



·强激光物理与技术·

复合结构掠入射板条放大器热效应的模拟分析*

王万祎, 陈方军, 公丕华, 贾全能, 张英华, 张祎景, 王杰, 赵子竣

(西南技术物理研究所, 成都 610041)

摘 要: 为了研究复合结构掠入射板条放大器的热效应, 采用在 Nd:YVO₄ 晶体抽运面上键合具有高热导率性能的蓝宝石的复合结构, 并建立了相应的热力学模型, 对激光介质的温度场分布、光程差(OPD)和热透镜效应进行了详细的理论分析, 利用有限元分析软件 COMSOL 模拟了晶体内部的温度、应变、光程差(OPD)及热焦距的分布情况。结果表明, 板条厚度为 2 mm、键合层厚度 1 mm、抽运功率 60 W 时, 复合结构相对于单一结构最高温度下降了约 50 K, 晶体中的最大形变量降低超过了 1/3, 极大地降低了介质中的热效应。

关键词: 掠入射板条放大器; 热效应; 热透镜; 光程差; 复合结构

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202335.220293

Thermal effect study of composite configuration grazing-incidence slab amplifier

Wang Wanyi, Chen Fangjun, Gong Pihua, Jia Quanneng, Zhang Yinghua,
Zhang Yijing, Wang Jie, Zhao Zijun

(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: To study the thermal effect of composite configuration grazing-incidence slab amplifier, a composite configuration was used, in which the Sapphire with high thermal conductivity was bonded on the pump face of the laser medium Nd:YVO₄ crystal. The thermodynamic model of the grazing-incidence slab amplifier was built up. The temperature distribution, optical path difference and thermal lens effect were analyzed theoretically in detail. Also, the temperature distribution, thermal strain, optical path difference and thermal focal length were simulated by finite element analysis software COMSOL. The results indicate that compared with single medium structure, the maximum temperature of the composite configuration decreased by 60 K, and the maximum deformation of the pump face decreased by 1/3, while the pump power is 60 W, the thickness of the slab is 2 mm and the thickness of the bonding layer is 1 mm. The novel composite configuration has reduced the thermal effect effectively.

Key words: grazing-incidence slab amplifier, thermal effect, thermal lens, optical path difference, composite configuration

随着半导体泵浦全固态激光技术的迅速发展, 半导体泵浦的板条激光器输出功率得到了极大的提高, 光束质量较之传统的固体激光器也有了较大的改善^[1-11]。在传导冷却高功率的板条放大器中, 掠入射结构在抽运面上能量密度高, 提取效率高, 并且该结构中由于种子光在抽运面上经过一次全反射, 对热畸变有部分补偿作用。因此, 掠入射结构板条放大器被广泛地应用在科研、工业和军事等领域^[12-13]。但是, 由于泵浦的不均匀性和冷却的不均匀性, 激光增益介质中产生了应力双折射、热致波前畸变、热透镜等效应, 限制着高功率和高光束质量的输出。对于掠入射结构激光介质中热效应, 研究人员已经进行了相关研究^[13-20]。

对于改善掠入射结构热效应的方法, 研究人员提出了采用传导冷却和气体冷却结合的方法^[14]。这些方法使热效应在一定程度上得到了改善, 但是由于气体的热导率较低使得这种方法非常有局限性。掠入射结构抽运面上温度较高, 形变严重, 本文提出了一种能够有效降低热效应的新型复合结构, 即通过在抽运面上键合蓝宝石而形成的

* 收稿日期: 2022-12-15; 修订日期: 2023-02-09
基金项目: 激光院青年科技创新项目(K210035-020)
联系方式: 王万祎, wangwany209@126.com。

