

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第3584450号
(P3584450)

(45) 発行日 平成16年11月4日(2004.11.4)

(24) 登録日 平成16年8月13日(2004.8.13)

(51) Int.Cl.⁷

H O I S 3/16

F I

H O I S 3/16

請求項の数 18 (全 15 頁)

(21) 出願番号	特願平7-59202	(73) 特許権者	000002130
(22) 出願日	平成7年3月17日(1995.3.17)		住友電気工業株式会社
(65) 公開番号	特開平8-255946		大阪府大阪市中央区北浜四丁目5番33号
(43) 公開日	平成8年10月1日(1996.10.1)	(74) 代理人	100088155
審査請求日	平成13年11月26日(2001.11.26)		弁理士 長谷川 芳樹
		(74) 代理人	100089978
			弁理士 塩田 辰也
		(74) 代理人	100092657
			弁理士 寺崎 史朗
		(74) 代理人	100094318
			弁理士 山田 行一
		(72) 発明者	塩見 弘
			兵庫県伊丹市昆陽北一丁目1番1号 住友 電気工業株式会社 伊丹製作所内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 レーザー発振素子及びレーザー発振装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

ダイヤモンドに、希土類金属原子又は希土類金属原子を含む化合物が添加されたドーブダイヤモンドから成る発振部分を備えることを特徴とするレーザー発振素子。

【請求項2】

前記希土類金属原子が、ネオジウム原子(Nd)と、サマリウム原子(Sm)と、ユウロピウム原子(Eu)と、イッテルビウム原子(Yb)とから成る群より選択される原子を含むことを特徴とする請求項1に記載のレーザー発振素子。

【請求項3】

前記希土類金属原子がエルビウム原子(Er)を含むことを特徴とする請求項1に記載のレーザー発振素子。

【請求項4】

前記ドーブダイヤモンド中における前記エルビウム原子(Er)の前記濃度が、1ppm~50,000ppmの範囲にあることを特徴とする請求項3に記載のレーザー発振素子。

【請求項5】

前記ドーブダイヤモンドが更に、1ppm以上の濃度で窒素原子(N)を含有することを特徴とする請求項3又は4のいずれかに記載のレーザー発振素子。

【請求項6】

前記窒素原子(N)の前記濃度が100ppm~50,000ppmの範囲にあることを

10

20

特徴とする請求項 5 に記載のレーザー発振素子。

【請求項 7】

前記ドーパダイヤモンドが更に、1 ppm以上の濃度でホウ素原子(B)を含有することを特徴とする請求項 3 又は 4 のいずれかに記載のレーザー発振素子。

【請求項 8】

前記ホウ素原子(B)の前記濃度が100 ppm~50,000 ppmの範囲にあることを特徴とする請求項 7 に記載のレーザー発振素子。

【請求項 9】

前記ドーパダイヤモンドが更に、1 ppm以上の濃度でホウ素原子(B)を含むことを特徴とする請求項 5 に記載のレーザー発振素子。

10

【請求項 10】

前記窒素原子の前記濃度が100 ppm~100,000 ppmの範囲にあり、且つ、前記ホウ素原子の前記濃度が100 ppm~100,000 ppmの範囲にあることを特徴とする請求項 9 に記載のレーザー発振素子。

【請求項 11】

添加物を含まないダイヤモンドから成る層を更に備えることを特徴とする請求項 1 ~ 10 のいずれかに記載のレーザー発振素子。

【請求項 12】

前記発振部分が、前記発振部分から発せられる光を反射する膜を更に備えることを特徴とする請求項 1 ~ 11 のいずれかに記載のレーザー発振素子。

20

【請求項 13】

前記レーザー発振素子が、pn接合構造と、ショットキー接合構造と、MIS構造とから成る群より選択される構造を内部に有し、且つ、電極を更に有することを特徴とする請求項 1 ~ 12 のいずれかに記載のレーザー発振素子。

【請求項 14】

ダイヤモンドに希土類金属原子又は希土類原子を含む化合物が添加されたドーパダイヤモンドから成る発振部分を含む発振素子と、
添加物を含まないダイヤモンドから成り、前記発振素子が装着される放熱部分とを備えることを特徴とするレーザー発振装置。

【請求項 15】

前記放熱部分が、凹凸が形成された表面を有することを特徴とする請求項 14 に記載のレーザー発振装置。

30

【請求項 16】

前記放熱部分が、1000 W/mK以上の熱伝導率を有することを特徴とする請求項 14 に記載のレーザー発振装置。

【請求項 17】

前記発振素子に光学的に接続される第2の発振素子を更に備えることを特徴とする請求項 14 に記載のレーザー発振装置。

【請求項 18】

前記発振素子が、pn接合構造と、ショットキー接合構造と、MIS構造とから成る群より選択される構造を内部に有し、且つ、電極を更に有することを特徴とする請求項 14 に記載のレーザー発振装置。

40

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】

本発明は、ダイヤモンドを用いた固体レーザー発振素子及び発振装置に関する。

【0002】

【従来の技術】

近年の光通信技術の著しい進歩に伴い、より長距離を、より大容量で伝送可能な光伝送技術が求められている。例えば、1本の光ファイバの中に複数の信号を同時に伝送する光多

50

重通信技術や、光信号を、強度変調ではなく位相又は周波数変調によって発生させて伝送する高感度なコヒーレント光通信技術の開発が重要になりつつある。

【0003】

このような状況においては、伝送される光信号の絶対波長（周波数）にも精度の高さが要求される。例えば、コヒーレント光周波数分割多重（光FDM；frequency division multiplexing）伝送方式においては、5GHz程度の周波数間隔で10チャンネル以上の光信号を伝送する方式が提案されている。この方式に基づく光FDM伝送実験の多くでは、基準となる一つの光源の絶対波長を安定化させ、更に他の光源の周波数を、基準光源との周波数間隔に関して一定にさせることにより、伝送周波数を安定化する。

