

达通型雪崩硅光电二极管最佳倍增因子的确定

喻其奇

本文给出了达通型雪崩硅光电二极管最佳倍增因子的一个新的表示式, 根据此式确定雪崩管的工作点能有效提高它的探测灵敏度。

在达通型硅雪崩光电二极管中, 由于设置了一个宽的光致电离区和一个窄的雪崩倍增区, 这就使倍增区中空穴与电子电离率的比值 K 很小, 从而使这种雪崩管十分接近于纯电子倍增理想雪崩管。它在比其他类型雪崩管的倍增因子高很多的情况下工作时, 仍能使系统虚警率保持在合适的水平上。

在以往的许多文献中, 常常将雪崩噪声与增益的关系 $2e I_0 M^2 F$ 近似地表为 $2e I_0 M^d$, 并由这种近似式导出最佳增益的表示式, 并指出, 对硅器件, $d = 2.3 \sim 2.5$ 。但这种近似仅仅对 $K = 1$ 才是正确的。如众所周知, 如果 $K = 1$, 则雪崩管的性能是很坏的, 根本无法使用。对达通型雪崩管, $K \approx 0.02$, 这种近似显然是不合适的。为了恰到好处地使用这种雪崩管, 就必须根据它的内在特性和系统参数确定最佳倍增因子。

显然, 雪崩管接收到脉冲光信号后, 其输出信号电流 i_s 为:

$$i_s = e \eta_s \Phi_s M \quad (1)$$

其中, e 是电子电荷, η_s 是雪崩管对脉冲光信号的量子效率, Φ_s 是入射到光敏面的信号光子通量, M 是雪崩倍增因子。在放大器输入端的总均方根噪声电流 i_n 为:

$$i_n = \left[i_{d_s}^2 + i_{n_a}^2 + 2e B \left(e \eta_0 \Phi_0 + I_{dt} \right) M^2 F \right]^{1/2} \quad (2)$$

其中, i_{d_s} 是雪崩管面漏电流, i_{n_a} 是放大器的等效输入噪声电流, B 是放大器带宽, η_0 是雪崩管对背景光的量子效率, Φ_0 是背景光子通量, I_{dt} 是雪崩管的体漏电流, F 是过剩噪声系数, 且[1]

$$F \approx K M + \left(2 - \frac{1}{M} \right) (1 - K) \quad (3)$$

当信号电流恰好等于噪声电流时, 由 (1)、(2) 两式得:

$$\Phi_s = \frac{\left[i_{d_s}^2 + i_{n_a}^2 + 2e B (e \eta_0 \Phi_0 + I_{dt}) M^2 F \right]^{1/2}}{e \eta_s M} \quad (4)$$

NEP 的单位取 瓦/赫^{1/2} 时,

$$NEP = \frac{\Phi_0 h \nu}{\sqrt{B}} = \frac{h \nu [i_{ds}^2 + i_{na}^2 + 2e B (e \eta_0 \Phi_0 + I_{dt}) M^2 F]^{1/2}}{e \eta_s M \sqrt{B}} \quad (5)$$

对达通型雪崩管, $K \approx 0.02$, 于是由 (3) 式得:

$$F = 1.96 + 0.02M - 0.98M^{-1} \quad (6)$$

将 (6) 式代入 (5) 式得:

$$NEP = A_1 \left[A_2 M^{-2} + A_3 (1.96 + 0.02M - 0.98M^{-1}) \right]^{1/2} \quad (7)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \frac{h \nu}{e \eta_s \sqrt{B}} \\ A_2 &= (i_{ds}^2 + i_{na}^2) \\ A_3 &= 2e B (e \eta_0 \Phi_0 + I_{dt}) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

取 (7) 式对 M 微分, 并令 $d(NEP)/dM = 0$ 则得:

$$M_{opt} = \left[\frac{50A_2}{A_3} + \left(\frac{2500A_2^2}{A_3^2} + 4357.37 \right)^{1/2} \right]^{1/3} + \left[\frac{50A_2}{A_3} - \left(\frac{2500A_2^2}{A_3^2} + 4357.37 \right)^{1/2} \right]^{1/3} \approx \left[\frac{25A_2}{A_3} \right]^{1/3} \quad (9)$$

