

好的软磁材料;含有多种纳米晶的材料可能会出现特殊磁性;对于含有稀土元素的钴基或铁基合金,如能有效地控制其晶粒大小,按无规各向异性模型的理论则可以实现用同一成分的合金制成从软磁到硬磁的系列材料,这将是很有意义的,有待通过实验来实现。

- [1] A. Datta et al., Proc. 4th Int. Conf. on Rapidly Quenched Metals, eds, I. Masumoto and K. Suzuki, The Japan Institute of Metals, Sendai, Japan, (1982), 1007.
- [2] R. Hasegawa et al., Proc. 4th Int. Conf. on Rapidly Quenched Metals, eds. I. Masumoto and K. Suzuki, The Japan Institute of Metals, Sendai, Japan, (1982), 929.
- [3] Y. Yoshizawa et al., *J. Appl. Phys.*, **64**(1988), 6044.
- [4] F. Pfeiffer and C. Radloff, *J. Magn. Magn. Mat.*, **19**

- (1980), 190.
- [5] N. Ishiwata et al., *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-23** (1987), 2152.
- [6] Y. Yoshizawa and K. Yamauchi, *Mater. Trans. Japan Inst. Metals*, **31** (1990), 307.
- [7] Y. Yoshizawa and K. Yamauchi, *Mater. Sci. Eng.*, **A133** (1991), 176.
- [8] 吉沢克仁,山内清隆,日本金属学会会报, **31** (1992), 29.
- [9] G. Herzer, *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-25** (1989), 3327.
- [10] G. Herzer, *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-26** (1990), 1397.
- [11] K. Hiraga and O. Kohmoto, *Mater. Trans, Japan Inst. Metals*, **33** (1991), 868.
- [12] K. Suzuki et al., *Mater. Trans. Japan Inst. Metals*, **32** (1991), 93.
- [13] K. Lu et al., *J. Appl. Phys.*, **69** (1991), 522.

宝光的理论

胡波

(西北纺织学院物理教研室,西安 710048)

国外从本世纪40年代开始对宝光进行理论研究,先后提出了几种解释宝光现象的理论,从而对宝光问题作出了相当深刻的解释.本文简要介绍和评述了这些研究成果,主要包括米氏散射理论、范德赫尔斯特的表面波理论和努森兹维格的复角动量理论.显然,经典的几何光学和一般的衍射理论都不能或难以解释宝光现象.

宝光(俗称佛光,英文名 Glory)通常包括有两个独立的部分——观察者的身影和环绕在观察者身影头部四周的瑰丽的彩色光环,色序为内紫外红.因为在四川的峨眉山和德国的布罗肯地区可常见这种现象,所以国内也称这种绮丽的光象为峨眉宝光,国外则有“布罗肯幽灵”之称.

宝光现象如何解释?因为宝光发生在反日点的周围,光环的色序与虹相同,因此,有人试图象解释虹一样用几何光学解释之^[1];又因为宝光与日月华的色序相同,而且光环的角半径相接近,于是,也有人认为一般的衍射理论可以解释宝光现象^[2].然而,宝光光环的角半径一般

只有几度,远小于虹(42°);华是日、月光通过云中水滴的向前衍射形成的,而宝光归因于云雾前面水滴的后向散射光的干涉作用,而且光环的角分布也与通常的衍射理论不一致.因此,经典的几何光学和通常的衍射理论不能或不足以解释宝光现象.

对于宝光现象的正确解释的基础是米氏(G. Mie)散射理论;范德赫尔斯特(Van de Hulst)的表面波理论是关于宝光的第一个有价值的理论;努森兹维格(H. M. Nussenzvig)将复角动量理论应用于宝光现象,对宝光问题作出了相当深刻的解释.

