

文章编号: 1002-2082(2004)04-0059-04

离子注入SI-GaAs 做激光器被动调Q 元件的研究

李朝阳¹, 王勇刚², 黄骝¹

(1. 北京工业大学 应用数理学院, 北京 100022; 2. 中科院半导体所, 北京 100083)

摘要: 本文从半导体材料GaAs的能级结构出发,探讨了GaAs做固体激光器被动调Q器件的可行性,对离子注入半绝缘GaAs用做Nd:YAG激光器中被动调Q元件的机理进行了实验研究,实验中腔型选择直腔式平平腔,Nd:YAG采用脉冲氙灯抽运,在腔型1 Hz下获得了单脉冲宽度为62 ns的调Q波形输出。

关键词: GaAs; 被动调Q; 离子注入; Nd:YAG 激光器

中图分类号: TN242

文献标识码: A

Study of Passive Q-switched Unit of Nd : YAG Laser Using Ion-Implanted GaAs

LI Chao-yang¹, WANG Yong-gang², HUANG Liu¹

(1. College of applied mathematics and physics, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022, China;

2. Institute of Semiconductors, CAS, Beijing 100083, China)

Abstract: Proceeding from the SI-GaAs's energy level structure, the feasibility of using the ion-implanted GaAs semiconductor material as a passive Q-switched unit of solid-state lasers is discussed. The dynamic characteristic of GaAs used as passive Q-switch device is investigated experimentally. In the experiment, flat-flat cavity was adopted and Nd : YAG was pumped by a xenon lamp, and the Q-switched waveform of 62 ns single pulse width was obtained at repetition rate of 1Hz.

Keywords: GaAs; passive Q-switched; ion-implantation; Nd : YAG laser

引言

相对于主动调Q技术,被动调Q激光器具有结构简单、价格便宜、易于调节、无需任何外界驱动装置等优点。但长期以来,被动调Q技术一直受限于可饱和吸收材料的发展。由于最常用于调Q的染料物化性质不稳定,保存期比较短,在激光器高频工作或抽运功率较大时需要一定的流速,大大限制了被动调Q技术的应用^[1~2]。近年来,具有良好物理化学性能的可饱和吸收被动调Q材料的研究日益引起人们的重视,其中比较瞩目的材料是Cr³⁺:YAG。目前这种材料在灯泵和LD泵浦的各种激光器上已经得到应用^[3~5],但关于GaAs材料做被动调Q元件的研究还很少有报道。同Cr³⁺:YAG相比,GaAs做成薄片插入激光器中能有效减少损

耗,也可以直接用做激光器的输出镜,进而提高激光器的稳定性和可靠性。

本文利用离子注入GaAs半导体材料对闪光灯泵浦的Nd:YAG激光器进行被动调Q实验,当重复频率为1 Hz时,在激光器阈值附近得到了脉宽大约为62 ns的单脉冲调Q输出;当逐渐增大泵浦能量时,发现调Q开始不稳定,并出现多脉冲运转情况,但调Q现象还是占主导地位。

1 GaAs 被动调Q 速率方程理论

理论研究表明,GaAs材料做固体激光器被动调Q器件是基于深能级缺陷EL2在1.0 μm附近的吸收跃迁过程。实验证明,EL2深能级是一个双施主能级,即中性的EL2⁰能级和EL2能级上的粒

收稿日期: 2003-05-22

作者简介: 李朝阳(1973-),男,北京工业大学研究生,主要从事激光超短脉冲和非线性光学方面的研究。

子发射电子后形成带正电的EL2⁻能级。图1为GaAs的能级示意图^[6]。当GaAs样品受到1.064 μm 波长激光激发时,GaAs中EL2缺陷深能级主要发生线性单光子吸收,位于EL2⁰能级上的粒子将吸收光子并跃迁到中性的EL2⁰能级上,在价带上生成一个带正电的空穴;同时,位于EL2⁰能级上的中性粒子也将吸收光子,发射电子到导带,自身跃迁到带正电的EL2⁻能级上。由文献知道,EL2⁰能级的吸收截面为σ⁰=1.0×10⁻¹⁶ cm² EL2⁻能级的吸收截面为σ⁻=2.3×10⁻¹⁷ cm²。由于σ⁰大于σ⁻,所以GaAs吸收跃迁的结果是EL2⁰能级上的粒子数越来越少,而EL2⁻能级上的粒子数越来越多。近似地,当EL2⁰能级上的中性粒子数全部跃迁到EL2⁻能级上时,吸收趋于饱和。可见GaAs材料的EL2能级单光子跃迁过程存在一定的可饱和和吸收特性,理论上可用做激光器的被动调Q 器件。

