

利用 AlGa_N 薄膜透射谱提取材料参数的研究盛彬彬^{1,2,3,4}, 王玲^{1,2*}, 许金通^{1,2}, 李向阳^{1,2,3,4}¹中国科学院上海技术物理研究所传感技术国家重点实验室, 上海 200083;²中国科学院上海技术物理研究所红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083;³上海科技大学信息科学与技术学院, 上海 201210;⁴中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了研究多层结构高铝组分 AlGa_N 薄膜材料的光学性能,并计算得到相关光学参数,本文基于多层膜传输矩阵方法,对两个样品的透射光谱进行了拟合。根据 AlGa_N 材料对不同波长入射光的吸收机制,并考虑了材料在带外的弱吸收,建立了全波段(200~800 nm)范围内的吸收系数模型,同时引入表面粗糙度均方根参数来表征材料表面粗糙度对透射谱的影响。采用所建模型对结构参数不同的两个 Al_{0.65}Ga_{0.35}N 样品的透射谱进行拟合,拟合结果与实验结果的一致性较好。本文得到的全波段范围内 Al_{0.65}Ga_{0.35}N 材料的吸收系数,为研究日盲紫外探测器的响应光谱提供了可靠的实验数据。同时,本文还得到了 Al_{0.65}Ga_{0.35}N 的膜层厚度、折射率、表面粗糙度等参数。

关键词 集成光学; AlGa_N; 透射谱; 吸收系数; 折射率; 表面粗糙度

中图分类号 TN304.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0313001

Extraction of Material Parameters by Transmission Spectra of AlGa_N FilmSheng Binbin^{1,2,3,4}, Wang Ling^{1,2*}, Xu Jintong^{1,2}, Li Xiangyang^{1,2,3,4}¹State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;²Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;³School of Information Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China;⁴University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract To study the optical properties of multilayer AlGa_N films with high Al content and calculate the relevant optical parameters, we fitted the transmission spectra of two samples based on the method of the multilayer-film transfer matrix. According to the mechanism of the AlGa_N materials absorbing the incident light on different wavelengths, considering the out-of-band weak absorption of the materials, we established an absorption coefficient model in the all-band range (200–800 nm). At the same time, the root mean square (RMS) parameter of surface roughness was introduced to characterize the effect of the surface roughness of the materials on the transmission spectra. Furthermore, the transmission spectra of two Al_{0.65}Ga_{0.35}N samples with different structural parameters were fitted by the proposed model, and the fitting results were in good agreement with the experimental results. The absorption coefficient of Al_{0.65}Ga_{0.35}N material in the all-band range provided reliable experimental data for the study of the response spectra of solar-blind UV detectors. Additionally, the parameters such as film thickness, refractive index, and surface roughness of the Al_{0.65}Ga_{0.35}N materials were also obtained.

收稿日期: 2020-07-10; 修回日期: 2020-08-09; 录用日期: 2020-08-31

基金项目: 国家自然科学基金(61774162)

* E-mail: wangling@mail.sitp.ac.cn

Key words integrated optics; AlGa_N; transmission spectra; absorption coefficient; refractive index; surface roughness

OCIS codes 130.5990; 300.6170; 300.1030; 240.5770

1 引言

直接带隙的 AlGa_N 材料禁带宽度灵活可变,可以从 3.4 eV 连续变化到 6.2 eV,而其波长恰好覆盖了 200~400 nm 范围的紫外波段,因此在紫外探测领域,尤其是日盲紫外区域,具有重要的应用价值。P 型材料掺杂技术的突破推动了紫外探测器的发展和应用^[1-2]。三十几年来,为了改善紫外探测器(尤其是 AlGa_N 基日盲探测器)的响应光谱,研究人员的工作重点主要集中在改进材料生长技术和器件制备工艺等方面^[3-6],而在理论研究方面的工作相对较少,也没有完整详细的材料参数库。

探测器的响应光谱与材料的光学性能息息相关。到目前为止,研究材料光学性能的手段主要有光致发光(PL)谱、X 射线衍射(XRD)谱、反射谱、透射谱、椭圆偏振谱^[7-10],其中透射谱以其通用性强、准确度较高等显著优势,成为表征材料光学特性的重要手段。Brunner 等^[11]根据透射谱和光热偏转光谱(PDS)得到了 AlGa_N 薄膜的折射率、吸收系数,并以此为基础研究了 AlGa_N 材料的温度特性。张进城等^[12]以透射谱为基础,计算了生长在蓝宝石衬底上的 GaN 外延材料的厚度。李超等^[13]和李雪等^[14]根据测试的透射谱研究了 GaN 材料的光学性能,得到了材料的吸收系数、折射率等参数。Brunner 等^[11]在利用 PDS 研究 AlGa_N 材料的吸收

