

脉冲激光探测电路设计

徐 焘¹, 杨甲胜²

(1. 驻沈阳地区航空军事代表室, 辽宁 沈阳 110850; 2. 光电信息控制和安全技术重点实验室, 河北 三河 065201)

摘要: 脉冲激光探测电路的设计是激光应用领域的重要内容, 根据脉冲激光信号的特点, 从探测能力、响应时间、稳定性三方面对脉冲激光探测电路的设计进行研究, 重点论述了光电探测系统组成的三个重要组成部分: 光电探测器、光电转换电路和探测器偏置电路。深入分析了光电探测器的选型、利用电阻进行光电转换电路的特性以及利用跨导放大器进行光电转换电路的特性, 对于激光探测系统的设计有一定参考价值。

关键字: 脉冲激光; 电路设计; 光电转换; 跨导放大器

中图分类号: TN710.6

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255-(2012)02-0005-04

Design of Pulse Laser Detection Circuit

XU Tao¹, YANG Jia-sheng²

(1. Aviation Military Representative Office in Shenyang, Shenyang 110850, China;

2. Science and Technology on Electro-optical Information Security Control Laboratory, Sanhe 065201, China)

Abstract: Design of pulse laser detection circuit is very important in the laser applications, according to the characteristics of the pulse laser, the design of the pulse laser detection circuit is studied from three aspects which are the detection capability, response time and stability. Three main parts of the photoelectric detection system are discussed, which are the photoelectric detector, photoelectric conversion circuit and detector bias circuit. The selection of the photoelectric detector, photoelectric conversion characteristics of the circuit with resistance and photoelectric conversion characteristics of the circuit with transconductance amplifier are analyzed, which offers the reference to the design of the laser detection system.

Key words: pulse laser; circuit design; photoelectric conversion; transconductance amplifier

在激光的各种应用中, 凡是涉及到远距离的应用, 绝大多数采用脉冲体制。通过调Q技术, 将激光的能量压缩成极窄的脉冲发射出去, 使脉冲激光的峰值功率提高几个数量级, 使得探测系统的作用距离可以很远^[1]。脉冲激光作用距离越远, 受环境因素影响而造成的衰减就越大, 接收到的脉冲激光信号也就越弱, 为了使探测系统处于最佳的工作状态, 脉冲激光探测电路的设计应满足以下三项基本要求^[2]:

(1) 信号探测能力强

要求选择的光电探测器的响应度高, 光电探测电路输出信号中有效信号成分多, 噪声成分少。

(2) 响应速度快

由于脉冲激光的脉冲宽度越窄, 其峰值功率越高, 所以脉冲激光探测电路的响应速度一定要满足脉冲激光带宽的要求。一般情况下, 探测电路应满足对纳秒级脉冲激光的快速响应。

(3) 稳定性、可靠性好

脉冲激光探测电路不能产生振荡, 在长期工作的情况下应该稳定、可靠, 特别是在一些特殊场合下, 对稳定性、可靠性的要求会更高。

脉冲激光探测的水平直接决定了光电探测设备的性能, 所以对脉冲激光进行更灵敏、快速、稳定的

探测可以有效地提升设备的性能。

1 脉冲激光特点

脉冲激光是高斯脉冲,如图1所示。脉冲激光可以表示为

$$f(t) = A \cdot e^{-\frac{t^2}{\tau^2}} \quad (1)$$

经傅里叶变换的频谱函数为

$$G(\omega) = \sqrt{\pi} \cdot A \cdot \tau \cdot e^{-\frac{(\tau\omega)^2}{4}} \quad (2)$$

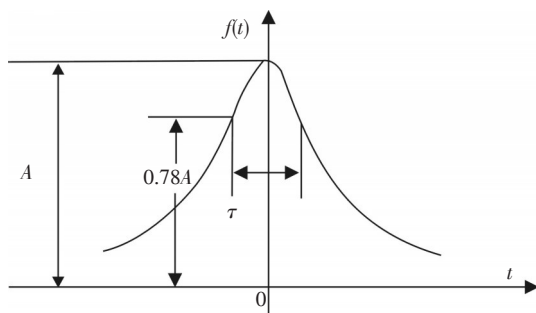


图1 脉冲激光波形图

针对于大信号脉冲激光探测电路设计需要考虑:保持脉冲形状不失真。由于脉冲信号的主要频谱能量集中在 $\Delta f = 0.27/\tau$ 以内,要保持脉冲形状不失真,就要求探测系统的带宽要保证脉冲激光的高频分量能够通过。脉冲宽度越窄,要求探测电路的带宽就越宽,否则高斯脉冲将会被展宽,其幅度也会随之下降^[3]。

