

扁平大功率氦氖激光器

——一项获中、美专利权的发明

凌一鸣

(东南大学电子工程系)

摘要 扁平大功率氦氖激光器是一项获得中国、美国专利权的发明,本文简要阐述了它的设计原理和实验结果。对这种氦氖激光器,可利用增加其横向尺寸来提高输出功率。实验证明,1.5米放电长度的这种氦氖激光器可得到波长为0.63微米约200毫瓦的激光功率。最后还讨论了它的应用领域。

气体激光器是应用最广的一种激光器,其中氦氖激光器是问世最早的一种气体激光器。由于其成本低、寿命长、结构简单、使用方便,并在可见与近红外波段可输出十余条激光谱线,因此,已广泛应用于精密计量、检测、准直、医疗、显示、印刷、全息、条码、光学实验等方面。其结构设计和理论研究也趋于成熟,只是输出功率较低,而且与放电长度明显有关。显然,过长的激光器既不便生产,也不便使用。因此,作为商品的氦氖激光器,波长为0.63微米的激光功率一般在数十毫瓦以下。

70年代末,光动力学治癌的问世,为征服癌症提出了新的研究课题,不久,即在全国范围内协作攻关,并取得明显成效。它是利用吸收某种光敏剂的癌细胞,在特定波长的激光作用下被选择性杀伤的原理进行治疗的。所指的特定波长正是氦氖激光器的工作波长0.63微米,但要求激光功率达数百毫瓦。因此,一般采用氩离子激光泵浦染料激光器作激光光源进行理论和临床研究。但由于这种激光系统成本高、寿命短、效率低、使用不便、结构复杂,给光动力学治癌的推广带来极大困难。虽然,后来也提出了其他各种激光系统,如准分子激光泵浦染料激光器、YAG激光倍频泵浦染料激光器、氙灯泵浦染料激光器、铜激光泵浦染料激光器、金蒸汽激光器等,但不同程度上都存在着上述的弊病。此外,即使对于已广为流传的激光理疗用氦氖激光器,为提高疗效和开拓新的适应症也要求进一步提高激光功率,因此,能否把实用氦氖激光器输出功率提高到百毫瓦量级以上,就成为改变这种激光器的传统设计理论的新课题。

一、扁平大功率氦氖激光器的设计理论基础

氦氖激光器中建立粒子数反转的主要机制是:在作为激光器激活介质的放电等离子体中,通过电子碰撞氦原子,使其激发到亚稳能级,通过共振转移过程,将其激发能转移到氖原子的激光上能级,再通过受激辐射到激光下能级,然后通过自发辐射很快跃迁到 $1s$ 能级。它向基态的跃迁是被能量跃迁的选择定则禁止的,只有扩散到管壁,把能量交给管壁才回到基态,因此,是典型的四能级系统。

为提高激活介质的激活增益,必须增加激光上能级粒子数的激励和加速激光下能级的驰豫,而激光上能级的激励实际上是等离子体中高能电子所作的贡献。对于低温等离子体,其电子能量分布基本上处于麦克斯威尔能量分布,其中能量 E 大于氦原子亚稳能级激发能 eV_e 的高能电子数为

$$n_e = \int_{eV_e}^{\infty} \frac{4}{\pi} \left(\frac{E}{kT_e} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E}{kT_e}\right) \frac{dE}{E} \quad (1)$$

式中, e 为电子电荷, k 为玻尔兹曼常数, T_e 为电子温度。因此,为增加高能电子数,必须提高等离子体电子温度。对于圆截面放电管而言,这就意味着降低气体压力和减小放电管直径,而这就减少了激光模体积及其反转粒子数,与试图获得高功率输出相矛盾。因此,对于一般氦氖激光管而言,难以通过增加放电管直径来提高输出功率,总是一根又长又细的毛细管!

