

## 基于 DSP 增益可控的光刻机测高电路的设计研究\*

赵英伟,郝晓亮,张文雅,马培圣,文黎波

(中国电子科技集团公司第十三研究所,河北 石家庄 050051)

**摘要:**介绍了激光三角法高度测量技术和基于数字信号处理器 DSP 与线阵 CCD 的激光高度测量系统。采用比例恒流源和镜像恒流源组合,设计了输出功率稳定可调的激光二极管驱动电路和线阵 CCD 的驱动电路,借助 DSP 定时器周期调节灵活的优点,方便地调节光积分时间来提高信号质量。针对光刻工艺中不同的测量对象表面的光学特征,自动进行激光二极管增益控制和光积分时间调节,提高测量的适应性和测量效率。

**关键词:**激光三角法;线阵 CCD;数字信号处理器;光刻机

中图分类号:TN405

文献标识码:A

DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.201252

中文引用格式:赵英伟,郝晓亮,张文雅,等.基于 DSP 增益可控的光刻机测高电路的设计研究[J].电子技术应用,2021,47(8):120-122,132.

英文引用格式:Zhao Yingwei,Hao Xiaoliang,Zhang Wenya,et al. Design and research of height measuring circuit based on DSP with adjustable gain for the lithography machine[J]. Application of Electronic Technique,2021,47(8):120-122,132.

## Design and research of height measuring circuit based on DSP with adjustable gain for the lithography machine

Zhao Yingwei,Hao Xiaoliang,Zhang Wenya, Ma Peisheng,Wen Libo

(The 13th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050051, China)

**Abstract:** This article briefly introduces the laser triangulation height measurement technology, and the laser height measurement system based on digital signal processor DSP and linear array CCD. Using a combination of proportional constant current source and mirror constant current source, a laser diode drive circuit with stable and adjustable output power is designed. The driving circuit of the linear CCD is given. With the advantage of flexible adjustment of the DSP timer period, it is convenient to adjust the light integration time to improve the signal quality. According to the optical characteristics of different measuring object surfaces, the laser diode gain control and light integration time adjustment are automatically performed to improve the adaptability and efficiency of measurement.

**Key words:** laser triangulation; linear array CCD; digital signal processor DSP; lithography machine

## 0 引言

光刻工艺是大规模集成电路生产中的关键工艺。为了在晶圆上获得高分辨率的光刻图形,光刻设备必须尽可能精确地将晶圆平行放置到镜头的焦平面上。

如果晶圆在工件台上的高度出现变化,会导致聚焦偏差,引起束斑或光斑增大、加工的线条模糊,曝光图形出现拼接缺陷等问题<sup>[1]</sup>。

所以高度测量系统要能够精确测量,能够对不同的晶圆厚度、胶层厚度或者温度和气压所引起的聚焦位置变化等因素的影响进行补偿<sup>[2]</sup>。

## 1 激光三角法高度测量

晶圆高度变化值范围通常在几微米以内,投影光刻

机镜头的可用焦深范围一般为几微米。由于精度高,普遍采用激光三角法进行高度测量校准<sup>[3]</sup>。

激光三角法测量按入射光线与被测工件表面法线的关系可分为直射式和斜射式。考虑到中心位置安装有光刻镜头,光刻机高度测量系统一般采用斜射式测量方法,位于光刻机的末级透镜和基片之间,如图1所示。

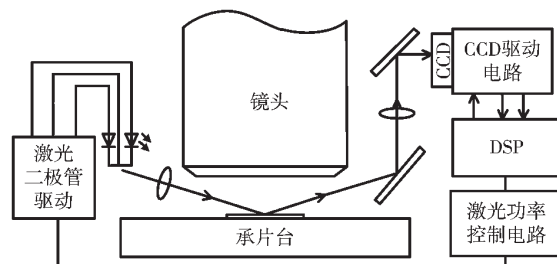


图1 高度测量系统结构示意图

\* 基金项目:河北省省级科技计划资助(20351803D)

