(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号
特許第6875680号
(P6875680)
(45)発行日　令和3年5月26日(2021.5.26)　(24)登録日　令和3年4月27日(2021.4.27)

(51)Int.Cl.　F I
G02F 3/00 (2006.01)　G02F 3/00

請求項の数 14　(全 24 頁)

(21)出願番号　特願2017-77478(P2017-77478)
(22)出願日　平成29年4月10日(2017.4.10)
(65)公開番号　特開2018-180179(P2018-180179A)
(43)公開日　平成30年11月15日(2018.11.15)
審査請求日　令和1年12月10日(2019.12.10)

(73)特許権者　000236436
浜松ホトニクス株式会社
静岡県浜松市東区市野町１１２６番地の１
(73)特許権者　504261077
大学共同利用機関法人自然科学研究機構
東京都三鷹市大沢二丁目２１番１号
(74)代理人　100088155
弁理士　長谷川　芳樹
(74)代理人　100113435
弁理士　黒木　義樹
(74)代理人　100140442
弁理士　柴山　健一
(74)代理人　100110582
弁理士　柴田　昌聰

最終頁に続く

(54)【発明の名称】量子シミュレータおよび量子シミュレーション方法

(57)【特許請求の範囲】
【請求項１】
窓部を有するチャンバーと、
前記窓部から前記チャンバーの内部へ入射させた光により前記チャンバーの内部において擬似スペックルパターンを生成する擬似スペックルパターン生成装置と、
前記チャンバーの内部において前記擬似スペックルパターンの生成が原子に与える影響を検出する検出装置と、
を備え、
前記擬似スペックルパターン生成装置が、
光を出力する光源と、
設定可能な強度の変調分布を有し、前記光源から出力された光を前記変調分布に応じて空間的に変調して、その変調後の光を擬似スペックルパターンとして出力する空間光変調器と、
生成すべき擬似スペックルパターンの光強度統計分布に応じた統計分布を有する擬似乱数パターンのフーリエ変換を第１パターンとし、生成すべき擬似スペックルパターンの自己相関関数に応じた相関関数のフーリエ変換の平方根のパターンを第２パターンとして、前記第１パターンと前記第２パターンとの積の逆フーリエ変換のパターンに基づく前記変調分布を前記空間光変調器に設定する制御部と、
を含む、
量子シミュレータ。

【請求項２】
窓部を有するチャンバーと、
前記窓部から前記チャンバーの内部へ入射させた光により前記チャンバーの内部において擬似スペックルパターンを生成する擬似スペックルパターン生成装置と、
前記チャンバーの内部において前記擬似スペックルパターンの生成が原子に与える影響を検出する検出装置と、
を備え、
前記擬似スペックルパターン生成装置が、
光を出力する光源と、
設定可能な強度の変調分布を有し、前記光源から出力された光を前記変調分布に応じて空間的に変調して、その変調後の光を擬似スペックルパターンとして出力する空間光変調器と、
生成すべき擬似スペックルパターンの光強度統計分布に応じた統計分布を有する擬似乱数パターンを第１パターンとし、生成すべき擬似スペックルパターンの自己相関関数に応じた相関関数のフーリエ変換の平方根の逆フーリエ変換のパターンを第２パターンとして、前記第１パターンと前記第２パターンとの畳み込み積分のパターンに基づく前記変調分布を前記空間光変調器に設定する制御部と、
を含む、
量子シミュレータ。
【請求項３】
前記擬似スペックルパターン生成装置が、前記空間光変調器から出力された光を入力して擬似スペックルパターンを前記チャンバーの内部において結像する結像光学系を更に含む、
請求項１または２に記載の量子シミュレータ。
【請求項４】
窓部を有するチャンバーと、
前記窓部から前記チャンバーの内部へ入射させた光により前記チャンバーの内部において擬似スペックルパターンを生成する擬似スペックルパターン生成装置と、
前記チャンバーの内部において前記擬似スペックルパターンの生成が原子に与える影響を検出する検出装置と、
を備え、
前記擬似スペックルパターン生成装置が、
光を出力する光源と、
設定可能な位相の変調分布を有し、前記光源から出力された光を前記変調分布に応じて空間的に変調して、その変調後の光を出力する空間光変調器と、
前記空間光変調器から出力された光を入力して擬似スペックルパターンを前記チャンバーの内部において再生する再生光学系と、
生成すべき擬似スペックルパターンの光強度統計分布に応じた統計分布を有する擬似乱数パターンのフーリエ変換を第１パターンとし、生成すべき擬似スペックルパターンの自己相関関数に応じた相関関数のフーリエ変換の平方根のパターンを第２パターンとして、前記第１パターンと前記第２パターンとの積の逆フーリエ変換のパターンに基づく前記変調分布を前記空間光変調器に設定する制御部と、
を含む、
量子シミュレータ。
【請求項５】
窓部を有するチャンバーと、
前記窓部から前記チャンバーの内部へ入射させた光により前記チャンバーの内部において擬似スペックルパターンを生成する擬似スペックルパターン生成装置と、
前記チャンバーの内部において前記擬似スペックルパターンの生成が原子に与える影響を検出する検出装置と、

を備え、
前記擬似スペックルパターン生成装置が、
光を出力する光源と、
設定可能な位相の変調分布を有し、前記光源から出力された光を前記変調分布に応じて空間的に変調して、その変調後の光を出力する空間光変調器と、
前記空間光変調器から出力された光を入力して擬似スペックルパターンを前記チャンバーの内部において再生する再生光学系と、
生成すべき擬似スペックルパターンの光強度統計分布に応じた統計分布を有する擬似乱数パターンを第１パターンとし、生成すべき擬似スペックルパターンの自己相関関数に応じた相関関数のフーリエ変換の平方根の逆フーリエ変換のパターンを第２パターンとして、前記第１パターンと前記第２パターンとの畳み込み積分のパターンに基づく前記変調分布を前記空間光変調器に設定する制御部と、
を含む、
量子シミュレータ。
【請求項６】
前記チャンバーの内部へ原子ガスを供給する原子ガス供給装置を更に備える、
請求項１～５の何れか１項に記載の量子シミュレータ。
【請求項７】
前記窓部から前記チャンバーの内部へ入射して前記チャンバーの内部の原子を捕捉する光ビームを発生させる光ビーム発生装置を更に備える、
請求項１～６の何れか１項に記載の量子シミュレータ。
【請求項８】
チャンバーの窓部から前記チャンバーの内部へ入射させた光により前記チャンバーの内部において擬似スペックルパターンを擬似スペックルパターン生成装置により生成させる擬似スペックルパターン生成ステップと、
前記チャンバーの内部において前記擬似スペックルパターンの生成が原子に与える影響を検出装置により検出する検出ステップと、
を含み、
前記擬似スペックルパターン生成ステップにおいて、
設定可能な強度の変調分布を有する空間光変調器を用い、
生成すべき擬似スペックルパターンの光強度統計分布に応じた統計分布を有する擬似乱数パターンのフーリエ変換を第１パターンとし、生成すべき擬似スペックルパターンの自己相関関数に応じた相関関数のフーリエ変換の平方根のパターンを第２パターンとして、前記第１パターンと前記第２パターンとの積の逆フーリエ変換のパターンに基づく前記変調分布を前記空間光変調器に設定し、
光源から出力された光を前記変調分布に応じて空間的に変調して、その変調後の光を擬似スペックルパターンとして出力する、
量子シミュレーション方法。
【請求項９】
チャンバーの窓部から前記チャンバーの内部へ入射させた光により前記チャンバーの内部において擬似スペックルパターンを擬似スペックルパターン生成装置により生成させる擬似スペックルパターン生成ステップと、
前記チャンバーの内部において前記擬似スペックルパターンの生成が原子に与える影響を検出装置により検出する検出ステップと、
を含み、
前記擬似スペックルパターン生成ステップにおいて、
設定可能な強度の変調分布を有する空間光変調器を用い、
生成すべき擬似スペックルパターンの光強度統計分布に応じた統計分布を有する擬似乱数パターンを第１パターンとし、生成すべき擬似スペックルパターンの自己相関関数に応じた相関関数のフーリエ変換の平方根の逆フーリエ変換のパターンを第２パターンとし

て、前記第１パターンと前記第２パターンとの畳み込み積分のパターンに基づく前記変調分布を前記空間光変調器に設定し、
光源から出力された光を前記変調分布に応じて空間的に変調して、その変調後の光を擬似スペックルパターンとして出力する、
量子シミュレーション方法。
【請求項１０】
前記擬似スペックルパターン生成ステップにおいて、前記空間光変調器から出力された光を入力する結像光学系を用いて、擬似スペックルパターンを前記チャンバーの内部において結像する、
請求項８または９に記載の量子シミュレーション方法。
【請求項１１】
チャンバーの窓部から前記チャンバーの内部へ入射させた光により前記チャンバーの内部において擬似スペックルパターンを擬似スペックルパターン生成装置により生成させる擬似スペックルパターン生成ステップと、
前記チャンバーの内部において前記擬似スペックルパターンの生成が原子に与える影響を検出装置により検出する検出ステップと、
を含み、
前記擬似スペックルパターン生成ステップにおいて、
設定可能な位相の変調分布を有する空間光変調器を用い、
生成すべき擬似スペックルパターンの光強度統計分布に応じた統計分布を有する擬似乱数パターンのフーリエ変換を第１パターンとし、生成すべき擬似スペックルパターンの自己相関関数に応じた相関関数のフーリエ変換の平方根のパターンを第２パターンとして、前記第１パターンと前記第２パターンとの積の逆フーリエ変換のパターンに基づく前記変調分布を前記空間光変調器に設定し、
光源から出力された光を前記変調分布に応じて空間的に変調して、その変調後の光を出力し、
前記空間光変調器から出力された光を入力する再生光学系により、擬似スペックルパターンを前記チャンバーの内部において再生する、
量子シミュレーション方法。
【請求項１２】
チャンバーの窓部から前記チャンバーの内部へ入射させた光により前記チャンバーの内部において擬似スペックルパターンを擬似スペックルパターン生成装置により生成させる擬似スペックルパターン生成ステップと、
前記チャンバーの内部において前記擬似スペックルパターンの生成が原子に与える影響を検出装置により検出する検出ステップと、
を含み、
前記擬似スペックルパターン生成ステップにおいて、
設定可能な位相の変調分布を有する空間光変調器を用い、
生成すべき擬似スペックルパターンの光強度統計分布に応じた統計分布を有する擬似乱数パターンを第１パターンとし、生成すべき擬似スペックルパターンの自己相関関数に応じた相関関数のフーリエ変換の平方根の逆フーリエ変換のパターンを第２パターンとして、前記第１パターンと前記第２パターンとの畳み込み積分のパターンに基づく前記変調分布を前記空間光変調器に設定し、
光源から出力された光を前記変調分布に応じて空間的に変調して、その変調後の光を出力し、
前記空間光変調器から出力された光を入力する再生光学系により、擬似スペックルパターンを前記チャンバーの内部において再生する、
量子シミュレーション方法。
【請求項１３】
前記チャンバーの内部へ原子ガス供給装置により原子ガスを供給する原子ガス供給ステ

