

清水出彩虹

孙天娇 尚雅轩 钱轩 姬扬

Coherent rainbows come from liquids

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

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 034205 (2018) DOI: 10.7498/aps.20172663

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.20172663>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I3>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[光学超振荡与超振荡光学器件](#)

Optical super-oscillation and super-oscillatory optical devices

物理学报.2017, 66(14): 144205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.144205>

[一种含时贝塞尔光束的理论性质研究](#)

Theoretical investigation on a kind of time-dependent Bessel beam

物理学报.2016, 65(14): 144201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.144201>

[从 plasmon 到 nanoplasmonics——近代光子学前沿及液晶在其动态调制中的应用](#)

From plasmon to nanoplasmonics-the frontiers of modern photonics and the role of liquid crystals in tune-able nanoplasmonics

物理学报.2015, 64(12): 124214 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124214>

[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>

[梯度负折射率介质中高斯光束传输特性的研究](#)

Propagation properties of Gaussian beam in gradient negative index of refraction material

物理学报.2014, 63(10): 104205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104205>

## 研究快讯

## 清水出彩虹\*

孙天娇<sup>1)2)</sup> 尚雅轩<sup>1)2)</sup> 钱轩<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)

(2017年12月15日收到; 2017年12月18日收到修改稿)

利用白光脉冲光纤激光器发出的高强度、高定向性的白光, 聚焦地照射水, 可以产生定向的、多级的彩色干涉环, 这就是“相干彩虹”. 脉冲激光加热在水里产生了大小相仿的气泡, 每个气泡成为散射源. 强光导致了空间自相位调制效应, 从而产生了相干彩虹. 已经在多种液体中观测到了这种现象.

**关键词:** 彩虹, 气泡, 空间自相位调制, 相干干涉

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

**DOI:** 10.7498/aps.67.20172663

彩虹是自然界常见的光学现象, 来自于水滴对太阳光的折射效应. 彩虹是非相干的光学现象, 是每个水滴折射光相加的结果. 不同颜色的光, 水的折射率不一样, 进去的是白光, 出来的就是彩虹. 用白光照射水里的气泡, 同样会因为折射效应而形成彩虹.

利用白光脉冲光纤激光器发出的高强度的、高定向性的白光(重复频率 1 MHz, 本文使用的最大平均功率约 0.5 W), 聚焦地照射液体, 可以产生定向的、多级的彩色干涉环, 这就是“相干彩虹”(图 1; 补充材料视频 S1 ([online](#)) 显示了样品为水时, 随着白光光强的增大, 成像屏上的图案逐渐变大, 出现越来越多的圆环; 补充材料视频 S2 ([online](#)) 显示了样品为水时, 光强保持不变, 打开快门后, 成像屏很快出现了相干彩虹). 把 550 nm 的干涉滤光片(带宽为 10 nm) 放在样品前方, 成像屏上就只有一个圆斑(图 2(a)). 把同一个干涉滤光片放在样品后方, 成像屏上就出现圆环, 中间是黑的(图 2(b)). 随着白光激光器功率的增强, 圆环逐渐变大, 并出现了更多的圆环(图 2(c)—(f)).

脉冲激光加热在水里产生了大小相仿的气泡, 每个气泡成为散射源. 气泡散射了白光, 使得图案中心变黑. 单个气泡可能产生干涉图案<sup>[1]</sup>, 但是, 空间位置随机的气泡无法彼此干涉. 在强光的作用下, 空间自相位调制效应<sup>[2]</sup> 产生了相干彩虹. 简单地说, 高强度的激光场把气泡放到了合适的位置上(也可能由于非线性效应<sup>[2]</sup> 或者电离产生的自由电子<sup>[3]</sup> 带来的折射率修正, 具体机理尚需进一步探究), 使得它们能够相长地干涉.

在脉冲激光的作用下, 许多大小相仿、位置合适的气泡发生相干干涉, 产生了高定向性的多级干涉环——相干彩虹(图 1(a) 中最外圈光环的张角大约是 7°). 水平入射光产生了卵圆形的干涉图案, 上下是不对称的, 因为气泡在重力作用下不再是球对称的, 而是轴对称的, 气泡的分布也会因为重力的作用而具有上下不对称性. 把白光垂直地照进水里(沿着气泡的对称轴), 干涉图案就非常圆了, 如图 3 所示(其他波长滤光结果见补充材料图 S1 和图 S2 ([online](#))).

\* 国家重点研发计划(批准号: 2016YFA0301202)、国家自然科学基金(批准号: 11674311)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)

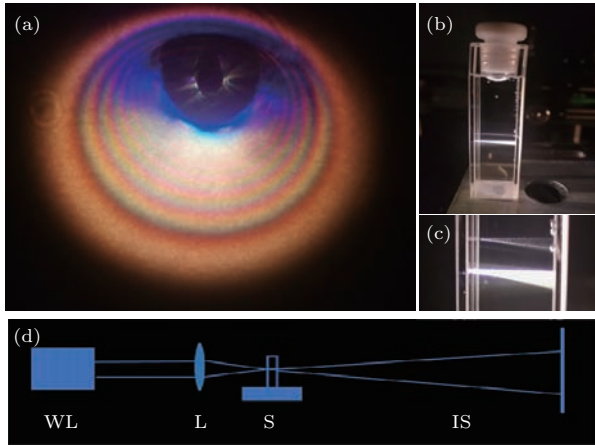


图1 (a) 气泡产生的相干彩虹, 最外圈光环的张角大约是  $7^\circ$ ; (b) 装有水的玻璃样品盒; (c) 图 (b) 的局部放大图, 可以看到激光加热产生的气泡导致了光的散射 (Tyndall 现象) 以及略有发散的前向光 (相干彩虹); (d) 实验装置示意图, 包括白光脉冲光纤激光器 (WL)、焦距约 5 cm 的凸透镜 (L)、样品盒 (S) 和成像屏 (IS, 距离样品约 50 cm)