复合结构。并且在考虑端面形变等因素的基础上,用有限元分析法对该结构中的热效应进行了模拟分析。

1 复合结构掠入射板条放大器模型

Nd:YVO₄ 晶体吸收截面较大,吸收系数较高,非常适合作为掠入射结构的激光介质。一般地,键合晶体是把一块激光晶体和一块或几块纯的非掺杂同质基底材料通过键合技术实现稳固结合的一种复合结构晶体。如图 1(a)所示为 Nd:YVO₄ 和 YVO₄ 复合结构,该结构可以降低晶体中的温度,减小抽运面的形变,但是由于种子光在抽运面上发生全反射,在增益区域中的光程较短,提取效率不高;而且 YVO₄ 导热率不高。因此,提出了 Nd:YVO₄ 晶体和具有较低折射率和较高热导率的蓝宝石键合的复合结构,如图 1(b)所示。蓝宝石的折射率较小,种子光入射角在小于 25° 的范围内,种子光在键合界面上能够发生全反射,因此克服了提取效率低的问题,而且蓝宝石的热导率 (25 W/(m·K)) 远大于 YVO₄ 晶体。下面主要针对 Nd:YVO₄ 和蓝宝复合结构的热效应进行分析。

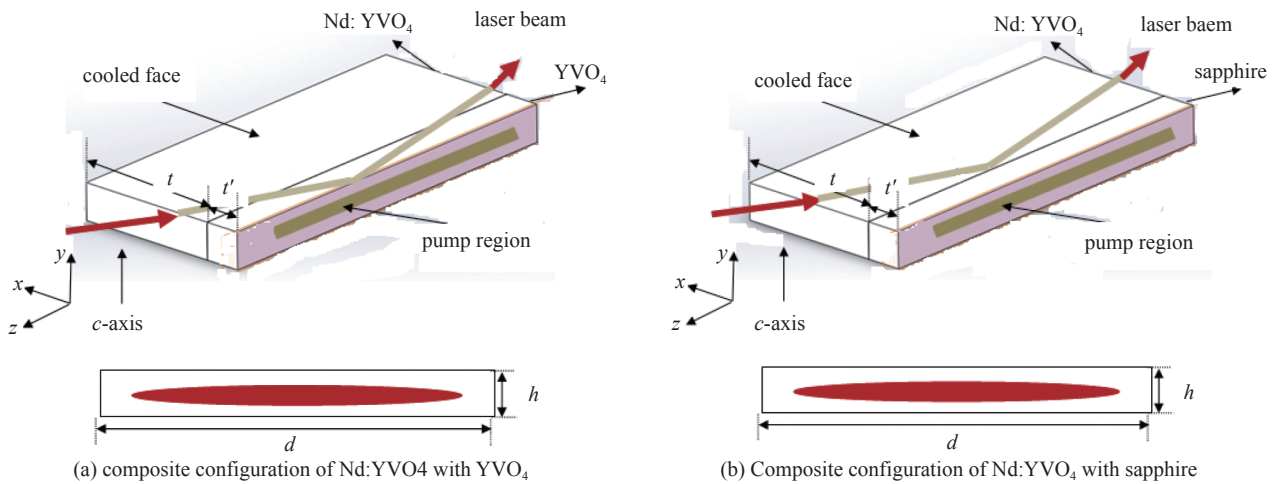


Fig. 1 Composite configuration of the grazing-incidence laser

图 1 复合结构板条放大器示意图

假设坐标原点位于晶体的中心位置,复合板条晶体的尺寸为:宽度为 $t+t'$ (x 轴方向, t 为晶体 x 方向的尺寸, t' 为键合层厚度),长度为 d (z 方向),厚度为 h (y 轴方向)。泵浦面位于右侧面 (x 方向,泵浦面位于 $x=-(t+t')/2$),复合晶体中的热通过上下两个与晶体大面接触良好的水冷热沉带走 (y 方向, $y=\pm h/2$), z 轴为种子光束的传播方向。忽略非冷却面的热流,并且假设冷却水温度 T_0 恒定为 293 K,泵浦光偏振方向与 Nd:YVO₄ 晶体 c 轴平行 (即 y 轴方向)。为抑制自激振荡,晶体两端一般切一个小角度或者布儒斯特角,这使得两侧面不平行。由于晶体两端的切角非常小,对热效应的分析不会产生影响,可以近似为没切角的情况。

2 理论分析

2.1 温度场的理论计算

对于掠入射结构,由于泵浦产生的热及传导冷却,在晶体中形成一个稳定分布的温度场。其热传导方程可写成^[12-13]

$$K_x \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + K_y \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + K_z \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \alpha P_h(y, z) e^{-\alpha(x+t/2)} \quad (1)$$

