

加长棒脉冲钕玻璃激光器异常实验现象理论研究

王英才^{1)†} 杨春兰¹⁾ 王磊¹⁾ 靳晔²⁾

1) (河北省科学院激光研究所, 石家庄 050081)

2) (河北省机电一体化中试基地, 石家庄 050081)

(2012年1月9日收到; 2012年4月6日收到修改稿)

以激光原理为基础, 以大量精确的实验数据为依据; 考虑被忽略的自发辐射的影响, 对加长到抽运腔外的钕玻璃棒, 未受到抽运, 反而产生光放大异常实验现象的机理进行了理论研究. 理论研究结果与实验结果基本相符.

关键词: 加长棒. 激光原理, 异常实验现象, 自发辐射

PACS: 42.55.-f, 78.45.+h, 42.62.-b

1 引言

1960年美国的梅曼(Maiman)发明了第一台红宝石(Ruby)固体激光器, 1961年底美国的施奈德(Snitzer)便研制出了钕玻璃(Nd: glass)激光器. 以后又有人相继研制出了钕铝石榴石(YAG)、钷酸钷(YAP)、五磷酸钕(NdPP)等多种掺钕晶体激光器.

在常用的固体激光器中, 大都采用直管抽运灯和椭圆柱体聚光腔. 根据激光原理和椭圆聚光腔的聚光效率, 从1960年开始, 不论是红宝石激光器, 还是钕玻璃、钕铝石榴石等激光器, 国内外都是把抽运灯 l_L 和激光棒 l_{ab} 分别置于椭圆腔 l_c 内的两条焦线上, 使抽运灯 l_L 、激光棒 l_{ab} 和椭圆腔 l_c 三者的长度相等^[1-3], 即 $l_L = l_c = l_{ab}$ (以下简称“等长棒”)^[4,5]. 不允许把棒的长度加长(伸长)到聚光腔外. 如果保持其他条件不变, 只把棒的长度向聚光腔外加长, 即 $l_{ab} > l_L, l_c$. 由于加长到聚光腔外的部分激光棒受不到光抽运, 和等长棒相比, 抽运阈值必然要升高; 输出效率必然要降低, 作者用三能级系统的红宝石做实验时, 得了出与激光原理完全符合的结果.

但是作者用四能级系统的钕玻璃做调Q脉冲实验时, 实际得到的结果恰恰与红宝石相反, 即抽

运阈值不但不升高反而明显降低; 输出功率不但不降低反而明显提高. 意外的发现了, 用激光原理无法解释的加长棒调Q脉冲光放大异常实验现象.

1992年, 作者提出了用自发辐射探讨这个问题的思路; 2001年, 作者首先根据四能级系统的速率方程, 考虑自发辐射的影响后, 探讨了加长棒产生调Q脉冲光放大现象的机理^[5].

本文是在探讨了加长棒产生调Q脉冲光放大的基础上, 又根据长脉冲的输入阈值和输出效率, 对长脉冲产生的光放大异常现象, 进行了更详细的理论研究和实验验证; 理论研究结果和实验验证结果基本相符.

2 长脉冲等长棒和加长棒的抽运阈值和输出效率

根据固体激光器的工作原理, 求得等长棒长脉冲的阈值输入电能为^[2]

$$E_{th} = \frac{N_{2th} V_{R_1} h \nu_p}{\eta_L \eta_c \eta_{ab} \eta_l}, \quad (1)$$

加长棒的阈值输入电能为

$$E'_{th} = \frac{N_{2th} V_{R_2} h \nu_p}{\eta_L \eta_c \eta_{ab} \eta_l}, \quad (2)$$

式中, N_{2th} 为抽运到激光上能级 E_2 的反转粒子密度, V_{R_1} 为工作物质的体积, h 为普朗克常数, ν_p 为

† E-mail: wang_yingcai@163.com

激活离子吸收光的频率, η_L 为抽运光的有效电光转换效率, η_c 为聚光腔的聚光效率, η_{ab} 为工作物质的吸收效率, η_l 为从吸收能级 E_3 向激光上能级 E_2 无辐射跃迁的量子效率. (1) 式, (2) 式表明, 抽运阈值的输入电能与工作物质的体积成正比, 由于 $l_2 > l_1$, 棒直径相同, $V_{R2} > V_{R1}$, 应有

$$E'_{th} > E_{th}. \quad (3)$$

但是, 作者实际得到的实验结果恰恰相反, 却是 $E'_{th} < E_{th}$. 总体效率 η_{tot} 为输出能量与输入能量之比

$$\eta_{tot} = \frac{E_{out}}{E_{in}} = \left(1 - \frac{E_{th}}{E_{in}}\right)\eta_s, \quad (4)$$