时发现该材料在透射谱振荡区域仍存在一定的弱吸收(他们认为这种弱吸收是由 AlGa_N 层与蓝宝石界面处较高密度的位错造成的),并计算得到了吸收系数在 $10\sim 10^3\text{ cm}^{-1}$ 量级。在全波段(200~800 nm)范围内建立吸收系数的模型,不仅能借助透射谱拟合得到吸收系数,还有助于定性分析外延材料层与衬底界面处材料的生长状况。

本文主要利用多层膜系和传递矩阵^[15-16]的方法,对 Al_{0.65}Ga_{0.35}N 薄膜材料的透射谱进行拟合。在拟合过程中,引入表面粗糙度均方根(RMS)来表征粗糙表面对透过率的影响。同时,根据 AlGa_N 材料对不同波长入射光的吸收机制,并考虑了材料在带外的弱吸收,拟合得到了 200~800 nm 范围内的吸收系数,并得到了材料的折射率、膜层厚度等参数。本研究工作不仅提供了一种无损、快速筛选 AlGa_N 外延材料的方法,还充实了 AlGa_N 材料的模型参数库。

2 理论模型

样品的截面图如图 1(a)所示,从下到上依次为蓝宝石衬底、AlN 缓冲层、Al_{0.65}Ga_{0.35}N 材料层。Al_{0.65}Ga_{0.35}N 层和 AlN 缓冲层组成多层薄膜系,多层膜系的总层数为 m 。当光线从 Al_{0.65}Ga_{0.35}N 面正入射时,光在外延材料内的传播过程如图 1(b)所示。

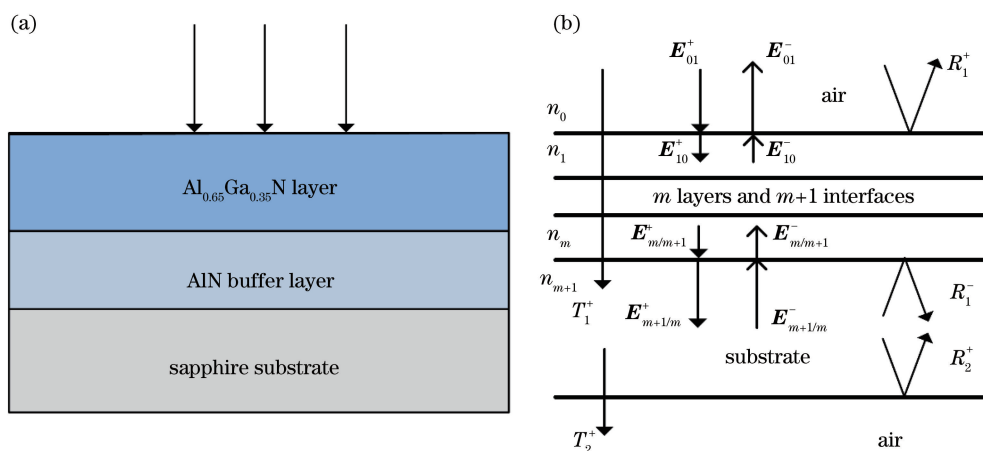


图 1 样品结构图和光线传播过程。(a)结构图;(b)光线传播过程图

Fig. 1 Structure plot of the samples and light propagation plot. (a) Structure plot; (b) light propagation plot

对于具有 m 层膜的膜系,假设每一个膜层对应的组分和光学常数是恒定的,根据多层膜系和膜系

传递矩阵原理^[15-16],相邻介质界面两侧的电矢量满足

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_{m/m+1}^+ \\ \mathbf{E}_{m/m+1}^- \end{bmatrix} = \mathbf{W}_{m/m+1} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{m+1/m}^+ \\ \mathbf{E}_{m+1/m}^- \end{bmatrix} = \frac{1}{t_{m/m+1}} \begin{bmatrix} 1 & -r_{m+1/m} \\ r_{m/m+1} & t_{m/m+1}t_{m+1/m} - r_{m/m+1}r_{m+1/m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{m+1/m}^+ \\ \mathbf{E}_{m+1/m}^- \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中： $\mathbf{E}_{m/m+1}^+$ 和 $\mathbf{E}_{m/m+1}^-$ 分别表示在 n_m 介质（折射率为 n_m 的介质）中，靠近 n_{m+1} 介质界面的正向电矢量和反向电矢量； $\mathbf{E}_{m+1/m}^+$ 和 $\mathbf{E}_{m+1/m}^-$ 分别表示在 n_{m+1} 介质中，靠近 n_m 介质界面的正向电矢量和反向电矢量； $\mathbf{W}_{m/m+1}$ 为折射矩阵； $t_{m/m+1}$ 和 $r_{m/m+1}$ 分别表示光从 n_m 介质传输到 n_{m+1} 介质的透射系数和反射系数； $t_{m+1/m}$ 和 $r_{m+1/m}$ 分别表示光从 n_{m+1} 介质传输到 n_m 介质的透射系数和反射系数，可以由界面两侧介质的复折射率计算得到。同一介质层中的正向电矢量满足

$$\mathbf{E}_{m/m-1}^+ = \mathbf{U}_m \mathbf{E}_{m/m+1}^+ = \begin{bmatrix} \exp(j\delta_m) & 0 \\ 0 & \exp(-j\delta_m) \end{bmatrix} \mathbf{E}_{m/m+1}^+, \quad (2)$$