一、宝光的米氏理论

1908年,米氏对任意尺度的球形粒子的散射问题进行了精确计算,散射电磁波的振幅函数为一元无穷级数,称为米氏级数解,其标量解为^[1]:

$$S_1(\beta, \theta) = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^{\infty} \{ [1 - S_l^e(\beta)] t_l(\cos\theta) + [1 - S_l^m(\beta)] p_l(\cos\theta) \}$$

$$S_2(\beta, \theta) = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^{\infty} \{ [1 - S_l^e(\beta)] t_l(\cos\theta) + [1 - S_l^m(\beta)] p_l(\cos\theta) \}, \quad (1)$$

其中 $S_1(\beta, \theta)$ 和 $S_2(\beta, \theta)$ 分别是与垂直偏振和平行偏振相联系的散射振幅, $p_l(\cos\theta)$ 和 $t_l(\cos\theta)$ 为角函数, $S_l^e(\beta)$ 和 $S_l^m(\beta)$ 分别为与磁的或电的 l 阶复极相联系的 S -矩阵, θ 为散射角, $\beta = \frac{2\pi a}{\lambda}$ 称为粒子的大小参量, a 为粒子的半径.

1946年,布赛里厄斯将米氏散射理论应用于宝光的研究,他的结果建立在米氏级数解的渐近展开式的基础之上. 其后,范德赫尔斯特(1957年)、豪厄尔(1961年)等都曾将米氏理论应用于宝光现象的研究^[4].

1966年,布赖恩斯等人利用计算机对水滴大小参数 $\beta = 200, 500$ 的情况进行了计算,结果表明,后向(散射角 $\theta = 180^\circ$) 散射主要决定于米氏解的最后几个重要的项,它们和几何光线掠射到水滴表面的情况相对应,当计算累计的项的数目超过了大小参量 β 的数量级时,米氏级数解迅速收敛^[5].

数值计算所揭示的宝光的基本特征为^[4]:

(1) 宝光的散射光强度是 β, θ 和折射率 n 的函数.

(2) 作为 β 的函数,后向散射光的强度显示出非常迅速的准周期振荡.

(3) 在 $10^2 \leq \beta \leq 10^3$ 的范围内,散射光强度的角分布和偏振状况随 β 的变化而变化. 当 $\beta \approx 100$ 时,宝光的第一暗环相当模糊,外环为平行偏振占有优势;当 $\beta \approx 1000$ 时,宝光的外环变

为垂直偏振光占有优势.

(4) 对于宝光的主要贡献来自于“边缘区域”的入射光.

二、范德赫尔斯特的表面波理论

范德赫尔斯特认为,从球形水滴出射的光线之间的相互干涉形成了散射图样,并根据惠更斯原理推出了后向散射光强度的两个偏振分量为^[6]

$$I_1 = [c_1 \{J_0(u) - J_2(u)\} + c_2 \{J_0(u) + J_2(u)\}]^2$$

$$I_2 = [c_2 \{J_0(u) - J_2(u)\} + c_1 \{J_0(u) + J_2(u)\}]^2, \quad (2)$$

(2) 式中 c_1 和 c_2 分别正比于 ϵ_1 和 ϵ_2 , ϵ_1 和 ϵ_2 分别为垂直于和平行于入射面的平面偏振波的振幅因子, $u = \pi - \theta$, $J_0(u)$ 和 $J_2(u)$ 分别为零阶和二阶贝塞尔函数.

对于水滴 ($n = 1.33$), 当 $100 < \beta < 300$ 时,紧贴水滴边缘的入射光线可用于解释宝光现象,为此,范德赫尔斯特提出了一个假设:宝光是由擦着水滴表面入射到水滴,并且经一次内反射之后紧贴在自身表面上的迅速衰减的表面波产生的. 表面波沿着表面的路径是很短的,约为 15° 的一段弧长.

如图1所示,光线沿着水滴表面从 A 点切入入射,在水滴内经一次内反射之后到达 C 点,该点距离后向还有 15° 的一段弧长,这段间隙被范德赫尔斯特提出的表面波连接上了. 因

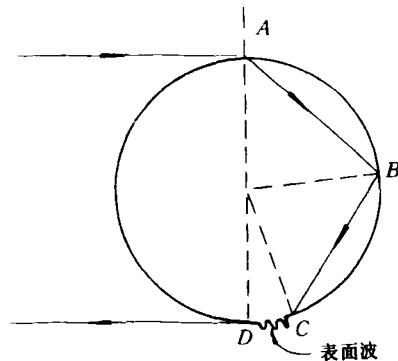


图1 表面波示意图

此,这样路径的光线对宝光作出了有效的贡献,常被称为范德赫尔斯特贡献.

