

全固化蓝光激光器

黄元庆 叶艺文 (厦门大学新技术开发研究所)

[摘要] 本文介绍了半导体、SHG与频率上转换三种全固化蓝光激光器的现状与发展趋势,并从理论上作了相应的分析。

关键词: 全固化 蓝光 激光器

1 概述

蓝光激光器,除了具有一般激光器的特性之外,由于其输出的激光波长更短,是可见光,因此,它不仅在彩色显示、复印、打印、检测、分析、全息、医学诊断与治疗、娱乐与军事等方面能得到极其广泛的应用,尤其在高密度存储方面,可满足计算机用户对存储量增长的需求。但目前,低功率、能输出蓝光的激光器主要是空气冷却的 Ar^+ 与 He-Cd 两种气体激光器。而这两种激光器具有致命的弱点,即效率低、体积大、电功耗大(一般所需的电功率要在几百瓦至几千瓦之间)、寿命短(尤其是 He-Cd 激光器)、模式较差、光学噪音过大,且价格也较昂贵。

微小型、高效率、全固化、低功率蓝光激光器与上述两种气体激光器相比,其明显的优点是:(1)振荡稳定;(2)电功耗低,只需数十瓦(大约为空冷 Ar^+ 激光器的 $1/30$, He-Cd 激光器的 $1/8$, 半导体激光器则更小);(3)寿命长,至少可在 1500 小时以上;(4)小型化,其体积不足空冷 Ar^+ 激光器的 $2/3$, He-Cd 激光器的 $1/2$ (半导体激光器则更微小);(5)光束质量好,(除半导体蓝光激光器外的其它全固化激光器,空间模式可实现 TEM_{00} 模,且 $M^2 < 1.3$ 光束发散角可达 2mrad 以下)因此,全固化蓝光激光器存在巨大市场,产业界对此要求急迫,现在国内外都在致力开拓这一领域。美国相干公司与 IBM 公司联合研制一种半导体激光二极管直接倍频的蓝光激光器^[1], 1994年相干公司首先推出商品 $\text{D}^3 430$ 型蓝光激光器,其输出波长 430nm , 功率 10mW , 电功耗小于 40W , 重量 6.3kg , 外型

尺寸为 $490 \times 120 \times 80\text{mm}^3$ ^[2]。这是至今唯一的一种全固化蓝光激光器商品。

目前,实现微小型全固化蓝光激光器的途径主要有三种:(1)半导体二极管蓝光激光器;(2)采用非线性晶体,对近红外半导体激光直接倍频,即 SHG(Second Harmonic Generation)法;(3)频率上转换法。

2 半导体蓝光激光器

目前,光盘上所用的半导体激光器是砷化镓及其它 III-V 族化合物激光二极管,波长在 $780 \sim 830\text{nm}$ 之间,若波长推进到 430nm 左右的蓝光激光波段,则数据存储将可提高到 4 倍。80 年代末,II-VI 族多层结构,如量子阱和超晶格取得显著进展,1991 年美国 3M 公司 M. A. Haase 等首次用 $\text{ZnCdSe}/\text{ZnSe}$ 半导体激光器,在 77K 下得到波长 490nm 的脉冲蓝光激光输出,这是蓝光激光器发展的一个重要里程碑。1992 年,索尼公司也研制出波长 447nm 的蓝光 $\text{ZnSe}/\text{ZnMgSSe}$ 半导体激光器,工作温度为 77K , 连续波输出^[3]。最近,许多大学在竞相研究蓝光半导体激光器,如美国的普渡大学、布朗大学及英国的赫里奥特·瓦特大学等。

要直接获得蓝光激光发射,材料的禁带宽度必须在 2.6eV 以上。蓝光激光二极管器件结构大多是采用在 GaAs 缓冲层的 GaAs 衬底上,用分子束外延法,在该衬底上生长 II-VI 族化合物,其结构包括四元 ZnMgSSe 光学包层、 ZnSSe 波导区及一般为 $1 \sim 3$ 层产生光学增益的 ZnSSe 量子阱。选用 ZnSSe 成分是为了与 GaAs 晶格匹配,而调节 Mg 与 S 的成分可使

