

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公表特許公報(A)

(11) 特許出願公表番号

特表2014-508317

(P2014-508317A)

(43) 公表日 平成26年4月3日(2014.4.3)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
<b>GO2B 5/08 (2006.01)</b>	GO2B 5/08 A	2H042
<b>GO2B 5/28 (2006.01)</b>	GO2B 5/08 C	2H148
<b>GO2B 5/10 (2006.01)</b>	GO2B 5/28	
	GO2B 5/10	

審査請求 有 予備審査請求 未請求 (全 14 頁)

(21) 出願番号 特願2013-549852 (P2013-549852)  
 (86) (22) 出願日 平成24年11月8日 (2012.11.8)  
 (85) 翻訳文提出日 平成25年5月10日 (2013.5.10)  
 (86) 国際出願番号 PCT/EP2012/072087  
 (87) 国際公開番号 WO2013/091986  
 (87) 国際公開日 平成25年6月27日 (2013.6.27)  
 (31) 優先権主張番号 11010091.4  
 (32) 優先日 平成23年12月22日 (2011.12.22)  
 (33) 優先権主張国 欧州特許庁 (EP)

(71) 出願人 513116829  
 マルクス アスペルマイアー  
 Markus ASPELMEYER  
 オーストリア共和国、2344 マリア  
 エンツァルスドルフ、マリアツェラー  
 シュトラッセ 8  
 Mariazellerstrasse  
 8, 2344 Maria Enzersdorf,  
 Austria

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 基板転移単結晶ブラッグミラー

(57) 【要約】

キャリア基板と、複数の第1タイプ及び第2タイプの交互式結晶性半導体層を含む結晶性スタックであって、第1タイプの層は第2タイプの層よりも高い屈折率を有し、それによりブラッグミラーを形成する結晶性スタックと、を備え、キャリア基板は、0.1mと10kmとの間の曲率半径を持って湾曲し、スタックは湾曲したキャリア基板に取り付けられるミラーアセンブリ。

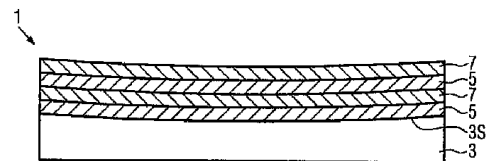


FIG. 1

## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

キャリア基板と、

複数の第 1 タイプ及び第 2 タイプの交互式結晶性半導体層を含む結晶性スタックであって、第 1 タイプの層は第 2 タイプの層よりも高い屈折率を有し、それによりブラッグミラーを形成する結晶性スタックと、を備え、

キャリア基板は、0.1 m と 10 m との間又は 1 km と 10 km との間の曲率半径 R O C を持って湾曲し、

結晶性スタックは、湾曲したキャリア基板に取り付けられる低吸収結晶性ミラーアセンブリ。

10

## 【請求項 2】

キャリア基板は透過的であり、とりわけ 1064 nm 又は 1550 nm の波長において透過的であり、キャリア基板の表面は磨かれている請求項 1 に記載のミラーアセンブリ。

## 【請求項 3】

キャリア基板は、SiO<sub>2</sub>、Si、サファイア、又は超低膨張ガラス U L E を含む請求項 1 又は 2 に記載のミラーアセンブリ。

## 【請求項 4】

ミラーの結晶性半導体層は、AlGaAs 三元合金に基づく単結晶エピタキシャル層であり、前記第 1 タイプ及び第 2 タイプは、Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As、ただし 0 < x < 1、を含み、第 1 タイプの層に関する x は第 2 タイプの層に関する x よりも小さい請求項 1 ~ 3 のいずれか一項に記載のミラーアセンブリ。

20

## 【請求項 5】

結晶性スタックは、ファンデルワールス力結合及び共有結合のうちの少なくとも一方によって、キャリア基板に取り付けられる請求項 1 ~ 4 のいずれか一項に記載のミラーアセンブリ。

## 【請求項 6】

低吸収結晶性ミラーアセンブリの製造方法であって、ミラーは、キャリア基板と、複数の第 1 タイプ及び第 2 タイプの交互式結晶性半導体層を含む結晶性スタックであって、第 1 タイプの層は第 2 タイプの層よりも高い屈折率を有する結晶性スタックと、を備え、キャリア基板は、0.1 m と 10 m との間又は 5 km と 10 km との間の曲率半径 R O C を持って湾曲する製造方法において、

30

第 1 の基板を準備するステップと、

キャリア基板を準備するステップと、

例えば分子線エピタキシー法 M B E や有機金属気相エピタキシー法 M O V P E によって、第 1 タイプ及び第 2 タイプの交互式結晶性半導体層の結晶性スタックをエピタキシャルに形成し、それによりブラッグミラーを形成するステップと、

第 1 の基板からスタックを分離するステップと、

湾曲するキャリア基板にスタックに取り付けるステップとを含む製造方法。

## 【請求項 7】

第 1 の基板は GaAs 又は Ge を含む請求項 6 に記載の製造方法。

40

## 【請求項 8】

キャリア基板は透過的であり、とりわけ 1064 nm 又は 1550 nm の波長において透過的であり、キャリア基板の表面は磨かれている請求項 6 又は 7 に記載の製造方法。

