

集成光学陀螺及相关技术研究的现状与展望^{*}

邓思盛 肖志松[†] 燕路 黄安平

(北京航空航天大学物理科学与核能工程学院 北京 100191)

摘要 陀螺技术作为惯性导航的重要组成部分已广泛应用于国民经济和军事工业的众多领域. 文章综述了包括机械陀螺、光学陀螺和原子陀螺在内的陀螺技术的发展过程和基本特点, 着重论述了集成光学陀螺及其相关技术研究的现状与发展趋势. 通过对比各种类型陀螺的性能特点, 结合导航技术的发展趋势, 展望了各种陀螺在相应领域的发展前景.

关键词 惯性导航, 机械陀螺, 光学陀螺, 原子陀螺, 集成光学, 光波导

The status and prospects of integrated optical gyroscopes and related topics

DENG Si-Sheng XIAO Zhi-Song[†] YAN Lu HUANG An-Ping
(School of Physics and Nuclear Energy Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract As an essential part of inertial navigation technology, gyroscopes have been explored extensively in many industrial and defense fields. This paper reviews the development and characteristics of mechanical, optical and atomic gyroscopes, focusing on the development of integrated optical waveguide gyroscopes. With regard to future navigation technology, the prospective applications of various types of gyroscopes in specific areas are discussed by comparing their relative advantages and disadvantages.

Keywords inertial navigation, mechanical gyroscope, optical gyroscope, atomic gyroscope, integrated optics, optical waveguide

1 应用广泛的陀螺技术概述

导航技术是从人类航海的需求和实践中发展起来的^[1]. 从最早的罗盘到无线电导航, 再到惯性导航和卫星导航技术, 伴随着导航技术的进步, 它的应用范围越来越广, 在国防和国民经济中起着越来越重要的作用.

因此, 作为惯性导航技术重要组成部分的陀螺有着十分重要的研究价值. 经过一百多年的发展, 目前已经得到广泛应用的陀螺主要有两大类: 机械陀螺和光学陀螺.

1.1 机械陀螺

机械陀螺, 是一种利用机械转子的定向性和进

动性而制成的敏感角速率或角位移的装置^[2]. 早在 1852 年, 法国物理学家傅科提出建立陀螺仪 (Gyroscope) 的设想, 虽然他的陀螺仪实验未能取得预期的效果, 但为日后机械陀螺技术的发展^[1-4] 和应用奠定了基础. 进入 20 世纪之后, 机械陀螺技术在军事、工业等需求的刺激下得到了快速的发展, 相继出现了浮力陀螺和静电陀螺 (ESG), 前者包括液浮陀螺、气浮陀螺、磁悬浮陀螺等. 这两种陀螺有着相对复杂的结构和精密的部件, 所以价格昂贵, 但同时也拥有极高的精度, 至今仍在很多领域发挥着不

^{*} 国家自然科学基金(批准号:11074020)、航空科学基金(批准号:2010ZC51035)、中央高等学校基本科研业务费专项(批准号:YWF-10-01-A20)资助项目

2011-03-05 收到

[†] 通讯联系人. Email: zsxiao@buaa.edu.cn

可替代的作用. 之后又发展出了振动式陀螺, 其基本工作原理是检测陀螺仪中的振动模块获得的科氏加速度的大小, 该加速度与其旋转坐标系的旋转速率成比例. 振动式陀螺包括半球谐振陀螺仪(HRG)、石英音叉振动式陀螺仪(QVG)以及微机械电子系统(MEMS)陀螺仪(简称微机电陀螺)^[5]等. 其中微机电陀螺是伴随着 21 世纪微纳米加工技术的发展而出现的新一代微型机械陀螺, 是近年来微机械电子系统领域研究的一个热点, 由于其体积小、重量轻、成本低、可靠性高、易批量生产等特点, 受到了世界的广泛关注^[6].

