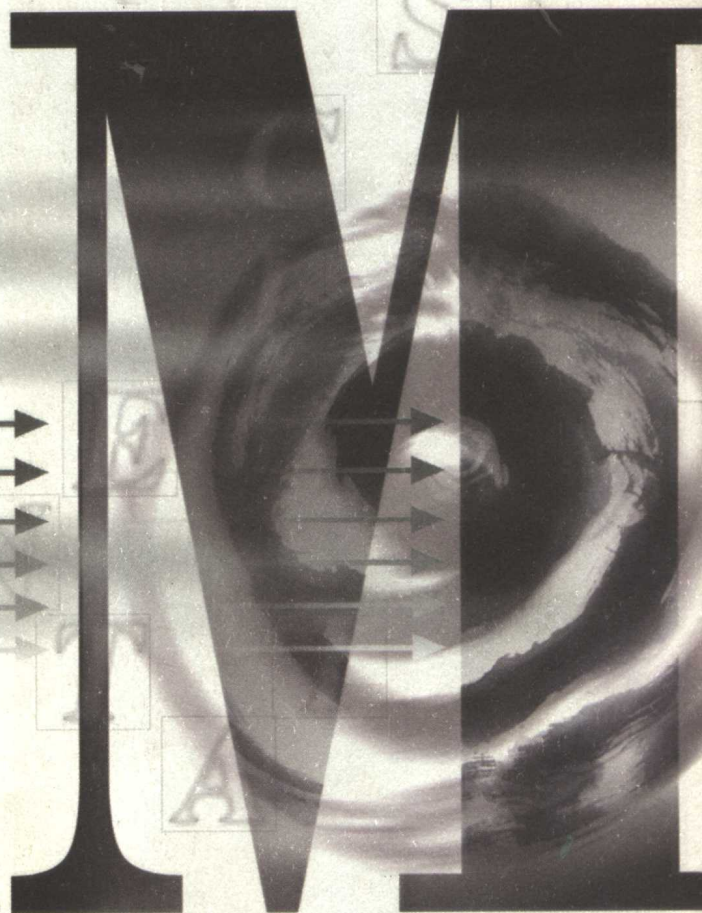


科 学 前 沿 丛 书

磁光学

Magneto-optics

刘公强 乐志强 沈德芳 著



上海科学技术出版社

科学 前沿丛书

磁 光 学

刘公强 乐志强 沈德芳 著

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

磁光学/刘公强,乐志强,沈德芳著. —上海:上海
科学技术出版社, 2001. 5

(科学前沿丛书)

ISBN 7-5323-5856-9

I. 磁... II. ①刘...②乐...③沈... III. 磁光学
IV. 0431

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 07180 号

上海科学技术出版社出版发行

(上海瑞金二路 450 号 邮政编码 200020)

上海新华印刷厂印刷 新华书店上海发行所经销

2001 年 5 月第 1 版 2001 年 5 月第 1 次印刷

开本 787×1092 小 1/16 印张 22.5 插页 4 字数 336 千

印数 1—1500 定价: 48.00 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题,
请向本社出版科联系调换

内 容 提 要

本书论述磁光效应的基本理论,磁光材料和磁光器件的性质、原理和应用。全书共分 12 章,第 1 章为绪论,第 2 章介绍光和磁的一些基本概念,第 3—6 章分别论述磁光效应的经典理论、量子理论、耦合模理论和光导波衍射理论,第 7—11 章分别论述和介绍磁光材料、磁光非互易器件、磁光存储原理及应用等,第 12 章概略介绍光磁效应。

本书可作为从事磁性(光)材料和器件研究人员、生产技术人员参考书,也可作为综合性大学凝聚态物理专业及工院校与固体材料和器件相关专业的教学用书。

《科学》前沿丛书》序

人类文明发展的长河正浩浩荡荡地流向又一个千年，在世界格局的综合国力竞争中，基础研究的发展水平已经成为一个民族的智慧、能力和国家科学技术进步的基本标志之一。

基础研究是人类对未知世界的探求，它在各门学科的前沿上展开，以认识客观世界的物质结构、各种基本运动形态和运动规律为己任，它的重大发现常常带来社会生产的革命性变化。

基础研究在科学前沿向未知领域迈进的每一步，都有赖于创新，创新是基础研究的灵魂，而创新需要很高水平的理论思维。正如 19 世纪的一位伟人所说，一个民族想要站在科学的最高峰，就一刻也不能没有理论思维。

