

脉冲激光测距仪光电探测器最佳

⑦ 工作状态下的接收灵敏度研究

谭显裕

(华中精密仪器厂 枝城 443304)

TN365

34-44

A 文摘: 本文根据脉冲激光测距仪和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,从理论和实验结果计算、分析出各类测距精度的脉冲激光测距仪在相同脉冲宽度条件下, Si-APD 的负载电阻、接收器带宽、噪声等效功率、最小可探测功率和信噪比的数据并进行了比较。说明保持 Si-APD 处于最佳工作状态是提高仪器的探测灵敏度和测量数据的稳定性、可靠性的重要条件。

主题词 脉冲激光测距仪 硅-雪崩光电二极管 信噪比 灵敏度

STUDY OF RECEIVING SENSITIVITY OF PHOTODETECTOR FOR PULSED LASER RANGEFINDER AT OPTIMUM OPERATING STATE

Tan Xianyu

(Huazhong Precision Instrument Factory Zhicheng 443304)

Abstract: In this paper, several noise sources have been analyzed on the basis of theory of noise spectrum density of Reach-through Si-avalanche photodiode(APD) and signal-noise-rate(SNR). Minimum detecting power of Si-APD has been set out and optimum multiplication factor at optimum operating state has been determined. Through the analysis and comparison of experimental results, the load resistance of Si-APD, receiver bandwidth, noise-equivalent power, minimum detecting power and signal-noise-rate of several pulsed laser rangefinders with range accuracy have been computed under the same pulse

收稿日期: 1993年11月,退修稿返回日期1994年4月

width condition. It is proved that keeping Si-APD at optimum operating state is an important condition for increase in detection sensitivity of the instrument, stability, and reliability of measured data.

Keywords Pulsed laser rangefinder Si-Avalanche Photodiode
Optimum operating state Signal noise rate

1 引言

目前国内外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 10m 和 5m, 采用新技术后可达 1m 和 0.15m; 测程一般为 5km、10km、20km, 最大测程可达 30km。但是, 1.06μm 波长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光束的衰减很快。若采用 PIN 硅光电二极管探测, 其噪声电平虽然可以达 $10^{14}\text{AHZ}^{-1/2}$ 量级, 但其灵敏度因受放大器热噪声电平的限制, 实际只能达到 $10^{10}\text{AHZ}^{-1/2}$ 量级, 且无增益; 若采用 Si-APD 探测, 因其量子效率高, 具有将光信号倍增 10~100 倍的内增益, 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 1.06μm 波长 YAG 脉冲激光测距仪光信号的最大优点。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, 即 Si-APD 器件目前距探测到的回波功率在 10^{-8}W 量级。因此, 在仪器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及测量数据的稳定性、可靠性是本文研究的中心内容。

图 1 是 Si-APD 器件的伏安特性曲线, 其中 $15V_0(V_0=30\text{V})$ 是 Si-APD 器件反向工作电压的临界线。若 Si-APD 器件要获得最大倍增因子 M , 反向工作电压应大于 $14V_0$, 而小于 $15V_0$, 它的最佳倍增因子 M_{opt} 所对应的工作电压范围为 $12V_0 < V_R < 14V_0$ (V_R 为最佳工作电压)。因此, 根据参考文献 [1], Si-APD 器件的光探测信噪比为:

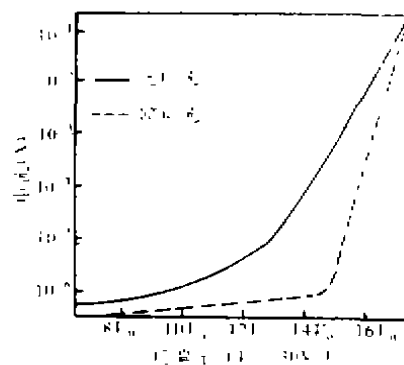


图 1 Si-APD 器件的伏安特性曲线

$$SNR = \frac{(MP_0 \eta e \cdot h\nu)^2}{[I_{\text{nt}}^2 + 2eM^2 B(P_{\text{ab}} \eta e / h\nu + I_{\text{nd}})]} \quad (1)$$

当 $SNR=1$ 时, 接收器的最小可探测功率为:

$$P_{r \min} = \frac{\left[I_{nT}^2 + 2eM^2 B(P_{nb} \eta e / hv + I_{nd}) \right]^{1/2}}{(M \eta e / hv)} = \frac{(2 \times 4kTB / R_L)^{1/2} (hv / e)}{M \eta} \quad (2)$$

