

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5860809号
(P5860809)

(45) 発行日 平成28年2月16日(2016.2.16)

(24) 登録日 平成27年12月25日(2015.12.25)

(51) Int.Cl.

G O 1 J 3/45 (2006.01)

F 1

G O 1 J 3/45

請求項の数 21 (全 17 頁)

(21) 出願番号 特願2012-528127 (P2012-528127)
 (86) (22) 出願日 平成22年9月8日 (2010.9.8)
 (65) 公表番号 特表2013-504066 (P2013-504066A)
 (43) 公表日 平成25年2月4日 (2013.2.4)
 (86) 國際出願番号 PCT/US2010/048169
 (87) 國際公開番号 WO2011/031791
 (87) 國際公開日 平成23年3月17日 (2011.3.17)
 審査請求日 平成25年9月3日 (2013.9.3)
 (31) 優先権主張番号 61/240,531
 (32) 優先日 平成21年9月8日 (2009.9.8)
 (33) 優先権主張国 米国(US)

(73) 特許権者 511248294
 シーウェア システムズ
 S I - W A R E S Y S T E M S
 アメリカ合衆国 94104 カリフォルニア州 サンフランシスコ カリフォルニアストリート 555
 (74) 代理人 110000246
 特許業務法人 O F H 特許事務所
 (72) 発明者 カリル、ディア・エー
 エジプト国 11371 カイロ マディナ ナスル フロム アバス エ-1-アカド ストリート アラム ストリート 5

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】マイクロ電子機械的システム(MEMS)干渉計

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

マイクロ電子機械的システム(MEMS)干渉計であって、
 第1媒体の、第2媒体との界面にある第1の表面に形成され、当該第1の表面への入射ビームを前記第1媒体中を伝播する第1干渉ビームおよび前記第2媒体中を伝播する第2干渉ビームに分割するビームスプリッタと、

前記第1干渉ビームを反射するように、前記第1媒体の第2の表面に形成された第1のミラーと、

前記第2干渉ビームを反射するように、前記第1媒体の第3の表面に形成された第2のミラーと、

前記第1干渉ビームの光路内および前記第2干渉ビームの光路内に設けられた前記第1媒体の付加的な表面と、

前記第1のミラーにより反射された前記第1干渉ビームと前記第2のミラーにより反射された前記第2干渉ビームとの間の干渉により生成された干渉パターンを検出するよう光学的に結合された検出器と、

前記第1および第2のミラーの一つに変位を生じさせるよう結合された静電アクチュエータであって、前記変位により、前記第1干渉ビームと前記第2干渉ビームとの間に前記変位の2倍に等しい光路長差を生成する静電アクチュエータと、

を備え、

前記第1干渉ビームの光路内には、第2干渉ビームの光路内の第1媒体のそれぞれの表

面に対応する第1媒体の表面であって、当該それぞれの表面と同じ方向に同じ大きさのティルト角を持って且つ当該それぞれの表面と同じ反射又は透過の機能を持つ対応する表面が存在するよう構成されており、

前記第2干渉ビームの光路内に設けられた前記付加的な表面の少なくとも一つは、第1干渉ビームと第2干渉ビームとの間のそれぞれの位相誤差における相違を最小化するために前記第2干渉ビームの光路内に配置された第1媒体のブロックの表面である、

干渉計。

【請求項2】

前記第1媒体がシリコンで、前記第2媒体が空気であり、

基板を構成する頂部層および底部層を含むシリコンオンインシュレータ(SOI)ウェハをさらに備え、

前記ビームスプリッタ、前記第1のミラー、前記第2のミラー、前記付加的な表面および前記静電アクチュエータが、前記SOIウェハの頂部表面に形成されており、

前記静電アクチュエータと、該静電アクチュエータに結合された前記第1および第2のミラーの前記一つとは、前記SOIウェハの底部層から分離されている、

請求項1に記載の干渉計。

【請求項3】

前記ビームスプリッタ、前記第1のミラー、前記第2のミラー、前記付加的な表面および前記静電アクチュエータを、前記SOIウェハの頂部表面にフォトリソグラフィ技術を用いて形成し、

前記静電アクチュエータと、該静電アクチュエータに結合された前記第1および第2のミラーの前記一つとを、前記SOIウェハの頂部層と底部層との間のエッチングによって形成する、

請求項2に記載の干渉計を製造する方法。

【請求項4】

前記第1、第2、第3の表面および前記付加的な表面を、それぞれ、深反応性イオンエッチング(DRIE)プロセスを使用して前記SOIウェハの頂部表面の一部をエッチングすることによって形成する、

請求項2に記載の干渉計を作製する方法。

【請求項5】

前記第1、第2、第3の表面のそれぞれのティルト角が等しく同じ方向である、請求項2に記載の干渉計。

【請求項6】

前記第3の表面が前記第2干渉ビームの伝播方向に関して向けられていて該第2干渉ビームが前記第2媒体から第1媒体を介して伝播し前記第2のミラーに達する、請求項5に記載の干渉計。

【請求項7】

前記干渉計がフーリエ変換(FT)分光計として使用され、

第1の干渉計アームにおいて、

前記第1媒体の第1区分は、前記ビームスプリッタが形成される前記第1の表面を持ち、

前記第1媒体の前記第2の表面に前記第1のミラーが形成されており、

第2の干渉計アームにおいて、

前記ブロックである前記第1媒体の第2区分は、前記第2のミラーが形成される前記第3の表面と、前記付加的な表面の一つとを持ち、該付加的な表面の一つは前記第3の表面に対向して前記第2干渉ビームを當該第3の表面に向かわせ、

前記ビームスプリッタ、前記第1のミラー、および前記第2のミラーのそれぞれの、基板との間のティルト角が、すべて同じである、請求項1に記載の干渉計。

【請求項8】

前記第1干渉ビームおよび第2干渉ビームが前記第1媒体を等しい距離伝播して、前記

10

20

20

30

40

50

第1干渉ビームおよび第2干渉ビームに等しい位相シフトが生じる、請求項7に記載の干渉計。

【請求項9】

前記第1区分は前記第2の表面を含み、前記第1の表面は、前記第2干渉ビームが前記第1区分内で内部反射するように、前記第1区分の前記第2の表面に対向して配置されている。

請求項7に記載の干渉計。

【請求項10】

前記第1のミラーの一部が部分的な内部反射器として機能するように、前記第1のミラーが前記第2の表面に形成されている。10

請求項9に記載の干渉計。

【請求項11】

前記第2の表面は、さらに、前記干渉パターンを、前記第2の表面と前記第1の表面との間の前記第1媒体内での完全内部反射を介して前記検出器に導く、請求項9に記載の干渉計。

【請求項12】

前記第2の表面は、前記干渉パターンを受け取って前記検出器に向かわせるよう光学的に結合している、請求項9に記載の干渉計。

【請求項13】

前記第1の干渉計アームは、さらに、前記第2媒体のエリアにより前記第1区分から分離された前記第1媒体の第3区分を持ち、該第3区分は前記第2の表面を持ち、かつ、20

前記第1区分は、さらに、前記付加的な表面の一つを含み、前記付加的な表面の当該一つは、前記第1の表面と対向し、前記第1干渉ビームを前記第2の表面へ導く、

請求項7に記載の干渉計。

【請求項14】

前記第1の表面が入射ビームの入力スポットのサイズに等しいサイズを持ち、前記第1区分の厚みが該第1の表面に面する不所望の反射ビームを最小にするよう調整されている、請求項7に記載の干渉計。

