

文章编号: 2095-4980(2016)02-0159-04

基于频率选择平面的太赫兹波调制模拟

崔 轩, 田 浩, 周忠祥

(哈尔滨工业大学 理学院 物理系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 太赫兹波调制器是太赫兹通信的一个重要器件。利用介质折射率影响频率选择平面的透射峰, 可以实现对太赫兹波强度透过率的调制。利用有限元法对该结构的调制性能进行模拟分析, 在 3.12 THz 附近 50 V 电压下, 实现了 50% 的强度调制。并进一步分析了该调制结构的调制机理。

关键词: 频率选择平面; 太赫兹调制器; 电光调制; 折射率

中图分类号: TN35

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201602.0159

THz modulation fashioned with frequency selective surface

CUI Xuan, TIAN Hao, ZHOU Zhongxiang

(Department of Physics, School of Science, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150001, China)

Abstract: Modulators are key components in THz systems. THz modulation is realized by controlling the refractive index of the substrate of the frequency selective surface. The performance of the modulators is simulated by finite element methods. The modulation depth reaches 50% under 50 V at 3.12 THz.

Key words: frequency selective surface; THz modulators; electro-optic modulation; refractive index

太赫兹波是指频率在 0.1 THz~10 THz, 波长在 30 μm ~3 mm 范围内的电磁波。其频率范围介于红外与微波波段之间。太赫兹波既有光波的准直性, 又具有较好的穿透性, 在成像、探测等领域具有自己独特的优势。太赫兹波 1 个光子对应的能量大约在 0.4 meV~40 meV 之间, 相对于 X 射线检测, 太赫兹波的光子能量很低, 具有更高的安全性, 不会对检测物质造成电离损伤。实验室已经实现 300 GHz 附近的短距离高速无线通信^[1], 更高频的调制还较少涉及。近年来, 随着太赫兹源^[2-3]、太赫兹时域谱分析^[4]等方面一系列技术性的突破, 太赫兹相关研究也取得飞速发展。周期性结构结合半导体材料的调制器大多通过电场^[5-6]、光强^[7]调节半导体载流子浓度, 通过控制对太赫兹波的衰减实现调制。本文设计了一种通过调节介质折射率实现周期性结构透射峰调制的太赫兹波调制器, 模拟结果显示该调制器实现了较好的调制效果。

1 器件结构

调制器结构如图 1 所示, 左侧为正面结构图, 金线宽 10 μm , x 轴结构周期都为 60 μm , y 轴结构周期为 50 μm 。选取碲化锌(ZnTe)电光晶体为介质层, 厚 2 μm 。图 1 右侧为背面结构图, 有周期为 50 μm , 线宽 10 μm , 在 y 方向上成周期排列的金线光栅。

当金属后衬底厚度较小时, 根据经验公式共振频率:

$$f = \frac{f_0}{\sqrt{(\epsilon_r + 1)/2}} \quad (1)$$

式中 f_0 为共振频率。

当衬底介质折射率发生变化时, 共振峰发生偏离, 从而调制了特定频率太赫兹波的出射光强。对上式取微分得到:

$$\delta f = \frac{\sqrt{2}n_0 f_0}{(1+n_0^2)^{3/2}} \Delta n \quad (2)$$

式中 n_0 为材料折射率。

以 ZnTe 为例, ZnTe 为立方晶系 $\bar{4}3m$ 点群对称的闪锌矿结构, 只有 1 个独立的一次电光系数, $\gamma_{41}=\gamma_{52}=\gamma_{63}$,

并且在太赫兹波段具有较大的一次电光系数, 其电光系数矩阵为: $\gamma_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \gamma_{41} & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_{41} & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_{41} \end{bmatrix}$ 。

可以利用金属线电极对 ZnTe 晶体施加纵向电场, 这会引起晶体折射率椭球发生形变, 电场方向不同会引起折射率椭球发生不同的形变。施加电场 $\mathbf{E} = (E_x, E_y, E_z)$ 后, 折射率椭球方程变为:

$$\frac{x^2 + y^2 + z^2}{n_0^2} + 2\gamma_{41}E_x yz + 2\gamma_{41}E_y xz + 2\gamma_{41}E_z xy = 1 \quad (3)$$

