

# 半导体侧面泵浦固体激光器均匀性的计算和分析

毛少卿 黄涛 温中一 杨涛

(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

摘要: 建立了半导体侧面泵浦固体激光介质内泵浦光能吸收分布情况的数值模型。模拟计算了不同泵浦参数下棒状介质和板条介质内泵浦光能的吸收分布, 计算结果和有关实验结果符合得很好。得出了半导体侧面泵浦机构中介质尺寸、介质吸收系数和半导体激光器发光面到介质泵浦面距离这三个参数对泵浦均匀性的影响, 比较了棒状介质和板条介质在半导体侧面泵浦应用中的优劣。

关键词: 半导体侧面泵浦固体激光器 泵浦均匀性 模拟计算

## Calculation and analyze of homogeneity of diode side pumped solid laser

Mao Shaoqing, Huang Tao, Wen Zhongyi, Yang Tao

(National Lab. of Laser Tech., HUST, Wuhan, 430074)

**Abstract** The calculating model of pumping energy distribution in a solid laser medium side pumped by semiconductor laser diode is made in this paper. The absorption and distribution of the pumping energy is analog calculated and the result of the calculation agrees with the result of some experiment very much. After analyze the result of the calculation we get the general rule that how the parameters (size of the medium, absorption coefficient of the medium and distance between the laser diode and the medium) affect the homogeneity of pumping energy distribution in the medium. The advantage and disadvantage of the rod medium and slab medium side pumped by laser diode are analyzed too.

**Key words:** diode side pumped solid laser pumping homogeneity analog calculation

### 一、引 言

半导体激光泵浦的固体激光器(DPL)以其效率高,热效应小,寿命长,体积小,全固态,可靠性高的优点引起了人们的极大兴趣。已有许多成果实现了商品化。在大功率 DPL 固体激光器中多采用侧面泵浦结构。在这种结构中泵浦光束由激光介质的侧面射入介质。与灯泵相比,由于半导体激光器的光束方向性较好,为了简化结构,提高效率,往往不用聚光腔,半导体激光器靠近激光介质放置,使泵浦光束直接射入介质。大多数侧面泵浦 DPL 激光器中泵浦光束只从介质的一侧入射,泵浦光能量在介质内部分布不均匀,对 DPL 激光器的工作性能影响很大。在大功率情况下,侧面泵浦是唯一可行的泵浦方式,如何选取侧面泵浦结构的参数,提高激光器的工作性能有重要实用意义。本文就介质对侧面泵浦光的吸收过程进行了数值模拟计算,得到了棒状介质和板条介质内侧面泵浦光能的分布情况,该分布情况同时对应于介质内的增益分布情况。并在此基础上得到了侧面泵浦参数对介质内泵浦光能分布均匀性的影响的一般规律。数值计算结果和有关文献报导的实验结果符合得很好。

## 二、数值模型

侧面泵浦用的半导体激光器阵列的发光截面一般是矩形,为了降低损耗,通常使发光截面的长度和激光介质的长度相等并沿介质轴向放置。发光截面的宽度即半导体激光器有源层的厚度一般为  $1 \sim 2 \mu\text{m}$ ,而发光截面的长度则可达  $10\text{mm}$ 。由半导体激光器的发光特性可知,泵浦光在平行于有源层的方向( $x$ 方向)上,光束发散角  $\varphi$  较小( $10^\circ \sim 15^\circ$ ),发光面尺寸长,泵浦光照射到激光介质上,除介质两端外,中间大部分区域上的泵浦光强可认为是均匀分布的。在垂直有源层的方向( $y$ 方向)上,光束发散角  $\theta$  较大( $35^\circ \sim 45^\circ$ ),光强近似于高斯分布。因此,只需计算介质内垂直于介质长度方向上的某一截面内的泵浦光能的吸收分布情况就可知道整个介质内部的泵浦光能吸收分布情况和相应的增益分布情况。

为简化计算,假设其角度空间分布为高斯分布:

$$P(\theta) = A \times \exp(-\theta^2/\theta_{1/2}^2) \quad (1)$$

式中

$$A = P_0 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \exp(-\theta'^2/\theta_{1/2}^2) d\theta' \quad (2)$$

为功率归一化常数,  $P_0$  为半导体激光器发光条单位长度上的发射功率,  $\theta'$  为积分变量,  $\theta_{1/2}$  是半导体激光器光束发散角半宽。计算时取其为  $20^\circ$ 。

