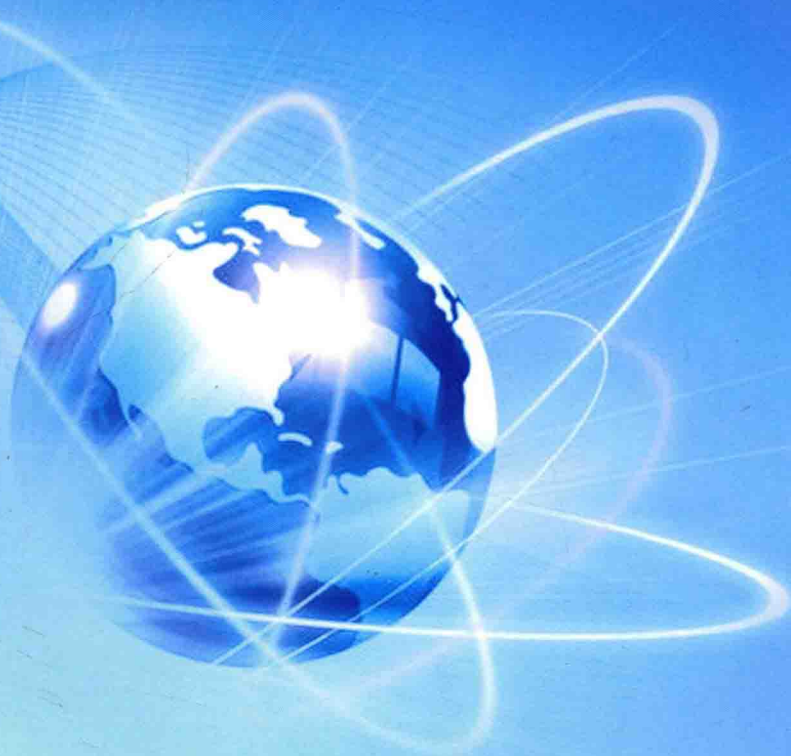


位置敏感探测器的定位 及结构改进研究

W
EIZHI MINGAN TANCEQI DE DINGWEI
JI JIEGOU GAIJIN YANJIU

席 锋 秦华锋◎著



重庆大学出版社
<http://www.cqup.com.cn>

位置敏感探测器的定位 及结构改进研究

席 锋 秦华锋◎著



重庆大学出版社

内容简介

本书系统地介绍了幅值法和相位法的定位原理,设计了相应的定位测试系统,并进行了实验测试。针对实验测试中发现的问题:光电流弱和易受环境光干扰,提出了通过结构改进增强横向光电效应的方法,建立了谐振腔增强横向光电效应的理论依据;并通过量子效率和横向电势差的数值计算,对横向光电效应的增强效果进行了验证。

图书在版编目(CIP)数据

位置敏感探测器的定位及结构改进研究/席锋,秦华锋著.—重庆:重庆大学出版社,2016.5

ISBN 978-7-5624-9697-7

I. ①位… II. ①席…②秦… III. ①光电探测器—研究 IV. ①TN215

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 043403 号

位置敏感探测器的定位及结构改进研究

席 锋 秦华锋 著

策划编辑:杨粮菊

责任编辑:文 鹏 何 敏 版式设计:杨粮菊

责任校对:关德强 责任印制:赵 晟

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:易树平

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023) 88617190 88617185(中小学)

传真:(023) 88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(营销中心)

全国新华书店经销

重庆长虹印务有限公司印刷

*

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:8.5 字数:196 千

2016 年 5 月第 1 版 2016 年 5 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5624-9697-7 定价:46.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

前言

位置敏感探测器是一种对入射光斑重心敏感的光电传感器,常被用于检测入射光斑位置。其物理机制是横向光电效应,当半导体 PN 结在非均匀光照下,在结面上激励光生载流子,即电子空穴对,并在横向电势差的作用下,在结面上扩散形成横向扩散电流输出。它是精密测量、精确定位的一种重要部件和功能部件,在目标探测(如同轴对准、激光定位、目标追踪等)、位移测量(如微位移测量、角位移测量)、位置检测(如爬壁机器人检测、盾构姿态检测)、高能粒子、射线探测等领域发挥重要作用。

在之前的研究中,笔者对位置敏感探测器的定位方法作了全面的研究。分析输出信号的特征,从电流信号中提取不同的信息,实现幅值法和相位法定位,分别制订了相应的测试方案,并进行了实验测试。在实验测试过程中,发现输出信号弱、易受环境光干扰的现象,提出了通过改进结构增强横向光电效应来解决这些问题。现将这些内容作系统整理,以供读者参考。