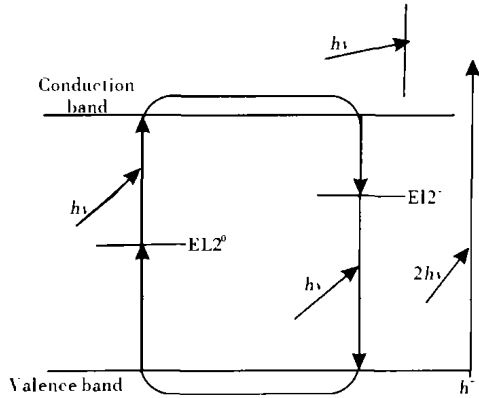


图1 GaAs 能级示意图

Fig. 1 EL₂ defect energy-level diagram of undoped semi insulating GaAs

T. K. Lim 等人综合考虑了GaAs材料EL2能级的各种因素,给出了描述GaAs被动调Q激光器的速率方程^[7]:

$$\frac{d\varphi}{dt} = [2\delta N l - 2\alpha l - \ln(1/R) - L] \frac{\varphi}{t_r} \quad (1)$$

$$\frac{dN}{dt} = -c\delta N\varphi - \frac{N}{\tau} + P_p \frac{1 - e^{-\alpha l}}{h\nu A l} \quad (2)$$

$$\frac{dn}{dt} = 2\sigma_e\varphi(N_0 - N^-) + \frac{B\varphi^2}{2} - \gamma_{en}N^- - \gamma_{hn}p \quad (3)$$

$$\frac{dp}{dt} = 2\sigma_h\varphi N^- + \frac{B\varphi^2}{2} - \gamma_{dp}(N_0 - N^-) - \gamma_{hp}p \quad (4)$$

$$\frac{dN^-}{dt} = 2\varphi[\sigma_e(N_0 - N^-) + N^- \sigma_h] + \gamma_{hp}p(N_0 - N^-) - \gamma_{en}N^- \quad (5)$$

式中α为GaAs的线性吸收系数,可由GaAs的单光子吸收特性决定,即

$$\alpha = \delta_e(N_0 - N^-) + \delta_h N^- \quad (6)$$

上式中,φ为谐振腔内光子数密度;N,δ,l分别为激光介质Nd:YAG的反转粒子数密度、受激发

射截面和晶体长度;c为真空中光速;t_r为光在腔内往返一周的时间;R为输出镜反射率;γ为Nd:YAG的反转衰减因子;L为腔内往返损耗;τ为激光上能级寿命;P_p为泵灯抽运功率;l_q为GaAs样品的厚度;N₀为EL2深能级上总的粒子数密度;N⁻为EL2⁻能级上的粒子数密度;σ_e和σ_h分别为EL2⁰和EL2⁻能级上的离子吸收截面;n和p分别为自由电子和自由空穴粒子数密度;γ_e表示电子与EL2⁻粒子的复合系数;γ_d表示空穴-EL2⁰上的粒子复合系数;γ_h是电子-空穴直接复合系数;B为GaAs的双光子吸收效应后引入的双光子吸收耦合系数,由下式确定:

$$B = 6\beta h\nu c l_q \frac{(\omega_0/\omega_q)^2}{n_q} \quad (7)$$

式中,β为双光子吸收系数;h为普朗克常量;ν为激光光波频率;ω₀和ω_q分别为激光束在激光工作物质和GaAs薄片上的光斑半径;n_q为GaAs折射率。

通常情况下,以非故意掺杂(ND)液封直拉法(LEC)生长的半绝缘GaAs材料的深能级缺陷EL2的成因主要来自两个方面:以碳原子取代砷位形成的浅受主形式和GaAs制备过程中引入过量As成分导致的富As缺陷。一般情况下其浓度都很低,饱和和吸收效应不明显。对于脉冲泵浦的Nd:YAG激光器来说,腔内振荡的激光脉冲很强,很容易达到GaAs片的饱和光强值,从而起不到调Q的作用。所以,要实现有效被动调Q,就需要可饱和吸收体具有相当大的调制深度。我们选择将As原子注入GaAs片的方法来提高EL2的浓度。实验证明,经离子注入后SI-GaAs被动调Q效果优于未经处理的GaAs材料,同时发现当注入光足够强时,被动调Q状态有向自由运转激光器转变的趋势。

在理论上,通过求解方程(1)~(5)即可确定被动调Q激光器的工作参数,但GaAs经过离子注入处理后,材料的多项指标会发生明显改变,所以对本文得到的调Q脉冲进行数值计算尚存在一定难度。

2 实验方法

实验装置如图2所示。我们采用平-平腔,激光振荡在M1和GaAs片之间形成,M1是1.064 μm全反镜。GaAs可饱和吸收片既是调Q器件,同时起输出镜的作用,厚度约450 μm,两面均镀1.064 μm的增透膜,对1.064 μm波段的光的透过率为15%,目的是一方面提高GaAs表面的人射激光功率密度,另一方面弥补离子注入后对GaAs表面造成的损伤,降低GaAs片对入射激光的散射。Nd:

YAG 晶体采用脉冲氙灯泵浦,其长度为 11 cm,直径为 8 mm。腔内引入可变光阑 A,以保证激光器以基横模运转。本实验中固定其孔径为 3 mm。L 是

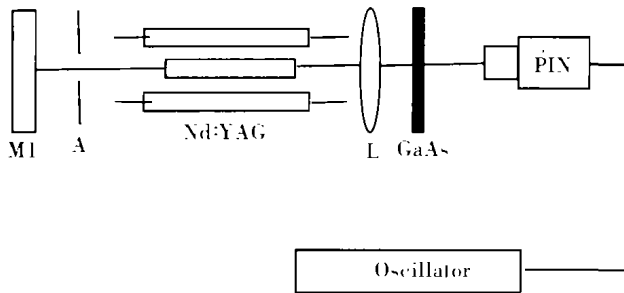


图 2 离子注入 GaAs 做被动调 Q 元件的 Nd:YAG 激光器实验装置

Fig. 2 Experimental setup of Nd:YAG laser with ion-implanted GaAs plate for passive Q switch

焦距为 65 mm 的聚焦透镜,将其固定在一个可六维调节的光学调整架上,可精确调节它到 GaAs 片的距离。PIN 是中科院半导体所海特光电公司生产的 PW410 型 InGaAs 高速光电二极管,其响应带宽为 2 GHz。信号显示由 HP-4100A 数字存储示波器完成,其分辨率为 100 MHz。

3 结果与讨论

图 3 是腔型选择 1 Hz,泵浦电压为 700 V 时获

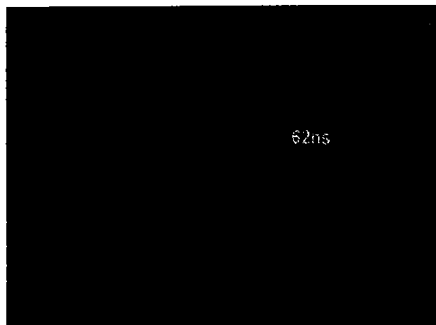


图 3 脉宽为 62 ns 的调 Q 脉冲

Fig. 3 Oscillogram of a laser single pulse that has the minimum width about 62 ns (Above: $1 \mu\text{m}/\text{div}$, Below: $200 \text{ ns}/\text{div}$)

