

# 全固化固体激光器研究及进展

陈义红, 赵兵, 赵德政, 曹卫东  
(湖北光通光电系统有限公司, 湖北 武汉 430074)

摘要: 文章详细分析了全固化固体激光器的结构、特点、市场和应用前景。

关键词: 全固化固体激光器, 二极管泵浦固体激光器, 光纤激光器

## 一、引言

就武汉中国光谷产业而言, 能量光电子是其中最重要的组成部分, 而激光器及其激光设备又是能量光电子的核心产品。自第一台红宝石激光器问世, 固体激光器就一直占据了激光器发展的主导地位, 特别是在 20 世纪 80 年代出现的半导体激光器以及在此基础上出现的全固化固体激光器更因为体积小、重量轻、效率高、性能稳定、可靠性好和寿命长等优点, 逐渐成为光电行业中最具发展前途的领域。目前世界范围内销售的商品固体激光器已有 500 余种, 但从 1998 年开始, 固体激光器中的 Nd:YAG 激光器的市场占有率和销售额已升为第一位。

传统的固体 YAG 激光器, 通常由掺钕钇铝石榴石晶体棒、泵浦灯、聚光腔、光学谐振腔、电源及制冷系统组成, 其转换效率为 2%到 3%。另一方面整个激光器需要庞大的制冷系统, 体积很大。泵浦灯的寿命约为 300 到 1000 小时, 操作人员需花很多时间频繁的换灯, 中断系统工作, 使自动化生产线的效率大大降低。因此技术上没有大的发展空间, 全固化固体激光器将取代灯泵浦固体激光器, 这是固体激光器的发展方向。近年来由于大功率激光二极管制造工艺的成熟和生产成本的降低, 使二极管泵浦固体激光器的研究得到了飞快的发展, 且已正式进入商品化。世界著名的激光公司 Rofin-Sinar 所销售的激光工业加工设备中 60%已是二极管泵浦的固体激光器。表一给出了三类激光器的特性比较。

表一、光纤激光器、二极管泵浦固体激光器和灯泵浦固体激光器的特性比较

特性	光纤激光器	二极管泵浦固体激光器	灯泵浦固体激光器
工作方式	连续或脉冲	连续或脉冲	连续或脉冲
辐射波长 (微米)	0.532, 1.07, 1.8-2.0	0.532, 1.06	1.06
输出功率/能量	高达 2KW/高达 1mJ	高达 2KW/高达 60mJ	高达 2KW/高 100J
电光转换效率	高达 20%	高达 20%	低于 6%
光束质量	基模*	基模或多阶模	基模或多阶模
功率/能量稳定性	< 1.5%	< 3%	< 3%
冷却方式	风冷	风冷或水冷	水冷
可靠性	最佳	较好	较差
维护周期	无需维护	无需维护	300 小时
使用寿命	大于 10 万小时	大于 1.5 万小时	大于 5 千小时
系统体积	小巧紧凑	较小	较大
光纤传输	单模光纤	多模光纤	多模光纤
成本	较高	较高	较低
技术	最新	新	旧

\* 输出功率大于 100 瓦时一般采用光纤束, 但光束质量比所有其它激光器系统高一个量级。

与传统灯泵浦固体激光器比较, 全固化固体激光器具有以下优点:

1) 转换效率高: 由于半导体激光的发射波长与固体激光工作物质的吸收峰相吻合, 加之泵浦光模式可以很好地与激光振荡模式相匹配, 从而光光转换效率很高, 已达 50%以上, 整机效率也可以与二氧化碳

激光器相当，比灯泵固体激光器高出一个量级，因而全固化固体激光器可省去笨重的水冷系统，体积小，重量轻，结构紧凑，易于系统集成，性能价格比高。

2) 性能可靠、寿命长：激光二极管的寿命大大长于闪光灯，达 15000 小时以上，而闪光灯的寿命只有 300-1000 小时。激光二极管的泵浦能量稳定性好，比闪光灯泵浦优一个数量级，性能可靠，可制成全固化器件。运行寿命长，成为至今为止唯一无需维护的激光器，尤其适用于大规模生产线。