当 $d(SNR)/dM=0$ 时, 根据参考文献〔2〕可求出 Si-APD 器件的最佳倍增因子为:

$$M_{opt} = \left\{ \frac{I_{nT}^2 + 2eM^2 B(P_{nb} \eta e / hv + I_{nd})}{2eB(P_{nb} \eta e / hv + I_{nd})} \right\}^{1/2} = \left\{ \frac{(4kTB / R_L)}{[eB(P_{nb} \eta e / hv + I_{nd})]} \right\}^{1/2} \quad (3)$$

本文对国内外两种典型 Si-APD 器件, 即美国 C30950E 和国内 SPD-032, 采用最佳偏置电路设计。由设计数据和实验结果分析比较出仪器的最小可探测功率约提高两个数量级, 探测灵敏度提高 26.6%, 实际测程约提高 25%。

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 器件的工作原理及其等效电路图。图中 I_s 为信号电流; I_{nb} 为背景噪声电流; I_{nd} 为 Si-APD 器件本身的暗电流; I_{RL} 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。

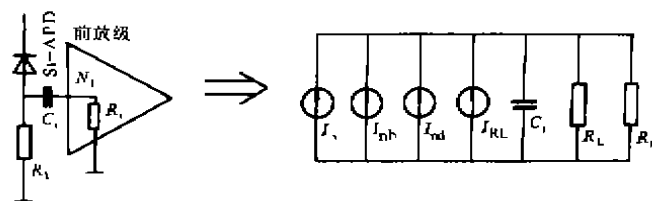


图 2 Si-APD 的工作原理及其等效电路图

当 Si-APD 器件接收到脉冲激光回波信号后, 经倍增放大并转换成电信号, 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) 前置放大级输入传输要求

输入传输电压比为:

$$K_v = R_i / (R_i + R_L) \quad (4)$$

式中, 当 $R_i \gg R_L$ 时, $K_v = 1$ 。这样, 才有效地将 Si-APD 器件的信号传输到前放级。因此, 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 1m 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频放大级将信号放大。

(2) 前置放大级的低噪声要求

随着负载电阻 R_L 的增大, 在 R_L 上产生的热噪声电压也随之增大为:

$$V_{nT} = (4kTB / R_L)^{1/2} R_L = (4kTBR_L)^{1/2} \quad (5)$$

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:

$$V_{nb} + V_{nd} = \left[2eM^2 B \left(\frac{P_{nb} \eta e}{h\nu + I_{nd}} \right) \right]^{1/2} R_L \quad (6)$$

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。因此, 电压信噪比的改善应服从:

$$\begin{aligned} (SNR)_v &= \frac{V_s}{2V_{nT}} \\ &= \frac{I_s R_L}{(2 \times 4kTBR_L)^{1/2}} \\ &= \frac{I_s (R_L)^{1/2}}{(8kTB)^{1/2}} \end{aligned} \quad (7)$$

(3) 前置放大级的带宽要求

接收器的带宽 B 随 R_L 的增大而下降为:

$$B = \frac{1}{(2\pi R_L C_i)} \quad (8)$$

式中, C_i 约为 3.5~10pF。

带宽 B 主要由仪器的脉冲宽度和测距精度确定, 若精度为 ΔL 、脉冲宽度为 Δt 、接收器的脉冲上升时间为 t_r , 则:

$$t_r = \frac{0.35}{B} \leq \frac{2\Delta L}{\Delta t} \quad \left(\text{或 } B \geq \frac{0.35\Delta t}{2\Delta L} \right) \quad (9)$$

式中 Δt ——激光脉冲宽度, 且 $\Delta t = 5 \text{ ns} = 5 \times 10^{-9}$;

将公式 (8) 代入公式 (9) 得:

$$R_1 C_1 \leq \frac{\Delta L}{(0.35\pi\Delta t)} \quad (10)$$

将 $\Delta t = 1 \times \Delta t$, $C_1 = (3.5 + 10)^{-2} = 8.5 \times 10^{-12} \text{ F}$ 代入公式 (10) 得 Si-APD 器件的等效负载电阻值:

$$\begin{aligned} R_1 &\leq \frac{\Delta L \Delta t}{(0.35\pi C_1)} = \frac{5 \times 10^{-9} \Delta L}{(0.35 \times 3.14 \times 8.5 \times 10^{-12})} \\ &\approx 0.535 \times 10^3 \Delta L (\Omega) \end{aligned} \quad (11)$$

