



## 超快光脉冲照射GaAs晶体产生的干涉环

尚玲玲 钱轩 孙天娇 姬扬

### Interference rings induced by ultrafast laser pulse in GaAs crystal

Shang Ling-Ling Qian Xuan Sun Tian-Jiao Ji Yang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 214202 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20201055

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201055>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

基于等离激元纳米结构非线性响应的超快光开关及脉冲激光器

Ultrafast optical switches and pulse lasers based on strong nonlinear optical response of plasmon nanostructures

物理学报. 2020, 69(18): 189101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200456>

相干彩虹的形成机制

Formation mechanism of coherent rainbows

物理学报. 2018, 67(18): 184204 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180888>

清水出彩虹

Coherent rainbows come from liquids

物理学报. 2018, 67(3): 034205 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172663>

非线性光学超构表面

Nonlinear photonic metasurfaces

物理学报. 2017, 66(14): 147803 <https://doi.org/10.7498/aps.66.147803>

低维半导体材料在非线性光学领域的研究进展

Research progress of low-dimensional semiconductor materials in field of nonlinear optics

物理学报. 2020, 69(18): 184211 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200206>

非线性克尔效应对飞秒激光偏振的超快调制

Ultrafast polarization modulation of laser pulses at terahertz frequencies via optical Kerr effect

物理学报. 2018, 67(23): 237801 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181450>

## 超快光脉冲照射 GaAs 晶体产生的干涉环\*

尚玲玲<sup>1)2)</sup> 钱轩<sup>1)2)</sup> 孙天娇<sup>1)2)</sup> 姬扬<sup>1)2)†</sup>

1) (中国科学院半导体研究所, 半导体超晶格国家重点实验室, 北京 100083)

2) (中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049)

(2020年7月3日收到; 2020年7月13日收到修改稿)

用飞秒脉冲激光照射砷化镓 (gallium arsenide, GaAs) 晶体, 透射光出现了多级的干涉环. 利用透射式 Z-扫描光路, 改变飞秒脉冲激光入射到 GaAs 晶体表面时的功率密度, 观察到干涉环有规律地收缩 (或扩张): 功率密度越大, 出现的干涉环越多, 张角也越大. 高强度飞秒脉冲激光的非线性效应局部地改变了 GaAs 晶体的折射率, 从而导致光程差的出现, 这是一种非线性效应 (克尔透镜). 超快光脉冲在 GaAs 晶体里产生的克尔透镜不能像理想的薄透镜那样把光束聚焦, 而是让透镜光束形成了干涉环. 通过分析干涉环的变化, 可以得到 GaAs 晶体的非线性吸收系数和非线性折射率.

**关键词:** 相干干涉, 非线性光学, 超快光脉冲, 克尔透镜

**PACS:** 42.25.-p, 42.25.Kb, 42.65.-k, 87.15.ht

**DOI:** 10.7498/aps.69.20201055

## 1 引言

用单色激光或者白光激光聚焦照射液体, 比如液晶<sup>[1-3]</sup>、茶水<sup>[4]</sup>、燃料<sup>[5,6]</sup>、原子材料悬浊液<sup>[7-15]</sup>、有机物溶剂<sup>[16,17]</sup>和多种液体纯溶剂<sup>[18-20]</sup>(水、丙酮、无水乙醇)等, 均观察到了干涉环. 同样地, 用激光照射固体, 比如聚合物薄膜<sup>[21-24]</sup>、塑料、石蜡、玻璃和冰<sup>[19]</sup>, 也观察到了干涉环. 现在, 关于液体与固体中出现的干涉环已有若干种解释: 光学非线性效应<sup>[5]</sup>、自相位调制<sup>[25]</sup>、热透镜效应<sup>[26]</sup>、气泡假说<sup>[20]</sup>和热致形变<sup>[20]</sup>等. 然而, 目前固体干涉环的研究对象都不是晶体, 激光引起了材料的改性<sup>[23]</sup>或变形<sup>[27]</sup>. 本文报道超快光脉冲照射半导体砷化镓 (gallium arsenide, GaAs) 晶体时产生的干涉环, 并确认它是一种非线性光学效应.

GaAs 是一种重要的直接带隙半导体材料, 具有明确的吸收边、高激光损伤阈值和高导热率, 容

易得到高质量的晶体. 采用改良的透射式 Z-扫描光路<sup>[28,29]</sup>, 用超快激光脉冲照射 GaAs 晶体, 观测到透射光束出现了多级的干涉环. 通过分析干涉环的变化, 可以得到 GaAs 晶体的非线性光学信息.

## 2 实验系统与测量结果

实验装置如图 1(a) 所示, 分光棱镜 1 把入射激光分为光强大致相等的两束 (a 路和 b 路), a 路和 b 路的入射功率连续可调. 其中 a 路安置了机械时间延迟线, 用来调节两路的光程差, 分光棱镜 2 把两路光重新汇合, 以共线的方式出射, 利用焦距为 5 cm 的凸透镜聚焦后照射在厚度为 350  $\mu\text{m}$ 、双面抛光的 GaAs 晶片上, GaAs 晶片由电动定位系统移动实现位置扫描, 使用高速相机来检测透射光的强度分布, 分别设置其拍摄频率为 1 kHz 和 2 kHz, 像素为 240  $\times$  320, 对应拍摄的图像范围为 5.2 mm  $\times$  6.5 mm.