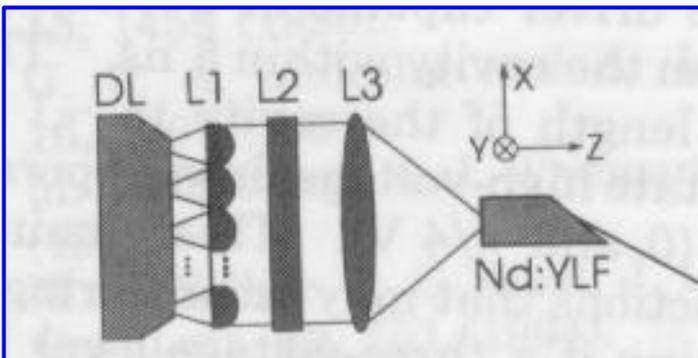
3) 输出光束质量好：由于二极管泵浦激光的高转换效率，减少了激光工作物质的热透镜效应，大大改善了激光器的输出光束质量，激光光束质量已接近理论极限  $M^2 = 1$ 。

## 二、全固化固体激光器结构及特点

全固化固体激光器可分为两类：二极管泵浦固体激光器和光纤激光器。现将其结构和特点分别叙述如下。

### 1. 二极管泵浦固体激光器

激光二极管泵浦固体激光器的种类很多，可以是连续的、脉冲的、调 Q 的，以及加倍频混频等非线性转换的。工作物质的形状有圆柱和板条状的。而泵浦的耦合方式又分为直接端面泵浦、光纤耦合端面泵浦和侧面泵浦三种结构。泵浦所用的激光二极管或激光二极管阵列出射的泵浦光，经由会聚光学系统将泵浦光耦合到晶体棒上，在晶体棒的泵浦耦合面上为减少耦合损失而镀有对激光二极管波长的增透膜。同时，该端面也是固体激光器的谐振腔的全反端，因而端面的膜也是输出激光的谐振腔，起振后产生的激光束由输出镜耦合输出。



(a) 二极管直接端面泵浦固体激光器示意图



(b) 湖北光通生产的端面直接泵浦固体激光器

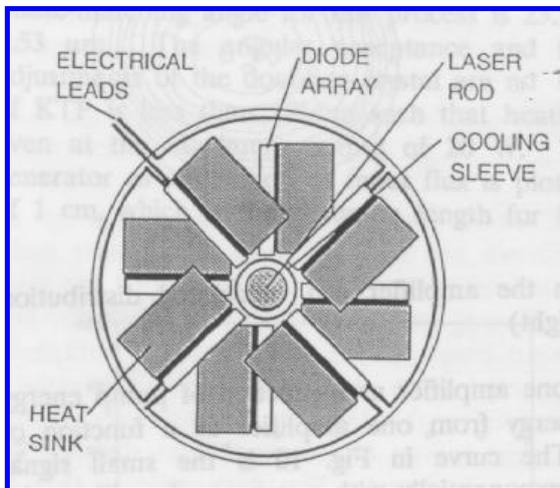
图一 二极管端面直接泵浦固体激光器

实验结果表明，与其它两种泵浦方式相对比，端面泵浦的效率最高。其原因为：在泵浦激光模式不太差的情况下，泵浦光都能由会聚光学系统耦合到工作物质中，耦合损失较少；另一方面，泵浦光也有一定的模式，而产生的振荡光的模式与泵浦光模式有密切关系，匹配的效果好，因此，工作物质用泵浦光的利用率也相对高一些。然而，端面泵浦虽然效率高，但固体激光的输出功率受端面限制，因为端面较小时只能采用单元的激光二极管，这就限制了泵浦光的最大功率。如果采用功率较大的激光二极管阵列作泵浦源，则由于阵列型二极管输出的泵浦光模式不好，因而不易将泵浦光有效地耦合到工作物质中，实际上降低了效率。而且由于泵浦光的模式较为复杂，泵浦后输出的  $1.06\mu\text{m}$  激光的光束质量也不易保证。

针对这一弱点，人们又进一步发展了光纤耦合的端面泵浦和侧面泵浦方式。端面泵浦激光器由激光二极管、两个聚焦系统、耦合光纤、工作物质和输出反射镜组成。与直接端面泵浦不同，这种结构首先把激光二极管发射的光束质量很差的激光耦合到光纤中，经过一段光纤传输后，从光纤中出射的光束变成发散角较小的、圆对称的、中间部分光强最大的泵浦光束。用这一输出的泵浦光去泵浦工作物质，由于它和振

