

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5220420号  
(P5220420)

(45) 発行日 平成25年6月26日 (2013. 6. 26)

(24) 登録日 平成25年3月15日 (2013. 3. 15)

(51) Int. Cl.	F I
GO 1 J 3/36 (2006. 01)	GO 1 J 3/36
GO 1 J 3/18 (2006. 01)	GO 1 J 3/18
GO 1 J 3/14 (2006. 01)	GO 1 J 3/14

請求項の数 21 (全 25 頁)

(21) 出願番号	特願2007-552223 (P2007-552223)	(73) 特許権者	507244080
(86) (22) 出願日	平成18年1月19日 (2006. 1. 19)		オプトボ インコーポレイテッド ディー
(65) 公表番号	特表2008-527393 (P2008-527393A)		/ビー/エイ センティス コーポレイシ
(43) 公表日	平成20年7月24日 (2008. 7. 24)		ョン
(86) 国際出願番号	PCT/US2006/001685		アメリカ合衆国、ノース カロライナ州
(87) 国際公開番号	W02006/078687		27560、モリスビル、スイート 10
(87) 国際公開日	平成18年7月27日 (2006. 7. 27)		00、サウスポート ドライブ 215
審査請求日	平成21年1月19日 (2009. 1. 19)	(73) 特許権者	507189666
(31) 優先権主張番号	60/644, 522		デューク ユニバーシティ
(32) 優先日	平成17年1月19日 (2005. 1. 19)		アメリカ合衆国 ノースカロライナ州 2
(33) 優先権主張国	米国 (US)		7705, ダラム, アーウィン ロード
(31) 優先権主張番号	60/705, 173		2812 スイート 306
(32) 優先日	平成17年8月4日 (2005. 8. 4)	(74) 代理人	100108604
(33) 優先権主張国	米国 (US)		弁理士 村松 義人

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 静的マルチモードマルチブレックス分光法のための静的2次元符号化アパーチャ

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

静的マルチモードマルチブレックス分光器であって、

発生源放射が入射するものであり、透過要素と不透過要素がその各列が内積変換で独立とされた符号化行列として数学的に表現された伝達関数に従って配置されている、2次元独立列コードマスクと、

前記2次元独立列コードマスクを透過した発生源放射がそれに入射したときに前記2次元独立列コードマスクの像の波長依存空間シフトを生じさせるようにされており、前記2次元独立列コードマスクと位置合わせされた分散素子と、

前記分散素子からの発生源放射が入射するようにされているとともに、行検出素子と列検出素子とを有し、前記行検出素子と前記列検出素子は、前記2次元独立列コードマスクの前記波長依存空間シフトの像を光強度値に一度に変換するようにされている、前記分散素子と位置合わせされた2次元検出アレイと、

前記発生源放射のスペクトル密度の数学的表現であるスペクトル行列を作成するために、前記光強度値をデータ行列に記憶し、前記符号化行列を使用して前記データ行列の変換を実行する処理ユニットと、

を有する静的マルチモードマルチブレックス分光器。

【請求項 2】

前記符号化行列はアダマール行列である、

請求項 1 に記載の静的マルチモードマルチブレックス分光器。

10

20

## 【請求項 3】

前記符号化行列は S 行列である、  
請求項 1 に記載の静的マルチモードマルチプレックス分光器。

## 【請求項 4】

前記符号化行列は、ランダムシーケンス、擬似ランダムシーケンスおよび完全シーケンスのうちの 1 つを使用する略直交列からなる、  
請求項 1 に記載の静的マルチモードマルチプレックス分光器。

## 【請求項 5】

前記符号化行列は、調和関数および部分波関数のうちの 1 つを有する連続的な直交関数族から形成される、  
請求項 1 に記載の静的マルチモードマルチプレックス分光器。

10

## 【請求項 6】

前記符号化行列は連続的な直交関数族から形成される、  
請求項 1 に記載の静的マルチモードマルチプレックス分光器。

## 【請求項 7】

前記分散素子は、グレーティング、ホログラフィックグレーティングおよびプリズムの 1 つ以上である、  
請求項 1 に記載の静的マルチモードマルチプレックス分光器。

## 【請求項 8】

前記 2 次元検出アレイ は、2 次元電荷結合素子、能動ピクセル光検出アレイ、マイクロボロメータアレイまたはフォトダイオードアレイである、  
請求項 1 に記載の静的マルチモードマルチプレックス分光器。

20

## 【請求項 9】

前記処理ユニットは、コンピュータ、マイクロプロセッサおよび特定用途向け回路の 1 つ以上である、  
請求項 1 に記載の静的マルチモードマルチプレックス分光器。

## 【請求項 10】

前記処理ユニットは、前記 2 次元検出アレイ への前記スペクトルのスペクトル線湾曲および非線形分散を補正するために、デジタル補償法を使用するようになっている、  
請求項 1 に記載の静的マルチモードマルチプレックス分光器。

30

## 【請求項 11】

前記 平均スペクトル密度 を得る代わりに、発生源放射スペクトル密度の 1 次元空間像を得ることに使用可能とされている、  
請求項 1 に記載の静的マルチモードマルチプレックス分光器。

## 【請求項 12】

前記発生源放射スペクトル密度の三次元像は、発生源を 光軸周りに回転させる、前記静的マルチモードマルチプレックス分光器を 光軸周りに回転させる、の 1 つ以上によって形成される、  
請求項 1 に記載の静的マルチモードマルチプレックス分光器。

40

## 【請求項 13】

静的マルチモードマルチプレックス分光器であって、  
発生源放射が入射するものであり、透過要素と不透過要素がその各列が内積変換で独立とされた符号化行列として数学的に表現された伝達関数に従って配置されている、2 次元独立列コードマスクと、

前記 2 次元独立列コードマスクを透過した発生源放射がそれに入射したときに前記 2 次元独立列コードマスクの像の波長依存空間シフトを生じさせるようにされており、前記 2 次元独立列コードマスクと位置合わせされた分散素子と、

前記発生源放射の不均一なスペクトル密度を少なくとも一方向に均一なスペクトル密度に変換するものとされているとともに、前記発生源放射と前記 2 次元独立列コードマスクとの間に配置された光学系と、

50

前記分散素子からの発生源放射が入射するようにされているとともに、行検出素子と列検出素子を有し、前記行検出素子と前記列検出素子は、前記 2 次元独立列コードマスクの前記波長依存空間シフトの像を光強度値に一度に変換するようにされている、前記分散素子と位置合わせされた 2 次元検出アレイと、

前記発生源放射のスペクトル密度の数学的表現であるスペクトル行列を作成するために、前記光強度値をデータ行列に記憶し、前記符号化行列を使用して前記データ行列の変換を実行する処理ユニットと、

を有する静的マルチモードマルチプレックス分光器。

【請求項 14】

空間的に不均一な発生源を空間的に均一な発生源に変換するために、前記発生源と前記 2 次元独立列コードマスクとの間にフーリエ変換レンズが配置されている、

請求項 13 に記載の静的マルチモードマルチプレックス分光器。

【請求項 15】

前記 2 次元独立列コードマスクの均一な照射のために、前記発生源と前記 2 次元独立列コードマスクとの間にピントガラス拡散体が配置されている、

請求項 13 に記載の静的マルチモードマルチプレックス分光器。

【請求項 16】

前記発生源と前記 2 次元独立列コードマスクとの間に配置されたマルチモードバンドルが、均一な照射を発生させるようになっている、

請求項 13 に記載の静的マルチモードマルチプレックス分光器。

【請求項 17】

静的マルチモードマルチプレックス分光器であって、

発生源放射が入射するものであり、透過要素と不透過要素がその各列が内積変換で独立とされた符号化行列として数学的に表現された伝達関数に従って配置されているとともに、特定の次数の離散的行列によって記述された符号化を実装するためにリソグラフィによってエッチングされた一連のアパーチャから構成されている、2 次元独立列コードマスクと、

前記 2 次元独立列コードマスクを透過した発生源放射がそれに入射したときに前記 2 次元独立列コードマスクの像の波長依存空間シフトを生じさせるようにされており、前記 2 次元独立列コードマスクと位置合わせされた分散素子と、

前記分散素子からの発生源放射が入射するようにされているとともに、行検出素子と列検出素子を有し、前記行検出素子と前記列検出素子は、前記 2 次元独立列コードマスクの前記波長依存空間シフトの像を光強度値に一度に変換するようにされている、前記分散素子と位置合わせされた 2 次元検出アレイと、

前記発生源放射のスペクトル密度の数学的表現であるスペクトル行列を作成するために、前記光強度値をデータ行列に記憶し、前記符号化行列を使用して前記データ行列の変換を実行する処理ユニットと、

を有する静的マルチモードマルチプレックス分光器。

【請求項 18】

アダマール行列の値 - 1 を有する前記 2 次元独立列コードマスクは、行 2 倍化アダマール行列によって実現されている、

請求項 17 に記載の静的マルチモードマルチプレックス分光器。

【請求項 19】

前記 2 次元独立列コードマスクは、独立列コードの族によって定義されるグレースケールパターンを実装するために連続トーンマスクをハーフトーンマスクに変換することによって作製されたものである、

請求項 17 に記載の静的マルチモードマルチプレックス分光器。

【請求項 20】

前記 2 次元独立列コードマスクの透過要素および不透過要素は、前記分光器が、さまざまな変換、ならびに前記発生源放射の特性に理想的に一致できるようにするアパーチャサ

10

20

30

40

50

イズ範囲を提供できるようにするために、電気的手段、光学的手段または機械的手段によって自動的に、または手動で再構成可能とされている、

請求項 17 に記載の静的マルチモードマルチブレックス分光器。

【請求項 21】

前記 2 次元独立列コードマスクの透過要素および不透過要素の再構築は、前記 2 次元独立列コードマスク上の前記発生源の異なる照射パターンに対応するために、前記アパーチャのうちの選択された部分のみを再構築するものとされている、

請求項 19 に記載の静的マルチモードマルチブレックス分光器。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

10

【0001】

本願は、2005 年 1 月 19 日出願の米国仮特許出願第 60 / 644,522 号 (522 号出願) ならびに 2005 年 8 月 4 日出願の米国仮特許出願第 60 / 705,173 号 (173 号出願) の出願日の権利を主張する。この 2 つは、参照によりここにその全体を援用する。

