

· 光电器件与材料 ·

## 半导体激光二极管的光纤耦合技术

王 侠, 欧阳竝, 李 苏

(中国电子科技集团公司第三十四研究所, 广西 桂林 541004)

**摘 要:**将半导体激光二极管(LD)发出的光更高效地注入到光纤中是光纤激光器与光纤放大器研究的先决条件. 半导体激光二极管包括二极管单管、条形巴、二维堆栈和二极管阵列等,其各自的耦合技术之间有联系也有区别. 分析介绍了有代表性的柱状楔形法、V型槽法、微透镜法等二极管单管与光纤的耦合技术;光纤束耦合法、光束整形法等二极管条形巴与光纤的耦合技术;以及二极管二维堆栈和二极管阵列与光纤的耦合技术等各种光纤耦合技术,比较了这些方法之间的共通点,供今后的研究人员选择和参考.

**关键词:**激光二极管;光纤耦合;光纤束;光纤阵列;V型槽;预准直

**中图分类号:** TN313<sup>+</sup>.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1673-1255(2010)03-0026-07

## Coupling Technology of LD and Optical Fiber

WANG Xia, OUYANG Hong, LI Su

(China Electronics Technology Group Corporation NO. 34th Research Institute, Guilin 541004, China)

**Abstract:** Injecting light from laser diode (LD) into fiber is the precondition of researching fiber optical laser and fiber optical amplifier. Single-tube diode, LD bar, LD two-dimensional stack and LD array all belong to LD, their coupling technologies are different and related. This paper introduces and analyzes the representative LD tube's coupling technology such as cylindrical wedge method, V-groove method, micro-lens method; LD bar's coupling technology such as optical fiber bundle coupling method, beam shaping method; and coupling technology of LD 2D stack and LD array with optical fiber. The common points of these methods are compared for the choice and reference of future researchers.

**Key words:** laser diode(LD); fiber coupling; fiber bundle; fiber array; V-grooves; pre-collimating

光纤和能与光纤配套使用的激光器是构建光通信系统和光纤激光器系统的先决条件. 半导体激光器,特别是半导体激光二极管(LD)可直接作为光通信光源,也可作为激光器、放大器的泵浦源在激光工程研究领域有着十分重要的地位. 随着光纤激光器输出功率的进一步提高,一个高功率光纤激光系统往往需要多个 LD 提供足够的泵浦功率. 于是,将 LD 发出的光高效地耦合进光纤,以及将众多的泵浦光束高效地合成一束已成为光纤激光器研究的重要问题,引起了国内外激光器研究者及制造商的重

视. 光纤耦合技术包括“LD 与输出尾纤的耦合技术”和“泵浦激光器尾纤与光纤激光器光纤的耦合技术”等,相对来说“LD 与输出尾纤的耦合技术”方法更多,形式更灵活,有些技术稍加延伸就可推广应用在“泵浦激光器尾纤与光纤激光器光纤”的耦合中. 因此,文中论述的重点放在“LD 与输出尾纤的耦合技术”上,如无特殊强调,文中一律以“光纤耦合技术”代之.

半导体激光二极管(LD)包括二极管单管(Tube)、条形巴(Bar)、二维堆栈(Stack)以及二极管

收稿日期:2010-05-07

基金项目:广西自然科学基金项目资助(2010GXNSFA013131)

作者简介:王侠(1981-),女,工程师,江苏溧阳人,双学士学位,研究方向为光通信技术,光纤激光器和光纤放大器。

阵列(Array)等.随着光纤激光器和光纤放大器研究的不断深入和制作工艺的不断提高,各种更新颖的想法和更先进的光纤耦合技术层出不穷,文中细致比较了国内外各种光纤耦合技术的研究现状,总结寻找出各种光纤耦合技术之间的规律,供今后的研究人员选择和参考.

## 1 二极管单管与光纤的耦合技术

二极管单管结构相对简单,功率较小,发光元基本上只有一个,但同样存在光束质量差,快轴、慢轴发散性差异大等问题.要想高效的将二极管单管的出射激光耦合进光纤,仍需采用一些特殊技术.

