

# 脉冲激光测距仪雪崩光电探测器最佳工作状态和接收灵敏度研究

谭显裕

(华中精密仪器厂研究所,湖北宜都,443304)

2000年10月17日收到

**摘 要** 根据脉冲激光测距仪目前广泛应用的达通型硅雪崩光电二极管(Si-APD)的噪声谱密度,从理论和实验结果分析各种测距精度的脉冲激光测距仪,在不同脉冲宽度条件下, Si-APD 的负载电阻、接收放大器带宽、噪声等效功率、最小可探测功率以及信噪比等数据,并将其进行比较。说明保持 Si-APD 器件的最佳工作状态是提高激光测距仪的探测灵敏度和测量数据的稳定性、可靠性的重要条件。

**关键词** 脉冲激光测距仪 硅雪崩光电二极管 信噪比 灵敏度 最佳工作状态

中图分类号: TN315+.2 文献标识码: A

文章编号: 1005-488X(2001)02-0129-09

## 1 引 言

目前,脉冲激光测距仪的探测光源广泛采用“掺钕:钇铝石榴石(Nd:YAG)”为器件的脉冲光源。这类仪器的测距精度一般为 10 m、5 m,采用新技术后可达 1 m、0.5 m;测程一般为 5 km、10 km 和 20 km,最大测程可达 30 km。但是,1.06  $\mu\text{m}$  的光波易受大气中硝烟、霾、雾的影响,在传输过程中大气对激光束按指数  $\exp[2\alpha L]$  分布衰减很快。若采用 PIN 硅光电二极管探测,其噪声电平虽然可以达到  $10^{-14} \text{AH}_z^{1/2}$  量级,但系统灵敏度因受放大器热噪声电平的限制,实际只能达到  $10^{-10} \text{AH}_z^{1/2}$  量级,且无增益;如果采用 Si-APD 器件探测,因其量子效率高,具有将光信号倍增 10~100 倍的内增益,且倍增后的噪声仅与放大器本身的热噪声电平相当,从而冲破了晶体管宽带放大器制作水平的限制,大大提高了接收系统的信噪比,这是 Si-APD 器件广泛用于探测 1.06  $\mu\text{m}$  光信号的最大优点。但 Si-APD 器件在倍增过程中产生的附加噪声又成了限制信噪比进一步提高的障碍,目前仅探测  $10^{-8} \text{W}$  量级的回波光功率。因此,在接收系统获得最大信噪比条件下,如何确定 Si-APD 器件的最佳倍增因子  $M$ ,以提高仪器的光探测灵敏度和测量数据的稳定性、可靠性是本文的中心内容。

谭显裕 男,1943年生,毕业于电子科技大学,现为华中精密仪器厂高级工程师。主要从事相位激光测距仪、脉冲激光测距仪整机、电路方面的工作。研究方向为电子物理学光电子技术。

图 1 是 Si-APD 器件的伏安特性曲线,其中 450 V 是其反向工作电压的临界线。如果 Si-APD 器件要获得最大倍增因子  $M$ , 则反向工作电压应大于 420 V 而小于 450 V, 它的最佳倍增因子  $M_{opt}$  所对应的工作电压范围为  $360 \text{ V} < V_R < 420 \text{ V}$ , ( $V_R$  为最佳工作电压)。

根据参考文献[1], Si-APD 器件的光探测信噪比 (SNR) 为

$$\begin{aligned} SNR &= (MP_s \eta_e / h\nu)^2 [I_{sT} + 2eM^2 B \\ &\quad (I_{sp} + I_{lh} + I_{nd})] \\ &= (MP_s \eta_e / h\nu)^2 \{ 4kTB/R_L + 2eM^2 B \\ &\quad [\eta_e / h\nu (P_{sp} + P_{nb} + I_{nd})] \} \quad (1) \end{aligned}$$

式中,  $M$  为 Si-APD 的倍增因子;  $P_s$  为探测信号功率;  $n$  为量子效率;  $e$  为电子电荷;  $h$  为普朗克常数;  $T$  为绝对温度;  $\nu$  为激光光波频率;  $k$  为玻兹曼常数;  $B$  为接收器带宽;  $R_L$  为等效负载电阻;  $P_{sp}$  为探测器输入信号功率;  $P_{nb}$  为背景噪声功率;  $I_{nd}$  为 Si-APD 的暗电流。

当 Si-APD 器件探测  $1.06 \mu\text{m}$  脉冲激光时, 放大器噪声、背景噪声和器件的暗电流噪声为主要噪声。因此, 式(1)可简化为

$$SNR = (MP_s \eta_e / h\nu) / [4kTB/R_L + 2eM^2 B (P_{nb} \eta_e / h\nu + I_{nd})] \quad (2)$$

