

电可调非致冷红外探测原理

张欢, 赖建军*, 李宏伟, 李明燃, 刘黎
(华中科技大学 武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要:传统的红外光谱探测技术能够提供丰富的光谱信息,应用广泛,但该技术同时也存在一定局限性,如很难同步实现探测器小型化和探测波段实时调节等方面的要求.提出了一种基于电可调表面等离子体谐振吸收的新型 FET 红外探测器结构.基于电磁场理论分析了结构参数对红外光学吸收的影响,并通过结构参数的优化使吸收结构对特定红外波段的吸收率达到 90% 以上.栅压变化时 VO_x 热敏层中载流子的浓度分布和折射率均发生变化,显示该器件具有明显的电可调光谱吸收特性.借助于这种 FET 结构,非制冷红外探测器将具有片上可调光谱探测能力,同时具有易于阵列化特点,为微小型可配置光谱成像探测器件提供了一条思路.

关键词:非致冷红外探测器;等离子体谐振;电可调探测器;光谱成像探测

中图分类号:TN215 **文献标识码:**A

Investigation of electrically tunable uncooled infrared detector

ZHANG Huan, LAI Jian-Jun, LI Hong-Wei, LI Ming-Ran, LIU Li

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Conventional infrared spectral imaging detection can provide large amount spectrum information and has extensive applications, but it cannot provide spectrum tunability with compact volume. A novel FET detector structure with electrically tunable plasmon absorption was proposed. Through electromagnetic simulation of infrared absorption variation with the structure parameters, more than 90% absorption is reached within specified spectral band under optimized condition for this kind of detector. When gate voltage is changed, the carrier concentration and complex refractive index vary simultaneously, which lead to obvious characteristics of tunable absorption. Based on this FET structure, uncooled infrared detector will have the ability of spectral imaging on one single chip, which opens a new route to miniaturization of spectral imaging systems.

Key words: uncooled infrared detector, plasmon resonance, electrically tunable, spectral imaging detection

PACS: 07.57.Kp

引言

红外成像光谱技术将红外光谱分析技术与二维成像技术有机地结合在一起,不仅能对物体进行二维形态成像,同时还能提供丰富的红外光谱信息,能直接反映出红外目标的物理光谱特征,从而揭示各种目标的存在状况和物质成分,使得从空间上直接识别和区分目标成为可能.在军事目标侦查探测、遥感系统的空间与地球的探测、生物活体组织的成分与病变的检查和食品安全检测等方面都有着广泛的应用.传统的红外光谱成像的分光技术主要有色散

型、干涉型、二元器件和滤波型.在像素级层面通过集成窄带微型滤波片阵列可以实现小型化的红外光谱探测器,但是不具有实时调节光谱谱段的能力^[1].基于 MEMS 技术的微型 F-P 微滤波器阵列虽然具有可调光谱的能力,但是与像元阵列的集成却是具有挑战性的工作^[2].

提出一种新颖的基于场控等离子体谐振原理在像素级上调控探测单元的光谱探测方法.采用金属光栅耦合红外辐射,同时也用作场控栅极.通过调节加在栅极上的电压,调节金属栅极下的半导体敏感薄膜中的载流子密度,调节薄膜的介电常数和等离

收稿日期:2013-10-24,修回日期:2013-12-16

基金项目:国家自然科学基金项目(61077078)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (61077078)

作者简介(Biography):张欢(1989-),男,湖北黄石人,硕士研究生,目前主要从事光电探测器研究. E-mail: 379744184@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: jllai@hust.edu.cn

