

酱油的光学热透镜效应

陈清楠, 范紫萍, 高绮妮, 郭政鑫, 郑博为, 彭 力

(华南师范大学 物理与电信工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 本文设计了一种材料易得、适用于演示非线性光学现象的热透镜效应装置. 低功率激光经凸透镜汇聚, 在薄酱油介质中传输时产生热透镜效应, 利用刀口法测量和软件拟合计算出激光高斯光束的半径, 并结合光学矩阵运算得到酱油热透镜的焦距. 由酱油薄膜位于凸透镜焦点前后时高斯光斑大小的变化, 得出酱油介质在高斯光束照射下可等效为凹透镜, 讨论了酱油浓度、厚度对热透镜效应的影响. 本装置结构简单、性价比高, 可用于本科的实验教学演示.

关键词: 热透镜效应; 酱油介质; 刀口法; 浓度; 厚度

中图分类号: O 436.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-0712 (2020) 11-0080-06

【DOI】10.16854/j.cnki.1000-0712.200089

1964 年, Gordon 等人在氦氖激光器腔内插入“透明”样品时, 观察到激光光束的功率和发散角产生短暂变化, 发现了热透镜效应. 激光在介质中传输时, 会使其传输路径上的介质吸收热量而产生温度变化. 由于激光光束的能量分布一般为高斯型, 介质吸热引起的横向的温度梯度会导致介质折射率横向梯度的变化, 产生类似透镜的效果. 本文旨在研究 5 mW 低功率半导体激光器在酱油薄膜传输时引起的热透镜效应. 这是基于第二十届广东省大学生物理实验设计大赛基础题的相关研究设计, 研究的问题也与 2019 年国际青年物理学家竞赛 (IYPT) 的第 9 题类似. 前人对热透镜效应的研究大多集中于高功率激光器, 并且材料较难获得、制备难度高、制作工艺十分繁琐. 且本科阶段的实验教学通常侧重于线性光学领域, 非线性光学相关的实验较少, 导致学生对非线性光学理论的理解难度加大, 故有必要提供一种操作简单、现象明显的教学演示或实验, 提高学生对非线性光学效应的认识. 本文利用生活中易得的低功率激光器和酱油, 无需复杂的样品制备流程, 提出了一个简单、安全环保、性价比高的实验装置, 适用于本科的实验室教学.

1 理论分析

1.1 热透镜效应

激光穿过吸收介质时, 光束的电磁能量部分通

过非辐射弛豫过程转换为热量, 从而导致介质发热, 折射率发生变化. 变化过程可由下面式子表示

$$n(T+\Delta T) = n_0(T) + \frac{dn}{dT}\Delta T \quad (1)$$

其中 $\frac{dn}{dT}$ 是热光系数. 假设单位长度产生的热量与光强成正比, 且热通量仅为径向, 可说明 ΔT 取决于 r^2 , 导致介质产生径向对称性的温度梯度. 而在波前变换中, 若二次相因子变换的函数 $\tilde{t}$

$$\tilde{t} \approx e^{-ik_F^2} \quad (2)$$

作用在波前上, 即相当等效透镜的作用^[1].

在热光效应中, 介质等效热透镜焦距 f_{th} 与介质的热导率 κ , 光吸收系数 α , 激光功率 P_0 有关, 其表

$$f_{th} \propto \frac{n_0 \kappa w^2}{P_0 b \alpha (dn/dT)} \quad (3)$$

实验中使用的半导体激光器光强分布呈高斯型. 由于酱油介质 $\frac{dn}{dT} < 0$, 激光照射酱油后使其中心温度高, 四周温度低, 导致中间折射率小, 四周折射率大, 相当于凹透镜的作用.

