

基于十字形金属亚波长孔阵列的电调谐太赫兹调制器设计

梁晓新^{1,2}, 阎跃鹏¹

(1 中国科学院 微电子研究所, 北京 100029; 2 帝国理工大学, 英国 伦敦, SW7 2AZ)

摘 要: 研究了一种硅基十字型金属亚波长孔阵列在太赫兹波段的传输性质和电调谐性质. 十字形半波长金属孔阵列加工在 n 型掺杂硅上形成肖特基结, 其耗尽区的电导率可通过调整外加反向偏压实时控制, 从而实现对增强谐振的太赫兹波传输的控制. 由此提出了一种半导体材料电学特性与太赫兹器件电磁场特性联合仿真方法: 首先基于漂移扩散方程模拟半导体材料在不同偏置电压下载流子的稳态分布并计算出其对应的材料电导率, 进而利用时域有限差分法仿真器件在太赫兹波段的传输性质. 设计的原型调制器在外加偏压分别为在 0 V 和 16 V 时在 4.87 THz 谐振频率处实现了 76% 的调制深度. 并且硅介质材料和相对简单的器件结构使器件实现成本和难度大大降低. 这种设计方法和器件结构也可被应用于其他太赫兹或光学频段, 尤其在光学频段将具有更好的性能.

关键词: 太赫兹; 调制器; 联合仿真**中图分类号:** TN402**文献标识码:** A**文章编号:** 1000-7180(2015)04-0005-05

Electrically – controlled Terahertz Modulator Based on Cross-shaped Subwavelength Metal Hole Arrays

LIANG Xiao-xin^{1,2}, YAN Yue-peng¹

(1 Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2 Imperial College, London SW7 2AZ, UK)

Abstract: The transmission and tuning properties of an electrically-controlled terahertz modulator based on cross-shaped subwavelength hole array is investigated. The metal-semiconductor forms a Schottky junction, where the depletion region modifies the substrate conductivity through an external reverse voltage bias. This achieves effective control of the resonance enhanced terahertz transmission. We introduce a simulation method which combines electrical specification of the substrate and electromagnetic mechanism of the device. Our proof-of-concept modulator achieves an intensity modulation depth of 76% by changing the external voltage bias from 0 to 16 volts. In addition, the silicon substrate and relative simple device structure achieve reduced fabrication cost and difficulty. This design approach and device structure can be also translated to other terahertz and optical frequency range, especially in the optical frequencies, where the switching performance could be more promising.

Key words: terahertz; modulator; co-simulation

1 引言

近年来太赫兹技术和应用的发展持续驱动着对太赫兹器件的需求. 在过去的二十年里, 对太赫兹器件的研究主要集中在太赫兹的产生和探测上^[1-2], 而对太赫兹波控制器件, 例如太赫兹空间波束调制器的研究仍然处于滞后状态^[3]. 作为太赫兹通信系统

里的关键器件, 太赫兹调制器越来越受到广泛关注. 例如超材料^[4]、光子晶体^[5]、量子阱^[6]等基于不同材料和结构的太赫兹调制器件成为近期研究的热点^[7].

基于亚波长孔阵列异常透射特性的器件^[8], 由于在太赫兹波段具有良好的窄带滤波特性也被广泛研究^[9], 但目前对这类人工结构器件的研究主要集

中在其无源特性,例如金属层厚度、孔的几何尺寸、周期性等,对这种超常传输的主动操控的研究开展得很少^[10]. 2011 年报道的源于注入载流子损耗效应的金属环结构太赫兹调制器在 0.3~0.6 THz 范围内实现了高速幅度调制,证明了亚波长孔阵列结构可通过调节金属孔阵列下半导体介质材料中载流子的浓度与分布,来改变器件的透射和反射特性,实现对太赫兹波的调制^[11]. 但在更高频率范围内由于器件尺寸大幅缩小,这类基于载流子注入原理的器件加工难度将大大提高.

为利用亚波长金属孔阵列在太赫兹波段优异的透射特性,同时兼顾实现成本与难度,本文提出加工在 n 型掺杂硅介质材料上的十字形金属亚波长孔阵列结构,基于载流子耗尽原理实现对太赫兹波调制. 设计中,首次结合了半导体材料特性仿真与器件特性电磁场仿真,提高了仿真设计的可靠性.

