**外差干涉中差分波前传感器的发展综述**

**摘 要**：外差干涉仪在高精度测量中具有广泛应用。差分波前传感可以同时测量位移、偏角，能提升外差干涉仪的性能。在天琴计划中，高精度和大偏角的要求使得现有的光电传感器无法达到要求。研发新型的差分波前传感器是必要的。这能有效促进我国精密测量技术的发展。

**关键词**：外差干涉仪；差分波前传感；传感器

**引 言**

引力波是爱因斯坦广义相对论的预言之一，指黑洞、中子星等极端致密天体的运动变化，导致时空曲率产生扰动，然后以波动的形式由波源向外扩散传播的现象[7]。地面干涉仪的臂长通常在几千米级别。LIGO，Virgo和GEO600都已经运行多年。地面激光干涉仪虽然可以用于百赫兹级别引力波信号的观测，但是在10 Hz以下, 各类噪声接踵而至, 目前提出的最先进实验方案都无法将灵敏频段延伸至1 Hz以下。在国际上, 经过长期讨论与实践, 基本形成共识:开展毫赫兹频段引力波探测, 必须将探测器发射到太空中, 通过空间激光干涉实现。

LISA计划于20世纪90年代提出，并于2015年成功发射技术验证卫星LISA Pathfinder。LISA计划首先把差分波前传感技术应用于激光干涉测量当中。本文回顾了引力波探测计划和介绍激光干涉中差分波前传感器的工作原理，介绍了最新技术的研究进展和发展方向，分析了该项技术未来面临的诸多困难于挑战。这对后续精密测量技术的发展具有重要指导意义。

**一 引力波探测计划的发展历程**

自从美国马里兰大学的Weber[1]在20世纪60年代率先开始利用被称为韦伯棒的探测器探测引力波后, 引力波探测在国际上获得了广泛的关注。目前, 从低频到高频的各个频段都有不同的引力波探测器, 包括地面激光干涉仪、空间激光干涉仪、脉冲星计时阵列、宇宙微波背景辐射探测等。各种探测方法主要针对的引力波波源、引力波波频段以及科学问题各不相同, 它们在引力波探测上相互补充, 无法相互取代[2]。

欧洲空间局和美国国家航空航天局合作发展空间激光干涉引力波探测项目LISA计划。其工作频段是，作为地面引力波探测系统的补充。从2013年底，我们开始讨论了一个中国主导的空间引力波探测方案，并于2014年提出天琴计划，在2015年公布了天琴的初步概念方案，准备在21世纪30年代实现空间引力波探测的任务目标。天琴的初步方案要求探测频段为1mHz-1Hz。2019年，我们成功发射了验证卫星“天琴一号”，首次完成了无拖曳控制技术等技术验证。

**二 差分传感器**

外差干涉仪因为其高动态范围、高信噪比和对长度标准的直接溯源性，成为了许多工业测量中必不可少的方法。采用频率足够稳定的激光光源和稳定环境，位移干涉仪可以达到亚纳米分辨率和纳米级不确定度。差分波前传感技术是一门新兴技术，其应用领域主要集中在光学对准领域。LISA项目的前身NGO项目就使用了差分波前传感技术在皮米级范围内来捕获和追踪两个浮动的实验质量的距离和在纳米级范围内获取角度变化。

差分波前主要可以得到两种数据，位移量和角度偏转量。我们可以通过对两道光干涉求解一个理论模型，得到干涉光的光强分布情况。有多种探测器可以探测光强分布，都是基于光电效应的原理。但是获取角度偏转量的原理略有差异。四象限光电传感器QPD是通过四个象限光电流的差异获得探测面两束光的偏角。它的组件比较通用且测量原理简单，但测量范围非常小。一旦光束偏角超过1mrad，QPD的象限无法得到有效的光电信号。这是QPD应用的局限。要解决这个问题，探测面的面积必须非常小。CCD可以满足要求。同样作为光电传感器，CCD的优点很突出，高分辨率、像元面积小、高响应速度。

**2.1 CCD的工作原理**

CCD不同于多数以电流或电压为信号的其它器件，其突出特点是以电荷为信号。工作过程中主要包括信号的产生、存储、传输和检测。一个完整的CCD器件由光敏元、转移栅、移位寄存器及一些辅助输入、输出电路组成[3]。

