公告本

405285

申請日期：87.12.1	案號：87119925
類別：H01S 3/094	

（以上各欄由本局填註）

發明專利說明書

一、發明名稱	中文	高功率二極體激發式固態雷射及其製造方法
	英文	405285
二、發明人	姓名（中文）	1.陳永富
	姓名（英文）	1.Yung-Fu Chen
	國籍	1.中華民國
	住、居所	1.彰化縣鹿港鎮東石里永春街105號
三、申請人	姓名（名稱）（中文）	1.行政院國家科學委員會精密儀器發展中心
	姓名（名稱）（英文）	1.Precision Instrument Development Center, National Science Council
	國籍	1.中華民國
	住、居所（事務所）	1.新竹市科學工業園區研發六路20號
	代表人姓名（中文）	1.黃文雄
	代表人姓名（英文）	1.Wen-Hsiung Huang

五、發明說明 (1)

發明領域

本發明係關於一種高功率二極體端面激發式固態雷射(high power diode end-pumped solid-state laser)裝置，主要是一種利用低釹離子濃度的釩酸類晶體(neodymium-doped vanadium-based crystals)所組成的雷射。低釹離子濃度的釩酸類晶體具有較高的破裂限制激發功率(fracture-limited pump power)，可產生更高的功率輸出。

發明背景說明

過去幾年，一些摻釹的釩酸類晶體(neodymium-doped vanadium-based crystals)已被視為二極體激發式固態雷射的重要材料。釩酸類晶體包括釩酸釔(YVO_4)、釩酸釓($GdVO_4$)以及氟化釩酸鍶($Sr_5(VO_4)_3F$ or S-VAP)等晶體。比起傳統的釔鋁榴石晶體(YAG)，釩酸類晶體(vanadate)有較高的增益截面(gain cross-section)、較低的臨界激發功率(threshold)、較寬的吸收波帶(absorption bandwidth)等優點，並且由於此類晶體是異向晶體，因此可產生線偏極化輸出，此特性可避免高功率時所發生的雙折射效應。

雖然釩酸類晶體材料在二極體激發式固態雷射的設計上有許多優點勝過傳統的YAG晶體，但這些材料的熱傳導

五、發明說明 (2)

係數較YAG晶體低很多，因此利用雷射二極體端面激發時，在激發區域所產生的熱不易傳至外界。理論與實驗研究結果顯示端面激發式固態雷射之最大輸出功率是受限於雷射晶體因熱所產生的破裂(thermal fracture)。因此，端面激發式固態雷射所能承受的最大激發功率可稱為「破裂限制激發功率」。Tsunekane 等人在IEEE J. Select. Topics Quantum Electron. vol. 3, 9 (1997)報導了摻入1.1%釹離子濃度的釩酸釔(YVO_4)的實驗結果，顯示了1.1% Nd:YVO_4 的最高激發功率為13.5瓦。而另一方面，Tidwell等人在 IEEE J. Quantum Electron., vol. 28, 997 (1992)估計了Nd:YAG的破裂限制激發功率約為50~70瓦。熱傳導係數低是造成釩酸類晶體的「破裂限制激發功率」遠低於YAG的原因之一。然而熱傳導係數是晶體母材的基本物理性質，無法改變。

除了熱傳導係數之外，端面激發式固態雷射的破裂限制激發功率與晶體對激發光源的吸收係數(absorption coefficient)有密切的關聯性。雖然高吸收係數的晶體在低功率操作容易有較高的 TEMoo輸出斜效率，而且常被用作短薄型單晶共振腔(short monolithic cavity)而產生單縱模運轉，如 Sasaki等人在 Opt. Lett. vol. 16, 1665 (1991)所報導，但是高吸收係數會導致晶體內部有大的溫度梯度，造成晶體的激發端面有大量的熱應力存在。一般相信，熱應力所導致晶體的熱破裂是設計高功率端面激發式固態雷射的主要技術瓶頸。換言之，高吸收係

五、發明說明 (3)

數的雷射材料在高功率的操作時會有所限制。

在低功率激發時，一般為了有高的輸出效率，$Nd:YVO_4$所摻入的釹離子濃度在0.5~3.0%之間，通常是1.0%。濃度1.0%的$Nd:YVO_4$在波長808-nm 的吸收係數是同濃度YAG晶體的5倍之多。實驗結果顯示，濃度1.0%的$Nd:YVO_4$在單端激發的情況下，其破裂限制激發功率約為15瓦，所對應之TEMoo的最高輸出功率約為7瓦。

