文章编号:1007 - 4252(2024)01 - 0001 - 027　　DOI: 10.20027/j.gncq.2024.0003

基于相变材料锗锑碲全介质光开关的研究

齐小瑜,郭丽君*,朱炳达
(长春理工大学物理学院,吉林 长春 130022;)

摘要:提出了基于相变材料锗锑碲(GST)在 1550nm 波段的全介质光开关模型,研究了金属与相变材料组合的光开关模型,实现对入射波的调制,仿真并分析了光开关产生的谐振内部机理,探讨了谐振器的尺寸、材质对光开关谐振响应的影响,对比了相变材料锗锑碲(GST)的光开关效果,引入调制深度、灵敏度和品质因数对光开关性能进行评估,研究得出铝材料的灵敏度较好,在半径为 170nm 时可达到 0.834,铜、金的调制深度最好,分别是 28.22%和 57.09%。同时考虑到制作成本,应根据实际需要来选择铝或铜作为全介质光开关的材料。引入相变材料大大提升了光开关的灵活性,为光开关的设计提供了新思路。

关键词:相变材料;可调超材料;光开关;FDTD 仿真;
中图分类号:TB34; O441　　**文献标识码**:A

Research on All-Dielectric Optical Switch Based on Phase Change Material Germanium antimony tellurium

QI Xiaoyu, GUO Lijun*, ZHU Bingda
(1 School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;)

Abstract: This paper proposes an all-dielectric optical switch model based on phase-change material Ge-Sb-Te (GST) in the 1550nm band. The optical switch model combining metal and phase-change material is studied to achieve the modulation of incident waves. The internal mechanism of resonance generated by the optical switch is simulated and analyzed. The effects of the size and material of the resonator on the resonant response of the optical switch are discussed. The optical switch effect of phase-change material Ge-Sb-Te (GST) is compared. The modulation depth, sensitivity and quality factor are introduced to evaluate the performance of the optical switch. The study finds that aluminum has the sensitivity, which can reach 0.834 when the radius is 170nm. Copper and gold have the best modulation depth, which are 28.22% and 57.09% respectively. At the same time, considering the production cost, aluminum or

收稿日期:2023-11-21;　　**修订日期**:2024-02-29
基金项目:国家自然科学基金(NSFC-62275030)
作者简介:齐小瑜(1998-), 女,吉林吉林,硕士研究生(E-mail:1967848033@qq.com).
通信作者:郭丽君(1978-), 女, 吉林洮南,博士, 副教授,主要从事集成光学器件及光学传感(E-mail:guolijun0915@163.com).

copper should be selected as the material of the all-dielectric optical switch according to the actual needs. Theintroduction of phase-change materials greatly improves the flexibility of the optical switch and provides new ideas for the design of the optical switch.

Key words: Phase change materials; Tunable metamaterial; Optical switch; FDTD simulation;

0 引言

光开关是集成光路上的一个基本元器件,是光电学最重要的技术之一,通过热、光、电等多种途径对光波的振幅、位相、偏振态、频率或传播方向[1]等进行控制和调节从而实现对光的调控。在中国经济高速发展的今天,面对 5G 网络新型基础措施建设需求的不断增长,我们对于光调制器的要求也逐步提高,且光调制器的发展对光纤传输、航空航天、生物传感等方面有重要意义。超材料通过人为设计简单的物理周期性结构材料,可呈现出自然材料所不拥有的超常物理性质,可以放大微弱的物理现象,将超材料引入光调制器解决了传统光调制器的各种弊端。超材料光调制器[2],可在特定频率处产生谐振,放大原本微弱的物理现象,将纳米结构结合可实现良好的谐振响应。可调超材料[3]分为金属结构、金属与介质混合结构和全介质结构。但金属结构的可调超材料光调制器有弊端,例如较高的欧姆损耗、不具有 CMOS 兼容性等。此时全介质材料的出现,使上述缺陷得以解决。全介质超材料的电磁波透射率更高,与纳米结构的结合率更高是可调超材料另一思路。

