

# W 离子注入 VO<sub>2</sub> 薄膜结构及红外发射性能研究\*

李仁莹<sup>1)</sup> 刘霖<sup>1)</sup> 李锦潇<sup>1)</sup> 吴蕾<sup>1)</sup> 吴晓玲<sup>1,2)</sup> 郑瑞廷<sup>1,2)</sup> 程国安<sup>1,2)†</sup>

(1)北京师范大学核科学与技术学院, 100875, 北京; (2)北京市辐射中心, 100875, 北京)

**摘要** 探讨了低剂量离子注入技术对 VO<sub>2</sub> 薄膜的结构和红外发射性能的影响, 发现  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  注量的 W 离子注入掺杂时, 会对 VO<sub>2</sub> 薄膜的晶体结构产生一定的损伤; 经 400 °C 退火处理后部分恢复了薄膜的单斜相晶体结构, 且退火处理后, 在掺杂 W 离子、结构缺陷和氧空位的共同作用下, 掺杂量 0.12% 即可使 VO<sub>2</sub> 薄膜的相变温度降低 8.9 °C; 掺杂原子数量每增加 1%, 其相变温度相应变化 74.2 °C; W 离子注入并经退火处理后, VO<sub>2</sub> 薄膜的红外发射率为 0.35 ~ 0.46, 其在低温区间的红外发射率相比未注入薄膜降低了 0.14, 这大幅度提高了 VO<sub>2</sub> 薄膜在低温区的红外隐身性能。

**关键词** 二氧化钒; 离子注入; 钨; 红外辐射

**中图分类号** TB34; TB43

**DOI:** 10.12202/j.0476-0301.2022101

## 0 引言

二氧化钒(VO<sub>2</sub>)作为一种典型的金属绝缘体相变材料<sup>[1]</sup>, 鉴于其相变前后电阻和红外发射率的变化, 使得在光谱学<sup>[2]</sup>、传感器<sup>[3-4]</sup>、开关器件<sup>[5-6]</sup>、智能窗<sup>[7-8]</sup>、红外辐射调控<sup>[9-10]</sup>等方面有着广泛的应用前景. 红外热辐射不仅与物体表面温度成正比, 而且与物体的热辐射发射率( $\epsilon$ )成正比<sup>[11]</sup>. 红外摄像机是在 7~14  $\mu\text{m}$  的波长范围内感知热辐射, 能够探测表面温度升高的物体<sup>[12]</sup>. VO<sub>2</sub> 相变过程中红外发射率的降低使其能够实现一定程度的红外隐身<sup>[13-14]</sup>. 然而 68 °C 的相变温度限制了 VO<sub>2</sub> 在低温范围内的应用, 因此降低其相变温度与低温区红外发射率一直是国内外的研究热点. 离子注入技术作为一种高效的掺杂技术, 其优势在于注入的杂质不受靶材料溶解度的限制, 各种元素均可以进行掺杂<sup>[15-16]</sup>. 同时, 通过离子注入计算, 能够得到离子注入的浓度分布和投影射程; 通过设计不同加速电压和注量, 能够实现对掺杂杂质浓度和深度的精确控制. 例如, Jin 等<sup>[17]</sup> 利用离子注入的方法将 W 离子注入 VO<sub>2</sub> 薄膜中, 实现了热致变色的调控.

本文利用离子注入技术对制备在 SiO<sub>2</sub>/Si 衬底上的单斜结构的 VO<sub>2</sub> 薄膜进行低剂量 W 离子注入掺杂, 并对注入后的薄膜进行退火处理, 探讨了 W 离子注入对 VO<sub>2</sub> 薄膜电阻、表面红外温度及红外发射率的影响, 以实现大幅度降低薄膜的相变温度和显著提高对红外辐射的调控能力的目的.

