

文章编号: 0258-7025(2004)09-1112-05

# 脉冲激光测距漂移误差的研究

赵大龙, 陈千颂, 秦来贵, 霍玉晶

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

**摘要** 光脉冲接收是脉冲激光测距的关键技术之一。稳定有效地探测反射激光脉冲信号和提高脉冲激光测距仪的环境抗干扰能力,是光脉冲接收技术需解决的主要问题。对 PIN 光电二极管的光探测过程进行了理论分析。指出 PIN 管中的光生载流子和耗尽层电荷的相互作用导致了耗尽层宽度的改变,进而引起 PIN 管的光接收响应时间的变化。结合半导体基本理论,构建了相应的 PIN 管光探测过程理论模型,定义两个描述 PIN 结性能的特征参数:单位光功率敏感度  $K$  和单位时间抖动  $\Delta\tau_{p0}$ ,进一步给出了 PIN 管的光响应时间及其抖动大小与光照强度的近似函数关系。该理论模型成功用于解释自触发脉冲激光测距中的漂移误差现象,经过对实验现象和相应实验结果的定性分析,验证了理论分析的正确性。

**关键词** 激光技术;激光测距;漂移误差;自触发脉冲;PN 结

**中图分类号** TN 958.98 **文献标识码** A

## Study on Walk Error in Pulsed Laser Range-Finding

ZHAO Da-long, CHEN Qian-song, QIN Lai-gui, HUO Yu-jing

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** The reception of laser pulses is one of the key technologies in the laser rangefinding. The stable and effective detection and the increased ability of anti-jamming are the main problems to be solved. In this paper, an elementary study on walk error in pulsed laser range finding is carried out. The photodiode response time is affected by the change of depletion layer width, which is caused by the interaction between depletion layer charges and photo-induced carriers. The basic theoretic model is set up to explain this process, and two characteristic parameters unit optical power sensitivity  $K$  and unit time jitter  $\Delta\tau_{p0}$  are introduced. The approximate relation between the photodiode response time, its jitter and the laser pulse power projected on the detector is obtained respectively, which are successfully employed to explain the walk error phenomena in the self-triggering pulsed time-of-flight laser rangefinding experiment.

**Key words** laser techniques; laser range-finding; walk error; self-triggering; PN junction

## 1 引 言

光脉冲的接收是脉冲激光测距的关键技术之一。光脉冲的接收单元主要包括三项主要功能:光电转换、脉冲信号处理和时刻鉴别输出。目前用于光电转换的光电探测器件主要有光电倍增管(PMT),PIN 光电二极管和雪崩光电二极管(APD)等<sup>[1,2]</sup>。在脉冲激光测距系统中,由于激光脉冲在

空中传输过程中的衰减和畸变,导致接收到的光脉冲与发射脉冲在幅度和形状上都有很大不同,给正确确定脉冲到达时刻带来困难,由此引起的测量误差被称之为漂移误差<sup>[3,4]</sup>。

本文利用自触发脉冲激光测距<sup>[5]</sup>实验系统,以 Si PIN 光电二极管作为光电探测器件,对漂移误差进行了研究。发现自触发脉冲激光测距信号的周期及其抖动随着接收光强的变化而变化。理论上分析

收稿日期:2003-05-12;收到修改稿日期:2003-07-17

基金项目:国防科技重点实验室基金(51456050103JW0103)资助项目。

作者简介:赵大龙(1979—),男,清华大学电子工程系硕士研究生,主要从事激光测距技术研究。E-mail:zhaodalong98@mails.tsinghua.edu.cn

了漂移误差的产生机理,并应用于相应实验结果的解释。

## 2 理论分析

PIN 光电二极管是利用光生伏特效应进行探测的,这是一种少数载流子过程。考虑到本征层(I区)主要作用是增加结电容的宽度,对其基本工作原理仍从原始的 PN 结开始分析。