全书内容共分 6 章,各章内容大致如下:第 1 章介绍位置敏感探测器的产生及发展历程,并举例说明其在实际中的应用;第 2 章介绍位置敏感探测器的物理机制,说明非均匀光照时 PN 结横向光电效应的机理及数学描述——Lucovsky 方程,介绍一维和二维位置敏感探测器的 RC 传输线模型、特性参数、影响性能的因素;第 3 章介绍位置敏感探测器的幅值法定位检测,从物理机制的理论结果,对一维和二维位置敏感探测器,分别求解 Lucovsky 方程得到光电流的解析解,重点介绍利用幅值法实现单光束和多光束检测的原理,设计了相应的检测系统,并进行了实验验证;第 4 章介绍了相位法定位检测,介绍了位置敏感探测器对调制光源的响应特性,说明了相位法单光束和多光束检测的原理,设计了相应的检测系统,对单光束和多光束进行了实验验证;第 5 章介绍了谐振腔增强横向

光电效应的机理,针对实验检测中输出光电流信号弱,且易受环境光干扰的现象,提出通过结构改进,利用谐振腔结构提升位置敏感探测器性能;重点介绍了谐振腔增强横向光电效应的原理以及理论基础,设计了谐振腔结构,并对增强效果作了初步的数值验证;第6章为谐振腔增强型结构位置敏感探测器的仿真验证,首先分析其等效结构,计算了谐振腔激活介质的量子效率,然后利用差分求解法,对 Poisson 方程和电流连续方程进行求解,数值计算了输出光电流信号,并与普通 PN 结的结果进行了比较。

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,热忱欢迎读者给予批评指正。

席 锋 秦华锋

2015 年 10 月

目 录

第 1 章 位置敏感探测器概述	1
1.1 位置敏感探测器的概述	1
1.2 PSD 的研究历史	2
1.3 PSD 的应用实例	6
1.4 PSD 的多自由度检测	9
第 2 章 位置敏感探测器理论基础	13
2.1 半导体基础	13
2.2 半导体 PN 结的光电转换	20
2.3 PSD 的等效分析	25
2.4 二维 PSD 的 RC 传输线模型	27
2.5 PSD 特性参数及其影响因素	29
第 3 章 幅值法定位检测	35
3.1 光电流的理论解	35
3.2 PSD 的幅值定位原理	42
3.3 基于单片 PSD 的多光束同步检测技术	46
3.4 一维 PSD 的幅值法定位	48
3.5 二维 PSD 幅值法定位	49
3.6 幅值法的实验测试	55
第 4 章 PSD 的相位法多光束检测	59
4.1 PSD 相位法位置检测的原理	59
4.2 相位法多光束检测	64
4.3 PSD 相位法实验测试	74

第 5 章 增强横向光电效应的机理研究	81
5.1 检测环境对光电流的影响	81
5.2 增强横向光电效应的研究	83
5.3 谐振腔基本原理	88
5.4 横向光电效应增强的机理研究	91
5.5 结构设计	97
5.6 小结	104
第 6 章 谐振腔增强型 PSD 的数值验证研究	105
6.1 谐振腔增强型结构的量子效率研究	105
6.2 增强型结构横向光电效应的数值研究	110
参考文献	119

第 1 章

位置敏感探测器概述

1.1 位置敏感探测器的概述

位置敏感探测器(position sensitive detector, PSD)是一种非接触式的光电定位传感器,被广泛应用于工业生产、军事和科学研究。相比其他的非接触式定位光电器件,如象限探测器(quadrant detector),电荷耦合器件(charge couple device, CCD), PSD 的光敏面连续、无盲区,且后续信号处理电路简单,在精密测距、准确定位方面备受青睐。另外,集成的二维面阵 PSD 也被用于高能射线、粒子的探测。

位置敏感探测器(PSD)是一种基于非均匀半导体横向光电效应的、对入射光或粒子重心位置敏感的光电器件。与上述其他位置探测器完全不同的是,PSD 是一种连续型的模拟器件,克服了阵列型器件分辨率受像元尺寸限制的不足。PSD 的基本结构类似于光电二极管,一般的制作方法是在半导体衬底表面扩散或注入杂质形成 PN 结,并在扩散面的侧面形成电极,当光敏面被非均匀光照时,由于横向光电效应,在平行于结平面的方向形成电势差,光生电流在扩散层被分流,通过电极收集电流。由于从电极输出的电流与入射光斑的重心位置相关,根据输出的电流能连续、直接地检出入射光斑的重心位置。这种整体模拟输出的工作方式不需要扫描,特别具有优势,但也存在不能同时探测多个光斑的缺点。与其他光电位置探测器相比,PSD 具有分辨率高、响应速度快、信号处理相对简单、对光源、光学系统的要求比较低、光谱响应比较宽、检出位置的同时还能检出光强等优点。PSD 特别适用于位置、位移、距离、角度以及可以间接转化为光斑位置或位移的其他物理量的非接触高精度快速测量,可以广泛应用于工业检测和监控、土木工程、自动聚焦、汽车避障、航空对接、军事、高能物理实验、三维形貌测量、机器人传感和生物医学等领域,是一种具有广阔应用前景的器件。

