

基于无水乙醇冷却的 Yb:YAG 片状晶体激光放大特性研究

张振华 程小劲 王建磊 李 磊 杨中国 施翔春 陈卫标

(中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800)

摘要 采用无水乙醇低温冷却 Yb:YAG 片状放大器结构,验证温度对准三能级结构 Yb:YAG 晶体自吸收的影响。详细研究了放大器在不同条件下的放大性能。在光抽运能量为 2.17 J 时,单通双程的小信号增益在低温(213 K)下可达 3 倍;采用双通四程放大结构,小信号增益提高到 9 倍,获得了单脉冲能量 60 mJ 的信号光输出。

关键词 激光放大器; Yb:YAG 晶体; 无水乙醇低温冷却; 双通放大器

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0702013

Amplification Characteristic of Low Temperature Yb:YAG Crystal Disc Cooled by Alcohol

Zhang Zhenhua Cheng Xiaojin Wang Jianlei Li Lei Yang Zhongguo
Shi Xiangchun Chen Weibiao

(Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract We describe a low temperature Yb:YAG crystal disc laser amplifier cooled by alcohol and studied detailed the re-absorption of Yb:YAG crystal at different temperatures. The amplifier's characteristic has a decided change with different temperatures. For double-pass amplifier, the small signal gain of 3 is obtained at the temperature of 213 K when the pump energy is 2.17 J. For four-pass amplifier, the output energy of 60 mJ per pulse is obtained, corresponding to a small signal gain of 9.

Key words laser amplifier; Yb:YAG crystal; alcohol cooling; double-pass amplifier

OCIS codes 140.0140; 140.3280; 140.3580

1 引 言

激光二极管抽运的全固体激光器,具有结构紧凑、工作寿命长、光束质量好、效率高且稳定性好、可小型化和致密化等特点,因而成为激光器发展的主要方向之一。近年来,随着铟镓砷(InGaAs)激光二极管的成熟,准三能级结构 Yb:YAG 激光晶体倍受激光科研人员的关注。Yb:YAG 晶体与传统的激光增益介质相比有几个明显的优势^[1]:1) Yb³⁺ 离子仅有两个电子态,基态²F_{7/2}和激发态²F_{5/2},在配位场作用下产生 Stark 分裂后,形成准三或准四能级的激

光运行结构;2) Yb³⁺ 离子吸收带在 900~1000 nm 波长范围,能与 InGaAs 半导体抽运源有效耦合,且吸收带较宽,对半导体器件温度控制的要求降低;3) 荧光寿命长,为 0.95 ms,是 Nd³⁺ 的 3 倍多,更有利于有效储存能量;4) 原理上不存在激发态吸收和上转换,光-光转换效率高;可以实现高浓度掺杂,原理上不存在浓度猝灭;5) 抽运波长与激光输出波长接近,量子效率高,量子缺陷低,材料的热负荷较低,仅为掺 Nd³⁺ 同种基质材料的 1/3。

目前,基于 Yb 晶体的储能型激光器得到广泛

收稿日期: 2011-01-10; 收到修改稿日期: 2011-03-01

作者简介: 张振华(1986—),男,硕士研究生,主要从事全固态激光器方面的研究。E-mail: tdahua@126.com

导师简介: 施翔春(1969—),男,研究员,硕士生导师,主要从事全固态激光器方面的研究。

E-mail: shixc@siom.ac.cn(通信联系人)

研究和应用,Brusselbach 等^[2]利用 Yb:YAG 晶体产生了 2.65 kW 的连续激光输出,Rutherford 等^[3]设计利用 Yb:YAG 晶体板条放大获得了 100 kW 的连续激光输出的模型,M. Siebold 等^[4]利用 Yb:YAG 晶体在室温下获得了 566 mJ 的脉冲激光输出,光-光转换效率 20%。目前国内也有不少关于利用 Yb:YAG 晶体或者陶瓷做激光材料的报道^[5~8]。

但是作为一种高储能材料,Yb:YAG 晶体也有一些不足。由于是准三能级结构,常温下 Yb³⁺ 的自吸收太过严重,对信号光损耗太大,不利于激光的放大输出。且常温下 Yb³⁺ 对抽运能量通量要求较高,这对抽运源及抽运耦合系统提出了很高要求,对膜损伤阈值也提出了较高的要求。同时对于室温下大能量的 Yb³⁺ 放大器,为了减少热效应,一般做得比较薄,故为了更好地提取激光放大器储能,往往采用多通放大的方式,这在一定程度上增加了光学系统的复杂性,工程上更难实现。