2 器件结构与工作原理

十字形亚波长金属孔阵列在太赫兹波段具有较好的带通滤波特性,器件的无源特性主要由金属层的几何结构、尺寸和周期性决定^[12].

十字形亚波长金属孔阵列单个阵列单元关键结构参数如图 1 所示. 对于有介质衬底的情况,且金属孔阵列尺寸满足 $K/(G-L) < 1$ 时,器件谐振频率由式(1)近似给出^[9]:

$$\lambda_0 = 2.1L \quad (1)$$

十字形孔的相对尺寸($G:L:K$)决定了器件的品质因数 Q ,开槽周期 G 决定了衍射发生的最大波长 λ_D .

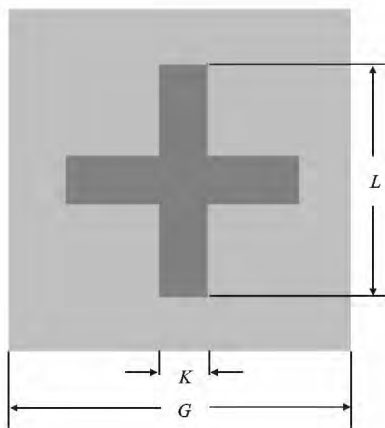


图1 十字形亚波长金属孔阵列单个阵列单元关键结构参数

随着介质厚度增加,谐振向长波方向移动^[13-14]:

$$\lambda_r = \lambda_0 \sqrt{\epsilon_r} \quad (2)$$

式中, ϵ_r 为介质衬底的相对介电常数, λ_r 为共振波长 λ_0 处器件的等效波长.

在太赫兹波段,材料的介电常数可由 Drude 模型来描述^[15]:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_b - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega/\tau} \quad (3)$$

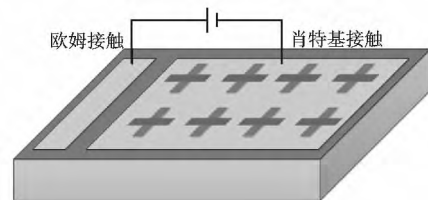
式中, ω 为入射太赫兹波的角频率, ϵ_b 为介质材料高频极限介电常数, ω_p 为材料等离子频率,由式(4)描述, τ 为载流子碰撞时间.

$$\omega_p = \sqrt{\frac{Ne^2}{\epsilon_0 m^*}} \quad (4)$$

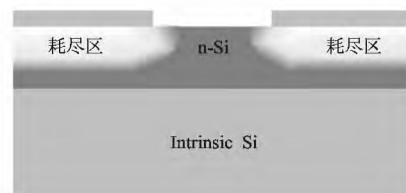
式中, N 为载流子浓度, m^* 为载流子有效质量, e 为电子电荷, ϵ_0 为真空介电常数.

由以上公式可以看出,器件的谐振特性与材料的载流子浓度 N 直接相关. 对于金属,在太赫兹波段其性质接近于完美导体,具有很低的损耗;对于 n 型硅,其电磁特性强烈依赖于载流子浓度,并可通过光、电注入及热来改变.

基于这个原理,我们仿真设计了一种基于这种十字形亚波长金属孔阵列的电控太赫兹空间波束调制器,每个孔阵列单元长度 $G=16 \mu\text{m}$,十字长度 $L=14 \mu\text{m}$,十字宽度 $k=5 \mu\text{m}$,金属厚度 $h=100 \text{ nm}$,加工在厚度 $1 \mu\text{m}$,掺杂浓度 $N=1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 的 n 型硅上,欧姆接触位于十字形阵列周围. n 型掺杂硅与金属层形成肖特基结,其耗尽区可以通过外加反向偏压动态控制,如图 2 所示.