式中: $K_i (i=x, y, z)$ 是激光晶体各方向的热传导系数, α 是晶体的吸收系数, P_h 为入射在板条表面 $x=-t/2$ 的热功率分布。

在该放大器结构中冷却面位于晶体的上、下面 (即 $y=\pm h/2$ 面), 泵浦面及通光面可视为绝热面, 可写出此冷却方式的边界条件为^[7]

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial x} \left(\pm \frac{t}{2}, y, z \right) = 0 \\ \frac{\partial T}{\partial y} \left(x, \pm \frac{h}{2}, z \right) = h(T - T_0) \\ \frac{\partial T}{\partial z} \left(x, y, \pm \frac{d}{2} \right) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中： h 为板条和冷却装置之间的热交换系数， T_0 为初始温度。求解热传导方程及相应边界条件组成的方程组，即可得到掠入射板条放大器介质中的温度场分布。

2.2 光程差 (OPD) 的计算

激光晶体受到热或者力的作用时，晶体会产生形变，而且折射率会发生变化。当一束平面波经过激光晶体时，会产生光程差(OPD)。光程差主要来自于温度梯度和热应力引起的折射率变化以及端面形变的贡献，由于Nd:YVO₄是自然双折射晶体，因此这里只考虑温度梯度和端面形变。

温度梯度所产生的光程差 $D_T(x,y)$ 可以表示为

$$D_T(x,y) = \int_s \left\{ \left[\left(\frac{dn}{dT} \right)_c + E\zeta B_{\perp} + (1+\nu)\zeta n \sin^2(\theta) \right] T(x,y,z) \right\} ds \quad (3)$$

式中： $(dn/dT)_c$ 是晶体c轴的折射率随温度的变化系数 ($3.9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)， ζ 是介质热膨胀系数 ($7.2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)， E 为杨氏模量 ($0.133 \times 10^{12} \text{ P}$)， ν 为泊松比 (0.33)， B_{\perp} 为垂直c轴的Nd:YVO₄材料压光张量元素 (0.42×10^{-12})， θ 为光线与z轴的夹角。

对掠入射板条结构，介质形变又分为通光面形变和抽运面形变，单侧通光面形变导致的光程差 $D_{D1}(x,y)$ 可表示为

$$D_{D1}(x,y) = \frac{n_0 - 1}{\cos[\arcsin(n_0 \sin \theta)]} dz \quad (4)$$

式中： n_0 为介质初始折射率， dz 为端面上一点的z向位移。

假设抽运面x方向一点的位移为dx，则相应的光程差 $D_{D2}(x,y)$ 应该为

$$D_{D2}(x,y) = 2n_0 \frac{dx}{\sin \theta} - 2n_0 \frac{dx}{\tan \theta} \cos \theta = 2n_0 \sin \theta dx \quad (5)$$

由温度梯度和端面形变引起的总的光程差为

$$D(x,y) = D_T(x,y) + D_{D1}(x,y) + D_{D2}(x,y) \quad (6)$$

2.3 热透镜效应的理论分析

由光程差可计算出在Nd:YVO₄板条晶体中产生的相应热透镜。热透镜计算遵循以下式子^[12-13]

$$D(j) = p_0 + p_1 j + p_2 j^2 + \dots + p_k j^k \quad (7)$$

式中： p_0, p_1, p_2 表示多项式的系数，热透镜焦距 f_t 及屈光度 D_p 由二次方程 $D(j)$ 的系数决定。

$$D_p = \frac{1}{f_t} = -2p_2 \quad (8)$$

3 数值模拟及分析

针对Nd:YVO₄晶体和蓝宝石复合结构，考虑了端面形变，对其介质中的热效应采用有限元分析软件COMSOL和MATLAB进行模拟分析。Nd:YVO₄晶体的尺寸为长度(z轴方向)22 mm，宽度(x轴方向)8 mm，厚度(y轴方向)2 mm；键合层厚度(x轴方向)为0.5~1.5 mm；泵浦区域为14 mm(长)×1 mm(厚)；泵浦功率为15~60 W。