ップを更に有する請求項８～１２の何れか１項に記載の量子シミュレーション方法。
【請求項１４】
前記チャンバーの内部の原子を捕捉する光ビームを光ビーム発生装置により発生させ、その光ビームを前記窓部から前記チャンバーの内部へ入射させる光ビーム発生ステップを更に有する請求項８～１３の何れか１項に記載の量子シミュレーション方法。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は、量子シミュレータおよび量子シミュレーション方法に関するものである。
【背景技術】
【０００２】
原子レベルのミクロな領域での物質の挙動は量子力学に従っていることが知られている。このようなミクロな領域での現象は、その距離スケールが現実世界のスケールと大きくかけ離れていることもあって、我々の目に直接触れる形で現れることは多くない。しかし、近年の科学技術の発展に伴い、量子力学的効果を利用する有効な技術が生み出されてきている。例えば、超電導、通信用素子、薬剤開発、新機能物質（特殊な電気伝導物質や強力な磁石など）など、その応用範囲は広範囲に亘っており、量子の挙動を知ることは新たな技術を生み出すための第一歩として、重要となりつつある。
【０００３】
現実の物質内において、上記のような量子力学的効果は、多数の粒子が互いに相互作用を及ぼし合いながら生み出されている。このような状況でも量子力学によって現象を記述することは原理的には可能なはずであるが、複数の粒子からなる量子力学（量子多体問題）は極めて複雑であり、理論的・数値的にその挙動を予言することは、現実の系から大きく乖離した理想形を除いて、現実的には不可能といっていい。
【０００４】
量子シミュレータは、このような複雑な量子力学的多体問題を研究するための手法として、近年注目を集めている。量子シミュレータでは、研究対象が持つ物理的特徴を備えたモデル系を準備して、そのモデルを実際に動かして如何なる現象が起こるかを観測する。たとえば、結晶中での量子力学的現象を研究する場合には、適当な原子を結晶構造に応じた空間配置に従って配列したモデル系を準備する。現実の結晶では原子間隔が小さく、その挙動を追うことは困難であるが、原子をマイクロメートル程度の間隔で配列することで、量子現象を制御および観測しやすいサイズのモデル系を構築することができる。
【０００５】
量子シミュレータは、配列された原子の位置を制御したり、配列された各原子に何らかの刺激を与えたりすることにより、系全体に現れる影響を検出することができる。量子シミュレータにおいて原子を配列する手段として、光を集光して当該集光位置に原子を捕捉する光トラップ技術が用いられる。また、量子シミュレータにおいて原子に刺激を与える手段としては、所定の形状を持つ光パターンを生成し、配列された原子に照射する技術が用いられる。同条件下での検出プロセスを複数回数くり返すことで、例えば解析に重要な電子の存在確率を知ることができるため、原子を配列する手段および原子に刺激を与える両手段において、優れた制御性および再現性が求められる。
【０００６】
現実の結晶における原子の配列は完全に周期的ではなく、部分的な欠落や歪みによる結晶欠陥の存在や、不純物の混入などにより、不規則な要素が存在する。さらに、有限温度領域では結晶中の原子は無秩序な力（熱振動）の作用を受けている。これら欠陥、不純物、熱振動等の不規則性は、電気伝導や光学特性などにも大きな影響を与えていることから、現実の物質の挙動を調べる上で無視できない要素となっている。したがって、不規則な複数の位置に原子を補足する、あるいは無秩序な熱振動による刺激を再現するために、不規則な光強度分布を生成する手段を確立することは、量子シミュレータによって現実の物質を調べる機能を実現する上で重要となっている。

【０００７】
光トラップ技術において規則正しく配列された複数の位置に原子を捕捉する場合には、二光束を互いに干渉させて一方向の周期的な光の明暗の干渉縞を形成したり、干渉縞を三方向に重畳して形成することで三方向の周期的な明暗分布を形成したりする。後者の場合、単純な結晶構造である「単純立方格子」を再現することができる。また、近年では、計算機ホログラムを利用して様々な原子配列を再現することが試みられており、自然界の様々な結晶構造を模して原子を配列することが可能となってきている。
【０００８】
光トラップ技術において不規則な複数の位置に原子を捕捉する場合、あるいは原子集団に無秩序な力場を与える場合には、非特許文献１～４に記載されているように、ディフューザ（散乱媒体）およびレンズを用いてスペックルパターンを生成し、捕捉対象の原子に応じて適切に光波長を選択することで、スペックルパターンにおいて輝度が高い位置もしくは輝度が低い位置に原子を補足する、あるいはスペックルパターンによって形成される無秩序な力場の作用を与えることができる。以下では、輝度が高い位置に原子を捕捉した場合について記載する。また、非特許文献５，６には、ディフューザおよびレンズを用いてスペックルパターンを生成する技術が記載されている。非特許文献７には、空間光変調器およびレンズを用いてスペックルパターンを生成する技術が記載されている。
【０００９】
なお、スペックルパターンは、レーザ光などのコヒーレントな光が拡散板等のディフューザにより散乱されたときに当該散乱光の多重干渉により生成されるものである。スペックルパターンにおける光強度の空間分布が乱数パターンに近い性質を有していることから、スペックルパターンは、干渉技術、超解像技術および光計測技術などにおいて利用され、また、最近では原子や粒子コロイドのトラップ等の光操作技術においても利用されている。
【００１０】
スペックルパターンは、空間構造および光強度統計分布により特徴付けられる。空間構造は、スペックルパターンの自己相関関数の空間的形状により表され、光学系の点像分布を示す。光強度統計分布は、スペックルパターンにおける光強度のヒストグラムにより表され、指数分布に従う。なお、擬似乱数を２次元配列した２次元擬似乱数パターンの空間構造（自己相関関数）はデルタ関数で近似される。
【先行技術文献】
【非特許文献】
【００１１】
【非特許文献１】D. Boiron et.al, “Trapping and cooling cesium atoms in a speckle field,” Eur. Phys.J. D 7, 373-377 (1999).
【非特許文献２】M. Robert-de-Saint-Vincentet.al, “Anisotropic 2D Diffusive Expansion of UltracoldAtoms in a Disordered Potential,” Phys. Rev. Lett. 104, 220602 (2010).
【非特許文献３】M C Beeler et.al, “Disorder-driven loss of phase coherence in a quasi-2D cold atomsystem,” New J. Phys. 14, 073024 (2012).
【非特許文献４】Sebastian Krinner et.al, “Superfluidity with disorder in a thin film of quantum gas,” Phys.Rev. Lett. 110, 100601 (2013).
【非特許文献５】Vladlen G. Shvedov et.al,“Selective trapping of multiple particles by volume speckle field,” OPTICSEXPRESS, Vol.18, No.3, pp.3137-3142 (2010).
【非特許文献６】E. Mudry et.al, “Structuredillumination microscopy using unknown speckle patterns,” NATURE PHOTONICS, VOL6, pp.312-315 (2012).
【非特許文献７】Yaron Bromberg and Hui Cao,“Generating Non-Rayleigh Speckles with Tailored Intensity Statistics,” PHYSICALREVIEW LETTERS 112, 213904 (2014).
【発明の概要】
【発明が解決しようとする課題】

【００１２】
非特許文献１～６に記載された技術は、ディフューザを用いるものであるから、生成されるスペックルパターンの空間構造および光強度統計分布の設定の自由度およびそれらの「再現度」が無いか又は低い。非特許文献７に記載された技術は、２次元擬似乱数パターンに応じて空間光変調器に呈示する変調分布を変更することによってスペックルパターンを変更することができる。しかし、この技術においても、スペックルパターンのコントラストが調整されるのみであり、生成されるスペックルパターンの空間構造および光強度統計分布の設定の自由度およびそれらの「再現度」が低い。
【００１３】
したがって、スペックルパターンを用いて光トラップ、あるいは無秩序な力場による効果のシミュレーションを行う従来の量子シミュレータ、または、これを用いた量子シミュレーション方法は、所望の空間構造または光強度統計分布を有するスペックルパターンを再現性良く生成することができないことから、対象の特徴をよく表す好適なモデルを構築することが困難である。
【００１４】
本発明は、上記問題点を解消する為になされたものであり、対象の特徴をよく表す好適なモデルを容易に構築することができる再現性・制御性に優れた量子シミュレータおよび量子シミュレーション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】
【００１５】
本発明で生成されるパターンは、ディフューザを用いて生成される通常のスペックルパターンと異なる空間構造または光強度統計分布を有することも可能であるので、「擬似スペックルパターン」と呼ぶことにする。
【００１６】
本発明の量子シミュレータは、(1) 窓部を有するチャンバーと、(2) 窓部からチャンバーの内部へ入射させた光によりチャンバーの内部において擬似スペックルパターンを生成する擬似スペックルパターン生成装置と、(3) チャンバーの内部において擬似スペックルパターンの生成が原子に与える影響を検出する検出装置と、を備える。
【００１７】
本発明の量子シミュレータの擬似スペックルパターン生成装置は、或る側面では、(a) 光を出力する光源と、(b) 設定可能な強度の変調分布を有し、光源から出力された光を変調分布に応じて空間的に変調して、その変調後の光を擬似スペックルパターンとして出力する空間光変調器と、(c) 擬似乱数パターン基づいて空間光変調器の変調分布を設定する制御部と、を含む。また、この擬似スペックルパターン生成装置は、空間光変調器から出力された光を入力して擬似スペックルパターンをチャンバーの内部において結像する結像光学系を更に含むのが好適である。
【００１８】
本発明の量子シミュレータの擬似スペックルパターン生成装置は、他の側面では、(a) 光を出力する光源と、(b) 設定可能な位相の変調分布を有し、光源から出力された光を変調分布に応じて空間的に変調して、その変調後の光を出力する空間光変調器と、(c) 空間光変調器から出力された光を入力して擬似スペックルパターンをチャンバーの内部において再生する再生光学系と、(d) 擬似乱数パターンに基づいて得られる計算機ホログラムを空間光変調器の変調分布として設定する制御部と、を含む。
【００１９】
本発明の量子シミュレータの擬似スペックルパターン生成装置の一側面では、制御部は、生成すべき擬似スペックルパターンの光強度統計分布に応じた統計分布を有する擬似乱数パターンのフーリエ変換を第１パターンとし、生成すべき擬似スペックルパターンの自己相関関数に応じた相関関数のフーリエ変換の平方根のパターンを第２パターンとして、第１パターンと第２パターンとの積の逆フーリエ変換のパターンに基づく変調分布を空間光変調器に設定するのが好適である。また、制御部は、生成すべき擬似スペックルパター

