

提高红外微测辐射热计光谱吸收率的金属光栅结构研究

张宇峰¹, 王 洋¹, 吴元庆¹, 戴景民²

1. 渤海大学新能源学院, 辽宁 锦州 121013

2. 哈尔滨工业大学仪器科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘 要 为提高红外微测辐射热计的光谱吸收率, 设计一种基于表面等离子激元的金属光栅促吸收结构, 研究光栅结构参数对光谱吸收率的影响规律。以金作为光栅材料, 利用等离子激元的谐振结构, 克服金属材料的高反射特性, 增强红外微测辐射热计的红外吸收能力。通过改变光栅的结构参数, 对等离子共振波长进行调节, 提高红外微测辐射计工作波段内的光谱吸收效率。利用有限差分法, 分析光栅参数对光谱吸收率的影响机理, 研究金属光栅的周期、占空比和高度对光谱吸收率的调控规律。随着光栅周期由 $2\ \mu\text{m}$ 逐渐增加到 $5\ \mu\text{m}$, 吸收峰的峰值波长发生明显的红移现象, 吸收峰高度呈现出较明显的下降趋势。随着光栅占空比从 0.2 逐渐增加到 0.5, 红外吸收峰的峰值波长向短波长移动, 吸收峰高度也逐渐增高, 但吸收峰宽度逐渐变窄。光栅厚度对吸收峰的峰值影响不大, 当厚度达到一定程度后, 峰值基本保持不变。峰值波长随厚度增加出现不同程度的减小, 当厚度不足 100 nm 时, 峰值波长减小的程度较大, 随着厚度的继续增加, 下降趋势逐渐变缓, 基本维持在 $10.6\ \mu\text{m}$ 附近。通过分析光栅结构参数对光谱吸收率的影响机理, 对光栅结构参数的进一步优化, 大幅提高氧化钽红外微测辐射热计的红外光谱吸收率, $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 的平均吸收率达 61.6%, 峰值吸收率在 99% 以上。金属光栅的光谱吸收率促吸收结构研究, 对高性能红外微测辐射热计的设计具有重要的指导意义。

关键词 光谱吸收率; 光栅; 红外微测辐射热计; 等离子激元

中图分类号: Q433.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)08-2647-04

引 言

20 世纪 70 年代以来, 非制冷型红外微测辐射热计无需复杂且昂贵的制冷系统, 可大幅降低器件成本和体积, 具有功耗低、结构简单、灵敏便捷等优点, 已经在民用、商用及军事红外探测领域得到广泛应用^[1]。特别是以氧化钽为敏感材料的微测辐射热计发展更加迅速^[2]。对于多层膜结构的氧化钽微测辐射热计, 其结构设计, 材料构成、层厚度等参数都严重影响其对红外辐射的吸收效率^[3]。

当外界光线照射到金属表面, 光子能量被金属中自由振荡的电子所俘获, 形成一种光子与电子相互作用的共振激发态, 被称为表面等离子激元 (surface plasmon polariton, SPP)^[4]。SPP 可以改变器件的局部电场, 能量被限制在一个很小的区域内。众多学者对 SPP 产生的电磁场增强特性表现出浓厚兴趣^[5-7], 纷纷设计出不同相状的金属纳米结构^[8], 以及阵列的纳米孔^[9-10]、条纹^[11]、微圆盘^[12]、靶心^[13]等结

构, 并分析研究使之与入射波长相匹配, 力求提高多种探测器件的光谱吸收能力。

设计一种激发表面等离子激元效应的金属光栅结构, 通过改变光栅的结构参数, 对等离子体共振波长进行调节, 提高红外微测辐射计工作波段内的光谱吸收效率, 揭示中心吸收波长的调控规律。

