光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021050802

基于超材料的太赫兹幅度调制器设计

潘　武*，杨龙亮，马　勇，刘博文，肖惠云

（重庆邮电大学 光电工程学院，重庆 400065）

摘　要： 提出了一款基于超材料的太赫兹幅度调制器，其结构由开口“弓”形超材料结构、高电子迁移率晶体管、斜十字馈线和碳化硅衬底四部分构成。“弓”形超材料结构开口处的连通和断开两种状态将对通过该结构的太赫兹波产生不同的响应。在开口处添加高电子迁移率晶体管可模拟开口连通和断开的效果。当对晶体管上的栅极不施加偏压时，超材料结构开口相当于导通，对太赫兹波透射系数高；当对晶体管上的栅极施加偏压时，超材料结构开口相当于断开，对太赫兹波透射系数低。仿真结果表明，在 0.22 THz 处，对晶体管栅极不施加偏压时，调制器的透射系数为 0.579；对晶体管栅极施加偏压时，调制器的透射系数为 0.040。通过公式计算得到其调制深度为 93%，而且对 x 和 y 极化入射波具有不敏感的特性。同时，通过分析 0.22 THz 处的电场分布和表面电流分布研究了该太赫兹调制器的工作原理。所设计的太赫兹调制器具有调制深度高、结构简单和易于加工等特点，在太赫兹通信领域具有广阔的应用前景。

关键词： 太赫兹；高电子迁移率晶体管；超材料；调制器

中图分类号： TN761　**文章编号：** 1001－5868(2021)05－0610－05

Design of Metamaterial-Based Terahertz Amplitude Modulator

PAN Wu, YANG Longliang, MA Yong, LIU Bowen, XIAO Huiyun

(College of Photoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, CHN)

Abstract: A metamaterial-based terahertz amplitude modulator is proposed with the structure consisting of an open "bow" shaped metamaterial structure, a high electron mobility transistor, an oblique cross feeder and a silicon carbide substrate. Whether the openings of the "bow" shaped metamaterial structure are connected or disconnected will produce different responses to the terahertz waves passing through the structure. The effect of connecting and disconnecting the openings can be simulated by adding high electron mobility transistors to the openings of the "bow" shaped metamaterial structure. When no bias voltage is applied to the gate of the transistor, the opening of the metamaterial structure is equivalent to conduction, and the transmission coefficient to terahertz waves is high; when bias voltage is applied to the gate on the transistor, the opening of the metamaterial structure is equivalent to disconnection, and the transmission coefficient of terahertz waves is low. The simulation results show that the transmission coefficient of the modulator is 0.579 at 0.22 THz when no bias is applied to the transistor gate, while it is 0.040 at 0.22 THz when bias is applied to the transistor gate. The modulation depth of 93% is obtained by the equation, and the modulator is insensitive to x- and y-polarized incident waves. Meanwhile, the operating principle of this terahertz modulator is studied by analyzing the electric field distribution and surface current distribution at 0.22 THz. The terahertz modulator designed in this paper is characterized by high modulation depth, simple

收稿日期：2021－05－08.

*通信作者：潘　武

structure and easy processing, which has a broad application prospect in the field of terahertz communication.

Key words: terahertz; high electron mobility transistor; metamaterial; modulator

0　引言

太赫兹(Terahertz, THz)波一般指频率在 0.1～10 THz,波长介于 0.03～3 mm 的电磁波,其高频部分与远红外波段有重合,低频部分与毫米波段有重合[1-3]。太赫兹波具有光子能量低、穿透能力强和频带宽等特点,在光谱学[4]、太赫兹通信[5]和太赫兹成像[6-7]等领域具有广阔的应用前景。太赫兹调制器是太赫兹通信系统的核心器件,在太赫兹通信系统中起着重要作用。而太赫兹调制器的研究受到能与太赫兹波产生强的电磁响应的材料限制。超材料(Metamaterial)的出现为此难题提供了解决方案。超材料通常是指由人工设计的亚波长微结构单元按一定的周期性排列方式构成的电磁材料。与自然界中存在的天然材料不同,超材料的电磁特性由构成它的谐振单元结构和排列方式决定,而不是由材料结构的原子或分子决定[8],因此通过合理地设计超材料单元结构和单元结构排列方式,可以实现自然界材料无法达到的特性,如负折射率[9]、完美透镜[10]和电磁隐身[11]等。