3.1 温度分布

为了研究在泵浦面上键合非掺杂蓝宝石晶体对整个板条晶体内部温度场分布的影响，基于上述模型，假设键合层厚度分别为0.5 mm、1 mm、1.5 mm，泵浦功率为60 W，用COMSOL软件模拟了复合板条晶体内部温度场的分布，如图2所示。和未键合单一晶体内部温度场的分布进行了对比，可以看出，在同等泵浦条件下，相对于单一晶体结构，键合层厚度为1.5 mm的复合结构晶体在x轴方向的最高温度降低约40 K，在y轴方向的最高温度降低约50 K，在z轴方向的最高温度降低约60 K，即采用在泵浦面键合蓝宝石的方法对改善增益介质的温度分布有明显的作用，键合层厚度越厚效果越显著。

3.2 光程差 (OPD) 的分析

由理论分析可知，光程差主要来自于温度梯度和热应力引起的折射率变化以及端面形变的贡献，介质形变又分为通光面形变和抽运面形变。对于掠入射板条结构，由于抽运面温度较高，形变主要考虑抽运面的形变。因此对未键合单一晶体、以及不同键合层厚度(分别为0.5 mm, 1 mm, 1.5 mm)复合板条晶体在泵浦功率60 W时抽运面

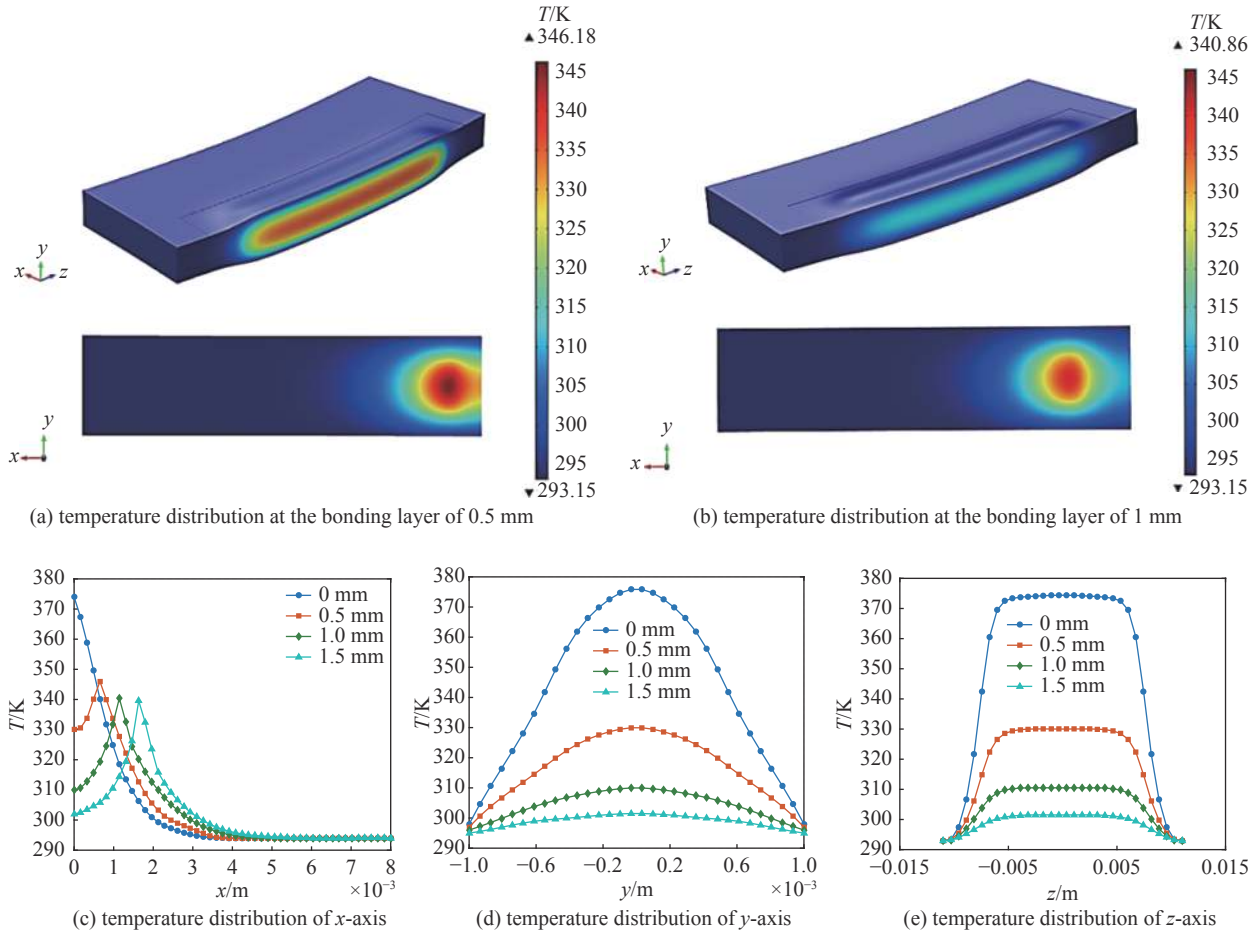


