

1.3 μm 场助TE光阴极 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}/\text{InP}$ 的能带计算及外延层的设计

王存让 郭里辉 李晋闽 侯 洵 张工力

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

摘 要 本文首先简述了1.3 μm 场助TE光阴极 InP (衬底)/ $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ (光吸收层)/ InP (发射层)/ Ag/CsO 的工作原理, 并对其能带结构进行了计算, 得到了 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ (光吸收层)/ InP (发射层)的势垒高度、掺杂、 InP 发射层厚度、组份、渐变区宽度、偏压及耗尽层宽度间的定量关系。并由此出发, 对光阴极各参数的设计进行了分析讨论。

关键词 场助光阴极; 异质结; 能带计算

0 引 言

由于GaAs NEA光阴极与Ag-O-Cs光阴极相比, 具有量子效率高, 暗发射小、光电子能量分布及角分布比较集中等优点, 所以GaAs NEA光阴极在微光夜视、辐射计量、自动控制、激光探测、医疗诊断, 科学实验等方面有着广泛的应用前景。但是, GaAs NEA光阴极的长波阈在0.9 μm , 这就极大地限制了其在某些方面的应用。近年来, 空间科学、夜视技术、光纤通讯得到迅速发展, 特别是由于石英光纤在1.3和1.55 μm 附近具有低色散、低功耗等特点, 迫切地要求研制响应波长在1 μm 以上的性能优良的光电探测器件。

1 场助光阴极原理

对半导体光电材料来说, 当阈波长大于1 μm 时, 其带隙变窄, 很难激活成NEA光阴极^{1, 2, 3}, 故需借助外场使材料能带在表面附近向下弯曲并使电子在向表面运动的过程中从能级较低的主能谷跃迁到能级较高的次能谷, 形成NEA发射。

对1.3 μm 的场助TE光阴极, 最佳的阴极结构⁴为 InP (衬底)/ $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ (光吸收层)/ InP (发射层)/ Ag/CsO 。其能带结构如图1所示, 它把光的吸收与光电子的发射这两个过程分限于不同的层来完成, 这样作为光吸收层的 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 可尽可能地向长波阈(最大约为1.65 μm)扩展, 而发射层 InP 由于禁带宽度比吸收层大, 故很容易激活。这样, 不同的功能由不同的层来完成, 就可充分发挥各自的优点。

收稿日期: 1991-03-11

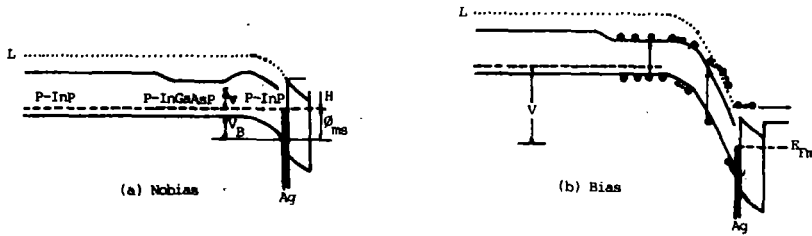


图 1 在有偏压、无偏压情况下的异质结TE光阴极的能带曲线

Fig.1 Energy band diagram of heterojunction TE photocathode for bias and nobias conditions.