2.2 视频放大器电路

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、放大的条件下, 应尽量压缩电路的带宽, 利于降低其噪声和提高其信噪比。

视频放大器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。从图中可以看出, 放大器的带宽为:

$$B = f_H - f_L \quad (12)$$

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, 它们随频率的提高而增益下降, 可以忽略不计, 因此, 视频放大器的带宽则主要由上截止频率, 即 f_H 决定。

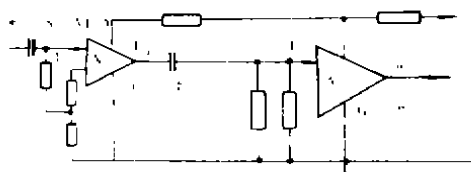


图3 视频放大器等效电路

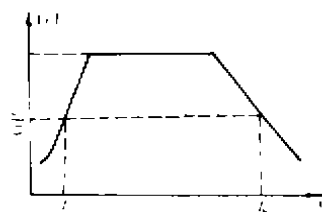


图4 视频放大器频率特性曲线

由图可以看出, 视频放大器的电压下降时间 t_r 大于或等于其上升的时间 t_f , 即 $t_f \geq t_r$ 。因此, 由公式 (9) 得:

$$t_r B = 0.35 \quad t_f B \geq 0.35 \quad (13)$$

则视频放大器的总带宽为:

$$B \geq \frac{0.35 \Delta f}{2 \Delta L} = \frac{0.35}{\Delta t / 2 \Delta L} \quad (14)$$

式中 $\Delta f = 1 / \Delta t$ 。

由前放级和视频级组成的视频放大器, 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的计算式为:

$$\frac{1}{B} = \left(\frac{1}{B_1^2} + \frac{1}{B_2^2} \right)^{1/2} \quad (15)$$

由公式 (11)、(14) 和 (15) 算出不同测距精度的脉冲激光测距仪所对应的 Δt 、 R_L 和 B 值列于表 1。

表 1 仪器测距精度 ΔL 对应 Δt 、 R_L 和 B 值

测距精度 $\Delta L(m)$	脉冲宽度 $\Delta t(ns)$	负载电阻 $R_L(k\Omega)$	各级带宽 $B_1 = B_2(MHz)$	总带宽 $B(MHz)$
10	5	≤ 5.35	> 4.9	> 3.5
5	5	≤ 2.68	> 10	> 7
1	5	≤ 0.535	> 49.5	> 35
0.15	5	≤ 0.08	> 329.5	> 233

2.2.2 电路信噪比

Si-APD 器件在最佳工作状态 (最佳反偏压) 下, 由公式 (3) 得最佳倍增因子为:

$$M_{opt} = \left\{ \frac{(4kTB / R_L)}{[eB(P_{nb} \eta e^{-h\nu} + I_{nd})]} \right\}^{1/2} \quad (16)$$

接收器的等效噪声功率为:

$$NEP = \frac{(2 \times 4kTB / R_L)^{1/2} (hv / e)}{(M_{opt} \eta \sqrt{3})} \quad (17)$$

接收器的最小可探测功率为:

$$P_{r \min} = \frac{(2 \times 4kTB / R_L)^{1/2} (hv / e)}{(M_{opt} \eta)} \quad (18)$$

接收器的信噪比为:

$$SNR = 20 \lg \left[\frac{M_{opt}^2 P_{r \min}^2 (\eta e / hv)}{(2 \times 4kTB / R_L)} \right] \quad (19)$$

当 $hv / e = 1.15 \text{ W/A}$; $\eta = 50\%$; $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$; $k = 1.36 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; $P_{nb} = 5 \times 10^{-3} \text{ W}$; $I_{nd} = 50 \times 10^{-9} \text{ A}$; $T = 300 \text{ K}$; B 分别为 3.5 MHz 、 7 MHz 、 35 MHz 和 233 MHz ; R_L 分别为 $5.35 \text{ k}\Omega$ 、 $2.68 \text{ k}\Omega$ 、 $0.535 \text{ k}\Omega$ 和 $0.08 \text{ k}\Omega$ 时, 在最佳工作状态下, 由公式 (16) ~ (19) 计算 Si-APD 器件的 M_{opt} 值和接收器的 NEP , $P_{r \min}$ 及 SNR 值分别列于表 2。