以單端激發濃度1.0%的$Nd:YVO_4$之輸出結果對高功率雷射作一標準，7瓦的TEMoo功率輸出可視為高功率雷射的基準(benchmark)。因此任何二極體端面激發式固態雷射能有7瓦以上的TEMoo輸出功率，以及40%以上的輸出斜效率(optical slope efficiency)，可稱為一高效率、高功率的二極體端面激發式固態雷射。

近年來，有研究者利用擴散粘接式晶體(diffusion bonded crystal)來提高「破裂限制激發功率」，而得出更高的輸出功率。如Tsunekane 等人在IEEE J. Select. Topics Quantum Electron. vol. 3, 9 (1997) 報導了擴散粘接式 $Nd:YVO_4$晶體的特性，他們將濃度1.1%的$Nd:YVO_4$與沒有摻入釹離子濃度之YVO_4利用擴散粘接法接合。其結果顯示，濃度1.1%的擴散粘接式 $Nd:YVO_4$最高可耐約20瓦的激發功率，得出約 9瓦的1.06微米雷射輸出。但擴散粘接式 $Nd:YVO_4$晶體為了維持線偏極輸出，必須精確的對準兩個晶體的光軸，在製程上複雜且不容易，在成本的考量上也非最佳的方法。除了擴散粘接式晶體外，雙端面激

五、發明說明 (4)

發是經常被採用得出大於 10 瓦的方法，如 Nighan 等人在OSA Tech. Dig. Series, Washington DC, 17 (1995) 所發表的結果。然而，多端面激發的設計須要加入額外的元件，為了得出最佳的輸出，通常要精密的對準，在工業應用上有所限制。

由此可見，如何降低成本與製造的對準複雜度而得出高功率、高效率雷射，是目前設計二極體端面激發式固態雷射的重要需求。如何將釩酸類晶體這種強吸收性材料以單端面激發方式，得出大於 10 瓦的雷射輸出已成為重要的開發主題，而此項設計的主要障礙在於激發時所引起的熱破裂。

發明之簡要說明

鑑於目前技藝的困難點，本發明之目的係為設計一個用摻釹之釩酸類晶體所組裝的二極體端面激發式固態雷射。可產生高效率、高功率、以及線偏極化雷射輸出。

本發明之進一目的在於設計一個用摻釹之釩酸類晶體所組裝的二極體端面激發式固態雷射。可有效操作在Q開關模式，產生高效率、高功率、以及線偏極化脈沖雷射輸出。

本發明的這些目的是由一高效率、高功率的二極體端面激發式固態雷射系統所完成。此雷射系統包括一共振腔鏡片、一輸出耦合鏡所組成的共振腔。而有一摻釹之釩酸

五、發明說明 (5)

類晶體，放置在共振腔中。使用摻釹之釩酸類晶體的因素在於其有較高的增益截面、較低的臨界激發功率、較寬的吸收波帶等優點，而且可產生線偏極化輸出。

本發明的重要本體之一所用的雷射晶體為$Nd:YVO_4$，為了增加破裂限制激發功率，而得出更高的輸出功率，其釹離子濃度不高於0.5%。習知的$Nd:YVO_4$所摻入之釹離子濃度在0.5~3.0%之間，通常是1.0%。雖然本發明所用的是非習用的離子濃度，但可有高效率、高功率的雷射輸出。舉一實例，以釹離子濃度0.30%之$Nd:YVO_4$作為雷射晶體，其「破裂限制激發功率」可超過27瓦，而在27瓦的激發功率下，可得出16瓦以上的多模輸出，其中約有13瓦以上的TEMoo輸出。