Received date: 2013-10-24, revised date: 2013-12-16

子谐振波长,导致谐振吸收波长移动. 根据已有的文献报道,电控主动调节器件在 THz 频段已得到验证^[3]. 掺杂 GaAs 衬底中的自由载流子吸收可以通过电偏压改变衬底中的载流子浓度进行动态控制,但是在更高频率如中波红外,由于自由载流子吸收很小,采用上述方法难以调节. Young Chul Jun 等^[4]设计了 Au 光学人工结构,同时作为栅极,通过调节栅压,调节人工结构下方的高掺杂 n 型 GaAs 的耗尽层厚度,从而改变 GaAs 衬底介电常数,从而引起频率调节. 美国普林斯顿大学 Amlan Majumdar 等^[5]设计和制备了电压可调超晶格红外探测器. 探测器由用于长波红外探测的多个短周期的超晶格 AlGaAs/GaAs 和用于与中波红外探测的应力层 InGaAs/GaAs/AlGaAs 短周期超晶格组成. 在大正偏压下工作于长波红外,在负偏压下用于中波红外探测. 国内上海技术物理所陈效双研究员等理论研究了 AlGaIn/GaN 和 AlN/GaN 场效应晶体管中对高密度区二维电子气系统的等离子体动力学相互作用现象以及电调制现象^[6-8]. 研究了栅极和非栅极下的等离子体激发特性以及相互作用规律. 通过栅极结构的改进增强等离子体谐振激发和可调性.

以 VOx 非制冷红外探测器应用为例,采用有限元方法研究基于 FET 原理红外吸收结构的电控可调红外吸收特性,理论证明电可调非致冷红外光谱探测的可行性.

1 FET 红外吸收结构

设计的非制冷红外探测器是基于 FET 载流子浓度调制原理的红外微测辐射热计,结构示意图如图 1 所示. 红外吸收结构自上而下依次为金属电极、氮化硅支撑层、氧化钒热敏层、氮化硅介质层和金属反射层. 金属电极类似于 FET,分为源极、栅极和漏极. 栅极为光栅式结构,沉积在氮化硅之上. 氮化硅材料由于具有热稳定性高、抗氧化和机械强度高等特点,包覆在氧化钒上下两侧,一方面起到绝缘作用,另一方面可制成桥腿,同支撑层相连,以此将整个器件支撑在硅衬底上形成悬空结构,减小热损耗. 源极和漏极则同氧化钒的两端直接接触,形成导电回路.

入射光由上端入射,透过光栅式栅极后被多层膜结构吸收,氧化钒的温度随之发生变化,进而引起氧化钒的阻值变化,通过在源漏两端加偏置电压可以测出氧化钒中的电流变化,最后信号经过外围电路处理完成探测. 整个吸收结构作为非致冷红外探

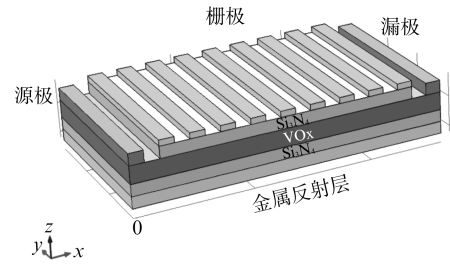


图 1 FET 可调红外吸收结构示意图
Fig. 1 Schematic view of FET tunable infrared absorption structure

测器的敏感吸收单元,结合支撑桥腿和热隔离空腔结构组成完整的红外探测单元.

器件的设计中主要用到了两个基本原理^[3]: 第一,使用金属光栅进行耦合,以便在金属和介质材料的交界处形成沿着材料表面横向传播的表面等离子体波,利用表面等离子体谐振效应 (SPR),使得器件产生增强吸收的效果. 第二,使用了类似于 FET 的载流子浓度调制原理. 在金属栅极上加上直流正电压后,由于氮化硅绝缘层的存在,栅极中无法形成电流,而是与底层金属间形成垂直方向上的电场,对氧化钒中的自由载流子进行调制,自由电子和空穴将在电场作用下逐渐于栅极正下方聚集,形成二维电子气,氧化钒的光学常数与其载流子浓度相关,进而发生改变,由此调制吸收窗口.

