

文章编号: 0253-2239(2007)12-2209-6

锯齿形板条抽运结构的热效应数值比较*

马秀华 毕进子 侯霞 邓泽微 孟俊清 陈卫标

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 激光二极管抽运的全固态激光器中,除了激光介质的温度分布和热透镜效应以外,抽运、冷却结构对获得高光束质量、高功率激光输出至关重要。基于热传导方程,在相同的抽运功率和传导冷却边界条件下,对单侧面抽运锯齿形(zigzag)板条、单侧面键合锯齿形板条、部分抽运板条三种不同抽运结构的温度分布、热致应力、温度导致的折射率变化进行了详细的分析,并通过光线追迹方法,比较了光束在锯齿形面内和垂直于锯齿形面内的光程差,由光程差曲线分析了激光束的热透镜效应。对三种抽运结构的端面温度、端面变形和端面变形导致的光程差也进行了对比分析。结果表明,三种抽运结构在锯齿形面内的光束均表现为发散特性,在垂直于锯齿形面内的光束表现为热聚焦效应,温度导致的热聚焦特性相差不是很大。而在消除端面效应方面,键合激光板条具有明显优势。最后,提出了热透镜效应的补偿方法。

关键词: 激光器; 固体激光器; 锯齿形板条; 数值比较; 热效应

中图分类号: TN248 文献标识码: A

Numerical Comparison of Thermal Effect Among zigzag Slab Pump Geometry

Ma Xiuhua Bi Jinzi Hou Xia Deng Zewei Meng Junqing Chen Weibiao

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract: Pump and cooling scheme play an essential role in getting high bright and high-average-power output for diode pumped solid-state lasers besides the temperature distribution and thermal lens effects. Base on heat conduction equations, under the condition of conductively cooling and the same pump power, temperature and thermal-induced stress and temperature induced refractive index are analyzed in detail in one-side pump zigzag slab, one-side pump diffusion bonding zigzag slab, partially pumped slab configurations. Using ray tracing method, the OPD (optical path difference) is compared in zigzag and perpendicular zigzag plane, and the thermal lens effect is analyzed with the OPD curves. The end temperature, end deformation, end OPD are also analyzed in contrast. It is shown that the beams are diverging in zigzag plane while they are focusing in perpendicular zigzag plane, and the diffusion bonding slab can eliminate end effect in evidence. At last, the compensation method of the thermal-lens effect is also proposed.

Key words: lasers; solid-state lasers; zigzag slab; numerical comparison; thermal effect

1 引 言

热致应力双折射、热聚焦和应力断裂效应使得棒状激光介质获得高功率、高光束质量激光输出遇到了困难。在均匀抽运和冷却条件下,锯齿形(zigzag)板条激光介质能够提供比棒状激光介质较大的增益长度与几何长度的比率,从而提高了效率。更重要的是可以在锯齿形面内消除一阶热聚焦、应

力双折射和退偏效应,理论上可以获得高光束质量、高功率的偏振激光输出^[1~5]。传导冷却在机械稳定性、结构简单、保护全反射面、减少振动、节约能源等方面比对流冷却更有优势。因此,传导冷却激光二极管(LD)抽运的全固态激光器在空间应用已经引起了广泛的关注^[6~13]。目前国内研究者均侧重于对流冷却棒状或直通板状固体激光介质热效应研

* 中国科学院方向性项目资助。

作者简介: 马秀华(1978—),男,山东人,博士研究生,主要从事二极管抽运固体激光器技术等方面的研究。

E-mail: xiuhua_ma@163.com

导师简介: 陈卫标(1969—),男,上海人,研究员,博士生导师,主要从事全固态激光技术,星载激光多普勒雷达技术,机载激光雷达技术以及地基大气污染检测激光雷达技术等方面的研究。E-mail: wbchen@mail.shcnc.ac.cn