圖式之簡要說明

為說明本發明之其他目的及優點，現以下列較佳實施例配合附圖之說明敘述如後，其中：

圖1：所示為$Nd:YVO_4$的「破裂限制激發功率」與其吸收係數之倒數的關聯性之實驗結果。

圖2：高功率二極體端面激發式固態雷射的說明圖，其中利用一低釹離子濃度的釩酸類晶體得出10瓦以上的輸出。

100…雷射二極體陣列　102…收光-聚光鏡組

101…光纖或光纖束　103…雷射晶體

104…共振腔鏡　105…輸出耦合鏡

106… Q開關

發明說明及專利說明

本發明是一種高功率、高效率的二極體端面激發式固態雷射，此雷射共振腔的組成有一共振腔鏡及一輸出耦合鏡，以及一低釹離子濃度的釩酸類晶體。本發明的雷射有下列特徵:單端端面激發時的輸出功率可大於10瓦、輸出效率在多模態時大於50%，在TEMoo時大於40%，所用的低釹離子濃度的釩酸類晶體，例如$Nd:YVO_4$，在0.1~0.49%之間，主要在0.2~0.4%。

Tidwell等人在IEEE J. Quantum Electron., vol. 28, 997 (1992)，以及Cousins在 IEEE J. Quantum Electron., vol. 28, 1057 (1992) 已報導建立一設計模式分析二極體激發式Nd:YAG雷射在熱破裂限制下的功率輸出極限。然而，在這些研究文獻中並未考量吸收係數對「破裂限制激發功率」的影響。實驗與理論分析顯示，「破裂限制激發功率」與吸收係數成反比。而吸收係數是正比於摻入晶體的離子濃度。因此降低釩酸類晶體的釹離子濃度，可提高「破裂限制激發功率」。由於釩酸類晶體的吸收截面很大，所以對釩酸類晶體而言，有很大的範圍可以降低摻釹的濃度，而有比Nd:YAG高的吸收係數及輸出效率。

根據一般的邊緣冷卻情況，利用平面應力近似法

五、發明說明 (7)

(plane stress approximation)，我們可以推導出一般化的解析公式。此近似法的誤差已證明在10%以內。利用平面應力近似法考量一般端面激發的情況，「破裂限制激發功率」$P_{abs,lim}$與晶體吸收係數α[1]的關係可表成

$$P_{abs,lim} = 4\pi R/(\alpha\xi) \quad (1)$$

其中ξ[TM]是熱負載比例(fractional thermal loading)，而且

$$R = (K_c \sigma_{max})/(\alpha_T E) \quad (2)$$

是所謂的「熱衝擊參數」(thermal shock parameter)。由式(2)可知「熱衝擊參數」與晶體材質的機械與熱性質有關，其中σ_{max}是發生熱破裂時的最大應力(maximum stress)，K_c是熱傳係數(thermal conductivity)，E是楊氏模數(Young's modulus)，α_T是熱膨脹係數(coefficient of thermal expansion)。由式(1)可看出「熱衝擊參數」愈大的晶體，可以有愈高的「破裂限制激發功率」。然而對一特定的晶體而言，「熱衝擊參數」是晶體的基本特質，無法改變。另一方面，「破裂限制激發功率」與吸收係數成反比。而吸收係數是正比於摻入晶體的離子濃度。因此降低釩酸類晶體的釹離子濃度，可提高「破裂限制激發功率」。

一般而言，雷射晶體對激發波長的吸收係數，$\alpha\beta$，與摻入的離子濃度之間的關係式可表為$\alpha=CN_d$，其中C為一比例常數，正比於吸收截面(absorption cross section)，而N_d是摻入的離子濃度，其單位為atomic %。

五、發明說明 (8)

以$Nd:YVO_4$而言，其C值約為20~25 cm^{-1}。而Nd:YAG的C值約為4~5 cm^{-1}。比較之下，任何雷射晶體滿足C≧20 cm^{-1}，可稱為強吸收性材料(strong absorption materials)。釩酸類晶體材料通常屬於強吸收性材料。要降低強吸收性材料的吸收係數就必須降低摻入離子的濃度。

圖1為由雷射二極體端面激發$Nd:YVO_4$晶體之實驗所得出的「破裂限制激發功率」$P_{abs,lim}$與吸收係數之倒數α^{-1}的關聯性。如上述之理論分析結果，「破裂限制激發功率」與吸收係數之間有反比的趨勢。在一般的雷射二極體端面激發式固態雷射系統，輸入的激發功率必須大於20瓦左右，才能產生10瓦以上的雷射輸出。由圖1可知，對$Nd:YVO_4$晶體而言，晶體的吸收係數必須小於10 cm^{-1}才能耐20瓦以上的激發功率。換言之，$Nd:YVO_4$晶體的離子濃度不能超過0.5 at.%，因此一般常用的1.0 at.% $Nd:YVO_4$晶體無法得出10瓦的雷射輸出。本發明所用的低釹離子濃度的釩酸類晶體，例如$Nd:YVO_4$，釹離子濃度在0.1~0.49%之間，主要在0.2~0.4%。

