

“激光原理”课程中的激光效率辨析

杜戈果

(深圳大学 电子科学与技术学院, 广东 深圳 518060)

摘要:在“激光原理”课程的教学中,针对易混淆的量子效率、荧光效率、斜率效率等概念进行了诠释,并对不同文献中出现的相关概念进行了辨析。对掺铒光纤激光器中出现的量子效率大于100%的特殊情况进行了分析。有助于学生及同行对这些概念的理解和掌握。

关键词:激光器;量子效率;斜率效率

中图分类号:TN241

文献标识码:A

文章编号:1008-0686(2008)02-0040-03

Discussions on Laser Efficiency in the Course of Principle of Lasers

DU Ge-guo

(College of Electronics Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract : There are many definitions about efficiency in the textbook of principle of lasers , which are subjected to confuse each other. After detailed analysis, the pumping quantum efficiency, the fluorescence quantum efficiency and the slope efficiency are distinguished clearly. The special case of the quantum efficiency being higher than 100% is also studied in thulium-doped fiber lasers. These are helpful to students' comprehension.

Keywords: laser; quantum efficiency; slope efficiency

激光器与任何能量转换系统一样,都存在效率问题,激光器的效率反映了器件把外部供给的能量转化为激光辐射的能力,通常可以用总效率和斜率效率两种方法来表示^[1]。但纵观激光原理教科书,涉及到的效率还有:无辐射跃迁的量子效率、荧光效率及总量子效率^[2]。按照正常理解,效率最大为100%。但是,在一些文献中,有些量子效率竟大于100%^[3-7]。学生在学习的过程中,容易混淆这些概念,因此本文对这些概念做出一些讨论与分析。

1 分析与讨论

激光器的总效率 η_t ,又可称绝对效率,定义为激光器的输出功率(能量)与泵浦输入功率(能量)的百分比。这一点易于理解,不再赘述。

无辐射跃迁的量子效率、荧光效率、总量子效率概念是教材在介绍激光器的能级速率方程时引入的^[2]。 E_3 能级向 E_2 能级无辐射跃迁的量子效率为

$$\eta_1 = S_{32} / (S_{32} + A_{30}) \quad (1)$$

E_2 能级向 E_1 能级跃迁的荧光效率为

$$\eta_2 = A_{21} / (A_{21} + S_{21}) \quad (2)$$

总量子效率 $\eta_F = \eta_1 \eta_2$ 。其中总量子效率可表示为

$$\eta_F = \frac{\text{发射荧光的光子数}}{\text{工作物质从光泵吸收的光子数}} \quad (3)$$

在上式中, S_{32} 表示粒子从激发态无辐射跃迁到激光上能级的几率, A_{30} 表示粒子从激发态自发辐射跃迁回基态的几率, A_{21} 表示粒子从激光上能级自发辐射跃迁到激光下能级的几率, S_{21} 表示粒子从激光上能级无辐射跃迁到激光下能级的几率。

在教材中,通常是针对四能级系统定义无辐射跃迁的量子效率 η_i 的;作为对比,我们也可以定义三能级系统的无辐射跃迁的量子效率,即 $\eta_i = S_{32}/(S_{32} + A_{31})$,其中 A_{31} 是粒子从激发态自发辐射跃迁回基态的几率。

关于 η_i 、 η_e 、 η_f 这三个效率,不同文献给出的定义各不相同,有的差别还很大。归纳起来,大概有下列这么几种情况:

(1)文献[1]和[8-11]中, η_i 被称为 E_3 能级向 E_2 能级无辐射跃迁的量子效率;文献[12]中, η_i 被称作 E_3 能级向 E_2 能级无辐射跃迁的概率;文献[1]和[13]中, η_i 被称为泵浦量子效率;文献[14-15]中, η_i 被称为抽运(的)量子效率。从 η_i 的定义看来,由光泵抽运到 E_3 能级的粒子,只有一部分通过无辐射跃迁到达激光上能级 E_2 ,另一部分通过其它途径返回基态。 η_i 反映了吸收的泵浦光子到达激光上能级的效率,因此文献[12-15]中的定义是比较恰当的。

(2)文献[1]和[8-11]中, η_e 被称为 E_2 能级向 E_1 能级跃迁的荧光效率;文献[12]中, η_e 被称作 E_2 能级向 E_1 能级跃迁的概率;文献[1]中, η_e 被称作自发辐射量子效率。从 η_e 的定义看来,到达 E_2 能级的粒子,也只有一部分通过自发辐射跃迁到达 E_1 能级并发射荧光,其余粒子通过无辐射跃迁而跃迁到 E_1 能级。 η_e 表示了这种发射荧光的效率,因此称为自发辐射量子效率是正确的。

