

(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
2020年10月8日(08.10.2020)



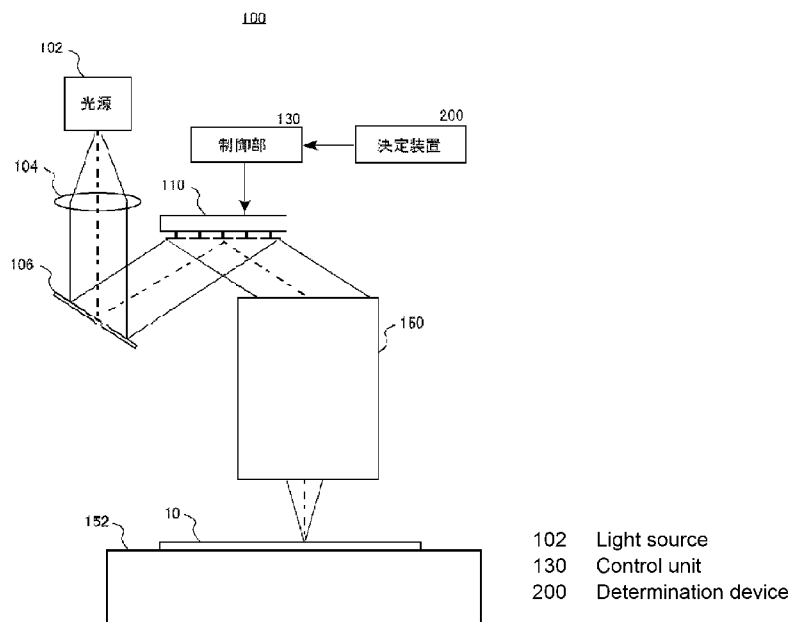
(10) 国際公開番号

WO 2020/202265 A1

- (51) 国際特許分類:
G02B 26/08 (2006.01) *G06N 99/00* (2019.01)
G03F 7/20 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2019/014038
- (22) 国際出願日: 2019年3月29日(29.03.2019)
- (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: 株式会社ニコン (NIKON CORPORATION) [JP/JP]; 〒1086290 東京都港区港南二丁目15番3号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 奥平陽介 (OKUDAIRA Yosuke); 〒1086290 東京都港区港南二丁目15番3号 株式会社ニコン内 Tokyo (JP).
- (74) 代理人: 龍華国際特許業務法人(RYUKA IP LAW FIRM); 〒1631522 東京都新宿区西新宿1-6-1 新宿エルタワー22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, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ,

(54) Title: DETERMINATION METHOD, DETERMINATION DEVICE, EXPOSURE DEVICE, AND PROGRAM

(54) 発明の名称: 決定方法、決定装置、露光装置およびプログラム



(57) Abstract: A determination method in which a formed image that is obtained from light that has been radiated at and reflected from a spatial light modulation element that has a plurality of pixels that are arranged at different locations in space, light that has been radiated at and transmitted by the spatial light modulation element, and/or light that has been radiated at and transmitted by a mask that has been virtually partitioned into a plurality of micro-regions that are regarded as the plurality of pixels is used to determine to which of a plurality of states each of the plurality of pixels should be

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))

set to form a target image in which a subject satisfies target conditions. The method involves: a setting step in which an evaluation function that makes the states of the plurality of pixels respectively correspond to the states of a plurality of bits of an Ising model and evaluates the coincidence between the formed image and the target image is set as a function for the plurality of bits; and a determination step in which, on the basis of the states of the plurality of bits as included in the results of evaluating the evaluation function using an Ising machine, it is determined to which of the plurality of states each of the plurality of pixels should be set.

(57) 要約: 空間的に互いに異なる位置に配置された複数のピクセルを有する空間光変調素子に照明された光の反射光、透過光、および、仮想的に複数の微小領域に分割した前記複数の微小領域を前記複数のピクセルとみなしたマスクに照射された光の透過光、の少なくともいずれかを結像することにより得られる形成像により、対象物に目標とする条件を満たす像である目標像を形成するために、複数のピクセルそれぞれを、複数通りの状態の中の、いずれにすべきかを決定する決定方法であって、複数のピクセルのそれぞれにおける状態を、イジングモデルの複数のビットの複数の状態に対応させ、目標像と形成像の合致度を評価する評価関数を複数のビットの関数として設定する設定段階と、評価関数をイジングマシンで評価した結果に含まれる複数のビットの状態に基づいて、複数のピクセルのそれぞれについて、複数通りの状態のいずれにすべきかを決定する決定段階とを備える。

明 細 書

発明の名称： 決定方法、決定装置、露光装置およびプログラム
技術分野

[0001] 本発明は、決定方法、決定装置、露光装置およびプログラムに関する。

背景技術

[0002] 近年、量子アニーリングに特化した計算を行う装置が開発され、使用できる環境が整いつつある。量子アニーリングは巡回セールスマン問題などの組み合わせの最適化問題を解くことに有用であるが、適用できることが知られている最適化問題はまだ少なく、量子アニーリングに特化した計算を行う装置が十分に利用されているとはいえない（非特許文献１）。

[先行技術文献]

[非特許文献]

[非特許文献１] Edward Farhiら著、A Quantum Adiabatic Evolution Algorithm Applied to Random Instances of an NP-Complete Problem、Science 20 April 2001, Vol. 292, Issue 5516, 472-475頁

発明の概要

[0003] 上記課題を解決するために、本発明の第１の態様においては、空間的に互いに異なる位置に配置された複数のピクセルを有する空間光変調素子に照明された光の反射光、透過光、および、仮想的に複数の微小領域に分割した前記複数の微小領域を前記複数のピクセルとみなしたマスクに照射された光の透過光、の少なくともいずれかを結像することにより得られる形成像により、対象物に目標とする条件を満たす像である目標像を形成するために、複数のピクセルそれぞれを、複数通りの状態の中の、いずれにすべきかを決定する決定方法が提供される。決定方法は、複数のピクセルのそれぞれにおける状態を、イジングモデルの複数のビットの複数の状態に対応させ、目標像と形成像の合致度を評価する評価関数を複数のビットの関数として設定する設定段階を有してよい。決定方法は、評価関数をイジングマシンで評価した結

果に含まれる複数のビットの状態に基づいて、複数のピクセルのそれぞれについて、複数通りの状態のいずれにすべきかを決定する決定段階を有してよい。

[0004] 複数のピクセルそれぞれの取り得る状態が第1の光の状態を生じる第1状態と、第1状態とは異なる第2の光の状態を生じる第2状態の2通りであってもよい。前記複数のピクセルそれぞれの取り得る状態が、それぞれ互いに異なる第1の光の状態から第 n の光の状態を生じる、第1状態から第 n 状態の n 通りであってもよい。設定段階において、結像における複数のピクセル像の間の干渉性と目標像に基づいて、量子アニーリングにおける複数のビットの間の結合定数に相当する物理量と各ビットに作用する外場に相当する物理量を決定してよい。決定段階でイジングマシンとして量子アニーリングに特化した計算機を用いてよい。

[0005] 設定段階において、結像における複数のピクセル像の間の干渉性と目標像に基づいて、シミュレーテッドアニーリングにおける複数のビットの間の積に掛ける係数と各ビットに掛ける係数に相当する量を決定してよい。決定段階でイジングマシンとしてシミュレーテッドアニーリングに特化した計算機を用いてよい。

[0006] 評価関数は、強度分布で表現された目標像及び単一ピクセル像を用いて設定されてよい。評価関数は、コヒーレント結像・インコヒーレント結像または部分コヒーレント結像時の強度分布で表現された目標像及び、部分コヒーレント結像による複数のコヒーレントモードに対応した単一ピクセル像を用いて設定されてよい。

[0007] 評価関数は、振幅分布で表現された目標像及び単一ピクセル像を用いて設定されてよい。

[0008] 設定段階において、複数のビットの n 次の相互作用を $(n-1)$ 次で表す補助ビットを用いてよい。評価関数が、複数のピクセルの状態とは関係なく選ぶことができる複数のビットの関数でもあってよい。

[0009] 本発明の第二の形態においては、空間的に互いに異なる位置に配置された

複数のピクセルを有する空間光変調素子に照明された光の反射光、透過光、および、仮想的に複数の微小領域に分割した前記複数の微小領域を前記複数のピクセルとみなしたマスクに照射された光の透過光、の少なくともいずれかを結像することにより得られる形成像により、対象物に目標とする条件を満たす像である目標像を形成するために、複数のピクセルそれぞれを、複数通りの状態の中の、いずれにすべきかを決定する決定装置が提供される。決定装置は、複数のピクセルのそれぞれにおける状態を、イジングモデルの複数のビットの複数の状態に対応させ、目標像と形成像の合致度を評価する評価関数を複数のビットの関数として設定する設定部を有してよい。決定装置は、評価関数をイジングマシンで評価した結果に含まれる複数のビットの状態に基づいて、複数のピクセルのそれぞれについて、複数通りの状態のいずれにすべきかを決定する決定部を有してよい。

[0010] 上記決定装置と、空間光変調素子の複数のピクセルのそれぞれを、決定された状態に制御する制御部とを備える露光装置が提供されてよい。

[0011] 空間的に互いに異なる位置に配置された複数のピクセルを有する空間光変調素子に照明された光の反射光、透過光、および、仮想的に複数の微小領域に分割した前記複数の微小領域を前記複数のピクセルとみなしたマスクに照射された光の透過光、の少なくともいずれかを結像することにより得られる形成像により、対象物に目標とする条件を満たす像である目標像を形成するために、複数のピクセルそれぞれを、複数通りの状態の、いずれにすべきかを決定するコンピュータのプログラムが提供される。コンピュータに、複数のピクセルのそれぞれにおける状態を、イジングモデルの複数の状態に対応させ、目標像と形成像の合致度を評価する評価関数を複数のビットの関数として設定する設定段階を実行させてよい。コンピュータに、評価関数をイジングマシンで評価した結果に含まれる複数のビットの状態に基づいて、複数のピクセルのそれぞれについて、複数通りの状態のいずれにすべきかを決定する決定段階とを実行させてよい。

[0012] なお、上記の発明の概要は、本発明の必要な特徴の全てを列挙したもので

はない。また、これらの特徴群のサブコンビネーションもまた、発明となりうる。

図面の簡単な説明

[0013] [図1]本実施形態にかかる露光装置を模式的に示す。

[図2]空間光変調素子を模式的に示す。

[図3]決定装置の機能ブロック図である。

[図4]本実施形態における決定方法のフローチャートである。

[図5]目標像を説明する模式図である。

[図6]空間光変調素子のマイクロミラーの状態と形成像との関係を示す模式図である。

[図7]イジングモデルの模式図である。

[図8]第1実施形態の変形例を説明するための概念図である。

[図9]第3実施形態を説明する模式図である。

[図10]第4実施形態を説明する模式図である。

[図11]他の反射型の空間光変調素子111を模式的に示す。

[図12]第1から第5実施形態の他の変形例を示す模式図である。

[図13]本発明の複数の態様が全体的または部分的に具現化されてよいコンピュータ1200の例を示す。

発明を実施するための形態

[0014] 以下、発明の実施の形態を通じて本発明を説明するが、以下の実施形態は請求の範囲にかかる発明を限定するものではない。また、実施形態の中で説明されている特徴の組み合わせの全てが発明の解決手段に必須であるとは限らない。

[0015] [第1実施形態]

図1は、本実施形態にかかる露光装置100を模式的に示す。露光装置100は、対象物の一例であるウエハ10に、形成像を形成することでフォトリソグラフィにおける露光を行う。露光装置100は、光源102と、第1の光学系104と、反射鏡106と、空間光変調素子110と、制御部13

0と、第2の光学系150と、決定装置200とを有する。

[0016] 光源102は露光に用いられる光を出力する。光の波長は特に限定されないが、例えばKrFの248nm、EUVの13.5nm等である。第1の光学系104は光源102からの光を、コリメートするなど、予め定められた光束に調整する。なお、図では簡略化のために第1の光学系104はレンズ1枚で表されているが、複数のレンズや他の光学素子が用いられてよい。反射鏡106は、第1の光学系104からの光を反射して、当該光の主線方向を空間光変調素子110に向ける。

