(19)日本国特許庁(JP)　　(12)公開特許公報(A)　　(11)公開番号
特開2023-93362
(P2023-93362A)
(43)公開日　令和5年7月4日(2023.7.4)

(51)国際特許分類		FI		テーマコード（参考）
H01S	*3/06 (2006.01)*	H01S	3/06	5F172
H01S	*3/042(2006.01)*	H01S	3/042	
H01S	*3/08 (2023.01)*	H01S	3/08	

審査請求　未請求　請求項の数　16　　ＯＬ　外国語出願　（全17頁）

(21)出願番号　特願2022-199084(P2022-199084)
(22)出願日　令和4年12月14日(2022.12.14)
(31)優先権主張番号　21216774.6
(32)優先日　令和3年12月22日(2021.12.22)
(33)優先権主張国・地域又は機関
欧州特許庁(EP)

(71)出願人　522485914
イノトニックス ゲーエムベーハー
Ｉｎｎｏｔｏｎｉｘ ＧｍｂＨ
オーストリア国，１０１０ ウィーン，
サルツトルガッセ ５／１７
Ｓａｌｚｔｏｒｇａｓｓｅ ５／１７，
Ｖｉｅｎｎａ １０１０，Ａｕｓｔｒｉａ
(71)出願人　522485925
フィズィカルニ ウスタフ エーブイ シーアール，ブイ．ブイ．アイ
ＦＹＺＩＫＡＬＮＩ ＵＳＴＡＶ ＡＶ ＣＲ，Ｖ．Ｖ．Ｉ
チェコ共和国，１８２２１ プラハ ８，
ナ スロヴァンス １９９９／２
Ｎａ Ｓｌｏｖａｎｃｅ １９９９／２，
最終頁に続く

(54)【発明の名称】　固体レーザシステム用レーザ増幅モジュールおよびその製造方法

(57)【要約】　（修正有）
【課題】リッドステートディスクに結合されたヒートシンクを効果的に冷却できるレーザビームを増幅するモジュールに関する。
【解決手段】モノリシックレーザ増幅モジュール１は、ソリッドステートディスク２と、ヒートシンク３と、２００ｎｍ～１０μｍの波長範囲λでソリッドステートディスク２内を伝搬する入射ビーム５を少なくとも部分的に反射するように構成された反射膜４とを含むモノリシック複合体６であって、反射膜４が堆積法によってヒートシンクの表面上に堆積され、ヒートシンク３が、特定の熱伝導率、ヤング率、ヒートシンクの厚さを含む、モノリシック複合体６と、を含み、ソリッドステートディスクおよびモノリシック複合体は、ＰＶ平坦度＜２１０ｎｍを有する表面６１および２１を有し、かつ表面粗さＲＭＳ＜２ｎｍを有し、ソリッドステートディスク２およびモノリシック複合体６の表面２１および６１は、直接かつ恒久的に結合されている。
【選択図】図２

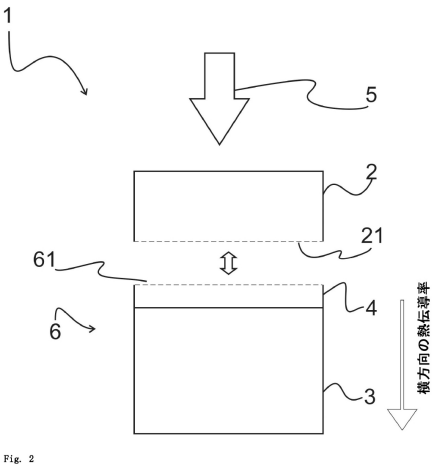


Fig. 2

【特許請求の範囲】
【請求項１】
固体レーザシステム用のモノリシックレーザ増幅モジュール（１）であって、
ソリッドステートディスク（２）と、
ヒートシンク（３）と、２００ｎｍ～１０μｍの波長範囲λで前記ソリッドステートディスク（２）内を伝搬する入射ビーム（５）を少なくとも部分的に反射するように構成された反射膜（４）とを含むモノリシック複合体（６）であって、前記反射膜（４）が堆積法によって前記ヒートシンクの表面上に堆積され、前記ヒートシンク（３）が、
少なくとも１００Ｗ／ｍ＊Ｋの横方向の熱伝導率、
少なくとも１００ＧＰａ、好ましくは少なくとも３００ＧＰａのヤング率、および
少なくとも１ｍｍ、好ましくは少なくとも２ｍｍの前記ヒートシンクの厚さを含む、モノリシック複合体（６）と、を含み、
前記ソリッドステートディスクおよび前記モノリシック複合体は、ＰＶ平坦度＜２１０ｎｍを有する表面（６１および２１）を有し、かつ表面粗さＲＭＳ＜２ｎｍを有し、
前記ソリッドステートディスク（２）および前記モノリシック複合体（６）の表面（２１および６１）は、直接かつ恒久的に結合されている、固体レーザシステム用のモノリシックレーザ増幅モジュール（１）。
【請求項２】
直接結合された前記モノリシックレーザ増幅モジュール（１）は、レーザ動作によるソリッドステートディスク温度５００℃未満に対して、０．１Ｗ／（ｍＫ）超、好ましくは１Ｗ／（ｍＫ）超の熱伝導率を有する、請求項１に記載のモジュール（１）。
【請求項３】
前記モノリシック複合体（６）は、前記反射膜（４）を形成する複数の交互の層を含み、層（４１、４２）が交互の屈折率を有する材料から作られ、上層が前記ソリッドステートディスク（２）に結合されている、請求項１または２記載のモジュール（１）。
【請求項４】
前記モノリシック複合体（６）は、前記反射膜（４）の上に犠牲層（７）を含み、前記犠牲層（７）の材料および厚さは、前記膜（４）の反射率を１０％未満減少させる、請求項１～３のいずれか１項に記載のモジュール（１）。
【請求項５】
前記モノリシック複合体（６）の前記犠牲層（７）は、フィルムスタックを形成する複数の層（７１、７２）を含み、少なくとも１つの犠牲層は、マイクロまたはナノパターン（７１１）によって構造化され、前記ソリッドステートディスク（２）の機械的および／または熱的特性を向上させる、請求項４に記載のモジュール（１）。
【請求項６】
前記モノリシック複合体（６）の前記犠牲層（７）は、フィルムスタックを形成する複数の層（７１、７２）を含み、このフィルムスタックは、前記モジュール（１）のレーザ誘起損傷閾値を高めるように構成される、請求項４または５に記載のモジュール（１）。
【請求項７】
前記ソリッドステートディスク（２）に直接かつ恒久的に結合された前記モノリシック複合体（６）の前記表面（６１）は湾曲している、請求項１～６のいずれか１項に記載のモジュール（１）。
【請求項８】
前記ソリッドステートディスク（２）の前記表面（２１）および前記モノリシック複合体の前記表面（６１）は、ＰＶ＜７０ｎｍおよびＲＭＳ＜０．８ｎｍを有する、請求項１～７のいずれか１項に記載のモジュール（１）。
【請求項９】
前記モジュール（１）の前記表面（６１）は湾曲しており、湾曲した前記表面は、ＰＶ＜２１０ｎｍおよびＲＭＳ＜２ｎｍを有する直接および恒久的な結合として機能し、湾曲した前記表面は前記モノリシック複合体（６）の全表面の一部である、請求項１～８のい