而在低温下尤其是极低温(77 K)下,Yb:YAG 晶体物理和机械性能得到明显改善^[9~11],低温下 Yb³⁺ 为四能级结构,受激吸收截面和受激发射截面显著增大,对应抽运饱和能量通量和激光饱和能量通量显著降低,同时自吸收消失,在低抽运能量通量的条件下即可以实现很好的激光放大输出,同时晶体机械性能的改善更有利于减小热效应,在获得高能量脉冲输出的同时保证了较好的光束质量。但极低温下的 Yb:YAG 晶体也带来了新的问题:放大自发辐射(ASE)和寄生振荡过于严重。因为极低温下 Yb:YAG 晶体的小信号增益很高,ASE 会严重消耗晶体储能,降低系统效率。同时,过高的增益小信号增益极容易在晶体面之间或者某两个光学面之间形成寄生振荡,从而极大地消耗储能,难以得到理想的放大效果。ASE 和寄生振荡使得放大器失去定标放大能力,已经不适合进行定标放大。因而 Yb:YAG 晶体作为大能量储能型的激光放大器不太适合工作于极低温下。Hiroaki Furuse 等^[11]在液氮温度下利用 Yb:YAG 陶瓷获得了 273 W 的连续激光输出,光-光转换效率 65%,同时在 85 K 极低温下,激光器 ASE 现象极为严重,严重影响激光器放大输出能力。

因此,对于 Yb:YAG 材料要合适的工作温度,既能保证高效高光束质量激光输出,同时很好地抑制自吸收和 ASE 等。由于无水乙醇的凝固点比较低,在 150 K 左右,可以在很宽的温度范围内进行调节控制,同时无水乙醇冷却与液氮冷却相比,成本

低,无污染,使用方便,可循环利用,因而成为一种较为合理的冷却液。

本文基于 Yb:YAG 晶体的准三能级结构,采用无水乙醇低温冷却 Yb:YAG 片状激光放大器结构,对放大器放大特性进行了研究,理论分析和实验验证了无水乙醇冷却对晶体自吸收方面的改善作用,同时研究了放大器的单通双程和双通四程放大特性,为进一步设计大能量 Yb:YAG 片状放大器提供了很好的依据。

2 理论分析

Yb³⁺ 的能级图如图 1 所示,只有间距为 10000 cm⁻¹的²F_{7/2}基态和²F_{5/2}激发态,它的发射主峰为 1030 nm,吸收主峰为 940 nm。Yb³⁺ 在常温下是准三能级结构,极低温下各能级上粒子数布局发生变化,成为四能级结构。

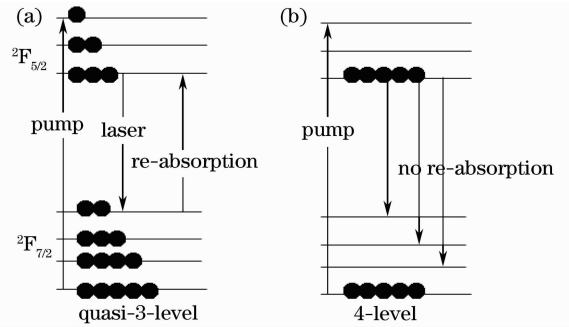


图 1 室温(a)和低温(b)下 Yb:YAG 晶体的能级结构及粒子数分布示意图

Fig.1 Level structure of Yb:YAG crystal at (a) room temperature and (b) low temperature

能级结构粒子数变化直接影响受激吸收截面和受激发射截面,进而影响饱和能量通量,从而对放大器的储能和能量提取都产生重要影响。对于放大器而言,放大器的储能可以表示为

$$E_{\text{store}} = g_0 F_{\text{sat}} V, \quad (1)$$

式中 g_0 为小信号增益系数, F_{sat} 为增益介质的饱和能量通量,是晶体受激发射截面的函数, V 为放大器的增益体积。

激光放大器的饱和增益 G 定义为

$$G = \exp(g_0 l_{\text{eff}}), \quad (2)$$

式中 l_{eff} 为信号光通过增益介质的有效光程,对于激光放大器而言,不仅要求高的储能密度,还要有高的能量提取效率。由 Franz-Nodvik 方程^[12]知

$$F_1 = \eta_{\text{overlap}} F_{\text{sat}} \ln \{ 1 + [\exp(F_{\text{in}}/F_{\text{sat}}) - 1] \exp(g_0 l_{\text{eff}}) \}, \quad (3)$$