1 机理与建模

红外微测辐射热计的主体为多层复合结构, 如图 1 所示。入射辐射进入到钝化层中的光栅结构, 产生表面等离子体谐振效应, 光波会在氮化硅表面传播, 最终被微测辐射热计吸收。器件底部的镀金层将透射到底部的红外辐射反射至微测辐射热计内部, 促进二次吸收。

对于金属半导体的等离子激元现象可用色散模型解释^[14], 其色散关系可表示为

收稿日期: 2019-07-04, 修订日期: 2019-11-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(61575029), 辽宁省高等学校创新人才支持计划项目(LR2017051)资助

作者简介: 张宇峰, 1981 年生, 渤海大学新能源学院副教授 e-mail: zyf81@aliyun.com

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} - \frac{\omega_n^2}{\omega^2 + i\omega_c\omega} + \sum_{m=1}^N \frac{s_m}{1 - i\Psi_m\omega/\omega_m - \omega^2/\omega_m^2} \quad (1)$$

其中, ϵ_{∞} 为高频介电常数, ω_n 为等离子体共振频率, ω_c 为衰减率, s_m 为振荡强度, ω_m 为谐振频率, Ψ_m 为线宽, m 为 Lorentz 项的阶数。

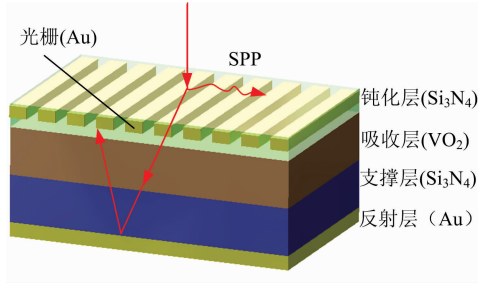


图 1 微测辐射热计的光栅结构示意图

Fig. 1 Structural schematic of the grating in microbolometer

金属材料采用金, 其材料属性来自文献[15]; VO_2 的光学参数由文献[19]给出, 其中 $\epsilon_{\infty} = 3.95$ eV, $\omega_n = 3.33$ eV, $\omega_c = 0.66$ eV, 建模所用的 Lorentz 项参数见表 1。

表 1 Lorentz 项参数
Table 1 Parameter of Lorentz

S_m /eV	ω /eV	Ψ_m /eV
1.816	0.86	0.95
0.972	2.8	0.23
0.04	3.48	0.28
1.05	4.6	0.34

2 结果与讨论

考虑大气窗口和氧化钒红外微测辐射热计的常用工作波段, 利用有限差分法对 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 红外光谱吸收率进行计算, 模拟光栅结构变化对其吸收效率的影响, 研究光栅周期、占空比、光栅高度、光栅位置等参数对光谱吸收率的调控规律。

2.1 光栅周期

如图 2(a) 所示, 随着光栅周期由 $2 \mu\text{m}$ 逐渐增加到 $5 \mu\text{m}$, 吸收峰的峰值波长发生了明显的红移现象, 且吸收峰的高度也发生了较明显的变化, 整体呈下降趋势, 但周期为 $3 \mu\text{m}$ 时的吸收峰略高于周期为 $2 \mu\text{m}$ 的情况。

如图 2(b) 所示, 当光栅周期由 $2 \mu\text{m}$ 增加至 $3 \mu\text{m}$ 时, 吸收率最大值从 0.95 升高至 0.98, 随着周期的继续增加, 最大值则开始逐渐降低到 0.88 左右。而吸收率的峰值波长随着周期的增加而呈现线性的增加趋势。

2.2 光栅占空比

光栅占空比对于红外吸收的影响如图 3(a) 所示, 从中可以看出, 占空比对于红外吸收的作用与周期的效果相反。随着光栅占空比从 0.2 逐渐增加到 0.5, 红外吸收峰逐渐向短波长移动, 吸收峰的高度也逐渐增高, 但是宽度也略微变窄。