因此, 机械陀螺经历了从陀螺罗经(它结合陀螺仪的定向性, 是可用于提供方向基准的仪器)、浮力陀螺、静电陀螺到微机电陀螺的发展历程. 虽然它们的工作机制、结构形态、成本以及精度都各不相同, 但所有机械陀螺都有着共同特点, 即包含可活动的部件, 并通过转子或振动模块的运动所产生的物理效应来测量旋转. 机械陀螺存在机械运动, 因而也就存在着磨损, 这也就必然会影响到系统的使用寿命, 而且会限制其在高加速度及强振动环境中的应用等, 这一系列问题便促进了另一种全新概念的陀螺——光学陀螺的诞生.

1.2 光学陀螺

光学陀螺主要有三大类: 激光陀螺、光纤陀螺和集成光学陀螺. 其中激光陀螺和光纤陀螺已经得到广泛应用, 集成光学陀螺目前正处在研究开发阶段, 具有良好的应用前景, 本文第二节将重点介绍.

光学陀螺是一种利用萨格奈克(Sagnac)效应^[7]测量旋转角速率的新型惯性仪表. 所谓 Sagnac 效应是指: 如果一个任意几何形状的闭合光学环路相对惯性系沿某一方向转动, 那么在此光路中沿相反方向传播的两束光绕行一周后, 所积累的相位差与系统旋转的角速度直接相关. 基于这一事实, 法国学者 Sagnac 于 1913 年提出了环形干涉仪可以作为一个测量旋转的传感器的想法, 这便是光学陀螺的最初设想.

随着 20 世纪 60 年代激光的出现, 首个激光陀螺实验^[8]很快就由 Macek 和 Davis 完成, 环形激光陀螺就此宣告诞生, 这标志着以 Sagnac 效应为基础的光学陀螺取得了实质性的进展. 目前, 激光陀螺技术已经完全成熟, 并在许多惯性导航领域特别是高精度领域得到应用. 相对机械陀螺而言, 激光陀螺取消了机械陀螺高速旋转的“转子”, 使其结构得到了极大的简化, 但在通常情况下, 激光陀螺需采用悬臂

梁结构的振动来避免它的“闭锁”现象, 因而激光陀螺还不是全固态仪表.

进一步发展的光纤陀螺得益于 20 世纪 70 年代光纤技术的进步, 特别是低损耗光纤的出现, 它具有更小的体积、更轻的质量、更低的成本、没有运动部件等优点, 是一种真正的全固态仪表. 自 1976 年美国犹他州立大学的 Vali 和 Shorthill 等人研制成功第一个光纤陀螺(FOG)以来^[9], 光纤陀螺已经发展了 30 多年, 共发展出了干涉式(IFOG)、谐振式(RFOG)和受激布里渊散射式光纤陀螺(BFOG)三类. IFOG(简称为 FOG)通过测量闭合光路中沿相反方向传播的两束光由于 Sagnac 效应积累的相位差值而得到系统旋转的角速度, 是一种相位敏感器件. FOG 产生的 Sagnac 相位差与闭合光路的面积和光纤的长度成正比, 而相位差值越大, FOG 精度就越高. 这使得干涉式光纤陀螺具有很好的设计灵活性, 可以根据应用精度的不同, 通过改变光纤长度调整陀螺的测量精度. FOG 技术现已完全成熟, 角速度探测精度已达到 $10^{-4} (^{\circ})/h$, 拥有了相当大的产业化规模. RFOG 则是一种频率敏感器件, 根据 Sagnac 效应, 在旋转的环形谐振腔中, 反向传播的两束相干光具有不同的谐振频率, 根据其频率差值即可得到系统旋转的角速度. 与 FOG 相比, RFOG 仅需要较短的光纤长度, 从而降低了由长光纤所带来的多种噪声, 因此有更高的极限灵敏度, 但目前 ROG 仍存在着高相干光源小型化封装、谐振腔精细度等技术问题, 尚未得到广泛的应用. 而 BFOG 则还处于基础研究阶段, 还有许多问题需要探索.

美国是世界上率先研制光纤陀螺的国家, Honeywell、Northrop Grumman(2001 年兼并了 Litton 公司成为其导航部门)、KVH 等公司的研发水平代表了国际上光纤陀螺技术的先进水平. 还有众多机构诸如日本的 JAE、三菱、日立公司, 法国的 IXSEA 和 CEA-Leti 公司, 俄罗斯的 Optolink 公司等也是研究和生产光纤陀螺的主要企业. 我国目前已有部分光纤陀螺仪关键技术及器件水平已达到或超过了国外同类产品的水平.

