

·激光技术·

窄脉冲激光探测电路分析与设计

苗秀梅¹, 张正茂²

(1.海军装备部,北京 100841;2.东北电子技术研究所,辽宁 锦州 121000)

摘要:光电检测电路的设计对激光探测系统的性能有重要的影响。针对窄脉冲激光的时域特性,对窄脉冲激光电路设计进行了详细的分析,包括光电二极管的偏置电压对检测电路的影响、光电流转换方式对信号带宽影响等。为提高探测系统信噪比,对放大电路、补偿电路的带宽设计提出优化方法,给出窄脉冲激光探测器的前级放大电路参数设计的依据,并对探测电路优化及设计方法进行了详细论述,为光电检测电路的设计提供了有效的设计方法。

关键词: PIN 光电二极管;光电探测;窄脉冲激光

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2012)04-0030-04

Analysis and Design of Detecting Circuit for Narrow Pulse Laser

MIAO Xiu-mei¹, ZHANG Zheng-mao²

(1.The Navy Equipment Department, Beijing 100841, China;

2.Northeast Research Institute of Electronic Technology, Jinzhou 121000, China)

Abstract: The performance of laser detecting system is influenced by the design of photoelectric detecting circuit. According to time domain characteristic, the design of narrow pulse laser detecting circuits are analyzed in detail, which include the affection of the photodiode bias voltage on detecting circuit and the affection of photocurrent conversion mode on signal bandwidth. In order to improve the SNR of laser detecting system, the optimization methods of bandwidth design for amplification circuits and compensation circuits are presented. The parameters design bases of preamplifier stage circuits for narrow pulse laser detectors are provided. And optimization and design methods of detecting circuits are introduced in detail. Effective design methods are provided for the design of photoelectric detecting circuits.

Key words: PIN photodiode; photoelectric detection; narrow pulse laser

在激光探测领域,脉冲激光器已经广泛使用^[1,2],其中典型的激光器脉冲宽度约为 10 ns,由于其频谱宽度非常宽,且光信号的动态范围大,因此光电探测电路为低噪声宽带放大电路。光电检测电路需探测微弱激光信号,将光信号转换为电信号,光电探测器件及前级放大电路的参数设计对信噪比有较大影响,对电路设计提出了较高要求,光电检测电路的设计性能决定了设备的整体性能^[3]。在脉冲激光检测电路中,通常采用 PIN 光电二极管为光电转换器件,通过检测光电流获取激光脉冲信息,前级放大电路

设计是激光探测系统的重要设计内容。

1 光电管模型

光电探测器普遍采用 PIN 光电二极管,其等效电路模型可采用一个电流源与一个理想的二极管并联来表示^[4],如图 1 所示。电流源代表由于入射光产生的光电流,二极管代表光电二极管的 PN 结,分流电阻 R_D 及结电容 C_D 与电流源及二极管为并联关系,串联电阻 R_S 与其他器件为串联关系。

收稿日期 2012-06-17

作者简介:苗秀梅(1959-),女,陕西横山人,高级工程师,研究方向为电子信息技术;张正茂(1971-),男,辽宁锦州人,硕士,高级工程师,主要研究方向为光电探测及信号处理。

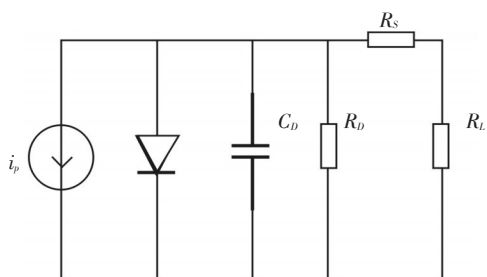


图1 光电二极管等效电路

理想的光电二极管的并联电阻为无穷大,但实际器件的并联电阻阻值为 $10\ \Omega \sim 1\ 000\ M\Omega$,在实际测试中可通过在光电二极管两端加较低的偏压,测试通过电流,计算光电二极管的并联电阻,当光电二极管工作在无偏压条件时,并联电阻决定了光电二极管的噪声电流。