2019 年,王曼婷[4]提出了基于相变材料 GST 的微波可调超材料器件以及一种可调吸波器。其可调微博超表面可在特定频率处获得高于 81% 的调制深度,通过改变 GST 厚度与组成成分实现了对调制效果的改变。2022 年,刘孝凯[5]设计了一种以上下层排布的金属光栅作为电极的超表面器件,底部为光栅电极,中部为相变材料,顶部为光栅电极交叉堆积,通过上下电极偏压的施加,调控结构的反射光与共振吸收峰。2023 年,赵钰[6]提出了基于 GST 的可调近红外超材料吸收器,通过改变 GST 结构实现了对入射波的吸收调控,即在 1.17μm 到 1.8μm 的红移。

本文提出了多种基于相变材料的光开关模型,选取的相变材料为锗锑碲(GST)[7]。通过外部加热或激光照射的方式可诱导材料发生相变,使材料的电磁性质发生显著改变,进而影响光学响应。引入相变材料构造超材料单元,省去了传统超材料需要改变物理结构才能改变电磁特性的弊端,通过热、光等外部条件激励,实现对超材料单元电磁特性的操控,大大提升了光开关的灵活性,为光开关的设计提供了新思路。

1 调制器的基本原理

基于超材料的设计中通常选择金属,因为介电常数越大其固有的谐振频率也越大,更容易产生谐振。而 GST 作为一种相变材料,可以与金属欧姆损耗的劣势互补,且在外场的激励下可以发生结构相变,导致介电常数发生变化,从而实现主动调控。两者混合的光开关结构谐振效果好,损耗低。

其中 GST 在相变前后两种状态下的折射率 n 与消光系数 k 如图 1 所示[8],根据折射率与消光系数的关系:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{re} &= n^2 - k^2 \\ \varepsilon_{im} &= 2nk \end{aligned} \tag{1}$$

可导出介电常数实部与虚部,将其导入 Lumerical 中有限时域差分法(FDTD)[9]建立数值模型进行计算。

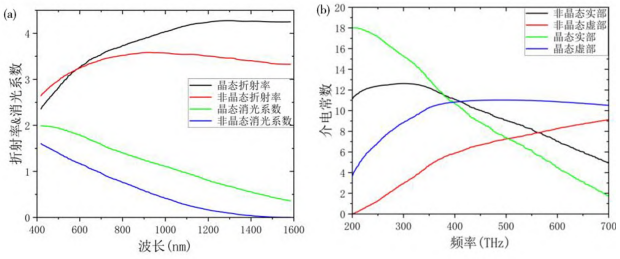


图 1 1550 *nm* 波段 *GST* 的电磁参数

(a)折射率和消光系数(b)介电常数[10]

Figure 1 Electromagnetic parameters in the 1550 band (a) refractive index and extinction coefficient (b) dielectric constant

本文为对设计的光开关模型性能通过调制深度、灵敏度和品质因数等参数进行评价。

调制深度(modulation depth,MD)用来描述材料相变前后两个状态的电磁波透射强度绝对变化量,

是评价调节效果的重要指标之一。将 T0 记为相变材料相变前调制器透射强度,T1 记为相变后调制器透射强度,则调制深度表示[11]:

$$MD = (T_1 - T_0) \cdot 100\% \quad (2)$$

灵敏度(figure of merit,FOM)用来描述材料相变前后电磁波透射强度的相对变化量。将λ_0记为相变前的谐振峰中心波长,λ_1记为相变后的谐振峰中心波长,$\lambda=\lambda_1-\lambda_0$即相变前后谐振峰中心波长偏移量,FWHM 记为谐振峰半峰宽,则灵敏度表示为[12]:

$$FOM = \frac{\Delta\lambda}{FWHM} = \frac{\lambda_1 - \lambda_0}{FWHM} \quad (3)$$

品质因数(Q)用来描述谐振峰的尖锐程度。谐振峰越尖锐,频率选择效果越好。将 λ_0 记为谐振峰中心波长,FWHM 记为谐振峰半峰宽,则品质因数表示为[13]:

$$Q = \frac{\lambda_0}{FWHM} \quad (4)$$

本研究基于相变材料 GST 的周期性全介质光开关结构在电磁场中的调制结果进行仿真。对谐振单元的不同尺寸材料模型方案进行仿真,分析光开关的谐振调制效果,利用电磁场强度分布研究内部机理,选出性能最佳的结构设计方案。采用商业软件 Lumerical 中有限时域差分法(FDTD)建立数值模型进行数值仿真。