## 1 制备与表征

**1.1 制备样品** 制备 VO<sub>2</sub> 薄膜: 利用射频磁控溅射方法, 在有 50~60 nm 热氧化层的 SiO<sub>2</sub>/Si 衬底上制备并获得 VO<sub>2</sub> 薄膜. 沉积过程使用金属 V 靶(纯度为 99.9%), 衬底温度为 630 °C;  $Q(\text{Ar}) : Q(\text{O}_2) = 49 : 1$  ( $Q$  为流量, 单位:  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ );  $P_{\text{at}} = 0.5 \text{ Pa}$ ,  $P_{\text{at}}$  为工程大气压; 沉积  $t = 2 \text{ h}$ . W 离子注入所使用的是北京师范大学自制的 FM2000 型纳米多层膜沉积注入复合机, 离子源为 W 金属蒸气真空弧离子源(MEVVA 源)<sup>[18]</sup>. 注入过程中离子的加速电压为 60 kV, 注量为  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ . 薄膜退火: 薄膜的退火是在真空气氛管式炉中进行的, 退火温度为 400 °C; N<sub>2</sub> 作保护气,  $Q(\text{N}_2) = 0.83 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ; 退火  $t = 2 \text{ h}$ .

**1.2 结构与性能表征** 分别利用电子显微镜(SEM, HITACHI S-4800, 10~20 kV) 和原位共聚焦拉曼显微镜(Raman, renishaw in via reflex)对薄膜的形貌厚度和结构进行表征; 在配有半导体加热冷却 Keithley DMM6500 与万用表的四探针测量平台测量了薄膜的电学性能. 平台升降温速率为  $18 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ , 样品尺寸为  $1.5 \text{ mm} \times 3.0 \text{ mm}$ , 电极距离和宽度均为 1.5 mm, 测量时间间隔为 2 s. 红外辐射测量系统搭建在四探针平台上, 通过四探针测量系统的半导体加热/冷却平台实现对样品的加热冷却; 测试温度为 40.0~80.0 °C; 测量中所使用的参比涂层是将发射率为 0.86 的涂料旋涂在单晶 Si 片上, 并烘干 24 h 后得到.

\* 国家自然科学基金资助项目(12175020, 11575025, U1832176)

† 通信作者: 程国安(1963—), 男, 教授. 研究方向: 纳米材料与技术. E-mail: gacheng@bnu.edu.cn

收稿日期: 2022-04-22

**1.3 SRIM 计算** 利用 SRIM 软件<sup>[19]</sup> 模拟计算注入离子在薄膜中的投影射程( $R_p$ )和溅射系数( $Y$ )等。

## 2 结果与讨论

**2.1 计算结果** MEVVA 源产生的 W 离子束是多价态离子的混合, 其中+1、+2、+3、+4、+5 价占比分别为 1%、17%、35%、5% 和 12%<sup>[15]</sup>, 按照其比例计算 99 999 个注入离子的浓度分布(图 1)

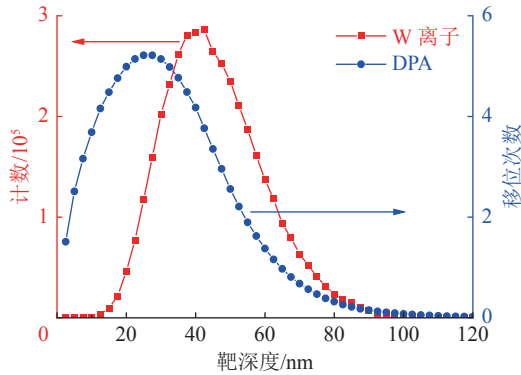


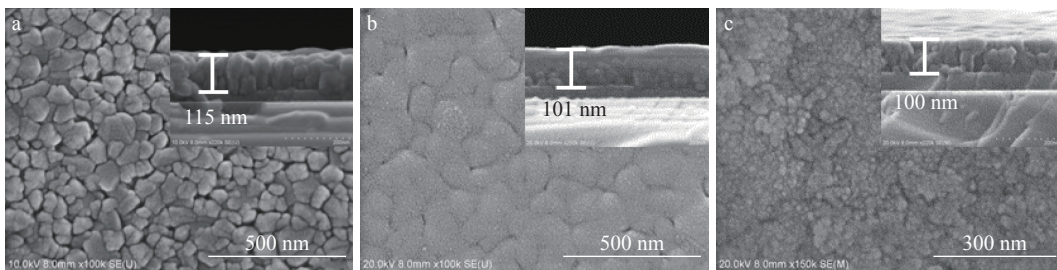
图 1 加速电压为 60 kV 时注入到 VO<sub>2</sub> 薄膜中的 W 离子以及薄膜中的离位原子分布

