

相干彩虹的形成机制

孙天娇 钱轩 尚雅轩 刘剑 王开友 姬扬

Formation mechanism of coherent rainbows

Sun Tian-Jiao Qian Xuan Shang Ya-Xuan Liu Jian Wang Kai-You Ji Yang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 184204 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180888

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180888>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I18>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种新型光学微腔的理论分析

Theoretical analysis of new optical microcavity

物理学报.2018, 67(14): 144201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180067>

基于合金介电常数的可控特性增强光子自旋霍尔效应

Enhanced photonic spin Hall effect due to controllable permittivity of alloy film

物理学报.2018, 67(6): 064201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20171824>

偏振双向衰减对光学成像系统像质影响的矢量平面波谱理论分析

Analysis of the influence of diattenuation on optical imaging system by using the theory of vector plane wave spectrum

物理学报.2017, 66(8): 084202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.084202>

环形光束锥形衍射出射光场偏振特性及光场调控

Polarization characteristic and control of the conical diffracted output field under annular beam

物理学报.2017, 66(12): 124202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.124202>

角向偏振无衍射光束的传输特性及其偏振态研究

Polarization and propagation characteristics of the azimuthally polarized non-diffracting beam

物理学报.2015, 64(6): 064201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.064201>

## 相干彩虹的形成机制\*

孙天娇<sup>1)2)</sup> 钱轩<sup>1)2)</sup> 尚雅轩<sup>1)2)</sup> 刘剑<sup>1)2)</sup> 王开友<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, 物理科学学院, 北京 100049)

(2018年5月4日收到; 2018年7月5日收到修改稿)

用一束白光激光聚焦照射液体(水、丙酮、无水乙醇、汽水等)或固体(冰、有色玻璃、塑料、彩色蜡等), 出现了多级的彩色干涉环, 即相干彩虹. 高强度白光局部地加热了液体(固体), 改变了它的密度(以及折射性质), 从而导致光程差的出现, 不同波长的光都发生干涉, 形成了彩色的干涉环. 有色玻璃在反射模式下也出现了相干彩虹, 此时的干涉完全来自于玻璃表面轮廓的变化, 并且无参数拟合的结果定量地符合观测到的干涉图案.

**关键词:** 相干干涉, 自相位调制, 热透镜效应, 光学非线性效应

**PACS:** 42.25.-p, 42.25.Hz, 42.65.-k

**DOI:** 10.7498/aps.67.20180888

## 1 引言

“赤橙黄绿青蓝紫, 谁持彩练当空舞.” 雨后彩虹是自然界中常见的现象, 太阳光因为空气中的水滴而发生折射和反射, 不同波长的光其折射率不同, 从而形成彩色的半圆环, 也就是虹和霓. 在合适的天气条件下, 大气中的冰晶也可以形成彩虹甚至幻日. 这些现象只涉及光的折射和反射, 它们是非相干的光学现象, 而牛顿环则是一种相干的光学现象. 凸透镜和玻璃平面接触, 二者之间会形成空气膜, 在白光的照射下, 经过球面和平面之间所形成的空气膜上、下表面反射的两束光发生干涉, 从而出现中间疏、边缘密的彩色同心圆环<sup>[1]</sup>.

用单色激光聚焦照射液晶<sup>[2]</sup>、茶水<sup>[3]</sup>、染料<sup>[4-6]</sup>、纳米材料的悬浊液<sup>[7-17]</sup>、醇类溶剂<sup>[18]</sup>, 都观察到了干涉环. 此外在固体材料如聚合物薄膜<sup>[19-21]</sup>中也观察到了类似的干涉环. 最近, 我们使用白光脉冲光纤激光器发出的高强度的、高定向性的白光激光, 在多种液体纯溶剂中观察到了彩色

干涉环(相干彩虹)<sup>[22]</sup>, 同时在多种固体中也观察到了同样的现象<sup>[23]</sup>. 本文详细报道了这些相干彩虹现象, 阐明其形成机制. 高强度白光的加热改变了材料的密度(以及折射性质)、产生了光程差, 由此导致的干涉效应形成了彩色干涉环, 也就是相干彩虹. 在此过程中, 液体中的对流过程和微气泡扮演了重要角色. 在反射模式下, 有色玻璃表面轮廓因加热而发生变化, 从而导致了干涉形成相干彩虹所需要的光程差. 在这种情况下, 无参数拟合的结果定量地符合观测到的干涉图案, 证明了我们提出的物理机制.

## 2 实验系统与结果

实验装置如图1(a)所示, 聚焦后的激光照射在待测样品上(固体材料或者是放在比色皿中的液体), 透射光照射在成像屏IS1上, 而反射光照射在IS2上. 大多数实验采用了白光脉冲光纤激光器, 其光谱范围为400—2400 nm, 重复频率在0.1—25 MHz连续可调(在本文报道的实验中, 主要采用

\* 国家重点研发计划(批准号: 2016YFA0301202)、国家自然科学基金(批准号: 11674311, 61674146, 61774144)、中国科学院战略先导专项(批准号: XDPB06)和王宽诚教育基金会资助的课题.

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

的重复频率是1—2 MHz), 脉宽约为100 ps, 聚焦后的光斑大小约为30 μm, 最大平均功率约为2 W. 有些实验采用了He-Ne激光器或者半导体绿光激光器.

透射模式下, 我们以多种凝聚态物质为样品, 都观察到了多级的同心彩色环(相干彩虹), 例如: 水、丙酮、无水乙醇甚至汽水等液体; 冰、有色玻璃、塑料以及彩色蜡等固体. 在反射模式下, 有色玻璃很容易出现很好的干涉图案, 而其他样品尚未观察到干涉图案.