## 【請求項 9】

キャリア基板は、SiO<sub>2</sub>、Si、サファイア、又は超低膨張ガラス U L E を含む請求項 6 ~ 8 のいずれか一項に記載の製造方法。

## 【請求項 10】

結晶性半導体層は、AlGaAs 三元合金に基づく単結晶エピタキシャル層であり、前記第 1 タイプ及び第 2 タイプは、Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As、ただし 0 < x < 1、を含み、第 1 タイプの層に関する x は第 2 タイプの層に関する x よりも小さい請求項 6 ~ 9 のいずれ

50

か一項に記載の製造方法。

【請求項 1 1】

結晶性スタックは、化学 - 機械的基板除去プロセス又はエピタキシャルリフトオフプロセスを用いることで、第 1 の基板から分離される請求項 6 ~ 1 0 のいずれか一項に記載の製造方法。

【請求項 1 2】

スタックは、ファンデルワールス力結合及び共有結合のうち少なくとも一方によって、キャリア基板に取り付けられる請求項 6 ~ 1 1 のいずれか一項に記載の製造方法。

【請求項 1 3】

スタックはキャリア基板に結合され、当該結合はアニーリングによって強化される請求項 1 2 に記載の製造方法。

10

【請求項 1 4】

請求項 1 ~ 5 のいずれか一項に記載の 2 つのミラーアセンブリを備える光学精密測定用の光共振器であって、ミラーの反射面は所定距離で相互に向かい合い、0.1 m から 1 0 m の R O C に関し、所定の厚みを有するスペーサーが 2 つのミラーアセンブリの間に存在し、そのスペーサーは 2 つのミラー間に所定の距離を与える光学精密測定用の光共振器。

【請求項 1 5】

請求項 1 ~ 5 のいずれか一項に記載の 2 つのミラーアセンブリを含む光学精密測定用の光共振器であって、ミラーの反射面は所定距離で相互に向かい合い、1 km から 1 0 km の R O C に関し、各ミラーアセンブリは個別に支持される光学精密測定用の光共振器。

20

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0 0 0 1】

本発明は、湾曲したキャリア基板に結合される単結晶ブラッグミラー ( B r a g g m i r r o r ) に基づくミラーアセンブリ、そのミラーアセンブリの製造方法、及び光学精密測定システムでの適用のための光キャビティを形成するミラーアセンブリのペアを備える光共振器システムに関する。

【背景技術】

【0 0 0 2】

現在の最新鋭のマルチレイヤー ( 多層膜 ) ミラーは、誘電材の積み重ね ( スタック ) によって構成され、イオンビームスパッタリング ( I B S ) を介して堆積されるアモルファス ( 非結晶質 ) の  $S i O_2 / T a_2 O_5$  ( 二酸化ケイ素 / 五酸化タンタル ) フィルムを用いた典型的な構成を有する。これらの部材は、1 0 6 4 n m の波長において 1 p p m よりも小さな全吸収能を示す優れた光学特性をもたらすという効果がある。しかしながら、光参照キャビティや重力波干渉計などの高性能光学デバイスの限界感度に関する最近の要件は、そのようなフィルムが非常に大きな機械的散逸を表すことを示す。この散逸は、そのような高性能光学デバイスを利用するシステムの総合的な感度を制限する主要因の一つである。コーティング特性に関する詳細な研究は、ミラー体積の機械的な損失が  $T a_2 O_5$  層における減衰 ( ダンピング ) によって支配されることを示している。この損失の低減は、ドーピングやアニーリング等によってこの部材を改変したり、ハフニウム (  $H f O_2$  ) などの代替の高屈折率フィルムによって  $T a_2 O_5$  を置き換えたりすることによって、試みられている。しかしながら、そのような改変は、典型的には、機械的なダンピングの改良の二つのうちの一つの要因に満たないという結果になる。

30

40

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0 0 0 3】

本発明は、上記の課題を克服してミラー部材の機械的なダンピングを著しく低減するための代替解決手法を提供する。

【課題を解決するための手段】

【0 0 0 4】

50

本発明は、キャリア基板と、複数の第1タイプ及び第2タイプの交互式結晶性半導体層を含む結晶性スタックとを備える低吸収結晶性ミラーアセンブリであって、第1タイプの層は第2タイプの層よりも高い屈折率を有し、それによりブラッグミラーを形成し、キャリア基板は0.1μmと10μmとの間又は1kmと10kmとの間の曲率半径ROCを持って湾曲し、結晶性スタックは湾曲するキャリア基板に取り付けられる低吸収結晶性ミラーアセンブリを提供する。

【0005】

本願において、結晶性、単結晶（シングルクリスタル）又は単結晶（モノクリスタル）という用語は、分子線エピタキシー法MBE；有機金属気相エピタキシー法MOVPE；液相エピタキシー法LPE等のエピタキシャル成長技術を介して製造可能なような低欠陥密度単結晶フィルムに言及する。本願において、結晶性という用語と単結晶（モノクリスタル）という用語とは、同じ意味で使われうる。単結晶（シングルクリスタル）又は単結晶（モノクリスタル）の材料構造は、有限数の欠陥若しくは転移を、依然として表すことに留意することが大切である。しかしながら単結晶部材は、結晶粒界及び当該結晶粒界に関連付けられる欠陥を含まず、多結晶試料において様々な配向の隣接結晶を分ける。

