

文章编号：1001-4322(2005)02-0279-04

提高砷化镓二次电子发射系数的探讨*

谢爱根, 裴元吉, 王 荣, 孙红兵

(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230029)

摘 要：介绍了延长负电子亲和势二次电子发射材料砷化镓的逸出深度的设计,并给出了经过特殊设计的这种砷化镓的能级示意图,然后对通常的砷化镓和经过特殊设计的砷化镓的二次电子发射系数的理论值进行了比较,得出:当原电子入射能量较低(小于 10 keV)时,两种砷化镓的二次电子发射系数差值较小;当原电子入射能量较高(大于 20 keV)时,经过特殊设计的砷化镓的二次电子发射系数比普通砷化镓的二次电子发射系数大,而且随着原电子入射能量的升高,两种砷化镓的二次电子发射系数差值也在增大。

关键词：二次电子发射系数；负电子亲和势；二次电子发射材料；逸出深度

中图分类号：O346.1

文献标识码：A

在具有一定能量的原电子轰击下,从物体表面发射电子的现象称为二次电子发射。二次电子数与原电子数之比定义为二次电子发射系数。影响二次电子发射材料的二次电子发射系数的因素很多,其中,二次电子发射材料的逸出深度是影响其二次电子发射系数的重要因素之一,本文将从理论方面探讨通过延长负电子亲和势二次电子发射材料砷化镓的逸出深度的方法来提高其二次电子发射系数。

1 能级模型

通常的负电子亲和势的二次电子发射材料砷化镓的能级如图 1 所示,该图考虑了在 P 型半导体砷化镓基底(晶向为(100))上覆盖 N 型表面层氧化铯层^[1]。从 F 到 E 段为 N 型氧化铯层,从 E 到 D 段为 p-n 结的耗尽层,从 D 到 C 段为 P 型半导体砷化镓层(厚度大于负电子亲和势二次电子发射材料砷化镓的逸出深度), E_0 为真空能级, E_C 为导带, E_F 为费米能级, E_V 为价带,有效电子亲和势 χ_{eff} 为负值。

经过特殊设计的负电子亲和势二次电子发射材料砷化镓的能级如图 2 所示。图 2 考虑了 P 型半导体砷化镓基底(晶向为(100))上覆盖 N 型表面层氧化铯层^[1],并且考虑了 P 型半导体砷化镓与 P 型半导体镓铝砷的 P-P 型异质结表面态的影响^[2]。P 型半导体砷化镓层的厚度约为负电子亲和势二次电子发射材料砷化镓的逸出深度,P 型半导体砷化镓与 P 型半导体镓铝砷为 P-P 型异质结层,从 B 到 A 段为 P 型半导体镓铝砷层(厚度约等于负电子亲和势二次电子发射材料砷化镓的逸出深度)。

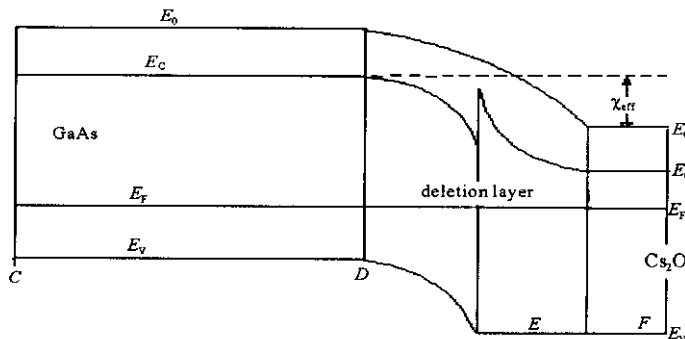


Fig. 1 Energy band schematic diagram of a ordinary negative electron affinity emitter GaAs

图 1 通常的负电子亲和势二次电子发射材料砷化镓的能级示意图

假设高能原电子从经过铯氧激活所形成的负电子亲和势二次电子发射材料砷化镓的表面入射,因为 CF 段(DF 段很短,其长度相对于 CD 段可忽略)长度约为负电子亲和势二次电子发射材料砷化镓的逸出深度,所以高能原电子穿过 CF 段所激活的部分内二次电子可以从砷化镓的表面逸出成为二次电子,高能原电子穿过

* 收稿日期 2004-05-17; 修订日期 2004-09-13

基金项目:国家创新工程资助课题

作者简介:谢爱根(1971—),男,安徽芜湖人,博士研究生,研究方向为二次电子发射材料,合肥 6022 信箱,E-mail: xag@mail.ustc.edu.cn.