一些典型结果如图1所示. 这些相干彩虹都是多级的环形结构, 而且是中心密、外围疏. 液体的相干彩虹往往会显著地偏离圆对称(水, 图1(b);

丙酮, 图1(c); 无水乙醇, 图1(d); 汽水, 图1(e)). 而固体材料就要圆得多(冰, 图1(f); 透明塑料棒, 图1(g); 透明固体蜡, 图1(h); 反射模式下的有色玻璃, 图1(i)). 这些干涉图案有些像牛顿环, 但是也有显著不同的地方. 牛顿环是非常对称的一组同心圆, 但这里观察到的相干彩虹并非完美的同心圆, 而是存在一定的畸变. 白光照明下, 牛顿环的中心处是暗的圆斑, 其周围为一些彩色圆环, 从中心向外, 不同单色光各自形成的环错开得越来越大<sup>[1]</sup>, 但是环间距越来越密; 相干彩虹的中心处可明可暗, 形状接近于圆形, 而环间距从中心向外越来越疏. 所以, 相干彩虹虽然和牛顿环有类似之处, 但并不是牛顿环.

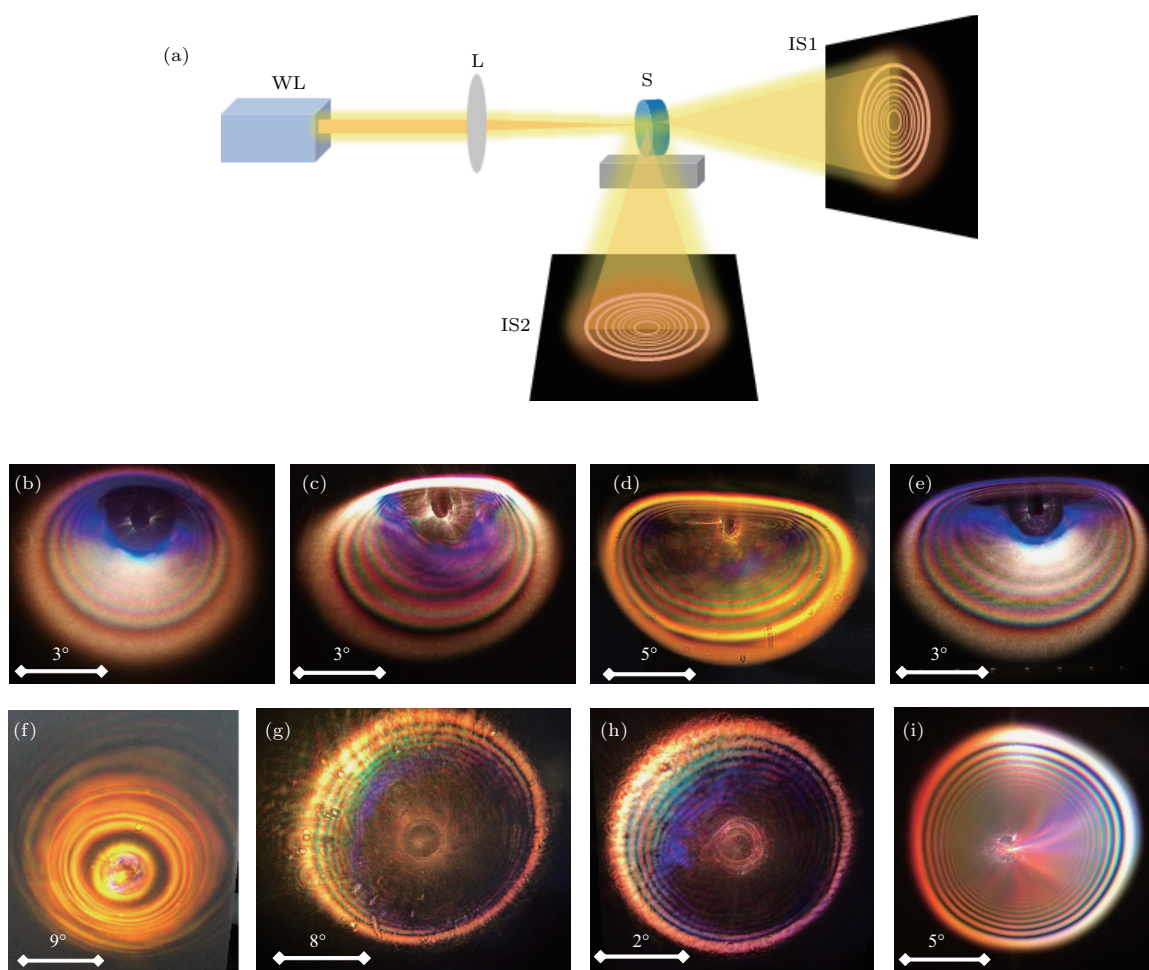


图1 相干彩虹 (a) 实验装置示意图, 白光脉冲激光器(WL)发出的一束白光经焦距约为5 cm的透镜(L)聚焦照射到样品(S)上, 透射光照射在成像屏IS1上, 反射光照射在IS2上; (b)—(i)不同材料里出现的相干彩虹: (b)水, (c)丙酮, (d)无水乙醇, (e)汽水, (f)冰, (g)透明塑料棒, (h)固体蜡, (i)有色玻璃(反射模式); 图中的标尺给出了出射光束的张角大小

Fig. 1. Coherent rainbows. (a) Schematics of the experimental setup. A pulsed white laser (WL) is focused into the sample (S) by a lens with focal length about 5 cm, the transmitted light shines on the image screen IS1, while the reflected light shines on the IS2. (b)–(i) Coherent rainbows from different materials: (b) water, (c) acetone, (d) absolute ethyl alcohol, (e) soft drink, (f) ice, (g) plastics, (h) wax, (i) colored glass (in reflection mode). Scale bar shows the size of the outgoing beam.