带隙变化,并使晶格与 GaAs 匹配,量子阱处于压缩应变状态。

为获得低阻金属接触,一般采用 P 型 Zn (Se, Te) 作为渐变接触,这在目前是一种较好的接触法。现在室温下运转的连续波激光器,阈值电流已降至 250 A/cm^2 , 阈电压为 5V 量级。

激光器的泵浦方式主要有电泵浦与光泵浦两种。布朗大学采用 PS 脉冲光泵 (Zn, Cd) Se 蓝光激光器,在 $T = 200 \text{ K}$ 时输出波长 496 nm 准连续波运转,平均输出功率 1 mW , 转换效率为 22%^[4]。但目前蓝光激光二极管寿命极短,在室温连续运转时,最长约几小时,输出功率也未达到实用有效值。产生器件退化的主要原因是晶体缺陷,主要是堆迭缺陷、丝状位错和点缺陷等。这类缺陷会在激光器的增益区产生非辐射复合,致使激活区增益降低,或直接使受激发射中止。此外,也由于采用宽带隙材料,使掺杂剂的激活能和电阻率增大,从而使激光作用的阈值电压增大。

采用半导体激光器来获得蓝光激光,无疑是最有意义的技术路线,但实现室温下连续工作的蓝光激光器,并推向市场,还需要对材料科学、器件物理和工艺作进一步研究,还需搞清控制带隙 II-VI 族多层结构的电特性,以及进一步降低接触电阻和工作电压等。这个过程将是一个艰巨的较长时间。

3 SHG 蓝光激光器

实现微小型 SHG 蓝光激光器的途径,大致有两种,一种是用半导体激光泵浦诸如 Nd:YAG 等激光晶体输出的激光,由非线性晶体倍频获得蓝光;另一种是由近红外半导体激光直接倍频而获得蓝光。第一种方法,用激光二极管泵浦 $\text{Cr}^{3+} : \text{LiSrAlF}_6$ 激光晶体,用 KNbO_3 作倍频晶体,采用腔内,也获得 13 mW 、 430 nm 的蓝光输出^[5],但这种方法结构复杂、体积大、成本高。第二种方法是得到蓝光输出的较为有效的方法。IBM 公司曾用 125 mW 的单频半导体激光,由闭环伺服控制将波长锁定到 856 nm , 由 KNbO_3 晶体倍频得到功率为 54 mW 、波长为

428 nm 的蓝光输出,电光转换效率为 13%^[6]。

为提高倍频效率,可采用如图 1 所示的外腔倍频的谐振腔结构。图中,谐振腔结构必须对近红外半导体激光是封闭的,且能满足泵浦光与腔模式匹配,能实现倍频光的增益正反馈。

图 1 带有非线性晶体外谐振腔的倍频蓝光激光器示意图

由于 KNbO_3 晶体对温度敏感(温度容限仅 1° C/cm),需温控,且吸收带宽也仅几 \AA ,故最近对 KTR、 LiNbO_3 、 LiTaO_3 等波导型倍频器的研究相当活跃,也已获得 5 mW 左右的蓝光输出^[7]。波导型的倍频转换率 η 为^[8]:

$$\eta = \frac{8\epsilon^2 d_1^2}{c E_0 (\lambda_\omega)^2 (n_\omega)^2 (n_{2\omega})} \cdot \left[\frac{P_\omega}{A_{\text{eff}}} \right]^2 \cdot \left[\int_0^L \exp[i\Delta k(z)z] dz \right]^2 \quad (1)$$

式中, λ_ω 与 P_ω 分别为基频光波长与功率; n_ω 与 $n_{2\omega}$ 分别是基频光与倍频光的折射率; d_1 为倍频晶体的非线性系数; A_{eff} 为基频光在倍频晶体中的有效光斑; Δk 为基频光与倍频光的波矢差; z 为光传播方向; L 为波导长度; c 为光速; E_0 为模场强。由此式可知,若实现准相位匹配时,则(1)式可简化为:

$$\eta = \frac{8\epsilon^2 d_1^2}{c E_0 (\lambda_\omega)^2 (n_\omega)^2 \cdot n_{2\omega}} \cdot \left[\frac{P_\omega}{A_{\text{eff}}} \right]^2 \quad (2)$$

