

红外光子牵引探测仪中P型锗元件 最佳参数的研究*

王春奎 傅裕寿

(中国科学院力学研究所)

【提要】 本文对红外(10.6 μm)光子牵引探测仪中P型锗的吸收系数与电阻率的关系进行了讨论。导出了P型锗对10.6 μm 光的吸收系数的简便公式。进而根据理论分析,给出了光子牵引探测仪锗棒的电阻率、长度及截面等最佳参数的选取原则和结果。利用文章中的公式可以很方便地计算锗元件参数和响应率。本文对光子牵引探测仪的制作有一定的指导意义。

一、引言

测量10.6 μm 的红外脉冲光波形,优选的仪器是光子牵引探测仪。由于它具有简便可靠等优点[1],多被人们采用。本文对该仪器进行了分析讨论。提供了光子牵引探测仪锗棒的电阻率、长度及截面积等参数的最佳选取原则,并给出了计算结果。文章还导出了一个实用而简便的吸收系数公式,对于计算P型锗对10.6 μm 红外光的响应率有用。

二、锗对10.6 μm 红外光的吸收系数

制作光电探测器,应有高的响应率(灵敏度)、稳定、灵巧、方便耐用等优点。达到这些要求,首先是材料的选择。光子牵引探测仪的响应率与材料及几何尺寸的选取有关。光子牵引探测仪响应率的表达式[1]:

$$\frac{V}{W} = \frac{\rho\mu(1-R)}{A \cdot C} \cdot \frac{1 - e^{-Kl}}{1 + Re^{-Kl}} \quad (1)$$

式中 ρ 为锗棒的电阻率; μ 为空穴迁移率; R 为锗棒端面反射系数; A 为锗棒横截面积; C 为光速; l 为锗棒长度; K 为锗的吸收系数。

* 本文于1981年9月收到。

根据方程, ρ 、 K 越大响应率越高。但文献[2]指出: ρ 与 K 是相互依赖的。 ρ 大, K 必然小; 反之亦然。不能随意同时选取 ρ 和 K , 因此, 首先应求得 ρ 与 K 之间的关系, 然后通过计算决定响应率的大小。

由半导体理论, 可以导出 P 型锗对 $10.6\mu\text{m}$ 的红外光吸收系数 K 与电导率 σ 间的关系[2]:

$$K = K_p + \frac{A_h \cdot \sigma}{e \cdot \mu} + (A_e - A_h \cdot b) \cdot \frac{\frac{\sigma}{e \cdot \mu} - \sqrt{\left(\frac{\sigma}{e \cdot \mu}\right)^2 - 4bN_i}}{2b} \quad (2)$$

其中, K_p 是声子对 $10.6\mu\text{m}$ 光的吸收系数, A_h 、 A_e 分别是空穴和电子的吸收截面, e 为电子电荷, μ 为空穴迁移率, b 为电子迁移率与空穴迁移率之比, N_i 为本征载流子浓度。根据实际情况分别取: $K_p = 0.013 \text{ 厘米}^{-1}$, $A_h = 6.5 \times 10^{-16} \text{ 厘米}^2$, $A_e = 0.15 \times 10^{-16} \text{ 厘米}^2$, $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ 库仑}$, $b = 2.0526$, $\mu = 1900 \text{ 厘米}^2 \cdot \text{伏}^{-1} \cdot \text{秒}^{-1}$, $N_i = 1.76 \times 10^{16} T^{3/2} \exp(-4550/T) \text{ 厘米}^{-3}$, $T = 300^\circ \text{ K}$ 时, $N_i = 2.368 \times 10^{13} \text{ 厘米}^{-3}$ 。

利用公式(2)计算的结果与实验数据相符。但较繁琐。

在室温下, 光子牵引探测仪中使用的锗, 一般是选小于 $10\Omega\text{-cm}$ 、远离本征值的 P 型锗, 其空穴密度 P 远大于电子密度 N , 而它们对 $10.6\mu\text{m}$ 红外光的吸收截面 A_h 和 A_e , 基本是同一量级。所以, $A_e N \ll A_h P$ 。在此条件下, 电子的吸收项, 可以忽略。故 $K = K_p + A_e P$, 此时, 电导率 $\sigma = e\mu P$ 。从而得到 P 型锗对 $10.6\mu\text{m}$ 光吸收系数 K 为:

$$K = K_p + A_e \cdot \sigma / (e \cdot \mu) \quad (3)$$

当样品靠近本征值时, (3) 式误差增大。因为电子密度不再是远小于空穴密度, 而变得可以相比了。因而电子吸收项不能忽略。(3) 式就要以 (2) 式代替。

三、锗棒的最佳选择

应该指出, (1) 式给出的光子牵引探测仪的响应率, 是开路条件下的。而一般是闭路使用。为了实现时间的快速响应, 又能很好地与测试系统匹配, 一般取小的负载电阻 ($50 \sim 100\Omega$)。这样亦有利于防止噪声干扰。