【請求項15】

前記第1のミラーが前記第1干渉ビームに垂直な角度で配置され、前記第2のミラーが前記第2干渉ビームに垂直な角度で配置されている、請求項1に記載の干渉計。30

【請求項16】

前記ビームスプリッタが、前記第1媒体と第2媒体との間の界面を形成する一つの反射、屈折表面からなり、

前記第1干渉ビームが、前記一つの反射、屈折表面から前記入射ビームが一部屈折して生成され、

前記第2干渉ビームが、前記一つの反射、屈折表面から前記入射ビームが一部反射されて生成される、請求項1に記載の干渉計。

【請求項17】

前記第1および第2のミラーの少なくとも一つが金属ミラーである、請求項1に記載の干渉計。40

【請求項18】

前記アクチュエータに結合された前記第1および第2のミラーの一方が可動ミラーであり、他方が固定ミラーである、請求項1に記載の干渉計。

【請求項19】

前記ビームスプリッタに入射ビームを提供するよう光結合した入力ファイバ溝と、前記検出器に前記干渉パターンを提供するよう光結合した出力ファイバ溝と、をさらに備える、請求項1に記載の干渉計。

【請求項20】

前記干渉計がフーリエ変換紫外線分光(FTIR)分光計として使用される、請求項150

に記載の干渉計。

【請求項 2 1】

前記第 1、第 2、第 3 の表面、及び前記付加的な表面を含む各表面がそれぞれのビーム伝播方向に垂直ではない通常の調整状態において、前記付加的な表面の少なくとも一つの平面と対応するビームの伝播方向との間の角度が、前記第 1 のミラーで反射された前記第 1 干渉ビームと前記第 2 のミラーで反射された前記第 2 干渉ビームとの間の角度およびその波長依存性を最小にするよう設計されている、請求項 1 に記載の干渉計。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0 0 0 1】

10

この発明は概して分光学および干渉学に関し、特に光学的分光計（スペクトロメータ）におけるマイクロ電子機械システム（Micro Electro-Mechanical System, MEMS）の使用に関する。

【背景技術】

【0 0 0 2】

マイクロ電子機械システム（MEMS）とは、機械素子、センサ、アクチュエータおよび典型的には微細加工技術によって共通のシリコン基板に設けられたエレクトロニクスの統合をいう。例えば、マイクロエレクトロニクスは、典型的には集積回路（I C）プロセスを使って製造され、マイクロメカニカル部品は、シリコンウェハの一部を選択的にエッティングして取り除き新しい構造層を加えて機械的なおよび電子機械的な部品を形成する微細加工プロセスを使って製造される。MEMS デバイスは、その低コスト、バッチ処理可能性、および標準的なマイクロエレクトロニクスとの互換性により、分光学、プロフィロメトリ（形状測定法）、環境センシング、屈折率測定（材料認識）その他のセンサ分野での使用する魅力的な候補である。さらに、MEMS デバイスはサイズが小さいので、移動（モバイル）デバイスおよび手持ち式デバイスに容易に統合することができる。

20

【0 0 0 3】

さらに MEMS 技術は、その多数の作動技法により、光同調およびダイナミックセンシング応用のような光デバイスの新しい機能および特徴の実現を可能にする。たとえば、MEMS 作動（静電的、磁気的または熱的）を使用してマイケルソン干渉計の可動ミラーを制御することによって、干渉計の光路長に小さな変位を導入することができ、したがって、干渉ビーム間の位相差を得ることができる。得られた位相差は干渉計ビームのスペクトル応答（たとえば、フーリエ変換分光学を使う）、動いているミラーの速度（たとえば、ドップラー効果を使う）を測定するのに使うことができ、または単に光位相遅延素子として使うことができる。

30

【0 0 0 4】

MEMS に基づく分光計では、ビーム分割は典型的にはシリコン（Si）またはガラスの薄い壁を使って行われる。たとえば、ビームスプリッタは、シリコン壁または単に空気

シリコン（または他の材料）の界面（インターフェイス）であることができる。このような構造は、完全な集積性という利点をもち、ミラーおよびビームスプリッタすべてが一つの自己位置合わせされたリソグラフィステップで製造され、他の素子の追加的なアセンブリを必要としない。しかし、そのような構造においては、光ビームが典型的には一つのアームにおいてシリコンを通り、第 2 のアームにはシリコンがない（すなわち、空气中だけを伝播する）。シリコン（またはビームスプリッタ用のその他の同等な材料）は波長によって変化する屈折率をもつので、干渉計に位相誤差（すなわち、波長に依存する位相シフト）が導入されることにより分散が生じ得る。

40

【0 0 0 5】

この位相誤差を克服するためには簡単なコサイン変換ではなく複雑なフーリエ変換（FT）が必要とされる。実際上、複雑な FT は、ミラーがそのゼロ光路差位置に関し正および負の方向に動くことを必要とする。したがって、ミラーが距離 L を動くためには、波長解像度は $L / 2$ のミラー変位だけによって決められる。しかし、MEMS 技術でのミラー

50

の動きは、ミラーを駆動するのに使われるアクチュエータのフル移動範囲によって通常制限される。したがって、位相誤差の訂正による移動範囲のロスは、結果として得られる分光計の波長解像度を制限する。

【0006】

現存のMEMSに基づく分光計のもう一つの問題は、製造プロセスそのものからくるものである。多くのMEMSベースの分光計は、絶縁体上シリコン(Silicon on Insulator、SOI)ウェハに深反応性イオンエッチング(Deep Reactive Ion Etching、DRIE)技術を使用して光ミラーおよびビームスプリッタを形成する。DRIEは、簡単なリソグラフィプロセスを使って異なる部品(コンポーネント)を集積化することを可能にするが、干渉計の光ミラーおよびビームスプリッタを形成するのに使った壁の融通性が低いという難点がある。例えば、DRIE技術では壁の垂直性についての従来技術は、基板に垂直な線に関して0.5度のオーダーにあり、これは干渉測定システムでは大きいと考えられている。典型的には、右許容可能な垂直角度(ティルト角)は数ミリラジアン(<0.1度)のオーダーである。大きなティルト角は視認性の低下および構造体の挿入口スの増加を招くので、このことはDRIEベースの分光計にとって障害となる。さらに、大きなティルト角は、干渉計の波長精度および解像度にも影響する。さらに、ビームスプリッタと2つの作動ミラーとの間には本来的なずれがあるので、入力ビームの位置合わせによって大きなティルト角を避けることはできない。

10

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

20

【0007】

したがって、分光計(スペクトロメータ、分光器)のバランスのとれた構造に対する必要性があり、ミラーおよびビームスプリッタを作るのに使われるDRIEプロセスにおけるティルト角または垂直性が両方のアームにおいて補償され、一つのアームにおける分散が第2のアームにおける類似の分散によってバランスされることが望まれる。

【課題を解決するための手段】

【0008】

この発明の実施例は、垂直性および分散の問題を解決するためバランス界面を使うマイクロメカニカルシステム(MEMS)干渉計を提供する。MEMS干渉計は、第1媒体の第1表面上で第1媒体と第2媒体との界面に形成されたビームスプリッタ、第1媒体の第2表面に形成された第1のミラー、第1媒体の第3表面上に形成された第2のミラー、およびバランス界面を有する。

