

文章编号: 0253-2239(2007)07-1301-4

气泡的远场干涉分析及应用*

李建民¹ 杨 富¹ 魏建宇² 王秀清¹ 南景宇¹

(¹ 河北北方学院 物理系, 张家口 075000
² 河南师范大学 物理与信息工程学院, 新乡 453007)

摘要: 提出了一种分析气泡远场干涉的理论模型。平行激光束照射到透明介质中的气泡上, 折射光束与全反射光束在远场发生干涉形成内密外疏圆环状干涉条纹, 推求了两平行出射光线的光程差公式和两光线之间的距离公式, 分析了圆环状干涉条纹内密外疏的原因, 给出了计算干涉条纹存在区域和最高干涉级的方法。通过干涉方法可以测量气泡的直径, 能够用于介质深处气泡尺寸的测量。利用远场干涉对玻璃水箱、平板玻璃、玻璃棱镜中的气泡直径进行了测量, 其中玻璃棱镜中气泡直径测量结果与用阿贝比长仪测量结果对比, 相对差为 0.9%。预期了气泡远场干涉在运动气泡尺寸、泡内气体折射率、透明光疏介质中光密介质球尺寸测量等方面的应用。

关键词: 物理光学; 气泡干涉; 远场分析; 干涉条纹分布

中图分类号: O436.1 文献标识码: A

Far-Field Interferometric Analysis and Application of Bubble

Li Jianmin¹ Yang Fu¹ Wei Jianyu² Wang Xiuqing¹ Nan Jingyu¹

(¹ Department of Physics, Hebei North College, Zhangjiakou 075000
² College of Physics & Information Engineering, Henan Normal University, Xinxiang 453007)

Abstract: A theoretical model of analysis of bubble far-field interference is given, when parallel laser beam is irradiating the bubble in a transparent medium, the interference between refraction beam and total reflection beam comes into being and the thick-inside-and-thin-outside interference rings have taken shape in far field, a formula on optical path length difference and a formula on distance of two parallel exit rays are derived, reasons for thick-inside-and-thin-outside interference rings are analyzed, the method of calculating interference regions and the largest constructive interference ordinal number are given. The diameter of bubble can be measured by method of interference, the size of bubble can be measured in the depths of medium. The diameters of bubbles in the glass water box, plate glass and glass prism have been measured by method of far-field interference, and the measured result of diameter in glass prism by the interference is compared with that by the Abbe comparator, the relative difference of which is 0.9%. The application of measurement in the size of moving bubble, refractive index of gas in bubble, size of optically denser medium ball in a transparent optically thinner medium is expected by method of far-field interference.

Key words: physical optics; bubble interference; far-field analysis; interference fringe distribution

1 引 言

当平行激光束照射透明液体或固体中的气泡时, 激光束的近轴部分经气泡界面两次折射后出射成为折射光束。激光束的远轴部分经气泡界面全反射后出射成为全反射光束, 两出射光束再相遇时必然产生干涉。由于出射光束的非单心性和干涉区域的不同, 干涉的程差关系较为复杂, 为使干涉得到利用, 用远

场干涉模型进行分析, 所得到的光程差公式较为简单, 包含了气泡半径、折射率且仅有一个可测的角度变量, 为气泡尺寸及气泡内气体折射率的干涉法检测提供了理论基础。为介质深处的气泡检测提供了一种方法, 可用于运动气泡的干涉法检测, 亦可适用于使用不同波段光对材料中的气泡进行探测研究。有关气泡的研究涉及材料、化工、生物医学、舰船尾流等

* 河北省教育厅科学研究项目(Z2006410)资助课题。

作者简介: 李建民(1956—), 男, 河北宽城人, 副教授, 主要从事光学、物理测量技术的研究及教学工作。

E-mail: ljmx318@tom.com

收稿日期: 2006-09-28; 收到修改稿日期: 2007-01-08

诸多领域,其光学研究方法大多集中于光通过众多微气泡时的散射^[1~3]、激光全息术^[4]及使用成像或视频技术等,气泡远场干涉模型的建立,使利用激光干涉对气泡进行相关研究和检测成为可能。