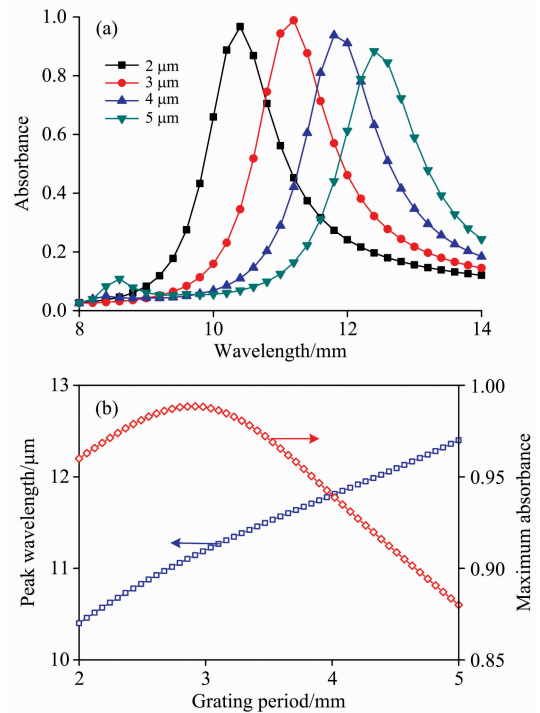


图 2 (a) 光栅周期对光谱吸收率的影响;
(b) 光栅周期对吸收峰的影响

Fig. 2 (a) Effect of the grating period on the spectral absorbance; (b) Effect of the grating period on the absorbance peak

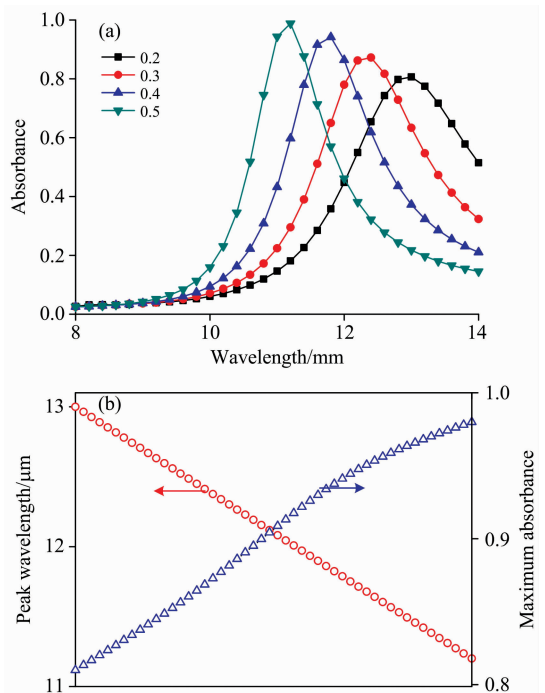


图 3 (a) 光栅占空比对光谱吸收率的影响;
(b) 光栅占空比对吸收峰的影响

Fig. 3 (a) Effect of the grating duty cycle on the spectral absorbance; (b) Effect of the grating duty cycle on the absorbance peak

如图 3(b)所示,随着占空比的增加,吸收峰的波长呈现线性减小,由 $13\ \mu\text{m}$ 蓝移至 $11.2\ \mu\text{m}$ 左右。吸收峰的峰值则由 0.82 逐渐提高至 0.94 左右。分析原因可知,对于金属光栅来说,占空比大意味着金属表面积大,光栅缝隙变窄,因此对应的吸收峰波长也会变化,使得波长与等离激元相匹配。金属面积增大,与半导体的接触也会增大,因此等离激元促进吸收作用增强,峰值提高。

