

透射式 GaAs 光电阴极

抗光反射膜的研究

郭里辉 赛小锋 侯 洵

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 710068)

摘 要 本文计算了在透射式 GaAs 光电阴极的窗玻璃和 GaAlAs 缓冲层之间引入 Si_3N_4 或 SiO_2 膜使光电阴极的入射光反射率所产生的变化, 并测量了 Si_3N_4 膜、 SiO_2 膜和 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 复合膜对阴极反射率的影响。理论计算和测量表明, Si_3N_4 膜和 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 复合膜可有效地降低光电阴极对入射光的反射率。当 Si_3N_4 膜的厚度约为 100nm 时, 可使光电阴极的反射率降低近 60%。本文结果为科学地选择透射式 GaAs 光电阴极所需的抗光反射膜提供了依据。

关键词 透射式 GaAs 光电阴极; Si_3N_4 抗光反射膜; 反射率

0 引 言

透射式 GaAs 光电阴极对近红外辐射有很高的灵敏度, 是第三代象增强器的关键部件。这种光电阴极的结构示意图如图 1 所示。在窗玻璃与 GaAlAs 缓冲层之间的抗光反射膜, 起着减小入射光反射、提高光电阴极量子效率的作用。一些研究者曾采用 SiO_2 作这层抗光反射膜^{1, 2, 3}。这可能是考虑到窗玻璃的主要成份是 SiO_2 , 所以用 SiO_2 作抗光反射膜还会有助于窗玻璃与半导体阴极材料的粘接工艺。也有人采用过 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 复合抗光反射膜⁴。但尚未见有人测量过 SiO_2 、 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 膜使光电阴极的入射光反射率产生的变化, 或给出对这些抗光反射膜所做的理论分析。本文计算了 SiO_2 、 Si_3N_4 膜对反射式 GaAs 光电阴极入射光反射率的影响, 并测量了单层、复合抗光反射膜对减小阴极反射率的作用, 为科学地选择透射式 GaAs 光电阴极的抗光反射膜提供了依据。

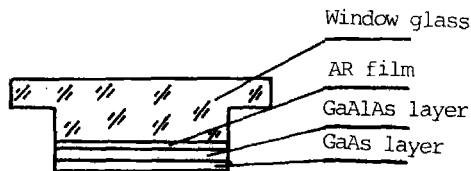


图 1. 透射式 GaAs 光电阴极结构示意图

Fig. 1. Structure sketch for GaAs photo-cathode of transmissiion type.

1 抗光反射膜的理论分析

图 2 是入射光在透射式 GaAs 光电阴极中传播的示意图。设入射光在窗玻璃入射面

本文1990年11月30日收到。

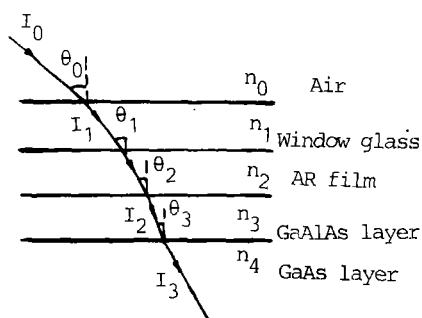


图 2 光在光电阴极中的传播示意图
Fig. 2 Light propagation sketch in photocathode.

上的光强为 I_0 ，各层内的光强用带脚标的 I 表示。空气和窗玻璃界面的反射率为 R_1 ，窗玻璃和 GaAlAs 层界面的反射率为 R_2 ，GaAl/As 层和 GaAs 层界面的反射率为 R_3 。各层内的光强满足以下三式：

$$I_1 = I_0 (1 - R_1) \quad (1)$$

$$I_2 = I_1 (1 - R_2) \quad (2)$$

$$I_3 = I_2 (1 - R_3) \quad (3)$$

将 (1)、(2) 两式代入 (3) 式，得：

$$I_3 = I_0 (1 - R_1) (1 - R_2) (1 - R_3) \quad (4)$$

光电阴极对入射光的反射率为：

$$R = 1 - \frac{I_3}{I_0} \quad (5)$$

将 (4) 式代入 (5) 式，得：

$$R = 1 - (1 - R_1) (1 - R_2) (1 - R_3) \quad (6)$$

当在窗玻璃和 GaAlAs 层间加入抗光反射膜时， R_2 可用下式表示⁵

$$R_2 = \frac{\gamma_{12}^2 + \gamma_{23}^2 + 2 \gamma_{12} \cdot \gamma_{23} \cdot \cos 2\beta}{1 + \gamma_{12}^2 \cdot \gamma_{23}^2 + 2 \gamma_{12} \cdot \gamma_{23} \cdot \cos 2\beta} \quad (7)$$