### 1.1 柱状楔形微透镜光纤法

为提高光纤耦合技术的耦合效率和失配容忍度,可用带柱状楔形微透镜的多模光纤与大功率单片式 LD 进行耦合,有关实验表明,该方法可得到最高为 87.06% 的耦合效率<sup>[1]</sup>.

柱状楔形光纤微透镜是近年出现的一种新型光纤微透镜.首先在光纤端头通过研磨和抛光等机械加工得到楔形角,然后在楔角顶端继续通过研磨加工得到柱状微透镜.柱状楔形光纤微透镜通过楔角和柱状透镜的组合来对发散角比较大的半导体激光光束快轴方向整形,激光光束慢轴方向发散角较小,满足正弦值小于数值孔径的限制,对这个方向上的出射光束不必整形即可顺利耦合.图 1 所示为柱状楔形微透镜光纤与 LD 耦合系统结构示意图.

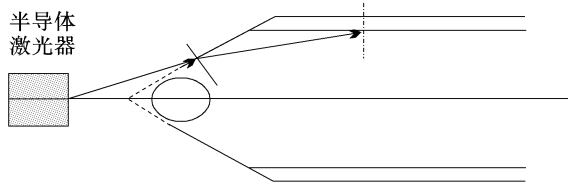


图 1 柱状楔形微透镜光纤与半导体激光器耦合系统结构示意图

与此原理类似的耦合方法还包括球状光纤耦合法<sup>[2]</sup>和伞状光纤耦合法<sup>[3,4]</sup>等.这类耦合方法的工作原理都是增大光纤对激光的接收角.就目前的文献资料来看,柱状楔形微透镜光纤耦合法的耦合效率最高,同时,该方法经仔细设计还有望用于宽发射域半导体激光器及高功率二极管 Bar 条与光纤的耦合系统中.

### 1.2 V 型槽侧面耦合法

不同于柱状楔形微透镜光纤耦合法,VSP(V-groove side-pumping)技术是一种侧面耦合系统.有资料显示法国 Keopsys 公司利用该技术结合双包层有源光纤,已实现了 20 W 的光纤激光输出.其原理如图 2 所示:在双包层光纤的内包层上加工出 V 型槽结构,使激光二极管发射的泵浦光从侧面垂直入射后,经 V 型槽侧面反射进入内包层中传播.

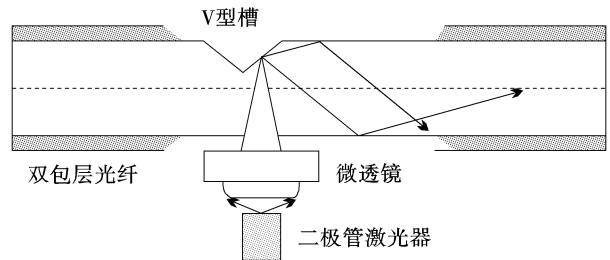


图 2 V 型槽侧面耦合系统结构示意图

该方法应用灵活,可将多个二极管激光器耦合在同一根光纤上,有利于实现高功率激光输出,但该方法也存在如下缺点:

(1)加工工艺较为复杂:光纤内包层直径一般都很小,需要特殊工具加工出 V 型槽结构,切割成形后还需要对加工表面进行抛光处理,技术难度大.

(2)对激光二极管的对准精度要求很高:微小的误差都会严重影响泵浦耦合效率,不仅调试困难,而且环境适应性差.

(3)单元泵浦功率一般只有瓦级,采用这种技术研制的光纤激光器功率也较小.

可能正是基于以上因素,这种耦合方法国内采用的并不多.

### 1.3 微透镜耦合法

图 3 所示为一种多 LD 单管与单根光纤的耦合结构图.其工作原理是先用一组准直器(collimators)将每个 LD 单管发出的光束在快轴方向上进行预压缩,再用一组反射镜(1st mirrors)将准直后的激光束按一定角度反射到反射镜 2 上(2nd mirror),使这 10 条光束排列成如图 4 所示的紧密结构的类圆形光束.之后再由一组透镜(Focusing lens)将这组光束聚焦耦合到一根光纤中去.

此结构简单明了,便于理解和实现,其设计思路还可被用在二极管条形巴与光纤的耦合技术以及二极管阵列与光纤的耦合技术中.但此类耦合方法仍

然存在耦合效率不稳定,系统调节复杂等问题.下文将进行详细分析.

