

二极管激光器泵浦的固体激光器

汤 晓 周佩珍

(同济大学波耳固体物理研究室)

本文简要介绍了二极管激光器泵浦的固体激光器的结构、优越性、研究现状以及发展前景。

一提起固体激光器,人们也许会联想到用于研究核聚变的钨玻璃激光器,那是安放在实验大厅中重达几吨乃至数十吨的庞然大物。就连普遍使用的激光打孔机、激光测距仪以及实验室用的固体激光器,都得配有橱柜般大小的电源以及复杂的水冷系统。这些都使得那些企图把固体激光器搬上人造卫星或航天飞机的工程师们望而生畏。但是,近年来,以半导体二极管激光器泵浦的固体激光器的实用化,无疑为航天科学家们带来了新的希望。由于这种激光器的多种优越性能,使它获得了蓬勃发展,也引起越来越多的人们的兴趣。文献[1],[2]对这一领域已作了详细介绍。我们在此简明扼要地介绍二极管激光器泵浦的固体激光器,让读者对其结构、优越性、研究现状以及发展前景有一大概的了解,以求在相近或相关领域工作的同志能有所启发和借鉴。

一、二极管激光器泵浦固体激光器的基本原理

激光器由三个要素构成,即激光工作物质、谐振腔和泵浦手段(或称激发源),三者缺一不可。其中泵浦手段使处于基态的激光工作物质激发到高能激发态,实现所谓粒子数反转,从而使该工作物质具有增益,通过谐振腔的正反馈,产生受激振荡。通常用气体放电的方法对气体激光器进行泵浦。这时,作为激光工作物质的原子、离子或分子与气体放电过程中产生并被加速的电子相互碰撞而受到激发。对于半导体二极管激光器,则直接在 p-n 结两端加上正向

电压,注入电子-空穴对,在结区形成粒子数的反转分布而达到泵浦的目的。虽然半导体也是固体的一种,但习惯上人们所称的固体激光器,其激光工作物质常常是存在于透明单晶或非晶固体材料中的稀土离子或过渡金属离子。由于这些离子存在于绝缘的固体之中,所以放电或电注入均不能达到泵浦的目的。这种情况下,一般使用由气体放电灯(脉冲工作时称为闪光灯)产生的强光进行泵浦。从本文标题可知,人们以二极管激光器取代了气体放电灯,也就是用一种激光作泵浦源来得到另一种激光。

用二极管激光器来泵浦固体激光器的想法由来已久。1968年10月,美国的 Monte Ross^[3]曾为他关于用半导体二极管激光器泵浦固体激光器的想法申请了专利。1974年 Keyes 和 Quist^[4]制成了世界上第一台由二极管激光器泵浦的掺铈氟化钙($\text{CaF}_2:\text{U}^{3+}$)固体激光器。他们用了五台砷化镓二极管激光器,置于 CaF_2 棒的侧面,整个装置放在液氦中,终于获得了 $2.613\mu\text{m}$ 的红外激光。自70年代中期以来,由于 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 单晶普遍被用来作为固体激光器的材料,所以人们的兴趣就集中到 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 上。

稀土离子 Nd^{3+} 的价电子在 4F 壳层,价电子的外面还有 5S 和 5P 两个闭合壳层。由于这两个闭合壳层的屏蔽作用,反映价电子之间跃迁的吸收和荧光光谱很少受外界的影响。处在不同基质中的 Nd^{3+} 具有大体相同的能级位置(见图1右半边)。无论是钨玻璃激光器还是 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光器,都产生常见的 $1.06\mu\text{m}$

