

磁 光 学 及 其 应 用

孙 金 祚 范 汝 盐

(山东省聊城师范学院)

本文对磁光学及其应用的几个主要方面作了扼要的评述,其中包括磁光学的产生、发展和现状;磁光学在理论研究和技術中的应用;磁光材料的现状和发展趋势。

磁光学是一门古老而又年青的学科。这一学科的研究活动是从十九世纪五十年代开始的,而磁光学的提法最早见于 1913 年出版的 Zeeman 的名著《磁光学研究》一书^[1]。在一个多世纪中,这个领域的研究活动一直处于不十分活跃的状态。

本世纪六十年代以后,这一古老的学科获得了新的生命。磁光学发展史上一个十分重要的事件是,1956 年美国 Bell 实验室的工作人员借助偏光显微镜观察到钇铁石榴石单晶片中的磁畴^[2]。这一发现刺激了人们对磁光学研究的新兴趣。随着七十年代以来新型磁光材料的研究有新的突破,以及激光理论与激光技术的迅速发展,使得这一学科的理论研究和应用研究空前活跃起来。

目前磁光学已发展成为一门内容十分广泛的学科,它涉及光学、磁学、固体物理学等学科,以及应用技术的许多方面,成为一门新兴的交叉学科。

一、磁 光 效 应

广义地讲,磁光效应是指当光通过透明的磁性物质(铁磁性物质、亚铁磁性物质、顺磁性物质)或光被磁性物质反射时,由于存在自发磁化强度(对顺磁性物质为外磁场),产生了新的各向异性,可以观测到各种光学现象,这些现象称为磁光效应^[3]。

在磁光学发展初期就曾进行过研究并为一般人所熟悉的磁光效应有磁致旋光效应(即

Faraday 效应、Kerr 磁光效应)和磁致双折射(即 Cotton-Mouton 效应或 Voigt 效应)。后来发现的常见的磁光效应有磁激发光散射、磁场光吸收、磁等离子体效应和光磁效应等。

1. 磁致旋光效应

当线偏振光通过磁性介质或在其表面反射时,出射线偏振光的振动面发生旋转,前者称为 Faraday 效应,后者称为 Kerr 磁光效应。

1845 年, Faraday 发现光在玻璃棒中的传播会受到外加磁场的影响,即本来不具有旋光性物质的玻璃棒产生了旋光性,使得由玻璃棒出射的线偏振光的振动面发生旋转。

自 Faraday 效应发现以来,这种磁致旋光效应曾在许多固体、液体和气体中观察到。根据实验测定,光矢量振动面的旋转角度 θ_F 与光在介质中穿行的距离 l 成正比,也与介质所在处的磁感应强度 B 成正比,即

$$\theta_F = VBl, \quad (1)$$

式中 B 通常以 G 为单位, l 以 cm 为单位, V 是比例因数,称为 Verdet 常数。(1)式仅对顺磁和抗磁等弱磁性材料成立。对于铁磁或亚铁磁等强磁性材料, θ_F 正比于磁化强度 M 在光传播方向上的分量, θ_F 与 B 之间不是成简单的比例关系,而且还存在饱和现象。这时应定义另外一个常数 K_F 来代替 Verdet 常数,

$$\theta_F = K_F Ml, \quad (2)$$

式中 M 为磁化强度。

Faraday 旋转的方向与磁场方向有关,与光传播方向无关,这是 Faraday 效应与某些物质所固有的旋光效应的重要区别。正是由于这

一特点, Faraday 效应在技术上得到广泛应用。

Kerr 磁光效应是在 1888 年由苏格兰物理学家 Kerr 发现的。一束在入射面内的光矢量或一束与入射面垂直的线偏振光, 当它在磁性介质表面上反射时, 反射光变成椭圆偏振光, 并且以椭圆长轴为标志的“振动面”相对于入射线偏振光的振动面旋转了角度 θ_k 。 θ_k 称为 Kerr 转角, 它与磁化强度 M 成正比, 即

$$\theta_k = K_R M, \quad (3)$$

式中 K_R 是常数。一般说来, Kerr 磁光转角及椭圆度取决于磁化强度的取向。当磁化强度 M 垂直于反射面时, Kerr 磁光转角 θ_k 最大; 当 M 反向时, Kerr 旋转也反向。利用这一特性可以判断磁化强度的方向。

