

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6087923号
(P6087923)

(45) 発行日 平成29年3月1日(2017.3.1)

(24) 登録日 平成29年2月10日(2017.2.10)

(51) Int. Cl. F I
C 3 O B 29/28 (2006.01) C 3 O B 29/28
H O 1 S 3/16 (2006.01) H O 1 S 3/16
H O 1 S 3/063 (2006.01) H O 1 S 3/063
C 3 O B 29/12 (2006.01) C 3 O B 29/12
C 3 O B 13/20 (2006.01) C 3 O B 13/20

請求項の数 20 (全 12 頁)

(21) 出願番号	特願2014-526220 (P2014-526220)	(73) 特許権者	503455363 レイセオン カンパニー
(86) (22) 出願日	平成24年8月16日 (2012. 8. 16)		アメリカ合衆国 マサチューセッツ州 O
(65) 公表番号	特表2014-529566 (P2014-529566A)		2451-1449 ウォルサム ウィン
(43) 公表日	平成26年11月13日 (2014. 11. 13)		ター ストリート 870
(86) 国際出願番号	PCT/US2012/051189	(74) 代理人	100107766
(87) 国際公開番号	W02013/025926		弁理士 伊東 忠重
(87) 国際公開日	平成25年2月21日 (2013. 2. 21)	(74) 代理人	100070150
審査請求日	平成27年4月24日 (2015. 4. 24)		弁理士 伊東 忠彦
(31) 優先権主張番号	13/210, 786	(74) 代理人	100091214
(32) 優先日	平成23年8月16日 (2011. 8. 16)		弁理士 大貫 進介
(33) 優先権主張国	米国 (US)	(72) 発明者	バイレン, ロバート ダブリュ
前置審査			アメリカ合衆国 カリフォルニア州 90 266 マンハッタン・ビーチ アグネス ・ロード 2001

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 ゾーン処理を用いてレーザー結晶内のドーパントプロファイルを調節する方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

調整されたドーパント濃度プロファイルを有する単一の連続したレーザ結晶を製造する方法であって：

各々が内部にドーパントを分布させた複数の多結晶セグメントをまとめて配置して、インゴットを形成する工程；

前記インゴットの第1端部に種結晶を供する工程；及び、

前記単一の連続したレーザ結晶を生成するように、前記インゴットに沿って前記第1端部から前記インゴットの第2端部まで加熱素子を移動させる工程；

を有し、

前記の移動する加熱素子は、前記インゴットに沿って通る際に、前記インゴット内部に移動する溶融領域を生成し、かつ、

前記インゴットの前記第1端部に位置する前記セグメントは、前記インゴットの前記第2端部に位置する前記セグメントよりも高いドーパント濃度を有する、

方法。

【請求項2】

前記ドーパントは、ネオジウム、イッテルビウム、エルビウム、ホルミウム、又はこれらの組み合わせを含む、請求項1に記載の方法。

【請求項3】

前記加熱素子が高周波(RF)誘導を利用する、請求項1に記載の方法。

【請求項 4】

前記セグメントの各々が、異なるドーパント濃度を有する、請求項1に記載の方法。

【請求項 5】

前記セグメントの各々が、異なる長さを有する、請求項1に記載の方法。

【請求項 6】

前記種結晶が、前記インゴットの前記第1端部での目標濃度に等しいドーパント濃度を有する、請求項1に記載の方法。

【請求項 7】

前記単一の連続したレーザ結晶は、前記種結晶と共通の結晶構造及び共通の格子方向を持った、選択された長さの連続体を有する、請求項1に記載の方法。

10

【請求項 8】

前記インゴットに沿って前記加熱素子を移動させる工程が、前記加熱素子によって前記インゴットの一部を取り囲むことを含む、請求項1に記載の方法。

【請求項 9】

前記移動する溶融領域と前記インゴットの前記セグメントとの間の界面が、前記インゴットの軸に対して垂直である、請求項1に記載の方法。

【請求項 10】

前記結晶が、 $Y_3Al_5O_{12}$ 、 $YLiF_4$ 、又は $Gd_3Ga_5O_{12}$ を含む、請求項1に記載の方法。

【請求項 11】

少なくとも1つのドーパントを含む複数の多結晶セグメントを有するインゴットを得る工程；

20

前記インゴットの第1端部に種結晶を供する工程；及び、

不均一なドーパント濃度プロファイルを有するレーザ単結晶を生成するように、前記インゴットに沿って前記第1端部から前記インゴットの第2端部まで加熱素子を移動させる工程；

