

·测试、试验与仿真·

## 基于PSpice的光电探测电路仿真分析

张正茂<sup>1</sup>, 胡心<sup>2</sup>

(1.东北电子技术研究所, 辽宁 锦州 121000; 2.陆航驻哈尔滨地区军事代表室, 辽宁 锦州 121000)

**摘要:**光电探测电路的设计对光电探测系统的性能有重要的影响。采用PSpice电子电路设计软件,对光电探测电路性能进行了仿真。分析了光电二极管的PSpice模型,光电探测电路的时域特性、频域特性及噪声特性。通过PSpice软件参数扫描功能,对电路参数进行了优化设计。利用PSpice软件的噪声分析功能,计算了系统等效噪声功率,并对后级电路设计参数进行了计算。

**关键词:**光电探测; PSpice仿真

中图分类号: TN702.2

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2012)05-0069-04

## Simulation and Analysis of Electro-optical Detection Circuit Based on PSpice

ZHANG Zheng-mao<sup>1</sup>, HU-xin<sup>2</sup>

(1. Northeast Research Institute of Electronics Technology, Jinzhou 121000, China;

2. Military Representative Office of Army Aviation in Harbin, Jinzhou 121000, China)

**Abstract:** The performance of electro-optical detection system is affected by the design of electro-optical circuit. The performance of electro-optical detection circuit is simulated based on PSpice EDA software. The PSpice model of photodiode, the characteristics of time domain, frequency domain and noise are analyzed. According to the parameter scanning function of PSpice software, the circuit parameters are optimized. Based on the noise analysis function of PSpice software, NEP and post-stage circuit design parameters of the system are calculated.

**Key words:** electro-optic detection; PSpice simulation

光电探测电路的作用是将输入的光信号转换为输出电压信号,其输入的光信号可包括自然光及各种人造光源。其中,广泛使用的脉冲激光器典型脉冲宽度约为10 ns,频谱宽度非常宽,由于光信号的动态范围大,因此探测该类型光信号对电路设计提出了较高要求。

光电探测器件及前级放大电路的参数设计对电路性能有较大影响,电路设计过程中由于光电二极管结电容、电路分布参数及放大器特性等因素的影响,使光电探测电路的特性分析较为复杂。

PSpice电子辅助仿真设计软件是一款功能强大、应用广泛的电子电路仿真软件,具备了强大的电路

仿真、分析功能。具有丰富元器件模型、支持数模混合仿真、使用方便等优点,能实现电路参量的模拟测试、分析功能及电气规则检查等功能。将PSpice仿真分析应用于光电探测电路设计中,通过对电路的时域特性、频域特性及噪声特性进行仿真研究,有利于电路的设计、分析及优化<sup>[1]</sup>。

### 1 光电探测器件PSpice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二极管并联来表示<sup>[2,3]</sup>,如图1所示。电流源仿真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。

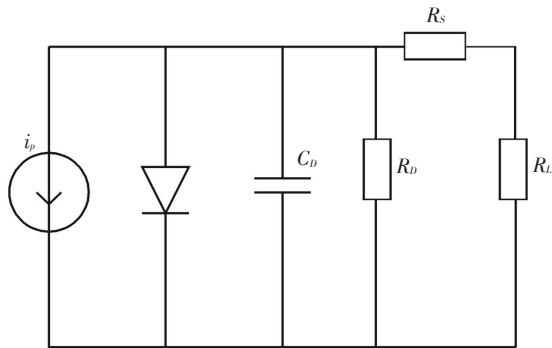


图1 光电二极管等效电路

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  $10\ \Omega \sim 1\ 000\ M\Omega$ 。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。通常光电二极管的串联电阻很小,在应用中可忽略其对电路的影响。