10

【0004】

このような伝送方式の光源として、各種の化合物半導体レーザーが提案され、特にGaAsまたはInPを基板としたIII-V族化合物半導体レーザーを中心に、半導体レーザーの実用化が進んでいる。しかし、半導体レーザーでは半導体のバンド発光を利用するため、電子の運動量に起因して発振波長が広がる傾向をもつこと、並びに、発振波長が温度に依存することが、周波数を安定させるための大きな障害となっている。

【0005】

この問題に対して、エルビウム（Er）やイットルビウム（Yb）等の希土類金属を活性層にドーピングした半導体レーザーが検討されている。この希土類ドーピングの半導体レーザーの代表例として、ErをInGaAsP/InPダブルヘテロ構造の活性層にドーピングしたレーザー発振素子がTsangらにより報告されている（Tsang, w. t. , et. al. , Applied Physics Letters, 49(25), pp. 1686-1688, 22 Dec. 1986；文献1）。この半導体素子に電流注入を行うと、Er³⁺の励起準位から基底準位への光学遷移が半導体素子内で支配的に起こり、レーザー発振を生ずる。

20

【0006】

この他にも、Er等の希土類をドーピングした半導体によるレーザー発振素子及びレーザー発振装置には、Siを基材として用いたもの（Rogers, J. L. , et. al. , Journal of Vacuum Science and Technology, A 12(5), pp. 2762-2766, Sep./Oct. 1994；文献2）、GaAs系III-V族半導体を基材としたもの（Takahai, K. , et. al. , Journal of Applied Physics, 76(7), pp. 4332-4339, 1 Oct. 1994；文献3、特開昭64-74783；文献4、特開平3-227092；文献5）、窒化物系III-V族半導体（Choyke, W. J. , et. al. , Applied Physics Letters, 65(13), pp. 1668-1670, 26 Sept. 1994；文献6）、SiC（Wilson, R. G. , et. al. , ibid, 65(8), pp. 992-994, 22 Aug. 1994；文献7）等が挙げられ、これらの他にも様々な試みが報告されている（例えば、特開平5-291655；文献8、特開平6-216446；文献9、特開平6-216455；文献10、特開平6-219776；文献11）。

30

40

【0007】

【発明が解決しようとする課題】

しかし、しかし、Tsangら（文献1）の半導体レーザー素子の動作はパルス発振にとどまっており、高い発光効率により、高い利得を得て連続発振するには至っていない。また、文献2、3、6、7に記載されるレーザー発振素子も、発光を確認するに留っており、これらレーザー発振素子を実用化するための提案はなされていない。更に、文献4、5、8～11に記載される半導体レーザーでは、機械的衝撃を受けた際等に生じる発振波長の変動の問題点に対して素子自体の改善はなされておらず、実用的なレーザー発振素子を提供するには至っていない。

【0008】

50

従って、本発明の目的は、室温において連続発振可能で且つ発振周波数の安定したレーザー発振素子を提供することにある。

【0009】

本発明の他の目的は、小型で且つ信頼性の高い絶対波長レーザー発振装置を実用的なレベルで提供することにある。

【0010】

【課題を解決するための手段】

本発明のレーザー発振素子は、ダイヤモンドに、希土類金属原子又は希土類金属原子を含む化合物が添加されたドーパダイヤモンドから成る発振部分を備えることを特徴とする。

【0011】

また、本発明のレーザー発振素子は、希土類金属原子が、ネオジウム原子(Nd)と、サマリウム原子(Sm)と、ユロピウム原子(Eu)と、イッテルビウム原子(Yb)とから成る群より選択される原子を含むことを特徴としてもよい。

【0012】

また、本発明のレーザー発振素子は、希土類金属がエルビウム原子(Er)を含むことを特徴としてもよい。

【0013】

また、本発明のレーザー発振素子は、ドーパダイヤモンド中におけるエルビウム原子(Er)の濃度が、1ppm~50,000ppmの範囲にあることを特徴としてもよい。

【0014】

また、本発明のレーザー発振素子は、ドーパダイヤモンドが更に、1ppm以上の濃度で窒素原子(N)を含有することを特徴としてもよく、且つ1ppm以上の濃度でホウ素原子(B)を含んでいてもよい。

【0015】

また、本発明のレーザー発振素子は、窒素原子(N)の濃度が100ppm~50,000ppmの範囲にあることを特徴としてもよい。

【0016】

また、本発明のレーザー発振素子は、ドーパダイヤモンドが更に、1ppm以上の濃度でホウ素原子(B)を含有することを特徴としてもよい。

【0017】

また、本発明のレーザー発振素子は、ホウ素原子(B)の濃度が100ppm~50,000ppmの範囲にあることを特徴としてもよい。

【0018】

また、本発明のレーザー発振素子は、窒素原子の濃度が100ppm~100,000ppmの範囲にあり、且つ、ホウ素原子の濃度が100ppm~100,000ppmの範囲にあることを特徴としてもよい。

【0019】

また、本発明のレーザー発振素子は、添加物を含まないダイヤモンドから成る層を更に備えることを特徴としてもよい。

【0020】

また、本発明のレーザー発振素子は、発振部分が、発振部分から発せられる光を反射する膜を更に備えることを特徴としてもよい。

【0021】

また、本発明のレーザー発振素子は、レーザー発振素子が、pn接合構造と、ショットキー接合構造と、MIS構造とから成る群より選択される構造を内部に有し、且つ、電極を更に有することを特徴としてもよい。

