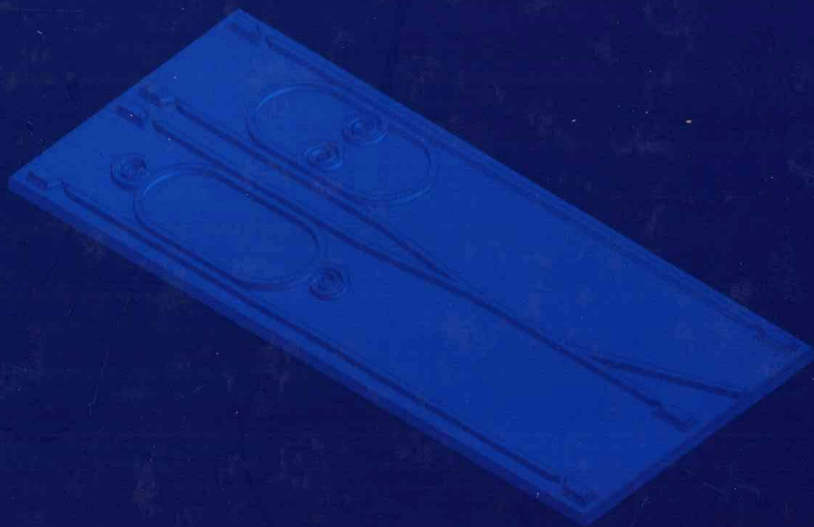




航天科技图书出版基金资助出版

光学陀螺系统与关键器件

章燕申 伍晓明 著



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

光学陀螺系统与关键器件

章燕申 伍晓明 著



中国宇航出版社

·北京·

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

光学陀螺系统与关键器件/章燕申, 伍晓明著. —北京: 中国宇航出版社, 2010. 12

ISBN 978-7-80218-869-3

I. ①光... II. ①章... ②伍... III. ①光学陀螺仪
IV. ①TN965

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 245423 号

责任编辑 刘亚静 责任校对 陈琳 封面设计 谭颖

出版
发行

中国宇航出版社

社址 北京市阜成路 8 号 邮编 100830
(010) 68768548

网址 www.caphbook.com / www.caphbook.com.cn

经销 新华书店

发行部 (010) 68371900 (010) 88530478 (传真)
(010) 68768541 (010) 68767294 (传真)

零售店 读者服务部 北京宇航文苑
(010) 68371105 (010) 62529336

承印 北京画中画印刷有限公司

版次 2010 年 12 月第 1 版 2010 年 12 月第 1 次印刷

规格 880×1230 开本 1/32

印张 13.375 字数 371 千字

书号 ISBN 978-7-80218-869-3

定价 68.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于2007年设立的,旨在鼓励航天科技人员著书立说,不断积累和传承航天科技知识,为航天事业提供知识储备和技术支持,繁荣航天科技图书出版工作,促进航天事业又好又快地发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定,由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作,航天工程技术著作,航天科技工具书,航天型号管理经验与管理思想集萃,世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著,向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审1~2次,资助10~20项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登陆中国宇航出版社网站,点击“出版基金”专栏查询详情并下载基金申请表;也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址: <http://www.caphbook.com>

电话: (010)68767205, 68768904

作者简介

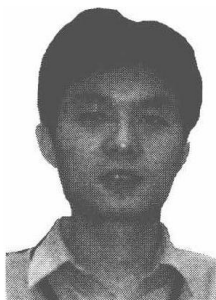


章燕申，1950年毕业于北京清华大学，1957年获莫斯科包曼技术大学Ph.D学位。

1957年参与创办清华大学自动控制系“导航与控制”专业，并担任该教研室主任和副系主任。1965年~1976年，在清华大学倡议并主持中国第一台静电陀螺仪及其三轴稳定平台的研制，成功地完成了环境条件例行试验和13次飞机试验。1980年，成为清华大学教授及博士生导师。1980年~1990年，被任命为国防重点研制项目“静电陀螺仪”的总设计师，工程样机成功地通过了部级技术鉴定。1995年~2000年，同时担任“光学陀螺自动寻北定位定向系统”和“集成光学陀螺仪”两项国家研究项目的负责人，取得了多项成果。