当  $SNR=1$  时, 由式(2)得接收器的最小可探测功率为

$$P_{rmin} = [h\nu / M \eta_e] [4kTB/R_L + 2eM^2 B (P_{nb} \eta_e / h\nu + I_{nd})]^{1/2} \quad (3)$$

当 Si-APD 器件探测  $1.06 \mu\text{m}$  脉冲激光时, 根据参考文献[2], 放大器噪声与背景噪声、器件的暗电流噪声近似相等。故式(3)可简化为

$$P_{rmin} = [(2 \times 4kTB/R_L)^{1/2} (h\nu/e)] / M \eta_e \quad (4)$$

当  $d(SNR)/dM=0$  时, 接收器的 SNR 有极大值。根据参考文献[2]可求出 Si-APD 器件的最佳倍增因子为

$$\begin{aligned} M_{opt} &= \{ [I_{sT} + 2eM^2 B (P_{nb} \eta_e / h\nu + I_{nd})] / [2eB (P_{nb} \eta_e / h\nu + I_{nb})] \}^{1/2} \\ &= \{ [4kTB/R_L] / [eB (P_{nb} \eta_e / h\nu + I_{nd})] \}^{1/2} \quad (5) \end{aligned}$$

本文采用最佳偏置电路和恒虚警率时间程序偏压控制方法, ①将国内外两种典型 Si-APD 器件(美国的 C30950E 和国内的 SPD-032)与前置放大级采用最佳阻抗匹配耦合, 大大提高了接收信号的传输, 有效降低了背景噪声和负载电阻上产生的热噪声, 加之与 Si-APD 器件封装于一体的前置放大级采用高增益集成放大器并在工艺上采用光导技术传输, 使最小可探测功率与一般前放级相比约提高一个数量级; ②视频放大器与前放级除工艺上采用紧耦合外, 在保证仪器精度和信号传输、放大的前提下, 最大限度地压缩电路带宽, 降低噪声和提高信噪比。因此, 经设计数据和实验结果分析比较得出仪器的最小可探测功率约提高 2 个数量级, 探测灵敏度提高 26.6%, 实际测程约提高 25%。

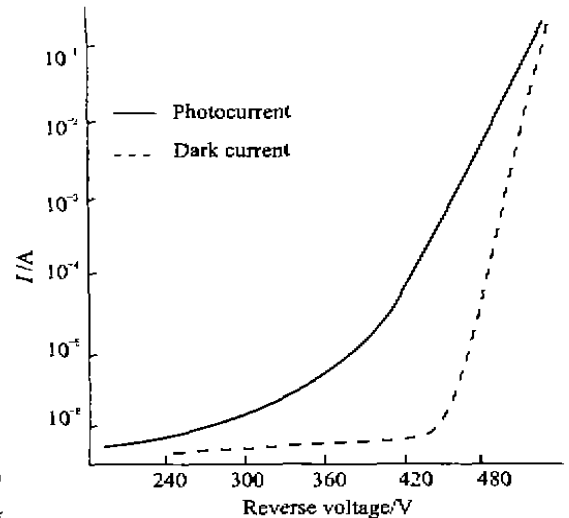


图 1 Si-APD 器件的伏安特性曲线  
Fig. 1 V-I characteristics of Si-APD devices

## 2 设计数据和实验结果分析、比较

### 2.1 Si-APD 器件对前置放大级的要求

图 2 是 Si-APD 器件的工作原理及等效电路图。图中  $I_s$  为信号电流;  $I_{nb}$  为背景噪声电流;  $I_{nd}$  为器件的暗电流;  $I_{R_L}$  为负载电阻上产生的热噪声电流;  $C_i$  为等效输入电容;  $R_L$  为等效负载电阻;  $R_i$  为前置放大级的等效输入电阻。