【0022】

本発明のレーザー発振装置は、ダイヤモンドに希土類金属原子又は希土類原子を含む化合物が添加されたドーパダイヤモンドから成る発振部分を含む発振素子と、添加物を含まないダイヤモンドから成り、発振素子が装着される放熱部分とを備えることを特徴とする。

10

20

30

40

50

【0023】

また、本発明のレーザー発振装置は、放熱部分が、凹凸が形成された表面を有することを特徴としてもよい。

【0024】

また、本発明のレーザー発振装置は、放熱部分が、 1000 W/mK 以上の熱伝導率を有することを特徴としてもよい。

【0025】

また、本発明のレーザー発振装置は、発振素子に光学的に接続される第2の発振素子を更に備えることを特徴としてもよい。

【0026】

また、本発明のレーザー発振装置は、発振素子が、pn接合構造と、ショットキー接合構造と、MIS構造とから成る群より選択される構造を有し、且つ、電極を更に有することを特徴としてもよい。

【0027】

【作用】

本発明のレーザー発振素子は、レーザー発振部分の基材として非常に硬質であるダイヤモンドを用いているため、機械的衝撃の際等に生じるレーザー発振素子自身の発振波長の変動の問題が著しく低減される。

【0028】

また、本発明のレーザー発振素子の基材であるダイヤモンドは、そのバンドギャップが 5.5 eV と大きいため、ダイヤモンドに注入されたキャリア又は照射された励起光が内部で自己消費されにくい。

【0029】

また、本発明のレーザー発振素子の基材であるダイヤモンドは、その光学遷移が間接遷移であるため、注入されたキャリアあるいは照射された励起光が内部のバンド遷移による自己消費が生じにくい。また、ダイヤモンドの結晶格子は小さいため、この結晶格子を占める炭素原子と添加された希土類金属原子との相互作用は無視できる程度である。

【0030】

更に、本発明のレーザー発振素子の基材であるダイヤモンドは、その熱伝導率が高いため、素子を過熱させることなく、発振させるためのキャリアを高密度でドーピングダイヤモンドに注入できる。

【0031】

また、本発明のレーザー発振素子において、希土類金属原子ドーピングダイヤモンドが窒素原子を含有する態様では、この窒素原子が、希土類金属原子のダイヤモンド中でのイオン化を促進する。

【0032】

また、本発明のレーザー発振素子において、希土類金属原子ドーピングダイヤモンドがホウ素（ボロン）原子を含有する態様では、このホウ素原子が、希土類金属原子のダイヤモンド中でのイオン化を促進する。

【0033】

更に、本発明のレーザー発振素子において、希土類金属原子ドーピングダイヤモンドが窒素原子とホウ素原子とを共に含有する態様では、原子半径の大きな窒素と原子半径の小さなホウ素との間で相互にストレスの緩和が生じる。従って、ダイヤモンドの結晶性が損なわれずに高いレベルでドーピングを行うことが可能となる。また、窒素とホウ素は共に希土類金属原子のダイヤモンド中でのイオン化を促進する。

【0034】

本発明のレーザー発振装置は、希土類金属がドーピングされたドーピングダイヤモンドから成る発振部分を備えるレーザー発振素子と、ダイヤモンドから成る放熱部分を備える。この放熱部分は、熱伝導率の高いダイヤモンドから成るため、発光により発熱するレーザー発振素子等から効果的に熱を吸収する。従って、長時間の連続発光においてもレーザー発振装

10

20

30

40

50

置は過熱することなく安定した発光を持続できる。

【0035】

また、本発明のレーザー発振装置の放熱部分は発振素子の発振部分と同じダイヤモンド製であるため、発振部分の形成のための装置をそのまま用いて容易に放熱部分を形成することができる。

【0036】

【実施例】

以下、添付した図面を参照して本発明の実施例を説明する。尚、各図面において同一の要素には同一の符号を付し、重複する説明を省略する。

【0037】

まず、本発明のレーザー発振素子の動作に関して、更に詳細に説明をする。

【0038】

ドーブダイヤモンドに電流又は光によるエネルギーが入力されれば、ドーブダイヤモンドに含まれる希土類金属原子が励起準位から基底準位への光学遷移を生じ、希土類金属のスピンスplit軌道間の内殻遷移に対応した波長での発光が生じる。例えば、 $Er^{+3}(4f^1)$ では $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 遷移により波長 $1.536\mu m$ の発光が生じる。この遷移による $1.536\mu m$ という波長は、各種の光通信システムに多用される石英ファイバの最小損失波長域に近いので、光通信システムに有効に利用できる。また、ネオジウム(Nd)も $1.06\mu m$ 、 $1.3\mu m$ 付近で発光し、これらの波長は光通信システムへ有効に利用することが可能な範囲にある。

【0039】

また、Erとイッテルビウム原子(Yb)とを共にダイヤモンドにドーブすることにより、上記のErの発光の強度を上昇させることができ、また、Er:Ybのドーブの比率を変えることにより、発振波長を調整することも可能である。

【0040】

ちなみに、これらドーブされた希土類金属原子の光学遷移挙動に関しては、前出のTsangらの文献1にも記載され、ErがドーブされたInGaAsPレーザーから波長 $1.536\mu m$ の発光が観察されていることが報告されている。

【0041】

また、本発明のレーザー発振素子は、温度変化に対しても本質的な波長の変動はなく、温度変化に伴うドーブダイヤモンド自身の屈折率変化によって僅かな波長の変動を伴うのみである。