30

【0009】

ビームスプリッタは、入射ビームを受け取り、第1媒体中を伝播する第1干渉ビームおよび第2媒体中を伝播する第2干渉ビームに分割するよう、光学的に結合されている。第1のミラーが第1干渉ビームを受け取り第1干渉ビームを反射して第1の反射した干渉ビームを生成するよう光学的に結合しており、第2のミラーが第2干渉ビームを受け取り、第2干渉ビームを反射して第2の反射した干渉ビームを生成するよう結合されている。第1干渉ビームおよび第2干渉ビームのそれぞれの光路にバランス界面があり、ティルト角の相違および位相誤差の相違を最小にする。

40

【0010】

例示的な実施例では、第1の反射した干渉ビームおよび第2の反射した干渉ビームの間の干渉の結果として生成される干渉パターンを検出するよう、検出器が工学的に結合されており、第1のミラーおよび第2のミラーの一つにアクチュエータが結合されていて、その変位を生じさせる。この変位は、第1の反射した干渉ビームおよび第2の反射した干渉ビームの間に変位の2倍の光路長差を生成する。

【図面の簡単な説明】

【0011】

【図1A】深反応性イオンエッチング(DRIE)を使って形成される構造体の典型的なプロファイルの描画的な図。

50

【図1B】あるティルト角をもつ直線プロファイルによって近似した図1Aのエッチングプロファイルを示す描画的な図。

【図2A】分光計の分散のない例示的な干渉写真（インターフェログラム）。

【図2B】分光計の分散のある例示的な干渉写真。

【図3A】この発明の実施例による例示的な補償されたMEMS分光計を示す図。

【図3B】この発明の実施例による例示的な補償されたMEMS分光計を示す図。

【図4】この発明の実施例による補償されたMEMS分光計のコンポーネントの位置づけの例を示す図。

【図5】この発明の実施例によるビームスプリッタの例示的なデザインを示す図。

【図6A】この発明の実施例によるもう一つの例示的な補償されたMEMS分光計構造を示す図。 10

【図6B】この発明の実施例によるさらにもう一つの例示的な補償されたMEMS分光計構造を示す図。

【図7】この発明による例示的な部分的に補償されたMEMS分光計構造を示す図。

【図8】この発明の実施例によるもう一つの例示的な部分的に補償されたMEMS分光計構造を示す図。

【図9A】この発明の実施例による補償されたMEMS分光計を製造する例示的な製造工程を示す図。

【図9B】この発明の実施例による補償されたMEMS分光計を製造する例示的な製造工程を示す図。 20

【図9C】この発明の実施例による補償されたMEMS分光計を製造する例示的な製造工程を示す図。

【図9D】この発明の実施例による補償されたMEMS分光計を製造する例示的な製造工程を示す図。

【図9E】この発明の実施例による補償されたMEMS分光計を製造する例示的な製造工程を示す図。

【図9F】この発明の実施例による補償されたMEMS分光計を製造する例示的な製造工程を示す図。

【図9G】この発明の実施例による補償されたMEMS分光計を製造する例示的な製造工程を示す図。 30

【図9H】この発明の実施例による補償されたMEMS分光計を製造する例示的な製造工程を示す図。

【図9I】この発明の実施例による補償されたMEMS分光計を製造する例示的な製造工程を示す図。

【図9J】この発明の実施例による補償されたMEMS分光計を製造する例示的な製造工程を示す図。

【発明を実施するための形態】

【0012】

DRIE技術では、シリコン（および同様に最も一般的な材料）に深い溝（トレーナー）をエッチングすることはある垂直性誤差を通常伴い、これは、深さによるエッチングレート（速度）の変化により垂直面は100%垂直ではないことを意味する。たとえば、DRIEを使ったシリコン（Si）の典型的なエッチングプロファイルを図1Aに示す。このプロファイルは、図1Bに示すあるティルト角 θ をもつ直線プロファイルで近似することができる。垂直な点線に関し小さな角度 θ の面が、この技術によって製造される分光計/干渉計に使用されるミラーまたはビームスプリッタの面を表す。 40

【0013】

溝（トレーナー）の底のオーバーエッチングは、同じ技術パラメータで製造する構造のすべてにおいて同じ方向を持つ。その結果、DRIEを使用して分光計/干渉計を作るとき、作られるミラーおよびビームスプリッタの表面は垂直方向に対しある固定の角度を持つ。しかし、この角度は、いくつかの面では正で他の面では負なので、入力ビームの位置合 50

わせによって補償することはできない。その結果、分光計/干渉計からの出力ビームは、それらの間に角度（よりずっと大きい）を持ち、分光計から得られる出力縞に有意な視認性低下が生じる。

【0014】

さらに従来のMEMSベースの干渉計においては、一つのアームのビームがシリコン（または他の材料）を通り、第2のアームにおけるビームが典型的には空気を通り、Si材料は（他の材料と同様に）波長とともに変化する屈折率を持ち得るので、分光計出力で得られる信号に位相誤差が導入され得る。したがって、DC成分を取り除いた後の信号は、次の式1のようになるのではなく、出力信号は、式2のようになる。

【数1】

10

$$I(x) = 2 \int_0^{\infty} B(\sigma) \cos 2\pi x \sigma d\sigma, \quad (\text{式1})$$

【数2】

$$I(x) = \int_{-\infty}^{\infty} B(\sigma) \cos[2\pi x \sigma + \phi(\sigma)] d\sigma, \quad (\text{式2})$$

【0015】

20

ここで、B()は波数の関数として測定される照射のスペクトル分布であり、は光路差であり、位相誤差（）が分光計に存在する。

【0016】

B()は負の周波数を含むよう拡張することができるので、実の物理的スペクトラムを想定すると、B()=B(-)となる。こうして、分散のないMEMSベースの分光計では、出力信号は次の式で表すことができる。

【数3】

$$I(x) = \int_{-\infty}^{\infty} B(\sigma) \cos 2\pi x \sigma d\sigma, \quad (\text{式3})$$

30

【0017】

簡単なフーリエコサイン変換は、次の形のスペクトルを与えるに十分である。

【数4】

$$B(\sigma) = 2 \int_0^{\infty} I(x) \cos 2\pi x \sigma dx. \quad (\text{式4})$$

【0018】

しかし、分光計が分散効果を受けると、スペクトルは複雑なフーリエ変換だけから得ることになる。（）=-（-）であるならば、B()ej（）はI()の複雑なフーリエ変換であり、次の式で表される。

【数5】

40

$$B(\sigma) e^{j\phi(\sigma)} = J(\sigma) = \int_{-\infty}^{\infty} I(x) e^{-2j\pi x \sigma} dx \quad (\text{式5})$$

【0019】

こうしてスペクトルは、（2サイドの）サインおよびコサイン積分の二乗の和の平方根で与えられる。

【数6】

$$B(\sigma) = |J(\sigma)| = [J_r^2(\sigma) + J_i^2(\sigma)]^{1/2}, \quad (\text{式6})$$

