

doi: 10.7690/bgzd.2014.09.021

一种小型脉冲激光器能量和重复频率测量电路

侯宏录¹, 辛光泽¹, 郭淑玲²

(1. 西安工业大学光电工程学院, 西安 710021; 2. 西北工业集团有限公司, 西安 710043)

摘要: 针对传统激光功率计无法实时检测的缺点, 设计一种基于 PIN 光电二极管的小型激光脉冲能量和频率实时检测电路。在激光器输出窗口前端设置光学玻璃对激光输出进行透射和散射, 利用 PIN 光电二极管探测激光散射信号并完成光电转换。微弱电信号经后续信号调理电路处理以外部中断方式触发单片机计时、计数, 单片机同时采集调理电路的输出电压。系统最终实现了激光脉冲频率及能量的检测。测试结果表明: 该系统的频率测量精度优于 0.02%, 能量测量精度优于 1%, 灵敏度优于 0.8 V/mW, 响应时间不大于 3 ns。

关键词: 激光脉冲频率; 光电检测; PIN 光电二极管; 前置放大

中图分类号: TP206 **文献标志码:** A

A Small Laser Pulse Energy and Repetition Frequency Measurement Circuit

Hou Honglu¹, Xin Guangze¹, Guo Shuling²

(1. School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

2. Northwest Industries Group Corporation, Xi'an 710043, China)

Abstract: A kind of circuit based on PIN photodiode is designed for measuring the frequency and power of laser pulse to solve the real-time detection problem of traditional laser power meter. The light intensity is decayed by the optical glass fixed in the front of the laser capsule. The photoelectric conversion is achieved by the PIN photodiode. After being processed through the conditioning circuit, the electricity signal is transferred to the microcontroller which calculates the pulse frequency in interrupt mode by counting the pulse amount and computes the pulse power by collecting the output voltage. This measuring system is able to monitor the state of high-power laser in real time. Results show that the frequency and power measurement precision of the circuit turns out to be less than 0.02% and 1% respectively. The sensitivity of this design is higher than 0.8 V/mW, while the response time is lower than 3 ns.

Keywords: frequency of the laser pulse; photoelectric detection; PIN photodiode; pre-amplifier

0 引言

高能脉冲激光器在现代武器系统中主要用于激光照明、测距、制导和致盲^[1], 因此, 长期以来受到研制方、军方的高度重视。研制方在系统研制和维护过程中需要进行真实环境下的试验, 以鉴定系统性能是否满足技战术指标要求。现有的检测方法一般是采用外场试验测试方案: 一种是在激光器前部设置衰减片和分光镜, 光电探测器接收分光后的激光, 根据分光比计算整台激光器输出功率^[2]; 另一种是在外场远距离设置靶标, 测量回波信号。这 2 种方法均要求试验前搭建复杂光路、对准光轴, 其操作复杂耗时。另外, 外界环境的变化对激光器输出特性影响显著, 因此, 需要对激光器输出参数进行实时检测。

针对以上问题, 笔者设计一种操作简单、响应速度快、具备实时检测能力的小型激光脉冲能量及频率测量电路。激光脉冲测量电路体积的小型化为其与激光器的一体化提供了可能。笔者以 1 064 nm

大功率红外激光器能量与频率监测为背景, 设计了电路板直径 50 mm, 可固定于瞄准舱内的激光脉冲测量电路。激光器位于半径为 0.5 m 的跟踪舱内, 为简化光路, 缩小尺寸, 在激光出射口安装光学玻璃。激光脉冲经玻璃散射功率仅为数毫瓦, 选择灵敏度高的 InGaAs PIN 光电二极管作为光电探测器^[3]。通过分析激光脉冲信号特征, 设计了通频带符合要求的光电转换电路及信号调理电路, 实现了对激光器脉冲能量及频率的实时检测。