范德赫尔斯特对宝光的解释,被普遍认为是关于宝光的第一个有价值的理论.然而(2)式中的 c_1/c_2 值的决定缺乏可靠的理论依据,范德赫尔斯特通过理论与观察结果的对照来决定这一比值.

关于自然界云的宝光的资料是佩尔德和埃克斯纳于1910年报道的,人工雾的测量由梅日德于1919年发表^[4].这些资料清楚地表明,当 $c_1=0$ 时是接近于实际的,在这种情况下,由(2)式得到的光强度分布如图2所示.

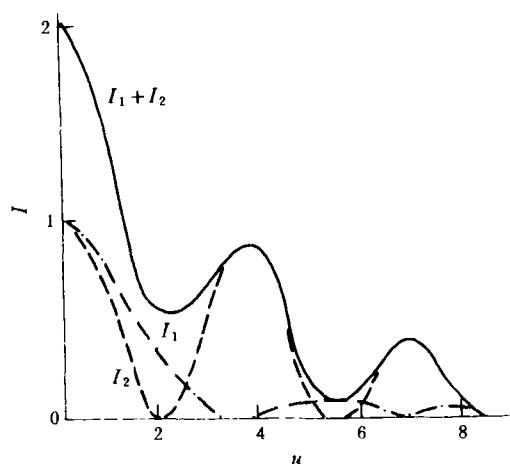


图2 $c_1=0$ 时宝光的光强度分布

范氏发现,当 $c_1=0$ 时,理论结果与自然界中云雾的宝光和人工云雾的宝光的测量资料相符合,且暗环的半径之比为^[6]

$$r_1:r_2:r_3:r_4\cdots=2:3:5:4:8:6:11:7\cdots$$

三、宝光的复角动量理论

米氏级数解虽然可以给出宝光问题的精确解答,然而米氏级数收敛很慢,计算中需要计及的项达到 β 数量级,计算工作量之大令人望而生畏,而且这种解答不能给出形成宝光的物理机制.因此,本世纪60年代努森兹维格将复角动量理论应用于对宝光的理论研究.宝光的复角动量理论克服了应用米氏级数解的困难,而且物理

可以在一定程度上揭示出产生宝光的物理机制.

1. 复角动量方法

本世纪初年,瓦特生(G. N. Watson)发现一个转换米氏级数解的分波级数(Partial-wave series)的方法,可以解决应用米氏解的困难.瓦特生的方法是将分波级数转变为复 λ 平面上正实轴周围的围线积分,如图3所示.这种积分是一种具有高度灵活性的有效工具,它可使米氏级数收敛很慢的情况,变得可以迅速收敛.这种方法被称为瓦特生变换,或称为复角动量方法.

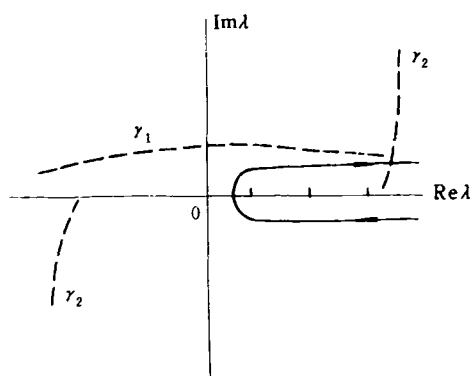


图3 瓦特生积分路径

将分波级数改写为路径积分的好处是:在复 λ 平面上利用柯西定理获得变形的积分路径,使得对最终解的主要贡献来自于数目极少的临界点的邻域.这些临界点是复数极点,称为雷琪极点.这些点也是实的鞍点,积分路径将经历这些鞍点的最陡下降的一段,然后利用“最陡下降法”进行计算.因此,通过瓦特生变换将分波级数转换到复角动量平面上之后,就无须计算大量的项,只需要计及少数几个鞍点的作用^[3].

如图3所示,沿着曲线 γ_1 和 γ_2 ,在水滴的大小参量 $\beta \gg 1$ 的情况下,位于曲线 γ_2 的极点点级数收敛极为迅速,而位于实轴附近的曲线 γ_1 类极点,其级数收敛极慢.为了解决这一问题必须用类似于法布里-珀罗干涉仪的多次反射来重写分波级数.

