

# 钢层缺陷对 Innoslab 激光晶体温度分布的影响

黄育广<sup>1,2</sup>, 高勇喜<sup>1,2</sup>, 郭洁<sup>1</sup>, 梁晓燕<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

**摘要** 建立了用于描述双端部分端面泵浦板条(Innoslab)激光晶体热源分布的模型。针对 700 W 双端泵浦 Yb:YAG 晶体, 利用有限元方法, 模拟了晶体在焊接钢层理想和有缺陷状态下的温度分布。理想焊接状态下经模拟得到的晶体表面最高温与实验测得的结果较为一致。借此进一步探究了钢层缺陷尺寸、位置及两相邻缺陷之间距离对晶体温度分布的影响, 并对影响程度进行了定量分析。

**关键词** 激光器; 激光晶体; Innoslab; 热效应; 数值模拟; 钢层; 温度场

**中图分类号** TN242; TN243; TN244

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL202249.2301002

## 1 引言

高功率全固态激光器由于稳定性好、平均功率高等特点, 广泛应用于科研、工业、医疗与军事等领域<sup>[1-4]</sup>。其中, 部分端面泵浦板条(Innoslab)激光器<sup>[5]</sup>凭借其独特的结构实现了高功率、高光束质量输出, 近年来逐渐成为国内外研究的热点<sup>[6-9]</sup>。

Innoslab 激光器中的晶体为板条状, 整形后的泵浦光从板条晶体的端面入射到晶体中, 热沉通过晶体的两个最大的表面对其进行冷却<sup>[6]</sup>。晶体与热沉材料(通常采用导热系数较大的紫铜)的热膨胀系数不同, 因此通常会在晶体与热沉之间增加传导性与延展性较好的钢片。钢片用以缓冲晶体与紫铜之间的热应力, 同时增加晶体与热沉的贴合度并进而增强散热。然而在人工贴合钢片时不可避免地会形成局部接触不良等缺陷(例如气泡)。利用扫描声学显微镜观察发现, 即使采用复杂的焊接工艺也很难将钢料中的缺陷完全排除。缺陷中残留的空气导热系数低, 使得热沉导热性能变差, 影响晶体的热量导出。缺陷还会使得晶体内部热量积聚进而造成波前畸变, 降低光束质量。同时, 缺陷会使晶体内部温度升高, 使得晶体的受激发射截面等参数改变, 从而导致放大效率下降<sup>[11-13]</sup>。当缺陷尺寸较大时, 上述影响变得十分显著, 甚至会因为热应力分布不均匀使得晶体发生断裂。因此, 分析缺陷特性对晶体内部温度分布的影响是十分必要的。

为了研究缺陷尺寸对散热效果的影响, 丁晓尘

等<sup>[14]</sup>针对波长为 808 nm、输出功率为 40 W 的连续波传导制冷单个巴条半导体激光器阵列, 系统地分析了钢层贴片内不同尺寸、不同位置的缺陷对发光点温升的影响。为了减小钢层中的缺陷, 董雪岩等<sup>[15]</sup>采用双面焊接方法将晶体与热沉连接, 避免了焊接层中出现空气孔并且提高了钢层的平整度, 提高了晶体的散热效率。但上述工作并未直观地表征钢层内缺陷特性对激光晶体温度分布的影响。

本文通过建立激光晶体热源分布模型并在钢层中引入缺陷, 对钢层中含有缺陷与理想状态(无缺陷)时的三维温度分布进行了仿真, 探究了钢层缺陷尺寸、位置及两相邻缺陷之间距离对晶体温度分布的影响, 并对影响程度进行了定量分析。在激光器设计及激光晶体安装过程中, 本文工作能帮助设计和实验人员决定是否需要考虑钢层缺陷的影响, 对激光器的设计和实验的进行有着现实的指导意义。

## 2 理论模型的建立

模型使用的 Yb:YAG 晶体结构如图 1 所示。晶体沿笛卡儿坐标系中三个轴向 X、Y、Z 方向的尺寸分别为  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 。晶体通光面两侧的泵浦光经过光束整形系统后沿 X 轴入射到晶体端面( $b \times c$ )中心、厚度为  $l_1$  的夹层区域( $b \times l_1$ )并继续向对侧传播, 上下两个大面( $a \times b$ )由钢( $a \times b \times l_3$ )焊接在水冷的紫铜热沉上。

在直角坐标系中, 稳态下的热传导方程<sup>[16]</sup>表示为

$$K_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q(x, y, z) = 0, (1)$$

收稿日期: 2022-01-14; 修回日期: 2022-02-23; 录用日期: 2022-03-21

基金项目: 国家自然科学基金(62005298)