を有し、

前記の移動する加熱素子は、前記インゴットに沿って通る際に、前記インゴット内部に移動する溶融領域を生成し、かつ、

前記インゴットの前記第1端部は、前記インゴットの前記第2端部よりも高いドーパント濃度を有する、

30

方法。

【請求項 12】

前記ドーパントが、ネオジウム、イッテルビウム、エルビウム、ホルミウム、又は、これらの組み合わせを含む、請求項11に記載の方法。

【請求項 13】

前記加熱素子が高周波(RF)誘導を利用する、請求項11に記載の方法。

【請求項 14】

前記セグメントの各々が異なるドーパント濃度を有する、請求項11に記載の方法。

【請求項 15】

前記セグメントの各々が異なる長さを有する、請求項11に記載の方法。

40

【請求項 16】

前記種結晶が、前記インゴットの前記第1端部での目標濃度に等しいドーパント濃度を有する、請求項11に記載の方法。

【請求項 17】

前記単結晶は、前記種結晶と共通の結晶構造及び共通の格子方向を持った、選択された長さの連続体を有する、請求項11に記載の方法。

【請求項 18】

前記インゴットに沿って前記加熱素子を移動させる工程が、前記加熱素子によって前記インゴットの一部を取り囲むことを含む、請求項11に記載の方法。

【請求項 19】

50

前記移動する溶融領域と前記インゴットの前記セグメントとの間の界面が、前記インゴットの軸に対して垂直である、請求項11に記載の方法。

【請求項20】

前記レーザー単結晶が、 $Y_3Al_5O_{12}$ 、 $YLiF_4$ 、又は $Gd_3Ga_5O_{12}$ を含む、請求項11に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本開示は固体レーザーに関する。より詳細には本開示は、調整されたドーパントプロファイルを有するレーザー結晶、当該レーザー結晶の製造方法、及び、当該レーザー結晶から製造されるレーザー放出媒体に関する。

10

【背景技術】

【0002】

固体レーザーは、現在開発中で、様々な軍事及び産業用途に用いられている。そのような様々な軍事及び産業用途には、範囲の検出、標的の指定/マーキング、照射、3次元可視化、振動検知、形状測定、切断、穴空け、溶接、熱処理及び他の材料処理、電子光学及び赤外の対抗策、及び、指向性エネルギー兵器が含まれる。固体レーザーは一般的には、光共振器内に設けられたレーザー増幅媒体すなわちレーザー放出媒体を有する。共振器は、レーザー内での電磁放射線の発振を起こすのに必要なフィードバックを供する。バルクのレーザー放出媒体は一般的に、スラブ、ロッド、又はディスク形状である。ポンピングされるとき、その媒体は、誘導放出過程によって増幅を起こす。レーザー放出媒体の端部に反射面又は回折格子が与えられることで、共振器が与えられる。

20

【0003】

典型的なレーザーでは、インコヒーレントな光源が、レーザー放出媒体にエネルギーを与える。これにより、波が特定の電子遷移を介して位相がそろっている光が生成される。レーザー放出媒体が適切に設計されている場合、この「コヒーレント光」がビームとして放出される。

【0004】

市販されているレーザー利得媒体は一般的に、実質的に均一なドーパント濃度を有する単結晶 - たとえばNd:YAG (ネオジウムがドーピングされたイットリウム - アルミニウム - ガーネット) - を有する。開発段階のレーザーは、従来の単結晶媒体を上回るサイズとコスト上の利点を与える光学品質の多結晶セラミックレーザー放出媒体を有するように設計されている。活性イオンがドーピングされた固体レーザー放出媒体は通常、「ポンプ光」を供する1つ以上のフラッシュランプ又はレーザーダイオードを用いる。ダイオードのポンプ光は、ドーピングされた結晶性又はセラミックのレーザー放出媒体中の活性イオンを高いエネルギー状態へ励起する。この過程は「吸収」として知られている。「ポンプ共振器」は一般的に、均一にドーピングされたレーザー放出媒体 - ロッド、スラブ、若しくはディスク形状で作製される結晶、ガラス、又は多結晶セラミック素子であって良い - 、及び、他の素子 - たとえばポンプ光反射体又はリレー光学系 - を含む。ポンプ光は、典型的には1つ以上のフラッシュランプ又はレーザーダイオードによって、共振器の側面から（つまり側面ポンピング）又は共振器の端面（つまり端面ポンピング）から、共振器内に結合される。

30

40

【0005】

ほぼすべてのポンプ光がドーピングされた媒体によって吸収される効率的な吸収は、レーザー設計者の基本的な目標である。効率的な吸収を実現する一の方法は、高吸収（高ドーピング）レーザー材料を用いることである。ドーピングされた結晶を一度通り抜けるポンプ光の光線は「パス(pass)」と呼ばれる。大抵の既存の設計によって、ポンプ光線は、飛び出す前にドーピングされた結晶を通り抜けるパスを1つか2つしか作らない。そのため効率的な吸収を実現させるには、高吸収材料を用いる必要がある。吸収は、指数関数によって支配される。よって係る結晶が側面ポンピングされるとき、不均一な吸収ひいては不