由模拟结果可知: W 离子注入 VO<sub>2</sub> 薄膜的  $R_p$  平均为 44.3 nm; 射程标准偏差  $\Delta R_p = 14.5$  nm; 溅射系数  $Y = 6.177$ ; 每个 W 离子注入到 VO<sub>2</sub> 薄膜中平均引起的离位原子数为 2 417. 有学者<sup>[15]</sup> 考虑了溅射效应的掺杂浓度分布公式计算得到 W 离子以  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  注量

注入到 VO<sub>2</sub> 薄膜, 在注入区离子的平均掺杂占比为 0.12%. 注入的 W 离子导致薄膜的原子平均移位次数 (displacements per atoms, DPA) 为 4.46, 其峰值 DPA 达到 5.49, 表明 W 离子的注入对薄膜结构会造成十分严重的损伤。

**2.2 薄膜结构** W 离子的注入引发了级联碰撞和能量传递, 形成大量的离位原子, 使 VO<sub>2</sub> 薄膜晶体结构有一定损伤(图 2)。

由图 2-a 可知, 未注入 W 离子的 VO<sub>2</sub> 薄膜厚度约为 115 nm, 晶粒尺寸均匀, 平均晶粒大小约 59 nm, 晶粒密集堆积. 由图 2-b 可知, 注入 W 离子后, VO<sub>2</sub> 薄膜表面晶粒边缘逐渐模糊, 只能隐约看到晶粒边界的存在; 较小的晶粒在离子注入的过程中逐渐与周围的晶粒融合在一起, 使颗粒的尺寸达到 129 nm 左右, 且薄膜的厚度减小到约 101 nm; 在 SiO<sub>2</sub> 氧化层上方还有部分晶粒保持原始 VO<sub>2</sub> 薄膜的晶粒形态, 其微观结构没有受到较大的损伤. 这是由于在 W 离子注入掺杂过程中, 注入离子和反冲原子在注入区造成了结构损伤, 形成明显的结构损伤层. 而薄膜底部受到 W 离子注入产生的损伤很小, 因而没有观察到明显的结构损伤. 由图 2-c 可知, 经 400 °C 退火处理后, 薄膜表面晶粒有明显的重结晶现象, 形成的晶粒尺寸约为 14 nm; 从截面 SEM 照片可看到明显的晶粒形态, 薄膜的厚度为 100 nm 左右。



a. 未注入 W 离子; b. 注入 W 离子; c. 注入 W 离子并进行 400 °C 退火处理.

图 2 W 离子注入及退火处理前后 VO<sub>2</sub> 薄膜表面和截面的 SEM 照片

为了分析 W 离子注入并进行退火处理前后 VO<sub>2</sub> 薄膜的结构, 对其进行了拉曼散射谱的测量(图 3)。

由图 3 可知: 未注入 W 离子的 VO<sub>2</sub> 薄膜在 137、194(Ag)、224(Ag)、262(Bg)、309(Ag/Bg)、338(Bg/Ag)、389(Ag)、440(Bg)、498(Ag) 和 617(Ag)  $\text{cm}^{-1}$  附近有明显的散射峰, 这些散射峰的峰位和峰强对应于单斜相结构的 VO<sub>2</sub><sup>[20]</sup>; 位于 520  $\text{cm}^{-1}$  的散射峰对应的是硅的散射峰; W 离子注入掺杂后的薄膜在 194、226 和 618  $\text{cm}^{-1}$  附近存在强度较弱的散射峰, 这些散射峰均为具有单斜相结构的 VO<sub>2</sub> 对应的散射峰, 说明此时薄