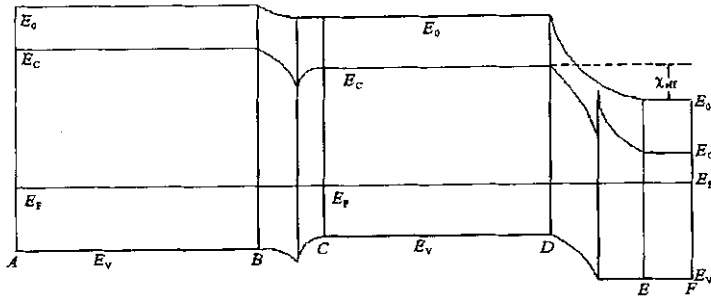


Fig. 2 Energy band schematic diagram of a specially designed negative electron affinity emitter GaAs

图 2 特殊设计的负电子亲和势二次电子发射材料砷化镓的能级示意图

AB 段所激活的内二次电子可以到达 BC 段(由于 AB 段的长度约等于负电子亲和势二次电子发射材料砷化镓的逸出深度),但是,因为 AB 段离砷化镓的表面距离大于负电子亲和势二次电子发射材料砷化镓的逸出深度,所以在通常情况下,高能原电子穿过 AB 段所激活的绝大部分内二次电子不能从砷化镓的表面逸出成为二次电子,但是,我们可以通过合适的设计使高能原电子穿过 AB 段所激活的部分内二次电子从砷化镓的表面逸出成为二次电子。

由于在室温条件下,砷化镓的禁带宽度为 1.42 eV,不同组份的镓铝砷的禁带宽度可表示为^[3]

$$E_g(x) = E_g(\text{GaAs}) + 1.429 \text{ eV} \times x - 0.14 \text{ eV} \times x^2, 0 \leq x \leq 0.44 \quad (1)$$

式中 x 是镓铝砷中(镓铝原子数的组份的总和为 1)铝原子数的组份,由(1)式可知,当镓铝砷中铝的组份 $x = 0.4$ 时,镓铝砷的禁带宽度为 1.973 eV,镓铝砷(铝的组份 $x = 0.4$)的禁带宽度比砷化镓的禁带宽度宽 $\Delta E = 0.553 \text{ eV}$,可以通过适当的掺杂使 P 型镓铝砷(铝的组份 $x = 0.4$)的导带比 P 型砷化镓的导带高约 $\Delta E/2 = 0.2765 \text{ eV}$ (约 5.3 kT ,室温时 1 $kT = 0.026 \text{ eV}$),即 AB 段镓铝砷的导带比 CD 段砷化镓的导带高约 $\Delta E/2 = 0.2765 \text{ eV}$,所以高能原电子穿过 AC 段所激活的内二次电子穿过 BC 段(BC 段很短,其长度相对于 AB 段可忽略,内二次电子穿过 BC 段的能量损失也可以忽略不计)时,它们距离导带底至少有几 kT ,对于负电子亲和势半导体来说,落入导带底部几 kT 范围内的电子,在与价带中的空穴复合之前,可在导带底部停留相当长的时间。在这段时间里,电子以非平衡少数载流子的形式向表面扩散运动。由于没有表面势垒的障碍,扩散长度就相当于逸出深度^[4],那些在 AC 段被激活的内二次电子又可以穿过 CF 段而从砷化镓的表面逸出成为二次电子。所以高能原电子穿过 CF 段和 AC 段所激活的部分内二次电子都可以从砷化镓的表面逸出成为二次电子,这样砷化镓的逸出深度为 AC 段与 CF 段之和。由于负电子亲和势二次电子发射材料镓铝砷的逸出深度约等于砷化镓的逸出深度^[5],所以经过特殊设计的砷化镓的逸出深度约为通常的砷化镓的逸出深度的两倍。

2 两种二次电子发射系数理论计算结果的比较

根据二次电子发射的物理过程和一些理论,通常的负电子亲和势二次电子发射材料砷化镓的二次电子发射系数可以表示成

$$\delta = B \frac{E_{pe}}{\varepsilon} \frac{\lambda}{R} (1 - e^{-R/\lambda}) \quad (2)$$

