

【公報種別】特許法第 17 条の 2 の規定による補正の掲載
 【部門区分】第 7 部門第 2 区分
 【発行日】平成20年7月10日 (2008.7.10)

【公開番号】特開2008-124505(P2008-124505A)
 【公開日】平成20年5月29日 (2008.5.29)
 【年通号数】公開・登録公報2008-021
 【出願番号】特願2008-24517(P2008-24517)
 【国際特許分類】

H 0 1 S 3/109 (2006.01)
 G 0 2 F 1/37 (2006.01)
 H 0 1 S 3/042 (2006.01)
 H 0 1 S 3/094 (2006.01)
 H 0 1 S 5/343 (2006.01)

【F I】

H 0 1 S 3/109
 G 0 2 F 1/37
 H 0 1 S 3/04 L
 H 0 1 S 3/094 S
 H 0 1 S 5/343

【手続補正書】
 【提出日】平成20年5月1日 (2008.5.1)
 【手続補正 1】
 【補正対象書類名】明細書
 【補正対象項目名】全文
 【補正方法】変更
 【補正の内容】
 【発明の詳細な説明】
 【発明の名称】レーザーダイオード励起固体レーザー
 【技術分野】
 【0001】

本発明は、固体レーザー結晶をレーザーダイオード（半導体レーザー）によって励起するレーザーダイオード励起固体レーザーに関し、特に詳細には、紫外光を得るように構成されたレーザーダイオード励起固体レーザーに関するものである。

【背景技術】

【0002】

例えば紫外線リソグラフィーや、レーザー励起による生体細胞の蛍光分析等においては、紫外域で連続発振する高効率、高出力のレーザーが求められている。

【0003】

そのような紫外レーザーの一つとして、InGa_N、InGa_NAsあるいはGa_NAsからなる活性層を有するGa_N系の半導体レーザーが知られている。このGa_N系の半導体レーザーとしては、近時、発振波長400 nm、出力数mWで連続1000時間発振するものも提供されている。

【0004】

また、非線形光学結晶を用いたSHG（第2高調波発生）あるいはTHG（第3高調波発生）により発振光を短波長化して、波長400 nm以下の紫外域のレーザービームを得る波長変換固体レーザーも知られている。

【0005】

しかしGa_N系の半導体レーザーにおいては、現状、多くの用途で求められる単一横モ

ード発振で100 mW以上の出力を得ることは困難となっている。また波長380 nm以下では、発振効率が低下し、かつ寿命も大幅に短くなるという問題が認められている。

【0006】

一方、SHGによって発振光を短波長化する波長変換固体レーザーでは、700～800 nmの波長帯で効率良く発振する固体レーザー媒質が見出されていないため、高出力を得るのが難しくなっている。

【0007】

またTHGによって発振光を短波長化する波長変換固体レーザーは、本来効率が低く、実際にはパルスモード発振しか実現されていない。それを連続モードで発振させるためには、基本波のSHG光を共振させる必要があるが、そのためには共振器を誤差0.01℃以下で高精度に温度調節しなければならない、コストを考えると実用化は極めて困難となっている。

【0008】

上記の事情に鑑みて、本出願人は先に、発振した固体レーザービームを光波長変換素子により第2高調波に波長変換して紫外光を得るレーザーダイオード励起固体レーザーを提案した（特許文献1参照）。

【0009】

このレーザーダイオード励起固体レーザーは、

希土類元素イオンのうち少なくとも Pr^{3+} が添加された固体レーザー結晶と、

InGaN 、 InGaNAS あるいは GaNAS からなる活性層を有し、前記固体レーザー結晶を励起するレーザービームを発するレーザーダイオードと、

前記固体レーザー結晶を励起して得られた固体レーザービームを紫外光に波長変換する光波長変換素子とを有することを特徴とするものである。

【特許文献1】特開2001-36175号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0010】

この特許文献1に示されるレーザーダイオード励起固体レーザーは前述した従来技術の問題を解決できるものであるが、その半面、ここで具体的に開示されている紫外光の波長は概ね360 nmに限られている。

【0011】

そこで本発明は、360 nmを超えた波長範囲や、360 nmを下回る波長範囲の紫外光を連続発振させることができる高効率、高出力、低コストのレーザーダイオード励起固体レーザーを提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0012】