Fig. 2 Temperature distribution of each section of crystal

图 2 晶体中温度场分布

上的形变分别进行了模拟计算,如图 3 所示,其中图(a)为抽运面在 y 方向的形变,图(b)为抽运面在 z 方向的形变。可以看出,通过键合非掺杂晶体对降低应变有显著的改善作用,键合层厚度越厚效果越明显。当键合层厚度为 1.5 mm 时,相对于未键合单一晶体,最大形变量改善量超过 1/3。

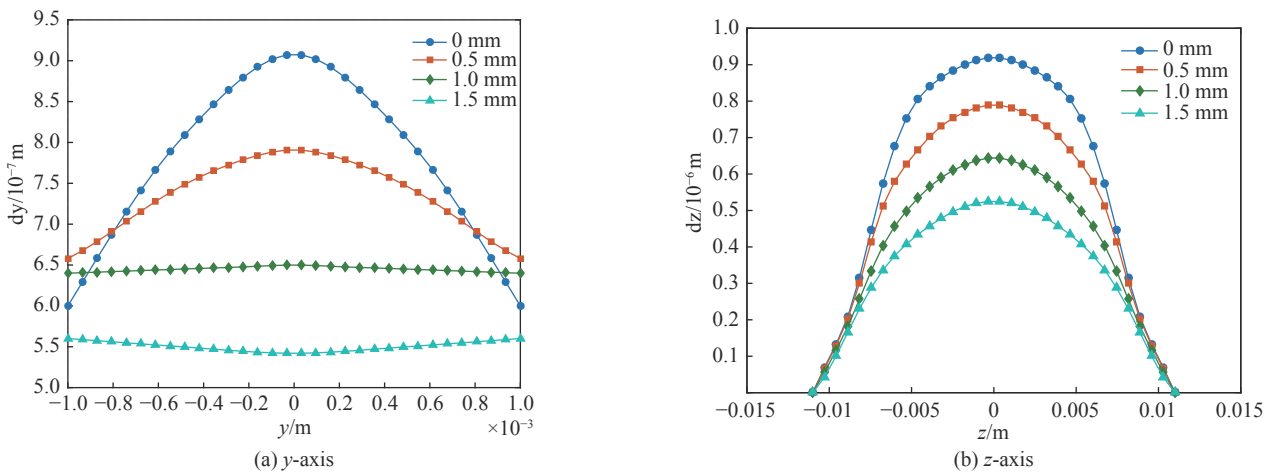


Fig. 3 Deformation of crystal on the pumping surface

图 3 晶体抽运面上的形变

在考虑温度梯度和热应力引起的折射率变化以及抽运面形变的情况下,分别对未键合晶体和不同键合层厚度的复合板条晶体内部各个方向的 OPD 进行了模拟计算,如图 4 所示,图(a)为不同键合层厚度的板条晶体 y 轴上各位置对应的总 OPD,图(b)为不同键合层厚度的板条晶体 z 轴上各位置对应的总 OPD。从图中可看出键合层对减小总 OPD 的作用显著,键合层厚度越厚,效果越显著。