[0017] 制御部130は空間光変調素子110を制御する。これにより、空間光変調素子110は、反射鏡106からの光の少なくとも一部を第2の光学系150に入力する。

[0018] 第2の光学系150は空間光変調素子110から入力された光をウエハ10に結像する。第2の光学系150が簡略化して図示されていることは第1の光学系104と同様である。ステージ152はウエハ10を保持する。

[0019] 決定装置200は、空間光変調素子110をどのように制御するかという制御情報を決定し、制御部130に出力する。

[0020] 図2は、空間光変調素子110を模式的に示す。空間光変調素子110は、基板112上において空間的に互いに異なる位置に配された複数のマイクロミラー114、116を有する。複数のマイクロミラー114、116は、基板112の面方向に格子状に並んでいる。図2では簡略化のために3×3の9個のマイクロミラーが示されているが、マイクロミラーの数は例えば1000×1000など、もっと多くてよい。

[0021] 複数のマイクロミラー114、116はそれぞれ、制御部130の制御により、独立して、第1状態と第2状態のいずれかをとることができる。第1状態は、基板112に対して傾いていない状態であって、図2のマイクロミラー114で示されるように、入射された光を第2の光学系150に向けて反射する。これを第1の光の状態と呼ぶ。一方、第2状態は、基板112に対して傾いた状態であって、図2のマイクロミラー116で示されるように

、入射された光を第2の光学系150に向けては反射しない。すなわち、第2の光学系150とは異なる方向に反射する。これを第2の光の状態と呼ぶ。第2の光の状態は第1の光の状態とは異なっている。このような空間光変調素子110は反射型の光変換変調素子とも呼ばれる。

[0022] 計算の便宜上、 i 番目のマイクロミラー114の位置を x_i 、状態を数値 ξ_i で表すことができる。例えば、第1状態を $\xi_i = 1$ 、第2状態を $\xi_i = 0$ で表す。なお、個々のマイクロミラー114、116は、形成像を形成するためのピクセルであるともいえる。よって、マイクロミラー114のことをピクセルとも呼ぶ。

[0023] 図3は、決定装置200の機能ブロック図である。決定装置200は、設定部210と、格納部212と、決定部220と、イジングマシン230とを有する。

[0024] 設定部210は、ウエハ10に目標とする条件を満たす像である目標像と、空間光変調素子110に設定された光の反射光を結像することにより得られる形成像とを設定する。さらに、設定部210は、目標像と設定像とに基づいて、目標像と形成像との合致度を評価する評価関数を設定する。

[0025] 決定部220は、評価関数をイジングマシン230で評価した結果に含まれる複数のビットの状態を取得する。さらに、決定部220は、当該複数のビットの状態に基づいて、空間光変調素子110の複数のピクセルのそれぞれについて、複数通りの状態のいずれにすべきかを決定する。決定部220は、決定した状態を示す情報を制御部130に出力する。なお、出力先は制御部130に限られず格納部212に格納してもよいし、表示部に表示してもよい。

[0026] イジングマシン230は、後述するイジングモデルについて、与えられた物理量で基底状態を計算する装置である。その場合に、量子アニーリングを用いる。アニーリングを用いているので、イジングマシン230はアニーリングマシンとも呼ばれる。量子アニーリングについては後述する。

[0027] 図4は、本実施形態における決定方法のフローチャートである。当フロー

チャートにおいて、まず、目標像が設定される（S101）。例えば、ユーザから画像データの入力を受け付けて、当該画像データに基づいて設定部210が目標像を設定する。

[0028] 図5は、目標像を説明する模式図である。ウエハ10に複数のダイ20を形成するために、ダイ20に対応する位置に形成しようとする像が目標像 I_t （ x ）である。よって、目標像 I_t （ x ）は、ダイ20のそれぞれに設定された座標軸における位置 x の関数である。図5において、目標像 I_t （ x ）の一部30を拡大して模式的に示した。なお、本実施形態において、目標像 I_t （ x ）は強度分布として設定される。

[0029] 図4のフローチャートにおいて、空間光変調素子110を用いた形成像が設定される（S103）。すなわち、空間光変調素子110のマイクロミラー114のそれぞれの状態を ξ_i で表し、空間光変調素子110に照明された光の反射光を結像することにより得られる形成像を定式化する。例えば、ユーザから空間光変調素子110に関する情報を受け付けて、当該情報に基づいて設定部210が形成像を設定する。

[0030] 図6は、空間光変調素子110のマイクロミラー114の状態 ξ_i と形成像122との関係を示す模式図である。図6に示すように、形成像 I （ x ）は、空間光変調素子110の複数のピクセルのそれぞれの状態 ξ_i と、一つのピクセルの点像分布関数120（すなわち、単一ピクセル像）との畳み込み積分により表される。

[0031] 点像分布関数120の k 次カーネルを $\phi_k(x)$ と表せば、形成像 I （ x ）は下記数1のように定式化される。

[数1]

$$I(x) = \sum_k \left| \sum_{ij} \phi_k(x - x_i) \xi_i \right|^2$$

[0032] 高次のカーネルまで考慮することは、部分コヒーレント結像による複数の

コヒーレントモードに対応した単一ピクセル像を用いることに対応する。これにより、ステップS 1 0 1で目標像 $I_t(x)$ を強度分布として表現したことに対応して、形成像 $I(x)$ も強度分布として定式化されたことになる。

なお、カーネルの情報は予め格納部 2 1 2 に格納されている。

[0033] 上記数 1 を展開して整理すると、下記数 2 のように表すことができる。

[0034] [数2]

$$I(x) = \sum_{ij} K_{ij}(x) \xi_i \xi_j$$

[0035] 図 4 のフローチャートにおいて、評価関数を設定する (S 1 0 5)。ここで、ステップS 1 0 3で定式化した形成像 $I(x)$ により、ステップS 1 0 1で設定した目標像 $I_t(x)$ を形成するべく、それらの合致度を評価する評価関数 H を設定する。評価関数 H の一例として、本実施形態では設定部 2 1 0 が下記数 3 に示される差分の二乗和を設定する。

[0036] [数3]

$$H = \int \left| I_t(x) - \sum_{ij} K_{ij}(x) \xi_i \xi_j \right|^2 dx$$

[0037] 上記評価関数 H は、 x についての積分がされると ξ_n (n は i または j) を変数とする高々 4 次の関数になる。ここで、 ξ_n は 0 または 1 の 2 値のいずれかである。

[0038] このことから、本願の発明者は、評価関数 H を最小にする ξ_n の組み合わせを見つけるという問題が、2つの状態のいずれかをとり得る複数のビットからなる物理的な系の、評価関数 H に対応するエネルギーの最小値すなわち基底状態をとるときの各ビットの状態の組み合わせを見つける問題に帰着することを見出した。2つの状態のいずれかをとり得る複数のビットからなる物

理的な系の一例として、イジングモデルがある。

[0039] 図7は、イジングモデル240の模式図である。イジングモデル240は、広義には、2つの量子化された状態のいずれかをとり得る、離散的に配された、複数のビットの集合である。イジングモデル240のハードウェアの例は、格子状の各点に配され、+1または-1のスピン状態 σ_i のいずれかをとり得る複数の磁気素子である。i番目の磁気素子とj番目の磁気素子とは結合定数 J_{ij} で相互作用する。隣接していない磁気素子間にも相互作用があってよい。また、i番目の磁気素子には外部磁場 h_i が働く。

[0040] 図7には、図2の空間光変調素子110の9個のマイクロミラー114、116に対応して、9個のビット242、244が描かれている。また、マイクロミラー114が第1状態「1」であることに対応して、ビット242がスピン状態「-1」である状態が示されている。同様に、マイクロミラー116が第2状態「0」であることに対応して、ビット244がスピン状態「+1」である状態が示されている。

[0041] ここで、状態 ξ_i から状態 σ_i へは、 $\sigma_i = 1 - 2\xi_i$ で変数変換できる。よって、上記数3の評価関数Hは下記数4の評価関数Hと等価であるといえる。

[0042] [数4]

$$H = \int \left| I_t(x) - \sum_{ij} K'_{ij}(x) \sigma_i \sigma_j - \sum_i k_i(x) \sigma_i \right|^2 dx$$

[0043] 当該評価関数Hはイジングモデルにおけるハミルトニアンであるともいえる。上記変数変換は線形なので、下記数4の評価関数Hも、 σ_i の高々4次の関数である。これにより、空間光変調素子110の複数のピクセルにおける第1状態と第2状態を、イジングモデルの複数のスピンのアップ（ $\sigma_i = +1$ ）またはダウン（ $\sigma_i = -1$ ）に対応させた評価関数Hが設定された。

[0044] イジングモデル240では2次の相互作用までを扱うことが多い。よって

、上記数4のように評価関数Hに3次以上の相互作用に対応する項がある場合には（S107：Yes）、補助ビットを利用して評価関数Hを高々2次になるように修正する（S109）。

[0045] 具体的には、2次の相互作用の項 $\sigma_i \sigma_j$ を補助ビット σ_{ij} を用いて表す。ここで、2次の相互作用の項 $\sigma_i \sigma_j$ は論理積に関する要素を含むので、一旦、下記数5のように、 σ_i を0と1のいずれかの値をとる q_i に変換して、その真理値を考える。

[0046] [数5]

$$\begin{aligned}\sigma_i \sigma_j &= (1 - 2q_i)(1 - 2q_j) \\ &= 1 - 2q_i - 2q_j + 4q_i q_j \\ &= 1 - 2q_i - 2q_j + 4q_{ij} \\ &= 1 + \sigma_i + \sigma_j - 2\sigma_{ij}\end{aligned}$$

[0047] 下記表1は、 q_i 、 q_j および補助ビット q_{ij} の真理値表である。

[表1]

	q_i	q_j	q_{ij}	H_{ij}
論理積	0	0	0	0
	0	1	0	0
	1	0	0	0
	1	1	1	0
論理積ではない	0	0	1	3
	0	1	1	1
	1	0	1	1
	1	1	0	1

[0048] 補助ビット q_{ij} は $q_i q_j$ であるから、 q_i と q_j の論理積となることが好ま

しい。そこで、論理積となる場合には値を変えず（すなわちゼロ）、論理積ではない場合には値が増える関数 H_{ij} を上記数 4 の評価関数 H に加える。そのような H_{ij} の一例は、下記数 6 である。

[0049] [数6]

$$\begin{aligned} H_{ij} &= 3q_{12} + q_1q_2 - 2q_{12}q_1 - 2q_{12}q_2 \\ &= \sigma_i + \sigma_i - 2\sigma_{ij} + \sigma_i\sigma_j - 2\sigma_i\sigma_{ij} - 2\sigma_j\sigma_{ij} \end{aligned}$$

[0050] このように決めた補助ビットおよび関数を用いて、評価関数 H は下記数 7 のように修正される。

[数7]

$$H = \int \left| I_t(x) - \sum_{ij} K'_{ij}(x)(1 + \sigma_i + \sigma_j - 2\sigma_{ij}) - \sum_i k_i(x)\sigma_i \right|^2 dx + B \sum_{ij} H_{ij}$$

[0051] これにより、論理積とならない q_i 、 q_j 、 q_{ij} の組み合わせに対応する解が選ばれる可能性を低くすることができる。ここで B は定数である。定数 B は K'_{ij} の値に基づいて定められてもよく、例えば、 K'_{ij} の最大値よりも大きいことが好ましい（例えばの 10 倍）。

[0052] 上記数 7 を展開して x に関する積分を実行して整理すると、評価関数 H は、下記数 8 のように表される。ここで、 i' は i または ij を示し、同様に、 j' は j または ij を示す。この場合に、設定部 210 は、格納部 212 に予め格納された積分計算のライブラリを読み出す等して、 x の積分を行う。

