

基于二氧化钒的双开口谐振环太赫兹透射调控*

陈善卓¹, 宋阳², 高亚臣¹

(1. 黑龙江大学 电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 辽宁省朝阳师范高等专科学校信息工程系, 辽宁 朝阳 122000)

摘要: 基于二氧化钒(VO_2)的温致金属-绝缘体相变特性, 利用双开口谐振环, 设计了透射频率可调的太赫兹器件。利用时域有限差分法(FDTD)理论研究了该结构的透射特性。结果表明, 当外界温度从 25 °C 升高至 85 °C, 超过二氧化钒的相变温度(68 °C)时, 在 0.63 THz 和 1.91 THz 处的透射率由 6.3% 和 0.5% 增加至 66.6% 和 45.2%, 调制深度分别达到 82.7% 和 97.8%, 表现出良好的可调特性。具体分析了谐振吸收的机理以及温度调控的过程。

关键词: 二氧化钒; 太赫兹透射; 双开口谐振环; 时域有限差分法

中图分类号: TN202

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200527

中文引用格式: 陈善卓, 宋阳, 高亚臣. 基于二氧化钒的双开口谐振环太赫兹透射调控[J]. 电子技术应用, 2020, 46(9): 132-136.

英文引用格式: Chen Shanzhuo, Song Yang, Gao Yachen. VO_2 based modulation of double split ring resonator THz transmission[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(9): 132-136.

VO_2 based modulation of double split ring resonator THz transmission

Chen Shanzhuo¹, Song Yang², Gao Yachen¹

(1. College of Electronic Engineering, Heilongjiang University, Harbin 150080, China;

2. Department of Information Engineering, Chaoyang Teachers' College, Chaoyang 122000, China)

Abstract: A terahertz(THz) device with tunable transmission frequency was designed based on the metal-insulator phase transition characteristics of VO_2 and double split ring resonator. The transmission characteristics of the structure are studied by using the finite-difference time-domain(FDTD) theory. The results show that when the external temperature rises from 25 °C to 85 °C and exceeds the phase transition temperature of VO_2 (68 °C), the transmittivity at 0.63 THz and 1.91 THz increases from 6.3% and 0.5% to 66.6% and 45.2%, and the modulation depth reaches 82.7% and 97.8% respectively, showing good tunable characteristics. The mechanism of resonant absorption and the process of temperature control are analyzed.

Key words: VO_2 ; terahertz transmission; double split ring resonator; finite difference time domain method

0 引言

太赫兹波(Terahertz, THz 波)是指频率在 100 GHz~10 THz, 波长为 0.3~30 mm 范围的电磁波^[1], 是电磁波谱上最后一个被开发的频率窗口, 广泛应用在医学成像和病理分析^[2-5]、显微镜技术^[6-7]、生物分子的无损检测^[8]、高速通信^[9-11]、宇宙空间遥感与探测^[12]等方面。在太赫兹技术的发展进程中, 设计和制造在太赫兹波段下的调控器件始终占据着十分重要的地位, 人们通过改变材料结构和组成来获得一些超常特性的人工材料, 其性能超过常规的天然材料。早期, PENDRY J B 等人通过设计周期金属细线阵列和金属开口谐振环阵列, 验证了微波波段下的负介电常数和负磁导率的存在^[13-14], 而后人们通过缩小谐振环的结构尺寸将负磁导率扩展至太赫兹波段^[15-16]。

近十几年来, 人们开始广泛关注太赫兹波段下的超材料, 2012 年, LI Z 教授等人^[17]证明了环形谐振器组成的多层微结构具有宽带截止滤波器的特性; 2013 年, Chen Houtong 教授课题组^[18]利用金属亚波长线栅设计了一种基于超薄平面超材料的高效宽带太赫兹线性振转换器并得到近乎完美的反常折射; 2016 年美国西北大学 Sun 教授团队^[19]通过 3D 打印技术设计制作了一种太赫兹超材料透镜, 0.4~0.6 THz 频率范围使其成像分辨率接近衍射极限同时获得了更优于均匀球面透镜的成像能力, 然而上述结构都为太赫兹被动器件, 其尺寸或结构一旦固定频谱响应也随之固定, 针对这种情况, 许多学者引入了温度场^[20-21]、电场^[22-23]、磁场^[24]、机械场^[25]、光场^[26-27], 提出了各种结构的可调控的超材料, 来对太赫兹波段的超材料进行动态调控。

