

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416968

基于光电检测的验孕电路设计与研究*

苏琪¹ 黄浩楠² 陈乐¹ 银珊¹ 林清标³

(1. 桂林电子科技大学光电工程学院 桂林 541000; 2. 桂林电子科技大学电子工程与自动化学院 桂林 541000;
3. 广西开蒙医疗科技有限公司 来宾 546299)

摘要: 本文介绍了一种基于光电检测技术的可循环利用的验孕电路设计。该设计采用金标检测试纸作为初级传感器,光电传感器作为次级传感器,利用金标检测试纸显色区域对特定波长光线的敏感性,精心选择匹配的光源波长,并通过不同孕期的HCG浓度的标准样本进行标定,进而实现对金标检测试纸显色结果的快速、精确检测。通过正交实验优化了电路变量参数,利用方差分析和极差分析确定了最优组合,实验结果表明,本文所设计的电路系统工作稳定,性能可靠。对比传统的验孕试纸和一次性电子验孕产品,本文提出的检测方法不仅可实现非接触测量和重复使用,还具备高测量精度和便携性,具有广阔的应用前景。

关键词: 光电检测; 验孕; 光电传感器; HCG

中图分类号: TN29 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.20

Design and implementation of pregnancy test circuit based on photoelectric detection

Su Qi¹ Huang Haonan² Chen Le¹ Yin Shan¹ Lin Qingbiao³

(1. School of Optoelectronic Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541000, China;
2. School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541000, China;
3. Guangxi Kaimon Medical Technology Company Limited, Laibin 546299, China)

Abstract: This paper introduces the design of a recyclable pregnancy test circuit based on photoelectric detection technology. The design uses the gold label test paper as the primary sensor and the photoelectric sensor as the secondary sensor, uses the gold label to detect the sensitivity of the color region of the test paper to the specific wavelength of light, and carefully selects the matching light source wavelength. And through the person of different pregnancy chorionic gonadotropin human chorionic gonadotropin (HCG), the concentration of standard sample for calibration, and then realize the gold test color fast and accurate testing results. The circuit parameters are optimized by orthogonal experiment, and the optimal combination is determined by variance analysis and range analysis. The experimental results show that the circuit system designed in this paper is stable and reliable. Compared with traditional pregnancy test paper and disposable electronic pregnancy test products, the detection method proposed in this paper can not only realize non-contact measurement and repeated use, but also has high measurement accuracy and portability, and has broad application prospects.

Keywords: photoelectric detection; the pregnancy test; photoelectric sensor; HCG

0 引言

随着现代生活水平的提升,人们越来越注重自身的生活质量和健康,在早期孕检、疾病预测等方面,需要对大量生化试剂的含量进行快速、准确的检测和分析,这对于人体疾病的早期诊断和怀孕准备至关重要。金标免疫层析法

(gold immunochromatographic assay, GICA) 是一种将已知抗原或抗体用胶体金进行标记再通过抗原抗体特异性结合反应^[1]使得胶体金聚集形成肉眼可见的形式,从而达到对待测物进行快速简便、迅速且准确的检测目的的技术。金标免疫层析技术具有成本低、操作便捷、灵敏度高、稳定性强等优势,非常适合家庭生活中个人健康的自我检测^[2]。

收稿日期:2024-09-24

* 基金项目:中央引导地方科技发展基金(2023ZYZX2046)、广西重点研发计划(2023AB01433)、国家自然科学基金专项(62341304)资助

随着科技的不断进步,验孕产品已经成为了现代女性生活中不可或缺的一部分。目前,对于判断是否怀孕,人们通常使用传统的验孕试纸或者电子验孕棒来进行,验孕试纸也是一种金标检测试纸,其原理也是利用金标免疫层析技术,通过孕妇尿液中的人绒毛膜促性腺激素(human chorionic gonadot, HCG)与验孕试纸中的某种抗体发生特定的化学反应。这种反应会导致验孕试纸上相应的位置出现特定的标志,例如线条或颜色变化^[3],从而提示是否怀孕。国内外学者对胶体金免疫试纸的定量测量进行了一系列研究,有采用光敏电阻测量方案的,这种设计测量光强范围广,灵敏度高,电路简单,但是光敏电阻在测量过程中存在严重的阻值漂移,影响测量精度^[4];采用 CMOS^[5]和 CCD^[6]等图像传感器测量显色区域,虽然提高了测量的精度,但后期对图像的分析处理很复杂,并且这种方案成本过高,难以在市场上推广。

传统的验孕试纸只能判断怀孕与否,而不能确定怀孕的具体周数。在怀孕 2~3 天内孕妇尿液中的 HCG 浓度较低,导致与验孕试纸中的抗体反应较弱,使得验孕试纸上的显色区域颜色较浅,难以被肉眼观察到,从而可能导致结果不准确。相比之下,电子验孕棒通过读取不同程度的颜色信息来判断怀孕与否,有的还可以确定怀孕前三周的怀孕周数,这种设计不仅提高了检测的灵敏度,使得即使在 HCG 水平较低的情况下也能给出可靠的测试结果,同时还避免了因主观判断造成的误读风险。目前市场上已有可丽蓝、金秀儿、思兰等品牌的电子验孕棒,其中思兰验孕棒仅能告知怀孕与否,而可丽蓝和金秀儿则还可以给出怀孕前三周的怀孕周数。尽管可丽蓝在市场上知名度较高,但其价格相对较高,且作为一次性产品灵敏度也不够高,对于频繁使用的用户不够经济实惠。目前市场上能买到的验孕试纸条和电子验孕棒,采用的都是两条杠的验孕试纸,如果出现两条杠代表怀孕,出现一条杠代表未怀孕;而本文介绍的验孕试纸是一条杠显示的,如果出现一条杠代表怀孕,未出现代表未怀孕。可丽蓝内部放置了两根验孕试纸作为一级传感器,配备了一个光电传感器和四个发光二极管,其中一根试纸用于测试有效性,另一根用于测试怀孕结果。

本文拟用一根一条杠显示的验孕试纸,一个发光二极管和两个光电传感器构建光电检测模块,采用双光路结构,能够敏锐地检测验孕试纸上的颜色差异,从而间接的检测孕妇尿液中的孕激素水平,且由于双光路设计还可以提高信号的稳定性和准确性,降低环境光干扰,通过单片机对整体进行控制,实现低功耗和循环使用,并采用显示屏显示验孕结果。