2　模拟结果与讨论

GST 与金属混合的光开关周期单元模型如图 2 所示,模型顶部为圆形金属片,半径为 100nm 且位于单元结构中央;金属圆片下方衬底由二氧化硅(SiO_2)和 GST 组成,上方是厚度 20nm 的二氧化硅(SiO_2),中间为 30nm 的 GST 薄膜,底部为二氧化硅(SiO_2)基底,厚度 1000nm。电磁波传播沿 z 轴负方向,电场方向沿 y 轴方向。

对金属圆片的半径依次增加 10nm 进行仿真,从而得出最适合的尺寸。图 3 为金属圆片不同对半径所对应的透射强度,由图可知,金属圆片半径从 100nm 增加到 160nm 时,无论是非晶态还是晶态的谐振峰的波长(频率)都发生红移(蓝移),透射强度逐渐减小,代表谐振效果逐渐增强。

当 GST 处于非晶态时,随着金属圆片半径 r 增加,谐振峰的波长由 1609.02nm 增大至 1954.89nm,

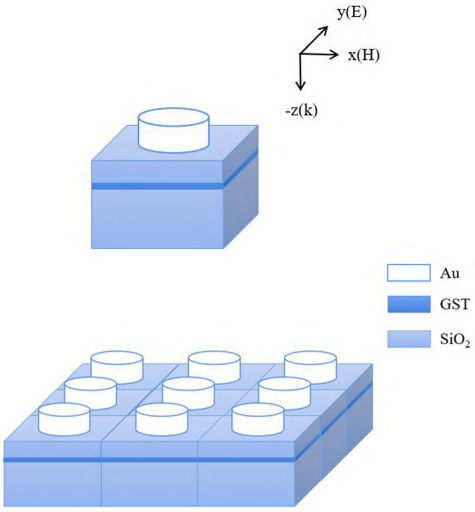
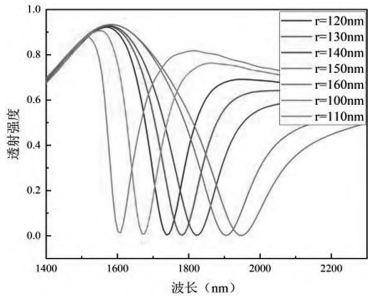


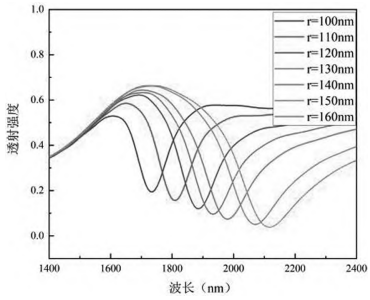
图 2　GST 与金属混合光开关的结构示意图

Figure 2 Structural diagram of GST and metal hybrid optical switch



a)非晶态

a) Amorphous state



b)晶态图

b) Crystal diagram

图 3　金属圆片半径 r 对光开关的谐振影响

Figure 3 The influence of the metal disc radius r on the resonance of the optical switch

当 GST 处于晶态时,谐振峰的波长由 1736.84nm 增加至 2112.78nm。

通过上述研究发现,金属片尺寸会对光开关的

调控效果产生影响。即我们可以通过改变金属片的半径来对入射光进行调控。

当金属圆片半径增大时,使得光开关的谐振响应也增强;同时半径增大时,光开关等效介电常数也会增大,从而引起谐振频率减小,谐振峰红移。

引入调制深度 MD 与灵敏度 FOM 作为评价参数,由式(2)和式(3)计算,结果如图 4 和表 1 所示。

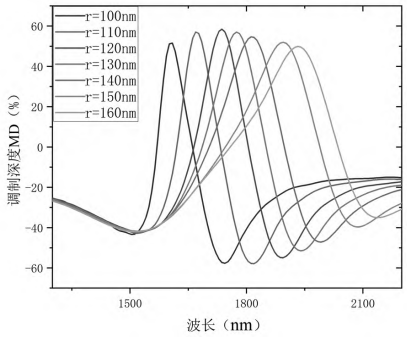


图 4 半径 r 的改变对调制深度 MD 的影响

Figure 4 The impact of changes in radius r on modulation depth MD

表 1 半径 r 的改变对灵敏度 FOM 的影响

Table 1 Effect of changes in radius r on sensitivity FOM

半径 (nm)	非晶态波长 (nm)	晶态波长 (nm)	FOM
100	1609.02	1736.84	1.125
110	1669.17	1812.03	0.809
120	1736.84	1887.22	0.748
130	1781.95	1932.33	0.668
140	1819.55	1977.44	0.461
150	1902.26	2067.67	0.466
160	1954.89	2112.78	0.488

