材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20260617001

3R-MoS_2/VO_2异质结构的非线性光学开关研究

黄晋豪[1]，李元元[1*]，尹乐天[1]，朱景霖[2]，谢师禹[2]，戚泽明[2]，邹崇文[2]

（1. 南京信息工程大学 电子与信息工程学院，南京 210044；2. 中国科学技术大学 国家同步辐射实验室，合肥 230029）

摘　要： 二维半导体与二氧化钒（VO_2）的异质结构，能够通过VO_2相变调控界面二维半导体的非线性响应，从而实现非线性光学开关，有望为片上可重构非线性光学器件提供新的解决方案。文章针对3R-MoS_2/VO_2异质结构，详细探究了其非线性二次谐波（SHG）的光开关特性。该光学开关表现出明显的3R-MoS_2厚度依赖以及基频光波长依赖特性。在780 nm基频光下，开关比随3R-MoS_2厚度呈现先降后升的趋势，最大开关比约为5；在1 560 nm基频光下，厚度依赖趋势翻转，整体表现为先升后降，最大开关比约为23。这主要归因于VO_2相变对基频与倍频光界面相位叠加过程的调控。该光学开关的研究结果将为基于二维半导体的片上非线性光学器件的设计与制作提供新的解决方案。

关键词： 3R-MoS_2；VO_2；二次谐波；光学开关

中图分类号： TN305；O437　**文章编号：** 1001－5868(2026)05－0925－08

Nonlinear Optical Switching of 3R-MoS_2/VO_2 Heterostructure

HUANG Jinhao[1], LI Yuanyuan[1], YIN Letian[1], ZHU Jinglin[2], XIE Shiyu[2], QI Zeming[2], ZOU Chongwen[2]

(1. School of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, CHN; 2. National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, CHN)

Abstract: Heterostructures composed of two-dimensional (2D) semiconductors and vanadium dioxide (VO_2) can modulate the nonlinear optical response of 2D semiconductors through the phase transition of VO_2. This capability enables nonlinear optical switching and presents opportunities for developing on-chip reconfigurable nonlinear optical devices. In this work, the second harmonic generation (SHG) optical switching characteristics of 3R-MoS_2/VO_2 heterostructures are investigated. The optical switch exhibits a pronounced dependence on the thickness of the 3R-MoS_2 layer and the wavelength of the fundamental excitation light. Specifically, at a fundamental wavelength of 780 nm, the ON/OFF switching ratio first decreases and then increases with increasing 3R-MoS_2 thickness, reaching a maximum of approximately 5. By contrast, at 1 560 nm, the switching ratio first increases and then decreases, reaching a maximum of approximately 23. This behavior is attributed to VO_2 phase-transition-induced modulation of the interfacial phase-superposition process between the fundamental and SHG fields. These findings can inform the design and fabrication of on-chip nonlinear optical devices based on 2D semiconductors.

Key words: 3R-MoS_2; VO_2; second harmonic generation; optical switching

收稿日期：2026－06－24.

基金项目：国家自然科学基金项目(61904082,12235015,12375331).

* **通信作者：**李元元

0 引言

以MoS_2为代表的二维过渡金属硫族化合物因其巨大的二阶非线性极化率和无悬挂键的原子级平整表面，被视为实现片上频率转换、量子光源及全光开关的理想候选材料[1-10]。特别是具有ABC-ABC菱面体堆叠的3R-MoS_2，在任何层数下均保持空间反演对称性破缺，其非线性极化能够沿厚度方向实现体相相干累积，从而克服了常规2H相中奇偶振荡的限制，为通过增加厚度来提升二次谐波转换效率提供了本征材料基础[11-17]。然而，为了适应可重构光学开关器件的需求，目前迫切需要在高效非线性响应的基础上引入动态调控的技术手段。

将二维半导体与相变材料二氧化钒（VO2）集成，是一条极具潜力的技术路线。VO_2能够在约68℃时发生可逆的绝缘体-金属相变，同时带来复折射率在相变前后的剧烈突变[18-23]。这种光学常数的巨大跳变已成功应用于调控二维半导体的光致发光[24-27]以及界面非线性二次谐波（SHG）[28-29]。例如，Hou等利用VO_2的相变实现了单层MoS_2光致发光强度的增强，并将其归因于界面的光学干涉效应[24]。在非线性光学领域，本实验组前期率先利用单层MoS_2/VO_2异质结构实现了二次谐波的光学开关，开关比约为3[28]；近期，进一步在多层InSe中实现了通信波段1 560 nm下的光学开关，开关比可达6[29]。尽管这些工作均成功观察到VO_2相变对界面非线性响应的调控和光学开关，但受限于单一的基频波长和有限的厚度范围，其光学开关的开关比不大，且并未探究不同基频光下异质结构的光学开关与其厚度依赖特性。

本文在构造多种厚度3R-MoS_2/VO_2异质结构的基础上，详细探究了VO_2相变对不同厚度3R-MoS_2二次谐波响应的界面调控和光学开关。通过原位二次谐波光谱的采集分析发现，在780 nm基频光激发下，开关比随厚度呈先降后升趋势，最大开关比约为5；而当以1 560 nm基频光激发时，开关比表现为先升后降趋势，最大开关比约为23。将两个基频光下开关比完全相反的厚度依赖特性归因于VO_2相变对界面二次谐波相位叠加过程的调控，并进一步通过相应理论计算加以证实。该研究结果为调控二维半导体非线性光学特性提供了一种新方法，并为基于二维半导体的非线性光学器件设计提供了新的思路。