1 金标免疫层析技术原理

验孕产品的核心都是借助验孕试纸的显色反应,而显色反应原理都是基于 GICA,这是一种在医学诊断和生物

分析中常用的技术,用于检测目标分子(如蛋白质、激素等)的存在与浓度。具体而言,金标免疫层析技术通常利用金纳米颗粒作为信号标记物,这些颗粒表面修饰有与目标分子特异性结合的抗体或配体。在样品中,如果存在目标分子(如特定蛋白质、激素或药物),它们将与标记抗体结合形成复合物^[7]。通过测量复合物在测试带或试验器表面的可见信号强度(如颜色变化或荧光发光强度),可以确定目标分子的存在量,从而进行定性或定量分析^[8]。图 1 所示为本文使用的验孕试纸内部结构示意图,包括:①样品垫、②衬底、③硝酸纤维素膜(NC 膜)、④吸水垫、⑤检测带、⑥空白带、⑦金标结合垫、⑧待测样品,其中条带状抗体固定于 NC 膜上^[9],而金标结合垫上吸附有胶体金标记试剂。检测过程中,在样品垫上滴加样品溶液(孕妇的尿液),样品通过渗透与虹吸作用进入金标结合垫,使固化的胶体金标记试剂溶解后,与样品中可能存在的被检物(HCG)发生免疫反应,重新溶解游离形成免疫复合物,通过层析作用向前移动,当移至检测带时,条带状抗体又与上述免疫复合物发生特异性反应而被截留、聚集形成直观紫红色条带^[10]。如果孕妇尿液中没有 HCG,则检测带没有颜色变化,如果孕妇尿液中含有 HCG,则检测带呈紫红色,且 HCG 含量越高显色越深。

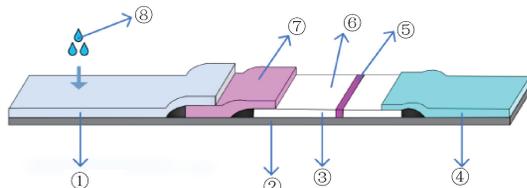


图 1 验孕试纸内部结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the internal structure of the pregnancy test strip

根据吸光度原理^[11],物体颜色的深浅和光的吸收与反射有关。颜色越深,则对光的吸收越强,反射的光强就越弱。因此目标待测物(HCG)的浓度和检测带的反射光强呈负相关关系。在 HCG 一定浓度内,可认为检测带反射光强与其浓度成线性关系^[12]。知道 HCG 的浓度就可以推算出孕妇怀孕周数。基于以上原理,检测验孕试纸检测带和空白带的颜色信息就可得出怀孕信息,本文介绍的检测方法是利用一个 LED 和两个光电传感器搭建的双光路结构,LED 用于照射试纸上的检测带和空白带,两个光电传感器分别用于接收并处理这两部分反射的光谱信息。在 LED 光源照射下,检测带和空白带各自产生一个反射光谱,光电传感器将反射光谱转换为电信号,经过放大、I/V 转换、滤波、A/D 转换^[13]之后分别得到一个电压 AD 值,将检测带的 AD 值减去空白带的 AD 值得到一个最终的 AD 差值,根据不同怀孕周数对应的 HCG 浓度所测得的这一 AD 差值进行标定后,用户自行检验的时候就可根据标定范围确定怀孕周数。

2 系统整体设计

实验证明: 验孕试纸检测带的颜色越深, HCG 浓度越高, 则怀孕周数越大; 反之, 检测带颜色越浅, HCG 浓度越低^[14], 则怀孕周数越小。根据这一关系, 把验孕试纸作为一级传感器, 光电传感器作为二级传感器, 再结合光电检测技术送到单片机中进行一系列处理。

整个系统电路主要由光电检测模块、CPU 控制模块、按键模块和液晶显示等部分组成, 为了方便调试, 采用 USART 实现串口数据传输给上位机, 系统总体设计如图 2

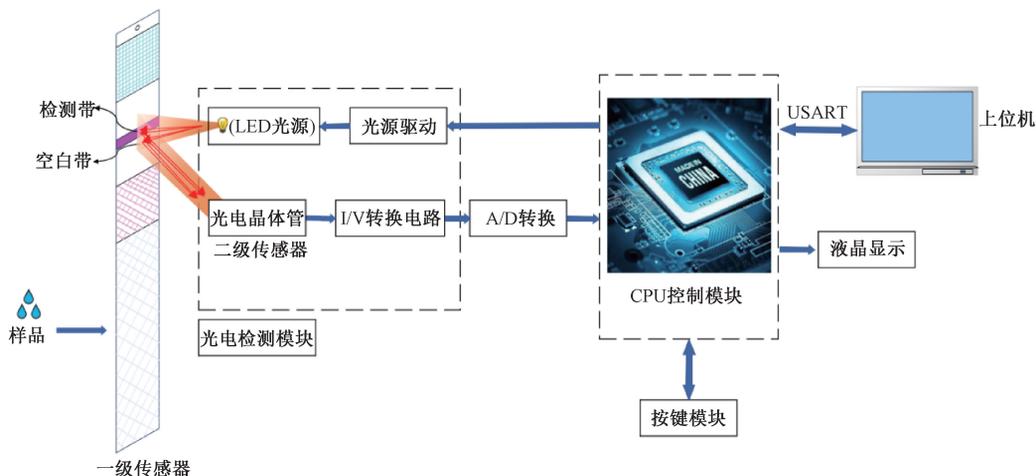


图 2 系统总体设计结构框图

Fig. 2 Block diagram of the overall system design structure

本文为了实现循环使用和提高灵敏度, 针对电路的功耗问题和优化问题进行了深度分析。在电路的功耗方面, 本文采用软件硬件相结合, 通过设计一个开关按键模块结合软件的操作来降低电路的功耗; 在电路的优化方面, 本文通过优化电路的变量参数来提高测量灵敏度, 拟采用正交实验方法, 从多变量多水平的实验组合中筛选出一组最优配置。