ずれか１項に記載のモジュール（１）。
【請求項１０】
前記ソリッドステートディスク（２）は、ガーネット、バナデート（ｖａｎａｄａｔｅ）、タングステート、サファイア、カルコゲナイド、またはセラミック材料、または半導体ゲイン材料（ｓｅｍｉｃｏｎｄｕｃｔｏｒ　ｇａｉｎ　ｍａｔｅｒｉａｌ）からなる群から選択されるドープレーザ結晶または非ドープレーザ結晶を含む、請求項１～９のいずれか１項に記載のモジュール（１）。
【請求項１１】
前記ヒートシンク（３）は、減衰係数＜１ｃｍ$^{-1}$で、２００ｎｍ～１０μｍの波長に対して透明である、請求項１～１０のいずれか１項に記載のモジュール（１）。
【請求項１２】
前記ヒートシンク（３）は、ダイヤモンド、窒化ホウ素、シリコン、炭化ケイ素、セラミック、金属、金属－ダイヤモンド複合体、金属－窒化ホウ素複合体、またはシリコン－ダイヤモンド複合体から作られる、請求項１～１１のいずれか１項に記載のモジュール（１）。
【請求項１３】
前記ソリッドステートディスク（２）は、前記表面（２１）の反対側の表面上に反射防止膜（２２）を含み、前記モノリシック複合体（６）に直接かつ恒久的に結合される、請求項１～１２のいずれか１項に記載のモジュール（１）。
【請求項１４】
前記モジュール（１）の縁は、粗面化および／または面取りされている、請求項１～１３のいずれか１項に記載のモジュール（１）。
【請求項１５】
請求項１～１４のいずれか１項に記載のレーザ増幅モジュール（１）を製造する方法であって、前記方法は、
ソリッドステートディスク（２）を提供するステップであって、その少なくとも１つの表面（２１）が、二乗平均平方根ＲＭＳ＜２ｎｍの表面粗さおよびＰＶ＜２１０ｎｍの表面平坦度を有する、ソリッドステートディスク（２）を提供するステップと、
ヒートシンク（３）を提供するステップであって、その少なくとも１つの表面（３１）が二乗平均平方根ＲＭＳ＜２ｎｍおよび表面平坦度ＰＶ＜２１０ｎｍを有し、その厚さが少なくとも１ｍｍである、ヒートシンク（３）を提供するステップと、
波長範囲λが２００ｎｍ～１０μｍの入射ビーム（５）を少なくとも部分的に反射する反射膜（４）によって前記ヒートシンク（３）をコーティングし、それによってモノリシック複合体（６）を形成するステップと、
前記ソリッドステートディスク（２）および前記モノリシック複合体（６）の表面（２１および４１）を洗浄するステップと、
前記表面（２１および４１）を活性化するステップと、
前記モノリシック複合体および前記ヒートシンクの両方の、ＲＭＳ＜２ｎｍおよびＰＶ＜２１０ｎｍの表面平坦度を有する前記表面（２１および４１）を合わせて、プレスして、直接かつ恒久的な結合を形成するステップと、を含む、方法。
【請求項１６】
犠牲層（７）を提供するステップと、
前記犠牲層（７）によって前記反射膜（４）をさらにコーティングし、それによってモノリシック複合体（６）を形成するステップと、
前記モノリシック複合体（６）の前記犠牲層（７）を化学的機械的研磨またはイオンビームアシスト研磨で処理して、ＲＭＳ＜２ｎｍの表面粗さおよびＰＶ＜２１０ｎｍの表面平坦度を与え、欠陥またはボイドの数およびサイズを減少させるステップと、さらに含む、請求項１４に記載の方法。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】

【０００１】
本発明は、固体レーザ用のレーザ増幅モジュールに関する。より具体的には、本発明は、ソリッドステートディスク（ｓｏｌｉｄ－ｓｔａｔｅ　ｄｉｓｋ）に結合されたヒートシンクを効果的に冷却することができるレーザビームを増幅するモジュールに関する。
【０００２】
さらなる態様では、本発明は、その製造方法に関する。
【背景技術】
【０００３】
高平均出力のレーザシステムは、特にビーム増幅中にレーザコンポーネントで発生する熱に悩まされている。通常、固体レーザディスクは水冷ヒートシンクに接着またははんだ付けされ、熱は固体レーザディスクからヒートシンクに伝達される。この熱除去技術はあまり効率的ではなく、特に平均出力がｋＷクラスの領域に近づくと、ほとんどの高平均出力レーザシステムでビームポインティングが不十分になる。
【０００４】
ＥＰ　２　９９６　２１１　Ａ１は、透明なヒートシンクに直接結合されたソリッドステートディスクとしても知られる固体レーザ活性媒体を開示する。ヒートシンクの熱伝導率は、１４９Ｗ／ｍ＊Ｋ以上であり、ここで、固体レーザ活性媒体およびヒートシンクは、１ｎｍ未満の二乗平均平方根（ＲＭＳ）表面粗さを示し、光学ゲイン材料は、直接結合によって透明ヒートシンクに取り付けられる。この文献はまた、固体レーザディスクとディスク上の反射層とを含むモノリシック半導体またはアモルファス構造を開示する。高反射率層は、スパッタリング、蒸発、化学気相堆積などの直接堆積法によって固体レーザディスクに取り付けられ得るか、またはそれが固体ディスクに直接結合され得る。図１は、上記の先行技術に開示された２つの実施形態を概略的に示す。第１の実施形態である図１Ａは、反射層４に直接結合され（破線で表される）、透明ヒートシンク３に直接結合されたソリッドステートディスク２を備える固体レーザビーム用のモジュールを開示する。光ビーム５は、ソリッドステートディスク２に入射し、反射層４および透明ヒートシンク３を通って伝播する。増幅されたビーム５１は、透明ヒートシンク３から放出される。第２の実施形態である図１Ｂは、ソリッドステートディスク２と、透明ヒートシンク３に直接結合（破線で表す）した、ソリッドステートディスク２上に堆積された反射層４（全線で表す）とを含む固体レーザビーム用モジュールを模式的に示す。光ビーム５は、ソリッドステートディスク２に入射し、反射層４および透明ヒートシンク３を通って伝播する。増幅されたビーム５１は、透明ヒートシンク３から放出される。しかしながら、両方の実施形態は、ヒートシンク２の底部から来るウォータージェットによる熱除去の場合には不利である。
【０００５】
したがって、本発明の目的は、従来技術の実施形態に比べて製造が容易でありながら、効率的に熱を除去することができる固体レーザシステム用のレーザ増幅モジュールを提供することである。より効果的に熱を除去することは、必然的により高く、より安定したレーザ性能をもたらす。表面活性化により、温度５００°Ｃ超で少なくとも０．５Ｊ／ｍ^{2}の接着強度が保証される。次に、両方の表面を互いに位置合わせし、大気圧または真空で結合して、製造を容易にする。
【発明の概要】
【課題を解決するための手段】
【０００６】
本発明の第１の態様である固体レーザシステム用のモノリシックレーザ増幅モジュールは、上記の目的に対する解決策を提供するものであり、請求項１によって定義される。
【０００７】
本発明によるレーザ増幅モジュールは、レーザビーム、特にレーザドリル加工、レーザショックピーニング、粒子加速などの産業用または科学用の高出力レーザビームを放射するための固体レーザシステムに実装され得る。