串联电阻由接触电阻与非耗尽区的电阻产生,可表示为

$$R_s = \frac{(W_s - W_d)\rho}{A} + R_c \quad (1)$$

式中, W_s 为基材的厚度; W_d 为耗尽层的宽度; A 为扩散区面积; ρ 为基材的电阻率; R_c 为接触电阻;典型的串联电阻的阻值可为 $10 \sim 1\ 000\ \Omega$ 。

结电容 C_D 与光电二极管反向偏压有关,典型的Si

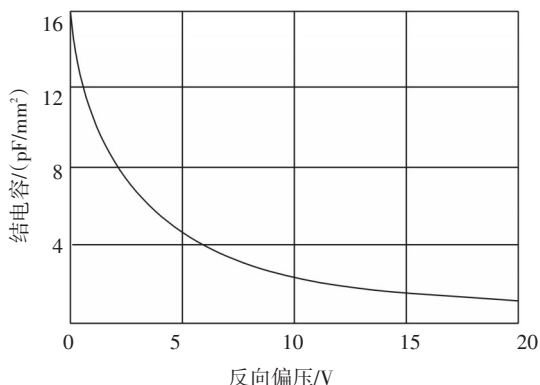


图2 结电容与反向偏压的关系

光电二极管的结电容与反向偏压的关系如图2所示。

图2显示随着反向偏压的增加,结电容减小,结电容的大小决定了光电二极管的反应速度、噪声增益等关键性能指标。

2 偏置电路模型

光电二极管的光电流信号与入射光信号的功率成正比,光电二极管的信号可通过测量其电压信号

或电流信号获得,测量其电流信号具有更好的线性特征与带宽,根据应用需求的不同可以采用不同的偏置方式^[4,5]。

光电二极管探测器既可在零偏置下工作(光伏模式),如图3所示。也可在反偏置下工作(光电导模

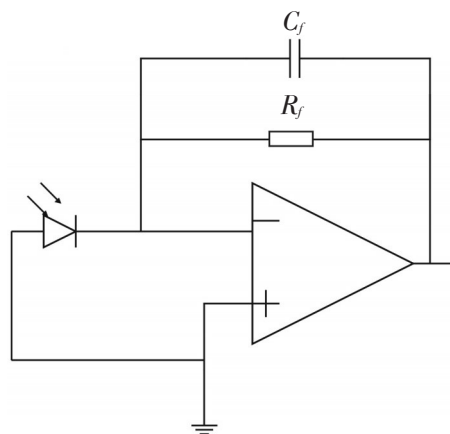


图3 光伏模式

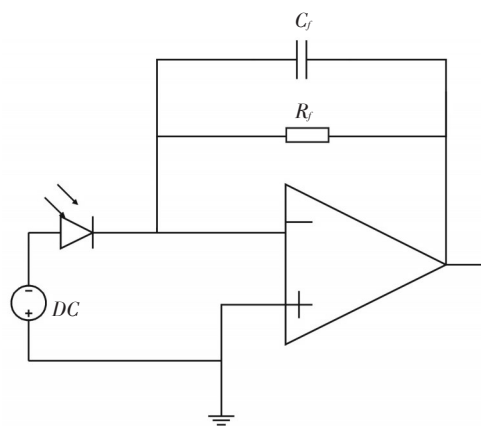


图4 光电导模式

式),如图4所示。

光电导模式通过对光电二极管加反向偏压可实现较高的切换速度,但会牺牲线性,而且偏压越高,暗电流越大,由此会产生较大的噪声电流。它适合于检测高速光脉冲的场合。零偏置模式由于不存在内部暗电流,其探测器输出噪声基本上是由分流电阻产生的热噪声,而且电路可充分利用器件的线性,从而实现最精确的线性工作。它适合于比较精确的测量检测和仪器仪表方面的场合。

