

射频磁控溅射制备 HfLaO 薄膜结构和光学性能研究

李智¹, 苗春雨², 马春雨², 张庆瑜²

(1. 大连大学 机械工程学院, 大连 116622; 2. 大连理工大学 物理与光电工程学院, 大连 116023)

摘要: 采用射频磁控溅射技术制备 HfLaO 薄膜, 利用 X 射线衍射(XRD)分析了薄膜的微结构, 通过紫外-可见分光光度计测量了薄膜的透过谱, 计算了薄膜的折射率和禁带宽度, 利用原子力显微镜观察了薄膜的表面形貌. 结果表明: 沉积态 HfLaO(La: 25%~37%)薄膜均为非晶态, 随着 La 掺入量的增加, HfLaO 薄膜的结晶化温度逐渐升高, HfLaO(La~37%)薄膜经 900℃ 高温退火后仍为非晶态, 具有优良的热稳定性, AFM 形貌分析显示非晶薄膜表面非常平整. 随着 La 掺入量的增加, HfLaO 薄膜的透射率先降后增, 在可见光范围薄膜均保持较高的透射率(82%以上). HfLaO 薄膜的折射率为 1.77~1.87. 随着 La 掺入量的增加, HfLaO 薄膜的折射率呈先增后降的变化趋势, 同时 HfLaO 薄膜的 E_g 逐渐降低, 分别为 5.9eV(La~17%)、5.87eV(La~25%)、5.8eV(La~33%)和 5.77eV(La~37%).

关键词: HfLaO 薄膜; 磁控溅射; 热学稳定性; 光学性能
中图分类号: O484; TN386 文献标识码: A

Structural and Optical Properties of HfLaO Films Prepared by RF Magnetron Sputtering

LI Zhi¹, MIAO Chun-Yu², MA Chun-Yu², ZHANG Qing-Yu²

(1. Department of Mechanical Engineering, Dalian University, Dalian 116622, China; 2. School of Physics and Optoelectronic Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: HfLaO films doped with different La contents, varying from 17% to 37%, were deposited using RF magnetron sputtering. The structure, thermal stability, surface morphology, and optical properties of HfLaO films were investigated by X-ray diffraction (XRD), atomic force microscope (AFM) and spectrophotometry. The results indicate that as-deposited HfLaO with 25%–37% La films are amorphous. With the increase of La contents, the crystallization temperature for HfLaO films is increased. The HfLaO film with 37% La remains amorphous even after annealed at 900°C. The AFM images show amorphous HfLaO films, which imply a good thermal stability have a relatively smooth surface. The average transmittance in the visible range is above 82% for all the films. The amorphous structure yields films of significantly higher transparency than the polycrystalline structure does. The refractive indices of the films are determined to be in the range 1.77–1.87. As the La content increases the refractive indices of the films are initially increased and then decreased. The optical band gap of the HfLaO films decreases to 5.9eV (La 17%), 5.87eV(La 25%), 5.8eV(La 33%), 5.77eV(La 37%), respectively.

Key words: HfLaO films; magnetron sputtering; thermal stability; optical properties

随着超大规模集成电路集成度的提高, 半导体器件的特征尺寸按摩尔定律不断缩小. 高性能 CMOS 器件的栅介质层等效氧化物厚度(EOT)减小

到 1 nm 以下时, 传统 SiO₂ 栅介质受隧穿效应的影响, 栅漏电流过大, 因此需要寻找新型高 k 栅介质材料来限制隧穿效应的影响, 从而能够在保持和

收稿日期: 2011-01-11; 收到修改稿日期: 2011-04-11

基金项目: 辽宁省教育厅高校科研计划项目(2008049); 国家自然科学基金(10605009, 10774018); 中央高校基本科研业务专项基金(DUT11LK44)

S&T Plan Projects of Liaoning Provincial Education Department (2008049), National Natural Science Foundation (10605009, 10774018); Fundamental Research Funds for the Central Universities (DUT11LK44)

作者简介: 李智(1972-), 女, 博士, 副教授. E-mail: malifcn@yahoo.com.cn

增大栅极电容的同时,使栅介质层仍保持足够物理厚度.