2.1 光电检测模块设计

光电检测模块实现了对验孕试纸检测带信息的提取, 它作为系统信号来源, 是整个系统电路的重要组成部分^[15], 主要由 LED 光源、光电传感器和 I/V 转换电路构成。图 3 所示为光电检测模块电路原理图, LED1 的阴极连接于单片机的一个 I/O 口, 通过控制这一引脚的高低电平就可以驱动 LED 光源了。由于本文使用的验孕试纸只有一条色杠显示, 且色杠检测带呈紫红色, 空白带呈白色, 所以使用两个光电传感器分别接收检测带和空白带的光强信号, 并采用了双光路结构。

为了提高对验孕试纸检测带颜色变化的分辨率, I/V 转换电路采用了两个三极管, 第一级三极管用作组成三极管放大电路, 第二级三极管用作构成射随电路, 提高信号的稳定性。如图 4 所示, 根据光电传感器的输入-输出特性

所示。CPU 控制模块采用的是 HK32F030MF4P6 微处理器作为电路的主控芯片。光电检测模块包括 LED 光源驱动电路、光电传感器和 I/V 转换电路。单片机驱动 LED 光源发出特定波长的光谱照射在验孕试纸检测带和空白带上, 检测带和空白带吸收一部分光, 反射一部分光, 光电传感器接收检测带和空白带反射出来的光信号, 并将光信号转换为电流信号, 再经过 I/V 转换电路转换为电压信号, 经过 A/D 转换之后送入单片机中, 再配合按键模块的操作, 最后由液晶显示屏显示最终结果。

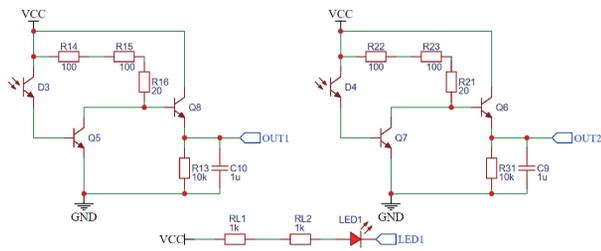


图 3 光电检测模块电路原理图

Fig. 3 Circuit schematic diagram of photoelectric detection module

曲线, 确定光电传感器的光生电流^[16]仿真范围是 $0 \sim 200 \mu\text{A}$, 最终的输出电压 U_{OUT} 为:

$$U_{\text{OUT}} = V_{\text{CC}} - \beta I_b R_1 - U_{\text{be}} \quad (1)$$

其中, V_{CC} 为电源电压, β 为第一级三极管的电流放大倍数, I_b 为光电传感器的光生电流, R_1 为第一级三极管的集电极电阻。

图 5 所示为电路仿真模型, 用恒流源代替光电传感器由光信号转换为电流信号的过程, 光生电流随光强的增加而增大, 由仿真实验可以验证随着光生电流的增大, 输出电压变小, 电路仿真数据如表 1 所示, 表中 I_b 表示输入电流, R_1 表示集电极电阻, I_{bc} 表示集电极电流, U_o 表示第一

级输出电压, U_{out} 表示第二级射随电压。

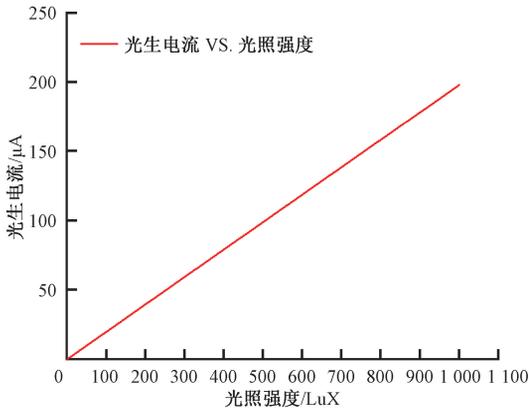


图4 光电传感器输入-输出特性

Fig. 4 Input-output characteristics of photoelectric sensor

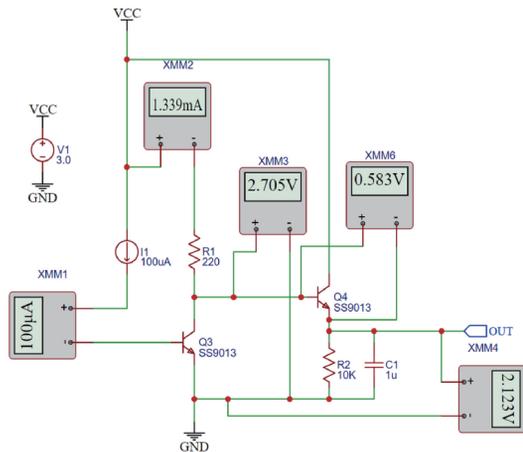


图5 电路仿真模型

Fig. 5 Circuit simulation model

表1 光电检测模块电路仿真结果

Table 1 Circuit simulation results of photoelectric detection module

编号	$I_b / \mu A$	R_1 / Ω	I_{bc} / mA	U_o / V	U_{out} / V
1	20	220	0.285	3.237	2.649
2	50	220	0.685	3.149	2.562
3	80	220	1.085	3.061	2.475
4	100	220	1.351	3.003	2.417
5	120	220	1.616	2.945	2.359
6	150	220	2.012	2.857	2.273
7	180	220	2.405	2.771	2.188
8	200	220	2.667	2.713	2.131

2.2 按键模块设计

1) 硬件设计

为了实现产品的多次使用,本电路系统的功耗问题是关键,如何保证产品从生产到用户使用的这段时间内电池

都是有电的,以保证用户使用的时候能够正常工作,同时电池的电量足以支持产品多次使用,针对以上问题,本文设计了一个结合软件操作的按键模块电路,以降低电路的功耗。

图6所示是按键模块电路原理图,通过一个按键开关控制整个电路的接通与断开,其中KEY1端口会与一个处于下拉输入状态的单片机I/O口相连,在按键模块电路导通之后,若按键SW1被按下则KEY1引脚为高电平,若SW1被弹起则KEY1引脚为低电平。H1的1号引脚连接单片机的供电引脚VCC,2号引脚连接GND。当电路接通电源时,即VCC1为3.3V时,场效应管U2处于截止状态,此时H1的输出电压为0V,单片机无法工作,即没有功耗;当按键SW1第一次被按下时,三极管Q1的基极变为高电平,U2和Q1同时导通,当SW1断开之后由于R8和R9之间的分压使得Q1的基极依然保持高电平,并且再次按下按键之后也无法改变电路的通断,电路将一直保持导通状态,H1的输出电压接近于VCC1的电压,此时单片机可以正常工作。当需要将电路再次断开时,则需要用到power端口,该端口将与单片机的I/O口相连,当将power端口拉至低电平时,Q1基极变为低电平,U2和Q1都截止,此时H1的输出电压就变为0V。

