单轴晶体双折射现象数值模拟与分析

◆张明洋

（渭南师范学院 数理学院 光电信息科学与工程 161 班）

摘要：利用麦克斯韦电磁理论推导了晶体中不同方向的光速，利用计算机对正晶体和负晶体的波阵面进行了模拟。麦克斯韦电磁理论解释了平面波在单轴晶体中产生双折射现象的原因，模拟结果形象地展示了正负晶体波阵面的特征。

关键词：正晶体；负晶体；波阵面；单轴晶体；双折射

随着单轴晶体在现代光学技术中的广泛应用，很多学者开展了单轴晶体双折射现象的研究。杨庆贤[1]从寻常光线和非常光线在单轴晶体中传播具有两种不同子波面的假定出发，应用惠更斯原理，推导出非常光线在单轴晶体中传播的折射定律和折射率的表达式。张智等人[2]应用惠更斯原理推导出主截面内折射角和阵面角公式，应用计算机作图阐明了双折射的规律。裴芳芳和陈西园[3]根据位相匹配条件和边界条件，在光轴取向任意的条件下得到了光在两单轴晶体界面的反射和折射的理论表达式，给出了计算光能量损失和两束折射光能量比的普遍公式。万玲玉等人[4]根据单轴晶体双折射和双反射性质，通过数值计算研究了光轴在入射面内以及与晶体界面成任意角时光波 分量在单轴晶体表面反射和折射的相位特性。宋哲等人[5]根据位相匹配条件，利用晶体的折射率曲面，通过作图法，分析了光轴取向任意时，自然光从各向同性介质入射到单轴晶体时界面上的反射和双折射。考虑到麦克斯韦电磁场理论将光学现象与电磁现象联系起来，所以麦克斯韦电磁理论是研究单轴晶体双折射现象的理论基础。本文将利用麦克斯韦电磁理论对单轴晶体双折射现象进行进一步研究分析。

1 晶体双折射

晶体结构的主要特点是组成晶体的各基元（原子、分子、离子或集团）在空间排列时，表现出一定的空间周期性和对称性。这种结构特点导致了晶体宏观性质的各向异性，自然，其光学特性也表现为各向异性[6,7]。一类晶体以石英为代表，$v_o > v_e$，即 $n_o < n_e$，其复合波面图中旋转椭球面的长半轴与球面半径相等，旋转椭球面内切于球面，这类晶体称为正晶体。另一类以方解石为代表，$v_o < v_e$，即 $n_o > n_e$，其复合波面图中旋转椭球面的短半轴与球面半径相等，旋转椭球面外切于球面，这类晶体称为负晶体。

我们知道，介质的折射率 n 等于真空中的光速 c 与介质中的光速 v 的比值。单轴晶体的寻常折射率或 o 光折射率 $n_o = c/v_o$ 为一常值，与方向无关；但是，由于 e 光在不同方向上的传播速率不同，故在不同方向上非常折射率或 e 光折射率亦不同。沿晶体光轴方向传播时，e 光折射率为 n_o；沿垂直于晶体光轴方向传播时，e 光折射率记作 n_e，且 $n_e = c/v_e$；沿其他方向，e 光折射率 n_e' 介于 n_o，n_e 之间。通常将 n_o，n_e 称为晶体的主折射率。

2 晶体双折射电磁理论及模拟

根据光的电磁理论，对频率为 ω 的光波，

$$n_o = \frac{c}{v_o} = c\sqrt{\mu_0 \varepsilon_i} \qquad (1)$$

它就是我们通常所说的寻常光（即 o 光）。相应地，非常光（即 e 光）的折射率为：

$$n_e = \frac{c}{v_\phi} = \frac{c}{\sqrt{\frac{1}{\mu_0 \varepsilon_z}\left(\cos^2\phi_1 + \cos^2\phi_2\right) + \frac{1}{\mu_0 \varepsilon_i}\cos^2\phi_3}} \qquad (2)$$

其中 $\cos\phi_1 = k_1/k$，$\cos\phi_2 = k_2/k$，$\cos\phi_3 = k_3/k$ 为波矢的方向余弦。上式结果表明，n_e 不是常数，它与波传播方向有关。我们取正晶体 $v_e/v_o = 0.4$，应用 MATLAB 模拟它的子波波阵面（如图 1）。

结果分析：非常光的波阵面就如同一个“瘦灯笼”被寻常光的圆球形波阵面包围，从上往下看，两种光的截面都是圆，非常光的圆在寻常光的圆里面[8]。

在通过光轴的截面上，寻常光 o 的波阵线是圆，非常光 e 的波阵面是椭圆，长轴等于圆的半径，短轴小于圆的半径。

我们取负晶体 $v_e/v_o = 1.7$，应用 MATLAB 模拟它的子波波阵面（如图 2）。

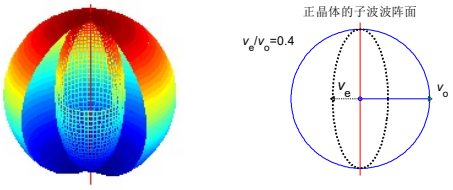

图 1　正晶体的子波立体波阵面

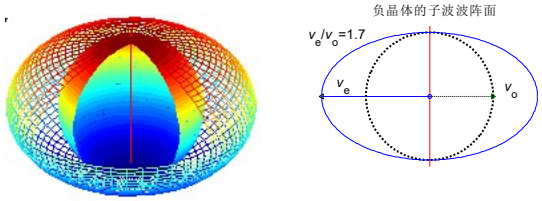

图 2　负晶体的子波立体波阵面

模拟结果显示，非常光的波阵面如同一个“胖灯笼”把寻常光的圆球形波阵面包围，从上往下看，两种光的截面都是圆，非常光的圆在寻常光的圆的外面。

在通过光轴的截面上，寻常光 o 的波阵线是圆，非常光 e 的波阵面是椭圆，长轴大于圆的半径，短轴等于圆的半径。

4 结束语

电磁理论给出了双折射现象的较完善的理论依据，光的色散关系只是该电磁解释的一个拓展。用电磁理论解释单轴晶体中的双折射，还可以得出晶体中不会出现多折射现象的结论，但是鉴于篇幅这里不作讨论。

参考文献：

[1]杨庆贤.非常光线在单轴晶体中的折射定律[J].福建林学院学报,2000,20(4):306-308.
[2]张智,周群益,陈曙光,周期.单轴晶体主截面内 e 光折射角和阵面角的计算和作图[J].大学物理,2006,25(1):19-53.
[3]裴芳芳,陈西园.光在两单轴晶体间界面的反射和透射[J].光学技术,2009,35(5):745-750.
[4]万玲玉,谷巍,班卫华,刘立人.光波 p 分量在单轴晶体表面反射和折射的相位特征[J].光子学报,2010,39(8):1481-1486.
[5]宋哲,郝林岗,吴宁,丁一,高媛,范刘燕.光轴任意取向时单轴晶体界面上的双折射[J].辽宁师范大学学报,2013,36(3):335-339.
[6]石顺祥,张海兴,刘劲松.物理光学与应用光学[M].西安:西安电子科技大学出版社,2000.192-222.
[7]石顺祥,刘继芳,孙艳玲.光的电磁理论[M].西安:西安电子科技大学出版社,2006.41-59.
[8]蔡履中,王成彦,周玉芳.光学[M].济南:山东大学出版社,2002.254-264.

作者简介：张明洋，男，1997 年 6 月，大学本科，无职称，研究方向为光电信息。

基金项目：项目支助：2018 年渭南师范学院大学生创新创业训练计划项目（编号：18XK059）。