对于柱函数的展开式由德拜首先给出,称为德拜展开. (1)式的德拜展开式为^[3]

$$S_j(\beta, \theta) = S_{j,0}(\beta, \theta) + \sum_{p=1}^p S_{j,p}(\beta, \theta) \text{ 十余项,} \quad (3)$$

(3)式中 $S_{j,0}$ 与在球表面上的直接反射相联系, $S_{j,p}$ 与在球内 $(p-1)$ 次内反射之后的透射相联系.

1965年,一个瓦特生变换的修正形式被用于(3)式中的每一项,因为仅仅表面相互作用被包括了,在 λ 平面中相应的雷琪-德拜极点,都和迅速衰减的表面波相联系,结果对于每一德拜项都得到了迅速收敛的渐近展开.

2. 主要的德拜贡献的分类

分析德拜展开后发现,边缘区域的入射光对宝光的解释有贡献, Yan de Hulst 的正交偏振效应和轴向聚焦效应都是值得重视的. 轴光线的贡献主要来自于 $p=0$ 和 $p=2$ 的德拜项,高阶的轴向德拜项由于多次内反射而强烈地衰减^[3].

理论分析指出:几何光学贡献与复平面上孤立的实鞍点相联系;表面波与复雷琪-德拜极点相联系;虹项与汇合鞍点(confluent saddle points)相联系^[7].

主要的德拜贡献可分为如下三类^[3]:

(1)宝光光线. 当光线沿切向入射时,它在水滴内不断地被内表面反射,形成了一个封闭的48边形的星状轨道,在每个顶点都有一部分透射到外边,轨道重复的周期是 $\Delta p=48$. 封闭和几乎封闭的轨道导致了“几何共振效应”. 当 $p=24$ 时,它的出射光线的散射角为 $\theta=180^\circ$, 是严格的后向光线(当水滴的折射率 $n=1.3307$ 时),被称为宝光光线(见图4).

(2)表面波的贡献. 边缘区域入射的光产生了表面波,对于 p 阶德拜项,有 p 段捷径. 表面波的贡献如图4中圆外(右边)的带有箭头的虚线段所示,其贡献大小大致与线段的长度一致. 同时,实际的贡献大小还受到反射衰减的影响. $p=2$ 的表面波项也常称为宝光光线.

(3)高级虹的贡献. 对宝光有重要贡献的德

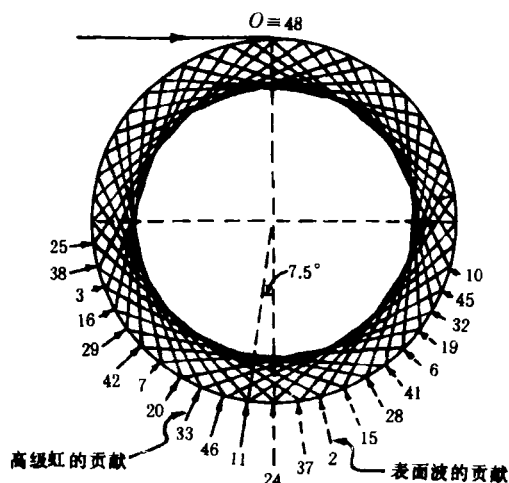


图4 表面波和高级虹的贡献

拜项还有来自于高级虹暗区的复光线,按贡献大小将其排成序列如图4中圆外(左边)的带有箭头的实线段所示,线段之长度大体上与重要性成正比.

3. 复角动量理论对宝光的解释^[3]

与宝光相关的 β 的范围是 10^2-10^3 . 对宝光的贡献主要来自范德赫尔斯特项. 第10级虹项和几何光学的近轴光线的贡献,即

$$S_j \doteq S_j^{(res)} + S_j^{(R)} + S_j^{(g)} + S_j^{(g)}, \quad (4)$$

(4)式中 S 的右上角的角码 res, R 和 g 分别表示 Van de Hulst 项、第10级虹项和几何光学项. 这一近似考虑的四项之总和,可以达到精确解的80—90%.