根据半导体理论,无光照状态下,P区和N区相接触,在少数载流子的扩散作用和漂移作用达到动态平衡的时候,PN结中会产生“耗尽层”,又称为“空间电荷区”(图1)。当光入射到PN结的P区表面时,如果入射光子的能量  $h\nu$  大于或等于半导体材料的带隙  $E_g$ ,则在P区将激发出电子-空穴对。由于P区的多数载流子是空穴,在热平衡时空穴浓度较大,因此光生空穴对P区空穴浓度影响很小。而光生电子对P区的电子浓度影响很大,从P区表面到P区内部形成电子浓度梯度,因此电子从表面向内部扩散。到达PN结的电子立即被内建电场扫向N区。入射的光子也可以到达N区,在那里也会激发出电子-空穴对,其中的空穴由于扩散和内建电场的作用进入P区。所以光辐射所产生的电子-空穴对被内建电场分离开来,空穴流入P区,电子流入N区。这样入射光辐射就引起由N区流向P区的光电流  $I_p$ 。

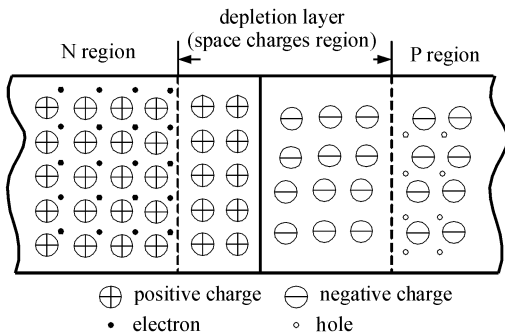


图1 半导体中的PN结

Fig.1 PN junction in the semiconductor

PN结中存在光电容<sup>[6]</sup>,它仅仅是由PN结的光生电势差所引起的<sup>[7,8]</sup>。在光生电子和光生空穴分别向N区和P区运动过程中,还存在光生电子与耗尽层N区一侧带正电的电离施主,以及光生空穴与耗尽层P区一侧带负电的电离受主之间进行电荷作用这样一个过程,从而导致在光照情况下耗尽层的宽度被改变。不同的光强对耗尽层宽度的影响也不同。无光照时,PN结处于扩散作用和漂移作用

的动态平衡中。有光照时,光生载流子的产生打破原有的动态平衡,随着光生载流子和耗尽层电荷的相互作用,逐渐再次建立新的动态平衡。这种状态下的平衡与无光照的情况形成机理不同,因而其光电参数也不同。

以P区的少数载流子-电子为例(N区可以作同样处理)。无光照情况下,结电容的宽度为  $\chi_{D0}$ 。当光照射到PN结时,P区少数载流子(电子)在内建电场的作用下向N区运动。部分少数载流子(电子)在到达N区时与其不可移动的带正电的电离施主作用,减少了耗尽层的电荷总量,导致耗尽层的宽度减小为  $\chi_D$

$$\chi_D = \chi_{D0} - kP \quad (1)$$

其中  $P$  为照射光功率,  $kP$  表示由光照导致的结电容宽度减少量,  $k$  为由材料本身性质所决定的比例系数。定义因子  $\alpha = \frac{kP}{\chi_{D0}}$  来表示光照对耗尽层宽度的影响大小。

根据半导体理论,PN结的势垒电容  $C_T$  由下式决定<sup>[9]</sup>

$$C_T = \frac{A\epsilon_r\epsilon_0}{\chi_D} \quad (2)$$

其中  $A$  为PN结面积。PN结的电容  $C$  是由扩散电容  $C_D$  和势垒电容  $C_T$  两部分组成的。由于光电二极管处于反向偏置状态,结电容以势垒电容为主,所以其PN结电容  $C$  可以进一步表示为

$$C = \frac{A\epsilon_r\epsilon_0}{\chi_{D0} - kP} \quad (3)$$

上式就是在光照情况下PN结电容的表达式。

对于光伏型探测器,其响应时间  $\tau_p$  主要包括三个因素:光生载流子扩散到结区(势垒区)的时间  $\tau_n$ ;光生载流子在电场作用下通过结区的漂移时间  $\tau_d$ ;由结电容  $C$  与外电路负载  $R_L$  所决定的电路时间常数  $\tau_c$ 。在实际应用中,主要影响因素是电路时间常数  $\tau_c$ 。其大小由外部电路决定  $\tau_c = R_L C$ ,正常工作情况下  $R_L$  基本保持不变。这样PIN管的响应时间  $\tau_p$  可以表示为  $\tau_p = 3R_L C$ ,将(3)式代入可得