其中，

$$\gamma_{12} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (8)$$

$$\gamma_{23} = \frac{n_2 \cos \theta_2 - n_3 \cos \theta_3}{n_2 \cos \theta_2 + n_3 \cos \theta_3} \quad (9)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_2 h \cos \theta_2 \quad (10)$$

式中带下脚标的 n 表示图 2 中所示各层的折射率，带下脚标的 θ 表示各层入射光与界面法线的夹角， h 表示所加入的抗光反射膜的厚度， λ 为入射光的波长， γ 为反射系数。

可以证明，当 h 满足如下关系时，

$$h = \frac{\lambda}{4 n_2 \cos \theta_2} \quad (11)$$

R_2 可得极小值。为了简化分析,设入射光是正入射,即 $\theta_0 = \theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 0$ 。在 R_2 取极小值时,

$$h = \lambda / 4 n_2 \quad (12)$$

把(8)、(9)、(10)、(11)代入(7)式,得:

$$R_2 = \left(\frac{n_1 n_3 - n_2^2}{n_1 n_3 + n_2^2} \right)^2 \quad (13)$$

当入射光是正入射而无抗光反射膜时, R_2 为:

$$R_2 = \left(\frac{n_1 - n_3}{n_1 + n_3} \right)^2 \quad (13')$$

同理也可得出,在正入射情况下, R_1 和 R_3 分别为:

$$R_1 = \left(\frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \right)^2 \quad (14)$$

$$R_3 = \left(\frac{n_3 - n_4}{n_3 + n_4} \right)^2 \quad (15)$$

所以有抗光反射膜时,阴极的反射率为:

$$R = 1 - 64 \cdot \left[\frac{n_1 n_2^2 n_4}{(n_0 + n_1)(n_1 n_3 + n_2^2)(n_3 + n_4)} \right]^2 \quad (16)$$

无抗光反射膜时,阴极的反射率为:

$$R' = 1 - 64 \cdot \left[\frac{n_1 n_3 n_4}{(n_0 + n_1)(n_1 + n_3)(n_3 + n_4)} \right]^2 \quad (17)$$

在计算中取空气的折射率 $n_0 = 1$,入射窗玻璃的折射率 $n_1 = 1.5$,GaAs的折射率 $n_4 = 4.025$ 。GaAlAs的折射率 n_3 是该层铝组分(x_{Al})的函数。我们用AlAs的折射率和GaAs的折射率线性插值得到 n_3 :

$$n_3 = -0.725 \times x_{Al} + 4.025 \quad (18)$$

上式中AlAs的折射率取为3.3°。

如果用 SiO_2 作抗光反射膜, $n_2 = 1.46$;如果用 Si_3N_4 作抗光反射膜 $n_2 = 1.92$ 。

表1给出不同铝组分下计算出的无抗光反射膜时、及当抗光反射膜的厚度为 $\lambda/4n_2$ 时,用 SiO_2 和 Si_3N_4 作抗光反射膜的反射率。计算结果表明, Si_3N_4 膜可减小光电阴极的反射率,在铝组分为0.4时,可将反射率减小61.5%。而 SiO_2 膜不但无助于反射率

表 1 光电阴极反射率的理论计算值

R $\swarrow$ AR膜 $\searrow$ x_{Al}	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
无	23.2	22.2	21.3	20.3	19.7	19.4	18.4
SiO ₂	24.6	24.0	23.2	22.6	21.9	21.3	20.5
Si ₃ N ₄	8.8	8.5	8.2	7.9	7.7	7.5	7.3

的减小, 还会使其略有上升。这是因为SiO₂的折射率比窗玻璃的折射率更小。从(3)式可知, 应选择折射率接近

$$n_2 = [n_1 \cdot n_3]^{1/2}$$

的膜作抗光反射膜。当 n_3 的值从3.3变化到4.025, 抗光反射膜的折射率越接近2.2~2.5, 抗光反射效果越好。从表1中还可以看出, 反射率随GaAlAs中铝组分的增加而减小。这是因为当 n_1 、 n_2 一定后, 铝组分越大, n_3 越小, 越接近 $n_3 = n_2^2 / n_1$ 所致。