2. 磁致双折射

磁致双折射是线偏振光垂直于磁化矢量方向传播时所产生的磁光现象。

1902 年 Voigt 发现, 若把强磁场施加于蒸气, 并令线偏振光沿着与磁场垂直的方向穿过蒸气, 则蒸气类似于具有双折射性质的单晶体, 光束分解为两束线偏振光。一束线偏振光的光矢量平行于磁场, 另一束的光矢量垂直于磁场。它们的传播速度 c/n_{\parallel} 和 c/n_{\perp} 不同, 即折射率 n_{\parallel} 与 n_{\perp} 不同。它们的折射率之差正比于外加磁感应强度 B 的平方。这种磁光现象称为 Voigt 效应。

Voigt 效应发现后不久, 1907 年 Cotton 和 Mouton 观察到, 在处于外磁场的硝基苯一类纯净液体中, 具有比 Voigt 效应强得多的双折射, 折射率之差也与外磁场的平方成正比。这种磁光现象称为 Cotton-Mouton 效应。

3. 磁激发光散射^[3]

这是由激发一个和两个磁振子(自旋波)而产生的光散射。通过光的吸收和发射, 可以观察到磁振子的激发。使用 Ar-Ne 激光可以观察到伴随这一过程产生的光的磁喇曼散射。

4. 磁场光吸收^[4]

主要包括回旋共振和磁光振荡。前者是处于静磁场的导体(金属和半导体)中磁场能量的选择吸收, 这种选择吸收是由于微观带电粒

子在朗道能级之间的量子跃迁。磁光振荡是由于价带中的电子从朗道能级到导带中同一能级的跃迁。

5. 磁等离子体效应^[5]

这是许多半导体在高于或低于自由载流子的等离子体频率时所产生的红外反射现象。

6. 光磁效应^[4, 6]

光磁效应是指磁性物质受到光照时产生的效应。例如, 某些磁性物质受到光照射时会引起共振磁场改变, 使磁各向异性发生变化, 并出现磁导率随时间逐渐减小的减落现象等。处于外磁场中的半导体受到光照射时会出现反电动势, 这种光磁效应也叫光磁电效应。

二、磁光学理论的发展

磁光学理论大体经历了三个阶段: 唯象理论、经典电子论和量子理论。

磁光学的唯象理论是将可观测的物理量(如 Faraday 旋转 θ_F 、折射率、吸收系数等)与介电常数张量联系起来, 给磁光现象以唯象解释。如果外磁场的方向平行于光传播方向(z 方向), 而且是各向同性介质, 则介电常数张量退化为^[2]

$$(\epsilon_{ij}) = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & 0 \\ -\epsilon_{xy} & \epsilon_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

介电常数张量的每一分量一般包括实部和虚部两部分。例如, $\epsilon_{xx} = \epsilon'_{xx} + i\epsilon''_{xx}$, 这表示介质离子的电偶极矩 p 与电磁波(光)的电场 E 不一定是同位相。

当 ϵ_{xx} 与 ϵ_{zz} 相差很小时, 可观察到 Cotton-Mouton 效应或 Voigt 效应。

Faraday 旋转 θ_F 和 Faraday 椭圆率 ϵ_F 与介电常数张量的非对角分量成正比, 即

$$\theta_F - i\epsilon_F = \frac{\pi l \epsilon_{xy}}{\lambda_0 \sqrt{\epsilon_{xx}}}, \quad (5)$$

其中 l 是试样的厚度。入射的线偏振光通过介质后变为椭圆偏振光, 椭圆的主轴相对于入射光的振动面旋转 θ_F , ϵ_F 是椭圆的短轴与主轴

之比。

如果介质的厚度足以使人射光产生反射，则反射光的振动面按 θ_K 旋转，并有一个椭圆率 ε_K ，这就是 Kerr 磁光效应。它可用下式表示：

$$\theta_K - i\varepsilon_K = \frac{i\varepsilon_{xy}}{\sqrt{\varepsilon_{xx}(\varepsilon_{xx} - 1)}} \quad (6)$$

磁光学的经典电子论也称为磁光效应的 Lorentz 准经典理论^[5]。如果将 Lorentz 修正也考虑在内，角频率为 ω 的光波的电场 \mathbf{E}' 可以写成

$$\mathbf{E}' = \mathbf{E} + \frac{4\pi}{3} \mathbf{P} = \left(\mathbf{E}_0 + \frac{4\pi}{3} \mathbf{P}_0 \right) e^{i\omega t} - \mathbf{E}'_0 e^{i\omega t},$$