3 放大电路模型

光电二极管的结电容对信号带宽的影响是非常严重的,光电二极管产生的信号都要受到结电容的

影响,结电容对光电流会产生分流。光电流的放大可采用两种方式,电压模式与采用I-V转换的跨阻放大模式^[6,7],采用电压模式与跨阻模式的电路模型分

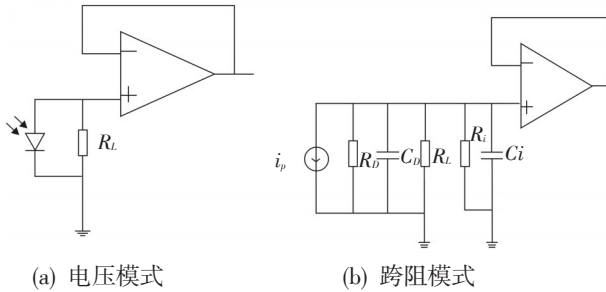


图5 电压模式放大电路及等效电路图

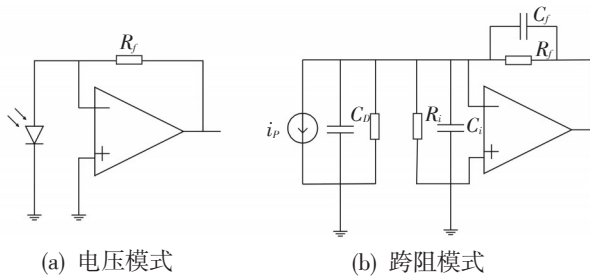


图6 跨阻放大模式及等效电路图

别见图5、图6。

在电压放大模式中,负载电阻 R_L 远小于 R_D , R_D 的影响可忽略。放大器的输入电阻及输入电容与负载电阻为并联关系,通常 R_i 很高可忽略。在电压模式中信号电流 i_p 通过负载电阻 R_L 产生电压,通过运放隔离负载电阻 R_L 与后端负载,理想的输出为 $V_o=i_p \times R_L$,但电路中光电流信号通过 R_L 产生的电压信号加于光电二极管与结电容上,在高频段结电容会分流光电流,会产生带宽限制,电路的-3 dB带宽为 f_i ,对光电二极管放大电路,当 R_L 与 C_D 值较大时会严重限制信号带宽。在电压放大模式中,定义 f_i 为电路滚降频率, f_i 可表示为

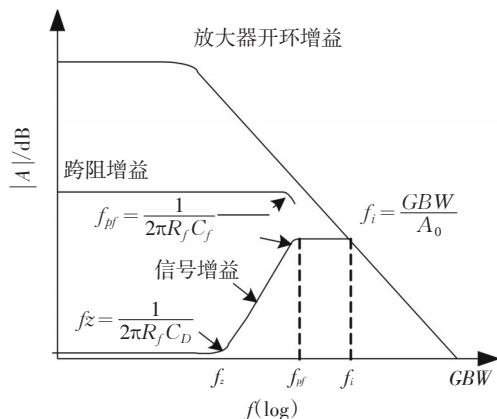


图7 跨阻放大电路波特图

$$f_i = \frac{1}{2\pi R_L C_D} \tag{1}$$

采用跨阻放大方式的波特图如图7所示。

通过分析电路的波特图,可知 f_z 与 f_{pf} 分别为跨阻放大方式信号增益曲线的零点频率与极点频率^[5], R_f 为反馈电阻, C_D 为输入电容, C_f 为反馈电容。