2 制做与测量

根据以上分析, Si₃N₄可用来作透射式GaAs光电阴极的抗光反射膜。有很多制备Si₃N₄膜的方法, 最常用的有溅射法、低压化学汽相淀积法(LPCVD)、和等离子增强化学汽相淀积法(PECVD), 但不能用真空蒸发法获得。我们采用的是PECVD法, 并自制了一台PECVD设备。图3示出的是该设备的原理图。

淀积Si₃N₄前先将样品加热并对系统抽真空。当真空度优于3 Pa(2 × 10⁻² t)后, 在加热和抽真空的状态下通入一定比例的N₂、SiH₄、NH₃混合气体。待气流稳定后, 开启高频感应器就可在样品上淀积Si₃N₄。Si₃N₄的厚度可通过控制淀积时间等来控制。

对自制的Si₃N₄膜, 我们用椭圆偏振仪进行了测量。Si₃N₄的折射率为1.92~1.94; 在直径为φ18 mm的样品上, 厚度为900~1000 Å时, 膜厚的不均匀性可控制在20 Å以内, 其性能完全可满足器件的要求。

为了将Si₃N₄用于透射式光电阴极, 要确定出所需的Si₃N₄膜的厚度。从(12)式可知, 当入射光波长被确定后, 可得到相应的Si₃N₄膜厚度。即, 首先要定出优先考虑的使光阴极反射率达到最小的光波长。用于第三代象增强器的透射式GaAs光电阴极的光谱响应范围一般为550 nm~900 nm, 为了加强器件在近红外区域的响应, 我们优先考虑的波长定为约800 nm。取 $n_2 = 1.92$, 可得出所需的Si₃N₄膜厚度约为104 nm。

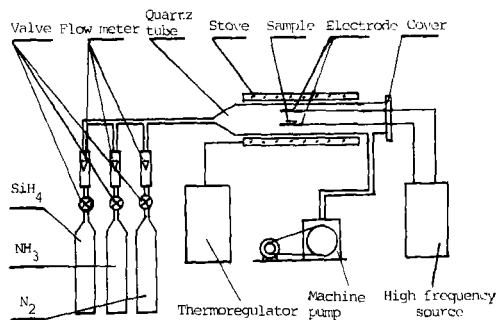
图 3 PECVD Si₃N₄膜淀积系统原理图

Fig. 3 Schematic diagram of the depositing system of Si₃N₄ film by PECVD.

为了实际测量 Si_3N_4 膜、 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 复合膜的抗光反射效果,和 SiO_2 膜对反射率的影响,我们制备了如下结构的测试样品:

1* 样品, 窗玻璃/ $\text{GaAlAs}(x_{\text{Al}}=0.4)/\text{GaAs}$

2* 样品, 窗玻璃/ $\text{SiO}_2(130\text{nm})/\text{GaAlAs}(x_{\text{Al}}=0.4)/\text{GaAs}$

3* 样品, 窗玻璃/ $\text{Si}_3\text{N}_4(100\text{nm})/\text{GaAlAs}(x_{\text{Al}}=0.4)/\text{GaAs}$

4* 样品, 窗玻璃/ $\text{SiO}_2(130\text{nm})/\text{Si}_3\text{N}_4(100\text{nm})/\text{GaAlAs}(x_{\text{Al}}=0.4)/\text{GaAs}$,其中 SiO_2 是用电子束蒸发的。

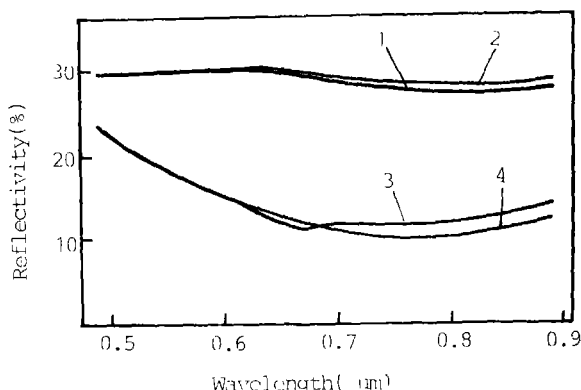


图 4 透射式GaAs光电阴极的反射率

(1* 无抗光反射膜; 2* 130nm的 SiO_2 ;

3* 100nm的 Si_3N_4 ; 4* 130nm的 SiO_2 加100nm的 Si_3N_4 .)

Fig. 4 Reflectivity of GaAs photocathode of transmission type.