【0042】

本発明のレーザー発振素子は、上記の発振部分を励起させる方式の点で2つの態様が可能である。第1の態様は、別に設けた励起用レーザーによる励起光を発振部分に入射させて、発振部分を発振させ発光させる態様である。この態様においては、発振素子にレーザー共振構造を形成して、この構造の中に発振部分で生じた光を閉じ込めて光出力密度を高めることにより、放出光強度を増加し利得を増大させることが可能になる。また、第2の態様は、発振部分に対して、pn接合、ショットキー接合あるいはMIS構造等、直接電流を注入できる構造を形成する。この態様では、ダイヤモンドに注入されたキャリアがErを励起して発振部分を発光させる。

【0043】

以下、本発明に従ったレーザー発振素子及びレーザー発振装置の具体例を例示する。

【0044】

(実施例1)

本実施例では、別に設けた励起用レーザーによる励起光を発振部分に入射させて、レーザー発振素子の発振部分を発振させ発光させる態様のレーザー発振装置を例示する。図1は、本実施例において作製されたレーザー発振装置を模式的に表した図であり、(a)は側面図、(b)は上面図、(c)は正面図である。本実施例のレーザー発振装置は、図1に示されるように、本実施例で作製されたレーザー発振装置10は、レーザー発振素子12と、

10

20

30

40

50

ダイヤモンドから成る放熱部分（ヒートシンク）14と、レーザー発振素子12を励起するための励起用半導体レーザー16と、レーザー発振素子から放出された光を伝達する光ファイバ18とから成る。本実施例のレーザー発振素子12は、ダイヤモンドにエルビウム原子（Er）をドーブしたErドーブダイヤモンドから成る発振部分と、このErドーブダイヤモンドの端面に形成された弗化マグネシウム／ゼオライト系のハーフミラーとから成る。

【0045】

以下、本実施例のレーザー発振装置の作製の手順を説明する。

【0046】

（1）レーザー発振素子（Erドーブダイヤモンド）の形成

10

まず、マイクロ波プラズマCVD法によりダイヤモンド膜を合成した。次いで、合成されたダイヤモンド膜に対して、イオン注入法によりErを注入し、Erドーブダイヤモンド膜を形成して、発振部分を形成し、この端面にハーフミラーをコーティングにより形成してレーザー発振素子を作製した。

【0047】

ダイヤモンド合成には、周知のマイクロ波プラズマCVD装置内で行われた。

ダイヤモンドの合成のためのマイクロ波プラズマCVD法の操作条件は以下の通りであった；

マイクロ波周波数	2.45 (GHz)	
水素ガス（H ₂ ）流量	200 (sccm)	20
メタンガス（CH ₄ ）流量	6 (sccm)	
圧力	100 (Torr)	
マイクロ波出力	300 (W)	
基板温度	1100 ()	
成長時間	25 (hrs)	
形成されたダイヤモンド膜厚	100 (μm)。	

【0048】

このマイクロ波プラズマCVD法は、電力を局所的に集中させやすく高密度のプラズマが得られる点で、本発明のダイヤモンドの合成には好ましいが、この他にも、熱フィラメントCVD法やイオンビーム蒸着法、グラファイトをターゲットとしたスパッタリング等、公知のダイヤモンドの合成法又は成長法を特に制限なく用いることが可能である。

30

【0049】

このように合成されたダイヤモンドに対して、周知のイオン注入法によりErを添加した。本実施例のイオン注入法によるErの注入条件は、以下の通りであった；

加速エネルギー	180 (keV)
ドーズ量	1×10^{14} (cm ⁻²)
最大注入深さ	1.5 (μm)
最大ドーブ量	1×10^{19} (cm ⁻³)。

【0050】

このようにして、Erドーブダイヤモンドから成る発振部分が作製された。そして、Erドーブダイヤモンドの端面に、Erの励起遷移によって発せられる波長に対するハーフミラーとして、フッ化マグネシウム／ゼオライト系のコーティングを形成し、図1に示されるような発振素子12が完成した。

40

【0051】

Erドーブ量は、以下のような近似によっても算出される。イオン注入によって打込まれたイオンの深さの方向の分布はガウスの近似でき、加速エネルギーE [keV]、ドーズ量Nd [cm⁻²] で打込まれたイオンの深さxにおける濃度N(x) [cm⁻³] は次の式で表される。

【0052】

【数1】

50

$$N(x) = \frac{Nd}{(2\pi)^{1/2} \Delta R_p} \times \exp\left(\frac{-(x-R_p)^2}{2\Delta R_p}\right)$$

【0053】

ここで、 R_p は投影飛程、 ΔR_p は標準偏差である。

【0054】

投影飛程 R_p 及び標準偏差 ΔR_p は、LSS理論から、次のように求めることができる。 10

【0055】

【数2】

$$R_p = \frac{1.1 \times 10^{26} \times (M_1 + M_2)}{N_m \times (3M_1 + M_2)} \times \frac{(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{1/2}}{Z_1 Z_2} \times E$$

【0056】

【数3】

$$\Delta R_p = \frac{1}{4} \times \frac{1.1 \times 10^{26}}{N_m} \times \left(\frac{M_2}{M_1}\right)^{1/3} \times \frac{(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{1/2}}{Z_1 Z_2} \times E$$

20

【0057】

E は M_1 は注入イオンの原子量、 M_2 は基材（この場合はダイヤモンド）の原子量、 Z_1 は注入イオンの原子番号、 Z_2 は基材の原子番号、 N_m は基材の単位体積当たりの原子の数である。この2つの式で得られた R_p と ΔR_p を数1で表される式に用いて、深さ x におけるイオン濃度 $N(x)$ を求めることができる。例えば、加速エネルギー E が 300 [keV]、ドーズ量 N_d が 2×10^{14} [cm⁻²] の条件で、 E_r をダイヤモンドに打込んだ場合は、式数2及び数3から、投影飛程 R_p は 1000 オングストローム、標準偏差 ΔR_p は 300 オングストロームが得られる。そして、この値を用いて数1のガウス分布近似から、平均深さ 1000 オングストロームの場合のイオン濃度 N は、 1×10^{19} [cm⁻³] と求められる。ここで、 E_r ドープダイヤモンドに含まれる E_r ドープ量は、SIMS（二次イオン質量分析計）によっても測定される。

