

# 谱宽压窄大功率半导体激光器研究进展

李元栋 华卫红 王红岩 杨子宁

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 近年来以半导体激光器为抽运源的碱金属蒸气激光器在高能激光领域获得了快速的发展,但是碱金属蒸气激光器的吸收谱宽非常窄,即使在充入一个大气压缓冲气体后其吸收谱宽仍小于 100 GHz(0.2 nm),而市售半导体激光器的输出线宽约 1000 GHz(2 nm),难以实现有效抽运,因此对窄线宽大功率半导体激光器提出迫切需求。在介绍半导体激光器抽运碱金属蒸气激光器基本原理的基础上,综述了用于大功率半导体激光器窄线宽的方法,分析了其优缺点,最后介绍谱宽压窄大功率半导体激光器的发展途径。

**关键词** 激光器;碱金属蒸气激光器;大功率半导体激光器;窄线宽

中图分类号 0472

OCIS 140.2010 140.2020 140.3325

文献标识码 A

## Research Development of Linewidth Narrowing of High Power Diode Lasers

Li Yuandong Hua Weihong Wang Hongyan Yang Zining

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** In recent years, laser diode pumped alkali laser (DPAL) has obtained a rapid development which has great potential to become a new kind of high-energy laser. But the absorption linewidth of the alkali atom even with proper one atmospheric pressure of buffer gas is difficult to exceed 100 GHz comparing with the 1000 GHz linewidth of the commercial diode laser. In order to pump the alkali laser efficiently, the high power frequency narrowed diode laser is needed. On the basis of the principle of laser diode pumped alkali laser, different ways to narrow the linewidth of high power diode lasers are introduced, the characteristics of each method are compared and a review on expectation and development for high power frequency narrowed diode laser is made.

**Key words** lasers; alkali vapor lasers; high power diode lasers; narrow linewidth

### 1 引言

碱金属蒸气激光器是以碱金属原子饱和蒸气作为激光介质的三能级激光器。2003年美国利弗莫尔国家实验室 Krupke 小组采用钛宝石激光器作为抽运源首次实现了铷激光输出<sup>[1]</sup>,2006年该小组又实现了半导体抽运的碱金属蒸气激光器(DPAL)。在军事领域,相比化学激光器,DPAL 无需大量危险化学品、不必采用真空抽运和化学物质排放、并且输出波长较短,可使衍射极限光斑更小、功率密度更高;相比固体激光器,DPAL 废热少、气体介质易于流动散热、光束质量高,这些优点使 DPAL 有望成为下一代激光武器。在航天领域,DPAL 的发射波长接近大气传输窗口,且与半导体光电转换器件的高效吸收波长吻合,使 DPAL 可用于太空激光传能系统。在基础物理研究领域,DPAL 为原子物理、量子光学及激光光谱学的研究提供新的实验手段,例如对碱金属激光倍频可以产生潜紫外激光。在激光加工领域,DPAL 良好的光束质量,更短的输出波长(相比固体 YAG 激光和气体 CO<sub>2</sub> 激光),更高的衍射极限功率密度,导致 DPAL 更高的加工效率<sup>[2]</sup>。目前,美国利弗莫尔国家实验室、通用原子公司、空军技术学院、空军军官学校等都相继投入到碱金属蒸气激

收稿日期: 2010-03-09; 收到修改稿日期: 2010-05-17

作者简介: 李元栋(1985—),男,硕士研究生,主要从事半导体激光器输出谱宽、碱金属蒸气激光器方面的研究。

E-mail: yuandong115@163.com

导师简介: 华卫红(1968—),女,教授,博士生导师,主要从事化学激光器技术及数值模拟等方面的研究。

光器的研究中<sup>[3~5]</sup>。2008 年底利弗莫尔国家实验室成功实现峰值功率 100 W 的铷激光输出,2009 年空军军官学校首次采用非稳腔实现光-光转换效率 30%,50 W 的铯激光输出<sup>[6]</sup>,2010 年通用原子公司实现了 145 W 的铷激光输出。

