

# 半导体激光纵向泵浦的光学耦合系统设计

沈小华 周复正 林尊琪 邓锡铭

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

**摘 要** 提出了半导体激光泵浦光束在固体增益介质内的加权平均半径是影响泵浦效率的主要参数; 分析了泵浦光束尺寸、椭圆率与斜率效率和阈值的关系。从分析模式匹配理论出发, 提出了光学耦合系统的设计和调整应满足的条件, 最后对棱镜扩束耦合系统进行了详细计算和简单的实验研究。

**关键词** 椭圆高斯光, 加权平均半径, 椭圆率, 棱镜对扩束。

## 1 引 言

半导体激光器泵浦固体激光器的方式有纵向和横向两种。横向泵浦光学耦合系统简单, 而且半导体激光器可以有大的发射面, 适合于大功率的半导体激光器列阵或堆泵浦, 可以获得大功率的固体激光输出。纵向泵浦时, 泵浦光在空间上与固体激光腔模能得到较好的匹配, 一般斜率效率高达 30~60%。泵浦用的半导体激光器一般为多条的列阵, 在垂直与平行于半导体激光器的结上有不同的尺寸和发散角, 远场光分布近似为椭圆高斯光束。而固体激光器腔的本征基模一般为圆高斯分布, 泵浦光在固体激光介质内的大小和椭圆率直接影响固体激光的阈值和斜率效率<sup>[1]</sup>。为了使泵浦光与固体激光腔模能得到有效的重迭, 对于纵向泵浦, 一个特别的光学耦合系统是必需的。本文研究了泵浦光束在固体介质内的分布对激光器阈值与斜率效率的影响, 最后从理论分析结果出发, 设计了一套用棱镜扩束的光学耦合系统, 获得低阈值、高效率的运转。

## 2 理论模型

### 2.1 半导体激光器的发光特点

列阵半导体激光器在结面上排列着多个发光元, 每个发光元尺寸一般为 $(0.5 \sim 1 \mu\text{m}) \times (3 \sim 4 \mu\text{m})$ , 间隔约  $5 \mu\text{m}$ 。单个发光元在远场光分布为椭圆高斯光束。相邻列阵发出的光为不相干或弱相干(锁相列阵器件), 为了使问题简便, 在以下分析中作不相干处理。列阵半导体激光器在平行于结面方向有较大的发光长度, 其发散角由两个边缘列阵的发射度决定。这样, 可以写出列阵半导体激光器在垂直( $x$ 方向)和平行( $y$ 方向)于结面上各自的光束特征方程。空间强度归一化分布为:

$$E_x(x) = (\sqrt{2}/\omega_x) \exp(-2x^2/\omega_x^2), \quad E_y(y) = (\sqrt{2}/\omega_y) \exp(-2y^2/\omega_y^2). \quad (1)$$

传播方程为:  $\omega_x^2(z) = \omega_{x0}^2 \{1 + [\lambda(z - z_0)/\pi\omega_{x0}^2]^2\}, \quad (2)$

$$\omega_y^2(z) = \{\omega_{y0} + \omega_{e0} [1 + (\lambda^2(z - z_0)^2/(\pi\omega_{e0}^2)^2)]^{1/2}\}^2. \quad (3)$$

式中,  $E_x, E_y$  分别为半导体激光在  $x, y$  方向上归一化强度分布函数,  $\omega_{x0}, \omega_{y0}$  为各自的束腰半径,  $\omega_x(z), \omega_y(z)$  为  $z$  处在  $x, y$  方向上的光束半径,  $\omega_{e0}$  为单个列阵在  $y$  方向的束腰半径,  $z$  为位置坐标,  $z_0$  为泵浦光束束腰处坐标(坐标原点取在泵浦光的输入面上),  $\lambda$  为半导体激光波长。

### 2.2 模式匹配对阈值与斜率效率的影响

每个光源都具有一定的空间尺寸和发射角, 根据几何光学原理, 经过线性光学系统变换后, 只要变换前后处于同一介质, 物像的拉赫量不变。固体介质对泵浦光的吸收是有一定长度的, 所以对激光器真正有意义的是在这个吸收长度内泵浦光的平均截面, 根据上述拉赫原理, 泵浦光聚焦点尺寸与发散角乘积是一恒量, 泵浦光耦合系统的作用在于通过合适的变换, 使泵浦光的聚焦点尺寸和发散角之间有合理的分配, 追求泵浦光束与腔模之间的最佳匹配。

