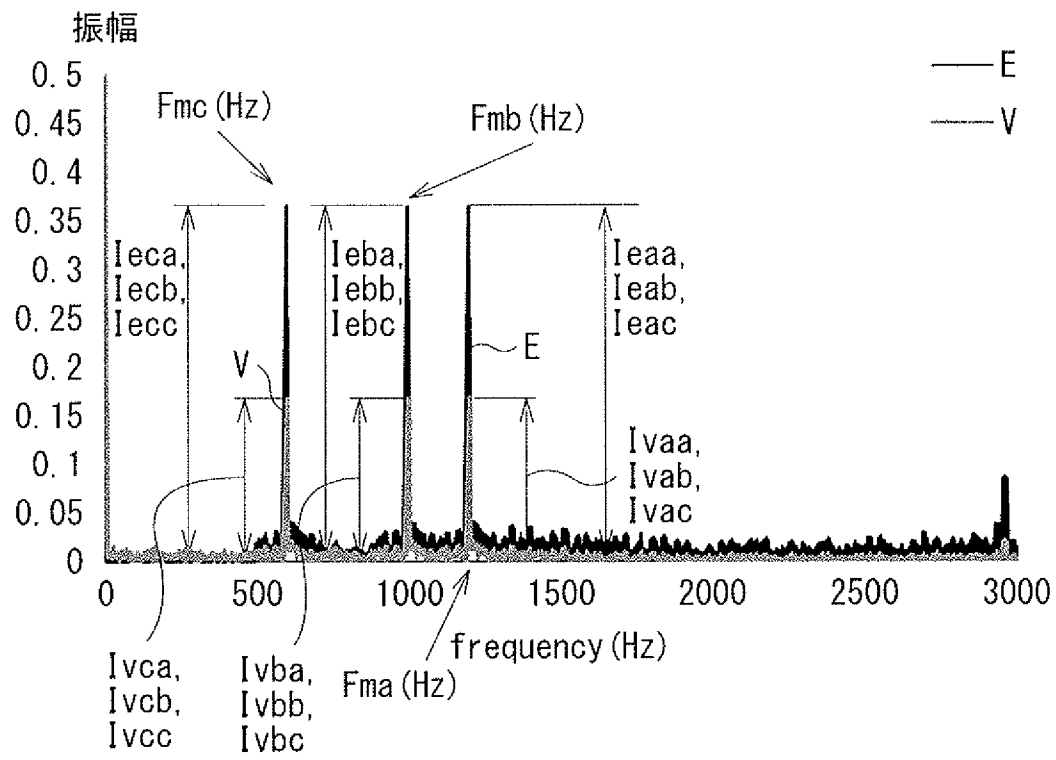
[図33]



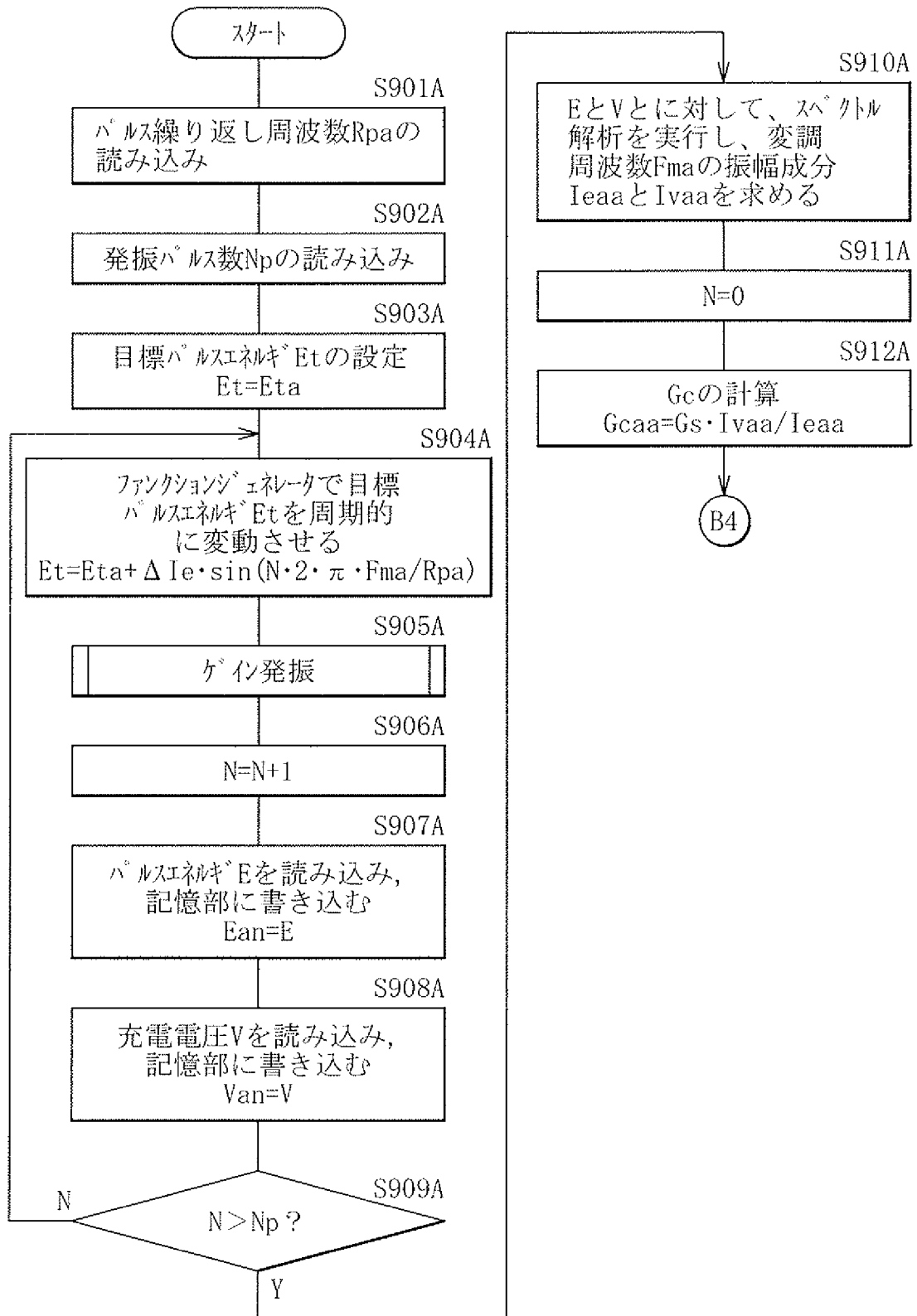
[図34]



