

激光二极管泵浦 Yb:YAG 激光器特性的研究

张立文 高明义 郑 义

(郑州大学河南省激光应用技术重点实验室, 郑州 450052)

提要 本文从 Yb:YAG 的晶体光谱特性出发,系统地介绍了 Yb:YAG 激光器的运转特性。着重阐述了自吸收效应、空间烧孔效应对激光器输出特性的影响,以及 Yb:YAG 激光器可调谐特性和自调 Q 特性。

关键词 Yb:YAG 激光器 自吸收 空间烧孔 可调谐

Study on Performance of Diode - Pumped Yb:YAG laser

Zhang Liwen Gao Mingyi Zheng Yi

(Henan Key Laboratory of laser Technology And Application, Zhengzhou University, 450052)

Abstract The laser performances of Diode - Pumped Yb:YAG laser are introduced systematically in this paper, basing on the crystal spectral properties. It also expounds the influence on properties of the laser output by the effect of self - absorption and the effect of spatial hole burning, the tunability of Yb:YAG laser and self - Q switched properties.

Key words Yb:YAG laser self - absorption spatial hole burning tunability

随着激光二极管(LD)的发展,用 LD 代替传统的闪光灯和离子激光泵浦已成为固体激光器发展的主要趋势,这将有利于固体激光器向高效、高功率、微型化、集成化方向发展。在二十世纪八十年代末九十年代初,泵浦波长在 $0.9 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 的 InGaAs 激光二极管的出现^[1],大功率的 LD 阵列已成为稳定的泵浦源,而适应这一波段的掺 Yb^{3+} 激光材料开始引起人们极大的研究兴趣^[2-7]。与 Nd^{3+} 相比, Yb^{3+} 离子能级结构简单 ($2F_{7/2} - 2F_{5/2}$),荧光寿命长(约是 Nd^{3+} 同种材料的三倍),量子效率高(约 90%),而更适合于 LD 泵浦。在掺 Yb^{3+} 激光材料中,由于 Yb:YAG 晶体具有大的晶场分裂能,宽的吸收带宽,在相对较高的掺杂浓度下也不会出现浓度淬灭现象,热承载小等优良特点,而成为激光二极管泵浦固体激光器增益介质研究的主要方向之一。目前,国内外对 Yb:YAG 固体激光器已进行广泛的研究。双端泵浦全固态 Yb:YAG 激光器已获得千瓦级激光输出^[3]。飞秒(fs)级激光脉冲也从 LD 泵浦 Yb:YAG 晶体中获得^[4,7,8]。同时,波长连续可调谐的 Yb:YAG 激光器国内外已有报道,天津大学报道的全固化可调谐 Yb:YAG 激光器最大调谐范围在 $1030.5\text{nm} \sim 1055.5\text{nm}$ ^[5];Brauch 等^[6]用 LD 泵浦 Yb:YAG 晶体,在 $1018\text{nm} \sim 1053\text{nm}$ 波长范围内已获得调谐宽度达 35nm 的连续可调谐激光输

出。随着高功率激光二极管的发展, Yb:YAG 晶体在全固态 Yb:YAG 激光器中将显示重要地位。

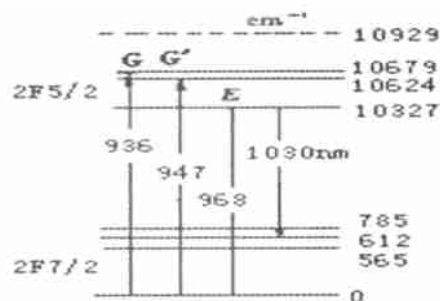


fig. 1 Stark level energies of Yb^{3+} in Yb:YAG

Yb:YAG 晶体的光谱特性

图 1 为 Yb:YAG 中 Yb^{3+} 离子能级结构^[9]。 Yb^{3+} 作为能级结构最简单的激活离子,电子构型为 $4f^{13}$,仅有一个基态 $2F_{7/2}$ 和一个激发态 $2F_{5/2}$,两者的能量间隔约为 10000cm^{-1} ,远大于在 YAG 中的禁带宽度 ($\sim 40000\text{cm}^{-1}$),在激光上能级之上不存在更高的激发态能级。YAG 基质中强的晶场作用导致了 Yb^{3+} 离子的斯托克能级分裂,基态和激发态分别分裂为四个和三个能级,形成准三能级的激光运行机制。激光过程发生在激发态 $2F_{5/2}$ 最低的子能级 10327cm^{-1} 和基态 $2F_{7/2}$ 的第三子能级 612cm^{-1} 能级之间,激光中心波长为 1030nm 。由于泵浦能级