HfO₂ 具有较高的介电常数、较大的禁带宽度和良好的热稳定性,有希望成为替代传统 SiO₂ 的新型高 k 材料. 但是 HfO₂ 结晶温度较低(约为 400~600°C), 结晶态 HfO₂ 栅介质薄膜对器件性能具有不利影响^[1-3]. 近年,为了提高 HfO₂ 薄膜的结晶化温度,研制与开发以 HfO₂ 为基的多元系栅介质薄膜材料已成为研究热点之一. 稀土氧化物 La₂O₃ 电学性能优越^[4], 具有较高的介电常数($k \sim 30$)、宽的带隙(5.8eV)、大的导带偏移量(2.3eV)且结晶温度较高(大约 1100°C). 有研究者提出在 HfO₂ 中掺入稀土元素 La 后形成 Hf_{1-x}La_xO_y 薄膜, 以提高 HfO₂ 的结晶温度. 国外已采用不同方法制备出 Hf_{1-x}La_xO_y 薄膜, 如原子层沉积法^[5]、磁控溅射法^[6-7]和化学气相沉积法^[8]等. 目前,国内对 Hf_{1-x}La_xO_y 薄膜的研究尚处于摸索阶段, 有关 Hf_{1-x}La_xO_y 薄膜制备工艺的研究报道较少. 本文采用射频反应磁控溅射技术, 通过改变 La、Hf 两种金属靶材的入射功率, 在 Ar、O₂ 混合气体中制备出不同 La 掺入量的 HfLaO 薄膜.

1 试验部分

1.1 样品制备

薄膜制备是在 JGPG450 型高真空磁控溅射系统上完成的, 溅射时靶面的法线方向与基片的法线方向近乎成 45°, 金属 Hf 靶、金属 La 靶的纯度均为 99.99%. 基片采用石英片和 n 型 (100)取向的单晶 Si 片. Si 基片清洗处理方法如下: 将 Si 片放入丙酮、乙醇、去离子水中分别用超声波清洗 5 min, 然后在 5%HF 溶液中浸泡 1 min, 除去自然氧化物层, 再在乙醇中用超声波清洗 5 min, 经去离子水冲洗, 用干燥 N₂ 吹干后, 快速放入真空室, 在 Ar 和 O₂ 混合气氛下沉积薄膜. 真空室抽至本底真空度 8.0×10^{-4} Pa. Ar 和 O₂ 表观质量流量分别为 30、5 cm³/min, 溅射过程中的工作气压均为 1 Pa. 金属 Hf 靶的溅射入射功率为 120 W, 金属 La 靶的溅射入射功率变化为 40~100 W, 沉积温度为室温. 本文采用同样方式沉积了氧化铪和氧化镧薄膜以进行对比研究. 沉积的 HfLaO 薄膜在氮气气氛中进行退火处理, 退火温度在 700~950°C, 升温速率为 15°C/min, 退火时间为 30 min, 退火后的样品自然冷却至室温.

1.2 薄膜表征

采用 X 射线衍射(XRD)分析表征薄膜结构, 在 D/Max2400 衍射分析仪上进行. X 射线源为 CuK α

辐射, 波长 $\lambda = 0.15418$ nm. 采用 EPMA-1600 型电子探针扫描显微镜进行薄膜成分分析. 在 CSPM5500 型原子力显微镜(AFM)上进行薄膜表面形貌观察, 采用轻敲扫描模式, 扫描频率为 2 Hz, 扫描范围为 2 $\mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$. 通过透射光谱研究薄膜光学性能, 采用 Lambda 35UV/VIS 光谱仪测薄膜透射光谱, 通过拟合光谱确定折射率、消光系数、光学禁带宽度等薄膜的光学参数.

2 结果与讨论

2.1 HfLaO 薄膜成分与沉积速率

通过能量色散 X 射线(EDX)特征能谱仪测量了不同工艺条件下制备的 Hf_{1-x}La_xO_y 薄膜的成份, 根据 Hf 峰和 La 峰的积分强度及其电离截面可以得到薄膜中的 [La]/[La+Hf] 原子含量比. EDX 分析结果表明(图 1), 随着 La 靶射频频入射功率的增大, 薄膜中 [La]/[La+Hf] 增大, 分别为 0、17%、25%、33%、37%. Hf_{1-x}La_xO_y 薄膜中 La/Hf 原子比与预先设置的 La 靶与 Hf 靶功率比基本接近, 说明通过调节靶材功率能够较好地控制薄膜的掺杂量. 从图 1 还可看出薄膜沉积速率随溅射功率的增大几乎呈线性增长, 这是由于在溅射沉积过程中, 当 La 靶溅射功率增大时, 靶面的溅射电流密度和自偏压都会增加, 使入射离子流密度和入射离子能量增大, 溅射产额增加, 靶面溅射速率增大, 从而使薄膜沉积速率随之近似增长.