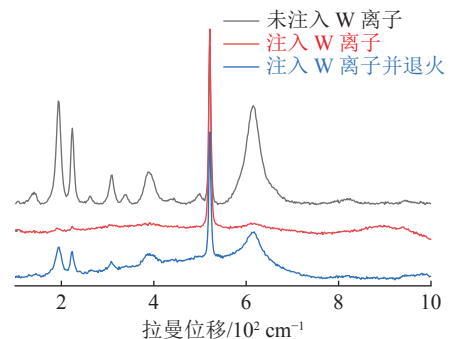
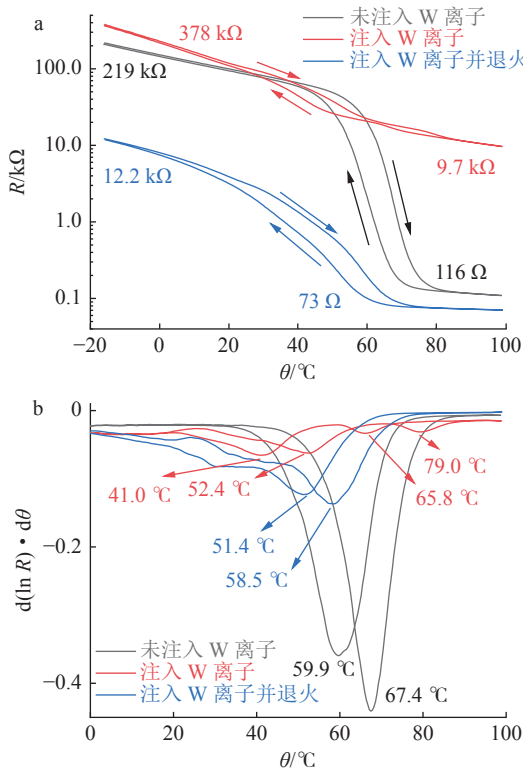


图 3 注入 W 离子并进行退火处理前后 VO<sub>2</sub> 薄膜的拉曼散射谱

膜中还有部分晶粒保持了单斜相晶体结构;退火处理后属于单斜相结构的  $\text{VO}_2$  所对应的拉曼散射峰强度有明显增加,但其峰强与未注入 W 离子薄膜的拉曼散射峰强有明显差距. 同时在退火处理后的散射谱中还可看到较高的背底,这表明虽然退火处理使得薄膜的晶体结构有一定恢复,但是注入 W 离子对薄膜晶体结构产生的损伤并没有完全恢复,使其拉曼散射谱具有较高的背底.

**2.3 电学性能** 薄膜的结构变化会引起其相变性能的变化(图 4).



a. 未注入、注入 W 离子掺杂并进行退火处理后的  $\text{VO}_2$  薄膜; b. 与 a 对应的  $\ln R-\theta$  微分曲线.

**图 4 注入 W 离子掺杂并进行 400 °C 退火处理前后  $\text{VO}_2$  薄膜的电阻温度变化曲线**

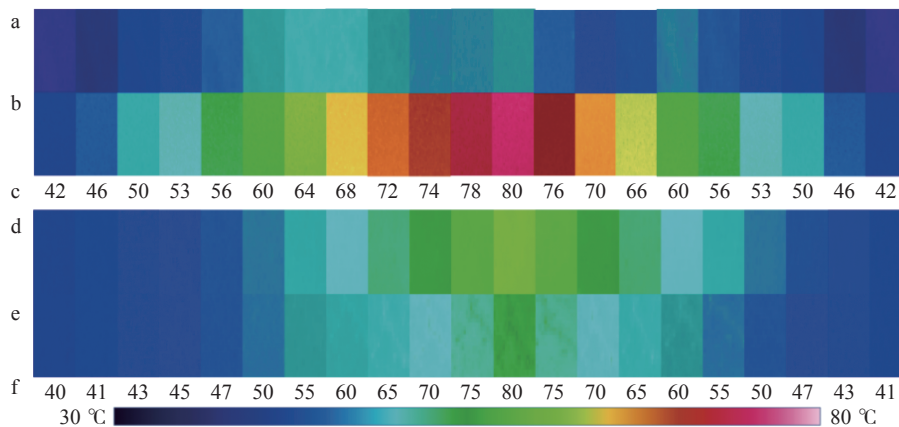
由图 4 可知:未注入的薄膜具有很好的电阻温度变化特性,升降温过程对应的相变温度分别为 67.4 和 59.9 °C,滞后宽度为 7.5 °C;低温和高温时薄膜的电阻分别为 219.0 和 116.0  $\Omega$ ,电阻变化超过 3 个数量级.