激光二极管发出的激光经过光学组件后,以一定入射角度照射在被测物体表面上,发生漫反射、镜面反射,甚至是折射。线阵 CCD(Linear Array Charge Coupled Device)以同样的角度,最大程度接受被测表面的反射光照,降低空气折射率变化的影响。反射光经过聚焦,入射到 CCD。CCD 输出反映物体位移信息的信号,输入到数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)的模数转换(ADC)进行采集。晶圆高度变化和线阵 CCD 像素偏移数量存在数学关系,通过像素的偏移数量,就可以计算出高度的变化值<sup>[4]</sup>。

## 2 系统硬件构成

## 2.1 数字信号处理器 DSP 的选型

DSP 选用 ADI 公司的 16 位定点高速数字信号处理器 ADSP-2199x。它可提供 160MIPS 的指令速度, 包括一个快速、高精度、多输入通道的 A/D 转换系统, 具有 3 个完全相同的独立的 32 位定时器, 每个定时器都有一个专用的双向 TMRx 引脚<sup>[5-6]</sup>。

## 2.2 激光器及驱动芯片选型

考虑到 CCD 的峰值响应波长等因素,设计选用 SONY 公司 SLD231VL 型激光器,波长 790 nm。它在恒功率工作模式下最大输出功率是 35 mW。

激光器的驱动选用了 SHARP 公司的 IR3C01, 它的最大输出电流是 150 mA, 由 5 V 和 -12 V 双电源供电。

如图 2 所示,激光器内部有一个监控二极管测量光强的波动,其输出电流作为内部反馈,输入到 IR3C01 的 2 脚,用来稳定激光二极管的光功率稳值输出。 $R1$  是限流电阻,可以抑制浪涌电流,保护激光二极管,同时也有电流反馈的作用。

实际应用中也有通过 3 脚和 6 脚连接一个外部的可调电位器来调节激光二极管的功率。

### 2.3 线阵 CCD 选型

基于分辨率和有效测量范围、光谱响应范围和饱和输出特性等因素,线阵 CCD 器件选用日本东芝公司的

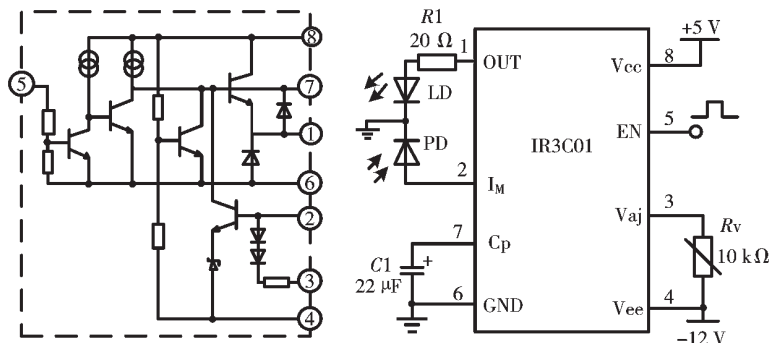


图 2 IR3C01 内部结构图和应用电路图

TCD132D, 1 024 像元, 感光单元尺寸为  $14\text{ }\mu\text{m}\times 14\text{ }\mu\text{m}$ 。CCD 光积分时间典型值为  $740\text{ }\mu\text{s}$ 。它由三相脉冲  $\Phi_{\text{M}}$ 、 $\Phi_{\text{CD}}$ 、 $\Phi_{\text{SH}}$  驱动。需要更高分辨率时, 也可以考虑选用 2 160 个像素的 TCD1028AP<sup>[7]</sup>。

### 3 激光二极管功率控制原理及电路设计

由于在光刻中被加工晶圆的材料不同,表面特性不同,对光的反射系数不同,为了得到稳定的测量信号,系统需要严格控制激光器的输出功率。本设计通过一个可调的压控电流源实现精确调整激光的输出功率和光强。