表 2 在最佳(M_{opt})状态下, 接收器的 NEP 、 $P_{r \min}$ 和 SNR 值

偏 压 (V)	M_{opt} (倍)	R_L ($\text{k}\Omega$)	B (MHz)	NEP ($\text{WHz}^{1/2}$)	$P_{r \min}$ (W)	SNR (dB)
380 ± 10	约 76	5.35	3.5	8.0×10^{-11}	1.4×10^{-10}	7.1
380 ± 10	约 76	2.68	7	1.6×10^{-10}	2.8×10^{-10}	7.3
380 ± 10	约 76	0.535	35	8.0×10^{-10}	1.4×10^{-9}	7.3
380 ± 10	约 76	0.08	233	5.4×10^{-9}	9×10^{-9}	6.6

图 5 是 Si-APD 器件在最佳工作状态下的接收器电路结构框图。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, 使之同步工作。当倍增因子 M 随温度变化而噪声电平超过阈值电平时, 经积分器与参考电平比较, 自动调整和控制偏压。视频放大器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, 最后由显示器将距离显示出来。

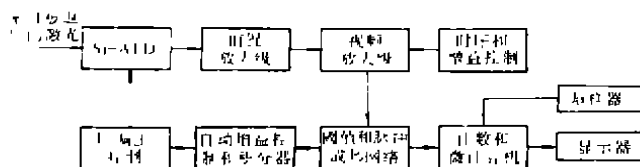


图5 Si-APD器件在最佳工作状态下的接收器结构框图

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。而仪器系统的探测灵敏度 S 就是对目标的测距能力，它可以在测距公式的基础上用常用对数再乘以 10 表示为：

$$S = 10 \lg \left[\frac{P_t K_t}{(P_{r \min} / A_r K_r)} \right]$$

$$= 10 \lg \left\{ \left[\left(\frac{\pi L_{\max}^2}{\rho} \right) e^{2\alpha L_{\max}} \right] \left[\frac{\pi \theta^2 L_{\max}^2}{4A} \right] \right\} \quad (20)$$

式中 左边——脉冲激光测距仪系统的内部参数直接决定其探测灵敏度,与外部条件无关;

右边——仪器系统对小目标的测距能力;

P_t ——激光发射功率;

K_t ——发射光学系统的透射率;

A_r ——接收器的接收视场面积;

K_r ——接收光学系统的透射率;

$L_{\max}$ ——最大测距能力;

ρ ——目标的反射系数;

α ——大气衰减系数 ($\alpha = 2.7 / V$ (V 为能见距离));

$\theta = \theta_r / \theta_t$;

A ——目标面积。

由公式 (20) 得脉冲激光测距仪系统内部的探测灵敏度为:

$$S = 10(\lg P_t + \lg K_t + \lg A_r + \lg K_r - \lg P_{r \min}) \quad (21)$$

式中 P_t 、 K_t 、 A_r 和 K_r ——固定值的条件下,如 $P_{r \min}$ 值越小,则脉冲激光测距仪系统内部的探测灵敏度就越高。

又由公式 (20) 得脉冲激光测距仪系统对小目标的测距能力为:

$$S = 10 \lg \left\{ \left[\left(\frac{\pi L_{\max}^2}{\rho} \right) e^{2\alpha L_{\max}} \right] \left[\frac{\pi \theta^2 L_{\max}^2}{4A} \right] \right\} \quad (22)$$

当脉冲激光测距仪系统对近距离 $L_0=500\text{m}$ 和大目标 ($A>A_t$, $A>A_l$) 靶 (靶面反射系数为 $\rho_0>0.85$ 、大气衰减系数 α_0 可忽略不计) 测距, 并在其发射窗前插入 $M(\text{dB})$ 衰减片达到“测距临界状态”时的消光比方法测试, 则公式 (22) 可以省去 $\pi\theta^2 L_{\max}^2/4A$, 并变换为:

$$\begin{aligned} S &= 10 \lg \left[\left(\frac{\pi L_{\max}^2}{\rho} \right) e^{-2\gamma L_{\max}} \right] \\ &= 10 \lg \left[M \left(\frac{\pi L_0^2}{\rho_0} \right) e^{-2\gamma_0 L_0} \right] \\ &= 10 \lg M + 10 \lg \left(\frac{\pi L_0^2}{\rho_0} \right) + 10 \lg e^{-2\gamma_0 L_0} \\ &\doteq 10 \lg M \end{aligned} \quad (23)$$