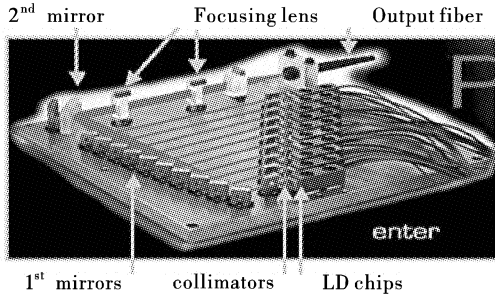


图 3 多 LD 单管单根光纤的耦合结构示意图

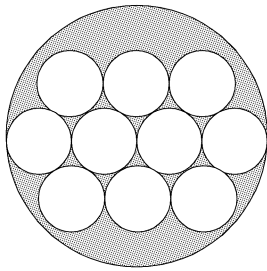


图 4 反射镜 2 上理想情况下的光束排列图

## 2 二极管条形巴 (Bar) 与光纤的耦合技术

大功率二极管 Bar 条的光束质量很差,在 2 个方向上的发散性差异也很大,通常由 19 个(或 49 个)发光元组成,每个发光元面积为  $150 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ ,发光元间距为  $500 \mu\text{m}$ (即阵列总长为  $1 \text{ cm}$ ).出射激光在快轴方向上的发散角  $< 40^\circ$ ,慢轴方向上的发散角  $< 10^\circ$ .图 5 所示为一个典型的输出功率数十瓦的 Bar,它由 19 个发光元组成,其光束质量为

$$M^2 = \frac{\pi\omega\theta}{\lambda} = \frac{\pi \times [(1/2)\text{cm}] \times [(10^\circ/2)/180^\circ \times \pi]}{\lambda} = \frac{3.14 \times 5 \text{ mm} \times 0.087}{970 \text{ nm}} = 1411$$

这样差的光束质量,不仅无法直接应用,而且无法用简单的透镜耦合法直接耦合到一根直径小于  $4 \text{ mm}$ 、 $NA = 0.22$  的光纤中(若要用简单的透镜耦合法直接将 Bar 条发出的光耦合进一根光纤,必须满足:  $\omega\theta \leq \frac{d}{2} NA$ .)

需要注意的是,上述计算中包含了 LD 发光元之间的间隙对光束质量的影响.如果剔除间隙的影响,则有

$$M^2 = 19 \times \frac{\pi\omega\theta}{\lambda} = 19 \times \frac{\pi \times [(150/2)\mu\text{m}] \times 0.087}{\lambda} = 19 \times \frac{3.14 \times 75\mu\text{m} \times 0.087}{0.970\mu\text{m}} = 402.42$$

针对这种情况,以下各种二极管条形巴与输出尾纤的耦合技术应运而生

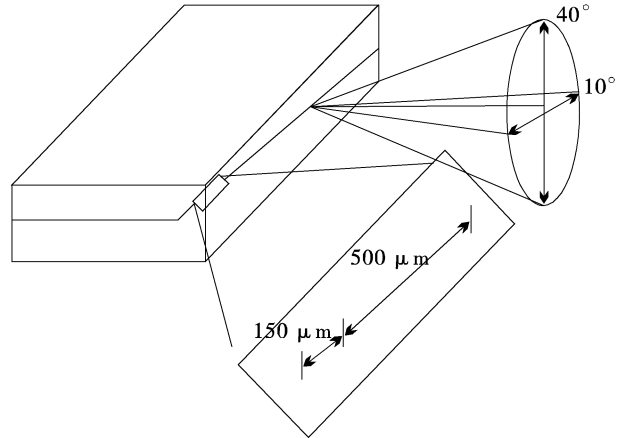


图 5 条形巴 (Bar) 半导体激光器的结构示意图

### 2.1 光纤束耦合法

图 6 所示为早期采用的一种光纤束的耦合方法.目前有过文献报道的采用该方法的单位包括中科院半导体所、Coherent 和 SDL 等.

