

泡泡在正交偏振下产生菱形明暗色块研究实验报告

摘要

本实验基于菲涅尔公式和球体的空间几何对称性，通过搭建正交偏振系统，对不同形态、不同浓度的洗手液泡泡进行观测。实验发现，在正交偏振系统中，球形泡泡中心会出现暗十字图案，四角呈现白色亮图案，并伴随彩色干涉色带；同步旋转偏振片时，暗十字会同步旋转；而平面化或柱面化的泡泡则无此明暗图案，仅保留彩色干涉条纹。本实验结合菲涅尔定律对折射光偏振方向的改变规律，解释了球体几何各向异性导致的偏振选择消光现象，并通过控制变量法验证了彩色条纹的干涉成因，最终通过程序模拟再现了实验观测到的偏振图案。

实验仪器与材料

1. 洗手液混合液两杯，浓度分别为“两泵洗手液+半杯水”和“两泵洗手液+四分之一杯水”
2. 白光平行光源
3. 正交偏振系统，由两块偏振面基相互垂直的线偏振片组成
4. 滴管
5. 两块亚克力板（15*20cm）
6. 手机相机（用于记录图像和视频）

实验方法和现象

1. 配置不同浓度的洗手液水混合液，搭建正交偏振系统。
2. 使用滴定管蘸取混合液吹出不同大小的泡泡，在正交偏振系统下观察。观察到泡泡中心呈现暗十字色块，四角呈现白色亮块（如图 1）；该现象伴随出现彩色颜色带（如图 2），猜想为应力双折射导致的色偏振现象或是干涉导致。



图 1

3. 移开检偏器，观测到彩色色带依然存在，仅色彩亮度出现轻微变化（如图 3）。

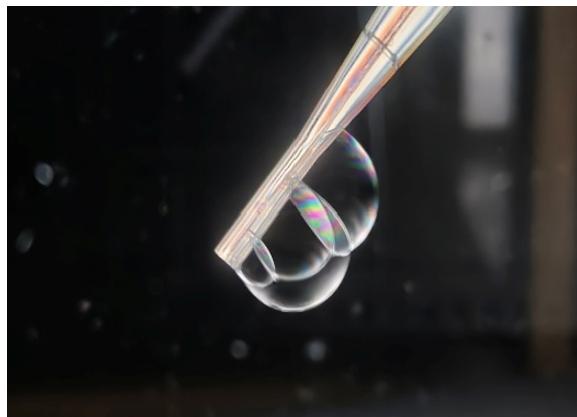


图 2

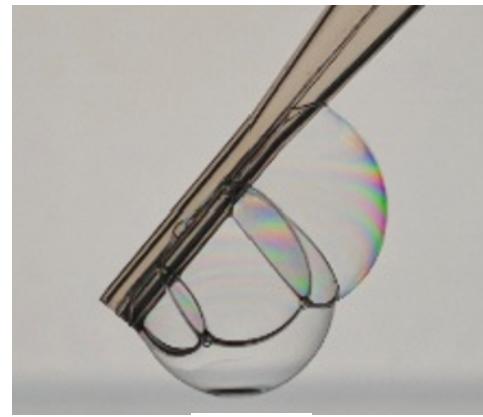


图 3

4. 同步旋转两块偏振片，观察到泡泡上的暗十字色块随偏振片系统的旋转而同步旋转（如图 4）。

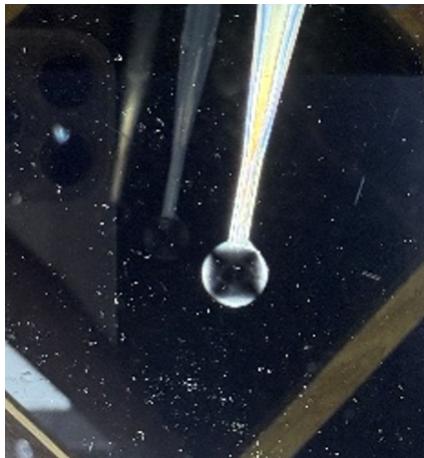


图 4



图 5

5. 用铁丝圈蘸取混合液制取单层泡泡膜，置于正交偏振系统中。观察到单层泡泡膜与偏振片平行时无明显现象（如图 5）；而当偏转一定角度之后，泡泡膜上出现彩色条纹。

6. 用棉签蘸取混合液润湿亚克力板，将吹出的泡泡夹在两块亚克力板之间，拉伸成泡泡柱，置于正交偏振系统中。观察到泡泡被拉伸方向的两侧出现竖向微量彩色条纹，并未出现明暗色块（如图 6）。