式中 M ——脉冲激光测距仪系统在其发射窗前加的衰减片分贝值。

因此, 接收器的最小可探测功率可以由公式 (21) 和公式 (23) 变换为:

$$P_{r \min} = \frac{P_t K_t A_r K_r}{M(\text{dB})} \quad (24)$$

式中, 在仪器系统的 P_t 、 K_t 、 A_r 和 K_r 为固定值条件下测试时, 接收器的最小可探测功率 $P_{r \min}$ 与 $M(\text{dB})$ 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

标准接收器选用: 为保证测试和计算数据准确, 便于比较, 按表 1 和表 2 分别选用测距精度 ΔL 为 10m、5m、1m 和 0.15m 的接收器各两组, 代号分别为 A_1 和 A_2 、 B_1 和 B_2 、 C_1 和 C_2 、 D_1 和 D_2 。

标准仪器选用: 根据仪器的系统设计要求, 适用 W、X、Y、Z 各两台脉冲激光测距仪, 在能见距离 r 均匀 18km 条件下, 对 $\rho=0.08$ 的 $2.3\text{m} \times 2.3\text{m}$ 军绿色坦克测距, 最大测距能力为 5km, $\theta_l=1\text{mrad}$, $\theta_t=0.8\text{mrad}$; 测距精度 ΔL 分别为 10m、5m、1m 和 0.15m。

2.4.2 Si-APD 器件在最佳工作状态下仪器系统的探测灵敏度计算

将上述脉冲激光测距仪的设计指标 (测距精度 ΔL 除外) 代入公式 (22) 计算出它们的探测灵敏度为:

$$S_w = S_x = S_y = S_z = 40.20(\text{dB}) \quad (25)$$

2.4.3 最小可探测功率 $P_{r \min}$ 和探测灵敏度 S 测试

测试示意图如图6所示。它由脉冲激光测距仪,被测目标, $M(\text{dB})$ 衰减片以及发射、接收光路组成。

测试方法:最小可探测功率 $P_{r \min}$ 和探测灵敏度 S 测试可以同时进行,按图6所示示意图测试。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仪器的 A_1 和 A_2 组件、对应于X仪器的 B_1 和 B_2 组件、对应于Y仪器的 C_1 和 C_2 组件、对应于Z仪器的 D_1 和 D_2 组件均为标准组件),仅调整光电探测器Si-APD的偏压值。

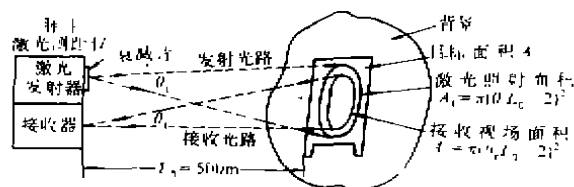


图6 脉冲激光测距仪 $P_{\min}$ 和 S 测试示意图

测试条件:将Si-APD器件的工作偏压 V 分别调到300V、350V、380V、410V和460V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探测灵敏度的实测数据