自然科学的理论来自关于自然现象和探索实践认识的总结。这种总结通过去粗取精、去伪存真、由此及彼、由表及里的过程，实现关于自然规律认识的飞跃，在人类认识自然的知识体系上编织出新的结点。这样的结点往往又是在新的高度编织下一个结点的支撑点。一个民族想要攀登到科学的最高峰，进行高水平的理论思维，既需要一批批科学家不懈地在科学前沿上探索，也需要他们不断地进行这种实现认识上飞跃的总结。

著书立说，对一个专题或一个领域的研究成果，进行去粗取精、去伪存真、由此及彼、由表及里的总结，使之系统化、理论化，是提高理论思维水平和持续创新能力的必须。在攀登科学高峰的历程中，一部好的基础科学学术著作常常能为众多继续向上攀登的人们提供一块坚实的 platform。因此，出版好基础性研究领域的学术著作，是一件十分有意义的工作。

《科学》杂志的编者和出版者，自 1915 年《科学》创刊以来，始终以传播科学为己任，在办好刊物的同时，积极地参与出版科学著作这件有意义的工作。在 20 世纪的最后五年，《科学》的出版者——上海科学技术

出版社推出了一套《**科学**专著丛书》，出版了 14 部专著，受到了科学界和出版界的欢迎和好评。

我高兴地看到，在迎来 21 世纪之时，作为上述努力的继续，该社又推出这套《**科学**前沿丛书》，着重于从基础性研究的前沿交叉领域选题，出版学术著作。我期望，这套丛书的编者、作者和出版者能通力合作，通过自己的辛勤劳动，以一部部精心选题、精心著述、精心编辑、精心出版的著作，参与铺筑通向中国科学再度辉煌的大道！

周光召

（《**科学**》杂志编委会主编）

2001 年元旦

本书序

1845年法拉第发现了磁光效应,但直至20世纪50年代初,还很少有人了解磁光效应,更谈不上有多少实际应用。1960年激光器诞生之后,犹如久旱逢甘霖,磁光效应才得到重视和发展。我国实质性地开展磁光效应及其应用研究始于20世纪70年代,较为系统地进入高等院校的教学,则是20世纪80年代的事。

磁光学是物理学中一门新兴的分支学科,它主要描述光与各种磁性物质相互作用的现象和理论,以及磁光材料与器件的特性和应用。

1984年,笔者将一项科研成果“磁光旋转测试方法和装置”转入生产并做了一些推广工作,一些单位,特别是一些高等院校的实验室陆续开设了有关磁光效应的实验课。在上海交通大学和中国科学院上海冶金研究所多年本科生和研究生教学的基础上,刘湘林教授、笔者和金绥更于1990年1月出版了《磁光材料和磁光器件》一书。该书介绍了各种磁光效应的基本概念和经典理论基础,汇集了国外20世纪60年代以来研究和制备的部分磁光材料和器件。至于国内的研究成果,仅关于石榴石单晶、薄膜和磁光隔离器等少量磁光材料和器件及其测量方法做了一点浅显的介绍,除此之外,还远谈不上系统论述。关于国内的基础理论研究成果,则没有涉及。显然,这已经不能适应目前的科研和教学的需要。

迄今为止,很难找到一本系统论述磁光效应基础理论,以及磁光材料和器件方面的专门书籍。最近几年,一些读者希望继续获得《磁光材料和磁光器件》一书,以及新近的教学和科研资料。刚好这些年来笔者又积累了一些较为系统的基础理论研究成果,磁光材料、磁光非互易器件和磁光记录等方面的部分研制经验,同时亦积累了一定数量的国内外资料,因此萌发了撰写这本《磁光学》的念头。