【0002】

本発明の実施形態は、符号化アパーチャ分光法 (aperture-coded spectroscopy) に関する。より詳細には、本発明の実施形態は、静的マルチモードマルチブレックス分光器を使用して、平行測定の一つの時間ステップにおいて、拡散源の平均スペクトル密度を推定するためのシステムおよび方法に関する。

20

【背景技術】

【0003】

拡散源は、高度に空間的にマルチモードの光フィールドをその性質上発生する、発生源である。最も単純にいうと、これは、角度方向に延在する放射パターンで、空間的に延在する発生源である。一定ラジアンスの定理 (constant radiance theorem) により、このような発生源のキャラクタリゼーションは複雑となる。簡単にいうと、エントロピーを考慮すると、発生源のモード体積を、モード体積の減少に伴うパワーの減少を生じずに減らすことはできない。その結果、拡散源の輝度を上げることができない。

【0004】

従来の分光器は、狭帯域空間フィルタリング (narrowband spatial filtering) を利用して、フィールドの空間モードとスペクトルモードを明瞭化するものであり、このことは、特に分光法の場合、不利である。分散要素 (dispersive element) は、入力スリットの像の波長に依存するシフトを発生させる。各スペクトルチャンネルが一意的シフトに対応しなければならないため、分解素子 (resolution element) のスペクトル幅はスリット幅に正比例する。

30

【0005】

この関係は、拡散源分光法にとって課題となっている。適切なスペクトル分解能を得るには、分光器に対する入力スリットを狭くしなければならない。しかし、発生源が拡散型であるため、スリットを介して放射フィールドに合焦させることができない。逆に、わずかな光のみしか機器に入射することができない。発生源が拡散型であるとともに微弱である場合、機器は光子不足に陥ることがあり、そのためスペクトル測定が不可能となる場合がある。

40

【0006】

光学機器のスループット (時にエタンデュ (光学不変量) とも呼ばれる) は、入力アパーチャの面積と機器が光を受容する立体角との積として近似することができる。受容立体角は、機器内部の光学部品によって決まる。所定の光学構成について、システムのエタンデュを上げる唯一の方法は、入力アパーチャのサイズを上げることである。しかし、このような手法は、スループットを上げるため、分光器の解像度を低下させる。

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

50

## 【 0 0 0 7 】

したがって、拡散源分光法の2つの主要な課題は、スペクトル分解能を犠牲にすることなく分光器のスループットを最大化することと、所定のシステムスループットおよび検出ノイズに対して、推定されたスペクトルの信号対雑音比 ( S N R ) を最大化することにある。

## 【 0 0 0 8 】

この2つの課題は長い間にわたり研究されており、この一方または両方に対処するために多くの設計が提案されてきた。第1の課題を解決する設計は、ジャッキーノ (または広面積またはスループット) 利得を有すると言われている。第2の課題を解決する設計はフェルゲット (またはマルチブレックス) 利得を有すると言われている。

10

## 【 0 0 0 9 】

これらの課題を解決するための最も初期の手法は、符号化アパーチャ符号化アパーチャ分光法によるものであり、この手法では、入力スリットの代わりに、より複雑なパターンの開口が使用される。最初の符号化アパーチャ分光器は、1950年代はじめに作製された。その後数十年にわたって急速な進歩が行われた。数学的処理が高度化したことで、アダマール (Hadamard) 行列に基づくアパーチャの利点が明らかとなり、符号化アパーチャ分光器の多くがアダマール変換 ( H T ) 分光器となった。しかし、H T 分光器の発展の大半にわたり、H T 分光器は、単チャネル検出器あるいは離散型検出器の少数のアレイしか備えていなかった。その結果、大部分の設計は、少なくとも2つの符号化アパーチャ (入力面に1つと出力面に1つ) を備えていた。更に、この設計では、通常、あるマスクに対して別のマスクを移動させる必要があった。そのようにして得られた機器のほとんどは、ジャッキーノ利得あるいはフェルゲット利得のみしか示さなかった。

20

## 【 0 0 1 0 】

符号化アパーチャ分光器では、強度情報を周波数またはスペクトル情報に変換するために符号化アパーチャまたはマスクを使用する。符号化アパーチャ画像分光器の基本要素は、例えばメンデおよびクラフリン (Mende and Claflin) の米国特許第5,627,639号 (639号特許) に記載されている。ターゲット上の複数位置からの光がマスクに入射する。マスクは、透過要素と不透過要素の両方の行および列を含んでいる。透過要素と不透過要素は、入射光の強度情報をスペクトル情報に変換するために使用する伝達関数にしたがって、マスクに配置されている。透過要素は入射光を透過させ、不透過要素は入射光をブロックする。透過光の波長にしたがって、透過要素からの透過光を線形空間関係で分散させるためにグレーティングが使用される。分散光は検出アレイに入射する。検出アレイは、検出素子の行および列を含んでいる。検出アレイ要素は、マスクの各透過要素から、異なる範囲の波長を受け取り、受け取った光強度を表す信号を供給するように設計されている。

30

## 【 0 0 1 1 】

639号特許では、マスクが、時間とともに、ターゲットに対して一方向に移動される。マスクが移動すると、データ行列が生成される。同じターゲット要素から入射する光が、マスクの対応する行を通過するため、このデータ行列は、検出アレイの各行からの光強度のデータを含んでいる。検出素子の行と列によって記録された強度が経時的に収集され、ターゲット要素の各組についてデータ行列にまとめられる。

40

## 【 0 0 1 2 】

伝達関数に従ってデータ行列を変換することによって、ターゲット要素の各組について周波数スペクトルが得られる。639号特許では、マスク要素の数学的表現からパターン行列が事前に決定される。マスクの透過要素はパターンマスクで「1」で表され、マスクの不透過要素はパターンマスクで「0」で表される。データ行列に逆パターン行列を乗算したものと、透過要素の数とマスク要素の総数との関数である係数 ( factor ) によって、周波数スペクトルを表している周波数行列が得られる。

## 【 0 0 1 3 】

符号化アパーチャ分光法は、Golay, M. J. E. (1951), "Static multislit spectromet

50

ry and its application to the panoramic display of infrared spectra." Journal of the Optical Society of America 41(7): 468-472で提案された。分光法のための2次元符号化アパーチャは、例えば、Girard, A. (1960), "Nouveaux dispositifs de spectroscopie a grande luminosite," Optica Acta 7(1): 81 - 97に記載されているように、1950年代後半と1960年代はじめに開発された。

#### 【0014】

符号化アパーチャ分光法の最初の40年の間、符号化アパーチャ分光法用の機器は、1つの光検出器素子または離散型検出器の少数のアレイに限られていた。1つの検出器を信頼するには、スペクトルデータを読み出すために、機械的変調、電気光学的変調、液晶または他の形での変調を必要とした。これらの初期の符号化アパーチャ機器は、入口および出口の両方の符号化アパーチャと、1つの検出素子または検出素子の対を使用して、スペクトル処理を実装していた。

#### 【0015】

例えば639号特許に記載されているように、高品質の2次元電子検出アレイが1990年代までに使用された。これらの高品質の2次元電子検出アレイが利用可能であるにも関わらず、例えば、Shlishevsky, V. B. (2002), "Methods of high-aperture grid spectroscopy," Journal Of Optical Technology 69(5): 342-353に記載されているように、2次元コード用の入口および出口の符号化アパーチャを組み合わせた符号化アパーチャ機器は現在も使用されている。

#### 【0016】

符号化アパーチャ分光法でのアダマールコードの使用は、Harwit, M. and N. J. A. Sloane (1979), Hadamard transform optics. New York, Academic Pressに詳細に記載されており、参照することによりその内容をここに援用する。639号特許は、マスクの各行の要素がアダマールパターンで配置され、マスクの各行がm個のシーケンスの異なる周期的な繰り返しを有する2次元アダマールコード設計、を開示している。入口および出口の両方の符号化アパーチャと、1つの検出素子または検出素子の対を使用する分光器のための、直交関数族を形成する適切に重み付けられた行と列のコードを有する2次元アダマールコードマスク設計が、F. A. Murzin, T. S. Murzina and V. B. Shlishevsky (1985), "New Grilles For Girard Spectrometers," Applied Optics 24 (21): 3625-3630に開示されている。

#### 【0017】

符号化アパーチャは、分光器の設計のこれらの問題を解決する唯一の手法でない。フーリエ変換(FT)分光器などの干渉分光器も、ジャッキーノ利得とフェルゲット利得を示すことができる。FT分光器は、実際、この両者を示す。しかし、FT分光器のほとんどは、機械式の走査要素を含んでいる。

#### 【0018】

上述の事情に鑑みて、スペクトル分解能を犠牲することなく分光器のスループットを最大化し、かつ所定のシステムスループットおよび検出ノイズに対して、推定されたスペクトルのSNRを最大化する、有利なシステムおよび方法が相当程度求められていることが理解されよう。

#### 【課題を解決するための手段】

#### 【0019】

符号化アパーチャ分光器のクラスが、拡散源のスペクトルのキャラクターゼーションのために最適化される。この分光器は、従来の分散型分光器におけるスリットの代わりに空間フィルタまたはマスクを用いることによって、高スループットと高空間的分解能を実現する。調和マスク、ルジャンドルマスク、およびアダマールマスクを含む多くのマスクを使用することができる。

#### 【0020】

一実施形態では、本発明は、静的マルチモードマルチプレックス分光器(MMS)である。このMMSは、発生源放射が入射するものであり、透過要素と不透過要素がその各列

10

20

30

40

50

が内積変換で独立とされた符号化行列として数学的に表現された伝達関数に従って配置されている、２次元直交列コードマスクを有する。このＭＭＳは、更に前記マスクを透過した発生源放射がそれに入射したときに前記マスクの像の波長依存空間シフトを生じさせるようにされており、前記符号化マスクと位置合わせされた分散素子を有する。このＭＭＳは更に、前記分散素子からの発生源放射が入射するようにされているとともに、行検出素子と列検出素子を有し、前記検出素子は、前記マスクの前記波長依存空間シフト像を光強度値に変換するようにされている、前記分散素子と位置合わせされた２次元検出アレイを有する。また、このＭＭＳは、前記発生源放射のスペクトル密度の数学的表現であるスペクトル行列を作成するために、前記値をデータ行列に記憶し、前記符号化行列を使用して前記データ行列の変換を実行する処理ユニットと、を有する。