对上式所含参数进行逐一分析后不难看出, 最佳增益是温度、背景光通量、雪崩管噪声、雪崩管量子效率、放大器噪声及带宽的函数。因此, 完善的偏压控制电路必须将这些因素的影响一并包括进去, 使雪崩管工作于最佳增益状态。

数值例。

根据我们所雪崩管和系统情况, 有关常数和参数值如下:

$$\begin{aligned} h \nu &= 1.87 \times 10^{-19} \text{ 焦耳} & \eta_0 &= 0.24 & \Phi_0 &= 8 \times 10^{11} \text{ 光子/秒} \\ e &= 1.6 \times 10^{-19} \text{ 库仑} & i_{ds} &= 8 \times 10^{-8} \text{ 安} & i_{na} &= 6 \times 10^{-9} \text{ 安} \\ \eta_s &= 0.18 & i_{dt} &= 5 \times 10^{-11} \text{ 安} & B &= 15 \times 10^6 \text{ 赫} \end{aligned}$$

将上列参数代入 (9) 式得:

$$M_{opt} \approx 113$$

我们据此选定工作点后的测距实验表明, 理论估计与实验数据能很好相符。

附录: (9) 式的简单推导

取 (7) 式对 M 微分并令其为零得:

$$-2A_2 M^{-3} + 0.02A_3 + 0.98A_3 M^{-2} = 0$$

整理上式得:

$$M^3 + 49M - 100 \frac{A_2}{A_3} = 0$$

(下转第58页)

$$\begin{cases} M = 1 - \frac{2L}{R_1} = \frac{D}{d} \\ R_2 = \frac{2ML}{M-1} \end{cases} \quad (17')$$

表 2 给出对 $R_1 = -50$ 厘米, $D = 6$ 毫米的计算结果:

表 2

N_{eq}	L (厘米)	R_1 (厘米)	R_2 (厘米)	M	$\delta_{几何}$	$\delta_{实际}$
0.5	120	-50	290	5.8	0.97	0.97
1.5	59	-50	168	3.36	0.91	0.84
2.5	40	-50	130	2.60	0.85	0.73
3.5	30	-50	110	2.20	0.79	0.64

(4) 考虑工作物质热透镜影响

把工作物质的热效应用一焦距为 f_T 的薄透镜等效 (图12), 其与后镜 R_2 的距离为 l , 当 l 满足:

$$\begin{cases} l \ll f_T \\ l \ll R_2 \end{cases} \quad (18)$$

时, 可利用下式求得需要的真正后镜曲率 R_2' :

$$\frac{1}{R_2'} = \frac{1}{R_2} - \frac{1}{f_T} \quad (18')$$

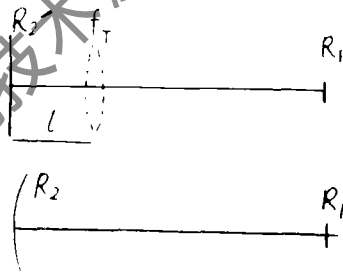


图12 非稳腔热透镜的影响

假如 (18) 得不到满足, 则需考虑 l 的影响:

$$\frac{1}{R_2} = \frac{1}{f_T} \left(1 - \frac{l}{f_T}\right) + \frac{1}{R_2'} \left(1 - \frac{l}{f_T}\right)^2 \quad (19)$$

(待续)

(上接第60页) 此方程的判别式显然大于零, 故它只有一个实根:

$$\begin{aligned} M_{opt} = & \left[\frac{50A_2}{A_3} + \left(2500 \frac{A_2^2}{A_3^2} + 4357.37 \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{3}} \\ & + \left[\frac{50A_2}{A_3} - \left(2500 \frac{A_2^2}{A_3^2} + 4357.37 \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{3}} \approx \left[\frac{25A_2}{A_3} \right]^{\frac{1}{3}} \end{aligned}$$

参 考 文 献

- [1] P.P.Webb, R.J.Melntyre and J.Conradi, RCA Review, 1974, Vol.35, No.2, P.234~278.