

# 埋入 GaAs/AlAs 周期反射层提高反射式负电子亲和势阴极效率的研究

徐 宏 伟 王 鼎 盛

(中国科学院物理所表面物理实验室, 北京, 100080)

1991年7月11日收到, 10月29日修改定稿

本文提出了在高掺杂反射式负电子亲和势 GaAs 光阴极材料的活性层下埋入 GaAs/AlAs 周期反射层, 提高光的利用率, 同时在界面附近引入电子势垒, 提高光电子发射效率。文中对周期反射层的反射性能进行了设计和计算, 并计算了埋入 GaAs/AlAs 周期反射层后的光电子发射效率。讨论了埋入 GaAs/AlAs 周期反射层后最佳活性层厚度的选取, 指出了对于扩散长度较短的材料, 通过埋入周期反射层, 能用较薄的活性层达到甚至超过无限厚活性层材料的极限效率。最后对光电发射实验的初步结果进行了讨论。

**PACC:** 6855, 4280Q, 7220J

## 一、引言

负电子亲和势(NEA)光电发射材料的光电子发射过程可由三阶段模型描述<sup>[1]</sup>。由于 NEA 光电子发射材料真空能级低于体内导带底, 体内光激发电子(热电子)在弛豫到导带底, 沿导带底扩散到表面后, 仍可发射出来。由于弛豫到导带底的“冷电子”的扩散长度约  $1 \mu\text{m}$  量级, 比热电子的逃逸深度(10 nm 量级)长得多, 因此 NEA 光电子发射材料的效率比传统材料高得多。由于其优越的光电灵敏度, NEA 材料特别适合于微光探测或微光成像, 并且已经有了实际应用。

NEA 的形成主要是由于表面覆盖 Cs + O 层, 使表面功函数降低, 同时 P型掺杂在表面附近形成宽度为  $w$  的空间电荷区, 能带向下弯曲, 使体外真空能级低于导带底, 如图 1。

对于无限厚的活性层, 当电子由体内向外扩散, 其光电子发射产额可由电子扩散方程得出<sup>[2]</sup>:

$$Y = (1 - R_s) \cdot \frac{\alpha L}{1 + \alpha L} \cdot p, \quad (1)$$

其中  $R_s$  为表面的反射系数,  $(1 - R_s)$  表示进入活性层的光的比例。 $\alpha$  为光吸收系数,  $L$  为冷电子扩散长度,  $\frac{\alpha L}{1 + \alpha L}$  称为表面收集系数, 它给出冷电子经扩散通过空间电荷区到达表面的比例。通过空间电荷区并在表面产生光电发射的比例由因子  $p$  表示。从方

程(1)可以看出,除了表面区的发射几率  $P$ (与表面的活化层有关)之外,体性能  $\alpha$  和  $L$  也是决定光电发射产额的重要参数。 $\alpha L$  越大,光电发射产额越大。

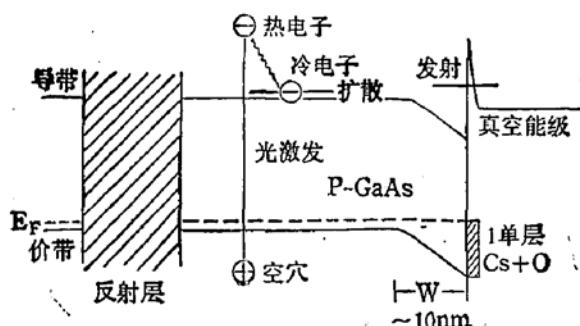


图 1 NEA 光电发射机理示意简图  
阴影线区域表示本文建议的反射层

因此必须用重掺杂才能使  $W$  较小。对于 GaAs, 为使空间电荷区为  $10\text{ nm}$ , 要求  $N_A$  掺到  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  以上。然而从少子扩散长度与掺杂浓度的关系可以看出<sup>[2,3]</sup>, 随着掺杂浓度的提高, 少子扩散长度很快下降, 在高于  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  以后, 一般小于  $1\text{ }\mu\text{m}$ 。因此重掺杂限制了光电发射产额的进一步提高。对于 GaAs, 其光吸收系数在近红外区( $\lambda > 800\text{ nm}$ ) 小于  $1\text{ }\mu\text{m}^{-1}$ , 因此光的穿透深度大于  $1\text{ }\mu\text{m}$ 。如果 GaAs 的少子扩散长度  $L$  小于光的穿透深度, 则距表面的深度大于少子扩散长度的光激发电子不能扩散到表面并发射出去。为了充分利用所有入射光, 增加光电子发射效率, 我们提出在活性层下埋入 GaAs/AlAs 周期反射层, 增加光电发射有效区内的光激发, 同时引入界面电子势垒, 促使电子向表面扩散, 提高光电发射产额, 弥补由于扩散长度短造成的光电子发射的损失。