10

【0006】

所定の曲率を有する湾曲した基板と、結晶性半導体層のスタックとの組合せは、高反射収束ミラーを提供し、この高反射収束ミラーは、高性能光学デバイスにおいて使用される。最後のキャリア基板は、所定の曲率半径を有する面をもたらす適切な研磨法を用いることによって事前に湾曲されうる。結晶性半導体層のスタックは、所望の動作波長でのブラッグミラーを作る。湾曲した基板と結晶構造スタックとの組合せは、非モノリシックなミラーアセンブリを提供する。これは、ミラーアセンブリの吸収/透過特性を対象用途のニーズに対して正確に適合させることを可能にするROCの選択は、最終用途の詳細に依存し、我々は二つの典型的な範囲をここでは記載する。高精度分光法において用いられるキャビティに関し、0.1μm～10μmの範囲のROCを有するミラーが一般的ではあるが、他の値も可能であると理解すべきである。重力波検出器などの大規模システムに関し、アーム長さ及び対応ROCは1kmから10kmの範囲にある。ここで再び、ROCに関して他の値も可能であると理解すべきであり、小規模テストシステムに関して最小値を0.1km以下とすることも可能である。低吸収という用語は、最大上限限界が50～100ppmである吸収レベルを示すと理解すべきである。好ましくは、これは、10ppmよりも低く（<10ppm）てもよく、1ppmよりも低い範囲であってもよい。

20

30

【0007】

誘電体マルチレイヤーミラーに関し、ミラーを構成する薄膜スタックは‘コーティング’と称される。ミラーアセンブリという用語は、湾曲した基板と一緒にマルチレイヤースタックに言及する。結合された結晶構造層の我々の実施例に関し、これは転移ミラーアセンブリ（*transferred mirror assembly*）と称される。後者のケースにおいて、マルチレイヤースタックは結晶質であると理解されるべきだが、基板はガラス、すなわち非結晶質であってもよいし、結晶質であってもよい。

【0008】

相対的に高い及び相対的に低い屈折率を有する半導体層に関し、それぞれ、部材の“高い率（高インデックス）”又は“低い率（低インデックス）”の屈折率、或いは両部材の屈折率は、スタックにわたって変更可能である。また、第1タイプの層の厚さと第2タイプの層の厚さとは、スタックにわたって変更可能である。

40

【0009】

ミラーアセンブリにおいて、キャリア基板は透明であってもよく、特に1064nm又は1550nmの波長において透過的であってもよく、キャリア基板の表面は研磨されてもよい。

【0010】

特に、透明なキャリア基板は、順々に、低減された吸収能を有してもよく、それは長伝搬距離を伴う適用例に対して有益となりうる。

50

## 【0011】

ミラーアセンブリにおいて、キャリア基板は、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Si}$ （シリコン、ケイ素）、サファイア、又は超低膨張ガラスULEを含んでもよい。

## 【0012】

キャリア基板に関する材料のいくつかの選択肢は、例えばC軸配向サファイアにおけるひ化アルミニウムガリウム（AlGaAs）のような、転移スタックに非常に似た熱膨張係数を与えてもよい。したがって、温度変化が、ミラーに、特にキャリア基板を伴うスタックの接触面の近傍に、ストレス/歪みをもたらす可能性があまり高くないかもしれない。

## 【0013】

ミラーアセンブリにおいて、単結晶半導体層は、典型的にはAlGaAs三元合金に基づくエピタキシャル層であり、第1タイプ及び第2タイプは、 $0 < x < 1$ を満たす $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ を含み、第1タイプの層に関して $x$ は第2タイプの層に関するものよりも小さい。

## 【0014】

このシステムにおいて、高い $x$ はより低い屈折率をもたらし、その一方で、低い $x$ はより高い屈折率をもたらす。したがって、Al含有量の変動するエピタキシャルAlGaAsは、機械的損失の著しい低減の可能性を提供しうるものであり、その一方で、同時に、ミラーに関する高反射及び低光吸収をもたらす。

## 【0015】

ミラーアセンブリにおいて、結晶構造スタックは、ファンデルワールス力結合又は共有結合のうちの少なくとも一方によって、キャリア基板に取り付けられうる。

## 【0016】

ファンデルワールス力結合を用いると、積み重ねられた層は、容易に実現されるプロセスで、キャリア基板に取り付けられうる。ファンデルワールス力結合及び/又は共有結合という結合のタイプは、所定の度合いで組み合わせられてもよい。また、結合ステップは、アニーリングステップと組み合わせられてもよいし、後にアニーリングステップが続いてもよい。アニーリング/加熱は、室温を少し上回る温度から約700 までの温度で実行されてもよい。約400 よりも上の温度は、典型的には、表面が適切に保護されている場合にのみ適用されうるものであり、さもなければAlGaAsからヒ素が滲出しうる。

## 【0017】

本発明は、更に、ミラーアセンブリの製造方法を提供する。当該ミラーアセンブリは、キャリア基板と、複数の第1タイプ及び第2タイプの交互式結晶性半導体層を含むスタックとを備え、第1タイプの層は第2タイプの層よりも高い屈折率を有し、キャリア基板は0.1mと10kmとの間の曲率半径を持って湾曲する。当該方法は、第1の基板を提供するステップと、キャリア基板を提供するステップと、第1タイプ及び第2タイプの交互式結晶性半導体層のスタックを、例えばMBEやMOVPEによって、エピタキシャルに形成するステップと、スタックを第1の基板から分離するステップと、スタックを湾曲したキャリア基板に取り付けるステップとを含む。