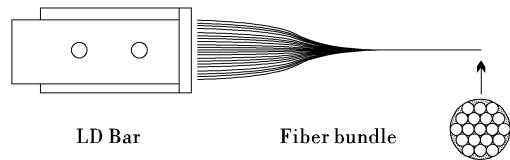


图 6 光纤束耦合法结构图

光纤束耦合法是在输入端将耦合光纤排列成具有固定周期的光纤列阵,使列阵中的光纤一一对应于组成 Bar 的数十个 LD 发光元,在经过快轴成像之后,将每个发光元的光耦合进一根光纤.在输出端,以上数十根光纤将排列成圆形的光纤束(排列原则与 2.3 节光束的排列原则一样,都是要排成一个“密结构”).必要时还可在光纤束的输出端进一步对接另一根单芯光纤,但这就要求有很好的对接光学系统.目前已在 Coherent 和 SDL 的产品中发现有进一步的对接操作.

光纤束耦合法的优点是思路简单明了,剔除了 LD 发光元之间的间隙对整体光束质量的影响,耦合效率高.缺点是光纤束的直径、或对接的光纤的芯

径通常会比较粗,光纤输出亮度的极限低.若要得到更小的输出截面,单根光纤的芯径就必须很细.因此,Bar 的数十个 LD 发光元在慢轴方向上常常也必须单个地聚焦进光纤.若能结合 2.1 节中提到的柱状楔形光纤耦合法、球状光纤耦合法等二极管单管与光纤的耦合技术,提高每一个发光元与对应光纤的耦合效率,则光纤束法的整体耦合效率还可有较大幅度的提高.根据中科院长春光机所<sup>[5]</sup>、吉林大学<sup>[6]</sup>以及河南大学<sup>[7]</sup>2006 年的相关文献报道,利用微球透镜光纤列阵技术的光纤束耦合法可将最大耦合效率提高到 80% 以上.

其中中科院长春光机所的做法是将 19 根芯径均为 200 μm 的光纤的端面分别熔融拉锥成具有相同直径的微球透镜,利用 V 形槽精密排列,排列周期等于二极管 Bar 条各发光单元的周期.将微球透镜光纤列阵直接对准二极管 Bar 条的 19 个发光单元.精密调节两者之间的距离,使耦合输出功率达到最大.通过微球透镜光纤列阵从各个方向压缩激光束的发散角,有效实现对激光束的整形和压缩.中科院长春光机所通过该方法用数值孔径为 0.16 的光纤实现了 30 W 的激光输出,最大耦合效率大于 80%.图 7 和图 8 分别是他们所使用的微球透镜光纤结构示意图以及二极管 Bar 条与微球透镜光纤列阵耦合结构简图.

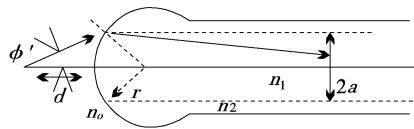


图 7 微球透镜光纤结构示意图

河南大学的做法是用一段直径为 600 μm 的裸石英光纤代替柱透镜对 LD 输出光束进行准直整

表 1 目前国内出售的高功率光纤耦合器情况汇总表

厂商	规格	单根最大 输入功率/W	转换效率/%	回波损耗 /dB	输入光纤参数		输出光纤参数	
					纤芯直径/包层直径/μm	纤芯直径/包层直径/μm		
SIFAM	3×1	15	>90	>40	105/125	125 或 200		
	7×1	15	>90	>40	105/125	125 或 200		
ITF	7×1	10	>90	45	105/125	125		
	7×1	10	>93	45	105/125	20/400		
	7×1	25	>93	45	200/220	20/400		
Nufern	7×1	50	>93	?	200/220	20/400		
	19×1	15	>93	?	105/125	20/400		
深圳朗光	7×1	15	?	?	105/125	200/230		

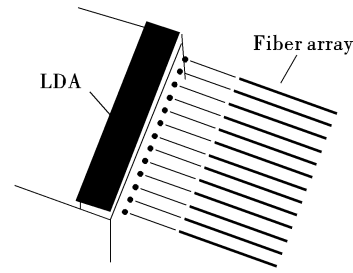


图 8 二极管 Bar 条与微球透镜光纤列阵耦合结构简图

形,再用微球透镜光纤对光束进行聚焦后直接实现和光纤耦合,耦合效率也在 80% 左右.图 9 为其实验装置示意图.