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2016YFA0301202) 和国家自然科学基金 (批准号: 11674311) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [jiyang@semi.ac.cn](mailto:jiyang@semi.ac.cn)

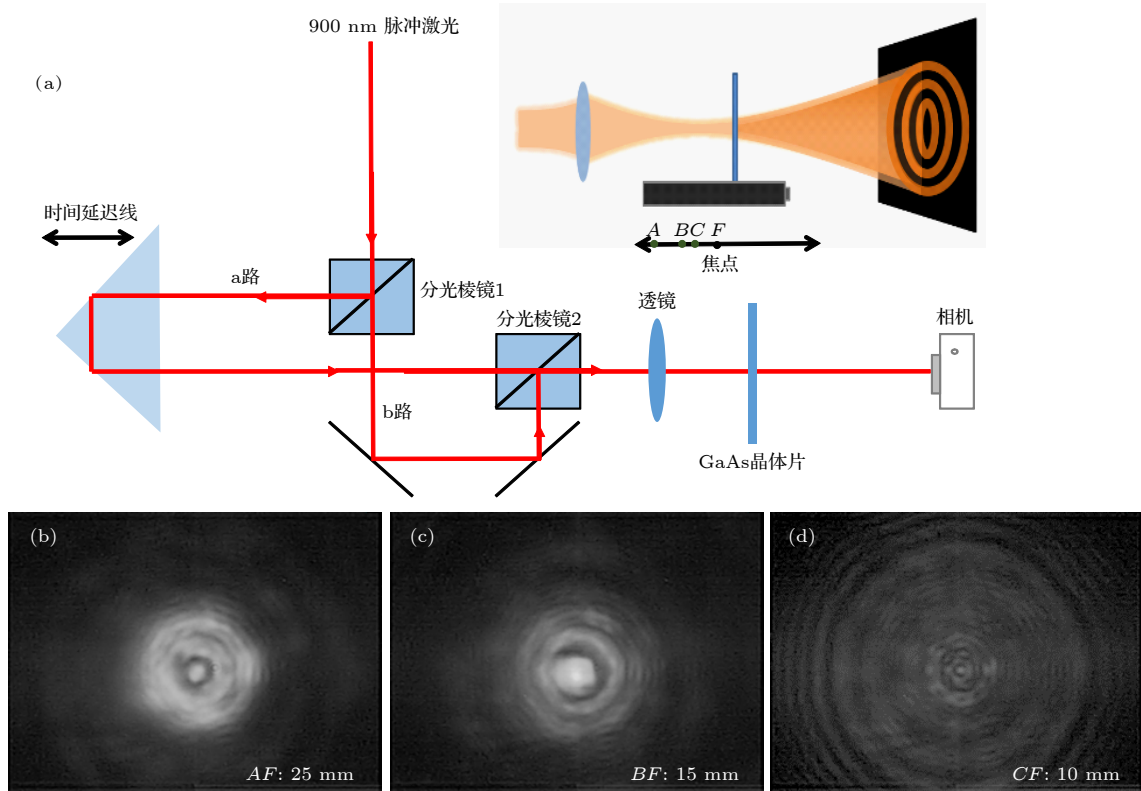


图 1 GaAs 晶体的干涉环 (a) 实验装置示意图, 分光棱镜 1 把入射激光分为光强大致相等的两束 (a 路和 b 路), a 路和 b 路的人射功率连续可调; 其中的 a 路安置了机械时间延迟线, 用来调节两路的光程差, 分光棱镜 2 把两路光重新汇合, 以共线的方式出射, 利用焦距为 5 cm 的凸透镜聚焦后照射在厚度为 350  $\mu\text{m}$ 、双面抛光的 GaAs 晶片上, GaAs 晶片由电动定位系统移动实现位置扫描, 使用高速相机来检测透射光的强度分布; 挡路 b 路, 只用 a 路脉冲激光照射 GaAs 晶片, 入射功率为 0.5 mW; (b)–(d) 是 1 kHz 脉冲激光入射 GaAs 晶片, 当样品逐渐靠近透镜焦点时, A、B 和 C 三点处出现的干涉环

Fig. 1. Interference rings from GaAs crystal. (a) Schematics of the experimental setup. The light beam of an ultrafast laser is split into two beams (a and b) via prism 1. The intensity of each beam is continuously adjustable. The optical path of beam a is adjustable while that of beam b is fixed. Beams a and b are recombined via prism 2, output colinearly and then focused onto a crystal GaAs wafer (350  $\mu\text{m}$  thick, double-side polished) through a lens with a focal length of 5 cm. The GaAs wafer can be moved by electrically controlled positioning system to realize scanning. A high-speed camera is used to record the transmitted light. (b)–(d) Interference rings are observed with the sample being at A, B and C, respectively. Only beam a is used, while beam b is blocked. 1 kHz 900 nm-ultrafast laser is used. The incident power (in front of the lens) is 0.5 mW.