在高频段信号增益为

$$A_h = 1 + \frac{C_D}{C_f} \tag{2}$$

在低频段信号增益为

$$A_l = 1 + \frac{R_f}{R_D} \tag{3}$$

跨阻增益的滚降频率即信号增益的极点频率 f_{pf} 为

$$f_{pf} = \frac{1}{2\pi R_f C_f} \tag{4}$$

信号增益的零点频率为

$$f_z = \frac{1}{2\pi R_f C_D} \tag{5}$$

式中, f_i 为放大器的闭环增益带宽; A_{ol} 为放大器在 f_{pf} 频率处开环增益; f_i 可由式(6)计算

$$f_i = \frac{GBW}{A_o} \tag{6}$$

由图7可知,在 f_{pf} 到 f_i 频率波段,跨阻增益以20 dB/十倍频程的速度衰减,而信号增益为固定值,在 f_{pf} 到 f_i 频率波段主要为噪声增益。因此,需对电路进行优化以减小噪声增益的带宽,在电路设计中,如 $f_{pf}=f_i$,则可以最大限度地压缩噪声带宽,同时可满足跨阻

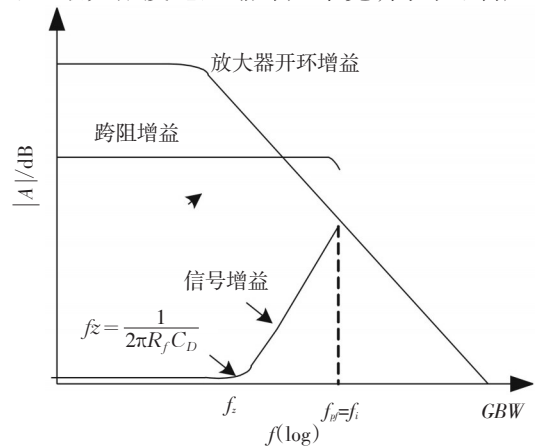


图8 优化后的跨阻放大电路波特图

增益的带宽要求^[5],优化后的波特图如图8所示。

因开环增益曲线以20 dB/十倍频程的速度衰减,而信号增益曲线以20 dB/十倍频程递增,放大器的增益带宽积 GBW ,闭环增益带宽 f_i ,零点频率 f_z 可用式

(7)表示,可得

$$f_i = \sqrt{GBW \times f_z} \quad (7)$$

采用跨阻模式的电路将二极管与结电容的信号电压降低为0,通常放大器的增益带宽积 GBW 远大于 f_z ,通过式(7)可看出,采用跨阻放大模式可提高电路的响应带宽,适用于探测纳秒级窄脉冲激光。

4 放大电路设计

通常由于分布电容的存在,反馈电阻会存在并联的反馈电容,同时为了电路的稳定性及降低噪声会采用补偿电容的方式^[5,8-10],使电路的闭环带宽与信号带宽相等,由式(4)~式(7)可推导出反馈电容数值计算公式

$$C_f = \sqrt{\frac{C_D}{2\pi R_f GBW}} \quad (8)$$

式中, C_D 为光电管结电容; R_f 为反馈电阻; GBW 为放大器增益带宽积。光电探测放大电路的设计过程可按如下步骤进行:(1)根据探测激光的脉冲宽度计算信号带宽;(2)选择放大器,应具有足够带宽及较低的电压噪声、电流噪声;(3)根据放大器带宽及信号带宽计算反馈电阻;(4)根据光电二极管结电容、放大器带宽及反馈电阻计算补偿电容大小。

如现需要探测脉冲宽度为10 ns的脉冲激光,上升时间与下降时间为5 ns,其信号带宽为

$$f_{sig} = \frac{0.35}{Tr} \quad (9)$$

式中, Tr 为信号上升时间,可计算信号的带宽为70 MHz。在设计放大器时应满足放大器的闭环增益的滚降频率大于、等于信号的带宽,这里令 $f_{-3dB} = f_{sig}$,光电探测器选用GT3552T光电二极管,结电容 C_D 为20 pf,并联电阻 R_D 为40 MΩ。放大器选用OPA847^[8,10],其增