由上文所述,经过图 2 设计的负电子亲和势二次电子发射材料砷化镓的二次电子发射系数可以表示成

$$\delta = B \frac{E_{pe}}{\varepsilon} \frac{2\lambda}{R} (1 - e^{-R/2\lambda}) \quad (3)$$

(2)式和(3)式中 B 是二次电子的逸出几率, E_{pe} 为原电子入射能量, λ 是二次电子的逸出深度, R 是原电子在发射体内的射程, ε 是原电子激发一个内二次电子所需要的平均能量。激发一个内二次电子所需的平均能量与半导体材料禁带宽度之间的关系为^[5]

$$\varepsilon = 2.6E_g + 0.7 \text{ eV} \quad (4)$$

若原电子入射能量 E_{pe} 较低($E_{pe} < 20 \text{ keV}$),又由于射程 R 小于通常负电子亲和势二次电子发射材料砷化镓的逸出深度,所以两种砷化镓的二次电子发射系数差距较小。若原电子入射能量 E_{pe} 很高($E_{pe} > 30 \text{ keV}$),由于射程 R 大于通常负电子亲和势二次电子发射材料砷化镓的逸出深度,所以两种负电子亲和势二次电子发射材料的二次电子发射系数有较大差距。由于两种负电子亲和势二次电子发射材料的表面态相同,所以(2)式和

(3)式中的逸出几率 B 可以都取 $0.18^{[7]}$ ，二次电子的逸出深度 λ 可以都取 $3 \mu\text{m}^{[7]}$ ，对于(2)式中 ε 可以根据(4)式和室温条件下的砷化镓的禁带宽度为 1.42 eV 算出 $\varepsilon = 4.4 \text{ eV}$ ，原电子在发射体内的射程 R 可以表示为^[8]

$$\frac{R}{\mu\text{m}} = 0.027 \left(\frac{E_{pe}}{\text{keV}} \right)^{1.46} \tag{5}$$

根据(5)式可以算出：当原电子入射能量为 25 keV 时，原电子的射程为逸出深度 λ ，即 $3 \mu\text{m}$ 。当原电子入射能量为 40.5 keV 时，原电子的射程为两倍逸出深度 λ ，即 $6 \mu\text{m}$ 。所以当原电子入射能量大于 25 keV 时，原电子不但要穿过图 2 设计砷化镓的砷化镓部分，而且还要射入甚至穿过砷化镓的镓铝砷部分。根据(4)式还可以算出，原电子在镓铝砷(铝的组份为 0.4)内激发一个内二次电子平均需要 5.83 eV 能量，所以对于(3)式，能量 ε 可以根据(4)式和(5)式近似表示成

$$\varepsilon = \begin{cases} 4.4 \text{ eV}, & E_{pe} < 25 \text{ keV} \\ 5.83 \text{ eV} - \frac{4.3}{0.027 (E_{pe}/\text{keV})^{1.46}} \text{ eV}, & 25 \text{ keV} < E_{pe} < 40.5 \text{ keV} \\ 5.1 \text{ eV}, & E_{pe} > 40.5 \text{ keV} \end{cases} \tag{6}$$

根据逸出几率 B 取 0.18 ，逸出深度 λ 取 $3 \mu\text{m}$ 以及(2)式~(6)式，可以算出通常的和经过图 2 设计的两种二次电子发射系数理论计算结果，如图 3 所示。

从图 3 可以看出，当原电子入射能量较低($E_{pe} < 10 \text{ keV}$)时，两种二次电子发射系数差值较小，当原电子入射能量较高($E_{pe} > 20 \text{ keV}$)时，两种二次电子发射系数差值较大，而且随着原电子入射能量的升高，其差值也在增大。所以当原电子入射能量较高($E_{pe} > 20 \text{ keV}$)且要求二次电子发射系数较大的情况下，经过图 2 设计的砷化镓就比通常的砷化镓优越多了。