1 激光脉冲能量和频率测量系统方案

激光器输出中心波长为 1 064 nm, 脉冲宽度约 100 ns, 脉冲重复频率为 50 Hz, 散射光功率处于毫瓦级别, 设计图 1 所示微弱信号检测电路。该系统由光电转换电路、前置放大电路、信号分频电路、采样保持电路及 AVR 单片机系统 5 部分构成。其中, 光电转换电路以 PIN 光电二极管作为探头将微弱光脉冲信号转换为微弱电脉冲信号。微弱电脉冲信号经前置放大电路放大后输入采样保持电路与信号分

收稿日期: 2014-03-19; 修回日期: 2014-04-21

基金项目: 国防科技重点实验室基金项目 (9140C360302120C36136)

作者简介: 侯宏录(1960—), 男, 陕西人, 博士, 教授, 从事光电测试、信息融合、复杂系统建模、仿真与作战效能评估研究。

频电路。激光脉冲能量可由激光脉冲功率对时间积分得到。引入采样保持电路使电压脉冲信号得到展宽，可满足单片机采样时间要求。分频电路的输出信号作为中断源触发单片机对脉冲计数。单片机将计算结果通过串口发送至上位机。

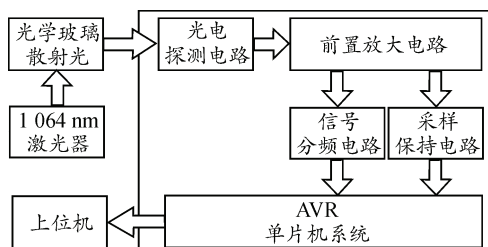


图1 激光脉冲能量和频率测量系统方框图

2 光电转换与信号调理电路

2.1 信号特征分析及光电探测器选型

图2为1064 nm激光单脉冲信号时域波形，经傅里叶变换得到频域波形如图3。激光脉冲频谱展宽约15 MHz，散射光脉冲峰值功率约为3.5 mW。因此，所选光电探测器件应具有光谱灵敏度高，响应速度快，频响范围宽的特点。

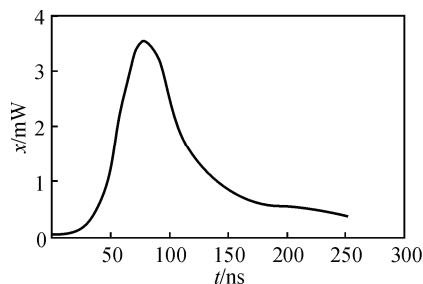


图2 激光输出脉冲时域波形

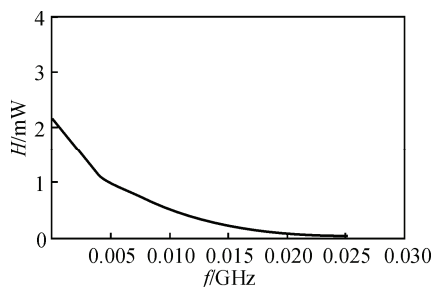


图3 激光输出脉冲频域波形

PIN光电二极管体积小，结电容一般为数皮法，频响上限可达到数吉赫兹，本征层电阻率极高，暗电流只有数纳安，长波光谱响应度高^[4]，对1064 nm波长红外光响应灵敏度为0.55 A/W。根据以上分析，选择GT3552T型InGaAs光电二极管作为探头，其光敏面直径800 μm，总电容最大20 pF，暗电流5 nA，分流阻抗为75 MΩ。

2.2 光电转换电路

图4为PIN光电二极管等效电路， C_d 为光电二极管的结电容， R_L 为负载， R_d 为光电二极管分流电阻，其值一般为1~100 MΩ， R_s 为串联电阻，阻值极低^[5-6]。

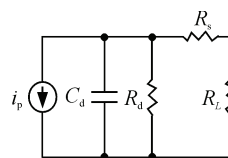


图4 PIN光电二极管等效电路

光电二极管通过串联取样电阻 R_L 将其输出的电流信号转换为电压信号 U_o ， $U_o=I_pR_L$ 。电路中高频段光电流信号一部分通过 R_L ，另一部分通过结电容^[7]。