2 光学性能仿真

金属氧化物中的 SPR 现象可用 Drude-Lorentz 色散模型解释^[9],现将 VOx 中的表面等离子体的色散关系表示如下:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)} + \sum_{i=1}^m \frac{S_m \omega_m^2}{\omega_m^2 - \omega^2 - i\Gamma_m \omega \omega_m} \quad (1)$$

其中式子右侧 ε_{∞} 为高频介电常数,第二项表示色散关系中自由电子所影响的部分, ω_p 为等离子体共振频率, γ 为衰减率,第三项表示由晶格振动或带间跃迁所影响的部分. S_m 为振荡强度, ω_m 为谐振频率, Γ_m 为线宽, m 为 Lorentz 项的阶数. 等离子体频率:

$$\omega_p = \sqrt{ne^2 / \varepsilon_0 m_e} \quad (2)$$

式中 n 表示载流子浓度, m_e 表示有效质量, ε_0 表示真空介电常数, e 表示电子电量. 可以看到,等离子体频率是随载流子浓度变化而变化,说明通过调节载流子浓度可以改变器件材料的等离子体频率和介电常数,进而可能改变含有这种材料的多层结构的

光学特性.

采用基于有限元方法的多物理场耦合分析软件 Comsol Multiphysics 对具有光栅式金属表面的多层结构进行仿真,研究不同结构参数对于吸收谱的影响.为了简化计算,仅设置一个周期的栅极结构,两侧运用周期性边界条件,栅极所用材料为金,光学参数来自文献[10];VO_x 的光学参数由文献^[9]给出: $\varepsilon_{\infty} = 3.95$ eV, $\omega_p = 3.33$ eV, $\gamma = 0.66$ eV,同时使用4阶 Lorentz 项,各项的参数如表1所示.

表1 4阶 Lorentz 项参数

Table 1 4 order Lorentz parameters

S_m (eV)	ω_m (eV)	Γ_m (eV)
1.816	0.86	0.95
0.972	2.8	0.23
1.04	3.48	0.28
1.05	4.6	0.34

结构的初始参数设置为:光栅周期 5 μm ,金属光栅占空比为 0.5,光栅厚度 200 nm, Si_3N_4 支撑层厚度 100 nm,VO₂ 层厚度 200 nm, Si_3N_4 绝缘层厚度 300 nm,底部为金属反射层.仿真结构图如图2所示.

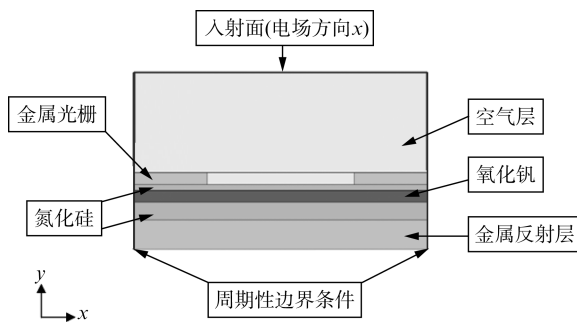


图2 仿真结构图

Fig.2 Diagram of device structure for simulation

由于S偏振光无法产生SPP波,因此默认入射光的电场方向为x方向,此时入射光的偏振方向平行于入射面,为P偏振.设置入射光波段为5~24 μm ,分别仿真了金属光栅占空比、周期、深度等参数对器件在中红外波段的光学性质的影响,得到吸收谱线.

由图3所示,随着占空比的增大,吸收峰值逐渐向长波方向移动,即产生红移.同时吸收峰值相应减小.图4中,光栅周期的增大会使得吸收峰红移,并且仍会减小吸收率.图5中,吸收谱线随着光栅深度的增大而略微增大.