假设通光面为晶体的 [110] 面, 外加电场垂直于通光方向, 则施加电场可以表示为: $\mathbf{E} = E(\sin\theta/\sqrt{2}, -\sin\theta/\sqrt{2}, \cos\theta)$, 此时折射率椭球方程为:

$$\frac{x^2 + y^2 + z^2}{n_0^2} + \sqrt{2}\gamma_{41}E \sin\theta yz - \sqrt{2}\gamma_{41}E \sin\theta xz + 2\gamma_{41}E \cos\theta xy = 1 \quad (4)$$

式中 θ 为电场方向与 z 轴的夹角。做如下坐标变换:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 0 \\ -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (5)$$

并令 $x'=0$, 得到 [110] 面的椭圆方程:

$$\left(\frac{1}{n_0^2} - \gamma_{41}E \cos\theta \right) y'^2 + \frac{z'^2}{n_0^2} + 2\gamma_{41}E \sin\theta y' z' = 1 \quad (6)$$

此时, 长、短轴的折射率分别为

$$n_1 = n_0 + \frac{n_0^3 \gamma_{41} E}{4} (\cos\theta - \sqrt{1 + 3\sin^2\theta}) \quad (7)$$

$$n_2 = n_0 + \frac{n_0^3 \gamma_{41} E}{4} (\cos\theta + \sqrt{1 + 3\sin^2\theta}) \quad (8)$$

则 $\Delta n = \frac{n_0^3 \gamma_{41} E \sqrt{1 + 3\sin^2\theta}}{2}$, 当 $\theta=90^\circ$, 即电场在 [110] 面内与 z 轴垂直时 Δn 有最大值, $\Delta n = n_0^3 \gamma_{41} E$ 。

带入 Δn 的表达式可得:

$$\delta f = \frac{\sqrt{2} n_0^4 f_0 \gamma_{41} E}{2(1 + n_0^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (9)$$

在斜率最大处 $\delta f=20$ GHz 的共振频率改变能引起 50% 的透过率变化, 此时需要的电场强度为 $E=23.46$ V/ μm , 调制器介质层厚 2 μm , 半波电压为 50 V。

2 性能模拟

改变垂直方向的金属线的长度, 共振峰位置发生了偏移, 可以根据不同要求来设计该结构以达到不同效果。改变图 1 正面电极的金属短线长度, 其共振峰会随金属线长度变化发生改变。图 2 从左往右依次为金属线长度 26 μm , 27 μm , 28 μm 的共振峰示意图。图 3 是改变衬底的折射率(从左往右依次为 3.40, 3.41, 3.42, 3.43)引起共振峰的偏移, 可以看到在 3.12 THz 附近能达到 50% 以上的调制深度。该调制方式与 ZnTe 的晶格结构、调制速率受晶格振动速率影响, 可实现很高的调制速度。

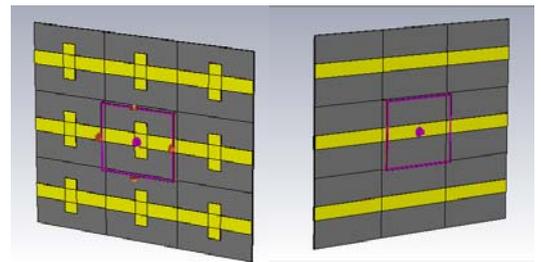


Fig.1 Schematic of the modulators
图 1 调制器结构设计

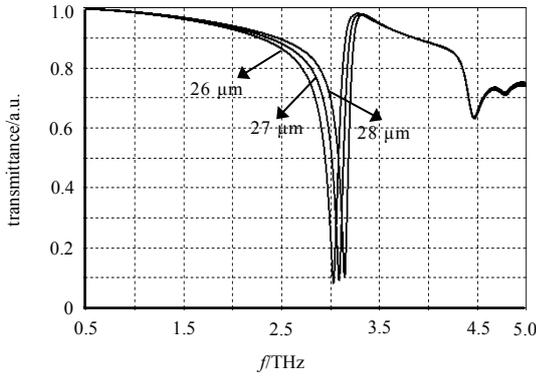


Fig.2 Resonance frequencies against the length of gold line
图2 金线长度变化引起共振频率变化

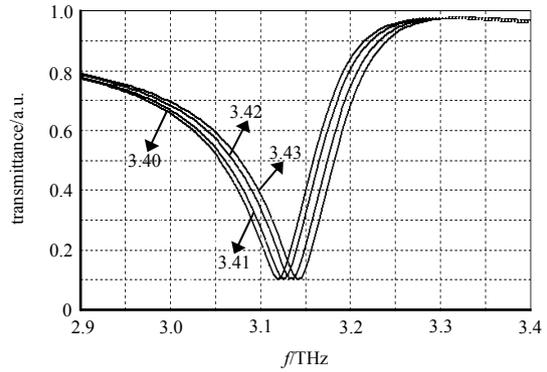


Fig.3 Resonance frequencies against the refractive index of the substrate
图 3 衬底折射率改变引起共振频率变化