收稿日期: 2007-04-04; 收到修改稿日期: 2007-06-04

究^[14~16]。为了选择合适的激光器抽运结构结构,本文从热传导方程出发,在相同的抽运功率和传导冷却条件下,以调 Q 脉冲方式实现 20 Hz、100 mJ 的激光输出为目标,比较三种不同的抽运结构:1) 单侧面抽运锯齿形激光板条,2) 单侧面抽运键合激光板条,3) 部分抽运激光板条结构,分析抽运的不均匀性导致的温度场分布和热致应力分布,进而比较激光介质的端面效应、温度导致的折射率分布的不均匀性。最后采用光线追踪方法计算了温度和热应力导致的激光介质的热透镜效应,并提出了对热透镜效应的补偿方法。

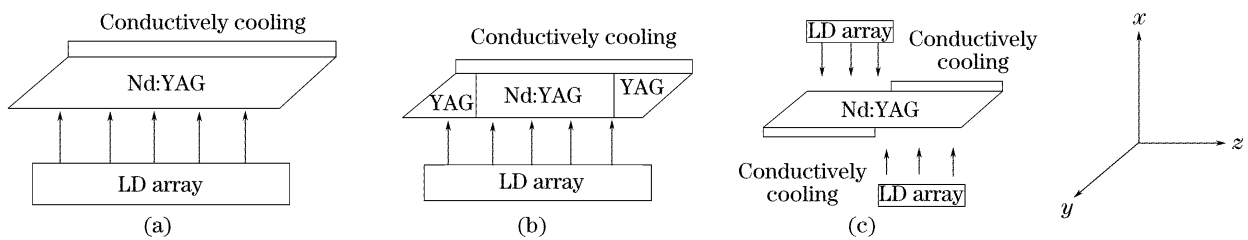


图 1 三种不同的抽运结构结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of three pump geometry

调 Q 方式实现 20 Hz、100 mJ 激光脉冲输出,抽运源需 60 条激光二极管,激光二极管阵列峰值功率 4200 W,脉宽 200 μ s。可假定抽运光在板条长度方向为均匀分布,在宽度方向上呈现高斯分布,在厚度方向上指数衰减。入射到激光晶体上的光强在抽运结构 a、b、c 上分布分别用 $I_1(x, y, z)$ 、 $I_2(x, y, z)$ 、 $I_3(x, y, z)$ 表示:

$$\begin{aligned}
 I_1(x, y, z) &= aI_{\max} \exp\left(-\frac{y^2}{\omega_y^2}\right) \left\{ \exp\left[-\alpha\left(x + \frac{t}{2}\right)\right] + \exp\left[-\alpha\left(\frac{3t}{2} - x\right)\right] \right\}, \\
 I_2(x, y, z) &= aI_{\max} \exp\left(-\frac{y^2}{\omega_y^2}\right) \left\{ \exp\left[-\alpha\left(x + \frac{t}{2}\right)\right] + \exp\left[-\alpha\left(\frac{3t}{2} - x\right)\right] \right\}, \\
 I_3(x, y, z) &= \begin{cases} aI_{\max} \exp\left(-\frac{y^2}{\omega_y^2}\right) \left\{ \exp\left[-\alpha\left(\frac{t}{2} - x\right)\right] + \exp\left[-\alpha\left(\frac{3t}{2} - x\right)\right] \right\}, & 0 < z < l/2 \\ aI_{\max} \exp\left(-\frac{y^2}{\omega_y^2}\right) \left\{ \exp\left[-\alpha\left(x + \frac{t}{2}\right)\right] + \exp\left[-\alpha\left(\frac{3t}{2} + x\right)\right] \right\}, & -l/2 < z < 0 \end{cases}
 \end{aligned} \quad (1)$$

其中 I_{\max} 为峰值功率密度,通过非序列性光线追迹得到 $I_{\max} = 1 \times 10^4$ W/cm², ω_y 为抽运光宽度方向上的光腰。 $I(x, y, z)$ 为激光二极管发出的光强在激光晶体上的分布。抽运光在抽运结构 a、b、c 上的光强(增益)沿板条厚度和长度方向上分布如图 2 中的 a、b、c 所示。

