

doi: 10.3788/gzxb20154411.1131001

Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵的光学特性

孙瑶¹, 李毅^{1,2}, 唐佳茵¹, 刘飞¹, 郝如龙¹, 方宝英¹, 王晓华^{1,3}, 肖寒¹,
陈培祖¹, 伍征义¹, 徐婷婷¹, 蒋蔚¹

(1 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

(2 上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093)

(3 上海电力学院 电子与信息工程学院, 上海 200090)

摘 要: 基于 VO₂ 薄膜的热致相变特性, 利用修正的 Sellmeier 色散模型和有限时域差分法计算了 Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵的透过率和反射率, 发现其存在反转效应, 且反转效应受点阵间距、膜层厚度和颗粒半径等参量调控. 随着颗粒间距的增大, 透射谱中谐振峰的位置发生红移, 透过率反转差值增加, 但间距进一步增大时, 反转效应消失. 随着 Au/VO₂ 膜层厚度的减小, 透过率明显增大, 透过率反转差值也随之改变. 随着颗粒尺寸的增大, 相变前后的透过率差值逐渐增大, 但当颗粒尺寸进一步增大时, 透过率反转效应不明显. 对点阵间距、膜层厚度和颗粒半径的优化结果表明, Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵间距为 9.8 nm、VO₂ 层厚度和 Au 层厚度均为 110 nm、颗粒半径为 58 nm 时, 反转效应最明显, 其相对透过率反转差值可达 91%, 其相对反射率反转差值可达 90%.

关键词: 薄膜; 纳米点阵; 有限时域差分; Au/VO₂; 反转效应; 热致相变; 优化

中图分类号: TB33; TB34

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)11-1131001-7

Optical Properties of Au/VO₂ Double-film Nano Array

SUN Yao¹, LI Yi^{1,2}, TANG Jia-yin¹, LIU Fei¹, HAO Ru-long¹, FANG Bao-ying¹,
WANG Xiao-hua^{1,3}, XIAO Han¹, CHEN Pei-zu¹, WU Zheng-yi¹, XU Ting-ting¹, JIANG Wei¹

(1 School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

(2 Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, Shanghai 200093, China)

(3 School of Electric and Information, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Based on the pronounced thermochromism of VO₂, the transmittance and the reflectance of Au/VO₂ double-film nano array were calculated with a modificatory Sellmeier dispersion model and finite difference time domain method. The simulated results show that there is a reversal effect, and the reversal effect is depended on the pitch between particles, the thickness of film and the radius of particle. When the pitch becomes large, the peak position of transmittance appears red-shift, and the transmittance reversal difference of Au/VO₂ double-film nano array obviously increases. The reversal effect will disappear with the pitch further increasing. When the thickness of Au/VO₂ decreases, the transmittance will increase, and the reversal difference will change. The difference of transmittance is bigger with the radius of particle increasing. However, the reversal effect is not obvious while the size of nano particle is futher increasing. By optimizing the pitch, the thickness and the radius of the particle, there is the best reversal effect with 9.8 nm pitch, 110 nm thickness of Au and VO₂, and 58 nm radius at 690 nm. The relative difference of transmittance can reach up to 91%, and relative reflectance difference

基金项目: 国家高技术研究发展计划(No. 2006AA03Z348)、教育部科学技术研究重点项目(No. 207033)、上海市科学技术委员会科技攻关计划(No. 06DZ11415)、上海市教育委员会科研创新重点项目(No. 10ZZ94)和上海市领军人才培养计划资助

第一作者: 孙瑶(1990-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光电子材料. Email: xiaoyao19901004@126.com

导师(通讯作者): 李毅(1964-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光电子材料、光电子器件等. Email: optolyclp@263.net

收稿日期: 2015-06-23; **录用日期:** 2015-08-24

<http://www.photon.ac.cn>

can arrive at about 90%.

Key words: Film; Nano array; Finite difference time domain; Au/VO₂; Reversal effect; Thermochromism; Optimization

OCIS Codes: 160.3900; 160.4236; 160.4760; 160.6840

0 引言

纳米材料^[1]作为纳米科学与技术领域的一个重要组成部分而被广泛应用于光电、生物和化工等领域。纳米材料的尺寸极小,使之具有尺寸效应、量子效应和表面效应等独特的性能,其光学、电学、力学、热学、磁学等性质也随之发生变化。二氧化钒(VO₂)^[2]作为一种热致变色的过渡金属氧化物,由于其相变温度(68 ℃)接近室温而被广泛应用于智能窗、热敏开关、激光防护和光存储等方面。纳米 VO₂ 由于尺寸处于纳米量级,其相变温度和光学透过率均得到显著改善^[3]。