在闭路中, 光子牵引探测仪响应率方程为:

$$\frac{V}{W} = \frac{\rho \mu (1 - R) R_l}{C (AR_l + I\rho)} \cdot \frac{1 - e^{-Kl}}{1 + R e^{-Kl}} \quad (4)$$

式中:

R_l 是负载阻抗。

实现最大探测响应率是重要的。光子牵引探测器时间响应很快[3], 要求整个测量系统的时间响应也要快。即与其连接部分的阻容时间常数要小, 并应匹配。

将 (4) 式以 l 为变数微商, 并令为零, 得:

$$R e^{-Kl} - e^{Kl} + K(1 + R)l + K \cdot A \cdot R_l \cdot (1 + R) / \rho + (1 - R) = 0 \quad (5)$$

式 (5) 之正实数解意味着锗棒取此长度时, 响应率最大。若要满足匹配关系, 则要求

$$R_l = R_i = \rho \cdot l / A = \rho l / A_m \quad (6)$$

(6) 式代入 (5) 式, 得

$$Re^{-\kappa l} - e^{\kappa l} + 2K(1+R)l + (1-R) = 0 \quad (7)$$

(7) 式之正实根满足最大响应率及匹配关系。当 R_l 选取 $50 \sim 100 \Omega$ 纯电阻, 并尽量减小分布电容时, 一般能满足时间的快速响应条件[4]。

选定电阻率为 ρ 的锗棒, 由公式 (3) 求出 K 。将 K 及 R 代入 (7) 式, 求出对应的正实根 l_p 。由 ρ 及其 l_p , 和已知的适当小的 R_l , 利用 (6) 式, 求出截面积 A_m 。如此, 最佳参数得以确定。响应率可由 (4) 式计算。

同样, 以 σ 为变数对 (4) 式微商, 并令为零, K 以 (3) 式代入, 得到与方程 (5) (6) (7) 类似的方程:

$$Re^{-\kappa l} - e^{\kappa l} + \frac{A_h \cdot l}{e \cdot \mu} \cdot (1+R) \cdot \sigma + \frac{A_h \cdot l^2}{e \cdot \mu \cdot A \cdot R_l} \cdot (1+R) + (1-R) = 0 \quad (8)$$

当

$$R_l = R_i = \rho l / A = \rho l / A_m \quad (9)$$

时, (8) 式为:

$$Re^{-\kappa l} - e^{\kappa l} + 2 \cdot \frac{A_h \cdot l}{e \cdot \mu} \cdot (1+R) \cdot \sigma + (1-R) = 0 \quad (10)$$

(10) 式之正实根也能同时满足最大响应率及匹配关系。当 R_l 选取 $50 \sim 100 \Omega$ 纯电阻, 并注意尽管减小分布电容时, 一般能满足时间的快速响应条件。

由 (3) (9) 及 (10) 式可得一组最佳 ρ 、 l_p 及 A_m 参数。由这些参数制成的光子牵引探测仪锗棒, 同负载是 R_l 的测量系统连接。可以满足响应率高、匹配及时间的快速响应。

满足最大响应率并匹配的锗棒长 l_p , 对于任何一个 ρ 仅有二个 l_p , 分别由 (7) 式和 (10) 式确定。称 l_p 为“特征长度”。 l_p 的数值与 R_l 取值无关, 仅决定于 ρ 的数值。同一个电阻率 ρ 对应的两个“特征长度”很相近, 但不相同。为得最大响应率 $\frac{V_{max}}{W}$, 并匹配, 必须满足 (6) 式或 (9) 式。因 ρ 与 l_p 已为 (7) 式或 (10) 式决定,

