

14-20

第4卷第5期
1996年10月光学 精密工程
OPTICS AND PRECISION ENGINEERINGVol. 4, No. 5
October, 1996

大功率半导体激光器应用的若干问题研究

郑朝思 胡企铨

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 主要致力于探索半导体激光及其泵浦的固体激光器在实际应用中的推广。具体包括: 半导体激光的热稳定、波长稳定性及功率稳定性; 激光二极管阵列多光束组合式光学耦合系统; 端面泵浦各向异性介质的热效应模型; 半导体泵浦的输出损耗电光调制的多功能激光技术。

关键词: 半导体激光; 光学耦合; 热效应; 电光调制

1 引言

半导体激光器以及半导体激光泵浦的固体激光技术, 推动半导体制造技术的飞速发展, 在众多的生产和科研领域获得广泛的应用。近十年来, 半导体激光及其泵浦的固体激光器的发展, 各国科研人员在这方面投入极大热情, 并取得了许多突破性的进展。随着研究的深入, 由传统的激光技术研究转向半导体激光及其泵浦的特有的激光技术的研究, 给激光技术的发展带来了全新的概念。小型、高效、多功能的激光技术越来越多地被开发和研究^[1-3]。我们主要致力于探索半导体激光及其泵浦的固体激光器在实际应用中的推广。

2 大功率激光二极管的光束特性

激光二极管在使用过程中, 其特性会随温度发生变化, 为了使波长、功率稳定必须用温控系统对 LD 热沉恒温。但芯片与热交换率影响了 LD 芯片的温度值。LD 波长、功率常常随 LD 结的温度变化而变化。为了满足 LD 应用中对波长、功率稳定性的要求, 用半导体致冷器温控系统对激光二极管的热沉温度进行控制(本实验中约为 20℃)。在此基础上, 对激光二极管波长的变化及功率稳定性参数进行测试, 以便为实际应用提供重要的参数。

激光二极管发光以后, 由于激光二极管芯片发出的热须通过传导向二极管热沉散热, 所以激光二极管芯片的热平衡须经过一段时间才能达到, 且这段时间长短决定于芯片与热沉间的热交换系数。所以激光二极管的管芯温度会有一上升过程而后趋于稳定。激光二极管管芯的温度上升, 造成二极管材料的折射率升高且准费米能级间距减少^[4]。准费米能级间距减少, 使峰值增益系数和增益达最大值处的波长朝长波长方向移动。激光二极管介质折射率的增加, 造成谐振腔决定的波长向长波方向移动。由于上述两方面的原因, 激光二极管管芯的温升引起激

收稿日期: 1996年8月1日

光波长向长波方向移动。管芯达到热平衡时,激光波长才达到稳定。

当激光二极管工作在阈值之上时,注入电流的增加对激光波长的影响主要也是由温度上升引起的。注入电流的增加同时也导致热耗散的增加,产生更多的热量。由于管芯与热沉之间的散热正比于二者之间的温差,所以在热沉温度由温控系统恒温时,管芯必须保持更高的温度才能将注入电流增加产生的更多的热量传出去。因此,注入电流的增加造成了管芯温度的增加,导致激光波长向长波方向移动。

管芯的温度特性同时还决定了激光二极管的功率稳定性。激光发光以后,LD 芯片的温度将上升一段时间,而后达到热平衡。因而其功率受温度特性的影响先下降一段时间而后达到较稳定的状态。

3 组合式半导体激光的耦合系统特性

半导体激光器随着其性能的改善和价格的降低已经得到越来越广泛的应用。但单个半导体激光器目前国内水平仅为 2~3 W,限制了其在更高功率领域的应用。如何将瓦级的单个半导体激光器组合成有相当功率并且激光光束具有可接受的小尺寸焦斑和发散角,是扩大半导体激光器的应用范围的重要手段。这将涉及到复杂的光学耦合系统。目前已有相当多的方法用于组合多个半导体激光器。这些方法包括:偏振双光束耦合、柱透镜聚光、微棱镜线阵聚光等^[5-7]。这些方法和光学系统或较为复杂或价格较贵,对少量的半导体激光器的组合还可应用,但要组合十几甚至几十个的半导体激光器,这些方法的代价太大。我们采用自聚焦透镜研究了一种光学耦合方法,大大降低了造价且光学系统也较为简单。