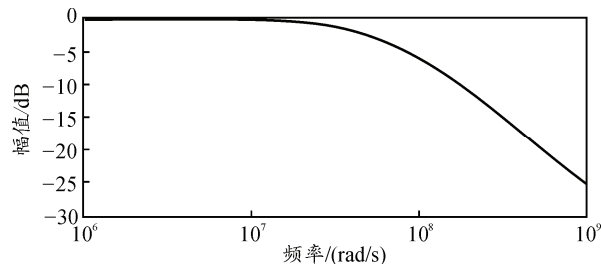
在电压放大模式下，负载电阻 R_L 远小于 R_d ，忽略其影响，该电路的传递函数为

$$H(S) = \frac{X_d(S)}{X_d(S) + R_L} = \frac{1}{1 + SCR_L} \quad (1)$$

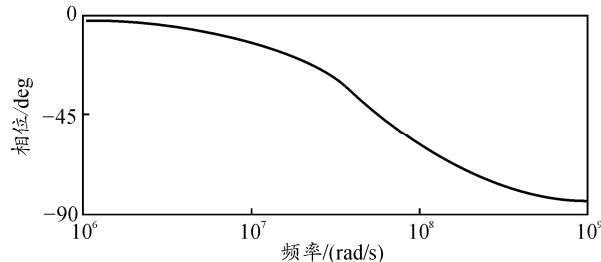
对该传递函数变换为频率 f 的函数：

$$H(S) = \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_H}} \quad (2)$$

其中 $f_H=1/2\pi R_L C$ ，当 $f=f_H$ 时， $H(S)=-3 \text{ dB}$ ^[8]。为获得完整电信号，设计光电二极管的通频带带宽大于10 MHz，由此可得， $R_L < 0.8 \text{ k}\Omega$ 。图5为光电转换电路的传递函数Bode图。



(a) 电路幅频响应特性



(b) 电路相频响应特性

图5 光电转换电路Bode图

考虑到 $V_i=I_pR_L$ ，因此随着 R_L 的减小，光电转换电路输出电压会明显下降。对于毫瓦级激光脉冲，

光电二极管输出电流 I 一般维持在 2 mA 左右，所以选择 820 Ω 电阻作为电流-电压转换电阻^[9]。图 6 为光电转换电路。

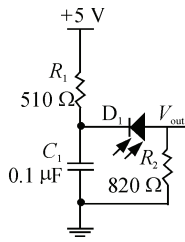


图 6 光电转换电路

2.3 信号调理电路

2.3.1 信号的前置放大

光电转换模块输出电压信号最大幅值约为 1.6 V，而分频电路要求输入信号峰值高于 TTL 标准高电平，需对电压信号前置放大。选择放大器工作于同向放大模式，放大器的输入电阻与取样电阻 R_L 为并联关系，由于放大器输入电阻远大于负载电阻 R_L ，因此放大器输入电压 $V_i = I_p R_L$ ，取 $R_f = R_1$ ，则 $V_o = 2V_i$ ，放大器输出正向电平信号，图 7 即为电压前置放大电路。

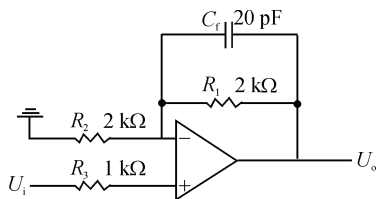


图 7 电压前置放大电路

PIN 光电二极管结电容、运算放大器输入电容及整个电路系统的分布电容会使电路形成极点，在反运工作于高频范围内极易形成自激振荡，在反馈电阻 R_f 两端并联反馈电容 C_f 进行相位补偿， C_f 的加入能够有效地提高相位裕值及运算放大电路的稳定性^[10]。并联电容 C_f 容值的选取一般较小，通常选取 $C_f > C_i$ ， C_i 为总的等效输入电容。

电阻 R_L 两端产生的噪声电压为

$$U_n = 2\sqrt{KTR\Delta f} = 0.012 \text{ mV} \quad (3)$$

对于 EL5205 运算放大器，输入电压噪声为 10 nV/Hz^{1/2}，输入噪声电流为 54 pA/Hz^{1/2}。整个系统产生的噪声功率远小于信号功率，因此可忽略噪声对系统的影响。