若设放电管具有尺寸为 $a \times b$ 的矩形截面,通过理论分析,在气压为 p 时,放电等离子体电子温度 T_e 由下式确定^[1]

$$\frac{\exp(eV_i/kT_e)}{\sqrt{eV_i/kT_e}} = 0.68 \times 10^7 C^2 p^2 \left(\frac{a^2 b^2}{a^2 + b^2} \right) \quad (2)$$

而对于一般半径为 R 的圆截面放电管内等离子体电子温度 T_e 由下式确定:

$$\frac{\exp(eV_i/kT_e)}{\sqrt{eV_i/kT_e}} = 1.2 \times 10^7 C^2 P^2 R^2 \quad (3)$$

在(2)和(3)式中, C 是气体常数, V_i 是电离电位。

比较(2)式和(3)式可见,若两种情况下的电子温度相等,则得矩形截面放电管的等效半径为:

$$R = 0.765 \sqrt{a^2 b^2 / (a^2 + b^2)} \quad (4)$$

由此可见,若 $a \gg b$, 则 $R \approx 0.765b$, $T_e \approx f(pb)$, 即对于具有二维尺寸的矩形截面放电管而言,其等离子体电子温度主要取决于短边尺寸,而与长边尺寸无关。那么,激光增益就可以通过控制其短边尺寸来保证,而增加长边尺寸来提高激光模体积从而提高激光功率。也就是说,可以通过增加横向尺寸来提高单位放电长度的输出功率。

此外,从加速激光下能级的驰豫来说,扁平放电截面也比圆放电截面有利得多,因为“面积一定,圆周长最短”,而加速激光下能级的驰豫对二氧化碳激光器而言尤为重要。

因此,由等离子体参量的理论分析给我们发展新型气体激光器以有益的启示,也为此奠定了设计理论基础。

二、扁平大功率氦氖激光器的实验研究

为验证上述分析结果,提出了一种新颖诊断技术,即用探极-光谱法诊断上述激光等离子体的电子温度。简单地说,即利用具有探极的辅助试验管,测量电子温度及发射光谱特征的某些对应关系。然后,测出待测器件中等离子体发射光谱特征。再由上述关系确定其电子温度^[2]。实验量测表明,扁平放电截面氦氖激光管内等离子体电子温度基本上与直径为其短边

长度的 1.5 倍圆截面放电等离子体电子温度相当,与理论分析结果基本一致。

基于上述分析,对扁平放电截面的大功率氦氖激光器进行了实验研究。起初,利用低熔点玻璃封接技术试制了放电长度为 1 米,放电截面 3×18 平方毫米,腔长 1.1 米的旁轴内腔结构的氦氖激光器。采用平凹谐振腔结构,其球面全反镜曲率半径为 3 米,平面输出镜的透射率为 1.5% 左右。在不同气压,不同气体配比,不同放电电流条件下,波长 0.63 微米激光功率如图 1,2 所示。由图可见,当气压为 106.6 帕斯卡,气体配比为 He:Ne=7:1 时,激光器输出功率可达 80 毫瓦以上。此外,还进行了激光束横向光强分布和激光光束发散角等实验研究工作^[3]。