自从 T. W. Ebbesen 等^[4]发现了金属亚波长孔洞周期阵列的超强透射效应(Extraordinary Optical Transmission, EOT)以来,贵金属亚波长结构的研究一直备受关注。Palma. D. Antonio 等^[5]在活性材料 GaN 衬底上沉积 Au 纳米颗粒,利用三维有限时域差分法(Finite Difference Time Domain, FDTD)建模分析该结构的性能,颗粒直径为 230 nm 时局域等离子体共振波长为 633 nm,但共振效应对光偏振的变化不够敏感。目前,对纳米 VO₂ 薄膜的光学性质研究主要集中在 VO₂ 薄膜的微结构与热致红外开关特性的内在关系上^[6]。R. Lopez^[7]等通过精确控制钒氧化学计量比和后续的热退火工艺,在 SiO₂ 衬底上沉积单晶氧化钒纳米颗粒,在近红外波段相变前后的透过率从 20% 上升到 35%。Yabin Zhu 等^[8]采用纳米球刻蚀技术在玻璃衬底上制备了金纳米颗粒,并通过反应磁控溅射法在金/玻璃上沉积氧化钒,通过掺杂有效降低了相变温度,但对如何提升相变前后的透过率及其差值的研究并未涉及。严梦等^[9]利用多孔氧化铝模板溅射金属钒点阵,结合后退火工艺制备 VO₂ 纳米点阵,虽然占空比在 0.83 时降低了相变温度,提高了相变前后的透过率,但只关注了单层 VO₂ 薄膜,对纳米复合薄膜的光开关调控能力仍有待研究。本文从复合材料基体与表面、界面的角度出发,结合贵金属纳米颗粒表面等离子体共振效应与过渡金属氧化物二氧化钒在高低温状态下的相变特性,研究了 Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵的光学特性。

1 理论模型

所设计的 Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵结构如图 1,通过温度诱导 VO₂ 从金属到半导体的相变来调控双层薄膜纳米点阵结构的光学特性。

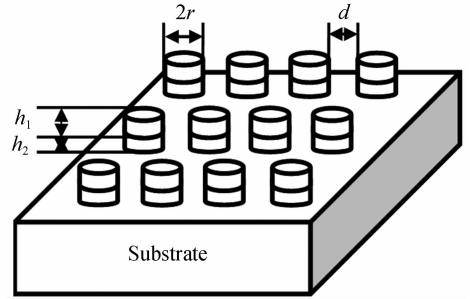


图 1 双层薄膜纳米点阵结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of double-film nano array

双层薄膜纳米点阵以玻璃作为衬底,衬底厚度为 1.5 mm, r 为颗粒半径, d 为点阵间距, h_1 为 VO₂ 薄膜厚度, h_2 为 Au 薄膜厚度,设截面形状为圆形。研究点阵间距、半径以及双层膜厚度等参量对 Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵光学特性的影响。

二氧化钒的光学透过率和反射率主要由复折射率 $N(N = n + ik)$ 和复介电函数 ϵ_1 ($\epsilon_1 = \epsilon' + i\epsilon''$) 所决定,介电函数可以由折射率的实部和虚部来表示

$$\begin{cases} \epsilon' = n^2 - k^2 \\ \epsilon'' = 2nk \end{cases} \quad (1)$$

采用 Sellmeier 方程来拟合 VO₂ 薄膜材料折射率的相关参量,标准形式的 Sellmeier 方程为

$$n^2 = A + B/(1 - C/\lambda^2) + D/(1 - E/\lambda^2) \quad (2)$$

但 VO₂ 的光学参量随温度和波长的变化而改变,且引入点阵结构还需考虑纳米材料本身具有的尺寸效应,故需采用修正的 Sellmeier 模型。采用磁控溅射的方法制备二氧化钒薄膜,并在 400~1 100 nm 范围内通过椭圆仪测定了二氧化钒薄膜在给定温度和波长下的折射率和消光系数,将实验测量值与修正 Sellmeier 方程的计算值进行数值拟合,最终确定修正的 Sellmeier 色散方程为

$$n(t, \lambda) = a_1 + a_2\lambda + \frac{a_3}{\lambda} + \frac{a_4}{\lambda^2} + a_5(t - t_0) + a_6(t - t_0)^2 + a_7(t - t_0)^3 + \frac{[a_8(t - t_0) + a_9(t - t_0)^2]}{\lambda^2} \quad (3)$$

$$k(t, \lambda) = b_1 + \frac{b_2}{\lambda} + \frac{b_3}{\lambda^2} + b_4(t - t_0)^2 + b_5(t - t_0)^3 + \frac{[b_6(t - t_0) + b_7(t - t_0)^2 + b_8(t - t_0)^3]}{(\lambda - b_9)^2} \quad (4)$$