50

均一な利得が発生する。このときレーザー放出媒体端部付近の利得が最も高くなる。媒体端部付近に利得が集中することで、寄生発振、増幅自然放出(ASE)、取り出し、効率、及びビーム品質(モード制御)に係る問題が生じる。これは、ロッド形状の媒体で特に問題となる。

【0006】

高効率の吸収という目標へ向かう他の方法は端部ポンピングの利用である。端面ポンピングでは、ポンプ光が、ポンプ共振器へその長手軸に沿って入射する。端面ポンピングは、高輝度ポンプダイオードと耐久性のある二色コーティングを必要とする。その理由は、ポンピング及びレーザー光の取り出しは、同一の光学面を介して行われるが、それらの反射特性はそれぞれ異なることが要求されるからである。高閾値が大きなポンピング率を要求する擬四準位系(たとえばイッテルビウムがドーピングされたイットリウムアルミニウムガーネット、Yb:YAG)又は三準位系(たとえばルビー)の場合では、ポンプ光の「退色(bleaching)」が起こる。この退色では、大部分の活性イオンが励起され、かつ、それに対応してわずかなイオンしか、ポンプ光の吸収に利用可能な基底状態に存在しない。その結果、側面ポンピング配置と端面ポンピング配置のいずれについても吸収が減少する。

【0007】

調整された濃度プロファイルを有するレーザー結晶は、レーザー放出媒体に高アスペクト比のスラブ形状を用いるレーザー用途に特に有用であり得る。スラブ形状の一の特殊な場合は、平面状導波路(PWG)である。PWGは、高利得、高平均出力、及び高効率を要求する用途にとって有利である。当技術分野において知られているように、PWGは、スラブの短い寸法においてしか光を導光しない平面形状を有する。端面でポンピングされるレーザーでは、ドーパントは、媒体の長さに沿ってポンピングエネルギーを吸収し、かつ、そのエネルギーを、光子として放射状に解放し、かつ、熱として非放射状に解放する。よって熱は、レーザー材料にポンピングされるエネルギーとそのレーザー材料のドーパントレベルの両方の関数である。従って、ポンピングエネルギー及び/又はドーパント濃度が増大することで、レーザー放出と熱の発生が増大する。レーザー放出媒体内で一般的に用いられる均一なドーパント濃度は、局在化した熱を生じさせる。この理由は、ポンピングエネルギーは、ドーパントによって吸収されるため、レーザー放出媒体を通り抜けることで減少するからである。従ってポンプ光端部付近での材料が、大抵のエネルギーを受けとり、かつ、大抵の熱を発生させる。その結果、局在化した熱が生じる。熱的效果は、高平均出力の固体レーザーのレーザー効率とビーム品質に負の影響を及ぼす恐れがある。よって複合構造材料 - たゞは接合結晶及び複合セラミックス - が、熱的效果を緩和するのに用いられてきた。

【0008】

レーザー放出媒体全体にわたって一定の加熱を実現するためには、(活性イオンドーパントの)長手方向の濃度プロファイルを調整することが必要である。長さ方向に沿って濃度が異なるレーザー放出媒体が用いられてきた。たとえば複数の単結晶セグメント - 各々は各異なる濃度を有する - が一つになるように接合されることで、ステップ状のドーパント濃度プロファイルを有するレーザー放出媒体が生成される。しかしこれらのレーザー放出媒体は、レーザービームの軸と交差する界面で接合される。その結果、媒体の製造は高価になり、かつ、その媒体は損傷を起こしやすくなる。あるいはその代わりに、本体のレーザー軸に沿ってそれぞれ濃度が異なる微細粉末を混合することによって生成される濃度プロファイルを有するレーザー放出媒体が存在する。よってその構造は、高密度で光学的に透明なセラミックスを生成するように焼成される。しかしこれらの媒体は、未加工の単結晶と同程度の優れたレーザー放出特性を示すことができない。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

調整されたドーパント濃度プロファイルを有するレーザー放出媒体の製造における上述の1つ以上の欠点を解決する方法及び装置が必要とされている。

10

20

30

40

50

【課題を解決するための手段】

【0010】

本開示の一の実施例は、調整されたドーパントプロファイルを有する連続するレーザー単結晶を製造する方法を供する。当該方法は、各々でドーパントが分布している複数の多結晶セグメント(区画)をまとめてインゴットを生成するように配置する工程、前記インゴットの第1端部に種結晶を供する工程、及び、前記インゴットに沿って前記第1端部から前記インゴットの第2端部まで加熱素子を移動させる工程を有する。前記の移動する加熱素子は、前記インゴットを通過する間、前記インゴット内部に移動する溶融領域を生成する。

