## 利用紫外透射光谱研究透射式 GaN 光电阴极的材料结构及光学特性

#### 杜晓晴,田 健,周强富

重庆大学光电工程学院,光电技术与系统教育部重点实验室,重庆 400044

摘 要 GaN 紫外光电阴极是近年发展起来的一种高性能真空紫外探测器件,其中透射式结构作为光电阴极实际应用的工作模式,其多层结构参数及光学特性对阴极的最终光电发射性能有着重要的影响。测试了 透射式 GaN 阴极材料的紫外透射光谱,通过建立透射式 GaN 阴极样品的透射模型,得到了 GaN 阴极样品的薄膜厚度、光学吸收系数与透射谱之间的函数关系。计算得到的 GaN 外延材料的厚度与实际值误差小,吸收系数与已发表数据一致,表明紫外透射光谱法能够准确地实现透射式 GaN 阴极材料结构及光学特性的 评估。

关键词 紫外透射光谱;透射式 GaN 光电阴极;薄膜厚度;光学吸收系数 中图分类号: 0433, TN 23 文献标识码: A **DOI**: 10 3964/j issn 1000 0593(2011)06 1606 05

#### 引 言

GaN 紫外光电阴极是近年来发展起来的一种新型真空 紫外探测器件,与传统正电子亲和势紫外光阴极以及固体紫 外探测器件相比,GaN 紫外光电阴极显示了量子效率高、暗 发射小、紫外可见光抑制比高、稳定性好、发射电子能量分 布集中等众多优点,因此在紫外探测及真空电子源领域具有 极大的应用潜力<sup>[1-5]</sup>。

目前,制备出高量子效率的透射式 GaN 光电阴极是该 阴极走向实用化需要解决的主要问题。其中透射式 GaN 光 电阴极的多层结构参数及光学特性对阴极的最终光电发射性 能有着重要的影响<sup>69]</sup>。作为实际应用的工作模式,透射式 光电阴极一般为"衬底材料 界面缓冲层 GaN 光电发射层"的 三层结构,并要求衬底和缓冲层对被探测紫外光透过率高, GaN 光电发射层的厚度适中,以匹配 GaN 材料的少子扩散 长度与吸收系数。因此,透射式阴极在材料结构与光学性能 上要求严格,需要在制备光电阴极前对所用阴极材料进行准 确评估,以为阴极光电性能的评估以及后续阴极材料结构的 优化提供可靠依据。

本文利用紫外光谱法测试了透射式 GaN 阴极材料的紫 外透射光谱,并通过建立透射式 GaN 阴极样品的透射模型, 得到了 GaN 阴极样品的薄膜厚度、光学吸收系数与透射谱 之间的函数关系,从而实现了透射式 GaN 阴极材料结构及 光学特性的评估。

#### 1 透射式 GaN 阴极样品的透射模型

本次实验采用的样品是以蓝宝石为基底的 GaN 材料, 同时中间有 Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N 缓冲层。图 1 是 GaN 阴极样品的透 射光学模型,该模型没有考虑材料层结构中的二次或多次反 射引起的干涉效应。模型中有空气、GaN 薄膜、Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N 缓冲层、蓝宝石衬底和空气 5 个区域组成,其中样品存在空 气 GaN 薄膜、GaN 薄膜 缓冲层、缓冲层 蓝宝石衬底、蓝宝 石衬底 空气 4 个反射界面。



Fig 1 Optical transmission model of GaN sample

基金项目: 国家自然科学基金项目(60701013)资助

收稿日期: 2010 06-20, 修订日期: 2010 08-30

作者简介: 杜晓晴, 女, 1978 年生, 重庆大学光电工程学院副教授 e e mail: duxq@ equ edu en; muyuandu@ sina com ◎ 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

对实验样品进行透射光谱的测量时,当一束强度为 I<sub>0</sub> 的入射光垂直照射到 GaN 样品的表面,会经历下述传输过 程后从样品底部出射:

① 首先一部分入射光在空气 GaN 薄膜界面发生反射, 设 R<sub>0</sub> 为空气 GaN 薄膜界面的反射率,则反射光强度为 I<sub>0</sub>R<sub>0</sub>,剩余部分 I<sub>10</sub>= I<sub>0</sub>(1- R<sub>0</sub>)折射进入 GaN 薄膜;