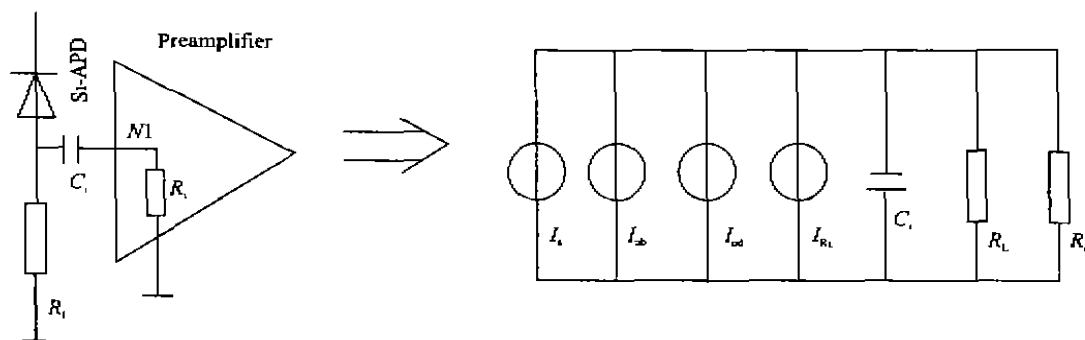


图 2 Si-APD 的工作原理及其等效电路图

Fig. 2 Operating principle and its equivalent circuit of Si-APD devices

当 Si-APD 器件接收到脉冲激光回波信号后, 经倍增放大并转换为电信号, 在  $R_L$  上产生的信号电压为  $V_s = I_s R_L$ 。显然,  $R_L$  的阻值越大, 从 Si-APD 器件上获得的信号电压就越强。但是,  $R_L$  的阻值必须满足以下要求:

#### (1) 前放级输入传输要求

传输电压比为

$$K_v = R_i / (R_i + R_L) \quad (6)$$

式中,  $R_i \gg R_L$  时,  $K_v = 1$ 。这样, 才有效地将 Si-APD 的信号传输到前放级, 故前放级的输入电阻  $R_i$  必须很高。在目前情况下, 要全面兼顾前放级的高增益、宽带宽和低噪声等综合要求很难做到。因此, 我们在前放级的前面加入一级输入阻抗高、但电压增益约为 1 的阻抗匹配级来解决信号的传输损耗, 然后由高增益、宽带宽和低噪声集成运算放大器组成视放级将信号放大。

#### (2) 前放级的低噪声要求

随着负载电阻  $R_L$  的增大, 在  $R_L$  上产生的热噪声电压也增大为

$$V_{nT} = (4kTB/R_L)^{1/2} \cdot R_L = (4kTBR_L)^{1/2} \quad (7)$$

由背景噪声电流和 Si-APD 器件中的暗电流产生的散粒噪声也随  $R_L$  增大为

$$V_{nb} + V_{nd} = [(2eM^2B(P_{nb}\eta e/h\nu + I_{nd}))^{1/2} \cdot R_L] \quad (8)$$

当  $V_{nb} + V_{nd}$  接近于  $V_{nT}$  时, 再增大  $R_L$  值不会进一步改善信噪比, 故电压信噪比的改善应服从

$$(SNR)_v = V_s / 2V_{nT} \approx I_s R_L / (2 \times 4kTBR_L)^{1/2} = I_s (R_L)^{1/2} / (8kTB)^{1/2} \quad (9)$$

## (3) 前放级的带宽要求

接收器的带宽  $B$  随  $R_L$  的增大而下降为

$$B = 1/2\pi R_L C_i \quad (10)$$

式中,  $C_i$  约为  $3.5 \text{ pF} \sim 10 \text{ pF}$ , 一般计算可取  $(3.5+10) \text{ pF}/2 = 8.5 \times 10^{-12} \text{ F}$ ,  $F$  为电容单位(法拉)。

## 2.2 接收器电路

## 2.2.1 电路带宽

在保证脉冲激光测距仪的测距精度和信号传输、放大条件下, 应尽量压缩电路的带宽, 利于降低噪声和提高信噪比。

接收器电路由前放级和视放级组成。它的等效电路和频率响应曲线分别示于图 3 和图 4。

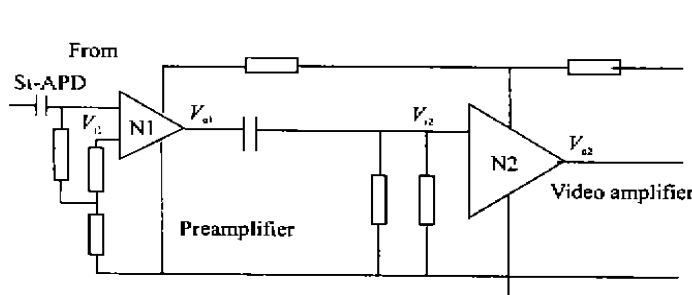


图 3 接收放大器等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of receiving amplifier

