

文章编号: 1001-3806(2003)06-0541-03

## 位相扰动下“热像”规律研究\*

王 逍<sup>1,2</sup> 景 峰<sup>1</sup> 朱启华<sup>1</sup> 张清泉<sup>1</sup> 彭志涛<sup>1</sup> 谢良平<sup>1</sup> 粟敬钦<sup>1</sup> 陈建国<sup>2</sup>  
(<sup>1</sup>中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳, 621900) (<sup>2</sup>四川大学光电系, 成都, 610064)

**摘要:** 研究了具有位相扰动的激光束经过非线性介质后的传输情况, 用数值模拟的方法着重研究了入射光强(这里以能量来反映)、调制深度、调制宽度等与热像的关系。研究结果表明, 在某些条件下, 即通常所说的共轭像面处, 和振幅调制一样也可以看到明显的热像, 但很多情况下其它一些地方峰值很强(例如棒后  $d_0/2$  处), 成为最值得关注的位置。光束演化(光场分布)对位相调制的深度反应较为敏感, 某些深度的调制会有更大的危害性。另外, 调制宽度、入射光强等对热像形成也有一定的影响。

**关键词:** 光学; 热像; 数值模拟; 非线性效应; 位相调制; 位相扰动

**中图分类号:** O437 **文献标识码:** A

### Phase perturbation induced “hot image” and its variation

Wang Xiao<sup>1,2</sup>, Jing Feng<sup>1</sup>, Zhu Qihua<sup>1</sup>, Zhang Qingquan<sup>1</sup>,  
Peng Zhitao<sup>1</sup>, Xie Liangping<sup>1</sup>, Su Jingqin<sup>1</sup>, Chen Jianguo<sup>2</sup>  
(<sup>1</sup>Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang, 621900)  
(<sup>2</sup>Department of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu, 610064)

**Abstract:** Numerical simulation has been carried out to study the evolution of perturbed laser beam after passing through a piece of nonlinear medium. The variation of “hot image” with incident beam energy, modulation depth and modulation width have been studied. It has been concluded that: in some conditions, there can be a “hot image” at the ordinarily called “conjugated plane”, but in other conditions, peak fluency density is very high at some places other than “conjugated plane”. Phase modulation depth can deeply influence the evolution of the laser beam, and some kind of depth may induce more serious damage than others. In addition, modulation width and incident beam energy will also influence the distribution of the field.

**Key words:** optics; hot image; numerical simulation; nonlinear effect; phase modulation; phase perturbation

## 引 言

美国加州大学的利弗莫尔实验室(LLNL)在研究高功率固体激光系统时提出了“热像”的概念。简单地描述如下: 当光路中存在遮光点(或光学元件缺陷)时, 会引起光束的衍射, 衍射光与主光束叠加, 经非线性介质传输后, 光束中的能量分布会发生变化, 在后面光路中的某处将形成高强度亮斑(比原来主光束强度高得多)。对照全息成像过程<sup>[1]</sup>, 可看到两者有许多相似点, 故该亮斑可看作遮光点或缺陷的一个像点。由于它对激光系统的损害很大, 而且往往会在名义上“安全”的光强下出其不意地损伤昂贵

的光学元件, 故引起了人们极大的关注。前人重点对不透明物体(振幅调制)形成的“热像”规律进行了研究<sup>[2]</sup>, 得到了热像处光场强度的近似表达式。事实上, 位相扰动可能具有更大的危害性, 本文中着重研究了位相扰动下热像出现情况, 用数值模拟的方法研究了入射光强(这里以能量来反映)、调制深度、调制宽度等对热像形成的影响。

## 1 计算模型及计算参数

图1是计算时的参照图, 入射光由左向右传输, 经过一个位相屏(调制平面)后再穿过非线性介质棒。位相屏置于棒前  $d_0$  处, 为了便于计算, 假定调制为“细条状”, 即位相在这里发生了阶跃。为了考察光束的演化情况, 将计算棒前棒后许多位置处的光场分布(图中只在介质棒后画了一个计算面)。