圖2為本發明之一實施例。參閱圖2，高功率二極體激發式固態雷射的組成有：一個雷射二極體陣列100，經光纖101耦合輸出，由收光-聚光鏡組102將激發光束匯聚至低釹離子濃度的釩酸類晶體103。合適的雷射晶體103包括(但不限定) $Nd:YVO_4$和 $Nd:GVO_4$。雷射晶體的吸收係數在2~10 cm^{-1}之間，主要約5 cm^{-1}。一較佳晶體103是低釹離子

五、發明說明 (9)

濃度的 $Nd:YVO_4$，釹離子濃度在 0.1~0.49% 之間，主要在0.2~0.4%。雷射晶體的兩端面鍍上基頻光的抗反射膜。雷射晶體外圍包上銦箔，且安裝在銅座上，溫度可操作在15~35℃之間。本發明的雷射系統對此溫度範圍影響不大。

共振腔的鏡104是一凹面鏡，在入光面上針對雷射二極體100放射的激發波長鍍有抗反射膜。並在第二面鍍基頻光波長的高反射膜和雷射二極體激發波長的增透膜。鏡104的較佳曲率半徑是1m。在共振腔的鏡104與輸出耦合鏡105之間的長度是可調整的，資以避免因晶體的熱透鏡效應所造成的不穩定。輸出耦合鏡105鍍有基頻光高部份穿透膜做為輸出。為了得出穩定的單模雷射，一適合的共振腔長度範圍大約在2~10cm，在實施例中大約是5cm。共振腔另外還包含了一Q開關106。

例如，用一最大輸出功率為30瓦的光纖耦合雷射二極體，激發濃度0.3at.% 的$Nd:YVO_4$雷射晶體。$Nd:YVO_4$的兩端面鍍上1064nm的抗反射膜。以0.5倍率及84%的光學耦合鏡組將激發光束匯聚到$Nd:YVO_4$上。雷射晶體外圍包上銦箔，且安裝在銅座上。溫度保持在20℃左右。輸出耦合鏡的反射率為90%。實驗結果顯示，30瓦的激發功率有16瓦的雷射輸出，此輸出功率約為1.0 at.% 的$Nd:YVO_4$晶體之最大輸出功率的2.3倍。文獻顯示，16瓦的雷射輸出為目前單端激發$Nd:YVO_4$晶體的最高記錄。

熟習於本技藝之人士得任施匠思而為諸般修飾，然皆

五、發明說明 (10)

不脫如附申請專利範圍所欲保護者。



四、中文發明摘要 （發明之名稱：高功率二極體激發式固態雷射及其製造方法）

一種高功率二極體激發式固態雷射，其中主要技能是利用低釹離子濃度的釩酸類晶體(neodymium-doped vanadium-based crystals)所組成的雷射。低釹離子濃度的釩酸類晶體有較高的破裂限制激發功率(fracture-limited pump power)，可實現高功率雷射光的運轉。本激發式固態雷射之組成元件有具一共振腔鏡和一輸出耦合鏡之一雷射共振腔，一雷射晶體，一雷射二極體做為激發光源，提供一激發光束至雷射晶體，以及一光學耦合鏡組，將激發光束匯聚至雷射晶體，並選擇適當的共振腔長度，以避免因晶體的熱透鏡效應所造成的不穩定。本發明亦提供製造此種雷射之方法。