(3)总量子效率 η_f 更多地被称为荧光量子效率 (Fluorescent Quantum Efficiency)^[15]。虽然与许多教材中的称谓不同,但含义是相同的,都反映了发射荧光的光子数与工作物质从光泵吸收的光子数的比值。

(4)而文献[16,17]中的含义不甚明了,将式(2)所定义的 η_e 称为荧光量子效率;将量子效率定义为发射激光波长与泵浦波长之比。

斜率效率 (Slope Efficiency),也称微分效率 (Differential Efficiency)^[18],是衡量激光器输出特性的很普遍的一个物理量。一般对光泵激光器而言。以泵浦功率作为横坐标、激光器输出功率作为纵坐标画一条曲线,该曲线的斜率即为激光器的斜率效率。一般情况下,当泵浦输入高出阈值很多时,激光器输出功率和泵浦输入功率的关系曲线接近直线,所以激光器斜率效率是一个确定的值。激光器的斜率效率可以针对入射的泵浦功率来定义,也可

以针对吸收的泵浦功率来定义。对前者,斜率效率中把泵浦吸收效率考虑在内了;若对后者,则是为了突出激光增益介质内在的、固有的效率。所以,当比较不同激光器的斜率效率时,要看针对什么泵浦功率而言;否则,就缺乏可比性了。

在教材中,对于光泵激光器,可得到输出功率的另一种表现形式^[2]

$$P = \frac{\nu_0 A T}{\nu_p S} \frac{1}{2\delta} \eta_i P_{pt} \left(\frac{P_p}{P_{pt}} - 1 \right) \quad (4)$$

按照斜率效率的定义,此时

$$\eta_s = \frac{\nu_0 A T}{\nu_p S} \frac{1}{2\delta} \eta_i \quad (5)$$

式中, ν_0 及 ν_p 分别为激光与泵浦光的频率; A 为激光束的有效截面积; S 为工作物质横截面面积; T 为输出镜的透过率; δ 为腔内平均单程损耗因子。对式(5)做简单分析可以判断出, η_s 的最大值取决于 ν_0 与 ν_p 的比值。对于大多数激光器来说,激光波长比泵浦波长长,即激光光子能量小于泵浦光子能量——这就是所谓的斯托克斯位移 (Stokes shift),因此激光器的斜率效率是小于 ν_0 与 ν_p 的比值的。也有文献称此比值为斯托克斯效率极限^[4]。

从以上的分析可知,一般情况下,激光器的斜率效率是小于斯托克斯效率极限的。但在一些文献中,激光器的斜率效率却大于该效率极限。如在文献[3]认为:激光器效率大约 46%,高于斯托克斯效率 (~39%);在文献[5]中,激光器斜(率)效率为 56%,泵浦波长 793nm,激光中心波长 2.04 μ m。经过计算,发现 56% > 793nm/2.04 μ m = 38.9%;文献[7]中激光器斜率效率为 74%,远远大于斯托克斯效率极限 ~40%。

对文献[3-7]中的情况,为了分析方便,可参考表 1 对参数进行比较。

表 1 文献[3-7]中激光器参数对比表

	文献[3]	文献[4]	文献[5]	文献[6]	文献[7]
泵浦波长 λ_p	787nm	~790nm	793nm	793nm	~800nm
激光波长 λ_0	2 μ m	2 μ m	2.04 μ m	2 μ m	~2 μ m
斯托克斯效率	~39%	39.6%	未提及	未提及	~40%
量子效率 η	>1.2	120%	>130%	173%	>100%
斜(率)效率 η_s	~46%	60.2%	56%	67%	74%

从表格中的数据看到,激光器的斜率效率之所

以大于斯托克斯效率,正是由于量子效率大于100%的结果。这怎么理解呢?需要对激光工作物质作具体的分析。文献[3-7]中的激光工作物质均为掺铥石英光纤,在 $\sim 790\text{ nm}$ 波长泵浦下,铥离子能级结构如图1所示[6]。

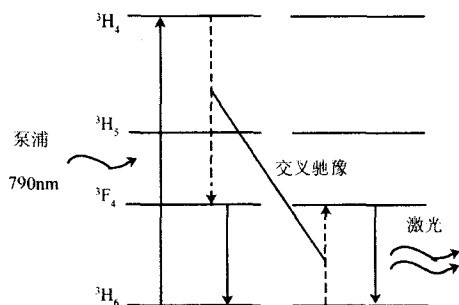


图1 掺铥石英光纤中铥离子能级结构及弛豫过程示意图

在 790 nm 波长泵浦下,基态 $^3\text{H}_6$ 上的粒子吸收泵浦光子能量跃迁到激发态 $^3\text{H}_4$ 。在铥离子掺杂浓度较高时,相邻离子相互作用,处于激发态 $^3\text{H}_4$ 的粒子释放能量跃迁至较低能级 $^3\text{F}_4$,而释放的能量被另一个铥离子基态上的粒子所吸收,向上跃迁到能级 $^3\text{F}_4$,即在相邻的两个铥离子之间发生了交叉弛豫。而能级 $^3\text{F}_4$ 是产生激光作用的上能级。因此,每吸收一个泵浦光子,就会发射两个光子,理论上最大的量子效率为200%。