2.2 HfLaO 薄膜结构与热学稳定性

对于栅介质而言, 最理想的结晶学状态为非晶结构. 图 2(a)为原位沉积不同 La 掺入量的 HfLaO 薄膜的 XRD 图谱, 可见, 原位沉积的氧化镧薄膜为非晶结构, 而原位沉积的 HfO₂ 薄膜已经结晶, 与标准

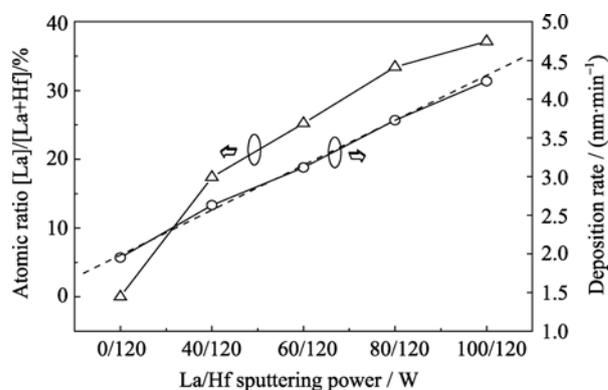


图 1 HfLaO 薄膜的 [La]/[La+Hf] 原子比和沉积速率的变化
Fig. 1 Change of the [La]/[La+Hf] atomic ratio in HfLaO films and the deposition rate as a function of La sputtering power

