

场助 InP/InGaAsP/InP 半导体光电 阴极时间响应的计算

李晋闽* 郭里辉 侯 洵

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

关键词 半导体光电阴极、异质结、时间响应

一、引言

场助 III-V 族多元化合物半导体光电阴极与 GaAs NEA (Negative electron affinity) 光电阴极相比, 具有可延伸光电探测的长波阈值、提高红外波段光谱灵敏度等优点^[1,2], 因此在光纤通信、微光夜视以及高速摄影等方面具有广泛的应用。虽然目前场助多元化合物半导体光电阴极的研究已取得了许多成果, 但有关理论研究方面的报道却很少见, 特别是判别多元化合物半导体场助阴极性能的一个重要指标, 即时间响应的理论计算, 到目前为止尚未见到过报道。本文根据光生电子在阴极体内的分布是时间的函数这一观点, 对多元化合物半导体的透射式 InP/InGaAsP/InP 场助异质结光电阴极的时间响应进行了理论计算。据此可对场助半导体光电阴极的设计及应用提供必要的理论依据。

二、理论计算模型

本文计算所用的 InP/InGaAsP/InP 异质结场助阴极的能带结构如图 1 所示, 其中吸收层

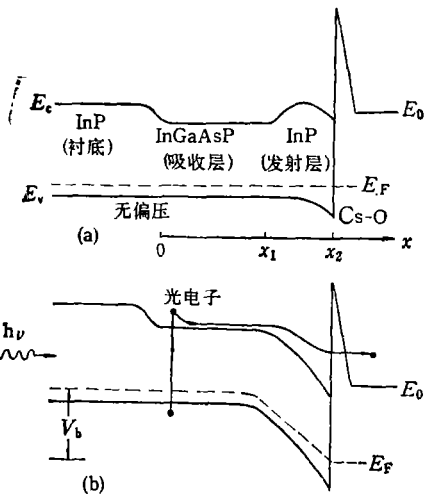


图 1 InP/InGaAsP/InP 异质结场助阴极的能带结构

是带隙为 0.99eV (对应的阈值波长为 1.25 μm) 的 InGaAsP 图中 InP 分别为衬底(入射窗口)和电子发射层。为了简化计算, 我们采用“耗尽层近似”原理, 假设场助偏压全部加在由肖特基结形成的表面耗尽层中, 耗尽层之外的区域是电中性的; 电场 E 的方向由电子发射层表面指向阴极体内。

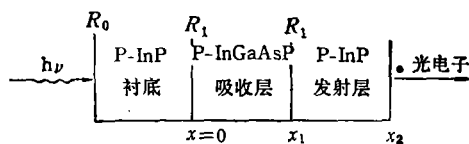


图 2 异质结阴极的计算模型

本文 1991 年 6 月 11 日收到, 1991 年 10 月 25 日收到修改稿

* 现在中国科学院半导体研究所工作。

场助半导体光电阴极吸收光子后的光电发射由以下 5 个过程组成: 1. 在吸收层中, 光激发电子进入导带; 2. 光生电子迅速热化到导带底; 3. 光生电子向发射层扩散; 4. 进入场助偏压的势垒区后, 光电子受到电场的加速, 由低能谷跃迁到高能谷; 5. 具有一定能量的光电子通过隧道效应, 穿过 Cs-O 激活层的势垒, 发射到真空中。以上过程表明, 光电子在半导体阴极体内除了扩散运动外, 还包括在电场作用下的漂移运动。根据图 1 及 InP/InGaAsP/InP 异质结场助阴极的结构, 在时间响应的计算中采用图 2 所示的模型。由此模型, 可写出含时间变量的电子运动方程及边界、初始条件为

$$\begin{cases} \frac{\partial \Delta n(x, t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \Delta n(x, t)}{\partial x^2} - \Delta n(x, t) \frac{\partial V(x)}{\partial x} - V(x) \frac{\partial \Delta n(x, t)}{\partial x} - \frac{\Delta n(x, t)}{\tau}, \\ \Delta n(x, 0) = \alpha(1 - R_0)I_0 \exp(-\alpha x), \quad (0 \leq x \leq x_1), \\ D \frac{\partial \Delta n(x, t)}{\partial x} - V(x) \Delta n(x, t) = S \Delta n(x, t) \Big|_{x=0}, \\ \Delta n(x, t) \Big|_{x=x_1} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\Delta n(x, t)$ 、 $V(x)$ 和 τ 分别为光电子的浓度、漂移速度和寿命; D 为电子扩散系数, α 为 InGaAsP 的吸收系数, R_0 为光电阴极入射面的反射率, I_0 为入射光强, S 为 InP (衬底)/InGaAsP (吸收层) 界面 ($x=0$) 的电子复合速度。