式中 F_1 为输出能量密度, F_{in} 为输入能量密度, η_{overlap}

为光束模式耦合效率因子。放大器的效率定义为

$$\eta_1 = \eta_{\text{overlap}} \frac{F_1 - F_{\text{in}}}{F_{\text{sat}} g_0 l_{\text{eff}}} \quad (4)$$

在双程放大器内的输出能量密度 F_2 可表示为

$$F_2 = \eta_{\text{overlap}} F_{\text{sat}} \ln\{1 + [\exp(F_1/F_{\text{sat}}) - 1] \exp(g'_0 l_{\text{eff}})\} \quad (5)$$

式中 $g'_0 = (1 - \eta')g_0$ 。返程中的输入能量是由(5)式计算出的输出能量,返程中的增益变小了,因为在第一个光程中,已经从增益介质中提取了能量,其双程放大器的提取效率为

$$\eta_2 = (F_2 - F_{\text{in}})/(F_{\text{sat}} g_0 l_{\text{eff}}) \quad (6)$$

由(1)式可知,晶体的饱和能量通量是晶体储能的关键参数,晶体饱和能量通量决定了晶体的储能能力。由(3)~(6)式可知,饱和能量通量是影响晶体输出能量通量和提取效率的关键因素,决定着晶体中储能的有效提取。

对于掺杂浓度为 N 的 Yb:YAG 晶体,假定在上下能级上的浓度分别为 N_1 和 N_2 ,满足 $N = N_1 + N_2$,在各能级的 Stark 分裂能级上的粒子数布局为 $N_i = f_a N_1, N_j = f_b N_2$,其中 f_a 和 f_b 是 Yb³⁺ 各能级结构上 Stark 分裂能级粒子数的 Boltzmann 占空比,是晶体温度的函数,满足关系式

$$f_a = \frac{g_a \exp[-E_a/(KT)]}{\sum_i g_i \exp[-E_i/(KT)]},$$

$$f_b = \frac{g_b \exp[-E_b/(KT)]}{\sum_j g_j \exp[-E_j/(KT)]} \quad (7)$$

式中 K 为 Boltzmann 常数, T 为晶体绝对温度, E_i 和 E_j 分别为下能级和上能级的子能级所对应的能量, g_i 和 g_j 分别为下能级和上能级的简并度。

能级结构粒子数变化直接影响受激吸收截面和受激发射截面,进而影响饱和能量通量。饱和能量通量是激光增益介质的一个基本参数,定义为^[13]

$$F_{\text{sat}} = \frac{h\nu_e}{\sigma_{\text{dyn}}^e} \quad (8)$$

式中 h 为普朗克常量, ν_e 为放大辐射的频率, σ_{dyn}^e 为增益介质的动态发射截面, $\sigma_{\text{dyn}}^e = \gamma\sigma_{\text{is}}^e$, 其中 σ_{is}^e 为测量所得的受激发射截面, $\gamma = 1 + f_a/f_b$ 。

由上面的理论可知,受激发射截面与温度关系密切。图 2^[14] 是不同掺杂浓度下 Yb:YAG 晶体受激发射截面与温度的关系。

3 实 验

图 3 是实验中采用的激光二极管抽运的片状

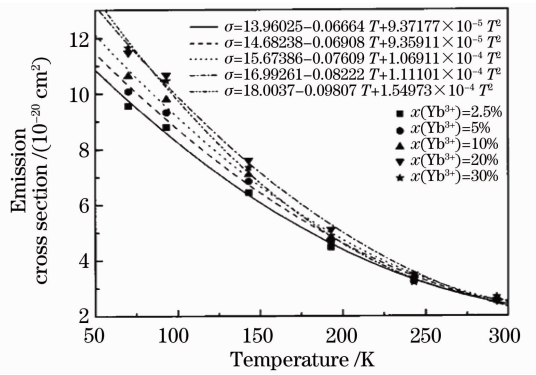


图 2 不同掺杂下 Yb³⁺ 受激发射截面与温度的关系

Fig. 2 Relationship of between stimulated emission cross section of Yb³⁺ and temperature at different dopings