2 集成光学陀螺及相关研究的现状与展望

导航技术应用领域的不断拓展与深化, 给不同领域内应用的光学陀螺提出了更新和更高的要求.

这些要求中有几项指标格外引人注目,那就是低成本、集成化、轻质小型化、低功耗、可大规模生产等。回顾近年来光子技术的发展不难发现,其革命性突破已使集成光子材料、器件、乃至系统的应用成为可能。纷繁多样且具有巨大应用前景的材料、器件和系统的研究吸引着全世界科学家的目光。集成光学陀螺(或者说集成惯性导航系统)就是其中之一。于是,集成光学陀螺的研究应运而生。

光学陀螺已经历了从激光陀螺、光纤陀螺到集成光学陀螺的发展历程。而这里所说的集成大致可分为两个阶段:第一是部分光子集成阶段,包括采用体积更小的部件,设计更紧凑的结构,将部分原本分离的光学元件集成到一块或多块芯片上,即用多功能集成光学芯片代替多个分离元件的功能,从而在一定程度上减小系统的体积和成本;第二则是全光子集成阶段,即实现全部器件的单片集成,也就是将不同的分离器件包括光源、波导环、探测器等集成在同一芯片中,以减小器件体积,降低成本,实现规模化生产。目前,光纤陀螺已开始向光路的集成化方向发展,其具体目标是将光纤陀螺中除光源和探测器以外的其他光路器件集成在一个芯片上,采用光波导代替光纤构建集成光波导陀螺(WOG)。但是,集成化发展的过程中有一个重要的共性问题,这就是各种光器件对应的材料体系不同,从而使集成制造工艺极为复杂和困难,解决这一问题的关键是选用合适的集成芯片的基础材料。

光波导是平面光路技术的核心组件,利用光波导代替光纤构建陀螺成为光学陀螺集成化的一个重要突破口。根据光波导理论,材料之间存在折射率差是构成光波导的最基本的条件,以高折射率材料做波导芯区,低折射率材料做波导限制层,两者折射率差越大,限制光的能力就越强。目前的光波导基底材料体系主要包括玻璃、铌酸锂(LiNbO_3)、硅材料、有机聚合物、III-V族化合物半导体等,其中铌酸锂晶体有着很好的电光效应,更适合制作调制器,如目前已广泛使用的Y型波导。III-V族化合物半导体是有源光子器件的重要材料^[10],最近还有有关在磷化镓(GaP)波导上制作高效率的 90° 弯曲波导的报道^[11]。这些成果表明,III-V族化合物半导体在未来集成光波导陀螺的研究中具有巨大的应用潜力,但目前的研究还主要集中在玻璃、聚合物和硅基材料上。

2.1 玻璃和聚合物基光波导陀螺

飞秒激光^[12]以及离子交换技术^[13]的出现与发

展,使得人们可以在透明材料如玻璃中直接刻写光波导结构,这些技术的发展还使得人们可以把玻璃作为基质材料,并在其中利用上述方法制备光波导结构。确切地说,就是利用飞秒激光超短脉冲聚焦到玻璃内部,在焦点区域产生非线性吸收,引起材料结构变化,进而产生正折射率变化,从而实现不同方位(深度)、不同尺寸(模式)的波导结构。玻璃材料因制备工艺简单、成本低廉而为制造低成本光集成器件提供了很好的选择,并且玻璃材料还能方便地利用稀土掺杂等方式引入光增益。美国密歇根大学的Winick研究组即利用银离子交换技术在玻璃材料中制备了直径为1.6cm的有源谐振环结构(见图1)^[14],并指出引入的光增益有望大幅度地提高集成光波导陀螺的精度。此外,也可以利用玻璃体材料的性质,在其内部制备具有三维结构的光波导,为集成化光波导陀螺提供了一种新思路。德国的研究人员Nolte等利用飞秒激光制备了第一个真正意义上三维集成光器件,他们制作了一种 1×3 的分束器,向人们展示了利用飞秒激光实现三维光集成的前景^[15]。我们认为,这些技术的发展,将会更方便地实现空间三维结构的集成光波导陀螺^[16]。以上这些成果应该也可以在同为透明材料的聚合物材料上实现,而聚合物材料有着优良的光电特性,有极强的可塑性和良好的加工性,因而利用聚合物制作用于陀螺的光波导也逐渐成为一个研究的热点^[17]。