英文發明摘要 （發明之名稱：）

六、申請專利範圍

1．一種製造高功率二極體激發式固態雷射之方法包括以下步驟：

提供具一共振腔鏡和一輸出耦合鏡之一雷射共振腔；

以一低釹離子濃度摻雜釩酸類晶體(neodymium-doped vanadium-based crystals)而形成一雷射晶體；

以一雷射二極體做為激發光源，而提供一激發光束至該雷射晶體；以及

提供一光學耦合鏡組，以將激發光束匯聚至該雷射晶體。

2．如申請專利範圍第1項所述高功率二極體激發式固態雷射之方法，其中該雷射係端面激發式。

3．如申請專利範圍第1項所述之高功率二極體激發式固態雷射之方法，其中該共振腔之長度係可調整。

4．如申請專利範圍第1項所述之高功率二極體激發式固態雷射之方法，其中雷射晶體與該共振腔鏡之距離為0.5~2.0 mm。

5．如申請專利範圍第1項所述之高功率二極體激發式固態雷射之方法，其中該雷射晶體是Nd:YVO4。

6．如申請專利範圍第5項所述之高功率二極體激發式固態雷射之方法，其中釹離子濃度約在0.1~0.49%。

7．如申請專利範圍第6項所述之高功率二極體激發式固態雷射之方法，其中釹離子濃度約在0.2%~0.4%。

8．如申請專利範圍第7項所述之高功率二極體激發式固態雷射之方法，其中釹離子濃度為0.3%。

六、申請專利範圍

9．一種高功率二極體激發式固態雷射包括：

一雷射共振腔，具一共振腔鏡和一輸出耦合鏡；

一低釹離子濃度的釩酸類晶體(neodymium-doped vanadium-based crystals)所組成的雷射晶體，置於該雷射共振腔內；

一雷射二極體做為激發光源，提供一激發光束至該雷射晶體；以及

一光學耦合鏡組，將激發光束匯聚至該雷射晶體。

10．如申請專利範圍第9項所述之高功率二極體激發式固態雷射，其中該雷射係端面激發式。

11．如申請專利範圍第9項所述之高功率二極體激發式固態雷射，其中該共振腔之長度係可調整。

12．如申請專利範圍第9項所述之高功率二極體激發式固態雷射，其中該共振腔長度為2~10 cm。

13．如申請專利範圍第12項所述之高功率二極體激發式固態雷射，其中共振腔鏡的長度約5 cm。