30

【0058】

(2) 放熱部分（ヒートシンク）の作製

図1に示されるように、本実施例のレーザー発振装置10の放熱部分14はダイヤモンドから成り、図1(c)に示されるように、その表面には、発振素子から放出される光を伝達する光ファイバのアライメントのためのパターンニング20が施されている。

40

【0059】

放熱部分14は、以下のようにして作製された。先に合成された E_r ドープダイヤモンドの合成装置と同じマイクロ波プラズマCVD装置を用い、マイクロ波プラズマCVD法により放熱部分のためのダイヤモンドの合成を行った。成長条件は次の通りである；

マイクロ波周波数	2.45 (GHz)
水素 (H ₂) 流量	200 (sccm)
メタン (CH ₄) 流量	4 (sccm)
圧力	100 (Torr)
マイクロ波出力	500 (W)
基板温度	1100 ()

50

成長時間 75 (hr)
 膜厚 300 (μm)
 熱伝導率 1500 (W/mK)。

【0060】

Erドーパダイヤモンドの合成と同様に、放熱部分の形成には、マイクロ波プラズマCVD法以外にも、公知のダイヤモンドの合成法又は成長法を特に制限なく用いることが可能である。また、製造工程の簡単さの点で、Erドーパダイヤモンドのためのダイヤモンドの形成と放熱部分の形成とは、同じ装置を用いて行われることが好ましいが、品質や工程時間等の理由がある場合には、別々の装置で行ってもよく、また、別々の合成法又は成長法を用いてもよい。

10

【0061】

ここで、合成されたダイヤモンドの熱伝導率の測定には、以下に説明する絶対定常法を変形した定常比較法によって測定した。絶対定常法では、目的の試料内に、温度分布が時間と共に変化しない状態（即ち定常状態）を実現し、即ち、フーリエの式；

$$q = - \text{grad} T \quad (\text{W}/\text{m}^2)$$

（ここで、 q は熱流束（heat flux）、 κ は熱伝導率（thermal conductivity）であり、 $\text{grad} T$ は、この熱流束の方向における温度勾配である。）

に従う熱移動の状態を実現する。このとき、試料内部の熱流束を、電気等の発熱によって外部から試料に与えられる発熱量に等しいとすれば、定常状態にある試料中の温度勾配を測定することにより、試料の熱伝導率が求められる。ここで、この絶対定常法では試料に与えられる熱量と試料中を移動する熱量とは必ずしも一致しないため、正確な測定が困難な場合が多い。そこで、熱伝導率が既知である物質の熱移動との比較により、目的の試料の熱伝導率を求める定常比較法が多用されており、本発明の実施例においてもこの定常比較法を採用する。

20

【0062】

比較定常法では、まず熱伝導率 κ_s の物質に対して外部から熱を与え、熱流束 q に対しての温度勾配 $(\text{grad} T)_s$ を測定する。次いで、目的の試料に対して、同一の熱流束を与えて、このときの温度勾配 $\text{grad} T$ を測定する。このとき、上記のフーリエの式により、目的の試料の熱伝導率 κ は、

$$\kappa = \kappa_s (\text{grad} T)_s / (\text{grad} T) \quad (\text{W}/\text{mK})$$

で与えられる。この定常法による熱伝導率の測定法は、例えば「熱物性値測定法」、1～5頁、日本機械学会編、養賢堂（1991年）、に詳細に記載されている。

30

【0063】

本実施例の定常比較法によるダイヤモンドの熱伝導率の測定では、理学電気社製の定常法熱伝導率測定装置を用い、熱伝導率が既知の物質として金（Au）を用いて測定を行った。

【0064】

次に、図1(c)に示されるように、形成されたダイヤモンドの放熱部分14の表面上に、光ファイバアライメント用の溝20を、以下のように形成した。まず、放熱部分の全面にわたり、Alをスパッタリングにより堆積させた後、通常のリソグラフィの技術により、光ファイバアライメント用のパターンニングを行った。次いで、形成されたAlのパターンをマスクとし、 O_2 を用いる反応性イオンエッチング法（RIE）によってエッチングを行い、放熱部分14の表面に光ファイバアライメント用の溝20を形成した。RIEによるエッチング条件は次の通りである；

40

O_2 / Ar 体積流量比 1 (%)
 RF周波数 13.56 (MHz)
 RF出力 500 (W)
 圧力 0.1 (Torr)
 エッチング時間 3 (hr)

50

エッチング深さ 10 (μm)。

【0065】

このようにして、図1(c)に示されるように、レーザー発振素子12及び光ファイバ18を装着するためのアライメント用の溝20が表面に形成された放熱部分14が得られた。尚、ここでは図示されないが、このアライメント用の溝20は、同時にレーザー発振素子12及び励起用レーザー16を装着するための溝をも有している。この溝は、レーザー発振素子12及び励起用レーザー16の装着される面(装着の際に下側となる面)が過不足なく納められる形状及び大きさを有している。即ち、前述のフォトリソグラフィの際に、このような溝を形成するようなパターンングが施されている。

【0066】

(3) レーザー発振装置の組立て

以上までに得られたレーザー発振素子12と放熱部分14に加えて、市販のInGaAsP系半導体レーザーである励起用半導体レーザー16と、周知の弗素ガラス製光ファイバ18とを用いて、レーザー発振装置10を作製した。