近年来, 二氧化钒(Vanadium dioxide, VO_2)因具有典

* 基金项目: 黑龙江省自然科学基金(F2018027); 黑龙江大学大学生创新项目(2019010)

光电子与激光 Photoelectron and Laser

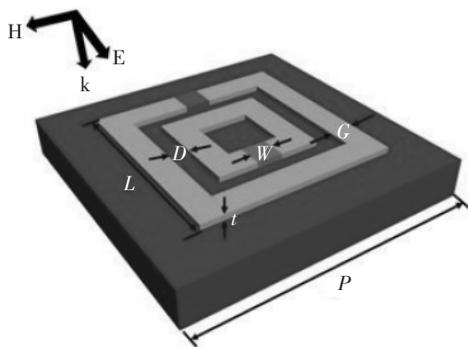
型的可逆绝缘体-金属相变特性,在众多领域得到广泛应用。例如,KANG L等人^[28]采用聚合物辅助沉积的溶胶-凝胶法制备了均匀、纳米级的多孔VO₂薄膜,为智能窗的研究奠定了基础;宁永刚等人^[29]提出了利用VO₂良好的光电性能将其用作红外探测器的激光防护材料。二氧化钒的晶格结构在低温时表现为单斜金红石结构,当温度升高超过其相变温度(68℃)时变化为四方金红石结构^[30],即在低于68℃时为绝缘相,表现为绝缘体;高于68℃时为金属相,表现为导体,VO₂独特的性质可为太赫兹波的动态调控提供一份思路^[31-32]。

双开口谐振环(Double Split Ring Resonator, DSRR)最早由PENDRY J B等人^[14]提出,是构造超材料的典型结构,内环与外环之间的电容以及电感的影响能增加谐振频率。由此,本文设计了一款周期性双开口谐振环并在两个开口处放置VO₂材料的阵列模型,利用FDTD solution软件研究了其温度调控特性。

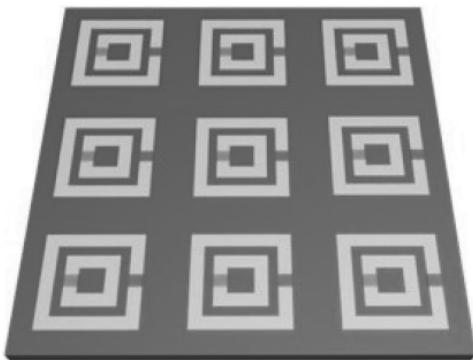
1 结构与仿真

图1(a)是模型单元的3D结构,其中 $P=44\ \mu\text{m}$, $L=30\ \mu\text{m}$, $W=G=4\ \mu\text{m}$, $D=3\ \mu\text{m}$ 。图1(b)为该结构的阵列模型,排列方式为周期性排布。谐振环材质为金,开口处为二氧化钒,其厚度 t 为200 nm,使用的是介电常数 $\varepsilon=10.5$ 的蓝宝石基底。入射光采用平面光源垂直入射,电场方向平行于开口方向。

因为VO₂可在绝缘相和金属相之间切换,设VO₂薄



(a)该结构的一个单元,用平面波垂直入射



(b)在蓝宝石基底上周期性排布的DSRR

图1 该模型的3D结构

膜中绝缘相组分与金属相组分的介电函数分别为 ε_D 和 ε_M 。其复合介电常数为^[33]:

$$\varepsilon_C = \varepsilon_D(2-3f) + \varepsilon_M(3f-1) + \sqrt{[\varepsilon_D(2-3f) + \varepsilon_M(3f-1)]^2 + 8\varepsilon_D\varepsilon_M} \quad (1)$$

