

## 激光诱导热透镜效应 ——空间自相位调制的实验教学推广

杨 博<sup>1</sup> 李 洁<sup>1</sup> 李一鸣<sup>1</sup> 乔中华<sup>1</sup> 唐嘉岐<sup>1</sup> 鄢小卿<sup>1,2</sup> 王 瑾<sup>1,3</sup> 刘东奇<sup>1,3</sup> 刘 芳<sup>1,2,4</sup>  
(<sup>1</sup> 南开大学物理科学学院, 天津 300071; <sup>2</sup> 南开大学弱光非线性光子学教育部重点实验室, 天津 300071;  
<sup>3</sup> 南开大学基础物理国家级实验教学示范中心, 天津 300071; <sup>4</sup> 南开大学超快电子显微镜实验室, 天津 300071)

**摘 要** 本文将理论与实验结合, 设计了一套基于空间自相位调制(Spatial Self-Phase Modulation, SSPM)探究激光诱导热透镜效应的教学装置, 观察了 SSPM 衍射条纹的形成-畸变-稳定的动态过程; 利用该装置验证了衍射环数与激光光强的线性依赖关系, 并发现入射光强相同时, 激光波长越靠近材料吸收峰衍射环数越多; 将实验教学场景从传统的 NMP(N-甲基吡咯烷酮)试剂进一步推广到安全性更高的茶多酚-乙醇试剂和固体样品。该装置不仅推广了热透镜效应在实验教学中的应用, 还有望为新材料热透镜效应研究提供重要的实验平台和参考。

**关键词** 热透镜效应; 热致非线性; 二维材料; 空间自相位调制

DOI: 10.27024/j.wlygc.2025.11.07.02

## EXPERIMENTAL TEACHING PROMOTION OF LASER-INDUCED THERMAL LENSING EFFECT IN TWO-DIMENSIONAL MATERIALS: SPATIAL SELF-PHASE MODULATION

YANG Bo<sup>1</sup> LI Jie<sup>1</sup> LI Yiming<sup>1</sup> QIAO Zhonghua<sup>1</sup> TANG Jiaqi<sup>1</sup> YAN Xiaoqing<sup>1,2</sup> WANG Jin<sup>1,3</sup>  
LIU Dongqi<sup>1,3</sup> LIU Fang<sup>1,2,4</sup>

(<sup>1</sup> School of Physics, Nankai University, Tianjin 300071;

<sup>2</sup> Key Laboratory of Weak Light Nonlinear Photonics, Ministry of Education, Nankai University, Tianjin 300071;

<sup>3</sup> National Experimental Teaching Demonstration Center for Basic Physics, Nankai University, Tianjin 300071;

<sup>4</sup> Ultrafast Electron Microscopy Laboratory, Nankai University, Tianjin 300071)

**Abstract** By integrating theoretical analysis with experimental demonstration, this study develops a teaching apparatus for investigating the laser-induced thermal lens effect based on spatial self-phase modulation (SSPM). The apparatus makes it possible to observe the dynamic evolution of SSPM diffraction fringes from formation to distortion and finally stabilization. The results confirm a linear dependence of the diffraction-ring number on laser intensity and further show that, under the same incident intensity, wavelengths closer to the material's absorption peak generate more diffraction rings. The experimental teaching system is extended

收稿日期: 2025-11-07; 修回日期: 2026-01-30; 出版日期: 2026-05-20

基金项目: 南开大学 2025 年科研仪器实验技术研发项目(项目批准号: 25NKSYS05); 国家重点研发计划(项目批准号: 2023YFB3307700); 航空科学基金(项目批准号: 202400540S6002)。

通信作者: 刘芳, 9920200077@nankai.edu.cn。

引文格式: 杨博, 李洁, 李一鸣, 等. 激光诱导热透镜效应——空间自相位调制的实验教学推广[J]. 物理与工程, 2026, 36(3): 180-184.

