

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7756832号
(P7756832)

(45)発行日 令和7年10月20日(2025. 10. 20)

(24)登録日 令和7年10月9日(2025. 10. 9)

(51)Int. Cl.	F I	
H 0 1 S 3/13 (2006. 01)	H 0 1 S 3/13	
G 0 2 F 1/01 (2006. 01)	G 0 2 F 1/01	B
H 0 1 S 3/00 (2006. 01)	H 0 1 S 3/00	G

請求項の数 15 (全 17 頁)

(21)出願番号	特願2025-500287(P2025-500287)	(73)特許権者	521338765
(86)(22)出願日	令和5年7月7日(2023. 7. 7)		フェルディナント・ブラウン・インスティ ツット ゲーゲーエムペーハー, ライプ ニッツ・インスティツット フュー ヘー ヒストフレクエンツテヒニク
(65)公表番号	特表2025-524589(P2025-524589A)		FERDINAND-BRAUN-INS TITUT GGMBH, LEIBNI Z-INSTITUT FUR HOCH STFREQUENZTECHNIK
(43)公表日	令和7年7月30日(2025. 7. 30)		ドイツ 1 2 4 8 9 ベルリン グスタフ ーキルヒホフ・シュトラッセ 4
(86)国際出願番号	PCT/EP2023/068884		Gustav-Kirchhoff-St rasse 4 1 2 4 8 9 Berli n (DE)
(87)国際公開番号	W02024/008937		
(87)国際公開日	令和6年1月11日(2024. 1. 11)		
審査請求日	令和7年1月30日(2025. 1. 30)		
(31)優先権主張番号	102022117050.0		
(32)優先日	令和4年7月8日(2022. 7. 8)		
(33)優先権主張国・地域又は機関	ドイツ(DE)		

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 レーザの周波数安定化装置、周波数安定化方法及び周波数測定方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項 1】

レーザの周波数安定化装置であって、前記レーザにより出射されたレーザ光線を周波数選択素子に入射するためのビーム経路を備え、

前記周波数選択素子は、温度制御され、

前記周波数選択素子は、複数の回折格子構造を有する体積型ホログラフィック回折格子であるVBGであり、入力面を介して前記レーザ光線が前記VBGに入射する前に、前記レーザ光線の一部が基準ビームに分岐され、前記VBGに入射した前記レーザ光線の一部が測定ビームを形成する、レーザの周波数安定化装置。

【請求項 2】

請求項 1 に記載の装置であって、

前記VBGは、光熱屈折率ガラス中に体積ホログラフィック的に生成されたブラッググレーティングの形態をとる、装置。

【請求項 3】

請求項 1 に記載の装置であって、

前記VBGは、リトロ配置されるように構成される、装置。

【請求項 4】

請求項 1 に記載の装置であって、

前記VBGの前記入力面は、入射レーザ光線のビーム軸及び／又は前記VBGの前記回折格子構造に対して90°以外の角度をなす、装置。

【請求項 5】

請求項 1 に記載の装置であって、

前記 V B G は、取付面と、前記取付面に対向する上面と、取付面と上面とを接続する 2 つの側面から構成され、

前記 V B G の回折格子ベクトル及び前記上面は、前記取付面に対して平行である、かつ／又は、前記側面は、互いに平行に構成される、装置。

【請求項 6】

請求項 5 に記載の装置であって、

前記 V B G は、平行六面体の形態をとり、

前記 V B G の前記回折格子構造は、前記 V B G の前記取付面、前記上面、前記側面のいずれにも垂直に配置される、装置。

10

【請求項 7】

請求項 1 に記載の装置であって、

前記基準ビームは、前記 V B G の表面又は前記 V B G の上流側に配置されたビームスプリッタにおいて分岐される、装置。

【請求項 8】

請求項 1 に記載の装置であって、

前記基準ビームの強度を決定するように設定された基準検出器と、

前記測定ビームの強度を決定するように設定された測定検出器と、をさらに備え、

前記測定ビームの強度は、前記 V B G を通過した後に決定される、装置。

20

【請求項 9】

請求項 8 に記載の装置であって、

前記基準検出器の基準信号と前記測定検出器の測定信号からエラー信号を導出するための第 1 の電子回路をさらに備える、装置。

【請求項 10】

請求項 1 に記載の装置であって、

前記 V B G は、回折格子ハウジングにより周囲から熱的に分離されている、装置。

【請求項 11】

請求項 1 に記載の装置であって、

前記 V B G は、モジュールハウジング内に他の構成と共に配置されている、装置。

30

【請求項 12】

請求項 1 に記載の装置であって、

前記 V B G の温度安定化のために、少なくとも 1 つの冷却及び／又は加熱装置が用いられる、装置。

【請求項 13】

請求項 1 に記載の装置を用いたレーザの周波数安定化方法であって、

エラー信号は、前記基準ビームの強度及び前記 V B G を通過した後の前記測定ビームの強度から導出され、

前記レーザの周波数は、制御ループを介して前記エラー信号により安定化される、方法。

40

【請求項 14】

請求項 13 に記載のレーザの周波数安定化方法であって、

前記 V B G によりスペクトルフィルタリングされた前記レーザ光線は、前記レーザに再び入射され、前記レーザの拡張共振器を形成する、方法。

【請求項 15】

請求項 1 に記載の装置を用いたレーザの周波数測定方法であって、

エラー信号は、前記基準ビームの強度及び前記 V B G を通過した後の前記測定ビームの強度から導出され、

前記 V B G の温度は、前記 V B G のブラッグ周波数が、任意に選択された符号付きの周波数差を除く前記レーザの周波数に対応するように、制御ループを介して前記エラー信号

50

で調整され、

前記レーザの周波数は、前記V B Gの調整後の温度との既知の関連付けにより決定される、方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、レーザの周波数を安定化させるための装置及び方法に関し、特に、温度安定化した体積型ホログラフィック回折格子（volume Bragg grating：V B G）の分光法に基づくレーザの周波数を安定化させるための装置及び方法に関する。

【背景技術】

【0002】

電気通信や量子センサの用途では、特定の性能プロファイルを有するレーザを安定化させるための周波数基準が必要とされる。特に、宇宙空間におけるモバイルプラットフォームでの用途では、そのような周波数基準は可能な限りコンパクトで、モードホッピングなしに調整可能で、長期にわたって安定している必要があり、（再現可能な）周波数精度は約50MHzでなければならない。このような特性を有する宇宙空間仕様の周波数基準を実装するための対応する周波数基準モジュールは、従来技術ではまだ知られていない。