其中,波长范围为 400~1 100 nm, t 为工作温度, t_0 为环境温度,表 1 给出了该模型的特色散参量。

表 1 拟合色散参量

Table 1 Dispersion parameters of fitting

Parameter	Value	Parameter	Value
a_1	3.7792	b_1	-1.1721
a_2	4.7000×10^{-4}	b_2	3.1006×10^3
a_3	-2.8395×10^3	b_3	-1.3565×10^6
a_4	1.4403×10^6	b_4	9.5900×10^{-3}
a_5	2.0780×10^{-2}	b_5	-7.0000×10^{-5}
a_6	-6.5000×10^{-4}	b_6	-2.5960×10^6
a_7	3.2602×10^{-6}	b_7	-2.9428×10^6
a_8	-9.3733×10^3	b_8	2.0215×10^4
a_9	1.1154×10^2	b_9	-1.7108×10^5

纳米点阵结构由于尺度达到纳米量级,金属颗粒结构会产生局域等离子体共振与强烈的近场耦合效应.采用有限时域差分法近似计算双层薄膜纳米点阵的光学特性.通过离散方式将电场 E 和磁场 H 在时间和空间上进行交替抽样,使得每个电场(或磁场)分量周围环绕四个磁场(或电场).将含有时间变量的麦克斯韦旋度方程用离散的方式转变为一组差分方程,在时间轴上逐步推进求解空间电磁场.通过式(3)和(4)分别计算出金属相和半导体相 VO₂ 在不同波长处的折射率 n 和消光系数 k ,再将其带入差分方程,可得到透过薄膜材料的空间电磁场值,即获得光波通过薄膜结构的透过率.同理,可以计算光波通过薄膜结构的反射率.为了研究双层点阵薄膜的光学特性,利用 FDTD Solution 软件进行了模拟仿真,薄膜的横截面为 xy 面,入射光沿 z 轴入射.计算网格取 $1 \text{ nm} \times 1 \text{ nm} \times 1 \text{ nm}$, x,y 方向采用周期性边界条件, z 方向采用完美匹配层(Perfect Matched Layer,PML)边界条件.

2 结果分析

2.1 颗粒间距对 Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵光学特性的影响

对于 VO₂ 纳米颗粒而言,相变前后的光学特性很大程度上依赖于纳米颗粒的间距、大小以及膜层的厚度;金属纳米点阵结构中激发的局域表面等离子体共振,也由点阵间距、大小和膜层厚度所调控^[10-15].为此,首先控制双层薄膜厚度 h_1 和 h_2 均为 100 nm,点阵半径 r 为 70 nm 不变,研究颗粒间距对 Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵光学特性的影响.通过对 Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵进行模拟计算,发现颗粒间距在小于 11.4 nm 时会出现透过率反转特性.图 2 给出了不同颗粒间距的 Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵结构的透射光谱,低温状态下,VO₂ 呈现半导体相,Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵结构具有较低的光学透过率峰值;高温状态下,VO₂ 呈现金属相,反而具有较高的光学透过率峰值,且高温状态下峰值位置略向长波方向移动,即发生红移.

图 2 所示的共振峰是由于阵列中激发的局域等离

子体共振及它们之间的相互作用导致的.费米能级附近导带上的自由电子在电磁场的驱动下会在金属表面集体振荡,并产生局域等离子体激元,当发生共振时电磁场的能量被转变成金属表面自由电子的集体振动能.随着颗粒间距的进一步减小,衬底的透光面积逐渐降低,因而透过率明显下降,驱动共振的能量略有增加,透射谱中谐振峰的位置发生蓝移,透过率反转差值也明显降低.经过大量的数值计算,并将 x 和 y 方向上的计算网格均减小至 0.5 nm,发现在波长为 690 nm 处,点阵间距为 9.8 nm 时,存在最大透过率反转差值.当颗粒间距大于 11.4 nm 时,反转效应会逐渐消失.在近红外区域,呈现出与典型 VO₂ 薄膜材料类似的光学开关特性^[16],即在近红外区域,低温状态下有较高的光学透过率,高温状态下有较低的光学透过率.