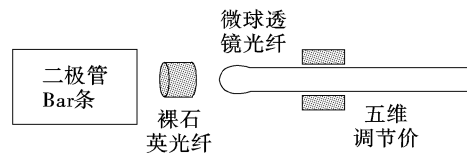


图 9 河南大学实验装置示意图

光纤束耦合法结构简单明了,便于理解和实现,其耦合输入端和输出端应用的光纤列阵和光纤束的设计思路还分别被二极管阵列与光纤的耦合技术以及多根光纤和一根光纤的耦合技术所借鉴.比如,现有部分高功率  $N \times 1$  的光纤耦合器(Combiner)就是将多根光纤排列成如图 6 所示的密结构,再采用熔融拉锥法(fused biconical taper,简称 FBT)将其拉制成与后继光纤匹配的几何尺寸,制成  $N \times 1$  的光纤耦合器,实现将多根光纤的输出光耦合到一根光纤中的目的.耦合效率已达到 90% 以上,具有很高的实用价值.表 1 列出了部分在国内出售的高功率光纤耦合器情况.

### 2.2 光束整形法

光束整形法的思路如图 10 所示. 首先对 Bar 条的光束在快轴和慢轴方向上分别准直. 准直后的光束为一线状光束. 再通过光束整形器把这一线状光束切割成  $n$  条, 并重新排列成一个预定的分布, 譬如矩形、方形、圆形、椭圆形等. 经过重排后的光束在聚焦性能上将得到极大地改善,  $M^2$  因子将缩小  $n$  倍, 因此对光纤芯径的要求也将减小  $n$  倍, 可以用一个透镜聚焦耦合到一根纤细的光纤中去. 经验表明, 如果在慢轴准直中使用透镜阵列以减少畸变,  $M^2$  因子还可以有效地减小.

和光纤束耦合法相比较, 光束整形法的优点是可以实现更细光纤芯径的耦合, 因而实现更高的亮度. 假设 Bar 条在快轴和慢轴方向上  $M^2$  因子分别为  $M_{fast}^2$  和  $M_{slow}^2$ , 则理论上, 线性光束可以切割的条数  $n$  最大可达到:  $n_{max} = \sqrt{\frac{M_{slow}^2}{M_{fast}^2}}$ , 通常  $n_{max} \approx 19$ .

$$n_{max} = \sqrt{\frac{M_{slow}^2}{M_{fast}^2}}, \text{ 通常 } n_{max} \approx 19.$$

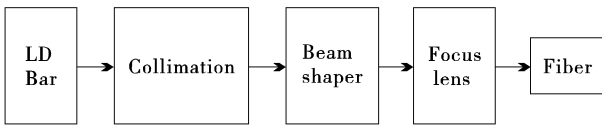


图 10 半导体 Bar 条的光纤耦合原理框图

图 11 所示为经过光束整形后的光束图样. 光束整形法通常可分为两步重排整形法和一步重排整形法.

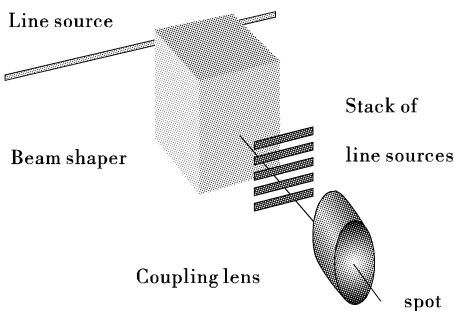


图 11 光束整形示意图

#### 2.2.1 两步重排整形法

要把线形光束分割、排列成矩形分布, 首先是把线形光束分裂成  $n$  份, 在一个方向上实现不等量的移动, 称为第一次重排; 再在另一个方向上实现不等量的移动, 实现第二次重排. 如图 12 中 2 个箭头所示的过程.