其中, f 为金属组分的体积分。VO₂中绝缘组分的介电常数 ε_D 取常数9,其中的金属组分介电常数 ε_M 可使用Drude模型来描述^[33]:

$$\varepsilon_M(\omega) = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega/\tau} \quad (2)$$

其中, ω 为频率, ε_∞ 是VO₂的高频极限介电常数, $\tau=2.2\ \text{fs}$ 为载流子碰撞时间, ω_p 为等离子频率,其公式为:

$$\omega_p = \sqrt{Ne^2 - \varepsilon_0 m^*} \quad (3)$$

N 为介质内部载流子浓度,取 $N=1.3 \times 10^{22}\ \text{cm}^{-3}$; m^* 为有效质量,取 $m^*=2\ m_e$; ε_0 为真空介电常数;对于VO₂薄膜^[34], $\varepsilon_\infty = \varepsilon_D = 9$ 。

此外,对于VO₂材料中金属组分的体积分 f 与温度对应的关系可用Boltzmann函数来表示:

$$f(T) = f_{\text{max}} \left(1 - \frac{1}{1 + \exp[(T - T_0)/\Delta T]} \right) \quad (4)$$

其中 T 为外界温度, $T_0=68\ ^\circ\text{C}$,为二氧化钒的相变温度;过渡温度 $\Delta T=2\ ^\circ\text{C}$; f_{max} 是最高温度下VO₂的金属体积分,经实验测得 $f_{\text{max}}=0.95$ ^[35]。

从式(1)、式(4)中可以看出VO₂的介电常数对温度特别敏感,因此可以预测带有VO₂的超材料在环境温度发生变化时,会引起不同的光谱响应。利用上述四个公式,可计算出VO₂在一定温度下不同频率对应的不同的介电常数,进而计算出VO₂一定温度下不同频率对应的折射率。选用了25℃、66℃、68℃、70℃和85℃5个温度用作透射研究,将结构参数代入到FDTD solution软件中进行仿真,仿真频段为0.5~3 THz,仿真过程在真空条件下进行,采用周期性边界条件,在不同温度下计算出了相应的太赫兹波的透射光谱。

2 结果与讨论

图2为不同温度下结构的透射曲线。其中25℃和66℃的透射曲线中波谷位置与透射率极值基本相同,在1.9~2.1 THz下谱线几乎重合。随着环境温度升高至68℃时,谱线发生巨大变化,当温度继续升高时,透射率极小值会继续减小,且波谷变窄,温度增加至70℃和85℃时,透射曲线基本保持不变。

当温度处在25℃时,VO₂的金属体积分 f 趋近于0表现为绝缘体的特性,从透射曲线中可以看到该结构在0.63 THz、1.53 THz和1.91 THz处透射率会急剧地下降,达到一个最小值,分别对应为6.3%、11.9%和0.5%。当温度升高至66℃时,VO₂的金属体积分 f 变为0.27,在0.63 THz和1.91 THz处透射率变化幅度小于1%近乎为零,只是中间的波谷发生微小的红移,即从1.53 THz变化至1.48 THz,对应的透射率略微增大从