荡激光在空间上匹配得很好，因此泵浦效率很高。由于激光二极管或二极管阵列与光纤间的耦合较与工作物质的耦合容易，从而降低了对器件调整的要求。而且最重要的是这种耦合方式能使固体激光器输出模式好、效率高。

侧面泵浦板条固体激光器要得到更大功率的激光输出，就必然要采用泵浦功率较大的阵列型激光二极管，由于阵列二极管的发光面较大，不可能利用端面泵浦，因此，大多采用侧泵浦方式。这种结构的特点是，在工作板条的一侧用激光二极管阵列，另一侧是全反器，使泵浦光尽量集中到工作物质中。板条状激光器结构的特点是，激光通过工作物质介质全内反射传输，这样，激光经过工作物质的长度就大于工作物质的外形长度，即提供了更长的有效长度。在有效长度内，工作物质皆可直接吸收到由激光二极管发射的泵浦光，从而较易获得大功率输出，研究开发的重点就在于发展大功率的端面泵浦固体激光器，从激光二极管发出的光束经光学耦合从侧面泵浦激光晶体，从而获得单级输出的激光；并可以根据所要得到的输出功率要求而改变激光工作物质的长度而改变激光二极管泵浦的效率和功率。



(a) 二极管侧面泵浦固体激光器示意图



(b) 新加坡制造技术研究院研制的  
二极管侧面泵浦固体激光器

图二 侧面泵浦二极管泵浦固体激光器

## 2. 光纤激光器

光纤激光器属光波导激光器，以掺稀土元素（Nd，Yb 或 Er）的光纤为工作物质，并用二极管激光作为泵浦源。可脉冲和连续运转，其性能已明显优于二极管泵浦固体激光器，不仅在光纤通讯领域得到广泛应用，而且由于大功率光纤激光器的成功开发，正向激光打标、焊接、切割等工业激光应用领域迅速发展。

光纤激光器基本结构和固体激光器的结构基本相同，由泵浦源（激光二极管和必要的光学耦合系统）、增益介质（掺稀土元素的增益光纤）、谐振腔（可为反射镜、光纤光栅或光纤环）等组成。按泵浦光的入射方式，光纤激光器可分为：端面泵浦光纤激光器、双包层光纤激光器和任意形状光纤激光器。



图三 IPG 生产的系列光纤激光器

### 1) 端面泵浦光纤激光器

端面泵浦光纤激光器中的光纤与普通光纤十分相似，仅在纤芯掺以激光工作物质。与二极管端面泵浦固体激光器的泵浦方式相似，采用光学耦合系统将泵浦光直接耦合到光纤的纤芯端面上。通常情况下，两端面也是激光谐振腔的全反镜和输出镜。可以看出，这种结构简单，但其泵浦端面因面积很小，可以注入的泵浦光能量有限，故该类激光器属小功率光纤激光器，它们大多应用于光通讯中。

### 2) 双包层光纤激光器

为了克服端面泵浦光纤激光器注入功率小的问题，人们发明了双包层光纤激光器。它主要由纤芯、内包层、外包层和保护层组成。纤芯采用了稀土掺杂技术，为激光增益介质，稀土离子吸收泵浦光并辐射单模激光，外包层采用低折射率材料。通常情况下，泵浦光采用斜入射方式，使泵浦光在内外包层界面形成全反射，这样，泵浦光在多次反射后，多次穿过内包层和纤芯，使纤芯吸收率大大增加，可达 90%以上。这种泵浦方式与二极管泵浦固体激光器的侧面泵浦方式很相似，注入功率可以大大增加，又提高了泵浦光的利用率。这类光纤激光器的输出功率在百瓦量级。

### 3) 任意形状光纤激光器

为了克服双包层光纤激光器输出功率受到限制，进一步提高输出功率，日本学者率先开发出了一种任意形状光纤激光器，有望获得千瓦量级的光纤激光器。其方案是将光纤排放成盘状结构，大大增加了泵浦光的利用面积，其有效利用面积比纤芯端面和包层端面大得多。根据光纤的排放方式不同，这类光纤激光器又可分为盘状、片状、圆柱状、环状和棒状等不同结构的光纤激光器。