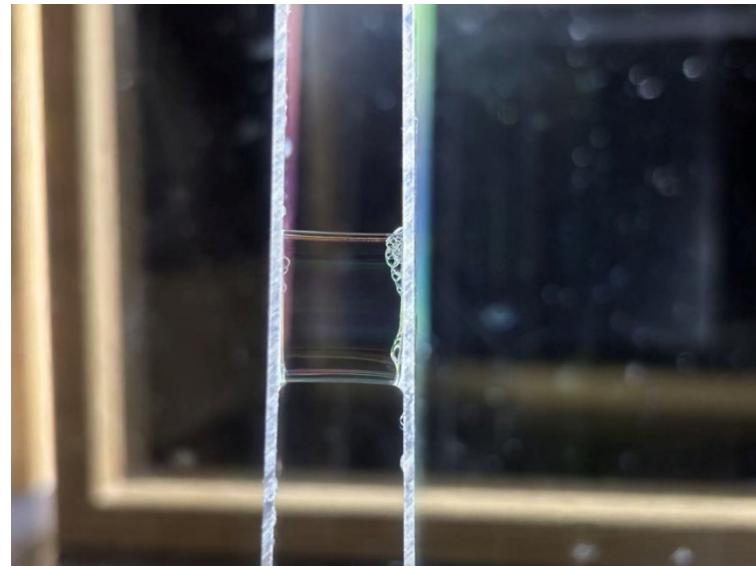


图 6

7. 将吹出的泡泡附着在两块偏振片相对的面上。观察到偏振片上的泡泡（呈半球形）中心呈现暗十字块，四角呈现白色亮块，与现象 1 类似（如图 7）。



图 7

8. 重复实验，发现不同浓度的混合液所吹出的泡泡现象与上述一致。（如图 8.1、图 8.2）



图 8.1 (浓度较高)

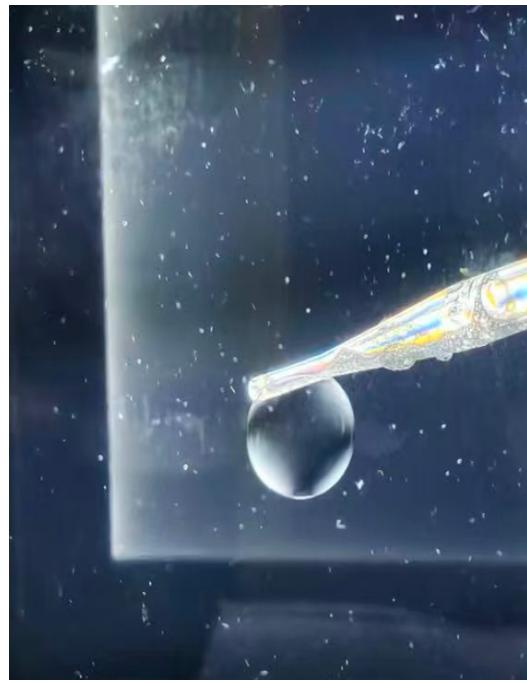


图 8.2 (浓度较低)

实验解释

1. 根据菲涅尔定律，当入射光的偏振方向与入射面共面时，折射光的偏振方向保持不变。球体经面和纬面处所有法向量和入射偏振光向量分别组成两个正交平面，与入射平行光共面，因此折射光的偏振方向未发生改变，在检偏器下仍呈现暗色，向四周渐变扩散；根据球体的中心对称性，折射偏振光的偏振方向相对于入射偏振光偏振方向的改变量关于球体几何中心对称，因而在检偏器下观测的图像也呈中心对称图案，印证了泡泡球体由于几何特性产生了各向异性；
2. 移开检偏器后彩色色带依然存在，说明彩色色带成因为薄膜干涉，而非由应力双折射引起的色偏振。（若为应力双折射，移开检偏器后彩色现象会消失）；
3. 入射线偏振光和检偏器的偏振面角度发生改变，在泡泡球上所对应的两个正交平面也发生对应偏转，导致暗十字随正交偏振系统的旋转而同步旋转；
4. 单层泡泡膜可近似为平面，无表面曲率，几何特性呈现各向同性，不会产生偏振选择消光现象，无明暗色块；
5. 柱形泡泡的侧面虽存在曲率，但沿水平或垂直方向改变入射点时，入射光线与法线形成的折射面始终为同一平面或相互平行，因此折射光线的偏振方向不会改变，故无明暗色块，仅有微量的彩色条纹；
6. 改变洗手液溶液浓度和泡泡大小，黑白图案的形状无明显变化，交叉印证了洗手液成分中的表面活性剂分子排列顺序不是造成泡泡各向异性的主要原因。