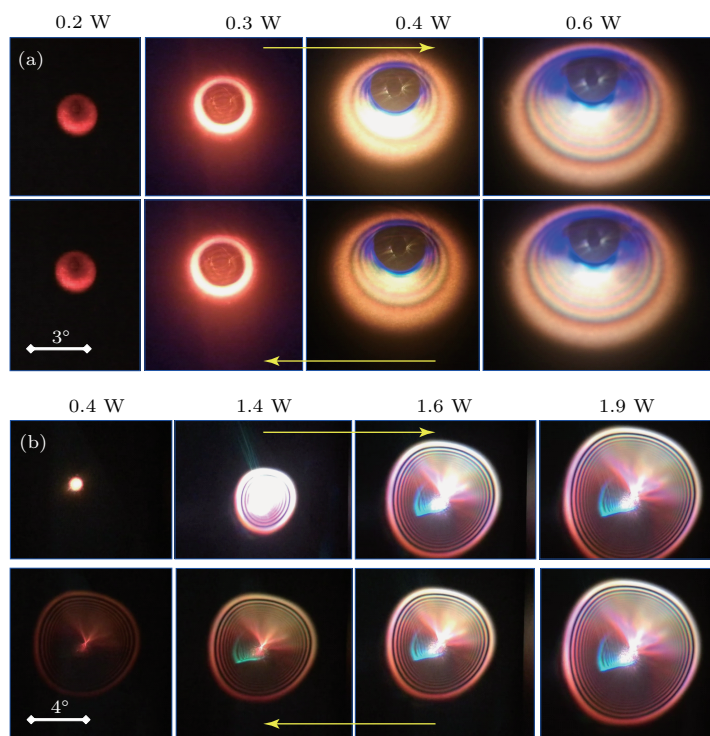


图2 从零开始逐渐增大白光光强再逐渐减小光强(箭头方向为光强增大方向)情况下干涉环的变化 (a) 样品为水; (b) 样品为有色玻璃

Fig. 2. Coherent rainbows changes when the power of the white light laser is increased from zero to maximum and then is reduced from maximum to zero, as indicated by the direction of arrow: (a) The sample is water; (b) the sample is colored glass.

对于液体样品, 从零开始逐渐增大白光光强, 成像屏上起初是一个光斑, 随着光强的增大逐渐变大, 出现越来越多的圆环; 在减小白光光强时, 干涉环随着光强的减小而逐渐减小直到变为光斑并消失, 整个变化过程与增大光强时相反, 是可逆的, 如图2(a)所示<sup>[22]</sup>(参见 video-1 (online)).

对于不同的固体样品, 干涉环随着白光光强的变化过程并不总是可逆的. 以有色玻璃为例, 在反射模式下, 让白光功率从零慢慢逐渐增大, 起初没有干涉环出现, 当功率增大到约1.4 W时, 开始出现干涉环, 且随着白光功率的增大而不断增大. 随后减小白光功率, 干涉环随之变小, 当功率减小到1.6 W时, 圆环大小不再变化, 而是随着功率的减小而变暗直至消失. 具体结果如图2(b)所示<sup>[23]</sup>(参见 video-2 (online)).

### 3 理论分析

这里先利用实验观察排除了几种可能的模型, 这些模型此前被用来解释液体中出现的类似干涉环. 然后给出相干彩虹的形成机制, 并对反射模式里有色玻璃出现的相干彩虹进行定量研究, 无参数

拟合的结果定量地符合观测到的干涉图案.

#### 3.1 相关模型

关于液体(特别是纳米材料悬浊液)中出现的类似干涉环, 此前有几种不同的解释, 包括光学非线性效应<sup>[4]</sup>、空间自相位调制<sup>[8]</sup>和热透镜效应<sup>[13]</sup>. 通过分析观察到的实验现象, 我们认为这些都不是相干彩虹的形成机制.

通过绿光激光与白光激光共线的实验(图3(a)), 我们发现, 当一束532 nm绿光与白光共线照射水时, 绿光也能出现单色环. 在样品后方放置一个532 nm的滤光片, 可以发现, 与白光的干涉环相比, 绿光的干涉环成环效果较差, 边缘较为模糊(图3(b)). 挡住白光, 仅用绿光照射样品则不会出现干涉环(图3(c)), 挡住绿光, 白光的单色环会整体变暗(图3(d)), 具体可见 video-3 (online). 在合适的样品里(如绿色透明蜡), 单独用绿光激光也可以看到干涉圆环, 与白光激光器的结果相差不大, 而这两者的最大瞬时功率相差好几个数量级. 根据这两个观察结果, 我们认为相干彩虹不是来自于光学非线性效应.