ここで、 $J_r(\)$ および $J_i(\)$ は $J(\)$ の実部および虚部である。しかし、そのような技術は、ミラーを正および負の方向に動かすことを必要とし、これは、所与の解像度を得るためにフーリエ変換が倍にされねばならないことを意味する。この問題を示すため、図2 Aが分散なしのマイケルソン干渉計の干渉を示し、図2 Bが分散ありのマイケルソン干渉計の干渉を示す。図2 Aおよび2 Bから、材料分散により干渉が広い光路差（またはミラー変位）にわたることがわかる。

10

【0020】

この発明の実施例によると、マイクロ・エレクトロメカニカル・システム（MEMS）分光計/干渉計について均衡した構造が使用され、ミラーおよびビームスプリッタ壁を作るのに使われるDRIEプロセスにおけるティルト角または垂直性が両アームにおいて補償され、一つのアームにおける分散が第2のアームにおける分散とバランスする。例示的な実施例は幾何的なバランス界面を使い、光干渉計の2つのアームが実質的に同じ垂直性のミラーおよびビームスプリッタを持つことができるようにして、これにより分光計出力に得られる縞の視認性を改善させ、挿入ロスを低減しスループットを増大させ分光計の解像度を改善する。もう一つの例示的実施例では、バランス界面が分光計の2つのアームの間のバランスをとり、一つのアームに存在する波長依存の位相シフトが第2のアームに導入され分光計における分散を補償する。

20

【0021】

図3 Aおよび3 Bは、この発明の実施例による例示的な補償されたMEMSベースの分光計構造10を示す。補償されたMEMSベースの分光計10は、たとえばフーリエ変換紫外線（FTIR）干渉計であることができる。分光計10はMEMSで作動される可動ミラーを許容するSOIウェハで実現される。

【0022】

図3 Aおよび3 Bにおいて、光源20が入射光ビームL1を生成し、これが入力ファイバ溝25を通って補償されたMEMSベースの分光計10に入る。入射ビームL1は入力ファイバ溝25を通って、第1媒体（すなわち、シリコン（Si）40）と第2媒体（すなわち、空気45）との界面に形成される半平面ビームスプリッタ30に至る。シリコン/空気界面ビームスプリッタ30は入射ビームからある角度（たとえば、45度）で配置されている。所望の角度は、入力ファイバ溝25近くのシリコン媒体40の面S3をリソグラフ的に規定することにより生成される。

30

【0023】

半平面ビームスプリッタ30に衝突すると、入射ビームL1は2つの干渉ビームL2およびL4に分割される。L2は、シリコン/空気半平面ビームスプリッタ30からの入射ビームL1の部分反射から生じ、ビームの入射角に等しい反射角を持つ。L4はシリコン/空気半平面ビームスプリッタ30を通る入射ビームL1の部分伝播から生じ、ある屈折角（スネルの法則によって決まる）でシリコン40の中を伝播する。その結果、L2がミラーM1に向かって空気45中を伝播し、L4がミラーM2に向かってシリコン40中を伝播する。

40

【0024】

ミラーM1はシリコン媒体40のもう一つの面S5上にビームL2に垂直な角度で形成されている。特にミラーM1は、L2がシリコン40の面S1に衝突するまでまず空気40を通って伝播し、次いでシリコン媒体40を通って伝播してミラーM1に到達するよう、L2の伝播の方向に関して位置づけられている。同様にミラーM2は、シリコン媒体40のもう一つの面S4上にビームL4に垂直な角度で形成されている。しかし、M2は、L4がシリコン媒体40の面S2に達するまでまずシリコン40を通って伝播し、次いで空気45を介して伝播しミラーM2に到達するよう、L4の伝播方向に関して位置づけら

50

れている。ビーム L 2 は、ミラー M 1 で反射され反射ビーム L 3 を生成し、ビーム L 4 は、ミラー M 2 で反射され反射ビーム L 5 を生成する。図 3 A に示すように、それぞれミラー M 1 および M 2 から反射した後、両ビーム L 3 および L 5 は半平面ビームスプリッタ 30 に向かって、それぞれ L 2 および L 4 と同じ光路をとる（反対方向に）。こうして、分光計/干渉計がフーリエ変換（F T）分光計として使用される実施例では、一つの干渉計アームがビーム L 2 / L 3 によって形成され、ビームスプリッタ 30 およびミラー M 1 を含み、もう一つの干渉計アームがビーム L 4 / L 5 で形成され、ミラー M 2 を含む。

【 0 0 2 5 】

ビームスプリッタ 30 で干渉がはじまり、干渉パターン L 6 が反射ビーム L 3 および L 5 から生成される。干渉パターン L 6 は出力ファイバ溝 50 を介して出力され検出平面（検出器）60 によって検出される。一つの実施例では、検出器 60 は、光検出器を含み、これは、基板の表面を微細加工する（たとえば、基板の表面をエッチングして光り検出器を配置する開口を実現する）ことによって組み立てられるか、またはドーピング（たとえば、P I N ダイオードを実現するため）または部分的なメタライゼーション（たとえば、金属 半導体 金属 MSM 光検出器を実現するため）を介して基板内にモノリシック的に実現される。

【 0 0 2 6 】

図 3 A に示す例示的な実施例では、ミラー M 1 は SOI 静電 MEMS アクチュエータ 70 を使って可動であり、図 3 B ではミラー M 2 が静電 MEMS アクチュエータ 70 を使用して可動である。たとえば、一つの実施例では、静電 MEMS アクチュエータ 70 は、くし形ドライブおよびばねで形成されている。キャパシタンスを有するくし形ドライブに電圧を加えることにより、アクチュエータ 70 に電位差が生じて駆動力が発生するとともにばねから復元力が発生し、ビーム L 2 または L 4 を反射させる所望の位置への可動ミラー M 1 または M 2 の変位を生じさせる。ミラー M 1 または M 2 のどちらが可動であろうと、ミラー変位の 2 倍に実質的に等しい L 3 、 L 5 間の光路長差を達成することができる。

【 0 0 2 7 】

一つの実施例では、ミラー M 1 および M 2 が金属ミラーであり、ビームスプリッタを保護するために選択的メタライゼーション（たとえば、メタライゼーションステップ中にシャドウマスクを使用する）が使われる。もう一つの実施例では、小さなフットプリント分光計を得るために非金属の垂直ブレーディング（Bragg）ミラーが使用される。ブレーディングミラーは、深反応性イオンエッチング（D R I E）を使って連続的な垂直シリコン/空気界面を生成することにより実現することができる。さらに、ブレーディングミラーは、簡単な反射器として作用するために広いスペクトル反射応答を持つように設計することができ、または応用によっては波長選択応答を持つように設計することができる。

【 0 0 2 8 】

ビームスプリッタとしてシリコン/空気界面を説明したが、半波平面ビームスプリッタを提供するその他の材料を使ってこの発明を実現することができる。たとえば、他の例示的実施例では、微細加工のまたは組み立てられたガラス半平面またはパイレックス（Pyrex）のようなその他の材料をシリコンの代わりに使いより広い動作スペクトルウィンドウをつくることができる。さらに、液体または異なるガスのような他の材料を空気の代わりに使い、半平面ビーム分割界面の反射率を修正する自由度を提供することができる。