\* 中国工程物理研究院行业科学技术预先研究基金及国家高技术惯性约束聚变领域资助项目。

作者简介: 王 逍, 女, 1970年6月出生。硕士。从事非线性光学方面的研究。

收稿日期: 2003-01-25; 收到修改稿日期: 2003-03-18

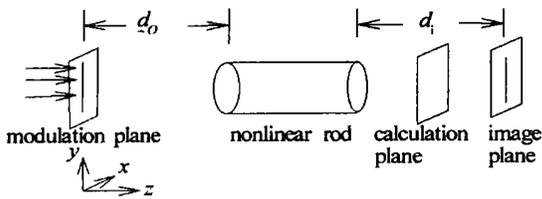


Fig. 1 Schematic graph for simulation

另外,将调制平面处光束的中心点设为坐标原点,主光束传播方向为  $z$  轴(即光轴),调制条延伸的方向为  $y$  轴,垂直于调制条的方向为  $x$  轴,并将介质输出端至像面的距离称为像距  $d_i$ ,另将光束紧贴位相屏前的初始位相定为 0。

光束在非线性介质中的传输用如下的非线性近轴波方程来描述<sup>[3]</sup>:

$$\nabla_{\perp}^2 A + 2ik \frac{\partial A}{\partial z} = -2k^2 \frac{\delta n}{n_0} A - ik\alpha \quad (2)$$

式中,  $A$  表示光场复振幅,  $k$  表示波数,  $\alpha$  是介质的损耗系数,  $n_0$  是介质的线性折射率,  $\delta n$  表示光强引起的折射率变化,并有关系式:  $\delta n = n_2 |A|^2$ ,  $n_2$  为非线性折射系数。等式左边第 1 项表示衍射,第 2 项表示光束沿  $z$  轴传输,等式右边第 1 项表示非线性效应,第 2 项表示损耗(当等式右边为 0 时则描述光在自由空间的传输)。计算中采用分步傅里叶变换数值求解<sup>[4]</sup>,使用的是九院研究中心自行开发的光传输程序,在没有特别声明的情况下各计算参数如下:光束能量为 2J,四阶超高斯圆截面光束,口径为 1cm,波长为 1054 nm,脉宽为 0.67ns 时间波形为矩形,调制平面距介质输入端的距离  $d_0 = 100\text{cm}$ ,介质棒长度为 20cm,直径为 2cm,线性折射率  $n_0 =$

1.528,非线性折射系数  $n_2 = 1.15 \times 10^{-13} \text{esu}$ ,吸收系数为  $0.004 \text{cm}^{-1}$ ,透射率为 0.995,调制条宽度为  $313\mu\text{m}$ ,调制深度为  $\pi/2 \text{rad}$ 。初始位相调制示意图见图 2。其中,调制宽度是指调制条的实际宽度,

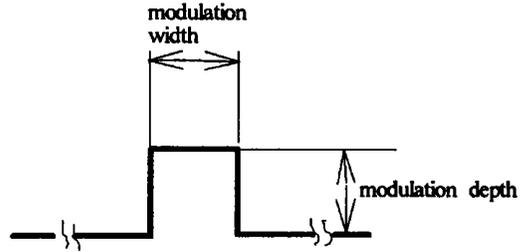


Fig. 2 Phase modulation

而调制深度则指在调制条处位相落后或超前的值。下面将分别讨论不同的入射光强(这里以能量来反映)、调制深度、调制宽度下热像形成情况。

## 2 计算结果及分析

图 3a,图 3b 分别列出有介质棒和无介质棒光束的演化情况,从图中可以看到,当不存在非线性介质棒时(简单的自由空间传输情形),在调制平面后几个厘米的距离内轴上光强便达到最大值(约为初始值的两倍多),之后轴上光强持续下降,两边条纹的亮度在达到一个较大的值之后,也逐渐下降,由于衍射的作用,条纹不断地变粗变稀。加入了介质棒以后,情况则很不相同,在棒后 100cm 的地方(即  $z = 220\text{cm}$  处),中心出现一个很亮的条纹,轴上能流密度达到输入光束平均值的 7 倍多,此处即为通常所认为的热像面。