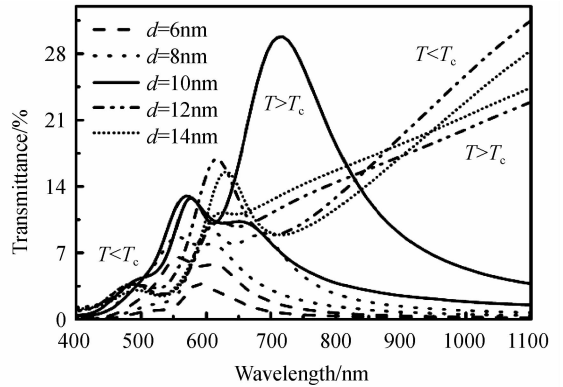


图 2 超小间距下的 Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵的透射光谱
Fig. 2 Simulated transmittance spectra of Au/VO₂ nano array with ultrasmall distance between particles

此外,图 3 给出了不同颗粒间距情况下的 Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵结构的反射光谱.可以看出,高低温状态下反射率均存在最小值,且随着温度的升高,VO₂ 发生相变,谷值发生红移,这与图 2 中高低温峰值位置相对应,因此当颗粒间距小于 11.4 nm 时,在一定波长范围内高温状态下的反射率与低温状态下的反射率存在较大差值,且随着颗粒间距的减小,该波长范围

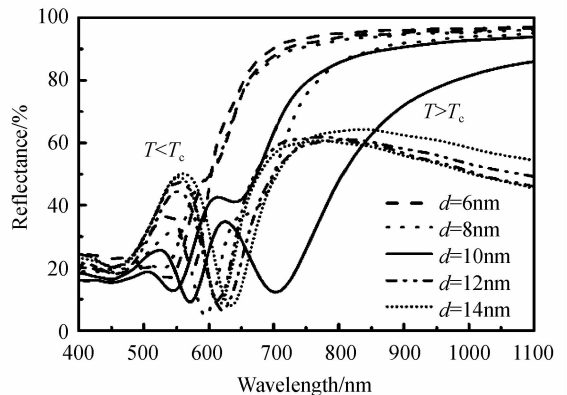


图 3 超小间距下的 Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵的反射光谱
Fig. 3 Simulated reflectance spectra of Au/VO₂ nano array with ultrasmall distance between particles

急剧变窄.

2.2 膜层厚度对 Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵光学特性的影响

2.2.1 Au 膜层厚度对 Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵光学特性的影响

控制颗粒间距为 9.8 nm, 颗粒半径为 70 nm, VO₂ 层厚度为 100 nm 不变, 研究 Au 膜层厚度对 Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵结构光学特性的影响. 图 4 和图 5 分别给出了不同 Au 层厚度的 Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵的透射光谱和反射光谱. 可以看出, 随着 Au 层厚度的减小, 透过率明显增加, 峰值位置略微红移, 经过大量的数值计算, 当 Au 层厚度为 110 nm 时透过率相对较高且透过率反转差值最大. 图 5 中谷值位置与图 4 中峰值位置相对应, 高低温状态下反射率存在较大差值的波长范围整体红移, 但范围大小并没有显著变化. 如果薄膜较薄, 透过率相对较高, 但峰值半宽度也相对较大; 反之, 如果薄膜较厚, 相应的透过率明显下降, 也不利于局域等离子体共振的激发.

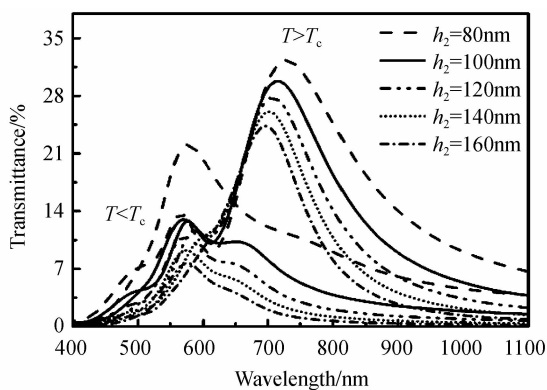


图 4 不同 Au 层厚度的 Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵透射光谱

Fig. 4 Simulated transmittance spectra of Au/VO₂ nano array with different thickness of nanoparticle of Au