典型的两步重排整形法是梯形镜法 (step-mirror). 如图 13 所示, 线形光束先由数个微小镜片分

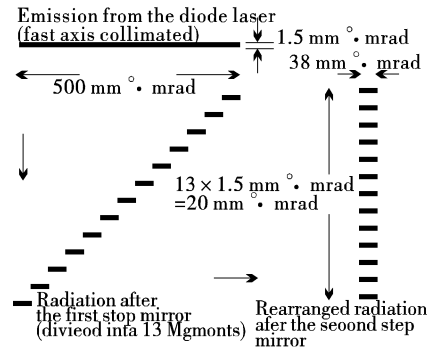


图 12 两步重排法原理示意图

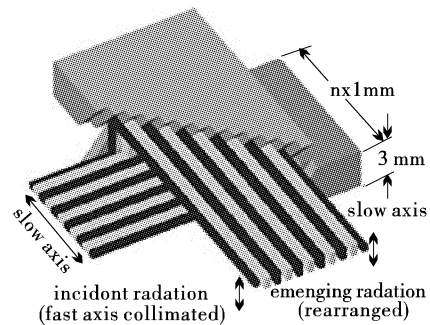


图 13 梯形镜整形原理

割并反射, 实现第一次光束重排. 重排后的光束再经过第二次反射, 实现第二次重排. 第一次重排的结果是分割后的数节光束在一个方向上实现不同量的平移; 第二次重排的结果是实现另一个方向上不同量的平移. 最终得到如图 12 中的整形后的输出图案. JOLD 等大多数公司提供的产品里使用的都是梯形镜. 另外, 属于 2 次重排整形法的还有棱镜组法 (Prism-group), 一般的耦合效率在 70% 左右.

#### 2.2.2 一步重排整形法

在上述的两步重排法里, 一方面结构复杂, 不利于小型化和模块化; 另一方面, 由于每一次反射都损失一些光能量, 致使整形后的效率受到影响. 因此, 近期发展起来的一种一步重排整形法相比之下显得很有特色, 下文将介绍 2 种常见的一步重排整形法.

##### (1) 45° 倾斜柱透镜阵列旋转整形法

由于倾斜的柱透镜成像可以实现旋转功能, 如图 14a 中所示. 可以证明, 如果柱透镜的旋转角为  $q$ , 则像的旋转的角度为  $2q$ . 使用  $45^\circ$  放置的柱透镜, 一个水平的线状物  $AB$  所成的像为一个垂直的线状  $A'B'$ .

在此思路的启示下, Limo 公司设计制造了如图 14b 所示的  $45^\circ$  倾斜的柱透镜阵列. 水平分布的 Bar 条在快轴准直后, 每个发光元对应  $45^\circ$  倾斜的柱透

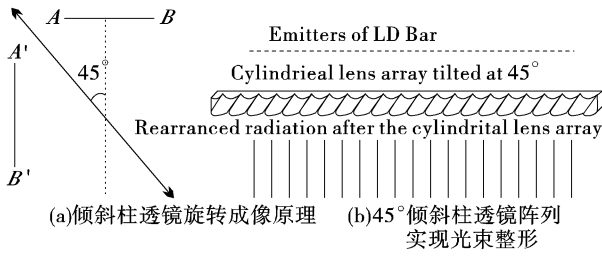


图 14 45°倾斜柱透镜旋转整形法

镜阵列中的一个柱透镜.在光经过柱透镜阵列之后,就会出现和发光元数目相等的、已经实现重排了的矩形光分布.

和梯度镜法相比较而言,倾斜柱透镜阵列旋转整形法只用一步就实现了光束的整形重排,但排列出的光不再是准直光,而是在垂直方向上发散的一个矩形分布.在Limo的实际产品中,首先使用一个柱透镜在垂直方向上进行准直.之后再使用2个柱透镜分别在水平和垂直方向上聚焦,最终实现了与光纤的耦合.

与此类似的一步重排整形法还有Apollo公司使用的体光栅整形法.在该方法中Apollo公司使用了具有专利权的体光栅取代了Limo公司的倾斜柱透镜阵列,实现了单个二极管条形巴的光束整形.

(2) 折射整形法

另一种整形原理,即折射整形法.根据折射原理,光束以一定的角度入射到透明介质(如玻璃等)中时,方向将发生改变.如果此介质是平行介质,光束穿过前后传播方向不变,但在入射面内位置将发生移动,如图15a所示.不同的移动量可以通过不同的入射角和介质长度来控制.采用多层透明介质即可实现光束的重排.图15b所示为一个整形模块的剖面图.