【0003】

先行技術の周波数基準は、一般的にファイバブラッググレーティング（fiber Bragg grating：F B G）の分光法に基づくものであり、当業者として、例えば、S o t o r e t a l. (J. Z. Sotor, A. J. Antonczak and K. M. Abramski, "Fiber Bragg Gratings as References for Frequency Stabilization of Microchip Laser", 2006 International Conference on Transparent Optical Networks, 2006, pp. 167-169)が知られている。S o t o r e t a l.から引用した図1に示されているように、レーザ光線は、光導波路に基づくビームスプリッタを介してF B Gに注入される。回折信号は光導波路に基づくビームスプリッタを介して分割され、送信信号とともにレーザの周波数を安定化させるための障害信号を生成するために使用される。レーザの周波数の安定性を向上するために要求される周波数選択素子の熱安定性を確保するために、F B Gは非熱的ハウジングにより囲まれている。

【0004】

しかし、光導波路に基づく分光法には大きな欠点がある。特に、光導波路の特性は、長期間の使用において、照射、機械的ストレス、温度変動の影響を受けて変化する可能性がある。これは、高感度センサのアプリケーションにおいて、許容できない測定誤差につながる。導波路に基づくビームスプリッタを使用する場合、これらの影響は導波路に基づくビームスプリッタの分割比の温度依存性、偏光依存性の原因ともなる。分割比の変動は、動作中における分光信号の誤った解釈をもたらす。このような系統誤差は周波数誤差の原因となる。非熱ハウジングを使用することは、高い周波数安定性を実現するために、F B Gの熱デカップリングを実現することを意図している。しかし、この方法では、温度制御によって回折格子の周波数を調整することは不可能である。したがって、F B Gに基づく周波数の安定化は、宇宙空間のモバイルプラットフォームへの応用には不向きであり、この目的には他の安定化コンセプトを使用しなければならない。

【発明の概要】

【0005】

従って、本発明の目的は、前述の性能プロファイルを有する宇宙空間での移動用途に十分なレーザの安定化を可能にするレーザの周波数安定化装置を提供することである。さらに、レーザの周波数安定化のための対応する方法を提供することである。

【0006】

これらの目的は、請求項1、13及び15の特徴による本発明によれば達成される。本発明の有利な構成は、従属請求項に記載されている。請求の範囲に個々に記載された特徴は、技術的に意味がある方法で互いに組み合わせることができ、本発明のさらなる変形実

10

20

30

40

50

施形態が示された、明細書からの説明的事実及び／又は図面からの詳細によって補足することができる。

【0007】

本発明の第1の側面は、レーザの周波数安定化装置であって、レーザにより出射されたレーザ光線を周波数選択素子に入射するためのビーム経路を備え、周波数選択素子は、温度制御され、周波数選択素子は、複数の回折格子構造を有する体積型ホログラフィック回折格子であるVBGであり、入力面を介してレーザ光線がVBGに入射する前に、レーザ光線の一部が基準ビームに分岐され、VBGに入射したレーザ光線の一部が測定ビームを形成する、レーザの周波数安定化装置である。

【0008】

ビーム経路は、特に、「自由ビーム」としてのレーザ光線を誘導するものを意味するとして捉えられる。すなわち、レーザ光線は、光ファイバ又は導波路を経由して周波数選択素子に入射されず、例えば、自由に伝播するガウシアンビーム（自由ビーム）として入射される。

【0009】

周波数選択素子の温度は制御可能であり、すなわち、適切な制御により環境に関連して変化させることができる。周波数選択素子のフィルタ周波数は一般的にその温度に依存するため、周波数選択素子の温度制御は、周波数選択素子のフィルタ周波数（中心周波数）の制御性能を含む。ペルチェ素子は、追加の冷却を伴う発熱体とは異なり、本質的に能動的な冷却も可能であるため、VBGの迅速な温度制御に有利に用いられる。しかし、発熱体を用いられる場合には、VBGの熱接続を迅速かつ効果的な冷却用に特別に最適化する必要がある。

【0010】

VBGは、特定の種類の光学回折格子である。機械的な回折格子（「ルーラー回折格子」）や、ホログラフィックに生成された平面回折格子（「ホログラフィック回折格子」）は、通常、表面回折格子として形成されるが、VBGは、一般的に、物質の内部にある「厚い回折格子」である。VBGは、複数の回折構造が互いに隣り合うように配置されている。本明細書では、回折格子の個々の反射層を格子構造と表記する。これらは例えば、適切な材料中に互いに隣接して配置された複数の回折格子面からなる可変帯域グレーティングの個々の回折格子面である。しかし、個々の回折格子構造は、例えば湾曲した表面形状など、非平面状の形態を有する可能性がある。回折格子構造間の間隔は、広帯域の分光分布を有する回折格子（「チャープ回折格子」と呼ばれる）を提供するために変化させることができる。また、VBGは、互いに別個の複数の格子を備えることもあり、少なくとも一部は互いに融合し、対応する格子構造を持つこともある。VBGは、通常、ホログラフィックに生成され、対応するフィルタ素子も体積型ホログラフィック回折格子（VHGs）と呼ばれる。しかし、VBG構造はホログラフィック以外の方法でも生成可能であり、例えば、位相マスクを介してガラスにfsレーザパルスを刻み込むことによって生成できる。

【0011】

VBGは、好ましくは、光熱屈折ガラス中に体積ホログラフィック的に生成されたブラッググレーティングの形態をとる。好ましい実施形態では、VBG媒体として、二色性ゼラチン、フォトリソグレイ、フォトリソグレイ結晶又はハロゲン化銀乳剤に基づく体積ホログラフィック回折格子を用いることも可能である。宇宙空間のモバイルプラットフォームに応用するための重要な基準の一つは、特にVBGの長期安定性であり、特に照射、機械的ストレス、温度変動、及び経年変化の影響を受けにくいことである。

【0012】

この発明によれば、レーザ光線の一部が、VBGに入射する前に基準ビームとして分岐される。この分岐は、VBGの入力面を介して行われる。「入射する前」という表現は、ビーム経路に沿った位置との関連で理解されるべきである。したがって、分岐は、入射と時間的に並行して、すなわち、入射の物理的プロセス中又はそのプロセス中に実行するこ