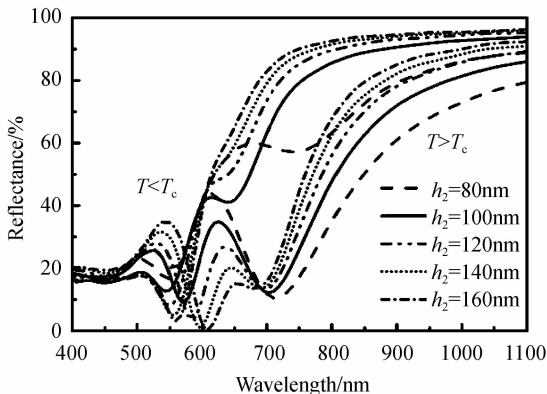


图 5 不同 Au 层厚度的 Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵反射光谱

Fig. 5 Simulated reflectance spectra of Au/VO₂ nano array with different thickness of nanoparticle of Au

2.2.2 VO₂ 膜层厚度对 Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵

光学特性的影响

控制颗粒间距为 9.8 nm, 颗粒半径为 70 nm, Au 层厚度为 110 nm 不变, 研究 VO₂ 层厚度对 Au/VO₂ 双层纳米点阵结构光学特性的影响. 图 6 和图 7 分别给出了不同 VO₂ 层厚度的 Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵的透射光谱和反射光谱. 随着 VO₂ 层厚度的减小, 透过率明显升高, 且峰值位置不发生移动. 同样, 反射率随着 VO₂ 层厚度的改变并没有显著变化, 由此验证了阵列中所激发的局域等离子体共振主要是 Au 材料作用的结果.

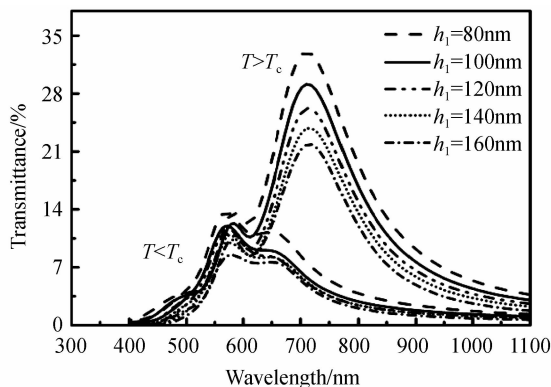


图 6 不同 VO₂ 层厚度的 Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵透射光谱

Fig. 6 Simulated transmittance spectra of Au/VO₂ nano array with different thickness of nanoparticle of VO₂

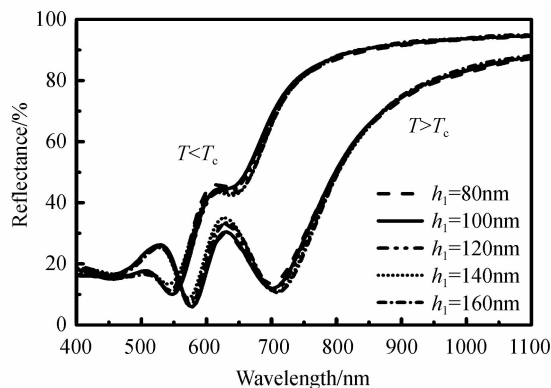


图 7 不同 VO₂ 层厚度的 Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵反射光谱

Fig. 7 Simulated reflectance spectra of Au/VO₂ nano array with different thickness of nanoparticle of VO₂

2.3 颗粒半径对 Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵光学特性的影响

控制颗粒间距为 9.8 nm, VO₂ 层厚度和 Au 层厚度均为 110 nm 不变, 研究颗粒半径对 Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵结构光学特性的影响. 图 8 给出了不同颗粒半径的 Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵光学透过率随波长的变化曲线, 可以看出, 随着颗粒半径的增大, 透过率反转程度有所增加, 峰值位置发生红移, 但尺寸进一步增大, 反转效果不再明显. 其中, 颗粒半径为 58 nm

时高温峰值处的透过率反转有最大差值,约 31.77%。颗粒尺寸对于透射谱的影响是传导电荷和振荡电荷竞争的结果^[17]。随着颗粒尺寸的增大,传导电荷逐渐增多,等离子体共振强度增强,但相位延迟又会削弱传导电荷的数量,减少在共振频率上集体振荡的电子数目。当颗粒尺寸较小时,传导电荷增加的作用超过了相位延迟的作用,因而透过率逐渐增大,但随着颗粒尺寸的进一步增加,相位延迟效应超过了传导电荷增加的数量时,透过率逐渐降低。