【０００８】
固体レーザは、固体であるゲイン媒体を用いたレーザの一種である。本発明に従って、固体媒体は、先行技術において薄ディスクレーザとしても知られているソリッドステートディスクであり、これは、活性ゲイン媒体の薄層の反対側に実現されるヒートシンクおよびレーザ出力によって特徴付けられるダイオード励起固体レーザの一種である。レーザディスクの形状は任意であり、好ましくは円形または長方形である。ソリッドステートディスクの厚さは、レーザビーム直径よりもかなり小さい。本発明の文脈では、ゲイン媒体という用語は、光学ゲインを生成することができる材料として理解されるべきであり、ここで、光学ゲインは、材料における光増幅プロセスを説明することと理解される。ゲイン媒体は、ドープまたは非ドープされた結晶の両方であり得、例えば、ＹＡＧ、サファイア、シリケート、ガーネット、バナデート（ｖａｎａｄａｔｅ）、タングステート、またはホスフェートガラス、好ましくはレーザ活性イオンでドープされたもの、セラミック材料またはＧａＡｓ、ＩｎＧａＡｓもしくはＧａＮなどの半導体材料であり得る。ドーパントの含有量は、固体レーザシステムの特定の用途に応じて変化され得、好ましくは、０．０１～２０モル（原子）％である。別の実施形態では、ソリッドステートディスクは、ホスフェートガラスまたは非晶質シリカなどの非晶質ゲイン材料由来であり得る。ソリッドステートディスクは、任意の厚さを有し得るが、有利には、本発明によるモジュール、ｒｅｓｐ．方法が、５μｍという低い厚さを提供することが可能であることが提供される。

【０００９】
モノリシック複合体は、ヒートシンクおよび反射膜を含む連続的な固体素子として理解されるものとする。反射膜は、物理蒸着、スパッタリング、蒸発、化学蒸着、さらには分子ビームエピタキシーなどの結晶成長技術などの先行技術の堆積法によってヒートシンクに堆積されるものとする。反射膜は、入射ビーム、特にポンプビームを少なくとも部分的に反射するように構成される。反射膜は、２００ｎｍ～１０μｍの範囲からの波長を有するビームを反射する。反射膜は、硫化亜鉛、二酸化チタン、五酸化タンタル、二酸化ケイ素、酸化ハフニウム、ヒ化ガリウム、ヒ化アルミニウムガリウムなどの材料群から選択され得る。

【００１０】
本発明によるヒートシンクは、少なくとも１００Ｗ／ｍ＊Ｋの横方向の熱伝導率、少なくとも１００ＧＰａのヤング率、および少なくとも１ｍｍのヒートシンクの厚さを有する。ヒートシンクは、ダイヤモンド、窒化ホウ素、シリコン、炭化ケイ素（ＳｉＣ）、セラミック、金属、金属－ダイヤモンド複合体、金属－窒化ホウ素複合体、またはシリコン－ダイヤモンド複合体から作られ得る。より好ましい実施形態では、ヒートシンクのヤング率は少なくとも３００ＧＰａであり、および／またはその厚さは少なくとも２ｍｍである。ヒートシンクの厚さが少なくとも２ｍｍあると、コーティングプロセス中の曲がりを防止する。

【００１１】
モノリシック複合体およびソリッドステートディスクの表面は、どちらもＰＶ平坦度が２１０ｎｍ未満で、粗さＲＭＳが２ｎｍ未満である。上記の表面は、直接かつ恒久的に一緒に結合される。直接結合プロセスは、接着剤または金属はんだなどの任意の中間接着層なしで、レーザディスクをヒートシンクに直接接合することと理解されるべきである。ヒートシンクは、室温で１００Ｗ／ｍ＊Ｋ以上の熱伝導率を有するヒートスプレッダまたは最終キャリア基板として理解され得る。

【００１２】
ＰＶ（ピークから谷まで）平坦度は、理想面に対する光学面の最高点および最低点の絶対差として定義される。ＲＭＳは、一般にナノメートルスケールでの表面うねりの二乗平均平方根として定義される、先行技術でよく知られているパラメータである。ＰＶ平坦度およびＲＭＳは、レーザ干渉計または原子間力顕微鏡などの先行技術の方法で測定され得る。

【００１３】

請求項１に定義された固体レーザシステム用のモノリシックレーザ増幅モジュールは、レーザ動作によるソリッドステートディスク温度＜５００℃に対して、０．１Ｗ／（ｍＫ）超、好ましくは１Ｗ／（ｍＫ）超の熱伝導度を提供する。

【００１４】

好ましい実施形態では、モノリシック複合体は、反射膜を形成する少なくとも２つの層を含む。より好ましくは、モノリシック複合体は、複数の層を含む。層の特定の数は、産業用途に依存する。固体レーザの特定の出願の当業者は、所望のミラー仕様を満たすのに何層が十分であるかを知っている。SiO_2／Ta_2O_5ベースの膜の場合、入射角０°で１０３０ｎｍについて計算すると、反射率は全４層（２ｘSiO_2＋Ta_2O_5）で６０％から、全８層で９０％超、２０層で９９．９％まで変化し得る。反射膜を形成する層は、屈折率に関して交互に変化する。第１の層と第２の層は、異なる屈折率を有する。複数の層を含む実施形態では、第１の層、および第２の層は、第１の層がｎ＝１．４６（SiO_2）、第２の層がｎ＝２．１（Ta_2O_5）、および第３の層が再びｎ＝１．４６を有するように、交互の屈折率を有する。最終的な上層は、ソリッドステートディスクに直接かつ恒久的に結合される。好ましい実施形態では、最低屈折率n_{low}＝１．３５および最高屈折率n_{high}＝５．６を使用して、高反射率膜を製造し得る。

【００１５】

モノリシック複合体は、好ましくは、犠牲層を含む。この犠牲層の機能的役割は、（ａ）反射膜の保護、（ｂ）レーザ誘起損傷閾値の改善、（ｃ）必要な表面仕様に達するための後処理が可能なバッファ層の提供、である。犠牲層は、反射膜の反射率を１０％未満に低下させる材料で作られる。このような保護犠牲層は、SiO_2、Si_3N_4、HfO_2、任意の金属の酸化物、特にAl_2O_3、ＧａＡｓ、ＡｌＧａＡｓ、ＮｉＰまたはフォトレジスト材料であり得、これは、必要な表面形状、特に２１０ｎｍ未満のＰＶ平坦度およびＲＭＳ表面粗さＲＭＳ＜２ｎｍ、好ましくはＰＶ＜７０ｎｍおよびＲＭＳ＜０．８ｎｍに達するように研磨され得る。９０％から９９．９％までの反射率が特に有利である。厚さ４０７ｎｍを有する、例えばSiO_2から作られた少なくとも１つの犠牲層は、下地多層反射膜のＬＩＤＴを約７倍増加させ得る。