在高精度导航系统、光学陀螺仪及其关键器件等学科领域，发表论文30余篇，出版专著和译著6部。

参加以下学术团体：中国惯性技术学会（曾任副理事长）、中国电子学会、中国造船工程学会、中国航空学会、中国宇航学会（曾任导航与控制专业委员会成员）、国际测量工作者协会（IAG）、美国光学学会（OSA）、美国电机电子工程学会（IEEE）。



伍晓明，1997年参与国防重点研究项目“集成光学陀螺仪”，1999年6月至2000年9月，在德国斯图加特大学光电子物理研究所作访问研究，2001年获北京清华大学工学博士学位。2002年进入清华大学微电子学研究所，现任副研究员。

承担国家自然科学基金、“863”、“973”和多项国际合作课题。研究领域包括：微型振动能量转换收集器、神经信号与生化检测微电极阵列、集成微声学器件、集成光波导器件及传感器、纳米材料的拉曼光学检测、碳基纳米材料的制备与器件研究等。2009年4月至2010年4月，在美国加州大学伯克利分校机械工程系作访问学者。发表论文50余篇，是美国电机电子工程学会（IEEE）会员。

前 言

1983年,笔者访问加拿大 Calgary 大学测量工程系。当时,该市的 Northtech 测量公司拥有多台液浮陀螺平台式惯性测量系统,应用效果很好。可是,Calgary 大学 K. P. Schwarz 教授已在指导博士生研究如何编写激光陀螺捷联式惯性测量系统的计算机程序。这一事实促使笔者开始重视光学陀螺技术。

1987年,笔者访问德国宇航研究院飞行制导研究所。当时,该所正在研究和开发具有德国自主知识产权的新型激光陀螺产品。他们向笔者提供了宝贵的技术资料 and 研制经验,使笔者深受教益。

1989年,笔者在1958年以后第一次重访苏联和母校莫斯科包曼技术大学,了解到包曼技术大学从1965年开始研制 KM-11 型棱镜式激光陀螺。1985年,采用 KM-11 的 I-42 型捷联式飞机惯性导航系统在苏联得到了实际应用。

1990年,中国惯性技术学会在洛阳召开了中苏惯性技术学术会议,会议以激光陀螺为研讨的重点。这次国际会议极大地促进了中苏两国对激光陀螺的合作研究,加速了我国开发激光陀螺产品的进程。

1993年以来,笔者在清华大学主持了以下有关光学陀螺仪的研究项目。

1) 光学陀螺自动寻北快速定位定向系统。1993年~2000年,在引进俄罗斯 KM-11 和 I-42 样机的基础上,针对样机性能测试中发现的关键技术开展了深入的理论和实验研究,并成功地提出了多项技术改进措施。

2) 集成光学陀螺仪。1995年,笔者在访问慕尼黑德国国防军大学期间接受了集成光学陀螺仪研究课题。1996年~2000年,清华大学和俄、德、法三国的有关高校和研究所开展了合作研究,取得了多项

实验研究成果。实验研究结果表明,谐振型集成光学陀螺难度较大。在实验研究的基础上,笔者于 2002 年获得了“循环干涉型光学陀螺”的发明专利。

3) 零闭锁激光陀螺。1999 年~2001 年,清华大学和美国 New Mexico 大学合作设计了零闭锁激光陀螺实验样机,采用固体激光器取代了现有激光陀螺产品中的气体激光器。可惜限于经费和人力,样机未能完成。

4) 大功率超辐射发光二极管。2000 年~2004 年,清华大学和德国 Stuttgart 大学合作开展研究项目,德方设计并完成了管芯的样件,中方有关单位协作管芯的封装。

本书作者全面总结了上述 4 个项目的科研成果,并将其撰写成书。全书分为以下 3 个部分:

- 1) 基础理论知识(第 1 章~第 6 章);
- 2) 光学陀螺系统(第 7 章~第 10 章);
- 3) 光学陀螺的关键器件(第 11 章~第 15 章)。

其中第 6、8、14、15 章由伍晓明撰写,其余内容由章燕申撰写。

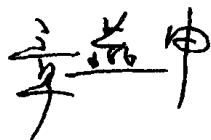
当前,微米纳米技术发展迅速,光学陀螺技术正面临着重大变革,突破点在器件方面。为此,本书作者认为,介绍光学陀螺的新型系统与器件很有必要。在系统方面,除了现有光纤陀螺和激光陀螺产品之外,需要增加“循环干涉型光学陀螺”和“零闭锁激光陀螺”等新型系统结构。在器件方面,重点是光学陀螺的新型光源和集成光学的 Sagnac 效应敏感环。

