

文章编号: 1001-3806(2008)06-0645-03

光栅反馈频率可调谐扩展腔半导体激光器

杨旭东, 李淑静, 曹学敏, 王海*

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

摘要: 为了实现半导体激光器在 795nm 处的单模输出, 采用输出端面镀有增透膜的半导体激光二极管作光源, 用光栅反馈的方法构成扩展腔, 研制了波长为 795nm、频率可调谐半导体激光器, 并对该激光器进行了实验测试, 可知其频率连续调谐范围约 7.6GHz, 激光线宽约为 2.5MHz, 运行在 110mA 时输出功率达 43mW。结果表明, 该半导体激光器可用于激光与铷原子相互作用中的量子相干效应的研究。

关键词: 激光技术; 扩展腔半导体激光器; 增透膜; 光栅反馈; 拍频

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A

Grating-feedback frequency-tuning extended-cavity laser diode

YANG Xu-dong, LI Shu-jing, CAO Xue-min, WANG Hai

(The State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Optoelectronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract In order to obtain the single mode output of a diode laser in 795nm, a system of anti-reflection-coated frequency-tuning diode laser with grating-feedback extended-cavity was presented. Experiments were executed in the laser diodes in 795nm with a mode-hop-free continuous scanning range of roughly 7.6GHz. The result shows the output linewidth is about 2.5MHz and the output power can achieve more than 43mW with a 110mA injection current. The diode laser can be very useful in the research of atomic coherent effect when laser interacts with Rb atoms.

Key words laser technique; extended-cavity diode laser; anti-reflection coating; grating feedback; beam beating

引 言

半导体激光器(LD)以其体积小、效率高、便于操作、输出功率稳定等优点受到了人们的普遍关注, 上世纪 80 年代以后, 波长可调谐半导体激光器得到了飞速发展, 被广泛应用于光纤通信、高分辨率激光光谱、光与原子相互作用等研究领域。近年来, 采用光栅反馈技术, 人们将自由运转时约 20MHz 线宽的半导体激光器压窄到 1MHz~2MHz, 并使其频率连续可调谐范围达到几个吉赫兹, 为原子冷却与俘获、光与原子作用中的量子相干效应的研究提供了很好的相干光源。光栅反馈频率可调谐半导体激光器中的激光二极管可分为两种, 一种输出端面不镀增透膜, 另一种输出端面镀有增透膜。对于输出端面不镀增透膜的半导体激光器,

人们已做了大量的研究^[1-6], 并已有产品销售。对于输出端面镀有增透膜的半导体激光器, 近年来也逐渐受到了人们的重视, 人们对其开展了许多研究, 发现其可工作波长范围较大^[7], 这就进一步拓展了半导体激光器的应用潜力。

在激光与铷(Rb)原子相互作用的量子相干效应的研究中, 要求半导体激光器输出窄线宽(2MHz左右)单频激光, 同时频率连续调谐范围宽(大于7GHz)且输出功率较高(需达到约50mW)。为了开展这方面的研究, 采用输出端面镀有增透膜的半导体二极管作激光光源, 用光栅反馈构成扩展腔, 研制了波长为795nm、频率可调谐扩展腔半导体激光器, 其频率连续调谐范围约7.6GHz, 激光线宽约为2.5MHz, 运行在110mA时输出功率达43mW, 从而为冷原子物理及电磁感应透明实验的深入开展提供了良好光源。

1 实验装置及结果

激光器结构如图 1 所示, 半导体激光管固定在激光紫铜底座 1 上, 准直透镜固定在透镜紫铜支架 2 上, 放置于激光管前方, 两个底座都被固定在 1 块俯仰可调的铜底座 3 上, 该铜底座由弹性较高的磷青铜制成。

基金项目: 山西省自然科学基金资助项目(2007011004); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20060108002); 山西省回国留学人员科研基金资助项目

作者简介: 杨旭东(1980-), 男, 博士研究生, 主要从事光与原子相互作用方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: wangha@sxu.edu.cn