## 三、全固化固体激光器市场和应用展望

根据《Laser Focus World》报道，2002 年全球商用激光器产值为 43 亿美元，其中，非二极管激光市场为 44%，预计 2003 年全球商用激光产值 48 亿美元，其中非二极管激光市场占领 41%。表二、三和四分别给出了近几年来全球商用激光市场的情况。可以看出，在全固化固体激光器中，二极管泵浦固体激光器仍然占主导地位。从 2002 年的销售到 2003 年的销售预测来看，全球非二极管激光产值平均增长为 5.9%，灯泵浦固体激光器增长为 5.83%，而二极管泵浦固体激光器增长却高达 12%，表明全固化固体激光器正快速增长，逐步在市场中成为主导产品。表五给出了 1999-2001 年国内激光产品的销售情况，可以看出，固体激光器销售额远大于气体激光器的销售额，但全固化固体激光器的销售额未见报道，其研究和开发还远落后于世界水平，其主要原因应归咎于我国大功率半导体激光器水平的落后。2001 年国内激光产品销售额为 28.39 亿元，仅湖北产值就为 15.64 亿元，显示武汉中国光谷在能量光电子方面的强大实力。

表二、全球商用激光器市场（亿美元）

1999 年	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年
49	88	56	43	48

表三、全球二极管激光在全固化固体激光器中的应用（亿美元）

	1999 年	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年
千台	51.8	71.4	88.8	122.8	144.1
百万美元	53.6	85.0	100.0	118.6	135.1

表四、全球非二极管激光器市场

	灯泵浦	流动 CO2	准分子	二极管激光	封离式 CO2	合计
2002 年（亿美元）	6.18	4.35	3.75	1.92	1.12	18.8
2003 年（亿美元）	6.54	4.57	4.01	2.15	1.12	19.9
2002 年（台）	13281	2960	1405	9278	12355	113021
2003 年（台）	13880	3110	1630	10430	12565	112506

表五、 1999-2001 年全国激光产品销售额按主要激光器件分类统计 ( 万元人民币 )

类别	1999 年		2000 年		2001 年	
	销售额	增长率	销售额	增长率	销售额	增长率
氦氖激光器及应用	1926.3	-32.7%	2179.6	13.2%	2634.45	20.9%
CO <sub>2</sub> 激光器及应用	12018.9	38.7%	15201.8	26.5%	31942.5	110.1%
YAG 激光器及应用	25635.1	-4%	49639	93.6%	66288.6	33.5%
半导体激光器及应用	39249.4	164.6%	67612.6	72.3%	156974.8	132.2%

由于高功率全固化固体激光器的相继成熟，其应用领域也已从最成熟的光通讯方面向其它更为广阔的激光应用领域扩展，如材料加工中的激光标记、激光焊接、激光打孔和激光切割等，其它领域如激光医学、激光检测和测量等。图四给出了现在国内生产的最广泛使用的二极管泵浦固体激光打标机，而图五给出了国外生产的光纤激光打标机。



图四 湖北光通生产的二极管泵浦激光打标机



图五 日本生产的光纤激光打标机

参考资料：

1. K. Kincade, Review and forecast of the laser markets, Laser Focus World, Jan. 2003, 73-98
2. 刘宝胜, 中国激光、光电子产业的发展, 中国光电, 典藏珍版创刊号, 2003 年, 122-125
3. 刘颂豪, 光纤激光器, 中国光电, 典藏珍版创刊号, 2003 年, 1-7
4. 王天及, 高功率光纤激光器及其应用, 激光产品世界, 2002 年 8 月, 6-12
5. 丘军林, 国外激光器发展动态, 激光产品世界, 2003 年 2 月, 15-21
6. 陈义红, 赵兵, 赵德政, 大功率全固化固体激光器的研制, 光电子·激光, Vol. 12, No. 12, 2001 年 12 月, 1234-1235

## Review of All-solidification Solid-state Lasers

CHEN Yihong, ZHAO Bing, ZHAO Dezheng, Cao Weidong  
(Hubei Guangtong Photoelectric System Co Ltd, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The configurations and characteristics of all-solidification solid-state lasers are reviewed in detail. Their market and applications are given in the paper.

**Key words:** solid-state lasers, fiber lasers, diode-pumped solid-state lasers

陈义红博士，出生于湖北荆州，现为湖北光通光电系统有限公司首席科学家、总经理，主要从事大功率全固化固体激光器及激光加工设备的研究、开发和生产。