2.3.2 触发信号生成

AVR 单片机系统以中断方式对脉冲计数。由于

激光脉冲信号宽度窄，仅为 100 ns 左右，不足以触发单片机产生中断，加入分频电路延长高电平持续时间。分频电路通过 MC10ELT22 芯片将放大器输出的 TTL 电压信号转化为高电平 4.1 V，低电平 3.2 V 的 PECL 差分信号，然后由芯片 MC10EL32 对信号进行 2 分频，经 MC10ELT28 芯片将 PECL 差分信号还原为 TTL 信号，分频后的脉冲信号高电平维持时间变长，可满足触发 AVR 单片机中断的要求。

2.3.3 采样信号生成

单片机模数转换器采样一次需要 13 μ s 以上的转换时间，因此，在采样电路前端加入采样保持器以实现高精度的模数转换。采样保持电路由 2 个电压跟随器及保持电容构成，如图 8 所示。当开关导通时，电路处于采样状态，此时电容充电，电容值很小，在很短时间内完成充电，输出信号跟随输入信号的变化而变化^[11]。当开关断开时，电路处于保持状态，电容缓慢放电，输出信号基本保持断开瞬间信号电平值。

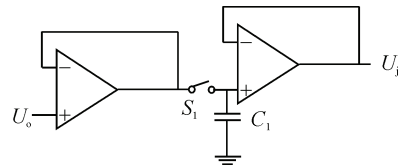


图 8 采样保持电路

采样保持电路以顺序等效采样模式工作，通过控制开关导通及断开时间，对重复脉冲信号的几个周期不同位置取样组成一个完整周期，新的脉冲波形相当于展宽的原始波形，其宽度为微秒级，适合单片机采集电压数据进行 A/D 转换。

激光功率 P 同光电二极管输出电流 I 间关系为

$$P = \Phi = I / S \quad (4)$$

式中： Φ 为光通量； S 为光电二极管灵敏度。光电二极管输出电流 I 与采样电压 U 关系为

$$I = \frac{U}{2R_L} \quad (5)$$

对于 M 个取样点，固定延时为 Δt 的等效采样过程激光脉冲能量为

$$W = \sum_{j=1}^M \Delta t \times \frac{U_j}{2R_L S} \quad (6)$$

3 系统的电路板级实现

3.1 电路布局

图 9 (a)为激光脉冲能量和频率测量电路 PCB

图。电源线和地线形成电流回路驱动整个电路系统，流经电流较大，应减小导线的分布电阻，同时为了得到较为平坦的零电势点，增大电源线和地线宽度为 30 Mil。为了避开地环电流，降低公共地线阻抗的耦合干扰，数字地同模拟地分开单点并连接地，并在数字地和模拟地之间用 0 Ω 电阻连接。为了减少外界噪声干扰，PCB 板上滤波电容放置于距离芯片信号输入管脚处，对 PCB 电路板进行覆铜，外加屏蔽壳处理。图 9 (b)为激光脉冲频率和能量测量电路实物。

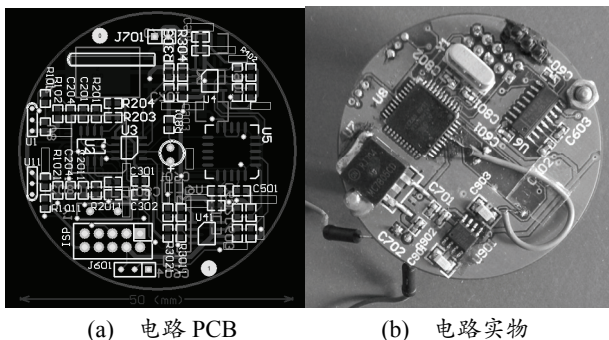


图 9 激光脉冲频率和能量测量电路 PCB 及实物对照

3.2 软件算法

单片机系统启动后，对定时器、计数器及 UART 串口进行初始化，设定计数器和定时器工作于比较匹配模式，设置定时器时长 t_0 及脉冲采样个数 N 。定时器中断次数由 i 记录，激光脉冲频率依据公式 $f = N/(t_0 \times i)$ 计算得到。根据公式 $W = \Delta t \sum_{j=1}^M U_j / 2R_L S$ 计算出激光脉冲能量。

