

GaAs 被动调 Q 兼输出耦合 Nd:YVO₄ 激光特性研究*

柳 强 巩马理 闫 平 贾维溥 崔瑞祯 王东生

(清华大学精密仪器与机械学系,北京 100084)

(2002 年 3 月 14 日收到,2002 年 4 月 15 日收到修改稿)

利用可饱和吸收半导体 GaAs 作为被动调 Q 元件和 F-P 输出耦合镜,实现了半导体激光器(LD)抽运 Nd:YVO₄ 激光调 Q 运转,获得脉宽度为 47ns,重复频率为 1183kHz,平均功率为 430 mW,光束质量为 $M^2 = 1.13$ 的 TEM₀₀ 激光基横模输出,调 Q 抽运阈值为 1700mW.并数值求解了含有 GaAs 被动调 Q 兼输出耦合的速率方程,分析了 GaAs 被动调 Q 机理以及脉宽宽度、重复频率、平均功率随抽运速率、腔长的变化关系,理论与实验结果相一致.为多功能综合型微型调 Q 固体激光器提供了简单有效的方法.

关键词:被动调 Q,输出耦合,GaAs

PACC:4260,4260D

1. 引 言

自从 20 世纪 80 年代末,美国麻省理工学院(MIT)的 Zayhowski 教授制作了第一个半导体激光器(LD)抽运的微晶片固体激光器以来,微晶片激光器由于体积小、重量轻、转换效率高、寿命长等优点成为激光应用器件中倍受关注的热点,固体激光器的微型化也真正进入了实质性的阶段.它的运转方式有脉冲、连续及单频运转,输出激光脉冲宽度从长脉冲几个纳秒到皮秒量级,在高密度光存储、高密度光学测量、光谱研究、激光雷达、空间光通讯、激光测距、海底通讯、化学成分分析、医用仪器等方面已显示出潜在的应用前景.近年来,微型固体激光器逐渐向多功能综合型和微片型发展,LD 抽运的自调 Q 的 Cr:Nd:YAG, Cr:Yb:YAG 激光器^[1]和 Nd:YCOB, Nd:GdCOB, Yb:YCOB, Yb:GdCOB 自倍频激光器^[2]以及 Cr:YAG, Nd:YAG 采用“液向相外延”的方法形成的微片激光器^[3]都是非常典型的例子.

20 世纪 1996 年 Kajara 等^[4]发现了高纯半导体 GaAs 具有被动调 Q 特性,并相继实现了氙灯抽运 Nd:YAG^[5]和 LD 抽运 Nd:YAG, Nd:YVO₄ 被动调 Q 运转^[6,7],也曾被用作锁模元件^[8].文献[7]采用 628 μ m 厚度的 GaAs 即作为调 Q 元件,又作为输出

耦合镜,实验上研究了腔长的变化对调 Q 脉冲宽度、脉冲重复频率、峰值功率和单脉冲能量的影响,在抽运功率为 3W 的条件下,获得了 12 μ J, 2.2ns, 峰值功率为 5.6kW 输出.我们曾经利用 GaAs 只作为被动调 Q 元件,实现了 LD 抽运平-凹腔 Nd:YVO₄ 激光调 Q 运转,获得脉宽度为 15ns,重复频率为 470kHz 的 TEM₀₀ 激光基横模输出.本文采用光纤耦合端面抽运方式,实现了 GaAs 既作为调 Q 元件,又作为输出耦合镜全固态被动调 Q 微片激光运转,并数值求解了含有 GaAs 被动调 Q 兼输出耦合的速率方程,理论和实验研究了抽运功率以及腔长的变化对调 Q 输出特性的影响,理论计算结果与实验结果变化趋势相一致.