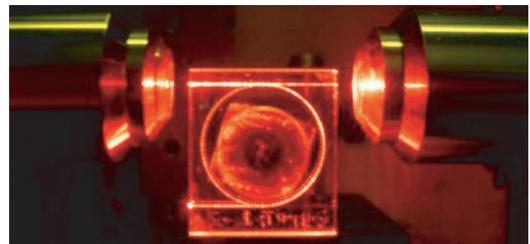


图1 利用离子交换技术制备的玻璃中的谐振环结构^[14]

2.2 硅基光波导陀螺

近期,随着世界上第一台硅基拉曼连续激光器^[18]的出现以及硅基高速调制器和探测器^[19]的研发取得巨大进展,使整个光波导陀螺光路中的关键器件都可以在硅基材料上制造,正如前文所述,不同材料体系的光器件很难集成在同一芯片上,这些成果就使得硅基光波导具有强大的集成化优势。而且,由于Si与 SiO_2 极高的折射率错配($n_{\text{Si}}=3.45$, $n_{\text{SiO}_2}=1.45$)的优点,使得光被紧密束缚在波导中,从而可以大幅度地减小硅基光子器件的尺寸,再加上硅材料具有成熟的微加工工艺,所以,硅材料(特别是绝

缘层上的硅)无疑是集成光波导陀螺的首选材料。

1997年,法国 CEA-Leti 公司 Mottier 等利用平面光路技术成功研制了第一个在硅基上单片集成的固态光学陀螺仪^[20]。他们将总长为 80cm 的硅波导集成在硅片上,配合外加光纤光源。该陀螺仪测量精度可达 $1^\circ/\text{s}$ 。他们这一成功的探索为光学陀螺集成化、低成本化、大规模生产奠定了良好的基础。随后,东京大学 Hotate 等人在 Mottier 等人的基础上又迈进一步,他们在硅平面集成光路上集成了约 14.8cm 的谐振环、定向耦合器和光开关,使用频率可调激光二极管作为光源,研制成功了基于硅平面光路单片集成的谐振式光学陀螺^[21]。此后,Armenise 介绍了一种基于多量子阱结构的陀螺方案^[22]。我国浙江大学也一直从事硅波导陀螺的相关研究,并且在实验上实现了灵敏度为 $7.3 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$ 的基于相位调制光谱技术的无源环形谐振腔陀螺^[23]。随后,他们又研究了多个弯曲结构的硅基波导环形谐振腔,在集成光波导陀螺领域进行了大量实验和理论方面的工作^[24]。

2.3 光子晶体光波导陀螺

除了上述各种材料外,光子晶体这种特殊的结构材料也被认为是极具发展前景的集成光学陀螺光波导材料。光子晶体具有介电常数周期性排列的人工结构,有类似于晶体能带结构的光通带与光禁带,只有光频率处于通带带隙的光波才能在该晶体中传播。如在光子晶体周期性结构中有目的地引入缺陷,便可以控制光在其中传播的特性,由此原理可以制作光波导。早在 2005 年,以色列 Tel Aviv 大学的 BZ Steinberg 就提出利用光子晶体制作集成光学陀螺中的光波导^[25],并指出可以此制造结构非常紧凑的光学陀螺。图 2 为文献^[25]给出的光子晶体环形微腔波导结构示意图,图中黑点为局部缺陷,每一个黑点都相当于一个高 Q 值(品质因数)的微腔。它不同于传统波导,光通过隧穿效应从一个微腔传播到相邻的另一个微腔中,图中的六个黑点就构成了一个六角形的环形谐振腔光波导。光子晶体波导可以在多种材料基底上制作,其中硅基光子晶体波导无疑具有上文讨论的硅基波导的大部分优势,而且光子晶体波导自身还具有结构可设计性强,传播损耗小(特别是弯曲损耗小)等优点,这些特点对于研制小型化、低功耗的集成光波导陀螺具有重要作用。