通信作者: \*liangxy@siom.ac.cn

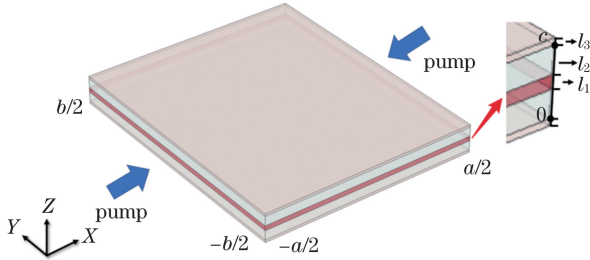


图 1 激光晶体和泵浦情况示意图

Fig. 1 Schematic of laser crystal and pump

式中:  $T(x, y, z)$  为晶体内部温度分布函数;  $K_x$ 、 $K_y$  和  $K_z$  分别是沿  $X$ 、 $Y$  和  $Z$  方向的导热系数;  $Q(x, y, z)$

是晶体中的热源分布, 也即单位体积产热量, 且

$$\iiint Q dV = P, \quad (2)$$

$$P = P_0 \cdot \alpha_{\text{abs}} \cdot \eta, \quad (3)$$

式中:  $P_0$  为入射泵浦光功率;  $\alpha_{\text{abs}}$  为晶体对泵浦光的吸收率;  $\eta$  为光热转化系数。

根据 Innoslab 放大器整形后泵浦光束的分布特性<sup>[17]</sup>, 泵浦光在  $Y$  方向上分布为矩形函数, 在  $Z$  方向上分布可近似看作高斯函数, 沿  $X$  方向传播时考虑晶体对其吸收, 吸收系数为  $\alpha$ 。由以上分析, 经计算可得:

$$Q(x, y, z) = Q_1(x, y, z) + Q_2(x, y, z) = \frac{\alpha\eta \cdot \alpha_{\text{abs}} \cdot P_0}{\sqrt{2\pi}b\omega_z} \exp\left[-\alpha\left(x + \frac{a}{2}\right)\right] \exp\left[-\frac{2\left(z - \frac{c}{2}\right)^2}{\omega_z^2}\right] + \frac{\alpha\eta \cdot \alpha_{\text{abs}} \cdot P_0}{\sqrt{2\pi}b\omega_z} \exp\left[-\alpha\left(-x + \frac{a}{2}\right)\right] \exp\left[-\frac{2\left(z - \frac{c}{2}\right)^2}{\omega_z^2}\right] = \frac{\alpha\eta \cdot \alpha_{\text{abs}} \cdot P_0}{\sqrt{2\pi}b\omega_z} \exp\left[-\frac{2\left(z - \frac{c}{2}\right)^2}{\omega_z^2}\right] \left\{ \exp\left[-\alpha\left(x + \frac{a}{2}\right)\right] + \exp\left[-\alpha\left(-x + \frac{a}{2}\right)\right] \right\}, \quad (4)$$

式中:  $Q_1(x, y, z)$  与  $Q_2(x, y, z)$  为左、右两端泵浦产生的热源;  $\omega_z$  为泵浦光束在  $Z$  方向的光斑半径, 且令其数值大小为  $l_1$ , 假设其在晶体中的大小保持不变。

现, 是  $X$  方向温度梯度的 66 倍。

### 3 仿真与实验

上文建立了温度和热源分布的理论模型, 下面对温度分布进行仿真。晶体的尺寸  $a$ 、 $b$  和  $c$  分别为 10 mm、12 mm 和 1 mm, 且  $c = l_2 + l_1 + l_2$ ,  $l_1 = 0.2$  mm,  $l_2 = 0.4$  mm, 单片铜层厚度  $l_3 = 0.1$  mm, 晶体被夹持在两片紫铜热沉 (20 mm × 24 mm × 2 mm) 中心位置, 上下两个大面与热沉大面接触, 热沉通水冷却, 水温恒定在  $T_{\text{cool}} = 25$  °C, 室温  $T_0 = 25$  °C, 左右两侧双端泵浦功率均为 350 W。在仿真中假设热沉外侧大面温度恒定在 25 °C 且热沉表面绝热, 晶体表面对环境进行热辐射且表面辐射率为 0.8, 由实验测得泵浦光吸收率  $\alpha_{\text{abs}} = 0.7$ , 光热转化系数  $\eta = 1$ , 晶体和热沉的导热系数分别为 8.6 W/(m·K) 和 400 W/(m·K)。根据比尔-朗伯吸收定律<sup>[18]</sup>, 泵浦光在沿  $X$  轴传播过程中指数衰减。在后文中, 对晶体两侧钢层处于理想状态下与含有缺陷时的三维温度进行仿真, 对得到的三维温度分布进行分析。

#### 3.1 理想钢层状态下温度分布

图 2 是理想状态下晶体的三维温度分布图。在仿真结果中, 晶体的最高温点温度为 65.6 °C, 靠近晶体端面中心位置, 最低温点温度为 25.93 °C, 位于晶体与热沉接触的大面上。在  $Z$  方向上, 温度分布关于晶体中心对称, 且如文献<sup>[19]</sup>所述, Innoslab 激光晶体中热梯度近似呈现一维分布, 温度梯度主要在  $Z$  方向上出

