

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2021-67525  
(P2021-67525A)

(43) 公開日 令和3年4月30日(2021.4.30)

(51) Int. Cl.  
G01N 23/27 (2018.01)

F I  
G O I N 23/27

テーマコード(参考)  
2 G O O 1

審査請求 有 請求項の数 7 O L (全 21 頁)

(21) 出願番号 特願2019-192046 (P2019-192046)  
(22) 出願日 令和1年10月21日(2019.10.21)  
(11) 特許番号 特許第6832592号(P6832592)  
(45) 特許公報発行日 令和3年2月24日(2021.2.24)

(出願人による申告)平成30年度科学技術試験研究委託事業「先端レーザーイノベーション拠点「次世代アト秒レーザー光源と先端計測技術の開発」部門」/平成31年度科学技術試験研究委託事業「先端レーザーイノベーション拠点「次世代アト秒レーザー光源と先端計測技術の開発」部門」、産業技術力強化法第17条の適用を受ける特許出願

(71) 出願人 504151365  
大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構  
茨城県つくば市大穂1番地1  
(74) 代理人 100099759  
弁理士 青木 篤  
(74) 代理人 100123582  
弁理士 三橋 真二  
(74) 代理人 100114018  
弁理士 南山 知広  
(74) 代理人 100165191  
弁理士 河合 章  
(74) 代理人 100133835  
弁理士 河野 努

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 時間分解光電子顕微鏡装置、正孔空間分布検出方法、正孔寿命推定方法及び正孔移動度演算方法

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】正孔の振る舞いを検出可能な正孔空間分布検出方法を提供する。

【解決手段】正孔空間分布検出方法は、試料の禁制帯幅よりも大きい光子エネルギーを有するポンプ光を試料に照射して、試料の価電子帯から伝導帯に電子101を励起し、試料の価電子帯のイオン化エネルギーよりも大きい光子エネルギーを有するプローブ光を試料に照射して、価電子帯に残された電子101を試料から光電子103として放出し、試料から放出された光電子103の空間分布と補完関係となる正孔102の空間分布を検出し、検出された正孔102の空間分布を示す正孔空間分布情報を出力することを含む。

【選択図】図5

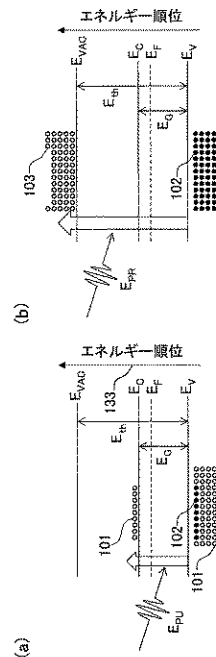


図5

## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

試料の禁制帯幅よりも大きいフォトンエネルギーを有するポンプ光を前記試料に照射して、前記試料の価電子帯から伝導帯に電子を励起し、

前記試料の価電子帯のイオン化エネルギーよりも大きいフォトンエネルギーを有するプローブ光を前記試料に照射して、前記価電子帯に残された電子を前記試料から光電子として放出し、

前記試料から放出された光電子の空間分布と補完関係となる正孔の空間分布を検出し、検出された正孔の空間分布を示す正孔空間分布情報を出力する、

ことを含むことを特徴とする、正孔空間分布検出方法。

10

## 【請求項 2】

前記プローブ光のフォトンエネルギー  $E_{PR}$  は、前記価電子帯のイオン化エネルギー  $E_{th}$  に対して、

$$E_{th} < E_{PR} < E_{th} + 0.5 \text{ eV}$$

との関係を有する、請求項 1 に記載の正孔空間分布検出方法。

## 【請求項 3】

前記プローブ光のフォトンエネルギー  $E_{PR}$  は、前記価電子帯のイオン化エネルギー  $E_{th}$  に対して、

$$E_{th} + 0.1 \text{ eV} < E_{PR} < E_{th} + 0.4 \text{ eV}$$

との関係を有する、請求項 1 に記載の正孔空間分布検出方法。

20

## 【請求項 4】

請求項 1 ~ 3 の何れか一項に記載の正孔空間分布検出方法に含まれる処理を、前記ポンプ光及び前記プローブ光を前記試料に照射する繰り返し周波数を変化させながら複数回に亘って実行し、

前記正孔空間分布情報から、前記試料の所定領域における正孔の空間分布の経時的変化を撮像した画像情報を生成し、

前記画像情報から、前記プローブ光が前記試料に照射される直前の前記所定領域の輝度を示す輝度情報を生成し、

前記輝度情報に対応する輝度と、前記所定領域に正孔が存在しないときの前記所定領域の輝度である基準輝度とが一致したか否かを判定し、

30

前記輝度情報に対応する輝度が前記基準輝度に一致したと判定した前記輝度情報に関連付けて記憶される前記繰り返し周波数を、正孔の寿命と推定し、

推定された正孔の寿命を示す寿命情報を出力する、

ことを含む正孔寿命推定方法。

## 【請求項 5】

請求項 1 ~ 3 の何れか一項に記載の正孔空間分布検出方法に含まれる処理を実行し、

前記正孔空間分布情報から、前記試料の所定領域における正孔の空間分布の経時的変化を撮像した画像情報を生成し、

前記画像情報から、前記所定領域の輝度の経時的変化を示す輝度情報を生成し、

前記輝度情報から、前記プローブ光が前記試料に照射されてから正孔が前記所定領域に存在しなくなるまでの正孔の寿命を推定し、

40

推定された正孔の寿命を示す寿命情報を出力する、

ことを含む正孔寿命推定方法。

## 【請求項 6】

前記試料に接するように配置された一对の電極の間に直流電圧を印加し、

請求項 1 ~ 3 の何れか一項に記載の正孔空間分布検出方法に含まれる処理を実行し、

前記正孔空間分布情報から、前記試料の所定領域における正孔の空間分布の経時的変化を撮像した画像情報を生成し、

前記画像情報から、印加された直流電圧により移動した正孔の移動速度を演算し、

前記一对の電極の間の距離、印加された直流電圧、及び演算された正孔の移動速度から

50

正孔の移動度を演算し、

演算された正孔の移動度を示す移動度情報を出力する、  
ことを含む正孔移動度演算方法。

【請求項 7】

試料の禁制帯幅よりも大きいフォトンエネルギーを有するポンプ光を生成し、生成した前記ポンプ光を前記試料に照射して、前記試料の価電子帯から伝導帯に電子を励起するポンプ光生成部と、

試料の価電子帯のイオン化エネルギーよりも大きいフォトンエネルギーを有するプローブ光を生成し、生成した前記プローブ光を前記試料に照射して、前記価電子帯に残された電子を前記試料から放出するプローブ光生成部と、

前記試料から放出された電子の空間分布と補完関係となる正孔の空間分布を検出し、検出された正孔の空間分布を示す正孔空間分布情報を出力する光電子顕微鏡装置と、

を有することを特徴とする時間分解光電子顕微鏡装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、時間分解光電子顕微鏡装置、正孔空間分布検出方法、正孔寿命推定方法及び正孔移動度演算方法に関する。

【背景技術】

【0002】

時間分解光電子顕微鏡装置を使用して、電子及び正孔を含む観測対象のキャリアの振る舞いを示すキャリアダイナミクスを検出する種々の技術が知られている。

【0003】

例えば、特許文献 1 には、試料の伝導帯電子のイオン化エネルギーに対応するフォトンエネルギーを有するプローブ光を試料に照射して、ポンプ光により価電子帯から伝導帯に励起された電子のキャリアダイナミクス画像を取得する技術が記載されている。特許文献 1 に記載される技術では、プローブ光のフォトンエネルギーを連続的に変更させることで、光電子放出強度におけるバックグラウンド強度及び強度の増加を明確にできるので、伝導帯に励起された電子のキャリアダイナミクス画像をより鮮明に取得できる。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献 1】国際公開第 2018 / 159272 号

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

M O S F E T (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) 等の半導体素子、及び光触媒等の効率等の特性を評価するとき、電子の振る舞いと共に正孔の振る舞いを検出することが望まれている。しかしながら、正孔の振る舞いを検出する技術は知られていない。

【0006】

本発明は、正孔の振る舞いを検出可能な正孔空間分布検出方法を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0007】

本発明に係る正孔空間分布検出方法は、試料の禁制帯幅よりも大きいフォトンエネルギーを有するポンプ光を試料に照射して、試料の価電子帯から伝導帯に電子を励起し、試料の価電子帯のイオン化エネルギーよりも大きいフォトンエネルギーを有するプローブ光を試料に照射して、価電子帯に残された電子を試料から光電子として放出し、試料から放出された光電子の空間分布と補完関係となる正孔の空間分布を検出し、検出された正孔の空

10

20

30

40

50

間分布を示す正孔空間分布情報を出力することを含む。

【0008】

さらに、本発明に係る正孔空間分布検出方法では、プローブ光の光子エネルギー  $E_{PR}$  は、価電子帯のイオン化エネルギー  $E_{th}$  に対して、

$$E_{th} < E_{PR} < E_{th} + 0.5 \text{ eV}$$

との関係を有することが好ましい。

【0009】

さらに、本発明に係る正孔空間分布検出方法では、プローブ光の光子エネルギー  $E_{PR}$  は、価電子帯のイオン化エネルギー  $E_{th}$  に対して、

$$E_{th} + 0.1 \text{ eV} < E_{PR} < E_{th} + 0.4 \text{ eV}$$

との関係を有することが好ましい。

10

【0010】

さらに、本発明に係る正孔寿命推定方法は、正孔空間分布検出方法に含まれる処理を、ポンプ光及びプローブ光を試料に照射する繰り返し周波数を変化させながら複数回に亘って実行し、正孔空間分布情報から、試料の所定領域における正孔の空間分布の経時的变化を撮像した画像情報を生成し、画像情報から、プローブ光が試料に照射される直前の所定領域の輝度を示す輝度情報を生成し、輝度情報に対応する輝度と、所定領域に正孔が存在しないときの所定領域の輝度である基準輝度とが一致したか否かを判定し、輝度情報に対応する輝度が基準輝度に一致したと判定した輝度情報に関連付けて記憶される繰り返し周波数を、正孔の寿命と推定し、推定された正孔の寿命を示す寿命情報を出力することを含む。

