

基于透射谱的 GaN 薄膜厚度测量^{*}

张进城 郝 跃 李培成 范 隆 冯 倩

(西安电子科技大学微电子研究所, 西安 710071)

(2003 年 6 月 6 日收到 2003 年 7 月 31 日收到修改稿)

通过对蓝宝石衬底异质外延 GaN 薄膜光学透射谱的分析, 结合晶体薄膜的干涉效应原理并考虑折射率随光子波长变化的影响, 从理论上推导出了实用的薄膜厚度计算方法. 实际应用表明, 该方法是一种快速准确的 GaN 薄膜厚度测量方法.

关键词: GaN, 透射谱, 厚度测量

PACC: 7865P, 4225B

1. 引 言

GaN 由于其具有宽的禁带宽度(约 3.4 eV)、高击穿场强($(1-3) \times 10^6$ V/cm)、高峰值电子速度(3×10^7 cm/s)和高饱和电子速度(1.5×10^7 cm/s)等优越电学特性, 因此成为制造短波长光电子器件、高频大功率电子器件以及高温器件最具潜力的新型半导体材料之一.

由于缺少合适的 GaN 晶体材料生长方法, 因此, 目前的 GaN 及其合金半导体材料大多都是基于蓝宝石和碳化硅等衬底异质外延生长的晶体薄膜. 在 GaN 材料生长和试验研究中, GaN 晶体薄膜厚度的确定是一项基本的试验内容. 目前 GaN 晶体薄膜厚度的确定方法主要是 x 射线法、阴极发光光谱 (CL) 和光致发光 (PL) 谱等方法. x 射线法通常包含 x 射线反射 (XRR)、x 射线荧光 (XRF) 和 x 射线衍射 (XRD) 三种方法^[1]. XRR 方法用于厚度测量的最大优点是厚度测量与材料参数无关, 所以该方法的应用最为普遍. XRF 和 XRD 方法用于厚度测量时都与材料参数、晶体质量、界面/表面质量等因素有关, 均需准确的参考样品. 由于 x 射线设备、CL 谱测试仪和 PL 谱测量仪都很昂贵, 在国内的使用并不是很普遍, 因此薄膜厚度的测量影响了 GaN 晶体生长的研究. 而基于分光光度计的透射谱测量是一种很常用的方法, 但是目前透射谱只用于确定晶体光学禁带宽度和定性地表征晶体的质量. 实际上, 透射谱

也是可以用来确定晶体薄膜厚度的.

本文通过对蓝宝石衬底异质外延 GaN 薄膜光学透射谱的分析, 结合晶体薄膜的干涉效应原理并考虑折射率随光子波长变化的影响, 从理论推导和试验分析两方面获得了一种基于透射谱的 GaN 薄膜厚度的快速准确测量方法.

2. 蓝宝石衬底异质外延 GaN 薄膜的透射谱

GaN 异质外延使用的蓝宝石衬底是一种无色透明的晶体, 异质外延得到的 GaN 晶体薄膜通常也是一种无色透明晶体. 因此, 利用可见光/紫外光分光光度计容易得到蓝宝石衬底异质外延 GaN 薄膜的透射谱曲线(见图 1). 从透射谱曲线可以看出, 光子波长小于 364 nm 的光子几乎被完全吸收, 而波长大于 364 nm 的光子具有 40% 左右的透射率. 364 nm 是一个明显的吸收边, 对应于 GaN 半导体材料的本征吸收, 由此可以得到 GaN 的光学禁带宽度为 3.4 eV. 而在波长大于 364 nm 的透射谱曲线上具有一条周期不断变化的干涉条纹. 明显的干涉条纹和较大的调制深度表明晶体具有好的光学质量^[2]. 目前大多数文献中有关透射谱的分析仅限于上述内容.

透射谱曲线上干涉条纹的出现是菲涅耳干涉效应的结果. 图 2 给出了透射谱干涉效应的基本原理图. 透射光 1 是入射光直接透过晶体薄膜, 而透射光 2 是入射光在 GaN 薄膜中经过两次反射后获得

^{*} 国防预研项目(批准号: 415010701)和国家重点基础研究发展规划(批准号: 2002CB3119)资助的课题.