ンの光強度統計分布に応じた統計分布を有する擬似乱数パターンを第１パターンとし、生成すべき擬似スペックルパターンの自己相関関数に応じた相関関数のフーリエ変換の平方根の逆フーリエ変換のパターンを第２パターンとして、第１パターンと第２パターンとの畳み込み積分のパターンに基づく変調分布を空間光変調器に設定するのも好適である。

【００２０】

本発明の量子シミュレータは、一側面では、チャンバーの内部へ原子ガスを供給する原子ガス供給装置を更に備えるのが好適であり、また、窓部からチャンバーの内部へ入射してチャンバーの内部の原子を捕捉する光ビームを発生させる光ビーム発生装置を更に備えるのも好適である。

【００２１】

本発明の量子シミュレーション方法は、(1) チャンバーの窓部からチャンバーの内部へ入射させた光によりチャンバーの内部において擬似スペックルパターンを擬似スペックルパターン生成装置により生成させる擬似スペックルパターン生成ステップと、(2) チャンバーの内部において擬似スペックルパターンの生成が原子に与える影響を検出装置により検出する検出ステップと、を含む。

【００２２】

本発明の量子シミュレーション方法の擬似スペックルパターン生成ステップにおいて、或る側面では、設定可能な強度の変調分布を有する空間光変調器を用い、擬似乱数パターンに基づいて空間光変調器の変調分布を設定し、光源から出力された光を変調分布に応じて空間的に変調して、その変調後の光を擬似スペックルパターンとして出力するのが好適である。また、この擬似スペックルパターン生成ステップにおいて、空間光変調器から出力された光を入力する結像光学系を用いて、擬似スペックルパターンをチャンバーの内部において結像するのが好適である。

【００２３】

本発明の量子シミュレーション方法の擬似スペックルパターン生成ステップにおいて、他の側面では、設定可能な位相の変調分布を有する空間光変調器を用い、擬似乱数パターンに基づいて得られる計算機ホログラムを空間光変調器の変調分布として設定し、光源から出力された光を変調分布に応じて空間的に変調して、その変調後の光を出力し、空間光変調器から出力された光を入力する再生光学系により、擬似スペックルパターンをチャンバーの内部において再生するのが好適である。

【００２４】

本発明の量子シミュレーション方法の擬似スペックルパターン生成ステップの一側面では、生成すべき擬似スペックルパターンの光強度統計分布に応じた統計分布を有する擬似乱数パターンのフーリエ変換を第１パターンとし、生成すべき擬似スペックルパターンの自己相関関数に応じた相関関数のフーリエ変換の平方根のパターンを第２パターンとして、第１パターンと第２パターンとの積の逆フーリエ変換のパターンに基づく変調分布を空間光変調器に設定するのが好適である。また、生成すべき擬似スペックルパターンの光強度統計分布に応じた統計分布を有する擬似乱数パターンを第１パターンとし、生成すべき擬似スペックルパターンの自己相関関数に応じた相関関数のフーリエ変換の平方根の逆フーリエ変換のパターンを第２パターンとして、第１パターンと第２パターンとの畳み込み積分のパターンに基づく変調分布を空間光変調器に設定するのも好適である。

【００２５】

本発明の量子シミュレーション方法は、一側面では、チャンバーの内部へ原子ガス供給装置により原子ガスを供給する原子ガス供給ステップを更に含むのが好適であり、また、チャンバーの内部の原子を捕捉する光ビームを光ビーム発生装置により発生させ、その光ビームを窓部からチャンバーの内部へ入射させる光ビーム発生ステップを更に含むのも好適である。

【発明の効果】

【００２６】

本発明によれば、対象の特徴をよく表す好適なモデルを容易に構築することができ、再

現性・制御性に優れる。
【図面の簡単な説明】
【００２７】
【図１】図１は、本実施形態の量子シミュレータ１００の構成を示す図である。
【図２】図２は、量子シミュレータ１００の動作の一例および量子シミュレーション方法の一例を説明する図である。
【図３】図３は、擬似スペックルパターンを計算により求める場合の計算手順のフローチャートである。
【図４】図４は、擬似スペックルパターンを計算により求める場合の他の計算手順のフローチャートである。
【図５】図５は、相関関数ｃおよびフィルタ関数Ｆの例を纏めた表である。
【図６】図６（ａ）は、統計分布が正規分布に従う２次元擬似乱数パターンａ(x,y)の一例を示す図である。図６（ｂ）は、図６（ａ）の２次元擬似乱数パターンａ(x,y)および相関関数ｃ(r)＝exp(-r)を用いた場合に得られる擬似スペックルパターンｂ(x,y)を示す図である。
【図７】図７（ａ）は、図６（ａ）の２次元擬似乱数パターンａ(x,y)および相関関数ｃ(r)＝exp(-r/9)を用いた場合に得られる擬似スペックルパターンｂ(x,y)を示す図である。図７（ｂ）は、図７（ａ）の擬似スペックルパターンｂ(x,y)の光強度統計分布（輝度ヒストグラム）を示す図である。
【図８】図８（ａ）は、ディフューザを用いて生成されたスペックルパターンの一例を示す図である。図８（ｂ）は、図８（ａ）のスペックルパターンの光強度統計分布（輝度ヒストグラム）を示す図である。
【図９】図９（ａ）は、図６（ａ）の２次元擬似乱数パターンａ(x,y)および相関関数ｃ(r)＝exp(-r/3)を用いた場合の擬似スペックルパターンｂ(x,y)を示す図である。図９（ｂ）は、図９（ａ）の擬似スペックルパターンｂ(x,y)の自己相関画像を示す図である。
【図１０】図１０は、図９（ｂ）の自己相関画像における強度プロファイルを示す図である。
【図１１】図１１は、第１実施形態の擬似スペックルパターン生成装置１Ａの構成を示す図である。
【図１２】図１２は、第２実施形態の擬似スペックルパターン生成装置１Ｂの構成を示す図である。
【図１３】図１３は、第３実施形態の擬似スペックルパターン生成装置１Ｃの構成を示す図である。
【図１４】図１４は、第４実施形態の擬似スペックルパターン生成装置１Ｄの構成を示す図である。
【図１５】図１５は、第４実施形態の擬似スペックルパターン生成装置１Ｄの空間光変調器１５に設定される計算機ホログラムの一例を示す図である。
【図１６】図１６（ａ）は、第４実施形態の擬似スペックルパターン生成装置１Ｄの空間光変調器１５に図１５の計算機ホログラムを位相変調分布として設定したときに光パターン生成面Ｐに再生される擬似スペックルパターンｂ(x,y)を示す図である。図１６（ｂ）は、図１６（ａ）の擬似スペックルパターンｂ(x,y)の光強度統計分布（輝度ヒストグラム）を示す図である。
【発明を実施するための形態】
【００２８】
以下、添付図面を参照して、本発明を実施するための形態を詳細に説明する。なお、図面の説明において同一の要素には同一の符号を付し、重複する説明を省略する。本発明は、これらの例示に限定されるものではなく、特許請求の範囲によって示され、特許請求の範囲と均等の意味および範囲内でのすべての変更が含まれることが意図される。
【００２９】
先ず、量子シミュレータおよび量子シミュレーション方法の実施形態について説明し、

量子シミュレータの動作例および量子シミュレーション方法の一例について説明する。これらの要部である擬似スペックル生成装置および擬似スペックル生成方法の実施形態については、その後に詳細を説明する。

【００３０】

図１は、本実施形態の量子シミュレータ１００の構成を示す図である。量子シミュレータ１００は、擬似スペックルパターン生成装置１、主真空槽（チャンバー）２、原子ガス供給装置３、光ビーム発生装置４、光検出装置５および原子数検出装置６を備える。

【００３１】

主真空槽（チャンバー）２は、外部と内部との間で光を透過させる窓部（第１窓部２１および第２窓部２２）を有する。第１窓部２１は光ビーム発生装置４と光学的に接続されている。第２窓部２２は擬似スペックルパターン生成装置１と光学的に接続されている。なお、第１窓部と第２窓部とは共通の窓部によって構成されていてもよい。主真空槽２は、真空排気系により内部の気体を排気するための排気用開口２３を有し、ポンプによる排気やゲッターによるガスの吸着などによって内部を超高真空の状態に維持することができる。主真空槽２は、原子ガス供給装置３から供給される原子ガスを内部に導入するための原子ガス導入用開口２４を有する。また、主真空槽２は、光と磁場の作用により原子を捕捉するためのＭＯＴ用磁気回路を含む。ＭＯＴとは「Magneto-Optical Trap」の略語であり、光と磁場の作用により原子集団を捕捉する技術である。

【００３２】

原子ガス供給装置３は、主真空槽２の内部へ原子ガスを供給する。原子ガス供給装置３は、真空ガラスセルの内部または周辺に配置された、所望の金属原子あるいは所望の原子を含む化合物などを加熱して気体状の原子を発生するヒータ、および、電流を加えることにより磁場を生成するコイルなどを有する磁気回路を含む。原子ガス供給装置３は、ヒータにより金属原子を加熱して原子ガスを生成し、真空ガラスセルに照射したレーザ光の光圧および光と磁場の作用により金属ガスを捕捉する。そして、原子ガス供給装置３は、その捕捉した原子ガスを別のレーザ光の照射による光圧で所定の位置に輸送して、主真空槽２の原子ガス導入用開口２４から主真空槽２の内部へ原子ガスを供給する。

【００３３】

光ビーム発生装置４は、第１窓部２１から主真空槽２の内部へ入射して主真空槽２の内部の原子を捕捉する光ビームを発生させる。光ビーム発生装置４から第１窓部２１を経て主真空槽２の内部に入射される光ビームはレーザ光であるのが好適である。このレーザ光の光圧および光と磁場の作用により主真空槽２の内部の原子を捕捉する。また、その捕捉した原子を他のレーザ光の光圧により所定の位置に輸送または配列する。更に他のレーザ光および電波発生源からの電波により原子を励起してもよい。光ビーム発生装置４は、これらのレーザ光を発生させ、また、電波をも発生させる。

