

# 离子注入 GaAs 实现双包层掺镱光纤激光器 被动调 Q 锁模

王勇刚<sup>1)</sup> 马晓宇<sup>1)</sup> 付圣贵<sup>2)</sup> 范万德<sup>2)</sup> 李 强<sup>2)</sup> 袁树忠<sup>2)</sup> 董孝义<sup>2)</sup> 宋晏蓉<sup>3)</sup> 张志刚<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>中国科学院半导体研究所,北京 100083)

<sup>2)</sup>南开大学现代光学研究所,天津 300071)

<sup>3)</sup>北京工业大学应用数理学院,北京 100022)

(2003 年 7 月 24 日收到,2003 年 11 月 5 日收到修改稿)

用离子注入的半绝缘 GaAs 晶片作为吸收体和输出镜,在双包层掺镱光纤激光器上实现了调 Q 锁模. 离子注入的能量为 400keV 的 As<sup>+</sup> 离子,注入剂量为 10<sup>16</sup>/cm<sup>2</sup>,然后在 600℃ 下退火 20min. 当抽运功率为 5W 时,脉冲平均输出功率为 200mW,调 Q 包络重复频率为 50kHz,半高宽为 4μs,锁模脉冲重复频率为 15MHz.

关键词:离子注入 GaAs,掺镱光纤激光器,被动调 Q 锁模

PACC:4260,4260D

## 1. 引 言

1996 年 Kajara 等<sup>[1]</sup>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<sup>[2]</sup>和 LD 抽运 Nd:YAG,Nd:YVO<sub>4</sub> 被动调 Q 运转<sup>[3,4]</sup>. Shen 等人<sup>[5]</sup>用 GaAs 兼输出镜在 Yb:YAG 激光器上获得最短达 15.5 ns,频率为 7.3kHz 的脉冲激光输出,符合激光制导等军用脉冲激光的脉冲宽度和频率要求,只是单脉冲能量太小,只有 75.6μJ. 柳强等人<sup>[6]</sup>对 GaAs 被动调 Q 兼输出耦合 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光特性进行了系统研究,得到了较好的结果.

自上世纪 80 年代后期掺稀土光纤用于激光器和放大器以来,这类光纤激光器得到了广泛的研究和迅速的发展. 在纳秒或微秒级光源方面,光纤激光器由于便于引出,在医疗、军事等领域的应用比固体激光器有独到之处. 被动锁模光纤激光器,由于其价格低廉,结构紧凑而在亚皮秒级、皮秒级乃至飞秒级光源方面有着广泛的应用. 比如作为高功率激光系统种子源,在远距离、大容量、超高速通信系统或局域网中作为高重复频率信号源等<sup>[7]</sup>. 光纤激光器的被动锁模得到了广泛的研究. 一类是附加脉冲锁模机理. 在激光谐振腔内加入非线性环形镜(NOLM)<sup>[8]</sup>或非线性放大光纤环形镜(NALM)<sup>[9]</sup>,利用光纤的克尔非线性效应形成快速开关使激光器处

于锁模运转状态. 或只通过偏振控制,利用非线性偏转旋转效应也能产生自脉冲行为<sup>[10]</sup>. 另一类是采用半导体饱和吸收体的方法,如采用 InGaAs/GaAs 超晶格结构<sup>[11]</sup>,低温生长的 GaAs(LT-GaAs)<sup>[12]</sup>以及用半导体可饱和吸收镜(semiconductor saturable absorption mirror, SESAM)<sup>[13]</sup>.

上述的光纤激光器被动锁模方法,仍然存在着设备复杂,成本过高的问题. 目前光纤激光器被动锁模采用的几种半导体饱和吸收体,都是反射式的,需要在光纤输出端增加组合输出透镜. 而且需要金属有机气相淀积(MOCVD)方法或分子束外延(MBE)方法进行材料生长,价格昂贵. 和光纤激光器被动锁模对应的可控制参数少. 本文提出了一种利用离子注入 GaAs 材料对掺镱光纤激光器进行被动调 Q 锁模兼做输出镜的方法,设备简单,成本低(采用大片加工,每个仅几十元). 尚未见报道. 我们的工作已经取得了一定的进展. 更深入的工作正在进行中.