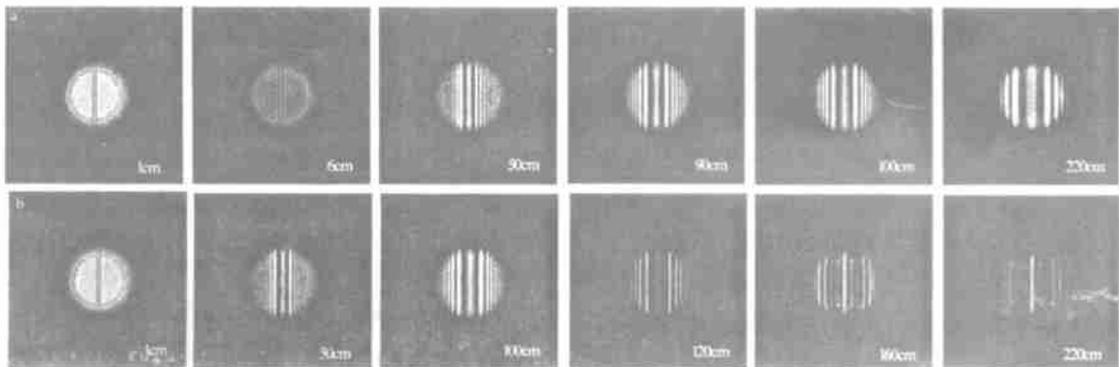


Fig. 3 a—field patterns at different position without a medium rod b—field patterns at different position with a medium rod

### 2.1 不同的调制宽度下热像出现情况

图 4 画出了调制宽度不同的情况下,轴上能流密度及最大能流密度随传播距离的变化(这里的最大能流密度是指光束横截面上最亮条纹中心的能流密度)。从图中可以看到,调制宽度较窄时,热像强度较高(细丝宽度为  $156\mu\text{m}$  时,热像处能流密度达

到  $35\text{J}/\text{cm}^2$ )。但从物理意义上讲,细丝细到一定程度时对光束的影响将会减弱,这个范围如何确定,恐怕尚需作进一步的研究。其它几个宽度下热像不太容易观察,因为相比而言,在通常所说的共轭像面处<sup>[1]</sup>( $d_i = d_0$ )中心条纹并不是很亮。调制宽度为  $313\mu\text{m}$  时,在 170cm(即距棒输出端 50cm,也就是棒

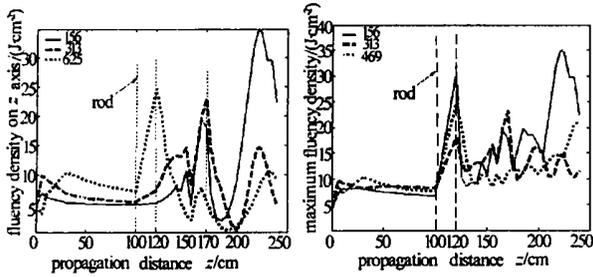


Fig. 4 Fluency density on axis(left) and maximum fluency density(right) at different position(z) for different modulation widths

后  $d_0/2$  处轴上能流密度很高, 该值甚至超过了通常所说的共轭像面处的值, 同时也超过了介质出口端最亮条纹处的值。所以, 由此可知, 不仅共轭像面处值得关注, 其它一些地方也不容忽视。

### 2.2 不同的调制深度下热像出现情况

图5、图6显示了不同的调制深度下轴上能流密度及最大能流密度随传播距离的变化。可以看

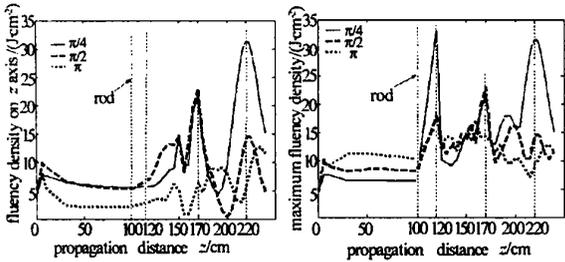


Fig. 5 Fluency density on axis(left) and maximum fluency density(right) at different position(z) for different modulation depths(positive)

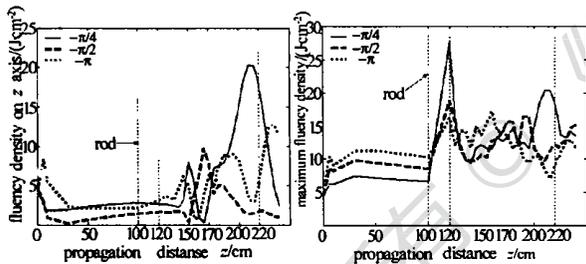


Fig. 6 Fluency density on axis(left) and maximum fluency density(right) at different position(z) for different modulation depths(negative)