益带宽积为3.9 GHz。原理图如图9。

由式(7)可计算放大器的零点频率 $f_z=1.256$ MHz,将 f_z 及结电容及放大器输入电容3.7 pf数值代入式(5),可计算出 $R_f=5.3$ kΩ,将 GBW 、 R_f 、 C_D 代入式(8),计算可得 $C_f=0.43$ pf。通常放大器的输入端会存在分布电容,当计算得到的补偿电容较小时,放大电路的分布电容可取代补偿电容,作用相当于补偿电容。通过MultiSim电路仿真软件对该电路进行瞬态、交流的分析,结果如图10、图11所示。

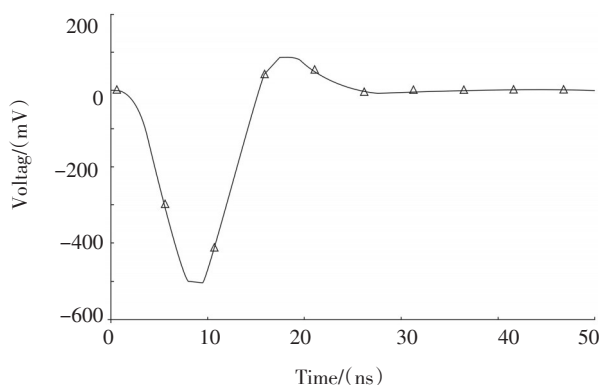


图10 瞬态分析图

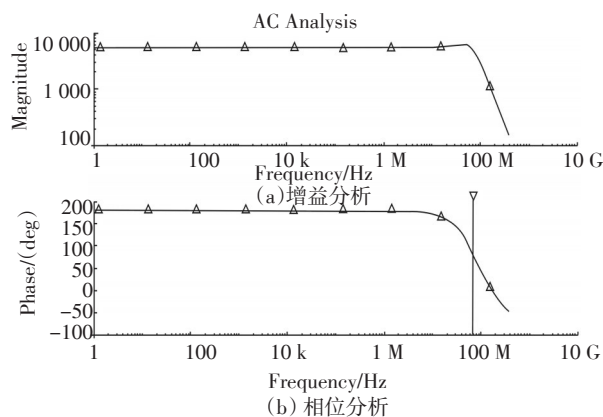


图11 交流分析图

由图11可看出放大电路较好保持了脉冲形状,同时在交流分析中可看出,电路的 f_{-3dB} 约为70 MHz,相位裕度为77°,电路可稳定工作。通过参数的优化设计,放大器的闭环带宽满足对窄脉冲激光探测的要求,同时压缩了噪声增益带宽,可有效提高了探测系统的信噪比。

5 结论

分析了光电二极管的参数模型、放大电路的参

(下转第38页)