其中，

$$\delta_m = \frac{2\pi N_m d_m \cos \theta}{\lambda}, \quad (3)$$

式中： \mathbf{U}_m 和 δ_m 分别表示第 m 层薄膜的相位矩阵和相位厚度； N_m 为第 m 层薄膜的复折射率，满足 $N_m = n_m - jk_m$ ，其中 n_m 为第 m 层薄膜的折射率， k_m 为第 m 层薄膜的消光系数[与吸收系数 α 之间的关系满足 $k_m = \alpha\lambda/(4\pi)$]； d_m 为第 m 层薄膜的厚度； θ 为入射角（对于正入射， $\theta = 0$ ）。因此，对于垂直入射经过 m 层薄膜的光线，由(1)~(3)式可以得到

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_{01}^+ \\ \mathbf{E}_{01}^- \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{m+1/m}^+ \\ \mathbf{E}_{m+1/m}^- \end{bmatrix}. \quad (4)$$

考虑到出射介质中无反射电矢量， $\mathbf{E}_{m+1/m}^- = 0$ ，则(4)式中的光学传输矩阵 \mathbf{M} 的表达式为

$$\mathbf{M} = \mathbf{W}_{01} \mathbf{U}_1 \mathbf{W}_{12} \mathbf{U}_2 \cdots \mathbf{W}_{m/m+1} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中： M_{11} 、 M_{12} 、 M_{21} 、 M_{22} 分别为光学传输矩阵 \mathbf{M} 中的 4 个元素。

因此，正入射光线经过多层膜系后的反射率与透射率分别为

$$R = \left| \frac{\mathbf{E}_{01}^-}{\mathbf{E}_{01}^+} \right|^2 = \left| \frac{M_{21}}{M_{11}} \right|^2, \quad (6)$$

$$T = \frac{n_{m+1}}{n_0} \left| \frac{\mathbf{E}_{m+1/m}^+}{\mathbf{E}_{01}^+} \right|^2 = \frac{n_{m+1}}{n_0} \left| \frac{1}{M_{11}} \right|^2, \quad (7)$$

式中： n_{m+1} 为出射介质的折射率。生长 $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}$ 材料所用的蓝宝石衬底的厚度往往大于 $400 \mu\text{m}$ ，该值远大于光源的相干长度，因此，光在衬底中的传播只需要考虑光波强度的叠加^[16]。因此，入射光通过 $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}$ 外延层、 AlN 缓冲层和蓝宝石衬底之后的透射率为

$$T = \frac{T_1^+ T_2^+}{1 - R_1^- R_2^+}, \quad (8)$$

式中： T_1^+ 为正入射光线经过多层膜系后的透射率； R_1^- 为光线从蓝宝石衬底背入射时的反射率，如图 1(b)所示； T_2^+ 、 R_2^+ 分别对应光线经过蓝宝石衬底传播到空气时的透射率和反射率，可由衬底和空气的折射率计算得到。

薄膜材料的粗糙表面会造成入射光线的散射，降低入射光的透过率。为此，本文通过引入表面粗糙度均方根(RMS)参数来进行修正^[17-18]，即

$$\begin{cases} r'_{01} = r_{01} \exp[-2(2\pi\sigma/\lambda)^2 n_0^2] \\ r'_{10} = r_{10} \exp[-2(2\pi\sigma/\lambda)^2 n_1^2] \\ t'_{01} = t_{01} \exp[-(2\pi\sigma/\lambda)^2 (n_0 - n_1)^2/2] \\ t'_{10} = t_{10} \exp[-(2\pi\sigma/\lambda)^2 (n_1 - n_0)^2/2] \end{cases}, \quad (9)$$

式中： σ 为表面粗糙度 RMS 值； λ 为波长； r_{10} 和 t_{10} 分别表示光从 n_1 介质传播到 n_0 介质的反射系数和透射系数； r_{01} 和 t_{01} 分别表示光从 n_0 介质传播到 n_1 介质的反射系数和透射系数； e 指数修正项为粗糙表面给界面处的入射光和反射光带来的相位差。将(9)式代入光学传输矩阵 \mathbf{M} 中进行计算，即可得到最终的透射率。