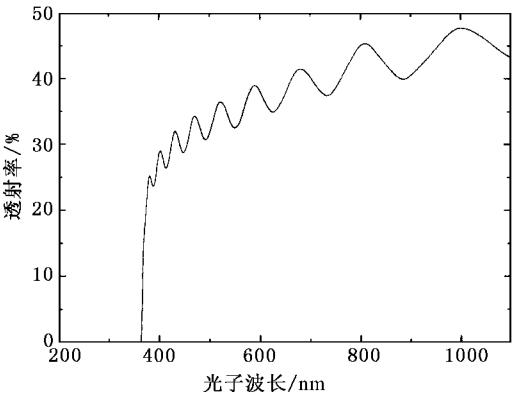


图 1 蓝宝石衬底异质外延 GaN 薄膜的典型透射谱曲线

的透射光. 虽然一束入射光经过蓝宝石衬底 GaN 薄膜产生透射光的过程要更复杂一些, 还存在更多的光学过程, 如 GaN 薄膜中的多次反射(两次以上)以及蓝宝石与 GaN 和空气两个界面的反射. GaN 薄膜中多次反射(两次以上)产生的透射光在整个透射光中所占的比例非常低, 可以忽略. 由于蓝宝石衬底比 GaN 薄膜厚得多, GaN 薄膜厚度通常在 0.5—5.0 μm 之间, 而蓝宝石衬底的厚度通常为 330 μm , 因此蓝宝石两界面反射获得的透射光由于光程的成倍增加而变得非常微弱, 也可以忽略. 所以, 透射谱曲线的干涉条纹主要是直接透射光和 GaN 薄膜中两次反射后的透射光两种分量.

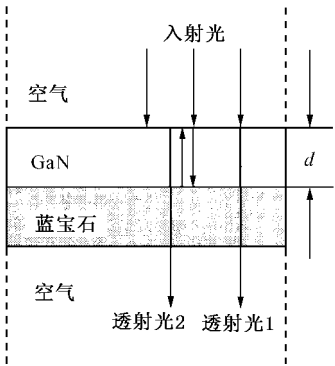


图 2 薄膜干涉效应原理

直接透射光和经过两次反射后的透射光发生干涉的条件为

$$2d \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_i} = \begin{cases} k\lambda & k = 1, 2, \dots \text{ (增强) }, \\ (k - 1/2)\lambda & k = 1, 2, \dots \text{ (减弱) }, \end{cases} \quad (1)$$

其中空气的折射率为 $n_1 = 1.003$, GaN 的折射率为

n_2 , d 为 GaN 层的厚度. θ_i 为入射角. 通常的透射谱测量时 $\theta_i = 0$. (1) 式中的“增强”指的是直接透射光和 GaN 薄膜中两次反射后的透射光同相位, 相互增强, 对应于透射谱曲线的峰值; “减弱”对应于透射谱曲线的谷值.

3. 薄膜厚度计算方法

从 (1) 式可以看出, 如果知道波数 k 的具体数值, 我们就可以利用干涉条纹的任一波峰或波谷对应的光子波长来确定薄膜的厚度 d . 但实际上每个干涉条纹波峰或波谷所对应的波数 k 是很难确定的. 由于不同厚度的薄膜, 波数 k 都会有所不同, 因此 (1) 式很难直接用于计算薄膜厚度.

为了在不清楚波数 k 的情况下确定薄膜厚度 d , 我们利用下述方法消去波数 k .

设透射谱曲线干涉条纹上相邻峰值和谷值对应的光子波长分别为 λ_1 和 λ_2 ($\lambda_1 < \lambda_2$), 再将空气的折射率 $n_1 = 1.003 \approx 1$ 代入 (1) 式, 有以下公式:

$$2n_2 d = k\lambda_1, \quad (2a)$$

$$2n_2 d = (k - 1/2)\lambda_2. \quad (2b)$$

引入常数 C_{thick} , 再利用测量得到的一对相邻峰值和谷值对应的波长 λ_1 和 λ_2 可以确定薄膜的厚度 d . 具体公式如下:

$$d = C_{\text{thick}} \frac{\lambda_2 \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}. \quad (3)$$

将 (2a) 和 (2b) 式代入 (3) 式, 可以确定常数 C_{thick} 的值, 即

$$\begin{aligned} d &= C_{\text{thick}} \frac{(2n_2 d) \left[k(k - 1/2) \right]}{2n_2 d \left(\frac{1}{k - 1/2} - \frac{1}{k} \right)} \\ &= C_{\text{thick}} (4n_2 d). \end{aligned} \quad (4)$$

由 (4) 式可得, $C_{\text{thick}} = 1/(4n_2)$.