3 讨论与结论

在不同的原电子入射能量范围，原电子入射能量与原电子在砷化镓发射体内的射程 R 的关系表达式有差别，但由于二次电子发射理论还不完善，实验还不充分，对不同的原电子入射能量范围的原电子入射能量与原电子在砷化镓发射体内的射程 R 的关系表达式只能用式(5)粗略地表示，所以本文只能从理论上粗略地比较经过图 2 设计的砷化镓的二次电子发射系数和通常的砷化镓的二次电子发射系数。经过该比较我们可以得出：当原电子入射能量较低(小于 10 keV)时，两种负电子亲和势二次电子发射材料砷化镓的二次电子发射系数差值较小，当原电子入射能量较高(大于 20 keV)时，两种负电子亲和势二次电子发射材料砷化镓的二次电子发射系数差值较大，而且随着原电子入射能量的升高，两种负电子亲和势二次电子发射材料砷化镓的二次电子发射系数差值也在增大。当然，随着二次电子发射理论的完善和实验的进展，图 2 的设计需要进一步改进。

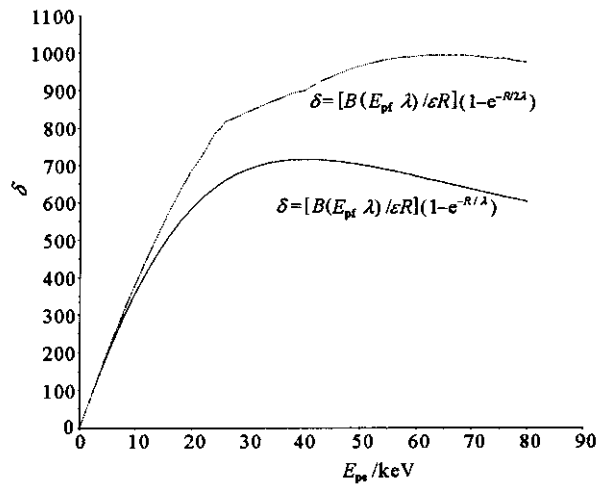


Fig. 3 Two kinds of secondary electron emission coefficient
图 3 两种二次电子发射系数

参考文献：

[1] 薛增泉, 吴全德. 电子发射与电子能谱 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1993. 143—144. (Xue Z Q, Wu Q D. Electron emission and electron energy spectra. Beijing: Beijing University Press, 1993. 143—144.)

[2] 刘元震, 王仲春, 董亚强. 电子发射与光电阴极 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995. 39—40. (Liu Y Z, Wang Z C, Dong Y Q. Electron emission and photoelectric cathode. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995. 39—40.)

[3] Allali M El, Sorensen C B, Veje E. Experimental determination of the GaAs and $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ band-gap energy dependence on temperature and aluminum mole fraction in the direct band-gap region [J]. *Physical Review*, 1993, **48**(7): 4398—4404.

[4] 承欢, 江剑平. 阴极电子学 [M]. 西安: 西北电讯工程出版社, 1986. 149. (Cheng H, Jiang J P. Cathode electronics. Xi'an: North-west Telecommunication Engineering Publication, 1986. 149.)

[5] Martili R U, Eitenberg M. Electron transport and emission characteristics of negative electron affinity $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ alloys ($0 \leq x \leq 0.3$) [J].

Journal of Applied Physics ,1974 **45**(9) 3896—3898.

- [6] Martili R U , Pankove J I. Secondary electron emission from the GaN :Cs-O surface[J]. *Applied Physics Letters* ,1974 **25**(10) 549—550.
- [7] Martili R U , Schultz M L , Gossenberger H F. Reflection and transmission secondary emission from GaAs⁺[J]. *Journal of Applied Physics* ,1972 ,**43** (11) #803—4809.
- [8] Martili R U , Wang C C. Electron-beam penetration in GaAs⁺[J]. *Journal of Applied Physics* ,1973 ,**44**(7) 3350—3351.

Discussion of the improving secondary electron emission coefficient

XIE Ai-gen , PEI Yuan-ji , WANG Rong , SUN Hong-bing

(*National Synchronization Laboratory , University of Science and Technology of China , P. O. Box 6022 , Hefei 230029 , China*)

Abstract : The design of lengthening the diffusion lengths of negative electron affinity emitter GaAs was introduced ; the secondary electron emission coefficients of normal GaAs was compared with that of specially designed GaAs. The conclusion shows that the deviation of the two kinds of secondary electron emission coefficient is smaller if primary electron incident energy is lower (less than 10 keV) and that the deviation of the two kinds of secondary electron emission coefficient is larger if primary electron incident energy is higher (more than 20 keV). With the primary electron incident energy becoming higher , the deviation of the two kinds of secondary electron emission coefficient becomes larger.

Key words : Secondary electron emission coefficient ; Negative electron affinity ; Secondary electron emitter ; Diffusion lengths