本発明によるレーザーダイオード励起固体レーザーは、

希土類元素イオンのうち少なくとも Er^{3+} が添加された固体レーザー結晶と、

InGaN 、 InGaNAS あるいは GaNAS からなる活性層を有し、前記固体レーザー結晶を励起するレーザービームを発するレーザーダイオードと、

励起された前記固体レーザー結晶における $^4\text{S}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ あるいは $^2\text{H}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2}$ の遷移によって発生した固体レーザービームを紫外光に波長変換する光波長変換素子とを有することを特徴とするものである。

【0013】

この Er^{3+} が添加された固体レーザー結晶を用いる本発明によるレーザーダイオード励起固体レーザーは、より具体的には、例えば固体レーザー結晶における $^4\text{S}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ の遷移によって波長がほぼ540 nmの固体レーザービームを発生させ、この固体レーザービームを前記光波長変換素子により第2高調波に波長変換して波長がほぼ270 nmの紫外光を得る構成とされる。

【0014】

あるいは、 Er^{3+} が添加された固体レーザー結晶における ${}^2\text{H}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}$ の遷移によって波長がほぼ554nmの固体レーザービームを発生させ、この固体レーザービームを前記光波長変換素子により第2高調波に波長変換して波長がほぼ277nmの紫外光を得る構成をとることも可能である。

【0015】

なお、上記 Er^{3+} が添加された固体レーザー結晶の励起波長は406nm、あるいは380nmとされる。そしてこの固体レーザー結晶としては、希土類元素イオンとして Er^{3+} のみが添加されたものを好適に用いることができる。

【0016】

一方前述の光波長変換素子としては、周期ドメイン反転構造を有する非線形光学結晶からなるものを好適に用いることができる。

【発明の効果】

【0017】

Er^{3+} が添加された固体レーザー結晶を用いる本発明のレーザーダイオード励起固体レーザーにおいては、前述した通り、例えば励起波長を406nmあるいは380nmとして、波長がほぼ540nmあるいは554nmの固体レーザービームを発生させ得るので、それらを各々第2高調波に波長変換して波長がほぼ270nmあるいは277nmの紫外光を得ることができる。

【0018】

そして、 Ho^{3+} 、 Sm^{3+} 、 Eu^{3+} 、 Dy^{3+} および Er^{3+} は波長380~420nmに吸収帯があるが、この吸収帯は現在提供されているGa₃N系レーザーダイオードが発振しやすい波長帯であり、特に400~410nmは現在提供されているGa₃N系レーザーダイオードの最大出力が得られる波長帯であるので、これらの中の一つである Er^{3+} をGa₃N系レーザーダイオードによって励起するようにした本発明のレーザーダイオード励起固体レーザーは、励起光の吸収量が大きくて、高効率化および高出力化を達成できるものとなる。

【0019】

一方、Ga₃N系レーザーダイオードは熱伝導係数が130 W/m℃と、ZnMgSSe系レーザーダイオードの4 W/m℃等と比べて極めて大きい。またそれに加えて、転移の移動度もZnMgSSe系レーザーダイオードと比べて非常に小さいことから、COD（カタストロフィック・オプティカル・ダメージ）が非常に高く、高寿命、高出力が得やすいものである。このような特性のGa₃N系レーザーダイオードを励起光源として用いたことにより、本発明のレーザーダイオード励起固体レーザーは、高寿命で、高出力の紫外域のレーザービームを発生可能となる。

【0020】

なお、特に上述のように固体レーザービームを第2高調波に波長変換する場合は、第3高調波を発生させる場合のように構成が複雑化することがなく、低コストのレーザーダイオード励起固体レーザーが実現される。

【発明を実施するための最良の形態】

【0021】

以下、図面を参照して本発明の実施形態を詳細に説明する。

【0022】

以下、図面を参照して本発明の実施の形態を詳細に説明する。図1は、本発明の一実施の形態によるレーザーダイオード励起固体レーザーを説明するための参考例を示すものである。この参考例のレーザーダイオード励起固体レーザーは、励起光としてのレーザービーム10を発するレーザーダイオード11と、発散光である上記レーザービーム10を集光する例えば屈折率分布型レンズからなる集光レンズ13と、 Ho^{3+} が例えば1at%ドープされた固体レーザー媒質である $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 結晶（以下、 $\text{Ho}:\text{YAG}$ 結晶と称する）14と、この $\text{Ho}:\text{YAG}$ 結晶14の前方側（図中右方側）に配された共振器ミラー15と、 $\text{Ho}:\text{YAG}$ 結晶14と共振器ミラー15との間に配された光波長変換素子16およびエタロン17