20

【0011】

さらに、本発明に係る正孔寿命推定方法は、正孔空間分布検出方法に含まれる処理を実行し、正孔空間分布情報から、試料の所定領域における正孔の空間分布の経時的变化を撮像した画像情報を生成し、画像情報から、所定領域の輝度の経時的变化を示す輝度情報を生成し、輝度情報から、プローブ光が試料に照射されてから正孔が所定領域に存在しなくなるまでの正孔の寿命を推定し、推定された正孔の寿命を示す寿命情報を出力することを含む。

【0012】

さらに、本発明に係る正孔移動度演算方法は、試料に接するように配置された一対の電極の間に直流電圧を印加し、正孔空間分布検出方法に含まれる処理を実行し、正孔空間分布情報から、試料の所定領域における正孔の空間分布の経時的变化を撮像した画像情報を生成し、画像情報から、印加された直流電圧により移動した正孔の移動速度を演算し、一対の電極の間の距離、印加された直流電圧、及び演算された正孔の移動速度から正孔の移動度を演算し、演算された正孔の移動度を示す移動度情報を出力することを含む。

30

【0013】

また、本発明に係る時間分解光電子顕微鏡装置は、試料の禁制帯幅よりも大きい光子エネルギーを有するポンプ光を生成し、生成したポンプ光を試料に照射して、試料の価電子帯から伝導帯に電子を励起するポンプ光生成部と、試料の価電子帯のイオン化エネルギーよりも大きい光子エネルギーを有するプローブ光を生成し、生成したプローブ光を試料に照射して、価電子帯に残された電子を試料から放出するプローブ光生成部と、試料から放出された電子の空間分布と補完関係となる正孔の空間分布を検出し、検出された正孔の空間分布を示す正孔空間分布情報を出力する光電子顕微鏡装置とを有する。

40

【発明の効果】

【0014】

本発明に係る正孔空間分布検出方法は、正孔の振る舞いを検出可能である。

【図面の簡単な説明】

【0015】

【図1】第1実施形態に係る時間分解光電子顕微鏡装置のブロック図である。

【図2】図1に示す光電子顕微鏡装置のブロック図である。

50

【図 3】図 1 に示す制御装置のブロック図である。

【図 4】図 1 に示す時間分解光電子顕微鏡装置により実行される正孔空間分布検出処理のフローチャートである。

【図 5】( a ) はポンプ光が照射された試料のキャリアの状態を示す図であり、( b ) はプローブ光が照射された試料のキャリアの状態を示す図である。

【図 6】図 1 に示す時間分解光電子顕微鏡装置による正孔の空間分布検出処理の一例を示す図であり、( a ) は( b ) ~ ( d ) の矢印 A で示される矩形の所定領域の P E E M 強度の経時変化を示す図であり、( b ) はポンプ光が照射される前の試料の表面を撮像した画像であり、( c ) はポンプ光が照射されたときの試料の表面を撮像した画像であり、( d ) はポンプ光が照射された後の試料の表面を撮像した画像である。

10

【図 7】第 2 実施形態に係る時間分解光電子顕微鏡装置のブロック図である。

【図 8】図 7 に示す制御装置のブロック図である。

【図 9】図 7 に示す時間分解光電子顕微鏡装置により実行される正孔空間分布検出処理のフローチャートである。

【図 10】繰り返し周波数と正孔の寿命との関係を示す図であり、( a ) 及び( b ) は繰り返し周波数が 20 k H z であるときの P E E M 強度の経時変化を示す図であり、( c ) 及び( d ) は繰り返し周波数が 5 k H z であるときの P E E M 強度の経時変化を示す図であり、( e ) 及び( f ) は繰り返し周波数が 0 . 5 k H z であるときの P E E M 強度の経時変化を示す図である。

【図 11】第 3 実施形態に係る時間分解光電子顕微鏡装置のブロック図である。

20

【図 12】図 11 に示す制御装置のブロック図である。

【図 13】図 11 に示す時間分解光電子顕微鏡装置により実行される正孔空間分布検出処理のフローチャートである。

【図 14】輝度情報から正孔の寿命を推定する方法の一例を示す図である。

【図 15】第 4 実施形態に係る時間分解光電子顕微鏡装置のブロック図である。

【図 16】図 15 に示す光電子顕微鏡装置のブロック図である。

【図 17】図 15 に示す制御装置のブロック図である。

【図 18】図 15 に示す時間分解光電子顕微鏡装置により実行される正孔空間分布検出処理のフローチャートである。

【発明を実施するための形態】

30

【0016】

以下、本発明の時間分解光電子顕微鏡装置、正孔空間分布検出方法、正孔寿命推定方法及び正孔移動度演算方法について図を参照しつつ説明する。但し、本発明の技術的範囲はそれらの実施の形態に限定されず、特許請求の範囲に記載された発明とその均等物に及ぶ点に留意されたい。

【0017】

(第 1 実施形態に係る時間分解光電子顕微鏡装置の構成及び機能)

図 1 は、第 1 実施形態に係る時間分解光電子顕微鏡装置のブロック図である。

【0018】

時間分解光電子顕微鏡装置 1 は、レーザー光源 10 と、ポンプ光生成部 11 と、プローブ光生成部 12 と、光電子顕微鏡装置 13 と、ビームスプリッタ 14 と、複数の光学ミラー 15 と、制御装置 20 とを有する。

40

【0019】

レーザー光源 10 は、フェムト秒レベルのパルス幅を有し、且つ、繰り返し周波数が可変であるパルス状のレーザー光を出力する。レーザー光源 10 は、例えば発振波長が 1028 nm ( 1 . 2 e V の光子エネルギーに相当 )、パルス幅が 180 f s であり、繰り返し周波数が 1 k H z 以上 1 M H z 以下の範囲で可変である。レーザー光源 10 は、例えば Light Conversion 社製の極短パルスレーザー ( P H A R O S ) であってもよい。なお、レーザー光源 10 は、パルス幅がアト秒レベルであり且つ繰り返し周波数が可変であるパルスを出力するアト秒パルスレーザー光源であってもよい。また、単一

50

のレーザー光源 10 が配置されるが、ポンプ光生成部 11 及びプローブ光生成部 12 のそれぞれにレーザーを入射する 2 つのレーザー光源を配置してもよい。

【0020】

ポンプ光生成部 11 は、波長変換器 111 と、高次高調波発生装置 112 とを有し、試料の禁制帯幅よりも大きいフォトンエネルギーを有するポンプ光  $L_{pu}$  を試料に照射して、試料の価電子帯から伝導帯に電子を励起する。ポンプ光生成部 11 は、例えば出力するポンプ光  $L_{pu}$  のフォトンエネルギーを所定の範囲で変更可能な光パラメトリック増幅器 (Optical Parametric Amplifier、OPA) である。高次高調波発生装置 112 は、光学ミラー、偏光子及び非線形結晶等の光学素子と、光学素子を回転及び移動するモータ及びピエゾ素子等の駆動素子とを有し、波長変換器 111 から入力されるパルス状のレーザー光のフォトンエネルギーを変換する。ポンプ光生成部 11 は、3 eV 以上 5 eV 以下の範囲で制御することが好ましく、0.1 eV 以上 8 eV 以下の範囲で制御することが更に好ましい。

10

【0021】

プローブ光生成部 12 は、波長変換器 121 と、高次高調波発生装置 122 とを有し、試料の価電子帯のイオン化エネルギーよりも大きいフォトンエネルギーを有するプローブ光  $L_{pr}$  を試料に照射して、価電子帯に残された電子を試料から光電子として放出する。プローブ光生成部 12 は、例えば出力するプローブ光  $L_{pr}$  のフォトンエネルギーを所定の範囲で変更可能な光パラメトリック増幅器 (Optical Parametric Amplifier、OPA) である。高次高調波発生装置 122 は、光学ミラー、偏光子及び非線形結晶等の光学素子と、光学素子を回転及び移動するモータ及びピエゾ素子等の駆動素子とを有し、波長変換器 121 から入力されるパルス状のレーザー光のフォトンエネルギーを変換する。プローブ光生成部 12 は、3 eV 以上 5 eV 以下の範囲で制御することが好ましく、0.1 eV 以上 8 eV 以下の範囲で制御することが更に好ましい。

20

【0022】

図 2 は、光電子顕微鏡装置 13 のブロック図である。

【0023】

光電子顕微鏡装置 13 は、光電子 (放出) 顕微鏡 (Photoemission Electron microscopy、PEEM) 131 と、スクリーン 132 と、撮像装置 133 とを有する。光電子顕微鏡装置 13 は、試料から放出される光電子の空間分布と補完関係となる正孔の空間分布を検出し、検出された正孔の空間分布を示す正孔空間分布情報を出力する。PEEM 131 は、例えばオミクロン社製の PEEM であってもよく、一例では GaAs である試料 100 にポンプ光  $L_{pu}$  及びプローブ光  $L_{pr}$  が照射されることにより試料 100 から放出される光電子の空間分布を拡大投影した光信号をスクリーン 132 に出力する。スクリーン 132 は、蛍光体を含む透光性部材であり、PEEM 131 から入力された光信号を可視光に変換して、撮像装置 133 に出力する。撮像装置 133 は、例えば電荷結合素子 (Charge Coupled Device、CCD) を有し、スクリーン 132 から入力される可視光を光電変換して、光電子の空間分布と補完関係となる正孔の空間分布を示す正孔空間分布情報を制御装置 20 に出力する。