【 0 0 2 9 】

使用する材料のタイプに拘わらず、2つのビーム L 2 / L 3 および L 4 / L 5 は第 1 の媒体 40 および第 2 の媒体 45 の両方を通るので、構造の寸法は、2つのビーム L 2 / L 3 および L 4 / L 5 が媒体（シリコン 40）中で等距離を通りよう調整することができる。これにより、干渉計の機能性において材料（すなわち S i）の分散を実質的に完全に補償することができる。等しく2つの光路に位相誤差が導入されるからである。

【 0 0 3 0 】

たとえば、図 4 に示すようにミラー M 1 をシリコン 40 の表面 S 5 に形成し、ミラー M 2 をシリコン 40 の表面 S 4 に形成すると、ビーム L 2 / L 3 はシリコン 40 の距離 d 1

10

20

30

40

50

(すなわち、ある厚み)を通り、ビーム L 4 / L 5 はシリコン 4 0 の距離 d 2 (すなわち、ある厚み)を通る。この発明の実施例では、シリコン中のビーム分散を補償するために d 1 が実質的に d 2 に等しい(すなわち、d1=d2)。こうして、表面 S 3 / S 2 / S 4 および表面 S 3 / S 1 / S 5 がバランスする界面を形成し、ビーム L 3 と L 5 との間のそれぞれの位相誤差における相違を最小にする設計となる。

【0031】

さらに、図 4 に示すように、ビームスプリッタ 3 0 および 2 つのミラー M 1 および M 2 は、それぞれ実質的に同じ方向に実質的に同じ垂直性(ティルト角)を持つ。したがって、D R I E 技術における垂直誤差または存在するティルト角に拘わらず、分光計の実効表面 S 2、S 4 および S 5 のすべてが平行である。したがって、表面 S 3 / S 2 / S 4 および表面 S 3 / S 1 / S 5 によって形成されるバランス界面が実効表面間のティルト角の相違をも最小化する。分光計/干渉計における 2 つの他の表面 S 1 および S 2 からの反射は、表面 S 1 および S 2 の方向付けを使って避けることができ、表面 S 1 および S 2 から反射されたビームが異なる方向に向くようになる。しかし、表面 S 1 および S 2 は、分光計/干渉計 1 0 の挿入口スを増大させ得る。この挿入口スを低減するために表面 S 1 および S 2 がビーム L 1 および L 2 にそれぞれ直角になるようフォトリソグラフ的に規定するか、反射防止(A R)コーティングを行うことができる。

【0032】

さらに、誘電体界面からの伝播角が波長に依存することから生じる 2 つの反射したビーム L 3 と L 5 との間の角度を最小にするよう、表面 S 1 および S 2 の方向を設計することができる。角度分散は、表面 S 1 および S 2 の方向を調整して、動作レンジにおけるすべての波長が 2 つの反射ビーム L 3 と L 5 との間でほぼ同じ角度を持つようにすることにより最小にすることができる。こうして、干渉計スペクトル応答は視認性および挿入口スの点でよりよい均一性を持つ。

【0033】

例示的実施例では、シリコン媒体 4 0 の表面 S 2 は、ビームスプリッタ 3 0 と平行であるかまたはある角度を持つことがある。S 2 がビームスプリッタ表面 S 3 と平行であるならば、S 2 とビームスプリッタ表面 S 3 との間のファブリ・ペロー(Fabry-Perot)効果は、ビームスプリッタ 3 0 の表面を入射ビーム L 1 の入力スポットのサイズ 7 0 に制限し、ビームスプリッタ表面 S 3 と S 2 との間の分離を調整して、図 5 に示すように表面 S 2 からの反射ビームがビームスプリッタ表面 S 3 に面しないようにすることにより解消することができる。図 5において、表面 S 2 からの反射ビーム L 7 はビームスプリッタ表面 S 3 に面しないので、ファブリ・ペロー効果は実質的に解消される。

【0034】

図 6 A および 6 B を参照すると、表面 S 2 は検出器 6 0 への出力方向付けのための界面としても使用することができる。たとえば、図 6 A および 6 B に示されるように、干渉パターン L 6 が表面 S 2 によって検出器 6 0 に向けられることができる。図 6 A および 6 B では、検出器はミラー M 2 の近くに配置されており、干渉パターン L 6 が表面 S 2 で検出器 6 0 に向けて屈折してミラー M 2 からは遠ざかる。この構造は、ミラー M 1 が可動か(図 6 A に示すように)、M 2 が可動(図 6 B に示すように)とすることにより可能である。

【0035】

例示的な動作では、入射ビーム L 1 が補償された M E M S ベースの分光計 1 0 に入力ファイバ溝 2 5 を通って入り、表面 S 3 に形成された半平面ビームスプリッタ 3 0 に達するまで入力ファイバ溝 2 5 を通って伝播する。半平面ビームスプリッタ 3 0 に衝突すると、入射ビーム L 1 は、2 つの干渉ビーム L 2 および L 4 に分割される。L 2 がミラー M 1 に向かって空気中を伝播し、L 4 がミラー M 2 に向かってシリコン 4 0 の中を伝播する。特に L 2 はシリコン 4 0 の表面 S 1 に衝突するまでまず空気 4 0 中を伝播し、次いでシリコン媒体 4 0 を伝播し、ミラー M 1 に達する。L 4 は、シリコン媒体 4 0 の表面 S 2 に達するまでまずシリコン 4 0 を伝播し、次いで空気 4 5 を伝播してミラー M 2 に達する。

10

20

30

40

50

【 0 0 3 6 】

ビーム L 2 がミラー M 1 で反射して反射ビーム L 3 を生成し、ビーム L 3 がミラー M 2 で反射して反射ビーム L 5 を生成する。ビーム L 3 および L 5 はそれぞれミラー M 1 および M 2 から反射した後に両方とも同じ光路（反対方向に）をとり、半平面ビームスプリッタ 3 0 に向けてどる。反射ビーム L 3 および L 5 がビームスプリッタ 3 0 で干渉した結果として生成される干渉パターン L 6 がシリコン 4 0 を伝播し表面 S 2 に達し、検出器 6 0 に向けて屈折する。

【 0 0 3 7 】

図 7 は、垂直性および分散問題の部分的な補償をもたらす MEMS ベースの分光計 1 0 のためのもう一つの構造を示す。さらに図 7 の構造は、表面 S 1 および S 2 から生成される挿入口スを図 3 A および 3 B の構造に比較して低減する。たとえば、図 7 において、ミラー M 2 のメタライゼーションが取り除かれ、表面 S 2 が不完全な反射器として使われ（すなわち、シリコン 4 0 と空気 4 5 との間の屈折率の相違を使用し）実効的ミラー M 2 となる。この構造では、2つの厚み（図 4 に示す d 1 および d 2 ）は、空気伝播に対応する位相シフトを許容するように等しくなくてよく、したがって部分的な分散補償しか生成しない。さらに、2つのミラー M 1 および M 2 は完全には平行でなく（すなわち、ティルト角が異なる方向を向いている）、不完全なティルト角補償しか生成しない。