[0053] [数8]

$$H = - \sum_{i'j'} J_{i'j'} \sigma_{i'} \sigma_{j'} - \sum_{i'} h_{i'} \sigma_{i'}$$

[0054] これはイジングモデルにおけるハミルトニアン of の各係数を計算したことに相当する（S111）。より具体的には、結像における複数のピクセル像の

間の干渉性と目標像に基づいて、複数のスピンの間の結合定数に相当する物理量 J_{ij} と各スピンに作用する外場に相当する物理量 h_i が計算されたことになる。なお数 8 において、 σ_i に依らない定数項は以降の計算に影響を与えないので省略した。

[0055] 決定部 220 は、上記数 8 で示された評価関数 H をイジングマシン 230 で評価する (S113)。より具体的には、イジングモデルにおいて評価関数 H に対応するエネルギーが最小値となる基底状態を、イジングマシン 230 で計算する (S113)。本実施形態ではイジングマシン 230 として量子アニーリングに特化した計算機を用いる。量子アニーリングに特化した計算機では、初期状態から基底状態への状態遷移が量子力学に裏付けられた物理現象として計算機内で現実発現することで計算が実行される。

[0056] 量子アニーリングでは、イジングモデルの各スピンの状態を横磁場項の固有状態であるスピン +1 とスピン -1 の均等な重ね合わせ状態に初期設定する。その後徐々に横磁場項を小さくし、結合定数 J_{ij} と外場 h_i の影響を相対的に大きくしていくと、イジングモデルのハミルトニアン（すなわち評価関数 H ）の基底状態を構成する各スピンの +1 または -1 のいずれかの状態に近づいていく。最終的に横磁場項をゼロにすると基底状態が選ばれる。

[0057] ただし、量子アニーリングにおいて最終的に基底状態が選ばれないことがある。基底状態が選ばれない原因は、極所解（すなわち最小値ではなく極小値）に落ち込んだり、熱雑音や周辺環境との相互作用を完全に遮断にできないこと、などが考えられる。そこで、量子アニーリングによる計算を複数回行って多数決を採用したり、複数回の計算結果の中から最小値を選ぶようにしてもよい。

[0058] 決定部 220 は、イジングマシン 230 の計算結果に基づいて、空間光変調素子 110 の各ピクセルの状態を決定し、制御部 130 に出力する (S115)。すなわち、決定部 220 は、計算結果に含まれる複数のビットの値に基づいて、複数のピクセルのそれぞれについて、第 1 状態と第 2 状態のいずれにすべきかを決定する。

[0059] この場合、上記の $\sigma_i = 1 - 2 \xi_i$ の関係から、イジングモデル 240 における計算結果における i 番目のビットのスピンの状態 σ_i を、空間光変調素子 110 の i 番目のピクセルの状態 ξ_i に割り当てる。すなわち、ビットのスピンの状態 $\sigma_i = -1$ をピクセルの第 1 状態 $\xi_i = 1$ に割り当て、ビットのスピンの状態 $\sigma_i = +1$ をピクセルの第 2 状態 $\xi_i = 0$ に割り当てる。

[0060] 以上、本実施形態によれば、目標像に近い形成像を形成するための空間光変調素子 110 の各ピクセルの状態をより早く計算することができる。すなわち、上記数 4 で示される評価関数 H を状態 ξ_i の可能な組み合わせについて総当りの計算することも理論上は考えられるが、ピクセルの数が多くなると現実的な時間で計算が終わらない。これに対して、本実施形態の方法によれば、イジングモデルにおけるエネルギーをイジングマシンで計算するので、ピクセルの数が多くても十分に現実的な時間で計算をすることができる。

[0061] [第 1 実施形態の変形例]

図 8 は第 1 実施形態の変形例を説明するための概念図である。上記第 1 実施形態では形成像を連続的な値で表したが、形成像を露光・現像後にレジストが残る程度の像強度と残らない程度の像強度として表してもよい。

[0062] 図 8 に示すように、ネガのレジストを仮定し、レジストが残るか否かの像強度の閾値に対し、上下のマージンをそれぞれ I_U , I_L とする。この場合に、位置 x がレジストを残す領域 S_U に属する場合には、 $I_U \leq I(x)$ を満たすことが求められる。一方、位置 x がレジストを残さない領域 S_L に属する場合には、 $I_L \geq I(x)$ を満たすことが求められる。

[0063] ここで、不等式を等式として扱うことができるように、Slack 変数 $Y(x)$ (< 0) すなわち「あそび」を導入すると、下記数 9 のように表すことができる。ただし $Y(x)$ は数 10 に定義する通りである。

[0064] [数 9]

$$\begin{aligned} x \in S_U \quad I_U(x) \leq I(x) &\rightarrow I(x) - Y(x) = I_U(x) \\ x \in S_L \quad I_L(x) \geq I(x) &\rightarrow I(x) + Y(x) = I_L(x) \end{aligned}$$

[0065] [数10]

$$Y(x) = b \sum_{n=0}^{N-1} 2^n \frac{1 + \eta(x, n)}{2}$$

ここで、 $\eta(x, n)$ は ± 1 であり、Slackの値を決める補助ビットである。この補助ビットはピクセルの状態とは関係なく、すなわち、ピクセルの状態とは独立して決めることができる。なお、 $0 \leq Y(x) \leq 2^N b$ であり、取り得る値を b と N とで調整することができる。

[0066] 上記 $Y(x)$ を用いることにより、形成像 $I(x)$ を、露光・現像後にレジストが残る程度の像強度と残らない程度の像強度として表すことができた。よって、 $\pm Y(x)$ をまとめて $Y(x)$ で表すこととすれば、第1実施形態の数7に対応して、評価関数 H は下記数11で表すことができる。

[0067] [数11]

$$H = \int \left| I_t(x) - \sum_{ij} K_{ij}(x)(1 + \sigma_i + \sigma_j - 2\sigma_{ij}) - \sum_i k_i(x)\sigma_i - Y(x) \right|^2 dx + B \sum_{ij} H_{ij}$$

[0068] 上記数11を x について離散化すると、下記数12を得る。

[0069] [数12]

$$H = \sum_k \left| I_t(x_k) - \sum_{ij} K_{ij}(x_k)(1 + \sigma_i + \sigma_j - 2\sigma_{ij}) - \sum_i k_i(x_k)\sigma_i - Y(x_k) \right|^2 + B \sum_{ij} H_{ij}$$

[0070] さらに、上記数12の k について和をとり、係数をまとめると、下記数13を得る。ここで、変数 σ_i 、 σ_{ij} 、 $\eta(x_k, n)$ をまとめて s_i と記した。

[0071]

[数13]

$$H = - \sum_{ij} J_{ij} s_i s_j - \sum_i h_i s_i$$

[0072] 上記数13の評価関数Hを第1実施形態と同様に評価することにより、レジストが残る程度の像強度と残らない程度の像強度に対応した、各ピクセルの状態を決定することができる。なお、ネガ型のレジストを例としたが、ポジ型のレジストにも同様に適用できる。

[0073] [第2実施形態]

第2実施形態は、図4のステップS101で目標像 $V_t(x)$ を振幅分布として表現し、これに対応してステップS102で形成像 $V(x)$ も振幅分布として定式化する点で、第1実施形態と異なる。これは点像分布関数120の1次カーネル $\phi(x)$ のみを考慮することに対応し、完全なコヒーレント結像として近似することに対応する。形成像 $V(x)$ は下記数14のように定式化される。

[0074] [数14]

$$V(x) = \sum_i \phi(x - x_i) \xi_i$$

[0075] ステップS105において評価関数Hは下記数15のように設定できる。

本実施形態でも評価関数Hの一例として差分の二乗和が設定されている。

[0076] [数15]

$$H = \int \left| V_t(x) - \sum_i \phi(x - x_i) \xi_i \right|^2 dx$$

[0077] 上記数15は、 x についての積分がされると ξ_n (n は i または j)を変数とする高々2次の関数になる。すなわち、イジングモデルに対応させた場合

に、高々2次の相互作用である（S107：No）。よって、ステップS109の補助ビットを利用した次数下げをしなくてもよい。

[0078] 上記数15を展開してxに関する積分を実行して整理し（S111）、イジングモデルに置き換えると、評価関数Hは、下記数16のように表される。ここで、第1実施形態と同様に空間光変調素子110の各ピクセルの状態 ξ_i を、イジングモデルのスピン σ_i へ、 $\sigma_i = 1 - 2\xi_i$ で変数変換する。

[数16]

$$H = - \sum_{ij} J_{ij} \sigma_i \sigma_j - \sum_i h_i \sigma_i$$

[0079] これにより、結像における複数のピクセル像の間の干渉性と目標像に基づいて、複数のスピンの間の結合定数に相当する物理量 J_{ij} と各スピンに作用する外場に相当する物理量 h_i が計算されたことになる。なお数14において、 σ_i に依らない定数項は以降の計算に影響を与えないので省略した。さらに、上記ステップ113およびS115を実行することにより、空間光変調素子110の各ピクセルの状態が決定される。

[0080] 第2実施形態においても、目標像に近い形成像を形成するための空間光変調素子110の各ピクセルの状態をより早く計算することができる。さらに、目標像および形成像を振幅分布で表現したので、評価関数Hにおけるイジングモデルの相互作用が高々2次であり、次数を下げるための補助ビットを用いなくてもよいという利点がある。

[0081] [第3実施形態]

図9は、第3実施形態を説明する模式図である。第3実施形態は、イジングモデルの複数のビットを用いて擬似的に一つのビットを表す点で第1実施形態と異なる。

[0082] 評価関数Hをイジングマシンで評価する場合に、イジングマシンに設定できる結合定数に想定する物理量 J_{ij} とおよび外場に相当する物理量 h_i の階

調数が小さい場合がある。説明を簡単にするため、2ビットの例で下記数17および数18を表現したいとする。すなわち、 J_{ab} を $(2L+1)$ 階調で表現したい場合を考える。

[0083] [数17]

$$H = -J_{ab}\sigma_a\sigma_b$$

[0084] [数18]

$$J_{ab} \in [-L, -L+1, \dots, L-1, L]$$

[0085] しかしながら、イジングマシンが下記数19のように J_{ij} が $(2K+1)$ 階調（ただし $K \ll L$ ）しか表現できない、という場合が問題となる。

[0086] [数19]

$$J_{ij} \in [-K, -K+1, \dots, K] \quad K \ll L$$

[0087] この場合に、図9に示すように、複数のビット σ_i 、 σ_j 、 $\dots$ （構成ビットと呼ぶことがある）を連結して実質的に一つの論理ビット σ_A として機能させる。図9では一例として6つの構成ビットを一つの論理ビットとして機能させる。さらに、異なる論理ビット σ_A 、 σ_B に含まれる構成ビット同士の結合定数を使って、論理ビット間の結合定数 J_{AB} を表す。

[0088] 複数の構成ビット σ_i 、 σ_j 、 $\dots$ を一つの論理ビット σ_A として機能させるには、同じ論理ビット σ_A に含まれる構成ビット σ_i 、 σ_j 、 $\dots$ は常に同じ値になることが好ましい。これが担保されるには、下記数20で示される構成ビット間のすべての結合定数 J を他の結合定数よりも大きく設定する。

[0089] [数20]

$$H = -J \sum_{i < j} \sigma_i \sigma_j$$

[0090] 上記数20によれば、構成ビットが一つ反転した場合に増えるエネルギー

ΔE_N は、 $2(N-1)J$ となり、解として選択され難くなる。

[0091] ここで、論理ビット σ_A のうちの構成ビット m_A 個と、論理ビット σ_B のうちの構成ビット m_B 個とが相互作用する、すなわち、ゼロでない結合定数 J_{ij} を有するように設定すれば、結合関係は最大では $m_A \times m_B$ 個設定できる。図9では $m_A = m_B = 2$ の例が示されている。よって、個々の結合定数 J_{ij} が $(2K+1)$ の整数から一つを選べるのであれば、結合関係の全体としては $(2m_A m_B K + 1)$ の整数から一つを選べることになる。これはすなわち、論理ビット間の結合関係としてみた場合に、階調が $(2m_A m_B K + 1)$ に増加したことに相当する。