2. GaAs 被动调 Q 机理

高纯 GaAs 晶体在生长过程中,由于碳的化学污染而在导带与价带间产生了深能级 EL2 和 EL2⁺,正是由于深能级 EL2 和 EL2⁺ 的存在,在 1064nm 激光辐照下,EL2⁺ 能级上粒子吸收光子,并从价带俘获电子跃迁到 EL2 能级,在价带上形成一个带正电的空穴,EL2 能级上粒子也将吸收光子,并发射电子到导带,从而跃迁到 EL2⁺ 能级,这一过程类似于双光子吸收过程^[9],使得 GaAs 具有可饱和吸收体的特

* 国防科技重点实验室基金资助的课题.

性.同时 GaAs 薄片的 F-P 效应使其又可作为输出耦合镜.

首先根据连续抽运被动调 Q 速率方程^[10]并考虑导带上的自由电子与 EL2⁺ 能级粒子的复合过程以及 EL2 和 EL2⁺ 能级的吸收,给出 GaAs 被动调 Q 兼输出耦合的速率方程组:

$$\frac{d\phi}{dt} = \left\{ 2\sigma_n l - 2[\sigma_e(n_0 - n^+) + \sigma_h n^+] d - \ln\left(\frac{1}{R}\right) - \delta \right\} \frac{\phi}{\tau}, \quad (1)$$

$$\frac{dn}{dt} = p\left(1 - \frac{n}{N_{\text{tot}}}\right) - \gamma\sigma_c\phi N - \frac{n}{\tau_a}, \quad (2)$$

$$\frac{dn^+}{dt} = \frac{(n_0 - n^+)}{t^+} - \sigma_h c n^+ \phi, \quad (3)$$

式中符号的物理意义和物理量的典型值如下: ϕ 为腔内光子数密度; τ 为光子在腔内往返一周的时间; τ_a 为增益介质的上能级寿命($50\mu\text{s}$); τ^+ 为导带上的自由电子与 EL2⁺ 能级粒子的复合时间(38ns); σ , n , l 分别为激光介质的受激发射截面($2.5 \times 10^{-18} \text{cm}^2$)、反转粒子数密度和长度(1mm); σ_e , σ_h 为 GaAs 两个能级 EL2 和 EL2⁺ 的吸收截面(1.0×10^{-16} 和 $2.3 \times 10^{-17} \text{cm}^2$); n_0 , n^+ 为 GaAs 两个能级 EL2 和 EL2⁺ 的初始粒子数密度(1.2×10^{16} 和 $1.4 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$); d 为 GaAs 的厚度($360\mu\text{m}$); N_{tot} 为增益介质的粒子浓度($2.75 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$); p 为抽运速率($\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}$); δ 为激光器的耗散性损耗(0.02); R 为 GaAs 作为 F-P 腔表面 Fresnel 反射率(0.3); γ 为反转因子(四能级系统为 1).

利用变步长龙格-库塔法对方程(1)–(3)进行数值求解,得到激光介质上能级反转离子数变化、GaAs 两个能级间粒子数的转移过程以及调 Q 脉冲波形(如图 1),随着腔内的光强增大,此时,由于 GaAs 饱和吸收作用导致腔内损耗减少,激光工作介质上能级粒子数急剧跃迁到下能级,调 Q 脉冲开始产生,此时饱和吸收体 EL2 能级上粒子也快速向 EL2⁺ 能级转移,进一步加速调 Q 脉冲的产生.调 Q 脉冲形成后,EL2 能级上粒子几乎全部转移 EL2⁺ 能级上,激光介质上能级反转离子数也降到最小值.