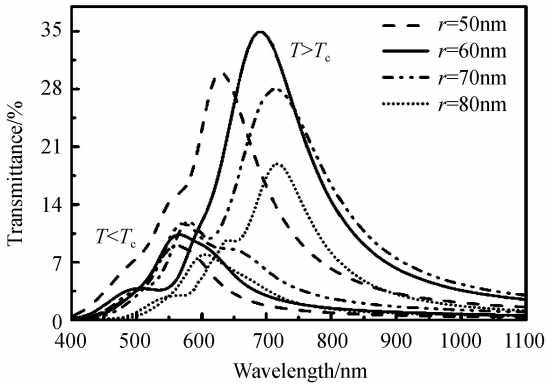


图 8 不同颗粒半径 Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵的透射光谱
Fig. 8 Simulated transmittance spectra of Au/VO₂ nano array with different radii of nanoparticles

图 9 给出了不同颗粒半径的 Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵结构的反射光谱,可以看出,随着颗粒半径的增大,谷值发生红移,高低温状态下的反射率存在差值的波长范围先增大后减小,同时,在短波长处,该点阵结构的反射率存在峰值,这主要是 Au 材料在超小间距下等离子共振耦合作用的结果。

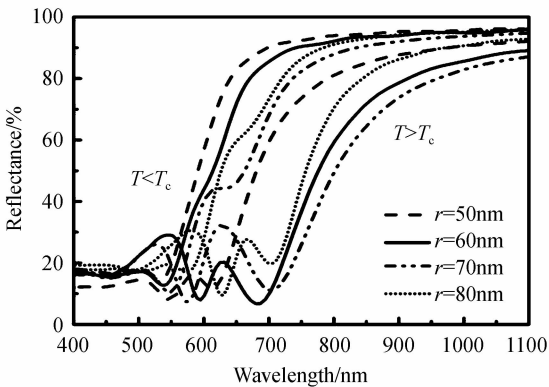
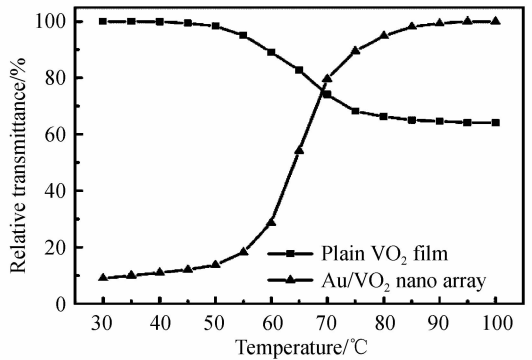


图 9 不同颗粒半径 Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵的反射光谱
Fig. 9 Simulated reflectance spectra of Au/VO₂ nano array with different radii of nanoparticles

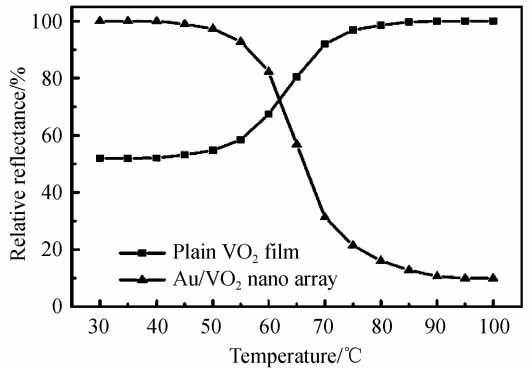
为了在 690 nm 处获得最大透过率反转效应,对点阵间距、膜层厚度和颗粒半径进行了优化,得到了最优结构参量: Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵间距 d 为 9.8 nm, VO₂ 层厚度 h_1 和 Au 层厚度 h_2 均为 110 nm, 颗粒半径 r 为 58 nm。为了更好地表征 Au/VO₂ 纳米结构相变前后的光学特性,引入了相对透过率和相对反

射率,相对透过率和相对反射率都是将高温或低温状态下相对较高的值定义为 100%。

图 10 分别给出了 VO₂ 薄膜和 Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵在 690 nm 处的相对透过率和相对反射率随温度变化的曲线,其中 Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵的颗粒半径为 58 nm,颗粒间距为 9.8 nm, Au 层和 VO₂ 层厚度均为 110 nm。从图中可以看出,高温状态下 VO₂ 薄膜具有较低的相对透过率、较高的相对反射率,而低温状态下具有较高的相对透过率、较低的相对反射率;但对于 Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵,随着温度升高,VO₂ 从半导体相到金属相转变,高温金属相呈现高的相对透过率、低的相对反射率,而低温半导体相呈现低的相对透过率、高的相对反射率,出现了反常的反转效应。分别比较图 10(a)和(b)中的两条曲线可以明显看出,两条曲线形状相似,趋势相反,且双层纳米点阵结构的相对透过率差值达到约 91%,相对反射率差值达到约 90%,而 VO₂ 薄膜结构的相对透过率差值则只有约 36%,相对反射率差值约 48%。