2.4 耦合谐振环光波导陀螺

综上所述,集成光波导陀螺近期主要还是会以硅基集成为主,包括利用传统 Si/SiO₂ 材料或 SOI

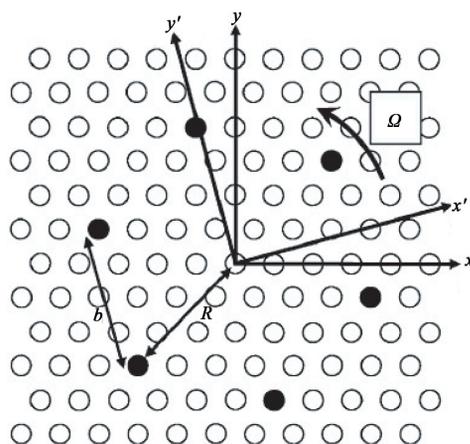


图 2 用于陀螺的二维光子晶体环形光波导^[25](图中所示的光波导系统是以角速度 Ω 逆时针旋转, b 为相邻两个缺陷之间的距离, R 为缺陷到旋转中心的距离)

材料在硅基底上制造各种类型的光波导,并以此构建集成光波导陀螺。集成光波导陀螺也可以分为两类:频率敏感型谐振式光波导陀螺和相位敏感型的干涉式光波导陀螺。谐振式光波导陀螺只需在基片上制作简单的环形波导谐振腔,陀螺精度正比于该谐振腔精细度,所以谐振腔需要达到较高的精细度以满足精度要求,但问题是通过不断提高精细度而提升陀螺性能的空间非常有限。

对于干涉式光波导陀螺情况则完全不同。在干涉式光纤陀螺中,一般采用增加闭合光路面积和光纤长度的办法增强 Sagnac 效应,但光波导陀螺受限于空间尺寸的微小,如何在有限的空间内延长光路长度和增强 Sagnac 效应显得尤为重要^[26]。仅仅为了代替光纤的作用而在硅片上制造几百米长的环形光波导是没有意义的,必须设计成特殊的结构,以实现用较小的总长度代替较大长度光纤的功能,即在硅片上设计并制造出具有合理耦合谐振环结构的光波导。耦合谐振环光波导可以有效地降低在其中传播的光的群速度,从而产生“慢光”效应。而利用“慢光”效应可以极大地提高基于 Sagnac 效应的光陀螺的灵敏度^[27]。虽然此后的报道^[28]称此慢光并不能直接提高灵敏度,所谓的慢光现象和灵敏度的增强只不过是一种共同发生的巧合而已,耦合谐振环光波导具有的慢光现象的超大结构色散才是真正的原因。即便如此,作为光波导陀螺的核心器件,谐振环耦合方式的不同的确会导致不同的传输特性、色散关系和相位灵敏度关系等,这意味着可以通过设计独特的耦合谐振环结构得到高灵敏度的光波导陀螺,上述现象确实非常具有吸引力,以致于众多学者都发表文章^[29-37],声称自己找到了并且分析了一些

可以给陀螺灵敏度带来增强效果的慢光结构. 在 2004 年 Matsko 等人的两篇文章^[29,30]中, 提出了一个边耦合高 Q 谐振环构成的干涉型陀螺的示意图, 如图 3 所示

然而, 上述文章分析的都是在不考虑光损耗时的无源波导, 而损耗对于陀螺性能有着重要影响. 相对于目前光学陀螺中传输光的典型波长而言, 硅波导损耗远大于石英光纤的损耗, 所以在给定尺寸和给定损耗的情况下, 与传统的光纤陀螺相比, 不论是谐振型还是干涉型, 硅集成光波导陀螺毫无优势可言, 这里的优势指的是灵敏度^[38]. 由于损耗最终限制了所有无源光陀螺的最大灵敏度, 超低损耗材料为高灵敏度集成化的陀螺提供了潜力^[38]. 但是, 既然损耗降低了光波导陀螺的精度, 是否可以认为引入光增益可以提高精度呢? 我们正在探讨采用稀土发光放大和利用硅基拉曼放大效应来解决这一问题.