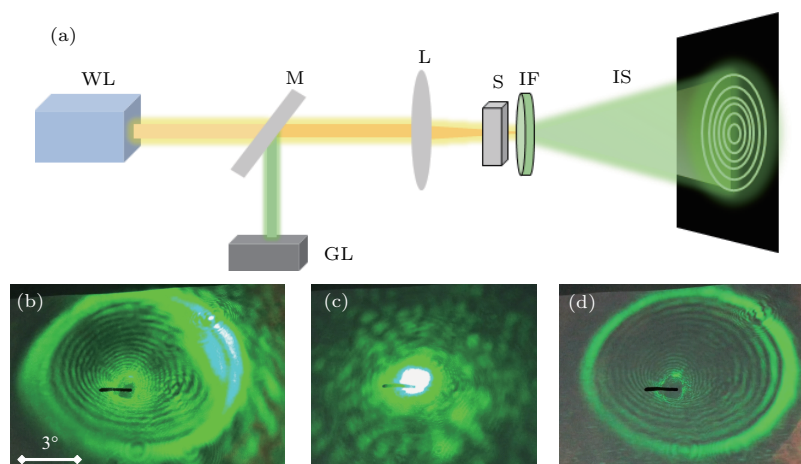


图3 双激光共线实验 (a) 实验装置示意图, 白光脉冲激光器 (WL) 发出的一束白光与半导体绿光激光器 (GL) 发出的一束绿光共线 (M 为半透半反镜) 经焦距约为 5 cm 的透镜 (L) 聚焦照射到样品 (S) 上, 样品后方放置 532 nm 干涉滤光片 (IF), 在成像屏 (IS) 上出现绿色干涉环; (b) 白光和绿光共线照射水得到的绿色干涉环; (c) 挡住白光, 仅用绿光照射水得到的绿色干涉环; (d) 挡住绿光, 仅用白光照射水得到的绿色干涉环

Fig. 3. Collinear experiments with two lasers. (a) A white laser (WL) and a green laser (GL) are aligned co-linearly and focused into the sample (S) by a lens (L) with focal length about 5 cm. M is a half reflecting mirror. A 532 nm interference filter (IF) is placed behind the sample. Single color rings are observed on the image screen IS. (b) Green rings appear when a white laser and a green laser are aligned co-linearly and focused into the water. (c) No rings appear when the white light is blocked. (d) Green rings appear darker when the green laser is blocked.

空间自相位调制效应需要利用光改变材料中的电子分布. 但是, 用白光照射多种纯溶剂以及多种固体材料如塑料、蜡等, 在这些液体和固体中并没有可以自由移动的电子, 却仍然能观察到相干彩虹. 因此我们认为, 相干彩虹也不是空间自相位调制的结果.

对于液体样品, 相干彩虹大多严重偏离轴对称性, 热透镜效应只涉及热的传导, 应该保持轴对称性. 白光聚焦照射有色玻璃时, 让光强从零开始逐渐增大, 起初并不会出现干涉环, 当光强增大到一定程度, 才开始出现相干彩虹. 然后再逐步减小光强, 干涉环慢慢变小, 但是在到达一定阈值后就不再变小, 而是变暗 (参见 video-2 (online)). 如果是热透镜效应, 那么在激光的照射下, 可以很快地在局部形成温度梯度, 从而产生干涉环. 但是实验观测表明, 情况并非如此. 根据这两个观察结果, 我们认为热透镜效应并不是相干彩虹的形成机制.

需要注意的是, 我们在上面的这些定性讨论并没有涉及液体中因加热引起的对流效应<sup>[4,6,12,24]</sup>, 这将在下文讨论.

### 3.2 相干彩虹的形成机制 (定性的模型)

无论是透射模式还是反射模式, 相干彩虹的形成都是因为出现了光程差. 在透射模式下, 高强度

白光的局部加热改变了样品的密度, 因而改变了折射性质, 产生光程差; 而在反射模式下, 高强度白光的局部加热使得有色玻璃局部熔化, 表面的形变导致了光程差. 由于光程差的存在, 各个波长的光都发生相互干涉, 形成彩色干涉环.

样品内局部加热后, 其密度的具体分布无法得知. 虽然可以根据热传导方程和物质的热学性质进行计算 (也许还要考虑对流), 但这些计算太繁琐, 而且需要人为地设定一些参数. 为了定性地说明相干彩虹的形成机制, 我们不妨假设白光透过样品后的光程差可能呈现高斯状分布, 与激光光强的空间分布类似, 如图 4(a) 所示. 最大光程差  $\Delta l$  的大小决定了相干彩虹的环的数目, 而光程差的径向梯度决定了环的大小 (也就是出射方向). 相干彩虹的环数  $n = \Delta l / \lambda$ . 光程差的径向梯度如图 4(b) 所示, 最高点对应最大出射角  $\phi_{\max}$ , 这就决定了相干彩虹的最外环的大小. 对于比这个更小的角度 (如图 4(b) 中所示的  $\phi_1$ ), 总是有两条不同的路径使得两个分光束出射 (对应于图中的  $r_1$  和  $r'_1$ ), 它们干涉的结果就是相干彩虹里较小的环.

在白光水平地照射液体时, 由于白光局部加热产生大量微小气泡, 同时液体会发生对流, 气泡不断上升, 气泡的分布具有上下不对称性<sup>[22]</sup>, 导致光程差梯度在这两个方向上存在差异. 因此, 液体所

产生的相干彩虹上下不对称, 上面环数较密(因为上方的气泡更多, 平均密度变化得更慢, 所以出射角度就会小一些). 而当白光自下而上地垂直照射液体时, 虽然气泡还是不断上升, 但是气泡在以光传播方向为轴的分布是对称的, 因此干涉环也就是对称的. 此前的一些工作也注意到了对流的作用, 特别是Sarkisov小组<sup>[4]</sup>和Karimzadeh<sup>[6,24]</sup>的工作.