利用图 1(a) 实验装置, 挡住 a 路, 让 b 路激光单独照射 GaAs 晶体, 进行单路 Z-扫描实验. 主要采用 3 个不同的入射激光进行单路实验: 第 1 个人射激光来自于再生放大器抽运的光学参量放大器, 其波长可在 627–950 nm 之间可调, 脉冲宽度为 150 fs, 重复频率为 1 kHz, 即两相邻脉冲的时间间隔为 1 ms, 设置入射激光波长为 900 nm, 光子能量小于 GaAs 晶体在室温下的带隙, 采用高速相机观测透射光的变化; 第 2 个人射激光波长同为 900 nm, 脉冲宽度为 150 fs, 重复频率为 80 MHz, 即两相邻脉冲的时间间隔为 12.5 ns, 采用焦距为 15 cm 的凸透镜汇聚入射激光, 采用普通 CCD 观测透射光的变化; 第 3 个是 900 nm 的连续激光, 选用焦距为 15 cm 的凸透镜、普通 CCD 进行实

验. 特别说明的是, 文章正文中所有的实验数据 (图 1–4), 使用的激光均为 1 kHz 的脉冲激光.

采用 1 kHz 的脉冲激光作为入射光源照射 GaAs 晶体时, 透镜前测得的入射激光功率为 0.5 mW, 单个脉冲能量为 0.5  $\mu\text{J}$ , 激光束径约为 1 mm, 焦点处的光斑束径为 14  $\mu\text{m}$ , 对应的瞬态平均光强密度是 8.1  $\text{GW}/\text{mm}^2$ . 在单路连续 Z-扫描中, GaAs 晶片在凸透镜焦点前后 3 cm 的范围内移动均可观测到干涉环, 由此判断出现干涉环所需的瞬态光强密度约为 1  $\text{MW}/\text{mm}^2$ . 样品在一些典型位置时, 高速相机拍摄的干涉环如图 1(b)–(d) 所示. 这些干涉环都是多级的环形结构, 呈现显著的圆对称, 图 1(b)、图 1(c) 和图 1(d) 是高速相机拍摄的干涉环, 样品与透镜焦点的距离分别

是 25 mm, 15 mm 和 10 mm (分别对应图 1(a) 左上方插图里的 A, B 和 C 三个位置). 当 GaAs 晶体片逐渐靠近透镜的焦点  $F$  时, 干涉环逐渐向外扩张, 从亮斑中心逐渐向外“吐”出更多圆环, 且随着入射光密度的增大, GaAs 晶体片的非线性吸收增强, 透射光强变小, 高速相机采集的干涉环的图片亮度逐渐变暗. 反之, 当远离透镜焦点时, 干涉环向内收缩, 环慢慢湮灭, 环的个数减少, 但干涉环的总体亮度逐渐增强. 完整的实验录像见 video-1 (online). 需要注意的是, 当设置高速相机的频率为 2 kHz 时, 在每两帧相邻的图片里, 都是一帧图片有光、出现干涉环, 另一帧图片没光、当然也就没有干涉环, 说明这种干涉图案来自于单个脉冲的激光束, 不是连续多个脉冲持续加热样品的结果.

采用 80 MHz 的脉冲激光作为入射光源进行单路实验时, 对应的瞬态平均光强密度为 0.5—5.7 MW/mm<sup>2</sup>. 在 GaAs 晶片逐渐靠近透镜焦点时, 普通 CCD 可以清楚地观测到从只有一个亮斑、没有干涉环到形成 3 圈干涉环的过程. 完整的实验录像见 video-2 (online). 用连续激光代替超快激光射到 GaAs 晶片时, 对应的平均光强密度为 1—10 kW/mm<sup>2</sup>, 远小于脉冲激光的 MW/mm<sup>2</sup> 量级的瞬态光强密度, 从始至终并未观测到干涉环.

还利用这三种光源做了单路 Z-扫描反射实验, 只能看到反射的亮斑, 没有观测到任何的干涉环结构, 说明表面没有发生任何形变.

挡住 b 路, 让 a 路激光照射 GaAs 晶片, 同样出现干涉环. 让两路激光同时照射, 也出现干涉环, 但是具体情况依赖于两束光的光程差. 利用图 1(a) 装置进行双路 Z-扫描实验, 图 2 是单路、双路激光入射 GaAs 晶体的干涉环对比, 将样品放置在距离透镜焦点 10 mm 处, 设置两路光程差为 2 cm, 调节两路入射功率均为 0.2 mW, 高速相机拍摄的 a 路和 b 路脉冲激光单独入射到 GaAs 晶体产生的干涉环如图 2(a) 和图 2(b) 所示, 拍摄的 a 路和 b 路脉冲激光同时入射到 GaAs 晶体产生的干涉环如图 2(c) 所示. 然后, 调节两路入射功率分别为 0.4 mW, 拍摄的 a 路脉冲激光单独入射到 GaAs 晶体产生的干涉环如图 2(d) 所示. 图 2(a)、图 2(b) 和图 2(c) 的干涉环基本相同 (图 2(c) 的亮度更大一些), 图 2(d) 的干涉环略多一些.