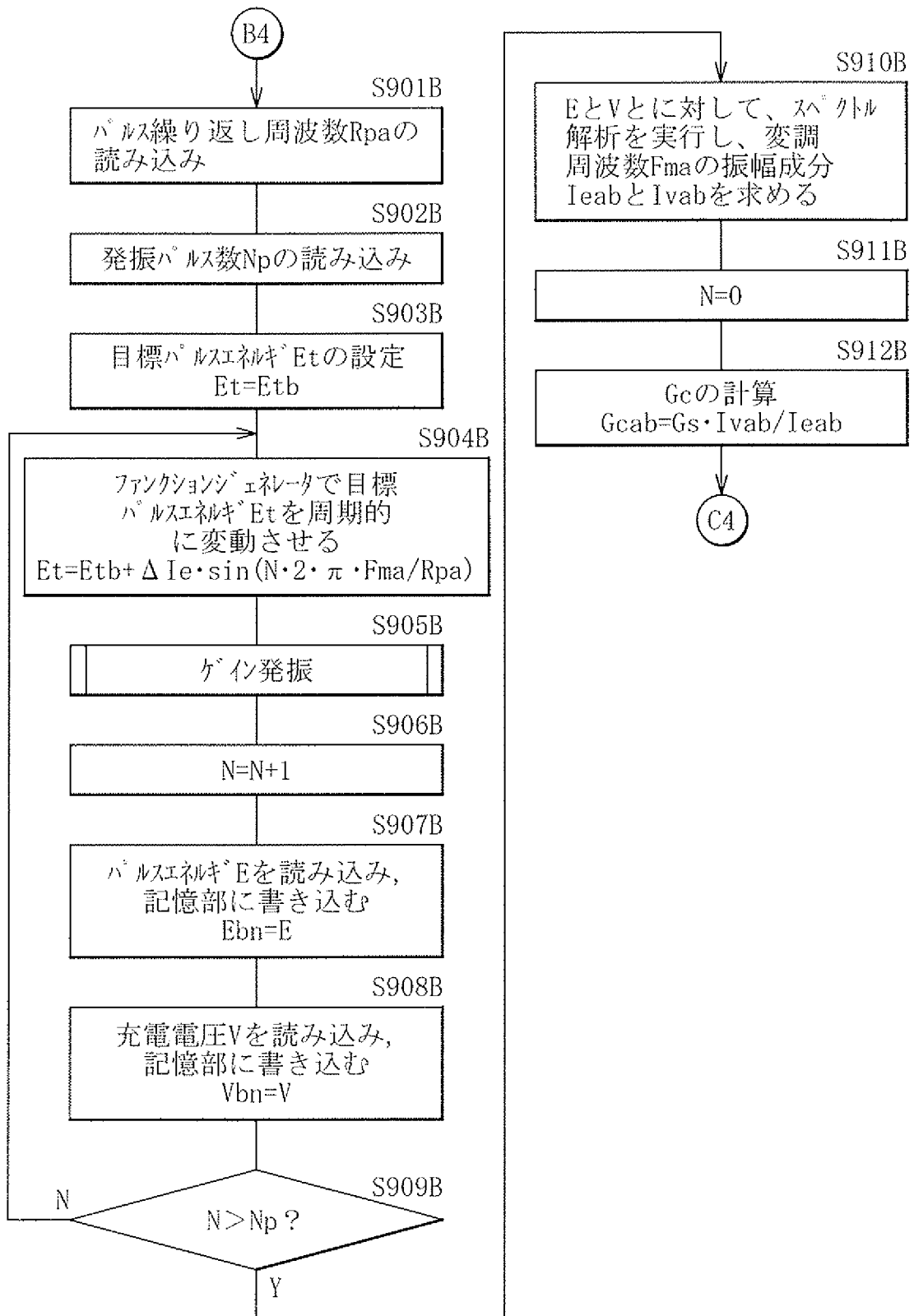
[図35]



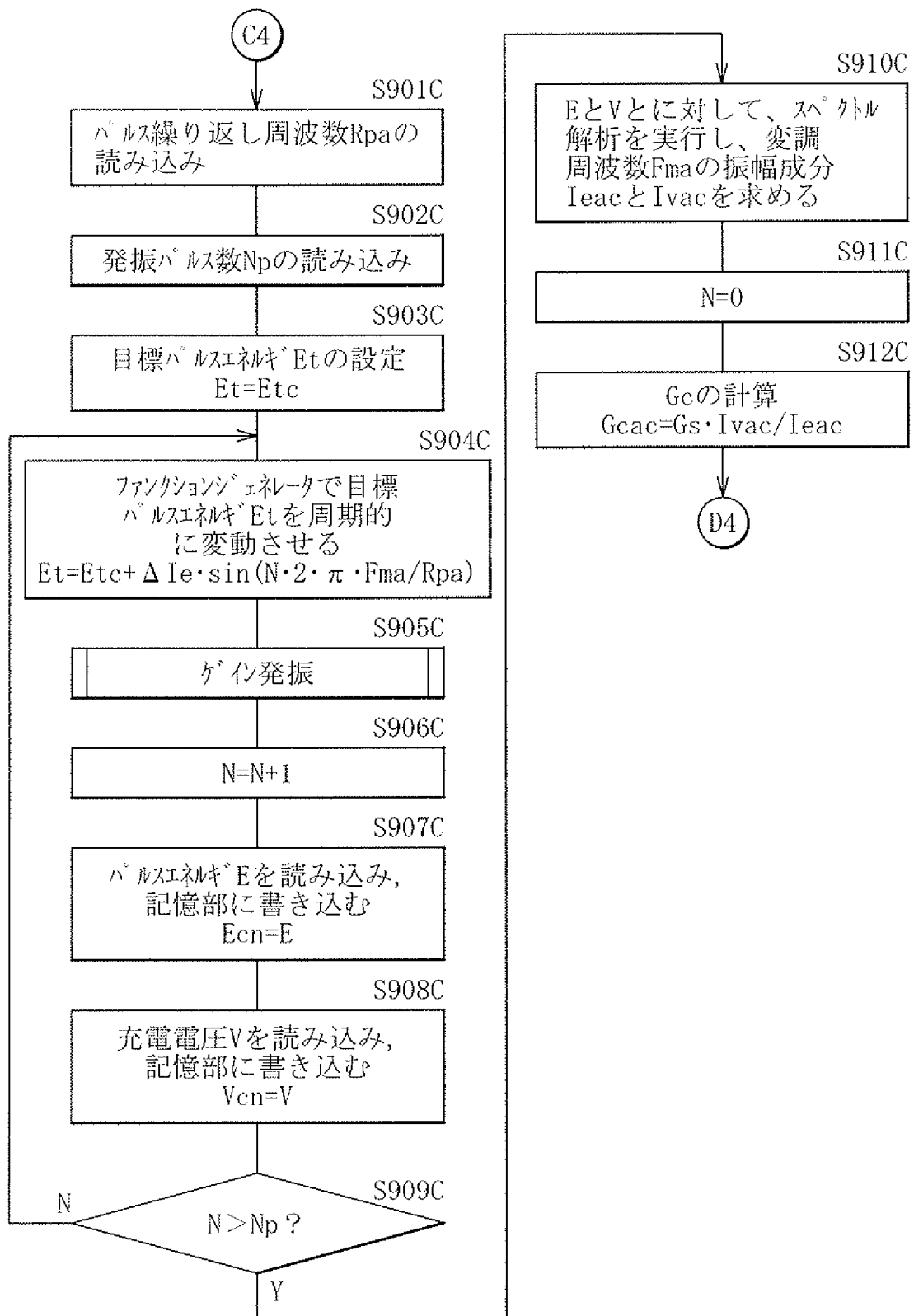
[図36]