外延层的色散关系可用 A 、 B 和 C 三个系数组成的关系式^[19]表示为

$$n(\lambda) = \sqrt{A^2 + \frac{B^2}{\lambda^2 - C^2}}. \quad (10)$$

将实验测量的透射率数据代入(11)式^[20]进行计算，就可以得到双抛蓝宝石衬底的色散关系。

$$n_s = \frac{1}{T_s} + \left(\frac{1}{T_s^2} - 1 \right)^{1/2}, \quad (11)$$

式中： T_s 表示蓝宝石衬底透射率的测试值； n_s 表示蓝宝石的折射率。 AlN 缓冲层与 $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}$ 外延层遵从相近的色散关系，但色散关系中的 A 需改为 A' ^[13]。

3 实 验

样品是在双抛蓝宝石衬底上利用金属有机化学气相沉积(MOCVD)技术生长的 $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}$ 外延

薄膜。为了对比结构参数对材料光学性能的影响,本文选择了结构相似但参数不同的两个样品,并将其记为样品 1 和样品 2。两种样品的材料结构如图 1(a)所示,两者的区别在于样品 1 的 $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}$ 层为非故意掺杂,厚度约为 $1\ \mu\text{m}$,缓冲层厚度约为 $20\ \text{nm}$;而样品 2 的 $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}$ 外延薄膜包含 i 层与 n 层, i 层与 n 层的折射率和吸收系数近似相等^[21],在拟合过程中当作同一层薄膜处理,总厚度约为 $2.8\ \mu\text{m}$,缓冲层厚度约为 $0.7\ \mu\text{m}$ 。使用波长分辨率为 $0.5\ \text{nm}$ 的 Cary 50 紫外/可见分光光度计测量两个样品在 $200\sim 800\ \text{nm}$ 波段内的室温透射光谱。

4 结果与讨论

样品 1 和 2 的透射谱如图 2 所示。根据半导体材料对不同波长入射光的吸收情况^[14],即入射光子能量与半导体材料禁带宽度之间的关系,本文将透射谱分成三个区域。I 区为高吸收区(入射光子能量大于材料禁带宽度),在该区域,材料的本征吸收使得透射率基本为零。为了研究高铝组分 AlGa_N 材料在透射谱振荡区的弱吸收^[11],进而分析 $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}$ 材料在全波段的吸收性能,入射光子能量小于材料禁带宽度的区域被分成了 II 区(吸收边区)和 III 区(带外区)。II 区为吸收边区,在此区域内,材料的本征吸收随波长的增大而迅速减弱,吸收边的陡峭程度可以定性表示材料内部的质量:吸收边越陡峭,材料组分越均一,质量越好;吸收边越平缓,材料组分的均一性越差,质量越差。III 区为带外区,在此区域内,透射谱都出现了明显的振荡。由李超等^[13]的研究结果可知:透射谱振荡波段的包络和振幅的变化可以用于定性分析材料内部的质量:若透射谱包络平稳,无明显的起伏,振幅均匀,则表示样品内部均匀,质量较好;若透射谱包络起伏明

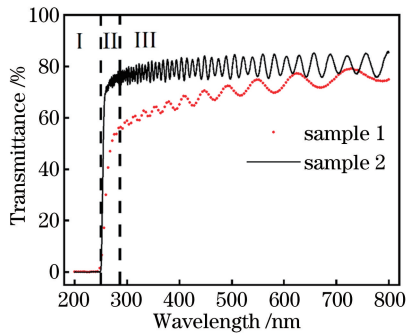


图 2 样品透射光谱的测试结果

Fig. 2 Measured transmission spectra of the samples

显,则表示样品内部的均匀性较差,质量较差。由此可推测样品 2 的质量优于样品 1,这可能与缓冲层厚度有关。文献[22]认为,随着 AlN 缓冲层厚度的增加,缓冲层内部的应力得以逐渐释放,GaN 薄膜的晶体质量和表面平整度均逐渐提高。样品 2 的缓冲层厚度远大于样品 1,因此可能导致样品 2 的质量优于样品 1。

建立合适的吸收系数模型是拟合透射谱的关键。透射谱的三个区域对应不同的吸收系数。在 I 区,吸收系数与光子能量满足平方根关系,将此区域的吸收系数记为 α_{high} ;在 II 区,根据 Urbach 带尾模型^[23],吸收系数与光子能量呈 e 指数关系,将此区域的吸收系数记为 α_{edge} ;对于 III 区,为了研究高铝组分 AlGa_N 材料的弱吸收,该区采用了与 II 区不同的指数模型,将此区域的吸收系数记为 α_{out} 。