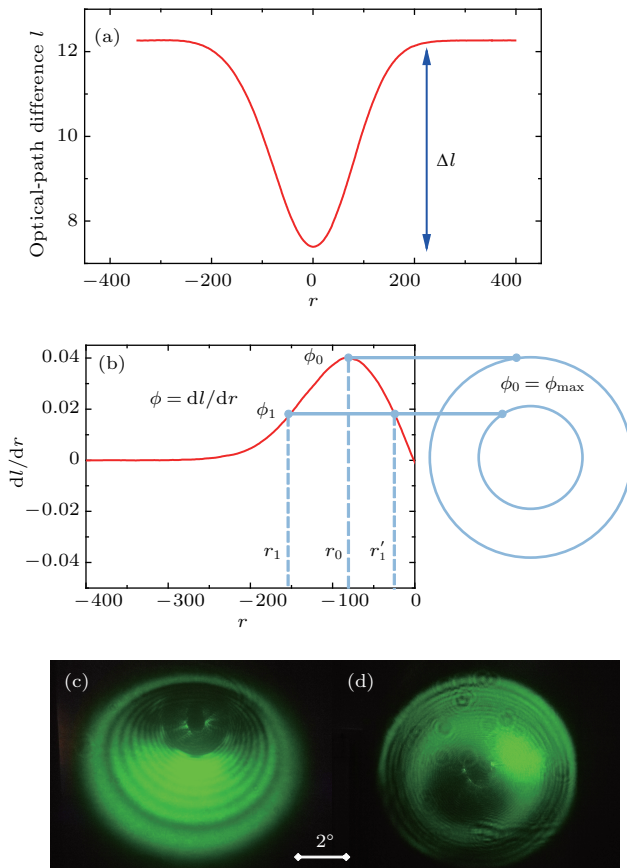


图4 相干彩虹的形成机制示意图 (a) 白光激光垂直照射样品后的光程差  $l$  在样品径向上的分布; (b) 由图4(a)得到的光程差梯度(左半部分),  $\phi$  为出射角(由光程差在  $R$  方向上的导数决定),  $\phi_0$  为最大出射角,  $r_1$  和  $r'_1$  位置处对应的两束光出射方向相同, 都是  $\phi_1$ ; (c) 水平入射的白光照射水得到的相干彩虹, 经过 532 nm 干涉滤光片滤光后的结果; (d) 白光自下而上照射水得到的相干彩虹, 经过 532 nm 干涉滤光片滤光后的结果

Fig. 4. Schematics of the formation mechanism of the coherent rainbows: (a) Optical path difference along the radial direction with the white laser focused into the sample; (b) derivative of the optical path difference along the radial direction (the left part),  $\phi$  is the outgoing angle which determined by the derivative and  $\phi_0$  is the maximum angle, two sub-beams at  $r_1$  and  $r'_1$  have the same outgoing angle  $\phi_1$ ; (c) coherent rainbows with an 532 nm interference filter, the white laser goes through the water sample horizontally; (d) coherent rainbows with an 532 nm interference filter, the white laser goes through the water sample from bottom to top.

我们认为, 此前的工作用单色激光照射悬浊液看到干涉环的原因是: 各种悬浊液更容易吸收单色激光的能量(很多纳米材料对光的吸收率都很大), 从而引起密度(以及折射率)的变化. 在此过程中, 甚至可以产生微小气泡, 而气泡和液体的差别, 要远大于任何非线性效应带来的差别.

在增大光强的过程中, 材料内部的温度升高, 密度变小. 对于液体而言, 最大光程差  $\Delta l$  总是随着光强的变化而变化的, 因为液体内部密度更多依赖于气泡; 而对于固体而言, 光强越大内部更容易熔化, 最大光程差  $\Delta l$  随之变大, 所以环数变多.

在达到最大光强以后, 逐渐减小光强. 因为液体具有流动性, 局部密度可以恢复到从前, 所以相干彩虹就是可逆的; 而局部熔化的固体在凝固过程中很难回到从前的状态, 相干彩虹就不一定是可逆的了.

### 3.3 相干彩虹的形成机制(定量的分析)

上述分析只能定性地说明确彩虹的形成机制, 下面利用反射模式进行更加详细的定量研究.

白光照射到有色玻璃表面并被反射, 在成像屏 IS2 上出现了相干彩虹(图5(a)). 通过显微镜可以观察到, 高强度白光的加热使得有色玻璃发生了局部变形(图5(b)), 台阶仪的测量结果表明, 玻璃表面形成了高斯状凸起(图5(c)).

当白光以入射角  $\gamma$  照射有色玻璃时, 总会存在两个分光束同时照射到有色玻璃表面凸起部分两个斜率均为  $\alpha$  的位置  $(r_1, h_1)$  和  $(r'_1, h'_1)$ , 如图5(d)所示, 这两束光将朝着同一方向反射出去(出射张角即出射方向与入射方向的夹角为  $2\alpha$ ); 切线 1 和切线 1' 平行, 且距离为  $d$ ,  $\theta$  为入射光与切线的夹角,  $\Delta h$  为两个入射点的垂直高度差,  $\Delta r$  为两个入射点的径向距离. 类似于平行板干涉, 当光程差是波长的整数倍即满足  $2d \sin \theta = n\lambda$  时, 来自平行平面的反射光就会发生相长干涉. 易知,  $\theta = \gamma - \alpha, \delta = \alpha$ ; 根据台阶仪测量结果, 可知斜率  $\alpha \ll 1$ , 这个值也远远小于其他参数, 可以近似地认为  $\theta = \gamma$ . 根据图5(d)中关系, 两切线之间的距离  $d \approx \Delta h - \Delta r \cdot \alpha$ , 因此光程差

$$2d \sin \theta \approx 2 \sin \gamma (\Delta h - \Delta r \cdot \alpha). \quad (1)$$

光程差随出射张角  $\phi$  ( $\phi = 2\alpha$ ) 的分布如图5(e)所示.