本书重点介绍各种磁光效应的经典理论和量子理论。在这些理论中,笔者提出了基态双能级电子跃迁模型,同时将交换作用有效场等概念

引入磁光效应。用此理论模型和概念,得到了各种磁光效应与物质磁化强度的明确表达式,磁光效应与磁化强度的非线性关系以及磁光效应的色散和温度特性,初步解释了多年来发现的一些实验现象。在导波光衍射理论中,用相当篇幅论述了近年来十分引人注目的、在各种静磁场条件下静磁波与导波光的相互作用及其衍射特性;同时,还讨论了介质损耗对静磁波传播和导波光衍射效应的影响。

磁光记录技术的发展是磁光效应应用上的重大突破,书中较详细地叙述了磁光存储的原理、材料和主要的记录技术,其中一些内容,如氧化物、铂钴合金和多层膜等磁光记录材料的结构、成分设计和制备方法是作者的实践经验和体会。在磁光材料和磁光器件部分,牵涉到一些磁光测量技术,其中磁光调制倍频法测量技术是笔者 20 世纪 80 年代的科研成果,考虑到至今仍在实际应用,故在书中也作了一定的叙述。

迄今对光磁效应知者甚少,为此在本书最后一章专门介绍有关光磁效应的一些基本概念。光磁效应是磁光效应的逆效应,它描述的是光与磁性物质相互作用引起物质磁性质变化的物理现象。由于关于这方面的研究工作很少,实际应用更少,所述内容仅供读者参考。

本书第 1—6、12 章由刘公强教授编写,第 7、8 章由乐志强副教授编写,第 9—11 章由沈德芳教授编写;武保剑博士参与第 6 章的编写工作,乐志强副教授承担了全书绝大部分计算机草图的绘制工作;全书由刘公强教授负责组织和统稿。

美国加利福尼亚大学的蔡振水(Chen S. Tsai)教授为第 6 章的编写提供了很大的帮助,笔者在此深表谢意!

考虑到磁光学是一门年轻的学科,笔者的教学和科研经历有限,上述理论和实践难免有不少缺点,乃至错误之处,诚请读者批评指正。

笔 者

2000 年 12 月

目 录

《科学前沿丛书》序

本书序

第 1 章 绪论	1
参考文献	3
第 2 章 光和磁的一些基本概念	4
§ 2.1 光的偏振	4
§ 2.2 光的双折射和二向色性	7
§ 2.3 光的衍射	8
§ 2.4 物质磁性的分类	9
§ 2.5 磁畴与磁化	14
§ 2.6 交换作用和间接交换作用	20
参考文献	28
第 3 章 磁光效应的经典理论	29
§ 3.1 法拉第效应	30
3.1.1 法拉第效应的宏观理论	30
3.1.2 有效场	36
3.1.3 法拉第效应的经典电子动力学理论	38
§ 3.2 磁线振双折射和磁线振二向色性	52
3.2.1 磁线振双折射的宏观理论	53
3.2.2 磁线振双折射的经典电子动力学理论	55
§ 3.3 克尔效应	57
3.3.1 极向克尔效应	58
3.3.2 横向克尔效应	63

§ 3.4 塞曼效应	66
§ 3.5 磁激发光散射	68
参考文献	70
第 4 章 磁光效应的量子理论	72
§ 4.1 引言	72
§ 4.2 磁光效应的基本关系式	72
§ 4.3 顺磁性物质中的法拉第磁光效应	77
§ 4.4 铁磁性物质中的法拉第磁光效应	83
§ 4.5 亚铁磁性物质中的法拉第磁光效应	90
§ 4.6 磁性物质中的克尔磁光效应	97
参考文献	101
第 5 章 耦合模理论	102
§ 5.1 导波光的耦合模理论	104
5.1.1 波导模的基本运算	104
5.1.2 耦合模方程	110
§ 5.2 磁光波导中的模式耦合	112
5.2.1 磁光介质中的介电常量张量	112
5.2.2 磁光波导中的 TE-TM 模转换	115
参考文献	119
第 6 章 静磁波传播和光导波衍射理论	120
§ 6.1 静磁波在磁性波导中的传播特性	120
6.1.1 无损耗介质中的静磁波传播特性	120
6.1.2 损耗介质中的静磁波传播特性	130
6.1.3 不均匀磁场中的静磁波传播特性	133
§ 6.2 静磁波作用下的光导波模转换	138
6.2.1 微扰介电常量张量	139
6.2.2 非共线位形下光导波的模转换	140
6.2.3 共线位形下光导波的模转换	146
§ 6.3 光导波的衍射理论	151