## 2. 离子注入 GaAs 调 Q 锁模机理

GaAs 的带隙是 1.42eV,掺镱光纤激光器的波长在 1.06μm 附近,远远低于 GaAs 的带隙. 理论研究表明,GaAs 材料做固体激光器被动调 Q 器件是由于其中深能级缺陷 EL2 在 1.0μm 附近的吸收跃迁

过程所致, 现在证实 EL2 深能级其实是一个双施主能级, 即中性的 EL2<sup>0</sup> 能级和 EL2 能级上的粒子发射电子后形成的带正电的 EL2<sup>+</sup> 能级, 图 1 为 GaAs 的 EL2 能级示意图<sup>[14]</sup>. 当 GaAs 样品受到 1.064 μm 波长激光的激发时, GaAs 中 EL2 缺陷深能级将主要发生线性单光子吸收, 位于 EL2<sup>+</sup> 能级上的粒子将吸收光子跃迁到中性的 EL2<sup>0</sup> 能级上, 在价带上生成一个带正电的空穴, 同时, 位于 EL2<sup>0</sup> 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<sup>+</sup> 能级上. 由文献知道, EL2<sup>0</sup> 能级的吸收截面为  $\sigma^0 = 1.0 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ , EL2<sup>+</sup> 能级的吸收截面为  $\sigma^+ = 2.3 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ . 由于  $\sigma^0$  大于  $\sigma^+$ , 所以 GaAs 吸收跃迁的结果是 EL2<sup>0</sup> 能级上的粒子数越来越少, 而 EL2<sup>+</sup> 能级上的粒子数越来越多, 近似的当 EL2<sup>0</sup> 能级上的中性粒子数全部跃迁到 EL2<sup>+</sup> 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吸收特性, 理论上可以用做激光器的被动调 Q 器件.

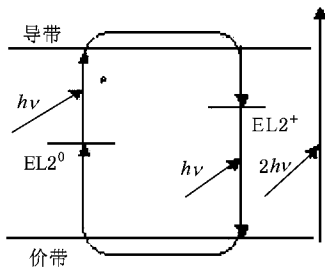


图 1 EL2 缺陷能级示意图

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 激光器的速率方程为<sup>[14]</sup>

$$\frac{d\phi}{dt} = [2\delta Nl - 2\alpha l_q - \ln(1/R) - L] \frac{\phi}{\tau_r}, \quad (1)$$

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

$$\frac{dn}{dt} = 2\sigma_e \phi (N_0 - N^+) + \frac{B\phi^2}{2} - \gamma_e n N^+ - \gamma_h n p, \quad (3)$$

$$\frac{dp}{dt} = 2\sigma_h \phi N^+ + \frac{B\phi^2}{2} - \gamma_d p (N_0 - N^+) - \gamma_h n p, \quad (4)$$

$$\frac{dN^+}{dt} = 2\phi [\sigma_e (N_0 - N^+) + N^+ \sigma_h] + \gamma_h p (N_0 - N^+) - \gamma_e n N^+, \quad (5)$$