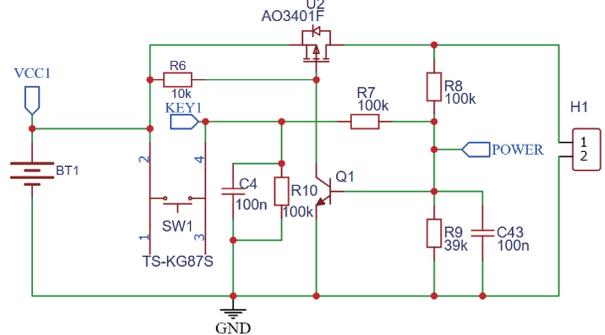


图6 按键模块电路原理图

Fig. 6 Circuit schematic diagram of key module

2) 软件设计

为了使产品能够高效稳定的运行,不仅需要底层硬件进行硬件调试,还需要给系统提供稳定可靠的程序做中央控制,以便各个模块各司其职分工合作,共同完成任务。该系统电路软件开发平台使用的是Keil5,在搭建好硬件电路的基础上,通过该平台对系统进行开发。以上是针对电路功耗问题的硬件调试,除了硬件电路的支持,还需配合软件操作以进一步降低功耗。对于上述按键模块电路,本文设置了单击、长按和双击3种按键状态来实现不同的功能,图7所示为按键模块软件设计流程图。首先对按键进行初始化,再对多功能按键回调函数进行初始化,判断进入哪种回调函数,如果是单击,则进入1s计时函数,判断1s内是否第2次按下按键,如果否,拉低power引脚关闭电路,结束;如果是,对按下按键

的时间进行计时,判断是否超过 3 s,如果是,则进入光电检测模块信息采集阶段,结束;如果否,则拉低 power 引脚关闭电路,结束。如果进入的是长按回调函数,判断按键是否在 3 s 内松开,如果否,则拉低 power 引脚关闭电路,结束。如果进入的是双击回调函数,判断按键是否在 3 s 内松开,如果否,则拉低 power 引脚关闭电路,结束。如果进入的是单击回调函数,判断按键是否在 3 s 内松开,如果否,则拉低 power 引脚关闭电路,结束;如果是,对按键进行判断是否再次按下按键,如

果否,则拉低 power 引脚关闭电路,结束;如果是,判断按键是否在 3 s 内松开,如果是,则进入光电检测模块信息采集阶段,结束;如果否,则拉低 power 引脚关闭电路,结束。如果进入的是双击回调函数,则直接进入光电检测模块信息采集阶段,结束。

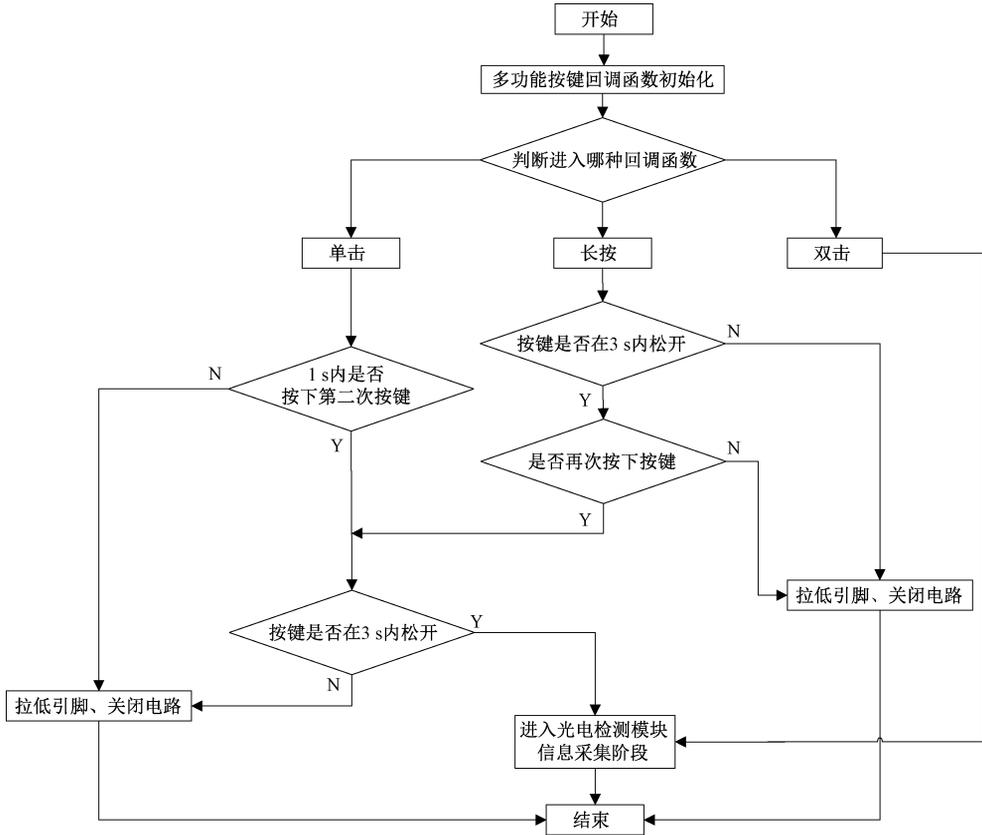


图 7 按键模块软件设计流程图

Fig. 7 Software design flow chart of key module

通过上述对应按键操作开启电路之前,先滴入适量 HCG 溶液至验孕试纸的样品垫,待溶液慢慢移动到检测带使得检测带逐渐显色,根据显色实验观察,从滴入样品垫开始计时,到 5 min 时,检测带显色才稳定下来。