利用折射整形法,不仅可以排列出光纤耦合所需要的矩形分布,还可以排列出圆形、椭圆形等其他分布.同时具有体积小、结构紧凑、损耗小的优点.

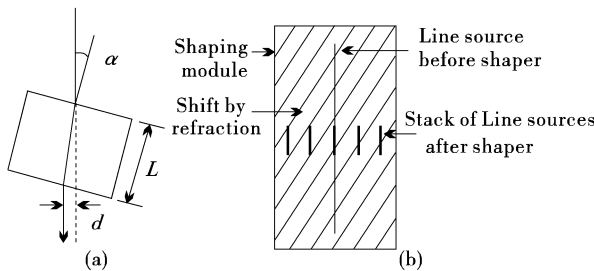


图 15 折射光束整形原理图

另外,一次重排实现光束整形的还有双反射器

法(Two-reflector)等,因为原理类似,这里就不再展开描述.

### 3 二维堆栈(Stack)与光纤的耦合技术

一般来说,Bar条的连续功率局限在百瓦数量级.为了得到更大功率的激光输出,就必须采用二维堆栈的组装技术.LD二维堆栈的结构如图16所示.多个条形巴平行放置,相邻Bar之间的间隔一般在1.5~2.0 mm之间,主要是由于散热的局限,无法更近.目前市场上的产品中条形巴的数目从2个到25个不等,连续输出功率可达1 000 W.

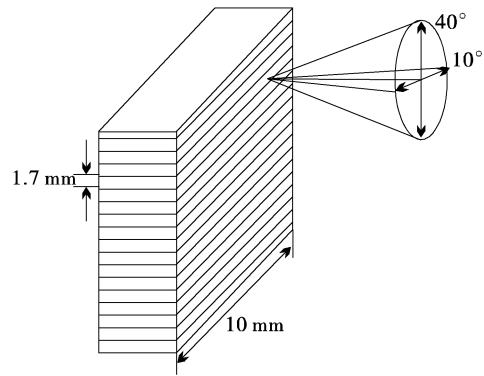


图 16 半导体激光器二维堆栈结构示意图

二维堆栈在快轴方向上由多条条形巴组成(如典型的25条),因此,其在快轴上的光参积(发光尺寸和发散角之乘积,Beam-Parameter-Product, BPP)至少要增大25倍.在图17a所示的耦合法中,首先将每条巴分别用柱面透镜进行了快轴准直,然后使用一个大面积柱面微透镜列阵进行慢轴准直.为了消除巴之间的不发光面积的影响,还使用了一个光束整形镜(Beam shaper 1)剔除每条准直光之间的间隙——光束压缩.处理之后的光束形状如图17b所示,其快慢轴方向上的BPP分别为100 mm·mrad和1 200 mm·mrad.

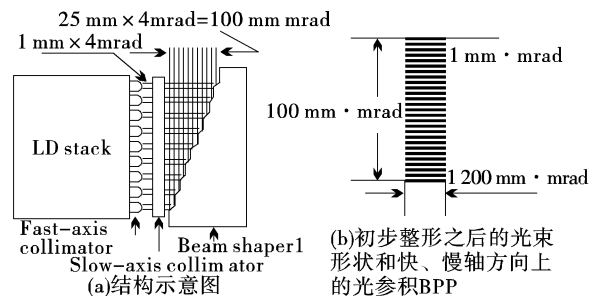


图 17 使用一个特制的光束整形器剔除条形巴之间的无光区

为了耦合这样的光到光纤中去,首先必须调整 2 个方向上的光参量为近似对称,调节技术依然为上面描述过的整形技术,如上文提到的两步整形法.这里使用棱镜组法作为例子.从图 17b 中得知,经过光束压缩后的光束的快慢轴方向上的理想的 BPP 分别是  $100 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$  和  $1\,200 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ .但由于压缩效果的限制,快轴方向上的 BPP 实际大致为  $130 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ .若想使得快慢轴方向上对称,可以把光束在慢轴方向上切成 3 份然后在快轴方向重排.