收稿日期: 2007-09-07; 收到修改稿日期: 2008-01-29



Fig 1 Photograph of the LD system

1个全息光栅安装于另一磷青铜调节架 4上,通过调节该磷青铜调节架上的螺杆 5可以调整光栅的水平取向,即光栅的衍射角度。在全息光栅与磷青铜调节架之间粘合着压电陶瓷(美国 Thorlabs公司生产,型号为 AE0203D04),通过改变加在压电陶瓷上的电压就可以进一步精确调节外腔腔长。而光栅的俯仰角度则可通过调节铜底座上的螺杆 6来实现。底座内激光管正下方装有热敏电阻,并和最底端的 Peltier元件(热电制冷块)一起构成温控装置。

实验装置图如图 2所示。图中有压电传感器 (piezoelectric transducer, PZT), 饱和吸收装置 (saturation absorption spectroscopy SAS), 偏振分束棱镜 (polarization beam splitter PBS), 全反镜 M, 半导体激光器 LD, 分束器 (beam splitter BS), 光电探测器 D 和透镜 L。

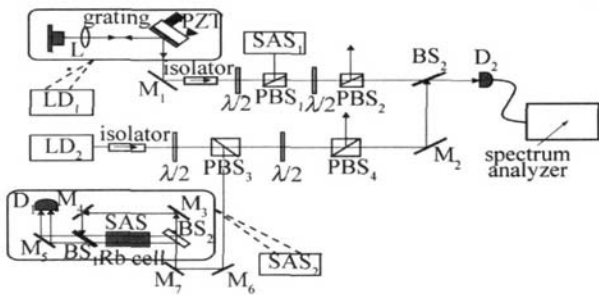


Fig 2 Experiment setup

激光器采用德国 Eagleyard Photo公司生产的型号为 EYP-DFB-0840-06010-1500的激光二极管,其输出端面镀有增透膜。由于输出端面的增透膜可以使半导体激光二极管的增益范围加大^[8-9],因而对于中心波长为 790nm 的激光管,其自由运转时光谱波长范围如图 3所示,可达 765nm~820nm,阈值电流约 80mA,这种宽

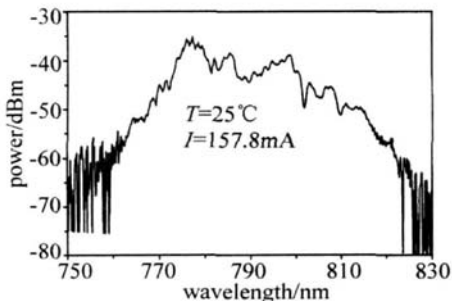


Fig 3 Spectrum of the laser diode

波长范围的激光二极管,通过光栅反馈,可稳定地工作在其中某一波长下。电流源采用美国 Newport公司生

产的 Mode 505型低噪声恒流源,电流起伏小于 2μA。温度由自制的高精度控温仪控制,其长期稳定性优于 0.01℃。激光二极管输出的光通过准直透镜 L(Thorlabs公司生产的 C230TM-B型准直透镜,其焦距约为 4.5mm)准直,然后入射到光栅。对于光栅反馈扩展腔半导体激光器而言,光栅选取得合适与否(主要是指光栅的衍射效率,也即反馈量)直接影响着激光器的运转性能。光栅反馈太强,会损坏半导体激光器;光栅反馈太弱,又会导致扩展腔不起作用,即达不到调谐激光频率、压窄激光线宽、提高激光输出功率等的目的。对于输出端面镀有增透膜的扩展腔半导体激光器,衍射效率在 10%左右较为合适^[7]。选取了美国 Thorlabs公司生产的 1800 line/mm 的光栅,其对 s偏振光的衍射效率约为 10%(实验中,将半导体激光二极管放置以合适的取向,使其输出的光是 s偏振光)。采用了 Littrow 式结构^[29]实现光学反馈。对于 795nm 的激光,当反射角 $\theta \approx 45^\circ$ 时,其 1级衍射光沿原路反馈回半导体激光二极管腔内,0级光则作为输出。通过微调光栅,实现波长的连续调谐。

实验中,首先要使光栅衍射的 1级光沿原路返回激光二极管,因此,对光栅的水平 and 俯仰方向进行了调节,当观察到激光输出的阈值电流大幅度降低(约为 40mA)时,即可确定 1级衍射光沿原路返回了激光二极管内。光栅反馈会极大地提高激光输出功率^[7-8,10]。实验中发现,使用反馈后,随着注入电流的缓慢增加,激光输出功率大大提高。图 4是实测的激光输出功率随电流变化的关系曲线,其中 a 为反馈前的变化关系