针对于小信号脉冲激光探测电路设计需要考虑:保证探测系统的信噪比。当脉冲激光产生的信号比较微弱的时候,此时再强调探测电路的带宽是没有意义的,必须尽可能的增大光电探测器的响应度,降低探测电路的噪声,提高探测系统的信噪比,保证在噪声信号中检测出微弱的脉冲激光回波信号。

2 探测电路组成

脉冲激光探测电路主要包括:光电探测器、光电转换电路、探测器偏置电路。

2.1 光电探测器

光电探测器是探测系统最核心的器件,是利用光电效应把入射的光信号转换为电信号的器件,探测器的质量对光电探测电路的设计和性能改善有重

要的意义^[4]。常见的光电探测器有:PD、APD、PIN、QD、MSM、SPM,还有比较热门的红外量子阱探测器等^[5]。光电探测器的种类虽然繁多,但是其基本结构都是由PN结构成,因此其使用方法可以认为与普通的二极管一样。

如果入射光辐射的单色光功率为 $P(t)$, 频率为 ν , 即单光子的能量为 $h\nu$, η 为光电探测器的量子效率, 则光电流 $i(t)$ 可以表示为

$$i(t) = \frac{e\eta}{h\nu} P(t) \quad (3)$$

这就是基本的光电转换定律,从中可以得出:光电探测器是功率器件,对入射的光功率有响应。

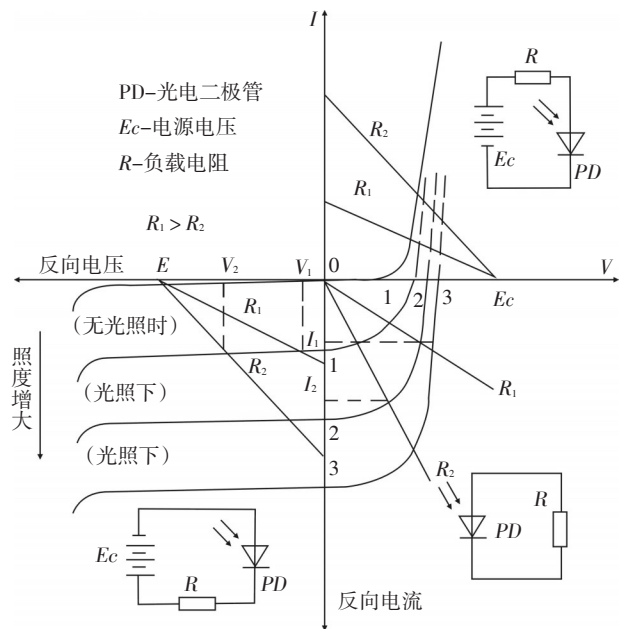


图2 光电二极管伏安特性曲线

在脉冲激光探测电路中,如何选择光电探测器是十分重要的。光电探测器的参数有光谱响应范围、灵敏度、响应时间、光敏面积、频率响应、量子效率、噪声等效功率、归一化探测度等,为了能够满足整个探测系统的设计要求,需要从以下几个方面对探测器的选型进行深入分析。

(1) 探测波段的匹配问题

光电探测器的最佳响应波段应当与入射激光的波长相吻合,如探测可见光波段的激光,需要选择Si、Ge材料的探测器,探测近红外波段的激光,需要选择InGaAs、PbS材料的探测器,探测中长波段的激光,需要选择MCT材料的探测器。