【００１６】

さらに好ましくは、モノリシック複合体は、フィルムスタックを形成する複数の犠牲層を含む。複数の犠牲層は、モノリシックレーザ増幅モジュールのレーザ誘起損傷閾値を増加させるように構成され得る。犠牲層のフィルムスタックは、ＡｌＧａＡｓまたはＧａＡｓを含む膜との組み合わせにおいて特に有利である。これらの材料は、１０ｎｓ未満の長パルスを有するパルスレーザに対して低い損傷閾値を示す。より好ましくは、フィルムスタックにおいて、少なくとも１つの層は、パターンによってマイクロまたはナノ構造化される。このパターンは、ソリッドステートディスクの機械的特性および／または熱的特性を向上させる。パターンは、反射膜またはさらなる犠牲層または犠牲層およびヒートシンクおよび／またはそれらの任意の組み合わせの表面であり得る、反対側の表面のパターンと一緒に適合する任意の種類のパターンであり得る。パターンは、溝状のものでもよい。

【００１７】

別の実施形態では、界面で共蒸発するナノラミネートを製造することにより、多層反射膜のＬＩＤＴを増加させ得る。

【００１８】

モノリシック複合体は、好ましくは研磨される。モノリシック複合体およびソリッドステートディスクを互いに直接かつ恒久的に結合したそれらの研磨面は、平坦度ＰＶ＜２１０ｎｍである。研磨方法は、上記パラメータの平坦度ＰＶおよびＲＭＳが達成されれば、機械的、磁気粘性、化学的、またはイオンアシストなど、先行技術に応じて選択され得る。

【００１９】

モノリシック複合体の表面は、好ましくは湾曲している。さらに好ましくは、モノリシック複合体の表面は曲面であり、ＰＶ＜２１０ｎｍの値およびＲＭＳ＜２ｎｍを有する表

面は、全表面の８０％より大きい面積で設けられる。
【００２０】
ソリッドステートディスクおよびモノリシック複合体の表面は、ＰＶ＜７０ｎｍ、ＲＭＳ＜０．８ｎｍを有する。これらの値は、より高い結合強度を提供する。
【００２１】
ヒートシンクは、好ましくは、２００ｎｍ～１０μｍの間の波長に対して透明であり、減衰係数＜１ｃｍ$^{-1}$である。透明なヒートシンクは、レーザビームの出力結合が透明なヒートシンクを介して提供され得る、実施形態を提供し得る。別の実施形態では、ヒートシンクは、レーザビームの反射出力結合が提供され得るように、レーザ波長（複数可）に対して不透明であり得る。
【００２２】
ヒートシンクは、好ましくは少なくとも１００Ｗ／（ｍ＊Ｋ）の熱伝導率を有する材料、好ましくはダイヤモンド、窒化ホウ素、シリコン、炭化ケイ素、セラミック、金属、金属－ダイヤモンド複合体、金属－窒化ホウ素複合体、またはシリコン－ダイヤモンド複合体を含む。
【００２３】
ソリッドステートディスクは、表面の反対側の表面上に反射防止膜を好ましく含み、モノリシック複合体に直接かつ恒久的に結合される。
【００２４】
モノリシックレーザ増幅モジュールのサイドエッジは、好ましくは、粗面化および／または面取りされる。エッジを粗面化および／または面取することで、レーザ活性媒体からの自然放出増幅（ＡＳＥ）を最小限に抑える。
【００２５】
本発明の第２の態様は、請求項１５に定義されるレーザ増幅モジュールの製造方法である。
【００２６】
方法は、ソリッドステートディスクを提供するステップを含み、その少なくとも１つの表面は、２ｎｍ未満の二乗平均平方根ＲＭＳおよびＰＶ＜２１０ｎｍの表面平坦度を有し、厚さが少なくとも５μｍである。
【００２７】
次のステップは、ヒートシンクを提供することであり、その少なくとも１つの表面は、２ｎｍ未満の二乗平均平方根ＲＭＳおよびＰＶ＜２１０ｎｍの表面平坦度を有し、その厚さは少なくとも１ｍｍである。
【００２８】
その後、波長範囲λが２００ｎｍ～１０μｍの入射ビームを少なくとも部分的に反射する反射膜によってヒートシンクがコーティングされ、それによってモノリシック複合体を形成する。
【００２９】
最終ステップでは、モノリシック複合体とヒートシンクの両方の２ｎｍ未満のＲＭＳとＰＶ＜２１０ｎｍの表面平坦度を有する表面を一緒に整列させ、直接結合することが提供される。
【００３０】
反射膜によってヒートシンクをコーティングするステップは、９０％を超える反射率の干渉膜を形成するために、交互に屈折率を有する交互材料のフィルムスタックを作製する複数のコーティングステップを含むことが好ましい。複数のコーティングステップは、蒸発、イオンアシスト、イオンビームスパッタリング、マグネトロンスパッタリング、または分子ビームエピタキシーなどの従来の手段によって提供され得る。
【００３１】
コーティングのステップは、ヒートシンクに望ましくない湾曲を導入し、ＲＭＳ＞１ｎｍの高い表面粗さを有し得る。導入された湾曲を補償するために、当業者は、ａ）コーテ

ィングによって引き起こされる湾曲が非常に起こりにくくなるように、好ましくは少なくとも３００ＧＰａのヤング率および少なくとも２ｍｍの厚さを有するヒートシンクを提供するステップ、またはｂ）高反射率膜は、好ましくは、反射膜の上に犠牲層をさらに備えられ得るステップをさらに提供し得る。化学的機械的研磨またはイオンアシスト研磨プロセスは、ボイド密度を低減すると同時に、表面品質（ＰＶ平坦度、ＲＭＳ表面粗さ）を向上させるのに役立ち得る。一般に、ボイドとは、例えば、材料のガス放出によって生じる空の空間（穴）であると理解される。欠陥は結晶構造のエラーと見なされる。

【００３２】

製造方法は、好ましくは、反射膜の上に犠牲層を提供し、それをＰＶ＜２１０ｎｍおよびＲＭＳ＜１ｎｍまで研磨するステップを含む。保護犠牲層の研磨は、イオンビーム補助研磨技術によって行われ得る。この方法では、通常、アルゴンイオンがイオン銃で生成され、保護犠牲層に向かって加速される。保護犠牲層の衝撃は、表面原子のスパッタリングにつながる。表面粗さの減少を観察し得る。特定の基板材料、入射角、およびイオンビーム電圧は、表面粗さの最終品質に大きな影響を与える。この処理方法を使用すると、表面形状を正確に変更することもでき、特に、基板を非常に高度な平坦度（溶融シリカ基板のＰＶ＜１０ｎｍ）にエッチングする。処理中の表面ボイドを回避するために、表面は非常にきれいに保たれ、それに応じてソフトビームパラメータ（低イオンエネルギー）が選択される。