Cite this article: YANG B, LI J, LI Y M, et al. Experimental teaching promotion of laser-induced thermal lensing effect in two-dimensional materials: Spatial self-phase modulation[J]. Physics and Engineering, 2026, 36(3): 180-184. (in Chinese)

from the conventional NMP (N-methylpyrrolidone) suspension system to a safer tea polyphenol-ethanol system and to solid samples. The proposed apparatus not only broadens the application of thermal lensing in experimental teaching, but also offers a useful platform for further studies of thermal lensing in emerging materials.

**Key words** thermal lensing effect; thermally induced nonlinearity; two-dimensional materials; spatial self-phase modulation

激光与物质相互作用的研究自激光器问世以来便引起了广泛关注。1965年, Gordon等人首次在激光谐振腔中插入液体样品时, 观察到了具有秒级时间常数的功率瞬变现象, 并将其归因于热透镜效应<sup>[1]</sup>。该效应源于材料对光能的微弱吸收导致局部温度升高, 进而引起折射率的空间分布变化, 形成类似透镜的效果, 从而影响激光束的传播特性。随后, Whinnery等人系统性地发展了基于热透镜效应的光学吸收测量方法, 并将其推广为一种高灵敏度的微量吸收检测技术<sup>[2]</sup>。

2004年曼彻斯特大学Geim小组首次成功分离出单原子层的石墨材料——石墨烯<sup>[3]</sup>, 而后随着二维纳米材料的兴起, 其在液相悬浮体系中表现出显著的空间自相位调制现象, 并伴随有多重衍射环的出现。早期研究多将这些现象归因于材料本身具有很高的三阶非线性光学参数 $\chi^{(3)}$ 。然而, Wang等人通过一系列对照实验与模拟计算指出, 这些衍射环的形成机制实际上主要来源于热透镜效应, 而非电子非线性效应<sup>[4]</sup>。热透镜效应作为一种基于光热转换的线性光学现象, 因其实验装置简单、灵敏度高、适用范围广等特点, 不仅在基础研究中具有重要价值, 也在化学分析、材料表征等领域展现出良好的应用前景。

然而, 目前高校实验教学中涉及该效应的内容仍较少, 因此, 本文基于空间自相位调制原理, 设计了一套可安全用于教学演示的激光诱导热透镜效应实验装置, 可系统展示衍射环的动态演化过程及其与激光功率、波长等因素的关系, 并尝试将实验演示材料拓展至更安全的茶多酚-乙醇体系及固体样品, 旨在推动热透镜效应在实验教学中的普及, 并为相关前沿研究提供可靠的实验基础和参考。

## 1 实验原理

热透镜效应虽然本质上属于线性光学现象(这是由于其折射率变化并非直接由激光电场通

过三阶非线性极化率 $\chi^{(3)}$ 产生), 但其对激光强度的依赖性与非线性光学效应具有相似性。该效应引发的空间自相位调制(SSPM)现象<sup>[5]</sup>指的是当激光束照射到样品时, 由于激光光强呈高斯分布, 温度沿光轴方向的升高最为显著, 会使温度在样品内分布不均匀, 形成温度梯度, 从而使折射率沿温度梯度方向呈现出差异, 其中材料的折射率 $n$ 随温度的变化为

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

这种折射率改变的空间分布会反作用于光束, 使其传播特性发生改变。具体表现包括: 空间分布的折射率改变导致光束可能发生会聚或发散, 类似于透镜产生的效果, 折射率改变引起的相位变化为

$$\Delta\phi(r) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L = \frac{2\pi}{\lambda} \int \Delta n dz \quad (2)$$