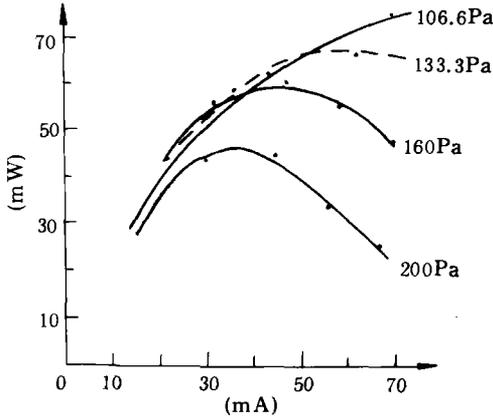


图 1 当 He, Ne 气压比为 7:1 时,不同气压,不同放电电流时波长为 0.63 微米的激光功率

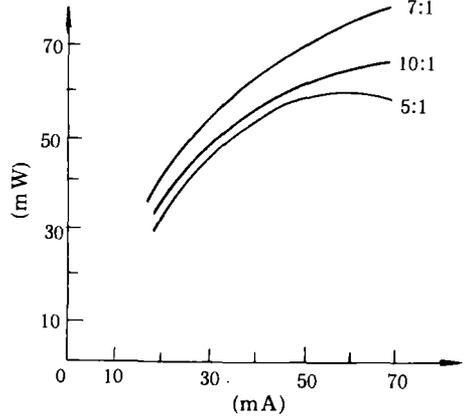


图 2 当总气压为 106.6 Pa 时,不同气体配比,不同放电电流的激光输出功率

以后,改用硬料扁玻璃管制成放电长度为 1.5 米的扁平大功率氦氖激光器。为兼顾激光器

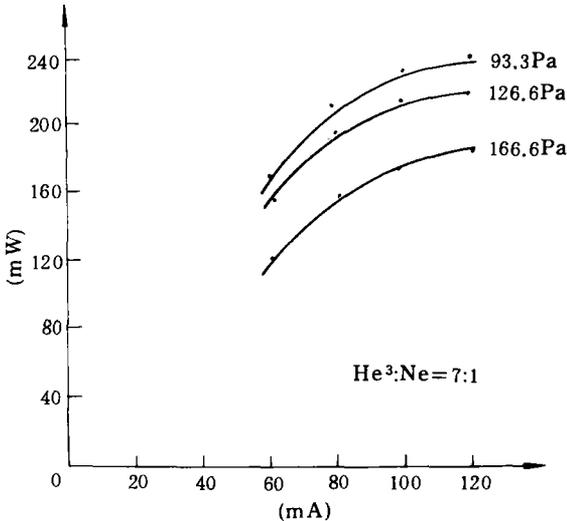


图 3 1.5 米放电长度的扁平大功率氦氖激光管输出特性下进行的。

输出功率稳定性和激活介质模体积的利用率,该激光器的球面全反镜曲率半径仍为 3 米。平面输出镜透射率为 2% 左右,而扁平放电管长为 1.3 米,截面为 4×16 平方毫米和长 0.2 米截面为 5×20 平方毫米的扁玻璃管(靠球面镜端)对接而成,并充以同位素 He³ 取代普通 He,在不同气压,不同气体配比,不同放电电流时的波长 0.63 微米激光功率如图 3 所示。由图,这种激光器在气压为 93.3 帕斯卡,气体配比为 He³:Ne=7:1 时,放电电流为 100 毫安左右,激光功率可达 200 毫瓦以上。

此外,实验未采取抑制 3.39 微米激光振荡,也未精细选择最佳工作条件的情况

总之,从上述实验研究不难看出,这种扁平大功率氦氖激光器与同样放电长度的一般氦氖激光管相比,其输出功率几乎成倍地提高。

三、扁平大功率氦氖激光器的应用前景

1. 激光医疗

激光医疗是应用广泛、经济效益较高的一种激光应用技术,由于激光在医疗上的应用的优点是常规医疗手段所不能比拟的,因此,它已广泛应用于医学各个领域。

激光医疗可分为激光手术治疗、弱激光治疗(又称非手术治疗,包括理疗和光针治疗)和光动力学治疗三大类。而这种扁平大功率氦氖激光器的发展将明显推动弱激光治疗和光动力学治疗的发展。

(1) 弱激光治疗 至今一般氦氖激光治疗机的输出功率都在 30 毫瓦以下,发展 50—200 毫瓦的氦氖激光医疗器械,将具有以下特点:

作理疗用时,幅照面积大,可大幅度改变辐照功率密度,从而提高疗效、缩短治疗时间,以及开拓新的适应症。对于在一般氦氖激光治疗下收效不大的病例,有可能在大功率氦氖激光的治疗下得到明显疗效。

作多光针治疗,可同时治疗更多的病人,甚至一个病房只需一台工作母机即可。

单位长度输出功率的提高,有利于氦氖激光医疗器械的小型化,以便制成便携式激光医疗器械,向家庭保健用品发展。

(2) 光动力学治疗 这种扁平大功率氦氖激光器通过耦合单光纤,输出 300 毫瓦以上的 0.63 微米激光功率,将是一种比较理想的光动力治疗的光源,与光动力学治疗所用的其他激光系统相比,具有成本低、寿命长、效率高、使用方便等优点,这就为这种先进的治癌手段的推广应用提供了十分有利的条件