碱金属激光器是用中性碱金属原子(K,Rb,Cs)的基态能级  $S_{1/2}$  和通过自旋轨道相互作用而分裂的 $^2P_{1/2}$  和 $^2P_{3/2}$  能级形成一个标准的三能级系统, $^2P_{1/2}$  和 $^2P_{3/2}$  能级分别为激光上能级和抽运上能级,激光跃迁和抽运跃迁分别称为 D1 线和 D2 线。D2 线的多普勒加宽很窄(K, $1.64 \times 10^{-3}$  nm;Rb, $1.16 \times 10^{-3}$  nm;Cs, $1.02 \times 10^{-3}$  nm; $T=373$  K),而市售半导体激光器的线宽一般在 1000 GHz(2 nm)左右,难以实现有效抽运,即使充入接近一个大气压的缓冲气体如氦气或乙烷,其压力加宽也只有 0.02~0.04 nm,因此对大功率半导体激光器输出谱线的压窄有迫切的要求。

窄线宽大功率半导体激光器除在军事上可用于抽运碱金属蒸气激光器,在民用上可用于抽运自旋交换极化惰性气体 $^3\text{He}$ , $^{129}\text{Xe}$ (SEOP)以实现对人体的肺部成像<sup>[7]</sup>,突破了医学上无法实现肺部成像的难题。其原理是先用圆偏振的窄线宽大功率半导体源抽运铷、铯等碱金属饱和蒸气,使其 $^2P$  态产生极化,通过碰撞将极化传递给 $^3\text{He}$ , $^{129}\text{Xe}$  等惰性气体,极化后的惰性气体被患者吸入肺部,从而实现核磁共振肺部成像。2009 年 New Hampshire 大学已推出初等样机<sup>[8]</sup>。

小功率半导体激光器窄线宽技术很成熟,国内外都有商业化产品。比较典型的有 2008 年北京奥普光太公司报道了首批国产化紧凑型窄线宽半导体激光器<sup>[9]</sup>,使用面衍射光栅,输出带宽小于 500 kHz( $1 \times 10^{-6}$  nm),输出功率约 80 mW。2009 年 Rio 公司研发出世界上线宽最窄的半导体激光器,使用光纤光栅,输出线宽小于 3 kHz( $6 \times 10^{-9}$  nm)。Ondax 公司使用体光栅实现输出线宽小于 50 MHz( $1 \times 10^{-4}$  nm),功率 80 mW 的输出。此外众望达等公司推出在半导体激光器有源区集成光栅的分布反馈布拉格(DFB)窄线宽小功率半导体激光器。小功率窄线宽半导体激光器已经广泛应用于光谱检测、环境气体检测、理论物理研究等方面,但是输出功率太小不适于抽运碱金属蒸气激光器。

对于大功率半导体激光器,其输出谱线压窄要比小功率困难得多。原因是业界普遍采用阵列或堆栈的方式获得大功率,这种方式的光栅器由很多发光单元组成,增加了谱宽压窄的难度。本文综述了可能用于大功率半导体激光器谱宽压窄的方法,并分析了各种方法的优缺点,最后展望了未来的发展趋势。

## 2 面衍射光栅法

面衍射光栅法是指在半导体激光器阵列(LDA)腔外插入面衍射光栅,利用面衍射光栅的角色散性,通过被动种子注入的方式实现窄线宽输出。典型的面衍射光栅窄线宽系统由 LDA、光束准直系统(微柱透镜、柱面镜或球面镜等)、半波片及光栅组成,如图 1 所示<sup>[10]</sup>。

LDA 由很多发光单元组成,每个发光单元都和光栅组成独立的子腔,整个 LDA 的输出特性是各个发光单元输出特性的总和。利用光束准直系统(微透镜、望远镜系统)压缩 LDA 快慢轴发散角,实现 LDA 在光栅上的精确成像。利用半波片调节入射光束偏振态,使得 LDA 输出线宽最窄。