衷心感谢国内和国外同行的参与和支持使得本书得以出版。丁衡高院士十分重视从俄罗斯引进激光陀螺技术,并于 1995 年倡议在我国研制集成光学陀螺仪。在他的参与下,笔者主持了和俄、德、法等国同行对集成光学陀螺仪的合作研究。这些研究工作的阶段性成果被收集在清华大学精密仪器系 1998 年刊印的英文版《集成光学陀螺》(Integrated Optic Gyros)论文集,以及 1999 年刊印的中文版《激光陀螺技术》技术报告与论文集之中。丁衡高院士分别为两本书撰写了序

言(见附录 A 和附录 B)。本书正文之后列出了作者及其合作者有关光学陀螺研究的著作(见附录 C)。

对宋有山研究员和王巍研究员推荐本书出版,本书作者深表感谢。

欢迎广大读者对本书中存在的不足之处提出指正。

A handwritten signature in black ink, consisting of three characters: '王', '巍', and '申'.

2010 年 10 月

于清华大学

目 录

引论	1
第 1 章 电磁场理论	9
1.1 引言	9
1.2 Maxwell 方程	9
1.3 电磁波在自由空间中的传播	10
1.4 电磁波的能量分布与扩散	12
1.5 电磁波在各向异性介质中的传播	14
1.6 Snell 定律	17
1.7 Brewster 角	18
1.8 光波的相干性	20
参考文献	23
第 2 章 Gauss 光束	24
2.1 引言	24
2.2 Gauss 光束的基本方程	24
2.3 Gauss 光束的低次横模	26
2.4 Gauss 光束低次横模的物理意义	29
2.5 Gauss 光束的高次模	32
参考文献	34
第 3 章 波动光学	35
3.1 单色光束的干涉	35

3.2	时间相干性与空间相干性	37
3.3	增透膜与高反射膜的工作原理	39
3.4	双光束干涉与多光束干涉	41
3.5	光束的衍射	42
3.6	Fresnel 衍射	47
3.7	Fraunhofer 衍射	49
3.8	衍射光栅	50
3.9	光学仪器的分辨能力	52
3.10	光束的偏振	54
3.11	偏振光束的反射和折射	56
3.12	双折射情况下的偏振	57
3.13	椭圆偏振光束和圆偏振光束	60
3.14	Kerr 效应	63
3.15	光束偏振平面的偏转	64
	参考文献	66
第4章	量子物理学	67
4.1	光的双重性	67
4.2	Plank 热辐射理论	68
4.3	光电效应	72
4.4	辐射压力与 Compton 效应	75
4.5	波函数理论	78
4.6	波函数的特性	79
4.7	不确定性关系与 Schrodinger 方程	80
4.8	量子力学中的算子及其特性	84
4.9	重要物理量的算子	87
4.10	量子力学算子形式的 Schrodinger 方程	90
4.11	自由粒子的运动	91
4.12	在无限高墙一维势能阱中的粒子	92

4.13 线性简谐振荡器	97
4.14 矩形势能门槛的反射与透射	101
4.15 有限宽度的矩形势能障碍区	105
4.16 隧道效应	107
参考文献	111
第 5 章 原子物理学	112
5.1 氢原子的光谱系列	112
5.2 Boor 氢原子理论	113
5.3 Frank 和 Hertz 的实验	117
5.4 氢原子的量子力学模型	120
5.5 氢原子中电子的 $1s$ 状态	127
5.6 在轨道运行中电子的磁性力矩与机械力矩	130
5.7 碱金属的光谱	131
5.8 电子的自旋	134
5.9 电子脉冲总力矩	136
5.10 在外磁场中的原子	137
5.11 等效粒子系统	140
5.12 Paula 量子数法则	141
5.13 受激辐射与激光器	143
参考文献	149
第 6 章 集成光电子学	150
6.1 引言	150
6.2 平面光波导	150
6.3 平面波导的光传播模式	153
6.4 单模的平面波导	155
6.5 光波导模式的有效折射率	157
6.6 波导模式的电磁学描述	158