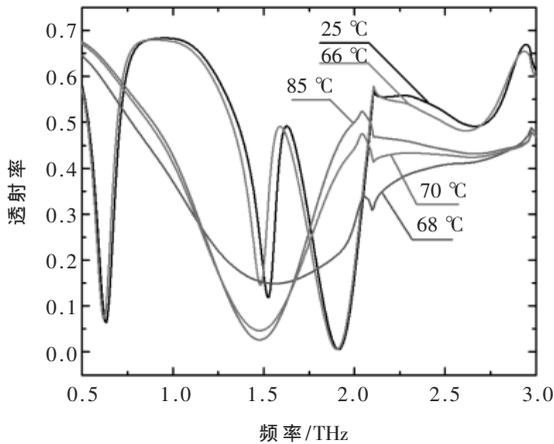


图2 该模型在0.5~3 THz下分别选取25 °C、66 °C、68 °C、70 °C和85 °C的透射曲线

11.9%变化至14.6%。而当温度升高至二氧化钒的相变温度68 °C时,VO₂的金属体积分数 f 变为0.48,透射曲线发生极大改变:在0.63 THz和1.91 THz处的透射率大幅提高,其波谷消失,而中间的波谷变宽。温度升高至70 °C时,透射曲线较66 °C出现波谷变窄,透射率极小值变小的现象,在1.47 THz处达到透射最小值,即从68 °C的14.9%降低至70 °C的4.6%。当温度继续升高至85 °C时,VO₂的金属体积分数 $f=0.91$ 表现为导体的特性,从透射曲线中可以看到仅在1.48 THz处透射率再次下降变为2.7%,在1.70~3 THz区间内透射率略有提高,其他频段基本保持不变。

由图2及上述分析可以看出,当外界温度升高时,该结构的频谱特性也随之发生改变,特别是当外界温度加热到68 °C以上时,波谷个数由三个变为一个,透射率低于15%的极值点也由三个变为一个。例如在0.63 THz和1.91 THz处,25 °C下对应的透射率为6.3%和0.5%,而当温度升高至85 °C时,对应的透射率为66.6%和45.2%,调制深度分别达到82.7%和97.8%,这时只留下了中心频率处的单个波谷,从而成功地在0.63 THz和1.91 THz附近频率处实现了由反射到透射的转变。因此,通过主动改变环境温度,可以灵活调控太赫兹波的透射和反射,成功实现二氧化钒对双开口谐振环的太赫兹透射调控。其原因是当器件被加热到VO₂相变温度以上时,VO₂的载流子浓度骤增,从绝缘体转变为导体,此时在结构上双开口谐振环转变为环形谐振器,谐振环形状的变化引起了谐振频率的变化,根据这个性质可将此结构用作可调谐功能器件、光开关等。

由于二氧化钒发生相变的响应时间极短,仅有几皮秒^[36],因此,当外界温度在25 °C~66 °C和70 °C~85 °C范围内变化时,透射率的变化幅度非常小,而当温度在相变温度(68 °C)附近变化时透射曲线发生了极大变化,正是利用VO₂对外界温度敏感的特性设计了这款调制器,相较于光场、电场等调控方式无疑更加方便,易于操作。

图3为该结构在25 °C时分别在0.63 THz、1.53 THz和1.91 THz三个透射率极小值处以及85 °C、1.48 THz处的电场分布图。从图中很容易看到,当外界温度为25 °C时,三个透射率波谷分别是外环单独作用、内环单独作用和内外环共同作用的结果,且(a)(b)两图的电场主要分布在谐振环开口处,因为此时温度较低,二氧化钒呈绝缘态,谐振环的电容响应明显,电荷密度高,电场强度较大。频率继续升高至1.91 THz处时,如(c)图所示,电荷向谐振环四周移动,电荷密度下降,整体电场强度也随之下降。

当温度升高至85 °C时,该结构在1.48 THz处的电场分布如(d)图所示,从中可以看出其整体的电场强度相较于25 °C所对应的有了大幅下降,由于环境温度的升高导致了二氧化钒中载流子浓度的增加,表现出更多的金属特性因此不利于电容响应,整体结构由双开口谐振环过渡至环形谐振器,电荷集中于在内外环之间而不是开口处,且电场强度发生明显减小。

3 结论

综上所述,本文展示了一种新型的可调太赫兹双开口谐振环,在谐振环开口处加入了VO₂薄膜,该结构的透射特性随温度的升高而显著变化,其温度依赖特性可归因于VO₂中的自由载流子密度随温度的升高而增加,即从绝缘体转变为导体。为阐明该结构的频率协调特性,利用FDTD solution仿真软件计算了在不同温度下器件的透射特性以及波谷处的电场分布,表现出了良好的可协调性,在未来可用作新型的可调谐功能器件或者光开关等,并且为温控太赫兹可调谐器件及其他功能器件的研究和开发提供了新的思路。