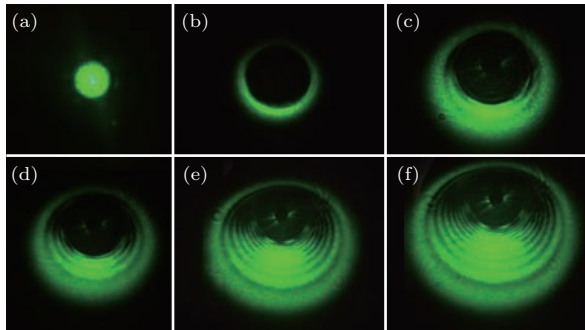


图2 (a)—(f) 随着白光光强的增大, 成像屏上的图案逐渐变大, 由圆斑变为圆环, 进而出现更多的圆环; 这里给出的是用 550 nm 干涉滤光片 (带宽 10 nm) 滤光后的结果; 图 (a) 里的滤光片放在样品前方, 图 (b)—(f) 的滤光片放在样品后方

Fig. 2. As the power of the white light increases, the interference pattern becomes larger and larger, with appearance of more and more circles. The pictures are taken with an interference filter with central wavelength of 550 nm and bandwidth of 10 nm. The filter in panel (a) is in front of the sample. The filters in panels (b)–(f) are behind the sample.

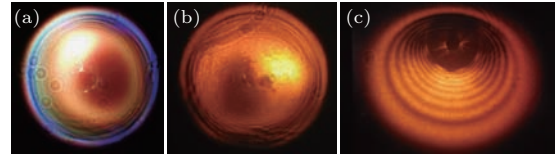


图3 (a) 由下而上地照射样品, 得到了更加对称的相干彩虹; (b) 图 (a) 经过 600 nm 干涉滤光片 (带宽 10 nm) 滤光后的结果; (c) 图 1 (a) 的 600 nm 滤光结果

Fig. 3. (a) Shine the sample from bottom to top and get more circular patterns of coherent rainbows; (b) the same picture as (a) with an 600 nm interference filter; (c) the same picture as Fig. 1(a) with an 600 nm interference filter.

用单色激光照射液晶<sup>[4]</sup>或石墨烯<sup>[5]</sup>悬浊液, 都看到过类似的干涉环, 但是照射纯净的溶剂, 并没有看到干涉环<sup>[5]</sup>. 我们先是在石墨的丙酮悬浊液中观察到了空间自相位调制导致的干涉图案, 继而用白光激光在溶剂 (无论水、丙酮还是汽水) 里都观察到了这种相干彩虹, 尽管在细节上略有不同 (参见补充材料图 S3 (online)).

脉冲式白光的瞬时功率很大、谱线很宽, 液体里杂质 (或微小气泡) 总能吸收某些波长的光, 局部加热液体而产生气泡, 脉冲式激光产生的气泡大小相仿, 高强度的激光场把气泡放到了合适的位置, 就可以相长干涉了.

我们相信, 任何透明液体都可以产生相干彩虹.

感谢中国科学院物理研究所赵继民研究员和中国科学院半导体研究所孙宝权研究员的讨论, 感谢中国科学院半导体研究所孙明飞提供的帮助.

参考文献

[1] Li J M, Wei J Y, Wang X Q, Nan J Y, Yang F 2007 *J. Henan Normal Univ. (Nat. Sci.)* **35** 98 (in Chinese) [李建民, 魏建宇, 王秀清, 南景宇, 杨富 2007 河南师范大学学报 (自然科学版) **35** 98]

[2] Yu Z H, Weng Y X 2010 *Sci. China: Phys. Mech. Astron.* **53** 1060

[3] Wu Y L, Wu Q, Sun F, Cheng C, Meng S, Zhao J M 2015 *PNAS* **112** 11800

[4] Durbin S D, Arakelian S M, Shen Y R 1981 *Opt. Lett.* **6** 411

[5] Wu R, Zhang Y L, Yan S C, Bian F, Wang WL, Bai X D, Lu X H, Zhao J M, Wang A G 2011 *Nano Lett.* **11** 5159

Rapid Communication

# Coherent rainbows come from liquids\*

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

1) (*State Key Laboratory for 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 15 December 2017; revised manuscript received 18 December 2017 )

## Abstract

When the highly-intensive and highly-directional white light from pulsed fiber laser is focused into water, many directional and colorful rings, “coherent rainbows”, are observed. The laser generates bubbles with similar sizes in the water, which serve as scatters. The intensive light leads to spatial self-phase modulation and thus generates the coherent rainbows. Such a phenomenon has been observed in many kinds of liquids.

**Keywords:** rainbow, bubble, spatial self-phase modulation, coherent interference

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

**DOI:** [10.7498/aps.67.20172663](https://doi.org/10.7498/aps.67.20172663)

---

\* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2016YFA0301202), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11674311), and K. C. Wong Education Foundation, China.

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