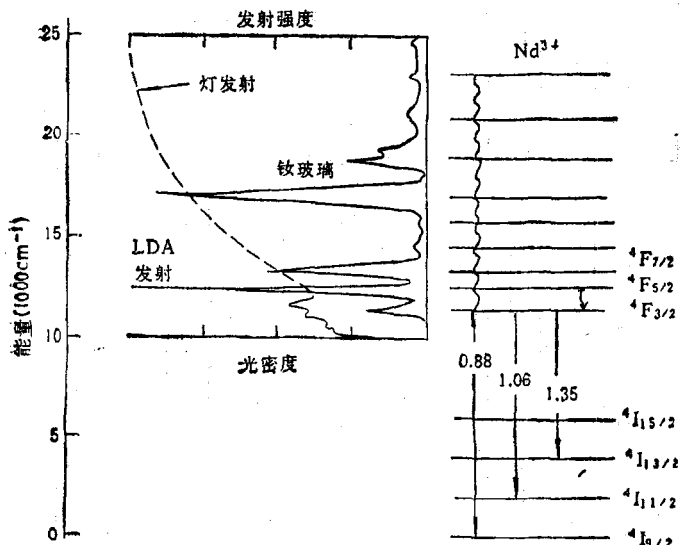


图1 钕离子能级和相应的吸收光谱

近红外激光。钕激光是四能级系统，通常用气体放电灯发出的强光，把钕离子从基态 $^4I_{9/2}$ 激发到 $^4F_{5/2}$ 及其以上各能级，通过快速的无辐射弛豫，大部分离子将处于寿命很长的 $^4F_{3/2}$ 态。当跃迁回到 $^4I_{11/2}$ 时，钕离子发出波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 的荧光，最后又通过无辐射跃迁回到基态。从基态 $^4I_{9/2}$ 到 $^4F_{3/2}$ 的激发是维持这个四能级系统工作的最经济的途径，其激发波长约在 $800 \mu\text{m}$ 附近。于是，人们就联想到用二极管激光器作为泵浦源的可能性。

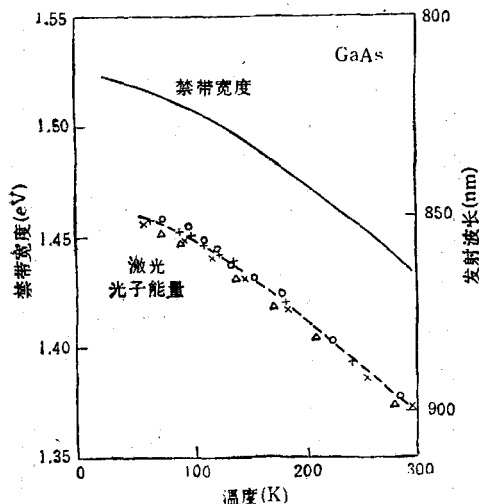


图2 砷化镓的禁带宽度及激光发射波长与温度的关系
二极管激光器的输出波长直接取决于该器

件 p-n 结区域的禁带宽度。通常的砷化镓激光二极管在室温下发出波长约 900nm 的激光。随着温度的变化，禁带宽度也发生变化，从而输出波长也相应变化。图 2^[2] 反映了这种变化的规律。从图中还可看到，激光输出波长的温度系数 $\frac{\Delta\lambda}{\Delta T} = 0.24 \text{nm}/^\circ\text{C}$ 。

目前用作泵源的二极管激光器通常都在砷化镓中加进了元素铝，记作 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ ，是镓铝砷三元化合物混晶， x 表示铝含量的大小。这种三元化合物半导体的禁带宽度强烈地依赖于铝含量 x 。1969 年 M.

B. Panish 和 S. Sumski^[6] 研究了 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 的液相外延技术，测出了镓铝砷三元化合物半导体的吸收限(禁带宽度)与铝含量的关系，如图 3 所示。图中纵坐标 ΔE_g 表示不同铝含量的 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 的禁带宽度与 GaAs 禁带宽度之差。随着铝含量的增加， $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 的禁带宽度不断增大，所以二极管激光器发射的波长随之变短。只要仔细控制铝含量，我们就可以

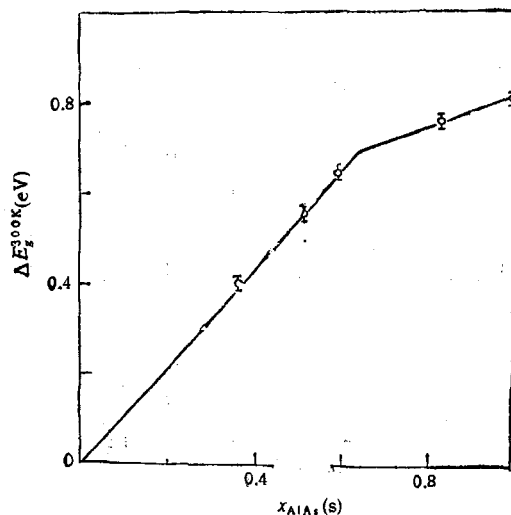


图3 镓铝砷三元化合物半导体的禁带宽度随铝含量的变化关系

制造出输出波长在 800nm 左右的二极管激光器，再稍稍调节二极管的温度，使它的发射波长

与 Nd^{3+} 的 ${}^4\text{I}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{F}_{5/2}$ 跃迁准确匹配,就能达到有效泵浦的目的。