[0092] 以上を定式化すると、表現したかった上記数17は下記数21および数22を使って表現することができる。なお、数21における第1項および第2項は上記数20の拘束項に対応する。

[数21]

$$H = -J \sum_{(i,j) \in A} \sigma_i \sigma_j - J \sum_{(i,j) \in B} \sigma_i \sigma_j - H'$$

[0093] [数22]

$$H' = - \sum_{i \in A, j \in B} J_{ij} \sigma_i \sigma_j$$

[0094] ここで、拘束が満たされているとして、下記数23の表記を用いれば、数22は下記数24のように表すことができる。これは $(2m_A m_B K + 1)$ 階調の結合定数 J_{AB} が設定できる2つのビット σ_A 、 σ_B 間の相互作用によるイジングモデルに相当している。

[0095] [数23]

$$\begin{aligned} \sigma_{i \in A} &= \sigma_A \\ \sigma_{i \in B} &= \sigma_B \end{aligned}$$

[0096] [数24]

$$\begin{aligned} H' &= - \left(\sum_{i \in A, j \in B} J_{ij} \right) \sigma_A \sigma_B \\ &= -J_{AB} \sigma_A \sigma_B \end{aligned}$$

[0097] 図4のステップS111において、ピクセルの評価関数Hを、上記数24を用いてイジングモデルの論理ビットを用いた評価関数Hに置き換える。これにより、イジングマシンで構成ビットを使った評価が、論理ビットの値としても評価でき、高い階調での計算が可能となる。

[0098] 説明の簡略化のために2つの論理ビットについて説明したが、3つ以上の論理ビットでも同様にして実質的に階調を上げることができる。また、結合係数について説明したが、外場についても同様にして階調を上げることができる。また、第3実施形態は、第1実施形態のみならず、その変形例および第2実施形態にも適用できる。

[0099] [第4実施形態]

図10は、第4実施形態を説明する模式図である。第4実施形態は、評価関数Hの一次項すなわち外場の項に補助ビットを導入する点で、第1実施形態と異なる。

[0100] イジングマシンによっては、一次項の計算ができないものがある。そこで、一次項を仮想的に計算するために、補助ビットを導入する。

[0101] 例えば上記数13の評価関数Hを考える。数13の第二項が一次項、すなわち、外場との相互作用に相当する。当該第二項に補助ビット σ' を一つ導入して、下記数25のように二次にする。

[0102] [数25]

$$H = - \sum_{ij} J_{ij} \sigma_i \sigma_j - \sum_i h_i \sigma_i \sigma'$$

[0103] 上記数25を図4のステップS113で評価する。これは、図10に示すように、ビット σ_i に対する外場の効果を補助ビット σ' との結合関係に置き換えていることに相当する。この場合、補助ビット σ' の値が+1のときだけ元の系と等価になる。よって、イジングマシンによる計算結果のうち、 $\sigma' = +1$ となる解だけを採用する。

[0104] 以上、第4実施形態によれば、一次項を含む評価関数Hが、一次項の計算ができないイジングマシンによって二次項のみの計算で評価できる。また、第4実施形態は、第1実施形態のみならず、その変形例、第2実施形態および第3実施形態にも適用できる。

[0105] [第5実施形態]

第5実施形態は、空間光変調素子110の各ピクセル114が多値を有する、すなわち3つ以上の状態のいずれかをとり得る点で、第1実施形態と異なる。すなわち、第5実施形態において、各ピクセル114は入射された光を第2の光学系150に向けて反射しない状態と、異なる強度で反射する複数の状態とを有する。

[0106] この場合に、 i 番目のピクセルの状態 ξ_i は、2値をとる $\xi_{i(m)}$ （ただし $m = 0, 1, 2, \dots$ ）を用いて、下記数26のように表すことができる。

[0107] [数26]

$$\xi_i = \sum_m 2^m \xi_{i(m)} = \xi_{i(0)} + 2\xi_{i(1)} + 2^2\xi_{i(2)} + \dots$$

[0108] 図4のステップS103において、上記数26を用いて、形成像 $I(x)$ を ξ_i に代えて $\xi_{i(m)}$ で表す。これにより、ステップS105において評価関数Hを設定すると、 $\xi_{n(m)}$ （ただし、 n は i または j ）の高々4次式となる。よって、 $\xi_{i(m)}$ にイジングモデルの各ビットの状態 $\sigma_{i'}$ （ただし、 i' は i に属する $m = 0, 1, 2, \dots$ のいずれか）を対応させれば、イジングモデルで表した評価関数Hも $\sigma_{n'}$ （ただし、 n' は i' または j' ）の高々4次式となる。

[0109] したがって、ステップS 1 0 5以降は第1実施形態と同様に計算することにより、基底状態に対応する各ビット σ_i の状態を得ることができる。基底状態に対応する各ビット σ_i の状態を各 $\xi_{i(m)}$ の値に変換することにより、上記数26を用いて、多値のi番目のピクセルをいずれの状態 ξ_i にするかが決定される。

[0110] 以上、第5実施形態によれば、空間光変調素子110の各ピクセル114が多値を有する場合であっても、目標像を形成するために各ピクセル114をどの値にするかを決定することができる。また、第5実施形態は、第1実施形態のみならず、その変形例、第2実施形態および第3実施形態にも適用できる。

[0111] [他の変形例]

図11は、他の反射型の空間光変調素子111を模式的に示す。空間光変調素子111は、基板112上において空間的に異なる位置に配置された複数のマイクロミラー117、118を有する。複数のマイクロミラー117、118は基板112の面方向に格子状に並んでいる。図11では説明のために、側面から見た、一列分のうちの5個のマイクロミラーを示すが、マイクロミラーの数は空間光変調素子110と同程度であってよい。

[0112] 複数のマイクロミラー117、118はそれぞれ、制御部130の制御により、独立して、基板112の主面に対して並行移動し、第1状態と第2状態のいずれかをとることができる。第1状態（図中のマイクロミラー117）は、基板112から第1の距離にある状態である。一方、第2状態（図中のマイクロミラー118）は、基板112から第1の距離よりも近い第2の距離にある状態である。第1状態と第2状態の基板112からの距離の差は、露光に用いる光の波長の $1/4$ 、またはこれに半波長の整数倍を加えた値である。これにより第2状態は第1状態に対して電場振幅の符号が反転した状態となる。そこで、第1状態を $\xi_i = +1$ 、第2状態を $\xi_i = -1$ と表す。

[0113] 空間光変調素子111の場合には、ステップS 1 0 5において空間光変調素子110でピクセルの状態 ξ_i からイジングモデルのスピン状態 σ_i へ変換

式 $\sigma_i = 1 - 2 \xi_i$ で変数変換したことに代えて、恒等変換 ($\xi_i = \sigma_i$) する。これにより、空間光変調素子 110 の場合と同様に、空間光変調素子 111 の各ピクセルの状態を上記第 1 から第 5 実施形態を用いて決定することができる。

[0114] 図 12 は第 1 から第 5 実施形態の他の変形例を示す模式図である。第 1 から第 5 の実施形態においては、図 2 に示す反射型の空間光変調素子 110 の各ピクセル 114 の状態を、イジングモデルの各スピンの状態に対応させた。

[0115] これに代えて、第 1 から第 5 実施形態を、図 12 に示すマスク 162 を用いる露光装置 160 のマスク 162 の設計に適用してもよい。この場合に、マスク 162 を仮想的に微小領域に分割して考える。この場合の各微小領域をピクセルとみなす。複数の仮想的なピクセルについて、光源からの光を遮光する遮光部 164 を設けるピクセルと、遮光部 164 を設けずに光を透過光として透過させるピクセルとをそれぞれイジングモデルのスピンの状態に対応させる。これにより、イジングモデルの基底状態の各スピンの値に基づいて、マスク 162 の各ピクセルの状態、すなわち、遮光部 164 を設けた状態と設けない状態とを決定することができる。

[0116] さらに、上記第 1 から第 5 の実施形態を、位相差を利用した位相差マスクに適用してもよい。同様に、第 1 から第 5 実施形態を、透過型の空間光変調素子における各ピクセルの状態の決定に用いてもよい。

[0117] 上記第 1 から第 5 の実施形態においては、図 4 のステップ S101 において、目標像である強度分布や振幅分布が予め与えられている。これに代えて、目標像が満たすべき条件が不等式等で間接的に与えられている場合でも、それらの条件に基づいて目標像を定式化することにより、上記第 1 から第 5 の実施形態を適用することができる。

[0118] 上記第 1 から第 5 の実施形態においては、イジングマシン 230 として、量子アニーリングに特化した計算機を用いた。しかしながら、イジングマシン 230 はこれに限られず、例えば、シミュレーテッドアニーリングに特化

した計算機を用いてもよい。シミュレーテッドアニーリングに特化した計算機は、シミュレーテッドアニーリングを高速に実行できる計算機を含む。

[0119] シミュレーテッドアニーリングは、イジングモデルの各スピンの状態に対応するビットを古典的なコンピュータ上で表し、熱ゆらぎを表す古典的な確率過程で最適解を探索する方法である。この場合に、上記 J_{ij} は複数のビットの間の積に掛ける係数であり、 h_i は各ビットに掛ける係数に相当する量である。

[0120] 上記図2の決定装置200は露光装置100に組み込まれているが、決定装置200は露光装置100とは別個の装置であってもよい。さらに、図2ではイジングマシン230が決定装置200に組み込まれているが、イジングマシン230が決定装置200とは別個の装置であってもよい。また、決定装置200による図4のフローチャートの少なくとも一部の定式化および計算をユーザが行ってもよい。

[0121] 本発明の様々な実施形態は、フローチャートおよびブロック図を参照して記載されてよく、ここにおいてブロックは、(1) 操作が実行されるプロセスの段階または(2) 操作を実行する役割を持つ装置のセクションを表わしてよい。特定の段階およびセクションが、専用回路、コンピュータ可読媒体上に格納されるコンピュータ可読命令と共に供給されるプログラマブル回路、および／またはコンピュータ可読媒体上に格納されるコンピュータ可読命令と共に供給されるプロセッサによって実装されてよい。専用回路は、デジタルおよび／またはアナログハードウェア回路を含んでよく、集積回路(IC) および／またはディスクリート回路を含んでよい。プログラマブル回路は、論理AND、論理OR、論理XOR、論理NAND、論理NOR、および他の論理操作、フリップフロップ、レジスタ、フィールドプログラマブルゲートアレイ(FPGA)、プログラマブルロジックアレイ(PLA) 等のようなメモリ要素等を含む、再構成可能なハードウェア回路を含んでよい。

[0122] コンピュータ可読媒体は、適切なデバイスによって実行される命令を格納可能な任意の有形なデバイスを含んでよく、その結果、そこに格納される命

令を有するコンピュータ可読媒体は、フローチャートまたはブロック図で指定された操作を実行するための手段を作成すべく実行され得る命令を含む、製品を備えることになる。コンピュータ可読媒体の例としては、電子記憶媒体、磁気記憶媒体、光記憶媒体、電磁記憶媒体、半導体記憶媒体等が含まれてよい。コンピュータ可読媒体のより具体的な例としては、フロッピー（登録商標）ディスク、ディスケット、ハードディスク、ランダムアクセスメモリ（RAM）、リードオンリメモリ（ROM）、消去可能プログラマブルリードオンリメモリ（EPROMまたはフラッシュメモリ）、電氣的消去可能プログラマブルリードオンリメモリ（EEPROM）、静的ランダムアクセスメモリ（SRAM）、コンパクトディスクリードオンリメモリ（CD-ROM）、デジタル多用途ディスク（DVD）、ブルーレイ（RTM）ディスク、メモリスティック、集積回路カード等が含まれてよい。