靠近激光上能级,可极大地降低掺杂材料中的热负荷,Yb:YAG的热效应比同基质材料的掺Nd³⁺的Nd:YAG小三倍,除此之外,由于Yb³⁺独特的能级结构,Yb:YAG与Nd:YAG相比其他激光光谱参数也有很多不同,如表1^[8]。

图2为Yb:YAG晶体的光谱特性^[10]。从图2(a)Yb:YAG晶体的吸收光谱中可以看出Yb:YAG的主吸收峰有两个,中心波长分别位于938nm和970nm处,大的峰值吸收截面能够高效吸收泵浦能量,有利于实现激光二极管泵浦,其中938nm的波

表1 Yb:YAG和Nd:YAG相关激光光谱参数

Laser material	Yb:YAG		Nd:YAG
Laser wavelength /μm	1.03	1.05	1.064
Emission bandwidth λ/nm	6.3	5.6	0.6
Emission cross section/ ×10 ⁻²⁰ cm ²	2.1	0.31	33
Absorption cross section / ×10 ⁻²⁰ cm ²	0.1	0.01	0
Gain saturation fluence Fsat.L/J/ cm ²	8.8	30	0.57
Fluorescence lifetime τ/ ms	0.95	0.95	0.23
Absorption cross section / ×10 ⁻²⁰ cm ²	0.75	0.75	8.6
Emission cross section / ×10 ⁻²⁰ cm ²	0.07	0.07	- - -
Pump saturation intensity I sat. P/ kw/ cm ²	27	27	9
Transparency intensity I _{p.trans} / kw/ cm ²	1.4	1.0	0
Doping density Ntot for 1 %R ³⁺ / ×10 ²⁰ cm ⁻³	1.38	1.38	1.38

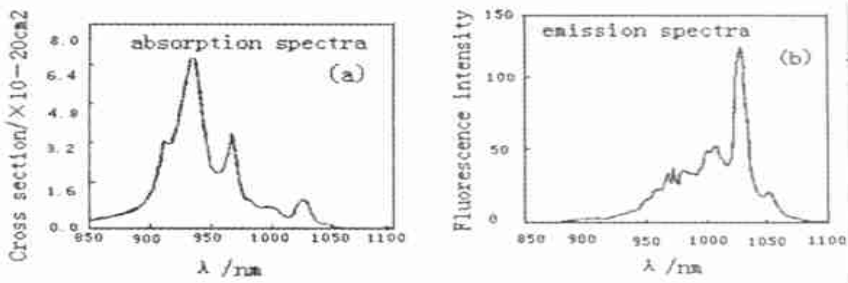


fig.2 Spectral properties of Yb:YAG

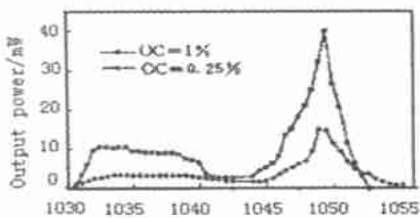


fig.3 Tuning rang of Yb:YAG laser

长非常适合于激光二极管泵浦,并且由于该波长处的吸收带宽高达18nm,使得激光二极管不需要复杂的温控系统。图3(b)所示为Yb:YAG荧光光谱,发射谱中心波长位于1030nm处,该处的发射谱带也

很宽,可在较长的波长范围内调谐。其上能级荧光寿命较长,约为1.30ms。Yb:YAG晶体宽的吸收光谱和大的吸收截面,能充分吸收泵浦光,提高泵浦光的转换效率;以及宽的荧光光谱也使Yb:YAG激光器的实用化及宽调谐范围和锁模脉冲的形成成为可能。

比较图2(a)和(b)还发现,吸收谱和发射谱在1030nm波长附近有较大的重叠,将存在着较严重的自吸收效应;这种自吸收效应也会严重地影响激光输出,这在后面将会谈到。