CCD工作时，在设定的积分时间内，光敏元对光信号进行采样，将光的强弱转化为各光敏元的电荷量。取样结束后，各光敏元的电荷在转移栅信号驱动下，转移到CCD内部的位移寄存器相应单元中。移位寄存器在驱动时钟的作用下，将信号电荷顺次转移到输出端。输出信号可接到示波器、图像显示器或其它信号存储、处理设备中，可对信号再现或进行存储处理。

CCD是由金属—氧化物—半导体（Metal-Oxide-Semiconductor）简称MOS构成的密排器件。这种MOS结构，一般是在P型（或N型）Si单晶的衬底上生长一层100~200nm的层，再在层上沉积具有一定形状的金属（一般是金属铝）或掺杂多晶硅电极。其中，“金属”为层上沉积的金属或掺杂多晶硅电极，称为“栅极”；半导体硅作为底电极，俗称“衬底”；“氧化物”为两电极之间夹的绝缘体。MOS光敏元结构图如图2-1所示。

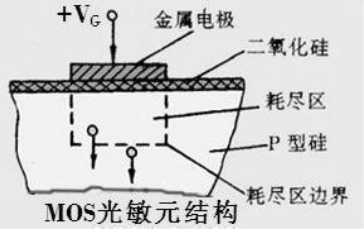


图 2-1 MOS光敏元结构

以P型半导体为例。当向栅极加正向偏压（或用光学系统将景物聚焦在器件表面）时，P型硅衬底中多数载流子—空穴被排斥，形成耗尽区，当VG（光强）足够大时，载流子深度耗尽，甚至在半导体表面形成反型层。电子在那势能较低，形成了一个势阱。于是，当附近存在自由电子时，自由电子就会吸引电极下方附近。 这样的MOS电容就有了存储电荷（电子）的能力，势阱的深浅决定存储电荷能力的大小。

为了实现CCD中信号电荷的转移，必须使MOS电容阵列的排列足够紧密，以致相邻MOS电容的势阱相互沟通，电荷能相互耦合。根据加在MOS电容上的电压越高产生的势阱越深的原理，通过控制相邻MOS电容栅极电压高低来调节势阱深浅，使信号电荷由势阱浅的地方流向势阱深处。CCD中电荷的转移必须按照确定方向，为此，在MOS阵列上所加的各路电压脉冲必须严格满足相位要求，使得任何时刻，势阱的变化总是朝一个方向。

通常把CCD电极分为几组，每组称为一相，并施加同样的时钟脉冲。所需相数由CCD内部结构决定。通常有二相、三相、四相CCD。四相CCD与三相、二相器件相比，有利于提高转移效率，能适应更高的时钟频率。图1-2为电荷传输示意图。1-2(a)图是一个三相二位CCD，2-2(b)图给出了加在栅极的电压值，2-2(c)图是在2-2(b)图所示时钟波形驱动下，势阱中电荷的分布图。

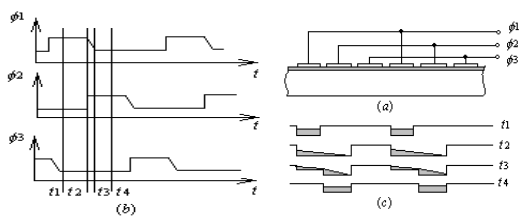


图2-2 电荷传输示意图

CCD输出结构是将CCD传输和处理的信号电荷变换为电流或电压输出。其输出端也是由一个二极管（OD）和一个输出栅极（OG）组成。一般在输出栅（OG）和二极管（OD）上外加电压使输出二极管反偏，于是势阱中的电荷包被反偏二极管结电容所收集。当输出二极管上加负载后，可获得输出电压。