1 异质结构的制备与表征

1.1 VO_2薄膜制备与表征

实验采用射频等离子体辅助氧化物分子束外延（RF-OMBE）技术，在Al_2O_3衬底上制备厚度约为100 nm的VO_2外延薄膜[30]。图1为所制备VO_2薄膜的变温电阻曲线，其电阻变化约为三个数量级，相变温度约68℃，且呈现出典型的回滞特性，证实了所制备薄膜具有明显的绝缘体-金属相变特性。

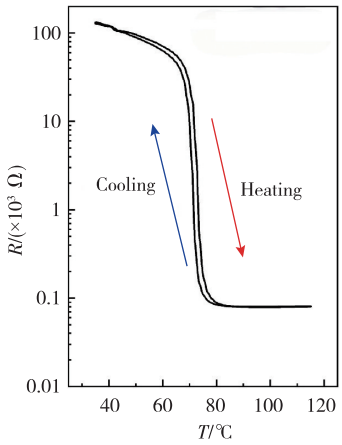
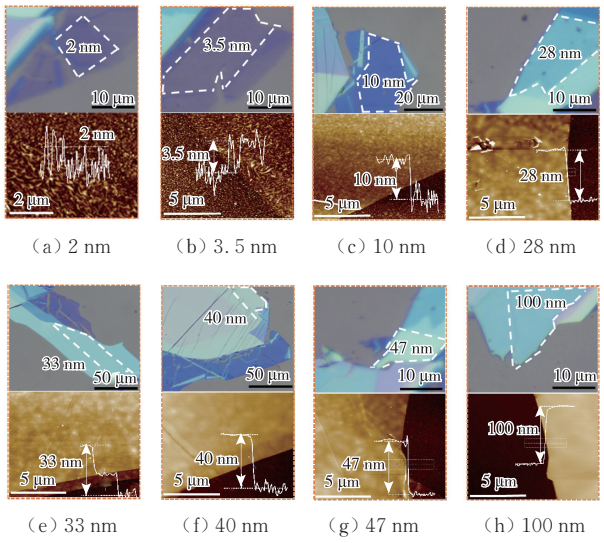


图1 VO_2薄膜的变温电阻曲线

1.2 3R-MoS_2/VO_2异质结构制备与表征

通过机械剥离和干法转移制备了8种厚度的3R-MoS_2/VO_2异质结构样品，如图2所示。



（a）2 nm （b）3.5 nm （c）10 nm （d）28 nm

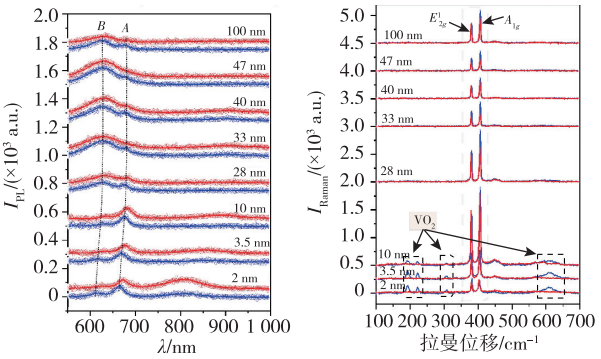
（e）33 nm （f）40 nm （g）47 nm （h）100 nm

图2 3R-MoS_2/VO_2异质结构光学显微与AFM照片

图2上部分为所制备异质结构样品的光学显微图像，样品表面平整，无褶皱或宏观损伤，且样品大小均能够满足测试要求。图2下部分为原子力显微镜（AFM）照片，利用原子力显微镜对8组样品进行

了厚度测定，样品厚度分别约为 2，3.5，10，28，33，40，47 和 100 nm，覆盖了从超薄到近体相的厚度区间。

性能优异的 3R-MoS_2/VO_2的光学开关需要异质结构界面具备高效的耦合，图 3 为所采集的不同厚度异质结构样品的变温光致发光（PL）和拉曼（Raman）光谱。测量使用 532 nm 连续激光作为激发光，功率控制在 1 mW 以下，以避免激光损伤。



