

# 减反膜外腔半导体激光器特性的研究<sup>\*</sup>

刘四平 张玉驰 张鹏飞 李刚 王军民 张天才<sup>†</sup>

(量子光学与量子器件国家重点实验室, 山西大学光电研究所, 太原 030006)

(2008 年 4 月 7 日收到, 2008 年 5 月 29 日收到修改稿)

研究了镀减反膜 GaAs 半导体激光器在 Littrow 式外腔结构中的输出特性. 采用电流补偿技术, 得到了约 30 GHz 的连续无跳模调谐范围. 利用外差拍探测技术获得激光器输出线宽约为 120 kHz. 还研究了激光器的强度噪声分别随着电流与波长变化的特点并对此进行了分析. 该类激光器可以广泛应用于冷原子物理、激光光谱以及量子光学等许多领域.

关键词: 减反膜, 半导体激光器, 线宽, 强度噪声

PACC: 4255P, 4260, 0765

## 1. 引 言

自 1962 年问世以来<sup>[1,2]</sup>, 半导体激光器在原子物理等很多领域获得了广泛应用. 外腔技术出现以后, 逐步发展形成外腔半导体激光器(external cavity diode laser, ECDL)<sup>[3,4]</sup>, 因可调谐、窄线宽等特点, ECDL 大大扩展了其在光学技术、原子物理、精密测量等方面的应用<sup>[5]</sup>. 随后人们发现减反膜激光器与外部反馈技术相结合可以进一步改善半导体激光器的性能<sup>[6-10]</sup>. Wyatt 与 Devlin 利用减反膜技术与光栅外腔反馈技术得到了线宽为 10 kHz 以及调谐范围达 55 nm 的激光输出<sup>[7]</sup>. Wandt 与 Laschek 在 Littman 式的外腔反馈半导体激光器结构中, 激光管前端镀有减反膜(反射率  $R = 2.4 \times 10^{-4}$ ), 当输出波长为 825 nm 时, 能够无跳模连续调谐 40 nm<sup>[8]</sup>. Lonsdate 等研究了镀有减反膜(反射率  $R \leq 8 \times 10^{-5}$ ) 的多量子阱的 InGaIn 半导体激光器的特性, 测得其线宽小于 11 MHz, 最大调谐范围为 6.3 nm<sup>[6]</sup>. Hildebrandt 等人利用外差拍探测技术测得镀减反膜( $R < 10^{-5}$ ) 的 Littrow 式的半导体激光器的线宽为 0.8 MHz, 并且获得了连续无跳模调谐范围为 50 GHz<sup>[9]</sup>. 不久前, Nyman 等人获得了线宽大约为 400 kHz, 无跳模范围为 5 GHz, 连续稳定运转 30000 h 的镀减反膜半导体

激光输出<sup>[10]</sup>. 这些进展为原子物理带来了极大的方便, 但是, 与钛宝石激光器相比较, 半导体激光器在其输出质量上还存在着一定的差距. 在原子操控与激光光谱研究中, 人们迫切需要获得成本低、阈值低(高效率)、输出功率高、线宽窄、噪声(强度噪声与位相噪声)低以及调谐范围大的激光光源. 通过特殊设计和合理地选择参数, 利用减反膜半导体激光器与光栅反馈相结合, 能够在上述综合性能方面取得实质性的进展.

本文正是基于这个目的, 系统研究了镀减反膜 ECDL 的特性. 经过精心设计, 采用镀减反膜半导体激光器和光栅反馈获得了稳定的激光输出. 我们较为全面地对同一激光器的多种特性, 包括调谐、线宽、噪声等进行了研究, 获得了中心波长在 830 nm 附近连续调谐达 30 GHz, 线宽约为 120 kHz, 噪声接近量子噪声极限, 可以长时间连续稳定运转的激光光源, 并获得了激光器工作的最佳参数. 这类激光器在许多情况下为取代钛宝石激光器提供了可能. 该研究对于扩展这种激光器的应用, 尤其是在研究冷原子物理和激光光谱中对原子操控的影响, 具有非常重要的意义.