10

【発明を実施するための最良の形態】

【００２１】

本発明の１つ以上の実施形態を詳細に説明するにあたり、当業者は、本発明が、その利用において、以下の詳細な説明に記載するか、もしくは図面に図示する構成の詳細、部品の配置、およびステップの順序に限定されないことを理解するであろう。本発明は、別の実施形態が可能であり、さまざまな方法で実施することができる。また、本明細書で用いられる語法（phraseology）および用語（terminology）は、説明を目的としており、本発明を制限するものではないことが理解されよう。

【００２２】

システムおよび方法の各実施形態は、２次元直交列コードマルチモード分光器に関し、スペクトルイメージャが本発明の詳細な説明に記載されており、これには、添付の５２２号出願の付録１および添付の１７３号出願の付録１が含まれる。この詳細な説明では、説明のために、具体的な詳細例を数多く記載し、本発明の各実施形態をよりよく理解できるようにした。しかし、当業者は、これらの詳細な内容の一部または全てを用いなくとも本発明の実施形態を実施することができることを理解されよう。場合によっては、構成および装置がブロック図形式で示される。更に、方法を提示および実行する特定の順序は例示的なものであって、本発明の実施形態の範囲から逸脱することなくこの順序を変更可能であることを当業者は容易に理解することができる。

20

【００２３】

本発明の各実施形態は、マルチモードマルチプレックス分光法のための静的２次元符号化アパーチャを提供する。分散型分光器の数学モデルを導出し、単純なアパーチャコードからジャッキーノ利得とフェルゲット利得をどのように得られるのかを、以下に示す。いくつかの異なる種類のアパーチャパターンについて記載する。更に、静的マルチモードマルチプレックス分光法から得た実験結果を提示する。

30

【００２４】

静的マルチモードマルチプレックス分光器（ＭＭＳ）の主要な目的は、拡散（マルチモード）発生源の平均スペクトル密度 $S(\lambda)$ を推定することにある。「静的」とは、発生源についての推定を行う際に、機械的変調、電気光学的変調または他の能動的な変調を行わないことを意味する。好ましい静的ＭＭＳは、平行測定の一つの時間ステップにおいて $S(\lambda)$ を推定する。好ましいＭＭＳシステムは、各種のモードまたは点から引き出されたフィールドのスペクトル射影を測定し、これらの射影を結合して、平均スペクトル密度の推定を得る。

40

【００２５】

図１は、本発明の一実施形態による例示的なＭＭＳシステム１００の模式図である。システム１００は、従来のシステムの入射スリットに代えて、２次元符号化アパーチャマスク１１０を有するグレーティング分光計である。従来の符号化アパーチャ分光器の多くと異なり、システム１００は出力スリットを使用しない。出力アパーチャは、２次元光検出アレイ１２０によって完全に占められている。

【００２６】

システム１００は、分散素子１３０を介して、光検出アレイ１２０に符号化アパーチャ

50

マスク 1 1 0 を結像する。符号化アパーチャマスク 1 1 0 は、好ましくはアパーチャコードと、パターンまたは符号化行列の各列が内積変換で直交となるような、アパーチャコードへの重み付けとを含んでいる。例えば、光検出アレイ 1 2 0 は、2 次元電荷結合素子 (CCD) である。分散素子 1 3 0 は、グレーティング、ホログラフィックグレーティングまたはプリズムである場合があるが、これらに限定されない。分散素子 1 3 0 は、幾つかの分散素子の組合せで構成されていてもよい。分散素子 1 3 0 は、検出アレイ 1 2 0 上で、符号化アパーチャマスク 1 1 0 の像の波長依存空間シフトを生じさせる。

【 0 0 2 7 】

システム 1 0 0 は、好ましくはリレー光学系 1 4 0 を有する。リレー光学系 1 4 0 は、発生源放射 1 5 0 の不均一なスペクトル密度を、少なくとも一方向では実質的に均一なスペクトル密度となるように変換するために使用される。また、システム 1 0 0 は、好ましくは、結像レンズ系 1 6 0 と結像レンズ系 1 7 0 も有する。結像系 1 6 0 と 1 7 0 の組み合わせは、像位置が照射波長の関数として線形にシフトするように、グレーティング 1 3 0 を介して、焦点面 1 2 0 上にアパーチャマスク 1 1 0 の像が形成されるように設計されている。

【 0 0 2 8 】

このシステムを、以下の分散型スペクトロマーの簡略なモデルとみなして説明する。

【 数 1 】

$$I(x', y') = \iiint d\lambda dx dy H(x, y) (T(x, y) S(x, y, \lambda)) \quad (12)$$

ここで、 $H(x, y)$  は分光器内の伝搬を記述するカーネルであり、 $T(x, y)$  は入力アパーチャを記述する透過関数であり、 $S(x, y, \lambda)$  は位置  $(x, y)$  における入力スペクトル密度である。本発明の別の実施形態の説明のため、座標系を、図 2 に示すように、ダッシュなしの変数は入力面において定義される量を指し、ダッシュ付きの変数は検出面における量を指す、と定義する。

【 0 0 2 9 】

本発明の一実施形態による分散型分光器のための伝搬カーネルは、以下のようにモデル化されうる。

【 数 2 】

$$H(x, y) = \delta(y - y') \delta(x - (x' + \alpha(\lambda - \lambda_c)))$$

このカーネルは、等倍 (unity-magnification) 光学部品を有し、 $x = 0$  のアパーチャについて、 $x$  方向の線形分散  $\alpha$ 、中心波長  $\lambda_c$  を有する基本的な分散型分光器を表す。式 (12) の伝搬カーネルを代入して、 $\int dy$  の積分を実行すると、以下の式が得られる。

【 数 3 】

$$I(x', y) = \int dx T(x, y') S\left(x, y, \frac{x - x'}{\alpha} + \lambda_c\right) \quad (13)$$

【 0 0 3 0 】

従来のスリット分光器は、 $T(x, y) = \delta(x)$  の入力アパーチャを取り、その結果、以下が得られる。

【 数 4 】

$$I(x', y) = S\left(0, y, \lambda_c - \frac{x'}{\alpha}\right) \quad (14)$$

式 (14) から、検出面における強度プロファイルが、スリット位置におけるスペクトル密度の直接の推定であることがわかる。しかし、上記のように、スリットが狭いために、このような手法の欠点は、システムのスループットが著しく低下することがあるという点である。しかし、より複雑なアパーチャパターンによって、システムの光子収集効率を上

10

20

30

40

50

げることができる。

【 0 0 3 1 】

前述のように、M M S の目的は、延びたアパーチャにわたって平均スペクトルの推定を可能にするアパーチャコードを開発することである。延びたアパーチャにわたる平均スペクトルは、以下のように定義される。

【 数 5 】

$$S_{mean}(\lambda) \propto \iint dx dy S(x, y, \lambda). \quad (15)$$

【 0 0 3 2 】

より一般的な場合では、数 ( 1 3 ) の強度プロファイルを平均スペクトルの推定に変換するために、解析関数  $T^{\sim}(x'', y')$  を乗算して、 $y'$  のパターンの範囲にわたって積分する。

【 数 6 】

$$\begin{aligned} E(x', x'') &= \int_{y_{min}}^{y'_{max}} dy' \tilde{T}(x'', y') I(x', y') \\ &= \int_{y_{min}}^{y'_{max}} dy' \int dx \tilde{T}(x'', y') T(x, y') S\left(x, y, \frac{x-x'}{\alpha} + \lambda_c\right) \end{aligned} \quad (16)$$

単純化すると、 $S(x, y, \lambda)$  は一定であるか、 $y$  がゆっくりと変化する。その結果、 $S(x, y, \lambda)$  は以下のように記述することができる。

【 数 7 】

$$S(x, y, \lambda) \approx I(y) S(x, \lambda) \quad (17)$$

式 ( 1 7 ) を式 ( 1 8 ) に代入すると以下の数式が得られる。

【 数 8 】

$$E(x', x'') \approx \int_{y_{min}}^{y'_{max}} dy' \int dx \tilde{T}(x'', y') T(x, y') I(y) S\left(x, \frac{x-x'}{\alpha} + \lambda_c\right) \quad (18)$$

$T(x, y)$  と  $T^{\sim}(x'', y')$  が生成され、以下のようになる、

【 数 9 】

$$\int_{y_{min}}^{y'_{max}} dy' \tilde{T}(x'', y') T(x, y') I(y') = \beta \delta(x - x'') \quad (19)$$

平均スペクトルの推定は、以下のようになる。

【 数 1 0 】

$$\begin{aligned} E(x', x'') &\approx \beta \int dx \delta(x - x'') S\left(x, \frac{x-x'}{\alpha} + \lambda_c\right) \\ &\approx \beta S\left(x'', \frac{x''-x'}{\alpha} + \lambda_c\right) \end{aligned} \quad (20)$$

式 ( 2 0 ) は、異なる入力位置における入力スペクトルの推定を含む 2 次元関数であると解釈することができる。この関数を通る  $x''$  の定値における断面は、 $x$  の特定の値における入力スペクトルに対応している。換言すれば、この時点で、1 次元画像分光器が作製されている。 $E(x', x'')$  の  $S_{mean}(\lambda)$  の推定への変換について下記に記載する。

【 0 0 3 3 】

式 ( 2 0 ) におけるスペクトル推定が互いに対してシフトされるため、平均スペクトルを計算するため、線  $x' = x'' + x'$  に沿って積分を実行する。

【数 1 1】

$$x' = \lambda \alpha + x'' :$$

$$\begin{aligned} S_{mean}(\lambda_c - \lambda) &\propto \iint dx'' dx' \delta[x' - \lambda \alpha + x''] E(x' x'') \\ &\propto \int dx'' S(x'', \lambda_c - \lambda) \end{aligned} \quad (21)$$

このように、適切に設計された入力アパーチャと解析関数を使用すれば、検出面における強度プロファイルを、入力スペクトルの推定に変換することができる。しかし、どうやって、式(19)の制約に従ったこの設計を実行するのであろう。

【0034】

式(19)を、 $x$  と  $x''$  を座標ではなくパラメータとして記述することができる。

【数 1 2】

$$\int_{y_{\min}}^{y_{\max}} dy \tilde{T}_x(y') T_x(y) I(y) = \beta \delta(x - x'') \quad (22)$$

式(22)は、ストゥルム リュウヴィル理論の固有関数のための直交制約と同一であり、 $I(y)$  が重み関数として、 $p$  がノルムとして機能している。このため、式(19)の設計要件は、入力アパーチャパターンの基底を、直交関数の何らかの族とすること(basing the input aperture pattern on any family of oethogonal functions)で満足させることができる。