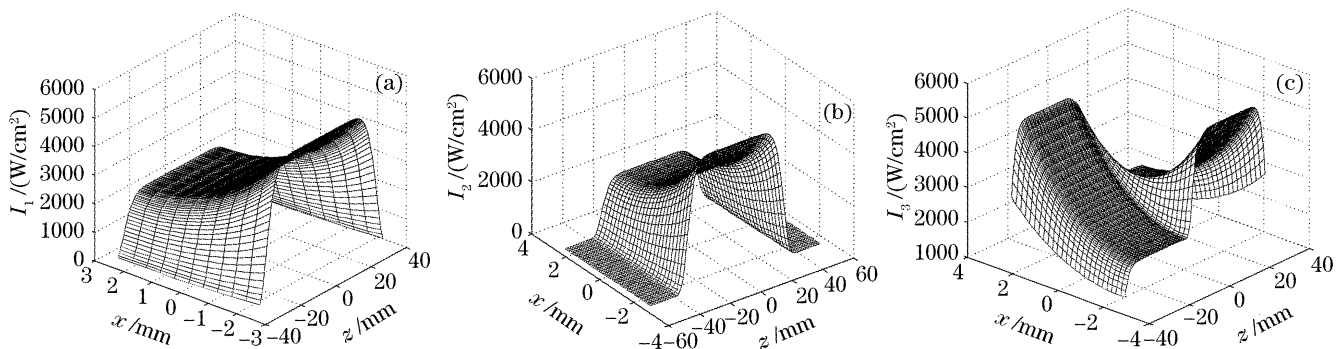


图 2 抽运光在三种不同抽运结构上的光强(增益)分布

Fig. 2 Pump light intensity distribution with three pump geometries. LD: Laser diode

表 1 计算用到的参量表

Table 1 List of parameters for computing

| | | |
|---------------|--|----------------------|
| k | thermal conductivity / [W/(m · K)] | 14 |
| c | specific heat / [J/(kg · K)] | 590 |
| ρ | mass density / (kg/m ³) | 4560 |
| E | Young modulus / GPa | 3 |
| ν | Poisson ratio | 0.28 |
| α | thermal expansion coefficient | 7.5×10^{-6} |
| ω_y | beam waist / mm | 1.5 |
| a | absorption coefficient / m ⁻¹ | 400 |
| η_∞ | coupling efficiency | 85% |
| η_a | absorption efficiency | 80% |
| η_k | heat load ratio | 36% |
| l | slab length / mm | 78.8 |
| b | slab width / mm | 7 |
| t | slab thick / mm | 5 |

激光板条的热源可以看成与抽运光强度成正比,表示为

$$Q_{\text{abs}}(x, y, z) = \eta I(x, y, z), \quad (2)$$

式中 $Q_{\text{abs}}(x, y, z)$ 为激光介质的热沉积, $\eta = \eta_\infty \eta_a \eta_h$

由以下三部分组成, η_∞ 为抽运耦合系统的耦合效率, η_a 为激光介质对抽运光的吸收效率, η_h 为产热比, 计算中用到的主要参量如表 1 所示。

3 三种抽运结构的温度和热应力分析

3.1 激光板条内的温度场分布

激光介质吸收抽运光除一部分转化为激光输出外, 大部分以热的形式沉积在激光介质中, 激光板条内的稳态温度场分布可以表示为^[17]

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q_v = 0, \quad (3)$$

冷却表面边界条件: $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, 另外两个非通光面: $\partial T / \partial y = 0$ 。其中 k 为激光介质的热传导系数, T 为激光介质内的温度分布, Q_v 为激光板条内热源。

图 3 为对应三种不同抽运结构稳态温度分布云图。从三种温度分布图来看, 温度梯度均沿厚度方向上。抽运结构 a、b、c 对应的最大温差分别为 $14 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $14 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $17 \text{ }^\circ\text{C}$, 且在端面附近抽运结构 b 端面热梯度最小。