【0067】

励起用レーザー16からの光を有効にレーザー発振素子12に導入できるように、レーザー発振素子12を励起用レーザー16に光学的に接続させた。この際の接続は、以下のようである。まず、発振素子12から発せられる光を伝達するための光ファイバ18が、発光素子の片方の面に光学的に接続された。次に、前述のようにレーザー発振素子12及び励起用レーザー16を装着するための溝及び光ファイバアライメント用溝が形成されているダイヤモンド放熱部分14表面上に、光ファイバ18と接続されたレーザー発振素子12と励起用レーザー16とを、それぞれのための溝の適切な位置に、それぞれ装着した。装着のためには金錫が用いられた。ここにおいて、RIEによって精度良く加工されている溝の中に、レーザー発振素子12及び励起用レーザー16はそれぞれ適正に納められ、励起用レーザー16の端面とレーザー発振素子12の端面とは、光学的に接続された。そして最後に、全体をハーメチックシールで封じて、不活性ガスであるArを充填し封入した。このようにして、本実施例のレーザー発振装置が完成した。

【0068】

本発明のレーザー発光装置のポンピング用のレーザには、装置全体を小型化する観点からは、半導体レーザーを用いることが好ましい。例えば、InGaAs/AlGaAs歪超格子を用いた発振光が $0.98\mu\text{m}$ 附近の半導体レーザーであつてもよく、AlGaInP系の発振光が $0.67\mu\text{m}$ 附近の半導体レーザーであつてもよい。

【0069】

図2は、レーザー発振装置10を設置したモジュールの縦断面図である。図2に示されるように、モジュール30の内部の台31の上には、レーザー発振装置10が設置されている。レーザー発振装置10から発せられた光は、サファイア窓32を通過して非球面レンズ34に入射する。そして、アイソレータ36を介してジルコニア製のキャピラリ38へと入射し、フェルール40に保持されている光ファイバ42へと至る。

【0070】

作製されたレーザー発振装置10をモジュール30に設置し、以下のように動作の確認を行った。図1及び図2に示されるように、レーザー発振装置10の励起用レーザー16に電流を通じ発光させてその光をレーザー発振素子12に入射させ、レーザー発振素子12即ちErドープダイヤモンド内のErの光学遷移を生じさせて、レーザー発振素子12を発光させた。このとき、40dB以上の副モード抑圧比で単一縦モード動作をしていることが確認された。

【0071】

本実施例ではレーザー発振素子12及び放熱部分14に高い熱伝導率を持つダイヤモンドを用いているため、素子を過熱することなく強力なポンピング用半導体レーザを利用できることから、強力なレーザ発振を得ることができたことが示された。

【0072】

10

20

30

40

50

(実施例 2)

本実施例では、実施例 1 で作製されたレーザー発振素子と同じ Er ドープダイヤモンドに窒素を 100 ppm ドーピングすることにより、実施例 1 において入力されたエネルギーと同じ量のエネルギーを入力した場合に、ダイヤモンド中の Er イオンを効果的にダイヤモンド中に発生させてレーザー強度を 1 桁あげることができたことを例示する。

【0073】

本実施例では、レーザー発振素子である Er ドープダイヤモンドの作製において、イオン注入の際に、窒素原子 (N) を 1000 ppm の濃度でドーブした他は、全て実施例 1 と同じ工程及び条件で、レーザー発振装置を作製した。そして、実施例 1 と同様にレーザー発振装置をモジュールに組み込み、同様に動作をさせた。このとき、5 mW のレーザー強度が得られた。

10

【0074】

また、本実施例の変形として、レーザー発振素子である Er ドープダイヤモンドの作製において、イオン注入の際に、窒素原子 1000 ppm のドーピングと同時にホウ素 (ボロン) 原子も 1000 ppm ドープした他は実施例 1 と同様の工程及び条件で、レーザー発振素子を作成した。このとき、6.5 mW のレーザー発振強度が得られた。従って、窒素とボロンとを同時にドーブすることによって、窒素のみの場合と比較してレーザー強度を 30% 上昇させることが可能であることが示された。

【0075】

(実施例 3)

実施例 1 で作製した Er ドープダイヤモンドに対して、ホウ素原子 (B、ボロン) ドープダイヤモンドとアンドープダイヤモンドとを上下面に形成し、それぞれの面に電極を形成して電流注入を行った。

20

【0076】

図 3 に示されるように、本実施例で作製されたレーザー発振素子 50 は、実施例 1 と同様に作製された Er ドープダイヤモンド 56 を備え、この下側に、B ドープダイヤモンドが形成され、上側には不純物を添加しないアンドープダイヤモンド 58 が形成された。更に、B ドープダイヤモンド 54 の下側及びアンドープダイヤモンド 58 の上側にはそれぞれ、電極 52、60 が形成された。

【0077】

B ドープダイヤモンド 54 の形成は、実施例 1 と同様のマイクロ波プラズマ CVD 法によってダイヤモンドを形成した後、実施例 1 と同様のイオン注入法によって B イオンをダイヤモンドに注入することにより行われた。アンドープダイヤモンド 58 の形成は、実施例 1 と同様のマイクロ波プラズマ CVD 法によって行われた。

30

【0078】

図 4 は、本実施例で作製されたレーザー発振装置 62 を表した図であり、(a) が側面図、(b) が上面図、(c) が前面図である。図 3 に示されるように、本実施例のレーザー発振装置 62 は、図 1 に示されるレーザー発振装置 10 と比較して励起用レーザー 16 が無く、放熱部分 14 の上にはレーザー発振素子 50 が装着されているのみである。