【 0 0 3 8 】

例示的な動作において、入射ビーム L 1 が一部補償された MEMS ベースの分光計 1 0 に入力ファイバ溝 2 5 を通って入り、入力ファイバ溝 2 5 を伝播して表面 S 3 に形成された半平面ビームスプリッタ 3 0 に達する。半平面ビームスプリッタ 3 0 に衝突すると、入射ビーム L 1 は2つの干渉ビーム L 2 および L 4 に分割される。L 2 が空気 4 5 中をミラー M 1 に向かって伝播し、L 4 がシリコン 4 0 中を表面 / ミラー S 2 / M 2 向かって伝播する。特に、L 2 はまず空気 4 5 中をシリコン 4 0 の表面 S 1 に衝突するまで伝播し、次いでシリコン媒体 4 0 を伝播してミラー M 1 に達する。L 4 はシリコン 4 0 を伝播してシリコン媒体 4 0 の表面 / ミラー S 2 / M 2 に達する。

【 0 0 3 9 】

ビーム L 2 がミラー M 1 で反射されて反射ビーム L 3 を生成し、ビーム L 4 が表面 / ミラー S 2 / M 2 で反射されて反射ビーム L 5 を生成する。ビーム L 3 および L 5 は、反射された後、両方とも同じ光路（反対方向に）をとり、半平面ビームスプリッタ 3 0 に向かう。反射ビーム L 3 および L 5 がビームスプリッタ 3 0 で干渉して生成される干渉パターン L 6 がシリコン 4 0 を伝播して出力ファイバ溝 5 0 を介して検出器 6 0 に向けて出力される。

【 0 0 4 0 】

次に図 8 を参照すると、もう一つの一部補償された MEMS ベースの分光計 1 0 が示されている。図 8 において、表面 S 2 は部分的反射器（S 2 / M 2）として作用するだけでなく、干渉パターン L 6 を表面 S 2 と S 3 との間の完全内部反射を介して検出器に導く。

【 0 0 4 1 】

例示的な動作において、入射ビーム L 1 が入力ファイバ溝 2 5 を介して一部補償された MEMS ベースの分光計 1 0 に入り、入力ファイバ溝 2 5 を伝播して表面 S 3 に形成された半平面ビームスプリッタ 3 0 に達する。半平面ビームスプリッタ 3 0 に衝突すると、入射ビーム L 1 は2つの干渉ビーム L 2 および L 4 に分割される。L 2 が空気 4 5 中をミラー M 1 に向かって伝播し、L 4 がシリコン 4 0 を表面 / ミラー S 2 / M 2 向かって伝播する。特に、L 2 はまず空気 4 5 を伝播してシリコン 4 0 の表面 S 1 に衝突し、次いでシリコン媒体 4 0 を伝播してミラー M 1 に達する。L 4 はシリコン 4 0 を伝播してシリコン媒体 4 0 の表面 / ミラー S 2 / M 2 に達する。

【 0 0 4 2 】

ビーム L 2 がミラー M 1 で反射されて反射ビーム L 3 を生成し、ビーム L 4 が表面 / ミラー S 2 / M 2 で反射されて反射ビーム L 5 を生成する。ビーム L 3 および L 5 は、反射後、同じ光路を（反対方向に）とて半平面ビームスプリッタ 3 0 に向かう。ビーム L 3

10

20

30

40

50

およびL5がビームスプリッタ30で干渉して生成される干渉パターンL6がシリコン40を伝播して表面/ミラーS2/M2に達し、S3とS2との間の完全内部反射によって反射され、出力ファイバ溝50を介して検出器60に向けて出力される。

【0043】

補償されたMEMSベースの分光計の例示的な製造プロセスを図9A～9Iに示す。図9Aにおいて、アルミニウムのスパッタリング工程がSOIウェハ(層900～910)に行われてアルミニウム層915が形成され、この層は、図9Eに示すようにDRIEを使ってSOIウェハの頂部シリコン層910をエッチングするためのマスクとして機能する。図9Bにおいて、フォトレジスト材料920がアルミニウム層上にスピノフ被覆される。図9Cにおいて、ミラー、半平面ビームスプリッタ、ファイバ溝、検出器および静電アクチュエータを実現するためにリソグラフィ工程が実施される。フォトレジスト材料920におけるリソグラフィパターンが、図9Dに示すようにアルミニウム層のプラズマ塩素エッチングによってアルミニウムマスク915に移される。次いで図9E似示すようにSOIのエッチストップ層905に達するまで、DRIEをウェハに実施する。次いで、図9Fに示すように、Aluエッチを使用して残りのアルミニウムマスク915を取り除く。

【0044】

図9Iを参照すると、マイクロミラーおよび反射面の選択的メタライゼーションのためおよび接続パッド形成のために、シャドウマスク940が使用される。図9Iに見られるように、シャドウマスク940は、頂部のシリコン層910の所望の部分にCr/Au950を選択的にスパッタするために、SOI基板900～910の上方に配置される。ブレッギングミラー(Bragg mirror)のような非金属のミラーを使う実施例では、シャドウマスク工程は実施されず、パッドのメタライゼーションは、残りのプロセス工程で耐えられるだけ強いメタライゼーション厚みが得られるならば、はじめに実施することができる。図9Jに示されるように、くし形のフィンガー、ばね、および可動ミラーのような可動構造がHFを使って埋め込みSiO₂層をエッチングすることによって解放され、固定の構造は下のSiO₂が広い面積なので解放されない。くし形の駆動アクチュエータを説明したが、可動ミラーは相性のよい技術によって製造される任意のMEMSアクチュエータを使って作動させることができる。たとえば、アクチュエータは、同じマスクで同じ先の工程を使って分光計と共に製造することができる。

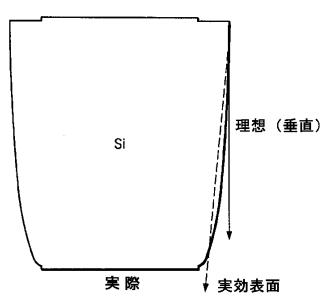
【0045】

DRIEエッチングにボッシュ(Bosch)プロセスを使用する実施例においては(図9E)、このプロセスの期間的な性質によりミラー面が荒くなることがある。したがって、図9Gに示すように、表面に厚い酸化層930を成長させ、次いで図9Hに示すようにHFによってこれを取り除き、構造を貴方する前にミラー面を滑らかにすることが有用である。しかし、高温度アニーリング、エッチングまたは酸化のような任意の使用可能な技法を使って光学表面の平滑化を行うことができることが理解されねばならない。低温のDRIEプロセスを図9Eにおいて使用するならば、エッチング後に滑らかな表面が得られるので、図9Gおよび9Hに示すプロセス工程は必要ないであろう。さらに、このプロセスは低温度においてフォトレジスト材料とシリコンとの間でよい選択性を持つので、図9Aに示すアルミニウムマスクは必要ない。

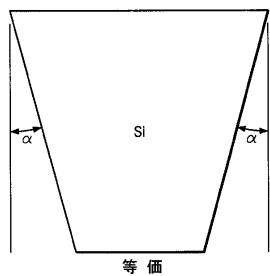
【0046】

当業者には明らかなように、この明細書に記載した革新的概念は、広いレンジの応用において修正市変更することができる。したがって、この発明の範囲は上述した特定の例示的な教示によって限定されてはならず、特許請求の範囲によって規定される。