## 二、反射层的设计和检验

多层膜的反射系数可以采用转移矩阵的方法计算<sup>[4]</sup>。图 2(a) 为多层反射膜反射率计算的结构示意图, 对不同的材料和结构, 多层反射膜具有不同的反射增强范围。通过选择各层的材料和调节各层的厚度, 可使反射增强落在人们最关心的波段范围内。由于目前关心的 NEA 器件的响应波段是  $700\text{--}900\text{ nm}$ , 我们应调整多层反射膜使其反射增强落在这一范围内。

我们选择 GaAs/AlAs 多层周期结构做为周期反射层, 埋在活性层下以提高光的利用率。因为 GaAs、AlAs 是晶格匹配得最好的两种半导体材料, 这里的结果可应用于分子束外延(MBE)反射式 NEA 器件。同时, 用 GaAs/AlAs 多层周期结构做反射层, 由于 AlAs 与 GaAs 的带边不连续, 可使周期反射层与活性层界面产生一个电子势垒, 有利于促使电子向表面扩散。

图 3 是 GaAs/AlAs 周期反射层的反射率的计算结果。设图 2(a) 结构中  $n_0$  和  $n_T$  都取 GaAs 的折射率 ( $n_{\text{GaAs}} = 3.57$ ), 中间是 GaAs/AlAs 的周期结构, 取 AlAs 的折射率  $n_{\text{AlAs}} = 2.97$ , GaAs 和 AlAs 层的厚度分别为  $56.0\text{ nm}$  和  $67.3\text{ nm}$ 。这样选取的周期反射层其反射增强范围正好落在我们所希望的波段内。图 3 中是周期数分别为 4,

在发射阶段, 当电子进入空间电荷区时, 受到内电场的作用, 电子受声子散射会重新分布, 部分电子能量低于真空能级, 发射不出去, 只能通过其他机制与空穴复合, 降低了光电发射效率。因此要求空间电荷区的宽度尽可能保持与声子散射的平均自由程接近, 即约  $10\text{ nm}$  左右。由于空间电荷区宽度 ( $W$ ) 反比于掺杂浓度 ( $N_A$ ) 的平方根,