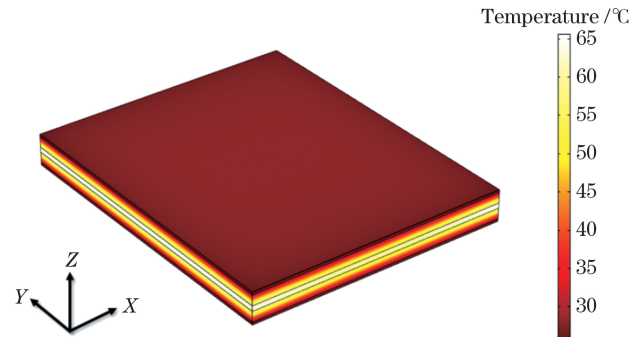


图 2 理想钢层状态下晶体三维温度分布图

Fig. 2 Three-dimensional temperature distribution of crystal with ideal indium layers

实验中采用掺杂浓度 2% (原子数分数) 的 Yb:YAG 晶体 (10 mm × 12 mm × 1 mm), 晶体对泵浦光的吸收率实测约为 70%, 紫铜热沉尺寸与仿真中的相同 (20 mm × 24 mm × 2 mm), 室温与冷却水温度为 25 °C, 钢层厚度约为 0.1 mm, 双端泵浦光源采用波长 940 nm、400 W、带宽 2 nm 的巴条激光器, 泵浦光经过整形系统照射到晶体端面时双端功率分别为 353 W 和 362 W, 尺寸分别为 12.09 mm × 0.21 mm 和 12.04 mm × 0.25 mm。将晶体、钢层与热沉进行贴合, 因晶体上下两个大面的光滑程度对散热效果影响不大, 所以并未对晶体上下两个大面进行抛光处理。晶体温度分布达到稳态后, 利用红外热成像仪测得晶体端面最高温度为 65.4 °C, 位于端面中心附近, 与仿真得到的 65.6 °C 较为吻合。此外, 实验实测晶体表面最高温度和仿真所得晶体最高温与左右两端泵浦总功

率的关系如图 3 所示。图 3 插图显示了泵浦功率 390 W 时晶体表面实测最高温值。可见实验与仿真结果较为一致。

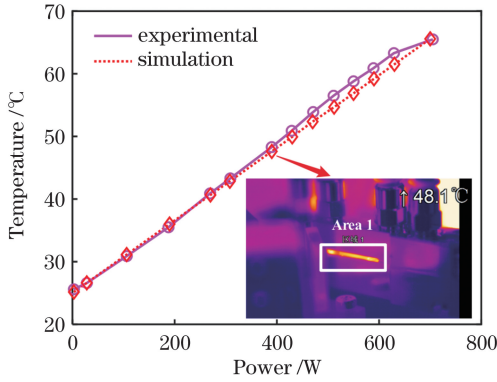


图 3 晶体最高温与泵浦功率关系

Fig. 3 Relationship between maximum temperature of crystal and pump power

图 4(a)为晶体内部在  $Y=0, Z=1/5, 1/3, 1/2$  mm 处沿  $X$  方向的温度分布图;图 4(b)为在  $X=0, Z=1/5, 1/3, 1/2$  mm 处沿  $Y$  方向的温度分布图;图 4(c)为在  $X=0, Y=0, -4.5, -6$  mm 处沿  $Z$  方向的温度分布。

泵浦光从晶体端面入射时光强最强,此时晶体对泵浦光吸收的量相对于  $X$  方向上其他位置来说是最大的。随着泵浦光被晶体吸收,入射到晶体内部的光强逐步降低,故如图 4(a)所示,在  $X$  方向上温度呈现出两边高、中间低的分布,在晶体中心层区域相较于上下两侧区域温度凹陷更为明显。如图 4(b)所示, $Y$  方向上的温度分布出现两边低、中间高的分布。从图 4(c)可以看出,在  $Z$  方向上的温度分布也呈现出两边低、中间高的分布且温度梯度较大,从晶体中心位置到边缘位置的温度值整体逐步降低。