80 年代前期,二极管激光器的制造技术还不太完善,必须采用多个二极管对激光棒进行泵浦,以致不得不采用横向泵浦的方式。而且由于受二极管激光器的功率、效率、寿命等的限制,用它作固体激光器的泵源只是一种尝试,离实用化的目标还相差甚远。近年来由于分子束外延技术的发展, MOCVD 技术的出现,二极管激光器的制造技术有了很大提高,出现了大功率二极管阵列。美国光谱公司二极管实验室 (spectra diode laboratories) 的 M. Sakamoto 等人^[7]在 1989 年 4 月报告了他们创造的 1cm 单片二极管激光阵列连续波输出功率达 55W 的最新记录,这种器件以 7W 输出时,寿命可达 5000h。1W 左右的二极管激光阵列已有商品出售。

正因为这个原因,近一、二年来,用二极管激光器泵浦的固体激光器得到突飞猛进的发展。目前最常用的泵浦方式为纵向泵浦(图 4)。二极管激光阵列输出的 800nm 左右波长可以通过调节它的温度来精确控制,以与 Nd^{3+} 能级匹配。它输出的激光用一组透镜系统收集后会聚到 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 棒的末端。在棒的这个末端,镀上一层对 800nm 左右为非反射而对钕激光 1.06 μm 为全反射的介质膜。泵浦光穿过这个末端沿棒的轴向传播,直至到达棒的另一端时已基本被全部吸收。这一端为钕激光的输出端,所以被镀上了对 1.06 μm 非反射的介质膜。在稍远处有一输出反射镜,它与激光棒左边的端面构成了激光谐振腔。透过输出镜的部分就是我们所要的激光。

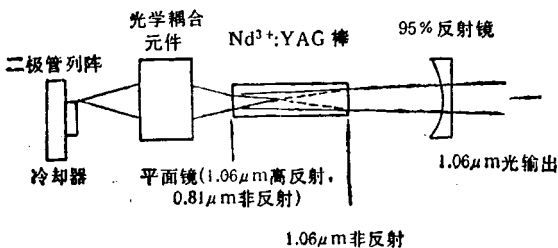


图 4 常用的纵向泵浦方式

二、二极管激光器作为固体

激光器泵源的优越性

与气体放电灯泵浦的 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光器相比,使用二极管激光器作泵源,有如下突出优点:

1. 效率高

诚然,气体放电灯泵浦的固体激光器,能以较低的成本获得较高的功率或较大的能量输出,但相比之下效率是很低的。如以输入激光棒的泵浦能量转换成激光输出能量来计算转换效率 η ,则气体放电灯泵浦的 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光器的转换效率仅为 1—2%,而二极管激光器泵浦的器件高达 30^[8]—50^[2]%,从理论上说,理想的光量子转换效率可高达 78%。

图 1 左边“钕玻璃”所指的是处在玻璃中的钕离子的吸收光谱,谱峰的位置分别与右边的钕离子能级一一对应,谱线峰值的大小表示吸收的强弱。虚线表示气体放电灯发射的连续谱;“LDA 发射”表示激光二极管阵列的发射光谱,它们都以“发射强度”来量度。由于激光二极管阵列发射的是 800nm 左右且与 Nd^{3+} 的 ${}^4\text{I}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{F}_{5/2}$ 跃迁相匹配的单色光,所以在图上仅以一短线表示。从图 1 可以清楚地看出,在气体放电灯发射的连续谱中,只有与 Nd^{3+} 的吸收峰具有相同光子能量的一小部分才能被吸收,从而有机会转变成激光。灯发出的连续谱中除了波长处于尖锐的 Nd^{3+} 吸收峰位置以外的绝大部分能量均不能被 Nd^{3+} 吸收,只能加热激光棒而白白地以热能形式消耗掉。相反,二极管激光器发射的是与 Nd^{3+} 的吸收峰完全吻合的单色光,因而能被充分吸收而转化为激光。这就是两者效率相差如此悬殊的主要原因。

其次,气体放电灯发射的是非相干光,分布在 4π 立体角内,尽管传统的固体激光器采用了类似椭圆的聚光腔,以提高泵源的聚光效率,使尽可能多的泵浦光投射到激光棒上,但因灯和棒都不是简单的几何线,加上聚光腔内壁引起的光损失,使总的聚光效率不能达到理想的

程度。与此相反,二极管激光器输出的是相干光,尽管其发散角大,但总可以用光学元件把输出光有效地耦合到激光棒上,使聚光效率比气体放电灯高得多。我们甚至可以用多模光纤把二极管激光器的输出光传送到与之相隔甚远的激光头,实现远距离泵浦。