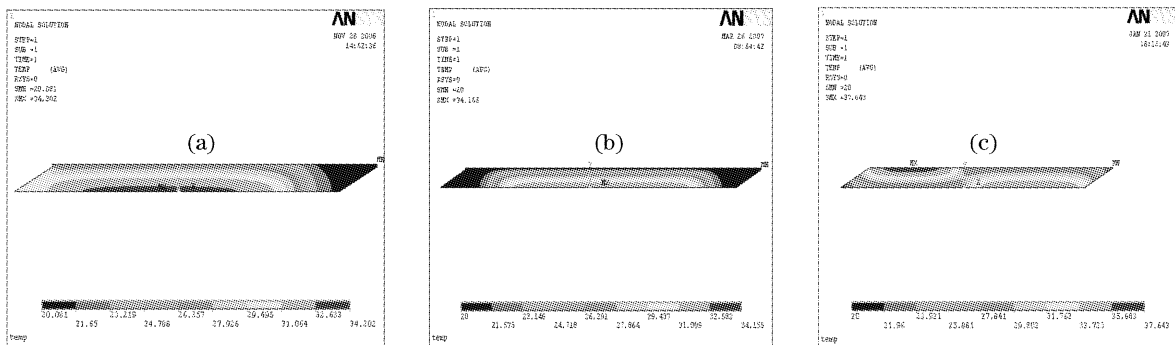


图 3 激光板条温度分布云图

Fig. 3 Temperature distributions of laser slab media

3.2 激光板条内的热应力分析

由于抽运导致的体积热源和表面冷却双重作用, 导致晶体内部温度分布不均匀, 使得晶体内部存在热应力, 胡克定律使应变张量与应力张量服从于^[18]:

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1-\nu} \left[\epsilon_{ij} + \left(\frac{\nu}{1-2\nu} \right) (\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}) \delta_{ij} - \left(\frac{1+\nu}{1-2\nu} \right) \alpha T \delta_{ij} \right], \quad (4)$$

其中 α, E, ν 分别为板条材料的热膨胀系数、杨氏模量和泊松比。 δ 是克罗内克(Kronecker) 函数。在稳态下,

设已知截面相对温度分布满足 $\int_A T'(x, y) dA = 0$ 时,

温度可表示为

$$T(x, y) = T'(x, y) + T_a, \quad (5)$$

式中 T_a 为平均温度。则该截面的应力分布有如下关系:

$$\sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) - E\alpha T'(x, y), \quad (6)$$

(4) 式中 $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$ 分别为 $x, y,$ 方向的应力, $T'(x, y)$ 为温度分布。本文应用有限元方法计算得到的等效热应力及变形分布如图 4 所示, 从三种抽运结构热应力图中可以看出, 激光板条在抽运面凸形弯曲, 该面受到张应力所致, 冷却面呈现凹形弯曲, 由于该面受到压应力所致。a、b、c 三种抽运结构端面热致应力分别为 29918 Pa、10 Pa、2712 Pa, 较大的热应力势必导致较大的热变形。可以看出, 键合激光板条能够减小晶体的端面热应力。

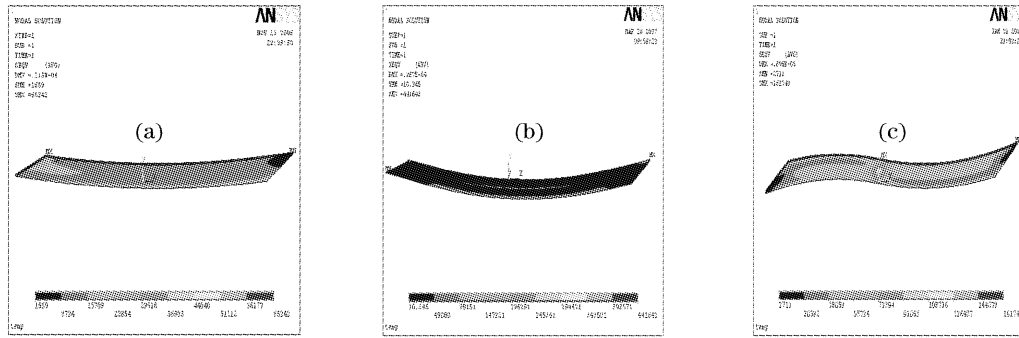


图 4 激光板条变形分布及等效应力分布图

Fig. 4 Deformation distributions and equivalent stress of laser slab media

4 热效应对光束的影响

4.1 温度导致的折射率变化

由于温度分布的不均匀性和热应力的存在,激光通过板条后的光程差发生变化,使得输出激光表现出透镜效应,光程差变化可以分为两部分:一部分与介质折射率随温度变化有关;另一部分为板条应力所致,应力带来的热应变通过光弹效应改变介质的折射率。由于锯齿形板条本身可以消除热致应力双折射^[18],本文分析温度导致的折射率变化,温度与折射率的关系可以表示为