DSP 输出激光器功率设定数据,由数模转换 DAC 转换为模拟电压,经过射极跟随器后,送到电压电流转换(U/I)电路,转换为控制电流,通过 IR3C01 的调节端,来控制激光二极管输出功率。

### 3.1 数模转换电路 DAC

数模转换电路原理图见图 3,采用 8 位精度的 AD7224。前级 SN74F543 包含了两个 8 位的 D 型锁存器,具有各自的输入输出控制。芯片的引脚 17 是复位输入,相当于一个很有用的过零功能,在测量系统初始化进行基准校正的时候很有用。

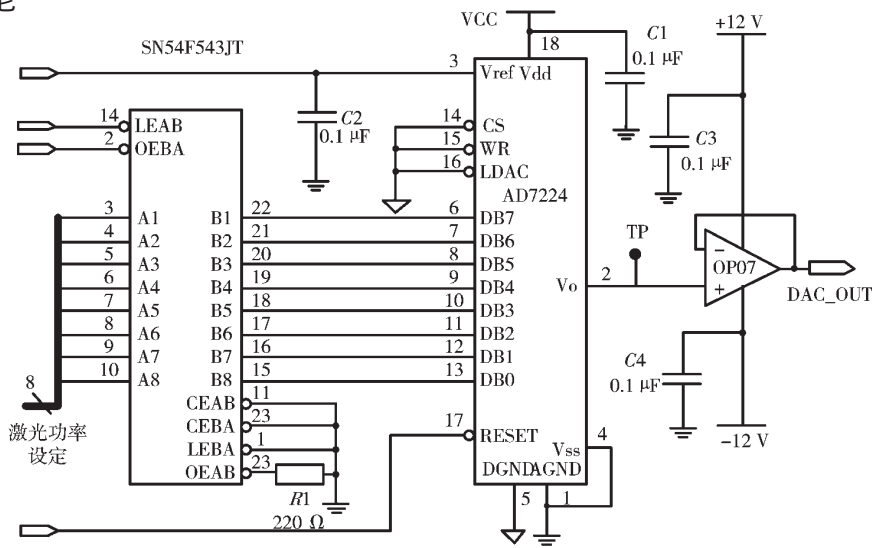


图 3 数模转换电路原理图

设计中采用 LM317 调压电路提供 2 V 的参考电压。

DAC 的电源电压是+12 V。由此得到 DAC 输出电压的调节范围：

$$V_{\text{OUT}}=D\times V_{\text{ref}} \quad (1)$$

这里  $D$  代表一个 8 位转换因子, 从 0 到 255 之间变化。也可以采用 12 位以上的数模转换器。

### 3.2 电压电流转换(U/I)电路

在比例恒流源和基本镜像恒流源电路的基础上,设计了一个 U/I 电路,见图 4,将  $V_{in}$  (即 OP07 输出的电压  $V_{OUT}$ ) 转换成稳定的电流,来控制 IR3C01 模块的输出。

通过有源负载和使用恒流源有效地降低了

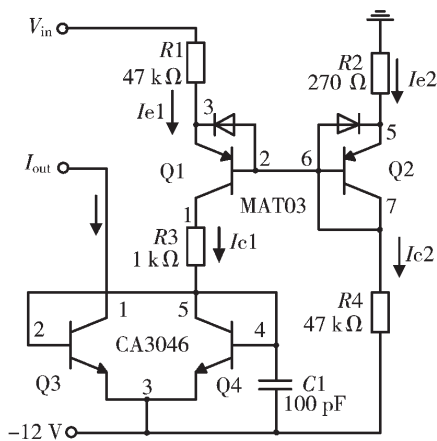


图 4 电压电流转换电路图

干扰,提高了恒流源电流的稳定性。

Q1 和 Q2 的基极电压相等, 所以有:

$$U_{BE2} + I_{E2} \times R_2 = U_{BE1} + I_{E1} \times R_1 - V_{in} \quad (2)$$

晶体管发射结电压与发射极的近似关系见式(3):

$$U_{\text{BE}} \approx U_{\text{T}} \ln \frac{I_{\text{E}}}{I_{\text{S}}} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)得:

$$U_T \ln \frac{I_{E2}}{I_s} + I_{E2} \times R_2 = U_T \ln \frac{I_{E1}}{I_s} + I_{E1} \times R_1 - V_{in} \quad (4)$$