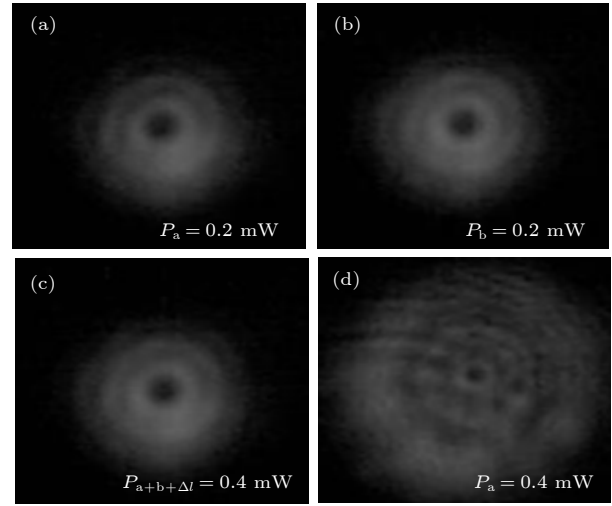


图 2 用单路或双路激光入射 GaAs 晶体时, 干涉环的对比 (利用图 1(a) 双路实验装置, 调整 a 路与 b 路的光程差为  $\Delta l = 2$  cm) (a), (b) 分别为入射功率为 0.2 mW 时, 高速相机拍摄的 a 路、b 路单独入射到 GaAs 晶体形成的干涉环; (c) 高速相机拍摄的 a 路、b 路同时入射时的干涉环; (d) 入射功率为 0.4 mW 时高速相机拍摄的 a 路单独照射时的干涉环

Fig. 2. Comparison of interference rings observed with single and/or dual lasers incident on GaAs crystal. Using the set-up shown in Fig. 1(a), the optical path difference between a and b is set to  $\Delta l = 2$  cm. (a) The interference rings of beam a only,  $P_a = 0.2$  mW; (b) the interference rings of beam b only with  $P_b = 0.2$  mW; (c) the interference rings of beam a and b,  $P_{a+b+\Delta l} = 0.4$  mW; (d) the interference rings of beam a only,  $P_a = 0.4$  mW.

### 3 非线性吸收效应和干涉环的形成

利用单路实验装置发现, 在扫描过程中, 随着光强密度显著增大, GaAs 晶体有典型的非线性吸收和干涉环结构. 接下来定量地从高速相机探测的透射光强随样品位置的变化拟合其吸收系数. 当瞬态入射光强密度较小时, 样品吸收在线性吸收区, 光的吸收率不依赖于光强密度; 随着瞬态入射光强密度的增大, 样品吸收进入非线性吸收区, 光的吸收率与光强密度相关. 假设 GaAs 的吸收系数  $\alpha$  与光强密度  $I$  线性相关, 即吸收系数  $\alpha = \alpha_0 + \beta I$ ,  $\alpha_0$  是线性吸收系数,  $\beta$  是非线性吸收系数.

超快强光脉冲不同于连续激光, 高斯光束的透射率  $t''$  为

$$t'' = \ln \left[ 1 + \frac{\beta E(0)/\alpha_0 (1 - \exp(-\alpha_0 z))}{(\pi r_0^2)} \right] \times \frac{\exp(-\alpha_0 z)}{(\beta E(0)/\alpha_0 (1 - \exp(-\alpha_0 z)) / (\pi r_0^2))}, \quad (1)$$

其中  $E(0)$  为入射脉冲能量;  $r_0$  为脉冲激光的束腰

宽度;  $z$  为样品厚度. 脉冲激光经过透镜聚焦后, 高斯光束的束腰  $r_0(z) = w_0 \left[ 1 + \left( \frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right)^2 \right]^{1/2}$ , 其中,  $r_0(z)$  为高斯光束在  $z$  轴的束腰分布,  $w_0$  为聚焦光斑束腰, 此处光强最大,  $\lambda$  为入射激光波长.