【0011】

他の実施例は、複数の多結晶セグメントをまとめてインゴットを生成するように配置する工程を含む方法によって生成された、調整されたドーパント濃度プロファイルを有する単結晶を供する。前記複数の多結晶セグメントの各々の内部では、ドーパントが分布する。前記工程はまた、前記インゴットの第1端部に種結晶を供する工程、及び、前記インゴットに沿って前記インゴットの第1端部から第2端部へ加熱素子を移動させる工程をさらに有する。前記の移動する加熱素子は、前記インゴットを通過する間、前記インゴット内部に移動する溶融領域を生成する。

【0012】

他の実施例は、選ばれた長さの連続体を有する単結晶を含むレーザー放出媒体を供する。前記単結晶は、均一な加熱プロファイルを実現するドーパント濃度プロファイルを画定するように、前記連続体の長さに沿って分布するドーパントを有する。前記レーザー放出媒体は、所望の形状及び光学特性を備える最終レーザー放出媒体を生成するように、当技術分野において既知の方法 - たとえばコアドリリング、ソーによる切断、研削、研磨、及びコーティング - を用いて前記単結晶を加工することによって生成されて良い。

【0013】

本開示の上記及び他の特徴及び特性、並びに、動作方法、構造の関連素子の機能、及び、製造部品の組立、及び製造の経済性は、明細書の一部を構成する添付図面を参照しながら以降の詳細な説明と特許請求の範囲を考慮することで明らかとなる。図中、同様の参照番号は、対応する部分を表す。しかし図面は説明目的でしかなく、本発明の基本思想を限定することを意図しないことに留意して欲しい。

【図面の簡単な説明】

【0014】

【図1a】複数の多結晶セグメントから生成される初期インゴットを表している。

【図1b】フロートゾーン処理中にインゴットを通り抜けて前記インゴット内に液体領域を生成する加熱素子を表している。

【図2】フロートゾーン処理中のインゴットの液体領域と溶融後領域と溶融前領域を表している。

【図3】フロートゾーン処理中のインゴットの液体領域と溶融後領域と溶融前領域を概略的に表し、かつ、対応する式で用いられるパラメータを特定している。

【図4】レーザー結晶の最終濃度プロファイルのプロットである。

【図5】目標濃度と、均一なインゴットに実行されるフロートゾーン処理の結果得られる濃度プロファイルと、各異なるドーパント濃度を有する複数の部分に実行されるフロートゾーン処理の結果得られる濃度プロファイルとの比較のプロットである。

【発明を実施するための形態】

【0015】

レーザー放出媒体は、調整されたドーパント濃度プロファイルを有するように作製されて良い。一部の実施例では、レーザー放出媒体は、選ばれた長さの連続体を有する長く延びた単結晶を含む。単結晶は、連続体の長さに沿って分布するドーパントを含み、かつ、目標ドーパント濃度プロファイルに従ったドーパント濃度プロファイルを有して良い。

【0016】

レーザー放出媒体は、フロートゾーン処理又はゾーンメルト法を用いて作製されて良い。フロートゾーン処理は、半導体産業において、結晶の狭い領域を溶融することによって結晶を精製するのに用いられてきた。よってこの溶融領域は、結晶の長手軸に沿って加熱素子を移動させることによってインゴットに沿って動く。溶融領域がインゴット全体を通り抜けるように移動するので、この溶融領域は、不純物を含む固体を溶融し、かつ、固化することで純粋な材料の単結晶領域を残す。その結果、不純物が、溶融物中に集中し、かつ、インゴットの一の端部へ移動する。液相中での不純物に対する固相中での不純物の比である偏析係数が通常は1未満であるため、不純物原子は固体/液体の境界で液体へ向かって拡散するという原理で、精製処理は機能する。よって、結晶ポウルの小さな領域のみがいつでも溶融するように、ファーンズの薄い部分に結晶ポウルを非常にゆっくり通過させることによって、不純物は、結晶の端部で偏析しうる。

10

【0017】

図1a-図1bは、レーザー結晶内部の活性レーザー放出種(すなわちドーパント)の濃度を調整するフロートゾーン処理を用いる様子を表している。当技術分野において知られているように、ドーパントは一般的に、物質の電気特性又は光学特性を変化させるために、その物質に挿入される。結晶性の物質の場合、ドーパント原子は一般的に、材料の結晶格子中に存在した元素の位置を占める。たとえばYAG-イットリウムアルミニウムガーネット($Y_3Al_5O_{12}$)としても知られている - は、レーザー結晶を精製するように通常は元素がドーピングされる一般的な合成結晶材料である。YAG中のイットリウムイオンは、格子構造に強く影響することない濃度限界まで、レーザー活性の希土類イオンに置き換えられて良い。濃度限界は、置換されたイオン(たとえばY)のサイズに対するドーパントイオン(たとえばNd)のサイズによって決定される。これらのドーパントイオンは基本的に、結晶中でのレーザー放出過程を実行しうる。結晶中での他の原子(つまりY原子、Al原子、及びO原子)は、ドーパント原子を支え、かつ、レーザーのエネルギーバンド構造に影響を与える結晶場を供する。様々な結晶材料 - たとえば $Y_3Al_5O_{12}$ 、 $YLiF_4$ 、又は $Gd_3Ga_5O_{12}$ - が用いられて良い。様々なドーパント - たとえばYb、Er、Tm、又はHo - もまた用いられて良い。