对脉冲光信号,通过光电探测器的光电转换形成光电流信号,在PSpice中可采用脉冲电流源来模拟,在仿真中采用的光电二极管的电路模型如图2所示。

## 2 放大电路模型

光电流信号的转换可采用两种方式,电压模式

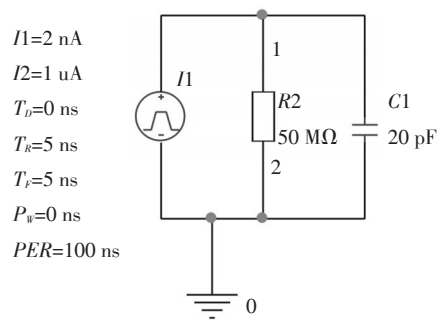


图2 光电二极管PSpice仿真模型

与采用  $I-V$  转换的跨阻放大模式,采用跨阻方式可降低二极管结电容对放大电路性能的影响,进一步提高放大电路的响应带宽。

在探测脉冲激光信号时,为提高探测电路响应速度,通常采用光电二极管加反向偏压的跨阻放大方式。

光电探测电路设计中,需根据所探测光信号带宽及所需要的阻抗增益等因素综合考虑选用的光电探测器件及放大器。设计中采用了低噪声、宽带运算放大器 OPA847。其增益带宽积为  $3.9\ GHz$ ,电压噪声为  $0.85\ nV/\sqrt{Hz}$ ,具有较低的电压噪声与电流噪声,适合作为宽带跨阻放大器。光电探测器选用低噪声、快速响应光电二极管 GT3552T,其结电容  $C_D$  为  $20\ pF$ ,并联电阻  $R_D$  为  $50\ M\Omega$ ,响应时间小于  $3.5\ ns$ 。实际设计的前级光电探测电路如图3所示。

现需要探测脉冲宽度为  $10\ ns$  的光信号,经过光电二极管后,光电流信号的上升时间与下降时间为  $5\ ns$

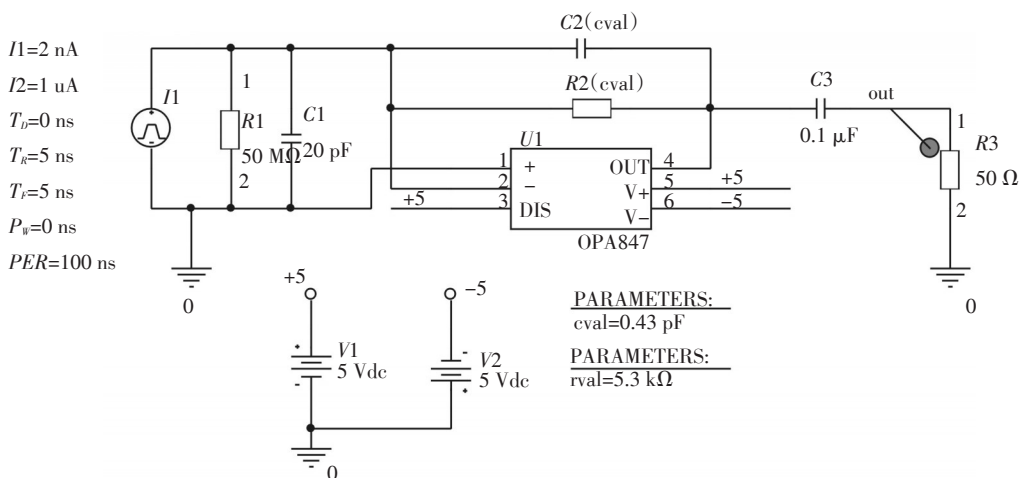


图3 光电探测电路原理图

$ns$ ,在图3中, $T_R$ 与 $T_F$ 设定为 $5\ ns$ ,为仿真光电二极管的暗电流, $I1$ 设定为 $2\ nA$ 。

通过式(1)可计算脉宽为  $10\ ns$  的电流信号的带

宽为

$$f_{sig} = \frac{0.35}{T_R} \tag{1}$$

式中, $T_R$ 为信号上升时间,可计算出信号的带宽为  $70$

MHz。

### 3 放大电路的仿真

#### 3.1 时域、频域的仿真

根据信号带宽、放大器增益带宽及光电二极管参数,可通过理论计算出电路中反馈电阻阻值为5.3 k $\Omega$ ,补偿电容为0.43 pF。

PSpice 软件是功能强大的专用电路仿真软件。它可以对给定参数的众多元器件构成的电路进行直流分析、交流小信号分析、瞬态分析、参数扫描分析等仿真分析。在电路设计的初级阶段进行功能和性能的验证,可以取代大量手工计算。为验证设计结果,可通过 PSpice 软件对电路性能进行详细的仿真分析。