其中 \mathbf{P} 是极化强度矢量。处在外加均匀磁场

$$\mathbf{H}_c = H_c \mathbf{h}_c (\mathbf{h}_c \text{ 是单位场矢量})$$

中并受电场 \mathbf{E}' 作用的束缚电子的运动方程为

$$\ddot{\mathbf{p}} + \gamma \dot{\mathbf{p}} + \omega_0^2 \mathbf{p} - \frac{eH_c}{mc} [\dot{\mathbf{p}} \times \mathbf{h}_c] = \frac{e^2}{m} \mathbf{E}'_0 e^{i\omega t}, \quad (7)$$

其中 $\mathbf{p} = e\mathbf{r}$ 是原子中电子的电矩， γ 是阻尼系数， ω_0 是原子中电子的固有角频率。

(7) 式是磁光效应经典电子论的基本方程。假定光波是平面电磁波，则在 \mathbf{H}_c 平行于光传播方向时得到 Faraday 效应的结果；在 \mathbf{H}_c 垂直于光传播方向时得到 Cotton-Mouton 效应的结果。

磁光学的量子理论首先是由 Kronig 于 1927 年开始考虑的^[6]。后来 Rosefeld (1929)，Kroll (1930) 和 Serber (1932) 应用量子理论分别对原子体系、单电子体系、顺磁性离子体系和分子体系中的磁光学问题进行了处理。后来 Goossens (1958) 对分子体系建立了较好的量子力学理论，并讨论了对称性低的多原子分子情况(1962)。但这些讨论仅限于抗磁体，对顺磁介质的讨论则仅限于准经典理论的框架。新近分子轨道方法也仅限于绝缘体和半导体，对于金属的处理是不成功的，在这方面还有大量的工作要做。

三、磁光学的应用

磁光学的应用可分为两个方面，即理论研
物理

究中的应用和技术中的应用。限于篇幅只能举例说明。

1. 磁光学在理论研究中的应用

磁光学对于当今磁学、固体物理学研究中的几个中心课题，如自旋玻璃和无序系统的行为、临界现象、基本相互作用以及激发等，具有十分重要的应用价值^[6]。

利用磁光旋转可以观察磁畴，这不仅能帮助了解磁畴结构，而且能帮助进一步理解磁光效应的起源。

双折射反映磁性晶体的微观结构，具有很高的灵敏度，因而可用它来研究晶体微观结构和基本相互作用^[6]。近年来的工作表明，双折射是研究相变和临界行为十分有效的工具^[7]。

2. 磁光学在技术中的应用

磁光学在技术中有着巨大的潜在应用能力。目前的应用主要是利用磁光旋转的非互易性制成磁光器件。

利用 Faraday 效应制成的磁光隔离器应用于光纤通讯中，可以消除调制器、光纤连接器、光探测器和其他光路元件处产生的反射对光源的影响^[9,10]。图 1 给出了磁光隔离器的原理。

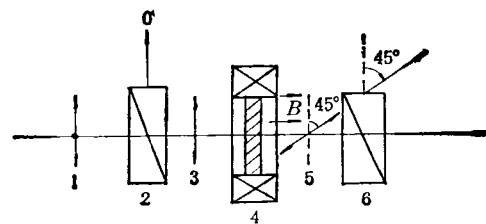


图 1 磁光隔离器原理

1. 自然光；2. 起偏器；3. 线偏振光；4. Faraday 旋转器；5. 线偏振光；6. 检偏器

磁光盘存储器是一种存储容量大、存储密度高的存储元件。一张直径为 130mm 的磁光盘，单面容量可达 200M 字节以上。这种存储器的信息保存是用磁性方法，写入是用热磁方法，读出是利用 Kerr 磁光效应^[9]。和其他磁感记忆方法相比，磁光读出的方法具有灵敏度高、信息点小的优点，并且不需要在磁性材料上附加任何复杂电路。