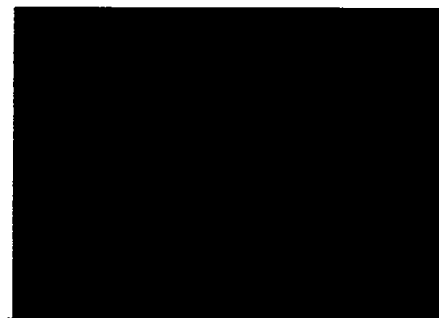
得的脉宽为 62 ns 的调 Q 脉冲。此时,激光器工作在阈值附近,泵浦电压稍微减小激光振荡就截止。这说明 GaAs 被动调 Q 从起始阶段就很显著。根据前面所讨论的 GaAs 吸收特性可知,当腔内光强比较小时, GaAs 中的单光子吸收 (SPA) 起主要作用,并具有可饱和吸收特性。由图 3 可见,深能级缺陷 EL2 上的光电离过程是 GaAs 实现被动调 Q 的主要原因。

随着腔内光强的持续增加, GaAs 材料内部将

诱发双光子吸收和自由载流子吸收等多种跃迁,进而影响激光器的被动调 Q 效果。图 4 是在不改变其它参数的情况下逐步增大泵浦电压所得的脉冲波形。比较图 4(a) 和 4(b) 可以看出,在整个增益范围内只出现一个调 Q 脉冲输出,其中 (a) 为泵浦电压为 700 V 时的波形, (b) 为泵浦电压为 730 V 时的波形。图 4(b) 中只给出 4 个比较典型的次脉冲,其重复频率为 160 kHz。从图 4(b) 可以看出,当泵浦电压稍高于阈值时,调 Q 现象开始退化,激光有多脉冲运转趋势,并且图中主脉冲宽度也有所增加,达到 80 ns。我们认为,当腔内光强较大时,虽然单光子吸收仍然占主导地位,但相比而言,自由载流子和双光子吸收对激光调 Q 的作用已不容忽视,位于导带内的自由电子和位于价带内的空穴可以直接吸收光子跃迁到更高能态上去,出现调 Q “关门”不紧的现象,激光器输出多脉冲。



(a) 泵浦电为 700 V 时的波形



(b) 泵浦电压为 730 V 时的波形

图 4 不同泵浦电压下被动调 Q 激光器的波形对比
Fig. 4 Contrast between wave forms of passive Q-switched laser at different pump voltages

不经过离子注入的 GaAs 片做激光器输出耦合镜的实验结果如图 5 所示。GaAs 片透过率为 15%, 表面未镀膜。由图 5 可见,在相同阈值泵浦电压下 (700 V), 激光器的输出是一个包含 5 个子脉冲的尖峰序列, 每个脉冲的宽度大约为 500 ns。在实验中还观察到,随着泵浦电压的增加,子脉冲个数随之增加,相邻脉冲间的间隔变窄,每个尖峰脉冲宽度均减小,这正是激光基横模自由运转的特征。由此可知,对本实验所述脉冲氙灯抽运 Nd:

YAG 激光器来说,未经离子注入的 GaAs 片达不到相应的 Q 调制深度,而经过离子注入的 GaAs 片可以有效增加 EL2 深能级缺陷的浓度,从而起到

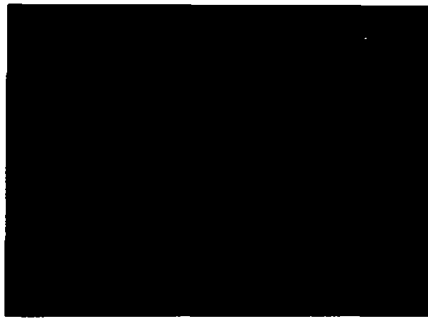


图5 未经离子注入的 GaAs 做激光器输出耦合镜实验结果

Fig. 5 Pulse shape of free-oscillating laser using non ion-implanted GaAs as output coupler(10 μ s/div)