通过研究发现,调制深度并没有固定的变化规律,但平均值约为 53%,当金属圆片半径为 120nm 时,调制深度在 1000nm 处取得最大值 57.09%。而灵敏度随半径的增加呈现出减小趋势,这是因为在不同半径下,相变前后谐振峰波长差值大致相似,而谐振峰半峰宽度随半径增大而逐渐增加,从而导致灵敏度减小,半径 100nm 时取得灵敏度最值为1.125。

金属圆片的存在可以对光开关产生较不错的调制效果,但在实际生产应用中,需要考虑金属圆片所使用材料的成本。为了选择更适用于实际加工的方案,我们选金、银、铜、铝等材料来对比光开关谐振响应的影响,从而选择更适用于实际加工的方案。通过选用不同金属材料,不断增加金属圆片的尺寸,选取 GST 处于非晶态时谐振峰在 1550nm 附近的金属圆片尺寸,计算调制深度与灵敏度。

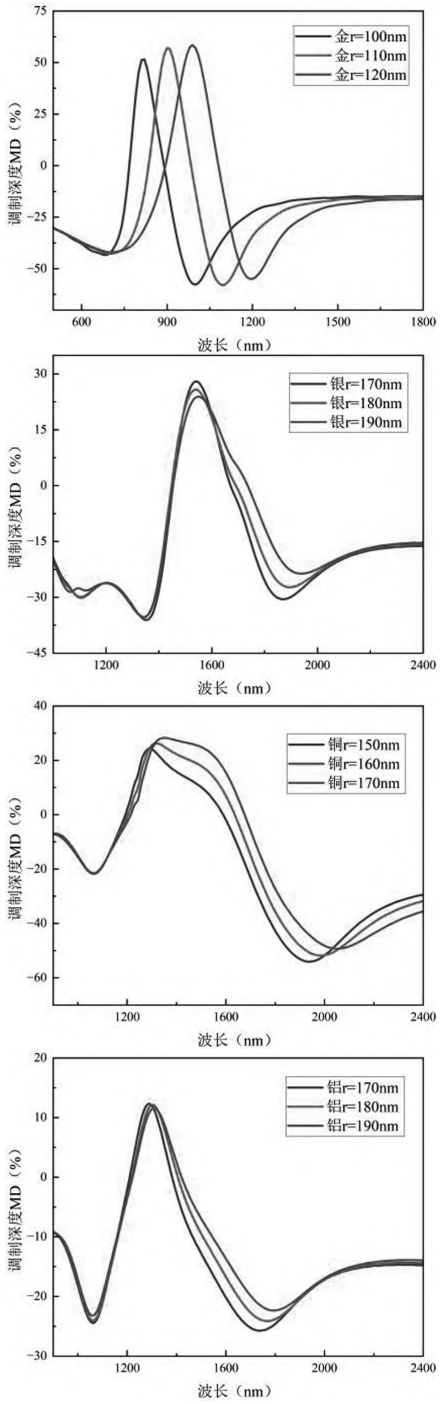


图 5 不同材质金属片对调制深度的影响

Figure 5 The influence of metal sheets of different materials on modulation depth

表 2　不同材质金属片对光开关的影响

Table 2 Effects of metal sheets of different materials on optical switches

材料	半径(nm)	MD	FOM	材料	半径(nm)	MD	FOM
	100	51.56%	1.125		170	27.98%	0.694
金	110	57.01%	0.809	银	180	25.76%	0.657
	120	57.09%	0.748		190	23.91%	0.657
	150	24.68%	0.662		170	12.32%	0.834
铜	160	26.36%	0.628	铝	180	12.15%	0.781
	170	28.22%	0.578		190	11.57%	0.647