30

【0024】

ビームスプリッター 14 は、例えばハーフミラーであり、レーザー光源 10 とポンプ光生成部 11 及びプローブ光生成部 12 との間に配置され、レーザー光源 10 から出力されたレーザー光をポンプ光生成部 11 とプローブ光生成部 12 とに分光する。

40

【0025】

複数の光学ミラー 15 は、レーザー光源 10 とプローブ光生成部 12 との間、並びにポンプ光生成部 11 及びプローブ光生成部 12 と光電子顕微鏡装置 13 との間に配置され、レーザー光、ポンプ光  $L_{pu}$  及びプローブ光  $L_{pr}$  を所望の方向に反射する。また、プローブ光生成部 12 と光電子顕微鏡装置 13 との間に配置される複数の光学ミラー 15 は、プローブ光  $L_{pr}$  が試料 100 に到達時間を、ポンプ光  $L_{pu}$  が試料 100 に到達時間よりも遅延させる光学遅延ステージ DS を形成する。

50

## 【 0 0 2 6 】

図 4 は、制御装置 2 0 のブロック図である。

## 【 0 0 2 7 】

制御装置 2 0 は、時間分解光電子顕微鏡装置 1 を制御する制御装置であり、時間分解光電子顕微鏡装置 1 を操作するオペレータにより操作される。制御装置 2 0 は、通信部 2 1 と、記憶部 2 2 と、入力部 2 3 と、出力部 2 4 と、処理部 3 0 とを有する。通信部 2 1、記憶部 2 2、入力部 2 3、出力部 2 4 及び処理部 3 0 は、バス 2 5 を介して互いに接続される。

## 【 0 0 2 8 】

通信部 2 1 は、イーサネット（登録商標）などの有線の通信インターフェース回路を有する。通信部 2 1 は、レーザー光源 1 0、ポンプ光生成部 1 1、プローブ光生成部 1 2 及び光電子顕微鏡装置 1 3 等と通信を行う。

10

## 【 0 0 2 9 】

記憶部 2 2 は、例えば、半導体記憶装置、磁気テープ装置、磁気ディスク装置、又は光ディスク装置のうちの少なくとも一つを備える。記憶部 2 2 は、処理部 3 0 での処理に用いられるオペレーティングシステムプログラム、ドライバプログラム、アプリケーションプログラム、データ等を記憶する。例えば、記憶部 2 2 は、アプリケーションプログラムとして、正孔の空間分布を検出する正孔空間分布検出処理を処理部 3 0 に実行させるための正孔空間分布検出プログラム等を記憶する。正孔空間分布検出プログラムは、例えば C D - R O M、D V D - R O M 等のコンピュータ読み取り可能な可搬型記録媒体から、公知のセットアッププログラム等を用いて記憶部 2 2 にインストールされてもよい。また、記憶部 2 2 は、正孔空間分布検出処理で使用される種々のデータを記憶する。さらに、記憶部 2 2 は、所定の処理に係る一時的なデータを一時的に記憶してもよい。

20

## 【 0 0 3 0 】

入力部 2 3 は、データの入力が可能であればどのようなデバイスでもよく、例えば、タッチパネル、キーボード等である。オペレータは、入力部 2 3 を用いて、文字、数字、記号等を入力することができる。入力部 2 3 は、オペレータにより操作されると、その操作に対応する信号を生成する。そして、生成された信号は、オペレータの指示として、処理部 3 0 に供給される。

## 【 0 0 3 1 】

出力部 2 4 は、映像や画像等の表示が可能であればどのようなデバイスでもよく、例えば、液晶ディスプレイ又は有機 E L (Electro - Luminescence) ディスプレイ等である。出力部 2 4 は、処理部 3 0 から供給された映像データに応じた映像や、画像データに応じた画像等を表示する。また、出力部 2 4 は、紙などの表示媒体に、映像、画像又は文字等を印刷する出力装置であってもよい。

30

## 【 0 0 3 2 】

処理部 3 0 は、一又は複数個のプロセッサ及びその周辺回路を有する。処理部 3 0 は、制御装置 2 0 の全体的な動作を統括的に制御するものであり、例えば、C P U である。処理部 3 0 は、記憶部 2 2 に記憶されているプログラム（ドライバプログラム、オペレーティングシステムプログラム、アプリケーションプログラム等）に基づいて処理を実行する。また、処理部 3 0 は、複数のプログラム（アプリケーションプログラム等）を並列に実行できる。

40

## 【 0 0 3 3 】

処理部 3 0 は、制御部 3 1 を有する。制御部 3 1 は、処理部 3 0 が備えるプロセッサで実行されるプログラムにより実現される機能モジュールである。あるいは、制御部 3 1 は、ファームウェアとして制御装置 2 0 に実装されてもよい。

## 【 0 0 3 4 】

（第 1 実施形態に係る時間分解光電子顕微鏡装置により実行される正孔空間分布検出処理）

図 4 は、時間分解光電子顕微鏡装置 1 により実行される正孔空間分布検出処理のフロー

50

チャートである。正孔空間分布検出処理は、予め記憶部 22 に記憶されているプログラムに基づいて、主に処理部 30 により時間分解光電子顕微鏡装置 1 の各要素と協働して実行される。

【0035】

まず、制御部 31 は、レーザー光源 10 が出力するレーザー光の繰り返し周波数を示す繰り返し周波数信号をレーザー光源 10 に出力する (S101)。レーザー光源 10 は、入力された繰り返し周波数信号に対応する繰り返し周波数をパルス状のレーザー光の繰り返し周波数に設定する。

【0036】

次いで、制御部 31 は、ポンプ光生成部 11 が出力するポンプ光  $L_{pu}$  の光子エネルギーを示すポンプ光エネルギー信号をポンプ光生成部 11 に出力する (S102)。ポンプ光エネルギー信号に対応する光子エネルギーは、試料 100 の禁制帯幅よりも大きい光子エネルギーである。ポンプ光生成部 11 は、入力されたポンプ光エネルギー信号に対応する光子エネルギーを出力するポンプ光  $L_{pu}$  の光子エネルギーに設定する。

10

【0037】

次いで、制御部 31 は、プローブ光生成部 12 が出力するプローブ光  $L_{pr}$  の光子エネルギーを示すプローブ光エネルギー信号をポンプ光生成部 11 に出力する (S103)。プローブ光エネルギー信号に対応する光子エネルギーは、試料 100 の価電子帯のイオン化エネルギーよりも大きい光子エネルギーである。

20

【0038】

設定されるプローブ光  $L_{pr}$  の光子エネルギー  $E_{pr}$  は、価電子帯のイオン化エネルギー  $E_{th}$  に対して、

$$E_{th} < E_{pr} < E_{th} + 0.5 \text{ eV}$$

との関係を有することが好ましい。また、設定されるプローブ光  $L_{pr}$  の光子エネルギー  $E_{pr}$  は、価電子帯のイオン化エネルギー  $E_{th}$  に対して、

$$E_{th} + 0.1 \text{ eV} < E_{pr} < E_{th} + 0.4 \text{ eV}$$

との関係を有することが更に好ましい。プローブ光生成部 12 は、入力されたプローブ光エネルギー信号に対応する光子エネルギーを出力するプローブ光  $L_{pr}$  の光子エネルギーに設定する。

30

【0039】

次いで、制御部 31 は、正孔空間分布検出を開始することを示す検出開始信号をレーザー光源 10 に出力する (S104)。レーザー光源 10 は、検出開始信号が入力されることに応じて、パルス状のレーザー光をビームスプリッタ 14 を介してポンプ光生成部 11 及びプローブ光生成部 12 に出力する。以降、レーザー光源 10 は、パルス状のレーザー光をビームスプリッタ 14 を介してポンプ光生成部 11 及びプローブ光生成部 12 に出力し続ける。

【0040】

ポンプ光生成部 11 は、レーザー光源 10 から入力されるレーザー光から S102 の処理で設定された光子エネルギーを有するポンプ光  $L_{pu}$  を生成し、生成したポンプ光  $L_{pu}$  を試料 100 に照射する (S105)。ポンプ光生成部 11 がポンプ光  $L_{pu}$  を試料 100 に照射することで、図 5 (a) に示すように試料 100 の価電子帯から伝導帯に電子 101 を励起する。試料 100 の価電子帯から伝導帯に電子 101 が励起されると、価電子帯に正孔 102 が形成される。

40

【0041】

プローブ光生成部 12 は、レーザー光源 10 から入力されるレーザー光から S103 の処理で設定された光子エネルギーを有するプローブ光  $L_{pr}$  を生成し、生成したプローブ光  $L_{pr}$  を試料 100 に照射する (S106)。プローブ光生成部 12 がプローブ光  $L_{pr}$  を試料 100 に照射することで、図 5 (b) に示すように試料 100 の価電子帯に残った電子 101 が光電子 103 として試料 100 から放出される。S105 及び S106 の処

50



理を複数回に亘って繰り返すことにより正孔の空間分布を示す画像の解像度を向上させることができる。

【0042】

プローブ光生成部12がプローブ光 $L_{PR}$ を試料100に照射することで、伝導帯に励起された電子101もまた試料100から光電子として放出される。しかしながら、伝導帯に励起された電子101の数は、試料100の価電子帯に残った電子101の数よりも十分に少ないので、スクリーン132の量子効果等により撮像装置133により撮像され難い。

【0043】

光電子顕微鏡装置13は、試料から放出された電子の空間分布と補完関係となる正孔の空間分布を検出する(S107)。光電子顕微鏡装置13は、試料100から放出される光電子103の空間分布を示す空間分布情報を制御装置20に出力する。

10

【0044】

制御部31は、光電子顕微鏡装置13から入力された空間分布情報を、S101の処理で設定された繰り返し周波数に関連付けて記憶する(S108)。次いで、制御部31は、光学遅延ステージDSの位置を変更して、ポンプ光 $L_{PU}$ とプローブ光 $L_{PR}$ との間の遅延時間を変更する(S109)。