到, 调制深度对热像出现与否、出现的位置以及热像强度的大小均有影响, 几个值相比较,  $\pm\pi/4$  时热像最明显, 而且出现在通常所说的共轭像面处( $-\pi/4$  时有点偏离);  $\pi/2$  时在棒后  $d_0/2$  处出现最大值, 这在前面已经提到过。  $-\pi$  和  $\pi$  相差  $2\pi$ , 两种调制下光束演化是完全相同的, 即不管是位相延迟还是位相滞后(可分别对应于高折射率杂质和低折射率杂质), 如果调制深度相差  $2\pi$  的整数倍, 对光场分布的影响是相同的。还应注意到,  $\pm\pi/4$  时, 介质中会产生较大的峰值能流密度, 这对介质棒是很不利的。总之, 从上面的计算可以看出, 光场分布对位相调制的深度反应较为敏感, 又具有周期性, 有必要对它作

进一步的研究, 从理论上解析地寻找其规律及关系。

### 2.3 输入光能量对热像形成的影响

图7表示了不同的输入光能量下轴上能流密度及最大能流密度随传播距离的变化, 可以看到, 随着

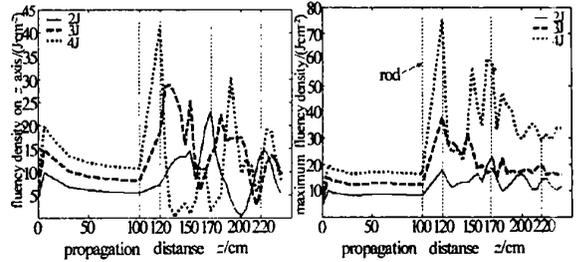


Fig. 7 Fluency density on axis(left) and maximum fluency density(right) at different position(z) for different incident beam energy

输入光能量的增加, 棒内棒外的最大能流密度均有大幅度增长, 另外, 计算时调制宽度取  $313\mu\text{m}$ , 调制深度为  $\pi/2$ , 图中看不到规律性的热像形成现象, 在许多地方中心以外的亮条纹强度很高, 许多峰值并不是出现在通常所认为的共轭像面处。能量  $4\text{J}$  时, 介质内最亮条纹处的能流密度达到了  $75\text{J}/\text{cm}^2$  以上(相当于  $11\text{GW}/\text{cm}^2$ ), 棒后  $d_0/2$  处也达到了  $60\text{J}/\text{cm}^2$ , 这种情况下为了防止介质棒受损, 应当降低输入光强。

### 3 结 论

可以看到, 位相调制和振幅调制对光束的影响不太一样。在某些条件下, 在通常所说的共轭像面处, 和振幅调制一样也可以看到明显的热像, 但很多情况下其它一些地方峰值很强(例如棒后  $d_0/2$  处), 成为最值得关注的位置。当然, 苏显渝等人是在一些近似条件下(例如, 非线性介质片很薄等)得到了共轭像面及热像光强等结论<sup>[1]</sup>, 该结论是否合理有效, 还有待多方面验证。从前述的计算还可以得出以下一些结论: (1) 光束演化(光场分布)对位相调制的深度反应较为敏感, 某些深度的调制会有更大的危害性; (2) 调制宽度、输入光强度等对热像形成也有一定的影响。

实际中的缺陷往往会对光束同时产生振幅和位相调制, 即便在某些情形下可以近似地看成初始只具有位相调制, 其形状也不会很规则, 做一些简单的假定和近似只是为了计算简便, 寻找规律性。要真实地反映实际情况, 还需要做许多认真细致的工作。

(下转第 576 页)

作灵活性降低。

减小熔覆体积的对策是在模具(芯盒)的工作面的背部形成空腔。如图 6 所示,图左为无空腔的

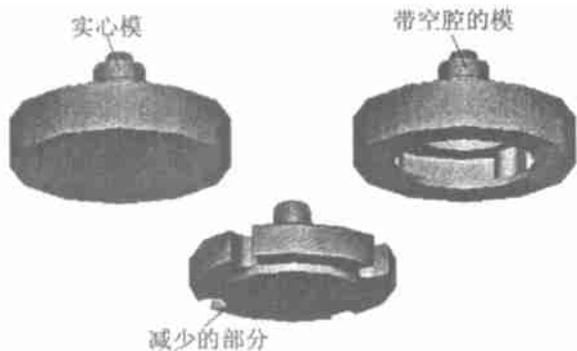


图 6 实心铸件模和带空腔的铸件模

铸件模,图右为后背部带空腔的铸件模。可以看出,带空腔的铸件模的体积大大减小。不过,空腔会导致铸件模中存在悬空部位,不易熔覆成型。这个问题也有一些解决办法,例如, Kruth<sup>[11]</sup>和 Hensing<sup>[16]</sup>分别采用 5 轴熔覆机床和机械手, Fessler<sup>[12]</sup>采用铜做支撑,成型后蚀除(该方法只能减轻模重,不能降低成本)。而且因为空腔在铸件模的后背部,其制造精度不重要。当然,要彻底解决这个问题,必须有先进的机电控制、图形信息技术等基础,要求较高的机床精度和性能,对材料的理化性能及其与激光和其它物质作用的机理有深入的认识。