在 1550nm 附近,金属圆片尺寸越大,调制效果越好,灵敏度随金属圆片半径的增加呈现下降趋势。

通过比较四种材质的灵敏度,金的最大,其次是铝,可以发现铝的相对变化量最大,在半径为 170nm 时可达到 0.834,从低到高依次为:铜、银、铝、金。这是由于铝的光开关谐振峰最窄,频率选择性好。比较四种材质的调制深度,从低到高依次为:铝、银、铜、金,调制深度最多可以达到 57.09%以上。综合两种参数选出每种材料的最佳尺寸,如表 2 所示。

通过上述讨论可知,在金属与 GST 混合的光开关中,铝、金的灵敏度最好,铜、金的调制深度最好。同时考虑到制作成本,应根据实际需要来选择铝或铜。

虽然金属材料作为光开关组成部分对调制效果的影响好,但其缺点所造成的结果也不容忽视,由于金属具有极高的欧姆损耗且不具有 CMOS 特性,会阻碍高效经济光纤传输。对此,我们提出用高介电常数的介质来代替金属,将会降低集成成本,可以获得具有低损耗、可调谐的光开关。

如图 6,提出全介质光开关的三种周期模型。记图 a)为模型一,基底为二氧化硅(SiO_2),顶部为相变材料 GST 圆柱体;记 GST 薄膜厚度为 h,硅圆柱高度为 t,圆柱半径为 r,电磁波传播方向为 z 轴负方向,电场方向为 y,磁场方向为 x。

通过对 r = 250nm, t = 250nm, 单元周期 1000×1000nm 的光开关进行仿真。如图 7 所示,发现非晶态 GST 的谐振峰在 1430nm 处;晶态 GST 的谐振峰在 1670nm 处,透射强度由 0.0005 增大至 0.204。随

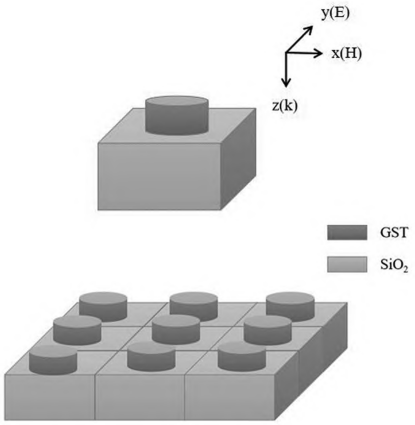


图 6　全介质光开关模型

Figure 6 All-dielectric optical switch model

GST 的相变,谐振峰发生红移,带宽增加,谐振效果减弱。

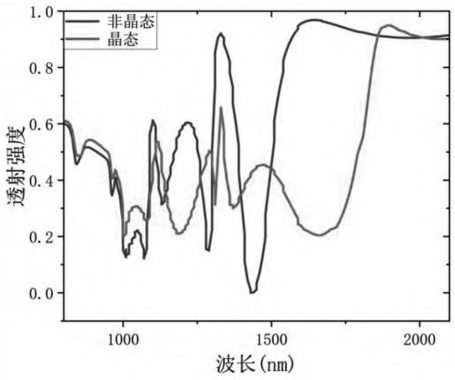
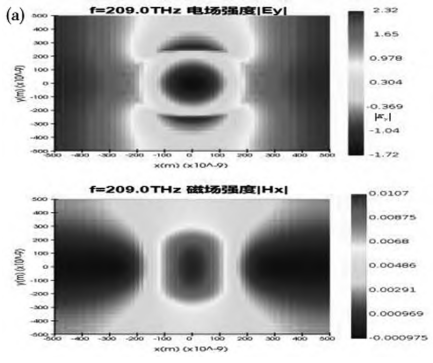


图 7　全介质光开关模型的谐振曲线

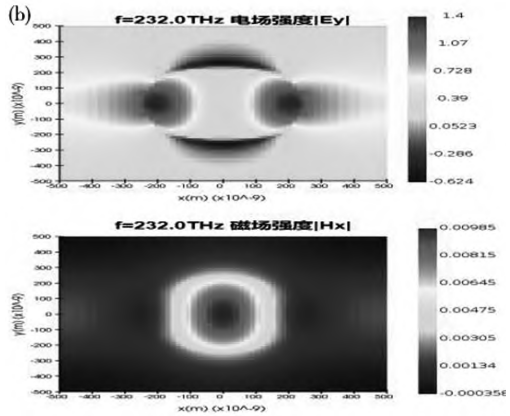
Figure 7 Resonance curve of all-dielectric optical switch model

