

## 二氧化钒相变对太赫兹反谐振光纤谐振特性的影响及其应用

闫忠宝 孙帅 张帅 张尧 史伟 盛泉 史朝督 张钧翔 张贵忠 姚建铨

### Effect of phase transition of vanadium dioxide on resonance characteristics of terahertz anti-resonant fiber and its applications

Yan Zhong-Bao Sun Shuai Zhang Shuai Zhang Yao Shi Wei Sheng Quan Shi Chao-Du Zhang Jun-Xiang Zhang Gui-Zhong Yao Jian-Quan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 168701 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210084

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210084>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### Articles you may be interested in

基于二氧化钒的太赫兹编码超表面

Terahertz coding metasurface based vanadium dioxide

物理学报. 2020, 69(22): 228101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200891>

太赫兹双芯反谐振光纤的设计及其耦合特性

Design and coupling characteristics of terahertz dual-core anti-resonant fiber

物理学报. 2020, 69(20): 208703 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200662>

利用连续激光抽运-太赫兹探测技术研究单晶和多晶二氧化钒纳米薄膜的相变

Study of phase transition of single crystal and polycrystalline vanadium dioxide nanofilms by using continuous laser pump-terahertz probe technique

物理学报. 2020, 69(20): 204205 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201188>

电触发二氧化钒纳米线发生金属-绝缘体转变的机理

Mechanism of electrically driven metal-insulator phase transition in vanadium dioxide nanowires

物理学报. 2018, 67(17): 177201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180835>

相变材料与超表面复合结构太赫兹移相器

Terahertz phase shifter based on phase change material-metasurface composite structure

物理学报. 2021, 70(7): 074201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201495>

石墨烯增强半导体态二氧化钒近场热辐射

Enhancement of near-field thermal radiation of semiconductor vanadium dioxide covered by graphene

物理学报. 2021, 70(5): 054207 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201360>

# 二氧化钒相变对太赫兹反谐振光纤谐振特性的影响及其应用\*

闫忠宝 孙帅 张帅 张尧 史伟<sup>†</sup> 盛泉  
史朝督 张钧翔 张贵忠 姚建铨

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

(2021年1月13日收到; 2021年4月8日收到修改稿)

利用有限元分析软件 COMSOL 模拟包层管内壁涂敷有二氧化钒的太赫兹反谐振光纤, 研究二氧化钒的相变对反谐振光纤传输特性的影响. 研究表明, 在太赫兹波段, 二氧化钒的相变会促使反谐振光纤的反谐振周期发生极大的改变, 在此过程中, 光纤包层管对入射光束的作用效果由反谐振状态变为谐振状态, 在不改变反谐振光纤结构的情况下, 仅通过控制二氧化钒的相变即可实现对反谐振光纤纤芯中太赫兹波的有效调控. 二氧化钒相变对反谐振光纤的这种调控效果在太赫兹调控器件领域有很广泛的应用前景, 基于涂敷二氧化钒的反谐振光纤, 本文提出一种太赫兹光开关及一种偏振调控器. 其中, 在波长为  $120\ \mu\text{m}$  处, 光开关处于不同状态时对应的光纤损耗分别为  $0.5\ \text{dB/m}$  与  $110\ \text{dB/m}$ , 并且通过激励光源诱导二氧化钒发生快速相变, 有望实现快速光开关. 在偏振调控器中, 可以对反谐振光纤纤芯中太赫兹波的偏振状态以及偏振方向进行控制, 偏振状态下光纤的双折射系数大于  $1.4 \times 10^{-4}$ .

**关键词:** 二氧化钒, 太赫兹, 反谐振光纤, 光纤器件

**PACS:** 87.50.U-, 42.81.-i, 42.70.-a, 42.81.Wg

**DOI:** 10.7498/aps.70.20210084

## 1 引言

太赫兹 (terahertz, THz) 波是频率为  $0.1\text{—}10\ \text{THz}$  的电磁波, 波长范围为  $30\text{—}3000\ \mu\text{m}$ , THz 波在电磁波谱中处于微波与红外光之间, 具有良好的光子学和电子学特性. THz 波对非极性材料具有较高的穿透性、较低的光子能量<sup>[1]</sup>, 因此在医疗<sup>[2]</sup>、无损检测<sup>[3]</sup>等领域有很重要的学术价值, 此外 THz 波还具有宽带宽和大通信容量等特性<sup>[1]</sup>, 可广泛应用于通信<sup>[4]</sup>、雷达探测<sup>[5]</sup>等领域.