1.2 PSD 的研究历史

1.2.1 PSD 的产生

PSD 的物理机理是横向光电效应,而横向光电效应的发现是偶然的。与其他科学研究中的发现一样,这种偶然也是大量研究的必然结果。1930 年,德国物理学家 Schottky 首次发现了横向光电效应并做了报道。他在研究金属-金属氧化物($\text{Cu-Cu}_2\text{O}$)金属半导体结构时发现,如果用一束光照射金属氧化物(Cu_2O)表面,在金属氧化物(Cu_2O)边缘的金属电极上测得电流输出。并且进一步的研究表明,输出的光电流随入射光点与电极之间的距离的增加而呈指数下降。

由于对这一现象缺乏特别的关注,直到 1957 年 Wallmark 才再次对 N 型 Ge 和重掺杂的 P 型 In^+ 半导体形成的 PN 结进行了研究。他用光照圆形 Ge-In 的半导体 P^+N ,在 N 型层上的两点之间再次发现了横向电势差,且电势差与光斑的位移近似成比例。针对这一现象,Wallmark 利用半导体内部的载流子基本传输理论,解释了横向光电效应形成的物理机制^[2]。同时,他对不同类型掺杂情况下半导体 PN 的横向电势进行了研究,并计算了在 PN 结表面上横向电场的分布。在此基础上,首次制备出了如图 1.1 所示的测试样品,在结表面用点电极输出入射光激励的横向光电流,通常称此为点电极型或 Wallmark 型电极。并对横向光电效应的响应灵敏度与位置间的线性关系等进行了实验测试。这一研究首次制备了 PSD 的实验器件,并对其基本特性作了全面测试和详细分析,为 PSD 的研究和制备奠定了基础。

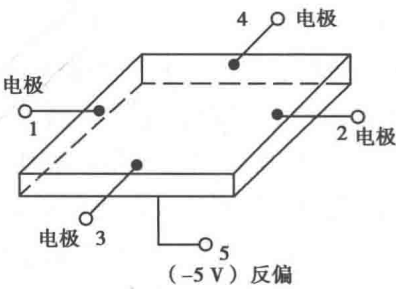


图 1.1 Wallmark 型电极 PSD

1.2.2 PSD 的国外研究状况

利用非均匀光照半导体 PN 结可以产生横向光电效应,而其物理机制的详细解释是由 Lucovsky 在 1960 年完成的。在 Wallmark 研究的基础上,Lucovsky 对 PN 结在非均匀光照时的横向光电效应作了细致深入的研究。他利用固体电子理论,结合电流的连续性方程和扩散方程,建立了横向电势在 PN 结表面分布的数学关系,描述了 PN 结电势的分布特征。通过严谨的理论推理,在考虑 PN 结的结宽度、结电容时,推出了横向电势的稳态分布函数。并利用格林函数对该二阶微分方程的解作了分析,给出了扩散电流与时间的依赖关系^[3]。其总结出的

横向光电效应的数学描述,即 Lucovsky 方程为:

$$\frac{1}{\rho} \nabla^2 \varphi(\vec{r}, t) - \frac{J_s}{W_p} \left(e^{\frac{q\varphi(\vec{r})}{kT}} - 1 \right) - \frac{C}{W_p} \frac{\partial \varphi(\vec{r}, t)}{\partial t} = \frac{qN(\vec{r}, t)}{W_p} \quad (1.1)$$

这一结果解释了横向光电效应产生的物理机理并奠定了 PSD 的理论基础。

在理论完善的基础上,后续研究者逐渐开始了对 PSD 器件的研究。R.B.Owen 从理论出发,利用不同的边界条件,通过求解 Lucovsky 微分方程,得到了 PSD 输出光电流的数学表述形式^[4]。利用半导体 Si 制备了一维 PSD 和二维 PSD 的样品,并对其进行了实验测试,对其响应特性、位置检测结果进行了分析和研究。图 1.2 所示直条形电极 PSD 是其所制备的实验器件。他们结合实际电路,从理论分析了输出电压幅值,详细研究了电路测试的信噪比、位置分辨率,并分析了测试系统的噪声以及相互影响作用。