2. 稳定性好

由于二极管激光器发出的线状谱能被 Nd^{3+} 有效地吸收,泵浦光源中未被吸收而变成热能的部分比起闪光灯来要少得多,所以激光棒由于热效应引起的不稳定性要小得多。激光棒的热胀冷缩,激光棒发热不均匀致使折射率的不均匀等,使输出激光的强度在空间和时间上变化很大,输出激光的波长也产生无规则的漂移。传统固体激光器由于发热而引起的这类不稳定性在改用二极管激光器泵浦后将得到明显的改善。另一方面,泵浦光源本身的稳定性对激光的稳定性影响也很大。很显然,二极管激光器比气体放电灯要稳定得多。现在,人们可以把二极管激光器泵浦的固体激光器设计成非常理想的基横模输出,聚焦后的光斑达到了衍射极限的尺寸,使激光能量高度集中。就频率稳定度而言,这类器件已做到了 3kHz,而气体放电灯泵浦的器件只能做到大约 120kHz。

3. 结构紧凑体积小

目前生产的氩离子激光器,管长1—2m,电源重约 100kg,耗电 kW 以上,需水冷系统,其标称功率仅约 10W 左右,而实际工作时往往只用到几 W。从前面所举例子可知,1cm² 见方的二极管激光阵列可以输出 55W 激光用于泵浦固体激光器。由于二极管阵列的效率高达约 20—30%,并且采用低压大电流电源,其重量和体积都可以做得很小。采用这样小巧的泵源做成的固体激光器自然是结构紧凑、体积小、重量轻。这使得二极管激光器泵浦的固体激光器在某些部门如军事、航天等方面获得特别重要的应用。

也许有人会问,为什么不直接使用二极管激光器的输出光,而要用它作为泵源,再从 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 获得 1.06 μm 的激光呢? 这是因

为 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光的线宽可以做到二极管激光的 10^6 分之一那么窄。其次, $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光可以用Q开关或锁模技术获得短脉冲和超短脉冲,从而获得高峰值功率。再则, $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光输出有非常好的光束质量,聚焦后可获得极高的亮度。所有这些性能都是二极管激光所无法达到的。目前,不少研究人员正试图以某些三价稀土离子取代 Nd^{3+} ,掺入YAG或其他固体介质中,以获得其他波长的激光输出。这样的稀土离子必须在800nm附近有吸收峰,并且有获得粒子数反转的能级结构。目前已获得激光输出的有 Yb^{3+} , 1.029 μm ; Ho^{3+} , 2.097 μm ; Tm^{3+} , 2.3 μm 和 1.5 μm 还有 Er^{3+} , 1.6 μm 和 2.8 μm 等。值得特别指出的是 Er^{3+} 的 1.6 μm 激光线,预料在光纤通信中有重要的应用。

三、现状和前景

对于 10W 以下的激光器目前大多采用如图 4 所示的纵向泵浦方式。对于这样的激光器,人们希望得到尽可能高的效率和尽可能好的光束质量,并在此基础上进行倍频、调Q和锁模等,以获得多种不同的功能。

据美国宇航公司 (aerospace corporation) 的 R. Fields 在私人通信中称,1988 年初他用效率为 31% 的二极管激光器去泵浦 $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$, 获得 525mW 1.06 μm 的激光输出。它的光-光转换效率达 50%,电-光转换效率为 15.7%,是迄今所知的最高记录。据 J. J. Smith^[9] 报告,1988 年初,他通过倍频,已获得 180mW、532nm 的绿色激光输出,电-绿光的转换效率达 1.5% 左右。据美国光谱物理公司的 T. M. Baer 和 D. F. Head 等^[10] 报告,1989 年春,他们以二极管激光阵列泵浦固体激光器,泵浦功率 10.9W,得到激光输出功率 3.8W,光-光转换效率为 35%。如在泵浦功率中扣除阈值以下的功率来计算效率(即微分效率或斜效率),则他们的结果为 40%。据 W. F. Krupke^[2] 分析认为,目前激光二极管的效率在 30—35% 范围,可以获得 Nd^{3+} 激光的电-光转换效率为 10—15%。随着技术的发展,激光二