【0035】

ストゥルム リュウヴィル理論の用語を用いると、 $T$  と  $T^*$  が同じコード集合である場合、システムは自己随伴(self-adjoint)である。このような場合、 $T$  のコードの完全集合を、ヒューバート空間上で直交基底を定義する抽象ベクトルとみなすことができ、コードのこのような族は直交列コードと呼ばれる。

【0036】

$T$  と  $T^*$  が同じコード集合ではない場合、システムは非自己随伴であるといわれる。このような場合、 $T$  のコードの完全集合を、ヒューバート空間上で非直交基底を定義する抽象ベクトルとみなすことができる。コードのこのような族は、独立列コードと呼ばれる。

【0037】

式(22)において、 $x$  と  $x''$  は、選択された関数族の固有値スペクトルによって決まる連続的パラメータまたは離散的パラメータでありえる。離散的な場合、ディラックデルタ関数  $(x - x'')$  を、クロネッカーデルタ  $\delta_{xx''}$  で適切に置換することができる。更に、この場合、入力マスクと解析パターンは、それぞれ、 $x$  方向と  $x''$  方向にピクセル化される。

【0038】

直交列符号化と独立列符号化に関する発見の見解から、多くの洞察を得ることができる。式(13)から、入力強度が均一の場合に、出力強度分布が入力アパーチャおよび入力スペクトルの畳込み(convolution)であることがわかる。

【数 1 3】

$$I(x', y') = \int dx T(x, y') S\left(\frac{x - x'}{\alpha}\right). \quad (23)$$

このため、検出面において  $x'$  の所定の値に入る光は、入力アパーチャ上の異なる位置を通る異なる波長の組合せから生じる。適切に設計されたコードによって、この曖昧性を解消し、光のスペクトルの内容を決定できるようになる。透過マスクのための関数族を選択することによって、入力面の可能な  $x$  位置のそれぞれに対する一意のコードが提供される。位置  $x$  における透過パターンは、抽象ベクトル  $|T_x\rangle$  とみなすことができる。このとき、透過パターンの完全な族が基底  $\{|T_x\rangle\}$  を形成する。検出面内の所定の  $x$  位置に入る光分布を抽象ベクトル  $|T_{x''}\rangle$  と考えると、入力アパーチャ上の位置  $x$  からの寄与

10

20

30

40

50

は、単に、 $\langle T_x / I_x, \rangle$ 、対応するベクトル

【数 1 4】

$$\left( \langle T_x | \equiv | T_x \rangle^\dagger \right)$$

の随伴式への  $| T_x, \rangle$  の投射として与えられる。波長  $\lambda_x, \lambda_{x'} = (x - x') / \pi + c$  の光のみが  $x$  から  $x'$  まで伝搬できるため、この内積も  $S(x, \lambda_x, \lambda_{x'})$  の推定を表す。形式  $\langle T_x / I_x, \rangle$  の全ての内積の組を作ると、2次元スペクトル推定関数  $E$  が得られる。

【0 0 3 9】

上記のセクションでは、分散型分光法においてアパーチャマスクパターンとして直交列コードまたは独立列コードを使用する利点を示した。可能な族の数は、当然、無限である。以下のセクションでは、対象となっている、ある特定の族について説明する。

【0 0 4 0】

上で、強度プロファイル  $I(y)$  が、積分限界と共に、ストゥルム リュウヴィル理論の重み関数として機能することを示し、直交関数の性質を制御する。均一な入力強度、対称の積分限界 ( $y'_{\min} = -Y, y'_{\max} = Y$ )、および離散的固有値スペクトルは、以下の制約を与える。

【数 1 5】

$$\int_Y dy \tilde{T}_{x'}(y) T_x(y) = \beta \delta_{xx'} \quad (24)$$

この制約は、公知の調和関数によって満足される。例えば、

【数 1 6】

$$T_x, \tilde{T}_{x'} \in \left\{ \cos \left( m \frac{y\pi}{Y} \right) \right\}, \quad m \in \mathbb{Z}^+, \quad (25)$$

は、式 (24) の自己随伴解である。

【0 0 4 1】

しかし、この関数集合には問題がある。照射がインコヒーレントであるため、 $T_x$  は、フィールドではなく、光の強度を変調させることしかできない。その結果、間隔が  $[0, 1]$  の値の関数しか使用することができない。

【0 0 4 2】

このことは、発見しうる解の性質に重要な影響を及ぼす。この要件を満たす連続関数の自己随伴集合を発見することは不可能である。負の値が認められていないため、このような2つの任意の関数間の内積は、正の定符号である。このため、 $T_y$  の関数は  $T_{-x}, x$  の関数となることができない。このため、独立列コードを考慮しなければならない。

【0 0 4 3】

調和関数に基づいた1つの可能な独立列コードは、以下のようになる。

【数 1 7】

$$T_x \in \left\{ \frac{1}{2} \left( 1 + \cos \left( m \frac{y\pi}{Y} \right) \right) \right\}, \quad m \in \mathbb{Z}^+. \quad (26)$$

このとき、対応する解析コードは以下のようになる。

【数 1 8】

$$\tilde{T}_{x'} \in \left\{ 2 \cos \left( m \frac{y\pi}{Y} \right) \right\}, \quad m \in \mathbb{Z}^+. \quad (27)$$

この独立列コードに基づく  $m = 1 \sim 64$  のアパーチャマスクが、図3に示される。このコードは、透過が間隔  $[0, 1]$  の物理的に実現可能な値を有するように選択されている。図3に示す例示的なパターンは、垂直方向に連続的であるが、水平方向に離散的である。

【0 0 4 4】

10

20

30

40

50

公知のルジャンドル多項式も、式(24)の制約を満たす。ルジャンドル多項式は以下のように記述することができる。

【数19】

$$P_n(y) = \frac{1}{2^n} \sum_{m=0}^{n/2} (-1)^m \binom{n}{m} \binom{2n-2m}{n} y^{n-2m} \quad (28)$$

上記式において、

【数20】

$$\binom{a}{b} = \frac{a!}{(a-b)!b!} \quad (29)$$

10

【0045】

調和マスクの場合と同様に、この関数はコードの自己随伴集合を形成する。

【数21】

$$T_x, \tilde{T}_x \in \left\{ P_m \left( \frac{y}{Y} \right) \right\}, \quad m \in \mathbb{Z}^+. \quad (30)$$

しかし、上記のように、これらのコードは、インコヒーレントシステムで物理的にありえない変調値を含む。物理的にありえる値を生成するためのスケーリングを行うと、独立列コードが得られる。例えば、1つの可能な例は以下のとおりである。

20

【数22】

$$T_x \in \left\{ \frac{1}{2} \left( 1 + P_m \left( \frac{y}{Y} \right) \right) \right\}, \quad m \in \mathbb{Z}^+. \quad (31)$$

このとき、対応する解析コードは以下ようになる。

【数23】

$$\tilde{T}_x \in \left\{ 2P_m \left( \frac{y}{Y} \right) \right\}, \quad m \in \mathbb{Z}^+. \quad (32)$$

この独立列コードに基づく  $m = 1 \sim 64$  のアパーチャマスクが、図4に示されている。このコードは、間隔  $[0, 1]$  の場合に、透過が物理的に実現可能な値となるように、選択されている。図4に示す例示的なパターンは、垂直方向に連続的であるが、水平方向に離散的である。

30

【0046】

前のセクションでは、 $y$  の連続関数のみを、可能なコード族であるとして考慮した。段落[0037]で上記した発見的洞察に基づけば、 $y$  方向にピクセル化された不連続な関数を考慮することも適切であると思われる。例えば、1つの選択肢として、アダマール行列に基づくピクセル化された関数がある。 $H_n$  を  $n$  次のアダマール行列として定義し、記号  $H_n(:, m)$  および  $H_n(m, :)$  を、それぞれ、 $H_n$  の  $m$  番目の列と行を指すものと定義する。このとき、

40

【数24】

$$T_x, \tilde{T}_x \in \{H_n(:, m)\} \quad m \leq n \quad (33)$$

はコードの自己随伴集合である。アダマール行列の要素が1または-1のいずれかであるとする、この場合も、インコヒーレント照射では実現不可能である。コード値のシフトおよびスケーリングを行うと、非自己随伴独立列コードが得られる。

【数25】

$$T_x \in \left\{ \frac{1}{2} (1 - H_n(:, m)) \right\}, \quad m \leq n. \quad (34)$$

50

対応する解析コードは以下のとおりである。

【数 2 6】

$$\tilde{T}_x \in \{2H_n(:,m)\}, \quad m \leq n. \quad (35)$$

この特定の選択肢は、従来のアダマールに関する文献では S 行列として知られている。S 行列コードに基づくアパーチャを、図 5 に示す。このコードは、間隔 [ 0 , 1 ] の場合に、灯火が物理的に実現可能な値となるように選択されている。図 5 に示す例示的なパターンは、垂直方向と水平方向の両方で離散的である。

【 0 0 4 7】

これまでに採り上げたアパーチャマスクの全てにおいて、物理的に実現可能な変調を得るためにコード値をシフトおよびスケールした。すべての場合において、シフトを適用することによって、直交列コードが独立列コードに変換された。しかし、コード値の符号を特定するための方法があれば、その符号をソフトウェアに適用する（適宜、測定値に - 1 を乗算することによって）ことができると考えられる。この追加の計算ステップを追加することによって、シフトを必要とすることなく、物理的に実現可能なアパーチャが得られ、かつコードの自己随伴集合が得られるであろう。

【 0 0 4 8】

しかし、コードの任意の行に、正の値と負の値の両方が含まれている。ここで、システムの多重性によって、これらの異なる領域からの光が検出面上で結合されることが確実となり、その結果ソフトウェアで適切な重み付けを適用することが不可能となる。しかし、コードの正の領域と負の領域を、別々の行に分離することができる。そうすれば、検出面にある全ての行に重み付けを行うことができ、期待した効果が得られるようになる。このように変更されたコードを、行 2 倍化（row-doubled）コードと呼ぶ。

【 0 0 4 9】

アダマール行列を行 2 倍化するために、元の行  $H_n(m, :)$  のそれぞれが 2 行に置換される。

【数 2 7】

$$H_n(m,:) \rightarrow \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(1+H_n(m,:)) \\ \frac{1}{2}(1-H_n(m,:)) \end{bmatrix} \quad (36)$$