根据电阻随温度变化的 Arrhenius 计算式:  $\ln R = b + E_a/(k_B\theta)$ , 其中  $R$ 、 $\theta$ 、 $E_a$ 、 $k_B$  和  $b$  分别是电阻、温度、电子活化能、玻耳兹曼常数和截距<sup>[21-22]</sup>, 可得其绝缘态的  $E_a = 148.1$  meV, 金属导电态的  $E_a = 88.2$  meV. 注入 W 离子后薄膜的电阻随温度的变化明显看到 2 个转变过程:升温过程对应的相变温度分别是 52.4 和 79.0 °C, 降温过程的相变温度分别是 41.0 和 65.8 °C; 其低温和高温时的电阻分别为 378.0 和 5.5 kΩ.

经退火处理后, W 离子注入掺杂的薄膜相变特性有了明显的变化,其升温过程中的相变温度为 58.5 °C, 比未注入 W 离子的薄膜降低了 8.9 °C; 相变温度的滞后宽度为 7.1 °C, 与未注入 W 离子的薄膜的滞后宽度相近. 退火处理后的薄膜在低温和高温时的电阻分别为 12.2 kΩ 和 73.0  $\Omega$ , 电阻变化超过 2 个数量级; 其绝缘态和金属导电态的  $E_a$  分别为 176.8、34.9 meV. 由这些结果可知, 退火处理能够明显减小 W 离子的注入对  $\text{VO}_2$  薄膜晶体结构的损伤, 同时注入掺杂的 W 离子、注入所产生的结构损伤以及氧空位共同作用, 使薄膜的相变温度大幅度下降.

**2.4 红外辐射性能** W 离子注入掺杂到  $\text{VO}_2$  薄膜中, 引起  $\text{VO}_2$  薄膜的结构变化, 同样会引起不同温度下其红外辐射性能的变化(图 5).

由图 5-a、b 和 c 可知:在加热冷却过程中, 参比涂层的颜色先变亮后变暗, 表明其表面红外显示温度随加热台温度的升高而升高, 随加热台温度的降低而降低; 由于热传导和表面散热作用, 测量所得红外显示温度略低于加热台温度; 未注入 W 离子的  $\text{VO}_2$  薄膜



a. 未注入 W 离子; b. 参比涂层; c. 与 a、b 对应的加热台; d. 注入 W 离子; e. 注入 W 离子并退火; f. 与 d、e 对应的加热台.

**图 5 升降温过程经不同处理的  $\text{VO}_2$  薄膜表面红外颜色和红外显示温度以及对应的加热台温度**

随着加热台温度的升高,其颜色变亮后又逐渐变暗,而后又变亮,表明其表面红外显示温度随着加热台温度的升高呈现N形转折与变化;在加热台降温过程中,VO<sub>2</sub>薄膜的颜色先变暗,而后变亮,最后又逐渐变暗,其表面显示温度也是N形的转折与变化.图5-d中,随着加热台温度的升高而逐渐变亮,随着加热台温度的降低而逐渐变暗,表明注入W离子后的薄膜表面显示温度不再有N形转折与变化.图5-e中,其随着加热台温度的升高而逐渐变亮,随着加热台温度的降低而逐渐变暗,同样不具有明显的转折与变化.

将在加热台升降温过程中测量获得的参比涂层、未注入W离子、注入W离子并进行退火处理后的薄膜表面红外显示温度随加热台温度的变化绘成曲线,如图6所示.