$$W \propto \sqrt{1/N_A},$$

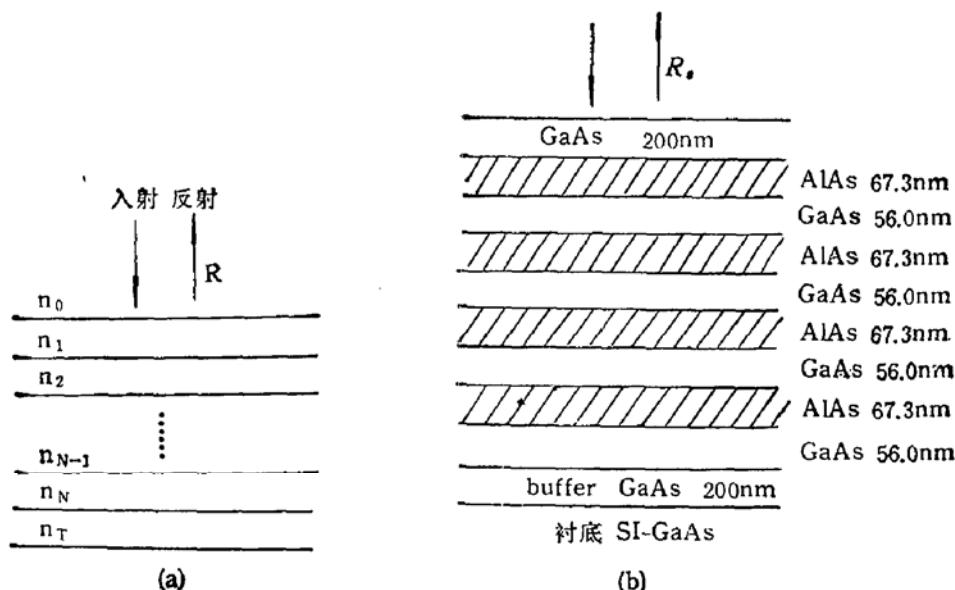


图2 周期反射层反射率的计算简图 (a) 及用 MBE 制做的含周期反射层样品的结构

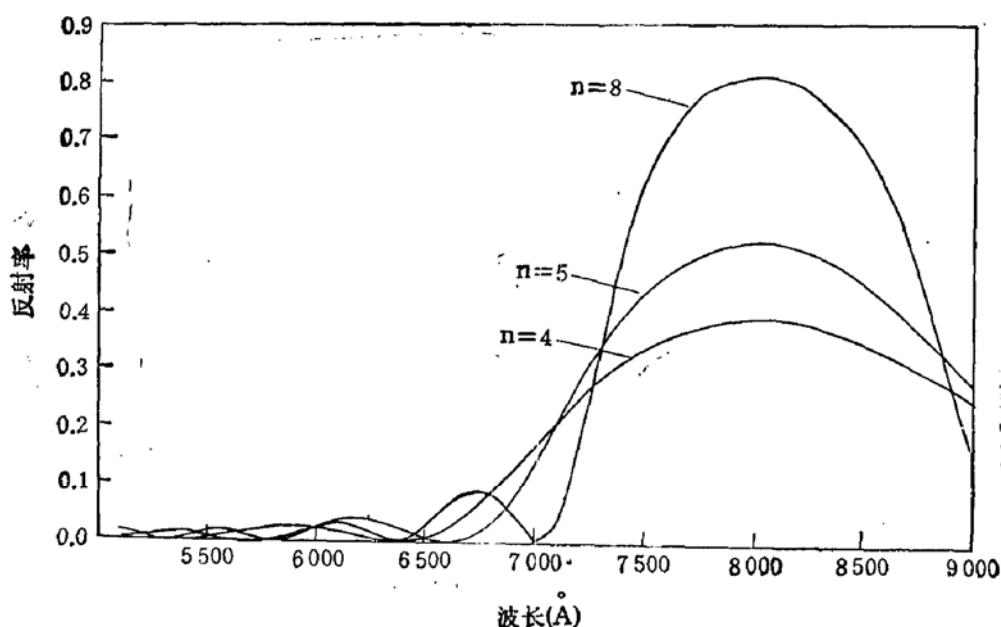


图3 周期反射层的反射率曲线的计算结果周期数分别为 4, 5 和 8

5, 8 时的反射率曲线。为避免周期反射层在 GaAs 光电发射响应曲线中引入响应峰, 我们取周期数为 4。

为了检验实际的周期反射层是否具有预料的效果, 我们用 MBE 生长了如图 2(b) 所示结构的样品。为了使光反射率测量更能体现周期反射层的反射效果, 活性层厚度取为 200 nm (小于实用器件)。

MBE 生长在 VG V80H 超高真空系统中进行, 生长条件是: 衬底温度为 600°C, GaAs 生长速率为 1 μm/h。生长过程中, RHEED 图像显示富 As 的 2×4 表面重构。

生长好的样品置于空气中测量其光反射率曲线, 图 4 是测得的反射率曲线及理论计算的反射率曲线。可以看出, 对未埋入周期反射层的体材料, GaAs 的反射率曲线较平直, 对于埋入反射层的反射率曲线, 实验和理论较吻合, 都在 750—800 nm 范围内产生一个很深的谷, 由于 4 层反射层的反射强度与表面的反射强度差不多, 这个谷可由反射层的反射与表面反射相干涉很容易理解, 说明了周期反射层这一范围反射增强。在高能端, 实验曲线与理论有较大的不同, 虽然两者都有振荡行为, 但理论曲线的振荡比实验曲线强得多, 而且位置不一致。因为在理论计算中没有考虑衰减效应, 但在上面的样品中衰减效应又不能完全忽略, 因而导致理论结果偏离实验。

由光反射率曲线的实验测量和理论计算可知, 周期反射层确实在我们所希望的波段范围内产生了反射增强, 因而可以用于 NEA 光电发射材料, 提高光的利用率, 达到提高光电发射效率的目的。