在双路系统实验中, 设置 a 路和 b 路光程差  $\Delta l = 2$  cm, 相同功率的双路脉冲同时入射与 a 路或 b 路单路脉冲照射 GaAs 晶体的透射光强不同, 如图 3 所示. a 和 b 两路脉冲分别以入射功率为 0.2 mW 和 0.4 mW 单独作用于样品, 透射光强随位置的变化趋势说明 GaAs 晶体在脉冲激光作用下有明显的非线性效应, 图中实线为最佳拟合曲线,  $P_a + P_b$  表示两单路的透射功率的直接相加,  $P_{a+b+\Delta l}$  表示 a 路与 b 路脉冲以 67 ps 的时间间隔同时作用于样品. 从图 3 可以直观地看出, 当入射

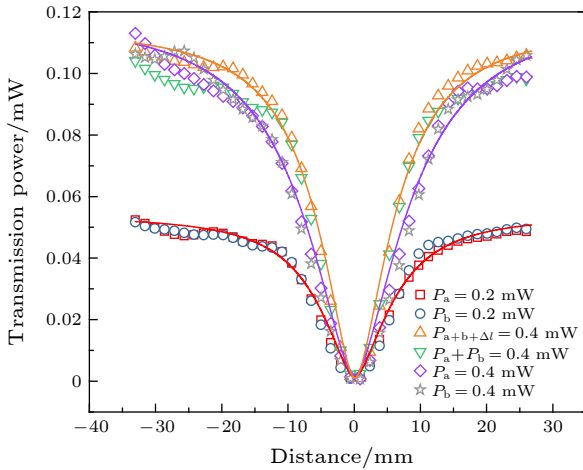


图 3 单路或双路激光入射 GaAs 晶体时的非线性透射功率, 其中,  $P_a = 0.2$  mW,  $P_b = 0.2$  mW,  $P_a = 0.4$  mW,  $P_b = 0.4$  mW 四种不同符号分别为单路脉冲直接作用在 GaAs 的透射功率的实验结果;  $P_{a+b+\Delta l}$  的符号  $\Delta$  为双路脉冲同时作用在 GaAs 的透射率变化, 其中  $\Delta l = 2$  cm, 两路的入射功率相同, 光程差为 2 cm, 总功率为 0.4 mW;  $P_a + P_b$  的符号  $\nabla$  为  $P_a = 0.2$  mW,  $P_b = 0.2$  mW 两路透射功率的直接相加; 实线对应于用 (1) 式拟合的结果

Fig. 3. Nonlinear transmission power of single and/or dual laser incident on GaAs crystal. Four symbols labeled with  $P_a = 0.2$  mW,  $P_b = 0.2$  mW,  $P_a = 0.4$  mW,  $P_b = 0.4$  mW are experimental results of the transmission power of single-channel pulse directly acting on GaAs. The solid lines are the best fits. The symbol  $\Delta$  labeled with  $P_{a+b+\Delta l}$  is the change of the transmission power with dual pulses simultaneously acting on GaAs. The incident power of two channels is the same with optical path difference  $\Delta l = 2$  cm, and the total power is 0.4 mW. The symbol  $\nabla$  labeled with  $P_a + P_b$  is the sum of the transmission power of two beams  $P_a = 0.2$  mW and  $P_b = 0.2$  mW. Solid lines are fitting results with Eq. (1).

功率相同时, 由于两路光程差的影响, 双路作用的非线性效应弱于单路作用的非线性效应.

通过拟合单路 Z-扫描的透射功率与位置之间的变化函数, 得到 GaAs 晶片的线性吸收系数  $\alpha_0 = (35.2 \pm 0.3) \text{ cm}^{-1}$ , 非线性吸收系数  $\beta = (9.2 \pm 0.2) \text{ cm} \cdot \text{GW}^{-1}$ . 可以将每一条曲线化为两个区域: 线性区和非线性区. 当样品距离透镜焦点较远时, 入射的单位光强密度较小, 处于吸收的线性区, 吸收系数基本不变, 透射率变化缓慢; 当样品进一步靠近样品焦点时, 样品上的单位光强密度增大到一定程度后进入非线性吸收区, 吸收系数线性依赖于入射光强密度, 透射率迅速变小. 当样品远离透镜焦点时, 也是这样. 纵观一条完整的透射率曲线, 考虑到高斯光束的汇聚/发散和样品的厚度, 靠近焦点过程的非线性吸收理论上强于远离焦点的非线性吸收, 但样品在逐渐远离透镜的过程中, 伴随着激光加热作用, 使得靠近焦点过程的透射率略大于远离过程的透射率.

在双路 Z-扫描实验中, 两路脉冲光除了光程的差别外, 其他参数都一致. 虽然激光在空气中会随着传播距离逐渐发散, 但是两束激光不会因为短距离的光程差有太大差别, 因此两路测得 GaAs 晶体的非线性曲线差别不大; 此条件下的两路光的共同作用如果等效于单独作用的直接相加, 就表示前一路脉冲对 GaAs 晶体的影响在下一路脉冲来之前已经消失, 干涉环的形成属于单个脉冲的作用, 形成时间短于两路的光程差.