当高斯光束经过样品时, 除了改变样品的折射率外, 光束的相位也会发生变化, 在出射时产生一个近似于高斯分布的横向附加相移:

$$\Delta\Psi(r) \approx \Delta\Psi_0 \exp\left[-\frac{2r^2}{w^2(z_1)}\right] \quad (4)$$

收稿日期: 2020-03-16; 修回日期: 2020-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(61975058); 广州市科技计划项目(201704020137); 蓝盾科技项目(LD20170209)资助

作者简介: 陈清楠(1999—), 女, 广东揭阳人, 华南师范大学物理与电信工程学院 2017 级本科生.

通信作者: 彭 力, E-mail: pengli27@126.com

其中 $\Delta\Psi_0$ 表示非线性介质对高斯光束产生的峰值非线性相移. 上式相当于在非线性介质薄膜内诱导了一个具有高斯分布的相位型微孔, 类似于光束通过标准圆孔产生衍射, 从而出现衍射环现象^[2].

1.2 热透镜等效焦距的测量

假设激光发射的高斯光束沿 z 轴传播, 光束横截面任一点到轴心的距离 r 的强度 $I(r)$ 满足

$$I(r) = I_0 e^{-\frac{r^2}{\omega^2}} \quad (5)$$

ω 为光束半径, 可由下式给出

$$\omega(z)^2 = \omega_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{2\pi\omega_0^2} \right)^2 \right] \quad (6)$$

其中 λ 为激光束波长, ω_0 为束腰半径.

为了描述高斯光束, 引入复曲率参量 q 和 q 的表达式为

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{R} - i \frac{\lambda}{\pi\omega^2} \quad (7)$$

当一束光通过一个由透镜组组成的光学系统时, 它进入光学系统时的复曲率参量 q_1 与传出光学系统时的复曲率参量 q_2 之间有如下关系

$$q_2 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D} \quad (8)$$

可改写为

$$\frac{1}{q_2} = \frac{D/q_1 + C}{B/q_1 + A} \quad (9)$$

其中 $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$ 是光束经过的光学系统的光学传递矩阵, 该矩阵表征了这个光学系统的特性. 下面介绍两种基本的光学系统所对应的传递矩阵.

一段长度为 d 的空气所对应的光学传递矩阵为

$$S = \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

一个焦距为 f 的薄透镜所对应的光学传递矩阵

$$L = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

当一束光经过一个由多个薄透镜组成的光学系统, 该光学系统的光学传递矩阵可以由它所包含的基本光学系统的传递矩阵累乘获得

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = SL \quad (12)$$

实验中的光学系统模型如图 1.

凸透镜的焦距为 f , 未知量热透镜焦距为 f_{th} , 由式(11)可得两者对应的光学传递矩阵分别为:

$$L_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

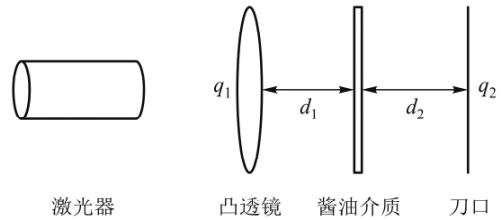


图 1 光学系统模型

$$L_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_{th} & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

d_1 、 d_2 分别代表透镜和酱油介质、酱油介质与光电板间的距离, 由式(10)可得这两段空气的光学传递矩阵分别为:

$$S_1 = \begin{bmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$S_2 = \begin{bmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

由式(12)知该光学系统的光学传递矩阵

$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$ 由式(13)、(14)、(15)、(16)累乘可得

$$\begin{bmatrix} 1 - \frac{d_1}{f_{th}} & d_1 - d_2 \left(\frac{d_1}{f_{th}} - 1 \right) \\ \frac{1}{f_{th}} \left(\frac{d_1}{f} - 1 \right) - \frac{1}{f} & \frac{d_2}{f_{th}} \left(\frac{d_1}{f} - 1 \right) - \frac{d_1 + d_2}{f} + 1 \end{bmatrix}, \text{ 将 } A、B、C、$$