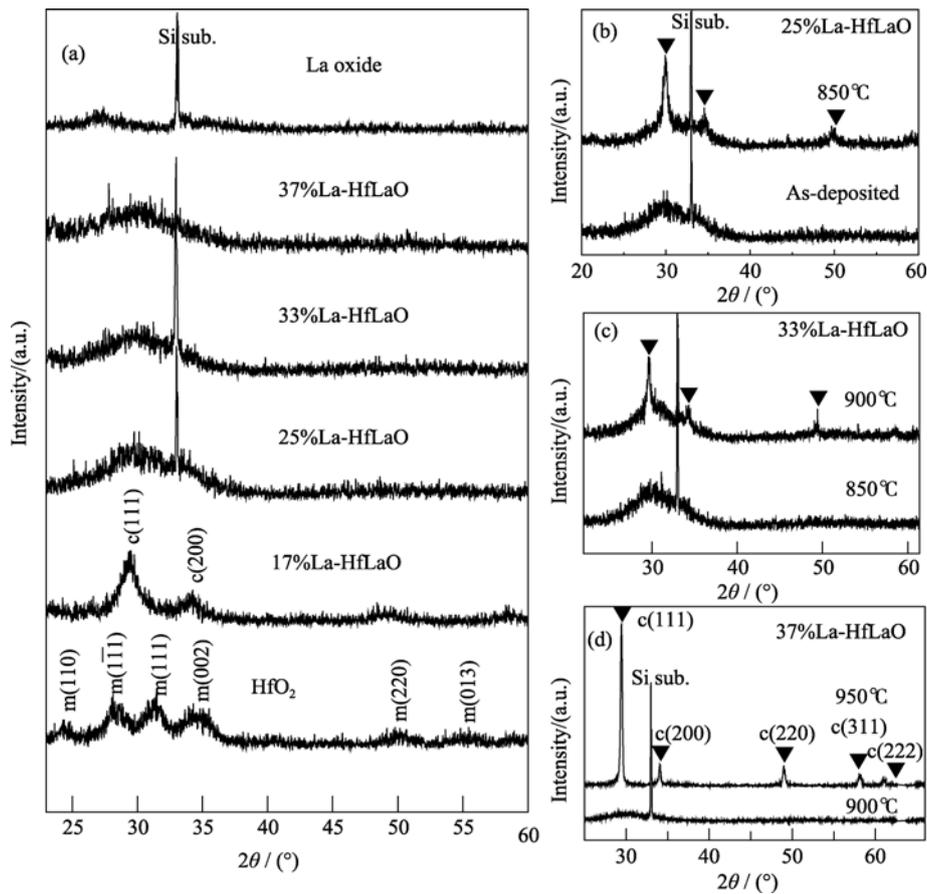


图 2 (a)不同 La 掺入量 HfLaO 薄膜的 XRD 图谱; (b)沉积态和经 850°C 退火后 HfLaO(La~25%)薄膜的 XRD 图谱; (c) 经 850°C 和 900°C 退火后 HfLaO(La~33%)薄膜的 XRD 图谱; (d)经 900°C 和 950°C 退火后 HfLaO(La~37%)薄膜的 XRD 图谱
 Fig. 2 XRD patterns of (a) HfLaO with different La contents, (b) 25%La-HfLaO film as deposited and annealed at 850°C, (c) 33%La-HfLaO film annealed at 850°C and 900°C, (d) 37%La-HfLaO film annealed at 900°C and 950°C

粉末衍射图谱(JCPDS 74-1506)相比,位于 $2\theta=24.28^\circ$ 、 28.26° 、 31.38° 、 34.36° 、 50.18° 和 55.56° 处的衍射峰分别归属于单斜相 m-HfO₂ 的(110)、 $(\bar{1}11)$ 、(111)、(002)、(220)和(013)晶面. 当 La 掺入量为 17%时, HfLaO 薄膜除了结晶, 还发生相变, 生成了具有萤石结构立方相 c-LaHfO_x. 当 La 掺入量从 25%增加到 37%时, 在谱图上除 Si 基片(200)衍射峰外没有出现任何特征衍射峰, 说明薄膜没有发生结晶, 结构呈非晶态, 这说明在 HfO₂ 薄膜中掺入适量的 La 可使其获得非晶的能力得到提高.

图 2(b)、(c)、(d)是 La 掺入量分别为 25%、33% 和 37%时 HfLaO 薄膜经不同温度退火处理后的 XRD 图谱. 可见, 沉积态 HfLaO(La: 25%~37%)薄膜均呈非晶态. HfLaO(La:25%)薄膜经 850°C 退火后, 如图 2(b)所示, 其衍射图谱中包括位于 $24^\circ\sim 38^\circ$ 之间非晶波包和位于 $2\theta=29.78^\circ$ 、 34.52° 、 49.62° 弱衍射峰, 薄膜中非晶结构已开始向晶体转变, 薄膜结构呈现非晶与多晶共存. 随着 La 掺入量的增加,

HfLaO(La:33%)薄膜经 850°C 退火后, 如图 2(c)所示, 薄膜结构为非晶态, 经 900°C 退火的薄膜结构仍然呈现非晶与多晶共存. 当 La 掺入量增加到 37%时, 如图 2(d)所示, 经 900°C 退火后, HfLaO 薄膜仍呈现非晶态, 经 950°C 退火后, 薄膜已经晶化, 只生成具有萤石结构立方相 c-LaHfO_x, 没有其它相生成, 其中(111)衍射峰的相对强度很大, 说明薄膜中(111)晶面择优生长.

图 3(a)为经过退火处理后 HfLaO 薄膜(La~25%、33%、37%)的立方相(111)晶向衍射峰图谱, 从图中可见, 经 950°C 退火处理后, HfLaO 薄膜为稳定的萤石结构, 随着 La 掺入量的增加, XRD 衍射峰位逐渐向小角方向移动, 由图 3(a)计算的晶面间距 d_{111} 分别为 0.2978、0.3007 和 0.3029nm. 根据 Scherrer 公式: $D_{hkl}=K\lambda/(\beta\cos\theta)$, 式中 D_{hkl} 为垂直于(hkl)晶面方向的平均晶粒尺寸, β 为(hkl)晶面衍射峰的半高宽(Rad), $K=0.89$, $\lambda=0.15406\text{nm}$, θ 为衍射角, 同时通过计算不同 La 掺入量的 HfLaO 薄膜垂直于(111)晶面