【0045】

次いで、制御部31は、正孔空間分布検出処理を終了する処理終了指示が入力されたか否かを判定する(S110)。制御部31が処理終了指示が入力されていないと判定する(S110-NO)と、処理はS105に戻る。

20

【0046】

以降、制御部31が処理終了指示が入力されたと判定する(S110-YES)まで、ポンプ光 $L_{PU}$ とプローブ光 $L_{PR}$ との間の遅延時間を変更しながら、S105~S110の処理が繰り返される。例えば、ポンプ光 $L_{PU}$ がプローブ光 $L_{PR}$ よりも試料100に5ps先に照射する状態から、ポンプ光 $L_{PU}$ がプローブ光 $L_{PR}$ よりも試料100に20ps後に照射する状態まで0.1ps毎に遅延時間を変更しながら、S105~S110の処理が繰り返されてもよい。そして、制御部31は、処理終了指示が入力されたと判定する(S110-YES)と、正孔空間分布検出を終了することを示す検出終了信号をレーザー光源10に出力して(S111)、レーザー光源10がレーザー光の出力を停止して処理は終了する。

30

【0047】

(第1実施形態に係る時間分解光電子顕微鏡装置の作用効果)

時間分解光電子顕微鏡装置1は、試料100の価電子帯のイオン化エネルギーよりも大きいフォトンエネルギーを有するプローブ光 $L_{PR}$ を試料100に照射して、試料100の価電子帯に残された電子101が放出された光電子103の空間分布を検出する。試料100の価電子帯に残された電子101の空間分布は、試料100の価電子帯に形成される正孔と補完関係となるので、時間分解光電子顕微鏡装置1は、正孔の空間分布を検出することができる。

【0048】

40

図6は、時間分解光電子顕微鏡装置1による正孔の空間分布検出処理の一例を示す図である。図6(a)は、図6(b)~6(d)の矢印Aで示される矩形の所定領域のPEEM強度の経時変化を示す図である。図6(b)はポンプ光 $L_{PU}$ が照射される前の試料の表面を撮像した画像であり、図6(c)はポンプ光 $L_{PU}$ が照射されたときの試料の表面を撮像した画像であり、図6(d)はポンプ光 $L_{PU}$ が照射された後の試料の表面を撮像した画像である。図6(a)において、横軸はプローブ光 $L_{PR}$ が照射される前後の時間変化を示し、縦軸は図6(b)~6(d)の矢印Aで示される矩形の所定領域の輝度であり、PEEM強度とも称される。

【0049】

図6(b)に示すように、ポンプ光 $L_{PU}$ が照射される前では、試料の表面は、矢印Aで

50

示される矩形の所定領域を含めて、ポンプ光  $L_{pu}$  の照射により生成した電子及び正孔は存在しない。図 6 ( c ) に示すように、ポンプ光  $L_{pu}$  が照射されると、矢印 A で示される矩形の所定領域を含めて、正孔が形成されて、輝度が低下する。さらに、図 6 ( d ) に示すように、ポンプ光  $L_{pu}$  が照射された後、矢印 A で示される矩形の所定領域を含めて、正孔が存在し続ける。

#### 【 0 0 5 0 】

( 第 2 実施形態に係る時間分解光電子顕微鏡装置の構成及び機能 )

図 7 は第 2 実施形態に係る時間分解光電子顕微鏡装置のブロック図であり、図 8 は図 7 に示す制御装置のブロック図である。

#### 【 0 0 5 1 】

時間分解光電子顕微鏡装置 2 は、制御装置 4 0 を制御装置 2 0 の代わりに有することが、時間分解光電子顕微鏡装置 1 と相違する。制御装置 4 0 以外の時間分解光電子顕微鏡装置 2 の構成要素の構成及び機能は、同一符号が付された時間分解光電子顕微鏡装置 1 の構成要素の構成及び機能と同一なので、ここでは詳細な説明は省略する。制御装置 4 0 は、処理部 5 0 を処理部 3 0 の代わりに有することが制御装置 2 0 と相違する。処理部 5 0 以外の制御装置 4 0 の構成要素の構成及び機能は、同一符号が付された制御装置 2 0 の構成要素の構成及び機能と同一なので、ここでは詳細な説明は省略する。

#### 【 0 0 5 2 】

処理部 5 0 は、一又は複数個のプロセッサ及びその周辺回路を有する。処理部 5 0 は、制御装置 4 0 の全体的な動作を統括的に制御するものであり、例えば、CPU である。処理部 5 0 は、記憶部 2 2 に記憶されているプログラム ( ドライバプログラム、オペレーティングシステムプログラム、アプリケーションプログラム等 ) に基づいて処理を実行する。また、処理部 5 0 は、複数のプログラム ( アプリケーションプログラム等 ) を並列に実行できる。

#### 【 0 0 5 3 】

処理部 5 0 は、制御部 5 1 と、繰り返し周波数変更部 5 2 と、画像情報生成部 5 3 と、輝度情報生成部 5 4 と、輝度情報判定部 5 5 と、寿命推定部 5 6 と、寿命情報出力部 5 7 とを有する。これらの各部は、処理部 5 0 が備えるプロセッサで実行されるプログラムにより実現される機能モジュールである。あるいは、これらの各部は、ファームウェアとして制御装置 4 0 に実装されてもよい。

#### 【 0 0 5 4 】

( 第 2 実施形態に係る時間分解光電子顕微鏡装置により実行される正孔寿命推定処理 )

図 9 は、時間分解光電子顕微鏡装置 2 により実行される正孔寿命推定処理のフローチャートである。正孔寿命推定処理は、予め記憶部 2 2 に記憶されているプログラムに基づいて、主に処理部 5 0 により時間分解光電子顕微鏡装置 2 の各要素と協働して実行される。

#### 【 0 0 5 5 】

S 2 0 1 ~ S 2 0 9 の処理は、S 1 0 1 ~ S 1 0 9 の処理と同様なので、ここでは詳細な説明は省略する。

#### 【 0 0 5 6 】

制御部 5 1 が処理終了指示が入力されていないと判定する ( S 2 0 9 - N O ) と、繰り返し周波数変更部 5 2 は、繰り返し周波数を変更することを示す繰り返し周波数変更指示をレーザー光源 1 0 に出力する ( S 2 1 0 ) 。レーザー光源 1 0 は、繰り返し周波数変更指示が入力されると、繰り返し周波数変更指示に応じて繰り返し周波数を変更する。次いで、処理は、S 2 0 5 に戻る。以降、制御部 5 1 が処理終了指示が入力されたらと判定する ( S 2 0 9 - Y E S ) まで、S 2 0 5 ~ S 2 1 0 の処理が繰り返される。

#### 【 0 0 5 7 】

S 2 0 5 ~ S 2 1 0 の処理が繰り返されることで、ポンプ光  $L_{pu}$  及びプローブ光  $L_{pr}$  を試料 1 0 0 に照射する繰り返し周波数を変化させながら、正孔 1 0 2 の空間分布を検出する処理が複数回に亘って実行される。

#### 【 0 0 5 8 】

10

20

30

40

50

制御部 5 1 は、処理終了指示が入力されたと判定する ( S 2 0 9 - Y E S ) と、正孔空間分布検出を終了することを示す検出終了信号をレーザー光源 1 0 に出力して ( S 2 1 1 )、レーザー光源 1 0 がレーザー光の出力を停止する。

【 0 0 5 9 】

次いで、画像情報生成部 5 3 は、 S 2 0 9 の処理で記憶部 2 2 に記憶された正孔空間分布情報から、試料 1 0 0 の所定領域における正孔 1 0 2 の空間分布の経時的変化を撮像した画像情報を繰り返し周波数毎に生成する ( S 2 1 2 )。画像情報生成部 5 3 は、生成した画像情報を繰り返し周波数毎に関連付けて記憶部 2 2 に記憶する。

【 0 0 6 0 】

次いで、輝度情報生成部 5 4 は、 S 2 1 2 の処理で生成された画像情報から、プローブ光  $L_{PR}$  が試料 1 0 0 に照射される直前の所定領域の輝度を示す輝度情報を生成繰り返し周波数毎に生成する ( S 2 1 3 )。輝度情報生成部 5 4 は、生成した輝度情報を繰り返し周波数毎に関連付けて記憶部 2 2 に記憶する。

【 0 0 6 1 】

輝度情報判定部 5 5 は、 S 2 1 3 の処理で生成された輝度情報に対応する輝度と、所定領域に正孔が存在しないときの所定領域の輝度である基準輝度とが一致したか否かを判定する ( S 2 1 4 )。画像情報生成部 5 3 は、生成した輝度情報を繰り返し周波数毎に関連付けて記憶部 2 2 に記憶する。

【 0 0 6 2 】

基準輝度は、正孔が存在しないときの輝度なので、正孔 1 0 2 の寿命、すなわちプローブ光  $L_{PR}$  により価電子帯から励起されて試料 1 0 0 から放出された光電子 1 0 3 が価電子帯に戻るまでの期間に一致したときの繰り返し周波数が正孔 1 0 2 の寿命と推定される。

【 0 0 6 3 】

図 1 0 は、繰り返し周波数と正孔の寿命との関係を示す図である。図 1 0 ( a ) 及び 1 0 ( b ) は、繰り返し周波数が 2 0 k H z ( 周期は 5 0  $\mu$  s である ) であるときの図 6 ( b ) ~ 6 ( d ) の矢印 A で示される矩形の所定領域の P E E M 強度の経時変化を示す図である。図 1 0 ( c ) 及び 1 0 ( d ) は、繰り返し周波数が 5 k H z ( 周期が 0 0  $\mu$  s である ) であるときの図 6 ( b ) ~ 6 ( d ) の矢印 A で示される矩形の所定領域の P E E M 強度の経時変化を示す図である。図 1 0 ( e ) 及び 1 0 ( f ) は、繰り返し周波数が 0 . 5 k H z ( 周期は 2 0 0 0 0  $\mu$  s である ) であるときの図 6 ( b ) ~ 6 ( d ) の矢印 A で示される矩形の所定領域の P E E M 強度の経時変化を示す図である。