GST 处于非晶态时光开关在 1290nm 和 1430nm 处都产生了谐振,为了探究作用机理,作出电磁场分布图,如图 8 所示。



a)第一级谐振

a) First level resonance



b)第二级谐振

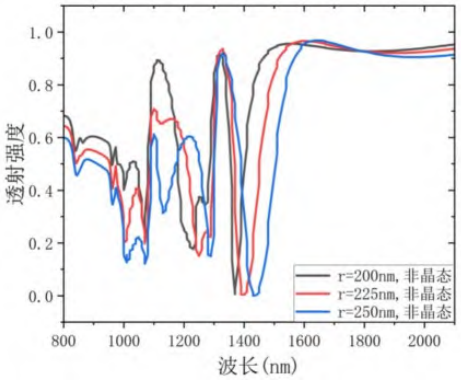
b) Crystalline state

图 8 电磁场分布

Figure 8 Electromagnetic field distribution

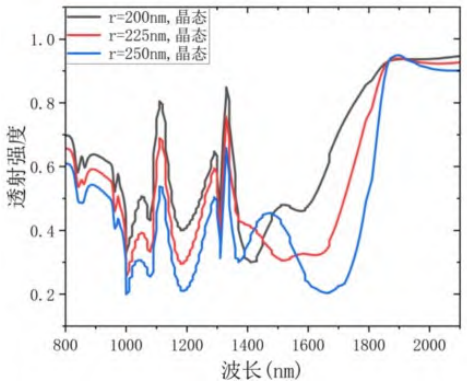
在 1550nm 波段附近的两处谐振峰,可分为第一级谐振 f = 209.0THz(1430nm)与第二级谐振 f = 232.0THz(1290nm)。根据磁场分布图可发现在两级谐振处均有明显的磁谐振现象,在 y 方向产生了磁偶极子。此外,由电场分布图可发现第一级谐振的电场强度要高于第二级谐振,且第一级谐振在 y 方向有明显的电谐振现象。根据图 7 可知,第二级谐振点在晶态与非晶态两状态下的谐振峰波长和强度偏移都不如第一级,且并不满足本文研究的窗口,因此本文只考虑第一级谐振的影响。

改变圆柱体的半径 r 分别为 200nm、225nm、250nm,获得其对光开关谐振响应的影响,如图 9 所示。



a)非晶态

a) Amorphous state



b)晶态

b) Crystalline state

图 9 半径 r 改变对谐振响应的影响

Figure 9 Effect of changing radius r on resonant response

可以发现无论 GST 处于何种状态,第一二级的谐振峰波长(频率)均随半径的增加而增大(减小),第一级偏移幅度略大于第二级。随着圆柱尺寸的减小,磁偶极子的耦合效应减弱,谐振的衰减呈现增强趋势,其中图 b)晶态 r = 200nm 时透射强度达到 40%以上,谐振显著衰减,劣于第二级谐振,此时不再适用于制作光开关。

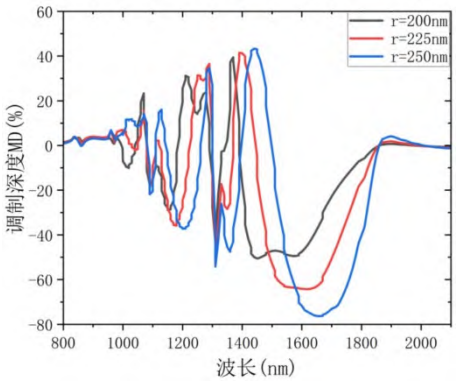


图 10 改变半径 r 对调制深度 MD 的影响

Figure 10 The effect of changing the radius r on the modulation depth MD

表 3 改变半径 r 对光开关的影响

Table 3 Effect of changing the radius r on the optical switch

半径(nm)	非晶态波长(nm)	晶态波长(nm)	FWHM(nm)	FOM	MD
200	1370	1580	140.54	1.494	39.43%
225	1400	1630	147.07	1.563	41.24%
250	1430	1670	137.00	1.751	43.05%