类别	偏压(V)	300		350		380		410		460	
	$P_{r \min}$ (W)	$P_{r \min}$	S	$P_{r \min}$	S	$P_{r \min}$	S	$P_{r \min}$	S	$P_{r \min}$	S
	SidB1										
W	A ₁	1.0×10^{-8}	30.7	5.0×10^{-10}	36.72	1.48×10^{-10}	42.35	6.2×10^{-10}	35.8	2.5×10^{-7}	25.35
	A ₂	1.5×10^{-8}	31.2	5.2×10^{-10}	35.8	1.5×10^{-10}	41.84	6.8×10^{-10}	36.01	1.9×10^{-7}	24.84
	平均	1.25×10^{-8}	30.9	5.1×10^{-10}	36.26	1.49×10^{-10}	42.09	6.5×10^{-10}	35.9	2.2×10^{-7}	25.09
X	B ₁	3.4×10^{-9}	32.01	1.06×10^{-9}	35.4	2.85×10^{-10}	41.96	2.4×10^{-9}	35.32	5.1×10^{-7}	25.7
	B ₂	2.9×10^{-9}	30.5	1.2×10^{-9}	36.57	3.0×10^{-10}	42.04	2.3×10^{-9}	35.21	5.4×10^{-7}	24.9
	平均	3.15×10^{-9}	31.25	1.13×10^{-9}	35.99	2.93×10^{-10}	42.02	2.35×10^{-9}	35.26	5.3×10^{-7}	25.3
Y	C ₁	2.5×10^{-7}	30.87	5.8×10^{-10}	34.84	1.5×10^{-10}	41.78	7.1×10^{-9}	35.12	5.6×10^{-6}	25.25
	C ₂	1.99×10^{-7}	30.96	5.46×10^{-10}	36.9	1.53×10^{-10}	42.27	7.2×10^{-9}	35.02	5.9×10^{-6}	24.78
	平均	2.25×10^{-7}	30.91	5.63×10^{-10}	35.87	1.52×10^{-10}	42.03	7.15×10^{-9}	35.07	5.8×10^{-6}	25.01
Z	D ₁	9.6×10^{-7}	31.24	2.84×10^{-8}	35.02	9.0×10^{-10}	42.26	3.9×10^{-7}	35.24	11×10^{-6}	25.11
	D ₂	10×10^{-7}	30.52	3.7×10^{-8}	36.8	8.8×10^{-10}	42.01	4.1×10^{-7}	35.09	12.5×10^{-6}	25.03
	平均	9.8×10^{-7}	30.88	3.27×10^{-8}	35.91	8.9×10^{-10}	42.13	4.0×10^{-7}	35.16	11.5×10^{-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, $P_{r \min}$ 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: (a) 当 Si-APD 器件工作于最佳 (380V) 状态时, 仪器系统的探测灵敏度与计算结果很接近, 误差在 2dB 以内; (b) 当 Si-APD 器件的反偏压调整低于最佳工作电压 (380V) 时, 由于倍增因子 M 下降, $P_{r \min}$ 值和 S 值也随之减小, 当偏压调整降到 300V 时, $P_{r \min}$ 约减少两个数量级, 仪器系统的探测灵敏度下降了 26.6%, 实际测距能力约下降了 25%; (c) 当 Si-APD 器件的反偏压调整高于最佳工作电压 (380V) 时, 虽然 Si-APD 器件的倍增因子 M 提高了, 但器件本身的暗电流噪声也随之增大, 结果 $P_{r \min}$ 值和 S 值比下偏压工作时下降得还快。当偏压调整升到 460V 时, 根据图 1 所示的伏安特性曲线, Si-APD 器件工作于极限高偏压状态, 器件本身的暗电流噪声几乎直线上升, 结果 $P_{r \min}$ 约下降 3 个数量级, 仪器系统的探测灵敏度 S 下降了 40%, 实际测距能力下降低于 40%。

3 讨 论

从表 1 可知, Si-APD 器件的负载电阻值随仪器系统的测距精度提高而下降, 接收器的带宽随测距精度提高而增宽, 并且下降值和增宽值均成比例; 从表 2 和表 3 可知, Si-APD 器件在最佳偏压工作状态下, 倍增因子 M 达到最佳值 M_{opt} 时, 等效噪声功率 NEP 、最小可探测功率 $P_{r \min}$ 和探测灵敏度 S 随仪器系统的测距精度提高有规律地减小, 但接收器的信噪比 SNR 基本不变, 这说明了 Si-APD 器件处于最佳工作状态是决定仪器系统的测距稳定性和可靠性的重要条件。为此, 对仪器系统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、量子效率在 50% 以上, 倍增因子 M 的范围在 10~120、工作温度在 -40~70℃ 范围内。

(2) 对前置放大级和视频放大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, 以恒虚警率偏压控制, 与 Si-APD 器件同步工作, 满足各类仪器系统的测距精度要求。

(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, 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 张承铨主编, 国外军用激光仪器手册, 兵器工业出版社, 北京, 1989
- 2 华中工学院等编, 激光技术, 湖南科学技术出版社, 1983
- 3 McInyre R J, IEEE Trans Electron Devices, ED-13(1), 1966
- 4 张舒仁, 雪崩光电二极管最佳偏置电路, 激光技术, 12 (4), 1988
- 5 谭显裕, 脉冲激光测距仪最大测程与消光比研究, 红外与激光技术, 3, 1990