泵浦光在固体激光介质内的加权平均半径为:

$$\bar{\omega}_p = \left[ \int_0^l \omega_p^2(z) \exp(-\alpha z) dz / \int_0^l \exp(-\alpha z) dz \right]^{1/2}. \quad (4)$$

固体介质的有效长度  $l = (-2.3\theta_p + 1.8)/\alpha$ ,  $\alpha$  是介质对泵浦光的吸收系数,  $\theta_p$  为泵浦光的发散角。Laporta 等从空间相关的速率方程出发, 获得了椭圆高斯光束泵浦时激光器输出与重迭系数的关系<sup>[1]</sup>。

$$P_{out} = (T/2\gamma) \eta_p P_{tho} f_1(\Delta, \beta) [\xi - f_0(\Delta, \beta)]. \quad (5)$$

$$f_0(\Delta, \beta) = [(\Delta\beta^2 + 1)(\Delta + 1)]^{1/2}/\beta,$$

其中,  $f_1(\Delta, \beta) = \Delta\beta [(\Delta\beta^2 + 2)(\Delta + 2)]^{1/2} / [(\Delta + 1)(\Delta\beta^2 + 1)], \quad (6)$

$$P_{tho} = \pi v I_{sat} \bar{\omega}_p^2 / 2\eta_p, \quad \Delta = \omega^2 / \bar{\omega}_p^2, \quad \xi = P_{in} / P_{tho}$$

$T$  为输出镜透过率,  $\gamma$  为单程对数损耗,  $\eta_p$  为泵浦效率,  $\omega$  谐振腔基模束腰,  $\bar{\omega}_p$  为椭圆泵浦光束两平均半径的最小值,  $\beta$  为椭圆率 ( $\beta \leq 1$ ),  $I_{sat} = hv/\sigma\tau$  为饱和光强,  $P_{tho}$  为泵浦光束分布确定时的极限泵浦阈值(基模体积为零时),  $f_0$  为归一化阈值,  $f_1$  为泵浦光与腔内基模的重迭效率, 其值直接决定激光器的斜率效率。对  $f_0, f_1$  求  $\beta$  的偏导, 得:

$$(2f_0/\partial\beta) < 0, \quad (\partial f_1/\partial\beta) > 0, \quad (\beta \neq 0)$$

说明在给定的  $\Delta$  下, 泵浦光束的椭圆率增加(即  $\beta$  减小), 使阈值增加, 斜率降低。这是因为在  $\omega$  确定的情况下  $\beta$  减小, 使泵浦光束截面增大, 导致泵浦光耦合效率降低。计算结果如图 1

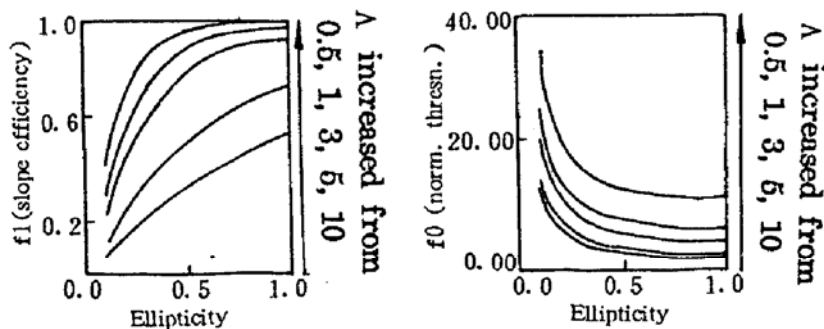


Fig. 1 Normalized threshold and slope efficiency as a function of ellipticity

所示,不同的  $\Delta$ 、归一化阈值和斜率效率随椭圆度变化的规律与偏导数获得的结果一致。从图 1 可看出,  $\Delta$  增加时,由于重迭系数增加,使斜率效率增加,同时阈值也变大,所以对于给定的泵浦功率和耦合条件存在一个最佳的  $\Delta$ ,使输出功率最大,这是腔基模束腰半径设计的一个重要依据。如图 2 所示,最佳  $\Delta$  随泵浦功率增加而增大,因此大功率半导体激光泵浦时,基模尺寸可以设计得大一些。

为了研究在同样的泵浦光平均截面下,光束椭圆度对激光器输出的影响,作如下替换:

光束平均截面为:

$$S = \pi \bar{\omega}_{px} \bar{\omega}_{py}, \quad \beta = \bar{\omega}_{pz} / \bar{\omega}_{py}, \quad (\text{假定 } \bar{\omega}_{pz} \leq \bar{\omega}_{py})$$

则有:

$$\Delta = \omega^2 / \bar{\omega}_p^2 = \pi \omega^2 / \beta S = C \beta^{-1} \quad (7)$$

$$\bar{\omega}_{px} = \sqrt{\beta S / \pi}, \quad C = \pi \omega^2 / S \quad (8)$$

(7)式代入(5)式,得:

$$P_{out} = (T/2\gamma)\eta_p f_1(C, \beta) [P_{in} - Q f_0(C, S, \beta)]. \quad (9)$$

其中  $Q = \pi \nu I_{sat} / 2\eta_p$ ,  $f_0(C, S, \beta) = \frac{S}{\pi} (C^2 + C\beta + C\beta^{-1} + 1)^{1/2}$ ,

$$f_1(C, \beta) = C(C^2 + 2C\beta + 2C\beta^{-1} + 4)^{1/2} / (C^2 + C\beta + C\beta^{-1} + 1),$$

$f_0$ 、 $f_1$ 分别对应于激光器的阈值和斜率效率。图 3 表示在同样的泵浦截面下,泵浦光束的椭圆度对斜率和阈值的影响。从这些曲线上可得出这样的结论:当  $\beta < 0.6$  时泵浦光椭圆度对激光器的输出影响是显著的;但  $\beta \geq 0.6$  时曲线变得较为平坦。因此,在设计泵浦耦合系统时,应尽量避免产生大椭圆率的泵浦光束,但适量的椭圆率( $\beta \geq 0.6$ )还是允许的。

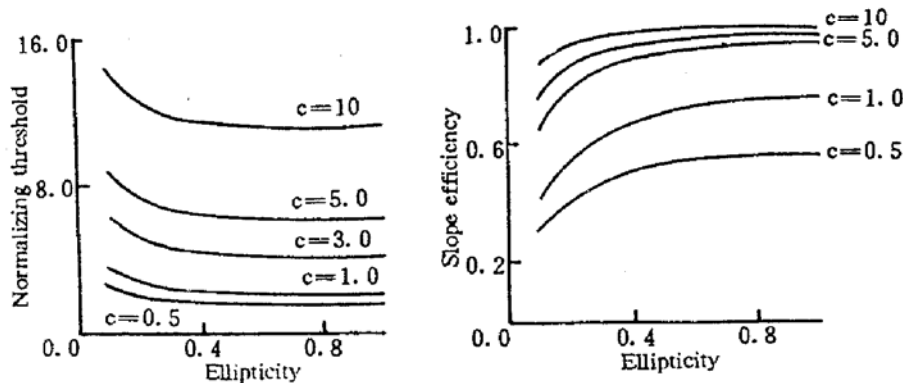


Fig. 3 Normalized threshold and slope efficiency are variable with ellipticity when average area  $S$  is static

### 3 棱镜扩束光学耦合系统的设计原理

半导体激光在两正交方向上的光束不平衡性用对称光学系统不可能得到优化,因此一般考虑用非对称光学系统作为半导体激光器的光耦合器,以消除像散。从上述模式匹配理论出发,下面对适合于半导体激光器纵向泵浦的棱镜扩束耦合系统作原理性的阐述。

该系统由准直镜  $L_a$ (焦距  $f_a$ )、聚焦镜  $L_b$ (焦距  $f_b$ ) 和一对棱镜组成,如图 4 所示。 $L_a$ 、 $L_b$ 对垂直发射结方向的光束放大,放大倍数  $U = f_b/f_a$ ,从而减小了光束在该方向上的发散角;半