其中,  $\lambda$  为入射激光的波长,  $r$  为激光光束的径向半径,  $z$  为激光光束的传播方向,  $\Delta L$  是光轴与径向 $r$ 处的光程差。此时, 光束中心相对于边缘产生相位延迟, 导致波前发生扭曲, 远场处产生一组明暗相间的同心衍射环。从而得到衍射环环数与相位差的关系式为

$$\Delta\phi(0) - \Delta\phi(\infty) = 2N\pi \quad (3)$$

与此同时, 考虑到激光会导致光束路径中心区域的液体温度升高。热胀冷缩使得中心区域液体密度低于周边区域, 在重力作用下形成向上的浮力流(即羽流)。如图1所示, 在激光照射初期(0.4秒), 热传导占主导, 温度场呈同心圆状分布, 对应对称的衍射环; 随着时间推移(4.0秒), 温度场向上偏移, 导致光轴上方的折射率减小, 对应透镜的焦距变大, 偏折角减小, 形成一个径向的不对称结构破坏了最初由热传导建立的、对称的温度分布和折射率分布。这种不对称的温度场导致折射率分布在垂直方向上被压缩和扭曲, 对应的远场衍射环也会在垂直方向上被“挤压”, 从而

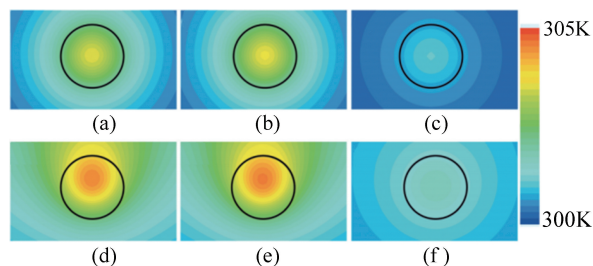


图1 模拟石墨烯在乙醇((a)、(d))、NMP((b)、(e))和水((c)、(f))中的流动温度分布,光照时间分别为0.4秒((a)~(c))和4.0秒((d)~(f));黑色圆点表示直径200 $\mu\text{m}$ 的激光光斑<sup>[4]</sup>

出现畸变形貌。

## 2 实验装置

由前文分析可知,材料的光吸收系数越高,越有利于热透镜效应的观察,而二维材料的光吸收系数(如石墨烯,过渡金属二硫化物(TMDs)等)一般比体材要高一个数量级<sup>[6]</sup>,因此我们选择二维材料作为我们的样品。

参照热透镜效应的过往研究<sup>[5,7-9]</sup>,本研究利用如图2所示的教学装置,并运用高速摄像机成功观察到了激光照射二维材料(如二硫化钼、铁锆碲、氧化石墨烯等)溶液所形成衍射环的动态过程(图3):激光照射样品后,首先在光屏上形成明亮光斑,随后迅速出现衍射环,衍射环的半径在0.155s时