通常, GaN 薄膜的折射率 n_2 是已知的, 只要从透射谱曲线干涉条纹上得到一对相邻波峰和波谷对应的光子波长, 就容易由 (3) 式得到 GaN 晶体薄膜的厚度. 实际上, 如图 1 所示, 可以从透射谱曲线干涉条纹上得到多组波峰和波谷, 因此我们可以选取多组波峰、波谷对应波长的数据, 得到多个 GaN 薄膜厚度的数值, 然后对其求平均值, 这样可以减少测量误差.

表 1 给出了利用 (3) 式计算得到的图 1 透射谱曲线对应的 GaN 薄膜厚度. 得到的薄膜厚度为 980

nm ,不同波峰、波谷确定的薄膜厚度相对偏差的平均值为 7.53% . 表 1 中的 λ_1 和 λ_2 对应相邻的波峰、波谷或者波谷、波峰 .

表 1 由(3)式确定的薄膜厚度

λ_1/nm	λ_2/nm	d/nm	相对偏差/%
1003	890	859	12.38
890	809	966	1.40
809	735	873	10.87
735	680	988	0.79
680	626	857	12.56
626	589	1083	10.53
589	552	955	2.53
552	522	1044	6.53
522	493	965	1.57
493	471	1147	17.07
471	449	1045	6.62
平均值		980	7.53

4. 薄膜厚度测量方法的优化

通过对表 1 中不同波峰、波谷所确定薄膜厚度的分析可以发现 ,随着波峰、波谷对应光子波长的减小 ,薄膜厚度不断增大 . 这是因为在光子波长范围 (如 400—1100 nm)内 ,GaN 晶体的折射率并不是一个常数 ,而是折射率随光子波长增大而减小 . 为了使透射谱干涉效应确定的薄膜厚度更加准确 ,需要在计算过程中考虑折射率随光子波长变化的影响 .

Yu 等^[3]研究了 GaN 晶体折射率随光子波长变化的规律 . GaN 晶体折射率随光子波长的变化规律如图 3 所示 . 图 3 中 ,实心方块表示 Yu 等对折射率的测量结果 . 为了方便应用 ,需要得到折射率随光子波长变化的解析方程 . 应用 Shaffer 等 1971 年研究 SiC 晶体折射率时的模型^[4] ,对于 Yu 等的测量结果进行曲线拟合 ,得到 GaN 晶体折射率随光子波长变化的解析方程 ,即

$$n = 2.229 + 4.166 \times 10^4 \lambda^{-2} . \tag{5}$$

图 3 中的实线表示(5)式的计算结果 . 可以看出 (5)式能准确地描述 GaN 晶体折射率随光子波长变化的规律 .

考虑折射率随光子波长变化的影响以后 ,常数 C_{thick} 可以由下式计算得到 :

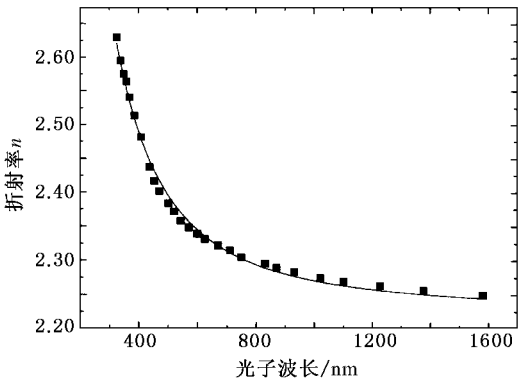


图 3 GaN 晶体折射率随光子波长的变化 实心方块表示测量值 ;曲线表示计算值

$$C_{\text{thick}} = 0.25 \times (2.229 + 4.166 \times 10^4 \lambda^{-2})^{-1} . \tag{6}$$

利用(3)(6)式对表 1 的测量数据进行重新处理 ,可以得到更为准确的薄膜厚度数据(见表 2) . 考虑 GaN 折射率随光子波长变化的影响后得到的薄膜厚度为 960 nm ,比不考虑折射率变化影响时的数据偏小一些 . 不同波峰、波谷确定的薄膜厚度相对偏差的平均值为 6.7% ,比不考虑折射率变化影响时的数据有所降低 .