其中  $\alpha$  为 GaAs 的线性吸收系数, 可由 GaAs 的单光

子吸收特性决定, 表示为

$$\alpha = \sigma_e (N_0 - N^+) + \sigma_h N^+, \quad (6)$$

$\phi$  为谐振腔内的光子数密度,  $N, \delta, l$  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,  $\tau_r$  为光在腔内往返一周的时间,  $R$  为输出镜反射率,  $\gamma$  为 Nd:YAG 的反转衰减因子,  $L$  为腔内往返损耗,  $\tau$  为激光上能级寿命,  $P_p$  是泵灯抽运功率,  $l_q$  为 GaAs 样品的厚度.  $N_0$  为 EL2 深能级上总的粒子数密度,  $N^+$  为 EL2<sup>+</sup> 上的粒子数密度.  $\sigma_e$  和  $\sigma_h$  分别为 EL2<sup>0</sup> 和 EL2<sup>+</sup> 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.  $\gamma_e$  表示电子与 EL2<sup>+</sup> 粒子的复合系数,  $\gamma_d$  表示空穴 - EL2<sup>0</sup> 上粒子的复合系数,  $\gamma_h$  是电子 - 空穴直接复合系数.  $B$  是考虑 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  $\beta$  为双光子吸收系数,  $h$  为普朗克常数,  $\nu$  为激光光波频率,  $\omega_0, \omega_q$  分别为激光束在激光工作物质和 GaAs 薄片上光斑的半径,  $n_q$  为 GaAs 折射率.

为了减少载流子吸收, 我们选择了半绝缘 GaAs 晶片. 半绝缘 GaAs 晶片的载流子浓度仅为  $10^5 / \text{cm}^3$ , 从我们测量的红外吸收谱看, 载流子吸收不超过 1%. 此外, 考虑到液封直拉法 (liquid encapsulated czochralski, LEC) 生长的 GaAs 晶片的 EL2 浓度要比微电子工业用 GaAs 晶片常用的生长方法: 垂直梯度凝固法 (vertical gradient freeze, VGF) 的 EL2 浓度高出三到五倍, 所以本实验采用液封直拉法生长的半绝缘 GaAs 晶片. 通常, 一般用液封直拉法生长的半绝缘 GaAs 晶片的 EL2 浓度最大为  $2.0 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ , 当然还可以通过生长条件来加以提高. 然而, 现有的对 GaAs 晶片有大量需求的光电子和微电子工业一般都要求 EL2 浓度越小越好, 如果要利用特殊要求的 GaAs 晶片进行固体激光器或光纤激光器进行调 Q, 就要生长上千片同样条件的晶片, 成本高昂而且可控制参数少. 本文通过 As<sup>+</sup> 离子注入 GaAs 的方法来增加 EL2 浓度, 可控参数有离子注入的能量、剂量、退火温度以及时间等. 至于我们使用 As<sup>+</sup> 离子注入 GaAs 在光纤激光器上观察到的并不是其他研究者在固体激光器上所观察到的调 Q 脉冲, 而是调 Q 锁模脉冲. 我们认为, 这与 As<sup>+</sup> 离子注入 GaAs 后产生的 As<sub>Ga</sub> 与 V<sub>Ga</sub> 有关. As<sub>Ga</sub> 点缺陷或淀积在 GaAs 内部形成电子陷阱, V<sub>Ga</sub> 成为空穴陷阱. 由于

EL2 能级的双光子吸收产生的载流子被  $As_{Ga}$  与  $V_{Ga}$  俘获的吸收恢复时间在几十皮秒的量级,所以就出现了调 Q 锁模的现象. 由于离子注入后的 GaAs 的反应截面等参数发生了变化,通常难以确定,我们未能根据 GaAs 被动调 Q 激光器的速率方程进行理论计算.

### 3. 离子注入 GaAs 材料的准备

我们采用的是厚为  $500\mu m$  的半绝缘 GaAs 晶片,用能量为  $400keV$  的  $As^+$  离子注入,注入剂量为  $10^{16}/cm^2$ . 我们采用 Trim95 软件对离子注入 GaAs 晶片后的分布进行了模拟. 得到了离子注入后产生的空位浓度分布如图 2 所示. 空位浓度分布与 EL2 的浓度直接相关,空位浓度越大,EL2 的浓度越大. 从图 2 可以看出,离子注入后增加的 EL2 缺陷主要分布在 GaAs 晶片的表层  $400 nm$  的范围内.