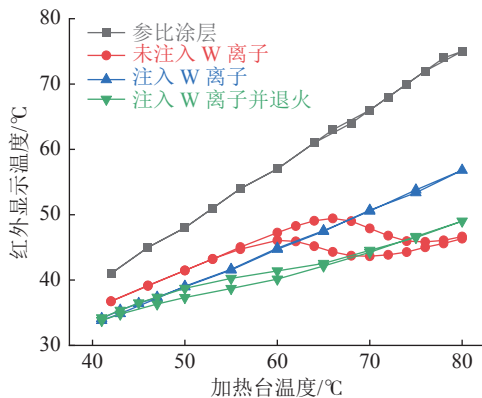


图6 4种红外显示温度随加热台温度的变化曲线

从图6可以看出,参比涂层的表面红外显示温度随加热台温度的升高而逐渐升高,呈线性变化关系;未注入W离子的薄膜随着加热台温度的升高,其表面红外显示温度为42.0~68.0 °C时逐渐升高,最高温度达到49.0 °C;在68.0~78.0 °C时,其逐渐降低到44.0 °C;在78.0~80.0 °C时又逐渐升高;在降温过程中则是先降低后升高,而后又逐渐降低.在整个升降温过程中VO<sub>2</sub>薄膜表面红外显示温度呈现迟滞回线的变化模式.这是由于VO<sub>2</sub>薄膜在升降温过程中发生相变导致了其红外发射发生变化,使其表面显示温度出现异常拐点.在整个测量温度范围内,VO<sub>2</sub>薄膜表面红外显示温度比参比涂层的低,最大温度差异达到28.0 °C.

注入W离子的薄膜表面红外显示温度随着加热台温度升高而逐渐升高,随着加热台温度降低而逐渐降低,大概呈线性变化关系,没有明显观察到由于VO<sub>2</sub>相变引起的表面红外显示温度突变.这是由于W离子注入使得VO<sub>2</sub>薄膜的晶体结构受到破坏,不再具有明显相变特征.温度<65.0 °C时注入W离子的薄膜表面红外显示温度始终低于未注入的薄膜的

表面显示温度,实现了对低温段红外辐射的降低.经退火处理后的薄膜表面显示温度同样随加热台温度的升高而逐渐升高,随加热台温度的降低而逐渐下降;其表面显示温度<68.0 °C时有明显类似迟滞回线的变化模式.这是由于退火处理使得薄膜的晶体结构有一定程度的恢复,在温度场的作用下发生相变,使其表面显示温度发生变化;在40.0~68.0 °C时,退火处理后的薄膜表面显示温度低于未注入和注入W离子后的薄膜,在测量范围内始终低于参比涂层的表面显示温度,其最大温差达26.0 °C,这表明退火处理能够有效地提高薄膜对红外显示温度的调控能力.

红外测量的薄膜表面所显示的温度变化,其实质是红外发射率的变化.通过红外相机测量可以得到不同处理后的薄膜的红外发射率(图7).

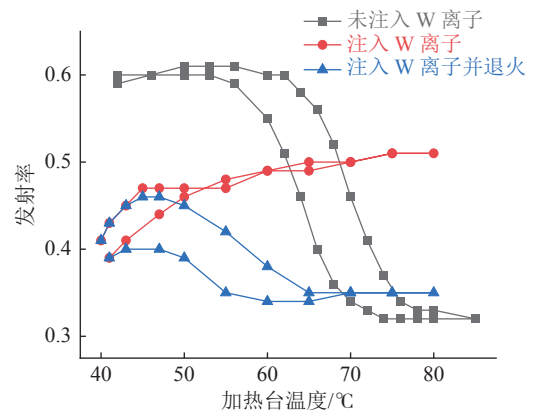


图7 未注入、注入W离子的VO<sub>2</sub>薄膜以及经400 °C退火处理后其红外发射率随温度变化的曲线

由图7可知,升温过程在42.0~68.0 °C时,未注入W离子的薄膜的红外发射率在0.60左右保持不变,这一阶段所对应的薄膜具有单斜相结构;在78.0~85.0 °C时,其红外发射率 $\approx$ 0.33,对应的薄膜具有金红石相结构;在60.0~78.0 °C时,红外发射率随加热台温度升高而逐渐降低.降温过程中,在85.0~74.0 °C时,其红外发射率 $\approx$ 0.32;56.0~40.0 °C时,红外发射率 $\approx$ 0.59;74.0~56.0 °C时,红外发射率随温度降低而逐渐升高.通过微分计算得到升温和降温过程中未注入W离子的薄膜红外发射率的变化率分别在70.0和56.0 °C时呈现极值点,其滞后宽度为14.0 °C;其转变温度与电阻温度曲线计算出的相变温度相近.