参考文献

- [1] 安国雨.太赫兹技术应用与发展研究[J].环境技术,2018(2):25-28.
- [2] HU B B, NUSS M C. Imaging with terahertz waves[J]. Optics Letters, 1995, 20(16): 1716.
- [3] COLE B E, WOODWARD R M, CRAWLEY D A, et al. Terahertz imaging and spectroscopy of human skin in vivo[C]. Proceedings of Spie the International Society for Optical Engineering, 2001, 4276.
- [4] WOODWARD R M, WALLACE V P, PYE R J, et al. Terahertz pulse imaging of ex vivo basal cell carcinoma[J]. Journal of Investigative Dermatology, 2003, 120(1): 72-78.
- [5] SY S, HUANG S Y, XIANG Y. Terahertz spectroscopy of liver cirrhosis: investigating the origin of contrast[J]. Physics in Medicine & Biology, 2010, 55(24): 7587-7596.
- [6] PLAUT S, BARABASH S, BRUZZONE L, et al. Jupiter Icy Moons Explorer(JUICE): science objectives, mission and instruments[C]. Lunar & Planetary Science Conference, 2014.
- [7] KIWA T, TONOUCHE M, YAMASHITA M, et al. Laser terahertz-emission microscope for inspecting electrical faults

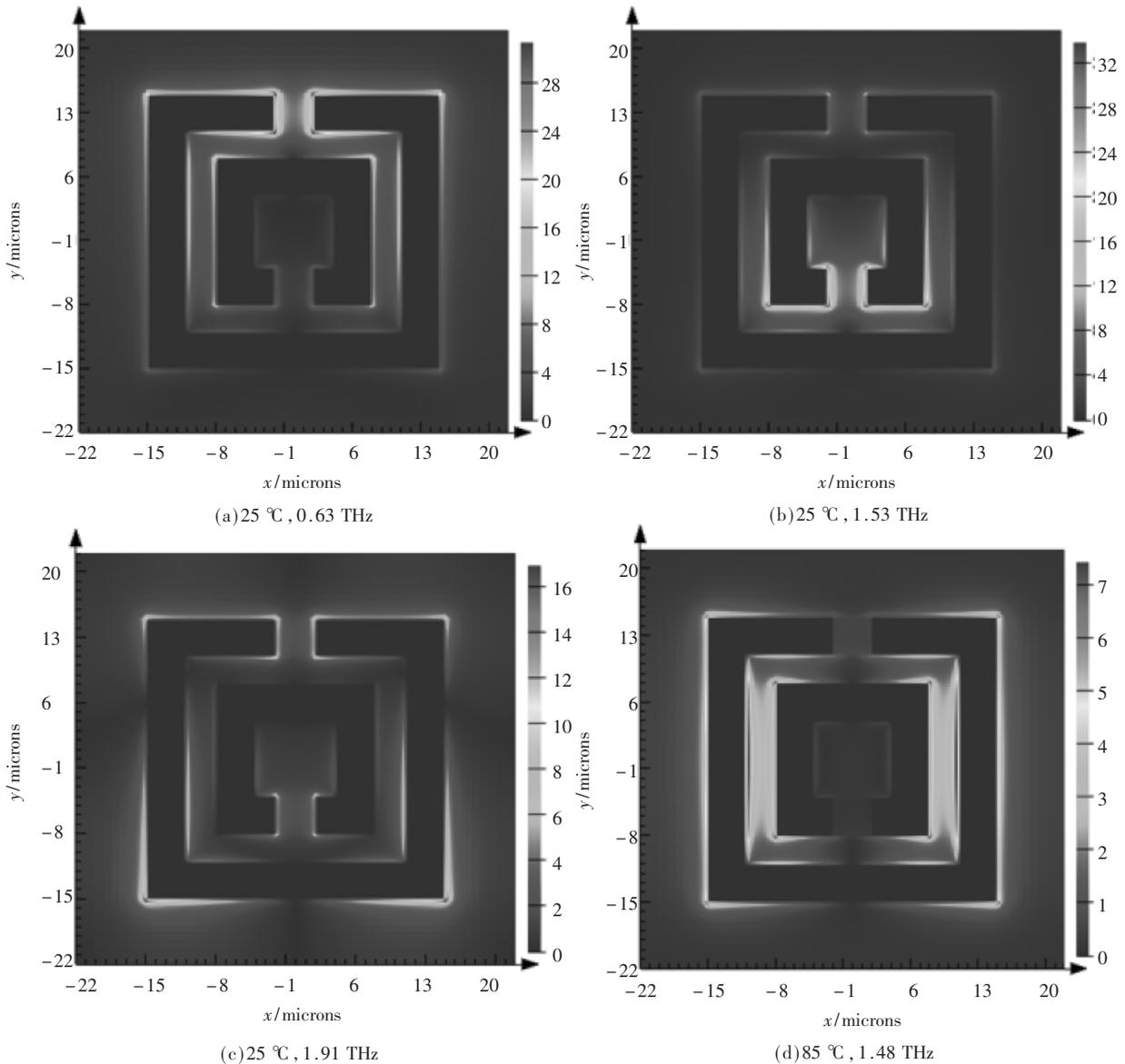


图3 在 25 和 85 °C 透射率极小值位置处对应的电场分布图

in integrated circuits[J].Optics Letters, 2003, 28(21): 2058-2060.

- [8] FALCONER R J, MARKELZ A G. Terahertz spectroscopic analysis of peptides and proteins[J]. Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves, 2012, 33(10): 973-988.