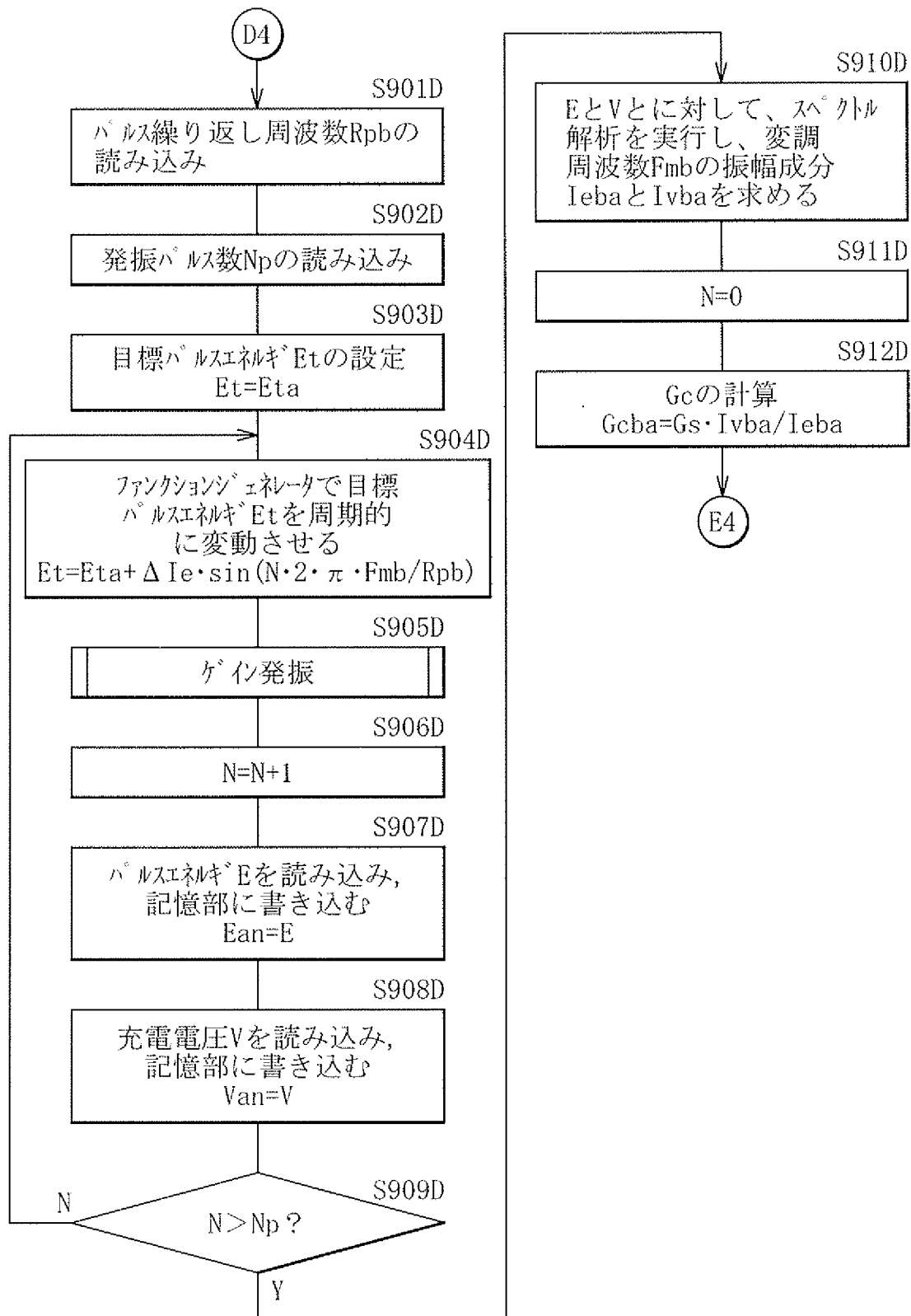
[図37]