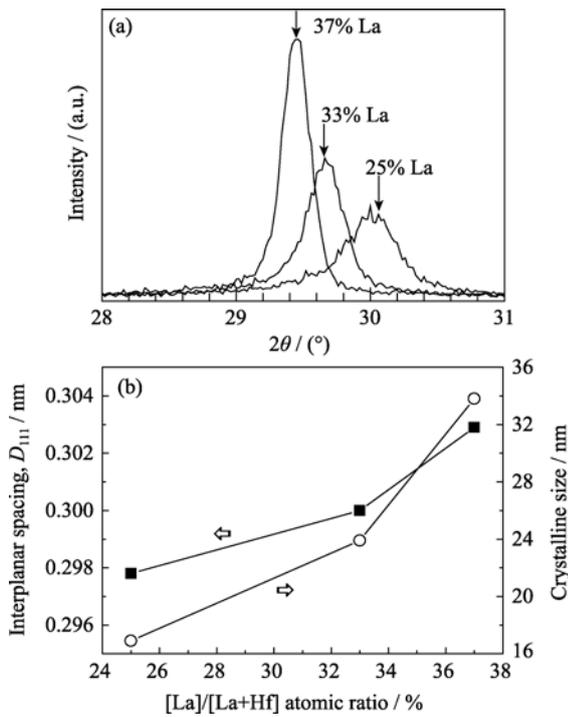


图 3 (a) 经 950°C 退火处理后 HfLaO 薄膜立方相(111)晶向衍射峰图谱以及(b)晶面间距和晶粒尺寸随着 La 含量的变化 Fig. 3 XRD patterns (a) of the cubic (111) peaks of HfLaO films annealed at 950°C and evolution (b) of the interplanar spacing D_{111} and the grain size as a function of La content

的平均晶粒尺寸, 如图 3(b), 其值分别为 $D_{111}(25\%La) \approx 16.9\text{nm}$ 、 $D_{111}(33\%La) \approx 23.9\text{nm}$ 和 $D_{111}(37\%La) \approx 33.8\text{nm}$. XRD 分析结果表明, 随着 La 掺入量的增加, 经 950°C 退火处理的 HfLaO 薄膜的平均晶粒尺寸逐渐增大.

由上述对比分析表明, 掺入 La 制备的 HfLaO 薄膜热稳定性明显改善. 对此现象的解释目前还没有统一的说法. 有研究者认为是由于 La 的掺入导致 HfO_2 晶格常数的改变, HfLaO 薄膜在热处理过程中, 不再生成单斜相, 而是形成晶化温度高于单斜相的立方相或四方相. 可以认为这是由于 HfO_2 或 La_2O_3 等均属于离子化合物, 键角相对灵活, 同具有良好非晶形成能力的 SiO_2 相比, 原子重新规则排列所需克服势垒较小, 导致易于晶化. 但是, 对于掺入 La 的 HfO_2 薄膜, 当离子配位数都为 6 时, La^{3+} 离子半径为 0.103nm, Hf^{4+} 离子半径为 0.071nm, 大量的、大尺寸 La^{3+} 掺入会使 HfO_2 晶格发生严重畸变, 由 $\text{HfO}_2\text{-La}_2\text{O}_3$ 相图可知, La 掺入将使体系熔点降低, 从而使体系自由能降低. 根据薄膜形核理论, 在晶化过程中形核所需克服势垒即形核功 $\Delta G \propto \gamma^3 / \Delta G_v^2$ (γ : 单位面积界面能; ΔG_v : 单位体积相变自由能之差), 由于 La 掺入降低体系自由能, 降低 ΔG_v , 从而增加形核功 ΔG , 导致 HfLaO 薄膜形核困难, 从而有利于

改善薄膜的热稳定性, 这与 XRD 分析结果基本一致.

2.3 HfLaO 薄膜表面形貌和光学性能

图 4 为不同 La 掺入量的 HfLaO 薄膜(La~17%、25%、33%、37%)的 AFM 表面形貌和表面粗糙度 RMS(均方根值). AFM 形貌像显示, 不同 La 掺入量对 HfLaO 薄膜表面形貌有很大的影响, 如图 4 可见, 随着 La 掺入量的增加, 表面岛尺寸明显减小, 岛密度增大. 统计表明, $2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$ 范围内薄膜的表面粗糙度逐渐降低, 其中沉积态 HfLaO 薄膜(La~37%)的表面粗糙度 RMS 仅为 0.7 nm.