$$n = n_0 + \frac{\partial n}{\partial T} T'(x, y, z), \quad (7)$$

式中 n_0 为常温下的折射率, $\partial n / \partial T$ 为折射率随温度的变化系数,温度导致的光程差可以表示为

$$D_{OP} = \int \frac{\partial n}{\partial T} T'(x, y, z) dl. \quad (8)$$

采用光线追迹方法,通过对激光光束经过激光板条进行分析,分析中只有相对光程差对光束波面才产生影响,采用每条光线的光程对第一条光线的相对光程差进行分析。在板条锯齿形面内从底面到顶面沿着左端面均匀取 17 条光线传输,得到在锯齿形面内相应的相对光程差分布如图 5 所示。

从图 5 可以看出,三种抽运结构导致的光程差曲线的曲率较小,接近直线,曲线曲率的大小反映了激光束的聚焦特性^[19],三种抽运结构光束均呈现近平行的偏离光轴的发散特性,偏折角度为相对光程差曲线与横轴的夹角,抽运结构 a 的激光板条相对光程差曲线与横轴的夹角最大,光束将向下偏折,抽运结构 c 次之,光束将向上偏转,抽运结构 b 最小,略微向下偏折。应用同样的方法,在垂直于之字面内均匀取 13 条光线,得到相应的相对光程差分布如图 6 所示。

从垂直锯齿形面内的相对光程差分布图可知,

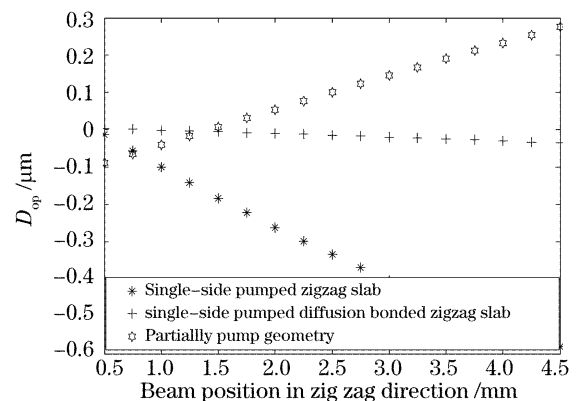


图 5 锯齿形面内的相对光程差分布

Fig. 5 Relatively OPD distribution in zigzag direction.

OPD: Optical path difference

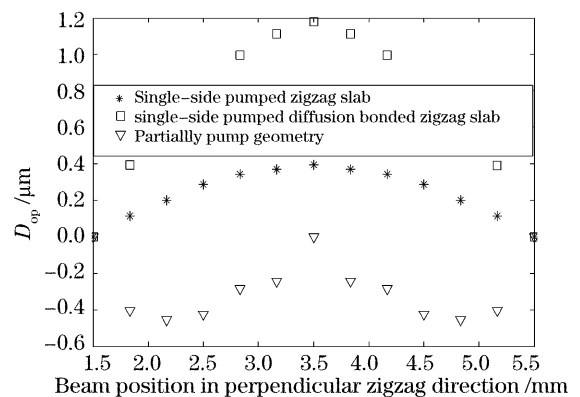


图 6 垂直锯齿形面内的相对光程差分布

Fig. 6 Relatively OPD distribution in perpendicular

zigzag direction

三种抽运结构的激光板条光束均呈现正透镜效应,通过计算得到三种抽运结构的热焦距依次为 5.1 m、2.19 m、4.44 m。

4.2 端面效应的影响

激光介质在工作过程中由于热应力的存在导致端面变形,端面变形使得光程差发生变化,端面效应的大小与端面温度梯度分布有着密切的关系。图 7、图 8、图 9 分别为三种不同的抽运结构的左侧端