为了避免吸收系数在各个区域边界点的不连续,本文在考虑了 α_{high} 、 α_{edge} 和 α_{out} 在各个吸收区的变化之后,对三者之间的关系进行了数学处理,得到了全波段的吸收系数表达式为

$$\alpha(\lambda) = \left(\frac{1}{\alpha_{\text{high}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{edge}}} \right)^{-1} + \alpha_{\text{out}} = \left\{ \frac{1}{\alpha_1 [1 + (E_\lambda - E_g)^{\frac{1}{2}}]} + \frac{1}{\alpha_1 \exp\left(\frac{E_\lambda - E_g}{E_{\text{urbach}}}\right)} \right\}^{-1} + \alpha_2 \exp\left(\frac{E_\lambda - E_0}{E_1}\right). \quad (12)$$

式中: E_g 为 AlGa_N 材料的禁带宽度; E_λ 为光子能量; α_1 、 α_2 、 E_{urbach} 、 E_1 、 E_0 为拟合参量。在透射谱吸收边上,选择透射率接近零的波长点所对应的能量作为禁带宽度^[24],可以得到样品 1 的禁带宽度为 $5.02\ \text{eV}$,样品 2 的禁带宽度为 $4.95\ \text{eV}$ 。 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 \leq x \leq 1$) 材料的禁带宽度满足

$$E_g(x) = xE_g^{\text{AlN}} + (1-x)E_g^{\text{GaN}} - bx(1-x), \quad (13)$$

式中: b 为弯曲系数。

室温时, $E_g^{\text{GaN}} = 3.4\ \text{eV}$, $E_g^{\text{AlN}} = 6.2\ \text{eV}$,弯曲系数 $b = 1\ \text{eV}$ ^[25],由(13)式可计算得到 $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}$ 的禁带宽度为 $4.99\ \text{eV}$,该值与根据吸收边得到的禁带宽度基本一致。

最后,基于上述理论模型,本文对样品 1 和样品 2 的透射谱进行了拟合,拟合结果用标准偏差来评价。标准偏差的表达式为

$$\sigma_t = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{m,i} - T_{f,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (14)$$

式中： n 表示透射谱的实际测量点数； $T_{m,i}$ 表示实际测量的透射率值； $T_{f,i}$ 表示拟合的透射率值。拟合的过程即为寻找 σ_i 最小的过程。

拟合结果与测试结果如图 3 所示，图中曲线表示实验测试值，点表示通过膜系传递矩阵得到的拟合值。可以看出，在吸收边与带外区交界处，两个样

品的拟合值均与实验值存在一定偏差。这是由于在吸收边附近，带间跃迁会带来较为复杂的局部吸收，简单的色散关系不再满足实际应用的需求^[14]。对于样品 2，透射光谱在短波区域剧烈振荡，分光光度计 0.5 nm 的分辨率满足不了该区域的测试需求，增大了该区域的拟合偏差。

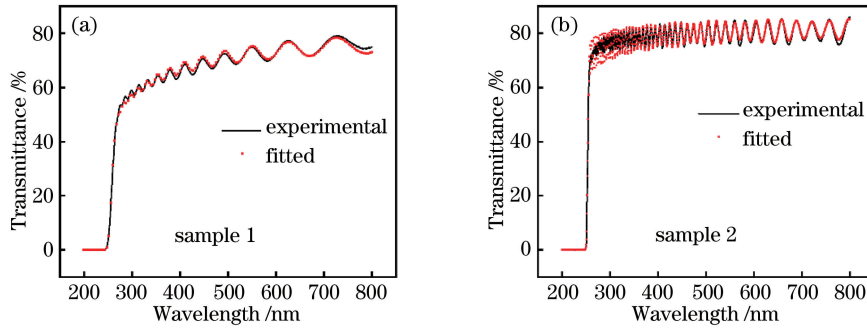


图 3 透射谱拟合结果。(a)样品 1；(b)样品 2

Fig. 3 Fitted transmission spectra. (a) Sample 1; (b) sample 2

拟合参数如表 1 所示。在所给参数中，除了折射率、吸收系数之外，还有样品厚度和表示样品表面粗糙度 RMS 的参数 σ 。其中，样品 1 和样品 2 拟合得到的薄膜总厚度分别为 1055 nm 和 3487 nm，相比薄膜设计生长厚度 1020 nm 和 3500 nm，误差分别约为 3.4% 和 0.4%。 σ 参数表征的是样品的表面粗糙度， σ 越大，样品越粗糙，入射光在表面的散射越严重。对比样品 1 和样品 2 的拟合结果可以发现，样品 2 的 σ 参数比样品 1 更小，因此样品 2 表面更加光滑。