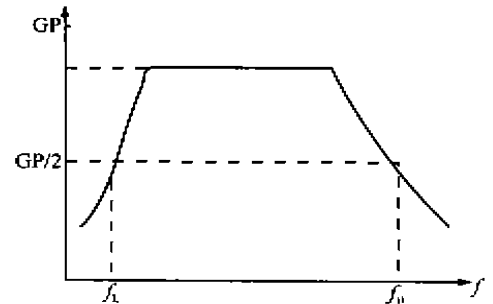


图 4 接收放大器频响特性曲线

Fig. 4 Frequency response character curve of receiving amplifier

从图中可以看出, 放大器的带宽为

$$B = f_H - f_L \quad (11)$$

式中,  $f_H$  和  $f_L$  分别取自上截止频率和下截止频率的中点即半功率 ( $GP/2$ ) 点。其中  $f_L$  主要来自低频  $1/f$  和光峰值频率  $1/f^2$  的噪声并随频率提高而增益下降, 可以忽略不计。因此, 接收放大器带宽主要由上截止频率即  $f_H$  所决定。

## 2.2.2 接收器带宽

接收器的信号带宽由探测器的频响特性和前放级的滤波性能决定, 即在保证电路带宽的条件下, 由激光脉冲宽度  $\Delta t$  和前放级的带宽  $1/2\pi R_L C_i$  决定 (与测距精度无关)。根据参考文献 [3], 对单级滤波的前放级来说, 接收器的最佳信号带宽为

$$B = 0.189/\Delta t \quad (12)$$

式中,  $\Delta t$  为激光脉冲宽度 (ns)。

由前放级和视放级组成的接收器电路, 各级带宽一般相等即  $B_1 = B_2$ 。因此, 利用总带宽计算各级带宽为

$$1/B = [(1/B_1^2) + (1/B_2^2)]^{1/2} \quad (13)$$

由式 (10)、式 (12) 和式 (13) 算出各种测距精度的脉冲激光测距仪所对应的  $\Delta t$ 、 $R_L$  和  $B$  值并与实验值比较分别列于表 1。

表 1 各种测距精度仪器对应  $\Delta t$ 、 $R_L$  和  $B$  的计算值和实验值比较Tab. 1 Comparison between the theory and experiment data of  $\Delta t$ ,  $R_L$  and  $B$  of pulsed laser rangefinders with various accuracy

Range accuracy/m	Compare	Pulse width $\Delta t/\text{ns}$	Load resistance $R_L/\text{k}\Omega$	Band width $B_1 = B_2/\text{MHz}$	Total band width $B/\text{MHz}$
	Theory data	5	0.496	53.46	37.8
	Experiment data		0.51	54.0	38.1
10	Theory data	10	0.991	26.73	18.9
	Experiment data		1.0	29.5	20.0
5	Theory data	20	1.982	13.36	9.45
	Experiment data		2.2	14.8	10.0
1	Theory data	50	4.956	5.35	3.78
	Experiment data		5.1	5.82	4.1

## 2.2.3 接收器信噪比

Si-APD 器件在最佳工作状态(最佳反偏压)下,由式(5)得最佳倍增因子  $M_{opt}$  为

$$M_{opt} = \{(4kTB/R_L)/[eB(p_{nb}\eta e/h\nu + I_{nd})]\}^{1/2} \quad (14)$$

接收器的噪声等效功率为

$$NEP = (2 \times 4kTB/R_L)^{1/2} (h\nu/e) / (M_{opt} \sqrt{3} \eta) \quad (15)$$

接收器的最小可探测功率为

$$P_{rmin} = (2 \times 4kTB/R_L)^{1/2} (h\nu/e) / (M_{opt} \eta) \quad (16)$$

接收器的信噪比为

$$SNR = 20 \lg [M_{opt}^2 P_{rmin} (\eta e/h\nu) / (2 \times 4kTB/R_L)] \quad (17)$$

当  $h\nu/e = 1.15 \text{ W/A}$ ;  $\eta = 50\%$ ;  $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ;  $k = 1.36 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ;  $p_{nb} = 5 \times 10^{-3} \text{ W}$ ;  $I_{nd} = 50 \times 10^{-9} \text{ A}$ ;  $T = 300 \text{ K}$ ;  $B$  分别为 37.8 MHz、18.9 MHz、9.45 MHz 和 3.78 MHz;  $R_L$  分别为 0.496 k $\Omega$ 、0.991 k $\Omega$ 、1.982 k $\Omega$  和 4.956 k $\Omega$  时,在最佳工作状态下由式(14)~式(17)计算出 Si-APD 器件的  $M_{opt}$  值和接收器的  $NEP$ 、 $P_{rmin}$  和  $SNR$  值并与实验值比较分别列于表 2。

表 2 在最佳( $M_{opt}$ )状态下,接收器的  $NEP$ 、 $P_{rmin}$  和  $SNR$  值与实验值比较Tab. 2  $NEP$ ,  $P_{rmin}$  and  $SNR$  of receiver compared with experiment data under optimum  $M_{opt}$  status