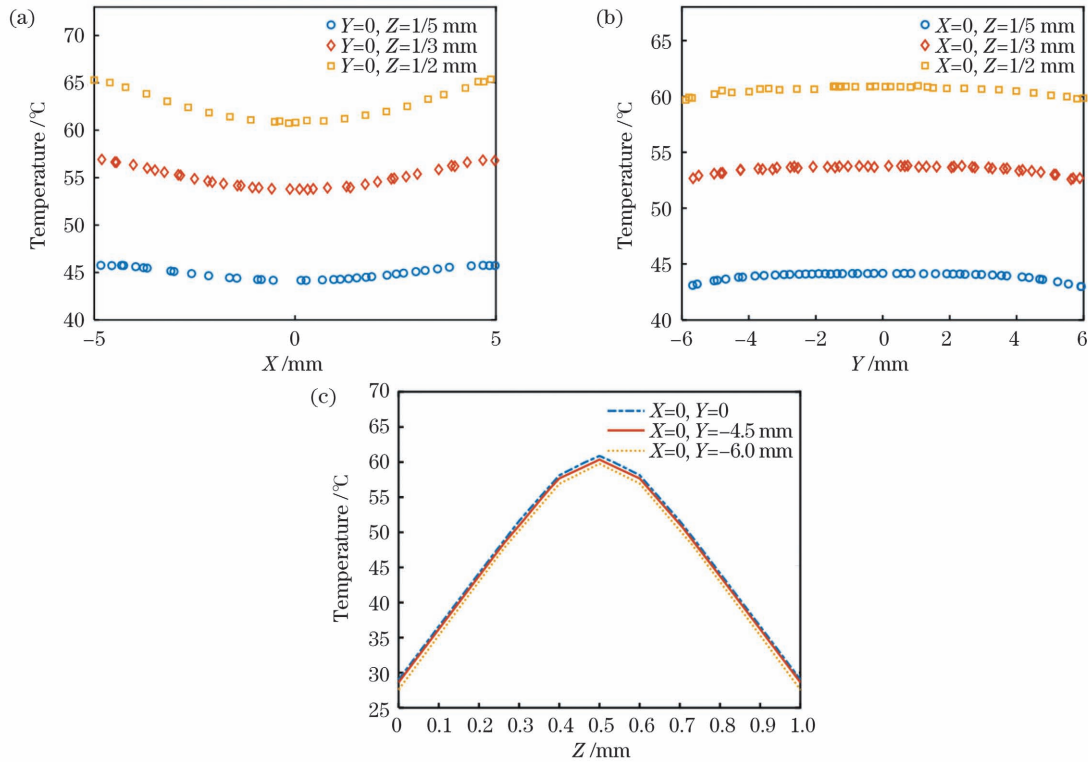


图 4 晶体温度分布。(a)  $X$  方向温度分布;(b)  $Y$  方向温度分布;(c)  $Z$  方向温度分布

Fig. 4 Temperature distribution of crystal. (a) Temperature distribution in  $X$  direction; (b) temperature distribution in  $Y$  direction; (c) temperature distribution in  $Z$  direction

### 3.2 钢层缺陷尺寸对温度分布的影响

上文阐述了钢层中不含缺陷时晶体内部温度的分布特征,同时定性分析了形成此特征的原因。下面说明在钢层中存在缺陷的情况下,缺陷尺寸对晶体内部  $X, Y, Z$  方向上温度分布的影响。在实际钢层中,当缺陷较小时可近似认为缺陷形状是圆形。假设钢层中缺陷形状为圆形,位置如图 5(a)所示,位于钢层上表面中心处,厚度为  $0.8l_3$ 。因泵浦光主要集中在晶体中间区域,故在下文的温度分析过程中主要分析晶体中间区域的温度分布。在  $X$  方向上对沿直线( $Y=0, Z$

$=0.5$  mm)的温度分布进行分析,在  $Y$  方向上对沿直线( $X=0, Z=0.5$  mm)的温度分布进行分析,在  $Z$  方向上对沿直线( $X=0, Y=0$ )的温度分布进行分析。不同缺陷半径条件下晶体内部  $X, Y, Z$  方向上的温度分布如图 5(b)~图 5(d)所示。

如图 5(b)所示,在缺陷所在位置温度出现了明显上升。随着缺陷尺寸增大,温度在缺陷中心处凸起程度逐步增大且温度峰的底座也越来越宽。值得注意的是,当缺陷半径  $r=0.65$  mm 时,晶体  $X$  方向的最高温点由晶体端面处转移到晶体内部的缺陷中心附近。