当入射光为自然光时,磁偏振 S^M 和电偏振 S^E 的贡献大小可以比拟,这样就产生了范德赫尔斯特的正交偏振效应, $J_1^2(u)$ 和 $J_1^2(u)/u^2$ 的曲线图显示出第一暗环是模糊的. 当 S^M 处于支配地位时,外环主要为垂直偏振光;当 S^E 处于支配地位时,外环主要为平行偏振光. 这些结论与实际的宝光观测结果相符合.

宝光的复角动量理论揭示出,宝光是下列物理因素相结合而产生的^[7]:

- (1)从水滴的边缘区域入射的光;
- (2)几乎完全内反射的结果和轴向聚焦的增强效应.
- (3)正交偏振效应;
- (4)来自雷琪-德拜极点的表面波的贡献;

(5) 在 $\theta=\pi$ 附近形成的高级虹暗区的复光线的贡献;

(6) 与封闭或接近封闭的准周期轨道相联系的几何共振效应;

(7) 各种衰变(表面波的辐射衰变、在虹的焦散曲线的暗区的复光线的衰变和内反射的衰变等)之间的竞争等。

形成宝光的条件是:观察者前面一定要有云雾;观察者的身后必须有太阳光直接射来;观察者在阳光下的身影要正好落在云雾之中。

宝光是阳光沿切向入射到云雾前面的水滴上产生的后向散射光的干涉形成的,它的基本特征(如光环的角半径和光强度分布^[4,6],宝光的第一暗环通常是模糊的等)不同于虹和华,因此,经典的几何光学和一般的衍射理论均难以解释宝光现象。

迄今可以对宝光现象作出正确解释的理论有三个,即米氏理论,范氏的表面波理论和复角动量理论。米氏散射理论是解释宝光现象的理论基础;范德赫尔斯特的表面波理论是关于宝光的第一个有价值的理论;努森兹维格的复角动量理论既可给出米氏理论所揭示的宝光的全部特征,又揭示出宝光是多种物理机制综合作用的结果。

宝光的实验室模拟和实验研究,也支持了现有的宝光理论^[8,9]。

现有的宝光理论尚有不足之处:米氏理论只给出了宝光问题的数值解,物理意义不够清楚;范德赫尔斯特理论中的两个系数之比值(c_1/c_2)缺乏严格的理论依据;努森兹维格理论又涉及了一些高深的数学物理知识。另外,大气光象中的多数(如虹、华等)都有了能解释其特征的简单模型,人们困惑不解的是,难道就没有能揭示宝光特征的简单的模型?

正如努森兹维格所指出,宝光也许代表了一个新的光学领域,宝光现象是一个相当复杂的光学现象。对于宝光的理论研究和实验研究尚待深入进行。

- [1] 陈中轩,物理通报, No. 1(1983), 62.
- [2] 《辞海》(修订稿),理科分册(下),上海辞书出版社编辑出版,(1978).
- [3] H. M. Nussenzveig, *J. Opt. Soc. Am.*, **69** (1979), 1068.
- [4] H. G. Houghton, *Physical meteorology*, London, The Mit Press, (1985).
- [5] H. C. Bryant and A. J. Cox, *J. Opt. Soc. Am.*, **56** (1966), 1529.
- [6] H. C. Van de Hulst, *Light Scattering by Small particles*, Wiley, New York, (1957).
- [7] V. Khare and H. M. Nussenzveig, *Phys. Rev. Lett.*, **38**(1977), 1279.
- [8] P. Gillis et al., *J. Phys. Am.*, **50** (1982), 416.
- [9] H. C. Bryant and N. Jarmie, *Scr. Am.*, **231-7** (1974), 60.

非晶硅半导体及其在传感技术中的应用

魏光普

(上海科学技术大学材料科学系 上海 201800)

叙述了非晶硅半导体的结构、制备方法及特性,介绍了非晶硅在制作光电传感器、色敏传感器、放射线(X射线等)传感器及应变传感器等方面的应用,并介绍了这些传感器的大致结构、输出特性及有关的应用。

Abstract

The structure, preparation and properties of amorphous silicon (a-Si) material were described. The application of a-Si in sensors, such as photodiode, colour sensor, X-ray sensor

物理