D 代入式(9)可求得未知热透镜的焦距 f_{th} :

$$f_{th} = \frac{f [(d_1 + d_2) q_2 - 1]}{f q_2^2 + [f - (d_1 + d_2)] q_2 - f q_1 + 1} \quad (17)$$

高斯光束在束腰处为平行光, 即 $R \rightarrow \infty$, 由式

$$(7) \text{ 可知 } q = i \frac{\pi\omega^2}{\lambda} \quad (18)$$

q 由光斑半径求得. 为简化运算, 调节激光器, 使光束垂直射入凸透镜, 将刀口先后放在凸透镜前和通过酱油介质后高斯光束束腰位置, 进入凸透镜前的光束束腰位置近似位于激光器出光口处. 通过移动螺旋测微器, 使刀刃从 a 开始沿 x 方向切入高斯光斑. 以光斑中心为原点, X 代表刀刃在坐标中的位置如图 2 所示. 切入过程中, 剩余未被遮挡的高斯光斑传播至光屏 D 处的能量 P 的表达式为

$$P(X, z) = \frac{P_0}{\pi\omega^2(z)} \int_X^{+\infty} e^{-\frac{x^2}{\omega^2(z)}} dx \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{y^2}{\omega^2(z)}} dy = \frac{P_0}{\pi\omega^2(z)} \int_X^{+\infty} e^{-\frac{x^2}{\omega^2(z)}} dx \quad (19)$$

积分结果形式与误差函数类似,定义互补误差函数: $\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{+\infty} e^{-t^2} dt$ (20)

通过类比可得

$$P(X, z) = \frac{P_0}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{X}{\omega(z)}\right) \quad (21)$$

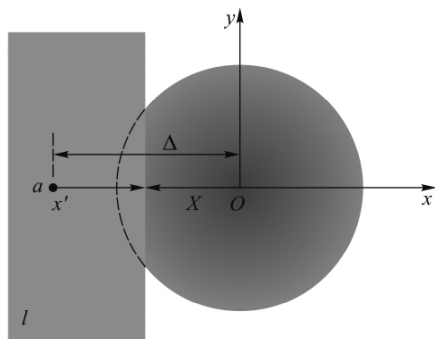


图2 刀口法测量高斯光斑^[3]

为了更好的了解函数 $P(X, z)$ 与 X 的关系,如图2所示,定义刀口移动的距离数值为 x' ,光斑中心到刀口初始点的长度为 Δ ,由数量关系 $x' = X + \Delta$,可得^[3]

$$-\frac{dP}{dx} \propto e^{-\frac{(x'-\Delta)^2}{\omega^2(z)}} \quad (22)$$

这说明能量 P 是关于 x' 的负导数,与高斯光束的光强成正比.由高斯光束的定义可知,高斯光斑的半径为高斯光斑中心能量最强处,沿径向衰减至能量为最强处 $1/e$ 的距离.因此,测出光斑的光强 P 以及刀口的移动距离 x' ,利用计算机得出 $-\frac{dP}{dx}$ 关于 x' 的曲线,取峰值处的 x'_1 ,及衰减至峰值 $1/e$ 处的 x'_2 ,便可得到高斯光束在 z 处的光斑半径:

$$\omega = |x'_2 - x'_1| \quad (23)$$

将刀口分别放在进出光学系统前后高斯光束束腰的位置,测出光斑半径 ω_1, ω_2 ,从而得到 q_1, q_2 ,代入式(17)即可求得热透镜的焦距.

1.3 测量精度的分析

激光功率计会引起的光斑半径的测量误差.由式(22)可知,功率计的测量误差引起刀口位置坐标的测量误差,进而引起光斑半径的测量误差.