- [9] FEDERICI J, MOELLER L. Review of terahertz and subterahertz wireless communications[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 107(11): 111101.
- [10] SONG H J, NAGATSUMA T. Present and future of terahertz communications[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology, 2011, 1(1): 256-263.
- [11] KLEINE-OSTMANN T, NAGATSUMA T. A review on terahertz communications research[J]. Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves, 2011, 32(2): 143-171.
- [12] 戴宁, 葛进, 胡淑红, 等. 太赫兹探测技术在遥感应用中

的研究进展[J]. 中国电子科学研究院学报, 2009, 4(3): 231-237.

- [13] PENDRY J B, HOLDEN A J, STEWART W J, et al. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures[J]. Physical Review Letters, 1996, 76(25).
- [14] PENDRY J B, HOLDEN A J, ROBBINS D J, et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena[J]. IEEE Transactions Microwave Theory & Techniques, 1999, 47(11): 2075-2084.
- [15] YEN T J, PADILLA W J, FANG N, et al. Terahertz magnetic response from artificial materials[J]. Science, 2004, 303(5663): 1494-1496.
- [16] LINDEN S. Magnetic response of metamaterials at 100 terahertz[J]. Science, 2004, 306(5700): 1351-1353.
- [17] LI Z, DING Y J. Terahertz broadband-stop filters[J].

- IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(1): 1-5.
- [18] NATHANIEL K, GRAD Y, JANE E, et al. Terahertz metamaterials for linear polarization conversion and anomalous refraction[J]. Science, 2013, 340(6138): 1304-7.
- [19] ZHOU F, CAO W, DONG B, et al. Additive manufacturing of a 3D terahertz gradient-refractive index lens[J]. Advanced Optical Materials, 2016, 4(7).
- [20] ZHU Y, VEGESNA S, ZHAO Y, et al. Tunable dual-band terahertz metamaterial bandpass filters[J]. Optics Letters, 2013, 38(14): 2382.
- [21] ZHU J, HAN J, TIAN Z, et al. Thermal broadband tunable Terahertz metamaterials[J]. Optics Communications, 2011, 284(12): 3129-3133.
- [22] VALMORRA F, SCALARI G, MAISSEN C, et al. Low-bias active control of terahertz waves by coupling large-area CVD graphene to a terahertz metamaterial [J]. Nano Letters, 2013, 13(7): 3193-3198.
- [23] LEE S, LEE K E, LEE W J, et al. Two-terminal graphene oxide devices for electrical modulation of broadband terahertz waves [J]. Advanced Optical Materials, 2015, 4(4): 548-554.
- [24] RICCI M C, XU H, PROZOROV R, et al. Tunability of superconducting metamaterials[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, 17(2): 918-921.
- [25] PRYCE I M, AYDIN K, KELAITA Y A, et al. Highly strained compliant optical metamaterials with large frequency tunability[J]. Nano Letters, 2010, 10(10): 4222-4227.
- [26] JANKE C, RIVAS J G, BOLIVAR P H, et al. All-optical switching of the transmission of electromagnetic radiation through subwavelength apertures[J]. Optics Letters, 2005, 30(18): 2357-2359.
- [27] PADILLA W J, TAYLOR A J, HIGHSTRETE C, et al. Dynamical electric and magnetic metamaterial response at terahertz frequencies[J]. Physical Review Letters, 2006, 96(10): 107401.
- [28] KANG L, GAO Y, LUO H, et al. Nanoporous thermochromic VO₂ films with low optical constants, enhanced luminous transmittance and thermochromic properties[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2011, 3(2): 135-138.
- [29] 宁永刚, 孙晓泉. 二氧化钒薄膜在激光防护上的应用研究[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(5): 530-534.
- [30] MORIN F J. Oxides which show a metal-to-insulator transition at the neel temperature[J]. Physical Review Letters, 1959, 3(1): 34-36.
- [31] Shi Qiwu, Huang Wanxia, Zhang Yaxin, et al. Giant phase transition properties at terahertz range in VO₂ films deposited by sol-gel method[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2011, 3(9): 3523-3527.
- [32] WANG D, ZHANG L, GU Y, et al. Switchable ultrathin quarter-wave plate in terahertz using active phase-change metasurface[J]. Scientific Reports, 2015(5): 15020.
- [33] FAN F, HOU Y, JIANG Z W, et al. Terahertz modulator based on insulator-metal transition in photonic crystal waveguide[J]. Applied Optics, 2012, 51(20): 4589.
- [34] CHOI H S, AHN J S, JUNG J H, et al. Mid-infrared properties of a VO₂ film near the metal-insulator transition[J]. Physical Review B, 1996, 54(7): 4621-4628.
- [35] JEPSEN P U, FISCHER B M, THOMAN A, et al. Metal-insulator phase transition in a VO₂ thin film observed with terahertz spectroscopy[J]. Physical Review B, 2006, 74(20): 205103.
- [36] PASHKIN A, KÜBLER C, EHRKE H, et al. Ultrafast insulator-metal phase transition in VO₂ studied by multi-terahertz spectroscopy[J]. Physical Review B, 2011, 83(19): 195120

(收稿日期: 2020-06-19)

作者简介:

陈善卓(1999-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 纳米光子学。

高亚臣(1969-), 通信作者, 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 非线性光学材料、纳米光子学, E-mail: gaoyachen@hlju.edu.cn。

(上接第 131 页)

- [7] ALI H A, FOUZEYAH R A. Bipolar junction transistor as a switch[J]. IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering, 2018, 13(1): 52-57.
- [8] 黄淑圆. 浅谈开关三极管的原理及应用[J]. 机电信息, 2015(21): 36-36, 37.
- [9] 刘树林, 岳改丽, 王党树. 低频电子线路[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- [10] 张承畅, 龚昱文, 余洒, 等. Multisim 在模电和数电混合实验案例中的应用[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(6): 50-52, 62.
- [11] 程院莲, 刘修泉. 基于 Multisim12 的晶体三极管开关电

路应用研究[J]. 电子制作, 2016(7): 13-15.

- [12] 孔璇. 提高晶体三极管开关速度的研究[J]. 软件教育现代化, 2018(5): 316.

(收稿日期: 2020-03-27)

作者简介:

张宏强(1999-), 男, 本科, 主要研究方向: 电路与系统设计。

王勇(1968-), 通信作者, 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 通信与信息系统、通信与信息工程, E-mail: ywang@mail.xidian.edu.cn。

刘乃安(1966-), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向: 无线通信与射频技术、无线网络。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所