(a) 整体结构示意图



(b) 截面示意图

图2 基于十字形金属孔阵列的太赫兹波空间调制器结构示意图
太赫兹波正入射孔阵列,如图 3 所示. 通过调节

器件偏置电压,改变 n 型硅介质耗尽区的范围及其中载流子浓度与分布,实现对频率选择表面谐振特性的控制,从而控制太赫兹波的传输。

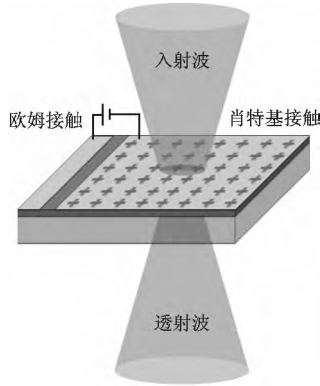


图 3 调制原理示意图

3 材料特性仿真

为实现对器件电调谐能力的准确估计,首先应用硅基光电子结构设计分析仿真软件 Device 进行材料特性模拟。软件基于载流子扩散漂移方程,对一定偏压下介质材料中载流子浓度与分布进行计算。根据器件十字型结构中心对称的特点,分别在单元中心截取三维体结构和一条十字臂处截取二维面结构进行计算。仿真结构和对应结果如图 4 和图 5 所示。

由图 4、图 5 仿真结果可以看出,1 μm 的 n 型硅层的耗尽区范围和载流子浓度可以通过向肖特基结施加反向偏压改变。相比零偏压情况,器件在 16 V 反向偏置条件下耗尽区范围明显增大,并向十字形孔内延伸。

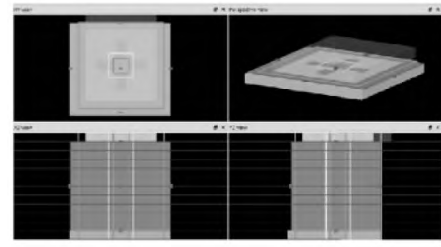
4 器件特性仿真

对于 n 型掺杂硅,其自由载流子浓度与电阻率的关系为^[16]

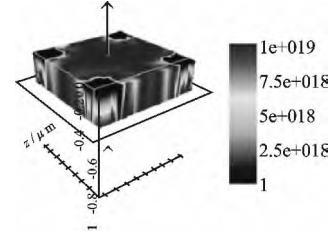
$$N = \frac{6.242 \times 10^{18}}{\rho} \times 10^z \quad (5)$$

$$z = \frac{-3.1083 - 3.2626x - 1.2196x^2 - 0.13923x^3}{1 + 1.0265x + 0.38755x^2 + 0.41833x^3} \quad (6)$$

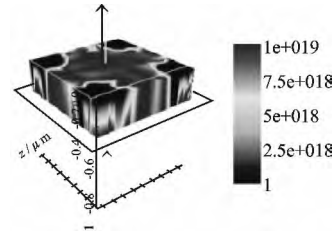
通过式(5)、(6)将材料仿真得到的载流子浓度与分布情况换算成材料电阻率,在 CST Microwave Studio 中对介质材料参数进行设定。设定过程中,为便于建立模型,对耗尽区的形状进行了矩形近似处理。模型建立为单个阵列单元,在 x 、 y 方向边界条件设定为 unit cell,在 z 方向设定为半波长 open space,软件在 x 和 y 两个阵列周期方向上进行周期