但是, 这里出现了一个问题, 就是光吸收层 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 与发射层InP之间的势垒阻止了光电子由光吸收层向发射层的运动(对 $1.3\mu\text{m}$ 的 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}/\text{InP}$ 来说这个势垒高度约为 0.4eV).这时须借助于外场使表面附近能带弯曲以相对提高体内能级, 可部分地或全部地拉平这个势垒。要做到这点, 一个必要的前提就是耗尽层需扩展到有源层。设InP发射层的厚度为 l_1 , 光吸收层 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 与发射层InP之间的组份渐变区宽度为 l_2 , 耗尽层宽度为 W , 则应有 $W > l_1 + l_2$, 为了满足此条件, 可以有以下三条途径: (1) 增大外场偏压 V , 由于 W 是 V 的增函数, 所以随着偏压的增大, 耗尽层 W 也增大。而实际上偏压 V 由于受到InP/Ag肖特基势垒的限制不可能很大。另外, 随着偏压 V 的增大, 暗电流也会迅速上升。(2) 减小InP发射层厚度使耗尽层足以扩展到有源层以至于在适当的偏压下拉平异质结势垒。(3) 降低掺杂 N_a 。由于 W 是 N_a 的减函数, 故降低掺杂就可以增大耗尽层宽度以保证耗尽层扩展到有源层。以上三条中的最后两条涉及到材料参数, 是外延生长场助光阴极材料所遵循地定性原则。在下一节将通过计算得到掺杂 N_{a1} 、 N_{a2} , InP发射层厚度 l_1 、组份渐变区宽度 l_2 、偏压 V 、耗尽层宽度及InGaAsP(光吸收层)/InP(发射层)间势垒高度的定量关系。

2 阴极能带计算

对场助阴极InP(衬底)/InP GaAs(光吸收层)/InP(发射层)/Ag/Cs.O能带的计算, 由于涉及到InGaAsP/InP异质结, 所以是相当复杂的, 但用一般方法所外延的材料其异质结不是突变的, 对液相外延来说, 二者之间的组份渐变区约厚 $0.05 \sim 0.2\mu\text{m}$, 故可以忽略由于InGaAsP与InP的功函数不同所引起的异质结界面间的电子再分布所致的势能变化, 并认为在能带无弯曲时发射层InP与吸收层InGaAsP的价带顶处于同一高度, 而导带底的高低则与其组份成比例, 即与其禁带宽度变化相同。在此基础上, 一般认为渐变层的禁带宽度 $E_g(x)$ 与其离发射面的距离 x 为双曲正切函数^{5, 6, 7}, 取坐标如图2所示, 则有:

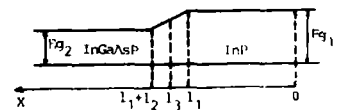


图 2 光吸收层InGaAsP与发射层InP的能带结构。

Fig.2 Energy band structure of photon absorber layer InGaAsP and emitter layer InP.

$$E_{g(x)} = E_{g2} + \frac{1}{2} (E_{g1} - E_{g2}) [1 - \tanh(\frac{x - l_1 - l_2/2}{l_2})] \quad (1)$$

其中 E_{g1} 为InP的禁带宽度, E_{g2} 为InGaAsP的禁带宽度, x 是光阴极内任一处到发射面InP/Ag的距离。如果把价带顶取为零点, 则 $E_{g(x)}$ 就代表了无任何偏压或结电压时电子的势能 $G(x)$ 。如果外加偏压于光阴极上, 使其相对Ag膜的费米能级 E_{Fm} 产生电势 $\psi(x)$, 则光阴极的导带底相对于 E_{Fm} 的变化为 $G(x) - \psi(x)$, $\psi(x)$ 可以通过求解泊松方程并取适当的边界条件来求得, 取渐变区的中点 $l_3 = l_2 + \frac{l_2}{2}$ 为吸收层与发射层的分界点, 则结果如下:

当耗尽层未扩展到光吸收层时:

$$\psi(x) = \frac{q N a_1}{\epsilon_0 \epsilon_{r1}} (\frac{1}{2} x^2 - wx) + \phi_m \quad (0 \leq x \leq l_3) \quad (2)$$

$$w = [\frac{2 \epsilon_{r1} \epsilon_0 (V + V_B)}{q N a_1}]^{1/2} \quad (3)$$

当耗尽层已扩展到有源层时:

$$\psi_1(x) = \frac{q N a_1}{\epsilon_{r1} \epsilon_0} (\frac{1}{2} x^2 - l_3 x) + \frac{q N a_2}{\epsilon_{r1} \epsilon_0} (l_3 - w) + \phi_m \quad (0 \leq x \leq l_3) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \psi_2(x) = & \frac{q N a_2}{\epsilon_{r2} \epsilon_0} (\frac{1}{2} x^2 - wx) + \frac{q l_3}{2 \epsilon_0} (\frac{N a_2}{\epsilon_{r2}} - \frac{N a_1}{\epsilon_{r1}}) \\ & + \frac{q N a_2 \cdot l_3}{\epsilon_0} (l_3 - w) (\frac{1}{\epsilon_{r1}} - \frac{1}{\epsilon_{r2}}) + \phi_m \quad (l_3 < x \leq w) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\psi_3(x) = \psi_2(w) \quad (x \geq w) \quad (6)$$

$$w = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (7)$$

其中:

$$a = \frac{q N a_2}{2 \epsilon_0 \epsilon_{r2}}$$

$$b = \frac{1}{\epsilon_0} \cdot l_3 q N a_2 (\frac{1}{\epsilon_{r1}} - \frac{1}{\epsilon_{r2}})$$

$$c = \frac{q l_3}{2 \epsilon_0} (\frac{N a_1}{\epsilon_{r1}} - \frac{N a_2}{\epsilon_{r2}}) + \frac{q l_3 N a_2}{\epsilon_0} (\frac{1}{\epsilon_{r1}} - \frac{1}{\epsilon_{r2}}) - V_B - V$$

$$V_B = \phi_m - \delta_v$$

其中 V_B 、 ϕ_m 、 δ_v 如图1所示, 一般取 $\phi_m = 0.75\text{eV}$, 要求得 V_B 就得求出 δ_v , 而 δ_v 与掺杂有关。对1.3μm的场助TE光阴极, 在室温下可求得:

$$\delta_v = 1.38 \times 10^{-21} (57.44 - \ln P_0) \quad (8)$$

在室温下, 掺杂范围为 $10^{15} \sim 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 时, 可认为 $P_0 = N_a$ 。在以上各式中 ϵ_{r1} 、 ϵ_{r2} 、 N_{a1} 、 N_{a2} 分别为InP发射层与InGaAsP光吸收层的相对介电常数及掺杂。把参数 $\epsilon_{r1} = 12.35$, $\epsilon_{r2} = 13$, $E_{g1} = 1.35\text{eV}$, $E_{g2} = 0.95\text{eV}$ 及 l_1 、 l_2 、 N_{a1} 、 N_{a2} 代入 (1) — (8) 式就可

求得 $1.3\mu\text{m}$ 场助 TE 光阴极的耗尽层宽度。InGaAsP/InP 势垒高度, 掺杂 N_{a1} 、 N_{a2} 及 l_1 、 l_2 、 V 间的关系。

3 结果及分析

取 l_1 、 l_2 分别为 $0.4\mu\text{m}$ 及 $0.2\mu\text{m}$, 根据 (3)、(7) 两式就可作出 $W-V$ 曲线如图 3 所示。图中各曲线以掺杂 N_{a1} 、 N_{a2} 作参数, 图中的虚线表示离发射面为 $l_1 + l_2 = 0.6\mu\text{m}$

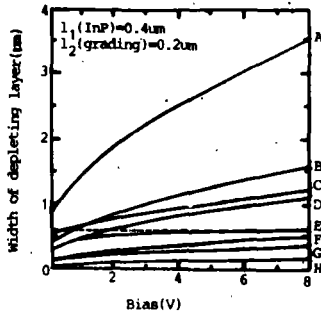


图 3 在不同掺杂情况下的耗尽层宽度

Fig. 3 Depleting layer width as a function for various doping concentrations shown as:

A: $N_{a1} = 10^{15}\text{cm}^{-3}$	$N_{a2} = 10^{15}\text{cm}^{-3}$
B: $N_{a1} = 5 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$	$N_{a2} = 5 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$
C: $N_{a1} = 10^{16}\text{cm}^{-3}$	$N_{a2} = 10^{16}\text{cm}^{-3}$
D: $N_{a1} = 10^{16}\text{cm}^{-3}$	$N_{a2} = 10^{16}\text{cm}^{-3}$
E: $N_{a1} = 10^{16}\text{cm}^{-3}$	$N_{a2} = 10^{17}\text{cm}^{-3}$
F: $N_{a1} = 5 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$	$N_{a2} = 5 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$
G: $N_{a1} = 10^{17}\text{cm}^{-3}$	$N_{a2} = 10^{17}\text{cm}^{-3}$
H: $N_{a1} = 5 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$	$N_{a2} = 5 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$