【 0 0 6 4 】

図 1 0 ( a ) ~ 1 0 ( f ) において、横軸はプローブ光が照射される前後の時間変化を示し、縦軸は図 6 ( b ) ~ 6 ( d ) の矢印 A で示される矩形の所定領域の P E E M 強度である。図 1 0 ( b )、1 0 ( d ) 及び 1 0 ( f ) において、縦軸はの正孔が存在しないときの輝度を 1 として正規化される。

【 0 0 6 5 】

曲線 C 1 1、C 2 1 及び C 3 1 は、ポンプ光  $L_{PU}$  が照射されないときの輝度変化を示し、基準輝度に対応する。曲線 C 1 2、C 2 2、C 3 2、C 1 3、C 2 3 及び C 3 3 は、ポンプ光  $L_{PU}$  及びプローブ光  $L_{PR}$  が照射されたときの輝度変化を示し、 S 2 1 5 の処理で生成された輝度情報に対応する輝度に対応する。

【 0 0 6 6 】

繰り返し周波数が 2 0 k H z であるとき、プローブ光  $L_{PR}$  が試料 1 0 0 に照射される直前の輝度は基準輝度の 9 0 % 程度であり、繰り返し周波数が 5 k H z であるとき、プローブ光  $L_{PR}$  が試料 1 0 0 に照射される直前の輝度は基準輝度の 9 5 % 程度である。繰り返し周波数が 2 0 k H z 及び 5 k H z であるとき、プローブ光  $L_{PR}$  が試料 1 0 0 に照射される直前でも、正孔は試料 1 0 0 の表面に溜め込まれているため、輝度が基準輝度の 1 0 0 % に達しない。

【 0 0 6 7 】

一方、繰り返し周波数が 0 . 5 k H z であるとき、プローブ光  $L_{PR}$  が試料 1 0 0 に照射

10

20

30

40

50

される直前の輝度は基準輝度の略100%である。繰り返し周波数が0.5kHzであるとき、プローブ光 $L_{pr}$ が試料100に照射される直前に、電子101が試料100の表面から価電子帯に戻ることにより、正孔が寿命に達する。

【0068】

輝度情報判定部55は、輝度情報に対応する輝度と基準輝度とが一致したと判定する(S214 - YES)まで、S214の処理を繰り返す。輝度情報に対応する輝度と基準輝度とが一致したと判定される(S214 - YES)と、寿命推定部56は、輝度情報に対応する輝度が基準輝度に一致したと判定した輝度情報に関連付けて記憶される繰り返し周波数を、正孔の寿命と推定する(S215)。

【0069】

そして、寿命情報出力部57は、S2157の処理で推定された正孔の寿命を示す寿命情報を出力する(S216)。

【0070】

(第2実施形態に係る時間分解光電子顕微鏡装置の作用効果)

時間分解光電子顕微鏡装置2は、従来の技術では推定が容易ではなかった正孔の寿命を正孔の空間分布の経時変化から直接推定することができる。

【0071】

(第3実施形態に係る時間分解光電子顕微鏡装置の構成及び機能)

図11は第3実施形態に係る時間分解光電子顕微鏡装置のブロック図であり、図12は図11に示す制御装置のブロック図である。

【0072】

時間分解光電子顕微鏡装置3は、制御装置60を制御装置20の代わりに有することが、時間分解光電子顕微鏡装置1と相違する。制御装置60以外の時間分解光電子顕微鏡装置3の構成要素の構成及び機能は、同一符号が付された時間分解光電子顕微鏡装置1の構成要素の構成及び機能と同一なので、ここでは詳細な説明は省略する。制御装置60は、処理部70を処理部30の代わりに有することが制御装置20と相違する。処理部70以外の制御装置60の構成要素の構成及び機能は、同一符号が付された制御装置20の構成要素の構成及び機能と同一なので、ここでは詳細な説明は省略する。

【0073】

処理部70は、一又は複数個のプロセッサ及びその周辺回路を有する。処理部70は、制御装置60の全体的な動作を統括的に制御するものであり、例えば、CPUである。処理部70は、記憶部22に記憶されているプログラム(ドライバプログラム、オペレーティングシステムプログラム、アプリケーションプログラム等)に基づいて処理を実行する。また、処理部70は、複数のプログラム(アプリケーションプログラム等)を並列に実行できる。

【0074】

処理部70は、制御部71と、画像情報生成部72と、輝度情報生成部73と、寿命推定部74と、寿命情報出力部75とを有する。これらの各部は、処理部70が備えるプロセッサで実行されるプログラムにより実現される機能モジュールである。あるいは、これらの各部は、ファームウェアとして制御装置60に実装されてもよい。

【0075】

(第3実施形態に係る時間分解光電子顕微鏡装置により実行される正孔寿命推定処理)

図13は、時間分解光電子顕微鏡装置3により実行される正孔寿命推定処理のフローチャートである。正孔寿命推定処理は、予め記憶部22に記憶されているプログラムに基づいて、主に処理部70により時間分解光電子顕微鏡装置3の各要素と協働して実行される。

【0076】

S301~S308の処理は、S102~S108及びS110の処理と同様なので、ここでは詳細な説明は省略する。

【0077】

10

20

30

40

50

制御部 7 1 が処理終了指示が入力されていないと判定する ( S 3 0 8 - N O ) と、処理は S 3 0 4 に戻る。以降、制御部 7 1 が処理終了指示が入力されたらと判定する ( S 3 0 8 - Y E S ) まで S 3 0 4 ~ S 3 0 8 の処理が繰り返される。

【 0 0 7 8 】

制御部 7 1 は、処理終了指示が入力されたらと判定する ( S 3 0 8 - Y E S ) と、正孔空間分布検出を終了することを示す検出終了信号をレーザー光源 1 0 に出力して ( S 3 0 9 )、レーザー光源 1 0 がレーザー光の出力を停止する。

【 0 0 7 9 】

次いで、画像情報生成部 7 2 は、 S 3 0 7 の処理で記憶部 2 2 に記憶された正孔空間分布情報から、試料 1 0 0 の所定領域における正孔 1 0 2 の空間分布の経時変化を撮像した画像情報を生成する ( S 3 1 0 )。画像情報生成部 7 2 は、生成した画像情報を記憶部 2 2 に記憶する。

10

【 0 0 8 0 】

次いで、輝度情報生成部 7 3 は、 S 3 1 0 の処理で生成された画像情報から、プローブ光  $L_{PR}$  が試料 1 0 0 に照射された後の所定領域の輝度の経時変化を示す輝度情報を生成する ( S 3 1 1 )。輝度情報生成部 7 3 は、生成した輝度情報を記憶部 2 2 に記憶する。

【 0 0 8 1 】

次いで、寿命推定部 7 4 は、輝度情報から、プローブ光  $L_{PR}$  が試料 1 0 0 に照射されてから正孔 1 0 2 が所定領域に存在しなくなるまでの正孔 1 0 2 の寿命を推定する ( S 3 1 2 )。

20

【 0 0 8 2 】

図 1 4 は、輝度情報から正孔の寿命を推定する方法の一例を示す図である。図 1 4 において、横軸はポンプ光照射時間に対するプローブ光が照射される前後の時間変化を示し、縦軸は図 6 ( b ) ~ 6 ( d ) の矢印 A で示される矩形の所定領域の P E E M 強度である。図 1 4 において、縦軸は正孔が存在しないときの輝度を 1 として正規化される。図 1 4 において、曲線 C 4 1 は S 3 1 3 の処理で生成された輝度情報であり、曲線 C 4 2 は S 3 1 3 の処理で生成された輝度情報から演算された近似曲線を示す。

【 0 0 8 3 】

まず、寿命推定部 7 4 は、 S 3 1 1 の処理で生成された輝度情報から、最小二乗法等の近似手法を使用して、近似曲線を演算する。次いで、寿命推定部 7 4 は、演算した近似曲線から正孔の寿命を推定する。図 1 4 に示す例では、  $500 \mu\text{m}$  まで検出された輝度の近似曲線から P E E M 強度が 1 に達する時点为正孔の寿命と推定する。図 1 4 に示す例では、正孔の寿命は  $3 \pm 1.5 \text{ms}$  と推定された。

30

【 0 0 8 4 】

そして、寿命情報出力部 5 7 は、 S 3 1 2 の処理で推定された正孔の寿命を示す寿命情報を出力する ( S 3 1 3 )。

【 0 0 8 5 】

( 第 3 実施形態に係る時間分解光電子顕微鏡装置の作用効果 )

時間分解光電子顕微鏡装置 3 は、従来の技術では推定が容易ではなかった正孔の寿命を正孔の空間分布の経時変化から直接推定することができる。

40

【 0 0 8 6 】

( 第 4 実施形態に係る時間分解光電子顕微鏡装置の構成及び機能 )

図 1 5 は第 4 実施形態に係る時間分解光電子顕微鏡装置のブロック図である。

【 0 0 8 7 】

時間分解光電子顕微鏡装置 4 は、光電子顕微鏡装置 1 8 及び制御装置 8 0 を光電子顕微鏡装置 1 3 及び制御装置 2 0 の代わりに有することが、時間分解光電子顕微鏡装置 1 と相違する。光電子顕微鏡装置 1 8 及び制御装置 8 0 以外の時間分解光電子顕微鏡装置 4 の構成要素の構成及び機能は、同一符号が付された時間分解光電子顕微鏡装置 1 の構成要素の構成及び機能と同一なので、ここでは詳細な説明は省略する。

【 0 0 8 8 】

50

図16(a)は光電子顕微鏡装置18のブロック図であり、図16(b)は、試料100と、直流電源180、第1電極181、第2電極182及びスイッチ183との配置関係を示す平面図である。