20

【0018】

図1aに図示されているように、初期インゴット10が、複数の多結晶セグメント(区画)12から精製される。初期インゴットは、長手軸が鉛直になるような向きをとって良い。一の実施例では、各多結晶セグメント12は、他のセグメントとは異なるドーパント濃度を有する。しかし、セグメント12は、同一のドーパント濃度を有し得るし、又はその代わりに、単一の多結晶セグメントであり得る。セグメント12の数は他の実施例において変化して良いことに留意して欲しい。各セグメント12の長さ及び各セグメント12での濃度もまた、目標濃度プロファイルを実現するために変化して良い。セグメント12は、接合又は焼成を行うことなく鉛直に積層され、かつ、重力のみによって正しい位置に保持されて良い。単結晶である種結晶14は、インゴット10の第1端部16に供され、かつ、インゴット10を形成するようにセグメント12と共に配置されて良い。種結晶14は、実質的に純粋であるか、又は、あるドーパント濃度でドーピングされて良い。種結晶14の格子の配向は、結果として得られるレーザー放出結晶の所望の配向と同一である。インゴット10はまた、第1端部16とは反対の第2端部18をも有して良い。加熱素子20は、液体領域22を生成するのに用いられて良い。一の実施例では、インゴット10の長手軸が上部で種結晶に対して垂直で、多結晶セグメントに隣接しない種結晶の端部が、重力を打ち消すように固定部材に固定又は接合され、かつ、インゴット10が静止するように保持される一方で、加熱素子20が上部から下部へ垂直に移動するように、インゴット10は配置される。種結晶14の端部16が結晶化した固体を残し、かつ、結果として得られるレーザー放出結晶の結晶構造と格子の配向を画定するように、加熱素子20の初期位置は、種結晶14と隣接する多結晶セグメント12'との間の界面付近である。加熱素子20は、RF誘起又は他の方法若しくは装置によって供されて良い。たとえば一の実施例では、加熱素子20は、誘導コイル、リングが巻かれた抵抗ヒーター、又は、ガス炎であって良い。一の実施例では、インゴット10は、誘導加熱された

30

40

50

タングステンリングを用いて放射加熱されて良い。インゴット10が電気伝導性である一部の実施例では、電流がインゴットを流れる一方で、インゴットは、制御された電流によって磁場内で浮いている。それによって材料は、液体領域22内での重力によって下に落ちるのを抑制するように磁場によって空中に浮いている。

【0019】

加熱素子20によって生成される液体領域22は、結晶の精製に関して上述した「溶融領域」と似ている。液体領域22は、インゴット10全体を通り抜けるように移動し、かつ、インゴット10全体にドーパントを分散させることで、ドーパント濃度プロファイルを生成する。図1bは、方向Aにインゴット10全体を通り抜けるように移動することで、インゴット10全体を通り抜けるように液体領域22を移動させる加熱素子20を図示している。加熱素子20がインゴット10全体を通り抜けるように液体領域22を移動させることで、結果として得られる所望の濃度プロファイルを有する結晶部分24が生成される。

【0020】

種結晶14とインゴット10の各セグメント12には、選択された活性レーザー放出種がドーピングされて良い。この選択された活性レーザー放出種は、上述のフロートゾーン精製処理における「不純物」としての役割を果たす。しかしインゴットを精製する代わりに、図1の処理は、所望すなわち目標の一次元ドーパントプロファイルを有する単結晶を生成する。結果として得られるプロファイルは、各セグメント12内で適切なドーパント濃度を選択することによって実現されうる。それによって液体領域内での活性レーザー放出種の拡散、及び、固相と液相との間での活性レーザー放出種の溶解度の差異が存在する結果、所望のプロファイルが得られる。単結晶領域での濃度の低下を引き起こす固相と液相との間での活性レーザー放出種の溶解度の差異は、特定の結晶内での特定のドーパント濃度の偏析係数によって評価される。一部の実施例では、種結晶14には、結果として得られる結晶の第1端部16での所望の濃度と同一の濃度がドーピングされなければならない、かつ、最初に溶融する種結晶14付近のセグメント12は、目標濃度よりも高いドーパント濃度を有しなければならない。係る実施例では、インゴット10の第2端部18により近いセグメント12は、低いドーパント濃度を有して良い。図1aに図示された実施例では、セグメント12の濃度は、第1端部16から第2端部18に向かって減少する。ドーピングプロファイルの滑らかさは、所望の濃度勾配の急峻さとインゴット10内の多結晶セグメント12の数に依存しうる。