图2-3为浮置栅结构输出电路，浮置栅是指在P型硅衬底表面用V族杂质扩散形成小块的区域，当扩散区不被偏置，其处于浮置状态。

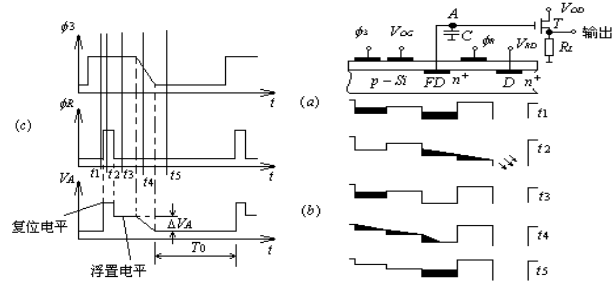


图2-3 浮置栅结构输出电路

其中，OG：输出栅，FD：浮置扩散区，R：复位栅，RD：复位漏，T：输出场效应管。

CCD的电荷注入方式有电信号注入和光信号注入两种。

在光纤系统中， CCD接收的信号是由光纤传来的光信号，即采用光注入CCD。当光照到CCD时，在栅极附近的耗尽区吸收光子产生电子-空穴对，在栅极电压的作用下，多数载流子（空穴）流入衬底，少数载流子（电子）被收集在势阱中，存储起来。这样能量高于半导体禁带的光子，可以用来建立正比于光强的存储电荷。

电注入是指CCD通过输入结构对信号电压或电流进行采样，然后将信号电压或电流转换为信号电荷。电注入的方法很多，一般常用的是电流注入法和电压注入法。

**2.2 CCD的主要性能参数**

2.2.1 转移效率和转移损失率

电荷包从一个栅极势阱转移到下一个栅极势阱时，有部分的电荷转移过去，余下部分没有被转移。即为电荷转移效率，相应地，称为损失率。根据电荷守恒定律有：



电荷包从一个势阱向另一个势阱转移时，需要一个过程。像素中的电荷在离开芯片之前要在势阱间移动上千次或更多，经n次转移后的电荷输出量为：



上千次转移后，即使接近1，总的效率仍然很低，这要求电荷转移效率极其高，否则光电子的有效数目会在读出过程中损失严重。引起电荷转移不完全的主要原因是表面态对电子的俘获，转移损失造成信号退化。采用“胖零”技术可减少这种损耗。

2.2.2 分辨率

分辨率是指摄像器件对物象中明暗细节的分辨能力。CCD的分辨率与每个像元的尺寸和像元之间的间距有关，CCD器件像素数越多，分辨率越高。当像素数一定时，转移损失率对空间分辨率的影响也很大。另外，若光生载流子产生在离耗尽层较远的地方时，产生横向扩散，引起像素之间的相互干扰，造成空间分辨率降低。在CCD像素数目相同的条件下，像素点大的CCD芯片可以获得更好的拍摄效果。大的像素点有更好的电荷存储能力，因此可提高动态范围及其它指标。

2.2.3 暗电流与噪声

CCD在既无光注入又无电注入情况下的输出信号称为暗信号，即暗电流。暗电流产生的原因有：半导体衬底的热产生、 耗尽区的产生复合中心的热激发载流子（主要）、 耗尽区边缘的少子热扩散、 界面上的产生中心的热激发。暗电流会限制器件的低频响应，减小动态范围，所以应尽量缩短信号电荷的存储与转移时间。同时，暗电流还会引起固定图像噪声，暗电流在整个成像区不均匀时使像面严重畸变。当CCD光敏元处于积分工作状态时，暗电流积分形成暗信号图像叠加到光信号图像上，引起固定图像噪声，出现个别暗电流尖峰，则一幅清晰完整的图像就会产生某些“亮条”或“亮点”。

2.2.4 光谱灵敏度

在一定光谱范围内，单位曝光量的输出信号电压（电流）即为灵敏度。CCD的光谱灵敏度主要由CCD器件响应度和各种噪声因素共同决定。由于CCD结构复杂，噪声源也较多，主要有光子噪声、暗电流噪声、表面捕获噪、肥零噪声和输出电路噪声等。量子效率表征CCD芯片对不同波长光信号的光电转换本领。不同工艺制成的CCD芯片，其量子效率不同。灵敏度还与光照方式有关，背照CCD的量子效率高，光谱相应曲线无起伏，正照CCD由于反射和吸收损失，光谱相应曲线上存在若干个峰和谷。