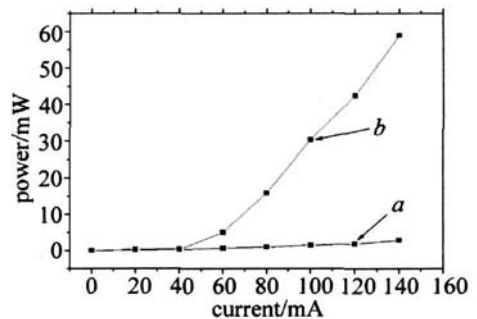


Fig 4 Variation of output power with current

曲线, b 为反馈后的变化关系曲线。从中可见,该扩展腔激光器运行在 110mA 时输出功率可达约 43mW。

在调好反馈之后,利用波长计观察输出激光的波长,将激光器的温度和电流调节在一个合适的工作点,然后微调光栅水平方向即微小改变衍射角,同时微调加在激光二极管上的电流,将激光频率调谐到 Rb 原子的吸收线上(通过观察 ⁸⁷Rb 原子汽泡中的明亮荧光即可确认)。在压电陶瓷上施加三角波电压进行扫描即可实现频率连续调谐,用饱和吸收装置通过观察

^{87}Rb 原子 D_1 共振跃迁线的饱和吸收谱,可确定激光频率的连续调谐范围。为了改善激光的输出性能,扩大其连续调谐范围,通常在扫描光栅的同时,同步扫描激光电流(商用激光器如 Toptica公司生产的半导体激光器通常如此)。因而实验中,在用三角波电压扫描光栅的同时,也给激光电流源施加了一个同步扫描的三角波信号,如图 5 所示,从而使电流与腔长同步变化,

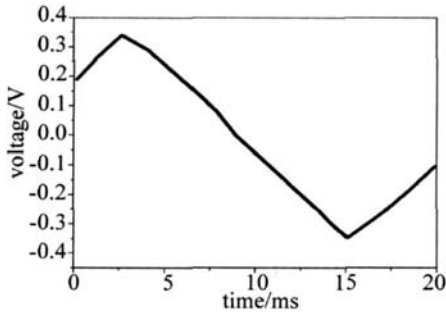


Fig 5 Current modulation signal

这样可使激光频率连续可调谐范围(不跳模)进一步扩展,实测其达到约 7.6GHz 完全覆盖了 ^{87}Rb 原子 D_1 共振跃迁线,并且注入电流越大,其调制的作用越为明显。图 6 为在温度 $T = 18.3^\circ\text{C}$ 时测得的 ^{87}Rb 原子 D_1 共振跃迁线的饱和吸收谱。其中,图 6a 为电流值 $I =$

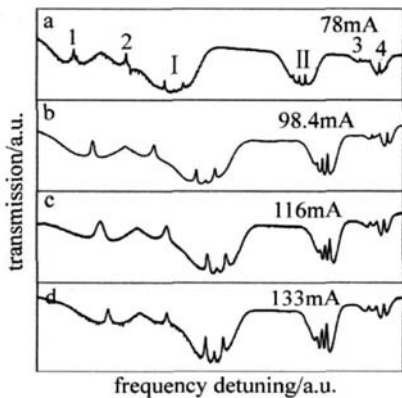


Fig 6 ^{87}Rb atom saturated absorption spectrum

78mA 时扫出的原子饱和吸收谱线,其中饱和吸收峰 1 对应于 ^{87}Rb 原子 D_1 线中 $5^2S_{1/2}F = 2$ 到 $5^2P_{1/2}F' = 1$ 的跃迁,饱和吸收峰 2 对应于 $5^2S_{1/2}F = 2$ 到 $5^2P_{1/2}F' = 2$ 的跃迁,其中间的峰则对应于两个跃迁过程中的交叉线;饱和吸收峰 3 对应于 ^{87}Rb 原子 D_1 线中 $5^2S_{1/2}F = 1$ 到 $5^2P_{1/2}F' = 1$ 的跃迁,饱和吸收峰 4 对应于 $5^2S_{1/2}F = 1$ 到 $5^2P_{1/2}F' = 2$ 的跃迁,中间的峰则同样对应于这两个跃迁过程中的交叉线。多普勒吸收曲线 I 和 II 对应于 ^{85}Rb 原子的共振吸收。在保持温度不变的情况下,继续加大电流,在电流等于 98.4mA , 116mA 和 133mA 时分别扫出了如图 6b~图 6d 所示的 ^{87}Rb 原子 D_1 共振跃迁线的饱和吸收谱,该饱和吸收谱的出现呈周期性变化趋势。