【0089】

光電子顕微鏡装置18は、直流電源180、第1電極181、第2電極182及びスイッチ183を有することが光電子顕微鏡装置13と相違する。直流電源180、第1電極181、第2電極182及びスイッチ183以外の光電子顕微鏡装置18の構成要素の構成及び機能は、同一符号が付された光電子顕微鏡装置13の構成要素の構成及び機能と同一なので、ここでは詳細な説明は省略する。

【0090】

直流電源180は、第1電極181及び第2電極182に電氣的に接続され、第1電極181と第2電極182との間に試料100を介して電圧Vを印加する。第1電極181及び第2電極182は、銅等の金属で形成された電極であり、試料100に電圧を印加する。第1電極181と第2電極182との間の離隔距離は、Dで示される。スイッチ183は、制御装置80から入力される電圧印加開始指示に応じてオンして、第1電極181と第2電極182との間に直流電圧Vを印加する。また、スイッチ183は、制御装置80から入力される電圧印加終了指示に応じてオフして、第1電極181と第2電極182との間への直流電圧Vの印加を終了する。

【0091】

図17は、制御装置80のブロック図である。

【0092】

制御装置80は、処理部90を処理部30の代わりに有することが制御装置20と相違する。処理部90以外の制御装置80の構成要素の構成及び機能は、同一符号が付された制御装置20の構成要素の構成及び機能と同一なので、ここでは詳細な説明は省略する。

【0093】

処理部90は、一又は複数個のプロセッサ及びその周辺回路を有する。処理部90は、制御装置80の全体的な動作を統括的に制御するものであり、例えば、CPUである。処理部90は、記憶部22に記憶されているプログラム(ドライバプログラム、オペレーティングシステムプログラム、アプリケーションプログラム等)に基づいて処理を実行する。また、処理部90は、複数のプログラム(アプリケーションプログラム等)を並列に実行できる。

【0094】

処理部90は、制御部91と、画像情報生成部92と、移動速度演算部93と、移動度演算部94と、移動度情報出力部95とを有する。これらの各部は、処理部90が備えるプロセッサで実行されるプログラムにより実現される機能モジュールである。あるいは、これらの各部は、ファームウェアとして制御装置80に実装されてもよい。

【0095】

(第4実施形態に係る時間分解光電子顕微鏡装置により実行される正孔移動度演算処理)

図18は、時間分解光電子顕微鏡装置4により実行される正孔移動度演算処理のフローチャートである。正孔移動度演算処理は、予め記憶部22に記憶されているプログラムに基づいて、主に処理部70により時間分解光電子顕微鏡装置4の各要素と協働して実行される。

【0096】

まず、制御部91は、電圧印加開始指示を光電子顕微鏡装置18に出力する(S401)。光電子顕微鏡装置18は、電圧印加開始指示が入力されることに応じてスイッチ183をオンして、試料100に接するように配置された一対の電極である第1電極181及び第2電極182の間への直流電圧の印加を開始する。

【0097】

S402~S410の処理は、S102~S110の処理と同様なので、ここでは詳細

10

20

30

40

50

な説明は省略する。

【 0 0 9 8 】

制御部 7 1 が処理終了指示が入力されていないと判定する ( S 4 1 0 - N O ) と、処理は S 4 0 5 に戻る。以降、制御部 7 1 が処理終了指示が入力されたらと判定する ( S 4 1 0 - Y E S ) まで S 4 0 5 ~ S 4 1 0 の処理が繰り返される。

【 0 0 9 9 】

制御部 9 1 は、処理終了指示が入力されたらと判定する ( S 4 1 0 - Y E S ) と、正孔空間分布検出を終了することを示す検出終了信号をレーザー光源 1 0 に出力して ( S 4 1 1 )、レーザー光源 1 0 がレーザー光の出力を停止する。

【 0 1 0 0 】

次いで、制御部 9 1 は、電圧印加終了指示を光電子顕微鏡装置 1 8 に出力する ( S 4 1 2 )。光電子顕微鏡装置 1 8 は、電圧印加終了指示が入力されることに応じてスイッチ 1 8 3 をオフして、第 1 電極 1 8 1 及び第 2 電極 1 8 2 の間への直流電圧の印加を終了する。

【 0 1 0 1 】

次いで、画像情報生成部 9 2 は、S 4 0 9 の処理で記憶部 2 2 に記憶された正孔空間分布情報から、試料 1 0 0 の所定領域における正孔 1 0 2 の空間分布の経時的変化を撮像した画像情報を生成する ( S 4 1 3 )。画像情報生成部 9 2 は、生成した画像情報を記憶部 2 2 に記憶する。

【 0 1 0 2 】

次いで、移動速度演算部 9 3 は、S 4 1 3 の処理で生成された画像情報から、印加された直流電圧により移動した正孔の移動速度を演算する ( S 4 1 4 )。例えば、移動速度演算部 9 3 は、画像情報に対応する画像から 2 つの時点の画像を抽出し、抽出した 2 つの画像を撮像した時間  $t$  の差、及び 2 つの画像のそれぞれに含まれる正孔の存在領域の移動距離  $L$  から正孔の移動速度  $v$  を

$$v = L / t \text{ [ m / s ]}$$

として演算する。移動速度演算部 9 3 は、演算した正孔の移動速度を記憶部 2 2 に記憶する。

【 0 1 0 3 】

次いで、移動度演算部 9 4 は、第 1 電極 1 8 1 と第 2 電極 1 8 2 との間の離隔距離  $D$ 、第 1 電極 1 8 1 と第 2 電極 1 8 2 との間に印加された直流電圧  $V$ 、及び演算された正孔の移動速度  $v$  から正孔の移動度  $\mu$  を演算する ( S 4 1 5 )。正孔の移動度  $\mu$  は、電場の強さ  $E ( = V / D )$  及び正孔の移動速度  $v$  との間に、

$$v = \mu E \text{ [ m / s ]}$$

との関係を有するので、

$$\mu = v / E = v \times D / V \text{ [ m}^2\text{ / V} \cdot \text{s ]}$$

として演算される。移動度演算部 9 4 は、演算した正孔の移動度を記憶部 2 2 に記憶する。

【 0 1 0 4 】

そして、移動度情報出力部 9 5 は、S 4 1 6 の処理で推定された正孔の移動度を示す移動度情報を出力する ( S 4 1 6 )。

【 0 1 0 5 】

( 第 4 実施形態に係る時間分解光電子顕微鏡装置の作用効果 )

時間分解光電子顕微鏡装置 4 は、従来の技術では推定が容易ではなかった正孔の移動度を正孔の空間分布の経時的変化から直接推定することができる。

【 符号の説明 】

【 0 1 0 6 】

- 1 ~ 4 時間分解光電子顕微鏡装置
- 1 0 レーザー光源
- 1 1 ポンプ光生成部

10

20

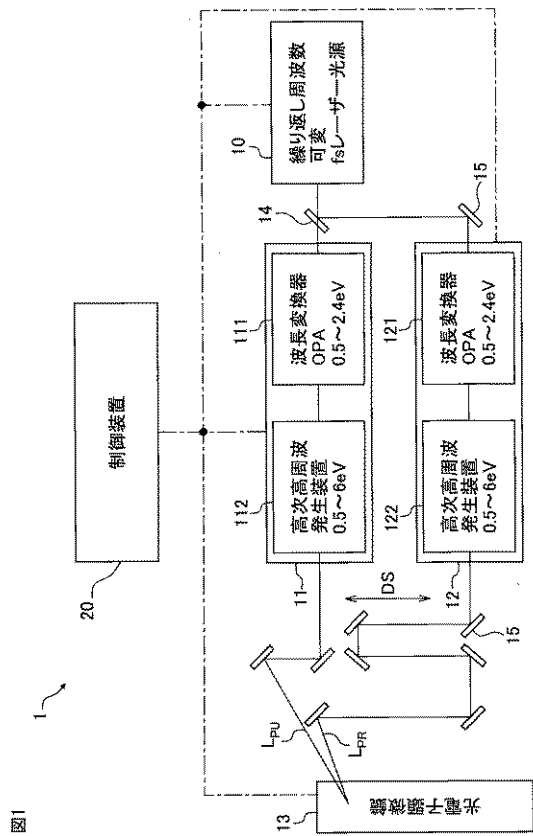
30

40

50

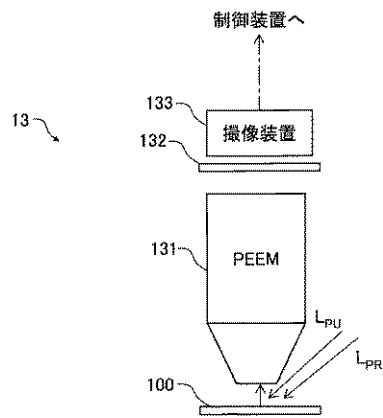
- 1 2     プローブ光生成部
- 1 3、1 8     光電子顕微鏡装置
- 1 4     ビームスプリッタ
- 1 5     光学ミラー
- 2 0、4 0、6 0、8 0     制御装置