4 系统标定

4.1 激光能量测量电路标定

由于电路存在噪声，放大器存在失调电压，反馈电阻以及其他元器件精度不够高，须对激光能量测量电路进行校准。对激光脉冲测量电路输入标准激光功率，测试输出电压，并与高精度的功率测量电路的测试值进行比较，结果如表 1 所示。

表 1 不同功率下激光脉冲输出的电压值

功率值/mW	电压测量值/V				平均值/V	理论值/V
1.0	0.84	0.83	0.85	0.87	0.85	0.92
1.5	1.30	1.27	1.32	1.33	1.31	1.38
2.0	1.70	1.79	1.72	1.77	1.75	1.84
2.5	2.18	2.28	2.24	2.19	2.22	2.30
3.0	2.73	2.64	2.66	2.71	2.69	2.76
3.5	3.09	3.19	3.15	3.10	3.13	3.22
4.0	3.63	3.56	3.64	3.54	3.59	3.68
4.5	4.01	4.10	4.03	4.09	4.06	4.14

不同功率下输出电压值取平均值同理论值进行

比对，两者的平均偏差为 0.08 V，图 10 为激光脉冲功率—输出电压拟合曲线。

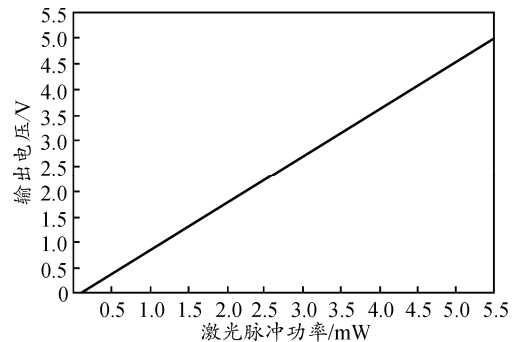


图 10 激光脉冲功率-电压拟合曲线

激光功率与输出电压拟合直线为 $U = 0.92P - 0.07$ ，则激光脉冲能量为 $W = \Delta t \sum_{j=1}^M (1.09U_j + 0.8)$ 。

4.2 激光能量比 K 标定

在激光脉冲能量测量中，激光能量计仅探测散射光能量，若散射激光能量与整台激光器输出能量的比值为 K ，则大功率激光器输出能量为 $W_{总} = W/K$ 。标定系统由 1 台标准能量计和 1 台监视能量计组成，其中监视能量计为笔者设计的激光能量测量电路。对于透射比为 R 的光学玻璃，激光器输出能量为 $W_{总} = W_{标}/R$ ， $W_{标}$ 为标准激光能量计，则 $K = RW/W_{标}$ ，多次实验后对 K 取平均值。

5 系统性能测试与分析

5.1 信号调理电路对标准测试信号的响应特性

对不加 PIN 光电二极管的信号调理电路进行测试，用 AFG3021B 信号发生器生成一个重复频率 1 kHz 高电平持续时间为 100 ns 的脉冲信号加载至放大电路前端，用示波器探测输入单片机的信号，如图 11 所示即为测试信号的波形，图 12 为调理电路对测试信号的响应波形。