结合上述结构分析, 当 La 掺入量为 17% 时, 薄膜结构为立方相 c-LaHfO, 表面岛尺寸较大, 而当 La 掺入量为 25%~37% 时, 薄膜结构为非晶态, 表面岛尺寸较小, 表面平整. 图 4 还显示出 HfLaO 薄膜表面粗糙度随着退火温度的变化情况, 随着退火温度的升高, 薄膜逐步从非晶态向晶态转变(如 25%La-HfLaO:850°C 退火; 33%La-HfLaO:900°C 退火), 薄膜表面粗糙度略有降低, 意味着薄膜致密性增加, 而当薄膜处于完全晶化并且具有一定的择优取向生长(如 37%La-HfLaO:950°C 退火)时, 薄膜表面粗糙度增大.

图 5 给出了石英基片上生长的不同 La 掺入量的 HfLaO 薄膜在 190~1100 nm 范围内的透射光谱及 HfLaO(La~37%)薄膜的拟合谱与测量结果的对比情况. 透射曲线在可见光范围内的波动来源于薄膜表面和界面对光的干涉效应. 从图 5(a)可见, 随着 La 掺入量的增加, 薄膜的透射率先降后增: 当 La 掺入量为 17% 时, 沉积薄膜的透射率为 82%; 当 La 掺入量增加至 25%, 薄膜的透射率提高至 88% 以上;

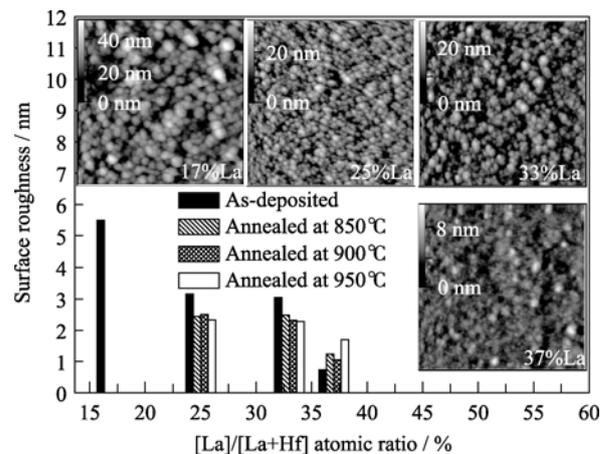


图 4 沉积态 HfLaO 薄膜 AFM 形貌像及不同温度退火薄膜表面粗糙度的变化

Fig. 4 Surface roughness of as-deposited and annealed HfLaO films with different La contents; Insets are AFM images of as-deposited HfLaO films with different La contents

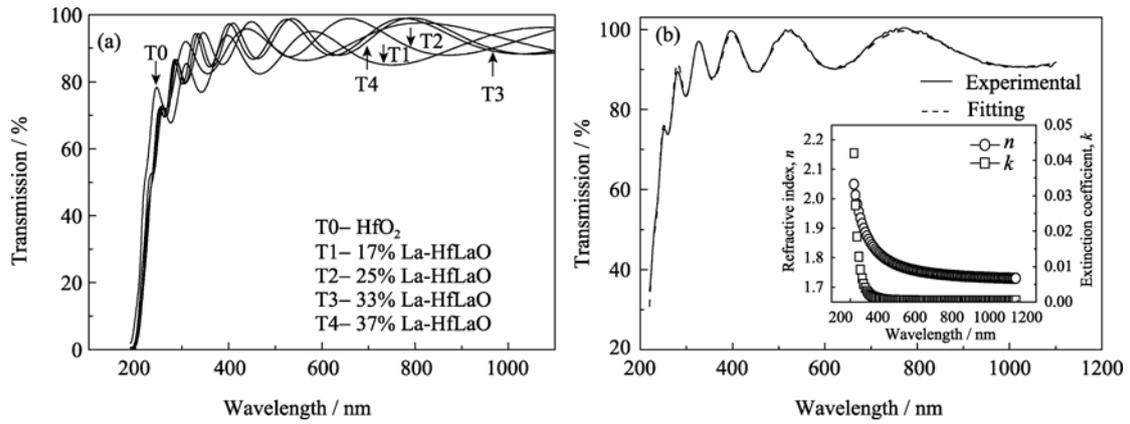


图 5 (a) 不同 La 掺入量的 HfLaO 薄膜的透射光谱, (b) 37%La-HfLaO 薄膜透射谱的拟合谱、实验谱、折射率和消光系数曲线
 Fig. 5 (a) Optical transmittance spectra of HfLaO films with different La contents, (b) experimental and fitting spectra of 37%La-HfLaO film, inset is variation of refractive index and extinction coefficient with wavelength