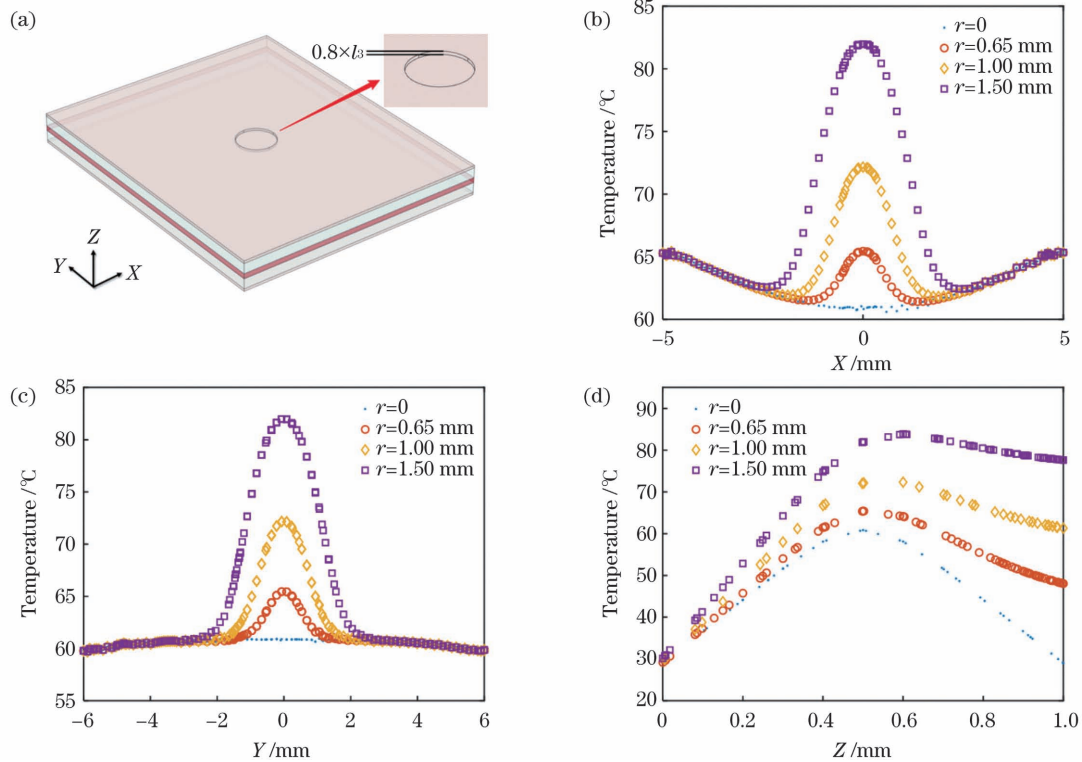


图 5 缺陷尺寸对晶体温度分布的影响。(a)含缺陷钢层晶体示意图;(b)~(d)不同尺寸缺陷中心处 X、Y、Z 方向温度分布  
Fig. 5 Influence of defect size on crystal temperature distribution. (a) Schematic of defective indium layer and crystal; (b)~(d) temperature distributions in X, Y, and Z directions at defect center with different defect sizes

图 5(c)表明,缺陷尺寸对 Y 方向上温度分布的影响类似于 X 方向:在缺陷中间位置,随着缺陷尺寸增大,温度升高越来越明显。Z 方向温度分布如图 5(d)所示。由图 5(d)可知,随着缺陷尺寸增大,晶体中心处温度整体升高,靠近上表面处温度升高尤为明显,而下表面处温度变化不明显。由以上结果可知,缺陷在上表面的出现阻碍了废热从晶体上表面的有效排出,使得缺陷附近区域温度升高,且缺陷尺寸越大,温度增量和升温范围越大。可见,钢层缺陷尺寸对晶体温度分布的影响是较为显著的。

### 3.3 钢层缺陷位置对 X 方向温度分布的影响

图 6 展示了  $r = 0.75 \text{ mm}$  的缺陷中心分别在  $(0, 0, 1.1 \text{ mm})$ 、 $(-1.5 \text{ mm}, 0, 1.1 \text{ mm})$ 、 $(-3 \text{ mm}, 0, 1.1 \text{ mm})$ 、 $(-4.5 \text{ mm}, 0, 1.1 \text{ mm})$  处时晶体内部温度在 X 方向的分布。通过计算可知,在缺陷中心处因缺陷所产生的温度增量分别为 6.3、6.5、6.8、11.5 K。当缺陷处于晶体内部时,缺陷的位置对温度增量的影响较小,在靠近 X 方向高温区(即晶体端面处)时,温度增量明显加大。可见,缺陷所处的位置对晶体温度分布存在较大的影响。

图 7 展示了钢层中同时存在两个半径  $r = 0.75 \text{ mm}$  的缺陷、两缺陷相距不同距离,以及仅存在单个缺陷、该缺陷位于不同位置时晶体 X 方向温度分布。两个缺陷的情况,其中一个缺陷中心固定在  $(0, 0, 1.1 \text{ mm})$  处,另一个则分别在  $(-1 \text{ mm}, 0, 1.1 \text{ mm})$ 、 $(-3 \text{ mm}, 0, 1.1 \text{ mm})$  和  $(-4 \text{ mm}, 0, 1.1 \text{ mm})$  处,

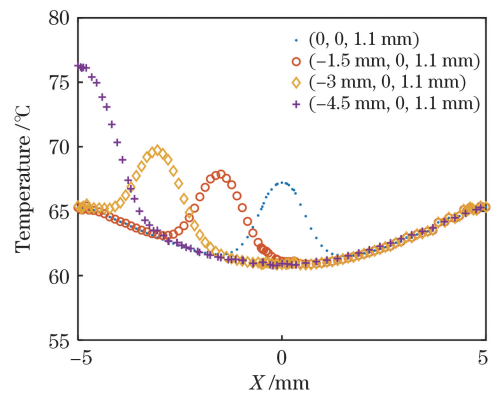


图 6 半径  $r = 0.75 \text{ mm}$  的缺陷单独分布在  $(0, 0, 1.1 \text{ mm})$ 、 $(-1.5 \text{ mm}, 0, 1.1 \text{ mm})$ 、 $(-3 \text{ mm}, 0, 1.1 \text{ mm})$  与  $(-4.5 \text{ mm}, 0, 1.1 \text{ mm})$  处时 X 方向温度分布  
Fig. 6 Temperature distribution in X direction when defect with radius  $r = 0.75 \text{ mm}$  is separately distributed at  $(0, 0, 1.1 \text{ mm})$ ,  $(-1.5 \text{ mm}, 0, 1.1 \text{ mm})$ ,  $(-3 \text{ mm}, 0, 1.1 \text{ mm})$  and  $(-4.5 \text{ mm}, 0, 1.1 \text{ mm})$