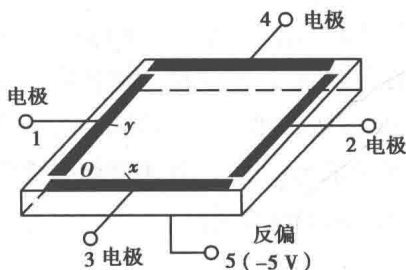


图 1.2 四边形电极 PSD

由于 PN 结可以工作在零偏、反偏和正偏模式,在不同的偏置方式,有不同的响应特性。因此,1971 年, P.Connors 对完全反偏模式下的 Schottky 结的横向光电效应进行了研究^[5]。在 Lucovsky 解释横向光电效应的物理机制基础上,建立了一维 Schottky 结横向光电效应的理论描述。当一维 Schottky 结在完全反偏时,得到了相应的 AC 等效电路。利用一维 Schottky 结的自然边界条件求解了横向电势,并分析了横向光电效应的暂态响应特性。

在此之前,关于 PSD 的研究主要集中在其物理机制和原理实现上。到了 20 世纪 70 年代后,随着理论的完善和成熟,其研究方向开始以改善 PSD 性能为主。1975 年, J.Woltring 报道了关于直条形电极 PSD 的研究成果^[6]。首先,他以 Lucovsky 方程为基础,分析了 PSD 在零偏和反偏条件下,不同电极形式的响应特点。实际上,电极的不同结构形式,决定了不同的边界条件。对二维直条形电极 PSD,给出了单轴和双轴时横向电势的数值解,将其与 Wallmark 型电极(点电极)的结果进行了比较。其中,重点研究了如图 1.3 的二维直条形电极双面分流型 PSD。对直条形电极单面分流和双面分流的二维 PSD 的横向电势特性进行了比较,分析了位置响应特性,以及研究了双面电极分流型 PSD 的温度依赖性、暂态响应和噪声特性等。

随后, Noorlag 在 1979 年也对直条形电极和双面分流型电极的二维 PSD 线性度作了进一步的研究^[7]。他们利用标准的平面硅加工和 IC 集成技术,将二维 PSD 及相应的信号处理电路集成为一个芯片,其光敏面面积为 6 mm×6 mm。并以固体电子理论,建立了集成器件的理论基础。对该器件制备的主要环节及重要参数作了详细说明。最后,对二维器件在不同方向进行了标定,并在二维面上作了实验测试,其测量结果有很高的线性度。

在此基础上, P.Petersson 对 PSD 的线性度进行了系统研究^[8],发现点电极、侧面电极结构

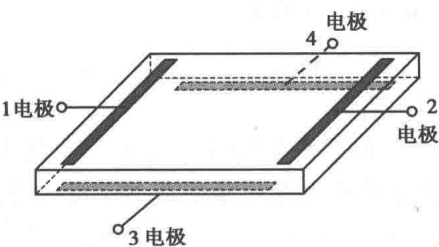


图 1.3 双面分流型电极 PSD

PSD 的测试结果存在严重的非线性,而边长为 10 mm 的双面型电极 PSD 的线性度较高,但测试结果也有失真。同时分析了不同参数对 PSD 线性度的影响。此外,也有其他关于对横向光效应和 PSD 进一步的研究^[9,10]。

在此之前,PSD 电极都被设计成直条形状。而实际应用中发现,PSD 在用于位置检测时存在较大的误差,且测量结果在二维面上的分布呈现枕形。受到这一结果的启发,1989 年, W.J Wang 与其合作研究人员提出改进二维 PSD 的光敏面,并设计与其相对应的电极结构,从而出现了如图 1.4 的二维枕形电极的 PSD^[11]。其研究结果表明,枕形 PSD 的位置测量线性度和分辨率比四边形电极、双面分流型电极要高。

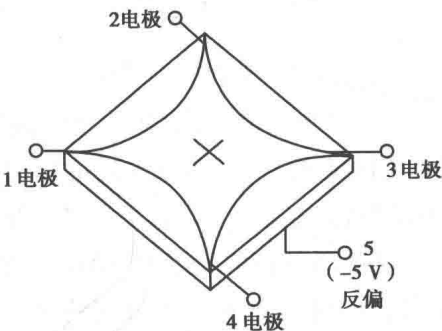


图 1.4 枕形电极 PSD

在此之前,对 PSD 的研究,主要针对提高半导体 PN 结型 PSD 的性能,其方法主要集中在对 PSD 的电极结构形式的研究和改进。除了前述几种电极形式外,还有如图 1.5 所示电极结构的 PSD 器件。