注入W离子的薄膜红外发射率随着加热台温度的升高在初始时快速增加,然后增加速率逐渐平缓,其红外发射率趋近稳定.降温过程中,在80.0~50.0 °C时其红外发射率与升温时的发射率基本重合;50.0~40.0 °C时,红外发射率变化曲线不重合,表明在该温度范围内薄膜中有残余单斜相晶粒发生相变,其结构

变化使其红外发射率出现滞后现象。

经退火处理后的薄膜红外发射率在加热过程中经历了如下 3 个阶段: 1) 在 40.0~47.0 °C 时, 随着温度的升高其红外发射率逐渐增大, 在 47 °C 温度时达到最大, 为 0.46; 2) 在 47.0~65.0 °C 时又逐渐降低; 3) 在 65.0~80.0 °C 时基本保持恒定的 0.35。降温过程中, 在 80.0~55.0 °C 时红外发射率基本保持恒定的 0.35; 在 55.0~47.0 °C 时逐渐升高; 在 47.0~41.0 °C 时又略有降低。红外发射率随温度变化率的极值点所对应的温度分别为 60.0 和 50.0 °C, 相比未注入 W 离子的薄膜, 分别低 10.0 和 6.0 °C, 并与薄膜的电阻温度变化中计算所得到的相变温度相近。这表明退火处理能够有效地消除 VO<sub>2</sub> 薄膜中由于 W 离子的注入引入的大部分辐照损伤, 同时由于注入引入的 W 离子掺杂和残余的部分结构损伤以及氧空位共同作用, 大幅度降低薄膜的相变温度和低温区的红外发射率, 提高了其对红外温度在低温区的调控能力。

### 3 结语

1×10<sup>15</sup> cm<sup>-2</sup> 注量的 W 离子注入掺杂 VO<sub>2</sub> 薄膜, 其原子掺杂占比为 0.12%。注入掺杂过程中对 VO<sub>2</sub> 薄膜结构产生一定损伤, 经 400 °C 退火处理能够对其损伤有一定程度的恢复。退火处理后, 薄膜的相变温度降低了 8.9 °C。W 离子注入掺杂并经 400 °C 退火处理后的 VO<sub>2</sub> 薄膜红外发射率降到了 0.46~0.35, 相比原始 VO<sub>2</sub> 薄膜, 其在低温区间的红外发射率降低了 0.14, 这大幅提高了 VO<sub>2</sub> 薄膜在低温区的红外隐身性能。