(2) 探测器在响应波段的响应度

响应度越高,产生的光电流也就越大,相应的噪

声也就越大。PIN探测器的内部增益不超过1;APD探测器由于内部强电场作用产生的雪崩倍增效应,使其具有很高的内部增益(增益可达 $10^2 \sim 10^4$ 量级);SPM探测器是由盖革式雪崩二极管阵列组成,其内部增益达到 $10^6 \sim 10^7$ 量级,可以达到单光子探测水平。

(3)探测器的响应时间

响应时间是表示脉冲激光入射到探测器上所引起的响应快慢。由于脉冲激光的脉宽通常很窄,为了能够探测到脉冲激光的大小及其变化,探测器的响应时间必须短于脉冲激光的变化时间。

(4)探测器的光敏面积

光敏面积大的探测器的探测视场会增加,但是,伴随着光敏面积的增加,探测器的结电容将增大,这会降低探测器的响应时间,同时,暗电流也会增加。

(5)探测器的偏压

给探测器加上偏压可以减小探测器内部的结电容,增大探测器的响应速度。APD探测器的偏压较高,通常在数百伏,是为了利用高电场的雪崩倍增效应使光生电流达到很高的增益。一般情况下,要保证电源偏压具有较高的纹波系数。

(6)探测器的暗电流

在没有外光子激发的情况下,由于非光子脉冲触发引起的激发电流称为暗电流^[5]。这个暗电流来源于探测器本身,它与探测器本身的材料、结构、环境温度等因素有关。暗电流过大会严重影响探测系统的性能,稳定的偏压、合理的分压以及制冷技术可以抑制探测器的暗电流。

2.2 光电转换电路

当脉冲激光入射到光电探测器上时,光电探测器相当于一个恒流源,将会产生反向光电流。为了将光电探测器产生的信号变换为便于处理的电压信号,可以采用两种方式进行电流电压变换,第一种是利用电阻将探测器输出的电流变换为电压;第二种是利用跨导放大器(transconductance amplifier)将探测器输出的电流变换为电压。

(1)使用电阻的光电转换电路

使用电阻的光电转换电路如图3所示。这种电路的输出电压可以表示为: $V = I \times R$ 。由于在光电探测器中存在极间分布电容,电阻 R 也存在一定的容性,并且存在引线之间的电容和导线分布电容,这些

电容加在一起形成的总电容用 C_S 表示,其大小约为几皮法,则转换电路的-3 dB带宽可以表示为

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot C_S \cdot R} \quad (4)$$

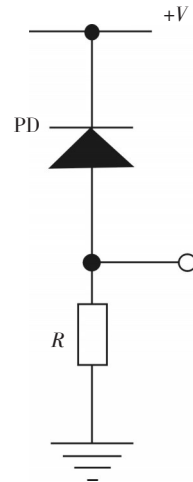


图3 使用电阻的光电转换电路

假定 $R=50 \Omega$, $C_S=10 \text{ pF}$,可以得到 $f=320 \text{ MHz}$ 。这个带宽对于大信号的探测是比较适合的,但是当入射的脉冲激光的峰值功率较低时,探测器产生的光电流很微弱的情况下,想得到较高的信噪比是无法实现的。因此,为了改善信噪比,必须要加大电阻值。假定 $R=100 \text{ k}\Omega$,则 $f=160 \text{ kHz}$,电阻增大会提高输出电压,增加信噪比。但是,相应的带宽就会降低。

使用电阻进行电流电压变换电路的优点是结构相对简单,对后端的放大器以及放大电路要求不高;缺点是不能取得大的动态范围,以及转换电路如果想要获得较高的信噪比,就一定要牺牲电路的频率特性。