## 2. 实验装置

实验装置如图 1 所示, 我们的外腔半导体激

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号: 10434080, 60578018), 基金委创新团队基金(批准号: 60821004), 国家重点基础研究发展计划(973)项目(批准号: 2006CB921102), 教育部重大项目培育计划和创新团队和山西省留学基金和明星计划资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: tczhang@sxu.edu.cn

光器采用了两个镀减反膜的 GaAs 半导体激光二极管 (EYP-RWE-0850-1500-SOT02-0000, Eagleyard Photonics). 图 2 是该激光管的输出光谱特性, 其中心波长约为 830 nm, 输出端面的反射率小于  $10^{-3}$ . 该激光器采用 Littrow 式外腔反馈结构, 提供反馈的全息光栅 (15 mm × 15 mm, 1800 line/mm) 的一级衍射效率大约为 15%. 在此条件下, 实验中测得激光器的阈值约为 49 mA. 激光输出后分别经过光学隔离器 (隔离度大于 50 dB) 来减少光学反馈, 再经过整形棱镜对进行光束整形, 然后在偏振分束器 (PBS<sub>1</sub>) 上重合. 其中一束通过半波片 (HWP<sub>1</sub>) 后经偏振分光棱镜 (PBS<sub>2</sub>) 分成两束, 分别用于波长监视 (High Finesse WM: WS-7, Angstrom) 和拍频信号的测量 (APD<sub>3</sub>: C30659-900-R5B, Perkin Elmer; SA: HP4396B), 分别获得激光器的输出波长与线宽特性. 在实验过程中, 需要仔细调整光栅, 确保它们的运转条件基本一致. 当两台激光器的波长非常接近, 并且两者的频率差在探测器的带宽范围内时, 可以获得差拍信号. PBS<sub>1</sub>

的另一端出射光经过 50/50 分束器后, 一部分用于测量激光器的强度噪声 (APD<sub>1</sub> 和 APD<sub>2</sub>). 在此, 我们采用了自平衡零拍技术来测量激光器的强度噪声<sup>[1]</sup>. 用于测噪声的这部分光分为强度相等的两束, 分别进入对称的低噪声光电探测放大器 APD<sub>1</sub> 与 APD<sub>2</sub> (自制 DZT-A 低噪声探测器, 量子效率约为 85%), 从探测器输出的信号经过加减法器 (自制, 共模抑制比大约为 50 dB) 运算后, 由频谱分析仪 SA (HP4396B) 进行观察与记录. 来自 PBS<sub>1</sub> 的另一部分光经过模式匹配后进入共焦 F-P 腔 (自由光谱区 FSR = 750 MHz) 监视激光模式. 为了进一步研究镀减反膜半导体激光器的调谐特性, 实验中我们采用了电流补偿技术, 即在扫描激光器压电陶瓷时, 同时该扫描信号会对激光器的前置电流产生小幅度的调制. 由于半导体激光器中模式跳变与其偏置电流有很大的关联, 实验过程中仍然需要选择合适的工作电流与扫描电压来减少跳模对实验的影响.

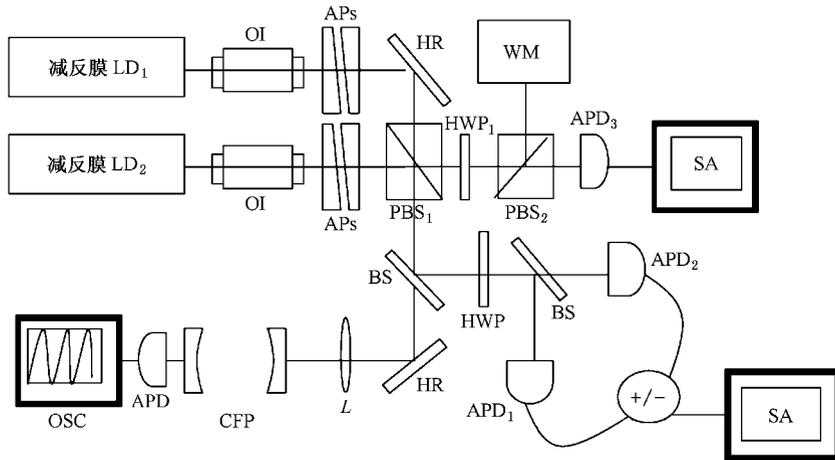


图 1 实验装置图 (OI: 光学隔离器, APs: 整形棱镜对, HR: 45°全反镜, HWP: 半波片, PBS: 偏振分光棱镜, BS: 50/50 分束器, L: 透镜, APD: 光电探测器, WM: 波片计, SA: 频谱分析仪, CFP: 共焦 Fabry-Perot 腔, OSC: 示波器)