$$\tau_p = 3R_L \frac{A\epsilon_r\epsilon_0}{\chi_{D0} - kP} \quad (4)$$

当光照引起的结电容宽度的减少量  $kP$  远小于无光照时的结电容宽度  $\chi_{D0}$  时,即  $kP \ll \chi_{D0}, \alpha \rightarrow 0$

$$\tau_p \approx \tau_{p0} + KP \quad (5)$$

其中,  $\tau_{p0} = 3R_L \frac{A\epsilon_r\epsilon_0}{\chi_{D0}}$ , 定义为无光照(光照趋于零)时的响应时间;  $K = \frac{k\tau_{p0}}{\chi_{D0}}$ , 为单位光功率敏感度,即

PN 结接收单位光功率引起结宽度的减小量与  $\chi_{D0}$  的比值,它的大小由材料本身的固有性质所决定。

$kP \rightarrow \chi_{D0}$ , 即  $\alpha \rightarrow 1$  时, 由(4) 式可得

$$\tau_p = \tau_{p0} \frac{1}{\Delta} \tag{6}$$

其中,  $\Delta = 1 - \alpha \rightarrow 0$ , 可以看出响应时间  $\tau_p$  以双曲线趋于无穷。实际上此时光照功率很大, 对 PN 结中载流子的分离过程造成破坏, 使之减弱或丧失分离载流子的能力, 进而根本无法形成内建电场<sup>[10]</sup>。这样就对光电探测器造成永久性的损伤, 因此, 实际上响应时间的上升必然是有限的。

对公式(4)以  $P$  为变量进行微分, 可得

$$\Delta\tau_p = R_L k \frac{A\epsilon_r \epsilon_0}{(\chi_{D0} - kP)^2} \Delta P \tag{7}$$

其中,  $\Delta\tau_p$  为光照条件下响应时间的抖动量。

在  $kP \ll \chi_{D0}$ , 即  $\alpha \rightarrow 0$  时, (7) 式可以写成

$$\Delta\tau_p \approx \tau_{p0} \frac{k\Delta P}{\chi_{D0}} \left(1 + \frac{2kP}{\chi_{D0}}\right) \tag{8}$$

光照功率的抖动  $\Delta P$  主要是由以下两方面引起的: 一是光在空间传播过程中, 由于受大气扰动等因素影响导致光探测器接收光功率的抖动; 二是发射激光器自身的调制噪声引起。可以认为  $\Delta P$  与光功率  $P$  的大小成正比, 定义  $\gamma = \Delta P/P$ , 对于确定的测距系统而言, 认为  $\gamma$  是一常数, (8) 式化为

$$\Delta\tau_p \approx \frac{kP}{\chi_{D0}} \Delta\tau_{p0} \tag{9}$$

其中  $\Delta\tau_{p0} = \gamma\tau_{p0}$ , 为单位时间抖动, 同样是材料自身所决定的性质。

当  $\alpha \rightarrow 1$  时, (7) 可以简化为

$$\Delta\tau_p = \Delta\tau_{p0} \frac{1}{\delta^2} \tag{10}$$

$\delta = 1/\alpha - 1 \rightarrow 0$ , 即光照功率很强时, 时间抖动将以  $1/\delta^2$  趋势快速增长。

式(5)和(9)构成了光电二极管在弱光照射下, PIN 管响应时间及其抖动的表达式, 它们都和光功率成线性关系。而式(6)和(10)则是在强光照射下, PIN 管响应时间及其抖动的表达式。

### 3 实验结果及分析

自触发脉冲激光测距方法的脉冲是通过自触发产生的, 发射单元向被测目标发射一束激光, 经过  $\Delta T$  (光从发射单元到目标然后返回到接收单元的传播时间) 的延时, 被接收单元的光电二极管接收; 经过 PIN 管响应时间  $\tau_p$  和电路延时  $\tau$ , 该信号触发