[0123] コンピュータ可読命令は、アセンブラ命令、命令セットアーキテクチャ（ISA）命令、マシン命令、マシン依存命令、マイクロコード、ファームウェア命令、状態設定データ、またはSmalltalk、JAVA（登録商標）、C++等のようなオブジェクト指向プログラミング言語、および「C」プログラミング言語または同様のプログラミング言語のような従来の手続型プログラミング言語を含む、1または複数のプログラミング言語の任意の組み合わせで記述されたソースコードまたはオブジェクトコードのいずれかを含んでよい。

[0124] コンピュータ可読命令は、汎用コンピュータ、特殊目的のコンピュータ、若しくは他のプログラム可能なデータ処理装置のプロセッサまたはプログラマブル回路に対し、ローカルにまたはローカルエリアネットワーク（LAN）、インターネット等のようなワイドエリアネットワーク（WAN）を介して提供され、フローチャートまたはブロック図で指定された操作を実行するための手段を作成すべく、コンピュータ可読命令を実行してよい。プロセッサの例としては、コンピュータプロセッサ、処理ユニット、マイクロプロセッサ、デジタル信号プロセッサ、コントローラ、マイクロコントローラ等を

含む。

[0125] 図13は、本発明の複数の態様が全体的または部分的に具現化されてよいコンピュータ1200の例を示す。コンピュータ1200にインストールされたプログラムは、コンピュータ1200に、本発明の実施形態に係る装置に関連付けられる操作または当該装置の1または複数のセクションとして機能させることができ、または当該操作または当該1または複数のセクションを実行させることができ、および／またはコンピュータ1200に、本発明の実施形態に係るプロセスまたは当該プロセスの段階を実行させることができる。そのようなプログラムは、コンピュータ1200に、本明細書に記載のフローチャートおよびブロック図のブロックのうちのいくつかまたはすべてに関連付けられた特定の操作を実行させるべく、CPU1212によって実行されてよい。

[0126] 本実施形態によるコンピュータ1200は、CPU1212、RAM1214、グラフィックコントローラ1216、およびディスプレイデバイス1218を含み、それらはホストコントローラ1210によって相互に接続されている。コンピュータ1200はまた、通信インタフェース1222、ハードディスクドライブ1224、DVD-ROMドライブ1226、およびICカードドライブのような入／出力ユニットを含み、それらは入／出力コントローラ1220を介してホストコントローラ1210に接続されている。コンピュータはまた、ROM1230およびキーボード1242のようなレガシの入／出力ユニットを含み、それらは入／出力チップ1240を介して入／出力コントローラ1220に接続されている。

[0127] CPU1212は、ROM1230およびRAM1214内に格納されたプログラムに従い動作し、それにより各ユニットを制御する。グラフィックコントローラ1216は、RAM1214内に提供されるフレームバッファ等またはそれ自体の中にCPU1212によって生成されたイメージデータを取得し、イメージデータがディスプレイデバイス1218上に表示されるようにする。

- [0128] 通信インタフェース 1222 は、ネットワークを介して他の電子デバイスと通信する。ハードディスクドライブ 1224 は、コンピュータ 1200 内の CPU 1212 によって使用されるプログラムおよびデータを格納する。DVD-ROM ドライブ 1226 は、プログラムまたはデータを DVD-ROM 1201 から読み取り、ハードディスクドライブ 1224 に RAM 1214 を介してプログラムまたはデータを提供する。IC カードドライブは、プログラムおよびデータを IC カードから読み取り、および／またはプログラムおよびデータを IC カードに書き込む。
- [0129] ROM 1230 はその中に、アクティブ化時にコンピュータ 1200 によって実行されるブートプログラム等、および／またはコンピュータ 1200 のハードウェアに依存するプログラムを格納する。入／出力チップ 1240 はまた、様々な入／出力ユニットをパラレルポート、シリアルポート、キーボードポート、マウスポート等を介して、入／出力コントローラ 1220 に接続してよい。
- [0130] プログラムが、DVD-ROM 1201 または IC カードのようなコンピュータ可読媒体によって提供される。プログラムは、コンピュータ可読媒体から読み取られ、コンピュータ可読媒体の例でもあるハードディスクドライブ 1224、RAM 1214、または ROM 1230 にインストールされ、CPU 1212 によって実行される。これらのプログラム内に記述される情報処理は、コンピュータ 1200 に読み取られ、プログラムと、上記様々なタイプのハードウェアリソースとの間の連携をもたらす。装置または方法が、コンピュータ 1200 の使用に従い情報の操作または処理を実現することによって構成されてよい。
- [0131] 例えば、通信がコンピュータ 1200 および外部デバイス間で実行される場合、CPU 1212 は、RAM 1214 にロードされた通信プログラムを実行し、通信プログラムに記述された処理に基づいて、通信インタフェース 1222 に対し、通信処理を命令してよい。通信インタフェース 1222 は、CPU 1212 の制御下、RAM 1214、ハードディスクドライブ 12

24、DVD-ROM1201、またはICカードのような記録媒体内に提供される送信バッファ処理領域に格納された送信データを読み取り、読み取られた送信データをネットワークに送信し、またはネットワークから受信された受信データを記録媒体上に提供される受信バッファ処理領域等へ書き込む。

[0132] また、CPU1212は、ハードディスクドライブ1224、DVD-ROMドライブ1226（DVD-ROM1201）、ICカード等のような外部記録媒体に格納されたファイルまたはデータベースの全部または必要な部分がRAM1214に読み取られるようにし、RAM1214上のデータに対し様々なタイプの処理を実行してよい。CPU1212は次に、処理されたデータを外部記録媒体にライトバックする。

[0133] 様々なタイプのプログラム、データ、テーブル、およびデータベースのような様々なタイプの情報が記録媒体に格納され、情報処理を受けてよい。CPU1212は、RAM1214から読み取られたデータに対し、本開示の随所に記載され、プログラムの命令シーケンスによって指定される様々なタイプの操作、情報処理、条件判断、条件分岐、無条件分岐、情報の検索／置換等を含む、様々なタイプの処理を実行してよく、結果をRAM1214に対しライトバックする。また、CPU1212は、記録媒体内のファイル、データベース等における情報を検索してよい。例えば、各々が第2の属性の属性値に関連付けられた第1の属性の属性値を有する複数のエントリが記録媒体内に格納される場合、CPU1212は、第1の属性の属性値が指定される、条件に一致するエントリを当該複数のエントリの中から検索し、当該エントリ内に格納された第2の属性の属性値を読み取り、それにより予め定められた条件を満たす第1の属性に関連付けられた第2の属性の属性値を取得してよい。

[0134] 上で説明したプログラムまたはソフトウェアモジュールは、コンピュータ1200上またはコンピュータ1200近傍のコンピュータ可読媒体に格納されてよい。また、専用通信ネットワークまたはインターネットに接続され

たサーバーシステム内に提供されるハードディスクまたはRAMのような記録媒体が、コンピュータ可読媒体として使用可能であり、それによりプログラムを、ネットワークを介してコンピュータ1200に提供する。

[0135] 以上、本発明を実施の形態を用いて説明したが、本発明の技術的範囲は上記実施の形態に記載の範囲には限定されない。上記実施の形態に、多様な変更または改良を加えることが可能であることが当業者に明らかである。その様な変更または改良を加えた形態も本発明の技術的範囲に含まれ得ることが、請求の範囲の記載から明らかである。

[0136] 請求の範囲、明細書、および図面中において示した装置、システム、プログラム、および方法における動作、手順、ステップ、および段階等の各処理の実行順序は、特段「より前に」、「先立って」等と明示しておらず、また、前の処理の出力を後の処理で用いるのでない限り、任意の順序で実現しうることに留意すべきである。請求の範囲、明細書、および図面中の動作フローに関して、便宜上「まず、」、「次に、」等を用いて説明したとしても、この順で実施することが必須であることを意味するものではない。

符号の説明

[0137] 10 ウエハ、20 ダイ、30 一部、100、160 露光装置、102 光源、104 第1の光学系、106 反射鏡、110 空間光変調素子、112 基板、114、116 マイクロミラー、120 点像分布関数、122 形成像、130 制御部、150 第2の光学系、152 ステージ、162 マスク、164 遮光部、200 決定装置、210 設定部、220 決定部、230 イジングマシン、240 イジングモデル、242、244 ビット

請求の範囲

[請求項1] 空間的に互いに異なる位置に配置された複数のピクセルを有する空間光変調素子に照明された光の反射光、透過光、および、仮想的に複数の微小領域に分割した前記複数の微小領域を前記複数のピクセルとみなしたマスクに照射された光の透過光、の少なくともいずれかを結像することにより得られる形成像により、対象物に目標とする条件を満たす像である目標像を形成するために、前記複数のピクセルそれぞれを、複数通りの状態の中の、いずれにすべきかを決定する決定方法であって、

前記複数のピクセルのそれぞれにおける前記状態を、イジングモデルの複数のビットの複数の状態に対応させ、前記目標像と前記形成像の合致度を評価する評価関数を前記複数のビットの関数として設定する設定段階と、

前記評価関数をイジングマシンで評価した結果に含まれる前記複数のビットの状態に基づいて、前記複数のピクセルのそれぞれについて、前記複数通りの状態のいずれにすべきかを決定する決定段階とを備える決定方法。

[請求項2] 前記複数のピクセルそれぞれの取り得る状態が第1の光の状態を生じる第1状態と、前記第1の光の状態とは異なる第2の光の状態を生じる第2状態の2通りである請求項1に記載の決定方法。

[請求項3] 前記複数のピクセルそれぞれの取り得る状態が、それぞれ互いに異なる第1の光の状態から第nの光の状態を生じる、第1状態から第n状態のn通りである請求項1に記載の決定方法。

[請求項4] 前記設定段階において、前記結像における複数のピクセル像の間の干渉性と目標像に基づいて、量子アニーリングにおける前記複数のビットの間の結合定数に相当する物理量と各ビットに作用する外場に相当する物理量を決定し、

前記決定段階で前記イジングマシンとして前記量子アニーリングに

特化した計算機を用いる請求項 1 から 3 のいずれか 1 項に記載の決定方法。

[請求項5] 前記設定段階において、前記結像における複数のピクセル像の間の干渉性と目標像に基づいて、シミュレーテッドアニーリングにおける前記複数のビットの間の積に掛ける係数と各ビットに掛ける係数に相当する量を決定し、

前記決定段階で前記イジングマシンとして前記シミュレーテッドアニーリングに特化した計算機を用いる請求項 1 から 3 のいずれか 1 項に記載の決定方法。

[請求項6] 前記評価関数は、強度分布で表現された前記目標像及び単一ピクセル像を用いて設定される請求項 1 から 5 のいずれか 1 項に記載の決定方法。

[請求項7] 前記評価関数は、部分コヒーレント結像時の強度分布で表現された前記目標像及び、部分コヒーレント結像による複数のコヒーレントモードに対応した単一ピクセル像を用いて設定される請求項 6 に記載の決定方法。

[請求項8] 前記評価関数は、振幅分布で表現された前記目標像及び単一ピクセル像を用いて設定される請求項 1 から 5 のいずれか 1 項に記載の決定方法。

[請求項9] 前記設定段階において、前記複数のビットの n 次の相互作用を $(n - k)$ 次で表す補助ビットを用いる（ただし、 n および k は正の整数で、 $n > k$ である）請求項 1 から 7 のいずれか 1 項に記載の決定方法。

[請求項10] 前記評価関数が、前記複数のピクセルの状態とは関係なく選ぶことができる複数のビットの関数でもある請求項 1 から 8 のいずれか 1 項に記載の決定方法。

[請求項11] 空間的に互いに異なる位置に配置された複数のピクセルを有する空間光変調素子に照明された光の反射光、透過光、および、仮想的に複

数の微小領域に分割した前記複数の微小領域を前記複数のピクセルとみなしたマスクに照射された光の透過光、の少なくともいずれかを結像することにより得られる形成像により、対象物に目標とする条件を満たす像である目標像を形成するために、前記複数のピクセルそれぞれを、複数通りの状態の中の、いずれにすべきかを決定する決定装置であって、