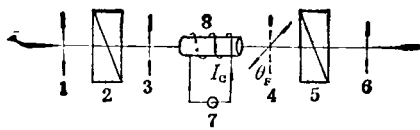


图2 磁光调制器原理

1.自然光; 2.起偏器; 3.线偏振光; 4.旋转 θ_F 的线偏振光; 5.检偏器; 6.出射光; 7.高频信号源; 8.磁光材料

磁光调制器是利用 Faraday 效应对光束进调制,其原理如图2所示。

利用磁光效应制成的磁光器件还有磁光环形器、磁光转换开关、显示元件、导向装置和磁强计等。这些器件因其具有独特的优点,可以在计算机技术、激光技术、信息处理、通讯技术、空间技术以及电力工业等许多领域得到广泛应用。

四、磁光材料

磁光材料的研制本来是一个比较老的课题。最初人们采用火石玻璃作为磁光材料。后来发现,若在玻璃中掺入稀土元素,则 Verdet 常数 V 大大增加,其数值随掺入的稀土元素而异。

1958年,美国 Bell 公司首先研制成功一种新型磁光材料——钇铁石榴石磁性晶体 YIG ($Y_3Fe_5O_{12}$)。1972年,美籍华人田炳耕(集成光学的开拓者)首先用液相外延法研制成功单晶薄膜式磁光材料,从而为磁光材料的研究及应用开发打开了新的局面,这是磁光材料发展的一个新突破。它的比 Faraday 旋转可达 10^3 — 10^4 [度/cm],对可见光波段虽然仍有较大的吸

(上接第448页)

HPCe (high purity germanium) detector 高纯锗探测器
 IBA (ion-beam analysis) 离子束分析
 IBFM (interaction boson fermion model) 相互作用玻色子费米子模型
 IBM (ion-beam mixing) 离子束混合
 IBM (interaction boson model) 相互作用玻色子模型
 MEC (meson exchange current) 介子交换流
 NAA (neutron activation analysis) 中子活化分析
 NAR (nuclear reaction analysis) 核反应分析

收,但却有较好的透明性。因为许多光学系统是在近红外工作,在这个波段比 Faraday 旋转和透明性都是好的。

近年来,磁光材料的研制工作主要是致力于增加比 Faraday 旋转和改进透明度这两个方面^[1]。例如对石榴石外延薄膜,一直在研究用于增大磁光旋转的替代物(特别是 Bi 和 Pb)以及用于改进透明度的替代物(例如 Ca)的作用。

用于磁光盘存储器的磁光材料,目前占支配地位的是稀土-过渡金属非晶态薄膜,已经取代了早期使用的如 MnBi 和 MnAlGe 多晶金属互化物^[1]。非晶态稀土-过渡金属材料与磁性石榴石之间有两点是类似的,即其中的元素很容易被其他元素替代,以及两者都表现出亚铁磁行为。大面积薄膜可以用蒸发或溅射的方法制备。

- [1] P. Zeeman, *Researches in Magneto-Optics*, Macmillan & Co. Ltd, London, (1913).
- [2] J. C. Suits, *IEEE Trans. Magn.*, MAG-8-1 (1972), 95.
- [3] 近角聪信等编,韩俊德等译,磁性体手册(下),冶金工业出版社,(1985).
- [4] J. 卡拉威著,杨顺华译,固体量子理论(下),科学出版社,(1984).
- [5] S. V. Vonsovskii, *Magnetism*, Vol. 1, Keter Publishing House Jerusalem Ltd. (1974), 405.
- [6] J. F. Dillon, *J. Magn. Magn. Mat.*, 31—34 (1983), 1—9.
- [7] G. Gehring, *Proc. Joint Inter-mag-conf. on Mag. and Mag. Mat.*, Montreal (20—23 July 1982).
- [8] M. Zvara, *Phys. Stat. Sol.*, K195(1968), 27.
- [9] 内山晋等著,姜恩永译,应用磁学,天津科技出版社,(1983).
- [10] K. Kobagashi and M. Seki, *IEEE J. Quantum Electronics* QE-16-1 (1980), 11.
- [11] T. H. O'Dell, *Rep. Prog. Phys.*, 49 (1986), 589.

OBEP (one boson exchange potential) 单玻色子交换势
 OPEP (one pion exchange potential) 单 π 介子交换势
 PIXE (particle induced X-ray emission) 粒子诱发的X射线发射
 PSD (pulse-shape discrimination) 脉冲形状甄别
 PWBA (plane wave Born approximation) 平面波玻恩近似
 PWIA (plane wave impulse approximation) 平面波冲量近似
 TOF (time-of-flight) 飞行时间