### 3. 实验结果

#### 3.1. 线宽特性

实验中激光器的温度控制在 26°C, 温度波动小于  $\pm 2$  mK. 我们首先测量了激光器的输出线宽特性. 在测量线宽时, 将其中一台激光器作为参考, 调节另一台激光器的波长, 通过波长计 (准确度可以达到 0.001 nm) 来监视两台激光器的波长. 实验中获得

两台激光器的波长  $\lambda = 828.813$  nm 左右. 图 3 中 ● 是记录的实验数据, 实线为洛伦兹拟合的结果, 其半高宽约 240 kHz. 在外差拍探测中, 当两台激光器的线宽可以认为相同或可比拟时, 拍频信号的半高宽的一半为每台激光器的线宽, 因而我们可以得到该减反膜半导体激光器的线宽约为 120 kHz.

为了进一步确认该激光器的线宽, 我们还在一倍、两倍、三倍与四倍阈值附近分别测量了线宽, 实验结果表明, 激光器的线宽随电流的变化没有显著的改变. 我们同时也尝试改变激光器的温度, 并没有

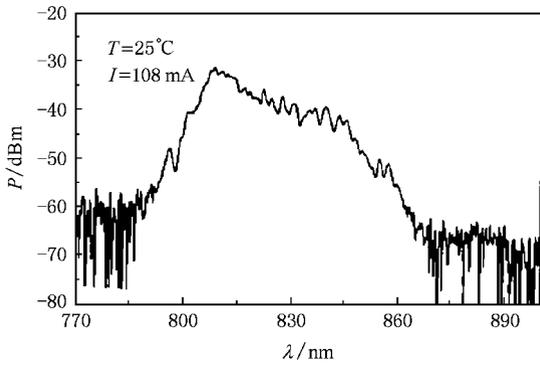


图2 EYP-RWE-0850-1500-SOT02-0000 的光谱特性(其中心波长约为 830 nm)

观察到线宽有明显的改变。

半导体激光器的线宽受到多种因素的影响,包括增益介质、腔的长度、输出端面的透射、电流噪声以及外部环境的各种干扰,在外部光学反馈下,与外腔长度和外部光栅的参数也有关系<sup>[12]</sup>。目前尚缺乏一个完整的模型把多种因素考虑进去。在目前的结构中,ECDL 的线宽主要不是受到自发辐射(Schawlow-Townes 极限)<sup>[13]</sup>的制约,我们能够改善的主要是各种外部的所谓技术噪声,包括机械、声学扰动、电流噪声等等,这些因素虽然无法确切地定量描写,但是改善这些条件无疑对获得窄的线宽有很大的帮助<sup>[10]</sup>。为此我们将激光器整体密封起来,并用隔振材料来减弱外部的各种扰动,这样就大大减弱了噪声对测量线宽的影响。

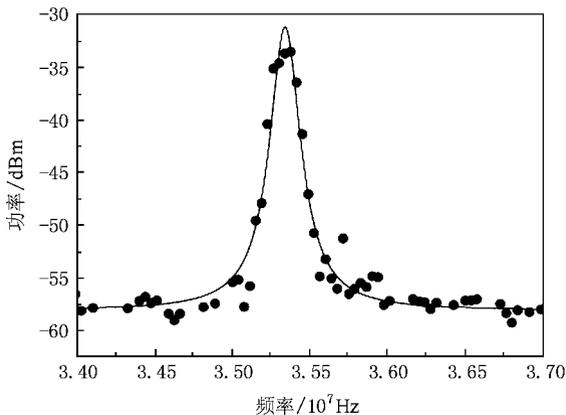


图3 两台激光器拍频信号(VBW:10 kHz,RW:10 kHz,sweep time:1.2 s,●为实测数据,实线为洛伦兹拟合结果)