的距离, 由图中可见对 $l_1 = 0.4\mu\text{m}$, $l_2 = 0.2\mu\text{m}$ 这样的光阴极, 当掺杂 $N_a > 5 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ 时, 耗尽层已不能扩展到有源层, 就更谈不上将 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ (光吸收层)/InP (发射层) 异质结势垒拉平。另外, 由图中可见, 当 N_a 较小时, W 随 V 而增大的趋势很明显。而当 N_a 较大时, $W-V$ 曲线很平坦, 对这样的材料单靠增大偏压 V 而使耗尽层扩展到有源层是不现实的, 最有效的办法就是降低掺杂与减小 InP 发射层厚度。

图 4 是根据 (2)、(4)、(5)、(6) 式所作的各种不同参数情况下的能带弯曲情况, 图中以体内费米能级作为参考点, 以偏压 V 为各曲线的参数。

图 4(a)、4(b)、4(c) 是掺杂 $N_{a1} = N_{a2} = 10^{15}\text{cm}^{-3}$ 情况下的能带图, 由图中可见, 在 $l_1 = 1\mu\text{m}$ 情况下, 即使外加偏压为 1.5V 时, 耗尽层也远远扩展到光吸收层, 而 InGaAsP/InP 势垒能否完全拉平还与 InGaAsP/InP 渐变层宽度有关。在渐变层宽度

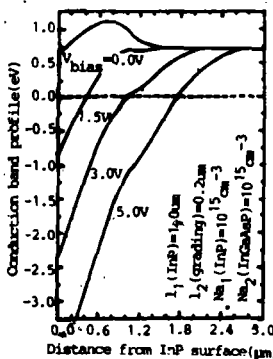


图 4 (a)

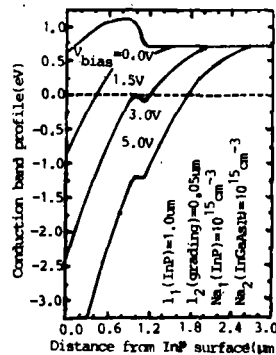


图 4 (b)

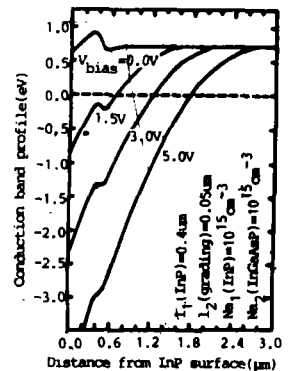


图 4 (c)

较小 (例如 l_2 为 $0.05\mu\text{m}$) 的情况下, 虽然外场已使耗尽层远远深入到光吸收层 (图 4(b)), 但还不足以完全拉平异质结势垒。而在 l_2 较大 (例如为 $0.2\mu\text{m}$) 的情况下, 则很容易拉平

异质结势垒(图4(a))。由图4(b)、4(c)还可以看出,尽管它们的渐变层宽度均为0.05 μm ,但由于InP 发射层厚度 l_1 不同,对异质结的势垒影响就不同。在这样的偏压下, l_1 越小越有利于异质结势垒的消除。所以,在光阴极材料的生长中应尽量减少InP 发射层厚度。

图4(d)、4(e)、4(f)是掺杂 $N_{a1}=N_{a2}=10^{16}\text{cm}^{-3}$ 的能带图,由图中可见,在 l_1 小到0.4 μm 的情况下,在偏压稍小时就无法消除异质结势垒。在这种情况下应尽量减少InP 发射层厚度使 $l_1<0.3\mu\text{m}$,另外,由图4(e)、4(f)还可以看出,此时渐变层的减小不是