图4、图5分别为探测电路的时域瞬态分析图与频域响应图。

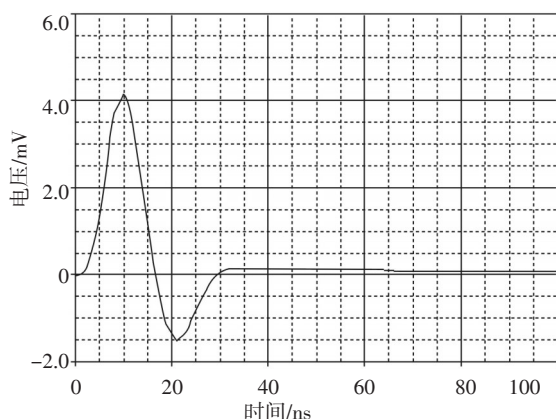


图4 光电探测电路时域瞬态分析图

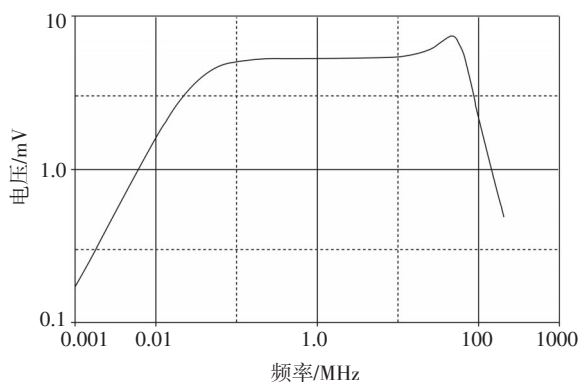


图5 光电探测电路频域响应图

由图4可看出,放大电路对输入电路信号进行了较好的放大,完整放大了输入信号,但输出信号存在

较大的下冲。通过图5的频域分析图可看出,在60 MHz频率附近,放大器产生了响应尖峰,导致响应曲线不平坦,高频处放大器响应较高是造成放大器输出信号产生较大下冲的原因。

放大器的频率响应特性可通过修正补偿电容的数值实现。为校正放大器的响应不平坦性,可通过 PSpice 软件的参数扫描功能进行参数优化。

在图3的PSpice原理图中设置补偿电容 $C_2$ 的电容值为参数类型,通过 PSpice 软件的参数扫描功能,分析补偿电容对电路时域及频域响应的影响。图6、图7为时域分析与频域分析图。

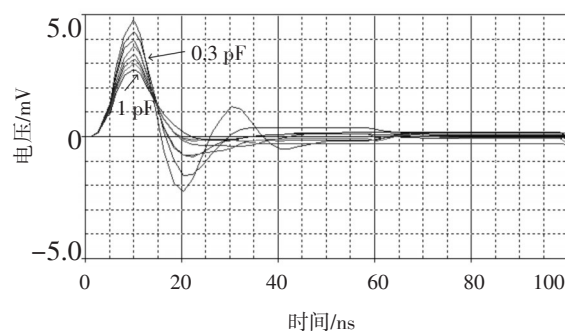


图6 时域参数扫描分析图

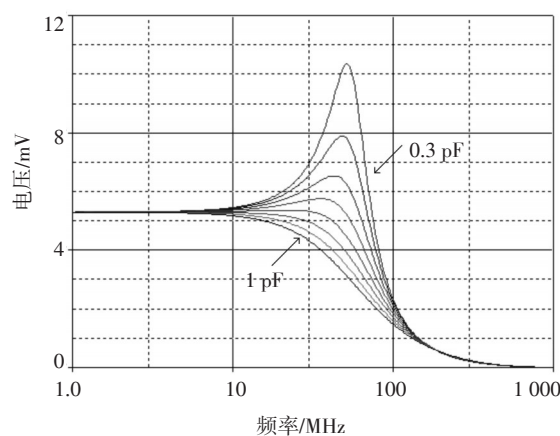


图7 频域参数扫描分析图

补偿电容的扫描参数范围为0.3~1 pF,扫描步长为0.1 pF。由图6、图7可观察出,当补偿电容的扫描参数由0.3~1 pF变化过程中,输出信号时域分析图中,脉冲下冲幅度随着容值的增加而降低,在频域分析图中可观察到放大器的高频响应在0.3 pF处产生较高响应尖峰,随着补偿电容的增加,响应尖峰下降,从而可得出结论,放大器的高频响应不平坦导致输出信号的下冲过大。综合考虑信号跨阻增益与频率响应曲线,补偿电容的取值可选为0.6 pF。

### 3.2 噪声仿真

光电探测电路的输出噪声由以下几部分组成<sup>[6]</sup>:电阻的热噪声、放大器的电流噪声、电压噪声及由光电二极管暗电流产生的电流噪声。上述几个噪声源为非相干噪声源,总的噪声可表示为

$$E_{no} = \sqrt{E_{noR}^2 + E_{noi}^2 + E_{noe}^2 + E_{noD}^2} \quad (2)$$

式中,  $E_{noR}$  为电阻热噪声;  $E_{noi}$  为放大器电流噪声;  $E_{noe}$  为放大器电压噪声;  $E_{noD}$  为光电二极管噪声。上述噪声可采用理论计算得出,但计算过程较复杂。通过 PSpice 软件的噪声分析功能可较快地计算出电路的输出噪声,图3电路的输出噪声谱密度图如图8所示。图9为总电压输出噪声随频率变化曲线,由图8噪声谱密度曲线积分后得到。