为了模拟计算激光介质内泵浦光能的吸收情况,把激光介质横截面划分为若干网格单元进行离散化。计算时每一网格单元的值代表了介质轴向单位长度上横截面内该单元面积内的激光介质吸收的泵浦能量相对值,所有网格单元的值共同表征了激光介质对泵浦能量吸收的均匀性,因此,各网格单元的面积应该相等,所以不论是圆形截面还是矩形截面的激光介质都在直角坐标下划分为矩形网格。在垂直于半导体激光器发光截面的方向上把泵浦光进行角度空间离散化,对每一条光线进行空间光线追迹求出其传播路径,当泵浦光穿过某一网格单元时,该单元内的介质吸收的光能为

$$P_{ab} = P_{in} [1 - \exp(-\alpha l)] \quad (3)$$

$$l = \delta / \cos(\beta) \quad (4)$$

式中,  $P_{in}$  为泵浦光射入该单元时的光功率,  $\alpha$  为介质吸收系数,  $l$  为光线在网格内经过的长度,  $\delta$  为网格单元边长,  $\beta$  为光线传播方向与坐标轴  $x$  轴正方向的夹角。某一网格单元对所有光线吸收的总和即为该单元对泵浦光能的吸收。在实际应用的半导体侧面泵浦机构中往往利用反射镜或直接在激光介质侧面镀膜把泵浦光限制在介质内折反传播,并且利用半导体激光方向性较好的特点,不用耦合透镜,使泵浦光直接射入介质。因此在计算中假设泵浦光经介质表面折射进入介质,被介质侧面多次反射传播吸收,当泵浦光能被吸收衰减为入射时的值的  $10^{-3}$  倍时停止对该光线追迹计算。

## 三、计算结果分析

在侧面泵浦机构中介质截面半径  $r$ , 介质吸收率  $\alpha$ , 半导体激光器发光面到介质入射侧面的距离  $e$  三个参数对泵浦均匀性影响较大,将这三个参数取不同的值对目前常用的棒状和板条介质进行计算,分析它们对泵浦均匀性的影响趋势。

### 1. 棒状介质

棒状介质是应用最广泛的一种介质形状,泵浦光线经介质圆柱侧面多次反射传播后能量吸收分布十分复杂。取不同的参数值,计算四种情况结果如图 1。各图参数值见附表。

Table Calculating parameters

parameters	fig.	value
radius of	1a	1.0
mediums	1b	1.0
$r$ (mm)	1c	1.0
	1d	1.5
absorption	1a	0.68
coefficient	1b	3.1
$\alpha$ ( $\text{mm}^{-1}$ )	1c	0.68
	1d	0.68
distance	1a	0.2
$e$ (mm)	1b	0.2
	1c	0.5
	1d	0.2

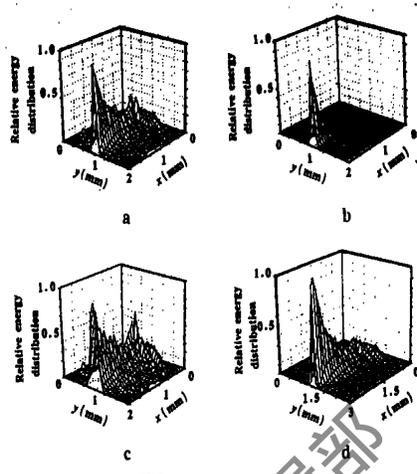


Fig. 1 Side pumping energy distribution in rod medium

表中吸收系数  $\alpha = 0.68\text{mm}^{-1}$  对应于掺杂浓度 0.81% 的 Nd:YAG 晶体, 而  $\alpha = 3.1\text{mm}^{-1}$  则对应于掺杂浓度 1.1% 的 Nd:YVO<sub>4</sub> ( $\alpha$ -cut) 晶体。为了和试验测量结果相比较, 还绘制了图 1a 参数值下泵浦能量吸收分布等值线图 2a。图 2b 为上述参数值下在激光介质端面用 CCD

器件测得的棒状介质侧面泵浦荧光图象<sup>[1]</sup>。图 2a 和图 2b 相比较两者符合得十分精确。这说明计算建立的数值模型和计算结果的可信度是很高的。由图 1 可以看到, 在棒状介质内泵浦光经多次反射传播后, 泵浦能量吸收分布在棒内有四个较明显的峰值, 各峰值的数值相差很大, 使泵浦能量分布很不均匀, 这势必影响激光器的输出模式。当介质半径  $r$ , 吸收系数  $\alpha$  越小, 能量分布均匀性越好。这是因为  $r$  和  $\alpha$  越小泵浦光经

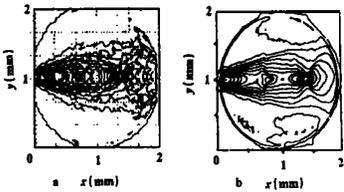


Fig. 2 Side pumping energy distribution in rod medium  
a—calculated b—detected by CCD