式中 η_s 为斜率效率. 由式 (4) 可见, 输入电能一定时, 总体效率与阈值 E_{th} 和斜率效率 η_s 都有关, 因此凡影响阈值和斜率效率的各种因素都影响总体效率. 根据 (3) 式输入能量一定时, 应有

$$\eta'_{tot} < \eta_{tot}. \quad (5)$$

但是, 实际得到的却是 $\eta'_{tot} > \eta_{tot}$. 这就是与理论不符的加长棒光放大异常实验现象.

3 理论研究

1989 年, 作者先是用测量椭圆激光腔外左、右两端沿加长棒的轴线方向, 抽运光的功率密度分布规律的方法, 对这个问题进行了分析. 测量结果表明 [6]: 在抽运灯的一个放电脉冲时间内, 椭圆腔外左、右两端沿加长棒的轴线方向, 抽运光的功率密度分布是按指数规律衰减的. 当聚光腔内棒吸收的抽运光的功率密度达到阈值时, 聚光腔外的棒, 抽运光的功率密度很快就按指数规律衰减到阈值以下. 这显然与阈值反而降低、输出效率反而提高的实验事实不符. 因此, 用工作物质内反射和抽运灯电极的强辐射理论解释不了这种异常实验现象. 见图 1.

3.1 自发辐射的影响

作者经过对实验现象的仔细观察和分析后, 找出了钕玻璃激光器产生这种异常实验现象的根本原因: 即, 被忽略的自发辐射的影响.

在求解长脉冲钕玻璃激光器能级 E_2 上的阈值反转粒子数密度时, 都认为可以不考虑自发辐射的影响 [2,7], 这种考虑问题的方法在三能级激光系统

中也许是正确的, 在四能系统中就不一定正确. 这是因为, 在四能级系统中, $E_2 \rightarrow E_1$ 的跃迁可在很小的抽运速率下发生, 而不需要三能级系统中为保持粒子数平衡所需要的高抽运速率 [1].

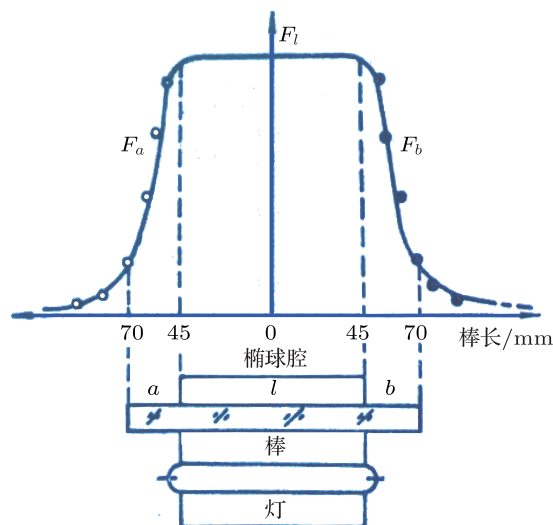


图 1 椭圆抽运腔外加长棒轴向光泵功率密度分布规律

一般说来, 在长脉冲四能级系统中多用高抽运速率, 当抽运速率达到某一定值, 使粒子数实现了高反转就开始产生自发发射. 这样, 在达到阈值反转粒子数密度之前, 在工作物质端面附近的自发发射会产生很强的光通量. 以致将大部分甚至全部激光上能级的反转粒子数消耗掉. 在达到阈值反转粒子数之前 $0 \sim t_0$ 的时间内激光上能级 E_2 的粒子数就有一部分自发地落到低能级 E_1 , 其数目减少率与上能级的粒子数成正比,

$$\frac{dN_{2th}}{dt} = -A_{21}N_{2th}, \quad (6)$$

式中, A_{21} 是自发跃迁概率, 其量纲为 s^{-1} . 它给出了单位时间内能级 E_2 上的粒子自发落到能级 E_1 的概率.