所引起刀口位置测量误差可以表示为

$$\Delta X = \frac{1}{\frac{dP(x)}{dX}} \Delta P \quad (24)$$

式中, $\frac{dP}{dX}$ 为透过刀口边缘的激光功率随刀口位置坐

标的变化率; ΔP 为激光功率计的精度.功率计引起的光斑半径测量误差为

$$\Delta \omega = |\Delta X_1| + |\Delta X_2| = \Delta P \left| \frac{dP(x)}{\omega dx} \right|_{X=X_1} \quad (25)$$

式中, ΔX_1 和 ΔX_2 分别为激光功率计引起刀口位置坐标测量误差.根据式(21), $\left| \frac{dP}{dX} \right|$ 表达式:

$$\left| \frac{dP}{dX} \right| = \frac{P_0}{\sqrt{\pi} \omega} e^{-\frac{x^2}{\omega^2}} \quad (26)$$

由式(25)、式(26)可得,功率计测量误差所引起的光斑半径测量误差为

$$\Delta \omega = \frac{2\omega \sqrt{\pi}}{P_0} e^{\frac{x^2}{\omega^2}} \frac{\Delta P}{P_0} \quad (27)$$

由式(27)可以看出,激光功率计所引起的光斑半径测量误差与功率计精度、激光功率以及所选取的测量点有关.因此,在量程足够的情况下,选择更小的量程有利于减小误差^[4].

2 实验装置

如图3所示,实验装置依次为 5 mW 半导体基横模激光器、焦距为 125 mm 的平凸透镜、酱油薄膜、数显式螺旋测微器和太阳能电池板.其中酱油样品室由手机膜夹着凹形槽制成.为更全面地探究介质对热透镜效应的影响,我们制作了不同浓度和不同厚度的酱油薄膜,分为厚度组和浓度组,其中浓度组定义老抽为浓度 1,生抽为浓度 0.通过以不同的比例混合老抽酱油和生抽酱油,制作出 0%、25%、50%、75%、100% 五种不同浓度的介质样品.实验操作中,刀口从与光斑相切位置开始移动,每隔 0.5 mm 步长记录一次数据,直至完全遮挡光斑.最后,由单片机传输数据到电脑,利用软件自动计算出热透镜焦距.

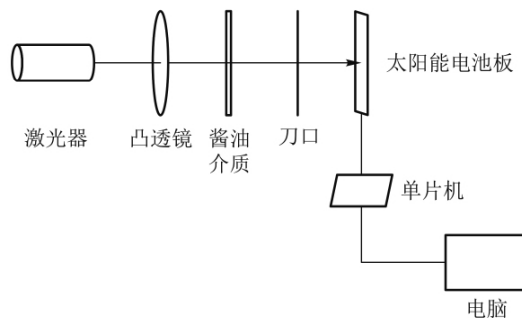


图3 实验装置图

3 实验结果与讨论

3.1 酱油薄膜的热透镜焦距

当酱油薄膜移至凸透镜焦点后一段距离时,出现第一个明显的暗环,以厚度为 0.4 mm、浓度为 50%的酱油薄膜作为测量样品,运用刀口法和光学矩阵法测量介质在此位置产生的光斑大小与热透镜焦距,结果如下

表 1 酱油薄膜的热透镜焦距

远场高斯光斑半径 ω_2/mm	等效热透镜焦距 f_{th}/mm
1.6765	-121.17
1.6563	-121.20
1.6769	-121.17
1.6610	-121.20
1.7007	-121.14

对数据进行误差分析,得到测量结果

$$f=f\pm\sigma=-121.1774\pm0.03\text{ mm}$$

$$E=0.24\%$$

3.2 酱油薄膜位置对热透镜效应的影响

选择厚度为 0.2 mm、浓度为 100%酱油膜作为测量样品.将样品放在凸透镜焦点前、焦点后和远场(远离凸透镜) 3 个位置,拍摄到的高斯光斑图样如图 4 所示

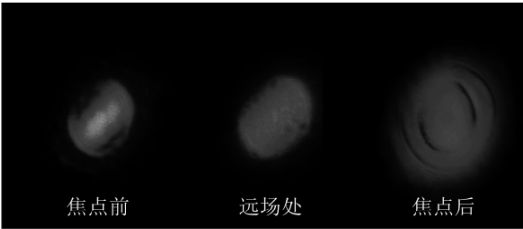


图 4 不同位置的酱油热透镜效应的光斑大小对比

为定量地表示酱油薄膜位置对热透镜效应产生的影响,以凸透镜的焦点位置为原点,激光光束传播方向为正方向,将样品放在 5 个不同的位置,分别对光斑大小与热透镜焦距进行测量,结果如下表