(2)使用跨导放大器的光电转换电路

使用跨导放大器的光电转换电路如图4所示。这种光电转换电路是利用跨导放大器将光电探测器

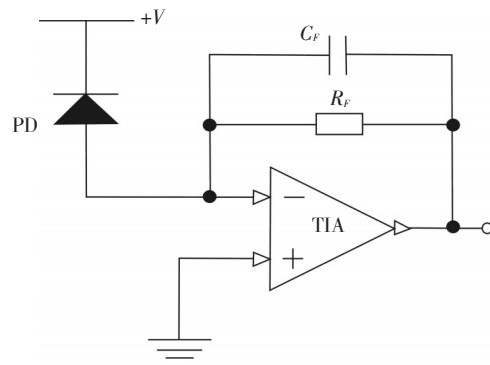


图4 使用跨导放大器的光电转换电路

产生的微弱电流转换为可用的电压信号,由于在光电探测器中存在极间分布电容,运算放大器也存在输入电容,并且光电探测器和运算放大器都存在极间分布电容,这些电容加在一起形成的总电容用 C_S 表示。 C_S 与反馈电阻 R_F 组成一个滞后网络,引起输出电压相位滞后,容易使运算放大器产生自激振荡。如果跨导放大器的单位增益带宽为 f_T ,那么该光电转换电路的-3 dB带宽可以表示为

$$f \approx \frac{1}{2} \sqrt{\frac{f_T}{2\pi \cdot C_S \cdot R_F}} \quad (5)$$

如果 R_F 的阻值较大,截止频率就会下降,同时 C_S 、 R_F 引入的附加滞后相位可能引起寄生振荡,使探测电路产生严重的稳定性问题。如果采用减小 R_F 的阻值,使截止频率高于脉冲激光的频率范围的话,将会使电路的增益下降,信噪比降低。此时,需要在反馈电阻 R_F 上并接一个补偿电容 C_F 进行相位补偿,可以使探测电路的稳定性得到改善。补偿电容的大小为

$$C_F \approx 2 \sqrt{\frac{C_S}{2\pi \cdot R \cdot f_T}} \quad (6)$$

为了增加探测系统的增益和信噪比,可以采用增加 R_F 和 f_T 的方法,虽然 $R_F \cdot C_S$ 的数值比较高,但只要跨导放大器的单位增益带宽 f_T 足够大,就不会影响探测系统的带宽和稳定性。所以,在脉冲激光探测电路中,如果使用跨导放大器的光电转换电路,跨导放大器的选择是非常关键的。

2.3 探测器偏置电路

光电探测器在使用的过程中,通常都会施加几十伏至几百伏的反向偏置电压^[6]。这是由于光电探测器存在结电容(极间分布电容),过大的结电容会导致探测电路的带宽降低,而给探测器施加反向偏置电压可以减小其结电容,有利于提高探测器的响

应速度,改善探测电路的带宽。

对反向偏置电路的设计要求是纹波系数低、动态范围宽、电压连续可调。通常光电探测器的内阻非常高,在其两端施加反向偏置电压时,几乎没有电流从中流过。所以,只要给探测器提供很小的电流就能够使其正常工作。可以利用科克洛夫特-沃尔顿电路为探测系统提供反向偏置电压,再利用稳压电路对反向偏置电压进行稳压,为了使脉冲激光探测电路的稳定性好,探测器反向偏置电路可以根据需要设计温度补偿电路。

3 结束语

根据脉冲激光信号的特点,研究了光电探测器的选型,分析了利用电阻进行光电转换的电路和利用跨导放大器进行光电转换的电路的优缺点,列举了一些在实际设计过程中会遇到的问题以及相应的解决办法,对于激光探测系统的设计和实际探测电路的调试有一定的帮助。

参考文献

- [1] 王晓东.高频脉冲激光测距接收系统设计[D].南京:南京理工大学,2009:5.
- [2] 孙培懋,刘正飞.光电技术[M].北京:机械工业出版社,1992.
- [3] 王晓东.高频脉冲激光测距接收系统设计[D].南京:南京理工大学,2000:21.
- [4] 肖洪梅.微弱激光脉冲信号的相关检测[D].成都:电子科技大学,2009:9.
- [5] 张松祥,胡齐丰.光辐射探测技术[M].上海:上海交通大学出版社,1996:128.
- [6] 金豪喆.基于APD雪崩光电二极管的生物发光检测的研究与应用[D].上海:华东师范大学,2009:16.
- [7] 曾毓敏.低耗底纹波可控式APD偏置电路[J].半导体光电,2002,23(1):69-71.

本刊声明

凡向本刊投稿的作者,请按照本刊刊登论文的格式要求写稿,详情见本刊网站 www.gdjsyy.com。
本刊拒绝一稿多投,敬请作者自觉遵守!