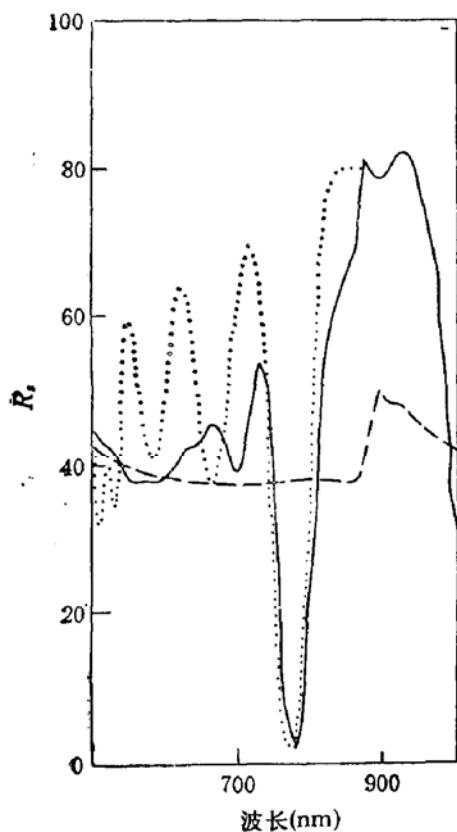


图 4 埋入周期反射层后 GaAs 样品的反射率曲线。实线为实验曲线, 点线为理论计算曲线, 短线为体 GaAs 反射率

的。

### 三、反射层对 NEA 光电发射效率的影响

由以上对周期反射层反射率的计算结果, 可进而计算光电发射量子效率。对 NEA 材料, 光电子的发射由三阶段模型描述, 光激发电子由体内向表面扩散, 然后通过表面发射出去。电子的扩散可由扩散方程描述<sup>[1]</sup>:

$$-D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \frac{n}{\tau} = G(x), \quad (2)$$

其中  $n(x)$  为少子密度,  $D$  为扩散系数,  $\tau$  为寿命,  $G(x)$  为光激发少子产率, 扩散长度  $L = \sqrt{D\tau}$ 。表面区的发射可以用发射几率  $P$  描述, 在最简单模型中,  $P$  定义为:

$$P = \begin{cases} 1 & \text{对 NEA} \\ 0 & \text{对非 NEA} \end{cases}$$

即当处于负电子亲和势时, 真空能级低于体内导带底, 体内的光激发电子沿导带底扩散, 到达表面的电子全部发射出去。否则, 当表面存在势垒时, 电子发射出去的几率很小。

解上面的扩散方程, 得到反射式 NEA 光电发射量子产额  $Y^{[1]}$ ,

$$Y = P \cdot (1 - R_F) \cdot \frac{\alpha L}{1 + \alpha L} \cdot \frac{1}{1 - R_F \cdot R_B \exp(-2\alpha t)} \\ \cdot \left\{ 1 + \frac{[2(1 - \alpha L)e^{-\alpha t} + 2(S - 1)(e^{-\alpha t} - e^{-t/L})] \cdot e^{t/L}}{[(S - 1) - (S + 1)e^{2t/L}] \cdot (1 - \alpha L)} \right. \\ \left. + R_B \cdot \exp(-2\alpha t + t/L) \right\}$$