2.2.5 动态范围

对于光照度有较大变化时，器件仍能线性响应的范围。上限由电荷最大存贮容量决定，下限受噪声所限制，通常在103~104数量级。

2.2.6 线性度

线性度是指在动态范围内，输出信号与曝光量的关系是否成直线关系。弱信号下线性度较差（器件噪声影响大，信噪比低，引起一定离散性），动态范围中间区域非线性度基本为0。

2.2.7 光谱响应

我们将最大响应值归一化为100％所对应的波长，即峰值波长。通常将10％（或更低）的响应点所对应的波长称为截止波长，有长波端和短波端截止波长，两者之间包括的波长范围为光谱响应范围。CCD器件的光谱响应范围与所用材料有关。Si材料CCD光谱响应曲线与Si光电二极管相同。

**三 CCD传感器的发展现状**

CCD传感器起源于1970年的美国，由贝尔实验室成功研制出了世界上第一个 CCD。随着该项技术的不断研究和发展，在20世纪80年代后期，CCD 取代电子管应用于大多数视频制作中。20世纪90年代后，CCD进入电子领域进行分辨率成像，大大促进了照相机、空间探索等领域的发展。

**3.1 CCD中的像元变化**

随着 CCD 图像传感器的不断发展，其自身内部的像元越来越小，导致 CCD 的输出电压和敏感程度随之减小。尤其是在像元减小到一定尺寸后，CCD 的敏感度极大缺失。因此，人们对上述问题做了进一步研究，提出了很多技术上的改进措施。比如，通过对微透镜形状进行优化，利用无缝透镜、内嵌式透镜进行复合和背面光照等技术，大大提高了饱和电压和灵敏程度[4]。

**3.2 暗电流的变化**

在 CCD 中的界面形态中，存在着很大的暗电流和暗电流产生的噪声。对于这种现象，一种方法是对埋沟器件中的结构进行处理。虽然利用这种埋沟结构能够很好地解决暗电流问题，但在制作上因其结构比较复杂，所以在工作过程中显得繁琐。另外一种解决方式是利用空穴对界面形态进行填充，经过填充作用后减少暗电流的产生。在这种方法的作用下，当界面形态所有结构都被电荷包围时，就没有暗电流继续产生。而在 CCD 的脉冲调试过程中，每一个像元的栅结构会使 MOS 达到积累模式后回到深度耗尽模式，从而使整个界面重新获得足够空间来进行界面形态的填充。这个过程利用了电荷的泵作用，将暗电流的产生度降到最低。这种方法也存在一定劣势，即局限性太大，尤其是对时间和温度具有较强依赖性。如果工作的周期过于短暂，则会在界面的空穴中继续产生暗电流。随着深入研究，人们将 MPPCCD 和 AGPCCD 进行有效结合，充分解决了暗电流问题。另外，由于 CCD 在电荷传输过程中要比界面形态的犹豫时间还快，就意味着在图像传感器一个工作周期内都可以保证产生的暗电流较低，也改变了传统技术对界面形态处理的短暂性，从而永久地解决了暗电流的产生。在之后的发展过程中，空穴累积二极管也被广泛应用于传感器的干感光结构，这种新型结构被称作掩埋式光电二极管[5]。

**3.3 CCD 技术的进一步发展**

进入 21 世纪后，CCD 作为最常用的光学传感元件，被应用到数码产品以及手机中。随着人类对新科技要求的不断提高，CCD 技术也在逐渐进步。从噪声问题的解决，到漏光现象的研究，很多灵敏度高、成本低的 CCD 图像传感器应运而生。

**四 总结**

CCD是一款区别于传统差分波前传感器QPD的新型技术，它克服了许多QPD的缺点，极大提高了光束偏差的范围。使用CCD传感器用于差分波前传感技术能有效提高光束校准的范围和精度。未来会由越来越多的CCD传感器用于差分波前传感。它也可以促进精密测量技术的发展，为天琴计划添砖加瓦。

**参考文献**

[1] Weber J.Gravitational radiation.Phys Rev Lett, 1967, 18:498-501

[2] Sathyaprakash B S, Schutz B F.Physics, astrophysics and cosmology with gravitational waves.Living Relativ, 2009, 12:2

[3] 蔡文贵,李永远,许振华. CCD技术及应用[M].电子工业出版社，1992.

[4] 王旭东，叶玉堂 .CMOS 与 CCD 图像传感器的比较研究和发展趋势 [J]. 电子设计工程，2010，（ 11）：178-181

[5] 程开富 . 新颖 CCD 图像传感器最新发展及应用 [J]. 集成电路通讯，2006，(3)：30-38.