2. 单模大功率氦氖激光器的研究

在上述的实验条件下,所获得的激光显然是多模的,但只要选用合适的放电管和谐振腔结构或合适的选模装置,完全可以从扁平的激活介质获得单模激光输出。由于激光光束相干性的提高,将进一步开拓其应用领域,譬如,全息技术、激光光谱、信息存贮等方面的应用,并可望部分替代离子激光器。

3. 其他应用

(1) 扁平激光激活介质置于光学谐振腔内,既具有一定的激光增益,又有丰富的振荡模式,因此,很适于演示激光横模作为激光物理的教学仪器。

(2) 红色激光是激光大屏幕显示的必不可少的组成部分。扁平大功率氦氖激光器可取代昂贵的氩离子激光器作大屏幕激光显示用。

(3) 绿光氦氖激光器是最近颇受青睐的气体激光器,利用这种扁平大功率氦氖激光器的设计原理,完全可以发展大功率绿光氦氖激光器与同类器件相竞争。

4. 发展新型气体激光器的应用

提高单位长度激光器的激光功率历来是激光器发展的努力方向,因为它涉及到激光器的小型化、低成本、稳定性、实用性等问题,这不仅对于正在开发应用的氦氖激光器是十分重要的,而且对于其他气体激光器的改进也是十分重要的。譬如,最常见的二氧化碳激光器,自问世以来,已出现了多种放电结构,如直管式、折叠式、横向流动式、纵向流动式、快速流动式、慢速流动式、波导式、高气压横向激励式等等。其目的也就是提高单位长度的激光功率。不难理

解,扁平放电二氧化碳激光器结构也将是一种提高输出功率的简易可行的设计方案,因为它无论对上能级的激励还是对下能级的驰豫都是十分有利的。同样,对其他气体激光器的设计也是适用的。因此,早在1986年,该项发明向美国、日本提出申请专利时已将发明保护权项扩展到扁平放电截面的气体激光器,即可用于除氦氖激光器以外的其他气体激光器。

笔者的这项研究工作得到国家自然科学基金委员会、机械电子工业部、上海亚明灯泡厂的资助。该项技术于1987年6月25日获准中国发明专利,在北京光大实业公司的资助下于1986年3月向美国、日本提出专利申请,在中国国际信托投资公司的资助下,于1987年5月向美国提出实审,并于1989年8月29日正式被批准为美国专利。利用该项技术研制的“大功率氦氖激光治疗机”于1991年1月23日通过部级鉴定。当年1月26日《人民日报》(海外版)头版以醒目标题“中国激光研究获重大突破……”报道了此项成果。此外,有关照片曾刊登于1990年7月《瞭望》杂志(海外版)和1991年8月27日《大公报》(香港)等报刊,并在38个我国驻外使馆的画廊内展出,在国内外引起很大的反响。

参 考 文 献

- [1] 凌一鸣等,矩形放电管中等离子体参量的理论分析,激光杂志,9卷,1期,1988。
- [2] 凌一鸣等,用探针-光谱法诊断扁平氦氖激光器放电等离子体电子温度,激光杂志,11卷,3期,1990。
- [3] 凌一鸣等,矩形放电管的氦氖激光器,应用激光,7卷,1期,1987。

FLAT HIGH POWER He-Ne LASER —AN INVENTION PATENTED IN CHINA AND U.S.A.

Ling Yiming

(Department of Electronic Engineering, Southeast University)

Abstract

The design principle and the experimental results of flat high power He-Ne laser being an invention patented in China and U.S.A. are described briefly in this paper. The output power of this He-Ne laser can be enhanced by increasing its transverse dimension. It is proved experimentally that about 200 mW of laser power at wavelength of $0.63\mu\text{m}$ can be obtained from this kind of He-Ne laser having discharge length of 1.5 meter. And its application field are discussed at last.