【００３３】

反射膜の上に犠牲層を提供し、それを研磨する別の実施形態では、化学的機械的研磨である。化学的機械的研磨プロセスは、様々なウェーハ材料に適用される半導体産業における一般的な手順である。これは、原子スケールの材料除去のための化学エッチングと全体的な平坦性達成のための機械的摩耗の組み合わせである。その結果、表面は、材料によっては、ＰＶ＜７０ｎｍの平坦度と表面粗さＲＭＳ＜０．５ｎｍを達成し得る。

【００３４】

直接結合するステップは、モノリシック複合体を提供すると同時に、ソリッドステートディスクを過度に洗浄し、表面活性化することを含む。表面活性化は、化学的、プラズマまたはイオンビームによる活性化であり得る。表面は、その後、一緒にプレスされる。加える圧力は基板の厚さによって異なり得るが、通常２ｋＰａから１０ＭＰａの範囲である。曲面基板では、５μｍ未満の精度でアライメントすることで高い結合強度が得られる。

【００３５】

本発明による方法は、０．１Ｊ／ｍ^2、有利には０．５Ｊ／ｍ^{2}の結合強度を提供し得る。これにより、ソリッドステートディスクの第２の表面の機械的研磨および／またはそれの所望の厚さ（典型的には５μｍ超、理想的には１００μｍ超）への薄化が可能になる。薄化および／または研磨の後、ソリッドステートディスクの第２の表面は、高い平坦度（理想的には＜７０ｎｍ）および低いＲＭＳ表面粗さ（理想的にはＲＭＳ＜０．８ｎｍ）を示す。

【００３６】

方法は、好ましくは、ポンプ源から光ビームを受け取るように構成された表面をコーティングするステップを含み得る。この表面は、次いで効率的なレーザ動作のために反射防止膜でコーティングされ得る。コーティングは、蒸発、イオンアシスト、イオンビームスパッタリングまたはマグネトロンスパッタリングなどの従来の手段によって行われ得る。あるいは、人は半導体ベースの反射防止膜（ＡｌＧａＡｓ／ＧａＡｓ）も使用し得る。

【００３７】

さらなる好ましい実施形態では、方法は、結合されたディスクの側面粗面化および／または面取りをさらに含む。側面粗面化および／または面取りは、エッジが粗面化されたときにレーザゲイン媒体からの増幅自然放出（ＡＳＥ）を最小化する。表面粗さが高くなると、小さな反射サイトが形成され、反射光に大きな回折損失が発生する。ＡＳＥを抑制するもう１つの方法は、薄膜ディスクのエッジをベベル加工（ｂｅｖｅｌ）することである。

【図面の簡単な説明】
【００３８】
【図１】ＡおよびＢは従来技術による２つの実施形態を表す。
【図２】本発明による第１の実施形態を表す。
【図３】反射膜を形成する２つの層を含む好ましい実施形態を表す。
【図４】反射膜を形成する複数の交互の層を含む好ましい実施形態を表す。
【図５】膜の上に犠牲層を含む好ましい実施形態を表す。
【図６】ナノ構造化された犠牲層を含む好ましい実施形態を表す。
【図７】反射防止膜を含む好ましい実施形態を表す。
【図８】図８Ａおよび図８Ｂは本発明によるモジュールを示す好ましい実施形態を表す。
【図９】固体レーザシステムにおける本発明によるレーザ増幅モジュールの実施態様を表す。
【図１０】図１０Ａおよび図１０Ｂは反射膜の上の犠牲層の厚さを変化させた本発明による実験例を表す。
【図１１】図１１Ａおよび図１１Ｂは比較検討－本発明による実施例を示す。
【図１２】比較検討－従来技術による実施例を示す。
【発明を実施するための形態】
【００３９】
従来技術と比較して、高性能リフレクタ（＞９８％）を形成する反射膜は、堆積法、特にスパッタリングによってソリッドステートディスク上に堆積される。これにより、コーティング内部に固有の膜応力が発生し、ソリッドステートディスクが過度に湾曲する。ソリッドステートディスクが薄くて弾力性があるほど、より曲がる。しかし、本発明に従って、少なくとも１００ＧＰａのヤング率と１ｍｍ超の厚さを有するヒートシンクは、曲げがそれほど深くならないようにヒートシンクの機械的剛性を保証し、ソリッドステートディスクとの直接結合のためにＰＶ平坦度を依然として使用または補正することが可能である。
【００４０】
図２は、本発明による第１の実施形態を概略的に示す。固体レーザシステム用のモノリシックレーザ増幅モジュール１が示される。モジュール１は、光学ゲイン媒体、例えば、ＹＡＧ、サファイア、シリケート、ガーネット、バナデート、タングステート、またはホスフェートガラス、好ましくはレーザ活性イオンでドープされたもの、セラミック材料またはＧａＡｓ、ＩｎＧａＡｓもしくはＧａＮなどの半導体材料といった例えばドープまたは非ドープ結晶から作られた薄いソリッドステートディスク２を含む。一般に、レーザ設計の当業者は、特定の産業用途にどの種類のゲイン媒体が適しているかを知っている。ソリッドステートディスク２は２つの面を有する。第１の表面は、ソリッドステートディスクレーザのポンプ源からのポンプビームなどの入射ビーム５のための平面として機能する。ポンプビームは、別のレーザビームであってもよい。反対側の表面２１は、ＰＶ平坦度＜２１０およびＲＭＳ＜２ｎｍが達成されるように処理される。これらのパラメータで得られる処理は、例えば、アニーリング、研磨、または機械的および／もしくは化学的処理のいずれかである。表面２１は、モノリシック複合体６との直接的かつ恒久的な結合を提供するために、上述のパラメータで構成される。モノリシック複合体６は、ヒートシンク３および反射膜４を含む。モノリシック複合体６は、ＰＶ平坦度＜２１０ｎｍおよびＲＭＳ＜２ｎｍとなるように処理された表面６１を有する。直接的かつ恒久的な結合は、接着剤または金属はんだなどの任意の中間接着層なしで、ソリッドステートディスク２をモノリシック複合体６に直接接合することを提供する。この結合は、０．１Ｊ／m^2から、好ましくは＞０．５Ｊ／m^2の強度を提供する。ヒートシンク３は、少なくとも１００Ｗ／ｍ＊Ｋの横方向の熱伝導率、少なくとも１００ＧＰａ、好ましくは少なくとも３００ＧＰａのヤング率、および少なくとも１ｍｍ、好ましくは少なくとも２ｍｍのヒートシンクの厚さを有する。ヒートシンクは、ダイヤモンド、窒化ホウ素、シリコン、炭化ケイ素（ＳｉＣ）、セラミック、金属、金属－ダイヤモンド複合体、金属－窒化ホウ素複合体、また

はシリコン－ダイヤモンド複合体から作られ得る。少なくとも２ｍｍのヒートシンクの厚さは、コーティングプロセス中の曲がりを防止し、これは、図１１Ａ、図１１Ｂ、および図１２に従って説明した実験によって証明され得る。モノリシック複合体６は、ヒートシンク３の上に堆積された反射膜４をさらに含む。反射膜４は、化学蒸着、スパッタリング、蒸発、化学蒸着、さらには分子ビームエピタキシーなどの結晶成長技術などの先行技術の堆積法によってヒートシンク３に堆積され得る。反射膜は、ソリッドステートディスク２を通って伝播する入射ビーム５、特にポンプビームを少なくとも部分的に反射するように構成される。反射膜４は、２００ｎｍ～１０μｍの範囲からの波長を有するビームを反射する。反射膜は、硫化亜鉛、二酸化チタン、五酸化タンタル、二酸化ケイ素、酸化ハフニウム、ヒ化ガリウム、ヒ化アルミニウムガリウムなどの群から選択され得る。このようにして、反射膜４は、ヒートシンク３とソリッドステートディスク２との間に挟持される。