6.7	Goos-Hänchen 位移	163
6.8	脊形波导	164
6.9	波导的传输损耗	167
6.10	弯曲波导	172
6.11	波导与光路的耦合	173
6.12	光波导传输损耗的测量	176
6.13	光纤	179
	参考文献	186
第 7 章	光纤陀螺	187
7.1	引言	187
7.2	Sagnac 效应	188
7.3	光纤陀螺的互易性光路	190
7.4	开环式光纤陀螺的读出系统	192
7.5	闭环式光纤陀螺的读出系统与标度因数误差	197
7.6	光纤陀螺的零偏稳定性	201
7.7	光纤陀螺的噪声	205
7.8	光纤陀螺的设计方法	206
7.9	光纤陀螺产品设计的实例	208
7.10	精密级光纤陀螺的探索性研究	210
7.11	采用光子带隙光纤的干涉型光纤陀螺	211
7.12	干涉型与谐振型两种光学陀螺的比较	213
7.13	采用空芯光子带隙光纤的谐振型光纤陀螺	215
7.14	Brillouin 光纤陀螺的探索性研究	217
	参考文献	223
第 8 章	循环干涉型光学陀螺	225
8.1	引言	225
8.2	循环干涉型光纤陀螺的系统方案	226

8.3 循环干涉型光纤陀螺的理论分析	227
8.4 循环干涉型光纤陀螺的实验	233
8.5 有源循环干涉型光纤陀螺	239
参考文献	242
第9章 激光陀螺	244
9.1 引言	244
9.2 棱镜式激光陀螺的结构与性能	245
9.3 反射镜式激光陀螺的结构与性能	249
9.4 双向环形激光器	252
9.5 激光陀螺光路的控制	260
9.6 激光陀螺的闭锁阈值与抖动偏频	266
9.7 抖动偏频激光陀螺的读出装置	270
9.8 激光陀螺技术的发展方向	279
参考文献	281
第10章 零闭锁激光陀螺	283
10.1 引言	283
10.2 激光陀螺闭锁阈值的测量与调节	285
10.3 超短光脉冲零闭锁激光陀螺的实验证明 (增益介质为染料)	293
10.4 超短光脉冲零闭锁激光陀螺的实验证明 (增益介质为钛宝石)	296
10.5 超短光脉冲零闭锁激光陀螺原理样机的设计	298
10.6 清华大学与美国 New Mexico 大学合作设计的零闭锁 激光陀螺原理样机	300
参考文献	306
第11章 超辐射发光二极管	307

11.1	引言	307
11.2	工作原理	309
11.3	管芯的封装	310
11.4	外延层的设计与工艺	311
11.5	外延层的性能参数	315
11.6	纵向结构的设计	318
11.7	光谱特性的测试	318
11.8	光功率特性的测试	320
11.9	偏振特性的测试	322
11.10	本章小结	323
	参考文献	324
第 12 章	掺铒超荧光光纤光源	325
12.1	引言	325
12.2	放大自发辐射	325
12.3	双程与单程结构	327
12.4	仿真计算	330
12.5	功率特性	334
12.6	光谱特性	336
12.7	光谱特性的温度稳定性	340
12.8	光纤陀螺对掺铒光纤光源的反馈作用	344
	参考文献	349
第 13 章	二极管激光器	350
13.1	引言	350
13.2	谐振型集成光学陀螺对光源的要求	351
13.3	二极管激光器应用于有源腔集成光学陀螺的 可行性	356
13.4	分布反馈式二极管激光器的研制	357

13.5 分布反馈式二极管激光器的设计方法	359
13.6 外腔式二极管激光器的设计方法	365
13.7 二极管激光器线宽的测试方法	367
参考文献	370
第 14 章 无源集成光电子器件	371
14.1 引言	371
14.2 无源平面光波导材料的淀积	371
14.3 无源平面光波导的光刻	374
14.4 干法刻蚀	376
14.5 无源平面光波导的离子交换	377
14.6 无源 Sagnac 效应敏感环	378
14.7 采用光子带隙光纤的光纤陀螺	389
14.8 本章小结	390
参考文献	391
第 15 章 有源集成光电子器件	393
15.1 引言	393
15.2 有源 Sagnac 效应敏感环	393
15.3 本章小结	402
参考文献	403
附录 A 丁衡高院士为英文版《集成光学陀螺》论文集 撰写的序	404
附录 B 丁衡高院士为《激光陀螺技术》技术报告与论文集 撰写的序	407
附录 C 作者及其合作者有关光学陀螺研究的著作	409