前記複数のピクセルのそれぞれにおける前記状態を、イジングモデルの複数のビットの複数の状態に対応させ、前記目標像と前記形成像の合致度を評価する評価関数を前記複数のビットの関数として設定する設定部と、

前記評価関数をイジングマシンで評価した結果に含まれる前記複数のビットの状態に基づいて、前記複数のピクセルのそれぞれについて、前記複数通りの状態のいずれにすべきかを決定する決定部とを備える決定装置。

[請求項12] 請求項11に記載の決定装置と、

前記空間光変調素子の前記複数のピクセルのそれぞれを、決定された前記状態に制御する制御部とを備える露光装置。

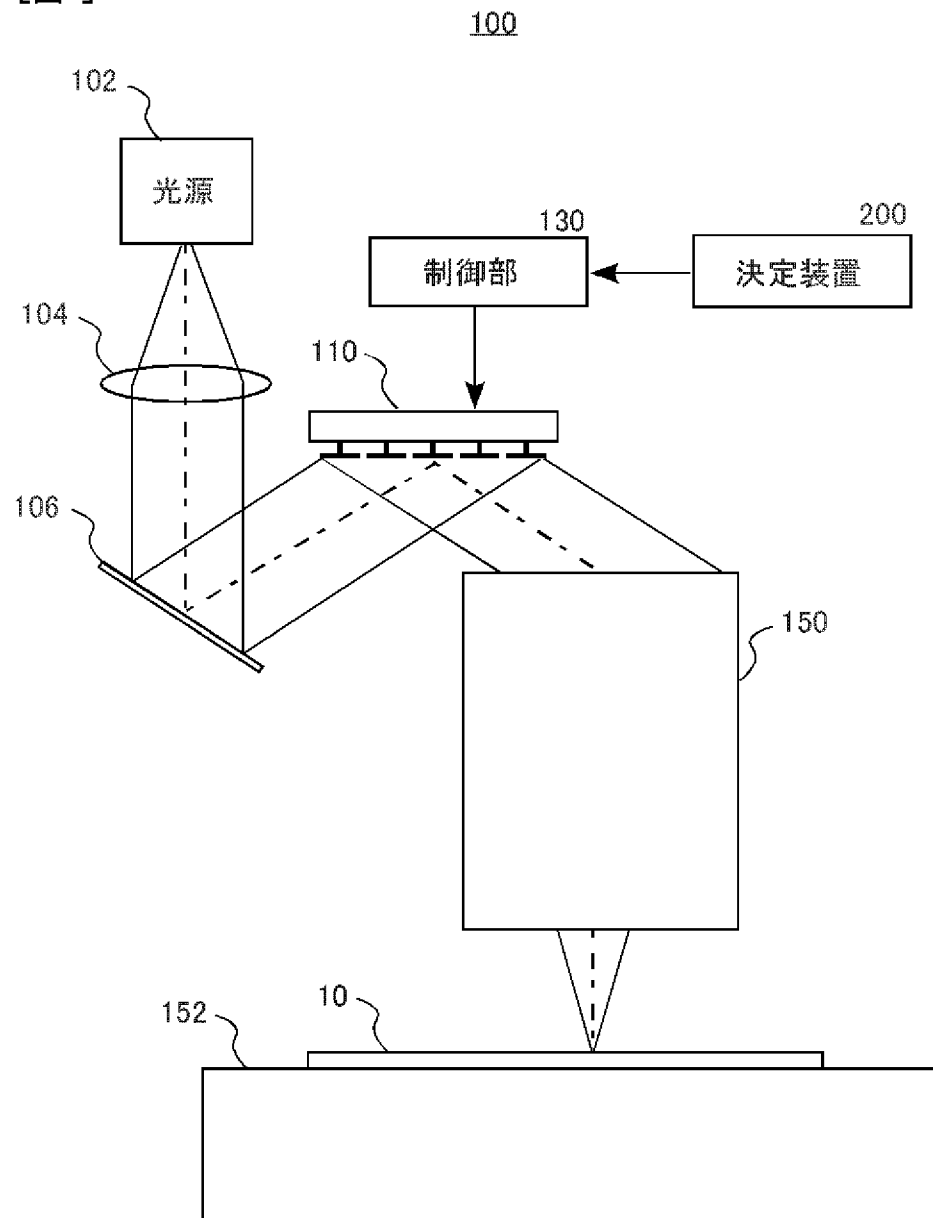
[請求項13] 空間的に互いに異なる位置に配置された複数のピクセルを有する空間光変調素子に照明された光の反射光、透過光、および、仮想的に複数の微小領域に分割した前記複数の微小領域を前記複数のピクセルとみなしたマスクに照射された光の透過光、の少なくともいずれかを結像することにより得られる形成像により、対象物に目標とする条件を満たす像である目標像を形成するために、前記複数のピクセルそれぞれを、複数通りの状態の中の、いずれにすべきかを決定するコンピュータのプログラムであって、前記コンピュータに、

前記複数のピクセルのそれぞれにおける前記状態を、イジングモデルの複数のビットの複数の状態に対応させ、前記目標像と前記形成像

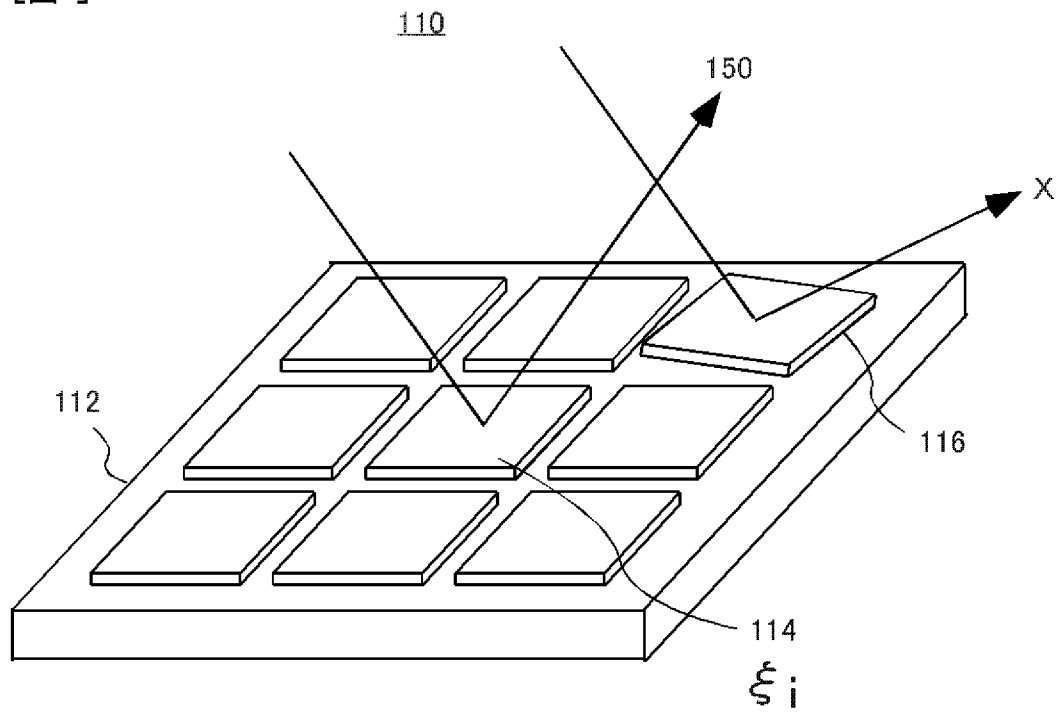
の合致度を評価する評価関数を前記複数のビットの関数として設定する設定段階と、

前記評価関数をイジングマシンで評価した結果に含まれる前記複数のビットの状態に基づいて、前記複数のピクセルのそれぞれについて、前記複数通りの状態のいずれにすべきかを決定する決定段階とを実行させるプログラム。

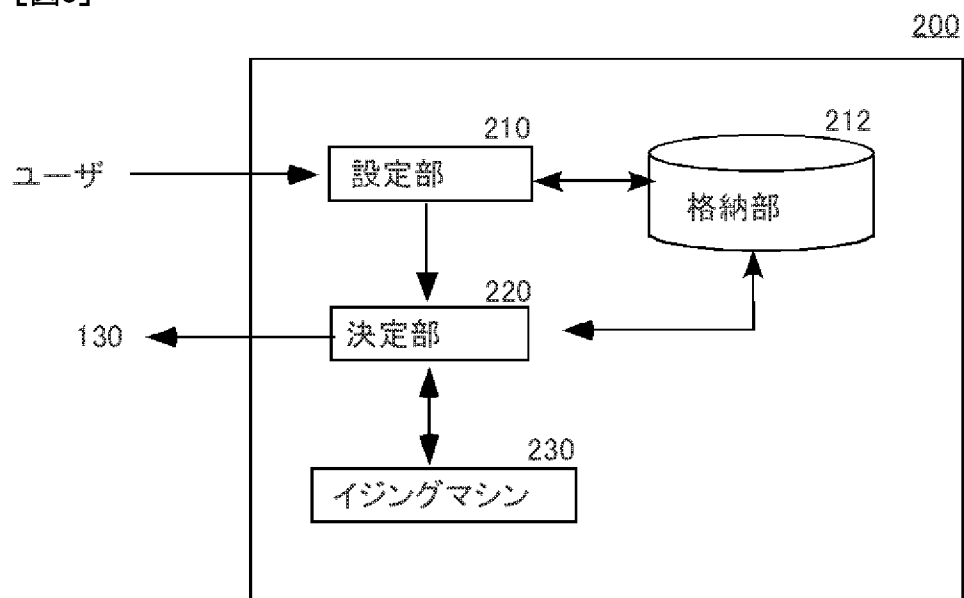
[図1]



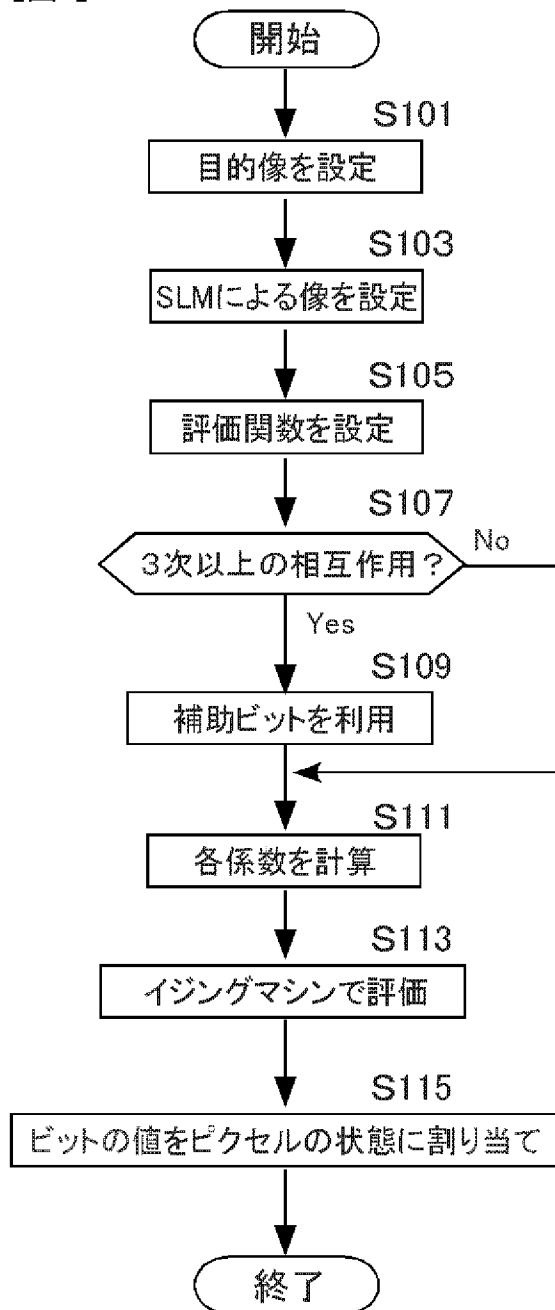
[図2]