（a）PL 光谱　　（b）拉曼光谱

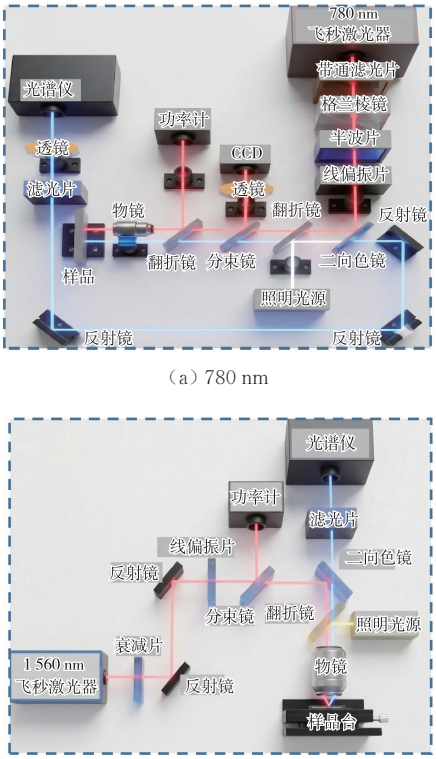
图 3　不同厚度 3R-MoS_2/VO_2异质结构的 PL 和拉曼光谱

图 3(a)为不同厚度样品在相变前后的 PL 光谱，蓝色曲线和红色曲线分别为 VO_2绝缘态和金属态时异质结构的 PL 光谱，且为对比不同厚度的变化，曲线整体做了纵向平移。可以看到，不同厚度 3R-MoS_2的 A 激子和 B 激子发光峰清晰可辨[31-32]，在 VO_2转变为金属态后，薄层样品（2～10 nm）的 A 激子峰位发生明显红移。这一现象与文献[24]中报道的 MoS_2/VO_2体系一致，可归因于 VO_2相变引起的光学干涉效应或界面耦合效应，表明异质结构具有高效的界面耦合。图 3(b)为拉曼光谱，3R-MoS_2的特征层内振动模 E^1_{2g}（≈383 cm^{-1}）和层外振动模 A_{1g}（≈407 cm^{-1}）在相变前后峰位移动不明显但峰强度出现了轻微减弱，表明衬底 VO_2的相变未引入明显的界面应力，但具有光场的调制[33-35]。

2　实验与结果分析

2.1　实验装置

如图 4 所示，实验采用自搭建的反射式微区二次谐波光谱采集装置，其中图(a)和(b)分别对应基频光源 780 nm（脉宽 80 fs，重频 80 MHz）和 1 560 nm（脉宽 60 fs，重频 80 MHz）。基频光经二向色镜反射后，780 nm 光路使用物镜（NA=0.4），1 560 nm 光路使用物镜（NA=0.45）将基频光垂直聚焦至样品表面，背向反射的二次谐波信号由同一物镜收集，经短通滤光片组滤除残余基频光后，由光谱仪收集。



（a）780 nm

（b）1 560 nm

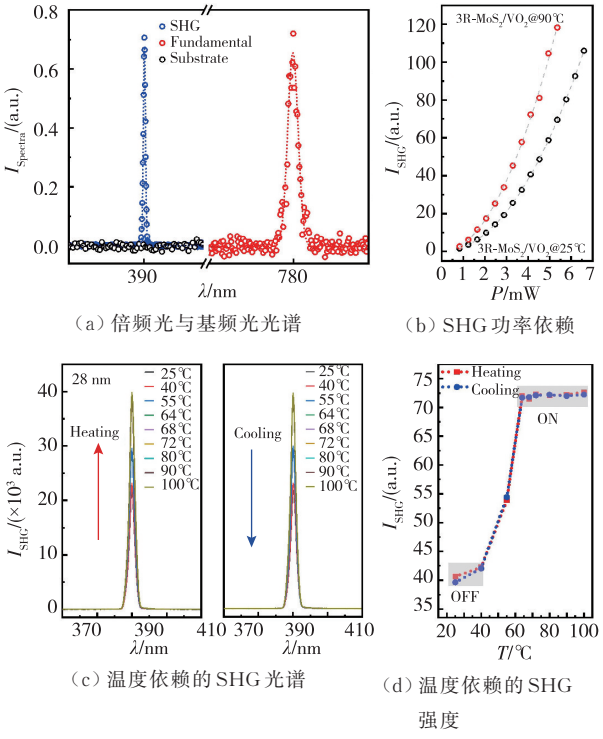
图 4　反射式微区二次谐波光谱采集装置

2.2　实验结果与讨论分析

图 5 为 780 nm 基频光下，28 nm 3R-MoS_2/VO_2异质结构的二次谐波光学开关实验结果。其中，图 5(a)为异质结处所采集二次谐波光谱（蓝色散点），中心峰位位于 390 nm，且 VO_2衬底无信号（黑色散点），证明了所探测到的信号为 3R-MoS_2的二次谐波响应。图 5(b)为 25℃和 90℃时 3R-MoS_2/VO_2异质结构的二次谐波功率依赖关系，两组数据均可通过平方函数很好地拟合（灰色曲线），进一步证实了所采集信号为二阶非线性效应，且当 VO_2处于金属相时，二次谐波强度相对绝缘态明显增强。

将基频光功率固定为 4.12 mW，采集升温和降温过程的二次谐波光谱，如图 5(c)所示，可以明显观察到二次谐波强度在相变温度点附近的急剧变化。为进一步获取温致 VO_2相变对二次谐波响应的开关调制，从图 5(c)中提取 390 nm 处的峰强，获得温度依赖的二次谐波强度曲线，如图 5(d)所示，温度依赖的二次谐波表现为明显的台阶效应。在室温附近（VO_2绝缘态），3R-MoS_2的二次谐波强度