为了测量增透膜半导体激光器的输出线宽^[11],用 1 台德国 Toptica 公司生产的已知线宽为 1.5MHz 的半导体激光器 LD₂ 与之拍频^[12],其实验装置如图 2 所示,两束激光通过 1 个 50% 的分束器 BS₂ 后叠加在一起,分束器前面的波片-棱镜系统可以分别调节两束激光的功率。先将 Toptica 公司 1.5MHz 的激光器锁定于 ^{87}Rb 原子 $5^2S_{1/2}F = 2$ 到 $5^2P_{1/2}F' = 1$ 的饱和吸收峰上,然后将自制的增透膜半导体激光器调谐于该峰上,通过改变其扫描偏置,将其失谐约 35MHz 用光电雪崩二极管 D₂ 探测两激光之间的拍频信号,然后输入到谱仪 (HP-8590L) 中进行信号分析。图 7 为谱仪所测得的拍频信号,其半峰全宽约 4MHz ,由此可知,此镀膜反膜半导体激光器在光学反馈状态下的频率线宽约 2.5MHz 。

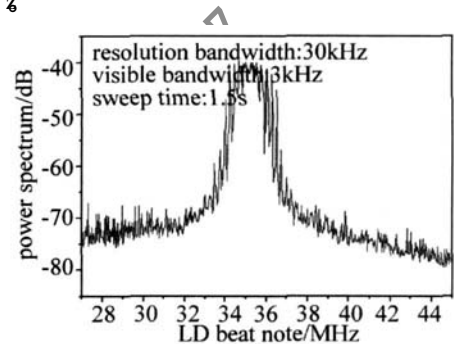


Fig 7 Beam-beating signal of LD

同时,考察了增透膜半导体激光器的稳定性,实验发现,在较长时间内,此增透膜半导体激光器能够保持模式稳定,特别是通过锁相放大器及积分微分电路进行锁定之后,尽管偶尔会出现由于温度及机械稳定性等因素所导致的微小的频率漂移,但通过电流及温度的轻微调整便完全可以很好地恢复,因而可以满足实验的需要。

2 结 论

采用镀有增透膜的半导体激光二极管作光源,使用衍射效率约为 10% 的光栅作反馈装置,实现了外腔反馈半导体激光器在 795nm 处的单模输出,且通过额外施加一个同步的三角波电流调制信号,该增透膜半导体激光器的频率连续调谐范围(不跳模)可达到约 7.6GHz 运行在 110mA 时输出功率可达约 43mW 。通过与另一台已知线宽为 1.5MHz 的半导体激光器拍频,测得了此镀有增透膜的外腔反馈半导体激光器的线宽约为 2.5MHz 。该激光器能够长时间内稳定工作,且成本低廉,可用于激光与原子相互作用中的量子相干效应的研究。

意味着在 b_B 两侧附近 $b_1 < b < b_2$ (b_B 除外), 同一 $|\Delta f/f|$ 对应两个 b 值。光束参量 b 不变时, $|\Delta f/f|$ 随 N_F 的增加而减小。

3 结 论

研究了 CsSGB 光束通过无光阑透镜后的聚焦特性, 得到了光强分布公式、2阶矩定义的光束束腰宽度及焦平面位置表达式。利用数值方法对轴上焦点的 DFS 现象和焦平面的焦移进行了模拟分析, 研究表明, 当 N_F 较小且 $b > 1$ 时, 轴上焦点存在较明显的 DFS 现象, 随 b 增大两跃变点间距增大, 跃变量增加; 在 $s' = 1$ 附近, 焦点在 s' 增大的过程中伴随着从负到正的焦移。2阶矩法定义的实际焦平面只可能存在焦移, 随系统参量 s' 的变化, 可以位于几何焦面的左侧、右侧或与之重合; 相对焦移量随光束参量 b 增大而增大过程中有一段反常的减小变化, 但随菲涅耳数增大而减小。研究表明, 在 CsSGB 的聚焦工作中, 要根据实际的精度需求采用合适的研究方法, 同时要考虑焦移和焦开关现象的影响。