由于 Q1 和 Q2 的特性完全相同, 所以式(4)可写成:

$$U_T \ln \frac{I_{E2}}{I_{E1}} = I_{E1} \times R_1 - I_{E2} \times R_2 - V_{in} \quad (5)$$

当  $\beta \gg 2$  时,  $I_{C1} \approx I_{F1}$ ,  $I_{C2} \approx I_{F2}$ , 所以有

$$I_{C1} \approx \frac{R_2}{R_1} \times I_{C2} + \frac{U_T}{R_1} \ln \frac{I_{E2}}{I_{E1}} + \frac{V_{in}}{R_1} \quad (6)$$

在一定范围内,上式中的对数项可忽略,第一项用实际电阻值计算后结果几乎为零,也可忽略,所以式(6)简化为:

$$I_{C1} \approx \frac{V_{in}}{R_1} \quad (7)$$

因此改变 DAC 输出电压就可以控制电流  $I_{C1}$ 。由 CA3046 组成基本镜像电流源, 因此有  $I_{C1} \approx I_{out}$ , 从而激光二极管功率控制电流  $I_{out}$  与调节电压  $V_{in}$  有了对应关系。

#### 4 CCD 信号控制原理及驱动电路

#### 4.1 CCD 驱动电路设计

CCD 驱动脉冲发生电路见图 5。利用 DSP 的定时器 0 的输出引脚 TMRO, 输出 4 MHz 的方波, 通过一级 D 触发器 SN74HC74D 的二分频得到 2 MHz 的  $\Phi_M$  驱动脉冲。再经过两级 D 触发器的分频得到 0.5 MHz 的  $\Phi_{GD}$  脉冲<sup>[8-9]</sup>。

参考 TCD132 器件手册中的工作波形图可知,  $\phi_{SH}$  至少应包含 2 182 个  $\phi_M$  周期, 设计时取  $T_{SH}=2\ 182\ T_M$ , 由 DSP 的定时器 1 的输出引脚 TMR1 产生。