## 【0018】

したがって、当該方法は、複数層のスタックを形成するための第1単結晶基板を提供する。第1の基板上にスタックを形成した後、スタックは第1の基板から離間されて第2湾曲基板の表面に接触される。スタックは、その後、転移ミラーアセンブリを形成する第2の基板に取り付けられる。それにより、低光学的な及び機械的損失の基板上における湾曲した単結晶ミラースタックを実現しうる。上述の方法において、第1の基板は、ヒ化ガリウム（GaAs）又はゲルマニウム（Ge）を含んでもよい。

## 【0019】

第1の基板は、特に、想定される用途のための動作波長に基づいて選定されてもよい。したがって、GaAsやGeなど、様々な結晶性半導体部材システムが、第1の基板用に選択されてもよい。また、リン化インジウム（InP）や窒化ガリウム（GaN）/窒化

10

20

30

40

50

アルミニウム (AlN) が用いられてもよい。

【0020】

前記方法において、キャリア基板は透過的であってもよく、特に1064nm又は1550nmの波長で透過的であってもよく、キャリア基板の表面は磨かれていてもよい。

【0021】

前記方法において、キャリア基板は、SiO<sub>2</sub>、Si、サファイア、又は超低膨張 (ULE) ガラスを含んでもよい。

【0022】

上述のような方法において、結晶性半導体層は、AlGaAs三元合金に基づく単結晶エピタキシャル層であってもよく、第1タイプ及び第2タイプは、 $0 < x < 1$ を満たすAl<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>Asを含み、第1タイプの層に関してxは第2タイプの層に関してもより小さくてもよい。

10

【0023】

前記方法において、化学機械的基板除去プロセス又はエピタキシャル分離プロセスを用いることによって、スタックが第1の基板から分離されてもよい。

【0024】

化学機械的基板除去プロセスは、ラッピング (擦り合わせ) / 研磨、ウェットエッチング及び他のプロセスを含んでもよい。

【0025】

スタックは、ファンデルワールス力結合及び共有結合のうちの少なくとも一方によって、キャリア基板に取り付けられてもよい。

20

【0026】

結合は、ファンデルワールス力結合又は共有結合のうちの少なくとも一方を含んでもよい。また、接着剤や酸化物などの中間膜を使用することも可能である。

【0027】

スタックは、キャリア基板に結合されてもよく、その結合はアニーリングによって強化されてもよい。

【0028】

アニーリングステップは、キャリア基板に対するスタックの永久的な結合をもたらしてもよい。

30

【0029】

また、本発明は、光学的精密測定のための光共振器を提供し、この光共振器は、上述のようなミラーアセンブリを2つ含み、ミラーの反射面は所定距離で相互に向かい合い、0.1mから10mのROCに関し、所定の厚みを持つスペーサーが2つのミラーアセンブリ間に置かれてもよく、そのスペーサーは2つのミラー間に所定距離を与える。

【0030】

上述のような2つのミラーアセンブリを具備し、ミラーの反射面が所定距離で相互に向かい合う光学的精密測定用光共振器において、1kmから10kmのROCに関し、各ミラーアセンブリは個別的に支えられてもよい。

【0031】

スペーサー部材は、ミラー基板と実質的に同じ光学特性を有していてもよい。また、それは、ミラー基板と実質的に同じ熱膨張特性を有していてもよい。それにより、スペーサーは、キャビティの特性に対して最小の影響を持つ。

40

【0032】

これらの応用例において、上述のようなミラーアセンブリを構成するためのエピタキシャルミラー部材の使用は、キャビティ及びミラーの機械的品質係数の著しい増加をもたらす。したがって、コーティング誘導位相ノイズの望まれない影響が最小化されうる。また総合的なシステム感度及び/又は安定性は向上されうる。例えば格子及び光結晶反射器などの、位相ノイズの好ましくない影響を低減することを目的とする他の手法と比較し、そのような転移エピタキシャルブラッグミラーは、既存の精密測定光学システムにおいて、

50

レイアウトの変更を必要とすることなく、採用されうる。一般に使用される誘電体スタックを単結晶マルチレイヤーに置き換えることは、約10倍から約100倍の機械的ダンピングの低減をもたらさう。したがって、結晶性ミラーで著しい改善が実現されうる。また、そのような部材は、光学素子の表面からの帯電除去を可能にする有限の導電率を達成するために、ドーブされてもよい。

#### 【0033】

これまでは、エピタキシャルに成長した単結晶マルチレイヤーは高性能な干渉計や光学参照キャビティに適用されてきていない。これは、以下の理由で追及されなかった。すなわち、その分野の専門家は吸収能が高過ぎるだろうと考え、機械的な損失が測定されず、エピタキシャル膜はほぼフラットであり、高吸収半導体基板上での堆積に典型的には限定されていた。対照的に、高性能な干渉計や光学参照キャビティに関する本願については、湾曲した構造体が必要である。しかしながら、エピタキシャル析出法による湾曲した単結晶スタックの成長は極めて難しいため、'成長'基板からフラット単結晶マルチレイヤーを除去してそれを事前に湾曲されたキャリア基板に結合するための転移及び結合プロセスが開発された。