表 1 透射光谱参数的拟合结果

Table 1 Fitted parameters of transmission spectra

| Parameter | | Sample 1 | Sample 2 | |
|--------------------|--|-------------------------------|----------|-------|
| Epitaxial layer | α_1/cm^{-1} | 89016 | 30000 | |
| | α_2/cm^{-1} | 1565 | 50 | |
| | E_0/eV | 4.54 | 4.85 | |
| | E_1/eV | 2.63 | 2.00 | |
| | $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}$ | $E_{\text{urbach}}/\text{eV}$ | 0.085 | 0.029 |
| | | A | 2.05 | 2.05 |
| | | B/nm | 245 | 232 |
| | | C/nm | 150 | 188 |
| | d_1/nm | 1037 | 2861 | |
| | Buffer layer | A' | 1.9 | 2.0 |
| d_2/nm | | 18.2 | 626 | |
| σ/nm | | 15.8 | 5.44 | |

样品的粗糙表面会增加入射光在表面的散射，降低透射谱的振荡峰值，同时压缩透射谱的振荡幅度，相关讨论可参见文献[17-18]。为了了解两个样品实际的表面状况，本文对它们进行了原子力显微

镜(AFM)测试，测试结果如图 4 所示。从图中可以发现，在所测区域内，样品 2 的表面相对样品 1 更加平整光滑。实验测得的样品 1 和样品 2 的粗糙度 RMS 值分别为 24.383 nm 和 1.455 nm，拟合得到的粗糙度 RMS 值分别为 15.785 nm 和 5.435 nm，与实验测得的粗糙度 RMS 值具有良好的相关性，验证了通过拟合透射谱得到样品表面粗糙度的可行性。

图 5 给出了样品 1 和样品 2 吸收系数的拟合结果，对比文献[11]中铝组分分别为 0.5 ($x=0.5$) 和 0.86 ($x=0.86$) 的 AlGaIn 薄膜的吸收系数可以发现，它们基本处于同一数量级。随着铝组分由 0.86 变化到 0.5，吸收边整体向长波方向移动，吸收边与禁带宽度相对应，说明禁带宽度逐渐减小，同(13)式中 AlGaIn 材料禁带宽度与铝组分的关系相符。当光子波长位于带外区时，对于样品 1，吸收系数随波长的减小而缓慢上升至 10^3 cm^{-1} 左右，而对于样品 2，吸收系数则上升至 10^2 cm^{-1} 附近；当波长位于吸收边时，吸收系数随波长的减小而迅速上升至 $10^4 \sim 10^5 \text{ cm}^{-1}$ 之间。

从图 5 中还可以发现：与样品 1 相比，样品 2 在吸收边的吸收系数随波长减小的增长速度明显更快，这与样品 2 透射谱的吸收边较样品 1 更为陡峭有关；当波长位于高吸收区时，吸收系数会随波长的减小而继续增大，但增大的速度会逐渐减慢，在波长为 200 nm 时，样品 1 的吸收系数约为 $2 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ，样品 2 的吸收系数约为 $6 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ 。

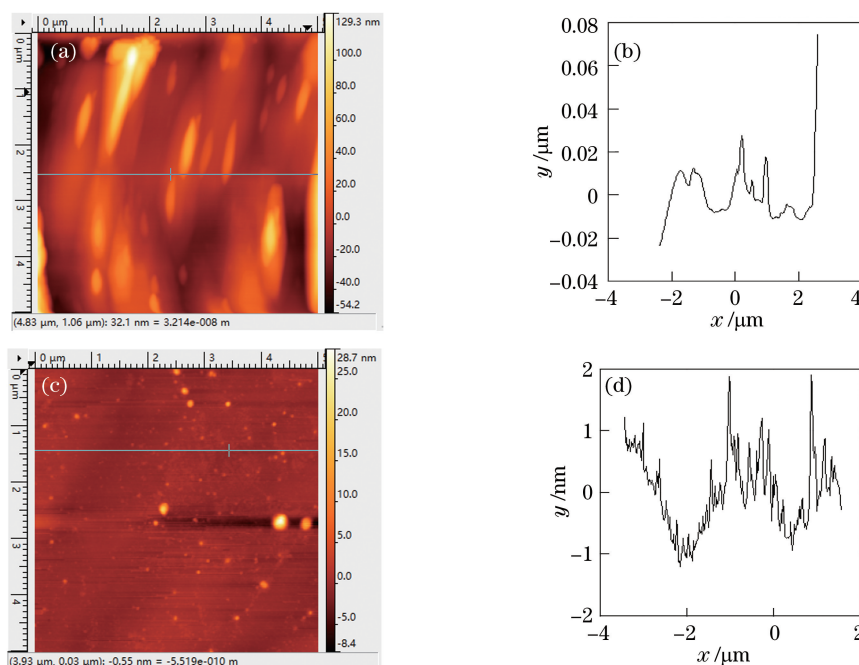


图 4 样品 1 和样品 2 的 AFM 图像和水平截面高度参数。(a)(b)样品 1;(c)(d)样品 2
Fig. 4 AFM images and horizontal section height profiles. (a)(b) Sample 1; (c)(d) sample 2