经过光学仿真的参数优化,最终得到器件参数

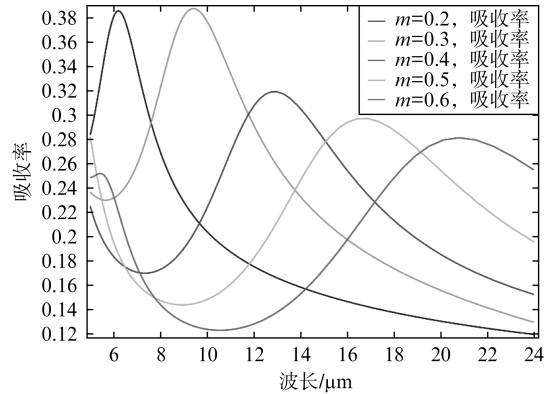


图3 光栅占空比对吸收率的影响

Fig.3 Absorption varied with wavelength under various fill factors

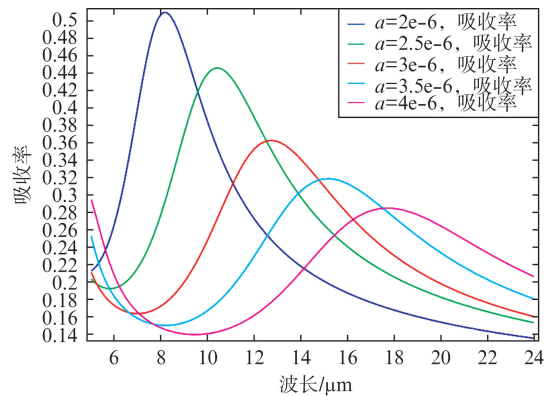


图4 光栅周期对吸收率的影响

Fig.4 Absorption varied with wavelength for various grating periods

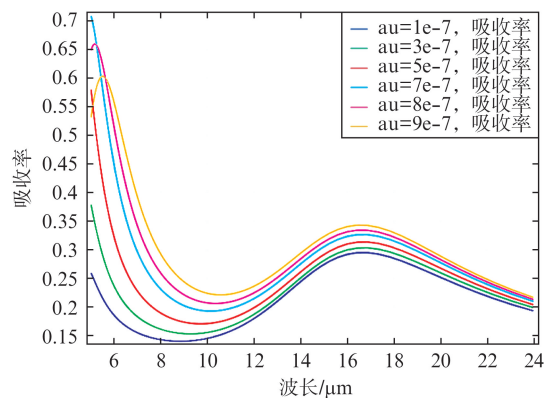


图5 光栅深度对吸收率的影响

Fig.5 Absorption varied with wavelength for various grating depths

为:光栅周期 3.3 μm ,占空比 0.5,光栅厚度 100 nm,上层 Si_3N_4 厚度 300 nm,VO₂ 层厚度 100 nm,底层 Si_3N_4 厚度 100 nm.此时的吸收谱线如图6所示:

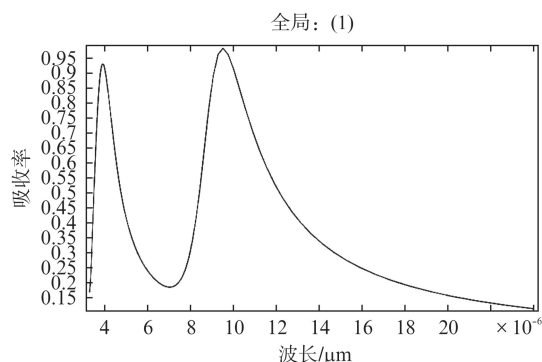


图 6 优化结构参数下的吸收谱线
Fig. 6 Absorption curves at optimized structure parameter

由图 6 看出,整个吸收光谱中存在两个较大的吸收峰,一个处于中红外波段的 $4 \mu\text{m}$ 处,另一个吸收峰较宽,在 $9 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段,在这两个红外成像窗口内均有较好的吸收率,吸收峰值达到了 90% 以上,器件光学性能良好.

两个吸收峰 $4 \mu\text{m}$ 和 $10 \mu\text{m}$ 处的电场分布图和时均功率流分别如图 7、8 和图 9、10 所示.由图 7 和图 8 可以看出, $4 \mu\text{m}$ 和 $10 \mu\text{m}$ 入射光下的电场分布存在明显差异,图 7 中 $4 \mu\text{m}$ 时的电场较强处为光栅间隙,说明受到金属光栅的遮挡,大部分入射光通过光栅间隙直射下来,而图 8 中 $10 \mu\text{m}$ 入射光经过光栅结构的耦合,在金属和介质的交界面、氧化钽和介质的交界面以及底层氮化硅和金属反射层的交界面上激发了横向传播的表面等离子体波,使得入射光能量局域在介质层中,减少了因垂直入射而被反射掉的功率,进而达到增强吸收的目的.图 9 和图 10 为两个峰值波长下的时均功率流分布图,可以直观地看到入射光的能量走向和主要分布区域.因此, $4 \mu\text{m}$ 处的吸收波峰主要是由光栅选频作用引起的, $10 \mu\text{m}$ 处的吸收波峰主要是由 SPP 模式的激发而引起的.