图 8 所示为光电检测模块软件设计流程图,进入光电检测模块信息采集阶段,首先将 power 引脚拉至高电平,并点亮 LED1,给试纸提供光源照明,为后续光电传感器接收反射光强做准备,这时电路开始检测电压 AD 值了。将第一次测量空白试纸的电压值设置为阴极,同时开始计算开机时间,每 10 s 测量一次电压差,同时计时器开始计时等待试纸显色,判断试纸是否为潮湿状态,若测量到检测带或者空白带的 AD 值发生明显变化,则试纸为潮湿;否则试纸为干燥。若试纸为干燥状态,则拉低 power 引脚关闭电路,结束;若试纸为潮湿状态,每 10 s 判断一次极性,计时到 5 min 时判断极性是否发生改变,是或否,显示屏都显示极性结果,判断开机时间是否到达设定值,若否,则仍停留在显示屏显示界面;若是,则拉低 power 引脚关闭

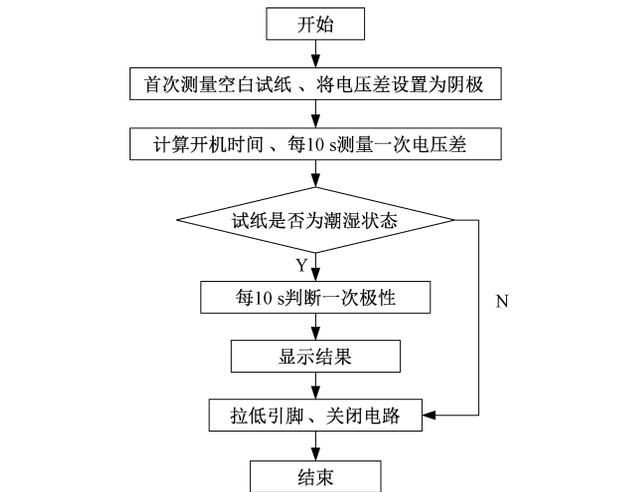


图 8 光电检测模块软件设计流程图

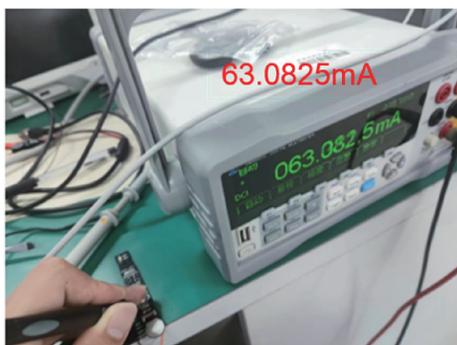
Fig. 8 Software design flow chart of photoelectric detection module

电路,结束。等待检测结束显示屏显示孕检信息后,长按

按键超过 10 s 即可拉低 power 引脚关闭电路,如果需要再次检测连续两次按下按键即可,这样设计就实现了可多次使用,降低了成本。

3) 功耗验证

为了验证上述降低电路功耗方案的可行性,本文将方案实施前后的电路功耗进行对比。根据上面的分析知道 power 引脚是为了使电路关机的,将 power 引脚设为输入模式,这样 power 引脚也不会影响外部电路的电平,触发关机条件之后,再将 power 引脚设为输出模式,将 power 引脚拉至低电平,这样电路就关机了。将 power 引脚设为输出模式时,用数字多用表测得电路工作时的功耗约为 63 mA;将 power 引脚设为输入模式时,测得电路工作时的功耗约为 8 mA。测得功耗如图 9 所示,可知此方案合理。



(a) 方案实施前电路工作功耗

(a) Circuit working power consumption before scheme implementation



(b) 方案实施后电路工作功耗

(b) Circuit working power consumption after scheme implementation

图 9 电路工作功耗图

Fig. 9 Power consumption diagram of circuit operation

3 正交实验设计与分析

为了提高产品检测的灵敏度,本文从电路优化的角度出发,探讨如何通过优化电路的变量参数来最大限度地提升测量结果的精度,并采用正交实验方法,从多变量多水平的实验组合中筛选出一组最优配置。根据上述的分析结合电路设计,考察的电路变量因素有 4 个:LED 光源颜色(A)、LED 限流电阻(B)、放大电路的集电极电阻(C)、电路板与验孕试纸间的距离(D),这 4 个

变量分别选取了 4 个水平,表 2 所示为正交实验因素水平表。

表 2 正交实验因素水平表

Table 2 Level table of orthogonal experimental factors

水平	LED 光源颜色(A)	限流电阻(B)/ kΩ	集电极电阻(C)/ Ω	距离(D)/ mm
1	红色	1.0	100	2.30
2	黄绿色	2.5	200	3.30
3	翠绿色	4.0	300	4.30
4	白色	5.5	400	5.30

为了探究这些变量水平对测量结果的影响并找到这些变量的最优水平组合,本文采用了两条检测带颜色深浅不一的验孕试纸,本文设为试纸 a 和试纸 b,如图 10 所示,试纸 b 检测带颜色比试纸 a 深,在同一环境、同一变量水平下分别对试纸 a 和试纸 b 进行检测,可以得到试纸 a 的 AD 值结果,记为 V_a ,同理,试纸 b 的结果记为 V_b ,将 $V_b - V_a$ 的值记为分辨率。

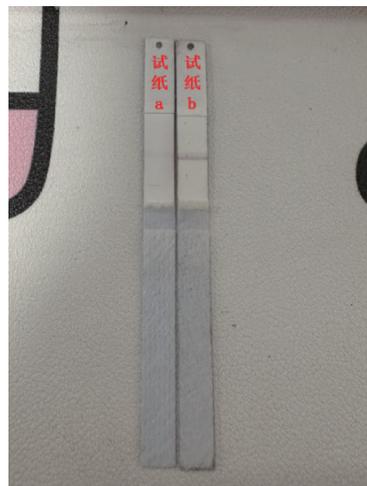


图 10 正交实验所用试纸

Fig. 10 Test paper for orthogonal experiment

本文将分辨率作为研究指标,围绕 LED 光源颜色、限流电阻、集电极电阻以及电路板与验孕试纸间的距离设计了四因素四水平 $L_{16}(4^4)$ 正交实验,一共 16 组实验。为保证实验数据的准确性和可靠性,每组实验进行 10 次测量,从而得到 10 组 V_a 和 V_b ,分别计算其平均值,最终将计算得到的 V_b 平均值减去 V_a 平均值,记作该因素水平下的分辨率。本文认为分辨率越大,该因素水平下的电路系统检测灵敏度越高。具体实验结果如表 3 所示。从表 3 中可以看出,在不同的变量参数下,得到的分辨率也呈现出显著的差异。