10

#### 【0034】

本発明の上述及び他の態様、特徴及び利点は、添付図面と併せて考慮されることで、以下の詳細な説明からより明確になる。

#### 【図面の簡単な説明】

#### 【0035】

20

【図1】本発明に係るミラーアセンブリの側面図

【図2】様々な材料の吸収値及び機械的ダンピングを示す材料の性質の表

【図3】本発明に係る2つのミラーアセンブリを伴うキャビティ

【図4】本発明に係るミラーアセンブリを製造するステップのシーケンス

【発明を実施するための形態】

#### 【0036】

図1は、本発明に係る低吸収ミラーアセンブリの側面図を示す。

#### 【0037】

スタックは、湾曲したキャリア基板に結合された単結晶ブラッグミラーを含む。上述のように、この出願において、単結晶(モノクリスタル)という用語は、MBE、MOVPE、LPE等のエピタキシャル成長技術によって製造可能な低欠陥密度単結晶(シングルクリスタル)膜に言及する。この書類において、結晶性及び単結晶は、区別しないで使われうる。図1のミラーアセンブリ1は、単に概略的に描かれている。湾曲基板3は、単結晶の複数層のスタックのためのキャリア基板として設けられる。層5及び7のスタック9は、4層のみによって単純化して描かれている。しかしながら、スタック9は典型的にはより多くの層を含むと理解されるべきである。最大反射率は、層の全数-100%の反射率値に漸近的に近づくことによって決定されうる。本例の層の数は、約40ペアの層、すなわち全80層としうるが、例えば全100~120層のように他の数の層がそのような構造において使用されてもよい。図1に示されるように層5及び7は、それぞれ高屈折率及び低屈折率を持つことに関して交互式の単結晶半導体層である。図1において、層5は低屈折率を有する層に対応し、層7は高屈折率を有する層に対応すると考えてもよい。典型的には、屈折率の相違は、可能な限り大きくするところであり、AlGaAsの例では、約1064nmの波長で、それぞれAl(0.12)Ga(0.88)As層及びAl(0.92)Ga(0.08)As層から作られる実施物に関して3.41及び2.98の指数値が使われうる。

30

40

#### 【0038】

図1のスタック9はキャリア基板3に取り付けられる。キャリア基板3は前もって湾曲される。湾曲は、所定の曲率を有する面を付与する適切な研磨法を用いることにより得られてもよい。交互式の結晶性半導体の高指数層及び低指数層5及び7は、まずキャリア基板3の表面に対して接着的に、すなわちファンデルワールス力を介して、留められる。な

50

ぜならば、キャリア基板 3 の表面 3 S は磨かれているからである。したがってスタック 9 は、湾曲したキャリア基板 3 に関する所定の接触位置に置かれてもよく、接着力によってその位置を保つようにしてもよい。面 RMS 粗さの標準値は、およそ 1 nm 以下である。上記のように、層は、可変アルミニウム含有量の交互式の  $Al_x Ga_{1-x} As / Al_y Ga_{1-y} As$ 、ただし  $0 < x < 1$ 、 $0 < y < 1$ 、によって形成される。Al 含有量の相違が大きくなる程、層間の屈折率の相違も大きくなることに留意すべきである。そのようなケースにおいて、典型的には、高反射率を実現するためには、より少ない層ペアを要する。また、アルミニウム量は、層が光を吸収し始める波長をコントロールする。高指数層においてゼロ (0) アルミニウム含有量であるミラーは、室温において約 870 nm の最小波長に対して透過的になる。そのようなミラーは、個々の層厚の適切な調整によって、約 3  $\mu$ m の最大波長に対して高反射率で操作可能である。しかしながら、より短い波長での、例えば 650 nm に至るまでの可視光に関する操作について、Al 含有量に対応する最小 x 値は、少なくとも 50% としうる。高反射ミラーに関し、層厚は、光学的厚さの '4 分の 1 波長' としてもよく、各層の物理的な厚さ t は、動作波長  $\lambda$  が 4 で割られ、また各層の屈折率 n で割られたたものに対応する。

【0039】

$$t = \lambda / (4 * n) \quad (\text{式 1})$$

しかしながら、いくつかの実施例では、層厚は、厚み t に対して変動してもよく、式 1 から逸脱してもよい。これは、広い作動域を持ちうるいわゆる 'チャープ' ミラーを製造する例において有用となりうる。加えて、"デュアル-バンド" ミラー又はダイクロイックミラーなどの多重周期構造体が可能となりうる。そして、これらの構造体は、少なくとも 2 つの異なる光の波長で反射しうる。"チャープ" ミラーに関し、高反射の波長域は、層の厚みを変えることによって、例えばミラーの垂直方向における層厚を徐々に増加することによって、増大する可能性がある。しかしながら、そのような変動された層厚の使用は、最大反射率を犠牲にしうる。図 1 は、物理的厚みに関して上記式を維持する高精度光学ミラーを示す。式 1 を考察することによって、高指数層及び低指数層が相互に異なる厚みを有し、それぞれの屈折率値も異なることに留意すべきである。また、キャリア基板は、重力波干渉計などの大規模な適用例において吸収効果を低減するために透明であってもよい。これらの部材は、典型的には、 $SiO_2$ 、サファイア、Si 又は ULE を含んでもよい。部材の適切な選択は、ミラーアセンブリの光共振システムへの統合を可能にしうるものであり、ミラーを離間保持するスペーサーに関して類似の又は同じ部材を使用する余地があり、以下の図 3 の記載も参照可能である。