另外,通过对方程的求解,我们获得抽运速率及腔长对调 Q 激光的脉冲宽度、重复频率、脉冲峰值功率和平均输出功率的影响.分析图 2 可知,随着抽运速率的增加或者腔长变短,调 Q 激光的脉冲宽度变窄,重复频率增加,平均功率增大.这与其他可饱和吸收体的被动调 Q 特性类似,由于 Q 突变前后

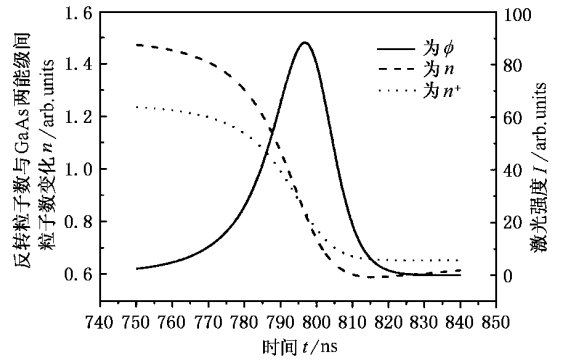


图 1 数值计算上能级反转离子数和 GaAs 两个能级间粒子数变化以及调 Q 脉冲波形

腔的损耗不变,使得调 Q 单脉冲的能量保持不变,抽运功率的增加只会导致重复频率增加,平均功率增大.

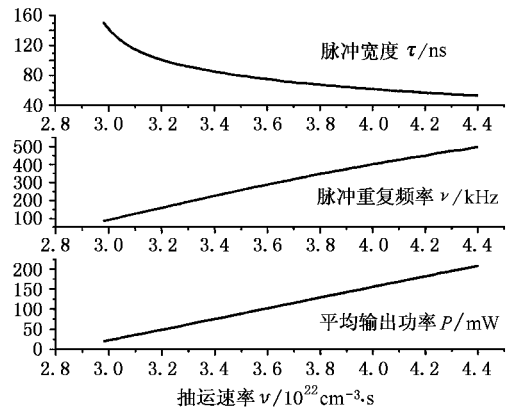


图 2 数值计算脉冲宽度 τ 、重复频率 ν 和平均输出功率 P 随抽运速率 ν 的变化

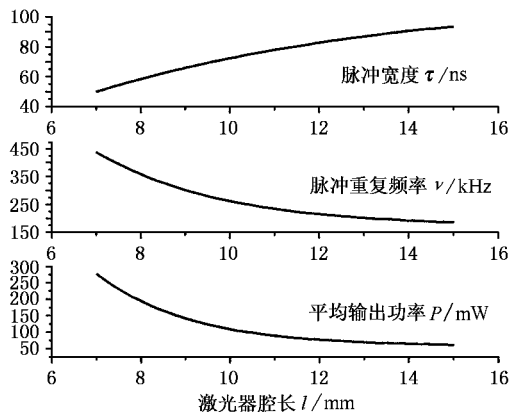


图 3 数值计算脉冲宽度 τ 、重复频率 ν 和平均输出功率 P 随腔长 l 的变化

3. 实验与结果分析

3.1. 实验装置

LD 光纤耦合端面抽运 Nd:YVO₄/GaAs 被动调 Q 激光器如图 4 所示,抽运源为带尾纤输出的温控半导体激光器,光纤芯径为 400 μ m,数值孔径 NA 为 0.22,光学系统传输比为 1:1,Nd:YVO₄ 晶体抽运面镀 1064nm 高反,808nm 高透膜,晶体的掺杂浓度为 2%,尺寸为 3mm \times 3mm \times 1mm,GaAs 晶体的厚度为 360 μ m,切割方向为 $100 \pm 0.60^\circ$,晶体的两面高度抛光.Nd:YVO₄ 晶体采用了导热性很好的紫铜作为晶体的热沉,激光器腔长为 50mm.实验中精确调整 LD 的温度,使得其工作波长为 808.7nm,与 Nd:YVO₄ 晶体的吸收峰相匹配,同时调整 LD 输出的偏振态,保证 Nd:YVO₄ 晶体的偏振吸收方向占有最大的分量.利用 Molelectron Detector 公司 EPM2000 型功率计,美国 Spiricon 公司 PC 激光光束分析仪和 M²-200 光束传输分析仪以及 New Focus 公司快速响应探头配合示波器分别对激光输出功率,激光强度分布,激光光束质量以及输出激光的脉冲特性进行了详细测量.