2 气泡干涉的远场干涉模型

为解决问题方便,假设气泡为半径等于 r 的理想圆球,泡外介质折射率为 n_1 ,泡内介质折射率为 n_2 ,平行激光束照射到气泡上。

由图 1 所示一近轴光线(入射角小于临界角)以入射角 i_1 入射于气泡界面 a 点,折射角为 i_2 ,经界面两次折射后光线 $a''b''$ 最终以折射角 i_1 出射。一远轴光线(入射角大于临界角)入射于气泡界面 a' 点,全反射光线 $a'b'$ 平行 $a''b''$ 出射。由图 1 可见两出射光线 $a'b'$ 与 $a''b''$ 的光程差

$$\Delta = n_1(ca' + a'c') - n_2aa'', \quad (1)$$

两出射光线的距离 d 与两入射光线的距离相等,图中折射角

$$i_2 = i_1 + \alpha, \quad (2)$$

α 为 a 点处折射光线与入射光线之间的偏向角,亦为半径 oa' 与光轴 $o'o$ 垂线的夹角(图 1 中四处有角标未标角名称都应均为 α),半径 oa' 在垂直于光轴方向的投影为 $r \cos \alpha$,则

$$d = r \cos \alpha - r \sin i_1 = r(\cos \alpha - \sin i_1), \quad (3)$$

由图 1

$$aa'' = 2r \cos i_2, \quad (4)$$

$$ca' + a'c' = \frac{cc'}{\cos \alpha} = (aa'' - 2d \sin \alpha) \frac{1}{\cos \alpha} =$$

$$(2r \cos i_2 - 2d \sin \alpha) \frac{1}{\cos \alpha} =$$

$$2r[\cos(i_1 + \alpha) - (\cos \alpha - \sin i_1) \sin \alpha] \frac{1}{\cos \alpha} =$$

$$2r(\cos i_1 - \sin \alpha),$$

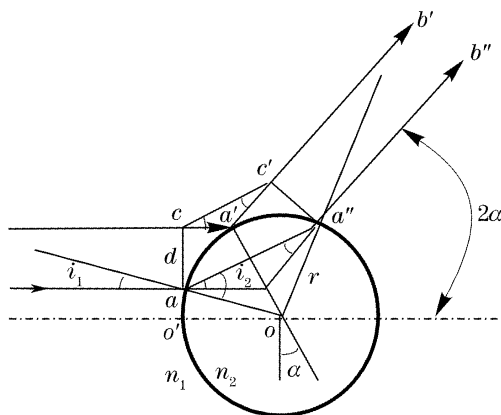


图 1 气泡远场干涉图

Fig. 1 Diagram of bubble far-field interference

将此式和(4)式代入(1)式

$$\begin{aligned} \Delta &= 2n_1 r(\cos i_1 - \sin \alpha) - 2n_2 r \cos i_2 = \\ &= 2r[n_1(\cos i_1 - \sin \alpha) - n_2 \cos(i_1 + \alpha)], = \\ &= 2r[\cos i_1(n_1 - n_2 \cos \alpha) + n_2 \sin i_1 \sin \alpha - n_1 \sin \alpha]. \end{aligned} \quad (5)$$

实践中较容易由出射光测出 2α ,即 α 可测,(3)式和(5)式中 i_1 最好用 α 来表达,由折射定律和(2)式有

$$\begin{aligned} n_1 \sin i_1 &= n_2 \sin i_2 = n_2 \sin(i_1 + \alpha) = \\ &= n_2(\sin i_1 \cos \alpha + \cos i_1 \sin \alpha), \end{aligned}$$