2.3 光栅高度

光栅高度对于红外吸收的影响如图 4(a)所示,随着光栅高度的下降,其红外吸收峰红移,且宽度越来越大,证明光栅高度对器件的吸收效率影响明显。

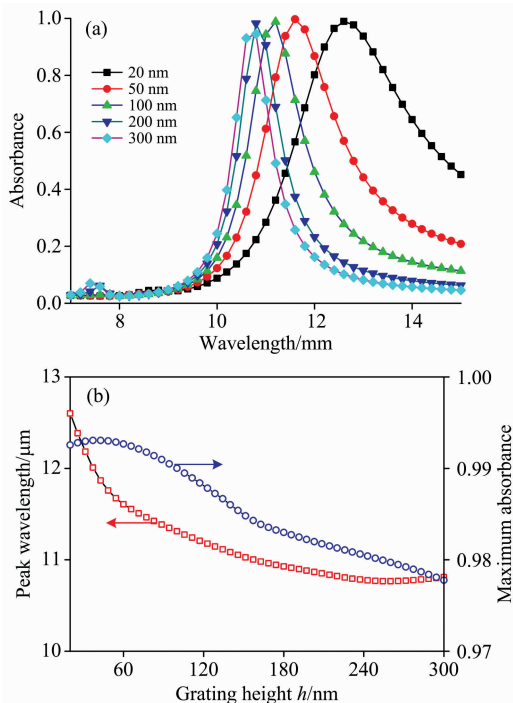


图 4 (a)光栅高度对光谱吸收率的影响;
(b)光栅高度对吸收峰的影响

Fig. 4 (a) Effect of the grating height on the spectral absorbance; (b) Effect of the grating height on the absorbance peak

如图 4(b)所示,随着光栅厚度的增加,对吸收峰的峰值影响不是很大,特别当厚度增加到一定程度高,峰值基本保

持不变。峰值波长随厚度增加出现不同程度的减小,当厚度不足 $100\ \text{nm}$ 时,峰值波长的变化程度较大,随着厚度的继续增加,峰值波长下降趋势变缓,基本维持在 $10.6\ \mu\text{m}$ 附近。

2.4 光栅结构参数的优化

综合分析光栅各参数对红外光谱吸收率的影响规律,得到优化后的红外微测辐射热计光栅参数:光栅周期 $0.5\ \mu\text{m}$,金属材料高度 $20\ \text{nm}$,光栅占空比 0.4,位置位于钝化层底部,与氧化钽层相接。如图 5 所示,结构优化后的吸收峰宽度有所增加,波段内的平均吸收率高达 61.6%,起到了促进红外吸收的作用。

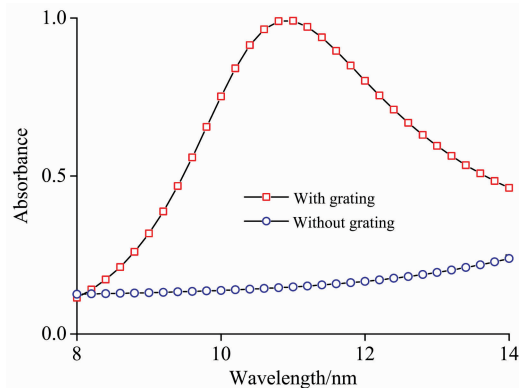


图 5 有无光栅结构的光谱吸收率

Fig. 5 Spectral absorbance with and without grating

3 结 论

高性能的红外辐射微测热计对于航天、航空及军事领域均有着重大的意义,光谱吸收率是影响其性能的关键参数。本文基于表面等离激元效应,通过理论建模和仿真计算,证明了金属光栅结构可以促进微测辐射热计对红外辐射的吸收作用,有效提高特定光谱内的红外吸收率。研究了光栅周期、占空比、高度以及位置对光谱吸收率的影响规律,通过对光栅结构参数的进一步优化,大幅提高氧化钽红外微测辐射热计的红外光谱吸收率, $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 的平均吸收率达 61.6%,峰值吸收率在 99% 以上。金属光栅的光谱吸收率促进吸收结构研究,对高性能红外微测辐射热计的设计具有重要的指导意义。