CCD 的输出信号经过 DSP 内部的 ADC 进行读取, 评估信号质量后, 通过重心法求出光斑中心<sup>[10-11]</sup>。

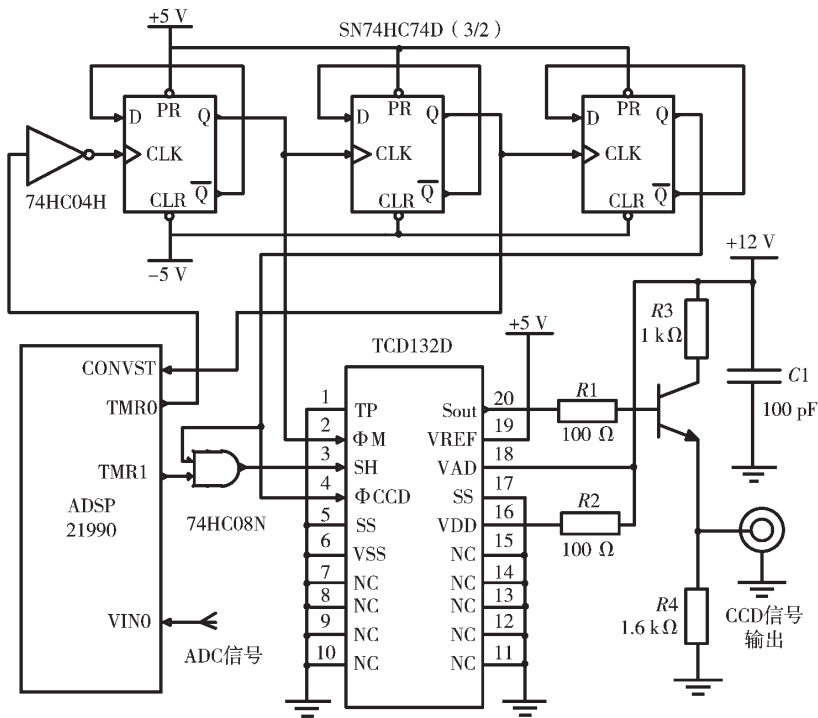


图 5 CCD 驱动脉冲发生电路

## 4.2 CCD 自动增益控制

测量系统的准确性与 CCD 输出的模拟信号的峰值电压范围相关,其范围与入射光光强、帧转移频率有关,当入射光越强,或帧转移脉冲频率越小,即积分时间越长,则对应的光敏单元捕捉到的光量越多。到一定限度时,连续的光敏单元产生的光电电荷到达饱和,从而使输出的模拟信号不真实反映被测物体的位移信息<sup>[12-13]</sup>。

所以有两种方法使得 CCD 信号保持在线性范围内, 一种是通过控制激光光照强度, 本文前面已经论述。另一种是通过调整 CCD 感光积分时间。DSP 定时器周期调整时采用逐次逼近的方法, 采用适当的步长, 就可以达到较好的收敛速度; 由于系统采用的检测调整模块是以 DSP 为核心, 使整个系统清晰、运行速度快。

## 5 高度测量系统在光刻中的应用

高度传感器可以运行于实时方式或者高度映射方式,实时方式下是在每个子场曝光之前,先检测该子场的高度;高度映射方式是在曝光之前,通过测量基片上一个点阵的高度值和  $XY$  坐标值,进行曲面拟合来模拟基片的实际的翘变。

采用快速搜索的方法调整激光功率和探测器增益,以给出正确的信号电平。按照基片衬底材料反射性,读数时打开自动增益调整(激光常开),信号电平以小步进调整,一段时间后取出高度读数,读数所需时间依赖于获取正确信号电平所需的积分数。对于亮衬底约为 30 ms,依次逐渐增加。

(下转第 132 页)

- 制和目标检测方法[J].雷达学报, 2020, 9(4): 640-653.
- [13] 吕焦盛.基于 TCP/IP 协议的网络通信服务器设计与实现[J].赤峰学院学报(自然科学版), 2019, 35(9): 50-52.
- [14] 刘彦平.基于 Qt 的 Windows 平台组播通信技术研究[J].软件, 2017, 38(1): 135-138.
- [15] 黄翩, 张琼, 祝婷.基于 Qt 的一个服务器多个客户端的 TCP 通信[J].电子科技, 2015, 28(3): 76-78, 82.

(收稿日期: 2021-03-01)

(上接第 122 页)

胶层厚度会引起高度测量值的偏移,如:在铬上涂敷 PMMA 后,由于在 PMMA 中的折射,铬表面看起来位置会更高一些,高度测量计读出的高度约为铬表面之上 PMMA 厚度的 0.69 倍,因此需要根据抗蚀剂厚度增加一个偏移量,以便有效读出衬底表面的真实高度。

### 6 结论

在光刻设备中也有采用二象限、四象限光电管作为探测器,采用汞灯、卤素灯作为测量光源的,利用光阑、光栅图形,应用双折射调制技术和激光功率脉宽控制等技术进行测量的方法。本设计的电路实现了 CCD 的光积分时间的调整和激光器的功率的调整,利用这两种方法来获得高质量的测量信号,提高测量的准确性和对不同材料的适应性,可以满足电子束曝光使用要求和投影光刻的高度粗调的技术要求。