在该系统中,笑脸效应(由于制造工艺等因素造成发光单元的弯曲)、输出端面的透射率<sup>[11]</sup>、光栅参数<sup>[12]</sup>、外腔腔长<sup>[13]</sup>、光学系统的偏差等都会造成不同的发光单元以不同的角度入射和反馈,从而各个发光单元的中心频率和线宽会有差别,最终导致 LDA 输出谱线被加宽。其影响可表示为<sup>[10]</sup>

$$\frac{\delta\lambda}{\lambda_0} \approx -\frac{\alpha^2}{2} - \varphi \cot \theta, \quad (1)$$

式中  $\alpha$  为入射至光栅的慢轴发散角, $\varphi$  为笑脸效应引起的角度, $\theta$  为入射光和光栅法线的夹角。

LDA 笑脸效应大小一般为 1~10  $\mu\text{m}$ ,对输出线宽的影响较大,可表示为<sup>[14]</sup>

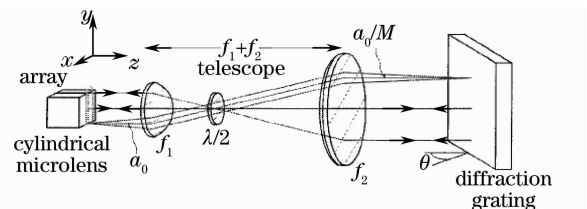


图 1 基于面衍射光栅的谱宽压窄 LDA 示意图

Fig. 1 Schematic diagram of linewidth narrowed LDA based on surface diffraction grating

$$\frac{d\lambda}{\lambda_0} = \frac{x \cot \theta}{M_f f_c}, \quad (2)$$

式中  $M_f$  为快轴放大倍数,  $x$  为笑脸效应的大小。通过绕慢轴旋转柱面镜<sup>[15,16]</sup>、快轴设置倒置望远镜系统<sup>[17]</sup>、使用大焦距微透镜<sup>[18]</sup>等方法可以减小笑脸效应的影响。

采用单宽面源半导体激光器可以消除笑脸效应的影响,获得较高功率的窄线宽输出,同时外腔结构相对简单,易于操作。2009年美国空军军官学校的 J. F. Sell 等<sup>[19]</sup>用 Axcel 公司的单宽面源半导体激光器 ( $1 \mu\text{m} \times 1000 \mu\text{m}$ ) 代替 LDA, 利用面衍射光栅对其线宽进行压窄, 获得了输出功率 9.7 W, 线宽 1.8 MHz ( $3.6 \times 10^{-6} \text{ nm}$ ) 的单纵模输出, 能有效抽运钕蒸气激光器, 实验示意图如图 2 所示。

除用上述非相干法压窄半导体激光器输出谱线外。2009年 B. Liu 等<sup>[20]</sup>采用相干法实现了 LDA 线宽 50 GHz (0.1 nm), 功率 12.5 W 的窄线宽输出。所谓相干法就是在 LDA 腔外一定距离 (整数倍的半 Talbot) 处插入光耦合器, 利用 Talbot 效应, 增强各个发光单元之间的光耦合。相干法的优点是输出线宽被压窄, 输出光束质量明显改善。

基于面衍射光栅的方法成本较低、技术相对成熟, 但光束准直系统复杂、效率较低。基于上述原因, 人们更多使用体全息光栅法压窄大功率半导体激光器的输出线宽。

### 3 体全息光栅法

体全息光栅 (VHG), 又称体布拉格光栅 (VBG), 是指能在三维空间范围内对入射光波进行周期性调制的衍射光学元件, 其结构是由部分散射、部分透射的面层组成。体全息光栅法是指在 LDA 腔外插入体光栅, 使得满足布拉格条件的入射光被反馈回 LDA, 从而实现 LDA 的窄线宽输出。典型的体光栅窄线宽系统由 LDA, 快轴准直镜 (FAC lens), VHG 构成, 如图 3 所示<sup>[21]</sup>。