近年来 THz 波技术发展迅速, 但目前 THz 波在应用中仍以自由空间光路为主, 自由空间中 THz 波不易长距离传输, 传输方向也难以控制, 并且自

由空间中 THz 波的传输通常会受到灰尘和水蒸汽的影响<sup>[6]</sup>. 为了实现 THz 波的高效传输, 科研工作者提出了多种 THz 波导, 包括塑料光纤<sup>[7]</sup>、布拉格光纤<sup>[8]</sup>、光子晶体光纤<sup>[9]</sup>和反谐振光纤<sup>[6]</sup>(anti-resonant fiber, ARF) 等. 其中 ARF 利用反谐振效应将入射光束限制在光纤中心的空气孔内进行传输, 以空气为导光介质, 有很低的非线性效应以及很高的损伤阈值. ARF 因其结构简单、传输损耗低、损伤阈值高、色散低以及传输带宽高而引起科研工作者的广泛关注<sup>[10]</sup>.

二氧化钒 (vanadium,  $\text{VO}_2$ ) 是一种具有相变性质的金属氧化物, 最大特点是在环境温度达到  $68\ ^\circ\text{C}$  时, 会由单斜结构的绝缘相转变为四方结构的金属相, 在这一过程中其电导率、介电常数等性

\* 国家自然科学基金 (批准号: 62075159) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: shiwei@tju.edu.cn

质都会发生剧烈变化<sup>[11]</sup>. 除改变环境温度外, 利用光场、电场等外部激励也可以实现 VO<sub>2</sub> 的相变, 尤其是利用光调控可以使 VO<sub>2</sub> 的相变速度达到皮秒量级<sup>[12]</sup>. VO<sub>2</sub> 的相变条件低且可控性强, 因而有很广泛的应用空间, 科研工作者将 VO<sub>2</sub> 集成至波导内制成多种波导调控器件, 如硅波导振幅调制器<sup>[13]</sup>、基于硅波导的偏振调制器<sup>[14]</sup>、光触发纳米级存储器<sup>[15]</sup>以及等离子体调制器<sup>[16]</sup>等. 此外, 在近红外波段, VO<sub>2</sub> 与 ARF 的结合也表现出一定的调制效果, 2020 年, Huang 等<sup>[17]</sup>将 VO<sub>2</sub> 涂敷于 ARF 内壁, 利用 VO<sub>2</sub> 的相变实现了 1550 nm 宽带光调制器, 调制深度在 60% 以上.

VO<sub>2</sub> 在 THz 波段同样具有非常重要的应用价值, 早在 2006 年, Jepsen 等<sup>[18]</sup>实验发现, VO<sub>2</sub> 发生相变时, 其对 THz 波的透过率会发生显著的变化, 证明 VO<sub>2</sub> 可应用于诸如光开关、调制器、偏振器等 THz 器件中. 此后, 利用 VO<sub>2</sub> 的相变特性, 研究者们实现了多种 THz 波调控器件, 如有源宽带 THz 偏振控制器<sup>[19]</sup>、宽带 THz 超材料吸收器<sup>[20]</sup>、太赫兹编码超表面<sup>[21]</sup>、可控开环谐振器<sup>[22]</sup>等.

本文利用有限元分析法研究包层管内壁涂敷有 VO<sub>2</sub> 的反谐振光纤 (VO<sub>2</sub>-coated ARF, VO<sub>2</sub>-ARF), 理论分析 VO<sub>2</sub> 相变对 VO<sub>2</sub>-ARF 传输特性的影响. 研究 VO<sub>2</sub> 的电导率、薄膜厚度以及 VO<sub>2</sub>-ARF 包层管壁的厚度对 VO<sub>2</sub>-ARF 导光特性的影响. 研究表明, VO<sub>2</sub> 发生相变时, VO<sub>2</sub>-ARF 的反谐振周期会发生显著变化, ARF 包层管对入射光束的作用效果由反谐振状态变为谐振状态, 在不改变 ARF 结构的情况下, 仅通过控制 VO<sub>2</sub> 的相变便可以实现对 ARF 内入射光的有效调控. 基于这种原理, 本文提出了一种 THz 光开关以及一种偏振调制器, 并对其传输特性进行了研究.

## 2 VO<sub>2</sub> 相变对 VO<sub>2</sub>-ARF 传输特性的影响

### 2.1 结构设计

利用有限元分析软件 COMSOL 设计包层管内壁涂敷有 VO<sub>2</sub> 的 ARF, 结构如图 1 所示, 该光纤由一定厚度的介质外包层、均匀分布在外包层内壁的 6 个包层管以及涂敷在包层管内壁的 VO<sub>2</sub> 薄膜组成. 光纤外包层壁厚  $T = 0.5$  mm, 包层管直径  $d = 1.3$  mm, 壁厚  $t = 0.078$  mm, 由反谐振条

件  $t = (N - 0.5) \frac{\lambda}{2\sqrt{n_1^2 - n_0^2}}$  计算得出, 其中  $\lambda$  为入射光波长,  $n_1$  为光纤包层管及外包层的材料折射率,  $n_0$  为空气折射率,  $N$  为正整数, 本文取  $N = 2$ .