场助光电阴极出射电子的粒子流密度为

$$I(t) = -D \cdot \frac{\partial \Delta n(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=x_1}. \quad (2)$$

由(1)式所组成的边值问题是无法给出解析解的。我们采用数值法对其进行离散化处理, 然后在电子计算机上求出数值解。对(1)式进行离散化处理后, 可得如下矩阵:

$$\begin{bmatrix} b_1 & c_1 & & & \\ a_2 & b_2 & c_2 & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & a_{n-1} & b_{n-1} & c_{n-1} \\ & & & a_n & b_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_1^{i+1} \\ N_2^{i+1} \\ \vdots \\ N_{n-1}^{i+1} \\ N_n^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ f_2^i \\ \vdots \\ f_{n-1}^i \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

在(3)式中

$$\begin{aligned} b_1 &= D/h_x + V_1 + S, \quad c_1 = -D/h_x, \\ a_i &= D/(2h_x^2) + V_i/(4h_x), \\ b_i &= -D/h_x^2 - [1/\tau + (V_{i+1} - V_i)/(2h_x)]/2 - 1/h_i, \\ c_i &= D/(2h_x^2) - V_i/(4h_x), \\ d_i &= -D/h_x^2 - [1/\tau + (V_{i+1} - V_i)/(2h_x)]/2 + 1/h_i, \\ a_n &= 0, \quad b_n = 1, \end{aligned} \quad (4)$$

以上 $i = 2, \dots, n-1$.

$$\begin{aligned} f_i^i &= -a_i N_{i-1}^i - d_i N_i^i - c_i N_{i+1}^i \quad \left(\begin{matrix} i = 2, \dots, n-1 \\ j = 1, 2, \dots, m-1 \end{matrix} \right), \\ N_i^1 &= \begin{cases} \alpha I_0 (1 - R_0) \exp[-\alpha(i-1)x_1/(n-1)] & (1 \leq i \leq n_1), \\ 0, & (n_1 + 1 \leq i \leq n), \end{cases} \\ n &= \left[\frac{x_2}{h_x} \right] + 1; \quad n_1 = \left[\frac{x_1}{h_x} \right] + 1; \quad m = \left[\frac{T}{h_t} \right] + 1, \end{aligned} \quad (5)$$

这里 T 为所考虑的总时间长度, h_i 为其破分长度。

从(4)、(5)式中可得到 $f_2, f_3, \cdots, f_{n-1}$, 代入矩阵(3)式, 用追赶法求出 $N_1^2, N_2^2, \cdots, N_n^2$ 。再把求出的 $\{N_i^2\}$ 代入(4)式可得到 $f_2, f_3, \cdots, f_{n-1}, \cdots$, 如此逐次用追赶法求解下去, 就可求出 $\{N_i^2\}$, 即解出 $\Delta n(x, t)$ 的数值解。

三、计算结果

在计算中, 取 $D = 150\text{cm}^2/\text{s}$, InGaAsP 吸收层和 InP 发射层的厚度分别为 $3.0\mu\text{m}$ 和 $0.5\mu\text{m}$ 。根据我们实测, InGaAsP 的吸收系数 α 在 $1.24\mu\text{m}$ 时为 $3 \times 10^3\text{cm}^{-1}$; 在该波长时 R_0 取为 0.263^[3]。另外, 电子漂移速度 $V(x)$ 与电场强度的关系如图 3 所示^[4]。

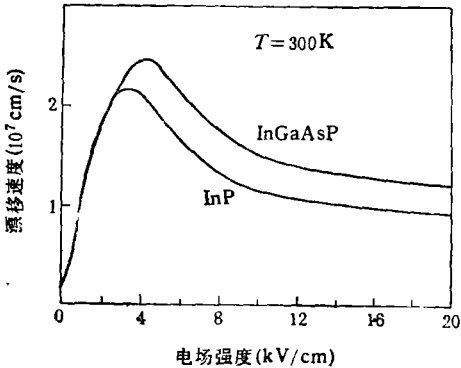


图 3 InP、InGaAsP 的 V - E 关系曲线

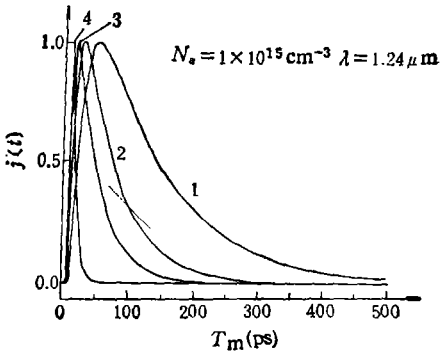


图 4 透射式场助 InP/InGaAsP/InP 异质结光阴极时间响应的计算曲线
1—— $V_b = 0.0\text{V}$; 2—— $V_b = 3\text{V}$;
3—— $V_b = 5\text{V}$; 4—— $V_b = 7\text{V}$