$H_n$  を行 2 倍化したものを  $H^{\wedge}_n$  と記述すると、以下の

【数 2 8】

$$T_x, \tilde{T}_x \in \{\hat{H}_n(:,m)\}, \quad m \leq n \quad (37)$$

は、測定において - 1 によって適切な行を重み付けする現在実現可能な計算ステップと組み合わせることにより、物理的に実現可能となる直交列コードである。行 2 倍化アダマール行列に基づくアパーチャが、図 6 に示されている。このコードは、透過が間隔 [ 0 , 1 ] である場合に物理的に実現可能な値を有するように、選択されたものである。図 6 に示す例示的なパターンは、垂直方向と水平方向の両方に離散的である。

【 0 0 5 0】

連続的なマスクコード（調和関数およびルジャンドル）と、離散的コード（S 行列および行 2 倍化アダマール）には重要な差が存在する。連続的なコード族の場合、可能なコードが無数に存在する。

【数 2 9】

$$(m \in \mathbb{Z}^+)$$

このことは、基礎をなすヒューバート空間が無数次元であることを意味する。これらのコードに基づいた物理アパーチャはいずれも、可能なコードパターンの部分集合のみを選択

10

20

30

40

50

しなければならない。その結果、実装された基底は完全でなく、パーセヴァルの関係式が成立しない。簡単にいうと、ノイズの存在下では、処理後、異なるアパーチャに関連する総パワーが、検出面で測定される総パワーと必ずしも等しくなるわけでない。

#### 【 0 0 5 1 】

しかし、離散的コードでは、所定の族のコードパターン数は有限である ( $m \times n$ )。このとき、基礎をなすヒューバート空間は  $n$  次元であり、全コードを含むアパーチャを設計することができる。この場合、パーセヴァルの関係式が成立し、パワーは、処理中に必ず保存される。

#### 【 0 0 5 2 】

実際のシステムの性能が、以上で考察した理想的状態から逸脱させるさまざまな実装上の問題が存在する。以下のセクションでは、これらの問題のうち最も重要なものを扱う。

#### 【 0 0 5 3 】

以上の説明において、検出面強度分布  $I(x', y')$  が利用可能であると仮定した。しかし、これは一般には当てはまらない。例えば、強度プロファイルの測定は、検出アレイのピクセルサイズによってダウンサンプルされた。これは、システムに対していくつかの重要な意味をもつ。第 1 に、連続的なコードでは、式 (34) は厳密には真ではない。しかし、ピクセルサイズによって定義されるナイキスト限界を下回る空間周波数を含むコードのみを有する限り、それはほぼ真となる。

#### 【 0 0 5 4 】

第 2 に、離散的コードでは、アパーチャは、検出器に結像されるときに、フィーチャに、 $y'$  方向に整数個のピクセルが含まれるように設計しなければならない。このことは、アパーチャおよび分光器のリレー光学部品の倍率 (magnification) の製造精度に性能上の要件を課する。

#### 【 0 0 5 5 】

更に、フィーチャ間の境界とピクセル間の境界との位置が合うように、離散的コードを含むアパーチャを、検出面に対して位置合わせしなければならない。これには、組立および位置合わせ時に、入力アパーチャ上に、ピクセルサイズ以下の位置合わせを行う能力が要求される。

#### 【 0 0 5 6 】

前のセクションの物理的実現性は、符号化を、間隔  $[0, 1]$  の値を有するパターンに制限していた。しかし、所定の変調パターンが、入力強度に物理的に記録されうる (physically imprinted) という事実は、必要な入力アパーチャが製造可能であるかとは関係がない。

#### 【 0 0 5 7 】

任意のパターンを有し、透過率が  $0 \sim 100\%$  の範囲とされた連続トーンマスクは、実際に実現可能である。しかし、大半の直交列コードパターンの複雑さを考慮すると、要求される精度で透過マスクを製造する原価は極端に高い。1つの代替策は、設計した連続トーンマスクをハーフトーンマスクに変換することである。連続トーンパターンの小さな領域を、より小さい部分領域のアレイに更に分割する。領域の正味の透過率が連続トーンパターンのグレースケール値と一致するように、これらの部分領域のそれぞれに  $0\%$  または  $100\%$  の透過率を割り当てる。この変換が検出面のピクセルよりも小さな空間スケールで行われるとすると、さほどの差は認められなくなる。

#### 【 0 0 5 8 】

変換を最適化するために利用可能なさまざまなハーフトーン処理アルゴリズムが存在する。このようなハーフトーン処理アルゴリズムの例は、David Blatner, Glenn Fleishman, and Steve Roth, Real World Scanning and Halftones, ISBN 0-201-69693-5, 1998; R. W. G. Hunt, The Reproduction of Color, Fountain Press, ISBN 0-86343-381-2, 1995; Henry R. Kang, Digital Color Halftoning, SPIE Optical Engineering Press, ISBN 0-8194-3318-7, 1999; Daniel L. Lau and Gonzalo R. Arce, Modern Digital Halftoning, Marcel Dekker, ISBN 0824704568, 2001に記載されている。これらの各々は、これら

10

20

30

40

50

を参照することによりここにその全体を援用する。

#### 【 0 0 5 9 】

分光器の内部の光学部品は、システムの性能に大きな影響を及ぼしうる。静的 M M S の光学特性は、重要な意味で、従来の機器から外れている。M M S は、検出面にわたるスペクトル情報を極めて非局所的に符号化するため、どの位置の光誤差も、再構築に非局所的に影響し、スペクトルの範囲の全領域にノイズと誤差を生じさせてしまう。

#### 【 0 0 6 0 】

以上では、インコヒーレント画像化カーネルが  $H(x, y) = (y - y') (x - (x' + \dots + c))$  によって与えられた。この仮定から大きく外れると、スペクトルの再構築が劣化する（あるいは誤ったものとなる）。このため、以下の 3 つの主要な光学的要件が存在する。

1. 機器のスペクトル分解能は、入力マスク上のフィーチャの幅  $x$  によって制限されなければならない。このため、このインコヒーレントパルス応答のサイズが  $x$  と比べて小さくなければならない。更に、パルス応答のサイズは、入力フィールドと出力フィールドにわたって著しく変動してはならない。

2.  $x$  方向と  $y$  方向のパルス応答が無相関でなければならない。このため、光学系が、入力フィールドと出力フィールドにわたり歪みが小さくなければならない。

3. 入力強度プロファイルは、システムを通る伝搬の影響を受けてはならない ( $x$  方向の波長依存シフトを除く)。このため、システム内に、フィールドに依存する輝度変調 (口径食) が存在してはならない。

#### 【 0 0 6 1 】

理想的な画像化カーネルは、別の方法によっても細分化することができる。しかし、この問題は、理想的な光学系にも存在し、ハードウェアを特別に変更するか、あるいはスペクトル再構築の前に検出像をソフトウェアで補正することによって処理する必要がある。

#### 【 0 0 6 2 】

回折格子を介してアパーチャを結像すると、像が分散方向に湾曲してしまうことはよく知られている。我々の画像化カーネルに関しては、これは  $c$  として現れ、 $y$  に依存する。この湾曲は、時にスマイル歪み (歪曲収差) とも呼ばれ、波面法線球体の特定の形状の結果生じる。高  $F/\#$  系では、湾曲は最小であり無視することができる。しかし、エタンドュを最大化するため、静的 M M S は、ほぼ常に超低  $F/\#$  で作製される。その結果、図 7 にみられるように湾曲が極めて大きくなる。スペクトル発生源は急峻なスペクトル線のみを有するため、図 7 の画像には、マスクパターンの少数の波立った像のみが含まれる。

#### 【 0 0 6 3 】

これらの変動は、測定された像をデジタル補正するか、光学系を補正するか、または符号化マスクを予め歪めておくことで解決することができる。マスクレベル補正では、光学系の歪みを測定または計算し、次に、マスク自体ではなく、マスクの歪像が適切な直交列コードとなるように符号化マスクを実装する。

#### 【 0 0 6 4 】

スペクトル推定の前に、スペクトル線の湾曲および検出アレイへのスペクトルの非線形分散を補正するために、デジタル補償法を使用することができる。ガス放電ランプなどのピークの狭い較正源を使用することで、較正パラメータを記憶して、更に別のデータセットに使用することができる。

#### 【 0 0 6 5 】

図 8 は、本発明の一実施形態による、垂直フィールド位置の関数としての補正前のスペクトル線湾曲を示す C C D 画像 8 0 0 の一例である。画像 8 0 0 は、キセノンペンランプ、 $N = 32$  のアマダール符号化マスクおよび上記の光学系を使用して得られた。歪みのない画像  $c$  からの直線変位は、以下のように記述することができる。

【数 3 0】

$$\Delta\beta = \left( \frac{\gamma^2}{2} \right) \lambda A$$

上記式において、 $\beta$  はグレーティングに入る光線の対角、 $\lambda$  は光の波長、 $A$  はゼロ以外の値に対するグレーティングの角分散である。

【0066】

本発明の一実施態様では、直線変位をデジタル的に補正するために、CCD画像が、まず、水平方向に、立方スプライン関数を使用して高い解像度に補間される。次に、マスクの垂直のフィーチャの列位置のベクトルが作成され、対応する行のベクトルも同様に作成される。次に、直線変位とCCD行との関係を見つけるために多項式フィッティングが使用される。狭い波長帯では、同じ補正を、CCDの全ての列に使用することができる。広い波長帯または高解像度の補正が必要な場合は、複数のスペクトル線からのマスクフィーチャを使用しなければならないが、この場合の補正は同様にCCD列に依存する。

10

【0067】

図9は、本発明の一実施形態による、垂直フィールド位置の関数としての補正後のスペクトル線の湾曲を示すCCD画像900の一例である。

【0068】

本発明の別の実施態様では、複数のスペクトル推定の平均をとるデジタル補正法が使用される。フォーマットされたCCDデータを反転させた後、異なるスリット位置でのスペクトル推定が求められる。透過グレーティングの回折格子の式は以下になる。

20

$$m = (\sin \theta - \sin \alpha)$$

上記式において、 $m$  は回折次数、 $\lambda$  は波長、 $d$  はグレーティング周波数に関連する定数、

$\theta$  は回折波の水平面の角度、 $\alpha$  は水平面におけるグレーティングへの入射角である。この式为非線形性のため、異なるスペクトル推定を、再構築されたスペクトルの領域について、解像度とピーク高さを低下させることなく、所定のピクセル数によって単にシフトさせることができない。この非線形性を補正するために、ペンランプなどの較正用の発生源を用いて再構築されたデータセットも使用される。次に、各スペクトル推定について、スペクトルにおいて最も強いピークのピクセル位置のベクトルが作成される。次に、発生源スペクトルの行位置は固定であるため、各推定でピークの間隔を一定に保つために、必要なピクセル位置のベクトルが作成される。CCDの列と、これらの必要なピクセル位置からのそのずれとを相関させるために、多項式フィッティングが実行される。次に、補正された軸へのこの多項式フィッティングを使用して、再構築されたスペクトルが再度サンプリングされる。スペクトル推定を作成するために、スペクトルの位置合わせと合算が行われる。