对应相距 1 mm、3 mm 和 4 mm 等 3 种情形;单个缺陷的情况,分别研究了缺陷位于  $(0, 0, 1.1 \text{ mm})$ 、 $(-1 \text{ mm}, 0, 1.1 \text{ mm})$ 、 $(-3 \text{ mm}, 0, 1.1 \text{ mm})$  和  $(-4 \text{ mm}, 0, 1.1 \text{ mm})$  处等 4 种情形。从图 8 可见,当在  $(0, 0, 1.1 \text{ mm})$  与  $(-3 \text{ mm}, 0, 1.1 \text{ mm})$  处以及  $(0, 0, 1.1 \text{ mm})$  与  $(-4 \text{ mm}, 0, 1.1 \text{ mm})$  处同时存在两个缺陷时,温度分布的左峰分别与在  $(-3 \text{ mm}, 0, 1.1 \text{ mm})$  处和  $(-4 \text{ mm}, 0, 1.1 \text{ mm})$  处单独存在缺陷时的分布基本重合,右峰与  $(0, 0, 1.1 \text{ mm})$  处单独存

在缺陷时的分布基本重合。但在  $(0, 0, 1.1 \text{ mm})$  与  $(-1 \text{ mm}, 0, 1.1 \text{ mm})$  处同时存在缺陷时, 两个峰交合为一个底座更宽、峰值更高的峰, 与  $(-1 \text{ mm}, 0, 1.1 \text{ mm})$  处单独存在缺陷时的温度分布不再重合。由此可见, 当钢层中存在多个缺陷但相距较远时, 每个缺陷对晶体温度的影响是相互独立的。

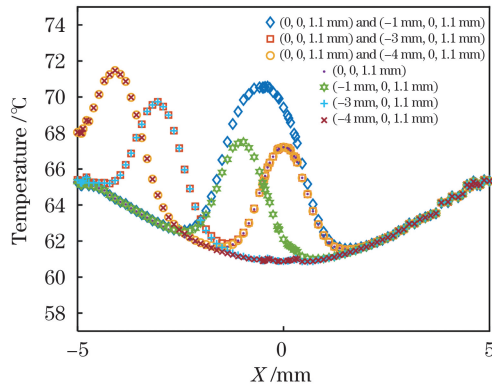


图 7 两个相距 1 mm、3 mm 和 4 mm 的缺陷与不同位置处的单个缺陷对温度分布的影响

Fig. 7 Influence of two defects with distances of 1 mm, 3 mm and 4 mm on temperature distribution and their separate influence

我们又进一步研究了缺陷间距较近时对晶体散热产生的耦合作用。图 8 中有两种数据点, 其中菱形数据点表示钢层中同时存在两个相距 1 mm 的缺陷 [两缺陷中心位置分别为  $(0, 0, 1.1 \text{ mm})$  和  $(-1 \text{ mm}, 0, 1.1 \text{ mm})$ ] 对晶体 X 方向温度分布的影响, 圆形数据点则表示在  $(0, 0, 1.1 \text{ mm})$  和  $(-1 \text{ mm}, 0, 1.1 \text{ mm})$  处分别单独存在一个缺陷对晶体 X 方向温度分布影响的简单数值叠加。由图 8 可见, 两个缺陷同时存在且相距 1 mm 时, 它们对晶体温度的影响比两个单独缺陷对晶体温度分布影响的叠加效果更显著。

由以上分析可知, 当钢层中存在多个缺陷时, 缺陷

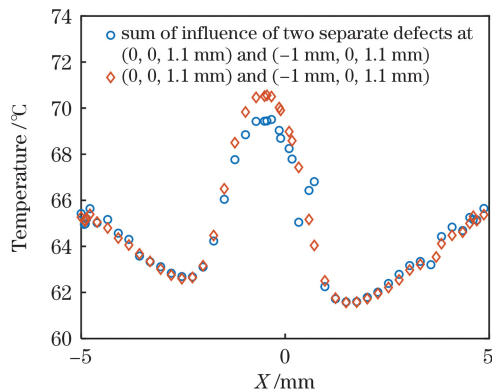


图 8 相距 1 mm 的两缺陷对晶体 X 方向温度分布的影响以及两缺陷单独作用时对晶体 X 方向温度分布影响的简单数值叠加

Fig. 8 Influence of two defects with distance of 1 mm on temperature distribution in X direction and sum of influence on temperature distribution in X direction when two defects act independently