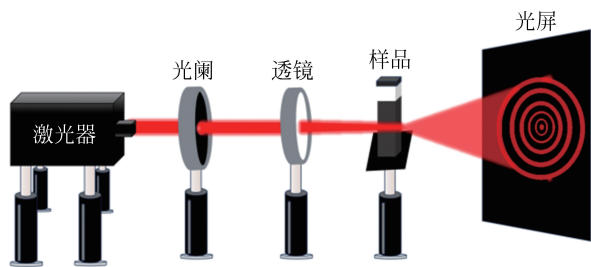


图2 实验光路示意图

达到最大,之后开始收缩,且上半部分收缩程度显著大于下半部分,呈现不对称坍塌特征;0.442s时,衍射环坍塌至极限并达到稳定状态。

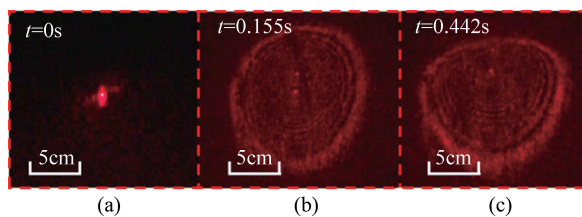


图3 不同时刻的衍射环动态演化图

(a)  $t=0\text{s}$ ; (b)  $t=0.155\text{s}$ ; (c)  $t=0.442\text{s}$

该过程验证了实验装置展现热透镜效应的可行性。

## 3 结果讨论与实验教学推广

本研究采用不同波长,不同功率的连续激光照射样品,查找衍射环环数,不同波长下铁锆碲衍射环如图4所示,记录实验结果并绘图,观察到其产生的衍射环环数与激光光强呈线性依赖,但不能证明该过程是线性光学效应,其本质是光热非线性,属于“光强依赖”的“非线性现象(折射率改变)”,验证了激光诱导的热透镜效应(图5)<sup>[4]</sup>。同时注意到,环数  $N$  与入射激光波长  $\lambda$  也存在较强的依赖性( $\frac{\Delta N}{\Delta \lambda}$ 为斜率),同一光强下  $N$  随  $\lambda$  增大呈现出先减小再增大再减小的趋势。这一趋势是材料吸收峰和激光发出的单个光子能量共同影响导致的。

其中,吸收峰对应的共振波长占主导地位,同一光强下,激光波长越靠近材料共振波长,所激发的衍射环环数越多,在图像上体现为更大的拟合斜率,因此本文认为材料的共振波长位于520nm左右;同时,本文发现405nm对应的拟合线具有较高的斜率,这归因于短波长单个光子能量更强,

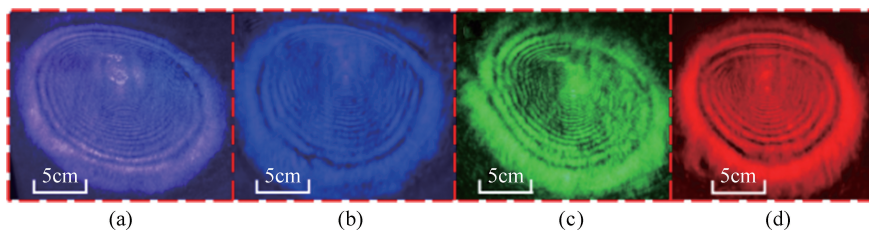


图4 不同波长下铁锆碲衍射环

(a) 405nm; (b) 450nm; (c) 530nm; (d) 638nm

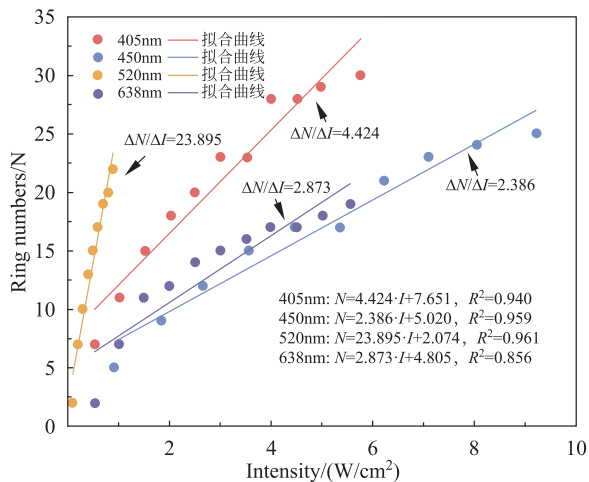


图5 铁铬碲的环数与光强关系

对衍射环的激发有正影响。

过往研究中常用 NMP 作为分散剂<sup>[10]</sup>,但由于 NMP 有毒且易挥发,我们考虑寻找安全可行的替代品,以利于实验教学。

由于 NMP 与乙醇具有相似的热力学性质,在相同的激光照射条件下,二者可产生相似的温度梯度。基于此,本研究改变分散剂(NMP→乙醇)再次进行了实验,发现二者激发的衍射环环数相当,实验现象如图 6(a)、(c)。但注意到以 NMP 为分散剂配置的样品悬浮液所激发的每一条衍射环都保持“连续且光滑”,衍射现象优于单独使用乙醇作为分散剂配置的二硫化钼悬浮液的效果。为了更好地观察实验现象,本研究考虑在乙醇分