表 2 热透镜效应随介质位置变化的关系

样品离焦点 距离 x/mm	远场高斯光斑 半径 ω_2/mm	等效热透镜 焦距 f_{th}/mm
-35	1.6207	-121.26

续表

样品离焦点 距离 x/mm	远场高斯光斑 半径 ω_2/mm	等效热透镜 焦距 f_{th}/mm
15	1.6279	-121.15
25	2.6961	-120.44
35	1.9869	-120.83
75	1.7953	-121.02

如图 4,当酱油薄膜放在凸透镜焦点后,对高斯光束起发散作用,远场光斑增大;当酱油薄膜放在凸透镜焦点前,使凸透镜焦点后移,远场高斯光斑减小,验证酱油薄膜热透镜效应等效于凹透镜^[3].由于液体受热膨胀,中心温度较高,向外膨胀,密度比边缘的薄,导致折射率的变化.而酱油组成主要为有机分子,因为温度的升高使得液体分子热运动加剧,分子间距增大,导致折射率减小^[5].同时,衍射环(图 5)也说明了介质薄膜内诱导了一个具有高斯分布的相位型微孔,对入射光产生标准圆孔的衍射.

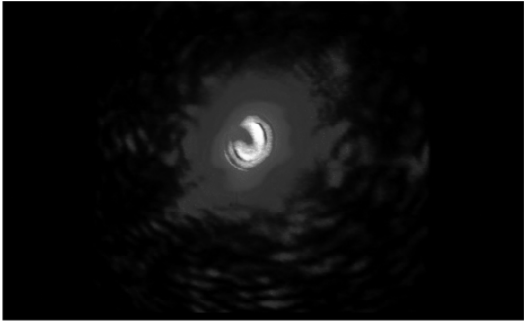


图 5 焦点后高感光拍摄下的衍射环

酱油样品在凸透镜焦点后,产生的热透镜等效焦距先变长后变短,选取的五个位置点中,在焦点后 25 mm 有最大的远场高斯光斑与最短热透镜等效焦距.当 $x<25\text{ mm}$ 时,激光束发散角较小,酱油样品横向的温度梯度不明显;当 $x>25\text{ mm}$ 时,由于激光器功率低,酱油样品吸收的能量少,这两个因素均导致酱油样品形成的热透镜效应不明显.

3.3 酱油薄膜厚度对热透镜效应的影响

制作不同厚度的 100%老抽酱油样品,厚度分别为 1 层、2 层、3 层、4 层,如图 6,其中单层厚度为 0.2 mm;分别将介质样品放置在能明显产生热透镜效应的位置,保持其他条件不变,用刀口法以及光学矩阵法求得对应的光斑半径和热透镜焦距,重复多次测量得到的结果如表 3

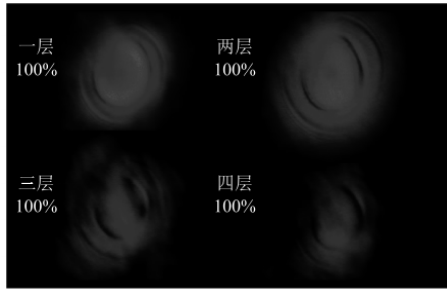


图6 不同厚度热透镜效应的光斑大小对比

表3 热透镜效应随介质厚度变化的关系

介质厚度 x/mm	远场高斯光斑半径 ω_2/mm	等效热透镜焦距 f_{th}/mm
0.2	1.2772	-122.02
0.4	3.3802	-120.27
0.6	1.8288	-120.99
0.8	0.6119	-128.14

随着介质厚度的增加,热透镜的焦距并不是呈线性的单调变化,如图7,而是在厚度为两层时,出现了一个极值.