我们认为干涉环源于脉冲激光在 GaAs 晶体中的非线性效应, 在改变样品位置的过程中, 透射光的强度有明显的变化. GaAs 晶体的折射率  $n$  线性依赖于入射光强密度  $I$ , 即  $n = n_0 + n_2 I$ , 其中,  $n_0$  为线性折射率,  $n_2$  为非线性折射率. 高强度飞秒脉冲激光的非线性效应局部地改变了 GaAs 晶体的折射率, 脉冲光强的高斯分布就会导致样品的局部折射率有相应变化, 这是一种非线性效应 (克尔透镜), 如图 4(a) 的实线所示. 这样一来, 在样品的不同位置 (垂直于光轴的方向) 的光程不一样. 超快光脉冲在 GaAs 晶体里产生的克尔透镜不能像理想的薄透镜那样把光束聚焦, 而是让透镜光束形成了干涉环. 在图 4(a) 里, 虚线表示  $dn/dr$  在实空间的分布,  $dn/dr$  相等的两束出射激光的出射方向相同、但是光程不一致. 当光程差是波长的整数倍

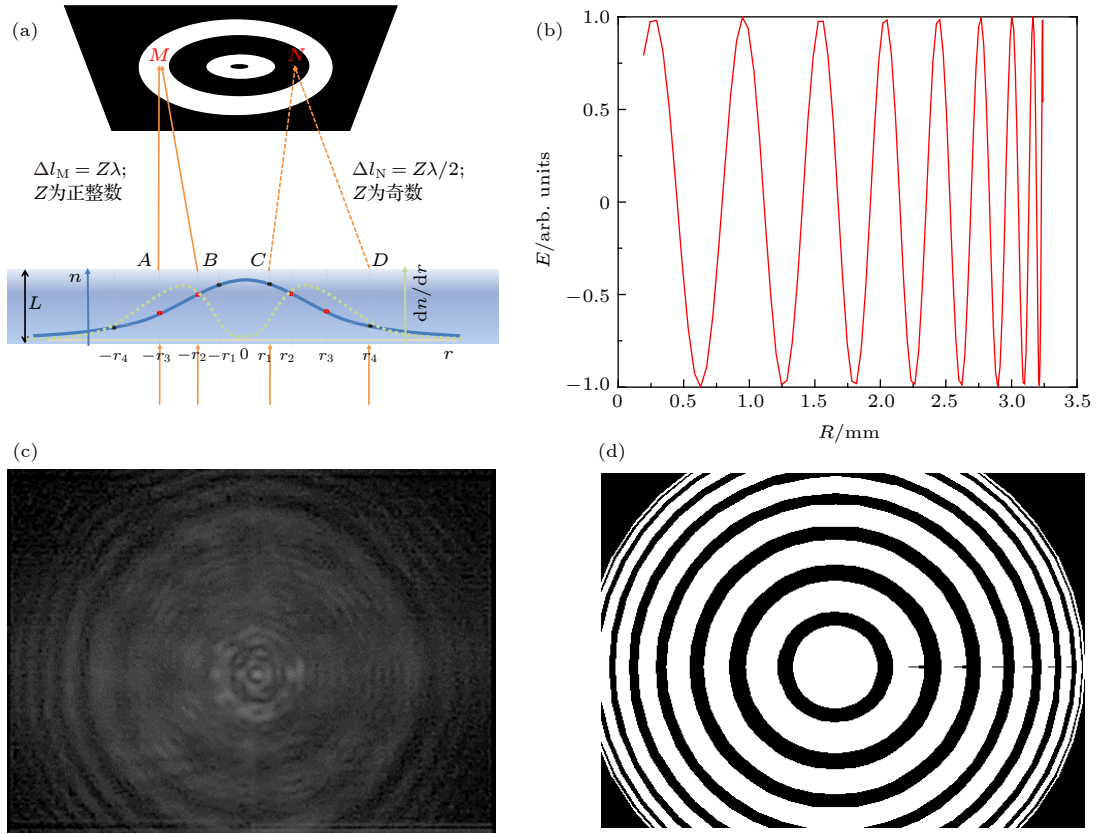


图 4 干涉环的形成机制 (a) 超快脉冲激光在实空间的光强分布导致了非线性折射率分布的差异,  $dn/dr$  相等的两个光束的出射方向相同, 但光程差不同; 当光程差是入射波长的整数倍时 (如图中所示的  $A, B$  两束光到  $M$  点), 干涉相长, 由于透射光束关于光轴的圆对称性, 出现亮环; 是半整数倍时 (如图中所示的  $C, D$  两束光到  $N$  点), 干涉相消, 出现暗环; (b) 同图 1(d); 用  $n_2$  为  $2.5 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{W}$  时模拟得到的干涉图案, (c) 为径向分布; (d) 为记录平面里的干涉环

Fig. 4. Schematics of the formation mechanism of the interference rings. The intensity distribution of the ultrafast pulse laser in real space leads to the nonlinear refractive index distribution in the GaAs crystal. The two beams with same  $dn/dr$  are outgoing in the same direction. When the optical path difference between them is an integer multiple of the incident wavelength (e.g., the beams  $A$  and  $B$  which meet at point  $M$ , as shown in the left part of panel (a)), a bright ring appears due to instructive interference and the axial symmetry of the system. When it is a half-integer multiple of the incident wavelength (e.g., the beams  $C$  and  $D$  which meet at point  $N$ , as shown in the right part of panel (a)), a dark ring appears. (b) The same as Fig. 1(d). Simulation with  $n_2$  is  $2.5 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{W}$ : (c) Interference pattern along the radial direction; (d) interference pattern on the camera plane.