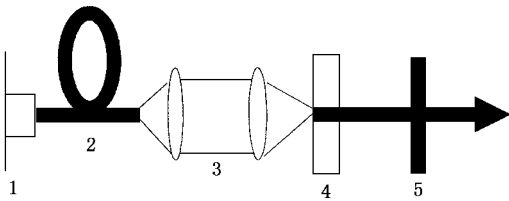


图 4 GaAs 被动调 Q 的 Nd:YVO₄ 激光器简图 1 为 LD 2 为光纤;3 为耦合光学系统;4 为 Nd:YVO₄ 晶体;5 为 GaAs 晶体

3.2. 实验结果与讨论

图 5 和图 6 分别为调 Q 脉冲宽度、脉冲重复频率、平均输出功率随抽运功率的变化关系,调 Q 激光运转阈值为 1700mW,随着抽运功率的增加,脉冲宽度变窄,重复频率升高,平均输出功率增加.当抽运功率从 1700 增加到 3170mW 过程中,脉冲宽度从 97 降低到 47ns,重复频率从 500 增加到 1183kHz.腔长的增加也导致调 Q 脉宽变宽,重复频率和平均输出功率降低,与理论计算结果的变化趋势相一致.造

成调 Q 激光运转的阈值较高,脉冲重复频率高,输出的单脉冲能量低的原因主要有两方面:一是 Nd:YVO₄ 作为增益介质与 Nd:YAG 相比,它的受激发射截面大,上能级寿命短,导致储能效果不好,输出单脉冲能量低;二是由于实验中 GaAs 晶体比较薄,初始透过率高,腔内微弱的光信号就能触发一个光脉冲,使得脉冲重复频率高.

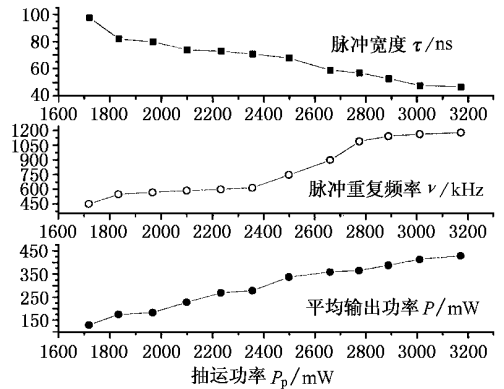


图 5 调 Q 脉冲的脉宽宽度 τ 、重复频率 ν 和平均输出功率 P 随抽运功率 P_p 的变化

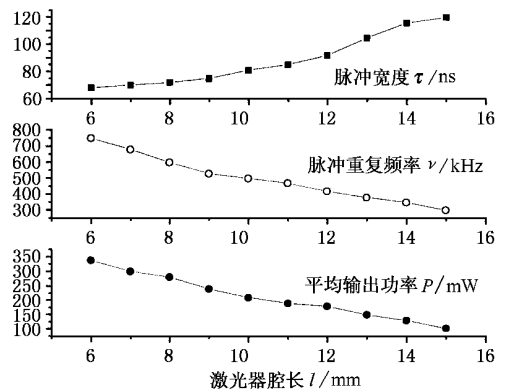


图 6 调 Q 脉冲的脉宽宽度 τ 、重复频率 ν 和平均输出功率 P 随腔长 l 的变化

图 7 和图 8 分别为 75ns 1304 个调 Q 脉冲叠加的结果和调 Q 脉冲序列取样.可饱和吸收体被动调 Q 同主动声光调 Q 相比,被漂白后重新恢复吸收的时间较长,这期间外界随机变化便会导致激光介质上能级初始反转粒子数不一致,同时调 Q 脉冲之间也存在着互相干扰.这些因素对被动调 Q 激光输出的峰值稳定性和频率稳定性都会产生影响.此外,本文采用的 Nd:YVO₄ 晶体的上转换一定程度上也会影响调 Q 输出^[11].所以,GaAs 被动调 Q 同样具有脉冲频率和单脉冲能量稳定性不好的缺点.