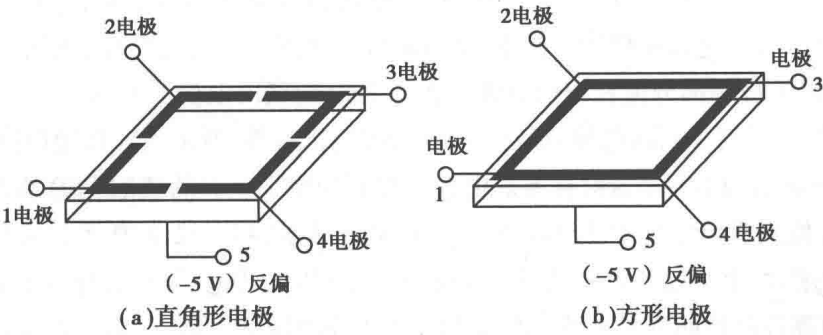


图 1.5 其他电极 PSD

不同电极结构 PSD 的性能也有所不同,其主要性能的比较见表 1.1。

表 1.1 不同电极 PSD 的特点

PSD 电极类型	电极特点	器件性能
点电极	电极设计为点状,使用时不加偏置	灵敏度、响应度和线性度等性能都很差
单面四直条电极	同一个面上,直条形,使用时要加偏压	暗电流小,电极间存在互扰,非线性误差较大
双面分流形电极	电极在结面两侧,无反偏电极	电极间互扰小,线性关系显著,暗电流较大
枕形电极	圆弧形电极在 PN 结同侧	线性度好,失真小,光敏面积减小
直角形电极	光敏面周边带直线形边界,并带了电阻边框	灵敏度高,线性度较大,枕形失真增大
直条边框阻性电极	电极为封闭的阻性边框	灵敏度高,线性度较大,枕形失真增大

随着 PSD 应用领域的扩展,不同领域的目的和要求的不同,对 PSD 的性能要求也不一样。如高能物理的粒子或射线探测、闪烁成像、生物医学传感等,都要求 PSD 有很高的响应速度。为了满足这些特殊用途的需求,这一时期的 PSD 器件不再局限于半导体 PN 结。其中, K.Lubke 制备了 $4\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 的 GaAs-Schottky 异质结 PSD。研究结果表明,在近红外区,要比传统半导体材料的 PSD 器件的响应速度高一个数量级。

此后, Dutta 等人从器件结构设计出发,研发了快速响应的网格状 PSD,并分析了 PSD 的瞬态响应特性^[13-17]。他将一维 PSD 进行阻容等效,建立了 RC 传输线的等效模型,把入射光激励的光电流等效成电流元,运用电流传输理论,得到了光电流在该 RC 等效传输模型的数学关系。在确定边界条件下,得到了该方程的解的傅里叶表达式。同时,还讨论了不同的光源产生的光电流的区别。

另外,为了实现光斑的成像以及高能粒子或射线轰击成像,出现了一维和二维阵列 PSD,其最大的有效光敏面积达到 $180\text{ mm}\times 180\text{ mm}$,且器件和相应的处理电路集成在一块芯片上^[18,19]。

实际上,进入 20 世纪 80 年代后,由于科学技术的发展带动了制造业的发展,特别是半导体加工工艺的成熟,推动了半导体器件的商业化进程。同时,PSD 应用需求的扩大,对其性能的要求也越来越高。更为重要的是,随着新技术的使用,使半导体加工技术和工艺得到了长足的进步。这些技术的应用推广,也使 PSD 的结构和性能都得到了优化,这也带动了 PSD 器件的商业化。日本松滨株式会社(Hamamatsu Photonics)、瑞典 Sitek 和美国 UDT 公司研发了能满足不同要求的一维和二维的 PSD 产品,并配备了相应的处理电路^[20,21]。特性参数的典型值:位置分辨率 $0.2\sim 7\text{ }\mu\text{m}$,响应速度 $0.3\sim 3\text{ }\mu\text{s}$,光敏面范围为 $1\text{ mm}\times 3\text{ mm}\sim 27\text{ mm}\times 27\text{ mm}$,位置误差 $10\text{ }\mu\text{m}\sim 1\text{ mm}$ 。

从 PSD 的出现到 20 世纪 80 年代末,PSD 芯片均是以半导体 PN 结作为主体。在研究的过程中,已经发现了这样的 PSD 器件在位置测量时,存在非线性误差。对 PSD 的整个感光面

来说,其有效位置线性区都较小。同时,非均匀入射光强度较弱时,所产生的光生载流子较为有限,使输出的光电流信号弱;而对较大功率的入射光源,又容易导致饱和效应。产生这样的结果是与半导体材料和其工艺密切相关。

1.3 PSD 的应用实例

PSD 是精密测量、精确定位的一种重要部件,在目标探测(如同轴对准、激光定位、目标追踪等)、位移测量(如微位移测量、角位移测量)、位置检测(如爬壁机器人检测、盾构姿态检测)、高能粒子、射线探测等领域发挥重要作用。