被动调Q 的作用。我们实际测量了在不同泵浦电压下调 Q 主脉冲的脉冲宽度,结果见表 1 所示。实验发现,当泵浦电压高于 800 V 后,调 Q 现象基本截止,示波器上各个子脉冲波形之间开始变得杂乱无章,且区分不出主调 Q 脉冲,激光器有自由运转的趋势。图6 给出泵浦电压和调 Q 主脉冲宽度之间的变化关系。

表 1 不同电压下调 Q 主脉冲宽度

Table 1 Pluse-width of main Q-switched pulses under different voltages

项目编号	1	2	3	4	5
泵浦电压(V)	700	730	750	780	830
脉冲宽度(ns)	62	80	95	120	300

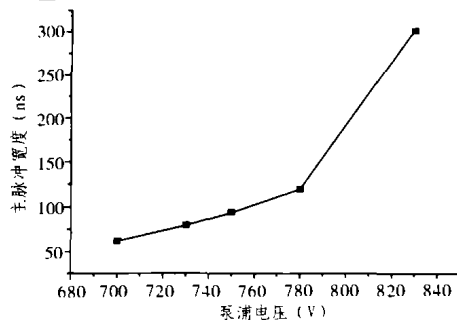


图6 泵浦电压和调 Q 主脉冲宽度之间的变化关系

Fig. 6 Pump voltages versus Q-switched pulse width

由图 6 可以看出,随着泵浦电压的增大,调 Q 主脉冲宽度展宽,在示波器上可以看到调 Q 峰值功率下降,这与主动调 Q 理论不一致。造成这一现象的原因可能是由 GaAs 材料自身的性质决定的。由于在较高的泵浦电压下 GaAs 被完全漂白,在一次泵浦期间出现了多脉冲,虽然泵浦能量提高了,但众多子脉冲也分别消耗了一次泵浦中的能量,使调 Q 主脉冲提取泵灯能量的效率下降,从而使调 Q

主脉冲展宽。

4 结论

本文报道了利用 As 离子注入 GaAs 半导体材料对闪光灯泵浦的 Nd : YAG 激光器进行被动调 Q 的实验结果。在重复频率为 1 Hz,氙灯抽运电压为 700 V 时得到了脉宽大约为 62 ns 的被动调 Q 输出的单脉冲。当逐渐增大泵浦能量时,调 Q 开始不稳定,并出现多脉冲运转情况,同时发现随着泵浦能量的增大,调 Q 脉冲宽度出现变宽的趋势。我们认为这种现象与 GaAs 材料的自由载离子和双光子吸收有关,并与同样透过率但未经离子注入的 GaAs 材料进行了对比实验,证明经离子注入处理的 GaAs 片可以有效提高深能级缺陷 EL2 的浓度,对 GaAs 被动调 Q 作用明显。

致谢:

感谢天津大学张志刚教授在实验中的指导和帮助。感谢北京工业大学激光工程院王登顺硕士提供了光阑及多组腔镜。

参考文献:

- [1] 蓝信钜. 激光技术(第一版)[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1995.
- [2] 段秀兰,袁多荣,许东. 被动 Q 开关材料的研究进展[J]. 激光与红外,31(5):266-268.
- [3] WAN Xiao-ke, LIN Li-huang, OU Yang-bin, *et al.* Saturable excited state absorption of Cr³⁺: YAG for Q-switching Nd : YAG laser [J]. Vacuum Science and Technology, 1997, 17(3):193-197.
- [4] Mackenzie J I, Shepherd D P. End-pumped, passively Q-switched Yb : YAG double-clad waveguide laser [J]. Optics Letters, 2002, 27(24): 2161-2163.
- [5] Fenic C, Stratan A, Dabu R, Mihailescu I N, *et al.* Multi-pulse passively Q-switched Nd : YAG laser for material surface cleaning [J]. SPIE, 2002, 4762: 156-161.
- [6] Valley G C, Smirl A L. Theory of transient energy transfer in gallium arsenide [J]. IEEE J Quant Electron, 1988, QE-24(2): 304-310.
- [7] T K Lim, K T Wan. Dynamics of passive Q-switching of a diode-pumped Nd : YAG laser using GaAs as the saturable absorber and output coupler [M]. SPIE, 1999, 3898: 413-424.