由于体光栅对入射光的角度和波长都具有选择性, 相当于窄带滤波器, 所以体光栅比面衍射光栅压窄效果好。例如 2006 年 L. S. Meng 等<sup>[22]</sup>使用 14 mm 厚的 VHG 压窄半导体激光器阵列获得了约 7 GHz (0.013 nm)、13.5 W 的输出。2008 年 A. Gourevith 等<sup>[23]</sup>用体光栅获得中心波长 780 nm、功率 30 W, 线宽约 10 GHz (0.02 nm) 的连续输出。2008 年薄报学等<sup>[24]</sup>使用体光栅获得了输出功率 3.4 W, 线宽 100 GHz (0.2 nm) 的窄线宽输出。2010 年 A. Podvyaznyy 等<sup>[25]</sup>利用体光栅获得中心波长 780 nm, 功率 250 W, 谱宽 10 GHz (0.02 nm) 的窄线宽输出。

体光栅窄线宽系统调节简单、结构紧凑, 但调谐范围小 (约 0.1 nm)、对笑脸效应敏感。因为笑脸效应导致不同的发光单元获得大小不同的反馈光, 某些发光单元会失锁, 从而 LDA 输出谱线被加宽。为减小笑脸效应的影响, 2009 年 Ondax 公司发明了 FAC-VHG 元件, 其特点是将体光栅直接集成到快轴准直镜上, 如图 4 所示<sup>[26]</sup>。

FAC-VHG 的优点是对笑脸效应不敏感, 只需操作和调整一个元件; 缺点是 VHG 的基底是石英玻璃, 其材料折射率相对较低, 而 FAC 通常由高折射率材料制造。如果 FAC 使用折射率较低的材料, 会增加整个元件的像差。

在 DPAL 中, 虽然不需要大的调谐范围, 但是 VHG 在制造时其中心波长和碱金属原子吸收峰会有一定的偏差, 并且 VHG 出厂后其中心波长就无法改变, 因此需要一定的调谐范围。对于面衍射光栅, 由于其输出中心波长随入射光束和光栅法线的夹角改变而改变, 所以不存在中心波长偏差的问题。为增加体光栅的

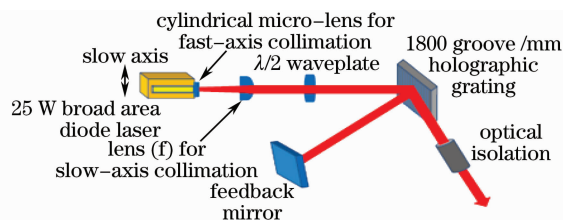


图 2 宽面源半导体激光器谱宽压窄示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of linewidth narrowed broad area diode laser

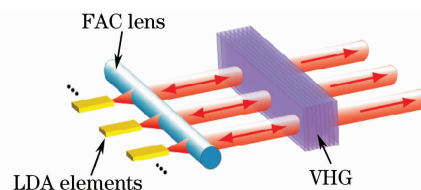


图 3 基于体全息光栅的 LDA 谱宽压窄示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of linewidth narrowed LDA based on volume holographic grating



图 4 商品化 FAC-VHG  
Fig. 4 Commercial product of FAC-VHG

调谐范围, Ondax 公司的 Moser 提出使用斜体光栅(刻线法线和体光栅平面有夹角), 绕 LDA 慢轴旋转斜体光栅, 调谐范围可增加至 0.8 nm 左右, 此外还提出波长多路技术可将调谐范围增加至 10 nm 左右<sup>[27]</sup>。

体光栅法结构紧凑、调节简单、压窄效果好, 大多数 DPAL 的实现均采用这种方案。DILAS, Nlight 等公司相继推出内置 VHG 的 976 nm 光纤输出的 Yb 光纤激光器抽运源, 输出线宽 150 GHz(0.3 nm)。体光栅法的最大缺点是压窄大功率半导体激光器时, 体光栅会吸热, 产生波长漂移, 必须对其制冷, 并且体光栅越厚吸热能力越强, 但体光栅越厚压窄效果越好, 所以在实际使用时要根据需求选择合适厚度的体光栅。