3 调制机理分析

介质层厚度的增加会使前后表面的反射相互影响，出现更多的共振峰，高次共振峰往往会有更窄的 3 dB 宽度。这是由于厚度介质会改变前后 2 次反射面的相位差，引起共振峰的偏移及锐化(或畸变)。将上述介质层厚度提高到 10 μm，其他参数不变，结构如图 4 所示。TE 波多透射率如图 5 所示，可以看出，除了 1.7 THz 的基频共振峰外，在更高频率上出现多个共振峰，有的共振峰还出现了简并的趋势。在 2.5 THz, 3 THz 附近都出现了可以用于调制的共振峰。设计不同的共振结构与介质厚度，可以调节共振峰的位置，实现在特定频段的大深度调制，并抑制其他频段的透射率。

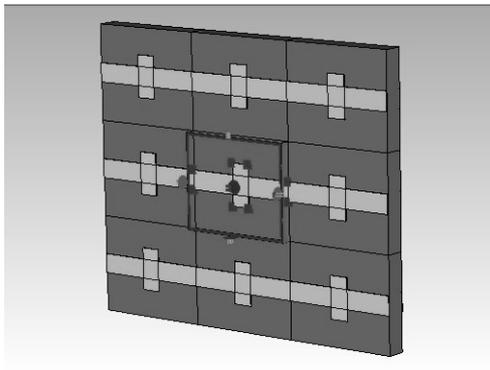


Fig.4 Sample of increasing the thickness of dielectric layer
图 4 增加介质层厚度

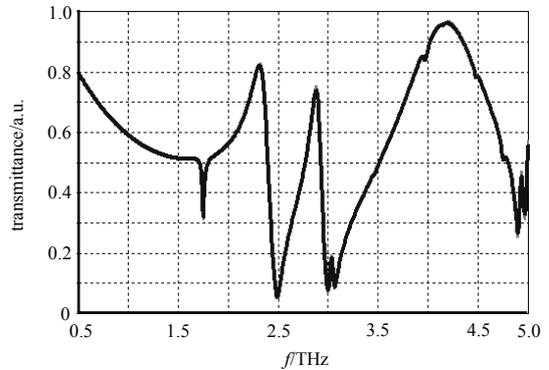


Fig.5 Transmission of TE polarization
图 5 TE 波透射谱

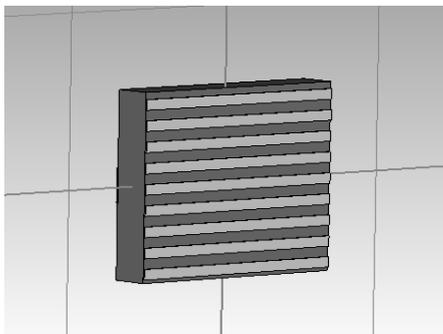


Fig.6 Back grating constant is set as 6 μm
图 6 接地端光栅常数为 6 μm

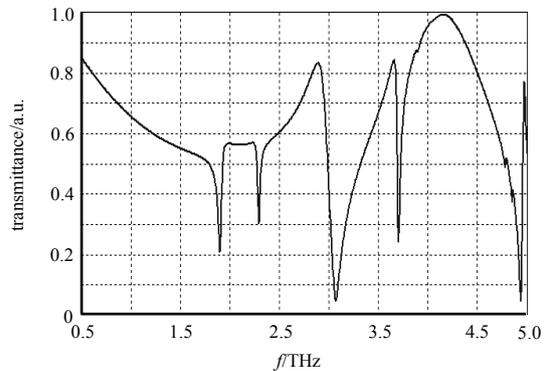


Fig.7 Transmission of TM polarization
图 7 TM 偏振太赫兹波透过率

通过改变背面电极(图 1 右侧金属光栅)的光栅常数,可以进一步压缩共振峰宽度,提高调制性能。减小接地电极的光栅常数可以使介质后表面的反射相位变化更加剧烈,增加高阶共振峰,并使其峰宽更窄。将接地端光栅设置成如图 6 所示,光栅周期为 $6\ \mu\text{m}$,线宽 $3\ \mu\text{m}$ 。其 TM 波多透过率如图 7 所示。可以看出,高阶共振峰进一步增多,并且在 3.7 THz,4.9 THz 频率处的共振峰非常尖锐,在 3 THz 的透过率变化也非常剧烈,峰宽可能是由于共振峰简并引起。在这些频率处进行工作可以大大提高调制器的性能。