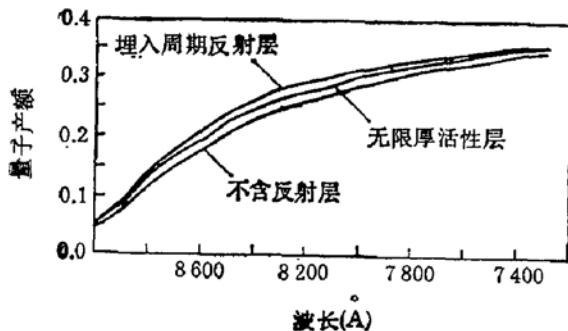


图5 埋入周期反射层有限厚活性层和不埋入周期反射层有限厚活性层以及无限厚活性层三种情况光电发射产额的比较

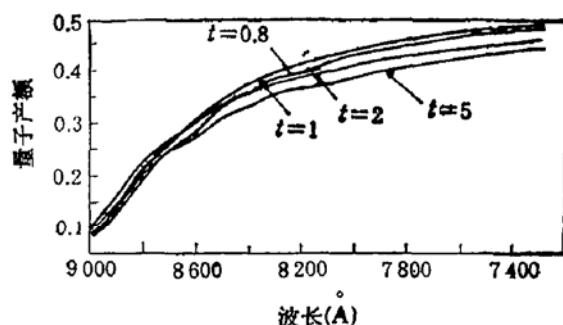


图6 埋入 GaAs/AlAs 周期反射层后, 不同活性层厚度下的光电发射量子产额的比较

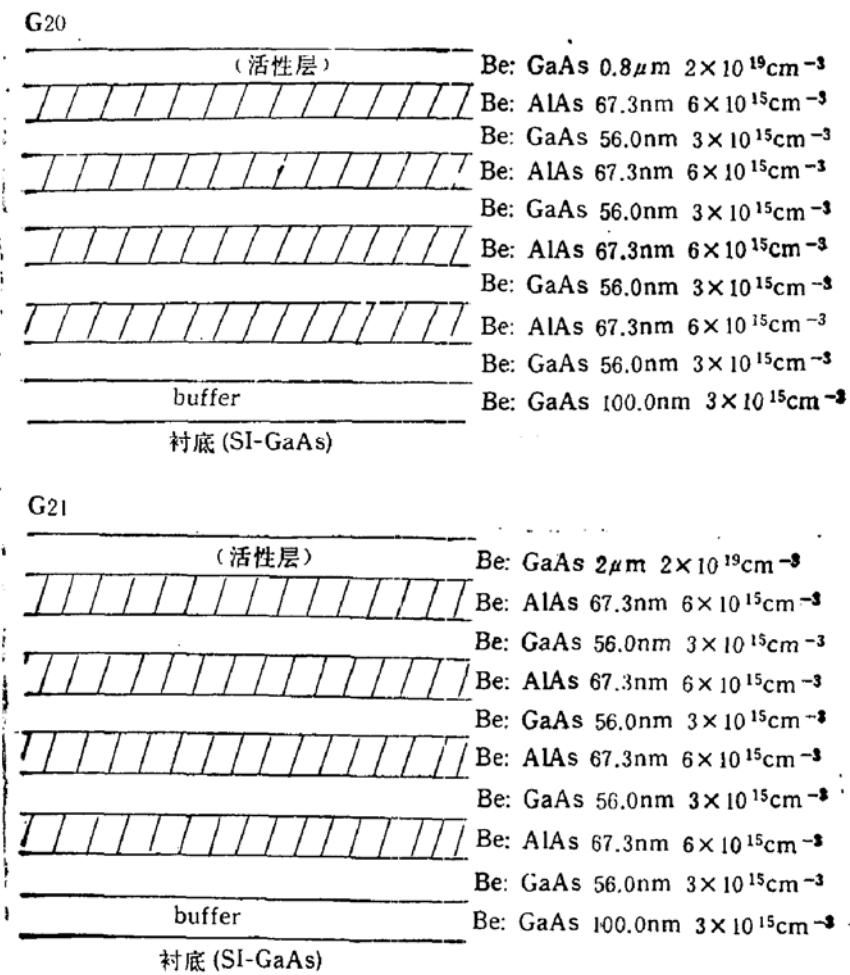


图7 MBE 生长的埋入周期反射层结构的光电发射材料结构。G20 和 G21 活性层厚度分别为  $0.8 \mu\text{m}$  和  $2 \mu\text{m}$ 。

$$\cdot \frac{[(-S+1)(1-\alpha L)e^{-t/L} + 2(S+\alpha L)e^{\alpha t} - (S+1)(\alpha L+1)e^{t/L}]}{[(S-1) - (S+1)e^{2t/L}] \cdot (1-\alpha L)}, \quad (3)$$

其中  $S$  为界面相对复合速率, 它等于界面复合速度除以体扩散速度,  $t$  为活性层的厚度,  $\alpha$  为吸收系数,  $R_F$  为正面反射率,  $R_B$  为背面反射率,  $L$  为少子扩散长度。可以看出, (3) 式的前三项因式就是(1)式, 当  $t \rightarrow \infty$  时, (3) 式变为(1)式。其他项反映了表面, 界面的反射和复合, 当活性层很厚时, 它们不起作用。