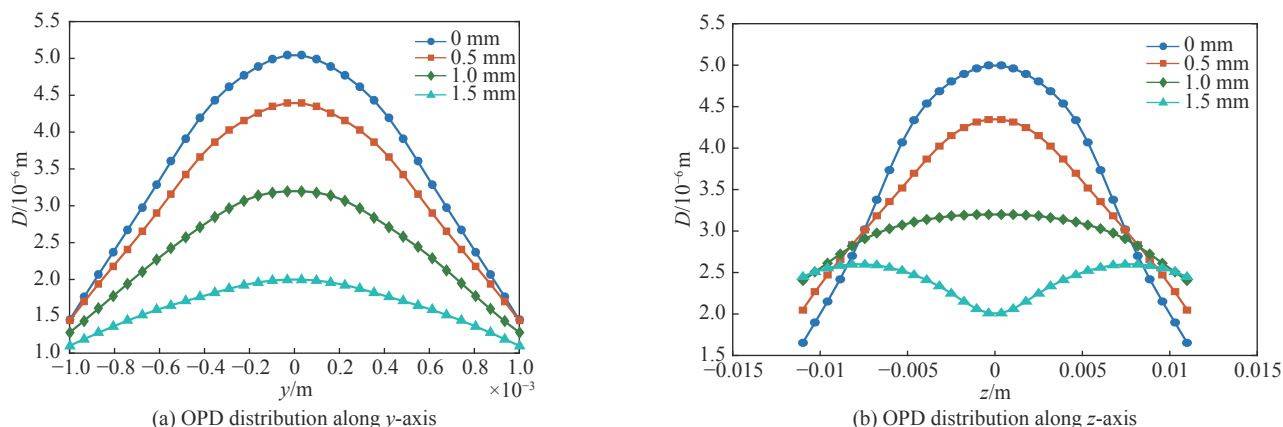


Fig. 4 OPD distribution of different bonding thickness

图4 不同键合层厚度总OPD分布图

3.3 热焦距的模拟计算

激光介质中由于存在温度梯度而形成了热透镜效应,虽然热透镜不会导致光束质量的退化,但如果热焦距太短,会使激光束聚焦在晶体内部打坏晶体。因此,为了研究在抽运面上键合非掺杂晶体对整个板条晶体内部热焦距的影响,分别模拟了未键合单一晶体和经过键合的复合板条晶体内部y方向的热焦距,图5为入射角为 6° 时,不同键合层厚度情况下厚度方向(即y方向)热焦距(f_t)随泵浦功率(P)变化的关系曲线。从图中可看出,在键合层厚度固定时,热焦距随泵浦功率的增大而减小,而在相同泵浦功率的情况下,键合层厚度越厚,热焦距也越大,也就是说造成的热透镜效应越小。

4 结论

本文采用有限元分析法数值模拟了复合结构掠入射板条放大器晶体内部的温度、应变、光程差(OPD)及热焦距的分布情况,分析了不同键合层厚度对复合结构板条晶体内部温度分布、应变、光程差(OPD)及热焦距的影响。结果表明,相对于未键合单一晶体,键合晶体的内部温度梯度、抽运面形变、光程差及热透镜效应明显减小,即采用在泵浦面键合蓝宝石的方法对降低增益介质的热效应有明显的改善作用,且键合层越厚效果越显著。当键合层厚度大于1 mm时,热效应改善的趋势逐渐放缓。同时考虑到键合层越厚,激光束在传输路径上能利用到的模体积越小的因素,因此键合层厚度应控制在合理范围之内。

参考文献:

- [1] Paschotta R. Encyclopedia of laser physics and technology[M]. Weinheim: Wiley-VCH, 2008.
- [2] Kane T J, Eckardt R C, Byer R L. Reduced thermal focusing and birefringence in zig-zag slab geometry crystalline lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1983, 19(9): 1351-1354.
- [3] Eggleston J M, Kane T J, Kuhn K, et al. The slab geometry laser—Part I: theory[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1984, 20(3): 289-301.
- [4] Teppitaksak A, Thomas G M, Damzen M J. Investigation of a versatile pulsed laser source based on a diode seed and ultra-high gain bounce geometry amplifiers[J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 12328-12336.
- [5] Bernard J E, Alcock A J. High-efficiency diode-pumped Nd: YVO₄ slab laser[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(12): 968-970.
- [6] Rutherford T S, Tulloch W M, Sinha S, et al. Yb: YAG and Nd: YAG edge-pumped slab lasers[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(13): 986-988.
- [7] Eggleston J M, Frantz L M, Injeyan H. Deviation of the Frantz-Nodvik equation for zig-zag optical path, slab geometry laser amplifiers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1989, 25(8): 1855-1862.
- [8] Dallas J L, Afzal R S. Modeling of a diode-side-pumped Nd: YAG laser[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(12): 2365-2370.
- [9] Furukawa H, Hiura N, Kato Y, et al. Evaluation of thermal birefringence power loss in the laser-diode-pumped Nd: glass laser[C]//Proceedings of SPIE. 2000, 3889: 610-618.