图4是测量出的样品的反射率与入射波长的关系。曲线1*的 $R_{\min}=27.5\%$;曲线2*的 $R_{\min}=28.1\%$;曲线3*的 $R_{\min}=11.5\%$;曲线4*的 $R_{\min}=10.1\%$ 。 Si_3N_4 膜使光电阴极的反射率降低了近60%,这与上一节的理论分析较吻合。当 $h=100\text{nm}$ 时,从(12)式可得出 $R_{\min}$ 应该在 $\lambda=770\text{nm}$ 处。从图中可见这一点很吻合。但对各样品所测出的反射率均大于计算值,这是由于计算值是一种较理想的状态结果。如,计算中采用正入射光计算,而在实际测量中,入射光总是有一定入射角的;另外,各层界面也并非是绝对突变的。这些都会使实际测量结果偏大。

从图4还可看出 SiO_2 膜确实会略加大光电阴极的反射率。复合抗光反射膜 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 比用单层 Si_3N_4 膜的效果要好些,但相对而言,反射率被进一步降低得不是很多。从简化工艺和实用的角度看,透射式GaAs光电阴极仅用 Si_3N_4 膜作抗光反射膜是比较合适的。当然,用 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 复合膜可能会使窗玻璃和阴极片的粘接更容易一些。

3 结 论

在透射式GaAs光电阴极的窗玻璃和GaAlAs缓冲层之间引入一层 Si_3N_4 膜或

SiO₂/Si₃N₄ 复合膜, 可在光电阴极的光谱响应范围内有效地降低对入射光的反射率。当 Si₃N₄ 膜厚度约为 100 nm 时, 可使光电阴极的反射率降低近 60 %, 反射率降低最明显的光谱区域在 800 nm 附近。

4 致 谢

感谢机电部第13研究所的章其麟等同志为本工作提供的半导体外延片; 感谢西安光机所的高洪楷、张济康等同志对本工作的支持。

参考文献

- 1 Antypass G A, Escher J S, Edecumbe J, Enck R S. J Appl Phys, 1978, 49(7): 4301
- 2 Antypas G A. U S Patent, 3, 959, 045, 1976.
- 3 李庚明等. 第三届全国光电成像器件会议, 成都, 1987年。
- 4 Richard J C. Conference of International Defence Electronics, Hanover Fairground, West Germany, 1982.
- 5 玻恩 M, 沃耳夫 E 光学原理。北京: 科学出版社, 1978: 13~101
- 6 Neuberger M. IV—V Semiconducting Compounds, Handbook of Electronic Material, Volume 2.

RESEARCH OF THE ANTI-REFLECTION FILM FOR TRANSMISSION MODE GaAs PHOTOCATHODES

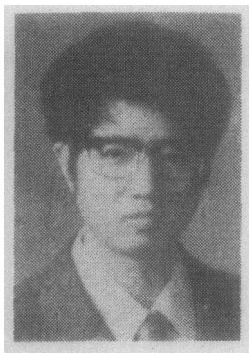
Guo Lihui, Sai Xiaofeng and Hou Xun

Xian Institute of Optics and Precision Mechanics, Academia

Sinica, Xian, 710068, P.R.China

Abstract The change of the reflectivity of transmission mode GaAs photocathodes has been calculated, which is caused by introducing Si_3N_4 or SiO_2 film between the input window glass and the GaAlAs buffer layer of the photocathodes. The effects of Si_3N_4 , SiO_2 and $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ films on the reflectivity have also been measured. The results of the calculation and the measurements show that the Si_3N_4 film and the $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ multilayers can reduce the reflectivity efficiently. The reflectivity can be lowered 60% as the thickness of Si_3N_4 is 100nm. Those results provide the basis to scientifically select the antireflection film for GaAs photocathodes.

Keywords Transmission mode GaAs photocathode; Anti-reflection film; Reflectivity



Guo Lihui was born in Shaanxi, China, on July 10, 1958. He received the B.S. and M.S. degrees from Xian Jiaotong University in 1982 and 1984, and Ph.D. degrees from Xian Institute of Optics and Precision Mechanics, Academia Sinica, in 1988.

From Jan. 1989 to Jan. 1991, he joined Xian Institute of Optics and Precision Mechanics as a postdoctoral researcher. Now, he is engaging in Universitat Erlangen-Nurnberg, West Germany, as a Alexander von Humboldt Fellow.

His research areas are I-IV semiconductor material epitaxy growth and photodetectors, solar cells made of silicon or other materials. He has published many papers on photocathodes and solar cells.

Dr. Guo is a member of Chinese Optics Society.