§ 6.4 不均匀磁场中的光导波衍射理论	160
参考文献	163
第 7 章 磁光材料及其物理性质	165
§ 7.1 磁光晶体	165
7.1.1 石榴石单晶	165
7.1.2 尖晶石晶体	178
§ 7.2 磁光薄膜	182
7.2.1 石榴石单晶薄膜	182
7.2.2 合金薄膜	185
§ 7.3 磁光玻璃	188
参考文献	189
第 8 章 磁光器件及其应用	192
§ 8.1 磁光调制器	192
8.1.1 低频磁光调制的基本概念	192
8.1.2 磁光调制器的损耗特性	195
8.1.3 钇铁石榴石单晶磁光调制器	199
8.1.4 石榴石单晶薄膜磁光调制器	200
8.1.5 玻璃磁光调制器	201
8.1.6 薄膜波导磁光调制器	202
§ 8.2 磁光隔离器	204
8.2.1 法拉第效应的非互易性	205
8.2.2 光隔离原理	205
8.2.3 偏振有关近红外光隔离器	206
8.2.4 偏振无关近红外光隔离器	208
8.2.5 波导型光隔离器	212
8.2.6 全光纤磁光隔离器	217
§ 8.3 磁光环形器	221
8.3.1 基本原理	222
8.3.2 高隔离度四端光环形器	223
8.3.3 不完全光环形器	225
§ 8.4 磁光传感器	227

8.4.1	磁光电流传感器基本原理	227
8.4.2	传感头的设计	229
	参考文献	231
第 9 章	磁光存储原理及其系统的构成	233
§ 9.1	光学存储的历史	234
§ 9.2	磁光存储和读出的原理	236
9.2.1	磁光存储原理	236
9.2.2	磁光记录读出原理	238
§ 9.3	磁光记录系统	244
9.3.1	盘片旋转及其控制	245
9.3.2	光学头及其伺服系统	245
9.3.3	磁光盘的信号读取	248
	参考文献	249
第 10 章	磁光存储材料	250
§ 10.1	磁光存储材料的基本性能要求	250
§ 10.2	Mn-Bi 多晶材料	251
§ 10.3	稀土-过渡族金属非晶态材料	253
10.3.1	非晶态磁性物质	254
10.3.2	RE-TM 非晶态薄膜的自发磁化强度	257
10.3.3	RE-TM 非晶态磁性薄膜的居里温度及其热稳定性	259
10.3.4	RE-TM 非晶态薄膜的磁各向异性	267
10.3.5	RE-TM 非晶态薄膜的矫顽力	270
10.3.6	RE-TM 非晶态薄膜的磁光效应	271
§ 10.4	铁氧体存储薄膜	273
10.4.1	尖晶石型铁氧体薄膜	273
10.4.2	磁铅石型铁氧体薄膜	274
10.4.3	石榴石型铁氧体薄膜	274
§ 10.5	Pt/Co 成分调制薄膜和 Pt-Co 合金薄膜	282
	参考文献	286
第 11 章	高密度磁光盘中的磁性多层膜结构和超高密度磁光存储	290

§ 11.1	平面磁化膜之间的耦合	290
§ 11.2	垂直磁化膜的层间耦合	291
11.2.1	磁光记录直接重写技术	293
11.2.2	多层膜结构的记录位超分辨率读出	298
11.2.3	磁畴扩大检测	301
11.2.4	磁性多层耦合膜在磁光光盘中的其他应用	303
§ 11.3	超高密度近场光学磁光存储	305
11.3.1	SIL 磁光存储	306
11.3.2	NSOM 磁光存储	306
参考文献		308
第 12 章 光磁效应		309
§ 12.1	石榴石材料中光磁现象的实验观察	310
12.1.1	对称性变化的光诱导效应	310
12.1.2	对称性不变的光诱导效应	313
§ 12.2	石榴石材料中光磁效应的理论分析	315
12.2.1	变化率方程	316
12.2.2	晶轴模型	318
12.2.3	微扰晶轴模型	324
12.2.4	光磁效应的微观机制	328
§ 12.3	铁磁体/半导体混合物中的光诱导效应	329
§ 12.4	磁性氰化物中的光诱导效应	331
12.4.1	Co-Fe 氰化物中的光诱导效应	332
12.4.2	Fe-Mn-Cr 氰化物中的光诱导效应	335
参考文献		337
主题索引		339