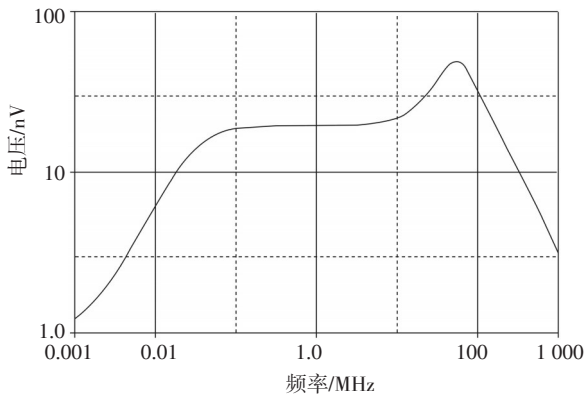


图8 噪声谱密度分析图

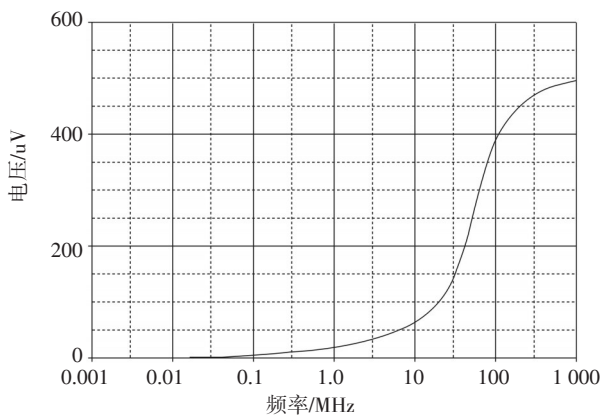


图9 噪声分析图

在图8中可观察到,电路在60 MHz处产生输出噪声尖峰,频率超过60 Hz后噪声频谱以20 dB/十倍频段的速度衰减。通过图9总输出噪声曲线可看出,频率超过放大器带宽后输出噪声增长较慢,近似为平坦直线。由此可得出结论,在满足信号带宽条件下,应尽量降低放大器带宽以降低输出噪声。图9中

所示电压值均为有效值。

通过对输出电压噪声的分析,可为后续处理电路提供必要的设计参数。如经过第一级放大后,后级电路需要采用电压比较的方式判断入射光信号的强度,可通过输出电压噪声的数值确定比较电压的大小。放大器输出噪声的分布具有高斯分布特性,在电压比较方式中对输出信号的峰值更为关注,可通过概率预估噪声的峰值。

波峰因数是噪声的峰值与噪声RMS值的比值可表示为

$$C = \frac{E_{peak}}{E_{rms}} \quad (3)$$

波峰因数  $C$  可根据实际需要选取,通常波峰因数  $C$  取值为6.6,其含义为噪声的峰值超过6.6倍的RMS值的概率为0.1%。所以电压比较器的阈值电平可取值为33 mV。

放大器的等效输入噪声可用于计算光电探测电路最小可探测功率。采用 PSpice 软件可得到图10所示的输入电流噪声分析图。

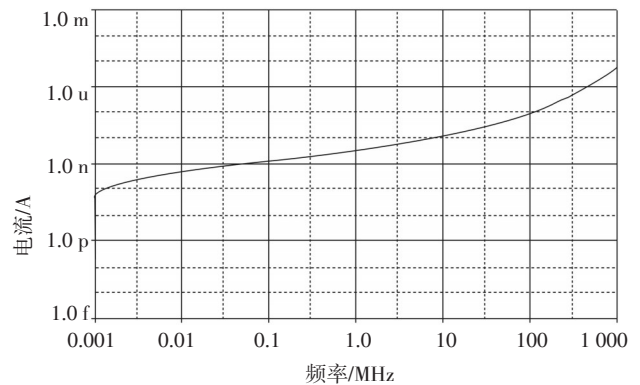


图10 输入电流噪声分析图

在图10中可看出,在等效噪声带宽为100 MHz时,输入电流噪声的有效值约为0.1 μA,当光电探测器响应度  $Re=0.9$  W/A,波峰因数  $C$  取值为6.6时,可计算出探测电路可测量的最低可探测功率为  $6.6 \times 0.1 / Re = 0.73$  μW。

## 4 结 论

在光电探测电路设计过程中,通过采用 PSpice 软件进行仿真,可直观地观察到电路参数调整对信号输出波形的影响<sup>[7]</sup>。可以更好地观察到电路各元件的参量设置如何影响到电路输出效果,从而避免