表 3 正交实验结果

Table 3 Orthogonal experiment results

编号	A	B	C	D	分辨率
1	1	1	1	1	32.81
2	1	2	2	2	28.31
3	1	3	3	3	32.58
4	1	4	4	4	21.22
5	2	1	2	3	29.69
6	2	2	1	4	21.78
7	2	3	4	1	17.24
8	2	4	3	2	13.13
9	3	1	3	4	0
10	3	2	4	3	0
11	3	3	1	2	27.20
12	3	4	2	1	10.32
13	4	1	4	2	0
14	4	2	3	1	0
15	4	3	2	4	32.27
16	4	4	1	3	12.01

实验结果与分析:

1) 极差分析

通过极差分析,确定电路最大测量精度的最佳变量水平组合。极差分析结果如表 4 所示,表 4 中 K 值表示每个因素在各个水平下的指标总合,Kavg 表示每个水平下实验结果的平均值,它用于衡量 4 个实验因素在不同水平下对分辨率的影响程度。极差 R 是通过计算每个 Kavg 的最大值减去最小值得到的,它的大小反映了因素水平变动对实验结果的影响程度,极差 R 越大,意味着该因素的水平变化对实验结果的影响越显著^[17]。由表可知,限流电阻对分辨率影响最大,其次是 LED 光源颜色、集电极电阻和距离。最优变量水平组合是:LED 光源颜色为红色,LED 限流电阻为 4 kΩ,集电极电阻为 200 Ω,距离为 5.30 mm。

不同变量水平对分辨率的影响如图 11 所示,其中影响最大的是 LED 光源颜色这一因素。在 LED 光源颜色这

表 4 正交实验结果的极差分析

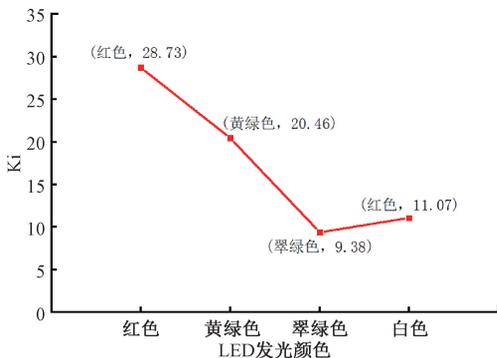
Table 4 Range analysis of orthogonal experiment results

项目	A	B	C	D
K1	114.92	62.50	93.80	60.37
K2	81.84	50.09	100.59	68.64
K3	37.52	109.29	45.71	74.28
K4	44.28	56.68	38.46	75.27
Kavg1	28.73	15.63	23.45	15.09
Kavg2	20.46	12.52	25.15	17.16
Kavg3	9.38	27.32	11.43	18.57
Kavg4	11.07	14.17	9.61	18.82
极差 R	19.35	14.80	15.53	3.73
最佳水平	1	3	2	4
主顺序	A	C	B	D
优组合	A1	B3	C2	D4

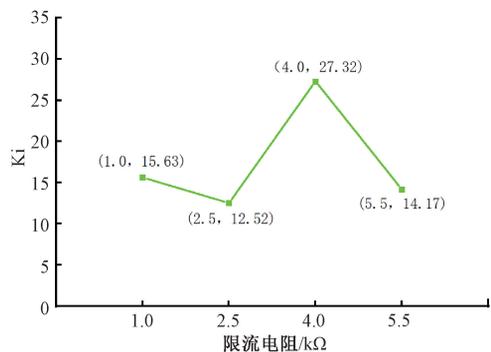
一因素中,最佳水平是红色,分析其原因是:验孕试纸检测带呈紫红色,根据补光原理,与紫红色互补的是绿色^[18],而白色反射所有光,当使用绿色 LED 光源时,照射在紫红色检测带上的绿光被吸收,反射极少其他光的光强,光电传感器转换的电流就小,通过 I/V 转换电路之后的电压就大,两路信号差值就小;反之,如果使用红色 LED 作为光源,检测带这一路的输出电压信号就小,那么两路信号差值就大了,所以本系统光源采用红色 LED,更有利于提高检测系统的精确性。

2) 方差分析

极差作为一种简单的统计量,通常用于初步判断不同因素对实验指标的影响程度,能够直观地显示各因素对结果的影响并帮助得出最优组合。然而,极差分析的局限在于无法估算实验误差,从而可能影响结论的准确性。为了更好地理解各因素对实验目标的实际影响并进行准确评估,引入了方差分析。方差分析的核心思想是将实验数据的总变异分解为两部分:一部分由不同因素引起的变异,另一部分由随机误差引起的变异。因素均方差反映了各因素水平间观测值的差异程度,即因素对实验结果的影响



(a) LED 发光颜色对分辨率的影响
(a) The influence of LED emission color on resolution



(b) 限流电阻对分辨率的影响
(b) The influence of current limiting resistor on resolution

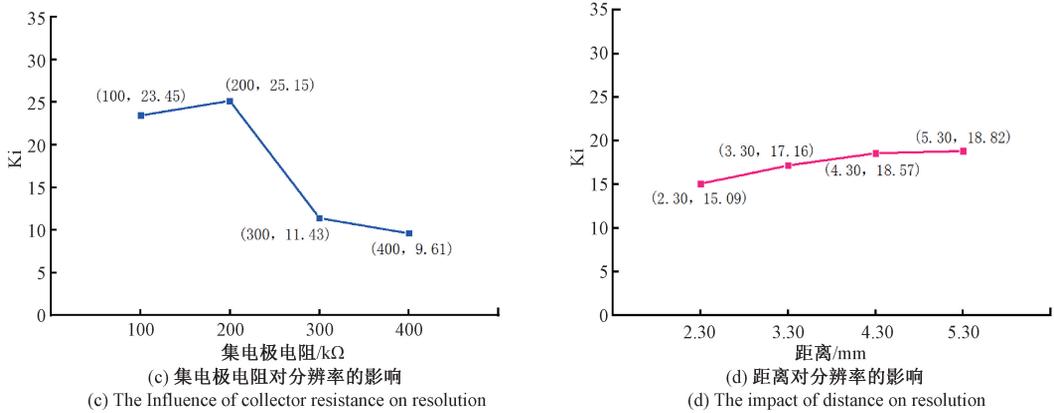


图 11 不同变量水平对分辨率的影响

Fig. 11 Effects of different variable levels on resolution

程度,均方差越大,说明因素对实验结果的影响越显著。误差均方差则反映了随机误差对实验结果的影响,误差均方差越小,说明实验结果的可靠性越高,误差对结果的影响越小。方差分析如表 5 所示,其中*(p 小于 0.05)表示