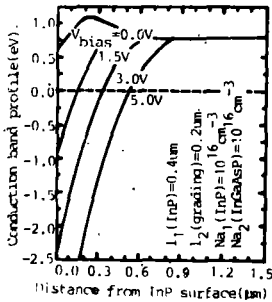


图 4 (d)

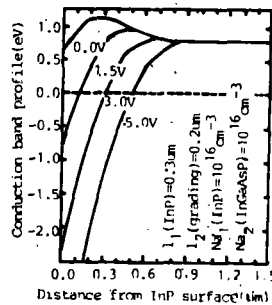


图 4 (e)

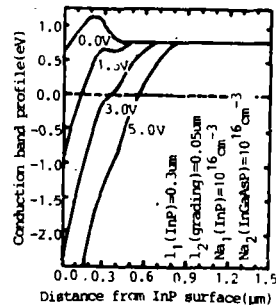


图 4 (f)

图 4 InGaAsP/InP 异质结在各种参数下的能带模型

Fig.4 Model conduction band profile for an InGaAsP/InP heterojunction with parameters as shown in figures.

阻碍势垒的消除,而是利于势垒的消除。

总结以上分析得到以下结论:对场助TE InP (衬底)/InGaAsP (光吸收层)/InP (发射层)/Ag/Cs.O结构的光阴极,在材料外延过程中(1)应尽量降低掺杂及减小InP 发射层厚度。(2)在掺杂较低时(如 10^{15}cm^{-3}),要求InGaAsP/InP 渐变层宽度越大越好;而在掺杂较高(如大于 10^{16}cm^{-3})时,则要求InGaAsP/InP 渐变层越小越好。

最后再提一下光吸收层 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 的厚度,它的最佳厚度应使入射光得以最大限度地吸收,并使光电子最大限度地输运到发射层中去,考虑到1.3 μm $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 的光吸收系数及少子扩散长度,此厚度一般取为1.5~2 μm 。

参考文献

- 1 Spicer W E. Appl Phys, 1979, 12:115
- 2 Sommer著,侯涛译.光电发射材料.北京:科学出版社,1979
- 3 Gregory P E, Escheer J S, et al. J Vac Sci Technol, 1973, 15(4):1463
- 4 AD. A059960, 81978
- 5 Oldham W G, Milnesy A G, Solid state Electronics, 1963, 6:121
- 6 Escher J S, et al. IEEE Electron Device Letters, 1981, EDL-2:123
- 7 Saul R H. Electrochem Soc 1971, 118:793
- 8 王存让.近红外场助TE光阴材料InGaAsP/InP的液相外延[硕士论文].西安光机所,1990

CALCULATION OF ENERGY BAND OF FIELD-ASSISTED InGaAsP/InP PHOTOCATHODE IN THE 1.3 μ m RANGE AND EPITAXIAL LAYER DESIGN

Wang Cunrang, Guo Lihui, Li Jinming, Hou Xun, Zhang Gongli

Xian Institute of Optics and Precision Mechanics, Academia Sinica, Xian 710068

Received date: 1991-03-11

Abstract In this paper, the principle of the field-assisted photocathode InP(substrate)/InGaAsP(photon absorber layer)/InP(emitter layer)/Ag/CsO, responded to 1.3 μ m was described briefly. Its energy band was calculated. We attained the quantitative relationship among the barrier height between InGaAsP photon absorber layer and InP emitter layer, doping level, thickness of InP emitter layer, the InGaAsP/InP hetero-junction composition grading distance, voltage of reversed bias and the width of depleting layer, basised on this relationship. All parameters of photocathode are discussed.

Keywords Field assisted photocathode; Heterojunction; Calculation of energy band



Wang Cunrang was born in 1963, and graduated from Department of Physics of Northwest University in 1987. Mr. Wang got M. S. degree in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Academia Sinica, in 1990. He is now working in this Institute. His research intrests include semiconductor material and semiconductor photocathodes.