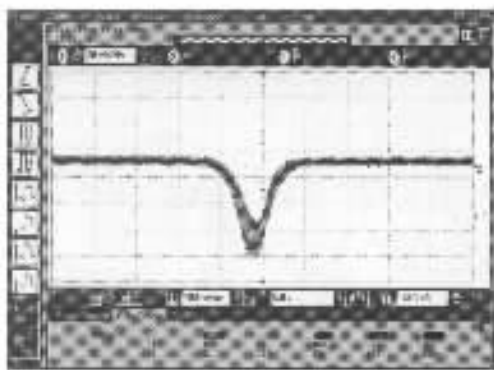


图 7 1304 个调 Q 脉冲叠加的结果

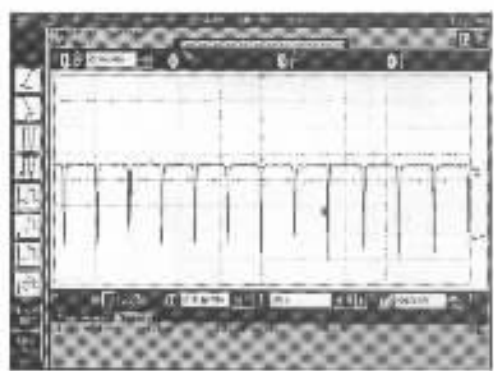


图 8 调 Q 脉冲序列取样

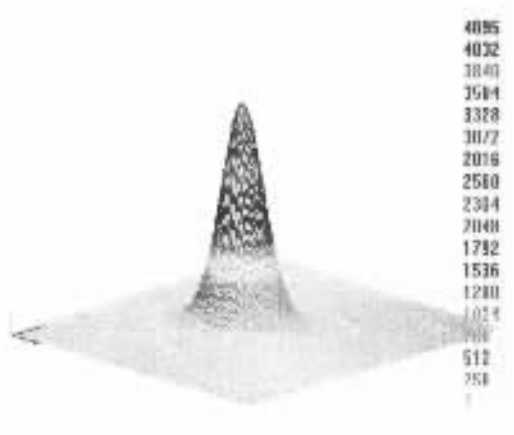
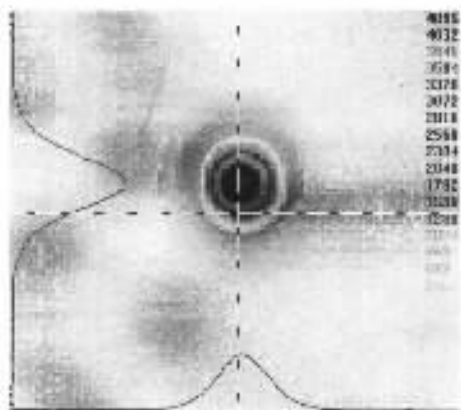


图 9 TEM₀₀ 模调 Q 脉冲的二维和三维光强分布

图 9 分别给出了激光光束的二维和三维的光强分布图,可以看出激光光束的对称性和均匀性较好,证明了激光器工作在 TEM₀₀ 基横模状态.所测 M^2 在 X 方向和 Y 方向的值: $M_x^2 = 1.12, M_y^2 = 1.14$; 输出激光的 X 方向的束腰为 $294\mu\text{m}$, Y 方向的束腰为 $271\mu\text{m}$; X 方向的发散角为 5.145mrad , Y 方向的发散角为 5.707mrad . 在我们的实验结果中,基模半径(约为 $150\mu\text{m}$)小于抽运光斑半径(约为 $200\mu\text{m}$). 根据端面抽运固体激光器模匹配理论,激光晶体如果散热效果不好,晶体中将产生热透镜效应以及由热透镜的产生的高阶球差,该球差在热透镜中心及其附近很小,而在偏离中心相对较远的横向区域内,热致球差很快增大.与此相应,过大的基模半径会使热透镜球差引起的附加衍射损耗急剧增大.因此,较高抽运功率下激光晶体内基模半径小于抽运光斑半径.