第 1 章 绪 论

磁性是物质的基本物理属性之一。根据物质磁性的基本特点,主要可分为抗磁性、顺磁性、铁磁性、亚铁磁性和反铁磁性五大类,此外还有螺磁性等。在顺磁性、铁磁性、亚铁磁性、反铁磁性以及螺磁性等物质中,原子或离子具有固有磁矩。在外磁场作用下,这些物质中的固有磁矩会沿着外磁场平行排列,外磁场越大,平行排列的程度越高,物质的磁化强度 M 亦越大。在抗磁性物质中,原子或离子没有固有磁矩,但这类物质处于外磁场中时,其内部的电子轨道将产生附加的拉莫尔进动,这一进动具有相应的角动量和相应的感应磁矩。通常这类物质的磁化强度 M 远小于具有固有磁矩的物质的磁化强度。

一束入射光进入具有固有磁矩的物质内部传输或者在物质界面反射时,光波的传播特性,例如偏振面、相位或者散射特性会发生变化,这个物理现象称为磁光效应(magneto-optic effect)。一般情况下,磁光效应随物质的磁化强度 M 增大而增大。因此,这些物质在外磁场中磁光效应将明显增强。一束光进入处于外磁场中的抗磁性物质内部时,也会产生磁光效应,但这类物质的磁化强度 M 通常远小于其他物质的磁化强度,因此其磁光效应十分微弱。

磁光效应包括法拉第效应、克尔效应、磁线振双折射(科顿-莫顿效应或者佛赫特效应)、磁圆振二向色性、磁线振二向色性、塞曼效应和磁激发光散射等许多类型。目前,研究和应用最为广泛的磁光效应是法拉第效应和克尔效应。

1845年,法拉第^[1]将一片玻璃置于一对磁极之间,发现沿外磁场方向的入射光经玻璃透射后的光偏振面发生了旋转。这是历史上第一次发现的磁光效应,后来就称为法拉第效应(Faraday effect)。受法拉第效应的启发,1876年又发现了光在物质表面反射时光偏振面发生旋转的现象,即克尔效应(Kerr effect)。1896年,塞曼^[2]在观察置于磁场中的钠蒸

气光谱时发现了塞曼效应(Zeeman effect)。1898年,发现了与横向塞曼效应有相似特性的佛赫特效应(Voigt effect)^[3]。接着,于1907年在做液体实验时又发现了科顿-莫顿效应(Cotton-Mouton effect)。之后,陆续发现了磁激发光散射等磁光效应。20世纪初,根据麦克斯韦电磁理论,以及洛伦兹和佛赫特等人的色散理论,应用磁场中电子的经典动力学理论,已能很好地解释早期发现的一些磁光效应。量子力学诞生以后,磁光效应的微观理论亦获得了一定的进展。但是,直至20世纪50年代初,磁光效应还没有得到实质性的应用,许多磁光性质还无法应用理论,特别是量子理论来解释。

1956年,贝尔实验室的狄龙(J. F. Dillon, Jr.)等^[4,5]在偏光显微镜下,应用透射光观察到了钇铁石榴石(yttrium iron garnet, YIG)单晶材料中的磁畴(magnetic domain)结构,从此揭开了磁光效应大量应用的序幕。特别是1960年第一台激光器问世以后,磁光效应研究才走上快速发展的道路,新的磁光材料(magneto-optic material)和器件以及许多磁光性质和现象如雨后春笋般地被发现或研制出来,磁光理论亦获得了相当大的发展。应用最为广泛的磁光材料有稀土铁石榴石(rare earth iron garnet)、掺铋稀土铁石榴石单晶和薄膜、稀土-过渡族金属(rare earth-transition metal, RE-TM)合金薄膜和磁光玻璃等。磁光器件有磁光偏转器、磁光开关和调制器、隔离器、环行器、显示器、旋光器、磁强计、磁光盘存储器(可擦除光盘)和各类磁光传感器等,在光学信息处理、光纤通信、CATV系统和计算机技术,以及在工业、国防、宇航和医学等领域已经有了较为广泛的应用。未来在光计算和光雷达等尖端技术领域亦将有所应用。磁光效应还可用来进行固体材料能谱研究、观察和分析材料磁结构等方面的基础研究。