30

【0069】

図10は、本発明の一実施形態による、水平非線形性補正を行って再構築されたスペクトル1010と、水平非線形性補正を行わずに再構築されたスペクトル1020を例示するプロット1000である。プロット1000にみられるように、補正が行われた後は、遠いピークの幅は狭くなり、その高さが高くなっている。この両者の補正のための較正データは記憶されており、今後行われる、任意の発生源に関わるあらゆる再構築に使用される。

40

【0070】

以上の概念とコード（詳細には、上記のアダマールマスクの行2倍化の実装）に基づくさまざまな分光器を作製した。ラマン、蛍光、および吸収分光法のために異なる機器が使用され、紫外（UV）から近赤外（NIR）までのスペクトル範囲にわたり、反射および透過の形状を示し、0.1～3nmの範囲のスペクトル分解能を実現した。機器の性能は常に優れており、拡散源に対する従来の分光器を著しく上回っていた。

【0071】

以下は、一実施形態による静的MMSシステムで収集された実験結果である。この結果

50

は、ジャッキーノ利得とフェルゲット利得が存在することを示し、予想どおり性能が増大したことを示す。

#### 【 0 0 7 2 】

以下に記載するすべての実験において、スペクトル発生源は、積分球と共に使用したキセノン放電ランプであった。積分球からの光が、マスクアパーチャに直接入るようにされ、どのような種類のリレー光学部品も使用しなかった。特段の断りのない限り、CCD積分時間は160msであった。この特定の分光器は、775～900nmのスペクトル範囲を有する。スペクトル分解能は、使用するマスクによって決まる。大部分のマスクでは、解像度は0.65nmである。このマスクは、石英基板に堆積させたクロムからなるものであった。最も小さなマスクフィーチャは36μmであり、これはCCD上の4ピクセルに相当する。

10

#### 【 0 0 7 3 】

図11は、40次の、行2倍化アダマールマスクから再構築されたスペクトルと、マスクのフィーチャと等しいサイズの幅(36μm)のスリットから再構築されたスペクトルを比較して示したものである。図11からわかるように、符号化アパーチャは、スペクトル分解能を犠牲にすることなく、非常に多くの光を収集する。

#### 【 0 0 7 4 】

さまざまな次数(N=40, 32, 24, 16, 12)の行2倍化アダマールマスク実装してみた。図12に、その異なるマスクからの結果がプロットされている。マスクの次数が増えると、スペクトル分解能に影響を及ぼすことなく、信号強度が強くなる。しかし、マスクの次数が増えると、マスクの所定の行の開口の数が増えるだけではなく、マスク行の数も増えるという事実によって、スループット利得を求めるのは複雑になる。スループットの増加を確認するために、所定のマスクについて収集した総カウントを、CCD上で等しい数の行を占めるスリットで収集した総カウントで割ることによって、正規化することができる。行2倍化アダマールマスクでは、どの行にもN/2個の開口が存在する。このように、正規化されたカウントも、この量だけ増えることが予想される。その結果を図13にプロットする。

20

#### 【 0 0 7 5 】

図13は、観察された増加が、予想したN/2ではなく、約N/4であることを示している。この不一致は、分光器の光学系に原因がある可能性があると考えられる。マスクのサイズを問わず、光収集量の減少が一定して1/2であるため、口径食を原因から除外することができる。この影響は光学部品の変調伝達関数(MTF)から生じたと考えられる。水平方向では、アダマールマスクとスリットは、同じ範囲の空間周波数を有する。しかし、垂直方向では、スリットはDC成分のみを含むが、マスクは、行2倍化からの高い周波数を含んでいる。実験によって、マスクとスリット間のCCDの1つの列のカウントを比較すると、パターン全体について測定すると、約N/4の比率が観察される。しかし、マスクと二乗ピンホール間で行のカウントを比較すると、理論から予測されたように、約N/2の比率が観察される。このため、この不一致は、光学系のMTFに関連していると結論される。

30

#### 【 0 0 7 6 】

最後に、スループットの増加を伴う信号対雑音比(SNR)の改良の定量化を試みる。図14a, 14bは、非常に小さなピークを含むキセノンスペクトルの領域を示す(あまりに微弱であるため、以前の図のスケールでは見ることができない)。図14aは、行2倍化された40次のアダマールマスクによって再構築されたピークを示す。下のプロットは、スリット孔で測定したピークである。ピークのSNRが、その高さを、ピークの近くの領域のrms値で割った値と定義すると、マスクアパーチャのSNRが約23.7であるが、スリットのSNRが約7.0であることがわかる。これは、 $23.7 / 7.0 = 3.4$ のSNR利得である。図13から、マスクが10.3のスループット利得を与えたことがわかる。ショット雑音手順では、このスループット利得が $(10.3 / 3.2)^{1/2}$ のSNR利得になると予想されるが、これは、実際、観測値に近い。

40

50

## リレー光学部品の設計

## 【0077】

多くの場合、対象の発生源は、空間的に不均一である。対象の空間的に不均一な発生源は、入力スペクトル密度が  $S(x, y, \lambda)$  であると仮定してモデル化される。直交列コードによるスペクトル解析では、スペクトル密度が、 $y$  について均一であるか、ほぼ均一であることが要求される。

## 【0078】

図15は、本発明の一実施形態であり、フーリエ変換レンズ1510を使用して、対象の空間的に不均一な発生源を対象の空間的に均一な発生源に変換するためのシステム1500の一例を示す模式図である。発生源放射が入力面1520において空間的にインコヒーレントな場合、入力面1520とマスク面1530の間にフーリエ変換レンズ1510を配置することで、均一照射が得られるようになる。フーリエ変換レンズ1510は、発生源入力面1520からの1つの焦点距離と、符号化マスク面1530からの1つの焦点距離に配置される。

10

## 【0079】

図16は、本発明の一実施形態であり、ピントガラス拡散体1610を使用して、対象の空間的に不均一な発生源を対象の空間的に均一な発生源に変換するためのシステム1600の一例を示す模式図である。発生源がコヒーレントであることを保証できない場合、入力面1620とマスク面1630の間にピントガラス拡散体1610を配置することで、均一照射が得られるようになる。

20

## 【0080】

図17は、本発明の一実施形態であり、マルチモードバンドル1710を使用して、対象の空間的に不均一な発生源を対象の空間的に均一な発生源に変換するためのシステム1700の一例を示す模式図である。同様に、発生源がコヒーレントであることを保証できない場合、入力面1720とマスク面1730の間にマルチモードファイババンドル1710を配置することで、均一照射が得られるようになる。

## 【0081】

球面フーリエ変換レンズを単独で用いるか、または光学ディフューザと併用することによって、符号化マスク面におけるスペクトル密度が、以下の式

## 【数31】

$$S(\lambda) = \iint S(x, y, \lambda) dx dy$$

30

であるとみなすことができ、その結果、最終的に分解された(resolved)スペクトルが発生源の平均スペクトル密度と等しくなる。

## 【0082】

スペクトル再構築には、 $x$ 方向の空間均一性は必要でない。図18は、本発明の一実施形態による、非点収差補正光学部品を使用する、非点収差補正画像化および強度フィールド均一化(homogenization)のための例示的なシステム1800を示す模式図である。 $y$ 方向の焦点距離が $x$ 方向の焦点距離の2倍になるような非点収差補正光学部品を使用して、 $y$ 方向の空間均一性と $x$ 方向の画像化が達成されうる。システム1800では、入力面1520とマスク面1830の間に円筒フーリエ変換レンズ1810と円筒結像レンズ1820を配置すると、 $y$ 方向に均一な強度フィールドが得られるが、 $x$ 方向に変動を保持している。システム1800では、符号化マスク面1830上のスペクトル密度は以下のようになる。

40

## 【数32】

$$S(x, \lambda) = \int S(x, y, \lambda) dy \quad (38)$$

検出アレイからの信号は、以下のようになる。

【数 3 3】

$$g(x, y) = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S(x - \gamma\lambda, \lambda) t(x - \gamma\lambda, y) d\lambda \quad (39)$$

その結果、以下ようになる。

【数 3 4】

$$\int_{-y_{\max}}^{y_{\max}} g(x - \gamma\lambda, y) \tau(x, y) dy \approx S(x, \lambda) \quad (40)$$

このため、システム 1 8 0 0 では、スペクトル密度の 1 次元空間像が得られる。

10

【0 0 8 3】

図 1 9 は、本発明の一実施形態による、スペクトル断層撮影画像化に使用するための例示的な非点収差補正光学系 1 8 0 0 の、時間  $t = 0$  における、入力アパーチャの回転および非点収差補正画像化および強度フィールド均一化の例示的なスナップショット 1 9 0 0 を示す模式図である。

【0 0 8 4】

図 2 0 は、本発明の一実施形態による、スペクトル断層撮影画像化に使用するための例示的な非点収差補正光学系 1 8 0 0 の、時間  $t = t_1$  における、入力アパーチャの回転および非点収差補正画像化および強度フィールド均一化の例示的なスナップショット 2 0 0 0 を示す模式図である。

20

【0 0 8 5】

図 2 1 は、本発明の一実施形態による、スペクトル断層撮影画像化に使用するための例示的な非点収差補正光学系 1 8 0 0 の、時間  $t = t_2$  における、入力アパーチャの回転および非点収差補正画像化および強度フィールド均一化の例示的なスナップショット 2 1 0 0 を示す模式図である。

【0 0 8 6】

図 2 2 は、本発明の一実施形態による、スペクトル断層撮影画像化に使用するための例示的な非点収差補正光学系 1 8 0 0 の、時間  $t = t_3$  における、入力アパーチャの回転および非点収差補正画像化および強度フィールド均一化の例示的なスナップショット 2 2 0 0 を示す模式図である。

30

【0 0 8 7】

図 2 3 は、本発明の一実施形態による、スペクトル断層撮影画像化に使用するための例示的な非点収差補正光学系 1 8 0 0 の、時間  $t = t_4$  における、入力アパーチャの回転および非点収差補正画像化および強度フィールド均一化の例示的なスナップショット 2 3 0 0 を示す模式図である。