散剂中加入茶多酚重复实验,得到的结果是:虽然衍射环的光滑性下降,但是可明显看到相比于单独使用乙醇来说衍射环的清晰程度增大,本文推测这源自茶多酚可以有效提高样品在分散剂中的分散效果并抑制其团聚作用,同时茶多酚作为一种化学物质可以吸收入射激光辐射的能量,转换为热能,可以在一定程度上增强衍射现象,使得其效果与使用 NMP 作溶剂的效果相当。因此,使用几乎无毒性的茶多酚+乙醇来代替 NMP 来配置悬浮液进行实验,可以显著降低实验的危险性和成本,且无毒化的分散剂更加适合教学场景应用。而后,为了实现样品的重复利用,本文推广研究二硫化钼分散固体样品,其实验结果如图 7 所示,样品如图 8(a)所示。使用二硫化钼分散固体样品也能观察到较为清晰的衍射现象,与此同时,实验消除了衍射环的畸变现象,如图 7 和图 8((b)~(d)),原因在于二硫化钼纳米片吸收激光热量后会通过晶格振动以及分子碰撞径向传递能量,而硅基材料可将每一片纳米片限制在微小局域内,硅基材料升温膨胀时,便会带动其中的二硫化钼形成中心对称的温度分布,形成完整的衍射环,避免了浮力流导致的折射率梯度变化引起的畸变。但是固体样品中的二硫化钼无法做到像悬浮液中一样分布均匀,因此其衍射环的环数以及连续性和光滑性均略差于悬浮液。不过其稳定性以及可长期储存的优点是悬浮液样品无法替代的,更适用于教学场景。

在此说明,由于衍射环是通过人工读取获得

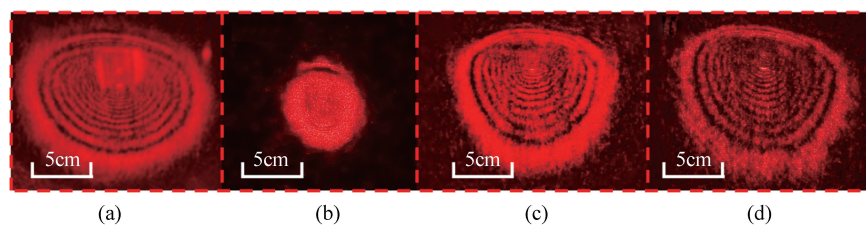


图6 不同溶剂下二硫化钼悬浮液衍射环

(a) NMP; (b) 茶多酚+水; (c) 乙醇; (d) 茶多酚+乙醇

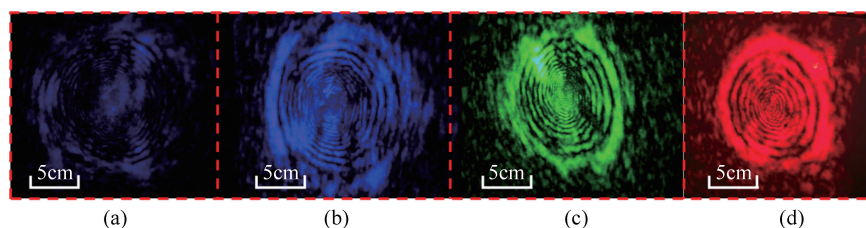


图7 不同波长下固体二硫化钼衍射环

(a) 405nm; (b) 450nm; (c) 530nm; (d) 638nm

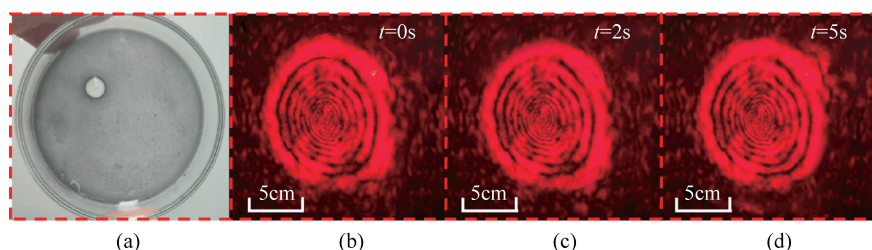


图8 固体样品实物图与衍射环动态演化图

(a) 固体样品图片; (b)~(d) 固体样品衍射环动态演化图

的,其读数存在主观性,因此本研究将读取误差范围定为 $\pm 3$ 环。

#### 4 结语

综合上述实验及分析,本研究所用的基于SSPM探究激光诱导热透镜效应的装置,可以有效地观察到激光诱导热透镜效应所产生衍射环的形成—畸变—稳定的动态过程,而且在教学适用性与经济性方面也展现出显著优势。