Yb:YAG 晶体激光放大器结构示意图,放大器晶体采用端面冷却,无水乙醇(冷却液体)通过晶体背面直接通过晶体进行冷却,抽运源为 940 nm InGaAs 激光二极管阵列,通过两块正交的柱透镜把抽运光压缩成超高斯光斑,晶体冷却面镀 940 nm 高反膜以提高抽运效率。晶体的前表面镀有 940 nm 的 0° 增透膜和 1030 nm 的 20° 增透膜,晶体背面(冷却面)镀有 940 nm 和 1030 nm 高反膜,信号光波长 1030 nm,脉宽 10 ns,频率 10 Hz,脉冲能量 6.2 mJ,抽运光通过两块正交柱透镜的压缩,在晶体中心的光斑尺寸为 0.4 cm×0.6 cm,晶体处的抽运能量为 2.17 J。图 3 中的 λ/4 波片改变信号光偏振态,与偏振片配合从而实现偏振输出。

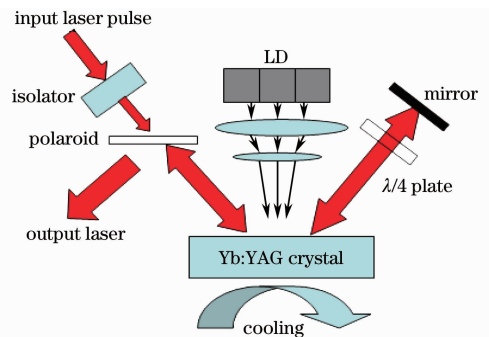


图 3 无水乙醇冷却的低温片状 Yb:YAG 晶体激光放大器结构图

Fig. 3 Structure of Yb:YAG crystal amplifier under low temperature cooling by alcohol

图 4 是模拟获得和实验测得的 Yb:YAG 晶体自吸收与晶体温度之间的关系,实线表示模拟得到的晶体自吸收值,点表示实验测到的晶体自吸收值。由图 4 可以看出,实验测得的结果与理论模拟的结果基本吻合。

图 4 中纵坐标是 Yb:YAG 晶体的自吸收效率,

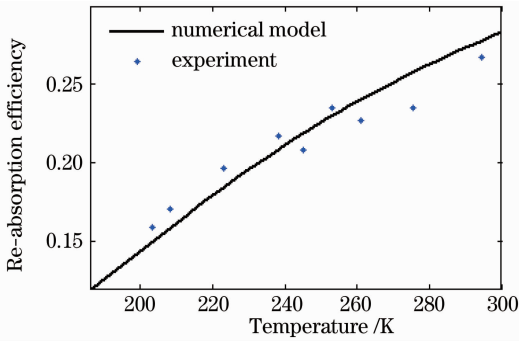


图 4 Yb:YAG 晶体自吸收与晶体温度的关系
Fig. 4 Relationship between the temperature and re-absorption of Yb:YAG crystal

其值为自吸收的能量与输入能量的比值。由图 4 可以看出, Yb:YAG 晶体自吸收在常温下非常严重, 可以达到 30%, 但是随着温度的降低, 自吸收明显改善, 到将近 200 K 时, 自吸收减小为约 15%。

常温下 Yb^{3+} 是三能级结构, 这种能级特性导致

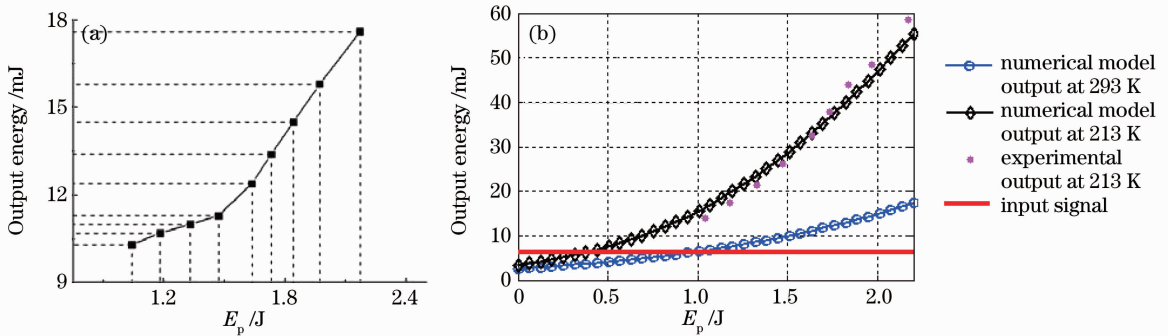


图 5 输出能量与抽运能量的关系。 $T=213\text{ K}$ (a), 单通双程放大, (b) 双通四程放大器的模拟与实验结果
Fig. 5 Relationship between output energy and input energy. $T=213\text{ K}$ (a), single-pass amplifier, (b) numerical and experimental results of the double-pass laser amplifier