とも可能である。この目的のため、基準ビームを分岐させるには、入射時にV B Gの入力面で直接反射させる方法が特に有効である。あるいは、基準ビームは、V B Gの上流側に配置されたビームスプリッタによって、自由ビームからV B Gに向けられたビームを分岐させることもできる。基準ビームは、適切な基準検出器で検出することができる。一方、V B Gに入射するレーザ光線の一部は、測定ビームを形成する。測定ビームは、望ましくは、V B Gの下流側で透過した測定ビームとして、又はV B Gの上流側で回折した測定ビームとして検出することができる。透過した測定ビームと回折した測定ビームは、いずれもV B G内で繰り返し反射（例えば、V B Gの外側で）させることもできる。

【0013】

V B Gは、好ましくは、リトロ配置されるように構成される。このような構成では、レーザ光線はV B Gの回折格子構造に垂直に入射する。V B Gがリトロ配置されるように構成されて動作する場合、本発明による装置の周波数（V B Gの中心周波数）の値は、入射レーザビームの傾きに対して1次的に鈍感である。

【0014】

V B Gの入力面は、好ましくは、入射レーザ光線のビーム軸及び／又はV B Gの回折格子構造に対して90°以外の角度をなす。V B Gの入力面が入射レーザ光線のビーム軸に対して90°以外の角度を有する場合、V B Gの入力面における入射レーザ光線の反射光の一部は、入射方向以外の方向に向けられる。つまり、干渉の原因となるレーザへの直接の後方反射がない。さらに、レーザビームの一部は、V B Gに入射する直前の反射によって、別の基準ビームに分岐することができる。入射ビームと入力面で反射されたビームが空間的に分離されているため、ビームスプリッタを追加する必要がない。誘電体ビームスプリッタは、すなわち、温度依存性と経時変化（エージング効果）を持つ高反射コーティングを持つ。特に好ましくは、入射レーザ光線の一部は、V B Gの入力面でフレネル反射により分岐される。V B G媒質の屈折率と入射角に応じて、レーザ光線とV B Gの回折格子構造との間に特定の角度を設定することができる。特に、これにより、V B Gを特定のリトロ配置に最適に適合させることができ、リトロ配置では、入力面で反射されたビームは、入射ビームの方向には反射されない。

【0015】

V B Gは、好ましくは、取付面と、取付面に対向する上面と、取付面と上面とを接続する2つの側面を備え、V B Gの回折格子ベクトル及び上面は、取付面に対して平行である、かつ／又は、側面は、互いに平行に構成される。V B Gはさらに、取付面と上面とを接続し、レーザ光線が好ましくはそこから入射する前面（入力面）と、取付面と上面とを接続し、入力面の反対側にある後面とを備えてもよい。V B Gの側面は、V B Gの体積を最小にするために、好ましくは±100'、より好ましくは、±10'の公差で互いに平行に配向される。回折格子構造（例えば、同一の屈折率を有する平面又はわずかに湾曲した面）に対して直交する回折格子ベクトル、及び上面は、本発明による装置の集積プロセスを簡略化するために、好ましくは±40'、より好ましくは、±4'の公差で、V B Gの取付面に対して平行に配向される。V B Gの回折格子ベクトルと屈折ビーム（V B Gに入射した後の測定ビーム）のビーム軸との間の角度は、好ましくは公差±40'、より好ましくは±4'である。V B Gの回折格子ベクトルと屈折ビームのビーム軸との間の角度の公差をより厳しくすることで、積分プロセス中により大きなゆとりを持たせることができる。

【0016】

入射光ビームのビーム軸とV B Gの入射面との間の角度は、好ましくは±10°、より好ましくは±1°である。V B Gの入力ファセットは、好ましくは、入射光ビームのビーム軸に対して45°±1°の角度を有する。入射光ビームのビーム軸とV B Gの入力ファセットとの間の角度を45°とすることにより、機械的な統合が単純化され、一方、入射光ビームのビーム軸とV B Gの入力ファセットとの間の角度の許容誤差をより厳しくすることにより、フレネル反射の角度依存性により予測可能な検出器信号レベルが得られ、したがって、より小型で高速な検出器を用いることが可能となる。

【0017】

10

20

30

40

50

さらに好ましい実施形態では、入射ビームのビーム軸とV B Gの入力ファセットとの間の角度は45°ではなく、代わりに別の値をとり、入射ビームと入力ファセットで反射されたビームとは空間的に分離している。さらに好ましい実施形態では、V B Gの入力ファセットに入射するビームと入力ファセットで反射するビームは空間的に重なる。この場合、基準ビームは、V B Gの上流に配置されたビームスプリッタによって生成することができる。

【0018】

V B Gは、好ましくは、平行六面体の形態をとり、V B Gの回折格子構造は、V B Gの取付面、上面、側面のいずれにも垂直に配置される。この場合、本発明による装置の統合プロセスが簡素化されるだけでなく、必要なスペースが削減され、熱負荷も低減されます。平行六面体は、入力面でのフレネル反射に必要な格子構造に対する表面傾斜をそれ自体で提供することができます。

【0019】

基準ビームは、好ましくは、V B Gの表面又はV B Gの上流側に配置されたビームスプリッタにおいて分岐される。フレネル反射の場合、反射を低減するために、入力面に誘電体コーティングを施さないことも可能である。V B Gの入力面に誘電体コーティングを施さないことで、反射及び透過における温度及び経年変化の影響を回避できる。

【0020】

本発明による装置は、好ましくは、基準ビームの強度を決定するように設定された基準検出器と、測定ビームの強度を決定するように設定された測定検出器と、をさらに備え、測定ビームの強度は、V B Gを通過した後に決定される。測定ビームは、V B G内の外側表面で繰り返し反射することができる。特に、測定ビームは、V B Gを1回、2回、又は複数回通過することができる。測定検出器は、好ましくは、V B Gによって伝送された信号（伝送信号）を検出する。しかし、代替的に、V B Gによって回折された光ビームも測定検出器によって検出することができる（回折信号）。検出器は、好ましくはフォトダイオードである。

【0021】

本発明による装置は、好ましくは、基準検出器の基準信号と測定検出器の測定信号からエラー信号を導出するための第1の電子回路をさらに備える。エラー信号は、制御偏差と相関する機能依存性を有する信号を意味する。通常、故障信号は、制御回路に適した特性動作点（例えばゼロクロスオーバー）を有する。

【0022】

エラー信号を導出するために基準信号と伝送信号を使用する代わりに、基準信号と回折信号を使用することも可能である。さらなる実施形態では、伝送信号と回折信号、又は基準信号、伝送信号、及び回折信号を使用してエラー信号を導出することができる。さらに、回折信号のみ、又は伝送信号のみを使用してエラー信号を導出することも可能であるが、いずれの場合も一定の入力レベルが必要である。