V/V	Compare	$M_{opt}$	$R_L$ /k $\Omega$	$B$ /MHz	$NEP$ /WHz <sup>1/2</sup>	$P_{rmin}$ /W	$SNR$ /dB
380±10	Theory data	Around 76	0.496	37.8	$8.0 \times 10^{-11}$	$2.4 \times 10^{-10}$	Around 25
	Experiment data	76~78	0.51	38.1	$7.6 \times 10^{-11}$	$2.2 \times 10^{-10}$	25~26
380±10	Theory data	Around 76	0.991	18.9	$1.6 \times 10^{-10}$	$2.8 \times 10^{-10}$	Around 25
	Experiment data	76~78	1.2	20.0	$1.2 \times 10^{-10}$	$2.4 \times 10^{-10}$	25~26
380±10	Theory data	Around 76	1.982	9.45	$8.0 \times 10^{-10}$	$1.4 \times 10^{-9}$	Around 25
	Experiment data	76~78	2.2	10.0	$7.1 \times 10^{-10}$	$1.1 \times 10^{-9}$	25~26
380±10	Theory data	Around 76	4.956	3.78	$1.4 \times 10^{-9}$	$1.1 \times 10^{-9}$	Around 25
	Experiment data	76~78	5.1	4.1	$1.1 \times 10^{-9}$	$1.0 \times 10^{-9}$	25~26

图 5 是 Si-APD 器件在最佳工作状态下的接收器电路的结构框图。它采用恒虚警率偏压控制方法,由时间程序控制电路去控制前放级与视放级及 Si-APD 器件的偏压,使其同步

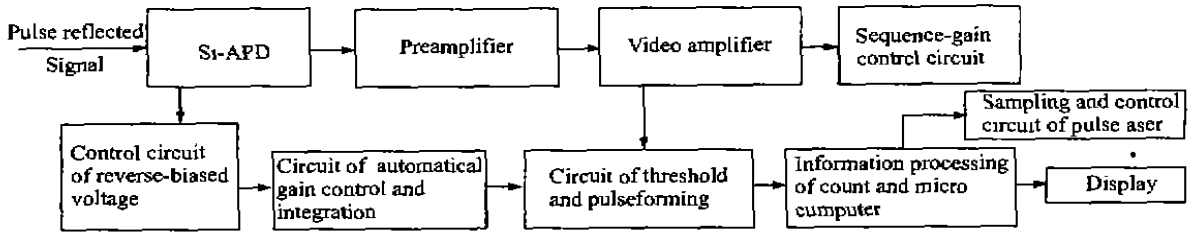


图 5 Si-APD 器件在最佳工作状态下的接收器结构框图

Fig. 5 Receiver's structure drawing of Si-APD devices under optimum operating status

工作。当倍增因子  $M$  随温度变化其噪声超过阈值时,经积分器与参考电平比较,自动调整和控制偏压。接收器中视频放大级的输出信号经脉冲成形电路整形后输给计数和微计算机电路、与取样器的起始脉冲信号比较,解算出距离,最后由显示器和打印机将距离显示和打印出来。

### 2.3 接收器的探测灵敏度

接收器的探测灵敏度与脉冲激光测距仪系统密切相关,而仪器系统的灵敏度  $S$  就是对目标的测距能力,根据参考文献[4]可在测距公式基础上用常用对数再乘以 10 表示为

$$S = 10 \lg [P_i K_t / (P_{\min} / A_r K_r)] \\ = 10 \lg \{ (\pi L_{\max}^2 / \rho) \exp(2\alpha L_{\max}) \} [\pi \theta^2 L_{\max}^2 / 4A] \quad (18)$$

式中,右边上式是脉冲激光测距仪的内部参数,直接决定其灵敏度,与外部条件无关;右边下式是激光测距仪对小目标的测距能力; $P_i$  为激光发射功率; $K_t$  为发射光学系统的透射率; $A_r$  为接收器的有效接收面积; $K_r$  为接收光学系统的透射率; $L_{\max}$  为最大测距能力; $\rho$  为目标的反射系数; $\alpha$  为大气衰减系数; $A$  为目标面积; $\theta = \theta_r / \theta_s$ 。