② 进入 GaN 薄膜的光,通过厚度 为 d<sub>1</sub>、吸收系 数为 α<sub>1</sub>
 的 GaN 薄膜时将被吸收,光通过薄膜后的强度从 I<sub>10</sub> 减少为
 I<sub>1</sub>: I<sub>1</sub> = I<sub>10</sub> exp(- α<sub>1</sub>d<sub>1</sub>);

③ 接着,通过 GaN 薄膜后的光将遇到 GaN 薄膜 缓冲 层界面,在此界面被反射和折射后进入缓冲层,设 *R*<sub>1</sub> 为 GaN 薄膜 缓冲层界面的反射率,则反射光强度为 *I*<sub>1</sub>*R*<sub>1</sub>,折 射光强度 *I*<sub>20</sub>= *I*<sub>1</sub>(1-*R*<sub>1</sub>);

④ 进入缓冲层的光,通过厚度为  $d_2$ 、吸收系数为  $a_2$  的缓冲层薄膜时将被吸收,因此光通过缓冲层后的强度则从  $I_{20}$ 减少为  $I_2$ :  $I_2 = I_{20} \exp(-a_2 d_2)$ ;

⑤通过缓冲层后的光将遇到缓冲层- 蓝宝石衬底界面, 在此界面被反射和折射后进入蓝宝石衬底,设 $R_2$ 为缓冲层 蓝宝石衬底界面的反射率,则反射光强度为 $I_2R_2$ ,折射光强 度 $I_{30}=I_2(1-R_2)$ ;

⑥ 进入蓝宝石衬底的光,通过厚度为 d<sub>3</sub>、吸收系数为
 α<sub>3</sub> 的衬底薄膜时将被吸收,因此光通过衬底后的强度从 I<sub>30</sub>
 减少为 I<sub>3</sub>: I<sub>3</sub> = I<sub>30</sub> exp(-α<sub>3</sub>d<sub>3</sub>);

⑦ 最后,光通过蓝宝石衬底后出射,出射时有部分光将 在蓝宝石衬底-空气界面被反射,设 $R_3$ 为蓝宝石衬底 空气 界面的反射率,则最终透射光强度 $I_{out}$ 为: $I_{out} = I_3(1 - R_3)$ ;

将上面相应的等式进行合并整理后,透射式 GaN 阴极 材料的最终透过率为

$$T = \frac{I_{\text{out}}}{I_0} = (1 - R_0)(1 - R_1)(1 - R_2)(1 - R_3) \times \exp(-\alpha_1 d_1 - \alpha_2 d_2 - \alpha_3 d_3)$$
(1)

从上面表达式可以看出,在薄膜吸收系数 α≠0 的 波长 区域,材料的透过率随着薄膜的厚度和吸收系数的增加而降 低。

各个界面处的反射率 *R* 可以根据其界面上下层材料的 折射率和消光系数计算得到,即

$$\begin{split} R_0 &= \frac{(n_1 - 1)^2 + k_1^2}{(n_1 + 1)^2 + k_1^2}, \ R_1 &= \frac{(n_1 - n_2)^2 + (k_1 - k_2)^2}{(n_1 + n_2)^2 + (k_1 + k_2)^2}, \\ R_2 &= \frac{(n_2 - n_3)^2 + (k_2 - k_3)^2}{(n_2 + n_3)^2 + (k_2 + k_3)^2}, \ R_3 &= \frac{(n_3 - 1)^2 + (k_3 - 1)^2}{(n_3 + 1)^2 + (k_3 + 1)^2} \\ \text{式中, 22(10)} &= \text{Constant} \text{ $\mathbf{x}$} \\ \text{GaN $\mathbf{x}$} \\ \mathbf{x} \\ \mathbf{y} \\ \mathbf{x} \\ \mathbf{$$

## 2 透射式 GaN 阴极材料的紫外透射测试光 谱及测量模型

图 2 是利用紫外 可见光分光光度计测得的以蓝宝石为 衬底、Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N 为缓冲层的透射式 GaN 阴极材料的紫外

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publisl



从透射谱曲线可以分析得到:

(1) 当 365 nm<  $\lambda$ < 1 000 nm 时, 样品具有 80% 左右的 透射率, 同时透射谱曲线上有一条周期不断变化的干涉条 纹。在该波段下, GaN 材料、缓冲层材料及衬底材料的禁带 宽度均大于入射光子能量, 因此样品对该波段的光透射率很 高, 光在样品中传输时的损失主要是四个界面的反射。透射 谱上的干涉条纹主要是由直接透射光、GaN 外延层中两次反 射后的透射光和缓冲层中两次反射后的透射光相互干涉产 生。干涉效应示意图如 3 所示。根据干涉图谱分析,在 380 nm<  $\lambda$ < 600 nm 区间内,有五个干涉峰,应是GaN 外延层及 缓冲层的二级独立干涉效应引起,而在 600 nm<  $\lambda$ < 1 000 nm 区间内,有三个干涉峰,分别对应 GaN 外延层及缓冲层 的部分一级干涉峰。由于 GaN 外延层为单层结构,由此得出 缓冲层应为逐层生长的四层 x 值与厚度均不同的 Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N 结构组成。