我们的组合式光学耦合基本思想是对列阵激光二极管光束分别进行准直,再对准直后的多光束会聚,获得叠加的多光束焦斑。会聚系统可采用消球差透镜或两正交柱面透镜。为了能在较小的结构上集成较多的 LD,关键在于准直透镜的选取。我们曾采用非球面透镜和消球差透镜组进行准直,虽然能获得较好的焦斑尺寸,但是由于要加工微小的非球面透镜或透镜组比较困难且价格较贵,难以提高准直集成度。经过权衡我们决定采用自聚焦透镜,其直径只有 1~2 mm,在 40 mm 的长度上就可以集成 20 个以上的透镜列阵。所以该系统对提高 LD 的耦合数,增强激光组合功率,减小系统尺寸具有显著的优势。

为了实验方便起见,我们选择了一个比较简单的三个半导体激光器耦合系统,其实验结构如图 1 所示。

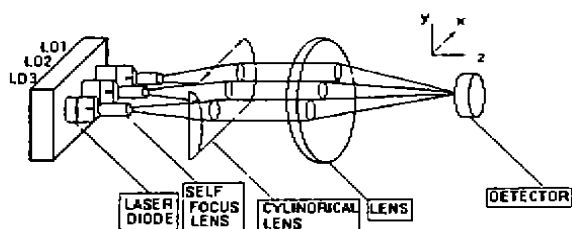


图 1 三个 LD 的光学耦合系统结构示意图

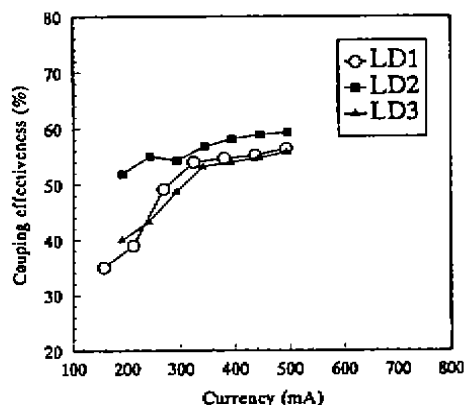


图 2 LD1, LD2, LD3 经光学系统的耦合效率

三个半导体激光器经光学系统聚焦后,在垂直结方向和平行结方向的焦斑大小分别为 1.1 mm 和 0.65 mm 焦深约为 1 mm。

图 2 给出 LD1、LD2、LD3 分别经光学系统耦合后,出射光能与入射光能之比即耦合效率。

4 半导体泵浦各向异性介质的热效应

端面泵浦具有很好的腔模耦合特性,所以具有很高的光-光转换效率。端面泵浦的激光材料也从原先的 Nd:YAG 发展到各种新型激光材料,Nd:YVO₄ 就是其中运用较为广泛的一种。由于 Nd:YVO₄ 是各向异性的激光介质,所以其端面泵浦的热模型与各向同性介质不同,必须考虑其各向异性的特点。

在理论分析之前先作如下假设:(1)激光介质的物理特性不随温度变化;(2)介质侧面为传导冷却,与四周热交换系数很大,且热沉散热足够快,则介质侧面温度为常数(假设为 0);(3)介质端面为空气对流冷却;(4)泵浦光斑为圆形高斯分布;(5)激光介质为各向异性,且几何轴与导热率主轴重合。

根据傅立叶导热定律,可以得出导热方程式的普遍形式:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} + q_v \quad (1)$$

其中, T 为激光介质的温度; q_x, q_y, q_z 分别为 x, y, z 方向的热通量, ρ 为物体的密度, c 为物体的比热, q_v 为热源的发热率。

在激光介质侧面传导冷却的情况下,由于端面为空气对流冷却,其边界热交换系数 h_D 远远小于传导冷却下的边界热交换系数 h_c 。因而,由端面散发的热量远远小于侧面热传导散发的热量,故而 q_z 可忽略不计,则方程可写为二维热传导方程:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + q_v \quad (2)$$

当各向异性介质的几何轴与导热率主轴相一致时,其热传导方程可简化为:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + q_v \quad (3)$$

其中, k_x, k_y, k_z 为激光介质的导热系数; q_v 为泵浦产生的内热源的发热率。

稳态时的热传导方程为:

$$k_x \frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial y^2} + a q_0 e^{-az} = 0 \quad (4)$$