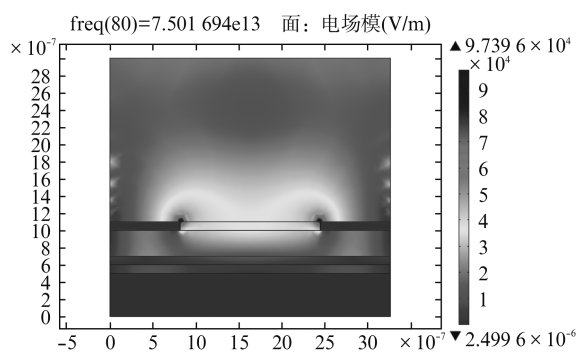


图 7 $4 \mu\text{m}$ 入射光下的电场分布图
Fig. 7 Electric field magnitude distribution at $4 \mu\text{m}$ wavelength

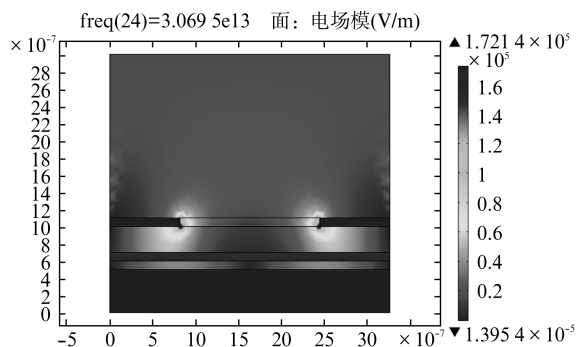


图 8 $10 \mu\text{m}$ 入射光下的电场分布图
Fig. 8 Electric field magnitude distribution at $10 \mu\text{m}$ wavelength

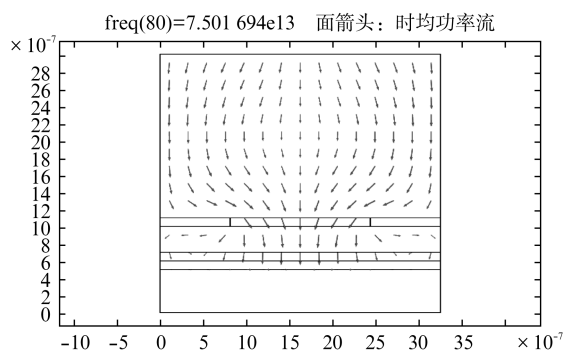


图 9 $4 \mu\text{m}$ 入射光下的功率流分布图
Fig. 9 Power flux distribution at $4 \mu\text{m}$ wavelength

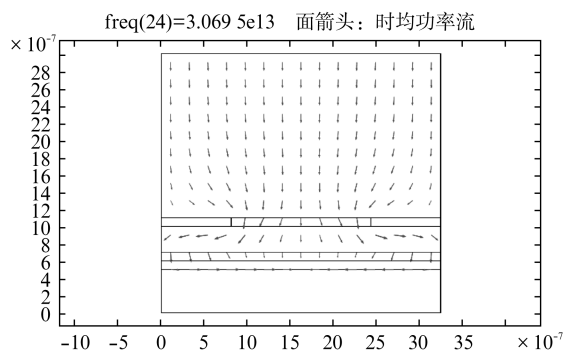


图 10 $10 \mu\text{m}$ 入射光下的功率流分布图
Fig. 10 Power flux distribution at $10 \mu\text{m}$ wavelength

以上结果说明:运用金属栅极结构可以产生 SPP 波以增强入射光的吸收,并且产生的表面等离子体频率是随载流子浓度而变化的.这为后文通过调制载流子浓度来改变器件的光学性质提供了理论依据.