【0 0 8 8】

図 1 9 ~ 2 3 は、システム 1 8 0 0 の入力アパーチャの像回転の状態を示す。このような回転は、プリズムの組合せによって、または画像分光器を回転させることによって行われる。入力線源像 1 5 2 0 の各回転について、推定された 1 次元スペクトルは、以下の形式で得られる。

40

【数 3 5】

$$S(x, \theta, \lambda) = \int S(x' = x \cos \theta + y \sin \theta, y' = -x \sin \theta + y \cos \theta, \lambda) dy \quad (41)$$

上記式において、 $x'$  と  $y'$  は正準座標系の横座標であり、 $x$  と  $y$  は回転させた横座標である。式 (41) は、 $S(x, y, \lambda)$  の  $x, y$  面のラドン変換を意味しており、標準的な断層撮影法 (例えば畳込み逆投影) によって反転可能である。このためシステム 1 1 0 0 の非点収差補正リレー光学部品と発生源回転を使用して、インコヒーレント光源の三次元空間スペクトル像を形成することができる。

【0 0 8 9】

本発明の一実施形態によれば、方法を実行するために、プロセッサによって実行される

50

ように適合された命令がコンピュータで読取可能な媒体に記憶される。コンピュータで読取可能な媒体は、デジタル情報を記憶する装置でありえる。例えば、コンピュータで読取可能な媒体は、ソフトウェアを記憶するために当業界で公知のコンパクトディスクROM (CD-ROM) などの読取り専用メモリを含む。コンピュータ可読媒体は、実行されるように構成された命令を実行するのに適したプロセッサによってアクセスされうる。「実行されるように構成された命令」および「実行される命令」との用語は、プロセッサによって現在の形 (例えばマシンコード) で実行の準備が整っている任意の命令も、プロセッサによって実行の準備が整うために更に操作 (例えば、コンパイル、復号、アクセスコードの提供など) を必要とする任意の命令も含む。

【0090】

10

本発明の実施形態の記載に使用されるように、「結合される (coupled)」との用語は直接接続される場合、間接接続される場合、またはこれらの組み合わせをも含む。結合された2つの装置は、直接通信でも、間接通信でも、またはその組み合わせによって連携してもよい。更に、結合された2つの装置は、連続的に通信している必要はなく、通常は、定期的、断続的、散発的に通信するが、時々通信するなどであってもよい。更に、「通信」との用語は、直接通信に限定されず、間接通信も含む。

【0091】

本願明細書に開示される本発明の一実施形態によるシステムおよび方法は、有利にも、スペクトル分解能を犠牲することなく分光器のスループットを最大化し、かつ所定のシステムスループットおよび検出ノイズに対して、推定されたスペクトルの信号対雑音比を最大化することができる。

20

【0092】

前述の詳細な説明において、本発明の各種実施形態に係るシステムおよび方法を、特定の例示的な実施形態によって記載した。したがって、本明細書および図面は、本発明を限定するものではなく、本発明を例示するものであるとみなすべきである。本発明の範囲は、本明細書に添付の番号付きの例、およびその均等物によって定義される。

【図面の簡単な説明】

【0093】

【図1】本発明の一実施形態による例示的なマルチモードマルチブックス分光法システムの模式図である。

30

【図2】本発明の実施形態の説明に使用する座標系を示す。

【図3】本発明の一実施形態による、調和関数に基づいた独立列コードのための例示的なアパーチャパターンである。

【図4】本発明の一実施形態による、ルジャンドル多項式に基づいた独立列コードのための例示的なアパーチャパターンである。

【図5】本発明の一実施形態による、アダマール行列に基づいた独立列コードのための例示的なアパーチャパターンである。

【図6】本発明の一実施形態による、行2倍化アダマール行列に基づいた直交列コード (測定された強度の処理に関連して) のための例示的なアパーチャパターンである。

【図7】スマイル歪みを示す焦点面においてキャプチャされた例示的な未処理像である。

40

【図8】本発明の一実施形態による、垂直フィールド位置の関数として、未補正のスペクトル線湾曲を示す例示的な電荷結合素子の像である。

【図9】本発明の一実施形態による、垂直フィールド位置の関数として、補正されたスペクトル線の湾曲を示す例示的な電荷結合素子の像である。

【図10】本発明の一実施形態による、水平非線形性補正を行って再構築されたスペクトルと、水平非線形性補正を行わずに再構築されたスペクトルを示す例示的なプロットである。

【図11】 $H^4_0$  およびスリットアパーチャに基づくマスクから再構築されたスペクトルから得た結果のグラフィカルな比較である。

【図12】さまざまな次数の行2倍化アダマールマスクから再構築されたスペクトルから

50

得た結果のグラフィカルな比較である。

【図 1 3】等しい高さのスリットと比較した、N 次マスクによって得られたスルーブット利得を示す。

【図 1 4 a】 $H^{\wedge}_{40}$  およびスリット孔に基づくマスクによって再構築された小さなスペクトルピークのグラフィカルな比較である。

【図 1 4 b】 $H^{\wedge}_{40}$  およびスリット孔に基づくマスクによって再構築された小さなスペクトルピークのグラフィカルな比較である。

【図 1 5】本発明の一実施形態による、フーリエ変換レンズを使用して、対象の空間的に不均一な発生源を、対象の空間的に均一な発生源に変換するための例示的なシステムを示す模式図である。

10

【図 1 6】本発明の一実施形態による、ピントガラス拡散体を使用して、対象の空間的に不均一な発生源を、対象の空間的に均一な発生源に変換するための例示的なシステムを示す模式図である。

【図 1 7】本発明の一実施形態による、マルチモードバンドルを使用して、対象の空間的に不均一な発生源を、対象の空間的に均一な発生源に変換するための例示的なシステムを示す模式図である。

【図 1 8】本発明の一実施形態による、非点収差補正光学部品を使用する、非点収差補正画像化および強度フィールド均一化のための例示的なシステムを示す模式図である。

【図 1 9】本発明の一実施形態による、スペクトル断層撮影画像化に使用するための例示的な非点収差補正光学系の時間  $t = 0$  における、入力アパーチャの回転および非点収差補正画像化および強度フィールド均一化の例示的なスナップショットを示す模式図である。

20

【図 2 0】本発明の一実施形態による、スペクトル断層撮影画像化に使用するための例示的な非点収差補正光学系の時間  $t = t_1$  における、入力アパーチャの回転および非点収差補正画像化および強度フィールド均一化の例示的なスナップショットを示す模式図である。

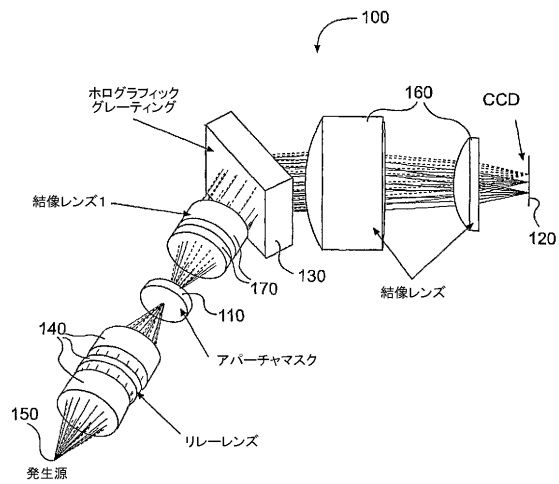
【図 2 1】本発明の一実施形態による、スペクトル断層撮影画像化に使用するための例示的な非点収差補正光学系の時間  $t = t_2$  における、入力アパーチャの回転および非点収差補正画像化および強度フィールド均一化の例示的なスナップショットを示す模式図である。

【図 2 2】本発明の一実施形態による、スペクトル断層撮影画像化に使用するための例示的な非点収差補正光学系の時間  $t = t_3$  における、入力アパーチャの回転および非点収差補正画像化および強度フィールド均一化の例示的なスナップショットを示す模式図である。

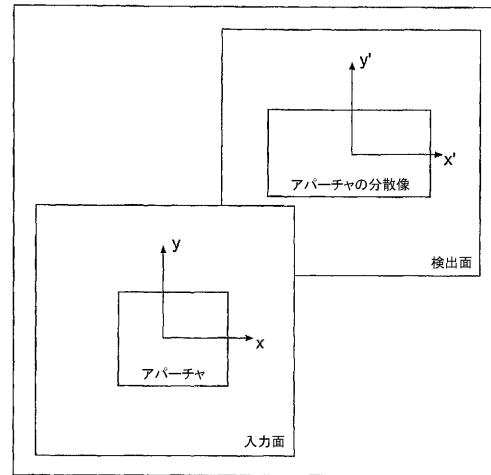
30

【図 2 3】本発明の一実施形態による、スペクトル断層撮影画像化に使用するための例示的な非点収差補正光学系の時間  $t = t_4$  における、入力アパーチャの回転および非点収差補正画像化および強度フィールド均一化の例示的なスナップショットを示す模式図である。