面温度分布图、端面变形分布图、端面效应导致的光程差分布图。

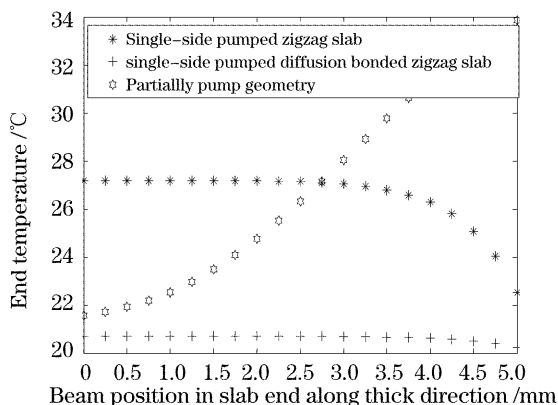


图 7 三种抽运方式端面温度分布比较图
Fig. 7 End-temperature distribution with three pump geometries

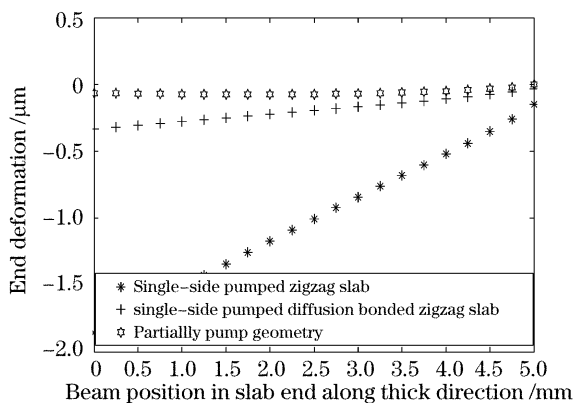


图 8 三种抽运方式端面变形分布比较图
Fig. 8 End-deformation distribution with three pump geometries

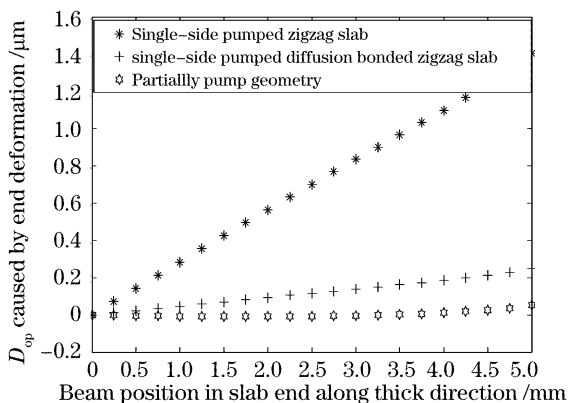


图 9 三种抽运方式端面效应导致的光程差分布比较图
Fig. 9 OPD distribution induced by end effect with three pump geometries

从图 7、图 8、图 9 分布上可以看出，采用键合激光板条的端面温度变化非常小，与之对应的端面变形和端面光程差也非常小，这是因为端面 YAG 对抽运光呈现透明状态，几乎不吸收。抽运结构 a 端面效应最严重，应该通过避免抽运光在端面附近照

射来减小端面效应。

5 激光束的矫正

激光通过激光介质后呈现热透镜效应，必须对其进行校正，图 10 为校正光路图，谐振腔采用平凹谐振腔，将焦距为 f_y 的负柱透镜置于激光板条左侧，与板条呈现共焦放置，校正垂直于锯齿形面内聚焦的光束，将焦距为 f_x 的正柱透镜置于激光板条的右侧，也与板条呈现共焦放置，用于校正锯齿形面内发散的激光束。

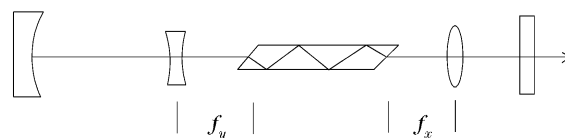


图 10 激光束校正光路图

Fig. 10 Optical layout for beam correction

6 结 论

在三种不同抽运结构的锯齿形激光板条中，在传导冷却、侧面抽运和相同的抽运功率条件下，对其温度场和热致应力作了较详细的理论计算和数值模拟，并且进行了比较。采用光线追迹方法，阐述了热效应对光程差的影响，以及由此导致的端面效应。提出光束校正方法，对在锯齿形面和垂直锯齿形面的激光束进行了校正。最终得到如下结论：三种抽运方式在锯齿形面内均呈现负透镜效应，在垂直锯齿形面内呈现正透镜效应，温度导致的热透镜效应相差不是很大，端面温度和端面效应相差甚大，键合激光板条在消除端面效应方面要优于其他两种抽运结构。