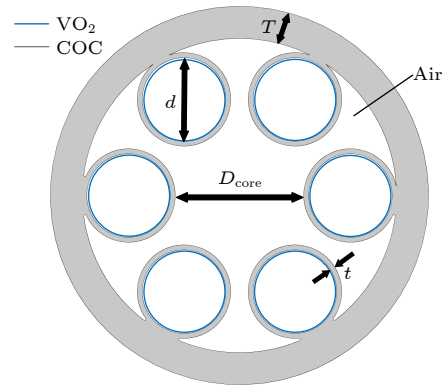


图 1 VO<sub>2</sub>-ARF 结构示意图

Fig. 1. Cross-section diagram of VO<sub>2</sub>-ARF.

在 VO<sub>2</sub>-ARF 中, 包层管内壁涂敷有 VO<sub>2</sub>, VO<sub>2</sub> 薄膜厚度  $t_0$  为 1  $\mu$ m, 如图 1 中蓝色部分所示, 为了平衡光纤损耗与光纤的尺寸, 光纤纤芯直径  $D_{\text{core}}$  控制为 2 mm. 此光纤用于 2.5 THz 波的传输与调控, ARF 主体材料为环烯烃共聚物 (cyclic olefin copolymers, COC), COC 是一种具有良好热塑性和高机械强度的聚合物材料, 并且其在 THz 波段有较低的吸收损耗<sup>[23]</sup>. ARF 利用反谐振效应将入射的 THz 波限制在中心空气孔内进行传输, 此时模场不依赖材料传输, 材料损耗远小于限制损耗 (confinement loss, CL), 光纤的传输损耗以 CL 为主, ARF 中的 CL 由以下公式进行计算<sup>[24]</sup>:

$$\text{CL} = \left( \frac{20}{\ln 10} \right) \left( \frac{2\pi f}{c} \right) N_i, \quad (1)$$

其中  $f$  为入射光频率,  $c$  为真空中的光速,  $N_i$  为有效折射率的虚部.

VO<sub>2</sub> 的介电常数等参数可通过 Drude 模型进行计算<sup>[20]</sup>, 在模拟仿真过程中, 以 VO<sub>2</sub> 的电导率  $\sigma$  表示其所处状态, VO<sub>2</sub> 由绝缘相向金属相的相变过程中, 电导率会从 100 S/m 增加至最高  $3 \times 10^5$  S/m.

### 2.2 模拟结果

利用上述 VO<sub>2</sub>-ARF 结构, 研究 VO<sub>2</sub> 相变对 VO<sub>2</sub>-ARF 传输特性的影响. 图 2(a) 是 VO<sub>2</sub> 电导率不同时, VO<sub>2</sub>-ARF 的损耗随包层管壁厚度  $t$  的变化曲线. 可以看出, 当 VO<sub>2</sub> 电导率由 100 S/m 变为  $3 \times 10^5$  S/m, 即 VO<sub>2</sub> 发生相变时, VO<sub>2</sub>-ARF

的反谐振周期发生分裂, 此时包层管对入射光束的作用效果由反谐振状态变为谐振状态, 光纤的损耗发生突变. 例如, 在  $t = 78 \mu\text{m}$  处光纤的损耗由  $0.5 \text{ dB/m}$  增加至  $100 \text{ dB/m}$  以上, 在不改变光纤结构的条件下, 仅控制  $\text{VO}_2$  发生相变, 便可以实现对  $\text{VO}_2\text{-ARF}$  损耗的控制. 为了研究这种变化出现的原因, 对比了  $t = 78 \mu\text{m}$  时, 不同电导率下光纤的电磁损耗情况, 图 2(b) 为光纤电磁损耗分布图, 可见, 光纤的电磁损耗主要集中在包层管壁处, 当  $\text{VO}_2$  电导率由  $100 \text{ S/m}$  变为  $3 \times 10^5 \text{ S/m}$  时, 包层管壁处的电磁损耗会有 3 个数量级以上的增加, 由此可知金属相的  $\text{VO}_2$  会产生很高的电磁损耗.

进一步研究  $\text{VO}_2$  的电导率与厚度对  $\text{VO}_2\text{-ARF}$  反谐振周期的影响.  $\text{VO}_2$  厚度  $t_0 = 1 \mu\text{m}$  时, 光纤的损耗随  $\text{VO}_2\text{-ARF}$  包层管壁厚度以及  $\text{VO}_2$  电导率的变化如图 3(a) 所示. 可以看出, 随着电导率的

增加, 在  $t = 60 \mu\text{m}$  附近反谐振周期中开始出现额外的高损耗点, 并且该高损耗点随着电导率的增加而右移, 损耗也随之增加, 在这一过程中, 包层管对光束的作用效果由反谐振状态变为谐振状态. 在  $\text{VO}_2$  电导率增加的过程中,  $\text{VO}_2$  会由最初的绝缘相向金属相过渡, 当电导率大于  $6 \times 10^4 \text{ S/m}$  后,  $\text{VO}_2$  由金属相占主导, 随着电导率的继续增加, 高损耗点不再发生变化.