1.3.1 空间对接

由激光器与 PSD 组成的传感器被大量地用于机器人上,可测量挠性机械臂的五个自由度误差。当挠性臂的挠度发生变化时,通过 PSD 检测激光光斑位置来获取挠度的大小。由挠性臂挠性偏差可以得到挠性臂的末端精确位移及速度。1993 年,日本东京大学和松下技术共同研制了一种使用 PSD 的三维视觉传感器,用于机器人中获取运动物体的三维形状。该视觉传感器可以 1/30 s 的速度连续测定一个场景。我国哈尔滨工业大学机器人研究所也在开展这方面的研究工作。



图 1.6 美国奋进号航天飞机与国际空间站对接

PSD 多光束测量系统在航空中的应用主要是在飞行器对接过程中测量飞行器的姿态^[15]。空间飞行交会是建立空间站、实现载人航天飞行等先进航天工程技术的关键技术。1985 年欧空局在其交会对接敏感器的研究报告中首次提出将 PSD 用于空间应用。我国从 20 世纪 90 年代开始由哈尔滨工业大学进行了用于空间飞行器交会对接的 PSD 敏感器的研究工作,建立了实验模拟测量系统,进一步的研究工作正在进行中。

1.3.2 位置检测

基于单 PSD 研究多光束位置检测的目标,最初是为了检测微小爬壁机器人的三维位置,考虑到微小机器人位置检测系统要满足尺寸小、分辨率高、稳定性和可靠性好、时间响应快等条件,我们研究了用一个 PSD 来检测微小步行机器人三维坐标的方法。

设观察坐标系为工件坐标系,原点矢量为 wO ,建立传感器坐标系以 PSD 的几何中心为坐标原点,记为 sO 点。在检测时首先通过 PSD 的输出得到目标 LED 在传感器坐标系中的位置,然后再转换为工件坐标系中目标 LED 的位置,最后求 3 个 LED 的中心位置从而得到机器人的位置^[16]。

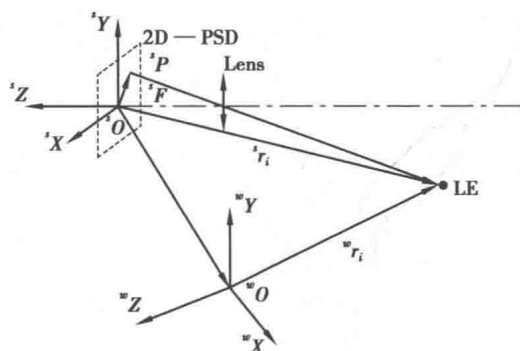


图 1.7 系统坐标关系

图 1.7 给出了工件坐标系和传感器坐标系的关系,LED 为背负在机器人上的发光二极管。聚焦矢量 ${}^sF(0,0,-f)$ 对系统而言是固有值,位置矢量 sP_i 对应于 PSD 的输出转换的位置信号,PSD 输出电压信号为 $(V_x, V_y, 0)$,此时

$${}^sP_i = [S_x(V_x - C_x), S_y(V_y - C_y), 0] \quad (1.2)$$

式中 V_x, V_y ——PSD 输出电压信号;

S_x, S_y ——PSD 输出的电压值对应的尺度因子;

C_x, C_y ——透镜光轴与 PSD 的交点在 PSD 上的对应位置输出信号。

从图中由传感器 PSD 和 LED 的光学系统,可得如下关系:

$${}^s r_i = k_i({}^s F - {}^s P_i) + {}^s P_i \quad (1.3)$$

设传感器坐标系到工件坐标系的位移矢量为 ${}^wO(x_o, y_o, z_o)$,从传感器坐标系到工件坐标系的旋转变换矩阵为 ${}^wR_s, {}^wR_s$ 用欧拉角 α, β, γ 表示为:

$${}^wR_s = R_x \cdot R_y \cdot R_z =$$

$$\begin{pmatrix} \cos \beta \cos \gamma & -\cos \beta \sin \gamma & \sin \beta \\ \sin \beta \sin \alpha \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma & -\sin \beta \sin \alpha \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & -\cos \beta \sin \alpha \\ -\sin \beta \sin \alpha \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma & \sin \beta \cos \alpha \sin \gamma + \sin \alpha \cos \gamma & \cos \beta \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

这样,在工件坐标系中 LED 的位置矢量 ${}^w r_i$ 可以表示如下:

$${}^w r_i = {}^wO + {}^wR_s \cdot {}^s r_i \quad (1.5)$$

通过求解式(1.5)元非线性方程组可求解旋转矩阵和平移矩阵。在求解出旋转矩阵和平移矩阵以后,也就确定了工件坐标系与传感器坐标系的相对关系。对于式(1.2)中的 k_i 值,当作为目标的3个LED相对于前一位置没有 Z 方向的位移时,可以看作常数。但是,从光学系统可知,当目标LED的 Z 轴发生变化时, k_i 值是变化的。所以在进行位置检测时,当目标LED有 Z 方向的位移时,需要重新计算 k_i 值。