【００４１】

図３はさらに好ましい実施形態を示し、反射膜４は少なくとも２つの層４１および４２を含む。第１の層４１は、約３．９７の屈折率を有するＳｉから作られ得、第２の層４２は、約１．４６の屈折率を有するSiO_2から作られ得る。

【００４２】

図４はさらに別の好ましい実施形態を示し、反射膜４は、交互の屈折率を有する材料による複数の層を含む。図４に示される実施形態では、４つの反射層が選択される。第１の層４１は屈折率ｎ＝２．１を有し得、第２の層は屈折率ｎ＝１．５を有し得、第３の層は屈折率ｎ＝２．１を有し得、上層４２は屈折率ｎ＝１．５を有し得る。別の好ましい実施形態では、交互の層のセットは、ＥＰ３０７６２０８から採用され得る。

【００４３】

図５はさらに別の好ましい実施形態を示し、モノリシック複合体６は、反射膜の上に設けられ、ソリッドステートディスク２との直接的かつ恒久的な結合が設定され得るように、ＰＶ平坦度＜２１０ｎｍおよびＲＭＳ＜２ｎｍの表面を有する犠牲層７をさらに含む。犠牲層７は、反射膜４を保護する役割を果たす。犠牲層７は、好ましくは、反射膜の反射率を１０％未満に低下させる材料で作られ得る。犠牲層７は、SiO_2、Si_3N_4、HfO_2、任意の金属の酸化物、特にAl_2O_3、ＧａＡｓ、ＡｌＧａＡｓ、ＮｉＰまたはフォトレジスト材料から作られ得、これは、必要な表面形状、特に２１０ｎｍ未満のＰＶ平坦度およびＲＭＳ表面粗さＲＭＳ＜２ｎｍ、好ましくはＰＶ＜７０ｎｍおよびＲＭＳ＜０．８ｎｍに達するように研磨され得る。９０％から９９．９％までの反射率が特に有利である。Ｓｃｈｌｉｔｚ ｅｔ ａｌ．，Ａｐｐｌｉｅｄ Ｏｐｔｉｃｓ ５６（４），Ｃ１３６－Ｃ１３９による実験結果に示されるように、厚さ４０７ｎｍを有する、例えばSiO_2から作られた少なくとも１つの犠牲層は、下地多層反射膜のＬＩＤＴを約７倍増加させ得る。

【００４４】

図６は、フィルムスタックを形成する反射膜４の保護のための複数の犠牲層７１、７２を含む。複数の犠牲層７１、７２は、モノリシックレーザ増幅モジュールのレーザ誘起損傷閾値を増加させるように構成され得る。より好ましくは、フィルムスタックにおいて、少なくとも１つの層は、パターンによってマイクロまたはナノ構造化される。このパターンは、ソリッドステートディスクの機械的特性および／または熱的特性を向上させる。パターンは、表面を増加させるために、互いに嵌合する溝とし得る。表面積の増加は、より高い熱伝達を提供することができ、これは、レーザの安定性を提供する。形状、サイズ、周期性に関する特定のパターンは、リソグラフィーのような先行技術の方法によって達成され得る。入れ子状（ｎｅｓｔｉｎｇ）の溝は、例えば、矩形形状を有し得る。ナノまたはマイクロパターンは、犠牲層のそれぞれの表面、直接結合に役立たない反射膜および犠牲層の表面、または膜とヒートシンクとの間の界面のいずれかに設けられ得る。

【００４５】

図示されていない実施形態では、ソリッドステートディスク２に直接かつ恒久的に結合

されたモノリシック複合体の表面６１は、ＰＶ＜７０ｎｍの平坦度を有する。ＰＶのそのような平坦度は、機械的、化学的またはイオンアシスト研磨などの先行技術の方法による研磨によって達成され得る。

【００４６】

さらに別の実施形態では、ソリッドステートディスク２に直接かつ恒久的に結合されたモノリシック複合体６の表面６１は湾曲している。曲率半径は＞０．０５ｍ、より好ましくは＞０．５ｍであり得る。

【００４７】

さらに別の実施形態では、ソリッドステートディスク２の表面２１およびモノリシック複合体６の表面６１は、ＰＶ＜７０ｎｍおよびＲＭＳ＜０．８ｎｍを有する。

【００４８】

さらに別の実施形態では、モノリシック複合体６の表面６１は湾曲しており、平面度ＰＶ＜２１０ｎｍおよびＲＭＳ＜２ｎｍが、モノリシック複合体６およびソリッドディスク２の湾曲面上に備えられ、湾曲面は、モノリシック複合体の全表面の８０％超など、モノリシック複合体の全表面の一部である。したがって、直接結合全体の界面を提供する必要はない。

【００４９】

さらに別の実施形態では、ヒートシンク（３）は、減衰係数＞１cm^{-1}の２００ｎｍ～１０μｍの間の波長に対して透明であり、および／またはレーザ波長（複数可）に対して不透明である。

【００５０】

図７は、反射防止膜２２が表面上に堆積されて、透過率を増加させ、望ましくない反射光の量を減少させる実施形態を示す。

【００５１】

図示されていない別の実施形態では、モジュール１のエッジは、粗面化および／または面取りされている。この実施形態は、レーザゲイン媒体からの増幅された自然放出（ＡＳＥ）を最小化する最小化を提供する。

【００５２】

図８Ａおよび８Ｂは、本発明による特徴の組み合わせの２つの例示的な実施形態を示す。

【００５３】

図９は、ディスクレーザの一部としての本発明によるモジュールの模範的な実施例を示す。ポンプビーム５は、レンズ８１を通して本発明によるモジュール１に向けられる。ビームがモジュール１に戻るように反射するミラー８２にビームが反射される場合、ポンプビーム５の一部はモジュール１内で吸収されて増幅される。増幅されたレーザビームは、モジュール１から、レーザビームを少なくとも部分的に反射してモジュール１に戻し、レーザビーム５１を部分的に透過することができる部分反射要素８３に放射される。

【００５４】

図１０Ａは、モジュール１で実施されたシミュレーション結果を表す。シミュレーションは、反射膜４の上に犠牲層７を有する反射膜４の例示的な反射率を示す。ここで、反射膜は、対応する屈折率が１．４６と２．１のSiO_2とTa_2O_5の交互層からなる。ここで、反射膜は１０００ｎｍの中心波長用に設計されており、SiO_2層の厚さは１７１．２ｎｍ、Ta_2O_5層の厚さは１１９ｎｍになる。９９．９％の高反射率は、２０の交互層によって実現される。反射膜の上に、SiO_2犠牲層がシミュレートされる。図１０Ａは、犠牲層の異なる厚さにおける膜の異なる反射率挙動を示す。