当  $\text{VO}_2$  电导率设置为最大值  $3 \times 10^5 \text{ S/m}$  时, 光纤损耗随  $\text{VO}_2\text{-ARF}$  包层管壁厚度以及  $\text{VO}_2$  厚度的变化如图 3(b) 所示. 此时  $\text{VO}_2$  为金属相, 由图 3(b) 可见, 当  $\text{VO}_2$  厚度较小时,  $\text{VO}_2\text{-ARF}$  的反谐振周期并没有受到  $\text{VO}_2$  的影响, 较薄的  $\text{VO}_2$  对  $\text{VO}_2\text{-ARF}$  传输特性几乎没有影响, 其金属相的性质并没有表现出来. 随着  $\text{VO}_2$  厚度的增加, 在  $t = 65\text{--}80 \mu\text{m}$  范围内, 反谐振周期中开始出现高

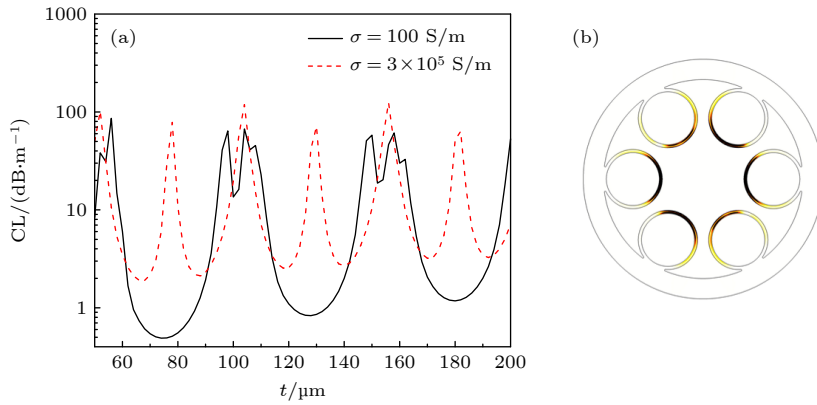


图 2 (a)  $\text{VO}_2$  电导率  $\sigma$  不同时, 光纤的损耗随包层管壁厚  $t$  的变化; (b)  $\text{VO}_2\text{-ARF}$  电磁损耗分布

Fig. 2. (a) Confinement loss (CL) of  $\text{VO}_2\text{-ARF}$  as a function of cladding tube wall thickness ( $t$ ) under different conductivity of  $\text{VO}_2$  ( $\sigma$ ); (b) electromagnetic loss distribution of  $\text{VO}_2\text{-ARF}$ .

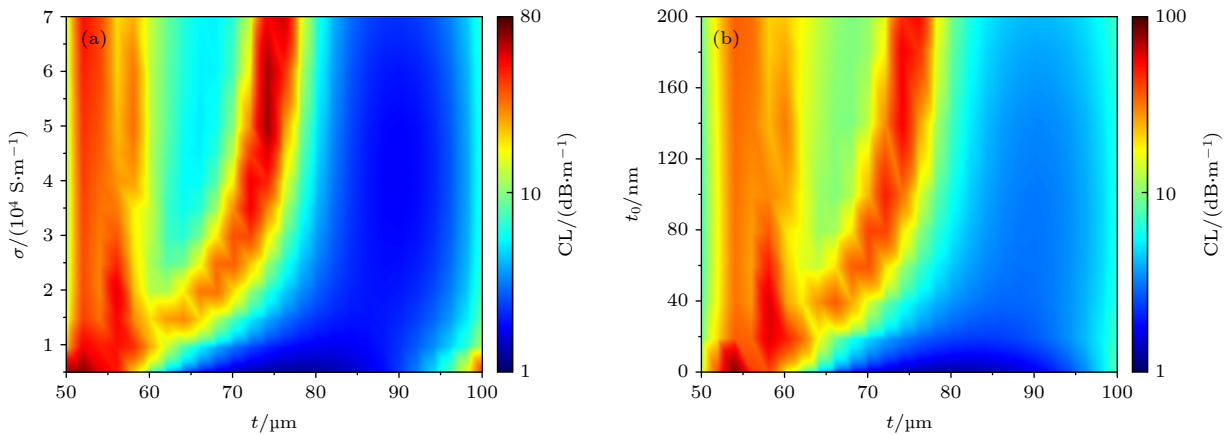


图 3 (a)  $\text{VO}_2\text{-ARF}$  的损耗随包层管壁厚  $t$  以及  $\text{VO}_2$  电导率  $\sigma$  的变化; (b)  $\text{VO}_2\text{-ARF}$  损耗随包层管壁厚  $t$  以及  $\text{VO}_2$  厚度  $t_0$  的变化

Fig. 3. Confinement loss (CL) of  $\text{VO}_2\text{-ARF}$  as a function of cladding tube wall thickness ( $t$ ) and the conductivity of  $\text{VO}_2$  ( $\sigma$ ); (b) confinement loss (CL) of  $\text{VO}_2\text{-ARF}$  as a function of cladding tube wall thickness ( $t$ ) and the thickness of  $\text{VO}_2$  ( $t_0$ ).