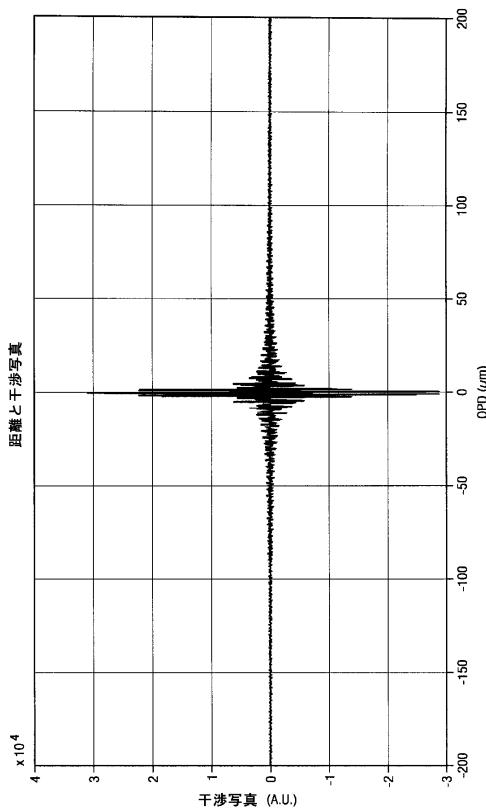
【図 1 A】



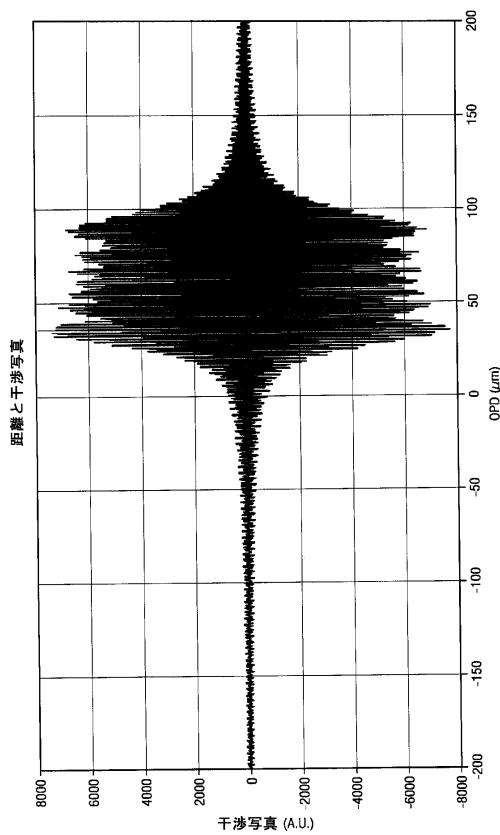
【図 1 B】



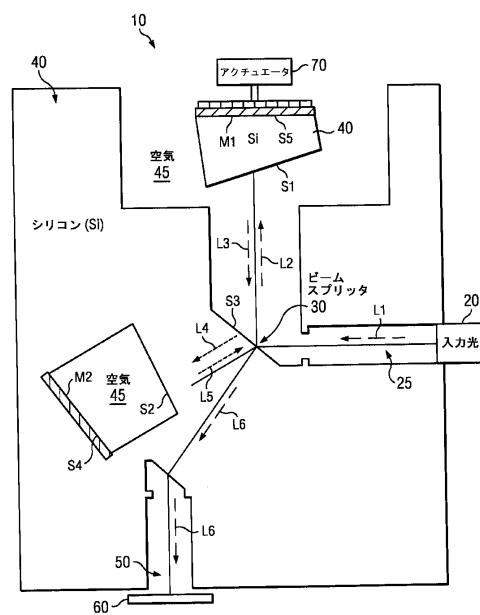
【図 2 A】



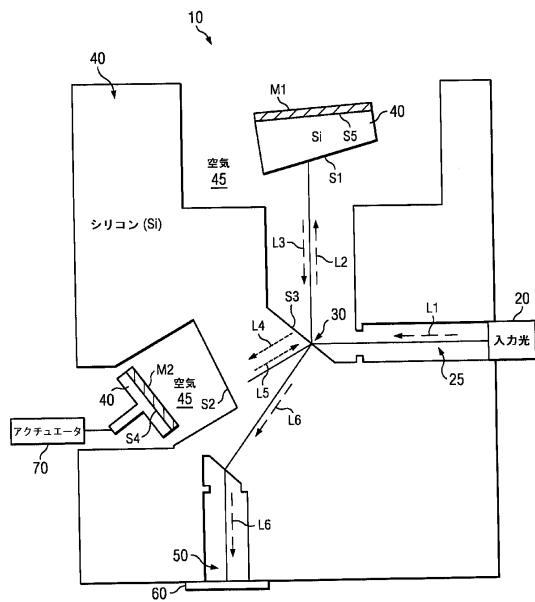
【図 2 B】



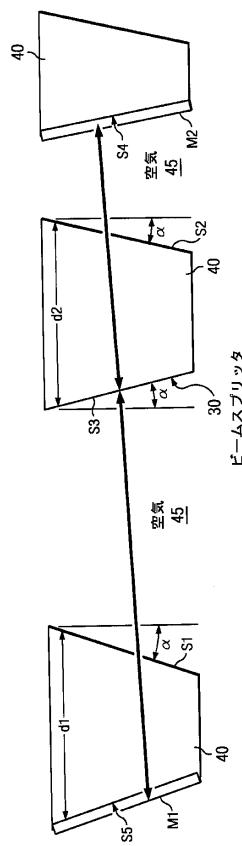
【図 3 A】



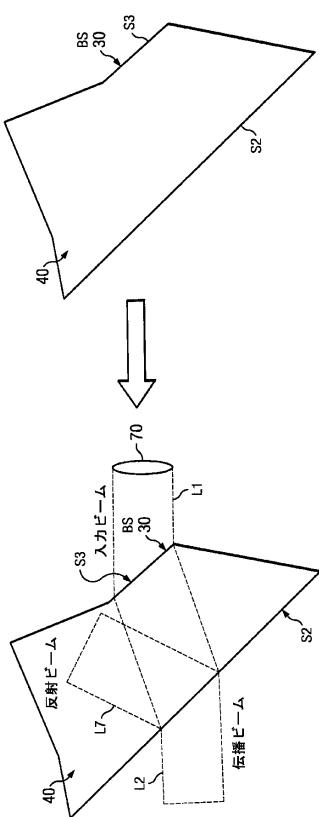
【図3B】



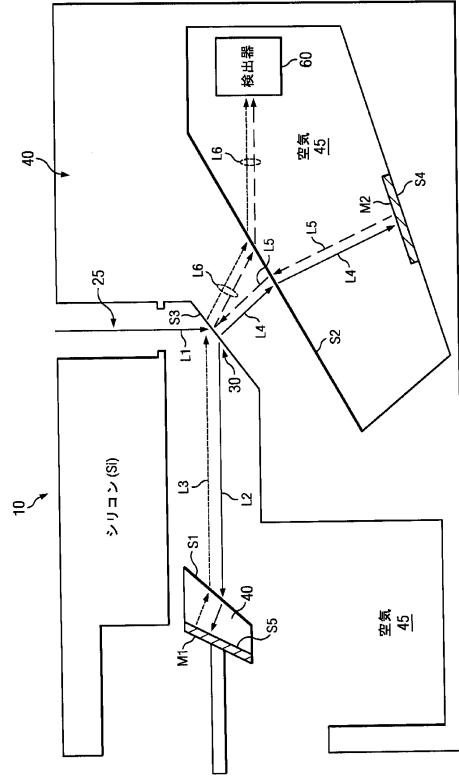
【図4】



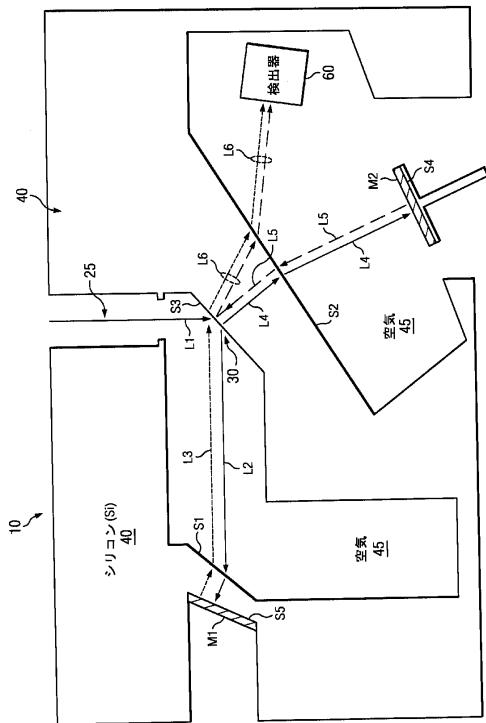
【図5】



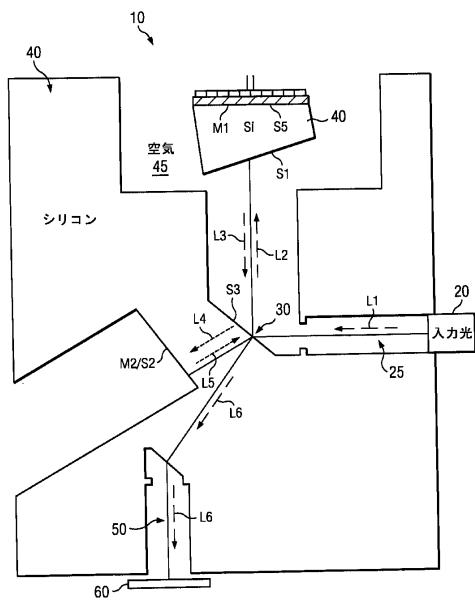
【図6A】



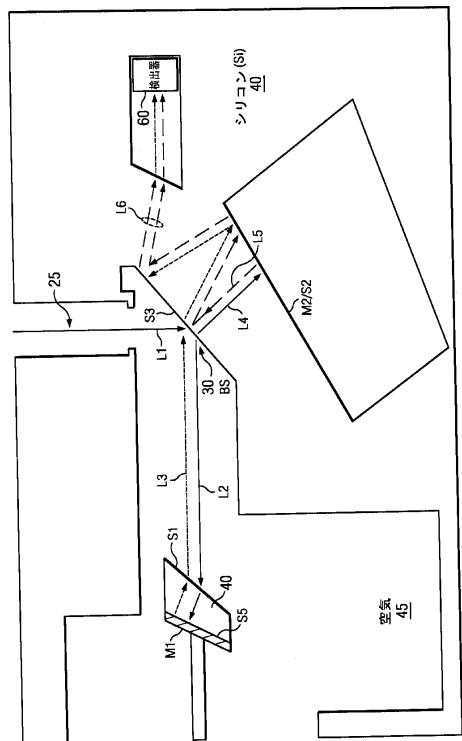
【図 6 B】



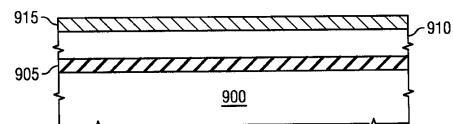
【図 7】



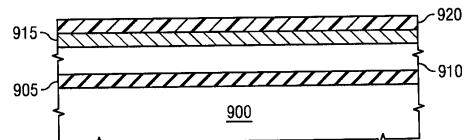
【図 8】



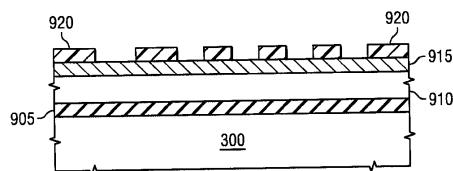
【図 9 A】



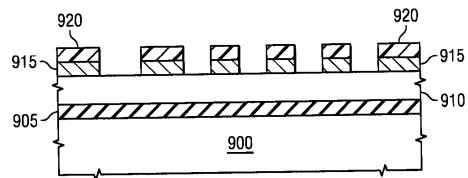
【図 9 B】



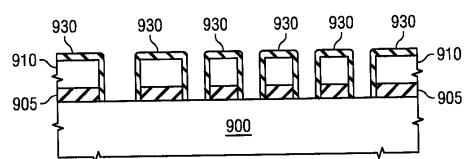
【図 9 C】