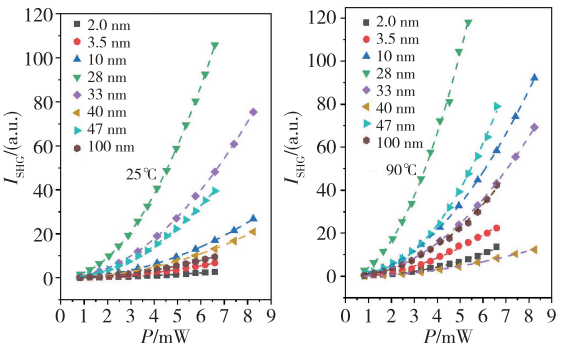
较弱，为“OFF”关闭状态；在高温 VO_2 处于完全金属态时，二次谐波强度保持在较高值，记为“ON”开启状态，开关比约为 1.74，并且这种二次谐波开关具有可逆性。随后，在相同条件下对其他厚度的 3R-MoS_2/VO_2 样品进行光学开关的实验测量。图 6（a）和（b）分别为不同厚度在 VO_2 处于绝缘态和金属态时的二次谐波功率依赖结果，均能很好地用平方函数进行拟合，且二次谐波强度展现出明显的 3R-MoS_2 厚度依赖特性。



（a）倍频光与基频光光谱　（b）SHG 功率依赖

（c）温度依赖的 SHG 光谱　（d）温度依赖的 SHG 强度

图 5　基频光 780 nm 下 28 nm 异质结光学开关实验结果



（a）绝缘态　（b）金属态

图 6　基频光 780 nm 下二次谐波的功率依赖

图 7 为不同厚度样品的温度依赖二次谐波强度，均表现出明显的可逆开关特性。值得注意的是，33 nm 与 40 nm 样品出现了开关极性反转现象，开关比均小于 1。

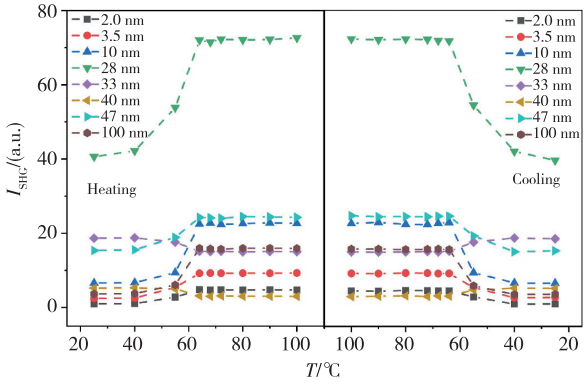


图 7　基频光 780 nm 下异质结构中的光学开关特性

将图 7 中不同厚度异质结样品在 VO_2 相变后的二次谐波强度与相变前的做比值，可以计算得到厚度依赖的开关比，如图 8 所示。在基频光 780 nm 下通过开关比的厚度依赖可以看出，开关比随厚度呈现出先下降后上升趋势，最大值约为 5。对于小于 10 nm 的超薄区域，相变界面调控的效应显著，开关比较大表明相变对薄层 3R-MoS_2 的二次谐波产生了正向增益；对于 33 nm 和 40 nm 厚度，开关比急剧下降且极性反转表明相变反而抑制了二次谐波信号，表现为反向调制；对于厚度大于 47 nm 的区域，开关比重新回升并随厚度增加而呈现增大趋势。VO_2 相变改变了基底的折射率和消光系数，从而改变了界面二次谐波的相位叠加，实现相变前后的二次谐波信号的可逆光学开关效应。

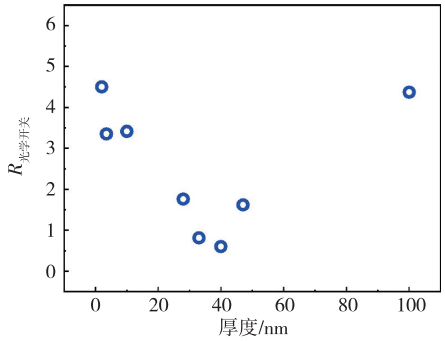
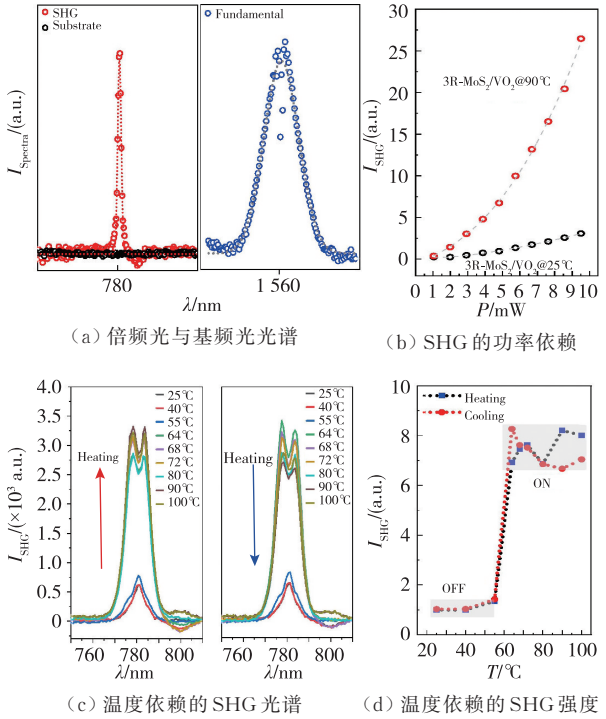