之间的距离会对晶体温度分布产生影响。当缺陷距离较近时, 它们对晶体散热的影响产生耦合, 使得缺陷对晶体的影响变得更加显著, 温度分布更不均匀。

## 4 结 论

本文利用稳态条件下的热传导方程, 通过建立激光晶体热源分布模型并在钢层中引入缺陷, 模拟了晶体在焊接钢层理想和有缺陷状态下的温度分布, 其中理想钢层状态下经模拟得到的晶体表面最高温与实验测得的结果较为一致。对温度分布特点和成因进行了定性分析。同时, 针对缺陷尺寸对晶体 X、Y、Z 方向温度分布的影响, 以及不同位置与不同间距的缺陷对晶体 X 方向温度分布的影响进行了定量分析。结果表明: (1) 缺陷的尺寸对晶体温度分布存在影响, 缺陷的存在阻碍了废热的有效排出, 使得缺陷附近区域温度升高; 缺陷尺寸越大, 温度增量和升温区域范围越大, 且当缺陷尺寸大于 0.65 mm 时, 晶体 X 方向的最高温点由晶体端面处转移到晶体内部缺陷中心附近。(2) 缺陷所处的位置对晶体温度分布存在影响, 缺陷在温度较高的区域时对晶体温度分布影响更大。(3) 缺陷之间的距离对晶体温度分布存在影响, 两缺陷相距较远时, 每个缺陷对晶体温度的影响是相互独立的, 当缺陷距离较近时, 它们对晶体散热的影响产生耦合, 使得缺陷对晶体的影响变得显著。本文工作可帮助实验人员得知何种情况下须考虑钢层缺陷对实验的影响, 对激光器的设计和实验的进行有着现实的指导意义。

## 参 考 文 献

- [1] Shi S P, Wang Y J, Yang W H, et al. Detection and perfect fitting of 132 dB squeezed vacuum states by considering green-light-induced infrared absorption[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(21): 5411-5414.
- [2] 连天虹, 杨磊, 朱家华, 等. 高峰值功率声光调 Q 厄米-高斯模固体激光器[J]. *光学学报*, 2022, 42(7): 0714001. Lian T H, Yang L, Zhu J H, et al. High-peak-power acoustic-optic Q-switched solid-state laser with Hermite-Gaussian modes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(7): 0714001.
- [3] Kleeman M, Unyime O, Nseyo M D. High-power (80-W) KTP laser vaporization of the prostate in the management of urinary retention: long-term follow up[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5312: 82-86.
- [4] 周寿桓, 赵鸿, 唐小军. 高平均功率全固态激光器[J]. *中国激光*, 2009, 36(7): 1605-1618. Zhou S H, Zhao H, Tang X J. High average power laser diode pumped solid-state laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(7): 1605-1618.
- [5] Du K, Wu N, Xu J, et al. Partially end-pumped Nd:YAG slab laser with a hybrid resonator[J]. *Optics Letters*, 1998, 23(5): 370-372.
- [6] 李密, 胡浩, 高清松, 等. 高功率双浓度掺杂的 Nd:YAG 复合陶瓷板条激光器[J]. *光学学报*, 2017, 37(5): 0514003. Li M, Hu H, Gao Q S, et al. Dual concentration doped Nd:YAG composite ceramic slab laser with high power[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(5): 0514003.
- [7] Meeseki K, Windeler M K R, Robinson J S, et al. Thermal effects in a high repetition rate 88 W average power OPCPA system at 800 nm[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10898:

- 108980M.
- [8] 李密, 胡浩, 唐淳, 等. 高功率双掺杂浓度板条激光技术研究[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0914004.
- Li M, Hu H, Tang C, et al. Research on high power slab laser technology with dual doped concentration [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0914004.
- [9] Russbuedt P, Weitenberg J, Schulte J, et al. Scalable 30 fs laser source with 530 W average power [J]. Optics Letters, 2019, 44(21): 5222-5225.
- [10] 朱协彬, 段学臣. 钢的应用现状及发展前景[J]. 稀有金属与硬质合金, 2008, 36(1): 51-55.
- Zhu X B, Duan X C. The present application and future development of indium [J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2008, 36(1): 51-55.
- [11] Koechner W. Solid-state laser engineering [M]. Beijing: World Publishing Corporation, 2005.
- [12] Fan T Y. Heat generation in Nd:YAG and Yb:YAG [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1993, 29(6): 1457-1459.
- [13] Kimura T, Otsuka K. Thermal effects of a continuously pumped Nd<sup>3+</sup>:YAG laser [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1971, 7(8): 403-407.
- [14] 丁晓尘, 张普, 熊玲玲, 等. 大功率半导体激光器贴片层空洞热效应影响[J]. 中国激光, 2011, 38(9): 0902006.
- Ding X C, Zhang P, Xiong L L, et al. Thermal reaction of high power semiconductor laser with voids in solder layer [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(9): 0902006.
- [15] 董雪岩, 李平雪, 李舜, 等. 高光束质量高重复频率光纤-固体混合皮秒 Innoslab 放大器 [J]. 中国激光, 2021, 48(17): 1701004.
- Dong X Y, Li P X, Li S, et al. High beam quality fiber-solid hybrid Innoslab picosecond amplifier with high repetition rate [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(17): 1701004.
- [16] Ma Z, Li D J, Gao J C, et al. Thermal effects of the diode end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> slab [J]. Optics Communications, 2007, 275(1): 179-185.
- [17] Russbuedt P, Mans T, Rotarius G, et al. 400 W Yb:YAG Innoslab fs-amplifier [J]. Optics Express, 2009, 17(15): 12230-12245.
- [18] 石顺祥, 张海兴, 刘劲松. 物理光学与应用光学 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000.
- Shi S X, Zhang H X, Liu J S. Physical optics and applied optics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2000.
- [19] 毛叶飞. LD 端面泵浦 Innoslab 激光技术研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2017: 7-8.
- Mao Y F. LD end-pumped Innoslab laser [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017: 7-8.