如图 5(a) 所示, 温度为 213 K 时单晶体在单通双程放大的情况下, 若抽运能量为 2.17 J, 小信号增益大约为 3 倍。由图 5(b) 理论模拟可以看出, 低温 (213 K) 下 Yb:YAG 晶体的增益特性明显优于常温 (293 K)。实验中, 常温下单通双程且抽运能量为 2.17 J 的情况下, 输出能量约为 18 mJ, 在 213 K 时, 双通四程放大情况下, 当抽运能量为 2.17 J 时, 输出能量可达约 60 mJ, 放大倍数突破 9 倍, 实验测量值与理论模拟值非常吻合, 与单通双程时相比就有明显的能量提升。当抽运能量较小时, 由于 Yb:YAG 晶体的自吸收作用, 增益介质损耗大于增益, 输出能量小于输入能量, 抽运能量突破阈值后, 输出能量随抽运能量的增加快速增长, 定标放大能力较好。常温下, Yb:YAG 晶体的放大阈值明显大大高于低温时的情况, 抽运能量突破阈值后, 其放大增益

了其对 1030 nm 的光吸收较严重, 因此 Yb:YAG 晶体常温下做放大器增益介质对信号光的损耗太大, 再加上常温下 Yb^{3+} 的受激发射截面相对较小, 只有 $2.1 \times 10^{-21}\text{ cm}^2$, 因而其饱和能量通量很大, 在激光很强时, 对膜的压力就相对较大, 因而, 常温下大能量激光放大器使用 Yb:YAG 晶体并不能很好地发挥 Yb:YAG 晶体的优势。但是, 随着温度的降低, Yb:YAG 晶体的自吸收明显改善, 在温度达 200 K 时, 自吸收减小为 15%, Yb:YAG 晶体的一些特性很好地体现了出来, 自吸收大幅降低, 同时受激发射截面也增大, 大约为 $4.2 \times 10^{-21}\text{ cm}^2$, 小信号增益增大, 此时在放大器增益和放大自发辐射之间取得了较好的权衡。

图 5(a) 是放大器单通双程时实验获得的能量输出与抽运能量之间的关系, 图 5(b) 是放大器双通四程时实验获得的输出能量与抽运能量之间的关系以及理论与模拟值之间的对比。

也太小, 效率很低。实际上, 当晶体温度继续降低至液氮温度时, 晶体的小信号增益将会很大, 此时 ASE^[11, 15~18] 将会比较严重, 同时过高的增益系数极易引起寄生振荡, 极大地消耗反转粒子数, 降低放大器的效率。国外相关科研单位在 80 K 低温下对 Yb:YAG 晶体光学特性和 ASE 及寄生振荡研究较多, 能够充分体现这一点。文献 [11] 和文献 [15, 16] 阐述了 ASE 的相关问题, 在小信号增益比较大时, ASE 抑制起来非常困难, 文献 [17, 18] 在更低温度下对 Yb:YAG 晶体的放大性能进行了实验, 实验显示, 在温度太低 (80 K) 的情况下, 输出能量开始有明显下降。因此, 在较低温度 (213 K) 下的实验测量结果显示, 放大器性能优异, 光束质量较好, 定标放大能力也较好, 效率较高, 放大器可以安全高效地工作。

4 结 论

研究了 Yb:YAG 晶体的特性,通过无水乙醇冷却的方法,测得了 Yb:YAG 晶体自吸收与温度的关系,同时与晶体自吸收理论模拟值进行比较,二者吻合较好。利用双通四程提取放大,晶体温度为 213 K 时,2.17 J 的抽运能量获得了 9 倍的信号增益,输出单脉冲能量 60 mJ 的信号光,测量值与理论模拟值非常吻合,证明了理论计算模型的正确性。实验表明,213 K 的晶体温度很好地限制了由于储能较高小信号增益较大而引起的横向 ASE 和寄生振荡等问题,同时较低的温度也可降低对抽运功率密度和信号光功率密度的要求,降低了对晶体和窗口玻璃等光学件膜层抗损伤的要求,单通 3 倍双通 9 倍的小信号增益表明了 Yb:YAG 晶体在温度为 213 K 时,定标放大性能优越,为后续更大能量的 Yb:YAG 晶体激光放大器提供了理论依据和实验指导。