【００５５】

図１０Ｂは、犠牲層の厚さに対する膜の反射率の依存性を表す。膜は、図１０Ａと同様に構成される。犠牲層の厚さは、膜の最終的な反射率性能にわずかな影響しか与えないことが示される。この事実に基づいて、犠牲層を使用して表面品質を改善し、ＰＶ＜２１０ｎｍおよびＲＭＳ表面粗さ＜２ｎｍを確立し得る。

【００５６】
図１１Ａは、コーティングされたヒートシンクの実験結果を示す。この実施例では、ヒートシンクのヤング率は３００ＧＰａ超であり、厚さは２ｍｍであり、直径は１２ｍｍである。ヒートシンクは、最初にＰＶ＜７０ｎｍの平坦度とＲＭＳ＜０．４ｎｍの表面粗さにまで研磨される。平坦度の測定は、６３２．８ｎｍで動作するレーザ干渉計で行われる。表面粗さの測定は、原子間力顕微鏡を用い、非接触モードで測定される。上部に３４０ｎｍのSiO_2犠牲層を備えたSiO_2／Ta_2O_5からなる全厚さ約４μｍの高反射率膜がヒートシンクに適用され、１０３０ｎｍで９９．９％超の反射率を提供する。コーティングは、球面曲率を導入する。測定されたＰＶの平坦度は約１３０ｎｍであり、表面粗さはＲＭＳ＝０．５ｎｍ程度と測定された。図１２に示すように、コーティングにより誘起される曲げを先行技術と比較すると、本明細書で説明される発明は、曲げをほぼ１００分の１に低減している。１３０ｎｍのＰＶの平坦度がまだ高すぎる場合、犠牲層を共堆積させ、その後、必要な表面品質に研磨し得る。
【００５７】
図１１Ｂは、犠牲層を研磨したコーティングされたヒートシンクの実験証明を示す。この実施例では、ヒートシンクのヤング率は３００ＧＰａ超であり、厚さは２ｍｍであり、直径は１２ｍｍである。ヒートシンクは、最初にＰＶ＜７０ｎｍの平坦度とＲＭＳ＜０．４ｎｍの表面粗さにまで研磨される。平坦度の測定は、６３２．８ｎｍで動作するレーザ干渉計で行われた。表面粗さの測定は、原子間力顕微鏡を用い、非接触モードで測定された。上部に３４０ｎｍのSiO_2犠牲層を備えたSiO_2／Ta_2O_5からなる全厚さ約４μｍの高反射率膜がヒートシンクに適用され、１０３０ｎｍで９９．９％超の反射率を提供する。その後、イオンビームアシスト研磨法により、上層の犠牲層が研磨される。この方法により、ＰＶ平坦度＜４０ｎｍ、ＲＭＳ表面粗さ＜０．４ｎｍの表面が達成され得る。図１２に示すように、イオンアシスト後研磨法を先行技術と比較すると、本明細書で説明される発明は、３００倍超の優れた表面平坦度を提供する。
【００５８】
一方、図１２は、先行技術、特にアプローチＥＰ　２　９９６　２１１による実験結果を示しており、ここでは、厚さ２００μｍのソリッドステートディスクがコーティングされている。曲率を最小にするために、ここではアンチストレスコーティングが適用された。それにもかかわらず、ソリッドステートディスクはＰＶ＝１０μｍまで過剰に湾曲していることがわかり得る。この高い湾曲は、分子力の打ち消し合いによる結合強度の低下を招く。ソリッドステートディスクの直径全体にわたってトポグラフィーを測定する（青線）。
参照記号
１　モノリシックレーザ増幅モジュール
２　ソリッドステートディスク
２１　ソリッドステートディスクの表面
２２　反射防止膜
３　ヒートシンク
４　反射膜
４１　第１の層
４２　第２の層
５　入射ビーム
６　モノリシック複合体
６１　モノリシック複合体の表面
７　犠牲層
７１　第１の犠牲副層
７１１　犠牲層上のナノまたはマイクロパターン
７２　第２の犠牲副層
８１　レンズ