【0021】

図2は、溶融中にドーパント種が液体内で混合される液体領域22周辺の領域の拡大図を示している。領域21は、溶融前領域又は条件を表し、かつ、 C_1 の濃度を有する。 C_1 は、重さで表されたドーパント種の初期濃度を表す。単一の均一にドーピングされたセグメントが用いられる場合、 C_1 は一定であって良い。あるいはその代わりに、各異なるドーパント濃度を有する複数のセグメント12が用いられる場合、 C_1 は、方向Aでのインゴット10の長さに沿った距離の関数であって良い。領域23は、濃度 C_F を有する溶融後領域又は条件を表す。 C_F は最終濃度を表す。 C_F は、結果として得られる結晶の長さに沿った距離の関数である。複数のセグメント12が用いられ、かつ、それらの長さや濃度は、最終濃度プロファイルを与えるように調整されて良いことに留意して欲しい。たとえば結果として得られる最終濃度は、各多結晶セグメントの長さを変化させ、各多結晶セグメント内でのドーパント濃度を変化させ、液体領域の長さを変化させ、加熱素子がインゴット全体を通り抜けて移動する際の経路の数を変化させ、かつ、後述する他の因子を変化させることによって調整されて良い。従って、 C_1 は溶融前条件を表し、かつ、 C_F は溶融後条件を表す。

【0022】

多結晶セグメント12に実行されるフロートゾーン処理は、多結晶レーザー放出材料を単結晶に変化させ得る。このとき標準的な成長法（たとえばチョコラルスキ法）は、サイズの観点から見て不可能かつ非現実的で、結晶内部に意図しない応力を生じさせる。たとえばチョコラルスキ法によって生成されたNdがドーピングされたYAGは、結晶の中心に沿って生成される応力を受けた領域を有する。この領域は、レーザー放出媒体には使えない。対照的に、複数の多結晶セグメント12のフロートゾーン処理によって生成される結晶は、

連続体、その連続体の長さに沿って調整されたドーパント濃度、及び、実質的に応力を受けない領域を有する。結果として得られる結晶は、種結晶14と同一の結晶構造及び格子配向、並びに、後述する任意の因子又はパラメータを変化させることによって任意で精密に調整されうる濃度プロファイルを有する単結晶であって良い。

【 0 0 2 3 】

図3は、図2と同一の領域、及び、ドーピングプロファイルを解析するのに用いられるパラメータを示している。パラメータは以下のように定義される。

L=液体領域の長さ

x=インゴットに沿った距離

$C_1(x)$ =初期インゴットの濃度(質量単位)

$C_F(x)$ =最終レーザー結晶の濃度(質量単位)

s=液体領域内の所与の位置に存在するドーパントの量

A=インゴットの断面積

k=偏析係数(固相/液相界面にわたる液体中でのドーパント濃度に対する固相でのドーパント濃度の比)

=固体結晶の比重

ヒーターが方向Aに左から右へ移動することで、熔融領域(図1a,1bに示された液体領域22)もそれに従って移動する。液体領域22は無限小距離dxだけ進むことで、インゴットから液体領域22に加えらるドーパントの量は $C_1(x)A_p dx$ となる。再度処理される結晶界面で液体領域22から除去されるドーパントの量は $(k_s/L)dx$ である。従って領域22がdxだけ進むときに液体領域22へ加えられるドーパントの正味の量は、 $ds=[C_1(x)A_p dx - (k_s/L)dx]$ となる。

【 0 0 2 4 】

種結晶端部での境界濃度は $s(0)=C_1(0)(AL_p)$ である。最終結晶ポウルの濃度は、 $C_F(x)=k_s/(AL)$ で与えられる。初期インゴットが均一のドーピング($C_1=一定$)を有する場合、微分方程式は陽的に解くことができる。その結果、 $C_F(x)$ の指数関数的に増大する値が、 $C_F(x)=C_1(x)[1-(1-k)\exp(-kx/L)]$ によって与えられる。

【 0 0 2 5 】

上記の式は、多結晶インゴットの任意の所与のプロファイルについて解くことができる。つまり濃度プロファイルを調整するため、上記の式は、パラメータの値を決定するのに用いることができる。あるいはその代わりに、パラメータの入力値は、結果として得られる濃度プロファイルを決めるのに用いられて良い。