如图 18 所示的,采用 3 块直角棱镜叠加在一起组成的重排模块实现一个方向上的重排.2 个这样的模块即可实现所需的光束整形.此时的快、慢轴上的 BPP 分别被调整为  $390 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$  和  $400 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ ,近似于对称.这样的光经过合适焦距的透镜聚焦后,就可以耦合到光纤中了.

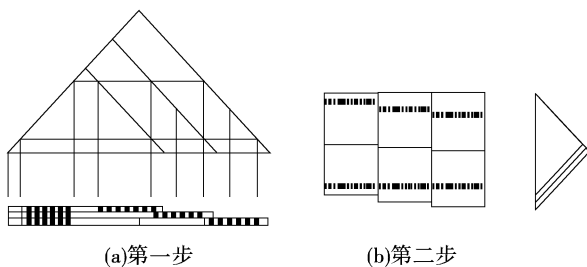


图 18 棱镜组法实现光束整形重排原理示意图

#### 4 多个二极管 Bar 条或 Stack 堆与光纤的耦合技术

接下来介绍一种在多个二极管 Bar 条或 Stack 堆与光纤的耦合中应用的比较多的偏振合束法.该方法是在第 4 节的基础上进行的,主要由 2 个光束整形的二维堆栈组成,其中一个堆栈的输出经过一个半波片后偏振方向发生  $90^\circ$  旋转,再使用偏振合束器对 2 路堆栈输出的光束进行合束,最后经过光学聚焦系统实现光纤耦合.

其实不论是条形巴还是堆栈都可以使用偏振合束法结合前面提到的各种整形耦合法实现多个激光器巴/堆栈的单光纤耦合.如 Apollo 公司就是利用 3.2 节提到的光束整形法将每个 Bar 条的出射光先进行初步的重排整形后,再结合 2.3 节提到的微透

镜耦合法实现了 10 个二极管 Bar 条的整形耦合.最后再利用偏振合束法实现了 2 组共 20 个 Bar 条出射激光的耦合.最后经过光学聚焦系统实现了与  $400 \mu\text{m}$  光纤的耦合,输出功率高达 400 W.另外,这种偏振合束法还可用在多个带尾纤的光纤激光器的输出功率合成中,考虑到技术的共通性,这里就不再展开介绍.

#### 5 结束语

随着半导体激光二极管(LD)及其应用技术的发展,大功率半导体激光二极管的光纤耦合技术也在不断的发展,人们还在向着更新的整形技术,更细的光纤耦合,更高亮度的光纤输出等研究方向进行着不断的开拓和探究,也取得了显著的进步.在美国、德国已经出现了  $40 \text{ W}$ 、 $100 \mu\text{m}$  光纤输出的半导体激光器组件.国内受限于制作工艺的不足,目前还局限在实验室小批量研究阶段,暂时还没发现自主研发的可供实用化批量生产的相关产品.因此,激光工作者们仍需加强对半导体激光器光纤耦合技术的研究.

#### 参考文献

- [1] 李鹏,张全,沈诗哲,等.柱状楔形微透镜光纤与半导体激光器耦合效率研究[J].光学仪器,2006,28(3):52-55.
- [2] 罗亚梅,梁一平,熊玲玲.球状光纤耦合器参数与耦合效率的关系[J].激光杂志,2006,27(3):52-55.
- [3] 徐庆扬,陈少武.半导体激光器与光纤光栅对接耦合研究[J].光子学报.2005,34(1):1-5.
- [4] 宋贵才,全薇,宁国斌,等.伞形端面光源-光纤耦合器[J].兵工学报,2004,25(3):345-348.
- [5] 许孝芳,李丽娜,吴金辉,等.高功率半导体激光器阵列光纤耦合模块[J].红外与激光工程,2006,35(1):86-88.
- [6] 薄报学,曲轶,高欣,等.高功率阵列半导体激光器的光纤耦合输出[J].光电子·激光,2001,12(5):468-470.
- [7] 王帆,王春霞,王田虎,等.一种实现半导体激光器和多模光纤耦合的实用技术[J].激光与红外,2006,36(7):555-557.

欢迎网上投稿 [www.gdjsyy.com](http://www.gdjsyy.com)