取吸收系数  $\alpha(h\nu)$  为 Zn:GaAs、掺杂浓度为  $1.1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  情况下得到的, 计算了不同情况下 NEA 光电发射量子产额, 研究埋入周期反射层后对 NEA 光电发射量子产额的影响。图 5 比较了  $S = 1$ ,  $L = 0.6 \mu\text{m}$  时,  $t = 1 \mu\text{m}$  情况下, 埋入周期反射层和不埋入反射层的光电发射量子产额曲线和活性层厚度很厚时的光电发射量子产额曲线。 $S = 1$  表示界面完整, 电子以扩散速率通过界面, 无其他复合。 $L$  为高掺杂下, 一般少子扩散长度的值。可以看出, 在高掺杂下, 埋入周期反射层的结构的光电发射产额在所关心的波段内得到增强, 与我们预料的结果一致, 而且比无限厚活性层情况下的光电发射产额高。由于 NEA 器件所探测的波段正好在周期反射层反射增强范围内, 预料埋入适当的周期反射层可以在较薄的活性层情况下, 使光电发射达到最佳, 发射效率优于无限厚活性层的情况。这里正是因为周期反射层反射增强的范围接近 GaAs 的带边, 这时光的穿透深度较大, 大于少子扩散长度, 因而部分光激发电子不能通过扩散到达表面, 所以埋入周期反射层才会起到增强光电发射效率的作用。若少子扩散长度很长, 则周期反射层就不能起到明显的作用。

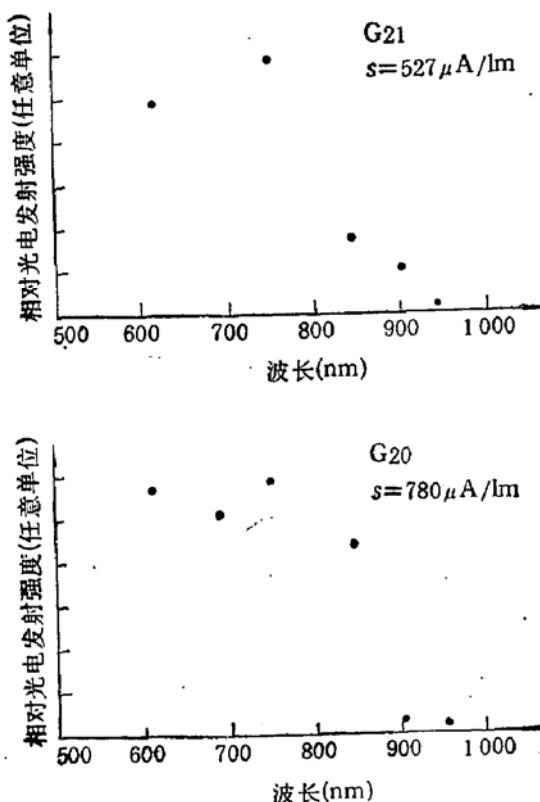


图 8 G20、G21 光电发射相应曲线

图 6 给出了  $L = 1 \mu\text{m}$ ,  $S = 0$  时, 分别取不同  $t$  值得到的光电子发射产额。这里  $S = 0$  相当于扩散到界面的电子全部返回, 即界面处有一个阻挡电子穿过的势垒, GaAs/AlAs 周期反射层就能产生这样的势垒。可以看出, 当活性层厚度接近或稍大于扩散长度时, 效果最好, 在所关心的波段内光电发射增强最大。因此活性层的厚度必须适当选择才能保证光电发射效率得到较大增强。通过对埋入周期反射层后不同活性层厚度下光电发射量子产额的比较, 我们认为埋入周期反射层后活性层厚度的最佳取值范围应是:  $L \leq t \leq 1.5L$ 。在这个范围之外, 周期反射层不能有效地提高 NEA 光电发射量子产额。这里最佳活性层厚度是与界面势垒及周期反射层的位置及反射增强大小有关。

我们还注意到界面复合速度对光电

发射产额的影响， $S$  越小，光电发射产额越大。如果只在活性层下引入一个势垒，同样可以降低  $S$ ，使光电发射产额增加\*。从(3)式可以看出，在大括号内，第二项是扩散项，引入势垒可以改进这一项的贡献，第三项是反射项，是周期反射膜的贡献，GaAs/AlAs 周期反射层可使这两项都得到改进，获得最佳效果。

为了检验上述结果及实际应用的可能性，我们进行了初步的光电发射实验。光电发射实验的样品结构如图 7。G20 选用活性层厚度  $0.8 \mu\text{m}$ , Be:GaAs 浓度  $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , 4 个周期的反射层埋在活性层下，这里活性层厚度  $0.8 \mu\text{m}$  与 Be:GaAs 浓度  $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  时的少子扩散长度相当。G21 选择同样掺杂浓度下活性层厚度为  $2 \mu\text{m}$ ，埋入同样的反射层，这里活性层厚度比少子扩散长度大得多。生长条件与前面用于反射率测量的样品的生长条件一样。