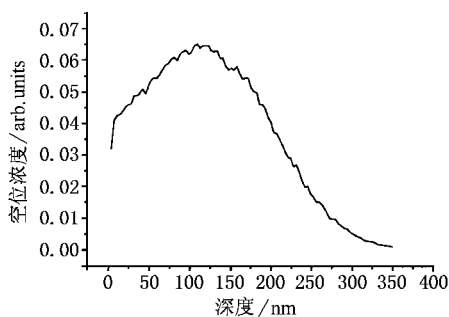


图 2 注入能量为  $400keV$   $As^+$  注入 GaAs 产生的空位浓度分布

为了减少非饱和损耗,增加被动调 Q 锁模掺镜光纤激光器的输出功率,还需要对离子注入后的 GaAs 晶片进行退火. 退火的温度过高或时间过长,会使晶片内离子注入后增加的 EL2 减少得太多,退火的温度过低或时间过短,达不到退火的效果. 在本实验中采用的退火温度是  $600^{\circ}C$ ,退火时间为  $20min$ . 随后测得的吸收谱如图 3. 纵轴代表离子注入及退火处理后的 GaAs 晶片与未经注入及退火处理的 GaAs 晶片吸收率之差. 我们认为经过处理后的 GaAs 晶片增加的光吸收率与增加的 EL2 缺陷浓度有密切关系. 从图 3 看到,在  $1060 nm$  处增加的吸收率约为  $1\%$ ,而未经过离子注入和退火的 GaAs 晶片在  $1060 nm$  处增加的吸收率远小于  $1\%$ ,由于吸收率太小,难以测定,(实际上 GaAs 晶片的吸收率是通过测量厚度为几个毫米以上的晶锭的红外吸收谱

而测定的),可以认为经过处理后的 GaAs 晶片在  $1060 nm$  处的光吸收率即为  $1\%$ . 此外,处理后的晶片在  $946nm$  处增加的吸收率在  $2\%$  以上. 这说明我们制作的调 Q 锁模吸收体也适用于 Nd:YAG 激光器  $946nm$  波长调 Q 锁模,同时说明我们选择的退火温度过高或退火时间过长. 尽管如此,我们利用这样条件加工的 GaAs 晶片取得了如下的实验结果. 为了保证能够在掺镜光纤激光器上使用,对经过处理的 GaAs 晶片两面分别镀上增透膜和高反膜,增透膜的反射率在  $4\%$  以下,高反膜的反射率在  $90\%$  以上,使其在  $1060 nm$  波长处总的透过率为  $2.8\%$ .

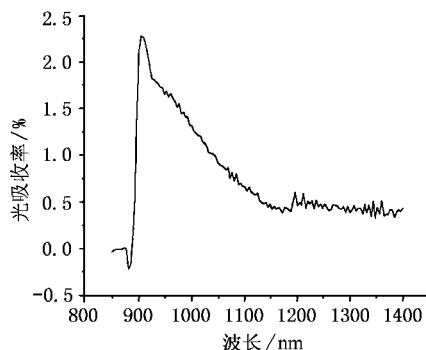


图 3 离子注入并退火处理后的 GaAs 晶片增加的光吸收率与光波长关系

### 4. 用离子注入 GaAs 对掺镜光纤激光器进行被动调 Q 锁模

我们采用掺  $Yb^{3+}$  光纤激光器进行被动调 Q 锁模实验. 实验的光路图如图 4 所示. 光纤长度为  $10m$ ,抽运芯径为  $10\mu m$ ,数值孔径为  $0.36$ ,抽运包层截面形状为 D 形,圆边直径为  $400\mu m$ ,直边为  $260\mu m$ . GaAs 晶片的增透膜表面正对光纤,并且与光纤垂直,高反膜表面作为光输出面. 抽运功率为  $5W$  时,输出调 Q 锁模脉冲中心波长为  $1060nm$ ,输