(a) 十字型结构单元中心区域三维体仿真结构

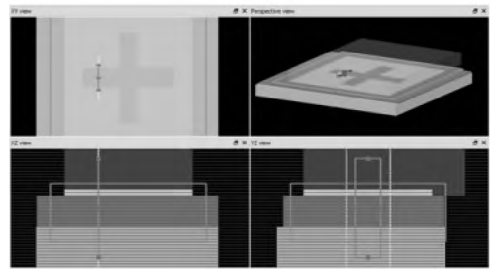


(b) 0 V 偏压下单元中心区域载流子浓度与分布

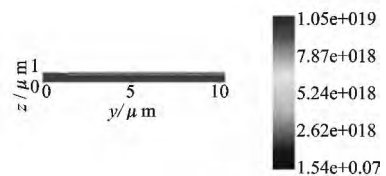


(c) 16 V 偏压下单元中心区域载流子浓度与分布

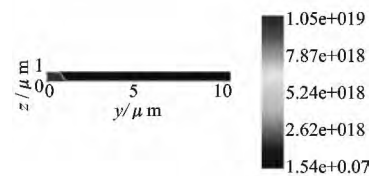
图 4 仿真结果



(a) 十字臂处二维面仿真结构



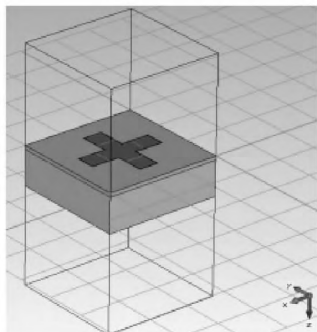
(b) 0 V 偏压下十字臂处载流子浓度与分布



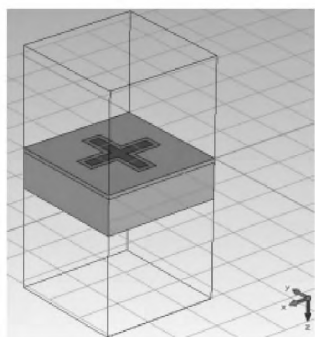
(c) 16 V 偏压下十字臂处载流子浓度与分布

图 5 仿真结果

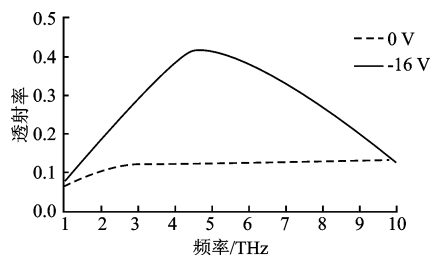
延拓,从而得到二维无限阵列结构的频率选择表面. 本征硅衬底的透射特性作为参考值在最终的仿真结果中减去得到归一化的透射率结果. 器件仿真结构及仿真结果如图 6 所示. 其中,图 6(b)中十字形孔内部边缘处的浅色区域设定为硅介质材料的耗尽区.



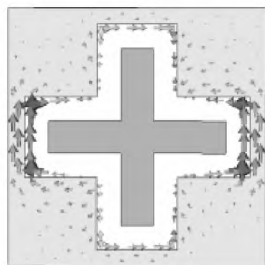
(a) 0 V 偏压下 CST 仿真结构



(b) 16 V 反向偏压下 CST 仿真结构



(c) 不同偏压下器件的透射率



(d) 16 V 反向偏压下谐振点 4.87 THz 处单元的表面电流分布

图 6 仿真结构及仿真结果

由图 6 (c) 所示的仿真结果可以看出,在无外加偏压时,介质损耗很大,相当于将十字型金属孔短路,因此谐振明显减弱,此时器件透射率 T_{0V} 在 1~10 THz 范围内仅为 10%;当反向偏压增加至 16 V 时,由于耗尽区增大,并向孔内延伸,介质损耗减小,相应谐振和太赫兹超常透射增强,此时器件在 4.87 THz 谐振频率处的透射率 T_{16V} 增加至 42%,对应的调制深度 $h = \frac{T_{16V} - T_{0V}}{T_{16V}}$ 达到 76%. 图 6(d) 显示了器件谐振时在十字形孔边缘处表面电流密度明显增强.

对于具有更窄的十字形金属孔的器件,由于耗尽区所占比例相对孔来说更大,将更显著地减小谐振损耗,带来更大的调制深度. 尤其对于更高频率、更短波长的光学频段应用,其需要的孔尺寸更小,整个孔区域可能被完全耗尽,从而实现更高的透射率和调制深度.

5 结束语

本文中我们仿真设计了一种加工在硅介质材料上的十字形亚波长孔阵列的太赫兹波电控调制器. 设计中首次将半导体材料特性仿真与器件电磁特性仿真相结合,提高了仿真的准确性和结果的可靠性. 设计的器件在外加偏压分别为在 0 V 和 16 V 时在 4.87 THz 谐振频率处实现了 76% 的调制深度,通过优化器件几何结构、材料厚度及掺杂浓度,将进一步提高器件的性能. 并且该器件结构相对简单,材料和加工成本较文献报道的同类器件大大降低,提高了器件实用化的可能性. 本文的设计方法和器件的结构同时适用于其他太赫兹频段和光学波段,尤其在波长更短的光学频段将具有更高的性能和应用潜力.