损耗点, 并且高损耗点随着 VO<sub>2</sub> 厚度的增加出现右移, 损耗也随之增加, 当 VO<sub>2</sub> 厚度大于 160 nm 后, 异常的高损耗点便不再受到 VO<sub>2</sub> 厚度的影响, 此时包层管对光束的作用效果为谐振状态. 可见, 在 ARF 包层管内壁涂敷一层厚度足够的 VO<sub>2</sub>, 通过控制 VO<sub>2</sub> 的相变, 便可实现对 ARF 包层管反谐振状态的调控, 利用该原理, 本文提出了一种基于 VO<sub>2</sub>-ARF 的 THz 光开关和一种偏振调控器.

### 3 基于 VO<sub>2</sub>-ARF 的 THz 器件

#### 3.1 光开关

根据 VO<sub>2</sub> 相变调控 VO<sub>2</sub>-ARF 反谐振周期的原理, 本文提出了基于 VO<sub>2</sub>-ARF 的 THz 光开关. 光开关的三维结构如图 4(a) 所示, 外包层壁厚  $T = 0.5$  mm, 6 个包层管均匀分布在外包层内壁, 包层管内径  $d = 1.3$  mm, 壁厚  $t = 0.078$  mm, 包层管内壁涂敷有 VO<sub>2</sub>, 如图 4(a) 中蓝色部分所示, VO<sub>2</sub> 厚度  $t_0 = 1$  μm, 考虑到光纤的尺寸及损耗, 控制纤芯直径  $D_{\text{core}} = 2$  mm, 光开关长度为 10 cm. 利用光调控的方法, 可实现对 VO<sub>2</sub> 相变的高速调控, Liu 等<sup>[12]</sup> 利用 800 nm 的脉冲激光对 VO<sub>2</sub> 进行光激励, 使其发生快速相变, 研究 VO<sub>2</sub> 的光学特性, 这一过程中 800 nm 脉冲激光会使 VO<sub>2</sub> 发生带间跃迁, 改变其光学特性. 根据上述研究, 本文采用波长为 800 nm 的脉冲激光器作为激励光源, 脉冲宽度为纳秒级, 激光能量密度不小于 100 μJ/cm<sup>2</sup>, 控制 6 个包层管处激励光源分别入射至各包层管内, 使激励光源能够均匀辐照位于包层管内部的

VO<sub>2</sub>, 控制其相变情况. 激励光源的通断对光纤损耗的影响如图 4(b) 所示, 激励光源关闭时, VO<sub>2</sub> 为绝缘相, 此时光纤的损耗随波长的变化如图 4(b) 中黑色曲线所示, 光纤内电场分布如图 4(c) 所示, 可见 THz 波被有效限制在纤芯中进行传输. 激励光源打开, 诱导 VO<sub>2</sub> 发生相变后, ARF 的损耗在入射光波长接近 120 μm 时发生剧烈变化, 此时光纤中的电场分布如图 4(d) 所示, 可见此时入射光与包层管壁发生强烈耦合, 致使光纤损耗急剧增加. 对波长约为 120 μm 的入射光, 激励光源打开与关闭状态下的损耗分别为 0.5 dB/m 和 110 dB/m, 可见, 该光开关可实现对 2.5 THz 波有效的“开”与“关”的效果.

#### 3.2 偏振调控器

基于 VO<sub>2</sub>-ARF 的研究, 本文提出了如图 5(a) 所示的偏振调控器, 外包层壁厚  $T = 0.5$  mm, 4 个包层管均匀分布在外包层内壁, 分别命名为 1, 2, 3, 4, 包层管内径  $d = 2$  mm, 壁厚  $t = 0.078$  mm, 包层管内壁涂敷有 VO<sub>2</sub>, 如图 5(a) 中蓝色部分所示, VO<sub>2</sub> 厚度  $t_0 = 1$  μm, 控制纤芯直径  $D_{\text{core}} = 2$  mm, 光纤入射光为 2.5 THz 波. 与光开关相同, 偏振调控器同样使用波长为 800 nm 脉冲激光诱导 VO<sub>2</sub> 发生相变, 从而达到调控效果. 分别控制光纤 4 个包层管内部激励光源的通断以控制不同包层管内 VO<sub>2</sub> 的相变情况, 使光纤的不同偏振方向处于不同的谐振状态, 因而光纤不同偏振方向的有效折射率及损耗会产生很大的差别, 入射的 THz 波会转变为偏振光, 且偏振方向可控.

