

显微拉曼光谱在 VO₂ 卷曲管状微腔应变特性研究中的应用

吴斌民¹, 王金龙¹, 刘园园¹, 黄高山¹, 梅永丰¹

(1.复旦大学材料科学系, 上海 200438)

摘要: 我们通过卷曲纳米薄膜技术与芯片制造方法相结合, 将 VO₂ 平面纳米薄膜卷曲为具有三维几何结构的管状微腔。我们通过多波长激发光源的显微拉曼光谱仪实现对 VO₂ 卷曲管状微腔的应变状态的分析。

关键词: 拉曼光谱; 卷曲管状微腔; VO₂; 应变

中图分类号: N33

文献标识码:

Application of micro-Raman spectroscopy in the study of strain of rolled-up VO₂ tubular microcavity

Wu Bingming¹, Wang Jinlong¹, Liu Yuanyuan¹, Hang Gaoshan¹, Mei Yongfeng¹

(1. Department of Materials Science, Fudan University, Shanghai 200438, China)

Abstract: We have rolled VO₂ nanomembrane into tubular microcavity with three-dimensional geometries by combining rolled-up technology with chip fabrication methods. We realize the analysis of the strain state of the VO₂ rolled-up tubular microcavities by micro-Raman spectroscopy with a multiwavelength excitation light source.

Keywords: Raman spectroscopy; rolled-up tubular microcavity; VO₂; strain

1 引言

二氧化钒(VO₂)是一种具有相变性质的金属氧化物,形态可在绝缘体和金属之间转换,在室温下表现为绝缘体,在 68 摄氏度以上则表现为金属导体^[1]。相变前后结构的变化导致对红外光由透射向反射的可逆转变^[2],根据这一特性我们将其应用于制备红外光电探测器。红外光电探测器应用于我们的日常生活中,如环境监测和地质灾害中的个人搜救^[3]。然而其结构复杂、非便携、信号响应弱等问题限制了其广泛应用。我们通过卷曲纳米薄膜技术与芯片制造方法相结合,将特定的 VO₂ 平面纳米薄膜转化为具有三维几何结构的管状微腔,在提升器件性能上具有重要的意义。我们通过拉曼光谱对 VO₂ 卷曲管状微腔的应变特性进行

了分析研究。

2 实验部分

VO_2 纳米薄膜的生长和 VO_2 管状微腔的制备：用丙酮和去离子水清洗覆盖有 500 nm SiO_2 的 4 英寸硅基板。采用磁控溅射法在硅衬底上溅射 VO_2 纳米薄膜，溅射时间为 700 s，溅射温度为 500 °C，氩氧比为 36:60，溅射功率为 200 W。通过光刻法制备电极，并通过电子束蒸发沉积 Cr。蚀刻窗口通过 RIE 蚀刻 100 s，最终在 10% 氢氟酸溶液中释放 VO_2 纳米薄膜。应变驱动下，纳米薄膜自卷曲构成管状微腔结构。

显微拉曼光谱测试在显微共聚焦拉曼光谱仪（雷尼绍，inVa）上进行，激发波长为 473 和 633 nm，激光功率 1%，曝光时间为 1 s，扫描范围 100 cm^{-1} - 800 cm^{-1} 。

3 结果展示

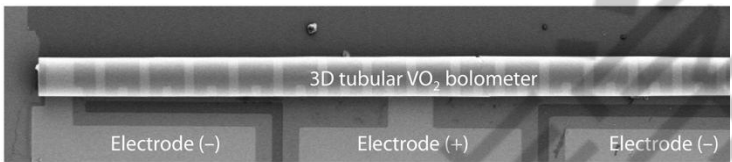


图 1 单个 VO_2 管状微腔的 SEM 图

图 1 为通过卷曲纳米薄膜技术与芯片制造方法相结合，制备的具有三维几何结构的 VO_2 卷曲管状微腔。管状微腔结构应用于红外光电探测器中可改善隔热性，增强光吸收，并实现偏振灵敏度和全向光检测。

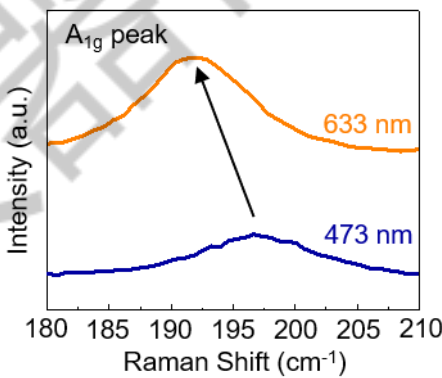


图 2 由 633 和 473nm 波长的激光激发的 VO_2 管状微腔的拉曼光谱

从不同激发波长的拉曼光谱检测结果可以看出，随着拉曼激发波长的增加， VO_2 的特征峰表现出红移，表明压缩应变被引入到 VO_2 纳米薄膜中。 VO_2 纳米薄膜的内部应变是微管自卷曲的主要因素，我们通过显微拉曼光谱分析 VO_2 纳米薄膜的应变。对于其 A_{1g} 特征峰位

置偏移归可因于 V-V 晶格运动的低频声子 (ω_{V1}), 它们比其他声子对于应变的变化更为敏感。压缩应变引起的 ω_{V1} 声子的位移可以由以下公式拟合:

$$\Delta\omega_{\text{alloy}} = \frac{1}{2\omega_0} (p+2q) \times \varepsilon$$

其中 ε 是 VO_2 中的应变分布, ω_0 表示未应变 VO_2 的拉曼平移, $(p+2q)$ 为系数。基于 189 cm^{-1} 附近的拉曼峰移, 计算出卷曲管状结构中 VO_2 纳米薄膜的压缩应变为 0.51%。该计算结果为后续实验研究 VO_2 纳米薄膜的应变状态和理化特性提供了理论依据。

4 结论

利用多波长激发光源的显微共聚焦拉曼光谱仪实现对 VO_2 卷曲管状微腔的拉曼检测。基于对 VO_2 纳米薄膜的多波长激发拉曼峰位的偏移计算, 可以得到 VO_2 纳米薄膜上的压缩应变为 0.51%。拉曼光谱可以助力类似三维微纳结构的表征与性能研究。

参考文献:

- [1]Cheng S, Lee M, Tran R, et al, Inherent stochasticity during insulator-metal transition in VO_2 [J]. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2021, 118, e2105895118.
- [2]Liu K, Lee S, Yang S, et al, Recent progresses on physics and applications of vanadium dioxide[J]. Mater. Today 2018, 21, 875-896.
- [3]Siciliani M, Viciani S, Borri S, et al, Widely-tunable mid-infrared fiber-coupled quartz-enhanced photoacoustic sensor for environmental monitoring[J]. Opt. Express 2014, 22, 28222-28231.