参考文献:

- [1] Ferguson B, Zhang X C. Materials for terahertz science and technology [J]. Nature Materials, 2002, 1 (1): 26-33.
- [2] Siegel P H. Terahertz technology [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50 (3): 910-918.
- [3] Chan W L, Chen H T, Taylor A J, et al. A spatial light modulator for terahertz beams [J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(21): 213511.
- [4] Chen H T, Padilla W J, Cich M J, et al. A metamaterial solid-state terahertz phase modulator [J]. Nature

- Photonics, 2009, 3(3): 148-151.
- [5] Fekete L, Kadlec F, KzP, et al. Ultrafast opto-terahertz photonic crystal modulator [J]. Optics Letters, 2007, 32(6): 680-682.
- [6] 林绪伦. 采用应变层量子阱的毫米波低噪声 HEMT 的进展 [J]. 微电子学与计算机, 1990, 7(2): 12-14.
- [7] Rahm M, Li J S, Padilla W J. The wave modulators: a brief review on different modulation techniques [J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2013, 34(1): 1-27.
- [8] Ebbesen T W, Lezec H, Ghaemi H, et al. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays [J]. Nature, 1998, 391(6668): 667-669.
- [9] Macdonald M E, Angelos Alexanian, York R A, et al. Spectral transmittance of lossy printed resonant-grid terahertz bandpass filters [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2000, 48(4): 712-716.
- [10] Chen H-T, Lu H, Azad A K, et al. Electronic control of extraordinary terahertz transmission through sub-wavelength metal hole arrays [J]. Optics Express, 2008, 16(11): 7641-7648.
- [11] Shu J, Qiu C, Astley V, et al. High-contrast terahertz modulator based on extraordinary transmission through a ring aperture [J]. Optics Express, 2011, 19(27): 26666-26671.
- [12] Melo A M, Gobbi A L, Piazzetta M H, et al. Cross-shaped terahertz metal mesh filters: historical review and results [J]. Advances in Optical Technologies, 2012(530512):12.
- [13] Qq D, Grischkowsky D, Zhang W. Terahertz transmission properties of thin, subwavelength metallic hole arrays [J]. Optics letters, 2004, 29 (8): 896-898.
- [14] Ghaemi H F, Thio T, Grupp D E, et al. Surface plasmons enhance optical transmission through subwavelength holes [J]. Physical Review B, 1998, 58(11): 6779-6782.
- [15] Ulbricht R, Hendry E, Shan J, et al. Carrier dynamics in semiconductors studied with time-resolved terahertz spectroscopy [J]. Review of Modern Physics, 2011, 83(2): 543-586.
- [16] Astm F723-99. Standard practice for conversion between resistivity and dopant density for boron-doped, phosphorus-doped, and arsenic-doped silicon [M]. West Consho Hocken:ASTM International, 2003.

作者简介:

梁晓新 女,(1979-),博士研究生,副研究员.研究方向为微波毫米波及太赫兹器件. E-mail:liangxiaoxin@ime.ac.cn.
阎跃鹏 男,(1963-),博士生导师,研究员.研究方向为通信、导航系统及其关键器件.

(上接第4页)

108 位前导 0 电路设计与优化,并与当前性能最优的 8 位分组 RTL 级代码进行性能比较,通过比较发现采用 2 位并行分组计数的前导 0 电路的运算速度比 8 位分组 RTL 级代码 DC 综合的时序快了 19%. 由于前导 0 计数器电路处在浮点加法运算的关键路径上,因此 108 位前导 0 计数器在时序上取得的良好结果,对提高浮点加法的运算具有非常重要的意义.

参考文献:

- [1] 唐世庆,尹勇生,刘聪.一种加速浮点加法器的设计实现[J].微电子学与计算机,2003,20(8):163-166.
- [2] 李星,胡春媚,李勇,等.前导 1 预测算法的设计与实现[J].计算机科学,2013,40(4):24-28.

- [3] 孙岩,张鑫,金西.基于并行预测的前导 0 预测电路设计[J].电子测量技术,2008,31(1):84-87.
- [4] 黎渊,倪晓强,张民选.两种基于 FFO 的前导 0 检测算法[J].计算机工程与科学,2010,32(7):69-71.
- [5] Jan M Rabaey. 数字集成电路—电路、系统与设 [M]. 2 版.周润德,译.北京:电子工业出版社,2009.
- [6] 吉伟,杨靓,黄士坦.浮点运算中前导 0/1 的设计方法[J].微电子技术,2007,24(22):82-85.

作者简介:

李 勇 男,(1970-),博士,副研究员.研究方向为微处理器和 SOC 设计. E-mail:yongli@nudt.edu.cn.
秦海阳 男,(1986-),硕士研究生.研究方向为高性能集成电路设计与实现.
李振涛 男,(1976-),博士,副研究员.研究方向为高性能微处理器电路设计与 EDA 设计.