该因素对分辨率的影响显著的可信度为 95%,LED 光源颜色和集电极电阻对分辨率影响较显著(p<0.05),限流电阻和距离对分辨率影响不显著(p>0.05)。与方差分析所得结论一致。

表 5 正交实验结果的方差分析

Table 5 Analysis of variance of orthogonal experiment results

因素	平方和	自由度	均方差	F 值	P 值	显著性水平
A	968.486	3	322.829	12.270	0.034	*
B	543.317	3	181.106	6.884	0.074	
C	771.611	3	257.204	9.776	0.047	*
D	35.040	3	11.680	0.444	0.739	
误差	78.928	3	26.309			

3) 实验验证

对正交实验优化的变量水平进行验证,进行了 10 次平行实验,检测电路系统的准确性和稳定性,结果如表 6

所示。由表 6 可知 A₁B₃C₂D₄ 组合下的分辨率为 35.55,高于表 3 中的分辨率,且每次实验的数值差异不大,说明本电路系统具有较好的稳定性,方案合理。

表 6 最优组合实验验证

Table 6 Experimental verification of optimal combination

实验	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	均值
分辨率	35.89	35.60	35.61	34.45	35.81	35.07	34.42	35.77	36.37	36.52	35.55

4 测试结果与分析

通过网查资料得知可丽蓝验孕棒检测灵敏度为 25 mIU/ml,实验室配置了浓度为 25 mIU/ml 的 HCG 溶液对可丽蓝产品和本文介绍的产品分别进行验证,滴入 0.25 ml 浓度为 25 mIU/ml 的 HCG 溶液以模拟浓度低于 25 mIU/ml 浓度的 HCG 溶液的显色效果,如图 12 所示,可以看到可丽蓝产品未能检测出来,而本文设计的电路配上合适的模具可以检测出来,说明本文设计的电路系统比可丽蓝产品的灵敏度更高。

为了验证本文设计的电路系统的整体性能,现使用 4 种检测带颜色深浅不一的验孕试纸进行实验标定,验孕试纸样品如图 13 所示,样品分别是滴入 0.25、0.4 和 0.5 ml 的浓度为 25 mIU/ml HCG 试剂发生显色反应后的试纸,用来模拟不同浓度的 HCG 溶液滴到试纸上所产生的显色效果。检测带颜色越深表征滴入 HCG 浓度越高。从左至右依次编号为空白试纸(level 0 positive test strip sample)、一级阳性试纸(level 1 positive test strip sample)、二级阳性试纸(level 2 positive test strip sample)和三级阳性试纸(level 3 positive test strip sample)。肉眼



(a) 可丽蓝产品
(a) Keli Blue product



(b) 本文所设计的产品
(b) The product designed in this article

图 12 检测结果

Fig. 12 Testing results

可以看出这 4 个试纸样品检测带的颜色深浅不一样,接下来将分别提取这 4 种试纸样品检测带的信息。

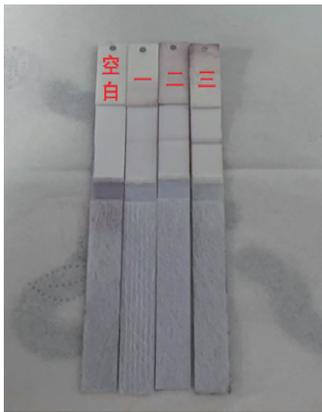


图 13 实验中使用的验孕试纸样品

Fig. 13 Sample of pregnancy test paper used in the experiment

当供电电源为 3.3 V 时,测得试纸样品电压差 AD 值结果如图 14 所示,从图中可以看出该系统检测结果稳定性较高,并且可以得出验孕试纸检测带显色越深,采集的

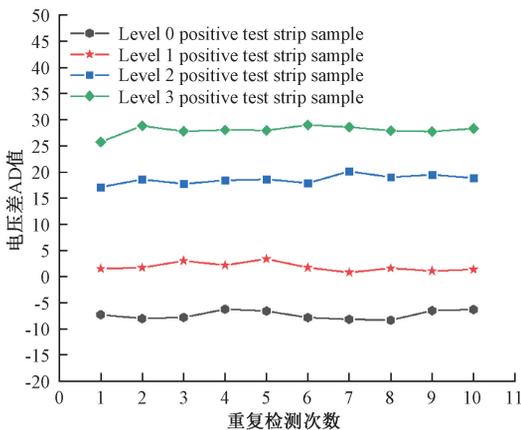


图 14 试纸样品重复性测试结果

Fig. 14 Repeatability test results of test paper sample

电压差 AD 值越大,因此可以根据 AD 值来判断 HCG 浓度大小,从而推断怀孕周数。根据采集的数据,可以对每种验孕样品进行阈值标定,阴性试纸样品标定的阈值为 -5,一级阳性试纸样品阈值标定为 5,二级阳性试纸样品和三级阳性试纸样品的阈值分别标定为 22 和 30。采集的电压差 AD 值如果小于 -5,则被判定为阴性;若采集的电压差 AD 值位于 -5~5,则被判定为一级阳性;若采集的电压差 AD 值位于 5~20,则被判定为二级阳性;若采集的电压差 AD 值位于 22~30,则被判定为三级阳性。图 15 为电压差 AD 值与试纸样品的线性拟合,数据表明该电路系统工作稳定,性能可靠。