根据以上数据, 计算出在入射光波长和掺杂浓度一定的条件下, 加不同偏压时场助阴极的时间响应曲线如图 4 所示。图中光阴极出射电子的粒子流密度作了归一化处理, 取为 $i(t)$ 。 T_m 为响应峰值延迟, ΔT 为响应脉冲半宽度。表 1 给出了不同掺杂浓度与所加偏压对 T_m 和 ΔT 的影响。

表 1 N_a, V_b 对 $T_m, \Delta T$ 的影响 ($\lambda = 1.24\mu\text{m}$)

$N_a(\text{cm}^{-3})$	10^{15}		10^{16}		10^{17}	
	$T_m(\text{ps})$	$\Delta T(\text{ps})$	$T_m(\text{ps})$	$\Delta T(\text{ps})$	$T_m(\text{ps})$	$\Delta T(\text{ps})$
0	52	119	63	144	64	144
3	31	59	60	135	64	144
5	21	38	51	113	63	144
7	13	10	44	96	63	143

四、结果分析与讨论

从以上结果可见, 在掺杂浓度较低时, 光阴极的响应速度随偏压的加大得到明显改善。在掺杂为 $10^{15}/\text{cm}^3$ 时, 加 7V 偏压可将响应脉冲半宽度由零偏压时的 119ps 减小到 10ps , 响应

峰值延迟也由 52ps 缩短到 13ps。随着掺杂浓度的提高,响应时间随偏压的变化不再明显。当掺杂浓度为 $10^{17}/\text{cm}^3$ 时,响应时间几乎不随外加偏压变化。这主要是由于在低掺杂时,异质结界面处($x = x_1$)的电子势垒很容易被外加偏压“拉平”,如图 1(b),因此消除了电子向发射层表面运动中所受到的势垒散射。另外在低掺杂时,随外加偏压的增大,场助作用深度向体内扩展的很快,使光电子受外加电场作用的范围也就越大。所以低掺杂时光电子的输出响应时间随偏压变化很快。相反,在相对高掺杂情况下(如 $10^{17}/\text{cm}^3$),外加偏压的增大很难消除掉界面处的电子势垒,电场作用范围也很小且随偏压增加变化不大,因此光电子的输出响应时间几乎不随外加偏压而变化。

我们还计算了 $N_A = 10^{16}/\text{cm}^3$, $V_b = 3\text{V}$, $\lambda = 0.92\mu\text{m}$ 时光电阴极的输出响应,得到 $T_m = 61\text{ps}$, $\Delta T = 138\text{ps}$ 。对比表 1 中 $\lambda = 1.24\mu\text{m}$ 时的结果,可看出入射光波长对响应时间影响不大。

虽然外加偏压可显著地改善光电阴极的响应特性,但由图 3 中可知,当电场强度超过一定值后,电子在阴极体内的运动速度趋于饱和,因此光电阴极的时间响应也趋于定值。另外根据我们的理论计算及实验^[5],场助偏压过高时(如: $N_A = 10^{16}/\text{cm}^3$ 时, V_b 大于 7V 或 $N_A = 10^{15}/\text{cm}^3$ 时, V_b 大于 10V),除了对时间响应特性不会再有明显改善外,场助半导体光电阴极的其它特性(如暗电流)将会受到影响,因此为了获得最佳的时间响应及光电阴极的整体特性,应根据材料参数综合考虑,选择适当的场助偏压值。

参 考 文 献

- [1] Gregory, P. E. et al., *Appl. Phys. Lett.*, 36(1980), 639—641.
- [2] Escher, J. S. et al., *IEEE Electron. Devices Lett.*, EDL-2(1981), 123—125.
- [3] Willardson, R. K. and Beer, A. C. (eds.), *Semiconductors and Semimetals*, Academic Press, New York, 1967, 529.
- [4] Pearsall, T. P. (ed.), *GaInAsP Alloy Semiconductors*, Wiley, New York, 1982, 255—268.
- [5] Li Jinmin, Hou Xun and Guo Lihui, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 22(1989), 1544—1548.

1) 李晋闽,中国科学院西安光学精密机械研究所博士学位论文,1990.