在装置设计方面,核心组件仅包含激光器、透镜、样品及光屏,光路调节简便,可有效降低操作复杂度。在实验教学方面,考虑成本与安全性,我们制备的固体样品具备良好的稳定性,可保存数月并重复使用,能够有效减少材料损耗与费用支出;采用乙醇-茶多酚作为分散剂替代NMP,不仅大幅降低悬浮液配置成本,更显著提升实验安全性,符合本科实验教学的需求。此外,该装置运行稳定,能够稳定产生清晰的衍射环图像,配合高速摄像机可完整记录衍射环的实验动态演化过程,有效证明衍射环不是由电子非线性引起的。

此外,该装置高度的可拓展性为教学实践提供了丰富空间,具有突出的教学推广价值与应用潜力。学生可基于该装置自主设计实验,探究不同变量对热透镜效应的影响,助力培养学生的创新实践能力和物理素养。

#### 参 考 文 献

- [1] GORDON J P, LEITE R C C, MOORE R S, et al. Long-transient effects in lasers with inserted liquid samples[J]. Journal of Applied Physics, 1965, 36(1): 3-8.
- [2] JOHN R W. Laser measurement of optical absorption in liquids[J]. Accounts of Chemical Research, 1974, 7(7): 225-231.
- [3] GEIM A K, GRIGORIEVA I V. Van der waals heterostructures[J]. Nature, 2013, 499(7459): 419-425.
- [4] WANG Y N, TANG Y J, CHENG P H, et al. Distinguishing thermal lens effect from electronic third-order nonlinear self-phase modulation in liquid suspensions of 2D nanomaterials[J]. Nanoscale, 2017, 9(10): 3547-3554.
- [5] WU L M, YUAN X X, MA D T, et al. Recent advances of spatial self-phase modulation in 2D materials and passive photonic device applications[J]. Small, 2020, 16(35): 2002252.
- [6] BERNARDI M, PALUMMO M, GROSSMAN J C. Extraordinary sunlight absorption and one nanometer thick photovoltaics using two-dimensional monolayer materials[J]. Nano Letters, 2013, 13(8): 3664-3670.
- [7] ZHANG J D, YU X F, HAN W J, et al. Broadband spatial self-phases modulation of black phosphorous[J]. Optics Letters, 2016, 41(8): 1704-1707.
- [8] LIAO Y L, SONG C M, XIANG Y J, et al. Recent advances in spatial self-phase modulation with 2D materials and its applications[J]. Annalen Der Physik, 2020, 532(12): 2000322.
- [9] HU L L, SUN F, ZHAO H, et al. Nonlinear optical response spatial self-phase modulation in  $\text{MoTe}_2$ : Correlations between  $\chi^{(3)}$  and mobility or effective mass[J]. Optics Letters, 2019, 44(21): 5214-5217.
- [10] NABANITA S, SAGNIK B, SOUVIK B C, et al. Unraveling SSPM Phenomena in Type-II Dirac Semimetal  $\text{NiTe}_2$  for All-Optical Diodes and Switching Applications[J]. Small, 2025, 21(31): 2503235.
- [11] WU L M, FAN T J, WEI S R, et al. All-optical logic devices based on black arsenic-phosphorus with strong nonlinear optical response and high stability[J]. Opto-Electronic Advances, 2022, 5(1): 200046.
- [12] WU Y L, WU Q, SUN F, et al. Emergence of electron coherence and two-color all-optical switching in  $\text{MoS}_2$  based on spatial self-phase modulation[J]. PNAS, 2015, 112(38): 11800-11805.