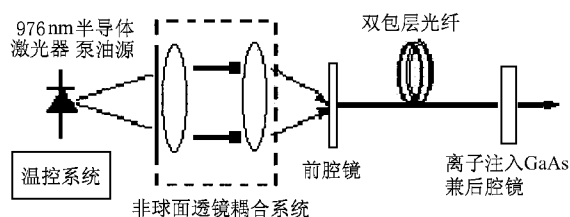


图 4 端面抽运掺  $Yb^{3+}$  双层光纤激光器用离子注入 GaAs 被动调 Q 锁模实验装置图

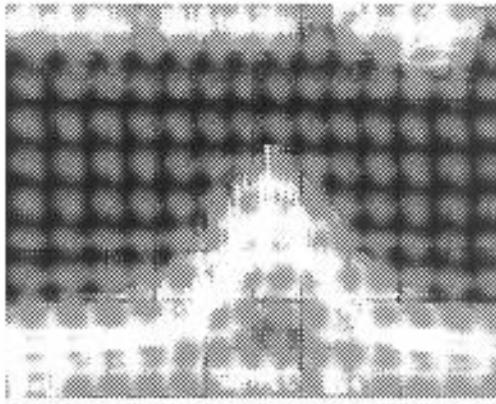


图 5 掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤激光器用离子注入 GaAs 被动调 Q 锁模调 Q 包络

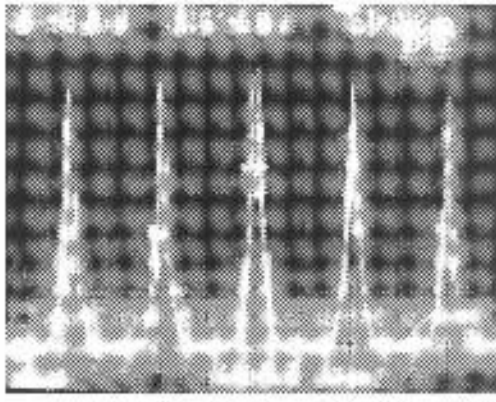


图 6 掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤激光器用离子注入 GaAs 被动调 Q 锁模调 Q 包络序列

输出功率达到 200 mW,被动调 Q 锁模调 Q 包络如图 5 所示,包络宽度为  $4\mu\text{s}$ ,调制深度为 50%左右,调 Q 包络序列如图 6 所示,调 Q 包络的能量为  $4\mu\text{J}$ ,频率

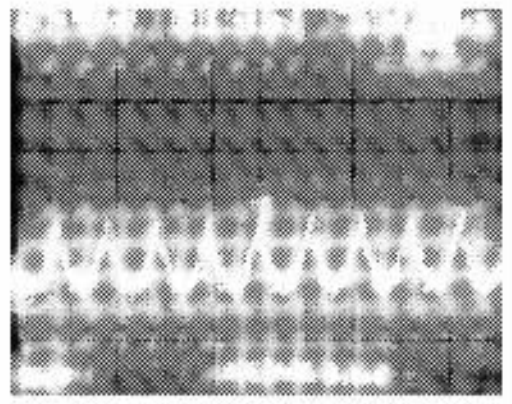


图 7 掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤激光器用离子注入 GaAs 被动调 Q 锁模调 Q 包络内锁模脉冲序列

为 50kHz. 图 7 为调 Q 包络内取的一部分锁模脉冲序列. 根据锁模原理中腔长与频率的关系  $f = c/2L$ , 我们可以得到,在光纤长为 10m 时,对应的锁模重复频率为 15MHz,也就是说锁模脉冲间隔为 67ns. 由图 7 看到,锁模脉冲是符合腔长与频率关系的,即可以判断所观察到的现象就是调 Q 锁模. 由于实验条件限制,我们未能测量出锁模脉冲的实际宽度,进一步的工作正在进行中.