综上所述,实现激光熔覆成型砂型铸造金属模具的轻量化、低耗化,必须解决上述的一些问题,而这些问题解决有赖于各种相关技术,如光、机、电、信息、材料等技术的发展和综合应用。

## 4 结 论

(1) 激光熔覆成型技术在制造成本、工期和制件结构、性能等方面具有不少优点,但这种技术在制造悬臂构件和成型精度等方面有待于继续改进。

(2) 砂型铸造金属模具无悬臂结构、有拔模斜度、采用圆弧过渡等结构特点和受型砂冲刷、磨擦的工作条件能够使激光熔覆成型技术发挥优点、避开缺点,从而使这种模具适合用激光熔覆成型技术直接制造。

(3) 随着光、机、电和材料等相关技术的发展与综合应用,激光熔覆成型技术将逐步能够优质、高效地直接制造各种结构的轻金属模具,实现模具的轻量化、低耗化。

## 参 考 文 献

- [1] 颜永年,张人佶,单忠德 *et al.* 航空制造技术, 2002(4): 17~ 21, 30.
- [2] 张海鸥,徐继彭. 航空制造技术, 2002(4): 22~ 23, 66.
- [3] 黄树槐,张祥林,马 黎 *et al.* 中国机械工程, 1997, 8(5): 8~ 12.
- [4] Pham D T, Dimov S S. Journal of Mechanical Engineering Science, 2003, 217(1): 1~ 23.
- [5] Prinz F B, Weiss L E. Novel applications and implementations of shape deposition manufacturing. [http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/usr/lew/www/NRR/nrr\\_paper.html](http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/usr/lew/www/NRR/nrr_paper.html), 1998 03 25.
- [6] Hu Y P, Chun C W, Mukherjee K. Journal of Materials Science, 1998, 33: 1287~ 1292.
- [7] 焦向东,佟泽民,邓双城 *et al.* 制造技术与机床, 2000(7): 8~ 9.
- [8] Kahlen F J, Kar A. Transactions of the ASME, 2001, 123: 38~ 44.
- [9] Vasinonta A, Beuth J L, Griffith M L. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2001, 123: 615~ 622.
- [10] Atwood C, Griffith M, Harwell L *et al.* Laser engineered net shaping (LENS<sup>TM</sup>): a tool for direct fabrication of metal parts. [http://mfgshop.sandia.gov/1400\\_ext/icaleo98.pdf](http://mfgshop.sandia.gov/1400_ext/icaleo98.pdf), 2003 09 09.
- [11] Kruth J P, Leu M C, Nakagawa T. Annals of the CIRP, 1998, 47(2): 525~ 540.
- [12] Fessler J R, Merz R, Nickel A H *et al.* Laser deposition of metals for shape deposition manufacturing (SDM). <http://www.rpl.stanford.edu/files/papre/1996/sff1996a.pdf>, 2003 02 28.
- [13] 黄卫东,李延民,冯丽萍 *et al.* 材料工程, 2002(3): 40~ 43, 27.
- [14] 梅琼凤,吴志超,叶升平 *et al.* 特种铸造及有色合金, 2002(1): 10~ 11.
- [15] 钟敏林,宁国庆,刘文今. 激光技术, 2002, 26(5): 388~ 391.
- [16] Hensing D M, Ames A L. Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2000, 4: 3095~ 3100.

(上接第 543 页)

## 参 考 文 献

- [1] 苏显渝,李继陶. 信息光学. 北京: 科学出版社, 1999: 39~ 45.
- [2] Hunt J T, Manes K R, Renard P A. Appl Opt, 1993, 32(30): 5973~ 5982.
- [3] 景 峰,张小民,朱启华 *et al.* 强激光与粒子束, 2000, 12(5): 551~ 555.
- [4] Taha T R, Abblowitz M J. J Commun Phys, 1984, 55: 203~ 207.