【0040】

曲率半径 ROC は、典型的には 0.1 m と 10 km との間であってもよい。図 2 に示される光参照キャビティ等の適用例において使用される標準値は、約 1 m である。極端なケースでは、重力波検出器、例えばレーザ干渉計重力波観測器 LIGO において採用されるミラーは、約 1 km (1 km のオーダー) の ROC を有しうる。

【0041】

図 2 は、様々な材料の特性を集めた表を示す。光吸収値は、構造体を介した光の二重 (ダブル) の通過を前提とし、光の入力と、部材へのそれぞれの深さでの反射後の出力を伴い、光の透過によって特徴付けられる。示されている値は、吸収係数、全吸収、及び損失角である。図 2 の表は、300 K 及び 4 K における損失角値を含む。また、結晶性又は非結晶性に関する材料の分類が示されている。また、結晶性という用語は単結晶 (モノクリスタル) として理解されるべきであり、部材は、実質的に粒界を示さない。表は、キャリア基板の基板部材としての GaAs の使用が、高吸収値及び低光学能のために、不利となりうることを示す。ミラー部材に関し、図 2 の表は、AlGaAs に関して  $SiO_2 / Ta_2O_5$  と比較して少なくとも 1 桁分或いはそれ以上の損失角の改善も示す。

【0042】

図 3 は、分光法などの高精度光学的測定や狭-線幅レーザーの安定のために使用されるキャビティなどの光共振器 11 を概略的に示す。図 3 は、図 1 に示されるような種類の

10

20

30

40

50

2つのブラッグミラー1A及び1Bを示す。反射面15A及び15Bは相互に向かい合い、真空ギャップによって分離される。2つのブラッグミラー1A及び1B間にスペーサー13が存在し、スペーサー13は、典型的にはミラー1A及び1Bの少なくとも上端及び下端と接触する。スペーサー13は、ミラー1A及び1B間に固定距離を付与するような所定の厚み又は長さを有する。

【0043】

付加的に又は代替的に、ミラーの位置を固定してミラー間に所定距離を与えるように、そこに各ミラーに関して少なくとも一つの支持部(図3には図示せず)が設けられてもよい。特に、ミラー間の大きな距離に関しては、分離した支持部が各ミラーアセンブリに関して設けられようように、1又は複数のスペーサー13を適用することは難しいかもしれない。図3の光共振器11は、約600nmから3 $\mu$ mまでの動作波長に関して使用される可能性があり、AlGaAsマルチレイヤーの使用を仮定する。また、単結晶ミラー層の材料組成及び層厚を変えることによって、異なる波長域を選択することを可能としうる。光学キャビティは、超狭線幅、低ノイズ、レーザーライトをもたらすために使用されうる。この低ノイズレーザーライトは、光学原子時計におけるようなトラップ原子又はイオンを求めるために、或いはモード・ロックされたレーザーとの組合せによって光周波数コムを生むために使用されうる。そのようなコムと付加的なキャビティとの組合せは、純粋なマイクロ波トーンの生成のために使用されうる。

10

【0044】

図4A~4Eは、本発明に係るブラッグミラーを製造するステップのシーケンスを示す。

20

【0045】

図4Aは、第1の基板すなわちドナー基板21を示す。第1の基板21は、単結晶GaAs又はゲルマニウムを含んでもよいが、他の部材であってもよく、それは適用例における所望の動作波長に依存する。そのような部材は、InP又はGaN/AlNを含んでもよい。第1の基板の厚みは、典型的には約300~500 $\mu$ mであるが、50 $\mu$ mと1mmとの間の値も可能である。図4Aは、第1の基板21上で成長した一つの層5をすでに示す。この層5及び更なる層は、MBEやMOVPEなどの適切な半導体成長プロセスを使用して成長されてもよい。

【0046】

図4B及び4Cは、製造プロセスの更なる段階を示す。特に、図1と同様に、4つの層5、7のみが示されている。これらの層は、図1に関して上述したように、交互に切り替わる屈折率を有する。層の数は4よりも大きくてもよいものと理解されるべきである。

30

【0047】

また図4Cは、スタックを形成する第1の基板21及び層5、7の組み合わせられたアセンブリにリフトオフプロセス33が適用されることを示す。スタックは、図1のスタックに実質的に類似しうると理解される。リフトオフプロセス33は、スタックが第1の基板21から分離されるように、ウェットエッチング、研磨、ラッピング等のうちの少なくとも一つを含みうる。イオン注入及びそれに続くアニーリングを伴うスマートカット(Smart Cut)プロセスなどの商業的に知られるリフトオフプロセスは、スタックの全体厚みのために及びスタックの層の感度の不規則性のために、図1のスタックに適用できないかもしれず、イオン注入プロセスは層にダメージを与えうる。したがって、リフトオフプロセスは、以下のステップを含みうる。第1のステップにおいて、第1の基板21が、例えば研削プロセスによって機械的に薄くされる。そして、第1の基板の残りの基板材料は化学的に除去され、それにより分離されたスタックが得られる。第1の基板21が除去された分離スタックが図4Dに示される。

40

【0048】

図4Eは、図1に示されるキャリア基板3に対応する第2の基板に取り付けられたスタックを示す。第2の基板3は、図1に関して記載したように透明であってもよいし研磨されてもよく、典型的な実施例では、1m以下の標準値である0.1mと10mの間、或い