继续增加 La 掺入量, 薄膜透射率有所下降, 但仍略高于 m-HfO₂ 薄膜的透射率(其值为 86%), 此现象可能与薄膜晶体结构变化、表面粗糙度等有关. 研究表明, 具有非晶结构、表面较平整的 HfLaO 薄膜(La 分别为 25%、33%、37%)的透射率明显高于结晶态、表面较粗糙的 c-LaHfO 薄膜(La 为 17%)的透射率. 以一阶 Sellmeier 方程为基础的光谱拟合结果与实验结果吻合良好, 平均误差小于 2%. 表 1 为根据光谱拟合所得到不同 La 掺入量的 HfLaO 薄膜的光学常数和厚度. 由表 1 可见, 当 $\lambda=632.8\text{nm}$ 时, 沉积态 HfO₂ 薄膜的折射率为 1.76, 经 800℃ 处理后, HfO₂ 薄膜折射率增加到 1.94, 比 HfO₂ 体材料的折射率($n=2.1$)低, 但与 Tan 等^[9]利用射频磁控溅射法和 Das 等^[10]利用电子束蒸发法制备的 HfO₂ 薄膜接近. 沉积态 HfLaO 薄膜的折射率 n 介于 1.77~1.87 之间, 高于 HfO₂ 薄膜的折射率, 不同 La 掺入量的 HfLaO 薄膜的折射率呈先增后降的变化趋势. 薄膜折射率与结构致密性密切相关, 高的折射率对应于更加致密的膜层. 由于沉积态 HfO₂ 薄膜经常呈现疏松的柱状结构, 薄膜折射率

较低, 而在 HfLaO 复合薄膜中掺入适量的 La 会使疏松的柱状结构得到一定程度的改善, 提高薄膜的结晶度, 从而提高薄膜折射率. 当 La 掺入量较大时, 由于 La₂O₃ 的折射率低于 HfO₂, 使 HfLaO 复合薄膜折射率降低.

通过薄膜透射率 T 和薄膜厚度 d 测量, 由 $\alpha=-\ln(T)/d$ 可得薄膜的吸收系数. 根据能带理论, 吸收系数与光子能量的关系为 $\alpha \propto (h\nu - E_g)^k$, 其中 $h\nu$ 为光子能量, E_g 为光学带隙宽度, 允许的直接跃迁或间接跃迁 k 分别为 0.5 或 2. 相关研究表明^[11-12]: HfO₂ 为直接光学跃迁. 图 6 为 HfLaO 薄膜 $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ 的关系曲线. 本试验研究中 k 为 0.5, 使用线性拟合, 在横坐标轴(代表着光子能量)上获得的截距为 E_g , 所得不同 La 掺入量的 HfLaO 薄膜的 E_g 见表 1. 可见, 随着 La 掺入量的增加, HfLaO 薄膜的 E_g 逐渐降低. 分析认为, HfLaO(La: 0~37%)薄膜的光学带隙宽度差异可能与薄膜缺陷及无序化程度有关, 随着薄膜中 La 掺入量的增加, 薄膜中的氧空位等缺陷增加, 薄膜无序化程度提高, 在其能带结构产生定域态, 从而导致带隙宽度降低.

表 1 不同含量 La 掺入 HfLaO 薄膜的光学性能
 Table 1 Optical properties of HfLaO films with different La content

La content	Refractive index, n_{633}	Extinction coefficient, $k_{633} \times 10^{-3}$	Film thickness / nm	Optical band gap, E_g/eV
HfO ₂	1.76	4.46	236	5.96
17%La-HfLaO	1.80	2.98	319	5.90
25%La-HfLaO	1.87	8.23	358	5.87
33%La-HfLaO	1.81	4.12	447	5.80
37%La-HfLaO	1.77	0.44	506	5.77