【００３４】

擬似スペックルパターン生成装置１は、第２窓部２２から主真空槽２の内部へ入射させた光により主真空槽２の内部において擬似スペックルパターンを生成する。擬似スペックルパターン生成装置１は、制御部１０、光源１１、ビームエキスパンダ１２、空間光変調器１５およびレンズ１６を含む。

【００３５】

光源１１は、光を出力する。ビームエキスパンダ１２は、光源１１と光学的に接続され、光源１１から出力される光のビーム径を拡大して出力する。空間光変調器１５は、位相変調型のものであって、設定可能な位相の変調分布を有する。空間光変調器１５は、ビームエキスパンダ１２と光学的に接続され、光源１１から出力されてビームエキスパンダ１２によりビーム径を拡大された光を入力し、その入力した光を変調分布に応じて空間的に変調して、その変調後の光を出力する。

【００３６】

レンズ１６は、空間光変調器１５と光学的に接続され、好適には高ＮＡを有する対物レンズである。レンズ１６は、空間光変調器１５から出力された光を入力して、その光を第

２窓部２２から主真空槽２の内部へ入射させる。レンズ１６は、主真空槽２の内部へ入射させた光により主真空槽２の内部において擬似スペックルパターンを再生する再生光学系である。制御部１０は、２次元擬似乱数パターンに基づいて（好適には更に相関関数にも基づいて）得られる計算機ホログラムを空間光変調器１５の変調分布として設定する。擬似スペックルパターン生成装置１の詳細については後述する。

【００３７】

空間光変調器１５とレンズ１６との間の光路上にダイクロイックミラー５１が挿入されている。ダイクロイックミラー５１は、光源１１から出力される光を透過させ、主真空槽２の内部の原子で発生する蛍光等の光を透過させる。光検出装置５は、主真空槽２の内部の原子で発生する蛍光等の光のうち第２窓部２２を透過してダイクロイックミラー５１で反射された光を受光する。光検出装置５は、受光した光の強度を検出してもよいし、受光した光のスペクトル（例えば蛍光スペクトルや吸収スペクトル）を検出してもよい。また、光検出装置５は、これらの２次元画像を検出することができるＣＣＤカメラであってもよい。

【００３８】

原子数検出装置６は、主真空槽２の内部に設けられたイオン化電極６１およびイオン検出器６２を含む。原子数検出装置６は、イオン化電極６１が形成する電場、もしくは適当な波長を有するひとつ以上のパルス光を外部から照射することにより、所定の状態にある原子をイオン化させ、そのイオンの個数をイオン検出器６２により計数する。光検出装置５および原子数検出装置６それぞれは、イオン化条件を変化させながら生成イオン数を計測することにより、主真空槽２の内部において擬似スペックルパターンの生成が原子に与える影響を検出することができる。

【００３９】

本実施形態の量子シミュレーション方法は、上記のような構成を有する量子シミュレータ１００を用いて行われるものであり、原子ガス供給ステップ、光ビーム発生ステップ、擬似スペックルパターン生成ステップおよび検出ステップを含む。

【００４０】

原子ガス供給ステップでは、真空状態とされた主真空槽２の内部へ原子ガス供給装置３により原子ガスを供給する。光ビーム発生ステップでは、主真空槽２の内部の原子を捕捉する光ビームを光ビーム発生装置４により発生させ、その光ビームを第１窓部２１から主真空槽２の内部へ入射させる。この光ビーム照射により、原子を捕捉し、原子を輸送または配列し、または、原子を励起する。

【００４１】

擬似スペックルパターン生成ステップでは、擬似スペックルパターン生成装置１により、第２窓部２２から主真空槽２の内部へ入射させた光により主真空槽２の内部において擬似スペックルパターンを生成させる。この擬似スペックルパターン生成ステップでは、設定可能な位相の変調分布を有する空間光変調器１５により、光源１１から出力されてビームエキスパンダ１２によりビーム径を拡大された光を変調分布に応じて空間的に変調して、その変調後の光を出力する。そして、空間光変調器１５から出力された光を入力するレンズ１６により、擬似スペックルパターンを主真空槽２の内部において再生する。また、制御部１０により、２次元擬似乱数パターンに基づいて（好適には更に相関関数にも基づいて）得られる計算機ホログラムを空間光変調器１５の変調分布として設定する。

【００４２】

検出ステップでは、主真空槽２の内部において擬似スペックルパターンの生成が原子に与える影響を検出装置（光検出装置５または原子数検出装置６）により検出する。擬似スペックルパターン生成後から検出までの時間差を変化させながら検出することで、擬似スペックルパターンの生成が原子に与える影響を検出することができる。

【００４３】

測定手段としては以下の３つの態様が可能である。測定手段１では、原子ガス供給装置３により主真空槽２の内部に供給された原子を光ビーム発生装置４により規則性の有無を

問わず配列させ、その原子の状態を光検出装置５または原子数検出装置６により測定する。測定手段２は、原子ガス供給装置３により主真空槽２の内部に供給された原子を光ビーム発生装置４により規則性の有無を問わず配列させ、擬似スペックルパターン生成装置１による擬似スペックルパターンの照射により原子に刺激を与え、所定時間が経過した後に原子の状態を光検出装置５または原子数検出装置６により測定する。また、測定手段３では、原子ガス供給装置３により主真空槽２の内部に供給された原子を光ビーム発生装置４により規則性の有無を問わず配列させ、擬似スペックルパターン生成装置１による擬似スペックルパターンの照射により原子を不規則に再配列させ、その再配列後の原子の状態を光検出装置５または原子数検出装置６により測定する。

【００４４】

計測値としては以下の２つが可能である。計測値１は、光検出装置５による蛍光スペクトルまたは吸収スペクトルの計測値である。計測値２は、原子数検出装置６によるイオン数の計測値である。

【００４５】

測定対象としては以下の４つの態様が可能である。測定対象１は、原子ガス供給装置３により供給された原子集団そのままである。測定対象２は、主真空槽２の内部に設けられたイオン化電極６１によりイオン化された原子のイオン集団である。測定対象３はボーズアインシュタイン凝縮体（ＢＥＣ: Bose-Einstein Condensation）である。ＢＥＣは、光ビーム発生装置４から主真空槽２の内部に導入された原子の補足の為のレーザ光の強度を徐々に弱くしたときに運動量の小さい原子のみを選択的に捕捉（蒸発冷却）することで生成される。測定対象４はリュードベリ原子（Rydbergatom）集団である。リュードベリ原子は、原子種に応じて適切に選択した１つ以上の波長のレーザ光または適切に選択した１つ以上の周波数の電波を光ビーム発生装置４から主真空槽２の内部の原子に対して多段階に照射することで生成され、電子が主量子数１０以上の軌道に励起された高励起状態の原子である。

【００４６】

測定対象に対する光学操作としては以下の２つの態様が可能である。光学操作１は、光の定在波による光の格子パターンに基づく測定対象の操作である。光学操作２は、ホログラムの再生による光パターンに基づく測定対象の操作である。これらは、光ビーム発生装置４から主真空槽２の内部に入射される光ビームにより行われる。

【００４７】

測定対象に対する配列手段としては以下の７つの態様が可能である。配列手段１は、主真空槽２の内部においてＭＯＴにより測定対象を配列させる。配列手段２は、主真空槽２の内部においてＭＯＴにより測定対象を配列させた状態を維持し、別のレーザ光の照射による光圧で測定対象を所定の位置に配列させる。配列手段３は、主真空槽２の内部においてＭＯＴにより測定対象を配列させた後にＭＯＴを中断して、別のレーザ光の照射による光圧で測定対象を所定の位置に配列させる。配列手段４は、主真空槽２の内部においてＭＯＴにより測定対象を配列させた状態を維持し、別のレーザ光の照射に光学操作１を施した光圧で測定対象を所定の位置に配列させる。配列手段５は、主真空槽２の内部においてＭＯＴにより測定対象を配列させた後にＭＯＴを中断して、別のレーザ光の照射に光学操作１を施した光圧で測定対象を所定の位置に配列させる。配列手段６は、主真空槽２の内部においてＭＯＴにより測定対象を配列させた状態を維持し、別のレーザ光の照射に光学操作２を施した光圧で測定対象を所定の位置に配列させる。配列手段７は、主真空槽２の内部においてＭＯＴにより測定対象を配列させた後にＭＯＴを中断して、別のレーザ光の照射に光学操作２を施した光圧で測定対象を所定の位置に配列させる。

【００４８】

本実施形態の量子シミュレータ１００および量子シミュレーション方法では、これらの測定手段１～３、計測値１，２、測定対象１～４、光学操作１，２および配列手段１～７を様々に組み合わせることにより、結晶構造の特徴を表すモデルを構築して、その結晶構造を研究することができる。すなわち、原子ガス供給ステップでは、原子ガス供給装置３

から主真空槽２の内部へ原子ガスを供給し、光ビーム発生ステップでは、光ビーム発生装置４から主真空槽２の内部へ光ビームを照射して、配列手段１～７の何れかにより主真空槽２の内部の原子を配列させる。また、光ビーム発生装置４から主真空槽２の内部へ光ビームまたは電波を照射して、その配列させた原子を測定対象１～４の何れかに転化する。その後、擬似スペックルパターン生成ステップでは、擬似スペックルパターン生成装置１により、主真空槽２の内部に擬似スペックルパターンを生成して、主真空槽２の内部の原子を再配列させたり揺らぎを与えたりする。そして、検出ステップでは、光検出装置５または原子数検出装置６を用いて、測定手段１～３の何れかにより、計測値１，２の何れかを取得する。これにより、無秩序性が測定対象または測定対象の配列に与える影響を解明することができる。