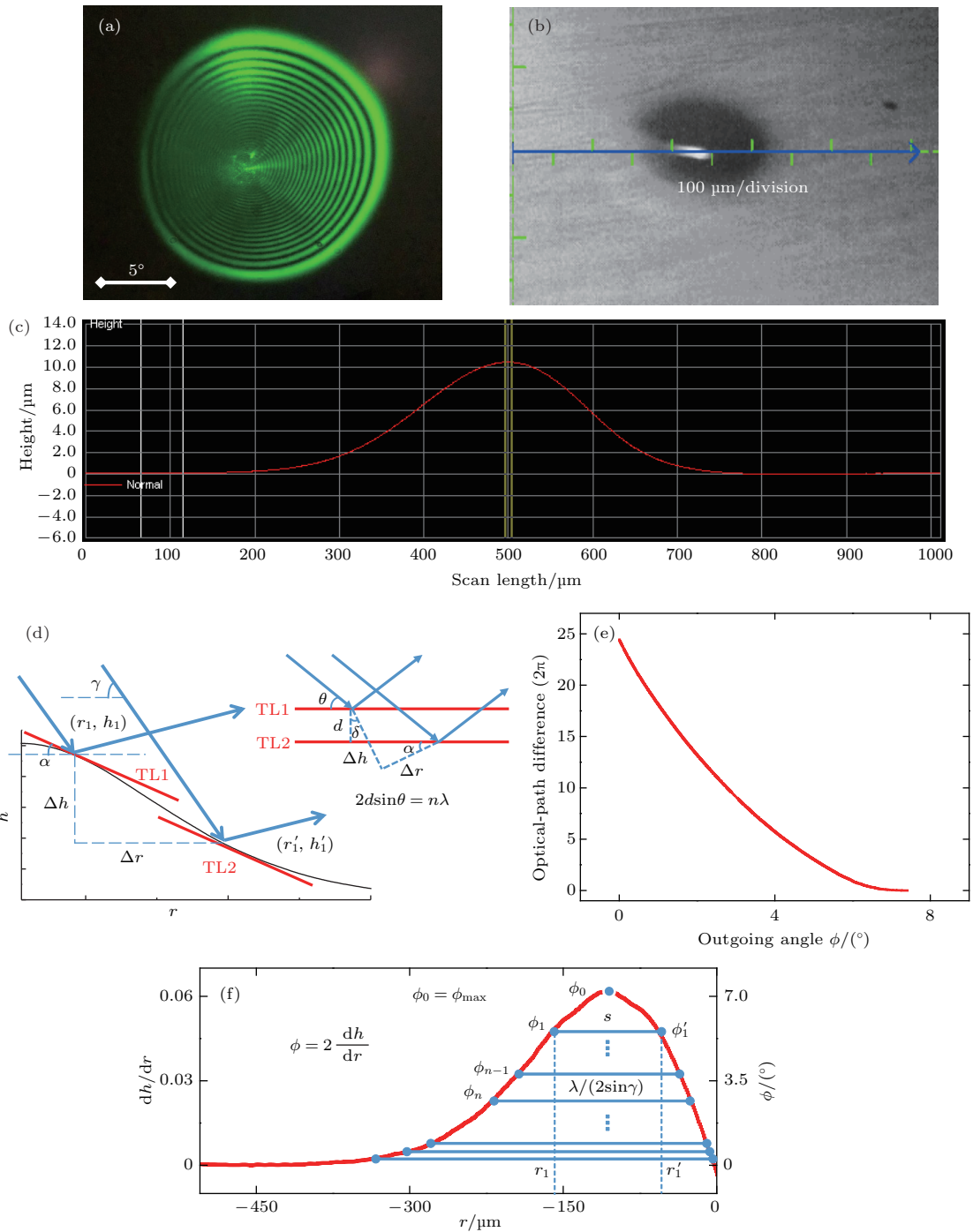


图5 相干彩虹的形成机制 (a) 反射模式下的相干彩虹, 经过 532 nm 滤光片后呈现出清晰的环状结构; (b) 显微镜里看到的经白光照射后的样品表面; (c) 台阶仪测量结果, 样品表面呈现出高斯状突起; (d) 光以入射角  $\gamma$  照射到有色玻璃表面, 两个分束光同时照射到有色玻璃表面上两个斜率均为  $\alpha$  的位置  $(r_1, h_1)$  和  $(r'_1, h'_1)$ ,  $\theta$  为入射光与切线的夹角,  $d$  为切线 1 和切线 1' 之间的距离,  $\Delta h$  为两个入射点的垂直距离,  $\Delta r$  为两个入射点的径向距离; (e) 光程差随出射角的分布; (f) 光程差的径向梯度 (左半部分),  $\phi$  为出射角,  $\phi_0$  为最大出射角,  $r_1$  和  $r'_1$  位置处对应的两束光出射方向相同, 即  $\phi_1 = \phi'_1$ ,  $s$  为  $\phi_0$ ,  $\phi_1$  和  $\phi'_1$  三点之间区域的面积