当脉冲激光测距仪对近距离  $L_0 = 500$  m 和大目标 ( $A > A_r, A > A_t$ ) 靶(靶面反射系数  $\rho_0 > 85\%$ , 大气衰减系数  $\alpha_0$  可忽略不计)测距,并在其发射窗前插入  $N$ (dB) 衰减片达到“测距临界状态”时的消光比测试,则式(18)右下式可以省去  $\pi \theta^2 L_{\max}^2 / 4A$  后并变换为

$$S = 10 \lg [(\pi L_{\max}^2 / \rho) \exp(2\alpha L_{\max})] \\ = 10 \lg [M(\pi L_0^2 / \rho_0) \exp(2\alpha_0 L_0)] \\ = 10 \lg M + 10 \lg(\pi L_0^2 / \rho_0) + 10 \lg \exp(2\alpha_0 L_0) \\ \doteq N(\text{dB}) \quad (19)$$

式中, $N$ (dB) 是插入脉冲激光测距仪发射窗前衰减片的分贝值。

因此,接收器的最小可探测功率可由式(18)右上式和式(19)变换得

$$P_{\min} = P_i K_t A_r K_r / N(\text{dB}) \quad (20)$$

式中,在激光测距仪的  $P_i, K_t, A_r$  和  $K_r$  为固定值条件下测试时, $P_{\min}$  与  $N$ (dB) 值成反比。

### 2.4 实验结果

#### 2.4.1 标准接收器和标准仪器的选用

标准接收器: 为保证测试和计算数据准确, 便于比较, 按表 1 和表 2 分别选用脉冲宽度为 5 ns, 10 ns, 20 ns 和 50 ns 的接收器各 2 组, 代号分别为 A1 和 A2, B1 和 B2, C1 和 C2, D1 和 D2。

标准仪器: 根据仪器的设计要求, 选用 W, X, Y, Z 各 2 台脉冲激光测距仪, 在能见度  $v$  均为 18 km 条件下, 对  $\rho=0.08$  的  $2.3 \text{ m} \times 2.3 \text{ m}$  军绿色目标测距, 最大测距能力为 5 km,  $\theta_t=1 \text{ mrad}$ ,  $\theta_r=0.8 \text{ mrad}$ ; 脉冲宽度分别为 5 ns, 10 ns, 20 ns 和 50 ns。