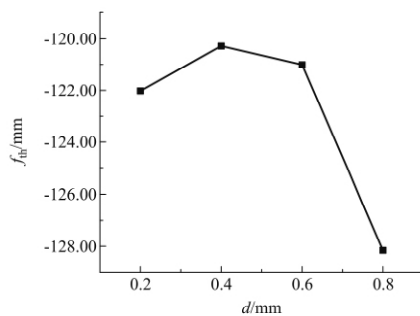


图7 热透镜焦距随介质厚度变化关系

3.4 酱油薄膜浓度对热透镜效应的影响

控制介质厚度为0.4 mm,分别将不同浓度介质样品放置在能明显产生热透镜效应的位置,如图8,重复多次测量得到的结果如表4

表4 热透镜效应随介质浓度变化的关系

介质浓度 $C/\%$	远场高斯光斑半径 ω_2/mm	等效热透镜焦距 f_{th}/mm
0	1.4880	-121.49
25	2.0162	-120.81
50	2.0597	-120.77
75	1.7466	-121.08
100	1.4221	-121.63

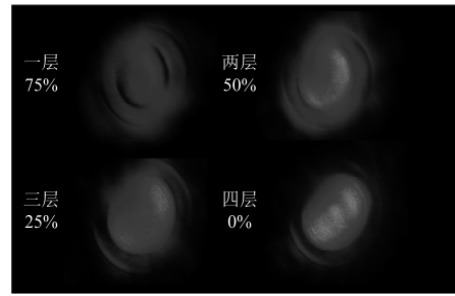


图8 不同浓度热透镜效应的光斑大小对比

跟厚度组类似,浓度组也呈现了焦距(绝对值)先下降在后上升的过程,在浓度为50%处取得了最短的焦距,如图9,即也存在一个使得热透镜效应最明显最优浓度.

从以上结果看,酱油热透镜等效焦距与酱油膜厚度、酱油浓度存在非线性的关系.其中原因可能由于使用的激光器功率太低,酱油介质后半部分无法形成完整的横向温度梯度,影响其热透镜效应的产生.

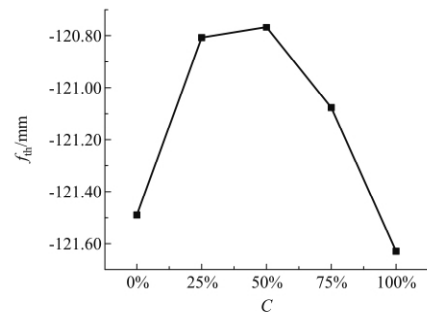


图9 热透镜焦距随介质浓度变化关系

4 结束语

本文对酱油的热透镜效应现象进行了分析,讨论的酱油薄膜的位置变化、浓度及厚度对实验结果产生的影响.与以往研究使用的高功率激光器不同,本实验利用生活中易得的低功率激光器,搭建了操作简单、成本低、安全性高的装置,定性分析了热透镜效应的影响因素.在接下来的工作中,可以建立数学模型对其进行定量的分析,讨论激光功率、介质厚度等对热透镜效应的影响,从而更清楚地了解热透镜效应产生的机制.