两端同除 $n_1 \cos i_1$ 有

$$\tan i_1 = \frac{n_2}{n_1}(\tan i_1 \cos \alpha + \sin \alpha),$$

即

$$\tan i_1 = \frac{n_2 \sin \alpha}{n_1 - n_2 \cos \alpha},$$

应有

$$\begin{aligned} \cos i_1 &= \frac{n_1 - n_2 \cos \alpha}{\sqrt{(n_1 - n_2 \cos \alpha)^2 + (n_2 \sin \alpha)^2}} = \\ &= \frac{n_1 - n_2 \cos \alpha}{\sqrt{n_1^2 + n_2^2 - 2n_1 n_2 \cos \alpha}}, \end{aligned}$$

$$\sin i_1 = \frac{n_2 \sin \alpha}{\sqrt{n_1^2 + n_2^2 - 2n_1 n_2 \cos \alpha}},$$

将此两式代入(5)式,有

$$\begin{aligned} \Delta &= 2r \left[\frac{(n_1 - n_2 \cos \alpha)^2}{\sqrt{n_1^2 + n_2^2 - 2n_1 n_2 \cos \alpha}} + \right. \\ &\quad \left. \frac{(n_2 \sin \alpha)^2}{\sqrt{n_1^2 + n_2^2 - 2n_1 n_2 \cos \alpha}} - n_1 \sin \alpha \right], \end{aligned}$$

即

$$\Delta = 2r[\sqrt{n_1^2 + n_2^2 - 2n_1 n_2 \cos \alpha} - n_1 \sin \alpha], \quad (6)$$

(3)式变为

$$d = r \left[\cos \alpha - \frac{n_2 \sin \alpha}{\sqrt{n_1^2 + n_2^2 - 2n_1 n_2 \cos \alpha}} \right]. \quad (7)$$

3 气泡干涉的特点

由图 1 可知,气泡远场干涉属于轴对称分波阵面干涉,其干涉条纹必为圆环状。当在气泡的右方较远处垂直于光轴放一屏,在屏上呈现内密外疏的圆环状干涉条纹见图 2(水箱内气泡远场干涉图)。

由(6)式得到程差 Δ 与观察角度 2α 之间的关系曲线见图 3(以水中气泡为例做出),由图中显示的程差曲线可知, 2α 愈小 Δ 关于 2α 的变化率(绝对值)愈大,则条纹愈密,或者由(7)式知 2α 愈小则两出射光线之间的距离 d 逾大必有条纹愈密,反之亦

然。条纹出现内密外疏的现象。

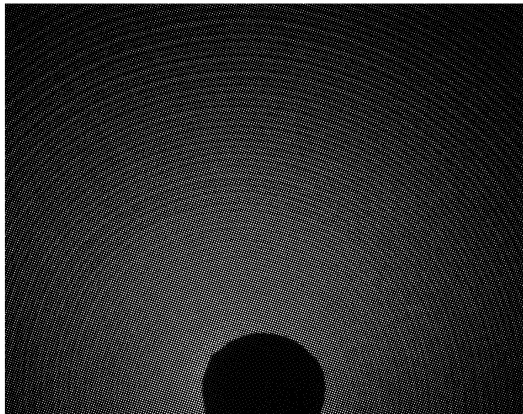


图 2 水中气泡的干涉条纹图

Fig. 2 A picture of interference fringe of bubble in water

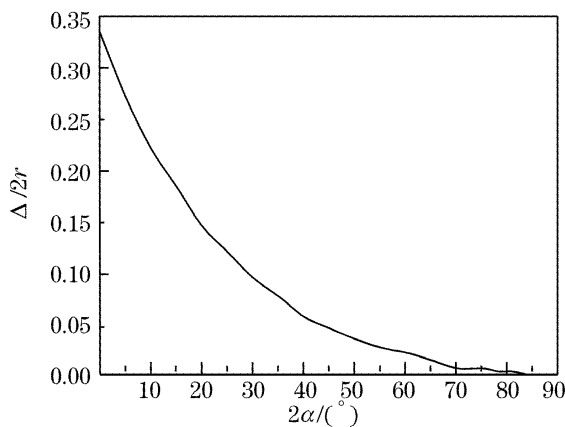


图 3 光程差与不同观察角的关系

Fig. 3 Curve of optical path difference with visual angle

由图 1 或 (6) 式, $\alpha = 0^\circ$ 时, 有最大程差 $\Delta = 2r(n_1 - n_2)$, 其最高干涉相长级 $M = 2r(n_1 - n_2)/\lambda$, λ 为光在真空中的波长。当 $\alpha = 90^\circ - i_c$, 即 $i_1 = i_c$ 时, 由 (5) 式或 (6) 式有最小程差 $\Delta = 0$, 应为干涉相长 0 级。即干涉级内高外低。