50

は 0.5 km と 10 km の間の曲率半径を有する。スタックは、適切な結合プロセス、好ましくはファンデルワールス相互作用を用いた直接的な結合によって第 2 の基板 3 に取り付けられ、その後にインターフェース（界面）を強化して共有結合を形成する可能性を付与するためのアニーリングが行われる。代替的に又は付加的に、接着剤を用いた低温結合が用いられてもよく、酸化物 / 酸化物結合、スピノンガラス等を含む接着の代替手段を適用しうる。

#### 【0049】

図 4 A ~ 4 E に示される方法は、ミラー層がまず平坦基板上で成長されることを含む。すなわち、ここでは第 1 の基板としても言及される“ドナー”基板及びエピタキシャル層の両者が実質的にフラットである。上述のように、キャリア基板、すなわち第 2 の基板は、定められた曲率を有し、転移されるエピタキシャル膜がその後に湾曲されることを強要する。

10

#### 【0050】

ミラーアセンブリの低吸収単結晶スタックは、典型的には、制限的な損失角を有し、機械的品質係数の逆数は最大  $1 \times 10^{-5}$  から  $10^{-6}$  よりも小さい値までとなる。加えて、ミラーは、典型的には、所望の中心波長における ppm レベルでの全吸収で、反射率 > 99.99% の関係を与えうる。中心波長に関する標準値は、1064 nm 及び 1550 nm であるが、既存の AlGaAs 合金で ~ 600 nm から 3  $\mu$ m までの範囲が可能である。損失角は、ミラーの全位相ノイズの重要な構成要素を表す材料特性であると理解されるべきである。誘電体ミラーを有する本実施形態において、構成要素のフィルムの損失角は支配的な因子であり、最新鋭の精密測定システムがミラーのブラウニアンノイズによって制限される多くのケースにおいて存在する。それに比べ、基板の損失角は典型的な材料よりも小さい桁数となりうる。

20

#### 【0051】

図 3 に示すようなこれらの低吸収ミラーアセンブリのうちの 2 つを組み合わせることは、1 s より小さい平均化時間に関して  $10^{-16}$  から  $10^{-17}$  の一部に対応する周波数安定性を有する光学キャビティを与えうる。これは、典型的には従来の誘電体ミラーを用いる現在のキャビティ実施例に、著しく勝る。ここで言う層は単結晶性であるが、現在の実施例は非結晶性の誘電体膜、ガラス、典型的にはイオンビームスパッタリングを介して湾曲した基板上に直接的に堆積される誘電体膜を採用する。

30

#### 【0052】

単結晶ミラー層は、典型的には、6 ~ 10  $\mu$ m の範囲の総厚みを有し、側方寸法又は直径は、約 10 mm から約 200 mm まで変わり、極端な適用例では 200 mm をも超える場合もありうる。図に示されるように、これらの構造体は湾曲した面において連続的である。

#### 【0053】

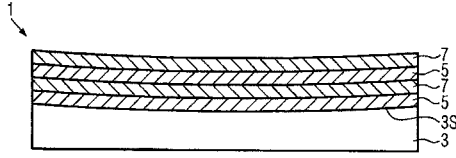
また、湾曲したキャリア基板の透明性は、干渉計 / キャビティシステムにおける熱負荷の低減に有益であり、熱光学不安定を低減し、特にミラー ROC 及びキャビティ長さを変えうる加熱影響を最小化又は回避するのに有益である。本発明に係るキャビティの典型的な動作波長は、1064 nm 及び 1550 nm である 2 つの最も一般的な波長を伴う 600 nm と 3  $\mu$ m との間にある。スタックの個々の層の厚みは、所望の中心波長によって決定され、例えば、上記の単純な 4 分の 1 波長光学表現を用いることができ、6 ~ 10  $\mu$ m の全体単結晶層スタック厚みを有する。典型的な径は 10 ~ 25 mm であるが、いくつかの適用例、例えば重力波検出器は、200 mm 以上の径を必要としうる。

40

#### 【0054】

本発明は、本発明のいくつかの好ましい実施形態に関して示され及び記述されているが、当業者であれば、添付の特許請求の範囲によって定義されるような本発明の精神及び範囲から逸脱することなく、それにおいて形式的及び詳細において様々な変更を行うことが理解されるであろう。