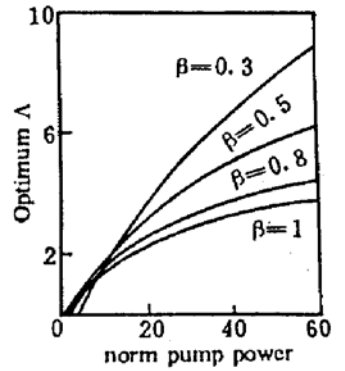


Fig. 2 The optimum  $\Delta$  as a function of normalized pump power

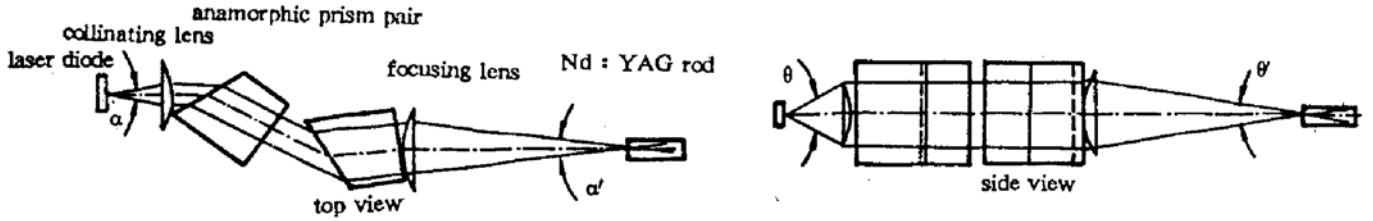
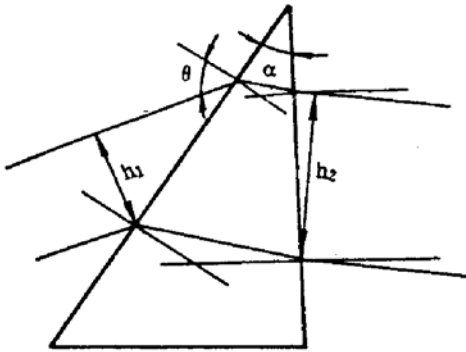


Fig. 4 Schematic diagram of coupling system consisting of a couple of prisms and two spherical lenses

导体激光器在结平行方向有较大的发光宽度，棱镜对的作用是补偿  $L_a$ 、 $L_b$  透镜组对光束的放大作用。



如图 5 所示，棱镜顶角为  $\alpha$ ，入射角为  $\theta$ 。单透镜对光束的放大倍数为：

$$m = \frac{\sqrt{(n^2 - \sin^2 \theta) [1 - (\sin \alpha \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} - \cos \alpha \sin \theta)^2]}}{\cos \theta (\cos \alpha \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} + \sin \alpha \sin \theta)}$$

为调整方便，一般选择出射光束与出射面垂直，此时放大倍数简化为：

$$m = \cos \alpha / \sqrt{1 - n^2 \sin^2 \alpha}$$

Fig. 5 Beam expanding function of a prism 双棱镜的扩束倍数  $M = m^2$ 。在  $L_b$  焦面上，棱镜对平行于半导体激光器发射结方向的光束放大倍数为  $1/M$ ，总的放大倍数  $V = U/M$ 。

下面利用(3)~(6)式对 SDL-2430 半导体激光器端面泵浦 Nd:YAG 激光器的光耦合器进行计算，以研究使激光器处于最佳效率时的耦合系统的状态。激光器的参数列表 1。

Table 1.

$\omega_{x0}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\omega_{y0}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\omega_{z0}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\alpha$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$n$	$l$ (mm)	$T$	$2\gamma$	$\eta_p$	$I_{\text{sat}}$ ( $\text{W} \cdot \text{mm}^2$ )
1	100	3	4	1.8	3.8	0.04	0.06	0.80	23.2

首先考察聚焦点在 Nd:YAG 晶体内的位置对光束平均截面  $S$  的影响，计算表明，聚焦点位置对  $S$  的影响是敏感的，按表 1 的参数，最佳  $Z_0 = 1.70 \text{ mm}$ ， $Z_0$  几乎不受耦合系统放大倍数的影响，主要由晶体参数和半导体激光器光束特性决定。图 6 是泵浦光束被耦合在最佳共轭

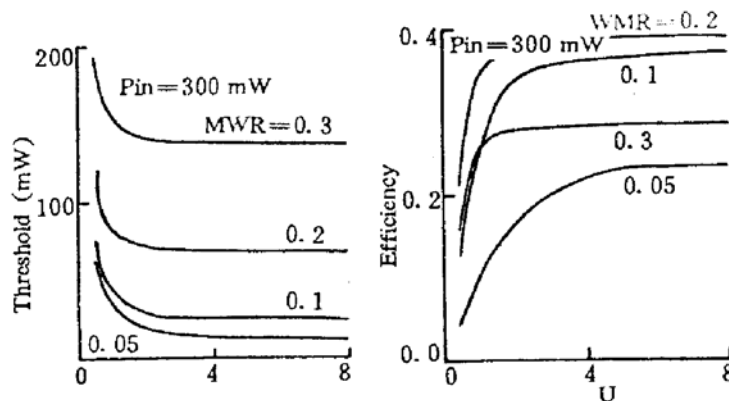


Fig. 6 Dependence of threshold and efficiency on  $U$

点，且平行于发射结方向上放大倍数  $M$  始终满足使效率最高时，激光器输出效率和阈值随垂直放大率  $U$  变化的曲线。泵浦阈值随  $U$  的增大呈降低的趋势，其原因是  $U$  增大使结垂直方向