【 図 1 】



【 図 2 】

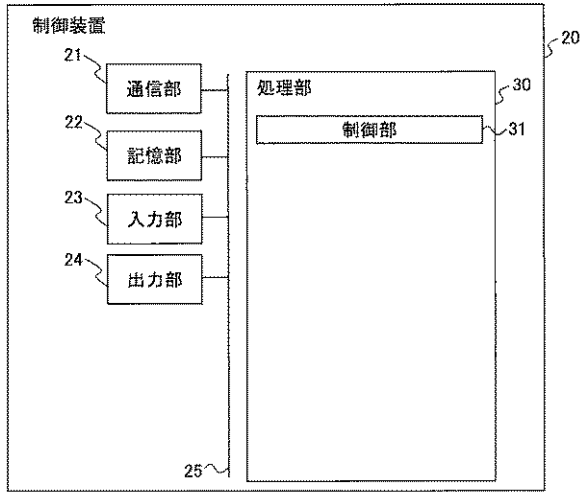
図2





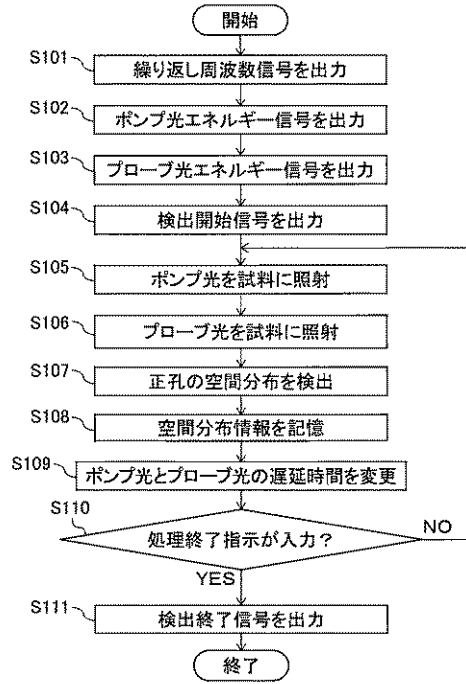
【 図 3 】

図3



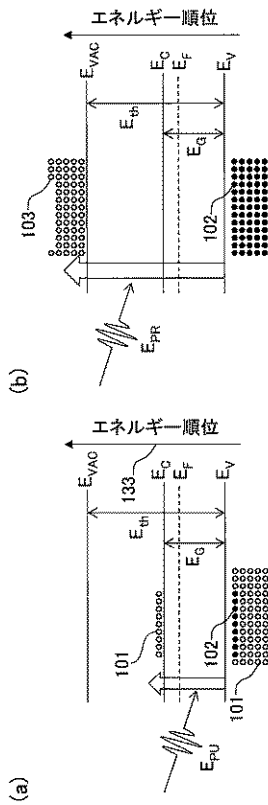
【 図 4 】

図4

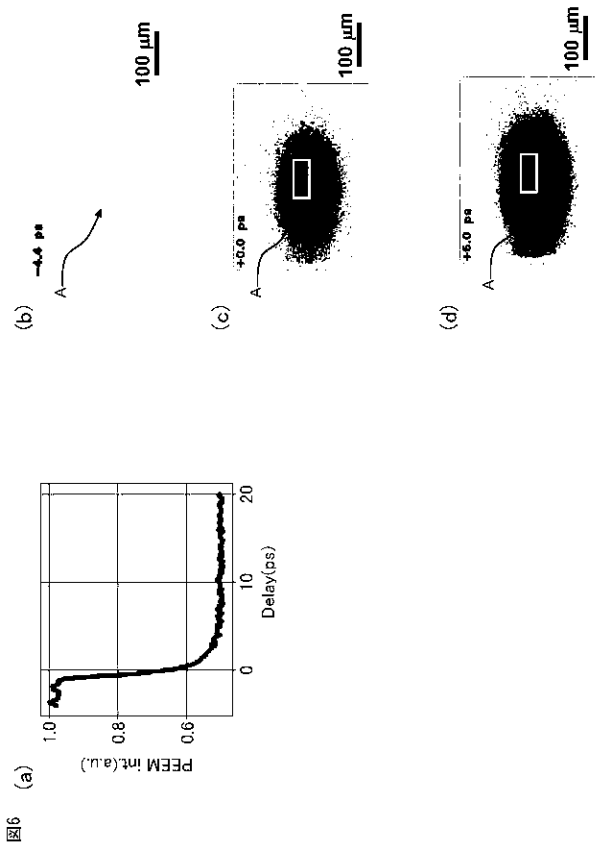


【 図 5 】

図5



【 図 6 】



【 図 7 】

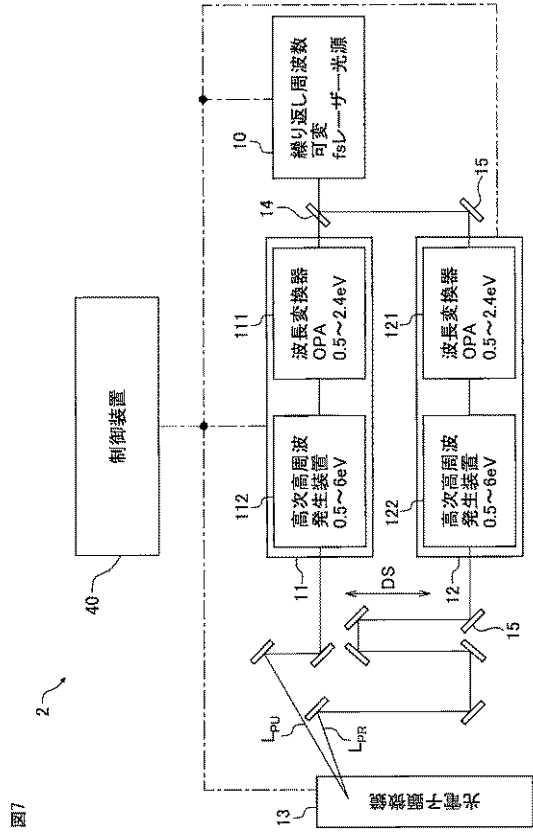
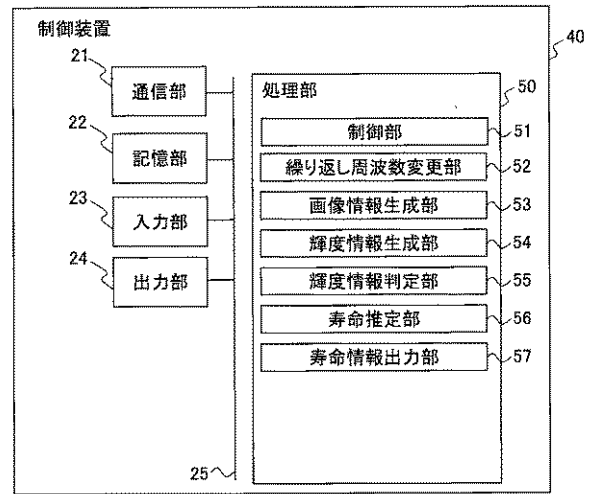


図7

【 図 8 】

図8



【 図 9 】

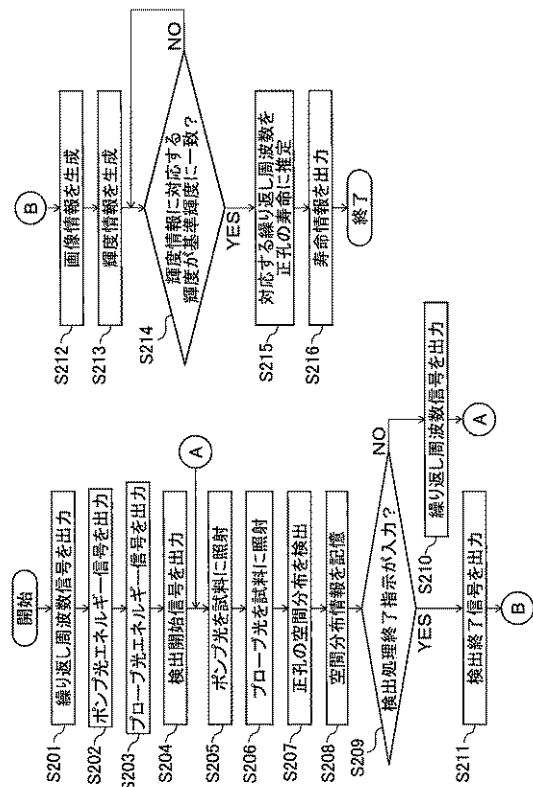
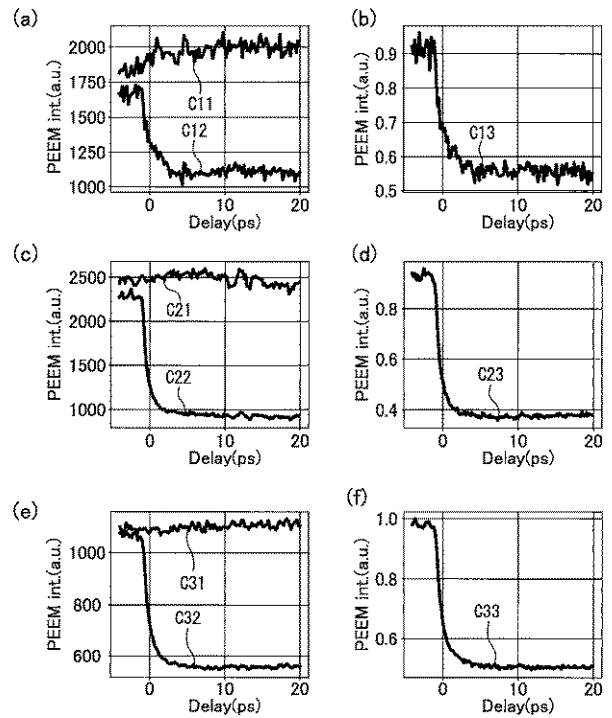