时, 出现相长干涉, 如  $M$  点, 对应亮环的所在位置; 当光程差是波长的半整数倍时, 出现相消干涉, 如  $N$  点, 对应暗环的所在位置. 当样品逐渐靠近透镜焦点时, 样品折射率的径向变化率变大, 两束相干光的光程差变大, 透射光出射角随之变大, 表现为干涉环向外扩散, 干涉环数增多. 当入射功率一定, 样品距离透镜焦点位置确定后, 我们从干涉环反推样品截面的折射率变化, 确定 GaAs 晶体的非线性折射率  $n_2$  为  $2.5 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{W}$ . 图 4(b) 同图 1(d), 图 4(c) 是利用  $n_2$  模拟得到的干涉图案的径向分布, 根据图 4(c) 的径向分布, 画出了图 4(d) 的干涉环. 通过很好地模拟了观测到的干涉环, 说明了理论解释的合理性.

## 4 结 论

本文用超快光脉冲激光器照射 GaAs 晶体观测到了干涉环, 并发现随着入射光强密度的不同, 干涉环会扩张/收缩. 通过单路 Z-扫描的透射率曲线, 得到 900 nm 入射激光照射 GaAs 晶体时, 线性吸收系数为  $(35.2 \pm 0.3) \text{ cm}^{-1}$ , 非线性吸收系数为  $(9.2 \pm 0.2) \text{ cm}/\text{GW}$ , 非线性折射率约为  $2.5 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{W}$ . 在双路 Z-扫描实验中, 通过改变双路光程差确认了单路干涉环的形成时间在 67 ps 以内, 对应 GaAs 光生载流子的超快弛豫过程. 此前的工作都是在非晶固体中看到干涉环, 但 GaAs 晶体不同于非晶固体材料, 不会因为强激光加热效

应引起物理形变, 而是因为强脉冲激光作用 GaAs 晶体的非线性效应, 局部地改变了 GaAs 晶体的折射率, 从而导致了光程差的出现, 让透射光束形成了干涉环. 我们认为, 在其他半导体晶体中也可以看到类似的干涉环.

## 参考文献

- [1] Durbin S D, Arakelian S M, Shen Y R 1981 *Opt. Lett.* **6** 411
- [2] Santamato E, Shen Y R 1984 *Opt. Lett.* **9** 564
- [3] Pilipetski N F, Sukhov A V, Tabiryan N V, Zeldovich B Y 1981 *Opt. Commun.* **37** 280
- [4] He K X, Abeledayem H, Sekhar P C, Venkateswarlu P, George M C 1991 *Opt. Commun.* **81** 101
- [5] Sarkisov S S, Curley M J, Fields A 2003 *Proc. SPIE* **5212** 193
- [6] Karimzadeh R 2012 *J. Opt.* **14** 095701
- [7] Brugioni S, Meucci R 2002 *Opt. Commun.* **206** 445
- [8] Pilla V, Munin E, Gesualdi M R R 2009 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **11** 105201
- [9] Hendry E, Hale P J, Moger J, Savchenko A K, Mikhailov S A 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 097401
- [10] Wang W H, Wu Y L, Wu Q, Hua J J, Zhao J M 2016 *Sci. Rep.* **6** 22072
- [11] Wang X, Yan Y F, Cheng H, Wang Y H, Han J B 2018 *Mater. Lett.* **214** 247
- [12] Hu L L, Sun F, Zhao H, Zhao J M 2019 *Opt. Lett.* **44** 5214
- [13] Jiang Y Q, Ma Y, Fan Z Y, Wang P, Li X H, Zhang Y, Shen J Q, Wang G, Yang Z J, Xiao S, Gao Y L, He J 2018 *Opt. Lett.* **43** 523
- [14] Shi B X, Miao L L, Wang Q K, Du J, Tang P H, Liu J, Zhao C J, Wen S C 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 151101
- [15] Jai Y, Liao Y L, Wu L M, Shan Y X, Dai X Y, Cai H Z, Xiang Y J, Fan D Y 2019 *Nanoscale* **11** 4515
- [16] Zhang Q, Cheng X M, He B, Ren Z Y, Zhang Y, Chen H W, Bai J T 2018 *Opt. Laser Technol.* **102** 140
- [17] Yao J J, Cheng X M, Zhang Q, Tang X J, Chen H W, Bai J T 2019 *J. Phys. Chem. Lett.* **10** 6213
- [18] Sun T J, Shang Y X, Qian X, Ji Y 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 034205 (in Chinese) [孙天娇, 尚雅轩, 钱轩, 姬扬 2018 物理学报 **67** 034205]
- [19] Sun T J, Qian X, Shang Y X, Liu J, Wang K Y, Ji Y 2018 *Sci. Bull.* **63** 531
- [20] Sun T J, Qian X, Shang Y X, Liu J, Wang K Y, Ji Y 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 184204 (in Chinese) [孙天娇, 钱轩, 尚雅轩, 刘剑, 王开友, 姬扬 2018 物理学报 **67** 184204]
- [21] Du W C, Liu S H 1993 *Opt. Commun.* **98** 117
- [22] Yang X Q, Qi S W, Chen K, Zhang C P, Tian J G, Wu Q 2005 *Opt. Mater.* **27** 1358
- [23] Al-Ahmad A Y, Al-Mudhaffer M F, Badran H A, Emshary C A 2013 *Opt. Laser Technol.* **54** 72
- [24] Shuai Z G, Sun X, Fu R L 1991 *Acta Phys. Sin.* **39** 375 (in Chinese) [帅志刚, 孙鑫, 傅柔励 1991 物理学报 **39** 375]
- [25] Wu R, Zhang Y L, Yan S C, Bian F, Wang W L, Bai X D, Lu X H, Zhao J M, Wang E G 2011 *Nano Lett.* **11** 5159
- [26] Wang Y N, Tang Y J, Cheng P H, Zhou X F, Zhu Z, Liu Z P, Liu D, Wang Z M, Bao J M 2017 *Nanoscale* **9** 3547
- [27] Ye P X 2007 *Nonlinear Optics Physics* (Beijing: Peking University Press) pp200–229 (in Chinese) [叶佩弦 2007 非线性光学物理 (北京: 北京大学出版社) 第200—299页]
- [28] Mansoor S B, Ali A S, Wei T H, Hagan D J, Van Stryland E W 1990 *IEEE J. Quantum Electron* **26** 760
- [29] Liu S M, Kang M J, Zhang J Y, Wu Y Q, Xu J J 1991 *Acta Phys. Sin.* **40** 923 (in Chinese) [刘思敏, 康明荐, 张光寅, 武原庆, 许京军 1991 物理学报 **40** 923]