表 2 由(3)(6)式确定的薄膜厚度

λ_1/nm	λ_2/nm	d/nm	相对偏差/%
1003	890	868	9.59
890	809	972	1.23
809	735	874	8.98
735	680	983	2.35
680	626	847	11.77
626	589	1064	10.81
589	552	932	2.91
552	522	1012	5.38
522	493	928	3.34
493	471	1096	14.13
471	449	991	3.19
平均值		960	6.70

这里需要说明的是 ,本文使用的相对偏差并不是指薄膜厚度的测量值与实际值之间的偏差 ,而是表征不同相邻波峰、波谷组合得到的薄膜厚度的一致性 . 这种一致性越好即相对偏差越小 ,就表示多点平均法得到的厚度越准确 .

根据以上的讨论和分析可以发现 ,在考虑了薄

膜材料折射率随波长变化的影响以后,厚度测量的相对偏差由 7.53% 下降为 6.70%。当然最后得到的相对偏差也不小,主要原因可以做以下解释。由(3)式可以看出,厚度的准确性主要取决于折射率数值的准确性以及波长 λ_1 和 λ_2 的准确性。首先异质外延得到的 GaN 晶体薄膜并不是完美的晶体,GaN 薄膜中与衬底相邻的 GaN 过渡层晶体很不完整,越到表面晶体质量越高,晶体质量的不同会影响折射率的数值。本文计算所采用的折射率也只是一种常用数值。由于 GaN 晶体薄膜与衬底之间的异质性,所以界面的质量也不是很好,再加上测量仪器的误差,因此采用不同波峰、波谷组合获得的薄膜厚度之间总会存在一定的偏差。通过多点测量然后求平均值的方法,是可以大大减小上述因素引入的测量误差的。

当 GaN 薄膜厚度在 0.5—5.0 μm 范围内时,由

透射谱干涉效应确定的 GaN 晶体薄膜厚度比较准确,实用性很强。而且目前大多 GaN 晶体薄膜都是在蓝宝石和 SiC 衬底上异质外延得到的,厚度也在上述适用范围内。

5. 结 论

本文通过对蓝宝石衬底异质外延 GaN 薄膜光学透射谱的分析,结合晶体薄膜的干涉效应原理,从理论上推导出了实用的薄膜厚度计算方法。并考虑 GaN 晶体折射率随光子波长变化的影响对得到的薄膜厚度测量方法进行优化。实际应用表明该方法是一种较准确、快速的 GaN 薄膜厚度测量方法,特别适用于蓝宝石衬底异质外延 GaN 晶体薄膜厚度的测量。

- [1] Terada S, Murakami H, Nishihagi K *et al* 1999 *Proceedings of Advanced Semiconductor Manufacturing Conference and Workshop (ASMC)* (IEEE) 414
- [2] Afifuddin A, Butcher K S A, Timmers H, Tansley T L 2002 *Physi-*

ca Status Solidi C **1** 499

- [3] Yu G, Wang G, Ishikawa H *et al* 1997 *Appl. Phys. Lett.* **24** 3209
- [4] Shaffer P T B 1971 *Applied Optics* **10** 1034

Thickness measurement of GaN film based on transmission spectra^{*}

Zhang Jin-Cheng Hao Yue Li Pei-Xian Fan Long Feng Qian

(*Institute of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

(Received 6 June 2003; revised manuscript received 31 July 2003)

Abstract

By analyzing the transmission spectra of hetero-epitaxial GaN films on sapphires, a film thickness measurement method is presented. The method uses the interference effect of the crystal film and considers the effect of the refractive index n on the photon wavelength. Applications of it show that the method is a rapid and precise one for measuring the film thickness of GaN crystals.

Keywords: GaN, transmission spectra, thickness measurement

PACC: 7865P, 4225B

^{*} Project supported by the Advanced Research for National Defence of China (Grant No. 415010701) and the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2002CB3119).