4. 结 论

GaAs 被动调 Q 特性被发现以来,相关的研究较少,而影响被动调 Q 特性的因素又较多,本文通过对 LD 抽运高纯半导体 GaAs 被动调 Q 兼输出耦

合激光器运转特性研究,成功的实现了 LD 端面抽运 Nd :YVO₄ 调 Q 激光运转,并数值求解了含有 GaAs 被动调 Q 兼输出耦合的耦合波方程,分析了 GaAs 被动调 Q 的动力学过程,理论与实验研究了

抽运功率和激光腔长对调 Q 脉冲的脉宽宽度、重复频率和平均输出功率的影响,理论计算结果与实验结果相一致,说明了半导体 GaAs 是一种有效的激光被动调 Q 材料.

- [1] Zhou S , Lee K K and Chen Y C 1993 *Opt. Lett.* **18** 1418
- [2] Engin Molva 1999 *Opt. Mater.* **11** 289
- [3] Dominiak-Dzik G , Ryba-Romanowski W , Golab S , Macalik L , Hanuza J and Pajaczkowska A 2000 *J. Mol. Str.* **555** 213
- [4] Kajara T T and Gaeta A L 1996 *Opt. Lett.* **21** 1244
- [5] Li P , Wang Q P , Gao D *et al* 2000 *Acta Opt. Sin.* **20** 744 (in Chinese) [李 平、王青圃、高 达等 2000 光学学报 **20** 744]
- [6] Gu J H , Zhou F , Xie W J , Tan S C , Lan Y L 1999 *Opt. Commun.* **165** 245
- [7] Gu J H , Zhou F , Wan K T , Lim T K , Tan S C , Lan Y L , Xu D S , Cheng Z H 2001 *Opt. Laser Engineer.* **35** 299
- [8] Cai L , Wang Q Y , Zhang Z G *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 68 (in Chinese) [柴 路、王清月、张志刚等 2001 物理学报 **50** 68]
- [9] Valley G C and Smirl A L 1988 *IEEE J. Quantum Electron.* **24** 304
- [10] Liu J G , Shen D Y , Tan S C and Lan Y L 2001 *IEEE J. Quantum Electron.* **37** 888
- [11] Feng Y , Song F , Zhao L J *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 335 (in Chinese) [冯 衍、宋 峰、赵丽娟等 2001 物理学报 **50** 335]

Study on passive Q-switched Nd:YVO₄ laser with GaAs as a passive Q-switched component and output coupler^{*}

Liu Qiang Gong Ma-Li Yan Ping Jia Wei-Fu Cui Rui-Zhen Wang Dong-Sheng
 (Department of Precision Instruments and Mechanology , Tsinghua University , Beijing 100084 , China)
 (Received 14 March 2002 ; revised manuscript received 15 April 2002)

Abstract

Passive Q-switched operation of a laser diode-pumped laser is studied with a saturable absorber GaAs as a passive Q-switched component and F-P output coupler. The Q-switched pulse duration is 47ns , pulse repetition rate is 1183 kHz , pulse average power is 430mW , beam quality M^2 is equal to 1.13 and the laser threshold of passive Q-switching is 1700mW. We performed numerical calculations of coupled wave equations for the case of GaAs playing the role as mentioned above , discussed the passive Q-switched mechanism and the dependence of pulse duration , pulse repetition rate and average power on the pumping rate and laser cavity length , which was in good agreement with the experimental results. A brief and effective technique is provided for compact Q-switched solid-state laser having multiple functions.

Keywords : passive Q-switching , output coupler , GaAs

PACC : 4260 , 4260D

^{*} Project supported by the Key Laboratory of National Defence Science and Technology of China.