とを有している。

【0023】

以上述べた要素14～17は、例えば銅からなる共通のマウント30に取り付けられ、このマウント30は温度調節手段を構成するペルチェ素子31の上に固定されている。またレーザーダイオード11と集光レンズ13もそれぞれ銅等からなるマウント32、33に取り付けられ、これらのマウント32、33もペルチェ素子31の上に固定されている。このペルチェ素子31は、光出射窓35を有する密閉型ケース36の中に収納されている。

【0024】

そして、マウント30に取り付けられたサーミスタ34が出力する温度検出信号に基づいて図示外の温度制御回路によりペルチェ素子31の駆動が制御されて、レーザーダイオード11および固体レーザー共振器（後述のようにH o : Y A G 結晶14および共振器ミラー15によって構成される）内の要素が全て共通の所定温度に制御される。

【0025】

光波長変換素子16は、非線形光学材料である、M g O がドープされた L i N b O ₃ 結晶に周期ドメイン反転構造が設けられてなるものである。本例の場合、周期ドメイン反転構造の周期は、後述の基本波波長 750 n m および第 2 高調波波長 375 n m に対して 1 次の周期となるように 2.0 μ m とされている。また波長選択素子としてのエタロン17は、固体レーザーを単一縦モード発振させて低ノイズ化を実現する。

【0026】

レーザーダイオード11としては、I n G a N 活性層を有し、波長 420 n m で発振するブロードエリア型のものが用いられている。

【0027】

またH o : Y A G 結晶14の光入射面である後方端面14 a には、波長 420 n m の光は80%以上の透過率で良好に透過させる一方、H o ³⁺ の 1 つの発振線である波長750 n m に対して高反射率（反射率99%以上さらに好ましくは99.9%以上）で、H o ³⁺ の750 n m 以外の発振線550 n m、980 n m、1010 n m および1210 n m に対しては低反射率（反射率60%以下さらに好ましくは30%以下）のコーティングが施されている。一方H o : Y A G 結晶14の前方端面14 b には、波長750 n m に対して低反射率（反射率0.2%以下）で、その第 2 高調波波長375 n m に対しては高反射率（反射率95%以上）のコーティングが施されている。

【0028】

そして共振器ミラー15のミラー面15 a には、波長750 n m の光に対して高反射率（99%以上さらに好ましくは99.9%以上）で、波長375 n m の光を95%以上透過させ、上記750 n m 以外の発振線550 n m、980 n m、1010 n m および1210 n m に対しては低反射率（60%以下さらに好ましくは30%以下）のコーティングが施されている。

【0029】

レーザーダイオード11から発せられた波長420 n m のレーザービーム10は、上記端面14 a を透過してH o : Y A G 結晶14に入射する。H o : Y A G 結晶14はこのレーザービーム10によってH o ³⁺ が励起されることにより、波長750 n m の光を発する。このときの遷移は、⁵ S ₂ → ⁵ I ₇ である。そしてH o : Y A G 結晶14の後方端面14 a と共振器ミラー15のミラー面15 a とで構成される共振器によりレーザー発振が引き起こされて、波長750 n m の固体レーザービーム20が得られる。このレーザービーム20は光波長変換素子16に入射して、波長が 1 / 2 すなわち375 n m の第 2 高調波21に変換される。

【0030】

共振器ミラー15のミラー面15 a には前述の通りのコーティングが施されているので、この共振器ミラー15からはほぼ第 2 高調波21のみが出射する。この第 2 高調波21は、光出射窓35を透過して密閉型ケース36の外に出射する。

【0031】

本参考例のレーザーダイオード励起固体レーザーは、上記の通りH o : Y A G 結晶14をI n G a N レーザーダイオード11によって励起する構成を有するので、先に詳しく説明し

た理由により、高効率化、高出力化が実現される。具体的には、レーザーダイオード11の出力が300mWの場合において、第2高調波21の出力は40mWであった。

【0032】

以上、CW動作について説明したが、Qスイッチ素子を共振器内に挿入することで、パルス動作にはなるが、波長変換効率を高め、より高い出力を得ることも可能である。あるいは、GaN系レーザーダイオードは高いCODを有することから、励起用レーザーダイオードをパルス駆動することで、同様に高効率、高出力の紫外パルス光を得ることも可能である。