(a) Relative transmittance



(b) Relative reflectance

图 10 VO₂ 薄膜和 Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵在 690 nm 处相对透过率和相对反射率随温度的变化曲线

Fig. 10 Curves of relative transmittance-temperature and relative reflectance-temperature at 690 nm of VO₂ film and Au/VO₂ nano array

一方面,这种反转效应是由于 Au 是光厚介质,入射光不能穿过点阵区域,只能以消逝波的形式通过,并且在 Au 与 VO₂ 界面存在的额外散射,使得 VO₂ 层成为了损耗材料,对于进入 VO₂ 层的光通量很大程度上

依赖 VO₂ 材料在金属相和半导体相的光学常量, 尤其依赖 VO₂ 与周围空气介电常量的比值^[18], 较高的介电常量比值会增加损耗. 在 690 nm 处 VO₂ 处于高温状态下的介电常量与空气介电常量之间的比值明显小于低温状态下的介电常量比值, 因此 VO₂ 在金属相相对半导体相透过率存在较大增强. 另一方面, 当 VO₂ 处于金属相时, 粒子中的自由电子浓度急剧增加, 引起电子间的库伦排斥和原子核的吸引, 使电子向相反方向移动, 进入 VO₂ 层的光激发电子纵向震荡. 对于超小间距的纳米点阵, 谐振发生时能量多集中在颗粒之间, 相邻颗粒间的耦合作用急剧增强^[19], 也在一定程度上增加了局域电磁场的强度. 因此, 这种反转行为是由电介质匹配条件和等离子体耦合共同作用的结果^[20].

3 结论

利用修正的 Sellmeier 色散模型和有限时域差分法计算了 Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵的透过率和反射率, 揭示了该结构的反转效应. 结果表明, 颗粒间距在小于 11.4 nm 时存在透过率反转效应, 当间距为 9.8 nm 时点阵结构透过率相对较高, 且反转差值较大. 该效应也受到膜层厚度和颗粒半径的调控. 随着 Au 膜层厚度的减小, 透过率逐渐增大, 但峰值半宽度也随之增加, 在 Au 膜层厚度为 110 nm 时, 透过率相对较大, 反转效应较明显; 随着 VO₂ 厚度的减小, 透过率逐渐增加, 但 VO₂ 层厚度不影响峰值位置, 透过率反转差值逐渐增大. 随着颗粒尺寸的增大, 相变前后的透过率差值有所增加, 但颗粒尺寸进一步增大, 反转效应不再明显. Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵的光学透过率随着相变的发生而产生很大的变化, 相对典型 VO₂ 纳米薄膜在接近 2 000 nm 处的开关效应, 这种结构明显增加了 VO₂ 作为光开关的工作范围. 通过改变结构参量对 Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵的光学特性进行调控, 也为新型光电器件领域提供了新的材料结构.