【0079】

作製されたレーザー発振素子 50 を有するレーザー発振装置 62 を、実施例 1 において用いられたモジュールに組み込み、電極 52 及び 62 を介してレーザー発振素子 50 に直接電流を供給することにより、励起用レーザを用いずに、1 mW のレーザー強度でレーザ発振が生じた。

40

【0080】

(実施例 4)

本実施例では、実施例 3 のレーザー発振素子 50 の構造に対し；(i) Er ドープダイヤモンド 56 に更に B を 10 ppm ドープして Er ドープダイヤモンドとし；(ii) アンドープダイヤモンド 58 のかわりに、ダイヤモンドに P を注入した n 型ダイヤモンドを Er ドープダイヤモンドの上に形成する変更を加えて、レーザー発振素子に pn 接合を形成

50

した。

【0081】

実施例3と同様に、レーザー発振素子を有するレーザー発振装置をモジュールに組み込み、同様に電流をレーザー発振装置に供給して、発振を生じさせた。本実施例では、10mWのレーザー強度が得られ、pn接合により効率的にキャリアをErドープ層に注入することにより、実施例3のレーザー発振装置と比較してレーザー強度を1桁あげることができたことが示された。

【0082】

(実施例5)

本実施例では、実施例1と同様のレーザー発振素子であるが、Erソースにエルビウム原子ではなく $\text{tris}(2, 2, 6, 6)\text{-tetramethyl-3, 5-heptanedionato erbium}$ を用い、マイクロ波プラズマCVDによるダイヤモンド成長中に同時に1000ppmの濃度でドーピングを行った。そして、このドーピングダイヤモンドをレーザー発振素子として、実施例1と同様にレーザー発振装置を組立て、モジュールに組込んで実施例1と同様に発振させた。このとき、10mWのレーザー強度が得られた。

10

【0083】

従って、本実施例ではドーパントとして、 $\text{tris}(2, 2, 6, 6)\text{-tetramethyl-3, 5-heptanedionato erbium}$ を用い、ダイヤモンド成長中に同時にドーピングを行うことにより、均質なドーピングが行われ、レーザー強度が上昇した。

20

【0084】

(比較例1)

本比較例では、実施例5のドーピングダイヤモンドの形成において、Erドーピング量を5000ppm以上の過剰な量とし、その他は実施例5と同様のドーピングを行った。

【0085】

しかし、形成されたダイヤモンドは結晶性が崩れ、グラファイト成分がダイヤ内に析出した。その結果レーザー発振を得ることができなかった。従って

(比較例2)

本比較例では、実施例5のドーピングダイヤモンドの形成において、Erドーピング量を1ppm以上の非常に少量とし、その他は実施例5と同様のドーピングを行った。

30

【0086】

しかし、ダイヤの結晶性はX線の半値幅ではノンドーピングダイヤと変わらないほど優れていたにもかかわらず、レーザー発振を得ることができなかった。

【0087】

(比較例3)

実施例5の放熱部分の形成において、以下の条件でマイクロ波プラズマCVD法により、熱伝導率が900W/mKのダイヤモンドを得てこれを放熱部分とした。

【0088】

マイクロ波周波数	2.45 (GHz)	40
水素(H ₂)流量	200 (sccm)	
メタン(CH ₄)流量	8 (sccm)	
圧力	100 (Torr)	
マイクロ波出力	500 (W)	
基板温度	1100 ()	
成長時間	75 (hr)	
膜厚	300 (μm)	
熱伝導率	900 (W/mK)。	

【0089】

ここで、実施例1におけるマイクロ波プラズマCVD法の条件と異なる点は、メタンの流

50

量を実施例 1 では 4 s c c m としていたところを、本比較例では 8 s c c m とした点である。また、熱伝導率の測定は、実施例 1 で用いられた方法と同じ定常比較法により行われた。

【0090】

このダイヤモンドを用いて実施例 5 と同様にレーザー発振装置を作製し、実施例 5 と同様にモジュールに組込んで発振を行った。

【0091】

しかし、励起用レーザーの出力を上げた際、レーザー発振装置全体の温度が上昇して発光波長が著しく不安定となり、所望のレーザー発振強度を得るには至らなかった。

【0092】

ここで、熱伝導率の異なるダイヤモンドの作製は、マイクロ波プラズマ C V D 法における合成において、メタン等の炭素原子供給ガスの濃度、供給量及び種類等を変えることにより実現される。この方法においては、一般には、炭素原子供給ガスの濃度を増加させると、ダイヤモンドの成長速度が増加するものの、ダイヤモンドの熱伝導率が低下する。

10

【0093】

この方法で、メタンの供給流量を上記の流量よりも僅かに減少させて、熱伝導率が 1 0 0 0 W / m K のダイヤモンドを作製して、実施例 5 と同様にモジュールに組込んで発振を行ったところ、レーザー発振装置全体の温度上昇による発光波長の変動は見られなかった。

【0094】

従って、これらの結果によれば、レーザー発振の際に生ずる熱を効果的に吸熱するためには、レーザー発振装置の放熱部分には 1 0 0 0 W / m K 以上の熱伝導率を有するダイヤモンドを用いることが好ましいことが示された。

20

【0095】

【発明の効果】

以上詳細に説明したように、本発明のレーザー発振素子は、基材に希土類金属を添加したダイヤモンドを用いているため、周波数の安定したレーザー光を高く且つ安定な発振強度で発することが可能となる。