【００４９】

より具体的な量子シミュレータ１００の動作の一例および量子シミュレーション方法の一例は以下のとおりである。図２は、量子シミュレータ１００の動作の一例および量子シミュレーション方法の一例を説明する図である。原子ガス供給装置３から主真空槽２の内部へ原子ガスを供給した後、光ビーム発生装置４から主真空槽２の内部へ光ビームを照射して、例えば配列手段７により主真空槽２の内部の原子を５行５列に２次元配列させる。さらに、光ビーム発生装置４から主真空槽２の内部へポンプ光を照射して、その配列させた原子を測定対象４に転化する。ポンプ光を照射した時刻ｔをｔ＝０とする。時刻ｔ＝t_1のタイミングで、擬似スペックルパターン生成装置１により、主真空槽２の内部に擬似スペックルパターンを生成する。ｔ＝t_1以降の所定の時刻ｔ＝t_2において、光ビーム発生装置４から主真空槽２内部の被測定地点へプローブ光を照射して、測定手段２により計測値２を取得する。ここで、プローブ光照射に対して、当該被測定地点における電子の存在確率に応じてイオンが生成されるため、原子ガスの供給から計測値２の取得までの手続きを複数回繰り返すことで、電子の存在確率を知ることが可能となる。さらに、プローブ光を照射する被測定地点の位置を変化させるとともに、プローブ光照射時刻ｔ＝t_2を時刻ｔ＝t_3など様々な時刻に変化させつつ計測値２を蓄積することで、無秩序性が測定対象または測定対象中の電子分布に与える影響の空間および時間的な変化を追跡することができる。

【００５０】

次に、量子シミュレータ１００が備える擬似スペックル生成装置１の実施形態、および、量子シミュレーション方法が含む擬似スペックル生成方法の実施形態について、詳細に説明する。本実施形態の擬似スペックルパターン生成装置１および擬似スペックルパターン生成方法では、２次元擬似乱数パターンａ(x,y)およびフィルタ関数Ｆ(u,v)に基づいて擬似スペックルパターンｂ(x,y)を光学的に生成する。

【００５１】

本実施形態において生成される擬似スペックルパターンを説明する。図３は、擬似スペックルパターンを計算により求める場合の計算手順のフローチャートである。なお、以下に登場する関数のうち、英小文字で表した関数は実空間における関数であり、英大文字で表した関数はフーリエ空間における関数である。また、(x,y)は実空間中の直交座標系で表した位置を示し、(u,v)はフーリエ空間中の直交座標系で表した位置を示す。

【００５２】

ステップＳ１１では、２次元擬似乱数パターンａ(x,y)を生成する。具体的には、任意の生成方法により所定のシード数および統計分布に従う１次元の擬似乱数列を生成し、これらの擬似乱数を２次元に配列することで２次元擬似乱数パターンａ(x,y)を生成する。１次元擬似乱数列の生成の際のシード数および統計分布ならびに２次元配列の際の配列規則が同じであれば、２次元擬似乱数パターンａ(x,y)の生成は再現性を有する。ステップＳ１２では、ａ(x,y)をフーリエ変換してＡ(u,v)を得る（（１）式）。

【００５３】

【数１】

$$A(u,v) = FFT[a(x,y)] \qquad \cdots(1)$$

【００５４】

ステップＳ２１では、相関関数ｃ(x,y)を準備する。ステップＳ２２では、ｃ(x,y)をフーリエ変換してＣ(u,v)を得る（（２）式）。ステップＳ２３では、Ｃ(u,v)の平方根を計算してフィルタ関数Ｆ(u,v)を得る（（３）式）。

【００５５】

【数２】

$$C(u,v) = FFT[c(x,y)] \qquad \cdots(2)$$

【００５６】

【数３】

$$F(u,v) = \sqrt{C(u,v)} \qquad \cdots(3)$$

【００５７】

ステップＳ３１では、Ａ(u,v)とＦ(u,v)とを乗算してＢ(u,v)を得る（（４）式）。そして、ステップＳ３２では、Ｂ(u,v)を逆フーリエ変換して擬似スペックルパターンｂ(x,y)を得る（（５）式）。なお、フーリエ変換と逆フーリエ変換とは、数値計算をする場合には同様の計算処理で実現可能であり、また、光学系により実現する場合には同様の光学系により実現可能であるから、両者を区別する必要はない。

【００５８】

【数４】

$$B(u,v) = A(u,v) \cdot F(u,v) \qquad \cdots(4)$$

【００５９】

【数５】

$$b(x,y) = IFFT[B(u,v)] \qquad \cdots(5)$$

【００６０】

このようにして生成された擬似スペックルパターンｂ(x,y)は、２次元擬似乱数パターンａ(x,y)の統計分布に応じた光強度統計分布と、フィルタ関数Ｆ(u,v)に対応する相関関数ｃ(x,y)に応じた空間構造（自己相関関数）と、を有する。なお、ステップＳ２３においてＣ(u,v)の平方根を計算してフィルタ関数Ｆ(u,v)を求めるのは、擬似スペックルパターンｂ(x,y)の自己相関関数と相関関数ｃ(x,y)とを互いに一致させるためである。

【００６１】

擬似スペックルパターンは、他の計算手順に従って求めることもできる。図４は、擬似スペックルパターンを計算により求める場合の他の計算手順のフローチャートである。

【００６２】

ステップＳ４１では、２次元擬似乱数パターンａ(x,y)を生成する。ステップＳ５１では、相関関数ｃ(x,y)を準備する。ステップＳ５２では、ｃ(x,y)をフーリエ変換してＣ(u,v)を得る（（２）式）。ステップＳ５３では、Ｃ(u,v)の平方根を計算してフィルタ関数Ｆ(u,v)を得る（（３）式）。これらステップＳ４１，Ｓ５１，Ｓ５２，Ｓ５３は、ステップＳ１１，Ｓ２１，Ｓ２２，Ｓ２３と同様の処理である。

【００６３】

ステップＳ５４では、Ｆ(u,v)を逆フーリエ変換してｆ(x,y)を得る（（６）式）。ステップＳ６１では、ａ(x,y)とｆ(x,y)とを畳み込み積分して擬似スペックルパターンｂ(x,y)を得る（（７）式）。

【００６４】

【数６】

$$f(x,y)=IFFT[F(u,v)] \qquad \cdots(6)$$

【００６５】

【数７】

$$b(x,y)=a(x,y)*f(x,y) \qquad \cdots(7)$$

【００６６】

このようにして生成された擬似スペックルパターンｂ(x,y)も、２次元擬似乱数パターンａ(x,y)の統計分布に応じた光強度統計分布と、相関関数ｃ(x,y)に応じた空間構造（自己相関関数）と、を有する。

【００６７】

本実施形態では、図３および図４の何れの計算手順に従って擬似スペックルパターンｂ(x,y)を求めてもよい。

【００６８】

すなわち、生成すべき擬似スペックルパターンｂ(x,y)の光強度統計分布に応じた統計分布を有する２次元擬似乱数パターンａ(x,y)のフーリエ変換（Ａ(u,v)）を第１パターンとし、生成すべき擬似スペックルパターンｂ(x,y)の自己相関関数に応じた相関関数ｃ(x,y)のフーリエ変換の平方根（Ｆ(u,v)）のパターンを第２パターンとして、第１パターンと第２パターンとの積の逆フーリエ変換のパターンを擬似スペックルパターンｂ(x,y)とすることができる。

【００６９】

或いは、生成すべき擬似スペックルパターンｂ(x,y)の光強度統計分布に応じた統計分布を有する２次元擬似乱数パターンａ(x,y)を第１パターンとし、生成すべき擬似スペックルパターンｂ(x,y)の自己相関関数に応じた相関関数ｃ(x,y)のフーリエ変換の平方根の逆フーリエ変換（ｆ(x,y)）のパターンを第２パターンとして、第１パターンと第２パターンとの畳み込み積分のパターンを擬似スペックルパターンｂ(x,y)とすることができる。

【００７０】

図５は、相関関数ｃおよびフィルタ関数Ｆの例を纏めた表である。この表に示される相関関数ｃは、実空間における原点(0,0)からの距離ｒのみを変数とする関数ｃ(r)である。対応するフィルタ関数Ｆも、フーリエ空間における原点(0,0)からの距離ｋのみを変数とする関数Ｆ(k)である。各式において、ｒ，ｋは非負の実数であり、η，ξは正の実数である。

【００７１】

相関関数ｃ(x,y)としては、フーリエ変換の結果であるＣ(u,v)が非負の実数の関数となるような関数が選ばれ、また、距離ｒが大きくなるに従い関数値が漸減する関数であるのが好ましい。相関関数ｃは、距離ｒのみを変数とする関数であるのが好ましい。相関関数ｃは、ｘおよびｙを変数とする関数（例えばexp(-|x+y|/ξ)）であってもよい。相関関数ｃは、原点(0,0)における関数値が１であってもよいが、その関数値が任意であってよい。相関関数ｃは、数式で表現することができないものであってもよい。

【００７２】

図６（ａ）は、統計分布が正規分布に従う２次元擬似乱数パターンａ(x,y)の一例を示す図である。図６（ｂ）は、図６（ａ）の２次元擬似乱数パターンａ(x,y)および相関関数ｃ(r)＝exp(-r)を用いた場合に得られる擬似スペックルパターンｂ(x,y)を示す図である。図７（ａ）は、図６（ａ）の２次元擬似乱数パターンａ(x,y)および相関関数ｃ(r)＝exp(-r/9)を用いた場合に得られる擬似スペックルパターンｂ(x,y)を示す図である。図７（ｂ）は、図７（ａ）の擬似スペックルパターンｂ(x,y)の光強度統計分布（輝度ヒストグラム）を示す図である。

【００７３】

図８（ａ）は、ディフューザを用いて生成されたスペックルパターンの一例を示す図である。図８（ｂ）は、図８（ａ）のスペックルパターンの光強度統計分布（輝度ヒストグラム）を示す図である。ディフューザを用いて生成されたスペックルパターンの光強度統計分布（図８（ｂ））は指数関数分布で近似することができるのに対して、擬似スペックルパターンｂ(x,y)の光強度統計分布（図７（ｂ））は、正規分布で近似することができ、２次元擬似乱数パターンａ(x,y)の統計分布と略一致している。なお、図７（ｂ）および図８（ｂ）の光強度統計分布（輝度ヒストグラム）の横軸は、２５６階調の光強度を表している。

【００７４】

図９（ａ）は、図６（ａ）の２次元擬似乱数パターンａ(x,y)および相関関数ｃ(r)＝exp(-r/3)を用いた場合の擬似スペックルパターンｂ(x,y)を示す図である。図９（ｂ）は、図９（ａ）の擬似スペックルパターンｂ(x,y)の自己相関画像を示す図である。図１０は、図９（ｂ）の自己相関画像における強度プロファイルを示す図である。ｘ方向およびｙ方向それぞれの強度プロファイルは、互いに略一致しており、また、相関関数ｃ(r)＝exp(-r/3)とも略一致している。すなわち、擬似スペックルパターンｂ(x,y)の自己相関関数は、相関関数ｃと略一致している。