生长好的样品装入另外的真空系统活化和进行光电发射测量。表面处理及活化都在相同的条件下进行，活化采用两步活化法<sup>[5]</sup>，具体实验过程在文献[6]中有详细论述。

标准白光灵敏度测量是由标准的钨灯 2856 K 发的光照射活化好的样品，测量光电流，标准白光灵敏度就等于光电流除以光功率：

$$S = I/\phi \quad (4)$$

其中  $I$  为光电流， $\phi$  为光功率。得到 G21 的标准白光灵敏度为  $527 \mu\text{A/lm}$ , G20 的标准白光灵敏度为  $780 \mu\text{A/lm}$ ，分光测量如图 8。

可以看出，标准白光灵敏度的测量结果与前面的理论预言是一致的。即埋入周期反射层和引入界面势垒可以提高光电发射效率，但只有合适厚度的活性层才能使光电发射效率提高，否则不能有效地提高光电发射效率。同时，这一结果也印证了少子扩散长度在掺杂浓度较高时，确实很短。

分光测量结果显示在  $800 \text{ nm}$  附近，光电灵敏度响应有增强的趋势，说明周期反射层在起作用，使相应波段光电发射增强。

上面的结果初步肯定了我们的设想是合理的，即埋入 GaAs/AlAs 周期反射层可以提高 NEA 光电发射产额，但这里的结论还比较粗糙，还需要更细致的实验及排除各种不确定因素的影响。

#### 四、结 论

埋入 GaAs/AlAs 周期反射层可以提高入射光的利用率，同时产生的界面势垒也有利于电子向表面扩散，从而使 Be:GaAs NEA 材料的光电发射效率提高。埋入 GaAs/AlAs 周期反射层后，活性层的厚度应当取在  $L \leq i \leq 1.5L$  范围内，才能有效地提高 NEA 光电发射效率。实验证明周期反射层的埋入是有效的，不仅使 NEA 材料光电发射增强，而且也没有增加制作材料的复杂性，因而具有实用价值。

感谢北京真空电子技术研究所王宁、王乃铸同志的有益讨论及帮助进行光电发射测量，感谢本实验室周小川博士在 MBE 制做样品方面的帮助。

\* 与王宁同志讨论：界面处增加一个势垒，可以使扩散到界面的电子返回，只要势垒的位置合适，就能使经扩散到表面的电子增加，提高光电发射效率。这一想法同样适用于其他光电发射材料。

## 参 考 文 献

- [1] J. S. Escher, "NEA semiconductor photoemitters", Semiconductors and Semimetals, Vol.15, ed. R.K. Willardson and A.C. Beer, Academic Press, New York 1981.
- [2] K. Saito, et al., *J. Appl. Phys.*, 64(8), 3975(1988).
- [3] T. Tiwari, and S. L. Wright, *Appl. Phys. Lett.*, 56(6), 563(1990).
- [4] G. R. Fewles, "Introduction to Modern Optics", Holt, Rinehart and Winston, Inc. 1975.
- [5] B. J. Stocker, *Surf. Sci.*, 47, 501(1975).
- [6] 王乃铸, 王宁, 顾香春, 电子科学学刊, 13(2), 177(1991).

## Enhancement of Photoelectron Emission Efficiency of Negative Electron Affinity GaAs Cathode by Embedded GaAs/AlAs Multilayer Reflector

Xu Hongwei Wang Dingsheng

*(Surface Physics Laboratory, Institute of Physics, Academia Sinica, Beijing, 100080)*

### Abstract

Because usual negative electron affinity (NEA) GaAs photocathodes are highly doped and thus have short minority carrier diffusion length, a GaAs/AlAs multilayer reflector under the active layer will enhance the quantum yield by increasing the photoexcitation in the effective region of the photocathode and introducing an electron barrier at the interface. The design and measurement of the characteristic of the multilayer reflector were made and photoelectron emission yields were calculated for the structures with GaAs/AlAs multilayer reflectors. The optimum design parameters for the active layer thickness and initial photoemission measurements are discussed.

**PACC:** 6855, 4280Q, 7220J