【0023】

V B Gは、好ましくは、回折格子ハウジングにより周囲から熱的に分離されている。適切な回折格子ハウジングは、V B Gの熱及び光の絶縁性を高めることができる。回折格子ハウジングは、V B Gが他の構成と共に配置される光学台に接続することができる。回折格子ハウジングは、温度安定化を含んでもよい。このような実施形態により、熱放射に関連するV B Gの周囲の温度勾配をより小さくすることができる。

【0024】

V B Gは、好ましくは、モジュールハウジング内に他の構成と共に配置されている。特に、V B Gは、追加の回折格子ハウジングの有無に関わらず、他の構成要素（例えば、ミラー、偏光子、及び／又は光学台）とともにモジュールハウジング内に配置することができる。このような実施形態により、V B Gの熱及び音響の絶縁性が向上する。モジュールハウジングは、周囲から熱的に分離され、温度安定化を含めることができる。

【0025】

V B Gの温度安定化のために、少なくとも1つの冷却及び／又は加熱装置が用いられることが好ましい。冷却及び／又は加熱装置は、ペルチェ素子又は発熱体を備えることが好ましい。発熱体を使用する場合、V B G（又はこれに接続された素子）の熱接続は、高速かつ効果的な冷却のために特別に最適化することができる。冷却は、例えば、宇宙空間への放射冷却を含むことができる。本発明による信号取得に使用される検出器は、V B Gと共通のペルチェ素子又は共通の適切に熱的に接続されたプラットフォーム上に配置されることがさらに好ましい。このような実施形態により、ビームのずれに対する感度を低減し、それによって本発明による装置の精度を向上させることが可能になる。

【0026】

上記実施形態は、全体又は一部を問わず、互いに有利に組み合わせることができる。

10

【0027】

本発明に関する第2の側面は、本発明による装置を用いたレーザの周波数安定化方法に関するものであり、エラー信号は、基準ビームの強度及びV B Gを（少なくとも1回）通過した後の測定ビームの強度から導出され、レーザの周波数は、制御ループを介してエラー信号により安定化される。

【0028】

特に、本発明による装置の温度は、冷却及び／又は加熱装置を介して制御することができる。この制御は、V B Gに局所的に関連するものであってもよいし、あるいは、例えばV B Gが他の構成要素とともに配置される光学台のような他の構成要素に関連するものであってもよい。同様に、複数の温度制御アプローチを組み合わせることも可能である。光学台の温度安定化は、本発明による方法の精度を向上させる。

20

【0029】

V B Gによりスペクトルフィルタリングされたレーザ光線は、好ましくは、レーザに再び入射され、レーザの拡張共振器を形成する。特に、拡張共振器を備えた周波数安定化ダイオードレーザ（「extended-cavity diode laser」、E C D L）は、この方法で実装することができる。関連する制御回路は、例えば、レーザ周波数を調整し安定化させるために、注入電流やレーザの温度を制御するために使用することができる。

【0030】

第3の側面は、本発明による装置を用いたレーザの周波数測定方法に関し、エラー信号は、基準ビームの強度及びV B Gを（少なくとも1回）通過した後の測定ビームの強度から導出され、V B Gの温度は、V B Gのブラッグ周波数が、任意に選択された符号付きの周波数差を除くレーザの周波数に対応するように、制御ループを介してエラー信号で調整され、レーザの周波数は、V B Gの調整後の温度との既知の関連性により決定される。これにより、V B Gのブラッグ周波数（中心周波数）も直接的にレーザの周波数に調整することができる。

30

【0031】

レーザの周波数測定方法と、レーザの周波数安定化のための本発明による方法は、制御変数の観点においてのみ実質的に異なるが、それ以外は共通の発明概念に基づいている。レーザの周波数安定化の目的では、特定のレーザ周波数を調整し安定化させるために、本発明に従って導出された誤差値を用いてレーザの温度及び／又は入射電流を制御することが可能であるが、レーザの周波数測定の目的では、温度制御の支援により、V B Gの温度を安定化させることが可能である。これにより、V B Gのブラッグ周波数（中心周波数）は、任意に選択された符号付き周波数差を除いてレーザの周波数と一致する。温度センサを介して調整又は確定されたV B Gの温度に基づいて、既知の関連付けによりレーザの周波数を決定し、例えば表示装置に表示することができる。

40

【0032】

さらに、本発明による方法の好ましい構成は、本発明による装置に関連して説明に記載された特徴によって直接的に明らかにされる。

【0033】

本発明は、例えば原子遷移の波長等、レーザをより迅速かつ確実に所望の波長に安定化

50

させる量子センサに利用することができる。したがって、本発明による装置は、例えば光衛星通信において2つの衛星が容易に通信を確立する（ロックを取得する）ことができる。

【0034】

先行技術では光信号は光導波路で導かれるが、本発明では、光信号は、自由空間で伝搬されることが好ましい。本発明は、特に以下の構造上の相違により区別される。

1. VBGがFBGに代えて周波数選択素子として用いられる。
2. FBGの上流側において光信号を分離するために、光導波路に基づくビームスプリッタが用いられない。入射光信号の一部は、VBGの入力面におけるフレネル反射によって、残りの信号から分岐されることが好ましい。この目的のため、VBGの入力面は、入射ビームに対して角度をつけて配置し、フレネル反射と入射ビームが空間的に互いに分離されるようにすることができる。エラー信号は、好ましくは、透過した入射光信号と分岐した入射光信号から導出することができる。
3. VBGは、光学台又は一般的に適切なキャリア上に配置することができ、その温度は、適切な冷却及び／又は加熱装置と温度センサにより、所定の値に安定化させることができる。

【0035】

従来技術と比較すると、この発明による装置は、測定精度にとって特に重要な箇所に光導波路部品が用いられていないため、照射、機械的ストレス、温度変化に対してはるかに耐性がある。フレネル反射による基準ビームの分岐が優先されるため、分割比を温度の影響からほぼ独立させることが可能である。ペルチェ素子を用い、非熱的ハウジングを廃することで、温度を介して直接VBGの周波数を調整することが可能となる。装置を小型化し、VBGを適切に形成することで、より高い機械的安定性を実現し、重量とフォームファクターを低減することができる。オプションのモジュールハウジングにより、この発明に基づく装置を音響及び熱の影響から非常に効果的に遮蔽することができる。さらに、例えばペルチェ素子をVBGの下に配置し、ペルチェ素子を囲む回析格子ハウジング、光学台を安定化させるための追加のペルチェ素子、及び光学台を囲むモジュールハウジングを使用して、VBGを段階的に温度安定化させることにより、周波数調整のオプションと同時に高い周波数精度を実現することも可能である。