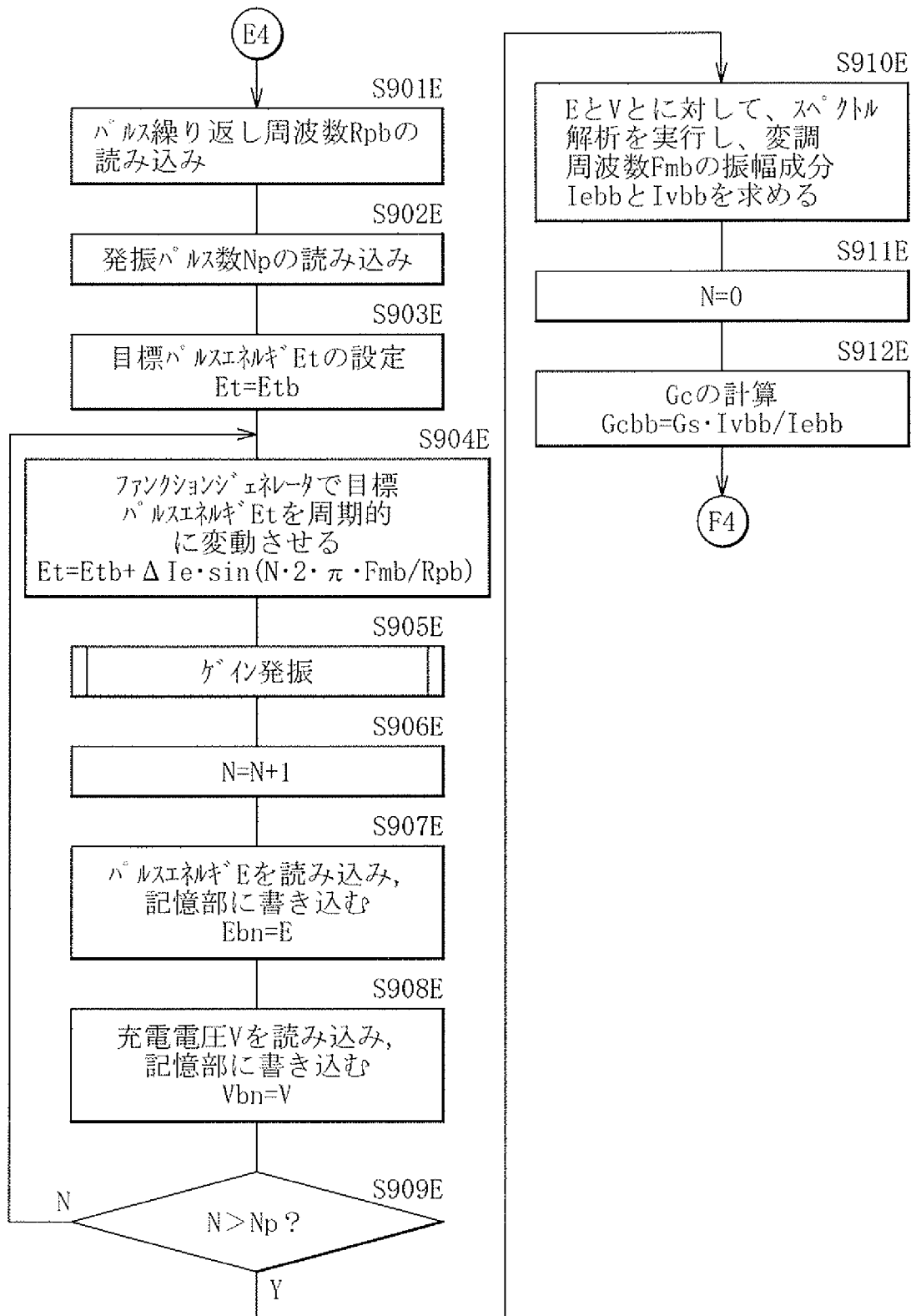
[図38]



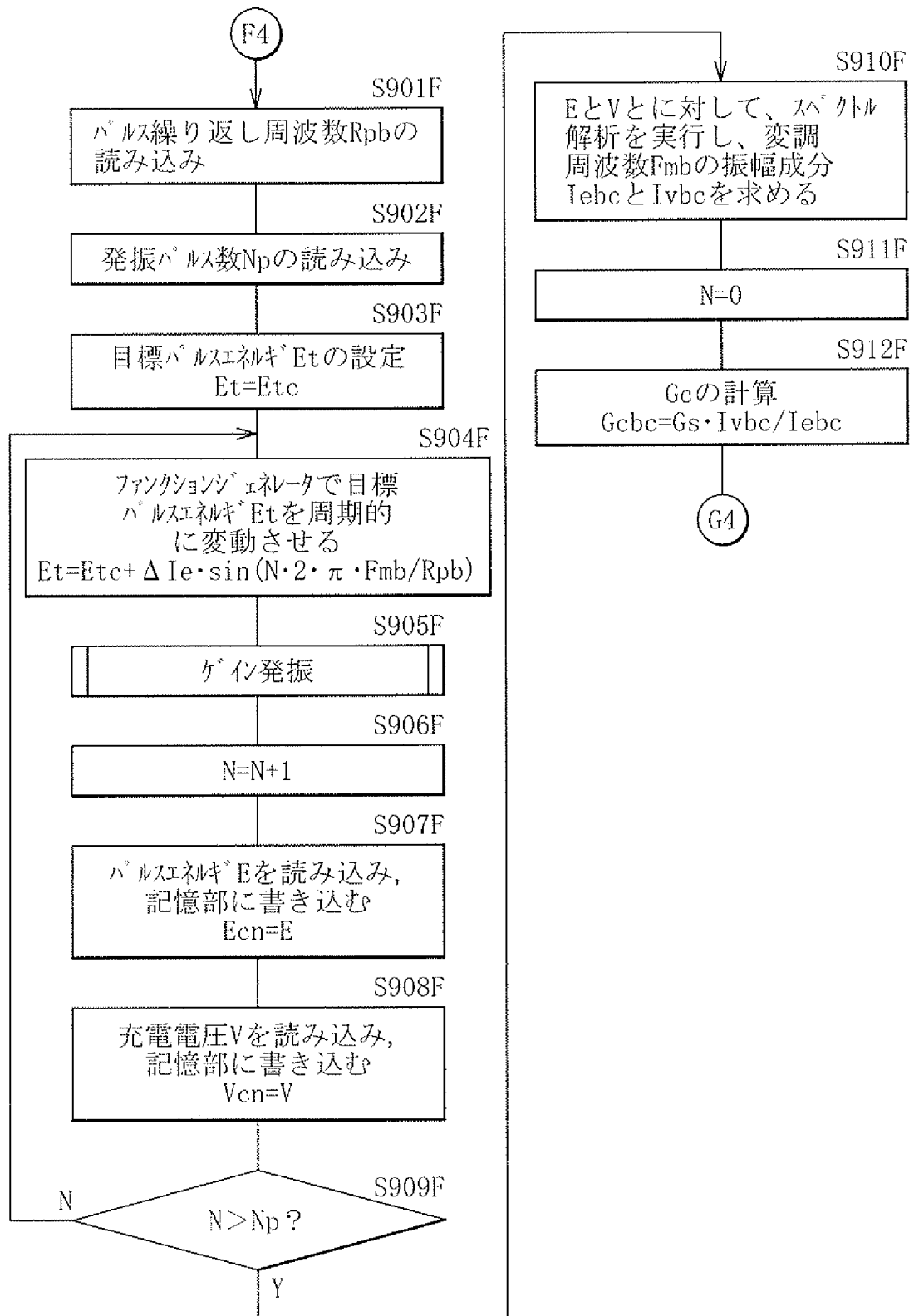
[図39]