(下转第76页)



- [2] 王彦吉, 宋增福. 光谱分析与色谱分析[M]. 北京: 北京大学出版社, 1995.
- [3] 陈瀑, 楮小立, 田松柏. 分子荧光光谱在原油分析中的应用概述[J]. 现代科学仪器, 2012, 1(1): 129-133.
- [4] 汪渊, 刘蓉, 宁斌科, 等. 硝化棉的热分解机理[J]. 含能材料, 1998, 6(4): 157-167.
- [5] 王文俊, 左洋, 李永红, 等. 精制棉与硝化工艺对硝化棉含氮量及其分布均匀性的影响[J]. 兵工学报, 2010, 31(10): 1363-1371.
- [6] 刘吉平. 火炸药及其化学基础[M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 1988.
- [7] 《发射药理化分析》编写组. 发射药理化分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- [8] 吴晓军. GPC法测定双基火药中硝化棉含量的研究[J]. 华北工学院学报, 1999, 20(1): 76-78.
- [9] Cunningham A F, Heathcote C, Hillman D E. Gel permeation chromatography of nitrocellulose[J]. Chromatogr Sci., 1980, 13: 173-96.
- [10] Maarten R van Bommela, Alexander M Wallert, et al. High-performance liquid chromatography and non-destructive three-dimensional analysis of early synthetic dyes[J]. Journal of Chromatography A, 2007, 1157: 260-272.
- [11] 童国忠, 陈奇毅, 熊国刚. 凝胶色谱法分析涂料树脂[J]. 上海涂料, 2003, 41(6): 28-233.
- [12] 许金钩, 王尊本. 荧光分析法[M]. 北京: 科技出版社, 2006.

(上接第63页)

### 参考文献

- [1] CHAN R H, CHUNG W H, NIKOLOVA M. An interactive procedure for removing random-valued impulse noise [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11(12): 921-924.
- [2] CHAN R H, CHUNG W H, NIKOLOVA M. Salt and pepper noise removed by median type noise detectors and detail preserving regularization [J]. IEEE transaction on Image Processing, 2005, 14(10): 1479-1485.
- [3] 王秀芳. 数字图像的噪声及其去噪的几种方法研究[J]. 黑龙江科技信息报, 2010, 28(6): 53-55.
- [4] 李杰. 基于边缘光流法向分量的运动区域划分[J]. 北京理工大学学报, 2011, 21(4): 452-455.
- [5] 黄福珍, 苏剑波. 人脸检测[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2006: 137-146.
- [6] 徐世伟, 张威. 基于FPGA实时红外图像自适应线性增强算法的实现[J]. 光电技术应用, 2009, 24(6): 67-68.
- [7] 岑峰, 戚飞虎, 陈茂林. 长期视频监控系统的分布模型差方法[J]. 红外与毫米波学报, 2002, 21(1): 59-63.
- [8] 侯志张, 韩崇昭. 基于像素灰度归类的背景重构算法 [J]. 软件学报, 2005, 16(9): 1568-1576.
- [9] 胡敏, 石美, 汪荣贵. 一种具有抗噪性的图像分割方法[J]. 计算机工程, 2011, 37(8): 231-232.
- [10] 官国仕, 陈劲松. 数字图像的小波去噪方法研究[J]. 绵阳师范学院学报, 2010, 29(8): 93-95.
- [11] 于雪莲, 宋洋, 刘晓红. 运动目标检测和目标区域的估算[J]. 计算机学报, 2011, 44(5): 119-120.
- [12] 陶文兵, 金海. 一种新的基于图谱理论的图像阈值分割方法[J]. 计算机学报, 2007, 30(1): 110-119.

(上接第72页)

所设计电路产生频率增益不平坦、相位失真等导致电路发生振荡、下冲问题。通过对电路中电参量波形的测量, 可为电路优化设计提供可靠的数据基础及理论依据。

### 参考文献

- [1] 唐益文, 史琳. 基于OrCAD/PSpice的波形发生电路设计仿真[J]. 山西电子技术, 2011(1): 27-29.
- [2] 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.
- [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] Jerald Graeme . Photodiode amplifiers op AMP solutions[M], 1995: 31-49.
- [5] 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.
- [6] 张正茂, 陈峰. 光电探测放大器的噪声分析[J]. 光电技术应用, 2012, 27(3): 37-40.
- [7] 张奕雄, 吴浚浩, 洪正滨. 通信电子线路PSpice仿真的研究与实现[J]. 通讯设备, 2010(11): 94-96.