#### 4 DFB 基底垂直腔面发射半导体激光器

垂直腔面发射半导体激光器克服了传统边发射激光器(堆栈、阵列、宽面源等)时间相干性差、发散角大、输出光束不对称等缺点, 是大功率半导体激光器输出谱线压窄的新方向。所谓垂直腔面发射半导体激光器是指谐振腔垂直于半导体芯片衬底, 由上下反射镜和中间的有源层组成, 类似于三明治结构<sup>[28,29]</sup>, 有源区的厚度即为谐振腔的长度, 如图 5 所示<sup>[30]</sup>。

垂直腔面发射半导体激光器克服了传统边发射激光器需要准直系统的缺点, 并且谐振腔很短, 本身输出线宽就比边发射半导体激光器窄, 有利于进一步的压窄。

2009 年 Jean-Francois Seuin 等<sup>[31]</sup>研发了连续输出 230 W, 中心波长 976 nm, 输出带宽小于 500 GHz (1 nm), 发散角约 17°, 温漂系数 0.065 nm/K 的垂直腔面发射的半导体激光器, 若对其使用面光栅或者体光栅法, 其输出线宽将进一步压窄, 抽运速率也进一步提高。除此之外研究人员还尝试将传统的小功率分布式反馈激光器结构用于大功率半导体激光器, 以获得大功率窄线宽输出。2009 年 6 月, Alfalight 公司研发人员获得了突破性进展, 研发出了一种新的面发射半导体激光器, 简称 SE-DFB<sup>[31]</sup>, 其中心波长 976 nm, 输出功率 73 W, 输出带宽 150 GHz(0.3 nm), 如图 6 所示。

这款激光器最大的特点是使用了 Alfalight 公司新发明的一种曲率光栅, 并将其刻蚀在 P 型衬底上, 然后在其表面镀一层金膜作为激光器的后腔面和 SE-DFB 输出窗口形成一个非稳腔, 决定了 SE-DFB 纵模输出模式。其中曲率光栅和 P 型材料接触的区域叫抽运条区, 非接触部分叫非抽运区, 如图 7 所示。

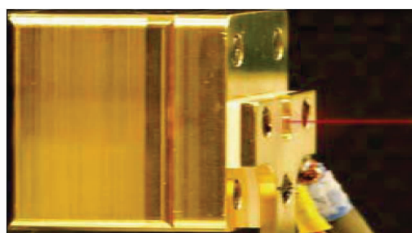


图 6 SE-DFB 实物图

Fig. 6 Commercial product of FAC-VHG

这种新型曲率光栅由一束参考平面波和一束曲面波(参考平面波通过相位屏实现)干涉形成, 和传统平面衍射光栅最大的区别是把光栅形状做成曲面, 这种设计不但使 SE-DFB 激光器的输出带宽很窄而且改善了输出光束质量, 并且克服了传统 DFB 半导体激光器输出功率小的特点, 并且 Alfalight 公司声称可以进一步设计光栅以控制输出横模模式, 这将大大拓展了 SE-DFB 的应用领域。

目前, SE-DFB 激光器的输出波段都是 976 nm, 主要应用于高功率掺 Yb 光纤激光器抽运源, 随着 DPAL 的推动, 可以预见将会有 780 nm, 853 nm 等的 SE-DFB 半导体激光器出现。

#### 5 结 论

本文在介绍 DPAL 的基础上, 综述了可用于大功率半导体激光器输出谱线压窄的方法, 并分析了各种方法的优缺点, 最后介绍谱宽压窄的发展方向之一 SE-DFB 垂直腔面发射半导体激光器。综观窄线宽大功