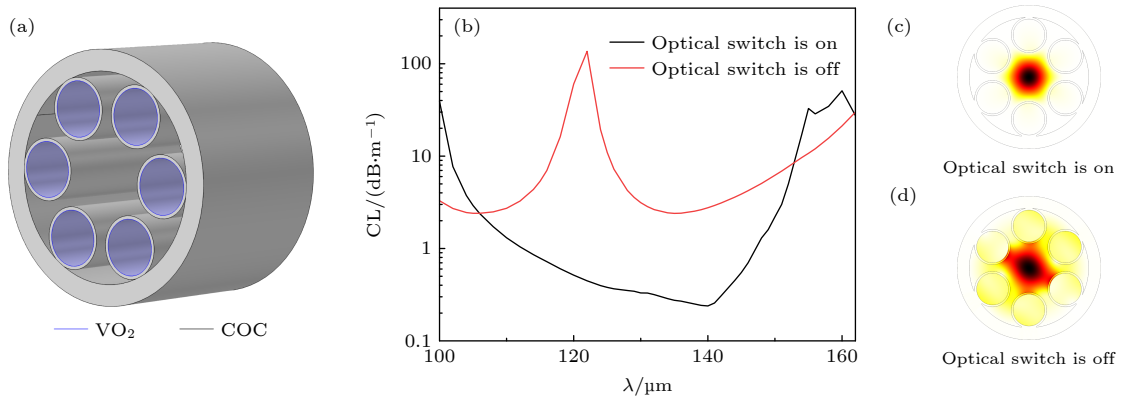


图 4 (a) 光开关结构示意图; (b) 光开关处于“开”、“关”状态时, 光纤损耗随波长  $\lambda$  的变化曲线; (c) 光开关为开状态和 (d) 关状态时的电场分布图

Fig. 4. (a) Cross-section diagram of optical switch; (b) when the optical switch is on and off, confinement loss (CL) of ARF as a function of incident light wavelength ( $\lambda$ ); electric field distribution diagram when optical switch is (c) on and (d) off.

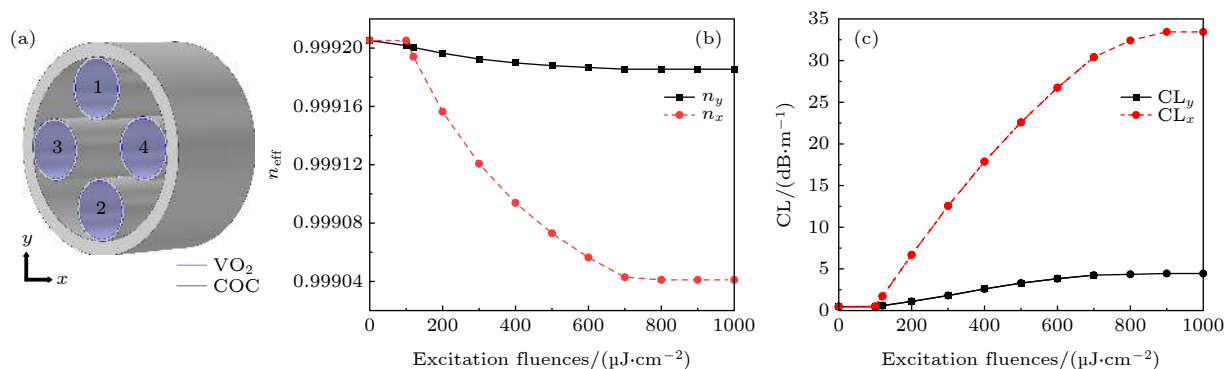


图 5 (a) 偏振调控器结构示意图; (b) 光纤实现偏振光传输时, 光纤不同偏振方向的有效折射率随激励光源光通量的变化曲线; (c) 光纤实现偏振光传输时, 光纤不同偏振方向的损耗随激励光源光通量的变化曲线

Fig. 5. (a) Cross-section diagram of polarization controller; (b) effective refractive index ( $n_{\text{eff}}$ ) and (c) confinement loss (CL) of ARF in orthogonal polarization directions as a function of excitation fluences of the excitation laser when ARF realizes the polarized transmission.