激光器停止发射激光。再经过  $\Delta T$  的延时, 光电二极管从有激光接收状态转变为无激光接收状态; 而后经过同样的延时, 该信号触发激光器再次发射激光。上述过程构成了自触发脉冲飞行时间激光测距的一个完整周期。如此循环往复, 便形成了自触发脉冲激光测距信号: 周期脉冲序列。因此, 测距信号的周期  $T_0$  为

$$T_0 = 2\Delta T + 2\tau + 2\tau_p \tag{11}$$

测量测距信号的周期, 便可获得距离值。目前, 自触发脉冲激光测距精度可以达到亚毫米精度, 其周期稳定性为皮秒量级<sup>[5]</sup>。

自触发脉冲激光测距的优势在于周期测量, 可以获得准确度非常高的周期值。特点是采取了平均方法, 测得的周期值是一段时间内的平均值, 这样就消除了瞬时抖动等的影响, 抖动等随机误差得到平均消除。只有缓变的因素才会得到体现, 如功率的变化、温度的变化等。

图 2 是自触发脉冲激光测距系统结构图。其中, 在被测目标与 PIN 管接收会聚透镜之间的返回光路上垂直放置一对平行偏振片, 反射光从它们的

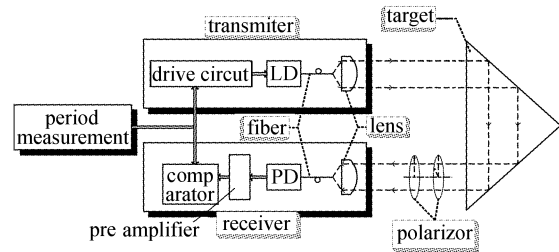


图 2 自触发脉冲激光测距系统框图  
Fig. 2 Experimental setup for self-triggering pulsed laser rangefinder

轴心透过。固定其中一片的偏振方向, 通过改变另一片的偏振方向角  $\theta$  来调节 PIN 管接收光功率  $P$ , 模拟实际测距过程中反射光脉冲强度的变化过程。被测目标为一直角棱镜, 测量距离为 1 m。  $\theta = 0$  时, 两偏振片偏振方向相同,  $P = P_0$ ; 朝一个方向转动偏振片至  $\theta$ , 则  $P = P_0 \cos^2 \theta$ 。此处假设 PIN 管响应时间及其抖动对于光脉冲信号的上升和下降沿的作用是一样的。距离不变时, 飞行时间  $\Delta T$  不变, 则由公式(11) 可以看出, 周期的抖动  $\Delta T_0$  主要来自电路延时  $\tau$  的抖动  $\Delta\tau$  和光电响应时间的抖动  $\Delta\tau_p$ , 同时还有接收光功率抖动的影响。实验中看到光功率变化时, 影响最大的是光电响应时间的抖动。因此可以认为光强  $P$  对 PIN 管响应抖动影响最大, 其他两方

面影响很小,那么周期的抖动  $\Delta T_0$  可以表示为

$$\Delta T_0 = \Delta\tau + 2\Delta\tau_p \tag{12}$$

把式(5)和(9)分别代入(11)和(12)式,就得到了弱光条件下的测距周期  $T_0$  及其抖动  $\Delta T_0$  与光接收功率  $P$  的关系式

$$T_0 = 2\Delta T + \tau + 2\tau_{p0} + 2KP \tag{13}$$

$$\Delta T_0 = \Delta\tau + 2 \frac{kP}{\chi^{D0}} \Delta\tau_{p0} \tag{14}$$

把式(6)和(10)分别代入(11)和(12)式,就得到了强光条件下的测距周期  $T_0$  及其抖动  $\Delta T_0$  与光接收功率  $P$  的关系式