上的发散角减小,而在该平面内的光束尺寸主要由发散角决定,结果使泵浦光束的平均截面减小。从图 6 可看出,不论是泵浦阈值还是效率,在  $U$  大于 2 之后曲线趋于平稳。图 7 是在激光器的输出效率最高时  $1/M$ ,在满足该条件下的  $V = U/M$  是一恒值 0.73。这说明在发射结平行方向上放大倍数为 0.73 时,激光器有最佳效率,它不受泵浦功率和  $U$  值的影响。图 8 是垂直于发射结方向放大倍数  $U = 4$ ,平行方向  $V = 0.73$ (相应  $\bar{\omega}_{px} = 38.7 \mu\text{m}$ ,  $\bar{\omega}_{py} = 138 \mu\text{m}$ )时,基模束腰半径(MWR)对效率的影响,入射泵浦功率为 200~500 mW 时,有最佳效率的基模束腰半径为 140~180  $\mu\text{m}$ 。

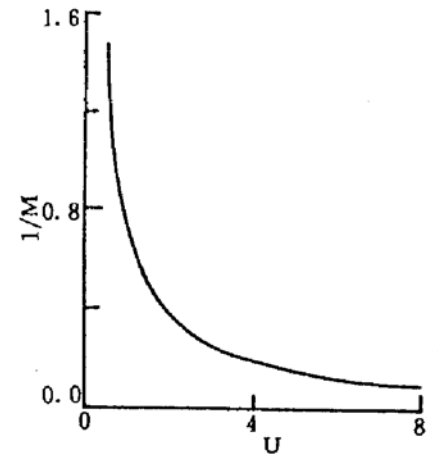


Fig. 7  $1/M$  is a variable with  $U$  for assuring optimum efficiency

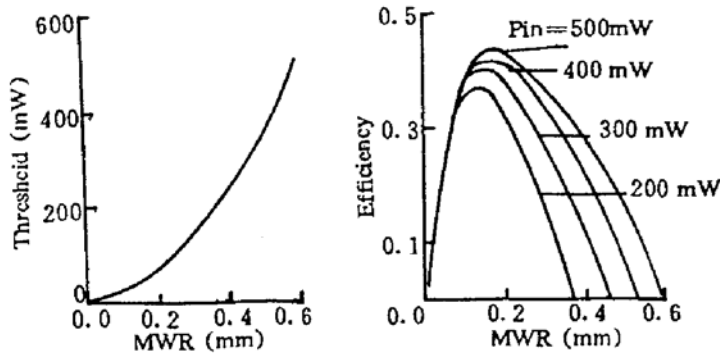


Fig. 8 Threshold and efficiency as a function of MWR (fundamental mode waist radius)

#### 4 实验研究

从上面的理论计算结果出发,设计了一套非球面透镜加棱镜的端面泵浦光学耦合系统,泵浦源尺寸为  $100 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ ,固体激光器的基模束腰半径为  $100 \mu\text{m}$ 。在这个条件下,从图 6、图 7 可以得到保证激光器有高的转换效率时,聚焦镜与准直镜焦距比应为 3:1 左右,棱镜的扩束倍数  $M$  相应为 4 左右。耦合系统的实际参数为  $f_a = 11.2 \text{ mm}$ ,  $f_b = 35.3 \text{ mm}$ ,数值孔径  $NA = 0.67$ ;扩束棱镜顶角  $\alpha = 52.3^\circ$ ,  $M = 4.6$ 。

这个光学耦合系统已经在半导体激光泵浦的固体激光器实验中得到应用泵浦源为 CW 500 mW 的 SDL-2430 半导体激光器,固体激光介质为  $\Phi 4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$  的 Nd:YAG 激光棒,其输入面对 800 nm 增透,对  $1.06 \mu\text{m}$  全反,输出透过率为 6%,腔的基模半径约为  $80 \mu\text{m}$ 。为了作比较,实验研究了三个不同耦合系统下的泵浦阈值与效率。