References

- [1] Safaei A, Modak S, Lee J, et al. Opt. Express, 2018, 26(25): 32931.
- [2] Shen N, Yu J, Tang Z. IEEE Photon Technol. Lett., 2015, 27(12): 1247.
- [3] Wu Z Y, Tang S F, Zeng H Y, et al. Microelectron Reliab, 2018, 91: 313.
- [4] Vadnala S, Paul N, Agrawal A, et al. Mat. Sci. Semicon. Proc., 2018, 81: 82.
- [5] Bernardi M, Mustafa, Neaton J B, et al. Nat. Commun., 2015, 6: 7044.
- [6] Zayats A V, Smolyaninov I I. J. Optics-UK, 2003, 5(4): S16.
- [7] Melikyan A, Lindenmann N, Walheim S, et al. Opt. Express, 2011, 19(9): 8855.
- [8] Lim S H, Mar W, Matheu P, et al. J. Appl. Phys., 2007, 101(10): 104309.

- [9] Yokogawa S, Burgos S P, Atwater H A. *Nano. Lett.*, 2012, 12(8): 4349.
- [10] Han Z, Bozhevolnyi S I. *Rep. Prog. Phys.*, 2012, 76(1): 016402.
- [11] Akbari A, Tait R N, Berini P. *Opt. Express*, 2010, 18(8): 8505.
- [12] Liu N, Mesch M, Weiss T, et al. *Nano. Lett.*, 2010, 10(7): 2342.
- [13] Stanley R. *Nat. Photonics*, 2012, 6(7): 409.
- [14] Ordal M A, Long L L, Bell R J, et al. *Appl. Optics*, 1983, 22: 1099.
- [15] Verleur H W, Barker J A S, Berglund C N. *APS Journals*, 1968, 172: 788

Study on Metal Grating Structure for Improving Spectral Absorptivity of Infrared Microbolometer

ZHANG Yu-feng¹, WANG Yang¹, WU Yuan-qing¹, DAI Jing-min²

1. College of New Energy, Bohai University, Jinzhou 121013, China

2. School of Instrumentation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

Abstract In order to improve the spectral absorptivity of infrared microbolometer, a metal grating absorption promoting structure based on surface plasmon was designed, and the influence of grating structure parameters on the spectral absorptivity was studied. Using the gold as grating material and the resonance structure of plasmon, the high reflectivity of metal material is overcome to enhance the infrared absorption capacity of infrared microbolometer. By changing the structure parameters of the grating and adjusting the resonance wavelength of the plasma, the spectral absorption efficiency in the working band of the infrared microbolometer can be improved. The influence mechanism of grating parameters on spectral absorptivity was analyzed by finite difference method. The regulation of the period, duty cycle, position and height of metal grating on spectral absorptivity was studied. With the grating period increasing from 2 to 5 microns, the peak wavelength of the absorption peak has a significant red shift, and the height of the absorption peak has a significant change. Although the overall trend is downward, the absorption peak at 3 microns is slightly higher than that at 2 microns. As the duty cycle of grating increases from 0.2 to 0.5, the infrared absorption peak shifts to short wavelength, and the height of the absorption peak increase gradually, but the width also narrows slightly. With the increase of grating thickness, the peak value of absorption peak is not affected very much, especially when the thickness increases to a certain extent, the peak value remains basically unchanged. However, the peak wavelength decreases with the increase of thickness. With the increase of thickness, the peak wavelength decreases slowly, and basically maintains near 10.6 μm . Based on the analysis of the mechanism of the influence of grating structure parameters on spectral absorptivity, the infrared absorption of vanadium oxide infrared microbolometer is greatly improved by further optimization of grating structure parameters. The average absorption of 8~14 μm is 61.6%, and the peak absorption is over 99%. The research on the absorption-promoting structure of metal grating has important guiding significance for the design of high-performance infrared microbolometer.

Keywords Spectral absorptivity; Grating; Infrared Microbolometer; SPP

(Received Jul. 4, 2019; accepted Nov. 19, 2019)