$$T_0 = 2\Delta T + \tau + 2\tau_{p0} \frac{1}{\Delta} \tag{15}$$

$$\Delta T_0 = \Delta\tau + 2\Delta\tau_{p0} \frac{1}{\Delta^2} \tag{16}$$

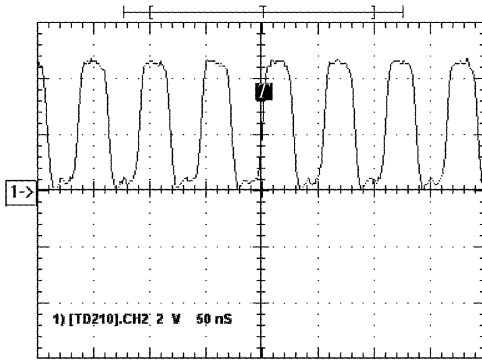


图 3 测距信号

Fig. 3 Electronic signal waveform in the rangefinder

图 3 为从周期测量端口得到的测距信号。图 4 为实验测得的测距信号周期  $T_0$  与接收光功率  $P$  的关系曲线,其中光功率以相对值  $P/P_0$  标示。实验开始,朝接收光强减弱的方向调节  $\theta$  至无测距信号产生的位置,再朝接收光强增加( $\theta$  的减小)的方向调节  $\theta$  至测距信号出现,记录  $\theta$  值作为测量起始点;继续减小  $\theta$ ,光强逐渐变强,以  $2^\circ$  为步长逐个记录测距信号周期值;调至  $\theta = 0$  时,光强最强。上述实验数据由图 4 中  $L_D$  表示。朝同一方向继续调节偏振片,得到数据  $L_I$ 。每次测量周期的同时,进行周期稳定性的测量,得到稳定性  $\sigma_w$  (以 2 min 为步长,连续测量 16 个时间点得到的周期值的标准偏差)与接收光功率  $P$  的曲线,如图 5 所示。对周期及其抖动的测量是通过 HP 的 53131A 通用频率计数器(10 digit/s)进行,将精度位数设为 9 位。周期测量是连续 100 个周期取平均,而瞬时抖动的大小由这 100 个连续周期的标准偏差来衡量。

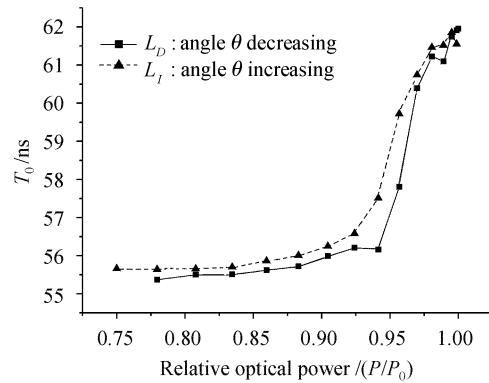


图 4 测距信号周期与接收光功率的关系

Fig. 4 Relationship between the signal period and optical power

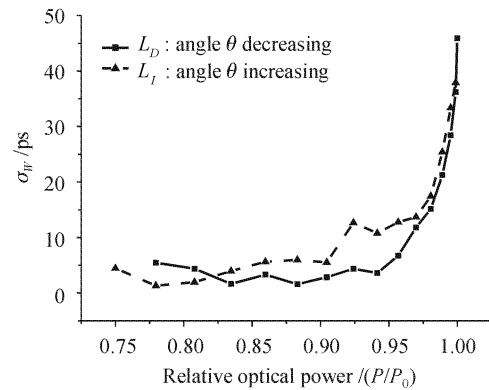


图 5 测距信号周期抖动与接收光功率的关系

Fig. 5 Relationship between the signal period jitter and optical power

图 4 和图 5 中光强由弱到强和由强到弱的两条曲线不重合,是以下两个原因造成的。一方面是调节精度问题,实验中采用的偏振片的最小单位是  $2^\circ/\text{div}$ ,测量步长也是  $2^\circ/\text{div}$ ,旋转偏振片时无法做到步长每次都精确相等;另一方面电源电压、温度等引起的系统缓变所致,但是这不影响其整个变化趋势。

在弱光条件下,随着接收光强的增加测距信号的周期基本上呈线性趋势增大(图 4),符合方程(13)的理论计算结果。当光强相对较大时,则表现出快速增长的趋势。由于方程(15)描述的是极限情况,实际测量中是无法达到的,但其变化趋势是与实验结果相一致的。同样,观察测距信号周期稳定性与光接收功率的关系(图 5),可以发现其变化趋势基本上符合式(14)和(16)所表达的理论预期。

对比  $T_0$  和  $\sigma_w$  在大光功率接收时的变化趋势,可以发现  $\sigma_w$  比  $T_0$  变化得更快,符合式(15)和(16)