８２　　ミラー
８３　　部分反射要素
９　　冷却
【図面】
【図１】

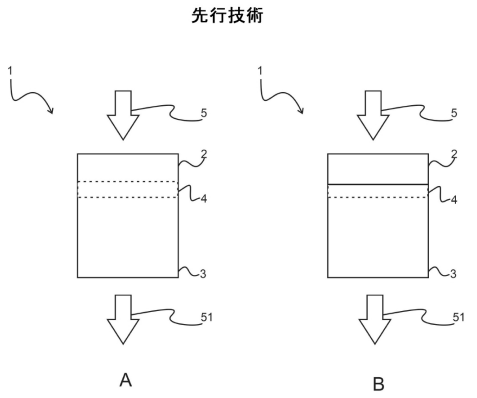


Fig. 1

【図２】

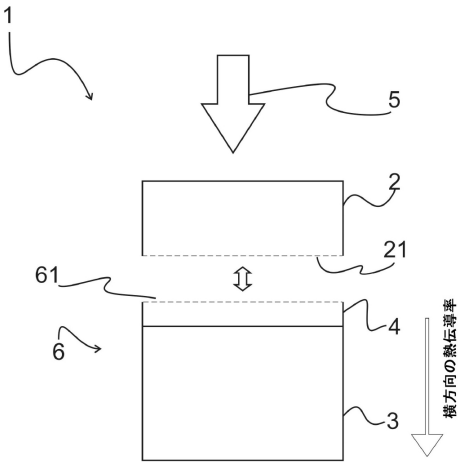


Fig. 2

【図３】

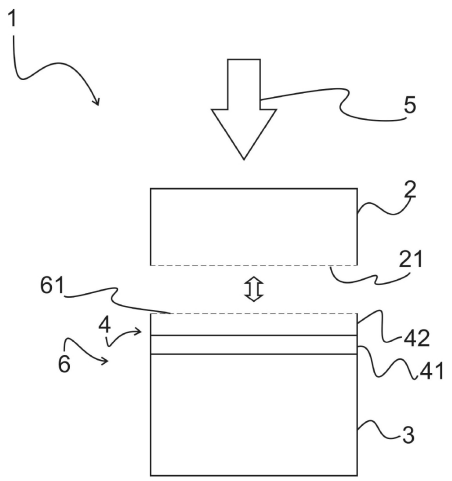


Fig. 3

【図４】

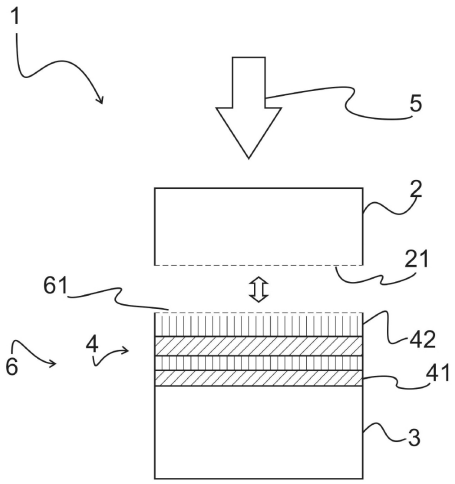


Fig. 4

【図５】

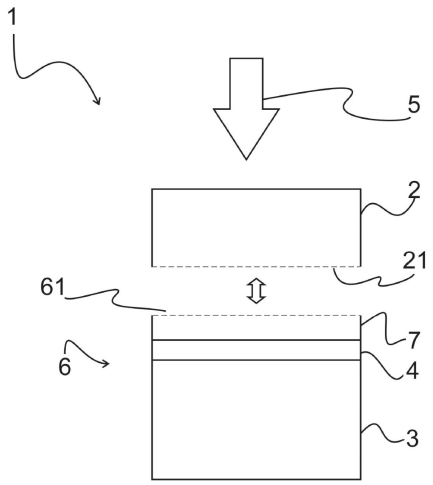


Fig. 5

【図６】

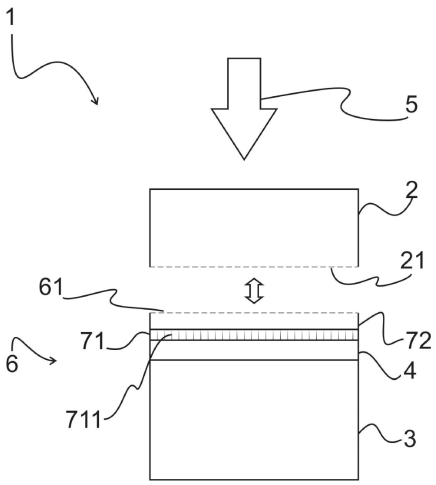


Fig. 6

【図７】

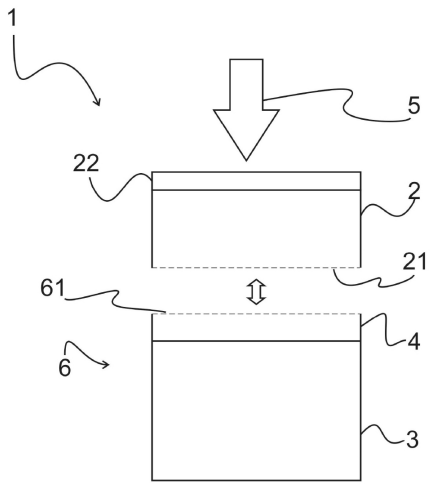


Fig. 7

【図８】

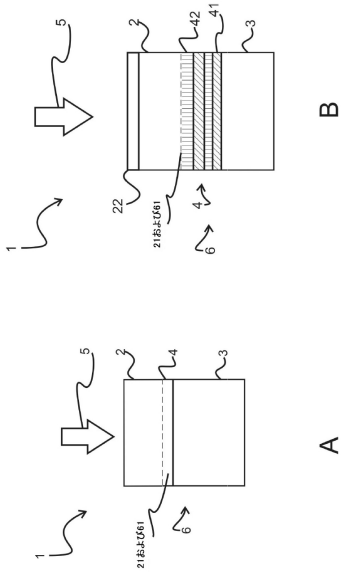


Fig. 8

【図９】

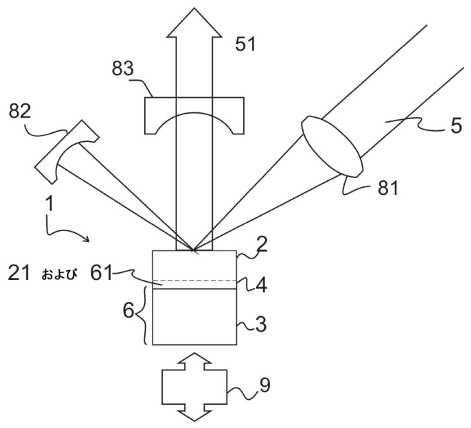


Fig. 9

【図１０】

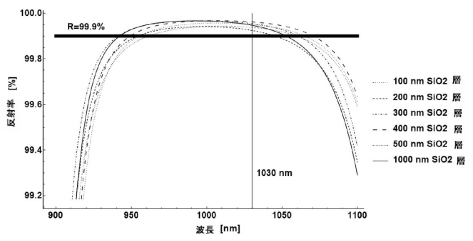


Fig. 10A

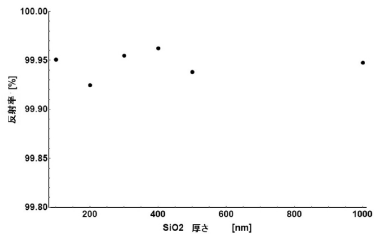


Fig. 10B

【図１１】

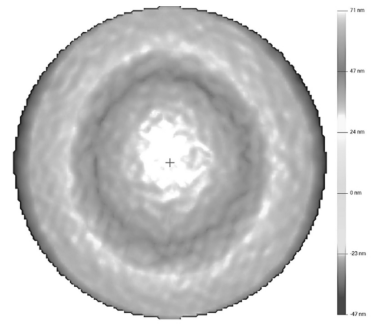


Fig. 11A

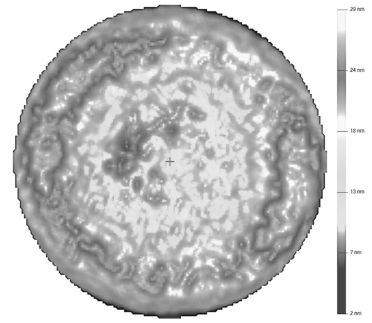
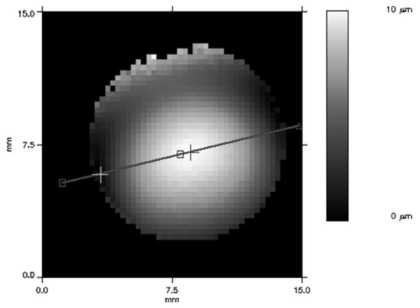


Fig. 11B

【図１２】



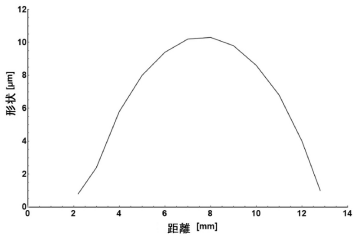


Fig. 12

【外国語明細書】
2023093362000014.pdf

フロントページの続き

１８２２１ Ｐｒａｈａ ８，Ｃｚｅｃｈ Ｒｅｐｕｂｌｉｃ （ＣＺ）
(74)代理人 110003487
弁理士法人東海特許事務所
(72)発明者 ウグール セザール
オーストリア国，１０１０ ウィーン，サルツトルガッセ ５／１７
(72)発明者 マーティン スマーズ
チェコ共和国，ドルニ ブジェジャニ ２５２ ４１，ザ ラドニチ ８２８
(72)発明者 ジャン シヴェルチェック
チェコ共和国，ドルニ ブジェジャニ ２５２ ４１，ザ ラドニチ ８２８
(72)発明者 オンドレイ ノヴァク
チェコ共和国，ドルニ ブジェジャニ ２５２ ４１，ザ ラドニチ ８２８

Ｆターム（参考） 5F172 AE02 AE03 AE06 AE12 AE26 AL08 NS04 NS18