【 0 0 2 6 】

一の実施例では、結果として得られるレーザー放出媒体は、ネオジウムがドーピングされたイットリウムアルミニウムガーネット(Nd:YAG)である。Nd:YAGは、中程度の励起レベル及びポンプ光強度でも相当なレーザー利得を与える。利得帯域は比較的小さくて良いが、これは、高利得効率ひいては低閾値ポンプ光出力を可能にする。Y格子位置での置換不純物としてのNdイオンが十分に適合しないので、YAG中でのNdの偏析係数は非常に低い($k=0.18$)。しかしこの低い値は、フロートゾーン処理において相当な濃度勾配を生じさせる。このことは、ある端部ポンピング用途にとっては望ましいと考えられる。インゴットの面積は解析における因子ではない。しかし固相と液相との間での界面は、比較的平坦で、かつ、方向Aに対して垂直でなければならない。これは、濃度勾配に対する横方向成分 - これは望ましくないと考えられる - を防止又は抑制することができる。しかし結果として得られる結晶は、フロートゾーン処理装置、レーザーポンプヘッドの熱設計、及び、レーザー結晶12の処理及び熱的耐性に基づいて変化する特徴又は性能の特性を有して良い。

【 0 0 2 7 】

一の実施例では、結晶は以下のパラメータを有して良い。

L=0.5cm, 1cm, 1.5cm

=4.56g/cm³

$C_1(0)=1$ 原子%= 1.36×10^{20} Nd原子/cm³= 2.98×10^{19} Nd原子/g

10

20

30

40

50

k=0.18

図4は、上のパラメータを有するレーザー結晶の最終濃度プロファイルのプロットしている。つまり図4は、1原子%のNdがドーピングされた初期インゴットの長さに沿って加熱素子が1回通過した後における複数の液体領域の長さについてのレーザー結晶12の最終濃度プロファイルのプロットしている。具体的には図4は、0.5cm, 1cm, 及び1.5cmの液体領域の長さを有する結晶の濃度プロファイルを示している。プロットAは液体領域の長さが0.5cmの結晶の濃度プロファイルを示し、プロットBは液体領域の長さが1cmの結晶の濃度プロファイルを示し、かつ、プロットCは液体領域の長さが1.5cmの結晶の濃度プロファイルを示す。Ndドーパントの初期量($C_1(0)$)は、1原子%=(1.36×10^{20} Nd原子/cm³= 2.98×10^{19} Nd原子/g)であって良い。YAG中でのNdの偏析係数は0.18である。

10

【0028】

図5は、目標濃度と、均一なインゴットに実行されるフロートゾーン処理の結果得られる濃度プロファイルと、濃度がそれぞれ異なる複数の部分を用いることによって生成された最終濃度を有する結晶と、均一にドーピングされた初期インゴット10での単純なフロートゾーン処理によって生成された最終濃度を有する結晶とを比較したプロットである。図5に示された目標濃度は、高アスペクト比のPWGスラブ構造の活性層となるように設計された長さ5cmの小さいレーザー結晶の最適付近の濃度プロファイルを表している。均一にドーピングされたインゴットの濃度プロファイルも図5に示されている。インゴットの初期濃度(1.95×10^{19} 原子/g)は、傾斜端部での目標プロファイルと同一の最終濃度(3.32×10^{18} 原子/g)を与えるように調整される。セグメントに分割されたインゴットの濃度も示されている。このとき各セグメントの長さは0.5cmで、各セグメントは以下の濃度を有する。

20

セグメント1 : 1.8×10^{19} 原子/g

セグメント2 : 6.0×10^{18} 原子/g

セグメント3 : 1.8×10^{18} 原子/g

セグメント4 : 9.5×10^{18} 原子/g

セグメント5 : 1.2×10^{19} 原子/g

セグメント6 : 1.6×10^{19} 原子/g

セグメント7 : 1.8×10^{19} 原子/g

セグメント8 : 2.3×10^{19} 原子/g

セグメント9 : 3.1×10^{19} 原子/g

セグメント10 : 3.7×10^{19} 原子/g

セグメント11 : 4.8×10^{19} 原子/g

30

一部の実施例では、フロートゾーンが、不連続なくスラブの有用な領域全体を通り抜けることを可能にするように、端部での追加セグメントが犠牲にされ得る。図5に示されているように、上述のドーパント濃度がそれぞれ異なる複数のセグメントへのゾーン処理によって生成される濃度プロファイルは、均一にドーピングされた初期インゴット10へのフロートゾーン処理によって生成される濃度よりも目標濃度に近い。従って、単結晶のドーパント濃度プロファイルは、複数の多結晶セグメントにフロートゾーン処理を実行することによって調整され得る。

【0029】

40

上述したように、レーザー放出媒体が均一にドーピングされた結果、ポンプ端部での材料は、最も多くのエネルギーを受け取り、かつ、最も多くの熱を発生させる。よって熱が局在化する。しかし上述のフロートゾーン処理によって生成された単結晶内部での調整されたドーパントレベルは、結晶全体で均一な加熱及び均一なレーザー放出をもたらすことができる。つまり単結晶のドーパントプロファイルを調整することで、より高い出力を生成しうる均一な加熱プロファイルを有する強く安定なレーザー放出媒体を得ることができる。