由此可知,转换效率正比于基频光的光功率密度 $P_\omega / A_{\text{eff}}$, 并与倍频晶体的非线性系数 d_1 的平方成正比。对 LiNbO_3 与 KTP 非线性晶体, d_1 分别为 d_{33} 与 d_{24} 。因此,寻找大的 d_1 值的非线性晶体新材料,提高基频光源功率及功率密度,是 SHG 蓝光激光器的关键技术之所在。

4 频率上转换蓝光激光器

上转换激光器,就是一种振荡频率高于泵浦光频率的光泵激光器,它主要包含和频与光泵光纤这两类上转换激光器。

4.1 和频蓝光激光器 两种激光波长在非线

性晶体中进行和频的过程,实际上就是一种吸收双光子而使一个激光离子激发的非线性激发过程。和频激光器主要分驻波型与行波型两种。图2所示是一种驻波型谐振腔实验装置,本装置在GaAlAs 30mW的5%与Nd:YAG 33mW的4% ,同时耦合进入长5mm的KTP晶体时,已获得459nm的蓝光激光输出。

图2 驻波腔和频蓝光激光器实验装置

这类和频激光器在技术上必须满足三个基本条件:(1)两入射光波长,在空间、光谱上与激光谐振腔相匹配;(2)阻抗匹配,即耦合反射镜M1的透射率必须与腔内往返一次所有的损耗匹配;(3)两入射光的频率必须分别锁定。

4.2 光纤上转换蓝光激光器 光纤上转换蓝光激光器结构如图3所示。上转换光纤,一般采用氟化物基质玻璃光纤,掺杂的激活离子有 Ar^{3+} 、 Nd^{3+} 、 Ho^{3+} 、 Er^{3+} 及 Tm^{3+} ,掺杂浓度一般在1%~2%之间。

目前,大多数的上转换激光器,主要工作在低温状态,因为在较高温度下,有几个因素可使激光性能退化。至今最成功的室温上转换激光运转就是这种氟化物玻璃光纤。同时由于III-V族半导体激光器的高功率和宽波长范围,为结构简单的微小型光纤蓝光激光器提供了很好的泵浦光源。现二极管泵浦上转换光纤激光器已产生了大于100mW的482nm蓝光输出^[9]。

5 结束语

半导体倍频蓝光激光器的输出功率已能满足使用要求,但体积较大,价格也较高;采用新材料的蓝光半导体激光器仍处于研究阶段,但

人们对它特别感兴趣,今后可能在技术上出现新的突破;而光纤上转换蓝光激光器,在近期内将得到迅速发展。

图3 上转换蓝光光纤激光器示意图

参考文献

- 1 TV Higgins. Visible solid-state lasers-IBM and Coherent to groom blue laser for marketplace under license. Laser Focus World, 19: 4, April 1992, 30.
- 2 陈云生,张荣康. 相干公司销售半导体激光二极管谐波发生蓝光激光器. 激光与光电子学进展,第12期,1995,45.
- 3 K. Akimoto, H. Okuyama, et al. Growth of Zn-MgSSe and fabrication of blue laser diodes. Physica B 194: 1-2, September, 1993, 133-135.
- 4 H. Jeon, V. Kozlov, et al. Room-Temperature optically pumped blue-green vertical cavity surface emitting laser. Applied Physics Letters 67: 12, September, 18, 1995, 1668-1670.
- 5 F. Falcoz, F. Balembois, et al. All solid state continuous wave tunable blue light source by intracavity doubling of a diode-pumped Cr:LiSAF laser. Optics Letters 20: 11, 1995, 1274-1276.
- 6 Proc. SPIE, 1499, 308(1991).
- 7 D. Eger, M. Oron, et al. Efficient frequency doubling and locking of diode laser light in periodically segmented KTiOPO₄ waveguide. Journal of Applied Physics. 77: 5, 1995, 2205-2207.
- 8 Xiaofan Cao, Ramakant, et al. Efficient quasiphase-matched blue second-order grating. Optics Letters, Vol. 17, No. 8, April 15, 1992, 592-594.
- 9 S. Sandes, R. G. Waarts, et al. Laser diode pumped 106 mW blue upconversion fiber laser. Applied Physics letters. 67: 13, Sep. 25, 1995, 1815-1817.

注:黄元庆,副教授,研究室主任,中国电子学会高级会员。

叶艺文,助理研究员。