图1.8表示工件坐标系和安装在机器人上的3个LED之间的关系,用机器人上任意一点 Q 的三维坐标表示机器人的三维位置,从传感器坐标系看见的位置矢量 ${}^w r_i (i=1,2,3)$,分别由对应于3个LED的PSD输出 ${}^s P_i$ 通过式(1.2)表示,在式(1.2)中,未知数是 ${}^s r_i (i=1,2,3)$ 。

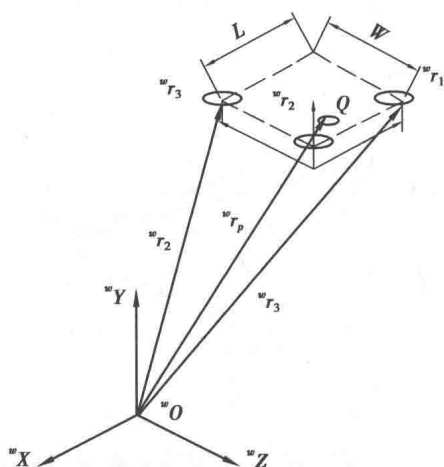


图 1.8 LED 相对位置示意图

用3个已知相对位置的LED点来计算 k_i ,根据LED的排列,可以得到下式:

$$|{}^w r_1 - {}^w r_2| = L \quad (1.6)$$

$$|{}^w r_3 - {}^w r_2| = W \quad (1.7)$$

$$|{}^w r_1 - {}^w r_3| = (L^2 + W^2)^{\frac{1}{2}} \quad (1.8)$$

L, W 是LED点之间的距离。 P_1, P_2, P_3 是3个LED点对应PSD的输出。所以把式(1.2)代入式(1.5)、式(1.6)和式(1.7),得到三元非线性联立方程组,解这个方程组,求得未知数 k_i ,再由式(1.4)求出 ${}^w r_i$ 。最后用3个LED点的 ${}^w r_i$ 矢量来求解代表机器人点 Q 的矢量 ${}^w r_p$ 。

1.3.3 直线度测量

以基于位置敏感探测器的直线度测量系统为例,如图1.9所示。该系统的测量原理如下:将半导体激光器固定在支架上,位置敏感探测器精确地沿着被测导轨运动并探测来自半导体激光器的激光,理想情况下,半导体激光器发出的光束始终照射在位置敏感探测器上的同一位置,输出信号始终不变;但实际上,待测导轨通常存在一个直线度,使得位置敏感探测器的输出在导轨的不同位置发生不同的变化,即入射光在位置敏感探测器光敏面上的相对位置在不断变化,根据这个位置变化就能得到被测导轨的直线度^[9]。这通常也用于同轴对准中。

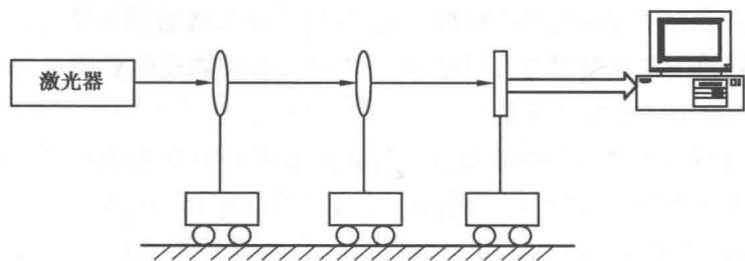


图 1.9 直线度测量系统

1.3.4 自准直仪

位置敏感探测器在国防军事领域中的应用主要有基于位置敏感探测器的自动准直系统、模拟射击系统等^[10-11]。和位置敏感探测器的其他应用一样,自准直系统和模拟射击系统都是通过将照射在位置敏感探测器光敏面上的光斑信息转换成电信号来实现的。

图 1.10 是由中国计量科学研究院研制的基于位置敏感探测器的自准直仪,目前已经获得应用。它的自准直角度测量原理是:将一个反射镜固定在被测物体上,该反射镜的偏转将导致其反射光在位置敏感探测器上的入射位置不同,从而通过处理位置敏感探测器上的光斑位置信息来实现反射镜偏转角的测量^[11]。