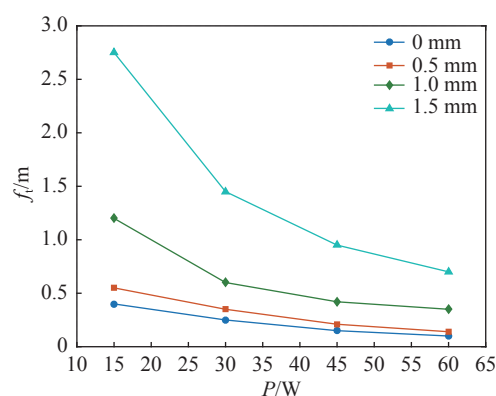


Fig. 5 Simulation of thermal focal length vs pump power

图5 热焦距随泵浦功率的模拟计算

- [10] Kanabe T, Kawashima T, Matsui H, et al. Laser-diode-pumped 10-J X 10-Hz Nd: glass slab laser system[C]//Proceedings of SPIE 3889. 2000: 190-197.
- [11] 刘亮, 郭少锋, 陆启生, 等. 传导冷却端面泵浦板条放大器波前畸变数值研究[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(7): 987-992. (Liu Liang, Guo Shaofeng, Lu Qisheng, et al. Thermal distortion analysis for conduction cooled end-pumped slab[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(7): 987-992)
- [12] Kaskow M, Zenzian W, Jabczynski J K. Near-diffraction-limited, high peak power, electro-optically Q-switched, diode-side-pumped Nd: YVO₄ grazing-incidence oscillator[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 65: 50-55.
- [13] Amarande Ş A, Damzen M J. Measurement of the thermal lens of grazing-incidence diode-pumped Nd: YVO₄ laser amplifier[J]. Optics Communications, 2006, 265(1): 306-313.
- [14] Chen Zhuo, Yan Xingpeng, Jiang Xiaoyu, et al. The thermal effect in a grazing-incidence slab laser with the novel composite cooling method[J]. Optical and Quantum Electronics, 2009, 41(1): 27-38.
- [15] Bermudez J C, Pinto-Robledo V J, Kir'yanov A V, et al. The thermo-lensing effect in a grazing incidence, diode-side-pumped Nd: YVO₄ laser[J]. Optics Communications, 2002, 210(1/2): 75-82.
- [16] Yan Xingpeng, Gong Mali, He Fahong, et al. Numerical modeling of the thermal lensing effect in a grazing-incidence laser[J]. Optics Communications, 2009, 282(9): 1851-1857.
- [17] 王万祎, 雷甸, 郭猛, 等. 掠入射板条放大器链的热效应模拟分析[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27: 051009. (Wang Wanyi, Lei Hong, Guo Meng, et al. Thermal effect study of grazing-incidence amplifier chain[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27: 051009)
- [18] 唐超, 徐霜馥, 张翔, 等. 掠入射Nd: YVO₄板条激光放大器的优化设计[J]. 中国激光, 2017, 44: 1201003. (Tang Chao, Xu Shuangfu, Zhang Xiang, et al. Optimization design of Nd: YVO₄ slab laser amplifier with grazing incidence[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44: 1201003)
- [19] 季林涛, 邹岩, 李之通, 等. 改善Nd: YAG掠入射板条激光器增益介质热效应的研究[J]. 中国激光, 2017, 44: 1101005. (Ji Lintao, Zou Yan, Li Zhitong, et al. Improvement of gain medium thermal effect in Nd: YAG grazing incidence slab laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44: 1101005)
- [20] 沈利沣, 姜洪波, 赵志刚, 等. 掠入射Nd: YVO₄板条结构皮秒激光放大器的实验研究[J]. 中国激光, 2016, 43: 1101004. (Shen Lifeng, Jiang Hongbo, Zhao Zhigao, et al. Experimental study of picosecond laser amplifier based on grazing incidence Nd: YVO₄ slab geometry[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43: 1101004)