自发发射是粒子在不受外界辐射场的控制下的发光过程, 是空间和时间的统计函数. 对大量的自发发射的粒子, 各个发射过程相互之间没有相位关系; 发射的光子是不相干的. 其特征可用处于激发态的粒子寿命表示, 超过这一寿命, 粒子自发地回到低能级并辐射出能量. 自发发射越强能量损耗就越多, 阈值输入电能 E_{th} 也就越大, 这是我们不希望的. 抑制不相干的离轴自发发射, 减少能量损耗, 这就是作者研究加长棒产生这种光放大异常实验现象的基本思路.

3.2 提高激光上能级反转粒子数的利用率

方程 (6) 的解为

$$N_{2\text{th}}(\iota_0) = N_{2\text{th}}(0) \exp\left(\frac{-\iota_0}{\tau_{21}}\right), \quad (7)$$

式中, $N_{2\text{th}}(\iota_0)$ 为激光长脉冲形成之前, 能级 E_2 上自发辐射损耗的粒子数, τ_{21} 为能级 E_2 的自发辐射寿命.

假设只有那些与棒轴成很小角度并通过整个棒长的近轴自发发射光子, 才能产生明显的放大自发发射, 放大自发发射从棒的两端发射出强光束, 其立体角近似为

$$\Omega \approx \frac{n^2 A}{l^2}, \quad (8)$$

式中, n 为介质的折射率, l 和 A 分别为棒长和截面积. 显然, 当 $l = L$ (腔长) 时, Ω 最小令为 Ω_{\min} .

这样, 这种细长的棒, 光路较长, 加上高增益, 就可以由各个非相干的自发衰减中建立起受激发射. 但是, 在实际应用中, 比如等长棒, 往往是 $l_1 < L$, 这样, 只有自发跃迁的粒子数符合下式时, 才能建立起近轴发射

$$N'_{2\text{th}}(\iota_0) = N_{2\text{th}}(0) \exp\left(\frac{-\iota_0}{\tau_{21}}\right) \left[\frac{\Omega_{\min}}{\Omega}\right]. \quad (9)$$

设, $N''_{2\text{th}}(\iota_0)$ 为考虑近轴自发辐射的影响后, 实际参加激光振荡的阈值反转粒子数密度, 根据能量守恒定律, 抽运到激光上能级 E_2 的阈值反转粒子数密度

$$N_{2\text{th}} = N_{2\text{th}}(\iota_0) - N'_{2\text{th}}(\iota_0) + N''_{2\text{th}}(\iota_0). \quad (10)$$

将 $\frac{\Omega_{\min}}{\Omega} = \frac{l^2}{L^2}$, 代入 (9) 式经整理后得

$$N_{2\text{th}} = N''_{2\text{th}}(\iota_0) \left\{ 1 + \exp\left(\frac{-\iota_0}{\tau_{21}}\right) \left[\frac{l^2}{L^2} - 1\right] \right\}^{-1}. \quad (11)$$

这就是考虑自发辐射的影响后, 抽运到能级 E_2 上的反转粒子数密度与达到阈值时的反转粒子数密度之间的关系. 由于棒加长后非相干离轴损耗的粒子数比等长棒少, 这样就提高了能级 E_2 上反转粒子数的利用率. 这一点已被作者观察到的与等长棒不同的实验现象所证实.

3.3 异常实验现象的理论解释

令加长棒为一直径为 D_2 ($D_2 = D_1$), 长度为 l_2 ($l_2 > l_1$) 的圆柱棒, 因为 l_1 和 l_2 在聚光腔

内受到的抽运长度相同, 因此, 受到的抽运体积也相同, 即 $V_{R_2} = V_{R_1}$. 根据 (9) 式, 加长棒由自发辐射引起的离轴损耗比等长棒小, 这样, 实际参加激光振荡的阈值反转粒子密度 $N'_{2\text{th}}$ 小于等长棒的 $N_{2\text{th}}$, 即 $N'_{2\text{th}} < N_{2\text{th}}$. 将 $N'_{2\text{th}}$ 代入 (2) 式, 和 (1) 式相比, 得

$$E'_{\text{th}} < E_{\text{th}}. \quad (12)$$

将 E'_{th} 代入 (4) 式得

$$\eta'_{\text{tot}} > \eta_{\text{tot}}. \quad (13)$$

这样, 就很好地解释清了加长棒产生光放大异常实验现象的形成机理.