Fig 3 Interference effect diagram

(2) 当 250 nm < *k* 365 nm 时,在A<sub>1</sub>B段,透射率急剧减小,下降到 20% 左右;在 BC 段,由 20% 逐渐下降到零。 在 A<sub>1</sub>B 段,由于 GaN 的光学禁带宽度为 3 4 eV,对应的吸收边界是 365 nm。所以,当光子波长小于 365 nm 的时候,

第6期

GaN 材料的吸收系数突然增大,对光子产生了强烈的吸收作用,又由于 GaN 外延材料的厚度有限,不能完全吸收入射光,还存在 20% 左右的透射率。在 BC 段,从图 3 可以看出,随着光子波长减小,GaN 材料对光子的吸收系数继续增大,GaN 材料对光子的吸收也会逐渐增多,当波长减小到 250 nm 的时候,光子几乎被完全吸收,透射率下降到零。

(3) 当 200 nm< № 250 nm 时,该波段对应的透射率几 乎为零。分析发现,当光子波长减小为 250 nm 的时候, Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N 缓冲层也到达了吸收边界,禁带宽度较大的 Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N 缓冲层也开始参与短波紫外光的吸收。

根据上面的分析,对透射谱曲线上的A<sub>1</sub>A<sub>2</sub>段,由于 GaN 薄膜和缓冲层都具有非常好的透过率,被吸收的光子主 要是界面的反射和蓝宝石衬底的吸收,因此A<sub>1</sub>A<sub>2</sub>段的透射 率表达式为

$$T_{\rm A} = (1 - R_0)(1 - R_1)(1 - R_2)(1 - R_3)\exp(-\alpha_3 d_3)$$
(2)

其中,吸收前透射谱曲线上是高低的干涉条纹,所以  $A_1A_2$ 段的透射率取最近一组波峰与波谷的平均值,即  $T_A$  是  $A_1$ 点和  $A_2$ 点透射率的平均值

$$T_{\rm A} = (T_{\rm A_1} + T_{\rm A_2})/2 \tag{3}$$

对于透射谱曲线中的 B 点,缓冲层依然保持非常好的透 过率,但是 GaN 薄膜的吸收系数突然增大,对光子产生强烈 的吸收作用,同时被吸收的光子还包括界面的反射和蓝宝石 衬底的吸收,因此 B 点透射率表达式为

$$T_{\rm B} = (1 - R_0)(1 - R_1)(1 - R_2)(1 - R_3) \times \exp(-q_1d_1 - q_2d_2)$$
(4)

将 A 点与 B 点的透射率相比,得到

$$\frac{T_{\rm A}}{T_{\rm B}} = \frac{(1-R_0)(1-R_1)(1-R_2)(1-R_3)\exp(-\alpha_3 d_3)}{(1-R_0)(1-R_1)(1-R_2)(1-R_3)\exp(-\alpha_1 d_1 - \alpha_3 d_3)} \\
= \frac{(T_{\rm A_1} + T_{\rm A_2})/2}{T_{\rm B}}$$
(5)

化简得到

$$\exp(\alpha_{1}d_{1}) = \frac{T_{A_{1}} + T_{A_{2}}}{2T_{B}}$$
(6)

对式(6) 两边取对数,得到 GaN 外延层厚度 d<sub>1</sub> 的计算 公式为

$$d_{1} = \frac{\ln[(T_{A_{1}} + T_{A_{2}})/2T_{B}]}{\alpha_{1}}$$
(7)

其中, T<sub>A1</sub>和 T<sub>A2</sub>分别表示相邻 B 点的一组波峰和波谷的透

射率, *T*<sub>B</sub> 表示 B 点透射率, α<sub>1</sub> 取 A<sub>1</sub> 和 A<sub>2</sub> 两 点之间, 即 波 长为 365 nm 下的 GaN 材料的吸收系数。