Fig. 5. Formation mechanism of the coherent rainbows: (a) Coherent rainbows from a colored glass in the reflection mode; (b) the morphology of the colored glass illuminated by the white laser, as viewed under a microscope; (c) the surface topography of the colored glass along the dash line in (b), which is Gaussian as measured by a step profiler; (d) two sub-beams at  $(r_1, h_1)$  and  $(r'_1, h'_1)$ , with the incident angle  $\gamma$ , illuminate on the surface of colored glass, where they have the same slope  $\alpha$ ,  $\theta$  is the angle between the incident light and the tangent line,  $d$  is the distance of these two tangent lines,  $\Delta h$  and  $\Delta r$  are the height difference and the radial distance between  $(r_1, h_1)$  and  $(r'_1, h'_1)$  respectively; (e) optical path difference along the outgoing angle; (f) the derivative of the surface profile fig. 4(c) (the left part),  $\phi$  is the outgoing angle,  $\phi_0$  is the maximum angle, two sub-beams at  $r_1$  and  $r'_1$  have the same emitting direction  $\phi_1$ ,  $s$  is the area between  $\phi_0$ ,  $\phi_1$  and  $\phi'_1$ .

根据台阶仪测量结果得到的光程差的径向梯度,可以得到光的出射张角如图 5(f) 所示.  $\phi_0$  为最大出射角, 假设  $\phi_1$  和  $\phi'_1$  分别为  $(r_1, h_1)$  和  $(r'_1, h'_1)$  两处的出射张角, 而且  $\phi_1 = \phi'_1$ . 由图 5(f) 中可知,  $\phi_0$ ,  $\phi_1$  和  $\phi'_1$  之间的面积

$$s = \int_{r_1}^{r'_1} \alpha dr - (r'_1 - r_1) \cdot \alpha = \Delta h - \Delta r \cdot \alpha. \quad (2)$$

当相长干涉时, 每一对相同出射角对应的面积  $s$  均为波长的整数倍除以  $2 \sin \gamma$ . 也就是说, 相邻两个干涉极大值的出射角  $\phi_{n-1}$  和  $\phi_n$  之间的面积 (图 5(f) 中阴影区域) 正好是  $\lambda/(2 \sin \gamma)$ .

### 3.4 实验结果模拟

利用 (1) 式和台阶仪测量的结果 (图 5(c)), 模拟了干涉极大值的分布, 如图 6(a) 所示. 可以发现, 中心处的环很密, 随着出射角的增大, 环越来越稀疏, 这很好地符合了实验中观测到的干涉环内密外疏的特征, 而且环的总数与观测结果相同. 通过图 5(c) 和图 5(e) 模拟得到了相干彩虹经过 600 nm 滤光片滤光后的单色环 (图 6(b)), 与实验中观察到的单色环 (图 6(c)) 较为接近. 实验观测的相干彩虹不是完全的圆对称图案, 因为正如台阶仪测量的结果表明的那样 (数据没给出), 有色玻璃表面的凸起并不是完全圆对称的.

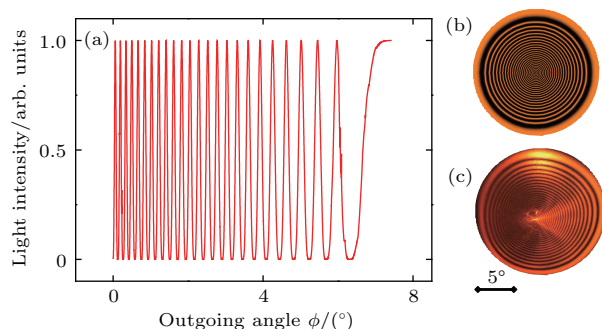


图 6 相干彩虹的模拟结果 (波长选择为 600 nm) (a) 模拟得到的干涉图案的径向分布; (b) 模拟得到的干涉图案; (c) 有色玻璃实验中观察到的相干彩虹 (经过 600 nm 干涉滤光片滤光后的结果)

Fig. 6. Simulation results (wavelength is set to be 600 nm): (a) Simulated interference pattern along the radial direction; (b) simulated interference pattern; (c) observed coherent rainbows from colored glass.

有色玻璃能很好地吸收光热而熔化, 从而产生光程差, 而同样条件下实验室里常见的光学玻璃如反射镜、透镜等, 却不能出现相干彩虹, 这是因为这

些光学元件纯度都较高, 对光的吸收少, 大部分光直接透过无法使其融化, 所以无法形成相干彩虹.

在增大白光功率的过程中, 有色玻璃被持续加热, 局部不断熔化, 表面形变增大, 因而光程差随之增大, 相干彩虹的环数增多. 而在减小白光功率的过程中, 有色玻璃逐渐冷却, 表面凸起变小, 因而干涉环缩小, 随后有色玻璃局部开始凝固, 表面形变不再变化, 继续减小光强就不再引起光程差的变化, 干涉环的环数和大小也不会发生变化, 只是亮度变暗, 直至看不见.

由此可见, 我们不需要引入任何参数, 完全利用实验测量的结果, 就很好地模拟了观测到的干涉环. 这进一步说明了本文理论解释是正确的.