极管的效率可望达到 60%，那时 Nd^{3+} 激光的电-光转换效率可望达到 25%。

为了改善或获得各种性能，人们在如图 4 所示的纵向泵浦的基础上，对二极管激光器泵浦的固体激光器进行了各种改进和发展。例如，已有许多作者进行了倍频，获得 532nm 的绿色激光。前面所述的 J. J. Smith^[9] 就是其中的一个。Kozlovsky 等人^[11] 获得 29.7mW 单轴模倍频输出，倍频效率高达 56%。J. Berger 等人^[12] 除了用连续波的纵向泵浦以外，在 YAG 棒的侧面施以脉冲泵浦，实现了对输出激光幅度的直接调制，展示出在光纤通信中十分重要的性能。A. Owyong 和 P. Esherick^[13] 在二极管激光器泵浦的 YAG 棒上使用由压电陶瓷产生的应力对输出激光的频率实现调制，调制范围达 76.5GHz。Basu 和 Byer^[14] 在 1987 年用单个条形二极管激光器去泵浦处在三镜腔中的钕玻璃和 Nd^{3+} :YAG 激光，并对其进行了锁模，获得了 10ps 的超短脉冲。

为了获得大功率的激光输出，从 1988 年年中开始研制出很好的二维二极管激光阵列，并用以泵浦片状固体激光器。目前片状激光器有两种基本形式。一种称为“之”字形片状激光器，激光增益介质材料为条块状，两个端面与输出光方向成布儒斯特角，激光束在进入端面时产生折射，以致在介质的上下两个面上来回反射形成“之”字形的路程，因而得名，如图 5 所示。由于在条块状增益片上下两面都用二维二极管激光阵列进行泵浦，总的泵浦功率增加了许多倍。另一种片状激光的增益介质是由许多平行放置的平板状片子组成，但这些平板的面都和出光方向成布儒斯特角，这种形式称为布儒斯特片状激光器。由于原则上增益介质片可

以大量使用，因此可望获得极大的输出功率。不过目前受大功率二维二极管激光阵列产品的限制，这类器件尚在开发研制和有待提高的阶段。可以想象，在它们比较成熟后，在军事部门以及一些特殊的场合会有很大的用处。

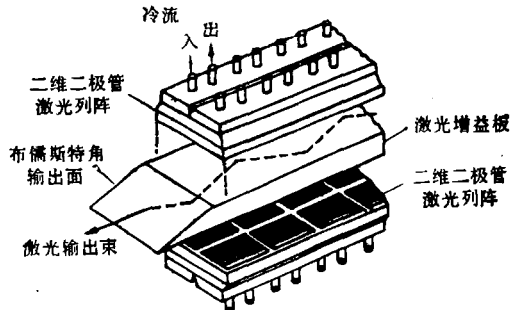


图 5 之字形片状激光器结构示意图

- [1] Tso Yee Fan and Robert L. Byer, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 24-6(1988), 895.
- [2] William F. Krupke, *Lasers & Optronics*, 7-3(1988), 79.
- [3] D. L. Begley, *Laser Focus / Electro-Optics*, June (1988), 18.
- [4] R. J. Keyes and T. M. Quist, *Appl. Phys. Lett.*, 4 (1974), 50.
- [5] C. H. Gooch, *Gallium Arsenide Lasers*, John Wiley & Sons Ltd., (1969), 109.
- [6] M. B. Panish and S. Sumski, *J. Phys. Chem. Solids*, 30(1969), 129.
- [7] M. Sakamoto et al., *Advance Program of CLEO'89 and QELS'89*, Baltimore, Maryland, April 24—28 (1989), 86.
- [8] J. Berger et al., *Appl. Phys. Lett.*, 51(1987), 1212.
- [9] J. J. Smith, *CLEO'88*, April, 1988.
- [10] Thomas M. Baer, David F. Head and Masamichi Sakamoto *CLEO'89 and QELS'89*, Baltimore, Maryland, April 24—28(1989), 98.
- [11] W. J. Kozlovsky et al., *IEEE J. Quant. Elect.*, 24-6 (1988), 913.
- [12] J. Berger et al., *Appl. Phys. Lett.*, 53-4(1988), 268.
- [13] A. Owyong and P. Esherick, *Optics Letters*, 12-12 (1987), 999.
- [14] S. Basu and R. L. Byer, *CLEO'87, Opt. Soc. Amer., Washington D. C.*, (1987), Paper WN3.

(上接第 507 页)

小时的观测并测得了中子寿命的新数据。

- [1] Ramsey, *Physics Today*, 33-7 (1980), 25.
- [2] Wineland and Wayne Itano, *Physics Today*, 40-6

- (1987), 34.
- [3] *Physics Today*, 38-5 (1985), 17.

(张革根据 *Physics Today* 1989 年第 12 期第 17—19 页编译)