同时, 进一步分析透射谱曲线可以发现, 在 BC 段, 随着 波长减小, GaN 外延材料的吸收系数不断增大, 使得 GaN 外延材料对光子的吸收不断增多, 相应的透射率则不断减 小, 直至透射率降为零。所以, BC 段的透射率的变化明显地 反映出了 GaN 外延材料的吸收系数随波长的变化关系, 因 此可以利用透射谱曲线的 BC 段进一步描绘出 GaN 薄膜的 吸收系数 α 随波长 λ(250 nm < λ< 365 nm)的变化趋势。BC 段中的透射率表达式为

$$T_{\rm BC} = (1 - R_0)(1 - R_1)(1 - R_2)(1 - R_3) \times \exp(-\alpha_1 d_1 - \alpha_3 d_3)$$
(8)

其中,四个界面的反射率  $R_0$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  和  $R_3$  都会随着波长的 变化而发生相应的变化,因此可从 250~ 365 nm 区间的透射 谱曲线上取若干组数值,查阅相关文献得到相应波长下 GaN 薄膜、缓冲层以及蓝宝石衬底的折射率  $n_1$ ,  $n_2$  和  $n_3$  的值,代 人前面公式计算出四种界面的反射率  $R_0$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  和  $R_3$ ,以 及蓝宝石衬底的透射比  $T_{\overline{HR}}$ ,从而计算得到 GaN 材料的吸 收系数随波长的变化关系。

### 3 计算结果与误差分析

利用上述推导的公式及方法对图 3 实验曲线进行了计算,根据透射谱曲线,取得  $A_1$ 和  $A_2$ 点和 B 点的透射率的数值,然后查阅相关文献得到光子波长在 365 nm 时的 GaN 材料吸收系数<sup>[6]</sup>,代入式(7),就可以计算 GaN 外延材料的厚度。表 1 给出了实验样品 GaN 外延材料的厚度,计算得到的薄膜厚度为 167 nm。

 Table 1
 Calculation of GaN epitaxial layer thickness

$T_{\rm A_1}/\%$	$T_{\rm A_2}  /  \%$	Т в/ %	$\alpha_1 / cm^{-1} [7]$	$d_1$ / nm	
88 251	79 330	18 689	9 000	167	

在计算出 GaN 外延材料的厚度之后,进一步计算在透 射谱曲线的 BC 段上 GaN 外延材料的吸收系数随波长的变 化趋势,结果如表 2 和图 4 所示。GaN 材料的吸收系数与波 长的变化趋势是:当 250 nm <  $\lambda$ < 365 nm 时,随着波长减 小,吸收系数逐渐增大,250 nm 下吸收系数的数量级是 2×  $10^5$  cm<sup>-1</sup>,与报道的 GaN 阴极材料吸收系数的数据相比<sup>[3]</sup>, 趋势和数量级一致。

Fable 2	Calcul ation	of	adsorption	coefficient	of	GaN	sample
---------	--------------	----	------------	-------------	----	-----	--------

$\lambda$ nm	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$R_0$	$R_1$	$R_2$	T <sub>衬底</sub>	T / %	α/ cm <sup>−</sup> 1
260	2 55	2 1	1.8373	0 2	0 009 4	0.004 5	0 808	1. 898	2 104 2× 10 <sup>5</sup>
280	2 55	2 05	1.8244	0 2	0 011 8	0.003 4	0 828	5 183	1. 516 5× 10 <sup>5</sup>
300	2 65	2 0	1.8144	0 2	0 019 5	0.002 4	0 830	8 469	1. 219 9× 10 <sup>5</sup>
320	2 65	1.96	1. 806 4	0 2	0 022 4	0.0017	0 834	12 119	1. 006 8× $10^5$
340	2 56	1.95	1.800 0	0 2	0 018 3	0.0016	0 833	15 039	0 879 4× $10^5$

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



Fig 4 Variation of absorption coefficient with wavelength of GaN photocathode sample

在建立测量模型的过程中,由于采取了一些近似处理, 使得推导出来的 GaN 外延材料的计算公式中包含一定的理 论误差。该理论误差主要来源于:

(1) 在推导出来的 GaN 外延材料厚度的计算公式中,需要查阅相关资料得到波长 365 nm 的 GaN 材料的吸收系数。由于 GaN 外延掺杂浓度、测量温度等因素,同样波长下的吸收系数也会有比较大的差异,虽然查阅掺杂浓度接近的 GaN 外延材料的吸收系数,但却无法避免这部分误差的产生。由 GaN 外延材料的吸收系数产生的误差是该测量方法中最主要的误差来源。