## 4 结 论

我们在多种液体和固体材料中观测到了相干彩虹, 无论是透射模式还是反射模式, 相干彩虹的形成机制都在于光程差带来的干涉效应: 透射模式下, 光程差的出现源于白光局部的加热改变了液体 (固体) 的密度以及折射性质; 反射模式下, 光程差来自于有色玻璃表面的形变. 光程差的存在使得不同波长的光都发生干涉, 形成了彩色的干涉环. 最大光程差  $\Delta l$  决定了相干彩虹环的数目, 光程差的径向梯度 (出射方向) 决定了干涉环的大小. 液体中相干彩虹的显著不对称性的原因在于液体中气泡因对流导致的不对称分布. 改变光强时, 液体样品和固体样品的变化趋势有所不同是因为液体中密度的改变依赖于气泡, 气泡随着光强的改变近似呈线性; 而固体中密度的改变源于材料的相变, 并不总是随着光强而线性变化. 我们以有色玻璃为样品在反射模式下详细研究了相干彩虹的形成机制, 而且定量的拟合结果与实验现象符合得很好.

感谢与中国科学院半导体研究所孙宝权研究员、中国科学院物理研究所赵继民研究员和翁羽翔研究员进行的有益讨论.

### 参考文献

[1] Born M, Wolf E (translated by Yang J S et al.) 2005 *Elements of the Theory of Interference and Interferometers in Principles of Optics* (Beijing: Electronics Industry Press) p268 (in Chinese) [玻恩 M, 沃耳夫 E 著 (杨葭荪等译) 2005 光学原理: 光的传播、干涉和衍射的电磁理论 (上册) (北京: 电子工业出版社) 第 268 页]



- [2] Durbin S D, Arakelian S M, Shen Y R 1981 *Opt. Lett.* **6** 411
- [3] He K X, Abeleldayem H, Sekhar P C, Venkateswarlu P, George M C 1991 *Opt. Commun.* **81** 101
- [4] Sarkisov S S, Curley M J, Fields A 2003 *Proc. SPIE* **5212** 193
- [5] Mathews S J, Kumar S C, Giribabu L, Rao S V 2007 *Opt. Commun.* **280** 206
- [6] Karimzadeh R 2012 *J. Opt.* **14** 095701
- [7] Pu S L, Yao L F, Guan F F, Liu M 2009 *Opt. Commun.* **282** 908
- [8] 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
- [9] 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
- [10] Wu Y L, Wu Q, Sun F, Cheng C, Meng S, Zhao J M 2015 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **112** 11800
- [11] Zhang J D, Yu X F, Han W J, Lü B S, Li X H, Xiao S, Gao Y L, He J 2016 *Opt. Lett.* **41** 1704
- [12] Li X H, Liu R K, Xie H H, Zhang Y, Lü B S, Wang P, Wang J H, Fan Q, Ma Y, Tao S H, Xiao S, Yu X F, Gao Y L, He J 2017 *Opt. Express* **25** 18346
- [13] 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
- [14] Wu L M, Xie Z J, Lu L, Zhao J L, Wang Y Z, Jiang X T, Ge Y Q, Zhang F, Lu S B, Guo Z N, Liu J, Xiang Y J, Xu S X, Li J Q, Fan D Y, Zhang H 2018 *Adv. Opt. Mater.* **6** 1700985
- [15] Wang X, Yan Y F, Cheng H, Wang Y H, Han J B 2018 *Mater. Lett.* **214** 247
- [16] Kadhum A J, Hussein N A, Hassan Q M A, Sultan H A, Al-Asadi A S, Emsshary C A 2018 *Optik* **157** 540
- [17] 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
- [18] Zhang Q, Cheng X M, He B, Ren Z Y, Zhang Y, Chen H W, Bai J T 2018 *Opt. Laser Technol.* **102** 140
- [19] Du W C, Liu S H 1993 *Opt. Commun.* **98** 117
- [20] Yang X Q, Qi S W, Chen K, Zhang C P, Tian J G, Wu Q 2005 *Opt. Mater.* **27** 1358
- [21] al-Ahmad A Y, al-Mudhaffer M F, Badran H A, Emsshary C A 2013 *Opt. Laser Technol.* **54** 72
- [22] 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]
- [23] Sun T J, Qian X, Shang Y X, Liu J, Wang K Y, Ji Y 2018 *Sci. Bull.* **63** 531
- [24] Karimzadeh R 2013 *Opt. Commun.* **286** 329

# Formation mechanism of coherent rainbows\*

Sun Tian-Jiao<sup>1)2)</sup> Qian Xuan<sup>1)2)</sup> Shang Ya-Xuan<sup>1)2)</sup> Liu Jian<sup>1)2)</sup>

Wang Kai-You<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, School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

( Received 4 May 2018; revised manuscript received 5 July 2018 )

## Abstract

Focusing white laser into samples, many colorful rings (coherent rainbows) come out. Such phenomena have been observed in many materials like water, acetone, absolute ethyl alcohol, soft drink and other liquids, and ice, colored glass, plastics, wax and other solids. From the center of the coherent rainbows to the outer side, the distance between neighboring rings becomes larger and larger. The coherent rainbow is an interference effect, whose optical path difference is induced by locally heating the material with the laser beam. Especially, the coherent rainbows from colored glass in reflection mode can be described with a simple formula, with which simulated results fit the observed interference pattern very well. Several possible mechanisms like nonlinear optical effect, thermal lens effect and self-phase modulation effect are excluded.

**Keywords:** coherent interference, self-phase modulation, thermal lens effect, optical nonlinear effect

**PACS:** 42.25.-p, 42.25.Hz, 42.65.-k

**DOI:** 10.7498/aps.67.20180888

---

\* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2016YFA0301202), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11674311, 61674146, 61774144), the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDPB06), and the K. C. Wong Education Foundation, China.

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