#### 2.4.2 Si-APD 器件在最佳工作状态下测距仪的灵敏度计算

将上述脉冲激光测距仪的设计指标(测距精度除外)代入式(18)右边下式计算其灵敏度为

$$S_w = S_x = S_y = S_z = 40.20 \text{ dB} \quad (21)$$

#### 2.4.3 最小可探测功率 $P_{\min}$ 和灵敏度 $S$ 测试

测试系统如图 6 所示, 由脉冲激光测距仪、被测目标、 $N(\text{dB})$  衰减片以及发射、接收光路组成。

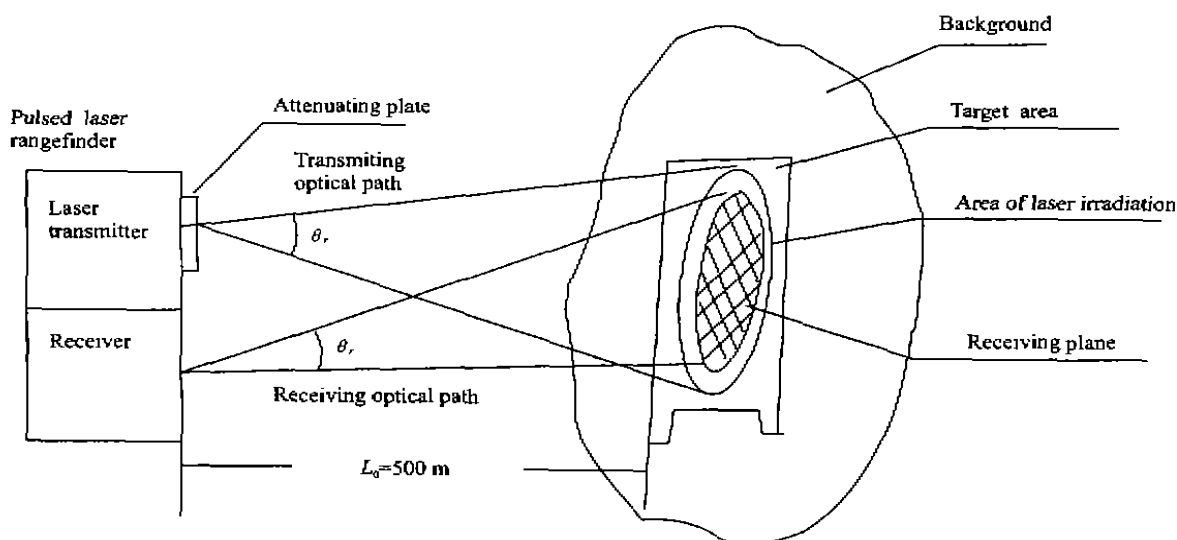


图 6 脉冲激光测距仪  $P_{\min}$  和  $S$  的测试系统

Fig. 6 Test system of  $P_{\min}$  and  $S$  for pulsed laser rangefinders

测试方法: 最小可探测功率  $P_{\min}$  和灵敏度  $S$  的测试可以同时进行并按图 6 测试。测试时, W, X, Y, Z 各两台脉冲激光测距仪中的接收组件均不更换(因对应于 W, X, Y 和 Z 仪器的 A1 和 A2, B1 和 B2, C1 和 C2, D1 和 D2 等组件均为标准组件), 只调整 Si-APD 的偏压值。

测试条件: 将 Si-APD 器件的工作偏压分别调至 300 V, 350 V, 380 V, 410 V 和 460 V 各档测试, 实验测试数据分别列于表 3。

表 3 接收器最小可探测功率和测距仪灵敏度的实测数据

Tab. 3  $P_{rmin}$  of receiver and experiment data of sensitivity of rangefinders

Bias/V	300		350		380		410		460	
	$P_{rmin}$ /W	S dB	$P_{rmin}$ /W	S dB	$P_{rmin}$ /W	S dB	$P_{rmin}$ /W	S dB	$P_{rmin}$ /W	S dB
A1	$1.0 \times 10^{-8}$	30.7	$5.0 \times 10^{-10}$	36.72	$2.48 \times 10^{-10}$	42.35	$6.2 \times 10^{-10}$	35.8	$2.5 \times 10^{-7}$	25.35
W A2	$1.5 \times 10^{-8}$	31.2	$5.2 \times 10^{-10}$	35.8	$2.5 \times 10^{-10}$	41.84	$6.8 \times 10^{-10}$	36.01	$1.9 \times 10^{-7}$	24.84
Average	$1.25 \times 10^{-8}$	30.9	$5.1 \times 10^{-10}$	36.26	$2.49 \times 10^{-10}$	42.09	$6.5 \times 10^{-10}$	35.9	$2.2 \times 10^{-7}$	25.09
B1	$3.4 \times 10^{-8}$	32.01	$1.06 \times 10^{-9}$	35.4	$2.85 \times 10^{-10}$	41.96	$2.4 \times 10^{-9}$	35.32	$5.1 \times 10^{-7}$	25.7
X B2	$2.9 \times 10^{-8}$	30.5	$1.2 \times 10^{-9}$	36.57	$3.0 \times 10^{-10}$	42.04	$2.3 \times 10^{-9}$	35.21	$5.4 \times 10^{-7}$	24.9
Average	$3.15 \times 10^{-8}$	31.25	$1.13 \times 10^{-9}$	35.99	$2.93 \times 10^{-10}$	42.02	$2.35 \times 10^{-9}$	35.26	$5.3 \times 10^{-7}$	25.3
C1	$2.5 \times 10^{-7}$	30.87	$5.8 \times 10^{-9}$	34.84	$1.5 \times 10^{-9}$	41.78	$7.1 \times 10^{-9}$	35.12	$5.6 \times 10^{-6}$	25.25
Y C2	$1.99 \times 10^{-7}$	30.96	$5.46 \times 10^{-9}$	36.9	$1.53 \times 10^{-9}$	42.27	$7.2 \times 10^{-9}$	35.02	$5.9 \times 10^{-6}$	24.78
Average	$2.25 \times 10^{-7}$	30.91	$5.63 \times 10^{-9}$	35.87	$1.52 \times 10^{-9}$	42.03	$7.15 \times 10^{-9}$	35.07	$5.8 \times 10^{-6}$	25.01
D1	$9.6 \times 10^{-7}$	31.24	$2.84 \times 10^{-8}$	35.02	$1.0 \times 10^{-9}$	42.26	$3.9 \times 10^{-8}$	35.24	$11 \times 10^{-6}$	25.11
Z D2	$10 \times 10^{-7}$	30.52	$3.7 \times 10^{-8}$	36.8	$1.0 \times 10^{-9}$	42.01	$4.1 \times 10^{-8}$	35.09	$12.5 \times 10^{-6}$	25.03
Average	$9.8 \times 10^{-7}$	30.88	$3.27 \times 10^{-8}$	35.91	$1.0 \times 10^{-9}$	42.13	$4.0 \times 10^{-8}$	35.16	$11.8 \times 10^{-6}$	25.07