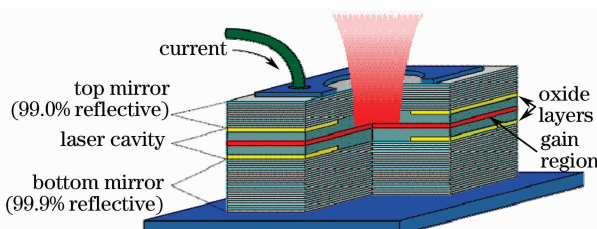


图 5 垂直腔面发射半导体激光器示意图

Fig. 5 Vertical-cavity surface-emitting diode laser

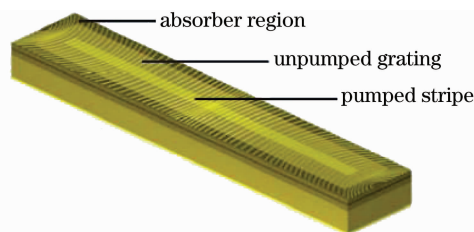


图 7 曲率光栅图

Fig. 7 Figure of curved second-order grating

率半导体激光器的发展历程,窄线宽系统的色散元件由原来需要复杂光束准直系统的面衍射光栅发展到只需快轴准直的体光栅,然后发展到把体光栅和快轴光束准直系统集成在一起,最后发展到把光栅直接集成在半导体激光器的衬底作为谐振腔的一个腔镜。整个窄线宽系统的结构越来越简单,元件进一步集成,输出功率进一步提高,输出谱线宽也得到了进一步的压窄。相信随着技术的发展,大功率窄线宽半导体激光器作为碱金属蒸气激光器的抽运源,其抽运质量会越来越高,将大大推动 DPAL 的发展,从而为碱金属蒸气激光器的发展奠定基础。

### 参 考 文 献

- 1 You Wang, T. Kasamatsu, Y. Zheng *et al.*. Cesium vapor laser pumped by a volume-Bragg-grating coupled quasi continuous wave laser diode array[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(14): 14112~14113
- 2 Yang Zining, Wang Hongyan, Lu Qisheng *et al.*. Research development of laser diode pumped alkali lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(5): 051405  
杨子宁, 王红岩, 陆启生 等. 半导体抽运碱金属蒸气激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(5): 051405
- 3 B. V. Zhdanov, M. K. Shaffer, R. J. Knize. Cs laser with unstable cavity transversely pumped by multiple diode lasers [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(17): 14767~14770
- 4 S. Q. Wu, T. F. Soules, R. H. Page *et al.*. Resonance transition 795 nm rubidium laser using  $^3\text{He}$  buffer gas[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(5): 1222~1225
- 5 J. Z. weiback, W. F. Krupke. 28 W average power hydrocarbon-free rubidium diode pumped alkali laser[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(2): 1444~1450
- 6 B. V. Zhdanov, M. K. Shaffer, R. J. Knize. Scaling of diode pumped Cs laser: transverse pump, unstable cavity, MOPA [C]. *SPIE*, **7581**: 75810F
- 7 I. A. Nelson, B. Chann, T. G. Welkera. Spin-exchange optical pumping using a frequency-narrowed high power diode laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **76**(11): 1356~1358
- 8 Lulian C. Ruset, David Watt, Jan Distelbrink *et al.*. SEOP Polarization of  $^3\text{He}$  and  $^{129}\text{Xe}$  at high volume rates[C]. 40th Annual meeting of the APS Division of Atomic Molecular and Optical Physics, 2009
- 9 Li Liping, Xiong Guisheng, Chen Jingbiao. Commercialized series of external cavity diode laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s1): 54~60  
李利平, 熊桂生, 陈景标. 首批系列化国产外腔半导体激光器[J]. 光学学报, 2008, **28**(s1): 54~60
- 10 E. Babcock, B. Chann, I. A. Nelso *et al.*. Frequency narrowed diode array bar[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(15): 3098~3099
- 11 Pan Wei, Zhang Xiaoxia, Luo Bing *et al.*. The reflection of the out fact depend on wavelength and have effect on tunable external cavity diode laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(8): 975~982  
潘 炜, 张晓霞, 罗 斌 等. 端面反射率的波长特性对外腔半导体激光器调谐范围的影响[J]. 光学学报, 2001, **21**(8): 975~982
- 12 H. Loh, Y. Lin, J. Teper *et al.*. Influence of grating parameters on the line widths of external cavity diode lasers[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(36): 9191~9197
- 13 Lü Desheng, Huang Kaikai, Wang Fengzhi *et al.*. The implementation of 657 nm external cavity diode laser[J]. *J. Time and Frequency*, 2003, **26**(1): 1~6  
吕德胜, 黄凯凯, 王凤芝 等. 657 nm 外腔半导体激光器的实现[J]. 时间频率学报, 2003, **26**(1): 1~6
- 14 C. L. Talbot, M. E. J. Friese, D. Wang *et al.*. Linewidth reduction in a large smile laser diode array[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(29): 6264~6268
- 15 N. U. Wetter. Three fold effective brightness increase of laser diode bar emission by assessment and correction of diode array curvature[J]. *Opt. Laser Technol.*, 2001, **33**(3): 181~187
- 16 Deng Xinli, Liu Yun, Yin Honghe *et al.*. The analysis and experiment about correcting the smile of the line diode laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 505~508  
邓鑫李, 刘 云, 尹红贺 等. 半导体激光线阵弯曲矫正方法的理论分析与实验[J]. 中国激光, 2008, **35**(4): 505~508
- 17 J. T. Gopinath, B. Chann, T. Y. Fan *et al.*. 1450 nm high brightness wavelength combined diode laser array[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(10): 9405~9410
- 18 B. V. Zhdanov, T. Ehrenreich, R. J. Knize. Narrowband external cavity laser diode array[J]. *Electron Letters*, 2007, **43**(4): 221~222