图 8　基频光 780 nm 下开关比的厚度依赖

相比之下，VO_2 在 1 560 nm 通信波段附近的光学性质随相变变化更加明显，特别是绝缘态与金属态之间的透射率差异显著增大[19,21,23]，这将进一步改变异质结构界面处的菲涅尔反射系数和局域光场分布，从而对非线性信号的调控产生重要影响。图 9 为 1 560 nm 基频光下，28 nm 3R-MoS_2/VO_2 异质结构的二次谐波光学开关实验结果。



（a）倍频光与基频光光谱　（b）SHG 的功率依赖

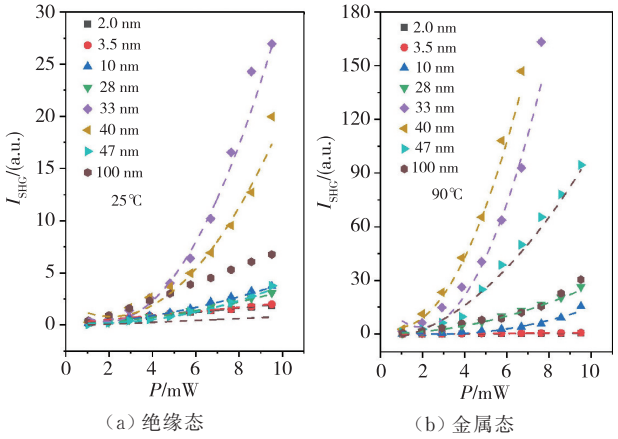
（c）温度依赖的 SHG 光谱　（d）温度依赖的 SHG 强度

图 9　基频光 1 560 nm 下 28 nm 异质结光开关实验结果

图 9(a)和(b)分别为采集到的二次谐波光谱和相应功率依赖，中心峰位为 780 nm，且衬底 VO_2 无谐波信号（黑色散点）以及功率依赖的平方函数拟合，表明所采集信号为 1 560 nm 基频光下 3R-MoS_2 的二次谐波响应。固定基频光功率为 4.12 mW 进行升降温采集，如图 9(c)所示，展现出相变温度处的二次谐波强度跳变。图 9(d)为二次谐波强度（采用面积积分）的温度依赖，表现出明显的阶梯状开关特性，开关比约为 7.6，且可逆。随后，对其他厚度 3R-MoS_2/VO_2 样品进行 1 560 nm 基频光下的二次谐波测量。图 10(a)和(b)显示不同样品二次谐波强度均遵循基频光功率的平方依赖特性，并表现出强度对 3R-MoS_2 厚度的依赖。

图 11 为固定基频光功率时二次谐波强度的温度依赖，随着 VO_2 的相变，二次谐波强度表现出可逆的光开关特性，最大开关比约为 23。此外，2 nm 与 3.5 nm 样品也出现了开关极性反转现象，开关比均小于 1。

图 12 为 1 560 nm 基频光下，光学开关比的厚度依赖呈现先上升后下降的趋势，在约 40 nm 厚度处达到了最大值，表现出与 780 nm 基频光时完全相反的厚度依赖特性，主要归结于基频光波长和样品厚度对界面二次谐波产生与干涉叠加过程的调制。



（a）绝缘态　（b）金属态

图 10　基频光 1 560 nm 下二次谐波的功率依赖

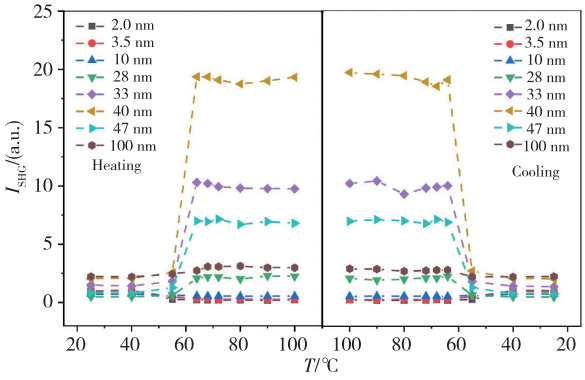


图 11　基频光 1 560 nm 下异质结构中的光学开关特性

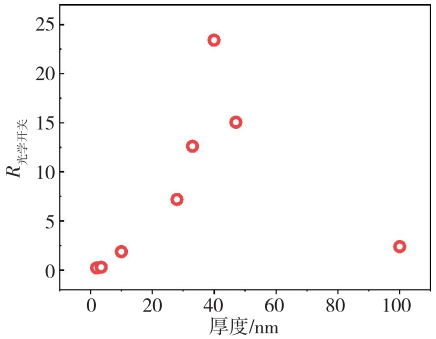


图 12　基频光 1 560 nm 下开关比的厚度依赖

2.3　理论计算结果与讨论分析

为进一步揭示 VO_2 相变调控 3R-MoS_2 二次谐波响应实现非线性光学开关的物理机制，针对异质结构提出了表面/体相二次谐波干涉的物理模型。如图 13 所示，定义异质结构由三层介质构成，分别为介质 0（空气环境）、介质 1（3R-MoS_2）以及介质 2（VO_2）。红色箭头代表入射的基频光场，蓝色箭头分别为来自表面的二次谐波信号（SHG（Top-Surface））以及来自界面的二次谐波信号（SHG（Bottom-Surface）），绿色箭头来自体相的二次谐波信号（SHG（Bulk））。总的二次谐波强度为来自表