设 $T(x, y, z) = T(x, y)T(z)$, 由上式可得 $T(z) = e^{-az}$ 。所以热传导方程表示为求解 $T(x, y)$ 的方程:

$$k_x \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial y^2} + a q_0 = 0 \quad (5)$$

用超松弛法可求解该式。所得图形如图 3 所示。图 3 为温度在 x, y 面的二维分布 $T(x, y)$ 。由于 $T = T(x, y)e^{-az}$, 则温度分布 $T(x, y)$ 将沿 z 方向指数衰减。

这样,我们可以得到温度三维分布图象:在径向分布的 $T(x,y)$ 沿轴向 z 指数衰减。

我们在实验中利用剪切干涉法对激光介质的温度分布引起的折射率分布进行测量。干涉条纹与等温线分布具有类似的形状, x 方向的导热系数大,干涉条纹密度稍小,而 y 方向正好相反。说明非对称的导热系数,造成了折射率分布的非圆对称。这必将引起热焦距在子午面和弧矢面的不同,从而造成激光腔形在子午面和弧矢面的不同,使得输出的激光光束在两方向的发散角不同。热影响大的截面,热焦距小,激光输出的发散角大;反则亦反。

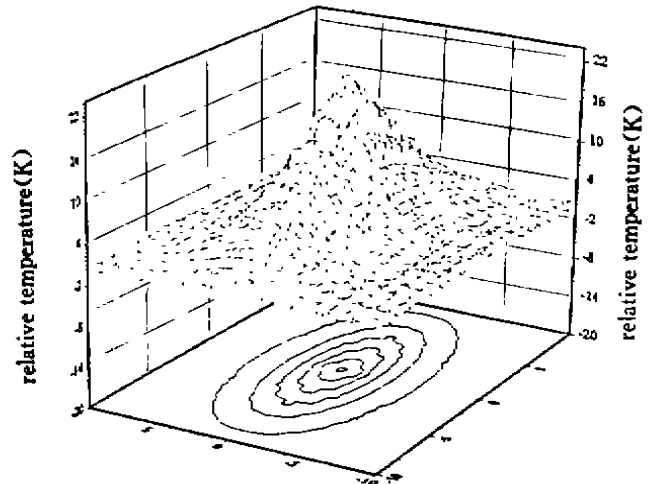


图 3 激光介质的温度分布

5 LD 泵浦固体激光器的输出损耗电光调 Q 技术

传统的电光调 Q 技术多为在谐振腔内部插入反射损耗电光调制元件,其结构较为复杂且损耗大。我们利用以往选模用的 F-P 电光调制器取代激光输出腔镜,调制其输出损耗则可实现电光调 Q^[8-9]。此器件具有结构简单、尺寸小、损耗小、调 Q 电压低的优点,且可实现输出耦合、调 Q、选模三重功能^[10]。我们在此文中以 Nd:YVO₄ 微型电光调 Q 为例就此三种功能进行详细讨论。

半导体泵浦的新型调 Q 激光器的结构如图 4 所示。温控的半导体激光器发射波长为 809 nm 的连续激光束,经耦合透镜后泵浦于 Nd:YVO₄ 微片表面。Nd:YVO₄ 的泵浦面对 809 nm 增透、对 1.06 μm 高反;另一面紧贴 LiTaO₃ 标准具放置,两面组合对 1.06 μm 部分反射,而 LiTaO₃ 的输出面亦对 1.06 μm 部分反射从而构成标准具输出腔。LiTaO₃ 的 c 轴方向加负脉冲电压,电极间距为 2.5 mm。LiTaO₃ 的电压调制使得 LiTaO₃ 输出镜反射率周期性变化,实现电光调 Q 功能。

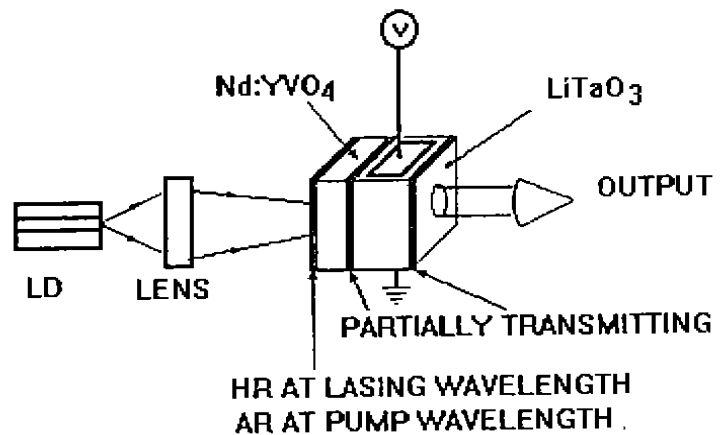


图 4 微片电光标准具调 Q 激光器

5.1 输出损耗电光调 Q 输出镜

F-P 标准具的反射率由激光波长确定,激光波长由泵浦面及标准具的第一面来确定。标准具的反射率是标准具的光学长度的函数,通过改变标准具的光学长度可获得 Q 开关。

标准具的反射率:

$$R = \frac{F \sin^2(\delta/2)}{1 + F \sin^2(\delta/2)} \quad (6)$$

$$F = \frac{4r}{(1-r)^2}$$

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda} n_2 L \cos\theta \quad (7)$$

λ 为激光波长, r 为标准具膜层反射率, L 为标准具的厚度, n_2 为标准具的折射率, θ 为标准具法线与光线的夹角。当 $\theta = 0$ 时, $\delta = 4\pi n_2 L / \lambda$ 。

为了改变标准具的光学长度,须改变 n_2 或 L 。选用 LiTaO₃ 晶体做成标准具,通过改变电场强度,由电光效应引起折射率 n_2 的变化,从而实现光学长度的改变。

加电场后有:

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda} (n_2 - \Delta n_2) L = \frac{4\pi}{\lambda} (n_2 - n_2^3 \gamma_{33} E) L \quad (8)$$

在周期性电压的作用下,利用反射率的周期性变化可实现激光器的调 Q。Q 开关关闭时,调制偏压使得该标准具对增益腔的所有激光模式有较高的透过率,使之达不到振荡阈值。在激发状态时,调制电压脉冲使得该标准具对某一模式具有较高的反射率,从而形成调 Q 脉冲输出。

5.2 F-P 标准具对脉冲输出的模式选择

设激光工作物质的两个相邻的纵模为 $\lambda_1 = \frac{2n_1 l}{m}$; $\lambda_2 = \frac{2n_1 l}{m+1}$ 则标准具对两波长的 δ 为

$$\delta_1 = \frac{2m\pi n_2 L}{n_1 l}$$

$$\delta_2 = \frac{2(m+1)\pi n_2 L}{n_1 l} \quad (9)$$

当 $n_2 L$ 为 $n_1 l$ 的整数倍时,相邻的纵模 λ_1, λ_2 具有相同透过率 1。此时 F-P 对所有的激光模式都增透。加电场后, F-P 的折射率变化为: $n' = n_2 - n_2^3 \gamma_{33} E$, 则 δ_1, δ_2 的变化量分别为:

$$\Delta\delta_1 = \frac{4\pi n_2^3 \gamma_{33} E L}{\lambda_1}$$

$$\Delta\delta_2 = \frac{4\pi n_2^3 \gamma_{33} E L}{\lambda_2} \quad (10)$$

若 $\Delta\delta_1, \Delta\delta_2$ 在 π 以内,由于 $\lambda_1 > \lambda_2$, $\Delta\delta_1 < \Delta\delta_2$ 。因而 F-P 标准具对 λ_2 的反射率变化较 λ_1 的严重,

原先对 λ_1, λ_2 全透的标准具此时对 λ_2 的损耗较 λ_1 的损耗小。当加一定的电场时,若 λ_2 的增益大于损耗,而 λ_1 的增益小于损耗,则输出波长为 λ_2 的激光模式。F-P 调制器对脉冲激光的模式选择示意于图 5。图中 λ_1, λ_2 为相邻的两激光模式,未加电场时的反射率曲线为实线,对两激光模式 λ_1, λ_2 增透,无激光输出。当加电场时, λ_1, λ_2 处反射率曲线的移动量不同,如图中虚线所示(虚线为加电场后的反射率曲线)。对应于 λ_2 的反射率曲线此时达到高反,而对应于 λ_1 的反射率仍为高透,故 λ_2 起振形成脉冲输出。