将包层管 1, 2 内激励光源打开, 同时关闭 3, 4 内激励光源时, 此时  $x, y$  偏振方向光纤的有效折射率与损耗随激励光源光通量的变化如图 5(b) 和图 5(c) 所示, 在光通量较低时, VO<sub>2</sub> 为绝缘相, 可见此时光纤不同偏振方向的有效折射率与损耗几乎无差别. 随着包层管 1, 2 内激励光源光通量的增加, 光纤的双折射系数  $\Delta n$  ( $\Delta n = |n_y - n_x|$ ) 逐渐增加, 当光通量大于  $700 \mu\text{J}/\text{cm}^2$  时, VO<sub>2</sub> 彻底转变为金属相, 此时  $\Delta n$  达到最大, 为  $1.4 \times 10^{-4}$ . 随着光通量的增加,  $x$  偏振方向的损耗急剧增加, 同时  $y$  偏振方向的损耗也有所增加, 但远小于  $x$  偏振方向的损耗. 可见, 控制包层管 1, 2 内激励光源打开且光通量达到  $700 \mu\text{J}/\text{cm}^2$  以上, 包层管 3, 4 内激励光源关闭, 偏振调控器可使入射的 THz 波变为  $y$  方向偏振光, 双折射系数  $\Delta n$  可达到  $1.4 \times 10^{-4}$ ; 同理, 包层管 1, 2 内激励光源关闭, 3, 4 内激励光源打开时, 可以实现  $x$  偏振方向的偏振光传输.

## 4 总 结

本文利用有限元分析理论研究 VO<sub>2</sub> 相变对 VO<sub>2</sub>-ARF 传输特性的影响. 研究表明, 在 2.5 THz 波段, VO<sub>2</sub> 的相变会促使 VO<sub>2</sub>-ARF 的反谐振周期发生突变, VO<sub>2</sub> 相变前后, VO<sub>2</sub>-ARF 包层管对入射光束的作用效果会由反谐振状态变为谐振状态, 从而使光纤的损耗急剧增加. 此外, 研究发现 VO<sub>2</sub> 的电导率大小以及薄膜厚度对这一调控现象有很大的影响, 在 ARF 包层管内壁涂敷一层厚度足够的 VO<sub>2</sub>, 通过控制 VO<sub>2</sub> 的相变, 便可实

现对 ARF 包层管反谐振状态的调控. 在此基础上, 提出基于 VO<sub>2</sub>-ARF 的 THz 光开关, 光开关处于“开”、“关”状态时对应的光纤损耗分别为 0.5 dB/m 与 110 dB/m; 此外, 本文提出基于 VO<sub>2</sub>-ARF 的 THz 偏振调控器, 分别控制偏振调控器不同包层管内激励光源的通断, 可以对 VO<sub>2</sub>-ARF 纤芯中入射光的偏振状态以及偏振方向进行调控, 偏振状态下光纤的双折射系数  $\Delta n$  可达到  $1.4 \times 10^{-4}$ .

## 参考文献

- [1] Zhong K, Shi W, Xu D G, Liu P X, Wang Y Y, Mei J L, Yan C, Fu S J, Yao J Q 2017 *Sci. China Ser. E: Technol. Sci.* **60** 1801
- [2] Cassar Q, Al-Ibadi A, Mavarani L, Hillger P, Grzyb J, Grogan G M, Zimmer T, Pfeiffer U R, Guillet J P, Mounaix P 2018 *Biomed. Opt. Express* **9** 2930
- [3] Zhang X, Guo Q, Chang T, Cui H L 2019 *Polym. Test.* **76** 455
- [4] Chen Z, Ma X Y, Zhang B, Zhang Y X, Niu Z Q, Kuang N Y, Chen W J, Li L X, Li S Q 2019 *China Commun.* **16** 1
- [5] Iwaszczuk K, Heiselberg H, Jepsen P U 2010 *Opt. Express* **18** 26399
- [6] Hasan M R, Akter S 2017 *Electron. Lett.* **53** 741
- [7] Barh A, Varshney R K, Agrawal G P, Rahman B M A, Pal B P 2015 *Opt. Lett.* **40** 2107
- [8] Yao H Y, Jiang J Y, Cheng Y S, Chen Z Y, Her T H, Chang T H 2015 *Opt. Express* **23** 27266
- [9] Wang J L, Du M Q, Zhang L L, Liu Y J, Sun W M 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 120702 (in Chinese) [王家璐, 杜木清, 张伶俐, 刘永军, 孙伟民 2015 物理学报 **64** 120702]
- [10] Yu F, Knight J C 2016 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **22** 146
- [11] Kakiuchida H, Jin P, Nakao S, Tazawa M 2007 *Jpn. J. Appl. Phys.* **46** 113
- [12] Liu H W, Wong L M, Wang S J, Tang S H, Zhang X H 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 151908