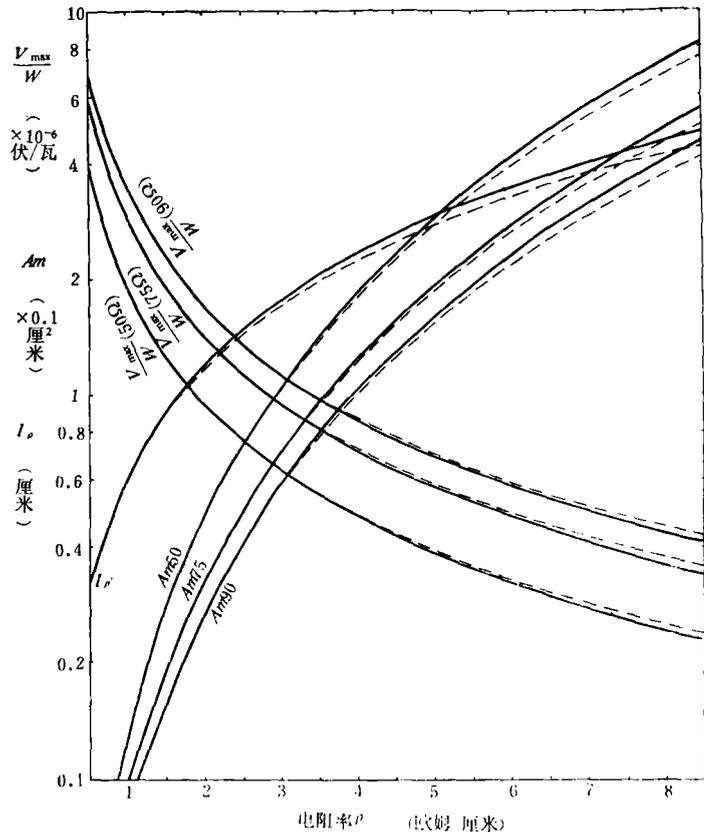


图 1 光子牵引探测仪 P 型锗棒最佳参数

所以 A_m 仅决定于 R_l 的取值, 可称 A_m 为“匹配截面”。

图 1 中的实线是 P 型锺棒的电阻率 ρ 与由方程 (7) 得到的“特征长度” l_p 的关系曲线, 以及 l_p 与 50 欧、75 欧、90 欧负载电阻连接的匹配截面 A_{m50} 、 A_{m75} 、 A_{m90} 与 ρ 的关系曲线, 及其响应率 $\frac{V_{max}}{W}$ 与 ρ 的关系曲线。

图 1 中的虚线为由式 (10) 得到的 P 型锺棒的电阻率 ρ 与“特征长度” l_p 的关系曲线, 以及 l_p 与 50 欧、75 欧、90 欧负载电阻连接的匹配截面 A_{m50} 、 A_{m75} 、 A_{m90} 与 ρ 的关系曲线, 以及各相应负载下的响应率 $\frac{V_{max}}{W}$ 与 ρ 的关系曲线。

锺棒的电阻率 ρ 及负载电阻 (50 欧、75 欧、90 欧的) 选定后, 即可由图 1 中直接找出二组可供利用的锺棒长度 l_p 、匹配截面 A_m 及其响应率 $\frac{V_{max}}{W}$ 。

四、结 论

根据式 (4), 在相同的条件下, A 越小, $\frac{V}{W}$ 越大, $A \rightarrow 0$, $\frac{V}{W}$ 最大。所以当比较 $\frac{V}{W}$ 时, A 是相同的。

通过公式 (3)(7)(6) 及 (3)(10)(9) 可得光子牵引探测仪锺棒最佳参数。用最佳参数制作的探测仪响应率高、匹配、时间响应快。

参 考 文 献

- [1] 王春奎, 傅裕寿, 唐沧雅, 激光, 5, 4, (1978), 17
- [2] P. J. Bishop and A. F. Gibson, Appl. Opt., 12, 11, (1973), 2549
- [3] A. F. Gibson, M. F. Kimmitt and A. C. Walker, Appl. Phys. Lett, 17, 2, (1970), 75
- [4] 清华大学电力系高电压技术专业, 冲击大电流技术, 科学出版社, (1978), § 8-8

An Investigation of the Optimal Parameters of P-type Ge Element in Photon Drag Infrared Detector

Wang Chun-kuei Fu, Yu-shou

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

ABSTRACT: In this paper, the relation between resistivity and light absorption coefficient of P-type Ge at 10.6 μm wave length has been discussed for photon drag infrared detector. Absorption coefficient of P-type Ge at 10.6 μm wave length is given in concise formula. Furthermore, according to the theoretical analysis, the principle selecting the optimal parameters of resistivity, length and cross section of P-type Ge bar and the calculating results of the optimal parameters has been given in photon drag infrared detector. The parameters of Ge element and responsivity of photon drag detector may be calculated very conveniently by formulas in this paper.

4