3 载流子浓度仿真

为了研究介质层中的载流子浓度调制,使用 Boltzmann 传输理论中一些普适的简化公式作为理论基础:

$$-\nabla \cdot (\varepsilon \nabla \psi) = q(p - n + N) \quad , \quad (3)$$

$$-\nabla \cdot J_n = -qR_{SRH} \quad , \quad (4)$$

$$-\nabla \cdot J_p = qR_{SRH} \quad , \quad (5)$$

其中 ψ 表示静电势, q 表示电子电量, p 与 n 分别表示空穴和电子浓度, N 为掺杂浓度, R_{SRH} 为 Shockley-Read-Hall 复合率, 表示电子和空穴的复合速率. J_n 和 J_p 分别表示电子电流密度和空穴电流密度, 两者又可表示为:

$$J_n = -qn\mu_n \nabla \psi + qD_n \nabla n \quad , \quad (6)$$

$$J_p = -qn\mu_p \nabla \psi - qD_p \nabla n \quad , \quad (7)$$

其中 μ_n 和 μ_p 为载流子迁移率, D_n 和 D_p 为载流子扩散系数.

以上方程可以用来计算介质层中复杂的载流子浓度变化, 涵盖了载流子浓度、静电势、载流子迁移率和载流子扩散系数等诸多参数, 当栅极加上直流电压时, VOx 内部不断发生载流子的产生和复合, 这些载流子在静电场的作用下逐渐于 VOx 边界上聚集, 形成与内建电场相反方向的电荷电场, 最终达到稳态^[11].

采用多物理场耦合分析软件 Comsol 来模拟探测器在阳极加压下的载流子浓度调制情况. 为简化计算, 仅以一个周期为 5 μm , 占空比为 0.5 的栅极结构为代表, 设置 Si₃N₄/VOx/Si₃N₄ 的厚度由上到下分别为 50 nm, 300 nm, 200 nm, 默认载流子浓度为 10^{21}cm^{-3} 量级. 在栅极逐渐加上 0 ~ 3 V 电压, 仿真结果如图 11 所示.

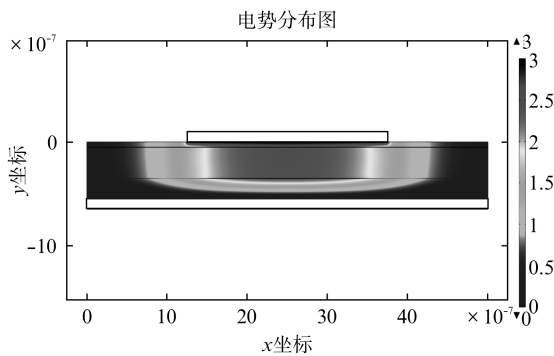


图 11 电势分布
Fig. 11 Electric potential distribution

图 11 中栅极上的电势由于绝缘层的存在局域在栅极底层, 然而处于栅极正下方的 VOx 层中也出现了较高的电势排布, 这是由于载流子在内建电场的作用下不断聚集所致. 图 12 为空间电荷密度分布, 图中红色和蓝色区域分别为密度较高的电子和空穴区, 两者极性相反, 可见在内建电场的作用下, 电子和空穴

分别向阳极和阴极聚集, 同时, 栅极正下方区域内的电荷密度也高于非栅极区域, 可见栅极电压在纵向和横向上均起到了对载流子的调制作用.

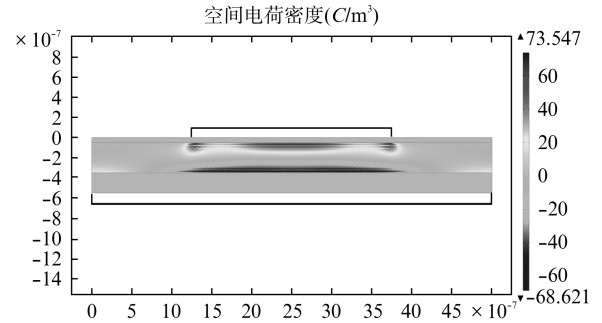


图 12 空间电荷密度分布
Fig. 12 Spatial charge density distribution

为研究氧化钒的光学常数和载流子浓度的关系, 将之前的式(1)和式(2)联立, 由于 Lorentz 高阶项的影响很小, 可以忽略, 因此这里使用 Drude 电子模型公式^[4], 推知:

$$\begin{aligned} \varepsilon(\omega) &= \text{Re}[\varepsilon(\omega)] + \text{Im}[\varepsilon(\omega)]i \\ &\approx \varepsilon_\infty \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} + i \frac{\omega_p^2 \gamma}{\omega^2} \right) \quad , \quad (8) \end{aligned}$$

式(8)中因 $\gamma \ll \omega$, 取近似分别得到:

$$\text{Re}[\varepsilon(\omega)] = \varepsilon_\infty \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right) \quad , \quad (9)$$

$$\text{Im}[\varepsilon(\omega)] = \varepsilon_\infty \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \gamma \quad , \quad (10)$$

再联立式(2)可得到 VOx 的光学常数与载流子浓度 n 的依赖关系.

从图 13 和图 14 中可以看到, 不同波长下的光学常数变化有差异, 波长越长, 光学常数对载流子浓度的变化越敏感. 在载流子浓度为 $10^{19} \sim 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 量级

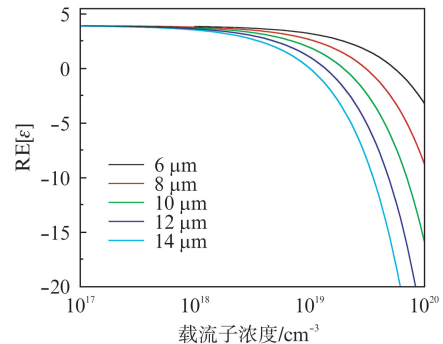


图 13 氧化钒介电常数的实部随载流子浓度变化图
Fig. 13 Carrier concentrations under various real part values of dielectric constant of VOx

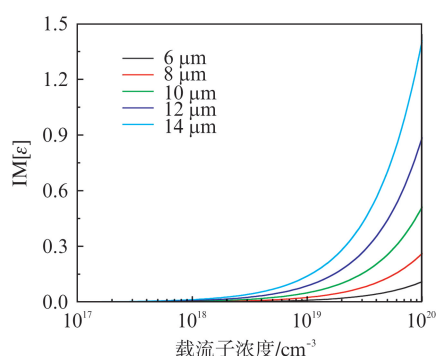


图 14 氧化钒虚部随载流子浓度变化图
Fig. 14 Carrier concentrations under various imaginary part values of dielectric constant of VOx

时,氧化钒光学常数随着载流子浓度发生明显变化,实部与之成反比例指数关系,虚部与之成正比例指数关系,此时氧化钒更接近于金属态,光学常数实部为负.由此可知,调制氧化钒中的载流子浓度可以改变其光学常数.

为进一步研究器件吸收谱与栅压 V_a 的关系,将金属-绝缘体-金属的半导体结构看做电容模型,由载流子聚集形成的耗尽层宽度表示为^[4]:

$$W = \left[\frac{2\varepsilon_{\text{VOx}}\varepsilon_0}{eN} \psi \right]^{1/2} \quad (11)$$

电容表面静电势 ψ 与栅压 V_a 的关系为:

$$V_a = \psi - \frac{\varepsilon_{\text{VOx}}}{\varepsilon_{\text{Si}_3\text{N}_4}} W \left[\frac{2eN}{\varepsilon_{\text{VOx}}\varepsilon_0} \psi \right]^{1/2} \quad (12)$$

这里 ε_{VOx} 取实部,由式(11)和式(12)推知栅压与 VOx 介电常数的关系,并带入 Comsol 中进行计算,在之前光学仿真的基础上得到器件吸收谱随栅压的变化趋势.