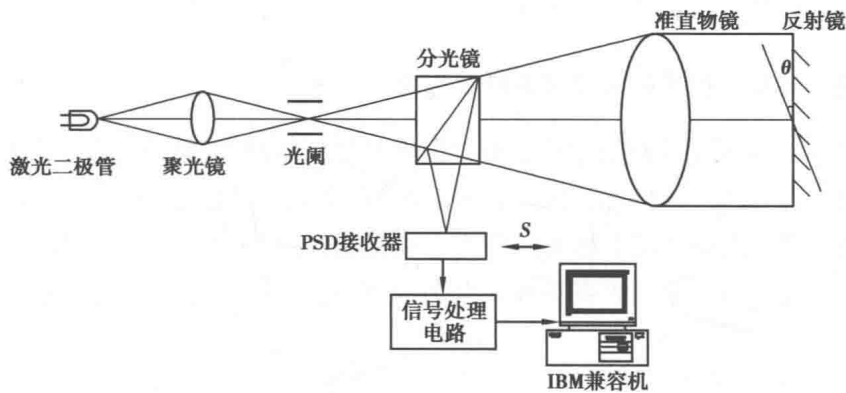


图 1.10 PSD 自准直仪原理图

1.4 PSD 的多自由度检测

多自由度测量在机器人、柔性制造、自动装配、数控机床检测、光纤对接耦合及多自由度平台等领域有着非常重要的作用。常见的多自由度测量手段包括三坐标测量机、双目视觉六自由度测量、基于全反射原理的五自由度测量、多光束六自由度测量、基于全息透镜的六自由度测量等。

多自由度测量系统一般是测量末端执行器相对于参考坐标系的位置信息。通常采用两种方式,即接触式和非接触式。由于非接触式采用光电或电磁式传感器构成一个测量空间,

避免了对多自由度执行器的运动产生机械影响,并且具有较高的测量精度和足够的测量范围(精度可达微米级,范围从几毫米至几百毫米)。因此,非接触式位置测量方法及测量系统的研制具有重要的实际意义和研究价值。

20 世纪 80 年代初,国外的科研机构就开始研究采用 PSD 等光电传感器构成的位置测量系统。其典型的研究成果有双 PSD 测量系统(20 世纪 80 年代中期),激光干涉测量系统(20 世纪 90 年代),电涡流传感系统(20 世纪 90 年代)。这些检测系统的位置测量精度都小于 0.01 mm,并已形成高新技术产品进入市场。

现在最常用的数控机床检测方法是采用激光干涉仪,比如 HP5529A 动态校正装置和 Renishaw、Zygo 激光测量系统。这些激光干涉仪采用先进的光学技术,简化了安装过程,加强了数据采集和处理等功能,使得测量较为简单,但其基本的测量过程并没有改变,还是单参数测量。一般三轴数控类加工设备总共需要检测 21 项误差分量,安装一次仅测量一项误差分量,其检测过程烦琐与漫长。因此,发展同时测量六自由度几何误差的激光系统是机床工具行业普遍面临的技术问题。而且,其他许多行业,如空气动力中天平的校正问题,需要同时测量六个自由度的变形来获得天平各方向所受力与力矩大小,使用传统的激光干涉仪单参数分时测量显然不能满足要求。国内外相关领域对以上问题进行了研究,出现了应用激光同时测量多自由度的几种方法,国际市场上也有 API 公司的五自由度、六自由度激光测量系统销售。下面对这些方法分别进行概述。

1.4.1 基于全反射原理的五自由度测量系统

如图 1.11 所示为基于全反射原理的五自由度测量原理图,双频激光器发出的激光经偏光分光镜分为两束,由固定角隅棱镜 RR1 反射回来为参考光束,由运动的角隅棱镜 RR2 反射回来为测量光束。在这两束光路中插入两个完全相同的无极性半透半反镜(BS1, BS2)和一个干涉滤光器。RR2 反射回来的光束经 BS2 分为两束,透射光用来测距,反射光用来测量其他

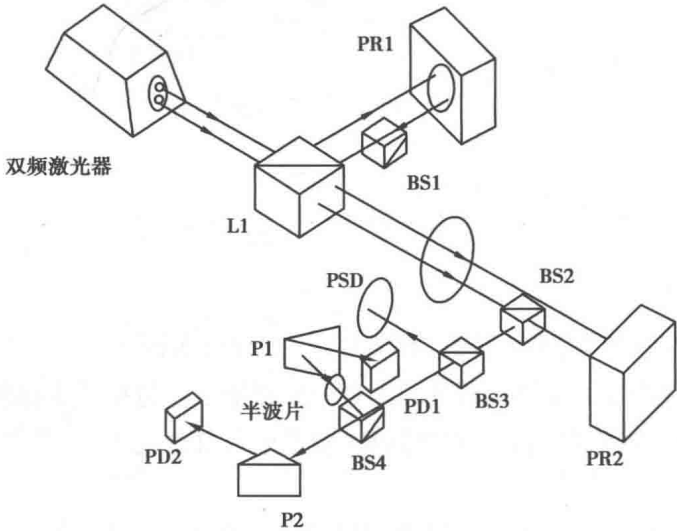


图 1.11 基于全反射原理的五自由度测量原理