至此,又产生了一个问题:在文献[3-7]中提到的量子效率(Quantum Efficiency)与前文定义的 η_i 、 η_e 、 η_f 相比,是一个新的物理量呢,还是其中的某一个?笔者认为将该量子效率理解为泵浦量子效率更确切。

关于量子效率,在激光物理与技术百科全书网站中有相应的解释[19]。从中我们可以看出,对应第一种例子的情况,定义的量子效率为泵浦量子效率;对应第二种例子的情况,定义的量子效率为荧光量子效率;对应第三种例子的情况,定义的量子效率为光电二极管的量子效率,即单位时间内产生并被电极收集的光生载流子数与入射(或吸收)的光子数之比。

2 结语

从以上分析可以看到,总效率和斜率效率是针对激光器而言的,是器件能力的一个衡量指标;而量子效率(无辐射跃迁的量子效率、荧光效率、总量子效率)是针对激光工作物质而言的,反映了工作物

质内在的性质。这些概念是不同的,但又是有关联的,对于光泵激光器,激光器的效率是与无辐射跃迁的量子效率成正比的。

参考文献:

- [1] 高以智、姚敏玉、张洪明编著. 激光原理学习指导[M]. 北京:国防工业出版社,2007年2月:133,128.
- [2] 周炳琨、高以智、陈倜嵘、陈家骅编著. 激光原理[M]. 北京:国防工业出版社,2004年8月第5版:149,173.
- [3] R. A. Hayward, W. A. Clarkson, P. W. Turner, J. Nilsson, A. B. Grudinin and D. C. Hanna. Efficient cladding-pumped Tm-doped silica fibre laser with high power single-mode output at $2\text{ }\mu\text{m}$ [J]. United Kingdom: Electron. Lett., 2000, 36(8): 711-712.
- [4] G. Frith, D. G. Lancaster and S. D. Jackson. High power $2\text{ }\mu\text{m}$ Tm³⁺-doped fibre lasers[J]. USA: Proceedings of SPIE, 2004, 5620: 36-45.
- [5] G. Frith, D. G. Lancaster and S. D. Jackson. 85W Tm³⁺-doped silica fibre laser[J]. United Kingdom: Electron. Lett., 2005, 41(12): 687-688.
- [6] G. P. Frith and D. G. Lancaster. Power scalable and efficient 790 nm pumped Tm³⁺-doped fibre lasers[J]. USA: Proceedings of SPIE, 2006, 6102: 44-53.
- [7] S. D. Jackson. Cross relaxation and energy transfer upconversion processes relevant to the functioning of $2\text{ }\mu\text{m}$ Tm³⁺-doped silica fibre lasers[J]. Holland: Optics Comm., 2004, 230: 197-203.
- [8] 沈柯编. 激光原理教程[M]. 北京:北京工业学院出版社,1986年1月:123.
- [9] 朱大勇主编. 激光概要与习题[M]. 北京:电子工业出版社,1986年5月:84.
- [10] 陈钰清、王静环编著. 激光原理[M]. 杭州:浙江大学出版社,1992年5月:316.
- [11] 李相银、姚敏玉、李卓、崔骥编著. 激光原理技术及应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2004年10月:44.
- [12] 李适民、黄维玲等编著. 激光器件原理与设计[M]. 北京:国防工业出版社,1998年7月:152-153.
- [13] 杨齐民、钟丽云、吕晓旭编著. 激光原理与激光器件[M]. 昆明:云南大学出版社,2003年2月:49.
- [14] 王喜山编. 激光原理基础[M]. 济南:山东科技大学出版社,1979年12月:207,129.
- [15] 陈天杰. 激光基础[M]. 北京:高等教育出版社,1987年10月:131.
- [16] 章若冰、王清月著. 激光物理导论[M]. 天津:天津大学出版社,1988年12月:6-7.
- [17] 吕百达. 固体激光器件[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2002年1月:31.
- [18] http://www.rp-photonics.com/slope_efficiency.html.
- [19] http://www.rp-photonics.com/quantum_efficiency.html.