【0036】

本発明のさらに好ましい構成は、それぞれのサブクレームで述べた特徴によって明らかにされる。

【0037】

本出願に記載された本発明の様々な実施形態は、特に指定がない限り、互いに有利に組み合わせることができる。

【図面の簡単な説明】

【0038】

以下、添付の図を参照しながら、この発明と技術的背景についてより詳細に説明する。なお、この発明は、記載された例示的な実施形態によって限定されることを意図したものではない。特に、他に明確な記載がない限り、図で説明された主題の副次的側面を抽出して、本明細書の他の構成要素や洞察と組み合わせることも可能である。図面において：

【図1】図1は、従来技術（Sotorらによる）のレーザの周波数安定化のための従来の装置を示す概略図である。

【図2】図2は、レーザの周波数安定化のための本発明による装置の第1の実施形態を示す概略図である。

【図3】図3は、レーザの周波数安定化のための本発明による装置の第2の実施形態を示す概略図である。

【図4】図4は、レーザの周波数安定化のための本発明による装置の第3の実施形態を示す概略図である。

【図5】図5は、レーザの周波数安定化のための本発明による装置の第4の実施形態を示

す概略図である。

【図6】図6は、本発明によるV B Gの幾何学形状を示す概略図である。

【図7】図7は、図2の装置を用いてレーザの周波数安定化のための本発明による方法の第1の実施形態を実施するための概略図である。

【図8】図8は、図7の実施形態に対応する信号を示す概略図である。

【図9】図9は、図2の装置を用いてレーザの周波数安定化を行うための本発明による方法の第2の実施形態を実施するための概略図である。

【図10】図10は、図2の装置を用いてレーザの周波数安定化を行うための本発明による方法の第3の実施形態を実施するための概略図である。

【図11】図11は、図2に従う装置を用いてレーザの周波数を測定するための、本発明による方法の実施形態を実施するための概略図である。

10

【図12】図12は、図11に従う信号を示す概略図である。

【図13】図13は、図11に従うV B Gの温度とレーザの周波数との関連を示す概略図である。

【発明を実施するための形態】

【0039】

図1は、従来技術によるレーザ周波数安定化装置を示す概略図である（S o t o r らによる）。レーザ（「安定化レーザ」）は、ペルチェ素子（「thermoelectric cooler」：T E C）によって温度制御される温度制御レーザ結晶（N d : Y A G / K T P）を備え、1064nm及び532nmの2つの波長により共振して出射する。レーザ結晶は、発光波長808nmのダイオードレーザ（「励起ダイオード」）によって励起される。1064nmの光線の一部は、ダイクロイックビームスプリッタ（「ダイクロイックミラー」）によって分岐され、ファイバーカプラーを介して非熱ハウジング内に配置されたF B Gに入射する。回折放射成分（「反射信号」）とF B Gを透過する放射成分（「透過信号」）の強度は、適切に配置されたP I Nフォトダイオード（「P I Nダイオード」）によって決定され、両信号はレーザ結晶の温度制御を行う電子回路に供給される（「自動周波数制御」）。このレーザ周波数安定化の品質は、主にF B Gと装置内の関連ファイバ部分の安定性に依存する。

20

【0040】

図2は、レーザの周波数安定化のための本発明による装置の第1の実施形態を示す概略図である。光信号は、偏波保持型単一モード光導波路（P M S F）F 1を介して装置に入射する。P M S F F 1により、既存の光学システムに本発明による装置を簡単に統合することができる。入射した光信号は、光学システムL 1により平行光となる。偏光子R 1により、ミラーS 1、S 1を備えるV B G G 1に、s - 偏光のみが導かれる。光ビームは、図6に示されているように、V B G G 1をリトロ配置するように構成すること（すなわち、格子構造Eへの光の垂直入射）で $\pm 1^{\circ}$ の許容誤差で動作するように導かれる。偏光子R 1は、系統的な測定エラーにつながる可能性のある偏光変動を防止することができる。2枚のミラーS 1、S 2を介したビーム誘導は、1枚のミラーを用いて、又は、ミラーを全く用いずにV B Gを配置する場合よりも、V B Gの位置決めに大きな自由度をもたらす。

30

40

【0041】

V B G G 1は、温度安定化のため、温度センサN 1と、例えば第1の冷却及び／又は加熱装置T 1に取り付けられ得る。基準検出器P 1及び測定検出器P 2も同様に、冷却及び／又は加熱装置T 1に取り付けられてもよく、これにより安定したビームアライメントが確保される。P M S F F 1、光学システムL 1、偏光子R 1、ミラーS 1、S 1、並びに冷却及び／又は加熱装置T 1は、共通の光学台B 1に接着結合されることが好ましい。回折格子ハウジングH 1は、光学台B 1に熱的に接続することができ、それにより、本発明による装置の温度安定性を向上させることができる。光学台B 1は、第2の冷却及び／又は加熱装置T 2によって、同様に所望の温度に安定化させることができる。

【0042】

50

オプションのモジュールハウジングH 2は、光学台B 1を周囲からの熱や音響干渉から遮蔽するために用いることができる。光学システムL 1、偏光子R 1、ミラーS 1、S 2、及びVBGG 1は、好ましくは微小な光学部品を備える。本発明による関連する小型化、軽量化、及び装置の機械的安定性の向上により、微小な光学部品を用いることが好ましい。冷却及び／又は加熱装置T 1、T 2は、好ましくはペルチェ素子又は発熱体を備える。

【0043】

図3は、レーザの周波数安定化のための本発明による装置の第2の実施形態を示す概略図である。この概略図は、概ね図2に対応しているため、参照符号は対応するものとする。この実施形態では、VBGG 1によって回折された光ビームの強度は、測定検出器P 3（回折信号）によって決定される。したがって、基準信号と直接伝送信号の代わりに、基準信号と回折信号を用いてエラー信号を生成することができる。回折ビームの強度は、VBGG 1の上流側のビームスプリッタA 1により反射した後、測定検出器P 3により測定することができる。

10

【0044】

図4は、レーザの周波数安定化のための本発明による装置の第3の実施形態を示す概略図である。この概略図は、概ね図3に対応しているため、参照符号は対応するものとする。入射ビームと回折ビームが空間的に重ならない場合、VBGG 1の上流側に追加のビームスプリッタA 1を設ける必要はなく、代わりに回折ビームの強度も測定検出器P 4で直接的に決定することができる。