Yb:YAG的激光特性

1. 自吸收效应及其影响

虽然 Yb^{3+} 离子的电子构型十分简单,为准三能级的激光运行机制,在理论上不存在激发态吸收和上转换。但从图 2 中 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 晶体的吸收光谱和荧光光谱对比可以看出,吸收峰和荧光发射峰相对较为靠近。 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 晶体的吸收谱范围为从 900nm ~ 1030nm;发射谱范围 980nm ~ 1060nm,并且中心波长在 1030nm 处,与吸收谱在 1030nm 波长处有很大的相互重叠,因此,存在着严重的自吸收效应。所谓自吸收效应就是激发态发射的光子可以被基态离子所吸收;这种自吸收过程将消耗激发光,又称为荧光捕获效应^[9]。自吸收效应的存在将会使激光振荡阈值发生变化,影响激光的输出。虽然在 1030nm 波长处发射最强,但其自吸收效应也很强,导致该波长处净增益反而降低,难于获得激光输出;而在 1050nm 波长附近,虽然发射强度低,增益低,但是其自吸收效应也很弱,反而更易获得激光输出。在 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 激光器调谐实验过程中,已观察到自吸收效应的影响^[5]。在该实验中发现 1034nm 至 1049nm 的波长范围内存在着严重的模式竞争,在不加光阑,只调节光路时,运转波长从 1034nm 直接跳变至 1049nm 或二者同时存在的状态,只有加入光阑限制其中一个波长的振荡,才能得到连续的调谐。这种现象就是由于自吸收效应引起,同样可以从 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 晶体的吸收和发射谱曲线得到解释。从图 2(a)、(b) 可以看出,虽然 1034nm 波长处的增益比 1049nm 处大得多,但 1034nm 处的自吸收也比后者大得多。在激光器运转于 1034nm 波长处时由于存在较强的自吸收,最终导致两个波长的净增益十分接近,只有加入光阑限制其中一个模式的增益,另一个模式才能稳定运转。

2. 空间烧孔效应的影响

在研究激光二极管泵浦高功率脉冲激光器中,由于 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 晶体具有良好的热学性质,宽的吸收带宽和增益带宽等独特的优点而引起人们的极大研究兴趣,目前,激光二极管泵浦 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 微片已经获得飞秒(fs)级激光脉冲^[4,7,8]。早在 1999 年就已报道^[8]用半导体可饱和吸收镜(SESAM)被动锁模 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 晶体获得了最小脉宽为 340fs 的激光脉冲,但此时输出功率较低。后来 J. Auseder 等^[4]人再次采用 SESAM 插入光路,同时减小 SESAM 调制深度($\approx 0.5\%$),设计低重复率谐振腔(34.6MHz),用激光二极管泵浦被动锁模 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 微

片,获得了高功率的 fs 级脉冲激光输出;其最大平均输出功率高达 16.02W,是目前 fs 级激光脉冲最大的平均输出功率,其峰值功率高达 560KW,脉冲宽度为 730fs。虽然这种方式脉冲功率很高,但是也只能得到有限脉宽的脉冲,无法得到范围更宽的脉冲,这主要是由于 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 微片中存在不可避免的空间烧孔效应对脉冲产生的限制。对固体工作物质而言^[11],激活离子被束缚在晶格上,借助粒子和晶格的能量交换完成激发态的空间转移,激发态在空间转移半个波长所需的时间远远大于激光形成所需的时间,所以空间烧孔不能完全消除。这种情况在 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 晶体中尤为严重,每次产生脉冲时,由于空间烧孔效应,在饱和增益曲线中心出现凹陷,脉冲中断。只有减小空间烧孔效应的影响,才能获得范围更宽的激光脉冲。减小空间烧孔就要减少增益介质中的驻波模式。J. Auseder 等^[7]在上述实验的基础上进一步改进,在光路中插入标准具,并且把泵浦光束以两个不同角度泵浦 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 微片,通过适当调节这两个角度,可大大减少腔内驻波模式,降低空间烧孔效应的影响,获得了脉冲宽度可调谐的高功率激光脉冲,脉冲宽度调谐范围为 3.3ps ~ 89ps,平均输出功率在 12W 左右。如果不加入标准具,仅以泵浦光束以两个不同角度泵浦 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 微片,也能获得可调谐的激光脉冲,其脉冲宽度范围为 0.83ps ~ 1.57ps。这样激光脉冲的宽度能够在很大的范围内变化,这种窄线宽长脉冲的产生以及脉冲宽度大范围的可调谐性使 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 激光器能满足不同的需要。

3. 可调谐特性

由图 2(b) $\text{Yb}:\text{YAG}$ 晶体发射光谱可以看出,在 980nm ~ 1060nm 波长间, Yb^{3+} 离子均有发射峰,因此可在较长的波长范围内调谐。目前,国内外已有不少关于可调谐 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 激光器的报道^[5,6]。U. Brauch 等人用 LD 泵浦 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 晶体微片,对其输出波长的可调谐性进行深入研究,在不同的温度下获得了不同调谐范围的连续输出,得到最大调谐宽度达 35nm,调谐范围在 1018nm ~ 1053nm 之间。天津大学对全固化 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 激光器可调谐特性的研究,在一定波长范围内得到连续的可调谐输出,其最大调谐范围为 1030.5nm ~ 1055.5nm^[5]。并给出了在不同输出耦合(耦合分别为 1%和 0.25%)条件下 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 激光器调谐曲线,如图 3 所示^[5]。

(下转第 188 页)