【図 1】



【図 2】



【図 3】

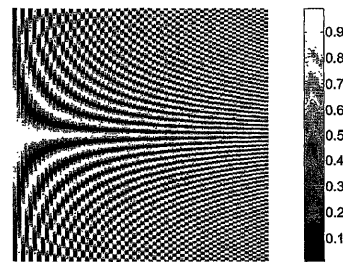


FIG. 3

【図 4】

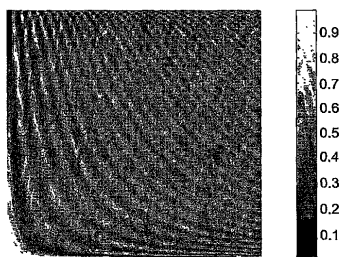


FIG. 4

【図 5】

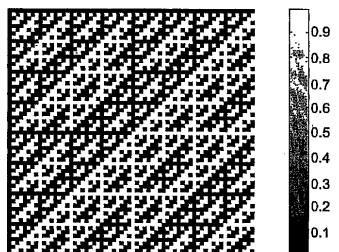


FIG. 5

【図 6】

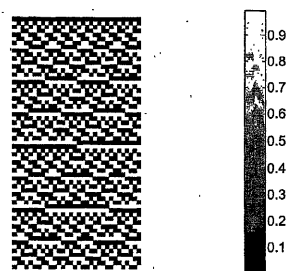


FIG. 6

【図 7】

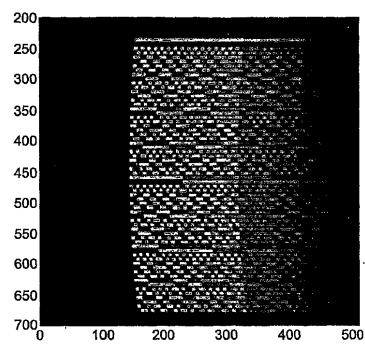
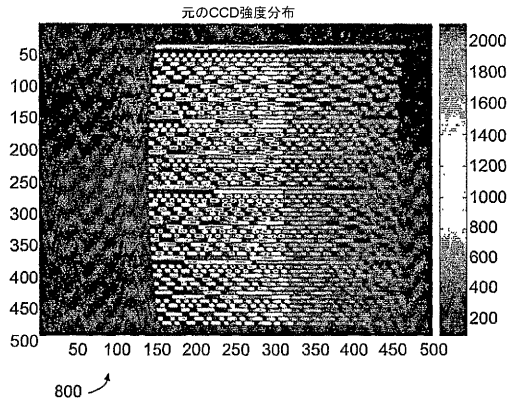
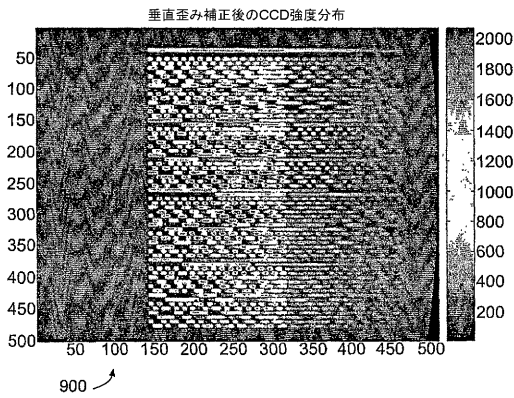


FIG. 7

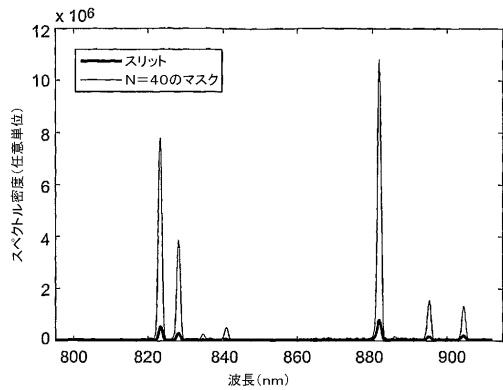
【図 8】



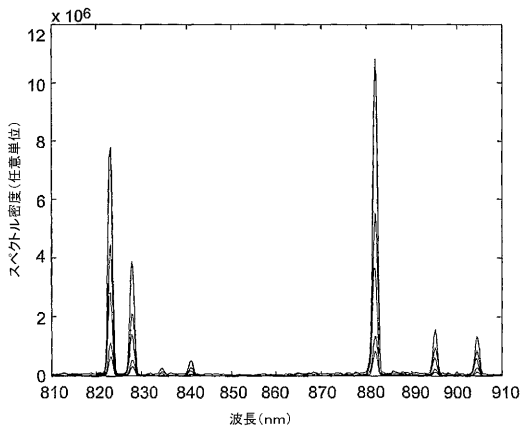
【図 9】



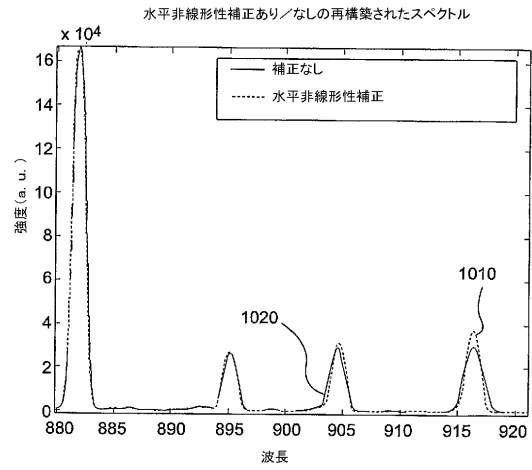
【図 11】



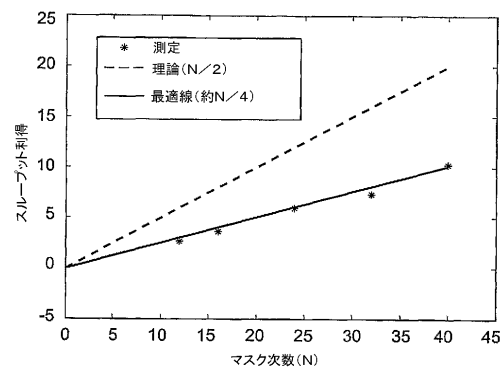
【図 12】



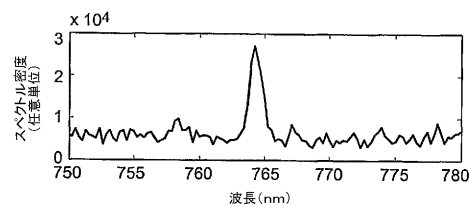
【図 10】



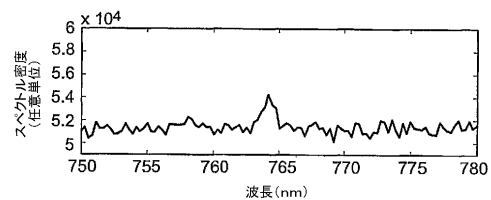
【図 13】



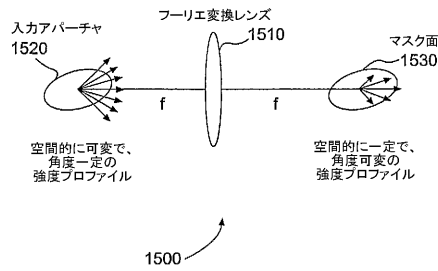
【図 14 A】



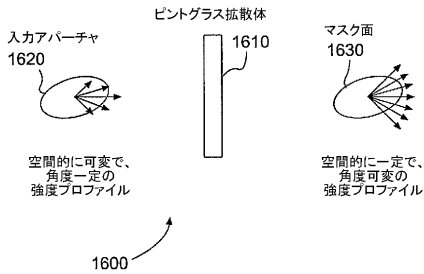
【図 14 B】



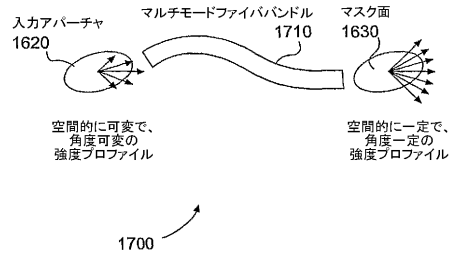
【図 15】



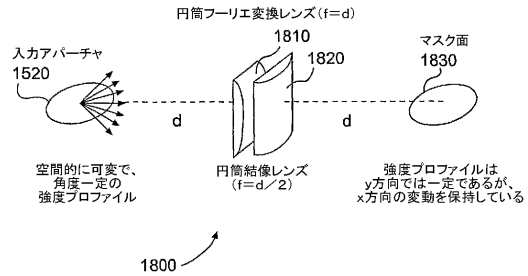
【図 16】



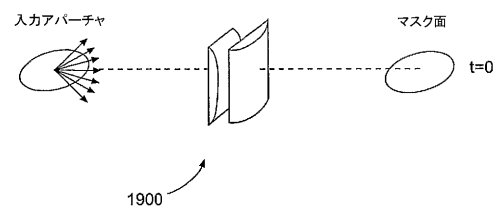
【図 17】



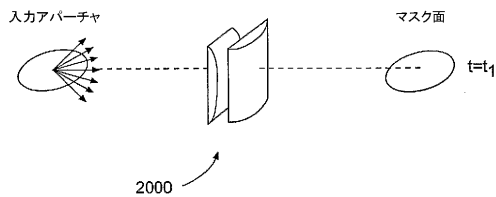
【図 18】



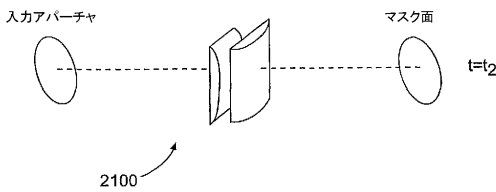
【図 19】



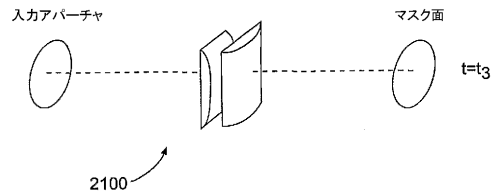
【図 20】



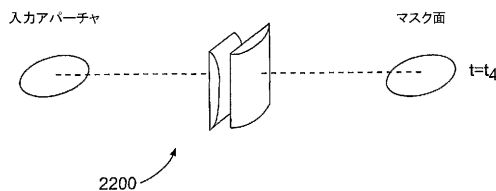
【図 21】



【図 22】



【図 23】



## フロントページの続き

- (72)発明者 デイビッド ブレイディー  
アメリカ合衆国、ノース カロライナ州 27705、ダーラム、ドッグウッド ロード 280  
1
- (72)発明者 スコット ティー . マケイン  
アメリカ合衆国、ノース カロライナ州 27707、ダーラム、ウェルズ ストリート 101  
3
- (72)発明者 マイケル ゲーム  
アメリカ合衆国、アリゾナ州 85743、トゥーソン、ノース イェロー ムーン ドライブ  
8815
- (72)発明者 マイケル イー . サリバン  
アメリカ合衆国、ノース カロライナ州 27613、ローリー、バーデン プレイス 1060  
0
- (72)発明者 プラザント ポツルリ  
アメリカ合衆国、ノース カロライナ州 27617、ローリー、ブロードフィールド コート  
11628

審査官 平田 佳規

- (56)参考文献 米国特許第06208413 (US, B1)  
特開2002-221447 (JP, A)  
特開平09-015046 (JP, A)  
特開2004-170118 (JP, A)  
特開2000-131142 (JP, A)  
特開昭52-042782 (JP, A)  
Applied Spectroscopy, 1990年, Vol.44 No.8, p.1270~1275

## (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01J 3/00 - 3/51  
G01J 1/00 - 1/04  
G01J 1/42 - 1/46  
G01N 21/00 - 21/01  
G01N 21/17 - 21/74  
G02B 5/04  
G02B 5/18