20

【0045】

図5は、レーザの周波数安定化のための本発明による装置の第4の実施形態を示す概略図である。この概略図は、概ね図4に対応しているため、参照符号は対応するものとする。回折ビームの強度を測定検出器P 4により決定する代わりに、例えば、VBGG 1の側面（例えば、側面A、B）を介して分離されたビームを測定検出器P 5により測定することもできる。この場合、入射面で反射した後に回折ビームが出射される面である、VBGG 1の対応する側面は、光学的に高品質でなければならない。

【0046】

図6は、本発明によるVBGの幾何学形状を示す概略図である。VBGG 1の入力ファセットは、好ましくは、入射光ビームのビーム軸に対して $45^{\circ} \pm 1^{\circ}$ の角度を有し、コーティングされていない。VBGG 1の側面A、Bは、好ましくは、VBGG 1の体積を最小化するために、 $\pm 10'$ の許容誤差で互いに平行に配向されている。等しい屈折率の格子構造Eに直交するグレーティングベクトル、及び上面Dは、好ましくは、許容誤差 $\pm 4'$ であり、VBGG 1の取付面Cに平行に配向される。これにより、本発明によるVBGの装置への統合プロセスが簡素化される。入射光ビームは、好ましくは、VBGG 1の入力ファセットでフレネル反射される。

30

【0047】

図7は、図2の装置を用いたレーザの周波数安定化のための、本発明による方法の第1の実施形態を実施するための概略図である。この概略図は、概ね図2に対応しているため、参照符号は対応するものとする。レーザD 1からの光は、適切な制御によってレーザD 1の周波数を安定化させることができるように、ここでは例として、光学システムL 2のアシストを受けて、本発明による装置の光導波路F 1に入射される。

40

【0048】

図示されたVBGG 1の入力面で反射されたビームは、例えば、反射ビームの強度を検出する基準検出器P 1（基準信号）に衝突する。入力面に当たる光ビームの一部は、VBGG 1に入射する際に屈折する。VBGG 1により透過されたビームの強度は、測定検出器P 2（透過信号）で検出できる。レーザD 1の安定化（又はレーザD 1の発振周波数の測定）に用いることができるエラー信号は、基準検出器P 1の基準信号U 1と測定検出器P 2の伝送信号U 2から生成することができる。

【0049】

50

この目的のため、基準検出器 P 1 及び測定検出器 P 2 の信号 U 1, U 2 は、適切な電子回路 E 1 で処理され、エラー信号が生成される。エラー信号は、適切な電子回路 E 2 で処理され、レーザ D 1 の周波数を制御するための制御信号としてレーザ D 1 にフィードバックされ、レーザ D 1 の周波数が定義された値 f_0 に調整される。

【0050】

最も単純な場合、電子回路 E 1 は、適切な比例係数を用いて基準検出器 P 1 及び測定検出器 P 2 の信号 U 1, U 2 を比例的に増幅し、信号 U 1 と信号 U 2 との差を決定するように実装することができる（図 8 参照）。

【0051】

図 8 は、図 7 の実施形態に対応する信号を示す概略図である。基準検出器 P 1 の基準信号 U 1 及び測定検出器 P 2 の伝送信号 U 2（フォトダイオード信号）の例示的な曲線を、レーザ D 1 の周波数（レーザ周波数 f ）に対してプロットする。これにより、エラー信号として差分信号 $U_2 - U_1$ を求めることができ、図 8 に例として示すように、エラー信号の最初のゼロクロスオーバーを、レーザ D 1 の周波数が定義された値 f_0 になるための制御点として示すことができる。制御ループが起動すると、レーザ D 1 の周波数は、エラー信号が正勾配又は（図示されているように）負勾配でゼロクロスする値 f_0 に調整される。

10

【0052】

図 9 は、図 2 の装置を用いてレーザの周波数安定化を行うための本発明による方法の第 2 の実施形態を実施するための概略図である。この概略図は、図 2 とほぼ対応しているため、参照符号は対応するものとする。これは特に、本発明による装置を用いて、拡張共振器（「拡張キャビティダイオードレーザ」、ECDL）を備えたダイオードレーザの内部周波数安定化を図るための方法である。

20

【0053】

レーザ D 2 が出射する光線は、光学コリメートシステム L 3 のアシストを受けてコリメートされ、光学システム L 2 のアシストを受けて、本発明によるデバイスに入射する。入射した光線は、VBGG 1 によって周波数選択的に回折される。このようにして具体化されたレーザ構成は、ECDL の可能な縦方向の固有モードの 1 つの周波数に対応する周波数で発振する。VBGG 1 は、狭帯域反射器として作用し、発振可能な縦モードのうちの 1 つを選択する。これは通常、反射器として作用する VBGG 1 のスペクトルの中心周波数に最も近い周波数を有する縦モードである。ここで説明する方法を用いるのに好ましい、本発明による装置の実施形態は、注入用の光導波路を含まず、むしろ自由ビームを装置に入射するものである。これにより、特に、光導波路の面からレーザ D 2 への寄生帰還が防止され、さもなければ ECDL の動作が干渉を受ける可能性がある。

30

【0054】

レーザ装置周辺の気圧の変化、レーザ D 2 の温度、レーザ D 2 に入射する電流、及び／又はレーザ D 2、光学コリメートシステム L 3、及び本発明による装置からなるレーザ装置周辺の温度の変化により、システム L 3 及び本発明による装置で構成されるレーザーセットアップの温度が、ECDL の長手方向の固有モードの周波数と、狭帯域反射器として作用する VBGG 1 の中心周波数との間にスペクトル離調をもたらす。この離調度が ECDL の自由スペクトル帯域の大きさのオーダーに達すると、モードホッピングが発生する。すなわち、ECDL の異なる縦モード固有モードへの変化が起こる。これにより、レーザ発振の周波数が急激に変化する。

40

【0055】

本発明によるレーザの周波数安定化方法は、一定の周波数での動作中又は所望の周波数変化が生じた場合に、レーザ発振の周波数の急激な変化を回避するために用いることができる。この目的のために、基準検出器 P 1 の基準信号 U 1 及び測定検出器 P 2 の伝送信号 U 2 から、適切な電子回路 E 1 を用いてエラー信号が生成される。その後、適切な電子回路 E 2 を用いて、例えば、レーザ D 2 への入射電流、レーザ D 2 の温度、又はレーザ D 2、光学コリメートシステム L 3、及び冷却及び／又は加熱装置 T 3 を備えた本発明による