面和界面的二次谐波$S(d)$与来自体相的二次谐波$B(d)$的叠加。

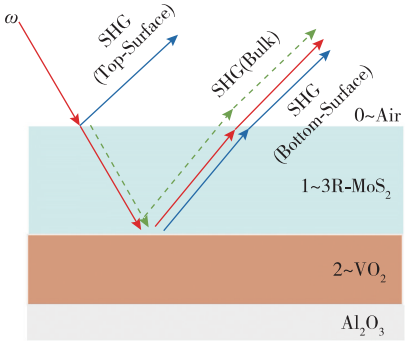


图13 3R-MoS_2/VO_2/Al_2O_3表面/体相干涉模型

设空气的折射率为$n_0=1$，3R-MoS_2的复折射率为$\tilde{n}_1=n_1+i\kappa_1$，$VO_2$衬底的复折射率为$\tilde{n}_2=n_2+i\kappa_2$。基频光和倍频光在二维半导体介质内部的波矢量分别定义为$\boldsymbol{k}$和$\boldsymbol{K}$：

$$\boldsymbol{k}=\frac{2\pi\tilde{n}_{1,\omega}}{\lambda_\omega} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{K}=\frac{2\pi\tilde{n}_{1,2\omega}}{\lambda_{2\omega}} \tag{2}$$

式中，λ_ω为基频光，$\lambda_{2\omega}$为倍频光。根据菲涅尔定律，在垂直入射条件下，定义基频光(r,t)和倍频光(R,T)在介质i和j界面处的反射系数与透射系数：

基频光(ω)系数：

$$r_{ij}=\frac{\tilde{n}_{i,\omega}-\tilde{n}_{j,\omega}}{\tilde{n}_{i,\omega}+\tilde{n}_{j,\omega}},\ t_{ij}=\frac{2\tilde{n}_{i,\omega}}{\tilde{n}_{i,\omega}+\tilde{n}_{j,\omega}} \tag{3}$$

倍频光(2ω)系数：

$$R_{ij}=\frac{\tilde{n}_{i,2\omega}-\tilde{n}_{j,2\omega}}{\tilde{n}_{i,2\omega}+\tilde{n}_{j,2\omega}},\ T_{ij}=\frac{2\tilde{n}_{i,2\omega}}{\tilde{n}_{i,2\omega}+\tilde{n}_{j,2\omega}} \tag{4}$$

总二次谐波强度$I_{\mathrm{SHG}}(d)$由表面-界面贡献$S(d)$和体相贡献$B(d)$相干叠加而成，d为二维半导体厚度。

$$I_{\mathrm{SHG}}(d)\propto\left|S(d)+B(d)\right|^2 \tag{5}$$

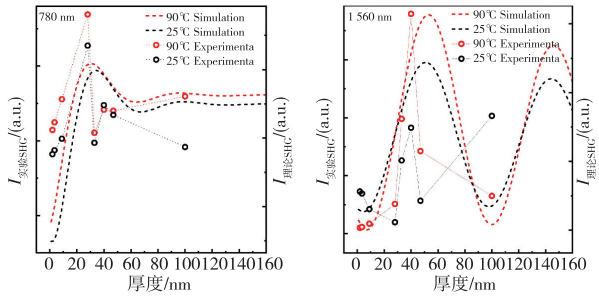
$$S(d)=\chi_s^{(2)}\left[R_{01}+T_{01}e^{iKd}R_{12}e^{iKd}T_{10}+\left(t_{01}e^{ikd}\right)^2 R_{12}e^{iKd}T_{10}\right] \tag{6}$$

$$B(d)=\chi_b^{(2)}d\left[t_{01}^2e^{iKd}R_{12}e^{iKd}T_{10}+\left(t_{01}e^{ikd}r_{12}\right)^2e^{iKd}T_{10}\right] \tag{7}$$

式中，$\chi_s^{(2)}$为表面二阶非线性极化率，$\chi_b^{(2)}$为体相二阶非线性极化率。随后计算VO_2处于绝缘态和金属态时的二次谐波强度I_{ins}和I_{met}，可获得非线性光学开关的开关比$R(d)$：

$$R(d)=\frac{I_{\mathrm{met}}(d)}{I_{\mathrm{ins}}(d)} \tag{8}$$

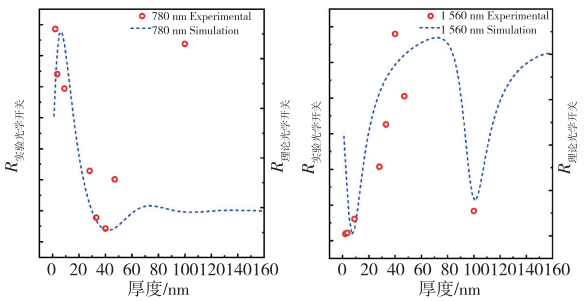
图14为基于表面/体相干涉模型的计算结果。所使用光学常数基于已有文献报道[36-38]。图14(a)和(b)分别为780 nm和1 560 nm基频光下VO_2处于金属态和绝缘态时二次谐波强度的厚度依赖曲线，均表现出随3R-MoS_2厚度的振荡依赖，能够与实验散点数据的厚度依赖趋势吻合。