### 参考文献

- [1] 陈安.曝光光学系统性能对光刻性能影响的研究[D].成都:中国科学院光电技术研究所, 2013.
- [2] 金晓刚.光刻工艺中的焦距异常发生原因分析及解决办法[D].上海:复旦大学, 2009.
- [3] 冯俊艳, 冯其波, 匡萃方.高精度激光三角位移传感器的技术现状[J].应用光学, 2004, 25(3): 33-36.
- [4] GARCIA D F, GARCIA M, OBESO F, et al. Flatness measurement system based on a nonlinear optical triangulation technique[J]. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(2): 188-195.

(上接第 127 页)

- scanning tightly coupled dipole array with integrated Balun (TCDA-IB)[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(9): 4538-4548.
- [12] CHEN Y K, YANG S W, NIE Z P. The role of ground plane plays in wideband phased array antenna[C]//IEEE International Conference on Ultra-Wideband Antenna, 2010, 2: 1-4.
- [13] CHEN Y K, YANG S W, NIE Z P. A novel wideband antenna Array with tightly coupled octagonal ring elements[J]. Progress In Electromagnetics Research, 2012, 124: 55-70.
- [14] TZANIDIS I, SERTEL K, VOLAKIS J L. Excitation and

### 作者简介:

侯彭亮(1995-), 男, 硕士, 主要研究方向: 雷达显卡平台开发。

郭苹(1989-), 通信作者, 女, 博士, 讲师, 主要研究方向: 合成孔径雷达成像算法研究, E-mail: guopingxidian@126.com。

王展鹏(1996-), 男, 硕士, 主要研究方向: 雷达显控设计。



扫码下载电子文档

- [5] 刘书明, 苏涛, 罗军辉. TigerSHARC DSP 应用系统设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [6] 王晓明, 庄喜润, 崔建. 高性能工业控制 DSP—ADSP-2199X 原理及应用[N]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- [7] 元琳. 基于线阵 CCD 的小型光电位移监测系统的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2013, 2.
- [8] 张智辉, 田地, 杨义先. 线阵 CCD 驱动电路设计的几种方法[J]. 仪表技术与传感器, 2004(6): 32-33.
- [9] 黄红星, 卢凌, 肖李, 等. 基于 DSP 的 CCD 驱动电路的设计[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 26(6): 811-814.
- [10] 孙立环, 赵霄洋, 高凌好, 等. 基于亚像素定位技术的激光光斑中心位置测量[J]. 激光技术, 2017, 41(4): 511-514.
- [11] 陈青山, 吕乃光. 激光准直高斯光斑中心位置计算方法分析[J]. 计算机测量与控制, 2004, 12(5): 486-488.
- [12] 王祖军, 张勇, 唐本奇, 等. TCD132D 线阵 CCD 总剂量效应的实验分析[J]. 电子器件, 2010, 33(1): 18-21.
- [13] 颜伟彬, 赵斌. 基于数字信号处理器的 CCD 自动增益调整[J]. 传感器技术, 2004, 23(3): 74-76.

(收稿日期: 2020-12-26)

### 作者简介:

赵英伟(1971-), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 半导体工艺设备。

郝晓亮(1979-), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 电子束光刻机和扫描电镜等。

张文雅(1982-), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 投影光刻机等。



扫码下载电子文档

termination of finite tightly coupled antenna arrays based on structural characteristic modes[J]. Proceeding on Antenna Applications Symposium. IEEE, 2011: 103-106.

(收稿日期: 2021-05-30)

### 作者简介:

杨龙(1988-), 通信作者, 男, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向: 宽带天线、共形相控阵, E-mail: wuyanqianzi@163.com。

周文涛(1987-), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向: 相控阵天线、数字信号处理。

王娜(1989-), 女, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向: 相控阵天线、测控通信系统。



扫码下载电子文档



## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所