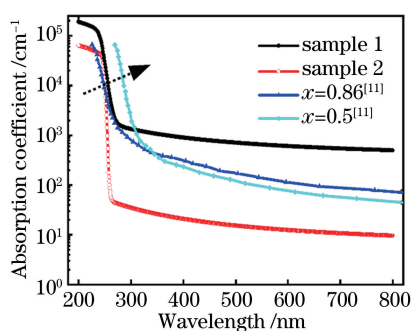


图 5 利用膜系传递矩阵得到的样品 1 和样品 2 的吸收系数
Fig. 5 Fitted absorption coefficient from the films transfer matrix of samples 1 and 2

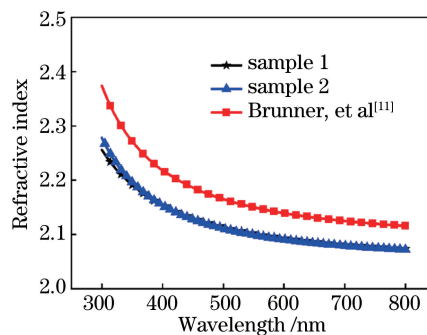


图 6 根据透射谱拟合得到的样品 1 和样品 2 的折射率
Fig. 6 Fitted refractive index from transmission spectra of samples 1 and 2

图 6 所示为样品 1 和样品 2 的折射率拟合结果,同时图 6 还给出了文献[11]中 $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}$ 的折射率曲线。可以发现:样品 1 和样品 2 的折射率比较接近,与文献[11]中的折射率相比,两个样品的折射率偏小 2%~4.5%,这可能与材料的生长条件有关。Antoine-Vincent 等^[26] 研究后指出,不同的工艺条件会导致材料内部生长的均一性、生长时的热应力、缓冲层引入的应力条件不同,因此会影响实际生长材料的铝组分,进而影响折射率。文献[11]中的样品是通过等离子体诱导分子束外延(PIMBE)技术制得的,而本文中的样品是通过 MOCVD 技术制得的,同时两组样品是在不同时期制备得到的,工艺水平可能存在差异,因此可能会造成折射率的差异。

5 结 论

本文讨论了利用多层膜系和传递矩阵方法对生长在蓝宝石衬底上的 $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}$ 外延薄膜材料的透射谱进行拟合的研究,建立了全波段(200~800 nm)范围内的吸收系数模型,根据透射谱测试数据得到了 $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}$ 材料的吸收系数,为进一步研究日盲紫外探测器的响应光谱提供了准确的实验数据。本文还提取了外延薄膜的折射率、膜层厚度和表面粗糙度等参数。样品 1 和样品 2 的薄膜厚度分别为 1055 nm 和 3487 nm,与设计厚度 1020 nm 和 3500 nm 相比,样品 1 的误差在 3.4% 左右,样品 2 的误差在 0.4% 左右。表面粗糙度参数与 AFM 测量结果的相关性良好。利用本文提出