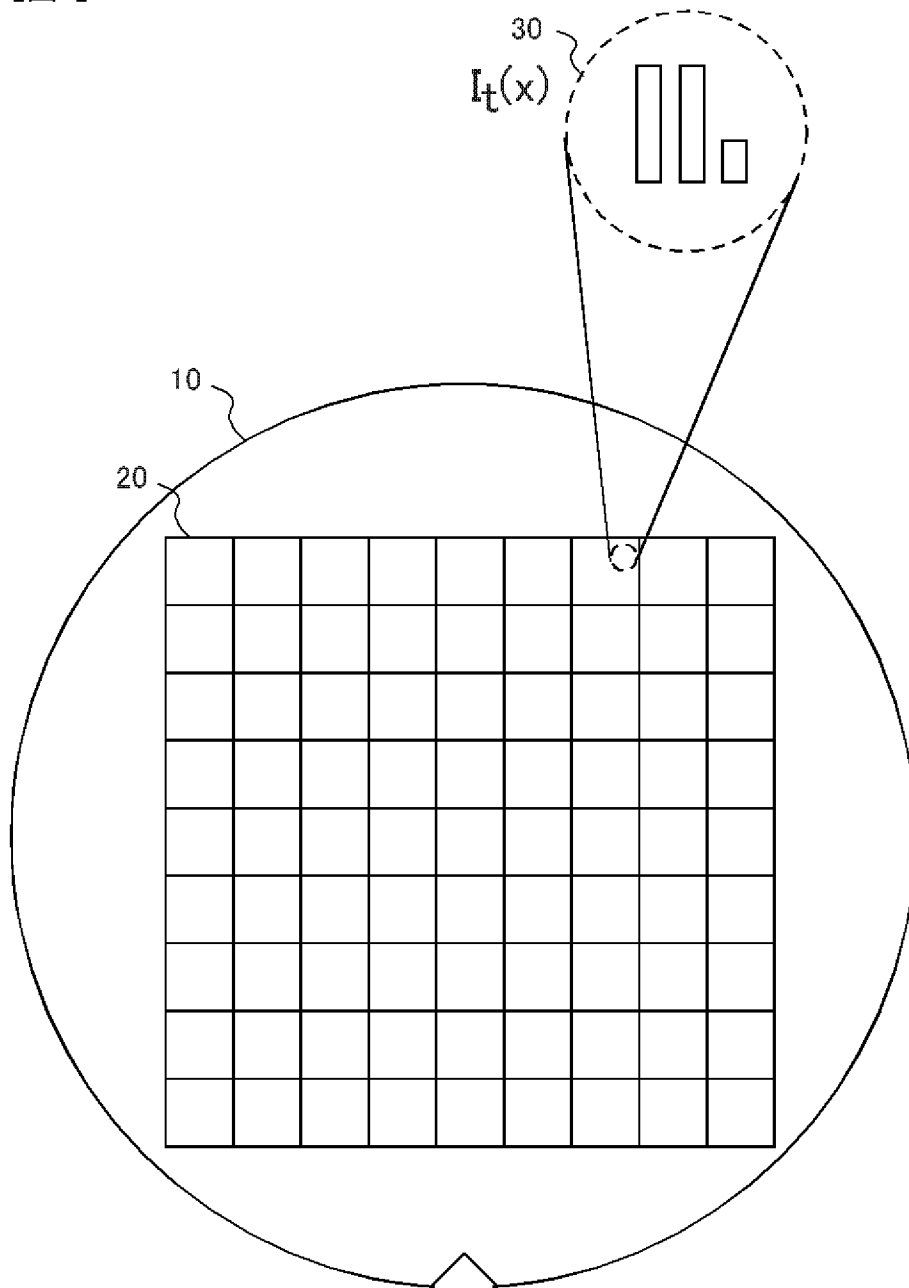
[図3]



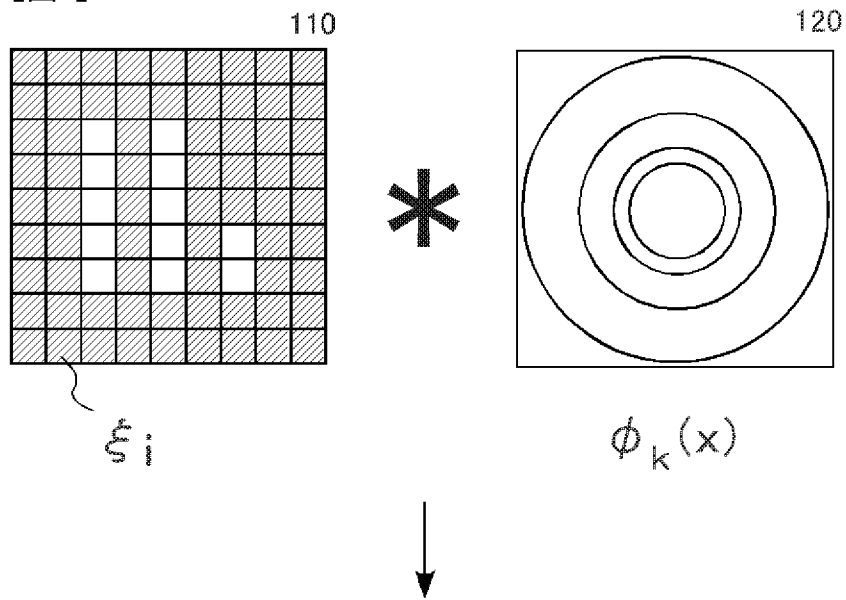
[図4]



[図5]

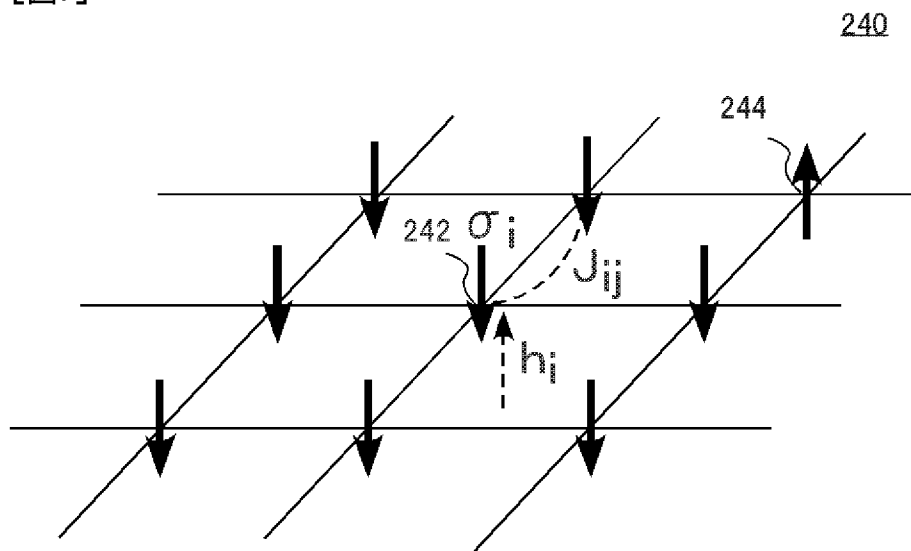


[図6]

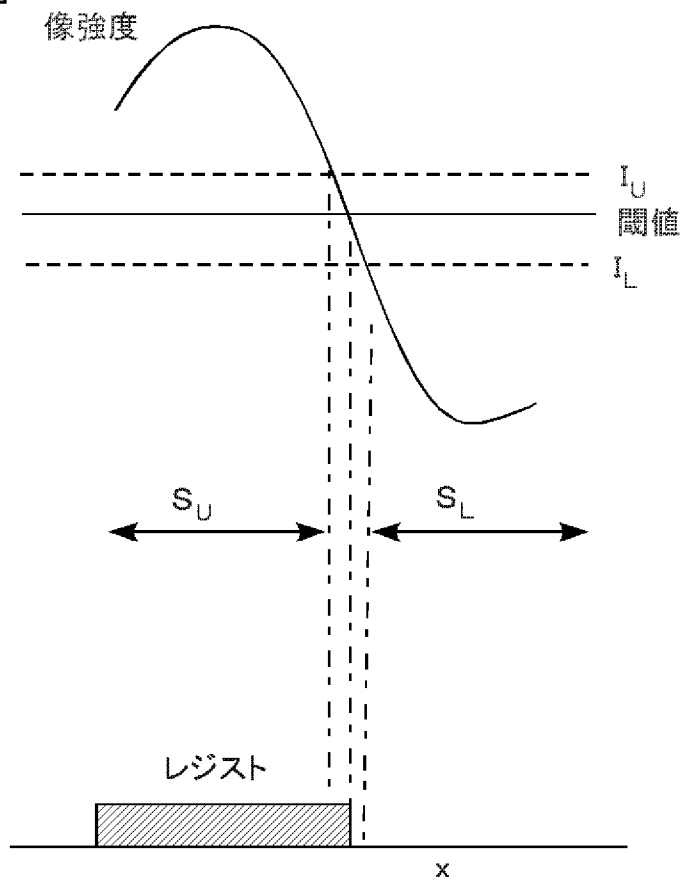


$$I(x) = \sum_k \left| \sum_i \phi_k(x - x_i) \xi_i \right|^2$$

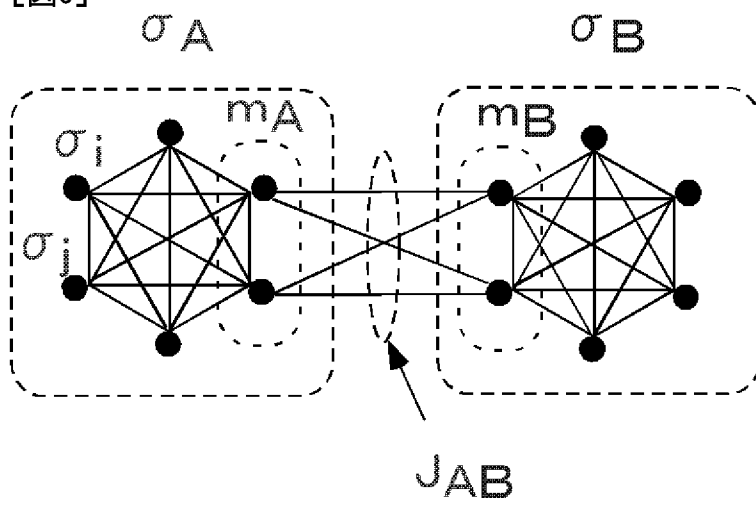
[図7]



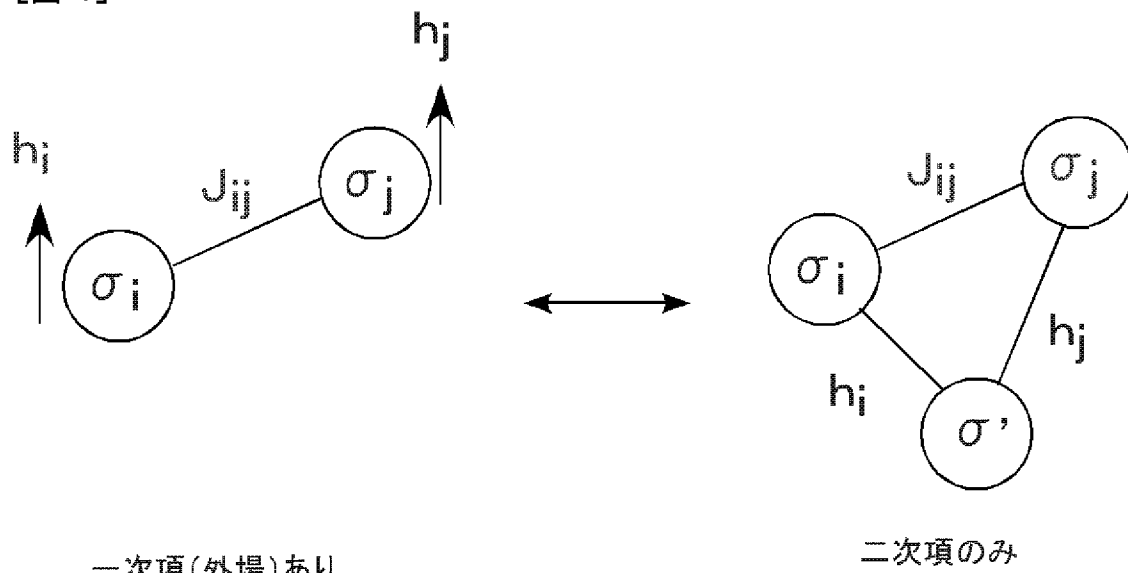
[図8]