参考文献:

- [1] 钟锡华.现代光学基础[M].北京:北京大学出版社,2003:280.
- [2] 姚保利,任立勇,侯洵,等.聚吡咯甲烯/聚乙烯醇薄膜对高斯光束的衍射行为[J].光学学报,2001(09):

- 1139-1143.
- [3] Turchiello R F, Pereira L A A, Gómez S L. Low-cost nonlinear optics experiment for undergraduate instructional laboratory and lecture demonstration [J]. American Journal of Physics, 2017, 85(7) : 522-528.
- [4] 杨晓冬,邵建新,廖生鸿,等.刀口法测量高斯光束光斑半径研究 [J].激光与红外,2009,39(8) : 829-832.
- [5] 吴俊慷,刘博,刘鹏,等.液体折射率随温度改变的研究 [J].大学物理实验,2014,27(05) : 32-35.
- [6] 熊小华.刀口法测量高斯光束腰斑大小实验设计 [J].南昌航空工业学院学报,2000(03) : 73-75.
- [7] 郝东山.光折变晶体的热透镜效应 [J].大学物理,2000(11) : 33-35.
- [8] 吴云峰,张萍,邓风卫,等.基于 MATLAB 语言的 He-Ne 激光器基模高斯光束分布的实验数据处理 [J].德州学院学报,2013,(6) : 39-45.
- [9] 高源,樊仲维,余锦,等.刀口法测平顶光斑和高斯光斑半径的新算法 [J].激光技术,2013,(2) : 261-264.
- [10] 徐林苗,辛红,南瑶,等.激光束空域强度分布测试 [J].应用光学,1995,(6) : 40-44.

Optical thermal lens effect of soy sauce

CHEN Qing-nan, FAN Zi-ping, GAO Qi-ni, GUO Zheng-xin, ZHENG Bo-wei, PENG li

(School of Physics and Telecommunication, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: A thermal lens effect teaching demonstration device based on soy sauce optics is designed. By observing the phenomenon of thermal lens effect when low-power laser is converged through convex lens and transmitted in thin soy sauce medium, the radius of laser Gaussian beam is calculated by using knife edge method and software fitting, and the focal length of soy sauce hot lens is obtained by combining optical matrix calculation. Based on the changes in the size of the Gaussian spot before and after the soy sauce slice is located at the focal point of the convex lens, it is concluded that the soy sauce medium can be equivalent to a concave lens under the irradiation of the Gaussian beam. This device has simple structure, high cost performance, and can be used for undergraduate experimental teaching demonstration.

Key words: thermal lensing effect; soy sauce medium; blade method; concentration; thickness

信息与动态

欢迎订阅 2021 年《大学物理》

《大学物理》是中国物理学会主办的、以高校物理教学研究为主要内容的学术性刊物。《大学物理》的办刊宗旨是:紧密结合我国高等院校物理教学实践,开展学术交流,报导物理教学研究成果,介绍物理学在技术领域和交叉学科的应用及物理学前沿进展,以提高我国高校物理教学质量和教学研究水平。主要栏目有教学研究、教学讨论、物理实验、教学改革、基础物理教学现代化问题、物理教育与科学素质培养、前沿综述、专论、物理学史、大学生园地、专题连载等。本刊读者对象为高校物理教师、学生、中等学校物理教师和物理学工作者等。

自创刊以来,本刊始终坚持高标准、高质量的原则,发表了许多高水平的论文。在这些论文中,有些澄清或纠正了某些国内外教材或文献中长期存在的混乱和错误;有些对扩展教师的知识面有重要的参考价值;有些论文的内容完全可以用来更新国内外教材的相应内容。本刊在推广教学研究成果,促进我国高校物理教学改革和教学现代化的进程中做出了积极的贡献,并在一定程度上起到了导向的作用。本刊以严谨的科学作风和认真的工作态度,赢得了广大读者的信赖与好评,被誉为“研讨教学、解决疑难、交流学术、开阔眼界、启迪思维”的良师益友。

本刊在这里向广大读者致以崇高的敬礼,感谢广大读者多年来对本刊的关心和爱护,更希望在以后的日子里继续得到广大读者的支持和帮助,让我们共同携手把《大学物理》办得更精彩。

本刊为月刊,开本为大 16 开,页数 64 页。国内由邮局发行,可在全国各地邮局订阅,邮发代号:82-320;国外由中国国际图书贸易总公司发行,发行代号:M 679。国内定价:16.00 元/期,192.00 元/年。