### 3.2. 强度噪声的测量

在进行噪声测量的实验过程中,模式分配噪声

是强度噪声的主要来源之一<sup>[14]</sup>,因此强度噪声会随着模式跳变发生很大的变化。ECDL 是由内腔与外腔组成的复合腔,相对于外部反馈,如果端面的反射率比较高,激光模式就会受到外腔的扰动从而引起强度噪声增强甚至振荡输出<sup>[15]</sup>。随着激光器的输出端面反射率的降低,内腔与外腔之间的模式竞争就会减弱。采用镀减反膜技术,大大降低了与外腔反馈的模式竞争,进而抑制边模,提高边模抑制比<sup>[14,16]</sup>,同时增强光学反馈量,使得激光器稳定工作在强反馈区。模式的跳变通常又是由反馈信号的位相与振幅变化所引起的,而其又与激光器的电流与温度有着直接的关系,因此我们可以适当地选择激光器的工作电流与温度参数,寻找一个稳定的工作范围,从而达到降低强度噪声的目的。实验过程中我们仍然把激光器的温度控制在 $(26 \pm 0.002)^\circ\text{C}$ ,同时改变激光器的电流,测量在不同电流值时激光器处于稳定单模运转时的噪声。图4给出了强度噪声与散粒噪声(shot noise)的比值随电流的变化关系。●为实验数据,实线是根据理论计算拟合的结果<sup>[17]</sup>,二者能够较好地符合。根据实验结果,我们可以观察到:强度噪声随着电流的增大而降低,在驱动电流数倍于阈值电流后逐渐趋于量子散粒噪声<sup>[18-20]</sup>。这与工作电流远高于阈值时,激光器的噪声近似为相干光的噪声相一致<sup>[21]</sup>。

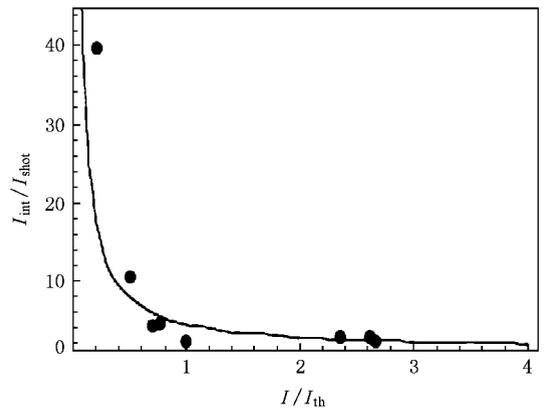


图4 强度噪声随着激光器电流的变化曲线(激光器温度为 $(26 \pm 0.002)^\circ\text{C}$ ,分析频率为 5 MHz,激光器阈值为 49 mA,实线为理论计算值,●为实验测量数据)

由于该激光器的阈值偏高以及整个系统的量子效率较低( $n_p/n_e \approx 25.4\%$ , $n_p$ 为光子数, $n_e$ 为电子数),因此就目前这个系统,其强度噪声还不能低于散粒噪声,并获得所谓强度压缩光输出<sup>[22,23]</sup>,但是如果设法降低激光器的运转阈值,比如将激光器控制

到液氮温度来大幅度降低其阈值并提高系统的量子效率, 仍然可望获得强度压缩光输出<sup>[24]</sup>.

我们还在实验上测量了激光输出的强度噪声随着波长的变化情况, 实验结果如图 5 所示. 从该结果可以看出: 当波长在  $\lambda = 858 \text{ nm}$  附近时, 激光器的强度噪声相对达到了最小. 其原因是因为激光器的工作性能主要受光学反馈量的影响. 在波长  $\lambda = 858 \text{ nm}$  附近, 光栅的一级衍射效率大约为 17%, 这一反馈量对应的工作性能较好. 由光栅的性能可以知道, 对于 P 偏振, 其一级衍射效率将会随着波长改变发生变化. 实际上, 过大或者过小的光学反馈对激光器的噪声抑制都不利<sup>[25]</sup>. 当然, 由于实际过程中存在反馈耦合率, 系统的稳定性等各种因素, 要确切知道激光器内部实际反馈量的大小, 还需要做很多相关的测量<sup>[26]</sup>. 但就目前的实验参数, 在波长  $\lambda = 858 \text{ nm}$  附近, 选择一级反馈量约为 17% 的光栅, 可以明显抑制激光器的强度起伏.