3.4 最佳棒长

(12) 式, (13) 式是在只考虑了棒加长后, 减少了由自发辐射引起的离轴损耗, 而没有考虑增加了棒的吸收损耗的情况下导出的, 实际上棒的吸收损耗不能忽. 考虑棒的吸收损耗后, 阈值粒子数反转密度为

$$N_{2\text{th}} = \frac{4\pi^2 \Delta\nu \nu_0^2 \mu^2 \tau_{21} \alpha_{\text{总}}}{c^2}, \quad (14)$$

式中, $\Delta\nu$ 为线宽, ν_0 为激光频率, μ 为介质的折射率, τ_{21} 为能级 E_2 的寿命.

$$\alpha_{\text{总}} = \alpha_{\text{内}} - \frac{1}{2l} \ln(r_1 r_2), \quad (15)$$

式中, l 为介质的长度, r_1, r_2 为反射镜的反射率, $\alpha_{\text{内}}$ 为介质的内部损耗系数.

令

$$\frac{4\pi^2 \Delta\nu \nu_0^2 \mu^2 \tau_{21}}{c^2} = K, \quad (16)$$

将 (15), (16) 式代入 (11) 式, 整理后得

$$N''_{2\text{th}}(\iota_0) = \left\{ 1 + \exp\left(\frac{-\tau_0}{\tau_{21}}\right) \left[\frac{l^2}{L^2} - 1\right] \right\} \times \left[\alpha_{\text{内}} - \frac{1}{2l} \ln(r_1 r_2) \right] K. \quad (17)$$

由式 (17) 可以定性分析出考虑自发辐射的影响后, 阈值反转粒子数密度 $N''_{2\text{th}}(\iota_0)$ 随加长棒 l 的变化规律. 在等长棒的基础上, 随着 l 的加长, 近轴自发发射的粒子数增加, 介质内部损耗也增加, 当粒子数的增加超过损耗时, 阈值降低, 总体效率提高; 当内部损耗超过近轴发射增加的粒子数时, 阈值开始升高, 总体效率开始下降. 由于棒的加长与近轴粒子数增加存在二次方的关系, 而棒的内部损耗与

棒的加长是线性关系,因此,阈值下降时,总体效率升高时的速率比较快;阈值升高时,总体效率降低时的速率比较慢。

因此,对于任何一个直管灯抽运的长脉冲钕玻璃激光器来说,在一定的条件下,棒长必定存在一个最佳值,由于影响因素较多,定量计算很难。所以,这个最佳值通常由实验决定。作者经过多次、反复地对比实验,得出的最佳棒长是:棒灯长度比 ≈ 1.5 ^[5,6,8]。在这个棒长范围内和等长棒相比,一般阈值可降低30%左右;总体效率可提高1—2倍,效果是非常显著的。调Q工作效果更佳^[9]。

3.5 实验验证方法与结果

为了使验证结果准确、可靠,作者采用了把同一块料加工的不同棒长,或同一根钕玻璃棒由长逐步截短的方法,进行了多次反复地实验验证^[4]。

长脉冲的输出特性曲线见图2。

3.6 推论

除钕玻璃外,作者也用四能级系统钇铝石榴石做了加长棒实验。结果表明:钇铝石榴石也有与钕玻璃类似的加长棒光放大异常实验现象。由此可推论:

1) 所有掺钕固体工作物质,如铝酸钕、五磷酸钕等也应有与钕玻璃类似的加长棒光放大异常实验现象。

2) 所有掺钕固体工作物质,在激光振荡器中得出的加长棒光放大实验现象,在激光放大器中也应存在。

由于各种掺钕固体工作物质的掺杂浓度不同,光学性质不同,工作时使用的器件条件不同,因此,虽然各种掺钕固体激光器也应有与钕玻璃相似的

加长棒光放大实验现象,但是,效果只是相似,不会完全相同。

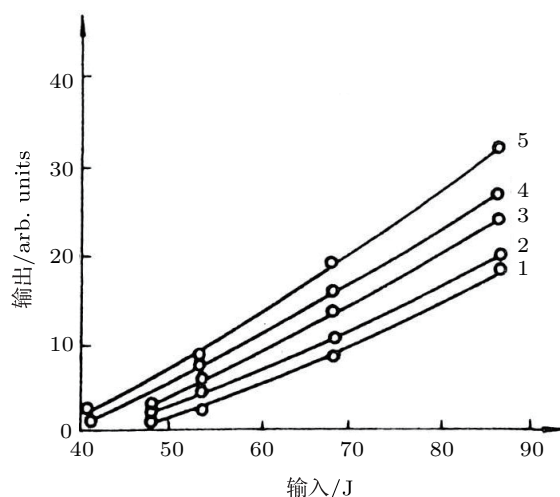


图2 用同一块料加工的不同棒长的输出特性曲线(钕玻璃棒长:1—5分别为80 mm, 86 mm, 96 mm, 111 mm, 130 mm;抽运灯长=椭圆腔长=80 mm)

4 结论

本文的理论研究结果,对四能级系统固体激光器的应用研究、应用基础研究、基础理论研究,也都应该有一定的参考价值。也就是说,对固体激光器的研究,还有许多工作可做,比如,加长棒与掺杂浓度的关系,加长棒与调Q脉冲的关系,等等。因此,目前一些资料提出的,有关固体激光器的理论,已经发展得十分完善的结论是有待商榷的^[3],加长棒异常实验现象的发现就说明了这一点。

由于作者的工作能力和工作条件有限,工作做得还不很完善,此文只能起到一个抛砖引玉作用。

中国科学院杨国祯院士、周炳琨院士,中国科学院上海光机所雷仕湛研究员等对本文提出了许多宝贵的修改建议,在此表示感谢。

- [1] Koechner W 1976 *Solid State Laser Engineering* (New York: Springer) p316–317
- [2] Xu R P, Liu J H 1986 *Laser Units and Tutorids* (Beijing: Beijing Institute of Technology Press) p167 (in Chinese) [徐荣浦, 刘敬海 1986 激光器件与技术教程(北京:北京工业学院出版社)第167页]
- [3] Chen J B 2007 *Laser principle and application* (Beijing: Electronics Industry Press) p102 (in Chinese)[陈家碧 2007 激光原理及应用(北京:电子工业出版社)第102页]
- [4] Wang Y C 1995 *Laser Journal* **16** 10 (in Chinese) [王英才 1995 激光杂志 **16** 10]
- [5] Wang Y C, Wang L 2001 *Laser & Optoelectronics Progress* **432**

19 (in Chinese)[王英才, 王磊 2001 激光与光电子学进展 **432** 19]

- [6] Wang Y C 1991 *Chinese J. Laser* **18** 556 (in Chinese) [王英才 1991 中国激光 **18** 556]
- [7] *Laser Technology* 1981 (Changsha: Science & Technology Press) p44 (in Chinese) [华中工学院等编 1981 激光技术(长沙:湖南科学技术出版社)第44页]
- [8] Wang Y C 1986 *Chines Physis Laser* **13** 433 (in Chinese) [王英才 1986 中国激光 **13** 433]
- [9] Zhang S W, Wang Y C 1981 *Laser* **8** 64 (in Chinese) [张硕卫, 王英才 1981 激光 **8** 64]

The theoretical study on abnormal experimental phenomenon of the elongated rod Nd:glass pulsed laser

Wang Ying-Cai^{1)†} Yang Chun-Lan¹⁾ Wang Lei¹⁾ Jin Ye²⁾

1) (*Laser Institute, Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang 050081, China*)

2) (*Hebei Mechaerotics Inetermediute Piloe Production Base, Shijiazhuang 050081, China*)

(Received 9 January 2012; revised manuscript received 6 April 2012)

Abstract

According to the principle of laser and a large number of experimental data proved and also considering the influence of the ignored spontaneous emission, we study the abnormal phenomenon that the Nd: glass rod which was longer than the optical pump cavity is optically amplified without pumping. The theoretical result is almost the same as experimental result.

Keywords: elonged rod, principle of laser, abnormal experimental phenomenon

PACS: 42.55.-f, 78.45.+h, 42.62.-b

† E-mail: wang_yingcai@163.com