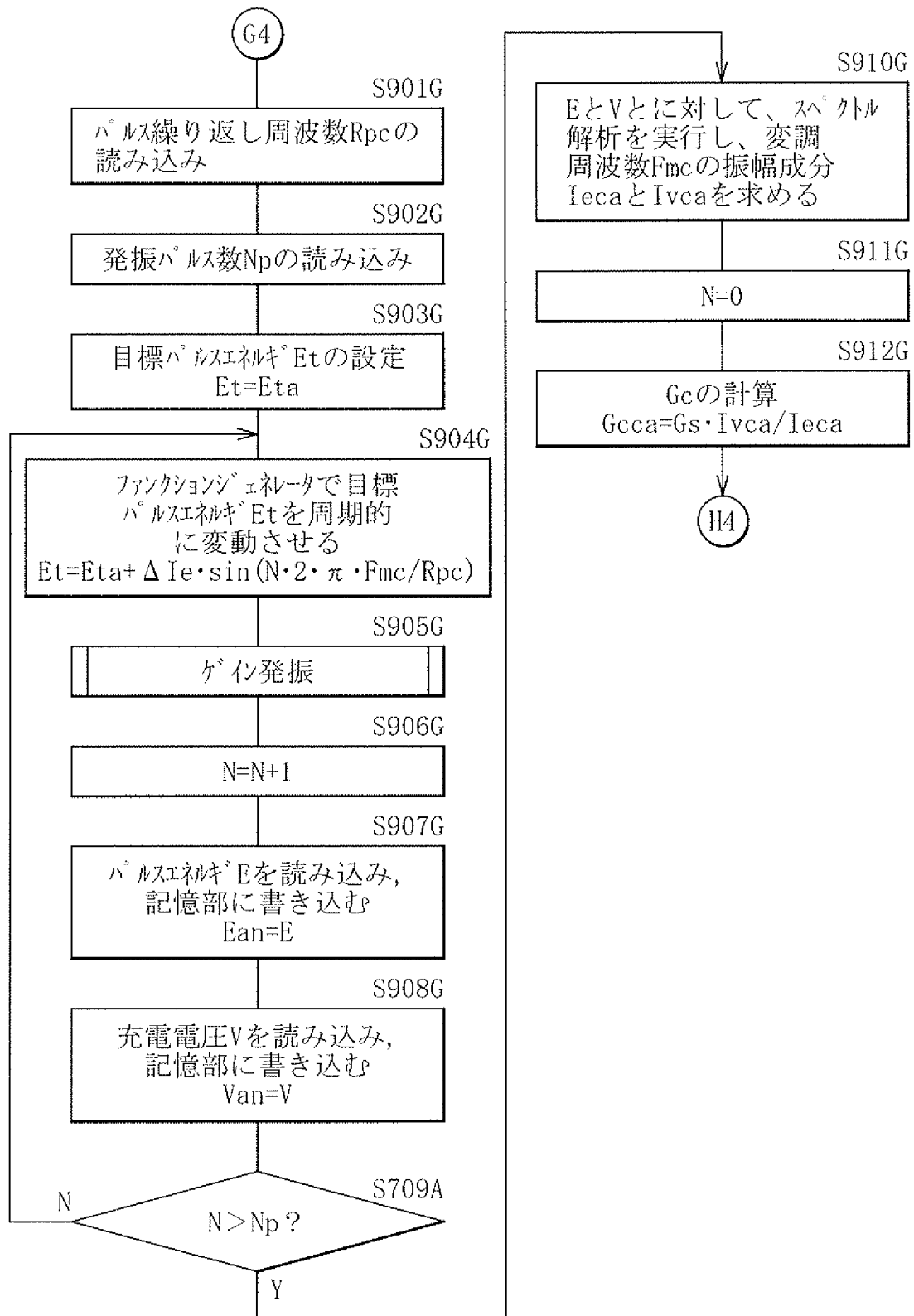
[図40]



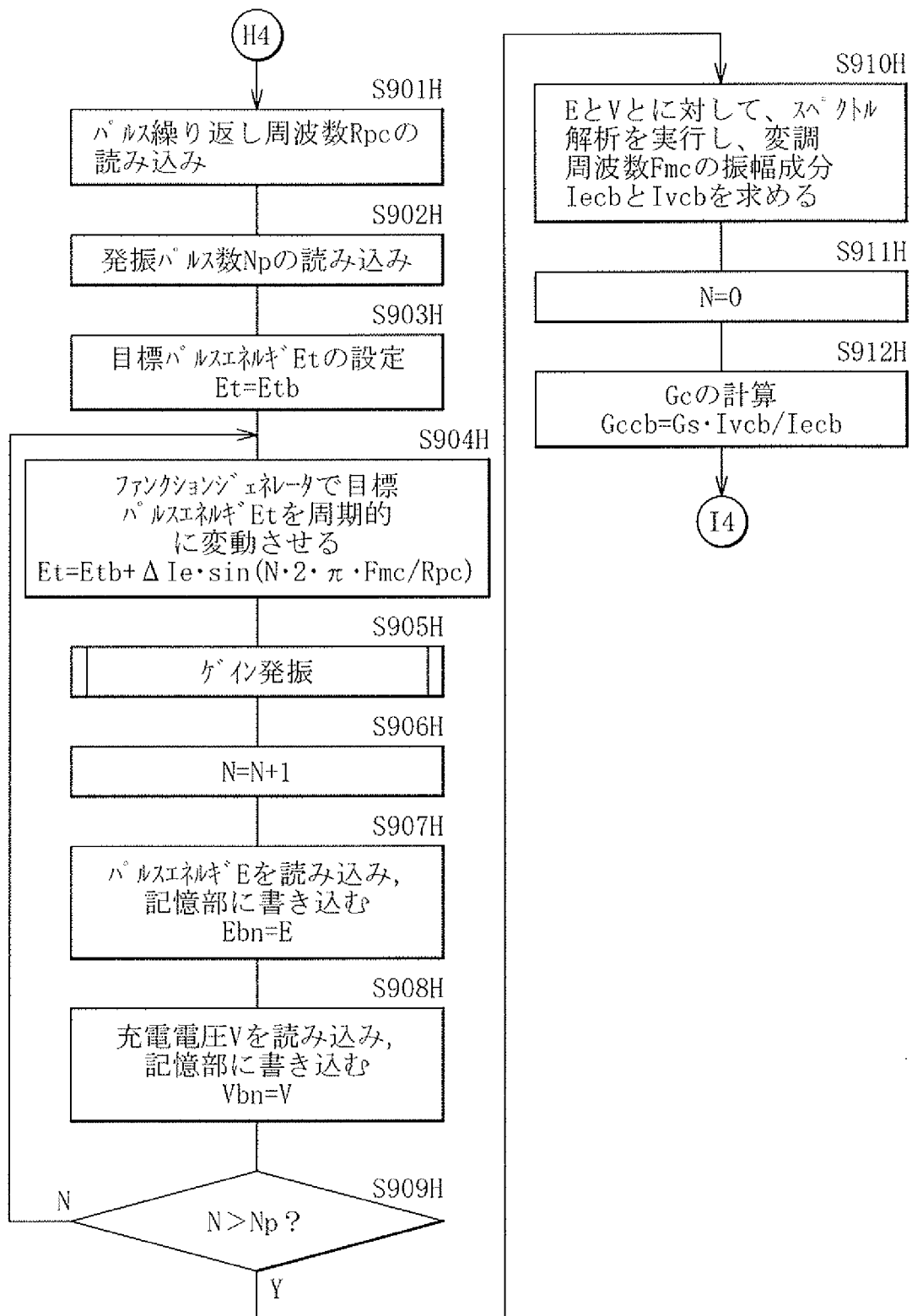
[図41]