(上接第 647 页)

参 考 文 献

- [1] WEMAN C E, HOLLBERG L. Using diode lasers for atomic physics [J]. Review Scientific Instruments 1991, 62(1): 1-20
- [2] JIN Sh Zh, LIY Q, XIAO M. Single mode diode laser with a large frequency-scanning range based on weak grating feedback [J]. Appl Opt 1996, 35(9): 1436-1441
- [3] WANG X Q, WANG Y Zh. A narrow linewidth tunable diode laser system [J]. Chinese Journal of Laser 1998, B7(3): 217-221
- [4] WANG JM, YANG W D, XIE Ch D, *et al*. Frequency tuning characteristics of single mode GaAs semiconductor laser with weak feedback [J]. Acta Optica Sinica 1999, 19(4): 463-467 (in Chinese).
- [5] ZHANG J, CHEN X Z, WANG Y Q. Analysis on continuous tuning range of tunable diode lasers [J]. Acta Optica Sinica 2003, 23(10): 1220-1224 (in Chinese).
- [6] ZHANG J, HUANG L, WANG D Sh, *et al*. Study on characteristics of output beam of combined optical diode lasers [J]. Laser Technology 2007, 31(3): 228-231 (in Chinese).

参 考 文 献

- [1] LÜ B D, PENG R W. Focal shift and focal switching in systems with the aperture and lens separated [J]. J Optics 2002, A4(6): 601-605
- [2] JIX L, LÜ B D. Focal shift and focal switch of flattened Gaussian beams in passage through an aperture bifocal lens [J]. IEEE J Q E 2003, 39(1): 172-178
- [3] PENG R W, LÜ B D. Focal switch of Hermite-Gaussian beams [J]. Acta Physica Sinica 2003, 52(11): 2795-2802 (in Chinese).
- [4] LIU X Y, PU J X. Focal shift and focal switch of partially coherent light in dual focus systems [J]. Opt Commun 2005, 252: 262-267
- [5] LIU X J, LÜ B D. Focal shift in a Gaussian beams focused by a thin lens without aperture [J]. Laser Journal 1997, 18(3): 17-22 (in Chinese).
- [6] JIX L, LÜ B D. Focal switch of cosine-Gaussian beams focused by a thin lens without aperture [J]. Laser Technology 2005, 29(6): 654-656 (in Chinese).
- [7] KONG R X, WANG L, WANG X Q. The beam waist width and its location of the elegant cosh-squared-Gaussian beams [J]. Laser Journal 2004, 25(1): 41-42 (in Chinese).
- [8] JIANG X D, WU Y M, WANG X Q. Focal plane and the position of the plane in cosine-Gaussian beams [J]. Optical Technique 2006, 32(3): 419-421 (in Chinese).
- [7] NYMAN R A, VAROQUAUX G, VILLIER B, *et al*. Tapered amplified AR coated laser diodes for potassium and rubidium atomic-physics experiments [J]. Condensed Matter 2005, 5(11): 737-739
- [8] GUAN H, HUANG G L, HUANG X R, *et al*. Construction of the tunable diode laser based on Littrow configuration [J]. Chinese Journal of Laser 2007, 34(1): 33-36 (in Chinese).
- [9] HEMMERICH A, MCINTYRE D H, SCHROPP D, *et al*. Optically stabilized narrow linewidth semiconductor laser for resolution spectroscopy [J]. Opt Commun 1990, 75: 118-122
- [10] HILDEBRANDT L, KNISPEL R, STRY S, *et al*. Antireflection-coated blue GaN laser diodes in an external cavity and Doppler-free indium absorption spectroscopy [J]. Appl Opt 2003, 42(12): 2110-2118
- [11] WANG B, YAO J Q, WU H B, *et al*. The linewidth narrow and frequency continuous tuning of diode laser [J]. Acta Sinica Quantum Optica 2004, 10(2): 82-86 (in Chinese).
- [12] ARNOLD A S, WILSON J S, BOSCHER M G. A simple extended-cavity diode laser [J]. Review Scientific Instruments 1998, 69(3): 1236-1239