### 4 参考文献

- [1] MORIN F J. Oxides which show a metal-to-insulator transition at the neel temperature[J]. *Physical Review Letters*, 1959, 3(1): 34
- [2] HUANG Z Y, WU Z M, JI C H, et al. Improvement of phase transition properties of magnetron sputtered W-doped VO<sub>2</sub> films by post-annealing approach[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2020, 31(5): 4150
- [3] SHI R, WANG J W, CAI X B, et al. Axially modulation of metal-insulator phase transition of VO<sub>2</sub> nanowires by graded doping engineering for optically readable thermometers[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2017, 121(44): 24877
- [4] STRELCOV E, LILACH Y, KOLMAKOV A. Gas sensor based on metal-insulator transition in VO<sub>2</sub> nanowire thermistor[J]. *Nano Letters*, 2009, 9(6): 2322
- [5] SHUKLA N, THATHACHARY A V, AGRAWAL A, et al. A steep-slope transistor based on abrupt electronic phase transition[J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 1
- [6] LEE D, LEE J, SONG K, et al. Sharpened VO<sub>2</sub> phase transition via controlled release of epitaxial strain[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(9): 5614
- [7] TANG K C, DONG K C, LI J C, et al. Temperature-adaptive radiative coating for all-season household thermal regulation[J]. *Science*, 2021, 374(6574): 1504
- [8] WANG S C, JIANG T Y, MENG Y, et al. Scalable thermochromic smart windows with passive radiative cooling regulation[J]. *Science*, 2021, 374(6574): 1501
- [9] KIM H J, CHOI Y H, LEE D, et al. Enhanced passive thermal stealth properties of VO<sub>2</sub> thin films via gradient W doping[J]. *Applied Surface Science*, 2021, 561: 150056
- [10] LEUNG E M, ESCOBAR M C, STIUBIANU G T, et al. A dynamic thermoregulatory material inspired by squid skin[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1
- [11] HERSCHEL W. Experiments on the refrangibility of the invisible rays of the sun[EB/OL]. (1800-04-24)[2022-04-08]. <https://royalsocietypublishing.org/doi/epdf/10.1098/rstl.1800.0015>
- [12] SALIHOGLU O, UZLU H B, YAKAR O, et al. Graphene-based adaptive thermal camouflage[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(7): 4541
- [13] KATS M A, BLANCHARD R, ZHANG S Y, et al. Vanadium dioxide as a natural disordered metamaterial: perfect thermal emission and large broadband negative differential thermal emittance[J]. *Physical Review X*, 2013, 3(4): 041004
- [14] XIAO L, MA H, LIU J K, et al. Fast adaptive thermal camouflage based on flexible VO<sub>2</sub>/graphene/CNT thin films[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(12): 8365
- [15] 张通和. 离子束材料改性科学和应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999
- [16] 北京市辐射中心. 离子注入原理与技术[M]. 北京: 北京出版社, 1982
- [17] JIN P, NAKAO S, TANEMURA S. Tungsten doping into vanadium dioxide thermochromic films by high-energy ion implantation and thermal annealing[J]. *Thin Solid Films*, 1998, 324(1/2): 151
- [18] BROWN I G. The metal vapor vacuum arc (MEVVA) high current ion source[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1985, 32(5): 1723
- [19] LINDHARD J, NIELSEN V, SCHARFF M, et al. Integral equations governing radiation effects[J]. *Mat Fys Medd Dan Vid Selsk*, 1963, 33(10): 1
- [20] SAKAI J, ZAGHRIQUI M, PHUOC T V, et al. Pulsed laser-deposited VO<sub>2</sub> thin films on Pt layers[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(12): 123503
- [21] KO C, RAMANATHAN S. Observation of electric field-assisted phase transition in thin film vanadium oxide in a

metal-oxide-semiconductor device geometry[J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(25): 252101

[22] YANG Z, KO C, RAMANATHAN S. Metal-insulator

transition characteristics of VO<sub>2</sub> thin films grown on Ge (100) single crystals[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 108(7): 073708

## Structural and infrared-emission properties of W ion-implanted VO<sub>2</sub> films

LI Renying<sup>1)</sup> LIU Lin<sup>1)</sup> LI Jinxiao<sup>1)</sup> WU Lei<sup>1)</sup> WU Xiaoling<sup>1, 2)</sup>  
ZHENG Ruiting<sup>1, 2)</sup> CHENG Guoan<sup>1, 2)</sup>

(1) College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;

2) Beijing Radiation Center, 100875, Beijing, China)

**Abstract** Vanadium dioxide (VO<sub>2</sub>), a typical metal insulator transition material, potentially has wide applications in functional materials due to a change in property before and after phase transition. But such applications are limited by the phase transition temperature of 68.0 °C. In this work, monoclinic VO<sub>2</sub> prepared on SiO<sub>2</sub>/Si substrate was doped with low doses of W ions after ion implantation, before the films were annealed. Crystal structure of VO<sub>2</sub> films was damaged by W ion implantation at  $1 \times 10^{15}$  ions/cm<sup>2</sup>. After annealing at 400 °C, monoclinic crystal structure of the film was partially recovered. After annealing, phase transition temperature of VO<sub>2</sub> thin films decreased by 8.9 °C with doping of 0.12%, the change rate being 74.2 °C. Infrared emissivity was reduced to 0.46-0.35. Infrared emissivity in low temperature region was 0.14 lower than the original VO<sub>2</sub> film. These changes greatly improved infrared stealth performance of the film in low temperature region.

**Keywords** vanadium dioxide; ion implantation; tungsten; infrared emission

【责任编辑: 陆有忠】