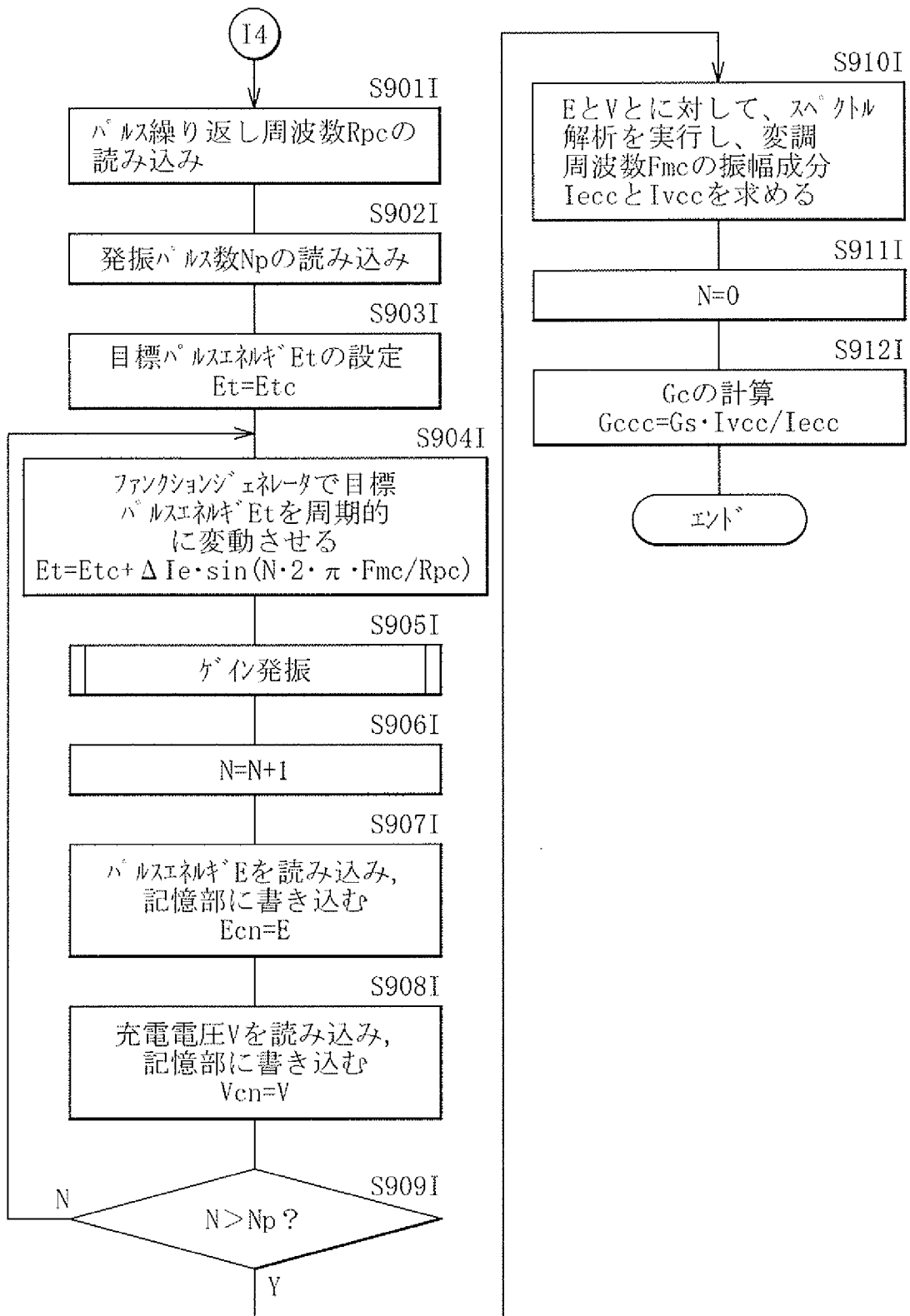
[図42]