図9

【 図 10 】

図10



【 図 1 1 】

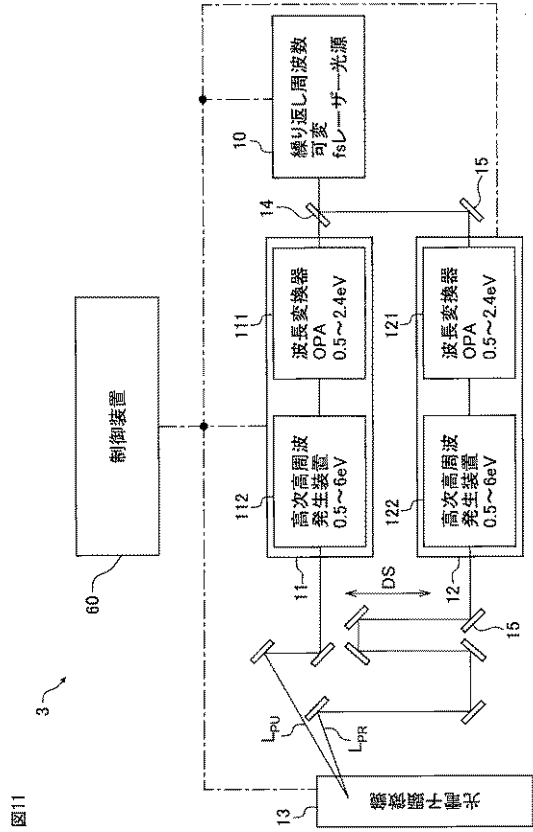
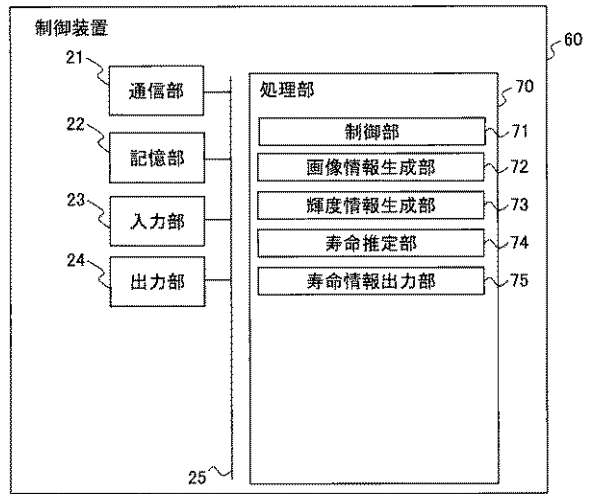


図11

【 図 1 2 】

図12



【 図 1 3 】

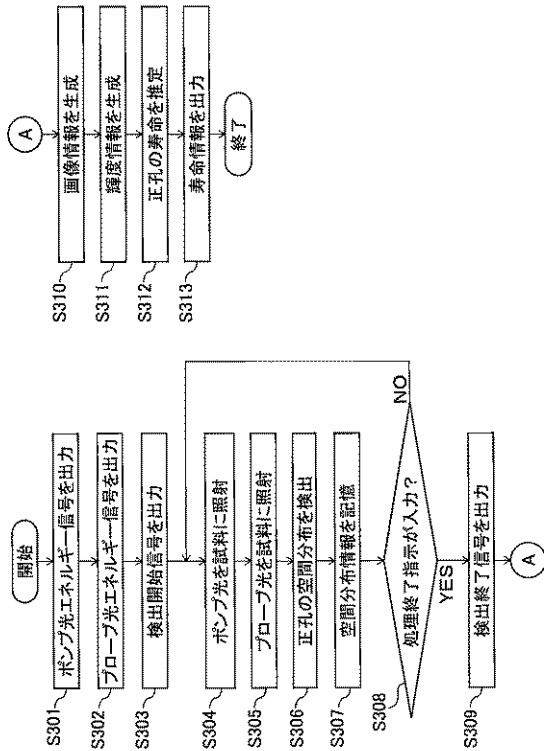


図13

【 図 1 4 】

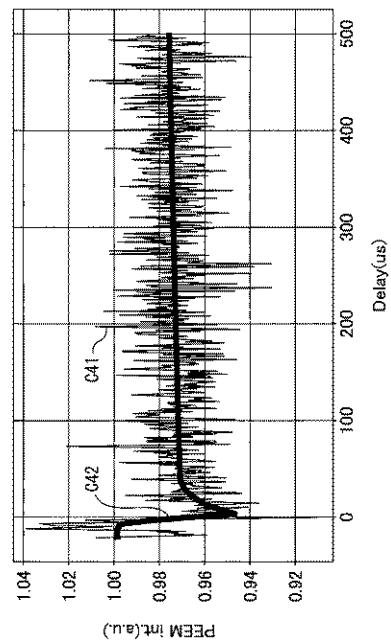


図14

【 図 1 5 】

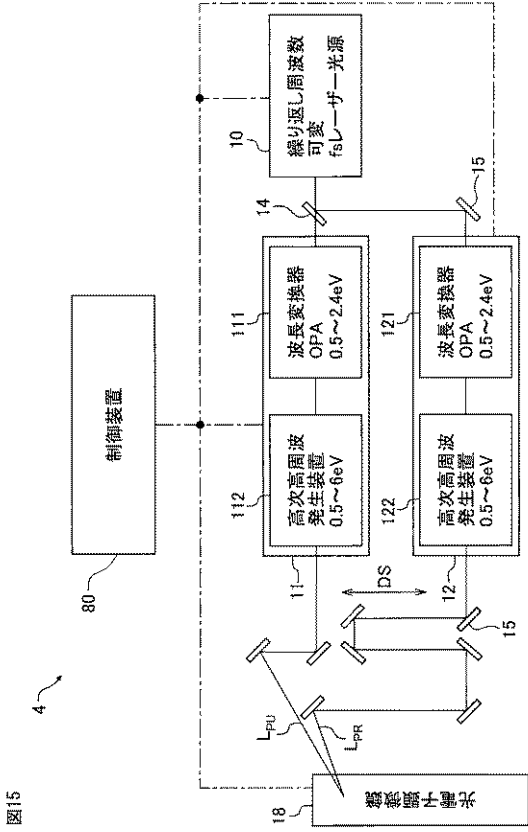


図15

【 図 1 6 】

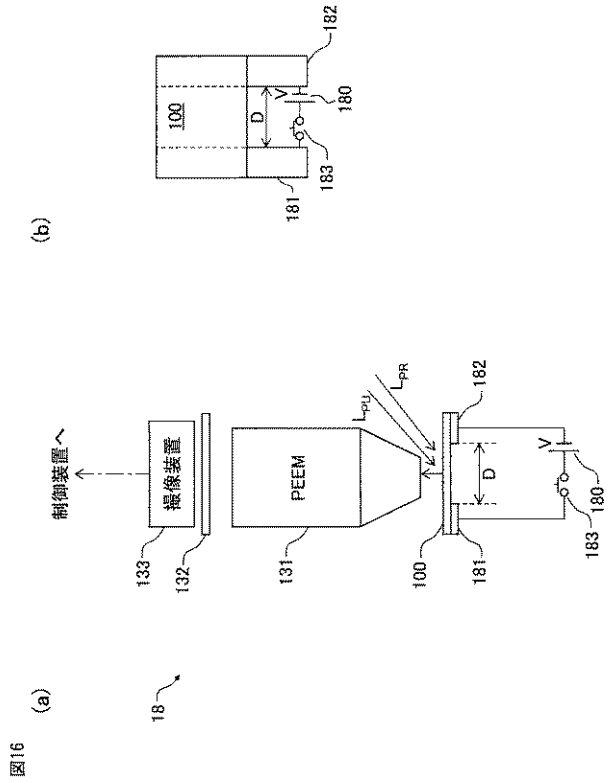
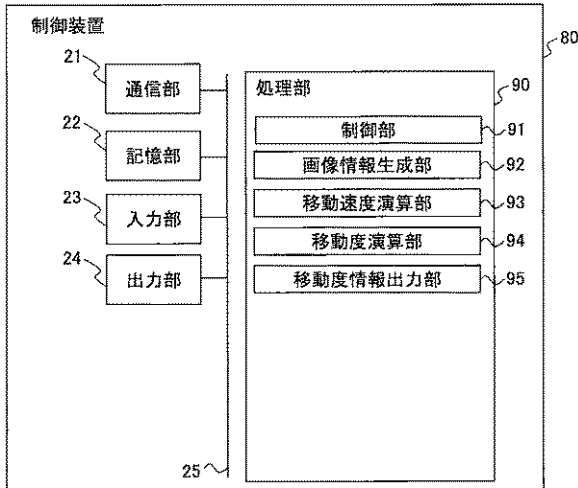


図16

【 図 1 7 】

図17



【 図 1 8 】

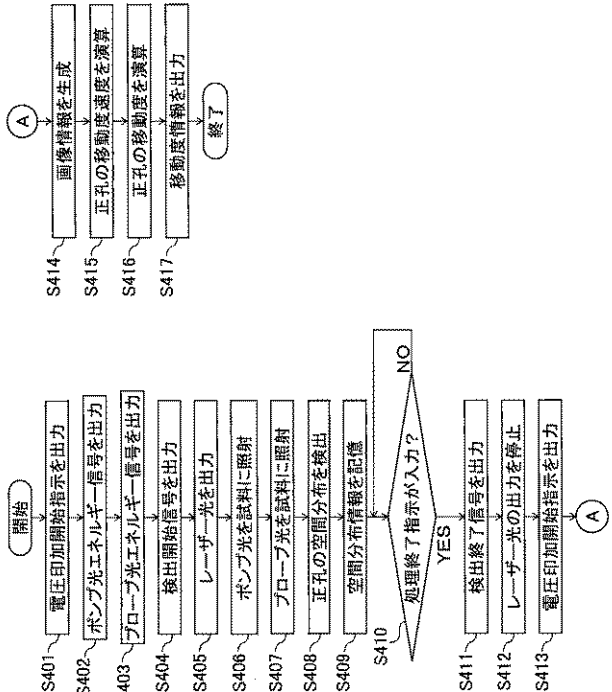


図18

---

フロントページの続き

(74)代理人 100160716

弁理士 遠藤 力

(72)発明者 福本 恵紀

茨城県つくば市大穂 1 番地 1 大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構内

(72)発明者 足立 伸一

茨城県つくば市大穂 1 番地 1 大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構内

F ターム(参考) 2G001 AA07 BA08 CA03 DA01 FA06 FA18 GA01 HA09 JA11 JA12

KA13