所给出的  $1/\Delta$  和  $1/\delta^2$  之区别,随着光强的增加,响应时间的抖动将迅速增加。

观察  $\sigma_w$  在  $P/P_0 = 0.75$  的点(图 5),它比前一点明显增大,而与之相对应的  $T_0$  (图 4)也有增大的趋势。这是因为,光强减弱到测距信号接近消失的临界状态时,信号出现剧烈抖动直至消失。测距信号的消失说明此时接收到的光强不足以使后续时刻鉴别电路产生信号去触发新的激光测距脉冲。

## 4 结 论

对自触发脉冲激光测距实验中出现的强光敏感(漂移误差)现象进行了研究。给出了产生漂移误差的理论分析:PIN 管中光生载流子和耗尽层电荷的相互作用导致了耗尽层宽度的改变,从而影响 PIN 管的响应时间,导致漂移误差的产生。根据半导体基本理论,结合理论分析构建相应的理论模型,定义了两个描述 PIN 结性能的特征参数:单位光功率敏感度  $K$  和单位时间抖动  $\Delta\tau_{p0}$ ;给出了在弱光和强光条件下,测距信号的周期及其抖动与光脉冲接收强度的近似函数关系。通过自触发脉冲测距实验,通过对实验现象的定性分析,验证了上述理论分析的正确性。

## 参 考 文 献

- Huang Hui, Cheng Bu-wen, Huang Yong-qing *et al.*. Experimental study on the tunable RCE photodetectors with built-in liquid-crystal layer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(10):908~910  
黄 辉,成步文,黄永清等. 集成液晶可调谐 RCE 光电探测器的实验研究[J]. 中国激光, 2002, **A29**(10):908~910
- Zhong Yuan, Pan Zhong, Li Lian-he *et al.*. A novel resonant cavity enhanced (RCE) photodetector with a flat-top and steep-edge response [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(4):347~350  
钟 源,潘 钟,李联合等. 一种具有平顶陡边响应的新型谐振腔增强型(RCE)光电探测器的理论分析与模拟[J]. 中国激光, 2002, **A29**(4):347~350
- Chen Qian-song, Yang Cheng-wei, Pan Zhi-wen *et al.*. A brief introduction on the development of Laser time-of-flight distance measurement technology [J]. *Laser & Infrared*, 2002, **32**(1):7~10  
陈千颂,杨成伟,潘志文等. 激光飞行时间测距关键技术进展[J]. 激光与红外, 2002, **32**(1):7~10
- Zhang Zheng-yu, Sui Xiao-lin. Faint signal digital correlation detection of laser ranging: study and simulation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(7):661~665  
章正宇,眭晓林. 激光测距弱信号数字相关检测技术的研究和仿真[J]. 中国激光, 2002, **A29**(7):661~665
- Chen Qian-song, Zhao Da-long, Yang Chen-wei *et al.*. Study on self-triggering pulsed time-of-flight laser rangefinding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(6):745~748  
陈千颂,赵大龙,杨成伟等. 自触发脉冲飞行时间激光测距技术研究[J]. 中国激光, 2004, **31**(6):745~748
- J. Nishizawa. Optical Electronics [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 1983. 208~209  
J. 西泽润一. 光电子学[M]. 北京:人民邮电出版社, 1983. 208~209
- Chen Jie. Photoelectric conversion in PN junction of high-pure P-type silicon [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 1998, **19**(3):208~209  
陈 杰. 高阻 P 型硅 PN 结中的光电转换[J]. 半导体光电, 1998, **19**(3):208~209
- He Yie, Shen Yafa. An optical measurement method for PN junction depth [C]. ICMTS 1992. Proceedings of the 1992 International Conference on Microelectronic Test Structures, 16~19 Mar. 1992, pp166~169
- Gao Wenhuan, Liu Runsheng. Electronic Circuits [M]. Beijing: Higher Education Press, 1997, Chap. 1  
高文焕,刘润生. 电子线路基础[M]. 北京:高等教育出版社, 1997,第一章
- Chen Dezhang, Zhang Chengquan, Qing Guangbi *et al.*. Research on laser damage threshold of photoelectric detector [J]. *Laser Technology*, 1995, **19**(3):135~140  
陈德章,张承铨,卿光弼等. 激光对光电探测器的损伤阈值研究[J]. 激光技术, 1995, **19**(3):135~140