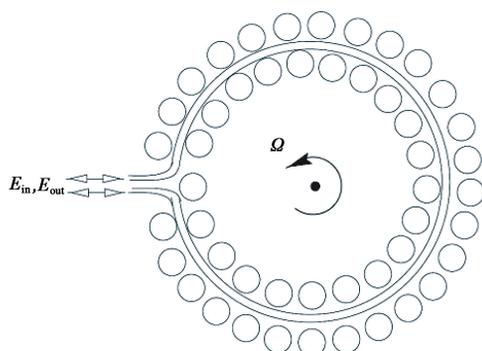


图 3 光波导角速度传感器示意图^[28-30]

从以上集成光学陀螺一个简单的发展过程看来, 基于近期硅基光子器件的突破进展, 未来集成光学陀螺的研究将朝着硅基全光子集成的方向发展. 但是, 使用现有技术在硅基上实现全部器件的单片集成尚有困难, 国际上在这方面的研究刚刚起步, 关于集成光波导陀螺的核心器件——光波导谐振环仍存在大量的科学问题有待研究. 因而, 在今后较长的时期内, 集成光波导陀螺的研发主要会集中在结构设计优化以及核心器件的研究和开发上, 而以光波导陀螺为核心的惯性导航系统仍处于概念阶段. 在对集成光波导陀螺(特别是有源集成光波导陀螺)的原理及核心器件研究上, 各研究组有不同观点, 争议很多, 目前无论在学术界还是工业界都尚未能形成能被人们广泛接受的观点. 各种研究内容与方式不尽相同, 甚至大相径庭. 但是, 这些研究的共同目标都是为了缩小陀螺体积、降低损耗与噪声以及提高陀螺精度.

3 陀螺技术的新发展: 原子(量子)陀螺

此外, 还应注意, 随着激光冷却原子等原子光学技术的进步, 一种利用物质波作为波源的所谓的原子(量子)陀螺^[39-43]正在快速的发展, 并逐步从实验室步入工程应用阶段. 原子陀螺基于原子干涉仪的 Sagnac 效应来实现对转动角速度的测量, 是一种物质波陀螺, 其概念早在 1973 年由 Ahschuler 和 Franz 提出^[44]. 根据德布罗意理论, 物质波也是一种波, 所以也具有 Sagnac 效应, 而且因为其波长极短, 在相同的闭合光路面积等条件下, 物质波引起的 Sagnac 相移比光波大了 10 个数量级, 所以此种类型的陀螺通常具有极高的精度, 理论上可以达到 $(10^{-9}-10^{-7})(^\circ)/h$, 是目前所有类型陀螺中精度最高的. 在用于解决惯性测量、计量学以及物理基础研究中的一些尚未解决的问题(如验证广义相对论等效原理)上, 这种量子传感器将起到十分重要的作用.

目前原子陀螺测量转动角速度的方法主要有两种: 一种是利用压电陶瓷驱动原子陀螺仪进行转动, 从而使原子陀螺产生 Sagnac 相位变化, 根据测量数据得到转动角速度的测量值, 该方法的测量精度较低, 对周围环境要求较高^[45]; 另一种则是采用相位调制模拟转动信号, 如在拉曼激光上增加调制频率, 或者采用对机械光栅进行扫描的方式, 来实现转动信号的模拟, 获得原子陀螺的相位变化, 这种方法测量精度较高, 但无法直接实现角速度的绝对测量, 需要通过对检测数据的进一步计算, 得到系统的绝对角速度^[46].

在原子陀螺研制方面, 美国斯坦福大学、耶鲁大学和麻省理工学院走在世界前列, 其中斯坦福大学和耶鲁大学合作研制成功的第一套实验室原子干涉陀螺, 其随机游走指标为 $(2 \times 10^{-6})(^\circ)/h^{1/2}$, 零偏稳定度指标为 $(2 \times 10^{-6})(^\circ)/s$ ^[46,47].