【0033】

また、上述のHo:YAG結晶14は、GaN系レーザーダイオードにより励起されて（励起波長は同様に420nm）、 $^5S_2 \rightarrow ^5I_8$ の遷移によって波長がほぼ550nmの固体レーザービームを発生させる。そこで、この固体レーザービームを光波長変換素子16により第2高調波に波長変換すれば、波長275nmの高強度の紫外光を得ることができる。

【0034】

その他に、前述した通り Sm^{3+} が添加された固体レーザー結晶を用い、励起波長を404nmとして波長がほぼ566nm、615nmあるいは650nmの固体レーザービームを発生させ、それらを第2高調波に波長変換して波長がほぼ283nm、308nmあるいは325nmの紫外光を得ることもできる。この Sm^{3+} が添加された固体レーザー結晶を用いる場合は、上記 Ho^{3+} が添加された固体レーザー結晶を用いる場合と並んで、特に高い出力を得ることができる。

【0035】

また、 Eu^{3+} が添加された固体レーザー結晶を用い、励起波長を394nmとして、波長がほぼ589nmの固体レーザービームを発生させ、それを第2高調波に波長変換して波長がほぼ295nmの紫外光を得ることもできる。

【0036】

また、 Dy^{3+} が添加された固体レーザー結晶を用い、励起波長を390nmとして波長がほぼ572nmあるいは664nmの固体レーザービームを発生させ、それらを第2高調波に波長変換して波長がほぼ286nmあるいは332nmの紫外光を得ることもできる。その中でも特に664nmの固体レーザービームを発生させる場合は、高い出力を得ることができる。

【0037】

さらに、 Er^{3+} が添加された固体レーザー結晶を用い、励起波長を406nmあるいは380nmとして、波長がほぼ540nmあるいは554nmの固体レーザービームを発生させ、それらを第2高調波に波長変換して波長がほぼ270nmあるいは277nmの紫外光を得ることもできる。

【0038】

そのように Sm^{3+} 、 Eu^{3+} 、 Dy^{3+} あるいは Er^{3+} が添加された固体レーザー結晶を用いる場合も、前述のHo:YAG結晶14に代えて適宜そのような固体レーザー結晶を用い、それぞれの場合の励起波長、発振波長および第2高調波波長に応じて前記コーティングを変えるだけで、基本的には図1の構成を採用することができる。

【0039】

また、上ではInGaNから活性層を構成したレーザーダイオードについて説明したが、InGaNAs系材料あるいはGaNAs系材料から活性層を構成したレーザーダイオードを励起用光源として用いることも可能である。

【0040】

またレーザー母材結晶としては、上の参考例で用いた $Y_3Al_5O_{12}$ （YAG）に限らず、 BaY_2F_8 、 $Ba(Y, Yb)_2F_8$ 、 LaF_3 、 $Ca(NbO_3)_2$ 、 $CaWO_4$ 、 $SrMoO_4$ 、 $YAlO_3$ （YAP）、 $LiYF_4$ （YLF）、 Y_2SiO_5 、 $Y_2P_5O_{14}$ 、 LaP_5O_{14} 、 $LuAlO_3$ 、 $LaCl_3$ 、 $LaBr_3$ 、 $PrBr_3$ 等を用いることもできる。

【0041】

一方光波長変換素子の周期ドメイン反転構造には、1次の周期に限らず、3次の周期を適用してもよい。750nm発振の時の3次周期は、 $6.0\mu\text{m}$ となる。また光波長変換素子としては、周期ドメイン反転構造を有するものに限らず、 B-BaBO_3 、 LBO 、 CLBO 、 GdYCOB 、 YCOB 等からなるものを用いることもできる。さらに励起用レーザーダイオードとしては、ブロードエリア型のものだけでなく、 MOPA 、 $\alpha\text{-DFB}$ 構造を有するもの等も同様に適用可能である。

【図面の簡単な説明】

【0042】

【図1】本発明の一実施の形態によるレーザーダイオード励起固体レーザーを説明するための参考例を示す概略図

【符号の説明】

【0043】

- 10 レーザービーム（励起光）
- 11 InGaN系レーザーダイオード
- 13 集光レンズ
- 14 Ho:YAG結晶
- 14a Ho:YAG結晶の後方端面
- 14b Ho:YAG結晶の前方端面
- 15 共振器ミラー
- 15a 共振器ミラーのミラー面
- 16 光波長変換素子
- 17 エタロン
- 20 固体レーザービーム
- 21 第2高調波
- 30、32、33 マウント
- 31 ペルチェ素子