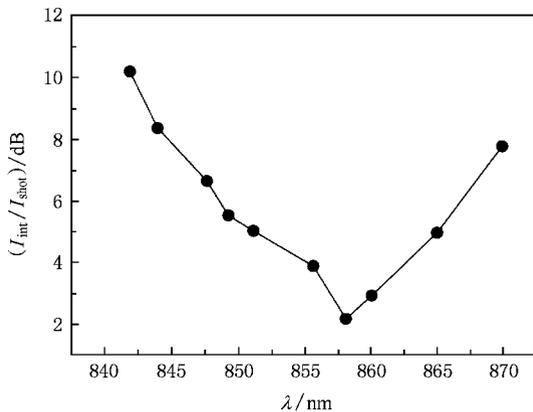


图 5 强度噪声随着激光波长的变化情况(激光器工作电流为 92 mA, 分析频率为 5 MHz, 激光器温度为  $(26 \pm 0.002)^\circ\text{C}$ )

### 3.3. 调谐特性

在实验中, 我们采用了电流补偿技术来改善半导体激光器的连续无跳模调谐特性, 并通过 F-P 模式监视腔测量了激光器无跳模调谐范围. 加在激光

器压电陶瓷(PZT)的扫描电压会同时对激光器产生小幅度的偏置电流调制, 因此在改变 PZT 的扫描电压时, 我们只需观察连续扫描过的自由光谱区数目就能判断其无跳模范围. 在本实验中, 我们能连续扫描 41 个自由光谱区(FSR = 750 MHz), 即对应的无跳模范围约为 30 GHz.

在 ECDL 中, 如果激光器镀有减反膜, 在外加相等偏置电流时, 其腔内的光强强度将比非减反膜的要低<sup>[10]</sup>. GaAs 是异质结材料, 当工作在阈值以上时, 因受激辐射损耗的载流子将与由电流注入而来的电子保持平衡状态, 载流子数目的增加进而促使带隙的增大. 在我们的实验中, 激光管输出端面镀有减反膜, 其反射率小于  $10^{-3}$ , 这使得半导体材料的增益谱宽加大, 因而大大扩展了其调谐范围. 当然, 调谐范围会随着激光器的电流与温度改变有很大的变化, 并且与合理的机械结构设计有关<sup>[27]</sup>. 只有选择合适的工作点, 才能够使得调谐范围满足实验的要求. 对于减反膜激光器, 其调谐特性已经得到了很大的提高. 这样的调谐范围已经完全能够适用于一般的原子物理实验.

## 4. 结 论

本文较为全面地研究了镀减反膜半导体激光器在外部光栅反馈下的特性. 我们采用了结构相似的两套激光器系统和相应的测量系统, 对激光器的线宽、噪声和调谐特性进行了实验研究和分析. 我们得到激光器的线宽约为 120 kHz, 激光器的线宽随着激光器的电流与温度没有明显变化, 连续调谐范围达到 30 GHz, 获得了强度噪声随电流和工作波长的变化关系. 在光栅的一级衍射效率大约为 17%, 输出波长为 858 nm, 工作电流在四倍阈值左右时, 强度噪声接近量子散粒噪声水平. 该激光作为一种线宽窄、调谐范围宽、噪声低的光源, 具有非常广泛的用途.