的研究方法还可以提取薄膜的光学参数、膜层厚度、表面粗糙度等参数,而这也为后续器件的质量评测与研究提供了分析依据。

参 考 文 献

- [1] Amano H, Kito M, Hiramatsu K, et al. P-type conduction in Mg-doped GaN treated with low-energy electron beam irradiation (LEEBI) [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1989, 28(12): L2112-L2114.
- [2] Li X Y, Xu J T, Tang Y W, et al. GaN based ultraviolet detectors and its recent development [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(3): 276-280.
李向阳, 许金通, 汤英文, 等. GaN 基紫外探测器及其研究进展 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(3): 276-280.
- [3] Yang L C, Fu K, Shi X S, et al. Technology and performance of metal-semiconductor-metal AlGaIn/GaN heterostructure ultraviolet photodetector [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(s1): s104001.
杨乐臣, 付凯, 史学舜, 等. 金属-半导体-金属结构 AlGaIn/GaN 异质结紫外探测器技术及特性 [J]. 光学学报, 2014, 34(s1): s104001.
- [4] Bao G H, Li D B, Sun X J, et al. Enhanced spectral response of an AlGaIn-based solar-blind ultraviolet photodetector with Al nanoparticles [J]. Optics Express, 2014, 22(20): 24286-24293.
- [5] Li D B, Jiang K, Sun X J, et al. AlGaIn photonics: recent advances in materials and ultraviolet devices [J]. Advances in Optics and Photonics, 2018, 10(1): 43-110.
- [6] Kalra A, Rathkanthiwar S, Muralidharan R, et al. Material-to-device performance correlation for AlGaIn-based solar-blind p-i-n photodiodes [J]. Semiconductor Science and Technology, 2020, 35(3): 035001.
- [7] Rajabi M, Dariani R S, Irajizad A, et al. Optoelectronic properties of cauliflower like ZnO-ZnO nanorod/p-Si heterostructure [J]. Solid-State Electronics, 2013, 80: 33-37.
- [8] Zhuang Q H, Wang S Q. Monitoring method of optical film thickness [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(10): 103102.
庄秋慧, 王三强. 光学膜厚的监控方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(10): 103102.
- [9] Jia H B, Sun J H, Xu Y, et al. Determination of thickness and optical constants of sol-gel derived TiO₂ films by combined analysis of transmittance and X-ray reflectivity spectra [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0831001.
贾红宝, 孙菁华, 徐耀, 等. 利用透射光谱与 X 射线反射谱精确测量溶胶-凝胶 TiO₂ 薄膜厚度和光学常数 [J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0831001.
- [10] Liu Y, Li Q X, Wan L Y, et al. Composition and temperature dependent optical properties of Al_xGa_{1-x}N alloy by spectroscopic ellipsometry [J]. Applied Surface Science, 2017, 421: 389-396.
- [11] Brunner D, Angerer H, Bustarret E, et al. Optical constants of epitaxial AlGaIn films and their temperature dependence [J]. Journal of Applied Physics, 1997, 82(10): 5090-5096.
- [12] Zhang J C, Hao Y, Li P X, et al. Thickness measurement of GaN film based on transmission spectra [J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(4): 1243-1246.
张进城, 郝跃, 李培成, 等. 基于透射谱的 GaN 薄膜厚度测量 [J]. 物理学报, 2004, 53(4): 1243-1246.
- [13] Li C, Li X, Xu J T, et al. Transmission spectra of GaN and AlGaIn films [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(9): 2294-2298.
李超, 李雪, 许金通, 等. GaN 及 AlGaIn 薄膜透射光谱的研究 [J]. 光子学报, 2009, 38(9): 2294-2298.
- [14] Li X, Wei Y F, Gong H M, et al. Study on optical characteristics of wurtzite GaN [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(2): 304-307.
李雪, 魏彦峰, 龚海梅, 等. 纤锌矿 GaN 薄膜光学性质的研究 [J]. 光子学报, 2007, 36(2): 304-307.
- [15] Katsidis C C, Siapkias D I. General transfer-matrix method for optical multilayer systems with coherent, partially coherent, and incoherent interference [J]. Applied Optics, 2002, 41(19): 3978-3987.
- [16] Lin Y C, Lu W Q. Principle of optical films [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1990.
林永昌, 卢维强. 光学薄膜原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1990.
- [17] Juárez-García B, González-Gutiérrez J, Rivera-Medina M J, et al. Requirements and applications of accurate modeling of the optical transmission of transparent conducting coatings [J]. Applied Optics, 2019, 58(19): 5179-5186.
- [18] Yin G, Merschjann C, Schmid M. The effect of surface roughness on the determination of optical constants of CuInSe₂ and CuGaSe₂ thin films [J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(21): 213510.
- [19] Yu G, Wang G. Optical properties of wurtzite structure GaN on sapphire around fundamental absorption edge [J]. Applied Physics Letters, 1997, 70(24): 3209-3211.
- [20] Swanepoel R. Determination of the thickness and

- optical constants of amorphous silicon[J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1983, 16 (12): 1214-1222.
- [21] Li C, Bao X C, Xu J T, et al. Optical characterization of GaN/AlGa_N bilayer by transmission and reflection spectra [J]. Journal of Applied Physics, 2010, 108(6): 063104.
- [22] Liu Z L, Wang W L, Yang W J, et al. Influence of AlN buffer layer thickness on the properties of GaN films grown by pulsed laser deposition [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2014, 35(1): 46-49. 刘作莲, 王文樑, 杨为家, 等. AlN 缓冲层厚度对脉冲激光沉积技术生长的 GaN 薄膜性能的影响[J]. 半导体光电, 2014, 35(1): 46-49.
- [23] Urbach F. The long-wavelength edge of photographic sensitivity and of the electronic absorption of solids [J]. Physical Review, 1953, 92(5): 1324.
- [24] Brown J D, Li J Z, Srinivasan P, et al. Solar-blind AlGa_N heterostructure photodiodes [J]. MRS Internet Journal of Nitride Semiconductor Research, 2000, 5(1): e9.
- [25] Yun F, Reshchikov M A, He L, et al. Energy band bowing parameter in Al_xGa_{1-x}N alloys [J]. Journal of Applied Physics, 2002, 92(8): 4837-4839.
- [26] Antoine-Vincent N, Natali F, Mihailovic M, et al. Determination of the refractive indices of AlN, GaN, and Al_xGa_{1-x}N grown on (111) Si substrates [J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93 (9): 5222-5226.