14．如申請專利範圍第9項所述之高功率二極體激發式固態雷射，其中雷射晶體與該共振腔鏡之距離為0.5~2.0 mm。

15．如申請專利範圍第9項所述之高功率二極體激發式固態雷射，其中該雷射晶體是$Nd:YVO_4$。

16．如申請專利範圍第15項所述之~~雷射晶體~~高功率二極體激發式固態雷射，其釹離子濃度約在0.1~0.49%。

17．如申請專利範圍第16項所述之高功率二極體激發

六、申請專利範圍

式固態雷射，其中釹離子濃度約在0.2%至0.4%。

18．如申請專利範圍第17項所述之高功率二極體激發式固態雷射，其中釹離子濃度為0.3%。

19．如申請專利範圍第9項所述之高功率二極體激發式固態雷射，其中該共振腔鏡的曲率半徑是1m的凹面鏡。

20．如申請專利範圍第9項所述之高功率二極體激發式固態雷射，其中該二極體激發光源是一個條狀二極體(diode bar)。

21．如申請專利範圍第9項所述之高功率二極體激發式固態雷射，其中該二極體激發光源是一組條狀二極體(diode bars)。

22．如申請專利範圍第9項所述之高功率二極體激發式固態雷射，其中該二極體激發光源是光纖耦合，可包括數條光纖。

23．如申請專利範圍第9項所述之高功率二極體激發式固態雷射，其中該二極體激發光源是光纖耦合，可包括數條光纖束(fiber bundle)。

24．如申請專利範圍第9項所述之高功率二極體激發式固態雷射，其輸出功率為7瓦以上。

25．如申請專利範圍第9項所述之高功率二極體激發式固態雷射，其輸出功率為10瓦以上。

26．如申請專利範圍第9項所述之高功率二極體激發式~~腔內倍頻綠光~~雷射，其中該共振腔內包括一Q開關。

27．如申請專利範圍第9項所述之高功率二極體激發式

陳述意見書用紙 清法律事務所 校正章

六、申請專利範圍

固態雷射，其輸出斜效率大於40%。

圖式

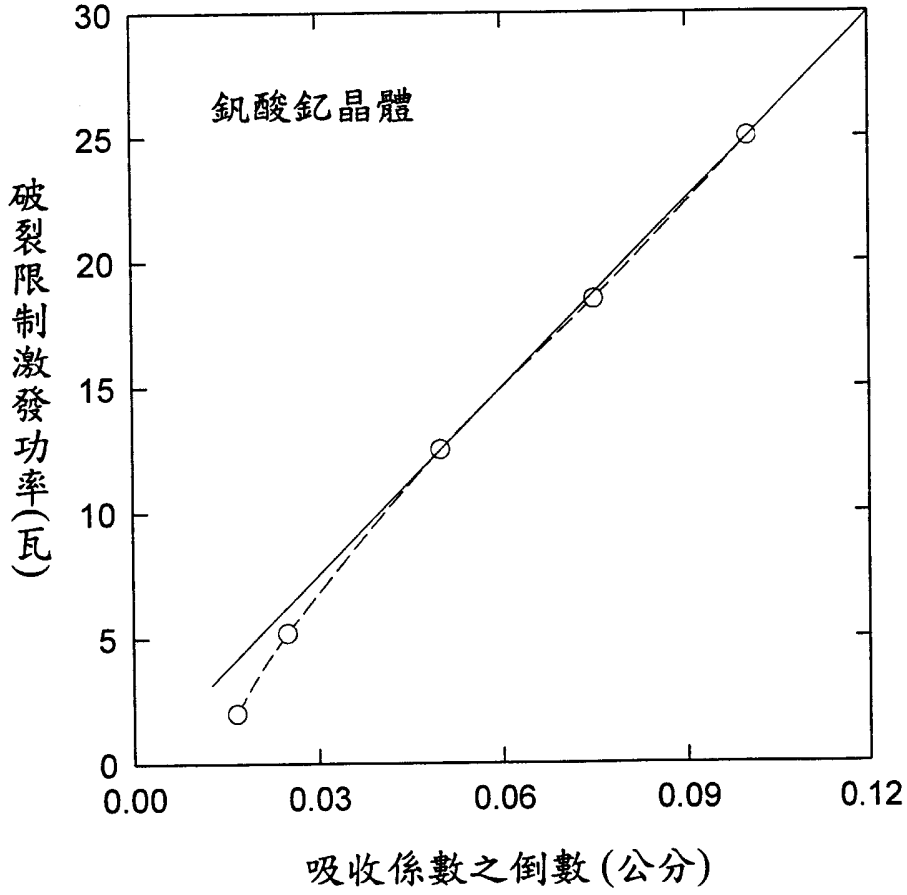

30
25
20
15
10
5
0
0.00
0.03
0.06
0.09
0.12
釩酸釔晶體
破裂限制激發功率(瓦)
吸收係數之倒數(公分)

圖1

圖式

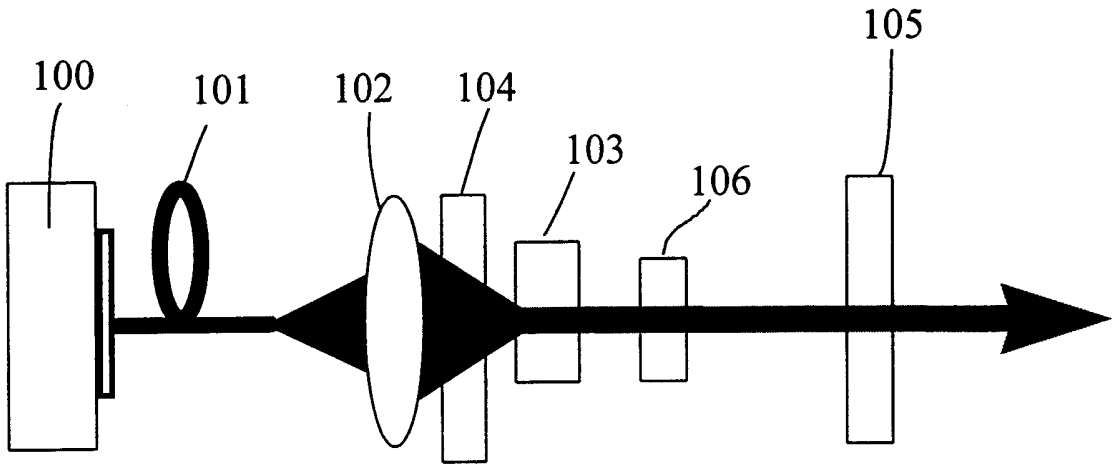


圖2