(a) 780 nm (b) 1 560 nm

图14 理论计算的二次谐波强度的厚度依赖

图15(a)和(b)分别为780 nm和1 560 nm基频光下的光学开关比。对于780 nm基频光，在薄层区域，界面二次谐波贡献占主导，VO_2相变调制使金属态下的二次谐波强度整体高于绝缘态时，表现为正向光开关极性，且随3R-MoS_2厚度增加变大。持续增加3R-MoS_2厚度，体相贡献逐渐明显且与界面二次谐波之间的传播相位差逐渐累积，导致开关比下降。对于1 560 nm基频光激发，由于3R-MoS_2厚度和VO_2界面对光场相位叠加的影响均不同于780 nm激发情形，开关比在薄层区域和约100 nm附近出现波谷，而在约70～90 nm及更厚区域表现为较大的开关比，这取决于VO_2相变后二次谐波场在相消叠加和相长叠加之间的转换。基于所提出模型计算的开关比厚度依赖趋势能够与实验数据(红色散点)较好地吻合。



(a) 780 nm (b) 1 560 nm

图15 理论计算的二次谐波开关比的厚度依赖

3　结论

本文系统研究了3R-MoS_2/VO_2异质结构中的光学开关特性，并给出了光学开关对3R-MoS_2厚度和基频光波长的依赖关系。在780 nm基频光下，开关比随厚度呈先降后升趋势，最大开关比约为5。而在1 560 nm基频光下，厚度依赖规律完全相反，最大开关比约为23。该现象主要归因于VO_2相变对界面与体相二次谐波干涉叠加过程的调控，相应理论计算结果能够与实验很好地吻合。本文揭示了二维半导体/VO_2异质结构光学开关中基频光波长、二维半导体厚度与VO_2相变协同调控的机制，为基于二维半导体的片上非线性光学器件设计提供了新的思路和途径。

参考文献：

[1] 石锦卫，黄晨颖，杨国霞，等. 从增强因子到转换效率：微纳光学二次谐波综述[J]. 中国激光，2026，53(7)：182-199.
Shi Jinwei，Huang Chenying，Yang Guoxia，et al. From enhancement factor to conversion efficiency：review of second harmonic generation in micro-nano optics[J]. Chinese Journal of Lasers，2026，53(7)：182-199.

[2] Anton A，Henri J，Andrea M，et al. Optical harmonic generation in monolayer group-VI transition metal dichalcogenides [J]. Physical Review B，2018，98 (11)：115426.

[3] Khan A R，Zhang L，Ishfaq K，et al. Optical harmonic generation in 2D materials [J]. Advanced Functional Materials，2022，32(3)：2105259.

[4] Kumar N，Najmaei S，Cui Q，et al. Second harmonic microscopy of monolayer MoS_2[J]. Physical Review B，2013，87(16)：161403.

[5] Malard L M，Alencar T V，Barboza A P M，et al. Observation of intense second harmonic generation from MoS_2 atomic crystals [J]. Physical Review B，2013，87 (20)：201401.

[6] Li Y，Rao Y，Mak K F，et al. Probing symmetry properties of few-layer MoS_2 and h-BN by optical second-harmonic generation[J]. Nano Letters，2013，13(7)：3329-3333.

[7] Wang Y，Xiao J，Yang S，et al. Second harmonic generation spectroscopy on two-dimensional materials [J]. Optical Materials Express，2019，9(3)：1136-1149.

[8] Yin X，Ye Z，Chenet D A，et al. Edge nonlinear optics on a MoS_2 Atomic monolayer [J]. Science，2014，344 (6183)：488-490.

[9] Janisch C，Wang Y，Ma D，et al. Extraordinary second harmonic generation in tungsten disulfide monolayers [J]. Scientific Reports，2014，4：5530.

[10] Clark D J，Senthilkumar V，Le C T，et al. Strong optical nonlinearity of CVD-grown MoS_2 monolayer as probed by wavelength-dependent second-harmonic generation [J]. Physical Review B，2014，90(12)：121409.

[11] Shi J，Yu P，Liu F，et al. 3R MoS_2 with broken inversion symmetry：a promising ultrathin nonlinear optical device[J]. Advanced Materials，2017，29(30)：1701486.

[12] Zhao M，Ye Z，Suzuki R，et al. Atomically phase-matched second-harmonic generation in a 2D crystal [J]. Light：Science & Applications，2016，5(8)：e16131.

[13] Strachan J，Masters A F，Maschmeyer T. 3R-MoS_2 in review：history，status，and outlook [J]. ACS Applied Energy Materials，2021，4(8)：7405-7418.

[14] 罗荣辉，俞婴海，田建国，等. 二维材料二次谐波产生：从本征机理调控到外部结构增强的研究进展[J]. 中国激光，2026，53(7)：62-77.
Luo Ronghui，Yu Zhaohai，Tian Jianguo，et al. Second-harmonic generation in 2D materials：recent progress from intrinsic mechanism regulation to external structural enhancement[J]. Chinese Journal of Lasers，2026，53(7)：62-77.