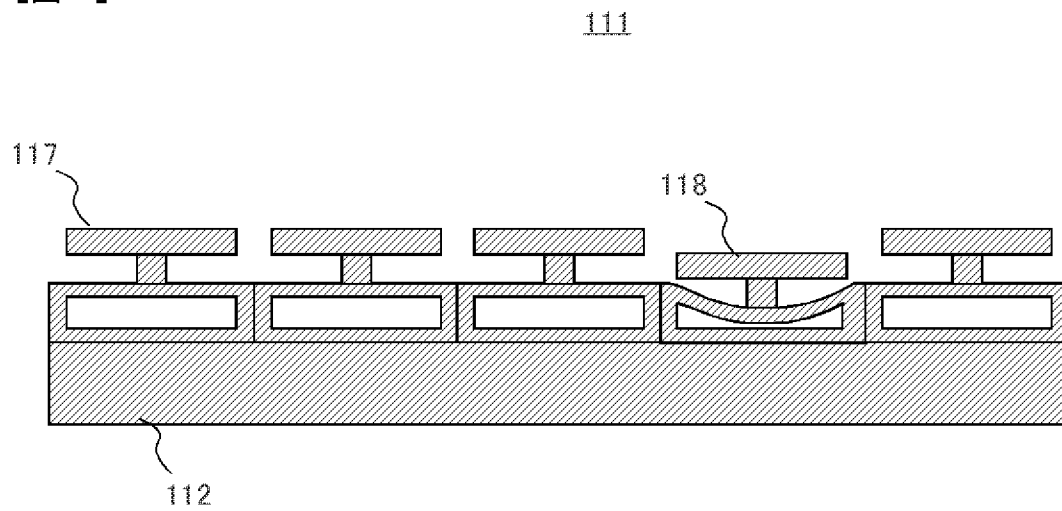
[図9]



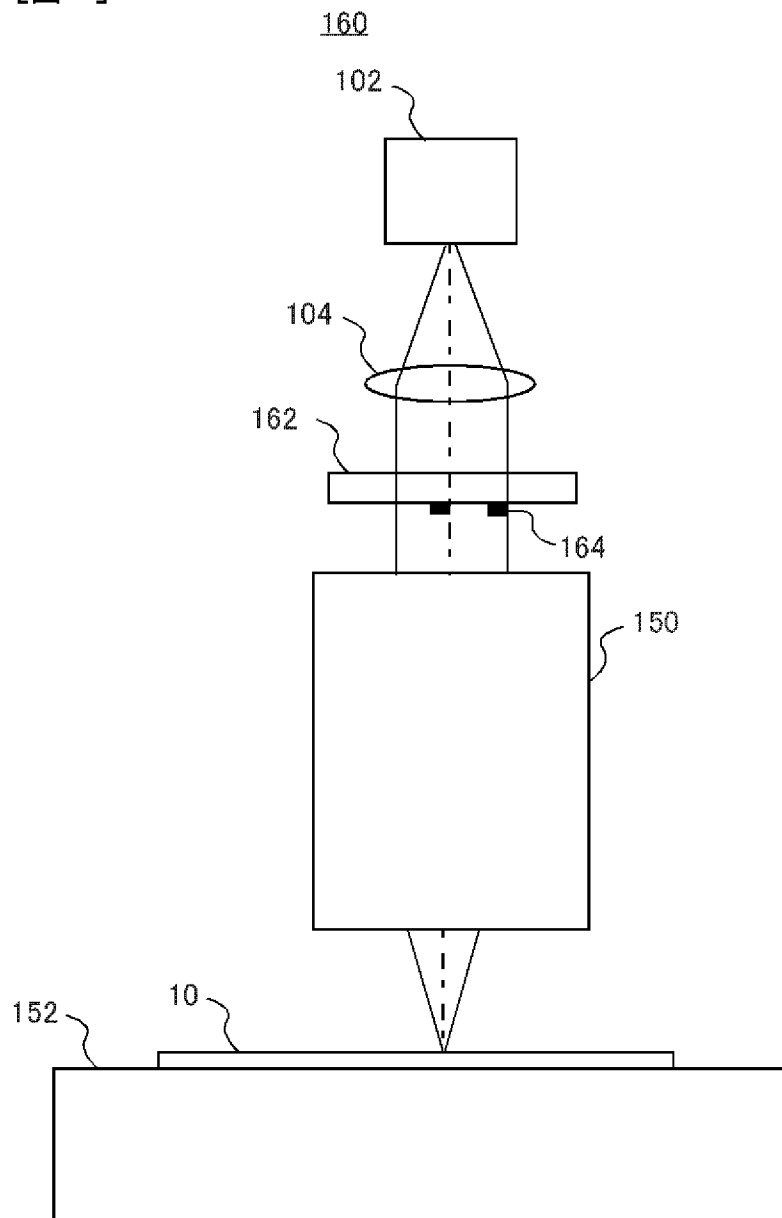
[図10]



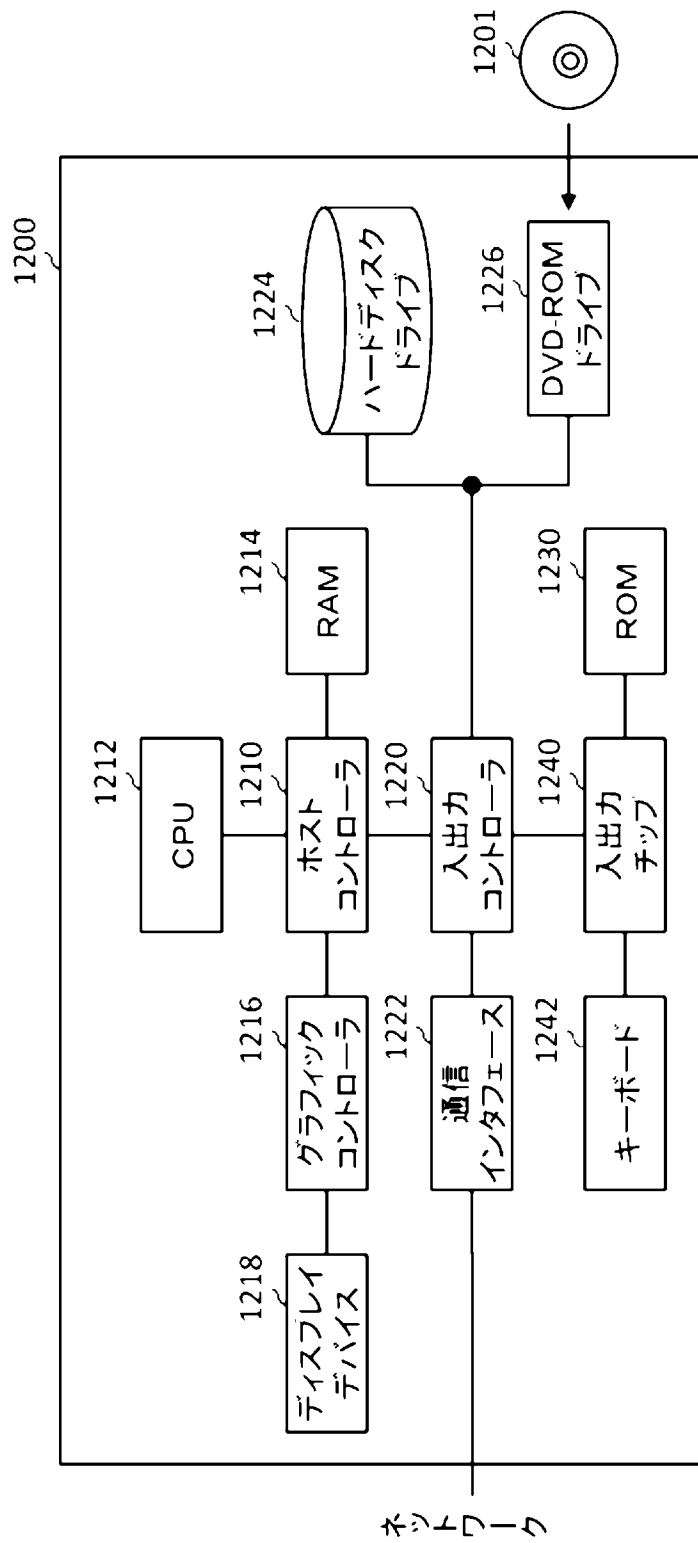
[図11]



[図12]



[図13]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2019/014038

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int. Cl. G02B26/08 (2006.01) i, G03F7/20 (2006.01) i, G06N99/00 (2019.01) 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)

Int. Cl. G02B26/08, G03F7/20, G06N99/00

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

Published examined utility model applications of Japan 1922-1996

Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2019

Registered utility model specifications of Japan 1996-2019

Published registered utility model applications of Japan 1994-2019

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

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2012-212884 A (CARL ZEISS SMT GMBH) 01 November 2012, entire text, all drawings & US 2011/0181855 A1 & WO 2010/034674 A1 & DE 102008042356 A1 & KR 10-2011-0047250 A & CN 102165371 A & TW 201019041 A	1-13
A	JP 2011-503835 A (NIKON CORP.) 27 January 2011, entire text, all drawings & US 2009/0116093 A1 & WO 2009/060773 A1 & KR 10-2010-0095566 A & TW 200928611 A	1-13
A	JP 2018-521382 A (KYNDI, INC.) 02 August 2018, entire text, all drawings & US 2016/0328253 A1 & WO 2016/179419 A1 & KR 10-2018-0004226 A & CN 107683460 A	1-13



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

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

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

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

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

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

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

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

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

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
04.06.2019

Date of mailing of the international search report
18.06.2019

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/JP2019/014038

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 2019/014345 A1 (MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY) 17 January 2019, entire text, all drawings & US 2019/0019100 A1	1-13

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. G02B26/08(2006.01)i, G03F7/20(2006.01)i, G06N99/00(2019.01)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. G02B26/08, G03F7/20, G06N99/00

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	1971-2019年
日本国実用新案登録公報	1996-2019年
日本国登録実用新案公報	1994-2019年

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

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 2012-212884 A（カール・ツァイス・エスエムティー・ゲーエム ベーハー）2012.11.01, 全文, 全図 & US 2011/0181855 A1 & WO 2010/034674 A1 & DE 102008042356 A1 & KR 10-2011-0047250 A & CN 102165371 A & TW 201019041 A	1-13
A	JP 2011-503835 A（株式会社ニコン）2011.01.27, 全文, 全図 & US 2009/0116093 A1 & WO 2009/060773 A1 & KR 10-2010-0095566 A & TW 200928611 A	1-13

☑ 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

04.06.2019

国際調査報告の発送日

18.06.2019

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）

右田 昌士

2 L

9513

電話番号 03-3581-1101 内線 3295

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 2018-521382 A (キンダイ、インコーポレイテッド) 2018.08.02, 全文, 全図 & US 2016/0328253 A1 & WO 2016/179419 A1 & KR 10-2018-0004226 A & CN 107683460 A	1 - 1 3
A	WO 2019/014345 A1 (MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY) 2019.01.17, 全文, 全図 & US 2019/0019100 A1	1 - 1 3