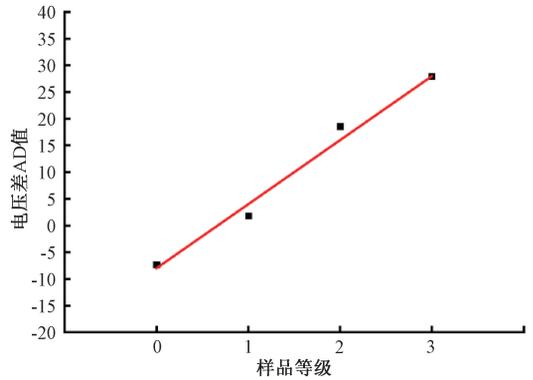


图 15 电压差 AD 值与试纸样品的线性拟合

Fig. 15 Linear fitting of voltage difference AD value to test paper sample

5 结 论

本系统以 HK32F030M 系列的单片机为主控芯片,结合光电检测技术,设计了一种用于检测怀孕的电路系统。通过光电传感器对验孕试纸显色反应的深浅进行检测,实现了对怀孕与否以及怀孕周数的快速判断。该设计不仅具备了传统试纸检测方法的灵敏度和准确度,而且克服了人为判断的主观性和误差,使得验孕过程更加可靠和便捷。此外,本系统凭借其高度集成化设计,有效降低了检测成本,提升了检测效率,使得医疗资源能够更广泛地惠及大众。在优化电路变量参数方面,本系统采用了正交实验设计,通过方差分析和极差分析确定了最优参数组合,从而进一步提高了系统的检测精度和稳定性。这一光电检测技术的应用不仅展示了其在生物医疗领域内的巨大潜力,还为定量分析提供了一种新颖且高效的解决方案,预示着未来在疾病预防、早期诊断及临床监测等方面将发挥更加重要的作用,展现了科技助力医疗健康的美好前景。

参 考 文 献

[1] ZENG N, WANG Z, ZHANG H, et al. Deep belief networks for quantitative analysis of a gold immunochromatographic strip [J]. Cognitive

- Computation, 2016, 8: 684-692.
- [2] TERPOS E, NTANASISSTATHOPOULOS I, SKVARC M. Clinical application of a new SARS-CoV-2 antigen detection kit (Colloidal Gold) in the detection of COVID-19 [J]. *Diagnostics*, 2021, 11(6): 995.
- [3] 张小平, 刘彤军. 胶体金免疫层析定量检测仪的研究[J]. *黑龙江科学*, 2016, 7(21): 4-6.
ZHANG X P, LIU T J. Research of colloidal gold immuno-chromatographic quantitative detector [J]. *Heilongjiang Science*, 2016, 7(21): 4-6.
- [4] 王洋. 高精度金标试纸读数仪的设计与开[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
WANG Y. Design and development of high precision Gold test paper reading instrument [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [5] ZENG N, YOU Y, XIE L, et al. A new imaged-based quantitative reader for the gold immunochromatographic assay[J]. *Optik*, 2018, 152: 92-99.
- [6] 张馥生. TDI CCD 光谱响应曲线测量技术研究[J]. *电子测量技术*, 2014, 37(5): 93-95.
ZHANG F SH. Study on TDI CCD spectral response curve measurement technology [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2014, 37(5): 93-95.
- [7] 汪鲁才, 王桃, 林海军, 等. 一种高精度的血液 C-反应蛋白浓度荧光检测系统[J]. *电子测量技术*, 2016, 39(6): 117-121.
WANG L C, WANG T, LIN H J, et al. A high-precision fluorescence detection system for C-reactive protein concentration in blood [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2016, 39(6): 117-121.
- [8] 刘翔, 杜民, 李玉榕, 等. 荧光免疫层析定量检测系统的设计与实现[J]. *电子测量与仪器学报*, 2013, 27(9): 859-866.
LIU X, DU M, LI Y R, et al. Design and implementation of fluorescence immunochromatographic quantitative detection system [J]. *Chinese Journal of Electrical Measurement and Instrumentation*, 2013, 27(9): 859-866.
- [9] LIU Y, GUO L, LIU L, et al. Immunoassay for the detection of cyproconazole in foods: From hapten synthesis to the establishment of a gold immunochromatographic assay[J]. *Food Chemistry*, 2024, 437: 137847.
- [10] 石金龙. 基于 CCD 的纳米金标试纸检测系统研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2013.
SHI J L. Development of detection system for Nanoscale Gold test paper based on CCD [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2013.
- [11] HUANG L, ZHANG Y, XIE C, et al. Research of reflectance photometer based on optical absorption[J]. *Optik*, 2010, 121(19): 1725-1728.
- [12] JIN S Q, BAI L H, XIA G, et al. A smartphone-based detection method of colloidal gold immunochromatographic strip[J]. *Photonics*, 2021, 8(12): 576.
- [13] 刘寰曦, 王弼陡, 罗刚银. 基于 ARM 的荧光定量分析仪设计[J]. *电子测量技术*, 2018, 41(13): 139-144.
LIU H X, WANG B D, LUO G Y. Design of fluorescence quantitative analyzer based on ARM [J]. *Electronic Measurement Technique*, 2018, 41(13): 139-144.
- [14] 陈贝特, 黄立华, 郭凯, 等. 一种高性能金标条阅仪的研制[J]. *中国激光*, 2013, 40(7): 113-121.
CHEN B T, HUANG L H, GUO K, et al. Development of a high performance Gold bar reader [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(7): 113-121.
- [15] 詹铭, 庞春颖, 郑伯明. 一种可调固定式金标卡量仪的研制[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 44(1): 42-49.
ZHAN M, PANG CH Y, ZHENG B M. Development of an adjustable fixed gold standard caliper [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 44(1): 42-49.
- [16] 凌子哈, 温庆宇, 丁志群. 基于光电传感的 pH 值检测研究[J]. *电子测量技术*, 2020, 43(9): 139-142.
LING Z H, WEN Q Y, DING ZH Q. Research on pH value detection based on photoelectric sensing [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2020, 43(9): 139-142.
- [17] 郭章. 工艺参数对 FDM 成型塑料制品力学性能的影响[J]. *现代机械*, 2023(4): 70-73.
GUO ZH. Effect of process parameters on mechanical properties of FDM molded plastic products [J]. *Modern Machinery*, 2023(4): 70-73.
- [18] 詹铭. 基于 STM32 的金标卡定量检测系统的设计与实现[D]. 长春: 长春理工大学, 2020.
ZHAN M. Design and implementation of quantitative detection system for gold standard card based on STM32 [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020.

作者简介

苏琪, 硕士研究生, 主要研究方向为光电检测技术。

E-mail: 1556285560@qq.com

陈乐(通信作者), 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为新型显示技术、半导体光电器件与材料等。

E-mail: chenle11@126.com