## Influence of Indium Layer Defects on Temperature Distribution of Innoslab Laser Crystal

Huang Yuguang<sup>1,2</sup>, Gao Yongxi<sup>1,2</sup>, Guo Jie<sup>1</sup>, Liang Xiaoyan<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup> Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

### Abstract

**Objective** Benefiting from their unique structures, Innoslab lasers have achieved high power and high beam quality output. However, there is still a lot of harmful heat in the laser crystal under the high-power pumping. To obtain an amplification output with high beam quality, the heat in the laser crystal during the laser amplification process must be effectively removed. An indium layer is added between the laser crystal and the heat sink before amplification. During this process, defects such as voids are inevitably introduced, which will inhibit the heat dissipation. Heat is accumulated in the crystal because of defects in the indium layer, resulting in wavefront distortion that leads to poor beam quality and even the crystal fracture due to inhomogeneous thermal stress distribution. Therefore, it is necessary to analyze the effects of defects characteristics on the temperature distribution inside the crystal. In this paper, the influences of the sizes and positions of the indium layer defects and the distance between two adjacent defects on the crystal temperature distribution are quantitatively investigated.

**Methods** In this paper, the effects of the sizes and positions of the indium layer defects and distance between two adjacent defects on the crystal temperature distribution are studied by the finite element method using the COMSOL software. Firstly, the heat source distribution model is obtained based on the distribution of pump light and the absorption characteristics of the crystal, and the temperature distribution inside the crystal is got through the steady-state heat conduction equation. After that, the temperature distribution of the crystal without defects in the indium layer is obtained. Then, circular defects with different sizes, positions and spacings are introduced into the ideal indium layer to obtain the temperature distribution of the laser crystal with defects in the indium layer. The influences of indium layer defects on crystal temperature distribution are obtained by comparing the temperature distribution of the crystal without and with defects in the indium layer.

**Results and Discussions** The temperature of the crystal in the pumping direction is low in the middle and high at the sides of the crystal without defects in the indium layer, and the highest temperature point of the crystal is near the incident surface of the pump light on the crystal. With a defect inside the indium layer, the temperature rises at the

position where the defect is located. As the defect size is increased, the temperature increment value increases, and the highest temperature point shifts from the incident surface of the pump light to the location near the defect (Fig. 5). The effects of the defect on the temperature distribution of the crystal with the defect above the high-temperature region of the crystal are more significant than those of the defect above the low-temperature region (Fig. 6). The influences of two adjacent defects on the crystal temperature distribution are coupled when the distance between the two defects is small, resulting in more significant effects of the defects on the crystal (Figs. 7 and 8).

**Conclusions** In this paper, the temperature distribution of crystal with and without defects in the indium layer is simulated, and the distribution characteristics are qualitatively analyzed using the heat conduction equation under steady-state conditions by establishing the heat source distribution model of laser crystal and introducing defects into the indium layer. The highest temperature of the crystal surface obtained by simulation without defects in the indium layer is relatively consistent with the experimental results. At the same time, the influences of the defect size on the temperature distribution in the  $X$ ,  $Y$  and  $Z$  directions of the crystal, and the influences of the defect positions and the distance between two adjacent defects on the temperature distribution in the  $X$  direction of the crystal are quantitatively analyzed. It is found that the larger the defect size is, the larger the temperature increment value and temperature rise area caused by the defect are, and the highest temperature point in the  $X$  direction of the crystal shifts from the crystal end face to the location near the center of the defect when the defect size is larger than 0.65 mm. The influences of the defect in the high-temperature region on the crystal temperature distribution are more significant than those of the defect in the low-temperature region. The effects of two defects that are far apart on the crystal temperature distribution are independent of each other. However, when the defects are close to each other, their effects on the heat dissipation of the crystal are coupled, resulting in more significant effects of the defects on the crystal temperature distribution. The work in this paper is useful in deciding whether or not to consider the influences of indium layer defects on the experiment during the laser design and laser crystal installation, which is of guiding significance for laser design and experiments.

**Key words** lasers; laser crystal; Innoslab; thermal effect; numerical simulation; indium layer; temperature field