广义地说,磁光学包括两大部分。一部分是描述光与磁性物质相互作用引起光性质的变化,这就是上面所说的磁光效应;另一部分是描述光与磁性物质相互作用引起物质磁性质的变化,称为光磁效应。相比之下,对光磁效应的研究远没有磁光效应那样广泛和深入,迄今也没有什么应用。但是,近年来对于光磁效应的研究已有日趋活跃之势,一些新的光磁现象时有发现,其应用前景不可忽视。

总的来说,磁光学仍是一门年轻的分支学科,许多磁光性质和现象还

尚待发现,一些磁光性质和现象正在不断发现。1997年,法国科学家发现,光在物质中传播时具有类似于霍尔效应的磁光效应。最近在测量一块含有氟化铈的塑料板的光透射率时,发现了塑料板的光透射率会随磁场强度 H 变化而变化。目前还不能对这种称为光的磁阻效应的现象进行令人满意的解释。随着研究的深入,这有可能获得很大的应用,不仅可望用作光开关之类的光纤通信器件,还可望利用光的这种磁阻效应来控制光子,用此特性做成的光子器件要比电子器件具有更高的控制精度。近来,磁光的应用也在迅速开辟新的领域,应用法拉第效应、克尔效应和扫描近场光学显微镜成像技术^[6],已经成功地获得了层次分明的动态和静态彩色磁畴图形,其分辨率优于所使用的光波波长,目前已达 100 nm。应用这一技术即将可以直接定量检测介质的磁化强度。可以想见,随着时代的推移,磁光学必将获得更大的发展,磁光材料、器件和测量技术必将获得更大的应用。

参考文献

- [1] Faraday M. *Phil Mag*, 1846, **29**:153
- [2] Zeeman P. *Researches in Magneto-Optics*. London: Macmillan, 1913
- [3] Voigt W. *Magneto- and Electro-Optics*. Tübingen: Leipzig, 1908
- [4] Dillon J F, Jr. *J Appl Phys*, 1958, **29**:539
- [5] Dillon J F, Jr. *J Phys Radium*, 1959, **20**:374
- [6] Hartmann U. *J Magn Magn Mat*, 1996, **157/158**:545

第 2 章 光和磁的一些基本概念

磁光效应涉及许多光和磁的基本性质,为便于叙述和理解,本章将首先概述一些光和磁的基本概念,包括光的偏振、光的双折射和二向色性、光的衍射、物质磁性的分类、磁畴与磁化,以及交换作用和间接交换作用等内容。

§ 2.1 光的偏振

设一单色平面光波沿 z 轴方向传播,根据光的横波性,可将其电矢量 E 写成:

$$\begin{cases} E_x = E_{0x} \cos(\varphi_x - \omega t) \\ E_y = E_{0y} \cos(\varphi_y - \omega t) \\ E_z = 0 \end{cases} \quad (2-1)$$

式中 ω 为光波的圆频率或称角频率, φ_x 和 φ_y 为两个(光)电矢量的相位;为简便起见,式中省略了 $\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}$ 项, \mathbf{k} 为波矢, \mathbf{r} 为位置矢量。消去式(2-1)中的时间 t , 整理得,

$$\left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)^2 - 2\frac{E_x}{E_{0x}}\frac{E_y}{E_{0y}}\cos\varphi = \sin^2\varphi \quad (2-2)$$

式中 $\varphi = \varphi_y - \varphi_x$ 。式(2-2)为一椭圆方程,这表明式(2-1)所描述的是一个椭圆偏振光(elliptically polarized light),它由两个频率相同、相位差固定、振动方向相互垂直的(光)电矢量所合成,合成的(光)电矢量末端的轨迹为一椭圆,见图 2-1a。