金属圆片半径 r 的改变对调制深度和灵敏度的影响如图 10 与表 3 所示。随半径 r 的增加,光开关的调制深度(MD)随之增大,谐振增强,最大可在 1450nm 处达到 43.05%;半径由 200nm 增加到 225nm 时灵敏度随谐振峰的增宽而增大,半径由 225nm 增加到 250nm 时,谐振峰的宽度(FWHM)减小,灵敏度(FOM)增大,最大值可达 1.751。

3　结论

本文通过对多种相变材料光开关模型的研究,选取相变材料 GST,实现对入射光的调制。首先通过仿真金属材料与相变材料 GST 结合的光开关结构,给出模型的相关尺寸参数,利用电磁强度分布分析了谐振调节内部机制。引入调制深度和灵敏度探讨金属片尺寸与材质的改变对光开关响应效果的影响,在不同实际需求情况下,光开关材料的最佳选择方案。最后得出除金外铝的灵敏度最好,在半径为 170nm 时可达到 0.834,铜、金的调制深度最好,分别是 28.22%和 57.09%。全介质光开关随金属圆片半径 r 的增加,光开关的调制深度随之增大,谐振增强,最大可在 1450nm 处达到 43.05%;半径由 225nm 增加到 250nm 时,谐振峰的宽度减小,灵敏度增大,最大值可达 1.751。

参考文献:

[1] Zhipei Sun, Amos Martinez, Feng Wang. Optical modulators with 2D layered materials[J]. Nature Photonics, 2016, 10(4).

[2] Turpin Jeremiah P., Bossard Jeremy A., Morgan Kenneth L., et al. Reconfigurable and Tunable Metamaterials: A Review of the Theory and Applications[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2014, 2014.

[3] Sergey V. Makarov, Anastasia S. Zalogina, Mohammad Tajik, et al. Light-Induced Tuning and Reconfiguration of Nanophotonic Structures [J]. Laser & Photonics Reviews, 2017, 11(5).

[4] 王曼婷, 高泽华, 兰楚文等. 基于相变材料 Ge_xSb_yTe_z(GST)的微波可调超材料器件研究[J]. 电子元件与材料, 2019, 38(02): 64-70.

[5] 刘孝凯. 基于非易失性相变材料的红外光调制器研究[D]. 杭州电子科技大学, 2022.

[6] 赵钰, 翟凤潇, 张晓冬等. 基于 Ge2Sb2Te5 相变材料的调谐近红外光学超构表面吸收器[J/OL]. 光通信技术:1-7[2023-05-04].https://kns-cnki-net.vpn.cust.edu.cn/kcms/detail/45.1160.TN.20230427.1357.002.html.

[7] Shinji Kohara, Kenichi Kato, Shigeru Kimura, et al. Structural basis for the fast phase change of Ge2Sb2Te5: Ring statistics analogy between the crystal and amorphous states[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(20).

[8] Gholipour Behrad, Zhang Jianfa, MacDonald Kevin F, Hewak Daniel W, Zheludev Nikolay I. An all-optical, non-volatile, bidirectional, phase-change meta-switch [J]. Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.), 2013, 25(22).

[9] 苏巍,张瑞耕,陈秉岩等.时域有限差分法仿真在大学物理实验创新教学中的应用[J].高师理科学刊,2018,38(06):98-100+103.

[10] MichelAK, Chigrin DN, Mass T W, et al. Using low-loss phase - change materialsfor mid - infrared antenna resonance tuning[J]. Nano Letters, 2013, 13(8): 3470.

[11] Carrillo S G, Nash G R, Hayat H, et al. Design of practicable phase-changemetadevices for near-infrared absorber and modulator applications[J]. Optics Express, 2016, 24(12): 13563.

[12] MichelAK, Chigrin DN, Mass T W, et al. Using low-loss phase - change materialsfor mid - infrared antenna resonance tuning[J]. Nano Letters, 2013, 13(8): 3470.

[13] Mimi Q, Yi L, Yuwei Z, et al. Influences of distributed losses on start current, quality factor Q and frequency in multi - mode multi - frequency coaxial gyrotrons [J]. Infrared Physics and Technology, 2023, 133.