4 结束语

本文综述了机械陀螺、光学陀螺与原子陀螺的发展历程和基本特点, 重点介绍了集成光学陀螺的材料选择、结构特性与发展过程. 各类陀螺都有着不同的特征, 适用于不同的领域并在各自的发展前景上有所差异. 本文通过对各种类型陀螺的特性、优缺点、适用范围等的比较, 展望了未来一段时间内的陀

螺技术的发展趋势. 图 4 给出了各类陀螺近期大致的体积大小与精度分布图, 目前还处于基础实验研究阶段的原子陀螺, 由于需要复杂的激光冷却、电磁控制等装置, 所以体积庞大, 图 4 中没有给出描述, 而其他类型的陀螺体积都不能用巨大来形容. 其中集成光学陀螺还处于研究阶段, 近期可实现的系统体积大小与精度应与微机械陀螺类似, 但它的极限精度远远超过微机械陀螺. 导航应用领域对于集成化、小型化和低成本有着越来越苛刻的要求, 使得只有芯片级尺寸的微机械陀螺与集成光学陀螺的应用前景更加广阔, 特别是在民用领域, 更是繁花似锦.

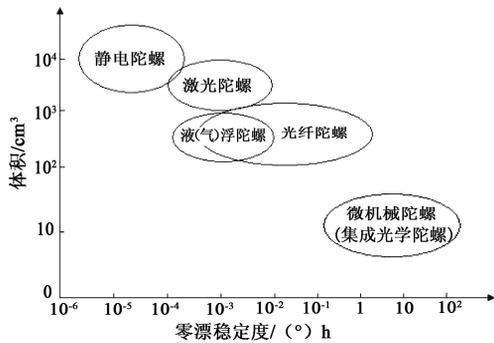


图 4 近期各类陀螺体积与精度分布图

因此, 我们认为, 在民用领域(即中低精度的导航系统中), 成本问题摆在首位. 对于陀螺的精度要求, 可以通过采用卫星导航系统(如 GPS)提供的定位信号建立组合导航系统的方式而适当地降低^[1]. 在这种条件下, 微机械陀螺与集成光学陀螺具有广阔的市场, 但微机械陀螺很难大幅度提高精度, 使其只能局限于民用领域的应用. 在高精度的导航系统中, 精度不断提高的光纤陀螺要比机械陀螺与激光陀螺更具竞争优势, 而尚处在研究和开发阶段的集成光波导陀螺, 特别是带有增益的有源光波导陀螺, 因其理论上可超过光纤陀螺的精度, 以及众多其他优点, 无疑有着超越光纤陀螺的巨大发展潜力. 随着导航技术的发展, 在兼顾陀螺精度的同时, 对于器件小型化、低成本、低功耗和可大规模生产方面的要求将不断提高, 集成光学陀螺会在不久的将来大放异彩, 基于集成光波导陀螺的结构设计优化以及核心器件的研究和开发将显得尤其重要.

参考文献

[1] 章燕申. 高精度导航系统. 北京: 中国宇航出版社, 2005 [Zhang Y S. Precision Navigation Systems. Beijing: China Aerospace Press, 2005 (in Chinese)]
 [2] 张桂才. 光纤陀螺原理与技术. 北京: 国防工业出版社, 2008 [Zhang G C. The Principles and Technologies of Fiber-Optic