计算建模&程序模拟

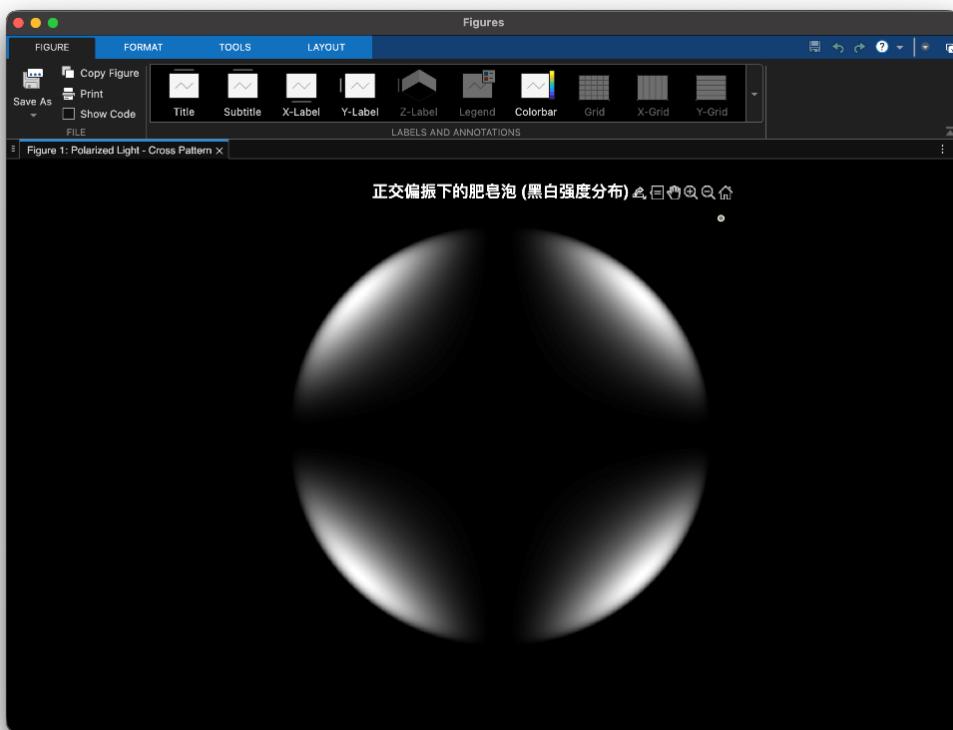
1. 经数学建模与推导，人眼看到的光强可近似为：

$$I = (t_p^2 - t_s^2)^2 \sin^2 \phi \cos^2 \phi,$$

$$\text{where: } t_p = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{(n_1 \cos \theta_t + n_2 \cos \theta_i)}, \quad t_s = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{(n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t)}$$

θ_i 为入射角, θ_t 为透射角

2. 经 MATLAB 程序计算模拟，得到的模拟图像为：



结论

本实验通过对不同形态泡泡的偏振观测，验证了球体几何各向异性是导致正交偏振下暗十字条纹的核心原因，并明确了彩色条纹的薄膜干涉成因。实验结果表明：

- 球形/半球形泡泡因表面曲率表现的各向异性，在正交偏振系统下会产生中心暗十字、四角亮的块特征图案；
- 暗十字的方向与偏振片系统的方向严格耦合，会随偏振片同步旋转；
- 平面或柱体泡泡因几何特性呈现各向同性，仅出现薄膜干涉的彩色条纹，无明暗偏振图案；

- 泡泡的偏振响应与洗手液混合液的浓度（表面活性剂分子排列）无明显关联，仅由其几何形态决定。