【0030】

上述の説明は、現時点で最も現実的と考えられていることに基づく例示目的で与えられている。しかし係る詳細は単なる上記目的のためであり、本発明の基本思想は開示された

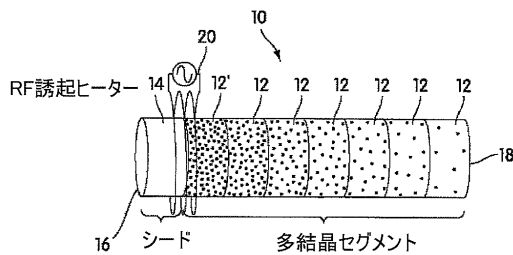
50

実施例に限定されず、対照的に請求項に含まれる修正型や均等型を網羅することを意図していることに留意して欲しい。たとえば本開示は、可能な限り任意の実施例の特徴のうちの1つ以上を、他の実施例の特徴の1つ以上と組み合わせられることも考えられることに留意して欲しい。

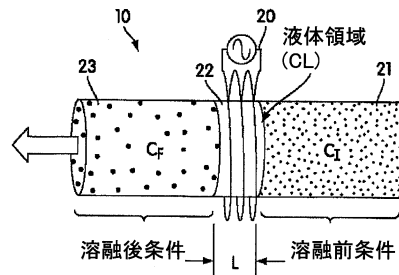
【0031】

さらに多数の修正型及び変化型が当業者にとってすぐに思い浮かぶので、本発明の基本思想を本願明細書に記載された厳密な構成や動作に限定することは望ましくない。当業者は、本発明の技術的思想及び技術的範囲から逸脱することなく、固体レーザーの製造及び他の分野における他の利点及び本発明の基本思想の応用を発見できる。

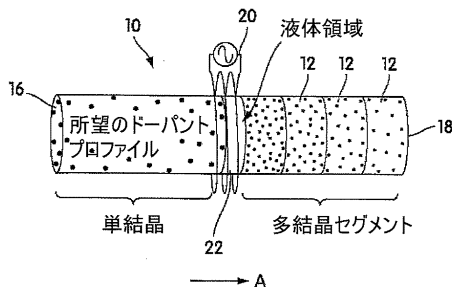
【図1a】



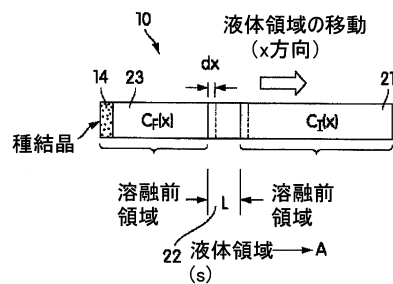
【図2】



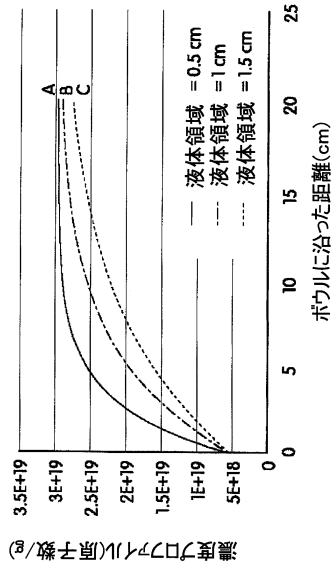
【図1b】



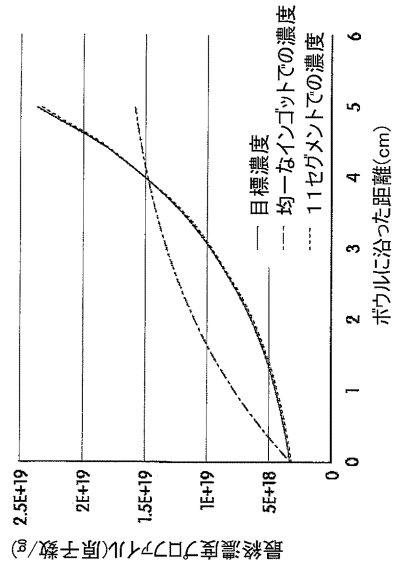
【図3】



【 図 4 】



【 図 5 】



フロントページの続き

審査官 宮崎 園子

- (56)参考文献 特開2005-008427(JP,A)
特開2001-213698(JP,A)
特開平06-271381(JP,A)
特公昭39-015505(JP,B1)
国際公開第2011/125897(WO,A1)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
- | | |
|------|-------|
| C30B | 29/28 |
| C30B | 13/20 |
| C30B | 29/12 |
| H01S | 3/063 |
| H01S | 3/16 |