50

装置からなるシステムの温度を制御する制御信号を生成することができる。これらのパラメータの組み合わせも制御することができる。このようにして、ECDLの固有モードの発振周波数は、それが本発明による装置の周波数 f_0 に同調した状態を維持するように調整される。このように、ECDLの発振周波数は、本発明による装置の周波数 f_0 に従う。

【0056】

図10は、図2の装置を用いてレーザの周波数安定化を行うための本発明による方法の第3の実施形態を実施するための概略図である。この概略図は、概ね図9に対応しているため、参照符号は対応するものとする。図9とは対照的に、電子回路E2によって生成された制御信号は、本発明による装置に直接結合された冷却及び／又は加熱装置T1を制御するために用いられる。この場合、本発明による装置の周波数 f_0 は、ECDLの発振周波数に安定化される。

10

【0057】

図11は、図2に従う装置を用いてレーザの周波数を測定するための、本発明による方法の実施形態を実施するための概略図である。この概略図は、概ね図2に対応しているため、参照符号は対応するものとする。レーザD1からの光は、例えば光学システムL2のアシストを受けて、本発明による装置の光導波路F1に入射する。これにより、本発明の装置における周波数 f_0 （VBG又はブラッグ周波数の中心周波数の任意に選択された符号付き周波数差に相当する）がレーザD1の周波数の値 f_1 を仮定するように、冷却及び／又は加熱装置T1を駆動することができる。このように調整された温度センサN1で測定された温度値は、レーザD1の周波数の特定の値に割り当てることができる。

20

【0058】

この目的のため、基準検出器P1の基準信号U1及び測定検出器P2の伝送信号U2は、適切な電子回路E1で処理される。エラー信号は、電子回路E2のアシストを受けて、制御信号として、本発明による装置の周波数 f_0 がレーザD1の発振周波数 f_1 に対応するように、冷却及び／又は加熱装置T1を制御するように処理される。レーザD1の発振周波数の値 f_1 に応じて、レーザD1の発振周波数の値 f_1 に特有の温度Tが温度センサN1で確立される。既知の関連付け（例えば較正テーブルK1）の支援により、レーザD1の発振周波数の値 f_1 は、温度センサN1での温度Tの値からこのようにして決定され、表示装置Y1に表示される。

30

【0059】

図12は、図11に従う信号を示す概略図である。本発明による装置の周波数 f_0 は、レーザD1の周波数（レーザ周波数 f ）の値に安定化される。差分信号 $U2 - U1$ の例示的な曲線（決定については図8参照）は、本発明による装置の2つの異なる温度 T_1 、 T_2 に対して示されている。この場合も、エラー信号の最初のゼロクロスオーバーを基準点として用いることができる。既知の割り当てにより、温度センサN1における温度 T_1 、 T_2 の値から、レーザD1の振動周波数の値 f_1 又は f_2 を決定することができる（図14参照）。

【0060】

図13は、図11に従うVBG（G1）の温度とレーザの周波数との関連を示す概略図である。この概略図では、温度センサN1の温度T（ T_{N1} ）がレーザD1の周波数（レーザ周波数 f ）に対してプロットされる。

40

【符号の説明】

【0061】

D1, D2 : レーザ
G1 : 体積型ホログラフィック回折格子（VBG、周波数選択素子）
E : 回折格子構造（例えば、格子面又は平面）
A, B : 側面
C : 取付面
D : 上面

50

- A 1 : ビームスプリッタ
- P 1, P 3 : 基準検出器
- P 2, P 4, P 5 : 測定検出器
- U 1 : 基準信号 (基準検出器)
- U 2 : 測定信号 (測定検出器)
- E 1, E 2 : 電子回路
- H 1 : 回析格子ハウジング
- H 2 : モジュールハウジング
- T 1, T 2, T 3 : 冷却及び／又は加熱装置
- K 1 : 校正テーブル
- Y 1 : 表示装置
- L 1, L 2, L 3 : 光学システム
- S 1, S 2 : ミラー
- F 1 : 光導波路
- R 1 : 偏光板
- N 1 : 温度センサ
- B 1 : 光学台