图 3 以水中气泡为例, $n_1 = 1.33, n_2 = 1.00$, 当 $2\alpha = 0^\circ$ 时, 程差最大, $\Delta = 0.33 \times 2r$, 为最高干涉级;

表 1 气泡直径的干涉测量

Table 1 Interferometric measurement of diameters of bubbles

Place where exist bubbles	n_1 and measuring method	$2r$ with interference /mm	$2r$ reduced value and measuring device	Relative difference /%
Water box	1.3333 Abbe refractometer	0.662	0.692 mm Travelling microscope	4.3
Plate glass	1.5221 Grating interference	0.528	0.5384 mm Abbe comparator	1.9
Glass prism	1.7350 Angle of minimum deviation	0.1516	0.1529 mm Abbe comparator	0.9

4.2 对其他应用的预期

4.2.1 对单个运动气泡直径进行测量

方法 1 当气泡在被扩束的激光束中上升时, 在远场观察点处看到气泡上升的同时气泡在明暗闪烁。这等同于气泡不动而观察点向下运动。由于干

$2\alpha = 82.4^\circ$ 时, 程差最小, $\Delta = 0$, 为干涉 0 级。

参照图 1, 当 $i_1 > i_c$ 时折射光束不存在, 干涉条纹存在于 i_1 等于 $(0 \sim i_c)$ 之间, 即干涉条纹存在于 $2\alpha = (0^\circ \sim 180^\circ) - 2i_c$ 范围内。对于水中空气气泡, 干涉条纹应存在于以 $2\alpha = 82.4^\circ$ 为角半径的空间范围内。

4 气泡干涉的应用

4.1 介质中气泡直径的测量

直接使用 (6) 式测量气泡直径的困难是不知该 2α 方向的程差 (干涉级) 是多少, 可对 (6) 式进行变换得 (8) 式

$$2r = N\lambda / [\sqrt{n_1^2 + n_2^2 - 2n_1n_2\cos\alpha_1} - n_1\sin\alpha_1 - \sqrt{n_1^2 + n_2^2 - 2n_1n_2\cos\alpha_2} + n_1\sin\alpha_2], \quad (8)$$

如 n_1 与 n_2 已知或可测, $2\alpha_1$ 与 $2\alpha_2$ 可测, $2\alpha_1$ 与 $2\alpha_2$ 两方向间的条纹数 N 可读出, 由 (8) 式得气泡直径。

为研究气泡远场干涉的应用并验证 (6) 式、(8) 式的正确性, 选用存在于玻璃水箱内壁、平板玻璃及棱镜内的三个静止气泡的直径进行对比测量。作为对比可先用其它方法^[5]测量气泡直径, 再与干涉法测量结果进行对比。表 1 为测量记录, 测量的精准程度主要取决于 2α 值测量的精准程度, 测棱镜内气泡直径时选用了分光仪测角度, 其相对差最小, 而水箱和平板玻璃内气泡直径的测量采取先用直尺测量干涉条纹的空间位置再转化为角度代入 (8) 式计算其相对误差较大, 液体中气泡的大小在测量中具有可变性也是其相对差较大的原因。气泡内气体折射率 n_2 全取 1, 由文献 [6] 可知, 气体压强的变化对气体折射率的影响在 10^{-4} 位, 经取 $n_2 = 1.001$ 代入 (8) 式试算, 与 $n_2 = 1$ 所测气泡直径的相对差小于 0.1%。由水箱内气泡直径的测量显示出远场干涉法测气泡直径的最大特点是可对介质深处的气泡进行测量。