几次反射后仍有较大的能量, 使介质内在泵浦光直接照射下吸收能量较少的部分得到能量补偿, 增加了均匀性。半导体激光器发光面到介质侧面的距离  $e$  越大均匀性越好。这是因为在泵浦光束发散角  $\theta$  一定的情况下  $e$  越大泵浦光入射到介质泵浦面时的光斑面积越大, 介质内被泵浦光直接照射的部分就越多, 因而均匀性越好。由计算结果可知泵浦光能在介质内分布是一个不均匀的椭圆区域, 且能量最大值点远离介质中心, 这使能量利用率和激光模式都变坏, 在选择侧面泵浦机构参数时应尽量使  $r, \alpha$  较小,  $e$  较大。但  $r, \alpha$  太小时光线在介质内反射次数增多, 侧面反射损耗加大, 减小能量利用率。同样  $e$  太大时介质泵浦面过大减小反射区面积, 也会降低能量利用率和分布均匀性。所以在选择以上参数时要根据和谐谐振腔参数具体计算选取。在上述四例计算中图 1c 参数下泵浦均匀性最好, 图 1b 最差。这说明在适当的参数下棒状 Nd:YAG 介质可以得到较好的泵浦均匀性, 而 Nd:YVO<sub>4</sub> 虽然吸收系数大, 受激发射截面大, 有利于得到高增益的微型器件。但从泵浦均匀性的角度来看这种介质内泵浦光能量吸收分布很不均匀, 对应的增益分布也很不均匀; 介质的泵浦区和工作区重叠性极差, 泵浦能量利用率低, 因此不适用于 DPL 侧面泵浦棒状介质激光器。而由后面的计算可知它更适用于 DPL 板条介质激光器。

### 2. 板条介质

采用类似的方法对板条介质进行计算。计算结果如图3所示。计算时取板条介质横截面为3mm×3mm的矩形,吸收系数 $\alpha=0.68$ ,半导体激光器发射面到介质泵浦面距离 $e=1\text{mm}$ 。通过改变参数值计算,发现各参数值对板条介质内泵浦光能吸收分布均匀性的影响规律和棒状介质的情况相似。只是由于板条介质的反射面为平面,光线反射传播时无焦点,因此介质内泵浦光的吸收分布基本上在泵浦光直接照射区内,且只有一个峰值,其泵浦均匀性略差于棒状介质。但由于板条介质激光器中激光束在介质内折返传播,传播方向和介质横截面成一定的角度,激光束依次通过介质内泵浦光能吸收分布不同的区域,激光模式得到的总体增益还是均匀的,泵浦光能量在介质内的吸收分布均匀性对激光模式的影响没有棒状介质情况下大。而且泵浦光能在介质有限区域内分布相当于一个增益光阑,有选模作用。因此板条介质激光器是侧面泵浦方式下,特别是采用吸收系数大,受激发射截面大的Nd:YVO<sub>4</sub>激光介质时的一种较好的方案。

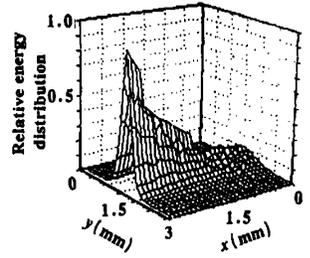


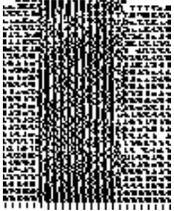
Fig. 3 Side pumping energy distribution in slab medium

## 四、初步结论

通过对半导体侧面泵浦激光介质内的泵浦光能的吸收分布均匀性的模拟计算,分析了泵浦机构各主要参数对泵浦均匀性的影响规律。介质横截面尺寸较小,吸收系数较小,半导体激光器发光面到介质泵浦面距离较大时,泵浦光能吸收分布就较均匀。因为板条介质激光器的固有特性,在半导体侧面泵浦激光器中它比棒状介质激光器的能量利用率高,激光模式好,是一种很好的大功率半导体侧面泵浦激光器方案。

### 参 考 文 献

1 Ajer H, Landre S. Opt Lett, 1992; 17: 1785~ 1787



作者简介:毛少卿(附照片),男,1936年出生。教授。长期从事激光物理、非线性光学和激光器件的研究及教学。

黄涛,男,1970年出生。现在华中理工大学攻读硕士学位。主要从事固体激光技术及应用、信号检测与控制的研究。

温中一,男,1937年出生。副教授。长期从事固体激光技术及应用、医用激光手术器的研究。

杨涛,男,1967年出生。工程师。从事固体激光技术及应用的研究。现在华中理工大学攻读硕士学位。

收稿日期:1996-02-26