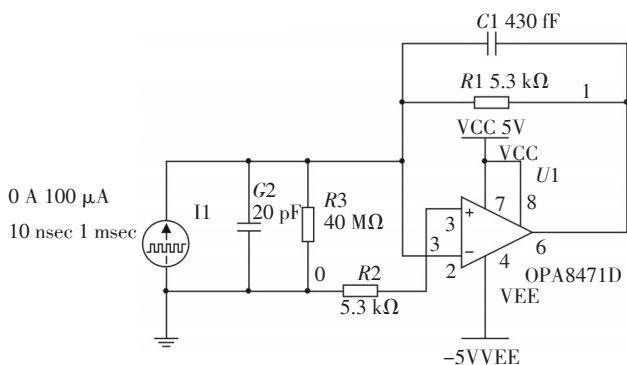


图9 放大电路

- [7] Ye Jing Yong, Mitsuru Ishikawa. Enhancing fluorescence detection with a photonic crystal structure in a total-internal-reflection configuration[J]. *Optics Lett*, 2008, 33(15): 1729-1731.
- [8] Zhu Qiaofen, Zhang Yan. Defect modes and wavelength tuning of one-dimensional photonic crystal with lithium niobate [J]. *Optik*, 2009, 120(4): 195-198.
- [9] Tang Tingting, Liu Wenli, Gao Xiuying, et al. Band gaps and nonlinear defect modes in one-dimensional photonic crystals with anisotropic single-negative metamaterials[J]. *Optics and Laser Technology*, 2011, 43(6): 1016-1019.
- [10] 袁纵横, 王明, 张静. 含缺陷光子晶体传光特性的实验研究[J]. *量子光学学报*, 2009, 15(3): 260-263.
- [11] Ma G H, Shen J, Rajiv K, et al. Optimization of two-photon absorption enhancement in one-dimensional photonic crystals with defect states[J]. *Appl Phys (B)*, 2005, 80(3): 359-363.
- [12] Ma G H, Shen J, Zhang Z, et al. Ultrafast all-optical switching in one-dimensional photonic crystal with two defects [J]. *Optics Express*, 2006, 14(2): 858-865.
- [13] Liu Xin, Chen Shuqi, Zang Weiping, et al. Optical limiting in one-dimensional photonic bandgap material with a bulk nonlinear defect[J]. *J Opt*, 2011, 13(1): 2040-8978.
- [14] Ma G H, Shen J, Zhang Z J, et al. Ultrafast all-optical switching in one-dimensional photonic crystal with two defects[J]. *Optics Express*, 2006, 14(2): 858-865.
- [15] 王艳玲, 苗峰, 韩文达. EastFDTD, 一款优秀的国产光电磁模拟软件[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, 46(5): 69-71.
- [16] Hideyuki Inouye, Yoshihiko Kanemitsu. Direct observation of nonlinear effects in a one-dimensional photonic crystal [J]. *Appl Phys Lett*, 2003, 82(8): 1155-1157.
- [17] 章志鸣, 沈元华, 陈惠芬. 光学[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2000: 145-156.

(上接第20页)

- [8] 张爱珍, 业宁. 基于图像模式识别技术的牛顿环检测[J]. *物理实验*, 2003(8): 33-35.
- [9] 朱竹青. 牛顿环实验数据的采集与处理[J]. *物理实验*, 2002(7): 10-13.
- [10] 虞仲博, 屠全良. 牛顿环实验等精度测量及其不确定度的评定与表示[J]. *物理实验*, 2000(5): 17-18.
- [11] 张广祥. 牛顿环实验的新方法[J]. *物理实验*, 1998(3): 6-9.
- [12] 单慧波. 牛顿环实验的拓展[J]. *物理实验*, 1996(6): 290.

(上接第33页)

数模型, 对窄脉冲激光探测电路的参数设计进行了详细分析。通过优化负载电阻、补偿电容参数, 有效提高系统的信噪比, 通过仿真测试表明, 该设计方法可提高探测系统性能, 可适用于不同参数激光脉冲探测系统的设计。

参考文献

- [1] 陈宏哲, 郑荣山, 张英远, 等. 激光主动侦察技术应用[J]. *光电技术应用*, 2007, 22(2): 19-21.
- [2] 李发泉, 程学武, 杨勇, 等. 星载威胁激光探测告警的技术需求分析[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37: 331-334.
- [3] 何初冬, 邱琪. 短脉冲激光信号接收灵敏度的研究[J]. *光电技术应用*, 2009, 24(2): 37-39.
- [4] 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.
- [5] Jerald Graeme. Photodiode amplifiers op AMP solutions[M]. 1995: 31-49.
- [6] 占建明, 汶德胜, 王宏, 等. 瞬变光探测系统前置放大电路的设计[J]. *红外*, 2011, 32(3): 14-18.
- [7] 张红旗, 梁谦. 激光引信前置放大器设计[J]. *航空兵器*, 2008(5): 34-37.
- [8] 阎鹤, 张记龙, 田二明, 等. 多窗口编码激光预警系统设计与性能分析[J]. *传感器与微系统*, 2010, 29(10): 59-61.
- [9] 严福兴. 极微弱光电流测量电路的设计[J]. *武汉理工大学学报*, 2006, 28(11): 114-116.
- [10] 刘日龙, 殷德奎. 激光干涉仪光电检测电路的设计[J]. *半导体光电*, 2010, 31(2): 284-287.