涉条纹的明暗不同, 放置于观察点处的光电器件向下运动必能纪录干涉条纹数及条纹形状, 利用 (8) 式可计算出气泡直径。

方法 2 由于是远场干涉, 当一个运动气泡经过平行光束时, 在气泡右侧放置一凸透镜, 呈现在凸

透镜焦平面上的远场干涉条纹是静止的。这和夫琅和费衍射图样不随衍射物的移动而移动一样^[7],通过对静止干涉图样的测量,求取运动气泡的直径。

4.2.2 对多个运动气泡直径进行测量

当多个具有相同直径的气泡经过平行光束时,所有气泡呈现在凸透镜焦平面上的远场干涉条纹既是静止的又是完全重合的,同样可实现对多个运动气泡直径进行测量。

4.2.3 对气泡内气体折射率进行测量

如测量精确度足够高,在已知气泡直径及介质折射率的条件下,可对泡内介质折射率进行测量。

4.2.4 对光密介质中的微小光疏介质球进行检测

当平行激光束照射到光密介质中的微小光疏介质球上时,“气泡远场干涉”亦会发生,上述对气泡直径、折射率的测量方法,亦可用于光疏介质球。

4.2.5 适用于非可见光波段

上述理论和测量方法还应适用于红外线等非可见光波段。

5 结 论

气泡干涉是由近轴光束经气泡界面两次折射与远轴光束经气泡界面全反射在远场相遇所产生的干涉,属于分波阵面干涉;当观察角 2α 减小时两出射平行光线的距离 d 增大,干涉条纹变密,其光程差 Δ 亦变大,干涉级增大;条纹密度还正比于气泡直径 $2r$;由图 1 所示的远场干涉分析模型及其结果(6)式、(7)式为气泡干涉的应用提供了理论基础。由于是远场干涉很适合对介质深处的气泡进行检测,可

用于运动气泡的检测,也可以使用其它波段的光源进行检测,还可以在介质外进行条纹计数及条纹位置测量。适宜使用视频或数码影像设备进行测量。

参 考 文 献

- 1 Li Wei, Yang Kecheng, Zhang Xiaohui *et al.*. Simulation and computation of bubbles volume scattering function in water[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 647~651 (in Chinese)
李 微,杨克成,张晓晖等. 水中气泡上的体散射函数的模拟与计算[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 647~651
- 2 Ji Yanjun, Ma Xiang, He Junhua *et al.*. The influence of bubble on the transmitting of light in wake[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5): 626~628 (in Chinese)
纪延俊,马 祥,何俊华等. 尾流中气泡对光传播的影响[J]. *光子学报*, 2004, **33**(5): 626~628
- 3 Wang Jiangan, Jiang Xingzhou, Ma Zhiguo *et al.*. Study on back light-scattering property of bubbles in ship wake [J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(2): 205~218 (in Chinese)
王江安,蒋兴舟,马治国等. 舰船尾流气泡后向光散射特性研究[J]. *激光技术*, 2005, **29**(2): 205~218
- 4 Xie Jianjun, Lu Yang, Pan Qinmin *et al.*. Holography application in characterization of dynamic bubbles of Foam-DV in cyclohexane/PDMS[J]. *Chin. J. Lasers*, 2000, **27**(2): 159~164 (in Chinese)
谢建军,鲁 阳,潘勤敏等. 激光全息在环己烷/PDMS体系起泡泡脱挥气泡场中的应用[J]. *中国激光*, 2000, **27**(2): 159~164
- 5 Deng Guangan, Cai Zhigang, Zhang Yunhua *et al.*. Refraction index measurement of transparent materials by using diffraction grating and CCD[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 100~103 (in Chinese)
邓广安,蔡志岗,张运华等. 用衍射光栅和 CCD 测量透明材料折射率[J]. *光学学报*, 2004, **24**(1): 100~103
- 6 Ye Shenghua. *Laser Application in Measuring in Precision* [M]. Beijing: China Machine Press, 1980. 113~114 (in Chinese)
叶声华. 激光在精密计量中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1980. 113~114
- 7 Yi Ming. *Optics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1999. 116~117 (in Chinese)
易 明. 光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999. 116~117