- [13] Shibuya K, Atsumi Y, Yoshida T, Sakakibara Y, Mori M, Sawa A 2019 *Opt. Express* **27** 4147
- [14] Sánchez L, Lechago S, Sanchis P 2015 *Opt. Lett.* **40** 1452
- [15] Lei D Y, Appavoo K, Ligmajer F, Sonnefraud Y, Haglund R F, Maier S A 2015 *ACS Photonics* **2** 1306
- [16] Kim J T 2014 *Opt. Lett.* **39** 3997
- [17] Huang Q, Ghimire I, Yang J, Fleer N, Chiang K S, Wang Y, Gao S, Wang P, Banerjee S, Lee H W H 2020 *Opt. Lett.* **45** 4240
- [18] Jepsen P U, Fischer B M, Thoman A, Helm H, Suh J Y, Lopez R, Haglund R F 2006 *Phys. Rev. B* **74** 205103
- [19] Liu X, Chen X, Parrott E P J, Han C, Humbert G, Crunteanu A, MacPherson P 2018 *APL Photonics* **3** 051604
- [20] Wang S, Cai C, You M, Liu F, Wu M, Li S, Bao H, Kang L, Werner D H 2019 *Opt. Express* **27** 19436
- [21] Li J H, Zhang Y T, Li J N, Li J, Li J T, Zheng C L, Yang Y, Huang J, Ma Z Z, Ma C Q, Hao X R, Yao J Q 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 228101 (in Chinese) [李佳辉, 张雅婷, 李吉宁, 李杰, 李继涛, 郑程龙, 杨悦, 黄进, 马珍珍, 马承启, 郝璇若, 姚建铨 2020 *物理学报* **69** 228101]
- [22] Park D J, Shin J H, Park K H, Ryu H C 2018 *Opt. Express* **26** 17397
- [23] Chang T, Zhang X, Yang C, Sun Z, Cui H L 2017 *Meas. Sci. Technol.* **28** 045002
- [24] Liang J, Ren L, Chen N, Zhou C 2013 *Opt. Commun.* **295** 257

# Effect of phase transition of vanadium dioxide on resonance characteristics of terahertz anti-resonant fiber and its applications<sup>\*</sup>

Yan Zhong-Bao Sun Shuai Zhang Shuai Zhang Yao Shi Wei<sup>†</sup>  
Sheng Quan Shi Chao-Du Zhang Jun-Xiang  
Zhang Gui-Zhong Yao Jian-Quan

(Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology, Ministry of Education, College of Precision

Instrument & Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

( Received 13 January 2021; revised manuscript received 8 April 2021 )

## Abstract

Terahertz (THz) wave is an electromagnetic wave with frequency in a range of 0.1–10 THz, which possesses excellent photonic and electronic properties. THz wave has higher penetration and lower photon energy to non-polar materials, which makes it possess great academic value in medical, non-destructive testing and other related fields. In addition, the features such as wide bandwidth and large communication capacity of THz wave allow it to be widely used in communication, radar detection and other applications. Despite its rapid development in recent years, THz technology is used still mainly in free space currently and it is difficult to control the transmission direction of THz wave over a long distance in free space. What is more, the transmission of THz waves in free space is affected usually by the dust and water vapor. For achieving the efficient transmission of THz waves, researchers have proposed a variety of THz waveguides, including plastic fiber, Bragg fiber, photonic crystal fiber and anti-resonant fiber (ARF). The ARF confines the incident beam within the air hole of fiber center by the anti-resonance effect, which has aroused great interest because of its simple structure, low transmission loss, high damage threshold, low dispersion, and high transmission bandwidth. At present, adjustable THz fiber devices based on ARF are still reported rarely. In the near-infrared band, researchers have combined ARF with vanadium dioxide (VO<sub>2</sub>) to realize the exceptional modulation effects. The VO<sub>2</sub> is a metal oxide with insulator-metal phase transition when the ambient temperature is near 68 °C, in which its electrical conductivity, dielectric constant and other properties will change drastically. In this paper, the VO<sub>2</sub> is coated on the inner wall of the THz ARF cladding tubes, and the effect of the phase transition of VO<sub>2</sub> on the propagation characteristics of the ARF is studied. Simulation results indicate that in the THz band, the phase transition of VO<sub>2</sub> will cause the anti-resonance period of the ARF to change greatly, in which the confinement effect of the ARF cladding tubes on the incident beam is converted from anti-resonant state to resonant state. Without changing the structure of the ARF, the effective modulation on the THz wave in the core of the ARF can be achieved only by controlling the phase transition of VO<sub>2</sub>, which has a wide application prospect in the field of THz adjustable devices. In this paper, a THz optical switch and a polarization controller based on VO<sub>2</sub>-coated ARF are proposed. With the optical switch being on and off, the corresponding losses are 0.5 dB/m and 110 dB/m respectively at 120 μm. If phase transition of VO<sub>2</sub> is induced by the excitation laser, it is expected to realize a fast-optical switch. Regarding the polarization controller, the polarization state and polarization direction of the THz wave in the core of the ARF can be controlled, and the birefringence coefficient of the ARF in the polarization state is more than  $1.4 \times 10^{-4}$ .

**Keywords:** vanadium dioxide, terahertz, anti-resonant fiber, fiber devices

**PACS:** 87.50.U-, 42.81.-i, 42.70.-a, 42.81.Wg

**DOI:** 10.7498/aps.70.20210084

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62075159).

† Corresponding author. E-mail: [shiwei@tju.edu.cn](mailto:shiwei@tju.edu.cn)