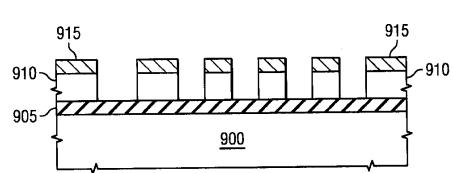
【図 9 D】



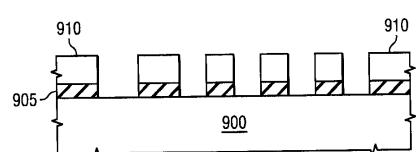
【図 9 G】



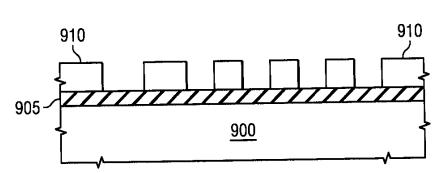
【図 9 E】



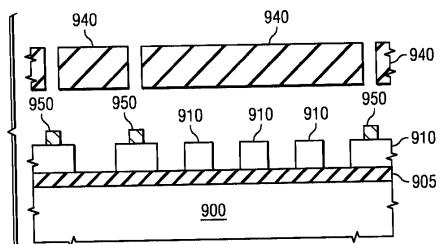
【図 9 H】



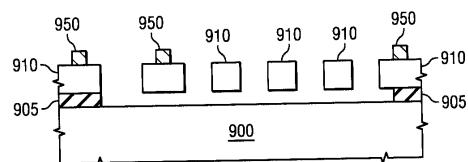
【図 9 F】



【図 9 I】



【図 9 J】



フロントページの続き

(72)発明者 モルタダ、バセム

エジプト国 11371 カイロ ナスル シティ イムテダッド ラムシス2 ストリート
292

(72)発明者 ナビル、モハメド

エジプト国 11371 カイロ テンス ディストリクト マディ アラファ ストリート 2
2

(72)発明者 メダット、モスタファ

エジプト国 11351 カイロ ヘリオポリス バガット ストリート 16

(72)発明者 サダニイ、バサム・エー

エジプト国 11371 カイロ ナスル シティ ゾーン 1 ゲハード ストリート 7

審査官 横尾 雅一

(56)参考文献 特開2008-102132(JP,A)

特開昭60-086520(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G 01 J	3 / 00 - 3 / 52
G 01 J	9 / 00 - 9 / 04
G 01 B	9 / 02
G 01 B	11 / 00 - 11 / 30
G 01 N	21 / 35
G 02 B	6 / 12
G 02 B	27 / 10
H 04 B	10 / 60