[1] Hall R N, Fenner G E, Kingsley J D *et al* 1962 *Phys. Rev. Lett.* **9** 366

[2] Nathan M I, Dumke W P, Burns G *et al* 1962 *Appl. Phys. Lett.* **1** 62

[3] Ricci L, Weidemüller M, Esslinger T *et al* 1995 *Opt. Commun.* **117** 541

[4] Liu K, Littman M G 1980 *Opt. Lett.* **6** 117

[5] Cassetari D, Arimondo E, Verkerk P 1978 *Opt. Lett.* **23** 2224

[6] Lonsdale D J, Wills A P, King T A 2002 *Meas. Sci. Technol.* **13** 488

[7] Wyatt R, Devlin W J 1983 *Electron. Lett.* **19** 110

[8] Wandt D, Laschek M, Przyklenk K *et al* 1996 *Opt. Commun.* **130** 81

[9] Hildebrandt L, Knispel R, Stry S *et al* 2003 *Appl. Opt.* **42** 2110

- [ 10 ] Nyman R A , Varoquaux G , Villier B *et al* 2006 *Rev. Sci. Instrum.* **77** 033105
- [ 11 ] Zhang J , Chen Y L , Zhang T C , Zhang K S , Xie C D , Peng K C 2000 *J. Opt. Soc. Am. B* **17** 1695
- [ 12 ] Genty G , Gröhn A , Talvitie H *et al* 2000 *IEEE J. Quantum Electron.* **36** 1193
- [ 13 ] Schawlow A L , Townes C H 1958 *Phys. Rev.* **112** 1940
- [ 14 ] Zhang Y C , Wang X Y , Li G *et al* 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2202 ( in Chinese )[ 张玉驰、王晓勇、李刚等 2007 物理学报 **56** 2202 ]
- [ 15 ] Geng T , Li G , Zhang Y C , Wang J M , Zhang T C 2005 *Optics Express* **13** 5904
- [ 16 ] Marin F , Bramati A , Giacobino E *et al* 1995 *Phys. Rev. Lett.* **75** 4606
- [ 17 ] Yamamoto Y , Machida S 1986 *Phys. Rev. A* **34** 4025
- [ 18 ] Wieman C E 1991 *Rev. Sci. Instrum.* **62** 1
- [ 19 ] Yamamoto Y , Machida S , Nilsson O 1986 *Phys. Rev. A* **34** 4025
- [ 20 ] Machida S , Yamamoto Y , Itaya Y 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 1000
- [ 21 ] Machida S , Yamamoto Y 1986 *IEEE J. Quantum Electron.* **56** 58
- [ 22 ] Zhang T C , Poizat J Ph , Grellu P *et al* 1995 *J. Opt. B* **7** 601
- [ 23 ] Zhang T C , Li T Y , van Effenterre D *et al* 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 1498 ( in Chinese )[ 张天才、李廷鱼、van Effenterre D 等 1998 物理学报 **47** 1498 ]
- [ 24 ] Dong R F , Zhang J X , Zhang T C , Xie C D 2002 *Opt. Commun.* **201** 10
- [ 25 ] Machida S , Yamamoto Y 1989 *Opt. Lett.* **14** 1045
- [ 26 ] Zhang T C , Wang J M , Hou Z J *et al* 1997 *Acta Sinica Quantum Optica* **3** 242 ( in Chinese )[ 张天才、王军民、侯占佳等 1997 量子光学学报 **3** 242 ]
- [ 27 ] Fletcher C S , Close J D 2004 *Appl. Phys. B* **78** 305

## Experimental study on the properties of the AR-coated external cavity diode lasers<sup>\*</sup>

Liu Si-Ping Zhang Yu-Chi Zhang Peng-Fei Li-Gang Wang Jun-Min Zhang Tian-Cai<sup>†</sup>

( State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices , Institute of Opto-electronics , Shanxi University , Taiyuan 030006 , China )

( Received 7 April 2008 ; revised manuscript received 29 May 2008 )

### Abstract

The properties of the Anti-Reflection coated ( AR-coated ) GaAs diode lasers are investigated systematically in Littrow configuration. The tuning range of about 30 GHz is obtained without any mode-hops by the current compensation technique. Using a heterodyne detection technique , the linewidth of the AR-coated ECDL is measured , which is about 120 kHz. We also investigate the intensity noise of the AR-coated ECDL as a function of the current and the wavelength. The relations between the intensity noise of the ECDL and the driving current and wavelength are obtained and analyzed. This laser system can be used in many areas , such as atomic physics , laser spectroscopy and quantum optics , etc.

**Keywords :** AR-coated , semiconductor laser , linewidth , intensity noise

**PACC :** 4255P , 4260 , 0765

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 10434080 , 60578018 ) , the Project for Excellent Research Team ( Grant No. 60821004 ) , the 973 Program ( Grant No. 2006CB921102 ) , the CFKSTIP and PCSIRT from Ministry of Education of China , and Project for Returned Scholars of Shanxi Province and Taiyuan Mingxingproject.

<sup>†</sup> E-mail : tczhang@sxu.edu.cn