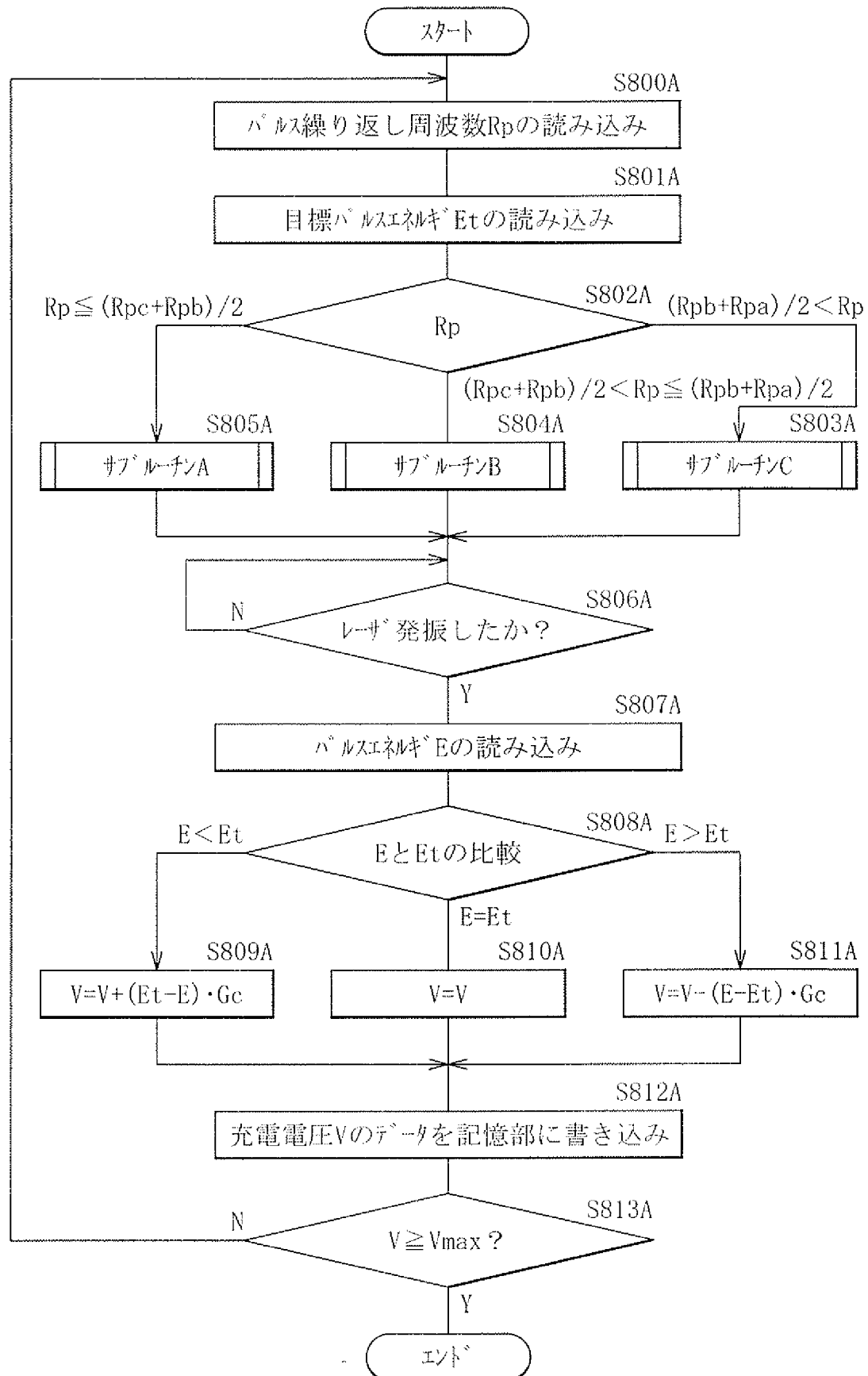
[図43]



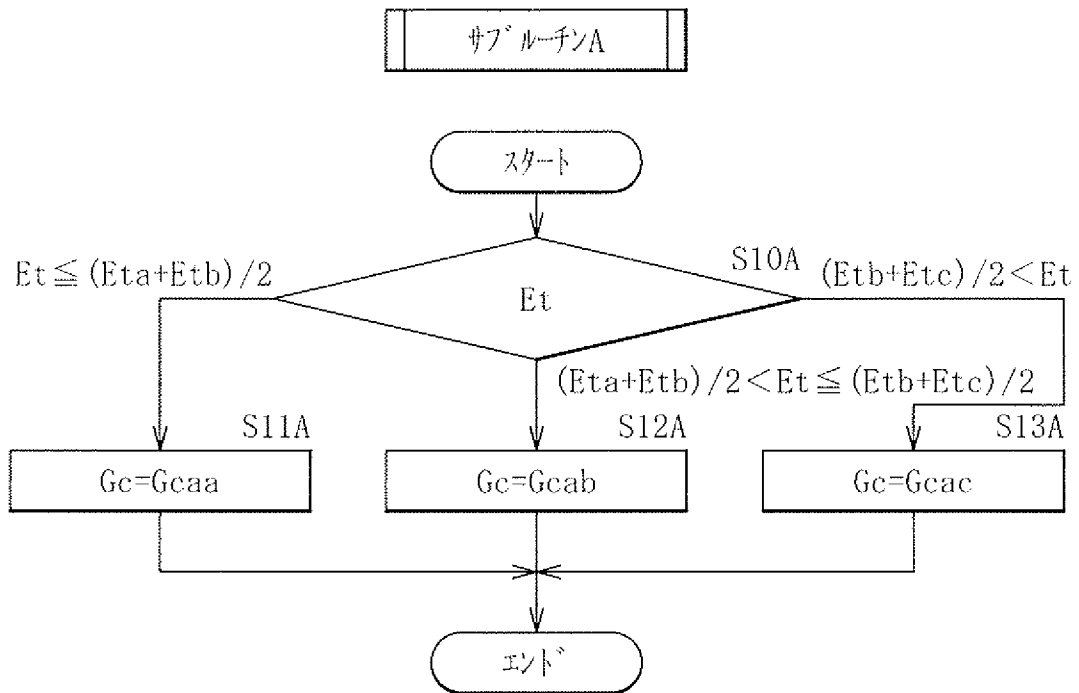
[図44]



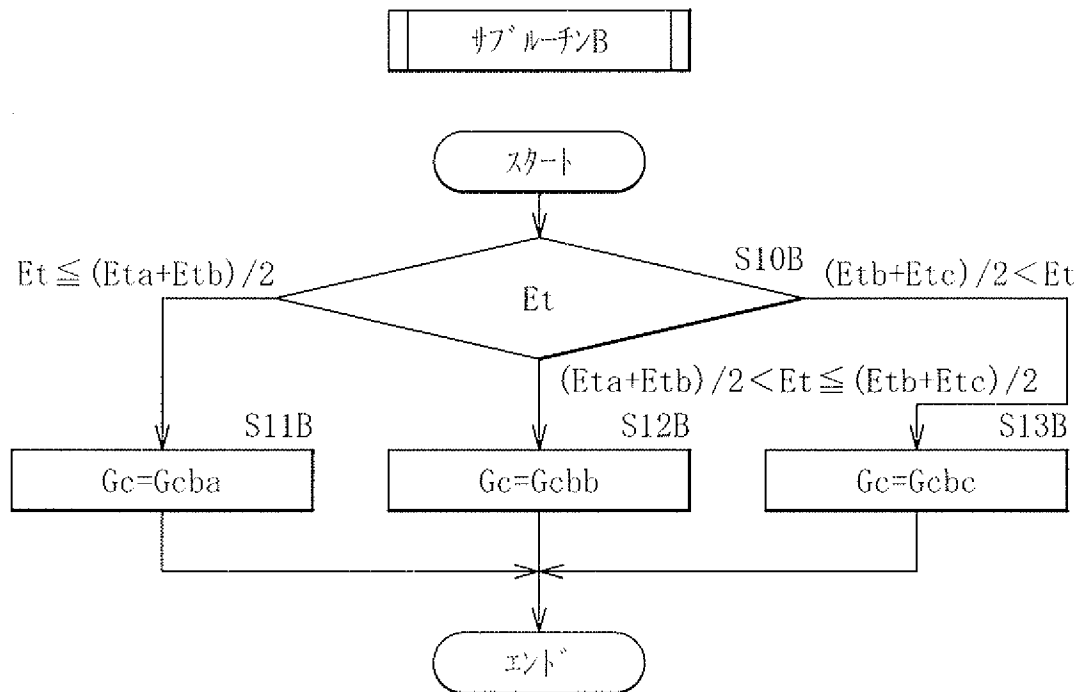
[図45]