由图 15 中看到,原本处于 $4 \mu\text{m}$ 和 $10 \mu\text{m}$ 处的吸收峰随着栅压的增大逐渐向长波长方向移动,吸收谱线整体趋势不变,吸收波段发生红移.由此可

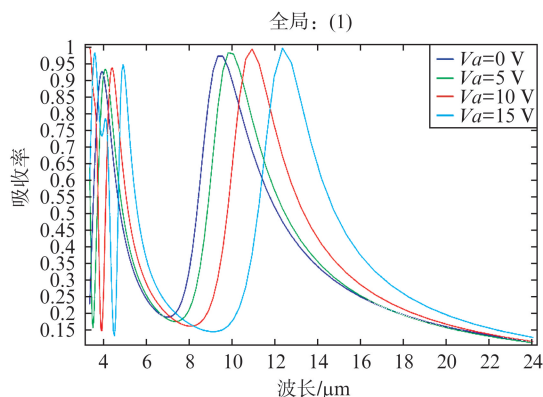


图 15 吸收谱随栅压变化趋势图
Fig. 15 Absorption spectrum under various grating voltages

证:增大栅压能够调制载流子浓度,进而对氧化钒的折射率产生影响,最后导致器件吸收光谱整体红移.故而这种 FET 结构的调制方法是可行的.

4 结论

介绍了一种基于场控可调红外吸收新型微测辐射热计结构,分析了其结构对于光学性能的影响,利用 SPP 谐振吸收原理使得器件的吸收谱处于中红外波段,吸收峰值达到 90% 以上.通过载流子浓度的仿真证明了通过栅压调制吸收谱这一方案的可行性.该方案在增强入射光吸收的基础上实现了传统红外探测器所不具备的智能调制功能,为今后的片上红外光谱成像探测研究提供了新的思路.

References

- [1] Lai Jian-Jun, Liang Hua-Feng, Zhou Zhi-Ping, *et al.* Patterning of visible/infrared dual-band microstrip filter arrays for multispectral imaging application [J], *J. Micromech. Microeng.*, 2009, **19**: 085004.
- [2] Rogalski A. Infrared Detectors for the Future [J], *Acta Physic Polonic.*, 2009, **116**(3): 389 - 406.
- [3] Viacheslav V Popov. Plasmon Excitation and Plasmonic Detection of Terahertz Radiation in the Grating-Gate Field-Effect-Transistor Structures [J], *J Infrared Milli Terahz Waves*, 2011, **32**: 1178 - 1191.
- [4] Young Chul Jun, Edward Gonzales, John L Reno, *et al.* Shaner, Alon Gabbay, and Igal Brener, Active tuning of mid-infrared metamaterials by electrical control of carrier densities [J]. *Optics Express*, 2012, **20**(2): 1903 - 1911.
- [5] Majumdar A, Choi K K, Reno J L, *et al.* Voltage tunable superlattice infrared detector for mid-and long-wavelength detection [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**: 261110 (2005).
- [6] Wang Lin, Hu Wei-Da, Wang Jun, *et al.* Plasmon resonant excitation in grating-gated AlN barrier transistors at terahertz frequency [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **100**: 123501.
- [7] GUO Nan, HU Wei-Da, CHEN Xiao-Shuang, *et al.* Enhanced plasmonic resonant excitation in a grating gated field-effect transistor with supplemental gates [J]. *Optics Express*, 2013, **21**: 1606 - 1614.
- [8] Hu W D, Wang L, Chen X S, *et al.* Room-temperature plasmonic resonant absorption for grating-gate GaN HEMTs in far infrared terahertz domain [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2013, **45**: 713 - 720 (2013)
- [9] Verleur Hans W, Barker A S, Berglund C N. Optical Properties of VO₂ between 0.25 and 5 eV [J]. *Physical Review*, 1968, **172**(3): 788 - 792.
- [10] Ordal M A, Long L L, Bell R J, *et al.* Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti and W in the infrared and far infrared [J]. *Applied Optics*, 1985, **24**(24): 4493 - 4497.
- [11] Kenneth Alexander Diest. Active Metal-Insulator-Metal Plasmonic Devices [D]. Ph. D thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California, 2010, 105 - 107.