4 结论

本文设计了一种利用频率选择平面下衬底折射率的改变引起共振峰偏移实现调制的太赫兹波调制器。理论分析得出半波电压为 50 V,数值模拟了该调制器的性能,在 3.12 THz 附近实现了 50% 的强度调制。通过改变结构参数可以实现对共振峰位置形状的调节,进一步提高调制性能。

参考文献:

- [1] KRUMBHOLZ N,GERLACH K,RUTZ F,et al. Omnidirectional terahertz mirrors: a key element for future terahertz communication systems[J]. Applied Physics Letters, 2006,88(20):202905–202905–3.
- [2] Köhler R,TREDICUCCI A,BELTRAM F,et al. Terahertz semiconductor-heterostructure laser[J]. Nature, 2002,417(6885):156–159.
- [3] ALTUKHOV I V,CHIRKOVA E G,SINIS V P,et al. Towards SiGe quantum-well resonant-state terahertz laser[J]. Applied Physics Letters, 2001,79(24):3909–3911.
- [4] FERGUSON B,ZHANG X C. Materials for terahertz science and technology[J]. Nature Materials, 2002,1(1):26–33.
- [5] TSAI T R,CHEN C Y,PAN C L,et al. Terahertz time-domain spectroscopy studies of the optical constants of the nematic liquid crystal 5CB[J]. Applied Optics, 2003,42(13):2372–2376.
- [6] VOGEL T,DODEL G,HOLZHAUER E,et al. High-speed switching of far-infrared radiation by photoionization in a semiconductor[J]. Applied Optics, 1992,31(3):329–337.
- [7] OKADA T,TANAKA K. Photo-designed terahertz devices[J]. Scientific Reports 1, 2011,1(10):121.

作者简介:



崔 轩(1989–),男,河南省濮阳市人,在读博士研究生,主要从事太赫兹器件(包括亚波长周期结构、调制、滤波)等方面的研究.email: cxcuixuan@gmail.com.

田 浩(1980–),男,沈阳市人,博士,副教授,博士生导师,主要从事钙钛矿结构单晶的临界特性、相变调控、畴工程研究;太赫兹透明电极、有机光电聚合物、石墨烯及二硫化钨的性能研究.

周忠祥(1965–),男,哈尔滨市人,博士,教授,博士生导师,主要从事光电功能材料与器件、非线性光学与光信息处理、等离子体与电磁波相互作用、无铅压电材料与器件、多铁材料等方面的研究.

第 11 届中国生物特征识别学术会议(四川成都)征文通知

中国生物特征识别学术会议(Chinese Conference on Biometric Recognition)是由中国人工智能学会(CAAI)主办,CAAI 模式识别专业委员会协办的国内生物特征识别领域的学术盛会。自 2000 年始,CCBR 已经在北京、杭州、西安、广州、济南、沈阳和天津等地成功举办了 10 届,为生物特征识别领域的学生、老师和工业界研究人员提供了一个活跃的学科互动和信息交流平台,有力促进了国内本领域的学术和技术发展。

2016 年中国生物特征识别学术会议(CCB2016)将于 2016 年 10 月 14–16 日在成都举行,由四川大智胜软件股份有限公司和四川大学联合承办。这是中国生物特征识别大会首次来到西南地区。本届会议将汇聚国内从事生物特征识别理论与应用研究的广大科研工作者,并邀请国际同行,共同分享我国生物特征识别研究的最新理论和技术成果,为大家提供精彩的学术盛宴。

现向广大科技工作者公开征集优秀学术论文(英文),大会录用的稿件将由 Springer 出版社的 Lecture Notes in Computer Sciences(LNCS)图书系列出版,并被 EI 和 ISTP 检索。欢迎学术界和工业界的同仁踊跃投稿、积极参会!有关本届大会的更多信息请参见大会网站: <http://www.wisesoft.com.cn/ccbr2016/>。