参 考 文 献

- 1 R. J. Shine, Jr., A. J. Alfrey, R. L. Byer. 40 W CW, TEM₀₀-mode, diode-laser-pumped, Nd:YAG miniature-slab laser [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(5): 459~462
- 2 Brian J. Comaskey, Ray Beach, G. Albrecht *et al.*. High average power diode-pumped slab laser [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **28**(4): 992~996
- 3 Zhang Shiwen. High average power Nd:YAG slab laser with improved beam quality[C]. *Proc. SPIE*, 1996, **2889**: 120~126
- 4 Armandillo E., Norrie G., Cosentino A. *et al.*. Diode pumped high-efficiency high-brightness Q-switched Nd:YAG slab laser [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(15): 1168~1170
- 5 Murray K. Reed, Robert L. Byer. The output beam quality of a Q-switched Nd: glass slab laser [J]. *IEEE Quant. Electron.*, 1990, **26**: 2138~2145
- 6 Lonnie E. Holder, Chandler Kennedy, Larry Long *et al.*. One joule per Q-switched pulse diode-pumped laser [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **28**(4): 986~991

- 7 Michael J. Kavaya, Sammy W. Henderson, James R. Magee *et al.*. Remote wind profiling with a solid-state Nd:YAG coherent lidar system[J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(15): 776~778
- 8 Robert S. Afzal, Mark D. Selker. Simple high-efficiency TEM₀₀ diode-laser-pumped Q-switched laser [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(5): 465~469
- 9 M. E. Kushina, M. G. Grote, C. E. Wiswall *et al.*. Clementine: diode-pumped laser qualification[C]. *Proc. SPIE*, 1995, **2379**: 137~140
- 10 Robert S. Afzal. Mars observer laser altimeter: laser transmitter [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(15): 3184~3188
- 11 Timothy D. Cole, Mark Boies, Ashruf El-Dinary. Laser radar instrument for the Near-Earth Asteroid Rendezvous (NEAR) mission[C]. *Proc. SPIE*, 1996, **2748**: 122~139
- 12 J. L. Dallas, R. S. Afzal, M. A. Stephen. Demonstration and characterization of a multibillion-shot, 2.5-mJ, 4-ns, Q-switched Nd:YAG laser[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(9): 1427~1429
- 13 Robert S. Afzal, Anthony W. Yu, John J. Zayhowski *et al.*. Single-mode high-peak-power passively Q-switched diode-pumped Nd:YAG laser[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(17): 1314~1316
- 14 Cheng Xiaojin, Niu Jinfu, Xu Jianqiu. Thermal effects in partially laser-diode-pumped slab lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 854~857 (in Chinese)
- 程小劲, 牛金富, 徐剑秋. 部分抽运的板条激光器的热效应分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(6): 854~857
- 15 Wang Junrong, Min Jingchun, Song Yaozu. Cooling of a side-pumped laser slab by heat sink[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(6): 830~857 (in Chinese)
- 王军荣, 闵敬春, 宋耀祖. 侧面抽运板状激光介质的热汇冷却[J]. *光学学报*, 2005, **25**(6): 830~834
- 16 Ou Qunfei, Chen Jianguo, Feng Guoying *et al.*. Analyses of transient temperature and thermal stress distribution in ring laser diode array pumped laser rod [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6): 803~807 (in Chinese)
- 欧群飞, 陈建国, 冯国英 等. 环形激光二极管抽运棒状激光器中瞬态温度和热应力分析[J]. *光学学报*, 2004, **24**(6): 803~807
- 17 M. Necaatiözsik. *Heat Conduction* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1983. 4~12 (in Chinese)
- M. N. 奥齐西克. 热传导[M]. 北京: 高等教育出版社, 1983. 4~12
- 18 J. M. Eggleston, T. J. Kane, K. Kuhn *et al.*. The slab geometry laser—Part 1: theory[J]. *J. Quant. Electron.*, 1984, **20**(3): 289~301
- 19 Thomas J. Kane, John M. Eggleston, Robert L. Byer. The slab geometry laser—Part 2: Thermal effects in a finite slab [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1985, **QE-21**(8): 1195~1210