【図 1】

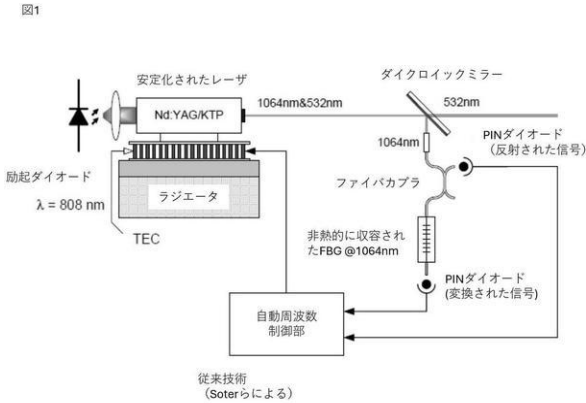


FIG. 1

【図 2】

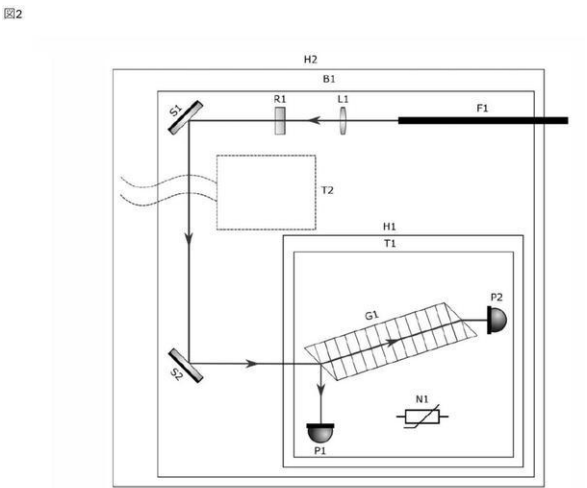


FIG. 2

【図 3】

図3

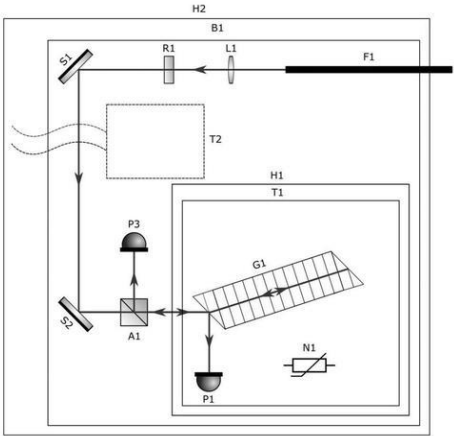


FIG. 3

【図 4】

図4

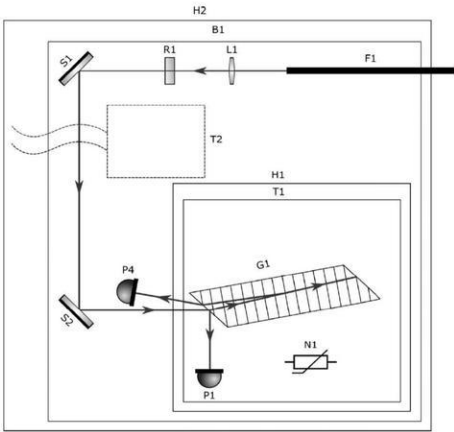


FIG. 4

【図 5】

図5

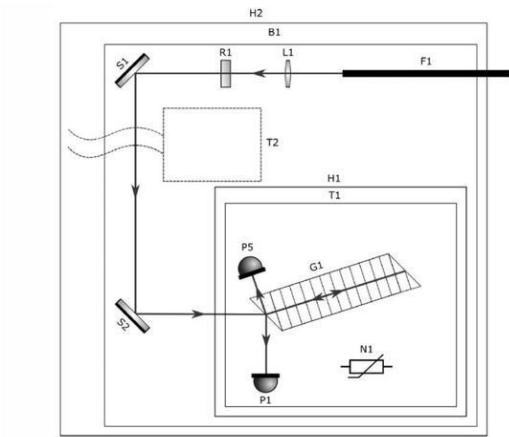


FIG. 5

【図 6】

図6

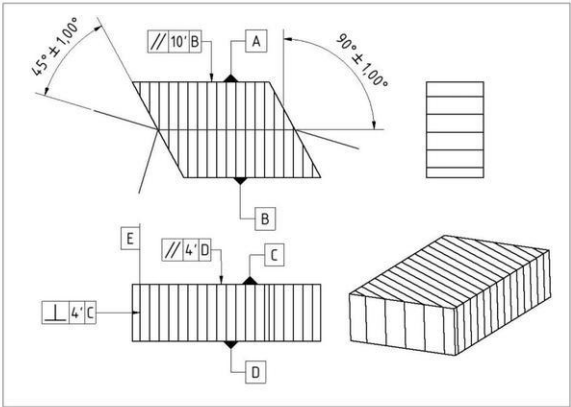


FIG. 6

【図 7】

図7

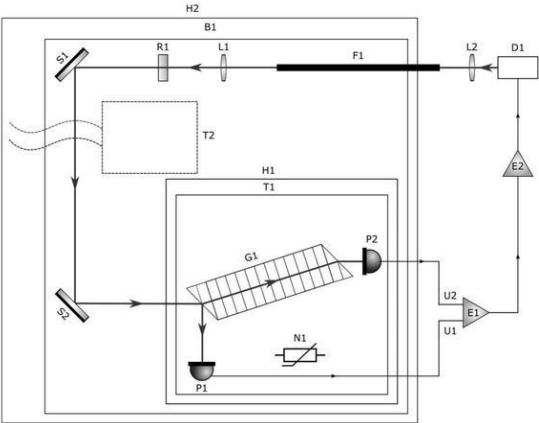


FIG. 7

【図 8】

図8

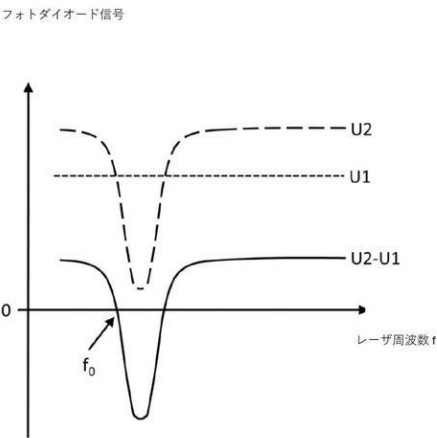


FIG. 8

【図 9】

図9

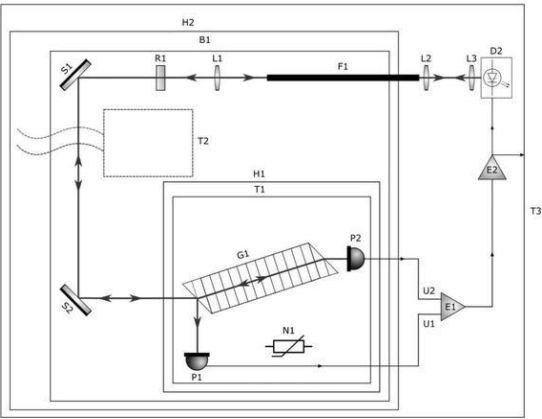


FIG. 9

【図 10】

図10

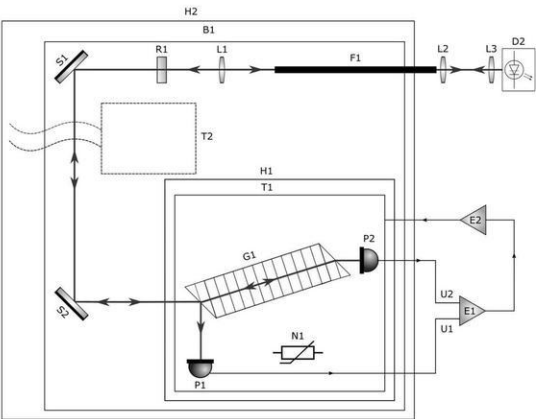


FIG. 10

フロントページの続き

(74)代理人 110001139

S K弁理士法人

(74)代理人 100130328

弁理士 奥野 彰彦

(74)代理人 100130672

弁理士 伊藤 寛之

(72)発明者 ヒルシュ、ヤンペーター

ドイツ 1 3 5 9 9 ベルリン ハーゼルホルスター ダム 1 1

(72)発明者 シーマング、マックス

ドイツ 1 2 4 8 7 ベルリン シュプリングボルンストラーセ 5

(72)発明者 ヴィヒト、アンドレアス

ドイツ 1 2 4 5 9 ベルリン クラーストラーセ 3

審査官 村井 友和

(56)参考文献 米国特許第9 5 7 7 4 0 9 (US, B1)

米国特許出願公開第2 0 0 3 / 0 1 7 9 7 9 1 (US, A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H 0 1 S 3 / 0 0 - 3 / 3 0