# Interference rings induced by ultrafast laser pulse in GaAs crystal\*

Shang Ling-Ling<sup>1)2)</sup> Qian Xuan<sup>1)2)</sup> Sun Tian-Jiao<sup>1)2)</sup> Ji Yang<sup>1)2)†</sup>

1) (*State key Laboratory of Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

2) (*College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

( Received 3 July 2020; revised manuscript received 13 July 2020 )

## Abstract

Gallium arsenide (GaAs) is an important semiconductor material with direct bandgap and clear-cut absorption edge. High-quality crystal is available, which has excellent performances in the field of high power transmission and luminescence because of high laser damage threshold and high thermal conductivity. Nonlinear optics is of great significance for developing the laser technology, spectroscopy, and optoelectronic devices. The Z-scan technology is a nonlinear measurement method based on the analysis of single beam transmittance. Previous studies mainly focused on the measurement of the nonlinear absorption coefficient of the sample by open-aperture configuration of Z-scan and the nonlinear refractive index of the sample by shut-aperture configuration of Z-scan. We build a dual-channel Z-scan system with variable optical path difference, equipped together with a high speed camera, to observe the spatial distribution of transmitted light. Besides, we find the interference rings induced by nonlinear absorption in semiconductor GaAs crystals. Using three kinds of lasers (continuous-wave laser, 80 MHz femtosecond pulsed laser, 1 kHz femtosecond pulsed laser) to illuminate the GaAs crystal separately, multi-level interference rings come out only when a GaAs crystal wafer is illuminated by a femtosecond pulsed laser. In the single-channel Z-scan experiment, we observe that the interference rings contract or expand regularly when changing pulsed laser intensity incident on the surface of GaAs crystal. The higher the intensity of pulse, the more interference rings appear, and the maximum exiting angle becomes larger. Nonlinear effect of high intensity femtosecond pulsed laser locally changes the refractive index of GaAs crystals, resulting in optical path difference (Kerr lens effect). However, the Kerr lens generated by ultrafast light pulse in GaAs crystal cannot focus a beam as done by an ideal thin lens, leading the transmitted light to form interference rings instead. By analyzing the variation of the interference rings, the nonlinear absorption coefficient and refractive index of GaAs crystal can be obtained. In the dual-channel Z-scan experiment, different interference rings are induced in the GaAs crystal as the path difference between the two pulses changes, as done by the nonlinear transmission power. Thus we obtain the formation time of the interference rings and ascribe it to the ultrafast relaxation process of GaAs carriers.

**Keywords:** coherent interference, nonlinear optics, ultrafast optical pulse, Kerr lens

**PACS:** 42.25.-p, 42.25.Kb, 42.65.-k, 87.15.ht

**DOI:** 10.7498/aps.69.20201055

\* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2016YFA0301202) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11674311).

† Corresponding author. E-mail: [jiyang@semi.ac.cn](mailto:jiyang@semi.ac.cn)