参考文献

- [1] SI Min-zhen, FANG Yan, DONG Gang, *et al.* Research on nano-silver colloids prepared by microwave synthesis method and its SERS activity[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5): 1034-1037.
司民真, 方炎, 董刚, 等. 微波加热法快速制备纳米银及其 SERS 活性研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(5): 1034-1037.
- [2] MORIN F J. Oxides which show a metal-to-insulator transition at the neel temperature[J]. *Physical Review Letters*, 1959, **3**(1): 34-36.
- [3] LIANG Ji-ran, HU Ming, WANG Xiao-dong, *et al.* Fabrication and infrared optical properties of nanovanadium dioxide thin films[J]. *Acta Physico Chimica Sinica*, 2009, **25**(8): 1523-1529.
梁继然, 胡明, 王晓东, 等. 纳米二氧化钒薄膜的制备及红外光学性能[J]. *物理化学学报*, 2009, **25**(8): 1523-1529.
- [4] EBBESEN T W, LEZEC H J, GHAEMI H F, *et al.* Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays[J]. *Nature*, 1998, **391**(6668): 667-669.
- [5] PALMA D A, ALESSIO V I. Localized surface plasmon resonances in gold nano-patches on a gallium nitride substrate[J]. *Nanotechnology*, 2012, **23**(45): 455709-1-7.
- [6] YU Xiao-jing, LI Yi, WANG Hai-fang, *et al.* Infrared optical properties of VO₂ nano-array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(6): 1120-1124.
俞晓静, 李毅, 王海方, 等. 二氧化钒纳米点阵红外光学特性研究[J]. *光子学报*, 2010, **39**(6): 1120-1124.
- [7] LOPEZ R, BOATNER L A, HAYNES T E. Synthesis and characterization of size-controlled vanadium dioxide nanocrystals in a fused silica matrix[J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, **92**(7): 4031-4036.
- [8] ZHU Yabin, NA Jie, HE Fan, *et al.* The characteristics of Au₂VO₂ nanocomposite thin film for photo-electricity application[J]. *Physica E-low-dimensional Systems & Nanostructures*, 2013, **52**: 112-115.
- [9] YAN Meng, LI Yi, FANG Bao-ying, *et al.* Preparation and Infrared optical properties of VO₂ nano array[J]. *Rare Metals*, 2014, **43**(3): 738-741.
严梦, 李毅, 方宝英, 等. 二氧化钒纳米点阵的制备及其红外光学特性研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2014, **43**(3): 738-741.
- [10] LOPEZ R, SUH J Y, FELDMAN L C, *et al.* Ion beam lithographic fabrication of ordered VO₂ nanoparticle arrays[J]. *Materials Research Society*, 2004, **820**: R1. 5. 1-1. 5. 6.
- [11] LI Yao, ZHU Ya-bin, DI Yue, *et al.* Fabrication of ordered Au nanoparticles array and its optical absorption properties[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(19): 198101.
李姚, 朱亚彬, 狄月, 等. 有序金纳米颗粒阵列的制备及光吸收特性研究[J]. *物理学报*, 2013, **62**(19): 198101.
- [12] ZHONG Hui. Research on the surface plasmon resonance and the photoelectric properties of Ag nano-meter material[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2012.
钟慧. 基于表面等离子体共振效应的 Ag 纳米材料光电性能的研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2012.
- [13] BAI Wen-li, GUO Bao-shan, CAI Li-kang, *et al.* Simulation of light coupling enhancement and localization of transmission field via subwavelength metallic gratings[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(11): 8022-8025.
白文理, 郭宝山, 蔡利康, 等. 亚波长金属光栅的光耦合增强效应及透射局域化的模拟研究[J]. *物理学报*, 2009, **58**(11): 8022-8025.
- [14] LIU Kai. The calculation of photonic crystal band Gap using the FDTD method [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2005.
刘锴. 光子晶体带隙时域有限差分方法计算[D]. 北京: 北京工业大学, 2005, 36-37.
- [15] LUO Yun-han, MAO Pei-ling, CHEN Chao-ying, *et al.* Side-polished fiber coupled plasmon resonance based on triangle nano-rod array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(4): 0406004.
罗云瀚, 毛培玲, 陈超英, 等. 光纤耦合三角形金柱阵列的等离子体共振[J]. *光子学报*, 2015, **44**(4): 0406004.
- [16] ZHU Hui-qun, LI Yi, WANG Hai-fang, *et al.* Infrared optical properties of thermochromic energy-saving thin films with nanostructure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2794-2799.
朱慧群, 李毅, 王海方, 等. 热致变色纳米节能薄膜红外光学特性[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2794-2799.
- [17] ZHOU Xin. Researches on manipulation of surface plasmon

and optical properties in periodic metallic nanostructures[D].
Changsha: Central South University,2012.

周欣. 金属纳米周期结构表面等离子体及光学特性调控研究
[D]. 长沙:中南大学,2012.

- [18] BOGAERTS W, BIENSTMAN P, TAILLAERT D, *et al.* Out-of-plane scattering in photonic crystal slabs[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, **13**(6): 565-567.
- [19] LÚ Jiāng-chāo, ZHAO Yu-qing, SONG Ai-juan, *et al.*

Tuning surface plasmons in nanorod arrays with ultrasmall spacing[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(23): 237806.

吕江涛,赵玉倩,宋爱娟,等. 超小间距纳米柱阵列中的谐振调制[J]. 物理学报, 2013, **62**(23): 237806.

- [20] LOPEZ R, FELDMAN L C, HAGLUND R F. Size-dependent optical properties of VO₂ nanoparticle arrays[J]. *Physical Review Letters*, 2004, **93**(17): 177403.

Foundation item: The National High Technology Research and Development Program of China (No. 2006AA03Z348), the Foundation for Key Program of Ministry of Education, China (No. 207033), the Science and Technology Research Projects of Shanghai Science and Technology Commission, China (No. 06DZ11415), the Key Science and Technology Research Project of Shanghai Committee, China (No. 10ZZ94), and the Shanghai Talent Leading Plan, China