(2) 在取 B 点透射率的过程中,由于 B 点是一小段逐渐 减小的过程,而并非明显的拐点,因此取 B 点透射率的过程

#### 中也会产生一定的误差。同时, B 点的透射率对计算结果会 产生比较明显的影响,所以该部分误差也是该测量方法中主 要的误差来源之一。

通过以上分析可以看出,利用公式计算得到的 GaN 外 延材料的厚度,其误差主要来源于 GaN 材料吸收系数  $\alpha_1$  的 准确度和 B 点的透射率  $T_B$  的准确度。因此,我们在取透射 率  $T_B$  和吸收系数  $\alpha_1$  的时候,可以对二者分别确定一个极限 误差范围,从而利用公式算出来的 GaN 外延材料的厚度也 会有一个极限误差的范围,使得最终得到的 GaN 外延材料 的厚度的数值更加准确可靠。取透射率  $T_B$  的极限误差  $\delta_{imT_B}$ = ±1 000%,吸收系数  $\alpha_1$  的极限误差  $\delta_{ima_1}$  = ±1 000 cm<sup>-1</sup>, 利用相关误差计算公式,可得到更准确的 GaN 外延材料的 厚度范围: (167±27) nm。与外延生长过程中在线测得的 GaN 外延材料厚度 185 nm 相比,本次 GaN 外延材料厚度的 测量结果比较准确。

#### 4 结 论

本文研究了透射式 GaN 阴极材料的紫外透射光谱的特征,通过建立透射式 GaN 阴极样品的透射模型,得到了 GaN 阴极样品的薄膜厚度、光学吸收系数与透射谱之间的函数关系。计算得到的 GaN 外延材料的厚度与实际值误差小,吸收系数与已发表数据一致,表明所用测量方法能够准确地实现透射式 GaN 阴极材料结构及光学特性的评估。本文工作为透射式 GaN 阴极光电发射性能的分析以及阴极材料结构的优化提供了可靠依据。

#### References

- [1] Machuca F, Sun Y, Liu Z, et al. Journal of Vacuum Science and Technology B, 2000, 18: 3042.
- [2] Oswald H W Siegmund. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2004, 525: 12.
- [3] Siegmund O, Vallerga J, M cphate J, et al. Nuclear Instruments and Methods in physics Research A, 2006, 567: 89.
- [4] QIAO Jian liang, TIAN Si, CHANG Berr kang, et al(乔建良, 田 思, 常本康, 等) Acta Phys. Sin. (物理学报), 2009, 58: 5847.
- [5] DU Xiao qing, CHANG Berrkang, QIAN Yurrsheng, et al(杜晓晴,常本康, 钱芸生, 等). Chinese J. of Laser(中国激光), 2010, 37: 385.
- [6] Siegmund O H W, Tremsin A S, Vallerga J V, et al. Proc. SPIE, 2008, 7021: 70211B.
- [7] Dabiran A M, Wowchak A M, Chow P P. Proc. SPIE, 2009, 7212: 13.
- [8] DU Xiao qing, CHANG Berrkang, QIAN Yurrsheng, et al(杜晓晴,常本康,钱芸生,等). Acta Opt. Sinica(光学学报), 2010, 30: 1734.
- [9] DU Xiao qing, CHANG Berrkang(杜晓晴, 常本康). Acta Phys. Sin.(物理学报), 2009, 58: 8643.

# Investigation of Material Structure and Optical Property of Transmission Mode GaN Photocathode by Ultraviolet Transmission Spectral

DU Xiao qing, TIAN Jian, ZHOU Qiang fu

Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems of Ministry of Education, College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China

**Abstract** GaN UV photocathode has become a highr performance vacuum ultraviolet detectors in recent years. As the photocathode practical application mode, transmission type multilayer structure and its optical property have important influences on photocathode photoemission performance. Ultraviolet transmission spectra of transmission mode GaN photocathode were measured. The optical transmission model of transmission mode GaN photocathode was built, and based on the model the functional relations of thin film thickness and optical adsorption coefficient with transmission spectral were deduced. The error of calculated GaN epitaxial thickness with respect to actual value is very small, and calculated adsorption coefficients are consistent with reported data. It was shown that material structure and optical property of transmission mode GaN photocathode can be evaluated accurately by this ultraviolet transmission spectral method.

Keywords Ultraviolet transmission spectral; Transmission mode GaN photocathode; Thin film thickness; Optical adsorption coefficient

(Received Jun. 20, 2010; accepted Aug. 30, 2010)