【００７５】

本実施形態の擬似スペックルパターン生成装置および擬似スペックルパターン生成方法では、２次元擬似乱数パターンａ(x,y)およびフィルタ関数Ｆ(u,v)に基づく強度または位相の変調分布を有する空間光変調器を用いて、擬似スペックルパターンｂ(x,y)を光学的に生成する。以下に、量子シミュレータ１００の擬似スペックルパターン生成装置１の第１～第４の実施形態について説明する。なお、図１には、擬似スペックルパターン生成装置１として、第４実施形態の擬似スペックルパターン生成装置１Ｄが示されている。

【００７６】

図１１は、第１実施形態の擬似スペックルパターン生成装置１Ａの構成を示す図である。擬似スペックルパターン生成装置１Ａは、制御部１０、光源１１、ビームエキスパンダ１２および空間光変調器１３を備え、空間光変調器１３の出力面に擬似スペックルパターンｂ(x,y)を出力する。

【００７７】

光源１１は、光を出力する。光源１１として、例えば、レーザ光源、ランプ光源、ＳＬＤ（SuperluminescentDiode）光源等が用いられる。ビームエキスパンダ１２は、光源１１と光学的に接続され、光源１１から出力される光のビーム径を拡大して出力する。このとき、ビームエキスパンダ１２から出力される光は、ビーム断面において強度が均一化されるのが好ましい。

【００７８】

空間光変調器１３は、強度変調型のものであって、ステップＳ３２またはＳ６１で生成される擬似スペックルパターンｂ(x,y)に基づく強度の変調分布を有する。空間光変調器１３として、例えば、変調媒体が液晶である変調器や、デジタルミラーデバイス（ＤＭＤ）が用いられる。空間光変調器１３は、ビームエキスパンダ１２と光学的に接続され、光源１１から出力されてビームエキスパンダ１２によりビーム径を拡大された光を入力し、その入力した光を変調分布に応じて空間的に変調して、その変調後の光を出力する。

【００７９】

このようにして空間光変調器１３の出力面に生成される擬似スペックルパターンｂ(x,y)は、２次元擬似乱数パターンａ(x,y)の統計分布に応じた光強度統計分布を有するとともに、相関関数ｃ(x,y)に応じた空間構造を有する。

【００８０】

制御部１０は、空間光変調器１３と電気的に接続され、２次元擬似乱数パターンａ(x,y)および相関関数ｃ(x,y)から計算される擬似スペックルパターンｂ(x,y)に基づく強度変調分布を空間光変調器１３に設定する。

【００８１】

制御部１０は、例えばコンピュータにより構成され、空間光変調器１３と電気的に接続されて通信を行う通信部を備える他、演算部、記憶部、入力部および表示部を備える。演算部は、ＣＰＵまたはＤＳＰ等を含み、２次元擬似乱数パターンａ(x,y)や相関関数ｃ(x,y)の生成、フーリエ変換、平方根計算、乗算、畳み込み積分、自己相関関数の演算、強度統計分布の算出等を行う。記憶部は、例えばハードディスクまたはメモリなどを含み、２次元擬似乱数パターンａ(x,y)や相関関数ｃ(x,y)の生成条件や各パターンの演算結果等を記憶する。入力部は、例えばキーボードまたはポインティングデバイスなどを含み、上記生成条件等の入力を受け付ける。表示部は、例えば液晶ディスプレイを含み、ａ(x,y)、Ａ(u,v)、ｃ(x,y)、Ｃ(u,v)、Ｆ(u,v)、ｆ(x,y)、Ｂ(u,v)およびｂ(x,y)等の各パターンを表示する。

【００８２】

本実施形態では、２次元擬似乱数パターンａ(x,y)および相関関数ｃ(x,y)から計算される擬似スペックルパターンｂ(x,y)に基づいて空間光変調器１３の強度変調分布を設定するので、生成される擬似スペックルパターンｂ(x,y)の空間構造または光強度統計分布の設定の自由度が高い。生成すべき擬似スペックルパターンｂ(x,y)の光強度統計分布に応じた統計分布を有する２次元擬似乱数パターンａ(x,y)、および、生成すべき擬似スペックルパターンｂ(x,y)の自己相関関数に応じた相関関数ｃ(x,y)を用いて、これらから計算される擬似スペックルパターンｂ(x,y)に基づいて空間光変調器１３の強度変調分布を設定することにより、所望の光強度統計分布および所望の空間構造を有する擬似スペックルパターンｂ(x,y)を生成することができる。

【００８３】

本実施形態の擬似スペックルパターン生成装置または擬似スペックルパターン生成方法では、生成される擬似スペックルパターンｂ(x,y)の空間構造または光強度統計分布の設定の自由度が高い。加えて、擬似スペックルパターンｂ(x,y)の空間構造または光強度統計分布を、制御部１０により、再現性よく設定することができ、迅速に設定を変更することができる。本実施形態の擬似スペックルパターン生成装置または擬似スペックルパターン生成方法は、計測対象や光操作対象に適した擬似スペックルパターンｂ(x,y)を生成することができ、様々な検証方法に有効な計測技術や光操作技術において好適に用いることができる。また、本実施形態の擬似スペックルパターン生成装置または擬似スペックルパターン生成方法は、擬似スペックルパターンを構造化照明として用いる場合に、輝度が高く明るい擬似スペックルパターンを生成することもできるので、照明回数を少なくして、高感度で短時間の照明が可能となる。

【００８４】

本実施形態により所望の空間構造および光強度統計分布を有する擬似スペックルパターンｂ(x,y)を生成することができることは、次のようにして確認することができる。すなわち、空間光変調器１３の出力面に生成された擬似スペックルパターンｂ(x,y)をカメラにより撮像する。そして、制御部１０により、撮像により得られた擬似スペックルパターンｂ(x,y)の自己相関関数を求めて、これを相関関数ｃ(x,y)と比較する。また、制御部１０により、撮像により得られた擬似スペックルパターンｂ(x,y)の光強度統計分布を求めて、これを２次元擬似乱数パターンａ(x,y)の統計分布と比較する。

【００８５】

図１２は、第２実施形態の擬似スペックルパターン生成装置１Ｂの構成を示す図である。擬似スペックルパターン生成装置１Ｂは、制御部１０、光源１１、ビームエキスパンダ１２、空間光変調器１３およびレンズ１４ａ，１４ｂを備え、光パターン生成面Ｐに擬似スペックルパターンｂ(x,y)を生成する。図１１に示された第１実施形態の擬似スペックルパターン生成装置１Ａの構成と比較すると、この図１２に示される第２実施形態の擬似スペックルパターン生成装置１Ｂは、レンズ１４ａ，１４ｂを更に備える点で相違する。

【００８６】

空間光変調器１３から光パターン生成面Ｐに至るまでの光学系は４ｆ結像光学系を構成している。レンズ１４ａ，１４ｂは、空間光変調器１３から出力される光を入力して擬似

スペックルパターンｂ(x,y)を光パターン生成面Ｐに結像する。このようにレンズ１４ａ，１４ｂからなる結像光学系を用いることで、空間光変調器１３の出力面と異なる位置にある光パターン生成面Ｐに擬似スペックルパターンｂ(x,y)を生成することができる。

【００８７】

図１３は、第３実施形態の擬似スペックルパターン生成装置１Ｃの構成を示す図である。擬似スペックルパターン生成装置１Ｃは、制御部１０、光源１１、ビームエキスパンダ１２、位相変調型の空間光変調器１７、偏光板１８，１９およびレンズ１４ａ，１４ｂを備え、光パターン生成面Ｐに擬似スペックルパターンｂ(x,y)を生成する。図１２に示された第２実施形態の擬似スペックルパターン生成装置１Ｂの構成と比較すると、この図１３に示される第３実施形態の擬似スペックルパターン生成装置１Ｃは、強度変調型の空間光変調器１３に替えて位相変調型の空間光変調器１７および偏光板１８，１９を備える点で相違する。位相変調型の空間光変調器１７は、例えば、変調媒体が液晶である変調器が用いられる。

【００８８】

位相変調型の空間光変調器１７を挟んで偏光板１８および偏光板１９が設けられている。一般に変調媒質が液晶である空間光変調器１７は特定の配向方向の液晶分子を有する。偏光板１８，１９は、この液晶分子の配向方向に対して相対的に４５°の角度である偏光方向となるよう配置される。偏光板１８，１９それぞれの偏光方向は、互いに平行であってもよいし、互いに垂直であってもよい。このように位相変調型の空間光変調器１７および偏光板１８，１９が配置されることで、これらは実質的に強度変調型の空間光変調器１３Ｃとして機能する。制御部１０は、空間光変調器１３Ｃ（これを構成する空間光変調器１７）と電気的に接続され、空間光変調器１３Ｃの強度変調分布（空間光変調器１７の位相変調分布）を設定する。

【００８９】

なお、擬似スペックルパターン生成装置１Ｂ，１Ｃにおいて、擬似スペックルパターンｂ(x,y)が生成される光パターン生成面Ｐは、レンズ１４ｂの後焦点面であってもよいが、その後焦点面と異なる面とすることもできる。例えば、強度変調分布にフレネルレンズパターンを加えたパターンを空間光変調器１３，１３Ｃに設定することにより、レンズ１４ｂの後焦点面と異なる位置にある光パターン生成面Ｐに擬似スペックルパターンｂ(x,y)を生成することができる。

【００９０】

図１４は、第４実施形態の擬似スペックルパターン生成装置１Ｄの構成を示す図である。擬似スペックルパターン生成装置１Ｄは、制御部１０、光源１１、ビームエキスパンダ１２、空間光変調器１５およびレンズ１６を備え、光パターン生成面Ｐに擬似スペックルパターンｂ(x,y)を生成する。

【００９１】

空間光変調器１５は、位相変調型のものであって、ステップＳ３２またはＳ６１で生成される擬似スペックルパターンｂ(x,y)に基づく位相の変調分布を有する。位相変調型の空間光変調器１５は、例えば、変調媒体が液晶である変調器が用いられる。空間光変調器１５は、ビームエキスパンダ１２と光学的に接続され、光源１１から出力されてビームエキスパンダ１２によりビーム径を拡大された光を入力し、その入力した光を変調分布に応じて空間的に変調して、その変調後の光を出力する。レンズ１６は、空間光変調器１５から出力された光を入力して擬似スペックルパターンｂ(x,y)を光パターン生成面Ｐに再生する再生光学系である。