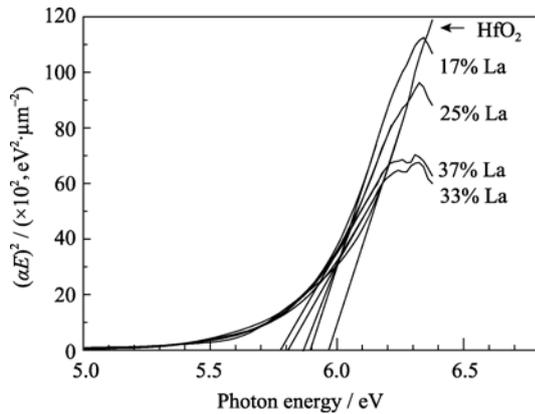


图 6 HfLaO 薄膜 $(\alpha h\nu)^2-h\nu$ 的关系曲线

Fig. 6 $(\alpha h\nu)^2-h\nu$ curves of HfLaO films with different La contents

3 结论

1) HfO₂ 薄膜为单斜相 m-HfO₂. 薄膜中 La 掺入量为 17% 时, 生成具有萤石结构立方相 c-LaHfO_x. 不同 La 含量的 HfLaO (La: 25%~37%) 薄膜均为非晶态, 随着 La 掺入量 (25%, 33%, 37%) 的增加, HfLaO 薄膜的结晶化温度分别为 800°C、850°C、900°C.

2) 随着 La 掺入量的增加, 非晶态 HfLaO 薄膜表面岛尺寸明显减小, 岛密度增大, 表面粗糙度逐渐降低, La 掺入量为 37% 时表面粗糙度 RMS 仅为 0.7nm.

3) 随着 La 掺入量的增加, HfLaO 薄膜透射率呈现先降低后增加的现象, 在可见光范围薄膜均保持较高的透射率 (82% 以上).

4) 随着 La 掺入量的增加, HfLaO 薄膜的 E_g 逐渐降低, 其 E_g 值分别为 5.9eV (La~17%), 5.87eV (La~25%), 5.8eV (La~33%) 和 5.77eV (La~37%).

参考文献:

- [1] Sayan S, Aravamudhan S, Busch B W, *et al.* Chemical vapor deposition of HfO₂ films on Si(100). *J. Vac. Sci. Technol.*, 2002, **A20**(2): 507-512.
- [2] Aygun G, Yildiz I. Interfacial and structural properties of sputtered HfO₂ layers. *J. Appl. Phys.*, 2009, **106**(1): 014312-1-7.
- [3] Cisneros-Morales M C, Aita C R. The effect of nanocrystalline size in monoclinic HfO₂ films on lattice expansion and near edge optical absorption. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **96**(19): 191904-1-3.
- [4] Wu Y H, Yang M Y, Chin Albert, *et al.* Electrical characteristics of high quality La₂O₃ gate dielectric with equivalent oxide thickness of 5 Å. *IEEE Electron Device Lett.*, 2000, **21**(7): 341-343.
- [5] He W, Zhang L, Chan D S H, *et al.* Cubic structured HfO₂ with optimized doping of lanthanum for higher dielectric constant. *IEEE Electron Device Lett.*, 2009, **30**(6): 623-625.
- [6] Yamamoto Y, Kita K, Kyuno K, *et al.* Structural and electrical properties of HfLaO_x films for an amorphous high *k* gate insulator. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(3): 032903-1-3.
- [7] Wang X P, Li M F, Chin Albert, *et al.* Physical and electrical characteristics of high *k* gate dielectric Hf_{1-x}La_xO_y. *Solid State Electronics*, 2006, **50**(6): 986-991.
- [8] Huang L Y, Li A D, Zhang W Q, *et al.* Fabrication and characterization of La doped HfO₂ gate dielectrics by metal organic chemical vapor deposition. *Appl. Surf. Sci.*, 2010, **256**(8): 2496-2499.
- [9] Tan T T, Liu Z T, Lu H C, *et al.* Structure and optical properties of HfO₂ thin films on silicon after rapid thermal annealing. *Optical Materials*, 2010, **32**(3): 432-435.
- [10] Das N C, Sahoo N K, Bhattacharyya D, *et al.* Correlation between local structure and refractive index of e-beam evaporated (HfO₂-SiO₂) composite thin films. *J. Appl. Phys.*, 2010, **108**(2): 023515-1-5.
- [11] Khoshman J M, Kordesch M E. Optical properties of a-HfO₂ thin films. *Surf. Coat. Technol.*, 2006, **201**(6): 3530-3535.
- [12] Xiong Y H, Tu H L, Du J, *et al.* Band structure and electrical properties of Gd-doped HfO₂ high *k* gate dielectric. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **97**(1): 012901-1-3.