程度依次分别为肾>肝>心>胃>舌。激光对组织损伤与水份多少(脱水比)无明显关系。其凝固坏死层损伤也大致相似。在实行治疗时,可以采用连续辐射也可用脉冲辐射,但对组织的气化、炭化程度不一样。可能几个组织的脱水比(即组织含水量)差距较小有关,但不提示对膀胱子宫等需要冲水循环组织采用 CO₂ 激光进行内腔治疗的可能性。

参考文献

[1]Gal Nov, Kalzir Abraham, et al, Optical fibers for medical

Applications, IEEE. J Quantum Electionics, 1987, 23 (10), 1827

[2] 高建平等, 关节式导光臂用卤化银光纤 CO₂ 激光手术刀头的研制, 中国激光医学杂志, 2002, 11(4), 237

[3] 蔡慧敏等, 卤化银 CO₂ 激光光纤手术刀对皮肤和骨损伤的实验的研究, 应用激光, 2001, 21(2), 21

[4] 蔡慧敏等, 卤化银 CO₂ 激光光纤临床应用研究(附 128 例分析), 中国激光医学杂志, 2000, 9(3), 192

[5] 秦家楠, 激光医学, 北京科技出版社, 1988, 60

(上接第 172 页)

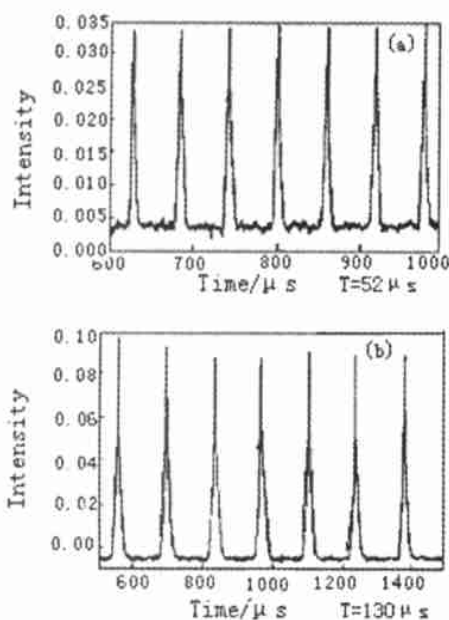


fig. 4 Self Q - switched pulse train of Yb:YAG laser

4. 自调 Q 特性

在激光二极管泵浦的 Yb:YAG 激光器进行 CW 运转的实验研究中,观察到了 CW 自调 Q 现象^[5]。分析其产生的原因是 Yb:YAG 晶体由于具有较长的上能级粒子寿命(1.3ms 左右),较容易出现自调 Q 现象。但这种自调 Q 现象在激光器处于 CW 输出功率最高的状态时,不会出现;只有当激光器略微失谐时(例如,稍稍调偏激光器中的一个端镜时)才会出现自调 Q 现象。当激光器处于自调 Q 状态时,其输出的平均功率比其在出现自调 Q 现象之

前的相应的输出平均功率要高出三分之一左右,这是因为激光器在自调 Q 脉冲状态下其峰值功率比连续光状态高得多,在增益介质内形成一定的自聚焦效应,使得腔内激光束腰收缩,更接近增益光束的中心,相当于增强了抽运。图 4 是实验中观察到的两种不同的自调 Q 状态对应的脉冲序列^[5]。由图可知在不同状态下自调 Q 脉冲序列的重复频率不同,而且在同一自调 Q 状态下,脉冲序列的重复频率也是在小范围内不断变化的;其主要原因是激光器的损耗的改变。

参考文献

[1]R. M. Kbas, N. G. Anderson et al. . IEEE J. Quant. Electron. ,1988, QE - 24(8) :1605

[2] P. Lacovara, H. K. Chai et al. . Opt. Lett. , 1991, 16 (14) :1089

[3] E. C. Honea, R. J. Beach et al. . Opt. Lett. , 2000, 25(11) :805

[4]J. Aus der Au, G. J. Spühler et al. . Opt. Lett. , 2000, 25(11) :859

[5]张丽哲,戴建明等,中国激光,2001,28(10) :873

[6]A. Gesen, M. Karszewski et al. . Opt. Lett. , 1991, 20 (7) :713

[7]F. Brunner, R. Paschotta et al. . Opt. Lett. , 2001, 26 (6) :379

[8]C. H?nninger, R. J. Beach et al. . Appl. Phys. , 1999, B69 :3

[9]D. S. Sumida, T. Y. Fan et al. . Opt. Lett. , 1991, 19(17) :1343

[10]杨培志,邓佩珍等,光学学报,1999,19(1) :133

[11]周炳琨,《激光原理》,国防工业出版社,北京,2000 : 171