【００９２】

制御部１０は、２次元擬似乱数パターンａ(x,y)および相関関数ｃ(x,y)に基づいて得られる計算機ホログラムを空間光変調器１５の変調分布として設定する。空間光変調器１５に設定される位相変調分布は、空間光変調器１５から出力された光をレンズ１６（再生光学系）により光パターン生成面Ｐに擬似スペックルパターンｂ(x,y)として再生することができるような計算機ホログラムである。制御部１０は、反復フーリエ変換法を用いて、

擬似スペックルパターンｂ(x,y)を再生像とする計算機ホログラムを生成し、この計算機ホログラムを空間光変調器１５に設定する。

【００９３】

なお、図１４では空間光変調器１５として透過型のものが示されているが、図１に示されるように反射型の空間光変調器が用いられてもよい。

【００９４】

図１５は、第４実施形態の擬似スペックルパターン生成装置１Ｄの空間光変調器１５に設定される計算機ホログラムの一例を示す図である。この図では、位相変調の大きさを濃淡で示している。ここでは、統計分布が正規分布に従う２次元擬似乱数パターンａ(x,y)と相関関数ｃ(x,y)＝exp(-r/9)とを用いて擬似スペックルパターンｂ(x,y)を計算し、この擬似スペックルパターンｂ(x,y)に基づいて計算機ホログラムを求めた。図１６（ａ）は、第４実施形態の擬似スペックルパターン生成装置１Ｄの空間光変調器１５に図１５の計算機ホログラムを位相変調分布として設定したときに光パターン生成面Ｐに再生される擬似スペックルパターンｂ(x,y)を示す図である。図１６（ｂ）は、図１６（ａ）の擬似スペックルパターンｂ(x,y)の光強度統計分布（輝度ヒストグラム）を示す図である。再生された擬似スペックルパターンｂ(x,y)の光強度統計分布は、２次元擬似乱数パターンａ(x,y)の統計分布と同様に正規分布であることが確認できる。

【００９５】

本実施形態の量子シミュレータ１００および量子シミュレーション方法は、このような構成を有する擬似スペックルパターン生成装置１，１Ａ～１Ｄを用いることで、所望の空間構造または光強度統計分布を有する擬似スペックルパターンを主真空槽２の内部に生成することができ、主真空槽２の内部の原子に対して様々な操作をすることができるので、対象の特徴をよく表す好適なモデルを容易に構築することができる。加えて、擬似スペックルパターンを再現性よく生成することができるので、常時同条件の無秩序性を実験的に繰り返すことや、多様な無秩序性を実験的に比較することで、無秩序性の影響に対する評価精度を高めることができる。

【００９６】

なお、上記の実施形態では擬似乱数パターンおよび擬似スペックルパターンは２次元であるとしたが、本発明では擬似乱数パターンおよび擬似スペックルパターンは１次元または３次元であってもよい。

【符号の説明】

【００９７】

１，１Ａ～１Ｄ…擬似スペックルパターン生成装置、１０…制御部、１１…光源、１２…ビームエキスパンダ、１３…空間光変調器、１４ａ，１４ｂ…レンズ（結像光学系）、１５…空間光変調器、１６…レンズ（再生光学系）、１７…空間光変調器、１８，１９…偏光板、

２…主真空槽（チャンバー）、２１…第１窓部（窓部）、２２…第２窓部（窓部）、２３…排気用開口、２４…原子ガス導入用開口、

３…原子ガス供給装置、

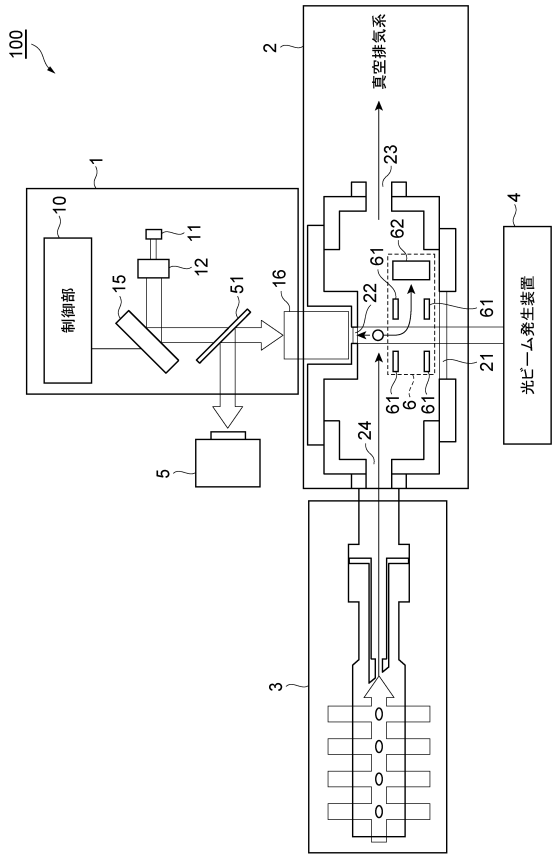
４…光ビーム発生装置、

５…光検出装置、５１…ダイクロイックミラー、

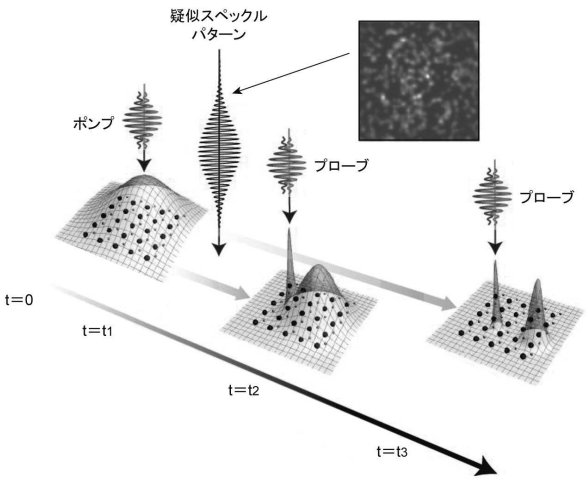
６…原子数検出装置、６１…イオン化電極、６２…イオン検出器、

１００…量子シミュレータ。

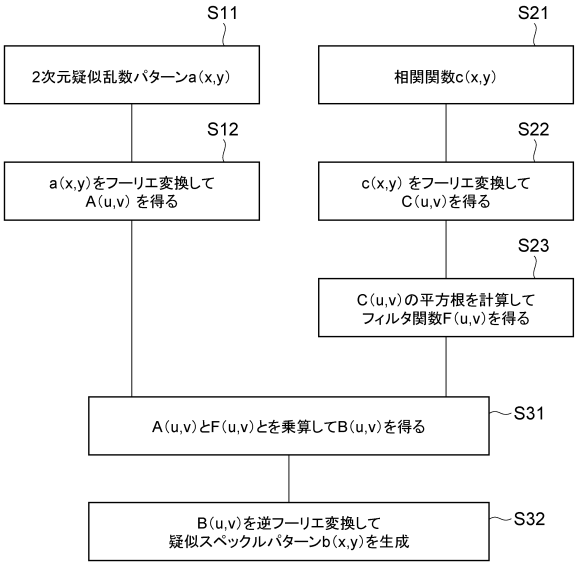
【図１】


100
2
真空排気系
23
1
10
制御部
11
12
15
51
16
62
61
22
O
61
21
4
光ビーム発生装置
61
6
61
24
5
3

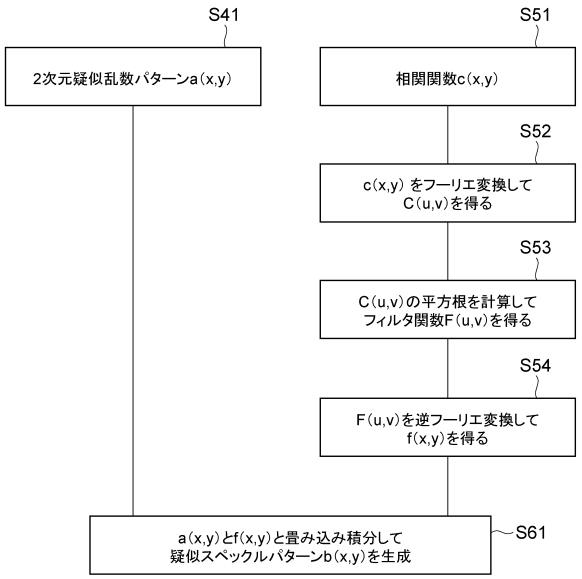
【図２】


疑似スペックル
パターン
ポンプ
プローブ
プローブ
t=0
t=t1
t=t2
t=t3

【図３】


S11
2次元疑似乱数パターンa(x,y)
S12
a(x,y)をフーリエ変換して
A(u,v) を得る
S21
相関関数c(x,y)
S22
c(x,y) をフーリエ変換して
C(u,v)を得る
S23
C(u,v)の平方根を計算して
フィルタ関数F(u,v)を得る
S31
A(u,v)とF(u,v)とを乗算してB(u,v)を得る
S32
B(u,v)を逆フーリエ変換して
疑似スペックルパターンb(x,y)を生成

【図４】


S41
2次元疑似乱数パターンa(x,y)
S51
相関関数c(x,y)
S52
c(x,y) をフーリエ変換して
C(u,v)を得る
S53
C(u,v)の平方根を計算して
フィルタ関数F(u,v)を得る
S54
F(u,v)を逆フーリエ変換して
f(x,y)を得る
S61
a(x,y)とf(x,y)と畳み込み積分して
疑似スペックルパターンb(x,y)を生成

【図５】

相関関数c(r)	パラメータ範囲	フィルタ関数F(k)
$(r/\eta)^{\alpha}e^{-r/\xi}$	$\alpha > -2$	$\xi\left(\sqrt{\frac{\xi}{\eta}}\right)^{\alpha}\sqrt{\Gamma(\alpha+2)\,F\left(\frac{\alpha+2}{2},\frac{\alpha+3}{2};1;-\xi^2k^2\right)}$
$e^{-r/\xi}$	–	$\xi(1+\xi^2k^2)^{-3/4}$
$e^{-r/\xi}/r$	–	$\sqrt{\xi}(1+\xi^2k^2)^{-1/4}$
$(r/\eta)^{\alpha}$	$-2 < \alpha < -\frac{1}{2}$	$\left(\frac{\sqrt{2}}{\eta}\right)^{\alpha}\sqrt{(-\alpha)\Gamma\left(1+\frac{\alpha}{2}\right)/\Gamma\left(1-\frac{\alpha}{2}\right)}\frac{1}{k^{1+\alpha/2}}$
e^{-r^2/ξ^2}	–	$\left(\xi/\sqrt{2}\right)e^{-\xi^2k^2/8}$
$(r^2+\xi^2)^{\alpha}$	$\alpha < -\frac{1}{4}$	$\left(\sqrt{2\xi/k}\right)^{\alpha+1}\sqrt{K_{\alpha+1}/\Gamma(-\alpha)}$
$\frac{e^{-\sqrt{r^2+\eta^2}/\xi}}{\sqrt{r^2+\eta^2}}$	–	$\sqrt{\xi}\exp\left(-\frac{\eta}{2\xi}\sqrt{1+k^2\xi^2}\right)(1+\eta^2\xi^2)^{-1/4}$