- 19 J. F. Sell, W. Miller, D. Wright *et al.*. Frequency narrowing of a 25 W broad area diode laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **94**(5): 051115
- 20 B. Liu, Y. Liu, Y. Braiman. Linewidth reduction of a broad-area laser diode array in a compound external cavity[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(2): 365~370
- 21 B. M. Goodson, N. Whiting, P. Nikolaou *et al.*. Preparation of laser polarized xenon at high xe densities and high resonant laser powers provided by volume holographic grating narrowed LDAs[C]. 40th Annual Meeting of the APS Division of Atomic, Molecular and Optic Physics. 2009
- 22 L. S. Meng, B. Nizamov, P. Madasamy *et al.*. High power 7 GHz bandwidth external cavity diode laser array and its use in optically pumping singlet delta oxygen[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(22): 10469~10471
- 23 A. Gourevith, G. Venus, V. Smirnov *et al.*. Continuous wave, 30 W laser diode bar with 10 GHz linewidth for Rb laser pumping[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(7): 702~704
- 24 Bo Baoxue, Gao Xing, Qiao Zhongliang *et al.*. Characteristics of high power volume Bragg grating external cavity semiconductor lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 501~504  
薄报学, 高欣, 乔忠良等. 大功率体光栅外腔半导体激光器的输出特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 501~504
- 25 A. Podvyaznyy, G. Venus, V. Smirnov *et al.*. 250 W diode laser for low pressure Rb vapor pumping[C]. *SPIE*, 2010, 758313
- 26 [http://www.ondaxinc.com/tunable\\_switch.htm](http://www.ondaxinc.com/tunable_switch.htm)
- 27 B. Kohler, T. Brand. Wavelength stabilized high power diode laser modules. [http://www.dilas-inc.com/gdresources/downloads/whitepapers/DILAS\\_PW09\\_7198\\_36081230.pdf](http://www.dilas-inc.com/gdresources/downloads/whitepapers/DILAS_PW09_7198_36081230.pdf)
- 28 Li Lin, Zhong Jingchang. Vertical cavity surface-emitting lasers[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2003, **26**(2): 68~72  
李林, 钟景昌. 垂直腔面发射半导体激光器[J]. *长春理工大学学报*, 2003, **26**(2): 68~72
- 29 Liu Wenli, Zhong Jingchang, Yan Changling. A novel vertical cavity surface emitting laser array [J]. *Chinese J. Luminescence*, 2006, **27**(4): 519~526  
刘文莉, 钟景昌, 晏长岭. 新型垂直腔面发射半导体激光器阵列[J]. *发光学报*, 2006, **27**(4): 519~526
- 30 <http://www.fi.isc.cnr.it/users/giovanni.giacomelli/Semic/Samples/samples.html>
- 31 Manoj, Kanskar. Novel grating boosts brightness. <http://www.alfalight.com/pdf/tech/2009-06%20Compound%20Semi%20-%20SE-DFB%20Article.pdf>