引 论

社会需求和科技创新是推动人类社会生产力发展的两大动力。惯性技术的发展也是如此，在过去的 100 年间惯性技术经历了以下三次飞跃。

1) 从采用滚珠轴承支承结构的陀螺仪转变为采用液浮、挠性、静电等支承结构的高精度陀螺仪。陀螺仪的零偏稳定性至少提高了 2 个数量级。

2) 从机械陀螺仪及其平台式惯性导航系统转变为光学陀螺仪及其捷联式惯性导航系统。导航系统的体积和质量显著减小，导航系统的性能价格比得到了提高。

3) 从纯惯性导航系统转变为卫星与惯性组合导航系统。采用卫星定位信号对惯性导航信号周期性地修正，放宽了对所用陀螺仪的精度要求。目前，微硅陀螺仪和微硅加速度计已经在组合导航系统中得到了大量应用。

下面介绍惯性技术的发展过程。第一次世界大战前后，世界各国高度重视海军建设。在钢铁的舰船上，陀螺罗经、陀螺方位水平仪以及陀螺稳定平台等都是舰船导航和火炮控制不可缺少的装备。20 世纪 20 年代，随着航空工业的发展，各种水平陀螺、方位陀螺以及速率陀螺，在飞行控制、射击以及轰炸瞄准等方面得到了大量应用。陀螺产业从航海领域扩展到航空领域，受到世界各国的高度重视。

以苏联为例，莫斯科包曼技术大学在 1929 年设立了精密仪器工程系，代号为“A-3”系，意思是从事航空、火炮以及自动控制等 3 方面的精密仪器设计与制造。全系设立 4 个专业：精密机械仪器、光学仪器、自动控制系统与器件以及解算装置。当时的解算装置是机电

式计算机，主要是火炮指挥仪。20 世纪 50 年代，解算装置专业更名为“电子计算机”专业。

在第二次世界大战中，德国使用的弹道式导弹武器促成了惯性技术的第一次飞跃。在 V-2 型弹道式导弹中采用了水平陀螺和方位陀螺控制飞行器的姿态角，与此同时，还首次采用了陀螺积分加速度计控制飞行器的射程。这种兼有控制和导航功能的系统被称为“惯性制导系统”。应当指出，当时的陀螺仪和陀螺积分加速度计都采用了滚珠轴承支承结构，因而陀螺仪的精度较低，导弹的着地点误差很大。德国的导弹武器未能发挥预期的威力。

第二次世界大战后，美、苏等国在德国 V-2 型导弹的基础上竞相发展中程和远程弹道式导弹。为此，要求陀螺仪的精度提高 2~3 个数量级。新的国防需求促使陀螺仪改变了传统的滚珠轴承支承结构，转为采用液浮、电磁定中、挠性以及静电等支承结构。采用上述新型结构后，机械陀螺仪的零偏稳定性提高了 2~3 个数量级，保证了中程和远程弹道式导弹的着地点精度。这是惯性技术的第一次飞跃。达到远程导弹制导精度要求的高精度陀螺仪被称为“导航级”陀螺仪。由导航级陀螺仪构成的惯性导航系统在远程飞机和核潜艇中得到了普遍应用。

应当指出，社会生产力的发展水平不仅体现在能够生产何种产品，更为重要的是采用什么技术设备进行生产。技术先进的生产设备不仅能够保证产品的性能，更为重要的是能够提高产品的成品率，从而实现批量生产。导航级陀螺仪的批量生产涉及多种技术关键，其中主要是特种材料（例如，铍）和特种工艺。为此，需要投入巨大的人力和财力，并经过较长时间才能解决这些关键技术问题。

第二次世界大战后，美国麻省理工学院首先研制成功了导航级的液浮陀螺。与此同时，苏联莫斯科动力学院也获得了类似的发明专利。但是，双方在实现液浮陀螺批量生产的进度方面可能存在一定的差异。作者有幸参加了苏联航空工艺研究院（缩写 NIAT）组织