【0096】

また、本発明のレーザー発振装置は、放熱部分に熱伝導率の高いダイヤモンドを用いるため、長時間の操作においても、発振強度及び周波数が安定する。

30

【0097】

従って、室温において連続発振可能で且つ発振周波数の安定したレーザー発振素子が提供される。

【0098】

また、本発明により、小型で且つ信頼性の高い絶対波長レーザー発振装置を実用的なレベルで提供される。

【図面の簡単な説明】

【図 1】本発明のレーザー発振装置を表す図であり、(a) は側面図、(b) は上面図、(c) は正面図である。

【図 2】本発明で作製されたレーザー発振装置が装着されるモジュールの断面図である。

40

【図 3】本発明の、内部に p n 接続構造を有するレーザー発振素子の断面図である。

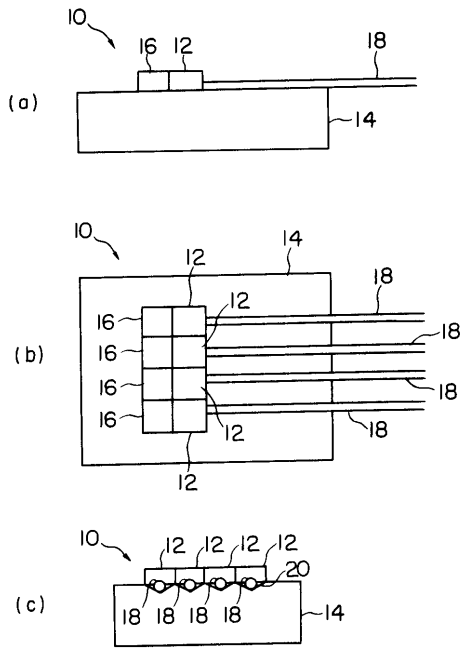
【図 4】本発明のレーザー発振装置を表す図であり、(a) は側面図、(b) は上面図、(c) は正面図である。

【符号の説明】

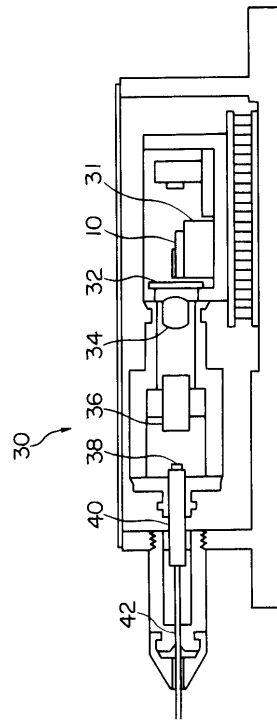
1 0 ... レーザー発振装置、1 2 ... レーザー発振素子、1 4 ... 放熱部分、1 6 ... 励起用レーザー、1 8 ... 光ファイバ、2 0 ... アライメント、3 0 ... モジュール、3 2 ... サファイア窓、3 4 ... 非球面レンズ、3 6 ... アイソレーター、3 8 ... キャピラリ、4 0 ... フェルール、4 2 ... 光ファイバ、5 0 ... レーザー発振素子、5 2 ... 電極、5 4 ... B ドープダイヤモンド、5 6 ... E r ドープダイヤモンド、5 8 ... アンドープダイヤモンド、6 0 ... 電極、6 2 ... レーザー発振装置。

50

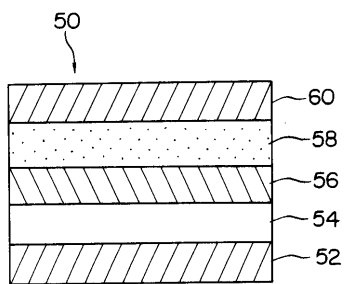
【 図 1 】



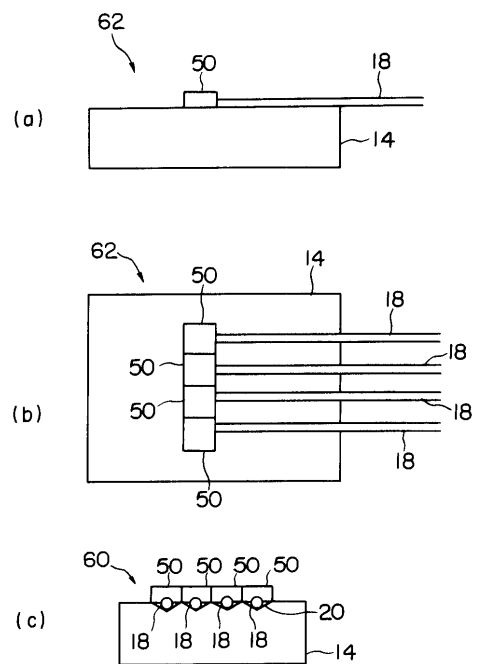
【 図 2 】



【 図 3 】



【 図 4 】



フロントページの続き

(72)発明者 西林 良樹

兵庫県伊丹市昆陽北一丁目1番1号 住友電気工業株式会社 伊丹製作所内

(72)発明者 鹿田 真一

兵庫県伊丹市昆陽北一丁目1番1号 住友電気工業株式会社 伊丹製作所内

審査官 河原 正

(56)参考文献 特開平6 - 97540 (JP, A)

特開平6 - 291404 (JP, A)

特開平5 - 13342 (JP, A)

特開平3 - 227092 (JP, A)

特開平4 - 333291 (JP, A)

特開平2 - 18980 (JP, A)

特開平4 - 84486 (JP, A)

特開平6 - 216455 (JP, A)

特開平64 - 74783 (JP, A)

Applied Physics Letters , 1994年, Vol.64 No.13, p.1668-1670

Applied Physics Letters , 1994年, Vol.65 No.8, p.992-994

Applied Physics Letters , 1986年, Vol.49 No.25, p.1686-1688

(58)調査した分野(Int.Cl.⁷, DB名)

H01S3/00-3/40