【 図 1 】

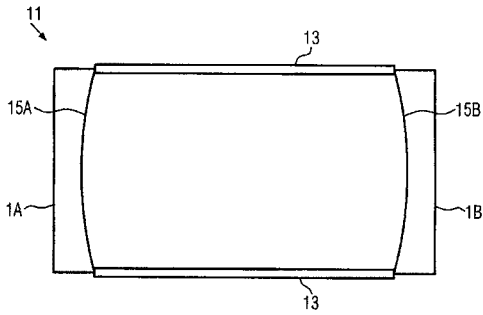


【 図 2 】

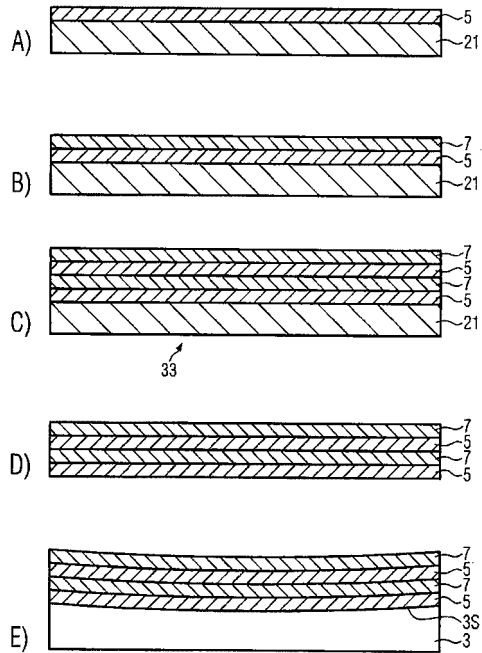
ミラー部材	吸収係数 ( $\text{cm}^{-1}$ )	全吸収 (ppm)	損失角 (300Kにて)	損失角 (4Kにて)	分類
AGaAs 分布ブラッグ反射ミラー (1064nmで182nm透過深さ)	0.23	9	3.0E-05	5.0E-06	結晶性
$\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ 分布ブラッグ反射ミラー (1064nmで250nm透過深さ)	<0.02	<1	4.0E-04	3.0E-04	非結晶性
基板部材	吸収係数 ( $\text{cm}^{-1}$ )	全吸収 (ppm)	損失角 (300Kにて)	損失角 (4Kにて)	分類
GaAsウエハ(p-タイプ, $6.5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ , 350 $\mu\text{m}$ 厚)	0.01	700	1.2E-04	1.0E-08	結晶性
GaAsウエハ(p-タイプ, $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ , 350 $\mu\text{m}$ 厚)	15.4	6.6E+05	1.2E-04	1.0E-08	結晶性
溶融石英( $\text{SiO}_2$ , 12.7mm厚)	2.5E-07	0.03	5.0E-08	5.0E-04	非結晶性
サブアリア(単結晶 $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 12.7mm厚)	5.0E-05	127	3.0E-07	1.0E-08	結晶性

光吸収値は構造体を介した二重通過を前提とする(入力、その後反射に続いて出力)

【 図 3 】



【 図 4 】



## 【 国際調査報告 】

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No  
PCT/EP2012/072087

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER INV. G02B5/08 H01L33/00 H01S5/0625 ADD.		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G02B H01L H01S		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) EPO-Internal		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	COLE GARRETT ET AL: "Monocrystalline AlxGal-xAs heterostructures for high-reflectivity high-Q micromechanical resonators in the megahertz regime", APPLIED PHYSICS LETTERS, AIP, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS, MELVILLE, NY, US, vol. 92, no. 26, 1 July 2008 (2008-07-01), pages 261108-261108, XP012107753, ISSN: 0003-6951, DOI: 10.1063/1.2952512 abstract pages 261108-2, left-hand column, last paragraph - right-hand column, paragraph 2 pages 261108-3, left-hand column, paragraph 2 - paragraph 3 figure 1 ----- -/--	1-5, 14, 15
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C.		<input type="checkbox"/> See patent family annex.
* Special categories of cited documents :		
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance		"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date		"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)		"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means		"&" document member of the same patent family
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed		
Date of the actual completion of the international search 26 November 2012		Date of mailing of the international search report 05/12/2012
Name and mailing address of the ISA/ European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Authorized officer von Hentig, Roger

1

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (April 2005)

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No PCT/EP2012/072087
---

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	<p>COLE GARRETT ET AL: "Free-standing Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As heterostructures by gas-phase etching of germanium", APPLIED PHYSICS LETTERS, AIP, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS, MELVILLE, NY, US, vol. 96, no. 26, 28 June 2010 (2010-06-28), pages 261102-261102, XP012131712, ISSN: 0003-6951, DOI: 10.1063/1.3455104 abstract pages 261102-1, left-hand column pages 261108-2, left-hand column - pages 261108-2, right-hand column figure 1</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	6-13
X	<p>ELI YABLONOVITCH ET AL: "Extreme selectivity in the lift-off of epitaxial GaAs films", APPLIED PHYSICS LETTERS, vol. 51, no. 26, 1 January 1987 (1987-01-01), page 2222, XP055024206, ISSN: 0003-6951, DOI: 10.1063/1.98946 page 2222, left-hand column, paragraph 1 - last paragraph figure 1</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	6-13
A	<p>PENG WEINA ET AL: "Single-crystal silicon/silicon dioxide multilayer heterostructures based on nanomembrane transfer", APPLIED PHYSICS LETTERS, AIP, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS, MELVILLE, NY, US, vol. 90, no. 18, 1 May 2007 (2007-05-01), pages 183107-183107, XP012094552, ISSN: 0003-6951, DOI: 10.1063/1.2734367 pages 183107-1, right-hand column, paragraph 1 - pages 183107-2, left-hand column, paragraph 1 figure 2</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-15

## フロントページの続き

(81)指定国 AP(BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), EA(AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), EP(AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OA(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG), AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC

(71)出願人 513116830

ガレット コール

Garrett COLE

オーストリア共和国、1060 ウィーン、グンペンドルファ シュトラッセ 14/25

Gumpendorfer Strasse 14/25, 1060 Wien, Austria

(74)代理人 100083116

弁理士 松浦 憲三

(72)発明者 マルクス アスペルマイアー

オーストリア共和国、2344 マリア エンツァルスドルフ、マリアツェラールシュトラッセ  
8

(72)発明者 ガレット コール

オーストリア共和国、1060 ウィーン、グンペンドルファ シュトラッセ 14/25

Fターム(参考) 2H042 DA08 DA12 DC00 DC09 DD08 DE09

2H148 GA03 GA13 GA30 GA32