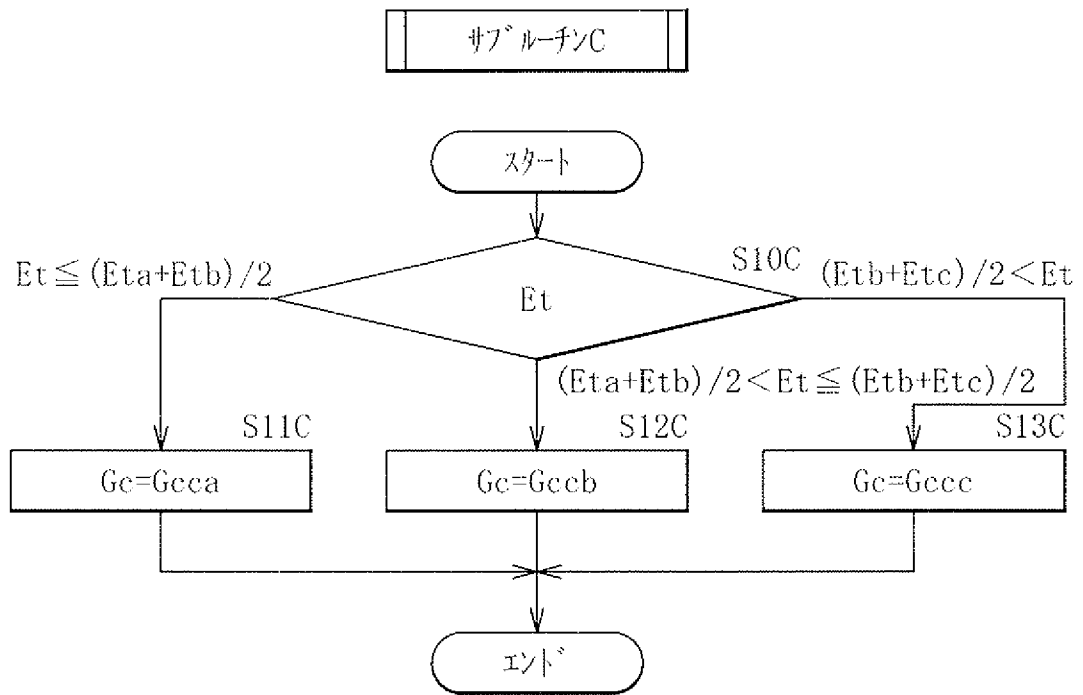
[図46]



[図47]



[図48]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2016/086057

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H01S3/225(2006.01)i, H01S3/0943(2006.01)i, H01S3/104(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)

H01S3/00-3/095, H01S3/098-3/102, H01S3/105-3/131, H01S3/136-3/213, H01S3/323-4/00

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 1996-2017
Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2017 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2017

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

JSTPlus/JMEDPlus/JST7580(JDreamIII)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y A	JP 2000-021717 A (Nikon Corp.), 21 January 2000 (21.01.2000), paragraphs [0002] to [0062]; fig. 1 to 6 (Family: none)	1-4, 6-9, 11-13, 15-18 5, 10, 14, 19
Y A	JP 9-107146 A (Komatsu Ltd.), 22 April 1997 (22.04.1997), paragraphs [0007] to [0070]; fig. 1 to 12 (Family: none)	1-4, 6-9, 11-13, 15-18 5, 10, 14, 19
Y A	JP 2006-088163 A (Fanuc Ltd.), 06 April 2006 (06.04.2006), paragraphs [0017], [0018], [0046], [0053] & US 2006/0060571 A1 paragraphs [0019], [0020], [0080], [0087] & EP 1637272 A1 & CN 1751836 A	1-4, 6-9, 11-13, 15-18 5, 10, 14, 19

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"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
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"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
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"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
"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)	"&" document member of the same patent family
"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	

Date of the actual completion of the international search
14 February 2017 (14.02.17)

Date of mailing of the international search report
28 February 2017 (28.02.17)

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/JP2016/086057

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 11-191653 A (Saima Inc.), 13 July 1999 (13.07.1999), entire text; all drawings & WO 1998/048494 A1 & US 5835520 A1 the whole document & CA 2322005 A & TW 382842 B & KR 10-2001-0030047 A & CN 1295729 A	1-19

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. H01S3/225(2006.01)i, H01S3/0943(2006.01)i, H01S3/104(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（IPC））

Int.Cl. H01S3/00-3/095, H01S3/098-3/102, H01S3/105-3/131, H01S3/136-3/213, H01S3/323-4/00

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	1971-2017年
日本国実用新案登録公報	1996-2017年
日本国登録実用新案公報	1994-2017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）

JSTPlus/JMEDPlus/JST7580 (JDreamIII)

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
Y A	JP 2000-021717 A（株式会社ニコン） 2000.01.21, 段落 0002-0062, 図 1-6（ファミリーなし）	1-4, 6-9, 11-13, 15-18 5, 10, 14, 19
Y A	JP 9-107146 A（株式会社小松製作所） 1997.04.22, 段落 0007-0070, 図 1-12（ファミリーなし）	1-4, 6-9, 11-13, 15-18 5, 10, 14, 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

14.02.2017

国際調査報告の発送日

28.02.2017

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（ISA/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）

佐藤 俊彦

2 K

4 7 5 3

電話番号 03-3581-1101 内線 3255

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
Y	JP 2006-088163 A (ファナック株式会社) 2006.04.06, 段落 0017, 0018, 0046, 0053	1-4, 6-9, 11-13, 15-18
A	& US 2006/0060571 A1, paragraphs 0019, 0020, 0080, 0087 & EP 1637272 A1 & CN 1751836 A	5, 10, 14, 19
A	JP 11-191653 A (サイマー インコーポレイテッド) 1999.07.13, 全文、全図 & WO 1998/048494 A1 & US 5835520 A1, the whole document & CA 2322005 A & TW 382842 B & KR 10-2001-0030047 A & CN 1295729 A	1-19