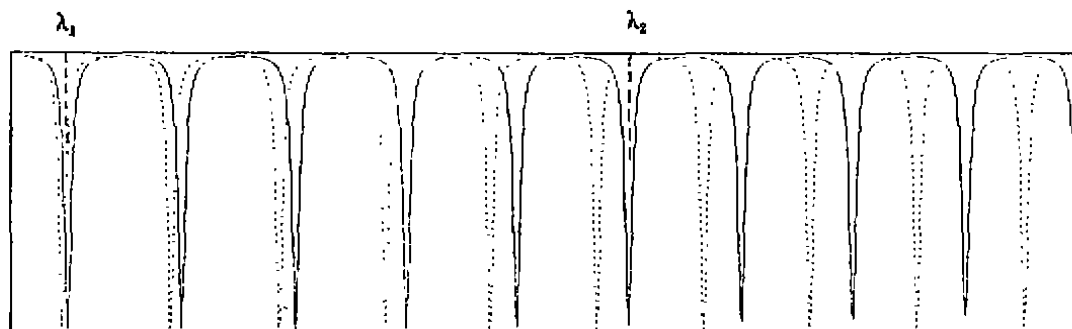


图 5 电光标准具对脉冲激光的模式选择

6 结 论

在半导体激光器的使用过程中,不仅仅要考虑二极管热沉的温度对激光特性的影响,同时也必须考虑芯片与热沉的热交换对激光特性的影响。这点往往易被忽视。

半导体激光器的广泛应用推动了半导体激光阵列的应用研究。自聚焦透镜阵列多光束耦合系统在价格及结构上有显著的优势。但由于自聚焦透镜的象差较大,采用带球面的消球差自聚焦透镜可以克服这一缺点。

半导体激光性能的改善促进了半导体泵浦固体激光的发展。端面泵浦 Nd:YVO₄ 各向异性介质的热效应,呈现出非轴对称性,但其对光束质量的影响较小,输出光束的非轴对称性并不显著。

输出损耗电调制技术是一种多功能、小型化的激光技术,可以实现输出耦合、调 Q、选模三重功能,是 DPL 小型化中较为典型的一种激光技术。但微小标准具的加工及面形检测和机械的高度稳定性是该器件实用化的关键,有待设计制造工艺更进一步的完善。

参 考 文 献

- [1] N. Mackinnon et al., A laser diode array pumped, Nd:YVO₄/KTP, composite material microchip laser. Opt. Commun., 1994, 105: 183
- [2] H. Nagai et al., Low-noise operation of a diode-pumped intracavity-doubled Nd:YAG laser using a Brewster plate. IEEE J. Q. E., 1992, 28(4): 1164
- [3] T. Taira et al., Intracavity frequency doubling and Q switched in diode-laser-pumped Nd:YVO₄ laser. Appl.

- Opt. ,1995,34(21):4298
- [4] 武 岚等,半导体激光器的光谱及参数测量. 半导体光电,1993,14(3):278
- [5] Hamid Hemmati, 2.07 μm CW diode laser pumped $\text{Tm}, \text{Ho}, \text{YLiF}_4$ room-temperature laser. Opt. Lett. 1989, 14(9):435
- [6] James R. Leger et al. , Geometrical Transformation of linear diode laser arrays for longitudinal pumping of solid-state lasers. IEEE J. Q. E. ,1992,28(4):1088
- [7] T. Y. Fan, Efficient coupling of multiple diode laser arrays to an optical fiber by geometric multiplexing. Appl. Opt. ,1991,30(6):630
- [8] T. Kobayashi et al. , Single frequency oscillation using two coupled cavities in incorporating a F-P electro-optic modulator. Appl. Phys. Lett. 1970,16:217
- [9] J. J. Zayhowski et al. , Diode-pumped microchip lasers electro-optically Q-switched at high pulse repetition rates. Opt. Lett. ,1992,17(17):1201
- [10] 郑朝思等, LD 泵浦固体激光器的输出损耗电光调 Q 技术. 中国激光,1996(7)

Some Questions About the Application of the Diode Lasers and Diode Pumped Lasers

Zheng Chaosi, Hu Qiquan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract

The spreads of the application of the diode laser and diode pumped solid-state lasers are explored. These include the following areas; thermal stability, wavelength stability and power stability of the diode lasers; the optical coupling system of the diode laser arrays; thermal model of the end-pumped anisotropic medium; multi-function laser technology of the electrooptical etalon.

Key words: Diode laser, Optical coupling, Thermal effects, Etalon

郑朝思 男,1970年11月生。1996年中国科学院上海光机所理学硕士毕业。现主要从事半导体激光器的应用研究。