参 考 文 献

- 1 W. Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. Berlin: Springer, 1999
- 2 Hans Bruesselbach, David S. Sumida. A 2.65 kW Yb:YAG single-rod laser[J]. *IEEE J. QE.*, 2005, **11**(3): 600~603
- 3 T. S. Rutherford, W. M. Tulloch, E. K. Gustafson *et al.*. Edge-pumped quasi-three-level slab lasers: design and power scaling [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, **36**(2): 205~219
- 4 M. Siebold, M. Loeser, U. Schramm *et al.*. High-efficiency, room-temperature nanosecond Yb:YAG laser[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(22): 19887~19893
- 5 Wu Wuming, Wu Huiyun, Xu Xiaojun *et al.*. Cryogenically cooled high average power Yb:YAG laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(7): 071403
- 吴武明, 吴慧云, 许晓军 等. 低温冷却高平均功率 Yb:YAG 激光器[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(7): 071403
- 6 Zhou Binbin, Zou Yuwan, Li Dehua *et al.*. Experimental study of continuous-wave mode-locked picosecond Yb:LSO laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1806~1809

- 周斌斌, 邹育婉, 李德华 等. 连续锁模皮秒 Yb:LSO 激光实验研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1806~1809
- 7 Wang Jianlei, Shi Xiangchun, Zhu Xiaolei. Optimization design and modeling of high peak power Yb:YAG pulsed lasers with high efficiency [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2278~2283
- 王建磊, 施翔春, 朱小磊. 高效率高功率脉冲 Yb:YAG 片状激光器优化设计与模拟[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2278~2283
- 8 Duan Wentao, Jiang Xinying, Jiang Dongbin *et al.*. 10 Hz joule-class laser diode end-pumped V-shaped water-cooled Yb:YAG oscillator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 44~48
- 段文涛, 蒋新颖, 蒋东铤 等. 激光二极管端面抽运的焦耳级 10 Hz“V”型水冷 Yb:YAG 激光器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 44~48
- 9 Jeffrey G. Manni, John D. Hybl, D. Rand *et al.*. 100-W Q-switched cryogenically cooled Yb:YAG laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2010, **46**(1): 95~98
- 10 S. Toroghi, A. K. Jafari, A. H. Golpayegani *et al.*. A model of lasing action in a quasi-four-level thin active media[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2010, **46**(6): 871~876
- 11 Hiroaki Furuse, Junji Kawanaka, Kenji Takeshita *et al.*. Total-reflection active-mirror laser with cryogenic Yb:YAG ceramics [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(21): 3439~3441
- 12 L. M. Franz, J. S. Nodvik. Theory of pulse propagation in a laser amplifier[J]. *Appl. Phys.*, 1963, **34**: 2346~2349
- 13 H. W. Bruesselbach, D. S. Sumida, R. A. Reeder *et al.*. Low-heat high-power scaling using InGaAs-diode-pumped Yb:YAG lasers[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1997, **3**(1): 105~116
- 14 Jun Dong, Michael Bass, Yanli Mao *et al.*. Dependence of the Yb³⁺ emission cross section and lifetime on temperature and concentration in yttrium aluminum garnet[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2003, **20**(9): 1975~1979
- 15 Aldo Antognini, Karsten Schuhmann, F. D. Amavo *et al.*. Thin-disk Yb:YAG oscillator-amplifier laser, ASE, and effective Yb:YAG lifetime [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2009, **45**(8): 993~1005
- 16 Gunter Haug, Martin Munz, Gerd Mavowsky *et al.*. Amplified spontaneous emission (ASE) in laser oscillators and amplifiers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1983, **19**(6): 1149~1160
- 17 J. Kawanaka, Y. Takeuchi, A. Yoshida *et al.*. Highly efficient cryogenically-cooled Yb:YAG laser [J]. *Laser Phys.*, 2010, **20**(5): 1079~1084
- 18 Stuart Pearce, Ryo Yasuhara, Akira Yoshida *et al.*. Efficient generation of 200 mJ nanosecond pulses at 100 Hz repetition rate from a cryogenic cooled Yb:YAG MOPA system [J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(11): 2199~2203