Gyroscope. Beijing: National Defence Industry Press, 2008 (in Chinese)]
 [3] Ishilinsky A U. Mechanics of Gyroscopic Systems. Moscow: Academic Science Press, 1963
 [4] Wrigley W, Hollister W M, Denhard W G. Gyroscopic Theory, Design, and Instrumentation. Cambridge Massachusetts: The M. I. T. Press, 1969
 [5] Yazdi N, Ayazi F, Najafi K. Proc IEEE, 1998, 86(8): 1640
 [6] Acar C, Painter C C, Schofield A R *et al.* NSTI-Nanotech, 2005, 3(1): 201
 [7] Post E. J. Rev. Mod. Phys., 1967, 39(2): 475
 [8] Macek W M, Davis D T M, Jr. Appl. Phys. Lett., 1963, 2: 67
 [9] Vali V, Shorthill R W. Appl. Opt., 1976, 15(5): 1099
 [10] Troppenz U, Hamacher M, Rabus D G *et al.* Indium Phosphide and Related Materials Conference, 2002, IPRM. 14th, 475
 [11] Maqsood M W, Mehruz R, Chau K J. Applied Physics Letters, 2010, 97: 151111
 [12] Florea C, Winick K A. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(1): 246
 [13] Wong S F, Pun E Y B, Chung P S. IEEE Photonics Technol. Lett., 2002, 14(1): 80
 [14] Hsiao H K, Winick K A. Opt. Express, 2007, 15(26): 17783
 [15] Nolte S, Will M, Burghoff J *et al.* Applied Physics a—Materials Science & Processing, 2003, 77(1): 109
 [16] 燕路, 肖志松, 张峰等. 中国激光, 2009, 36(3): 547 [Yan L, Xiao Z S, Zhang F *et al.* Chinese J. Lasers, 2009, 36(3): 547 (in Chinese)]
 [17] Yeniay Aydin, Gao R F, Cai Y M *et al.* Photographic Science and Photochemistry, 2004, 22(6): 444
 [18] Rong H S, Jones R, Liu A S *et al.* Nature, 2005, 433(7027): 725
 [19] Liu A S, Jones R, Liao L *et al.* Nature, 2004, 427(6975): 615
 [20] Mottier P, Pouteau P. Electron. Lett., 1997, 33 (23): 1975
 [21] Suzuki K, Takiguchi K, Hotate K. Journal of Lightwave Technology, 2000, 18(1): 66
 [22] Armenise M N, Passaro V M N, Leonardi F De *et al.* Journal of Lightwave Technology, 2001, 19(10): 1476
 [23] Ma H L, Zhang X L, Jin Z H *et al.* Optical Engineering, 2006, 45(8): 080506
 [24] Ma H L, Wang S J, Jin Z H. Optics Communications, 2008, 281(9): 2509
 [25] Steinberg B Z. Physical Review E, 2005, 71: 056621
 [26] Barbour N, Schmidt G. IEEE Sensors Journal, 2001, 1(4): 332
 [27] Leonhardt U, Piwnicki P. Phys. Rev. A, 2000, 62(5): 55801
 [28] Shahriar M S, Pati G S, Tripathi R *et al.* Phys. Rev. A, 2007, 75(5): 053807
 [29] Matsko A B, Savchenkov A A, Ilchenko V S *et al.* Optics Communications, 2004, 233(1-3): 107
 [30] Matsko A B, Savchenkov A A, Ilchenko V S *et al.* Opt. Commun., 2006, 259: 393
 [31] Scheuer J, Yariv A. Physical Review Letters, 2006, 96(5):

- 053901
- [32] Steinberg B Z, Scheuer J, Boag A J. *Opt. Soc. Am. B: Opt. Phys.*, 2007, 24(5):1216
- [33] Peng C, Li Z B, Xu A S. *Applied Optics*, 2007, 46(19):4125
- [34] Peng C, Li Z B, Xu A S. *Opt. Express*, 2007, 15:3864
- [35] Zhang Y D, Wang N, Tian H *et al.* *Phys. Lett. A*, 2008, 372(36):5848
- [36] Yan L, Xiao Z S, Guo X Q *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 95(14):141104
- [37] Scheuer J. *Opt. Lett.*, 2009, 34(11):1630
- [38] Terrel M, Digonnet M J F, Fan S H. *Laser Photon. Rev.*, 2009, 3(5):452
- [39] Zimmer F E, Fleischhauer M. *Physical Review A*, 2006, 74(6):063609
- [40] Wu S, Su E, Prentiss M. *Physical Review Letters*, 2007, 99(17):173201
- [41] Krause M, Hulman M, Kuzmany H *et al.* *Physical Review Letters*, 2004, 93(13):137403
- [42] Kitagawa H, Kobori Y, Yamanaka M *et al.* *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(26):10444
- [43] Durfee D S, Shaham Y K, Kasevich M A. *Physical Review Letters*, 2006, 97(24):240801
- [44] Berman P R. *Atom Interferometry*. San Diego: Academic Press, 1997. 1
- [45] Keith D W, Ekstrom C R, Turchette Q A *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1991, 66(21):2693
- [46] Gustavson T L, Landragin A, Kasevich M A. *Classical and Quantum Gravity*, 2000, 17(12):2385
- [47] Peters A, Chung K Y, Chu S. *Metrologia*, 2001, 38:25