#### 2.4.4 实验数据和计算数据比较、分析

从表 2 和表 3 可以看出, Si-APD 器件在最佳偏压工作状态下,  $P_{rmin}$  的实验测试数据和计算数据均很接近, 误差可以忽略不计。又从表 3 实测数据看出: ①当 Si-APD 器件工作于最佳(380 V)状态时, 仪器的灵敏度与计算结果很接近, 误差在 2 dB 内; ②当 Si-APD 器件的反偏压调整低于最佳工作(380 V)时, 因倍增因子  $M$  下降,  $P_{rmin}$  值和  $S$  值也随之减小, 当偏压调降到 300 V 时,  $P_{rmin}$  约减少 2 个数量级, 仪器的灵敏度下降了 26.6%, 实际测距能力下降了 25%; ③当 Si-APD 器件的反偏压调整高于最佳工作电压(380 V)时, 虽然 Si-APD 的倍增因子  $M$  提高了, 但器件的暗电流噪声也随之增大, 结果  $P_{rmin}$  值和  $S$  值比低于最佳偏压下工作时下降得还快。当偏压调升到 460 V 时, 根据图 1 示的伏安特性曲线, Si-APD 器件工作于级限高偏压状态, 器件的暗电流噪声几乎直线上升, 结果  $P_{rmin}$  约下降 3 个数量级, 仪器灵敏度  $S$  下降了 40%, 实际测距能力下降低于 40%。

### 3 讨 论

从表 1 看出, Si-APD 器件的负载电阻  $R_L$  随测距仪的激光脉冲宽度增宽而提高, 接收器带宽随脉冲宽度增宽而下降, 且提高值和下降值均成比例; 又从表 2 和表 3 看出, Si-APD 器件在最佳偏压工作状态下, 倍增因子  $M$  达到最佳  $M_{opt}$  值时, 噪声等效功率  $NEP$ 、最小可探测功率  $P_{rmin}$  和灵敏度  $S$  随仪器的激光脉冲宽度增宽有规律地减小, 但信噪比  $SNR$  变化较小, 这说明 Si-APD 器件处于最佳工作状态是决定脉冲激光测距仪的测距稳定性和可靠性的重要条件。为此, 对激光测距仪的接收器提出以下要求:

(1) Si-APD 器件不仅要调整处于最佳工作状态, 器件本身还要具有探测灵敏度高、光谱响应范围宽、响应速度快、暗电流低等特点, 而且量子噪声在 50% 以上, 倍增因子  $M$  的范围在 10~120, 工作温度在  $-40 \sim 70$  C 范围内;

(2) 对前放级和视放级中的主要元件应设计采用输入阻抗高、增益高、噪声低和频带宽,

并且动态范围大的集成运算放大器,用恒虚警率偏压控制,与 Si-APD 器件同步工作,以满足各种脉冲激光测距仪的激光脉冲宽度要求:

(3)接收器应具有较高的分辨精度,从假目标回波信号中识别真实目标的回波信号;还应具有自动增益控制功能,在最小测程时,定时脉冲增益(TPG)电路应能控制到最小,且随测程增大增益提高,但最大增益还应保持恒定的虚警率,使 Si-APD 器件始终处于最佳工作状态,接收信噪比和探测灵敏度为最佳值。

#### 参 考 文 献

- 1 张承铨,刘松明,彭长华等.国外军用激光仪器手册.兵器工业出版社,北京,1989:1~21
- 2 兰信钜,黄国标,张渝楠等.激光技术.湖南科学技术出版社,长沙,1983:56~82
- 3 Robert W·Byren,Laser rangefinders,IR/Eo hand book.Hughes aircraft company,El Segunda,California,1993:79~108
- 4 谭显裕.脉冲激光测距仪灵敏度与消气比研究,电子科学学刊,1995,17(2):154~160

## Research on Optimum Operating Condition and Receiving Sensitivity of Avalanche Photodetectors for Pulsed Laser Rangefinders

Tan Xianyu

(Huazhong Institute of Precision Instrument Factory, Yidu, Hubei, 443304)

**Abstract** The channel type Si-APD devices were widely used in the equipments of pulsed laser rangefinder at present. The theoretical and experimental parameters, such as load resistance of APD, bandwidth of receiver, noise equivalent power, minimum detectable power and signal-to-noise ratio about pulse laser rangefinder of various range precision, were analyzed and compared under different conditions of pulse width. As a result, keeping up optimum operating condition of Si-APD devices is an important factor to improve the stability and reliability of the detecting sensitivity and measuring results of the laser rangefinder.

**Key words** pulsed laser rangefinder, Si-APD, SNR, sensitivity, optimum operating condition