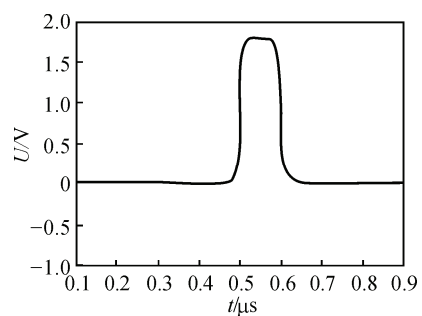


图 11 测试信号波形

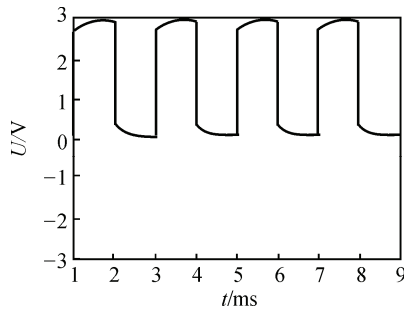


图 12 调谐电路对测试信号的响应波形

经过测试，系统能很好地完成对占空比为 0.01% 的 100 kHz 脉冲信号的捕捉及分频，误差低于 0.01‰，满足设计要求。

5.2 电路整体性能测试

测试平台包括 1 台重复频率约 30 kHz 的 1 064 nm 激光器、标准激光频率计、标准激光能量计及设计的脉冲能量和频率测量电路。表 2 为激光脉冲频率测试结果，表 3 为激光脉冲能量测试结果。由表 2 和表 3 可知，脉冲频率和能量测量值同标准测量计测量值基本吻合，系统的频率测量精度优于 0.02%，能量测量精度优于 1%，满足技术指标要求。

表 2 激光脉冲频率测试结果对比 kHz

设计的系统测量值	标准频率计测量值
30.090	30.093
30.044	30.042
30.026	30.027
29.985	29.983
30.055	30.054
29.972	29.971
30.010	30.012
29.965	29.967

表 3 激光脉冲能量测试结果对比 mW

设计的系统测量值	标准频率计测量值
1.53	1.54
2.16	2.18
2.75	2.76
3.12	3.10
3.50	3.49
3.96	3.95
4.14	4.12
4.31	4.32

5.3 结果分析

从表 2 和表 3 可知，设计系统的频率和能量测量值较真实值的测量误差分别为：1.87 Hz、0.012 mW。造成激光频率测量偏差 1 个重要因素为单片机系统计时单位。N 个脉冲所对应时间通常不是计时单位

的整数倍，而单片机系统在计时过程中无法记录短于定时单位的时间。缩短计时单位，可降低这一偏差。造成激光能量测量偏差的原因包括放大器自身的失调电压，A/D 转换精度以及杂散光的干扰。采用低失调电压放大器，提高 A/D 转换位数，在探头上设置滤光膜片，尽可能消除杂散光，可提高系统测量精度。

6 结束语

笔者设计的激光脉冲参数测量电路克服了传统激光功率计无法实时检测的缺点，对脉冲信号及电路模块做了数学分析，从理论的角度验证了系统的可行性。整个电路系统结构紧凑、功耗较低、便于操作，仅需要+5 V 直流电源即可正常工作。采用 PIN 光电二极管作为光电探测器使其更适合探测快速变化的毫瓦级激光脉冲信号。搭建测试平台验证了系统整体性能，实验结果表明整个测量系统的不确定度低于 2%，满足技术指标要求。

参考文献：

- [1] 张兴奎. 激光功率检测技术研究[D]. 长春: 长春理工大学物理电子学学院, 2009.
- [2] 杨照金, 王雷. 激光功率和能量计量技术的现状和展望[J]. 应用光学, 2004, 25(3): 1-4.
- [3] 宋一兵. 脉冲激光峰值功率计研制[D]. 南京: 南京理工大学电子与通信工程学院, 2004.
- [4] 侯宏录. 光电子材料与器件[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 176-180.
- [5] 曾凯. 微弱激光功率检测[D]. 长沙: 中南大学机械电子工程学院, 2011.
- [6] 李远明, 陈文涛. 微弱光信号前置放大电路设计[J]. 电子元器件应用, 2007, 9(8): 51-53.
- [7] 苗秀梅, 张正茂. 窄脉冲激光探测电路分析与设计[J]. 光电技术应用, 2012, 27(4): 30-38.
- [8] 塞尔吉欧·弗朗哥. 基于运算放大器和模拟集成电路的电路设计[M]. 3 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2004: 30-40.
- [9] 陈张伟, 李玉和, 李庆祥, 等. 光电探测器前级放大电路设计与研究[J]. 电测与仪表, 2005, 42(474): 32-34.
- [10] 霍戍文, 李伟, 李进, 等. 光电探测微信号放大器设计[J]. 浙江理工大学学报, 2005, 22(3): 259-262.
- [11] 赵岩, 敬守钊. 高速采样保持电路设计[J]. 电子质量, 2011(9): 4-6.