## 5. 结 论

我们用能量为 400keV 的  $\text{As}^+$  离子进行注入,注入剂量为  $10^{16}/\text{cm}^2$ ,然后在  $600^\circ\text{C}$  下退火 20min 的半绝缘 GaAs 晶片作为吸收体,在双包层掺镱光纤激光器上实现调 Q 锁模. 抽运功率为 5W,脉冲输出功率为 200mW,调 Q 包络频率为 50kHz,半宽为  $4\mu\text{s}$ ,锁模脉冲频率为 15MHz.

- [ 1 ] Kajara T T and Gaeta A L 1996 *Opt. Lett.* **21** 1244  
 [ 2 ] Li P *et al* 2000 *Acta Opt. Sin.* **20** 744( in Chinese ) [ 李平 等 2000 光学学报 **20** 744 ]  
 [ 3 ] Gu J H, Zhou F, Xie W J, Tan S C and Lan Y L 1999 *Opt. Commun.* **165** 245  
 [ 4 ] Gu J H, Zhou F, Wan K T, Lim T K, Tan S C, Lan Y L, Xu D S and Cheng Z H 2001 *Opt. Laser. Engineer.* **35** 299  
 [ 5 ] Shen D Y, Tang D Y and Kong J 2002 *Opt. Commun.* **211** 271  
 [ 6 ] Liu Q *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2756( in Chinese ) [ 柳强 等 2002 物理学报 **51** 2756 ]

- [ 7 ] Liang J Z *et al* 2002 *Chin. J. Lasers* **29** 865( in Chinese ) [ 梁建中等 2002 中国激光 **29** 865 ]  
 [ 8 ] Doran N J, David Wood 1998 *Opt. Lett.* **13** 56  
 [ 9 ] Fermann M E *et al* 1990 *Opt. Lett.* **15** 752  
 [ 10 ] Tamura K, Haus H A and Ippen E P 1992 *Electron. Lett.* **28** 2226  
 [ 11 ] Zirngibl M *et al* 1991 *Electron. Lett.* **27** 1734  
 [ 12 ] Leitner M, Glas P, Sandrock T and Wrage M 1999 *Opt. Lett.* **24** 1567  
 [ 13 ] Paschotta R *et al* 1999 *Opt. Lett.* **24** 388  
 [ 14 ] Valley G C *et al* 1988 *IEEE J. Quant. Electron* QE-**24** 304

# Passive Q-switched mode locking of double-cladding Yb fiber laser with ion-implanted GaAs

Wang Yong-Gang<sup>1)</sup> Ma Xiao-Yu<sup>1)</sup> Fu Sheng-Gui<sup>2)</sup> Fan Wan-De<sup>2)</sup> Li Qiang<sup>2)</sup>

Yuan Shu-Zhong<sup>2)</sup> Dong Xiao-Yi<sup>2)</sup> Song Yan-Rong<sup>3)</sup> Zhang Zhi-Gang<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>*(Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)*

<sup>2)</sup>*(Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)*

<sup>3)</sup>*(School of Applied Mathematics and Physics, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)*

(Received 24 July 2003; revised manuscript received 5 September 2003)

## Abstract

We report the technique of the ion-implanted semi-insulating GaAs wafer used for passive Q-switched mode locking in double-cladding Yb fiber laser. The wafer was implanted with 400-keV energy,  $10^{16}/\text{cm}^2$  dose  $\text{As}^+$  ions, and was annealed at  $600^\circ\text{C}$  for 20 min. At the pump power of 5W, we achieved output power of 200mW. The repetition rate of envelope of Q-switched mode locking is 50-kHz with a FWHM envelope of  $4\mu\text{s}$ . The repetition rate of mode locked pulse train was found to be 15-MHz. This is the first report of such a kind of laser to the best of our knowledge.

**Keywords** : ion-implanted GaAs, Yb fiber laser, passive Q-switched mode locking

**PACC** : 4260, 4260D