1)  $f_a = f_b = 11 \text{ mm}$ ,无扩束棱镜,由(4)求得:  $\bar{\omega}_{px} = 153 \mu\text{m}$ ,  $\bar{\omega}_{py} = 146 \mu\text{m}$ ,  $S = 0.022 \text{ mm}^2$ ,  $\beta = 0.9$ 。

2)  $f_a = 11 \text{ mm}$ ,  $f_b = 34 \text{ mm}$ ,无扩束棱镜,  $\bar{\omega}_{px} = 49.4 \mu\text{m}$ ,  $\bar{\omega}_{py} = 327 \mu\text{m}$ ,  $S = 0.016 \text{ mm}^2$ ,  $\beta = 0.2$ 。

3)  $f_a = 11 \text{ mm}$ ,  $f_b = 34 \text{ mm}$ ,扩束棱镜  $M = 4.6$ ,  $\bar{\omega}_{px} = 49.4 \mu\text{m}$ ,  $\bar{\omega}_{py} = 137 \mu\text{m}$ ,  $S = 0.0067$ ,  $\beta = 0.4$ 。

在以上三种情况下,激光器都调整到最佳状态时,它们的输入-输出曲线分别如图 9 所示。从图中可以明显地发现,曲线③有最低的阈值和最高的斜率,采用棱镜对扩束使激光器的斜率效率高达 37%。但是,从输出激光的基模强度分布看,用棱镜扩束的泵浦耦合系统后

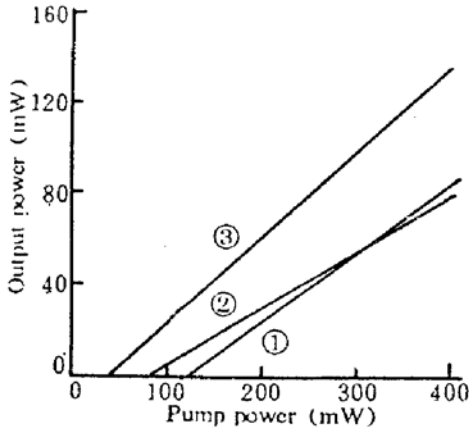


Fig. 9 Variations of threshold and slop efficiency under 3 unsame couple optics

输出激光的椭圆度并不比用  $f_s = f_s$  系统的椭圆度小, 这与泵浦光束的椭圆率计算结果一致。由此看来, 影响输出激光效率的最重要参数是泵浦光束在激光介质内的加权平均面积, 小的泵浦光面积对应于高的效率, 而泵浦光束的椭圆率对效率的影响不是很显著。

**讨 论** 对棱镜对和球面镜耦合系统的计算是基于 Nd:YAG 这种特殊基质材料, 根据计算结果, 激光介质的折射率  $n$  和泵浦光的吸收系数  $\alpha$  的大小对耦合系统结构参数的选择也是有影响的。但对于任一特定的半导体激光器纵向泵浦的固体激光器, 为获得最佳效率输出的耦合系统参数可以从(2)至(9)式求得。目前, 半导体激光器器件大多是锁相阵列, 发出的光为部分相干, 所以实

验结果有可能略优于理论计算值。

### 参 考 文 献

- [1] Paolo Laporta, Marcello Bussard, Design critier for mode size optimization in diode-pumped solid-stat-lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1991, 27(10): 2319~2326
- [2] Thomas Brabec, F. Krause, E. Wintner *et al.*, Longitudinal pumping of lasers with multitriple laser diodes. *Appl. Opt.*, 1991, 30(12): 1450~1454

## Design for Optical Coupler in Diode Laser Longitudinal Pumped Solid-State Lasers

Shen Xiaohua    Zhou Fuzheng    Lin Zunqi    Deng Ximing

(High Power Lasers & Physics Joint Laboratory,

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 31 August 1994; revised 30 May 1994)

**Abstract** In the paper the concept of average radii of pumped beam in a solid medium being a criteria of efficiency is presented. Dependences of slope and threshold on volume and ellipticity of pumped light are analysed. Based on the theory of mode-coupling, requirements of a coupling system for design and adjustment are deduced, Finally a coupling system consiting of a couple of expanding prisms is investigated in detail.

**Key words** elliptic gaussian beam, average radius, ellipticity, prisms beam-expanding.