ただし、

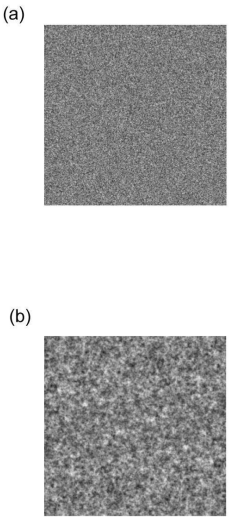
$\Gamma(z)$　ガンマ関数

$F(a,b;c;z)$　Gaussの超幾何関数

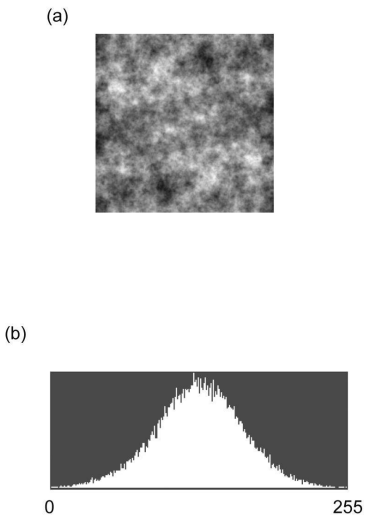
$$F(a,b;c;z)=\frac{\Gamma(c)}{\Gamma(a)\Gamma(b)}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{\Gamma(a+n)\Gamma(b+n)}{\Gamma(c+n)}\frac{z^n}{n!}$$

$K_n(z)$　η 次の「第二種の変形されたBessel関数」

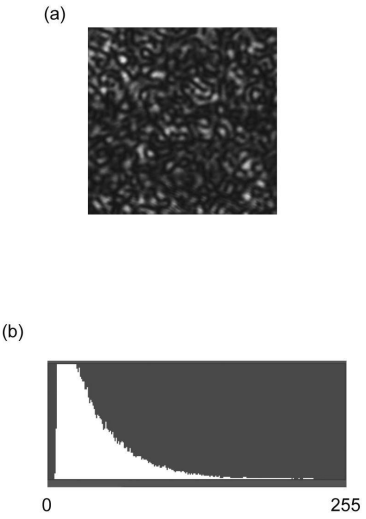
【図６】



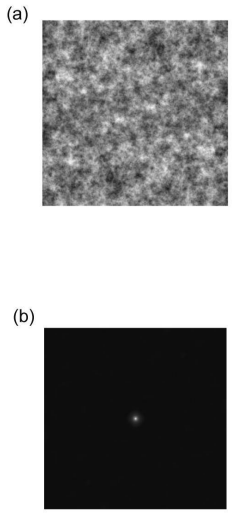
【図７】



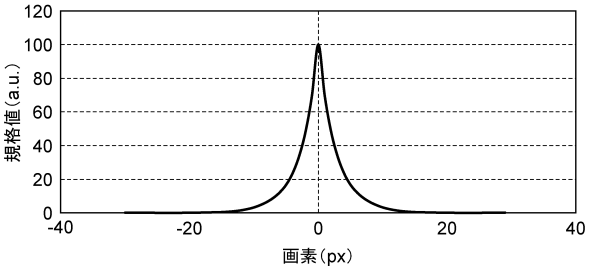
【図８】



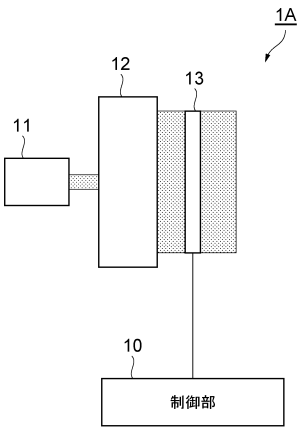
【図９】



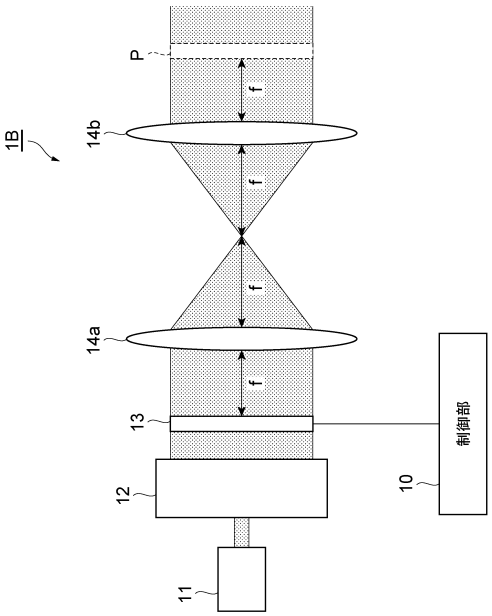
【図１０】



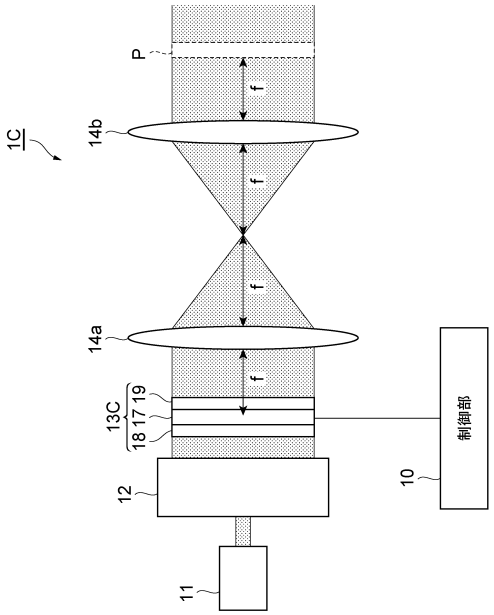
【図１１】



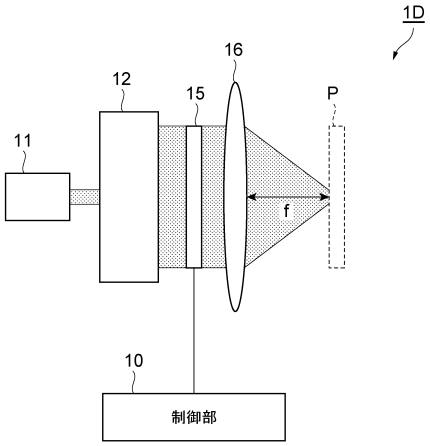
【図１２】



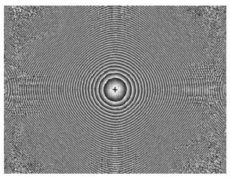
【図１３】



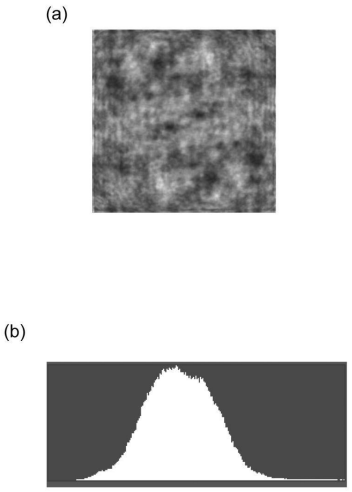
【図１４】



【図１５】



【図１６】



フロントページの続き

(72)発明者　酒井　寛人
静岡県浜松市東区市野町１１２６番地の１　浜松ホトニクス株式会社内
(72)発明者　大森　賢治
愛知県岡崎市明大寺町字西郷中３８番地　大学共同利用機関法人自然科学研究機構　分子科学研究所内
(72)発明者　安藤　太郎
静岡県浜松市東区市野町１１２６番地の１　浜松ホトニクス株式会社内
(72)発明者　武井　宣幸
愛知県岡崎市明大寺町字西郷中３８番地　大学共同利用機関法人自然科学研究機構　分子科学研究所内
(72)発明者　豊田　晴義
静岡県浜松市東区市野町１１２６番地の１　浜松ホトニクス株式会社内
(72)発明者　大竹　良幸
静岡県浜松市東区市野町１１２６番地の１　浜松ホトニクス株式会社内
(72)発明者　兵土　知子
静岡県浜松市東区市野町１１２６番地の１　浜松ホトニクス株式会社内
(72)発明者　瀧口　優
静岡県浜松市東区市野町１１２６番地の１　浜松ホトニクス株式会社内

審査官　堀部　修平

(56)参考文献　特開２００５－２５００３８（ＪＰ，Ａ）
特開２００２－２０７２０２（ＪＰ，Ａ）
特開昭６４－０４４８８２（ＪＰ，Ａ）
特開平０８－１６１０００（ＪＰ，Ａ）
米国特許出願公開第２００４／０１７４６００（ＵＳ，Ａ１）
中国特許出願公開第１４１４４２４（ＣＮ，Ａ）
特開２００６－０７１４９２（ＪＰ，Ａ）
M. Robert-de-Saint-Vincent et al., Anisotropic 2D Diffusive Expansion of Ultracold Atoms in a Disordered Potential, Phys. Rev. Lett., 米国, APS, ２０１０年　6月　2日, Vol. 104, No. 22, 220602-1 - 220602-4
武田俊太郎, 外７名, 超高速量子シミュレーターの実現に向けた 87Rb 原子のunit filling モット絶縁体の生成, 日本物理学会 第72 回年次大会（2017 年）概要集, 日本, ２０１７年　3月１７日, 19pB22-10

(58)調査した分野(Int.Cl., ＤＢ名)
Ｇ０２Ｆ　　１／００－１／１２５, １／２１－７／００
Ｇ０３Ｈ　　１／００－５／００
Ｇ０１Ｎ　２１／００－２１／０１, ２１／１７－２１／７４
ＪＤｒｅａｍＩＩＩ
ＩＥＥＥ　Ｘｐｌｏｒｅ