[15] Hong H，Huang C，Ma C，et al. Twist phase matching in two-dimensional materials [J]. Physical Review Letters，2023，131(23)：233801.

[16] Trovatello C，Ferrante C，Yang B，et al. Quasi-phase-matched up-and down-conversion in periodically poled layered semiconductors [J]. Nature Photonics，2025，19 (3)：291-299.

[17] Seidt L，Weber T，Seredin A A，et al. Ultrafast all-optical switching in nonlinear 3R-MoS_2 van der Waals metasurfaces[J]. npj Nanophotonics，2025，2：37.

[18] Jiang C，He L，Xuan Q，et al. Phase-change VO_2 based thermochromic smart windows [J]. Light：Science & Applications，2024，13：255.

[19] Taha M，Walia S，Ahmed T，et al. Insulator-metal transition in substrate-independent VO_2 thin film for phase-change devices[J]. Scientific Reports，2017，7：17899.

[20] Chen L，Wang X，Wan D，et al. Tuning the phase transition temperature，electrical and optical properties of VO_2 by oxygen nonstoichiometry：insights from first-principles calculations [J]. RSC Advances，2016，6 (77)：73070-73082.

[21] Qazilbash M M，Brehm M，Chae B G，et al. Mott transition in VO_2 Revealed by infrared spectroscopy and nano-imaging [J]. Science，2007，318(5857)：1750-1753.

[22] Cavalleri A，Tóth C，Siders C W，et al. Femtosecond structural dynamics in VO_2 during an ultrafast solid-solid phase transition[J]. Physical Review Letters，2001，87(23)：237401.

[23] 张　钧，杨文俊，李　磊，等. 二氧化钒微结构的光场调控性能[J]. 光学学报，2024，44(22)：18-25.

Zhang Jun, Yang Wenjun, Li Lei, et al. Light field manipulation properties of vanadium dioxide microstructure[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(22): 18-25.

[24] Hou J, Wang X, Fu D, et al. Modulating photoluminescence of monolayer molybdenum disulfide by metal-insulator phase transition in active substrates[J]. Small, 2016, 12(29): 3976-3984.

[25] Oliva N, Casu E A, Yan C, et al. Van der Waals MoS_2/VO_2 heterostructure junction with tunable rectifier behavior and efficient photoresponse[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 14250.

[26] Kumar P, Singh D, Balakrishnan V. Thermally driven reversible photoluminescence modulation in WS_2/VO_2 heterostructure[J]. Applied Surface Science, 2019, 480: 680-688.

[27] Liu J, Lai H, Huang X, et al. Temperature dependent photoresponse of MoS_2/VO_2 heterojunction[J]. Materials Letters, 2023, 341: 134303.

[28] Li Y, Wang T, Li L, et al. Interfacial second harmonic generation switching with 2D monolayer/VO_2 heterostructure[J]. Applied Physics Letters, 2024, 124(17): 173102.

[29] Li Y, Sun Y, Li L, et al. Interfacial second harmonic generation switching with multilayer InSe/VO_2 heterostructure in telecom band[J]. Applied Physics Letters, 2025, 126(14): 143501.

[30] Hu C, Li L, Wen X, et al. Manipulating the anisotropic phase separation in strained VO_2 epitaxial films by nanoscale ion-implantation[J]. Applied Physics Letters, 2021, 119(12): 121101.

[31] Splendiani A, Sun L, Zhang Y, et al. Emerging photoluminescence in monolayer MoS_2[J]. Nano Letters, 2010, 10(4): 1271-1275.

[32] Mak K F, Lee C, Hone J, et al. Atomically thin MoS_2: a new direct-gap semiconductor[J]. Physical Review Letters, 2010, 105(13): 136805.

[33] Jang A R, Yoon J, Son S B, et al. Phase transition-induced temperature-dependent phonon shifts in molybdenum disulfide monolayers interfaced with a vanadium dioxide film[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(2): 3426-3434.

[34] Li H, Zhang Q, Yap C C R, et al. From bulk to monolayer MoS_2: evolution of Raman scattering[J]. Advanced Functional Materials, 2012, 22(7): 1385-1390.

[35] Molina-Sánchez A, Wirtz L. Phonons in single-layer and few-layer MoS_2 and WS_2[J]. Physical Review B, 2011, 84(15): 155413.

[36] Song B, Gu H, Fang M, et al. Layer-dependent dielectric function of wafer-scale 2D MoS_2[J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(2): 1801250.

[37] Islam K M, Synowicki R, Ismael T, et al. In-plane and out-of-plane optical properties of monolayer, few-layer, and thin-film MoS_2 from 190 to 1700 nm and their application in photonic device design[J]. Advanced Photonics Research, 2021, 2(5): 2000180.

[38] Petit C, Frigerio J M. Optical properties of VO_2 thin films in their dielectric and metallic states[J]. Advances in Optical Interference Coatings, 1999, 3738: 102-109.

作者简介：

黄晋豪(2000—)，男，硕士研究生，主要研究方向为低维半导体非线性光学特性；

李元元(1989—)，女，博士，副教授，硕士生导师，主要研究方向为二维半导体非线性光学特性。