2006 年,美国 Los-Alamos 实验室的 Chen 等[12]首次提出基于开口环形超材料结构的电控太赫兹调制器。该调制器通过在金属超材料结构上施加偏置电压改变 n-GaAs 衬底的载流子浓度,从而改变超材料结构开口处的电容,影响超材料结构的谐振特性。该调制器的调制深度达到 50%,受器件较大寄生电容的影响,调制速率只能达到几千赫兹,该调制器的驱动电压较高(大于 16 V)。高电子迁移率晶体管(High Electron Mobility Transistor, HEMT)具有电子迁移率高、驱动电压低的特点,为实现低驱动电压的高速调制器提供了一种途径。2011 年,波士顿大学的 Padilla 团队[13]首次将砷化镓高电子迁移率晶体管(GaAs HEMT)与超材料相结合,实现了电控太赫兹调制器。该调制器能够在 0.46 THz 处实现 33%的调制深度,其调制速率达到 10 MHz,驱动电压仅为－3 V。2018 年,Zhang 等[14]提出了一款基于单通道 AlGaN/GaN HEMT 的电控太赫兹调制器,对该调制器施加－3 V 的驱动电压,在 0.835 THz 处实现了 33%的调制深度,调制速率达到 20 MHz。虽然上述几种太赫兹调制器具有较高的调制速率,但是其调制深度较低,且均对入射波的极化方向敏感,这极大地降低了调制器使用的灵活性。

针对太赫兹调制器的调制深度低和对入射太赫兹波的极化方向敏感的问题,本文提出了一款基于超材料的极化不敏感太赫兹调制器。当入射太赫兹波的极化方向分别为 x 和 y 方向时,调制器在 0.22 THz 处均能实现 93%的调制深度,在太赫兹通信领域具有重要的潜在应用价值。

1　调制器结构设计

本文设计的太赫兹调制器主要由开口“弓”形超材料结构、HEMT、斜十字馈线和碳化硅(SiC)衬底四部分构成。HEMT 位于“弓”形超材料结构的开口处,其源漏电极与超材料结构连接,栅极与中间斜“十”字馈线连接,通过加载不同电压可以控制 HEMT 的通断。

调制器的单元结构如图 1 所示,单元结构周期 $p=280.0\ \mu m$,介质层厚度 $h=260.0\ \mu m$,中间圆环半径 $r=20\ \mu m$,开口大小 $g=10\ \mu m$,顶层金属 Au 的厚度 $t=0.2\ \mu m$,SiC 衬底的相对介电常数 $\varepsilon_{SiC}=9.8$。

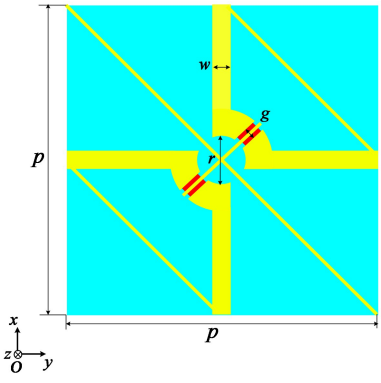


图 1　太赫兹调制器结构示意图

2　调制器特性分析

利用 CST Microwave Studio 2018 电磁仿真软件对调制器的电磁透射特性进行数值仿真分析,设置如下:网格剖分选择有限元法,x 和 y 方向边界条

件设置为 unit cell，z 方向边界条件设置为 open (add space)。入射太赫兹波沿 z 轴方向垂直入射至调制器表面，其电场方向为 x 方向，如图 2 所示。

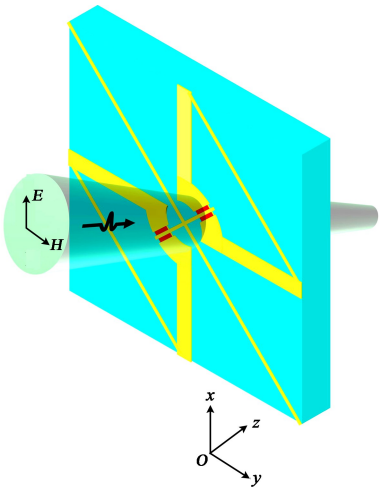


图 2 太赫兹波入射到调制器表面示意图

利用等离子体自由电子气模型(Drude 模型)模拟不同偏置电压下 HEMT 沟道中二维电子气的浓度变化。该 Drude 模型通常表示为[11]

$$\varepsilon(\omega)=\varepsilon_{\infty}+\mathrm{i}\omega_{\mathrm{p}}^{2}\frac{\gamma\omega^{-1}}{\omega^{2}+\gamma^{2}} \tag{1}$$

其中，ε_{∞} 为高频极限介电常数，γ 为自由电子碰撞频率，γ 可通过下式计算：

$$\gamma=\frac{1}{\tau}=\frac{\mathrm{e}}{m\mu} \tag{2}$$

其中，μ 为沟道内电子迁移率，τ 为弛豫时间，ω_{p} 为等离子体频率，ω_{p} 可表示为

$$\omega_{\mathrm{p}}^{2}=\frac{ne^{2}}{\varepsilon_{0}md} \tag{3}$$

其中，ε_{0} 表示真空介电常数，m 表示载流子有效质量，d 为 HEMT 沟道的厚度，n 表示沟道内电子浓度，e 表示电子电荷量。由式(3)可知，电子浓度 n 与等离子体频率的平方成正比，可通过改变 ω_{p} 的值等效模拟电子浓度的改变。

当 y 极化方向的太赫兹波沿着 z 轴正方向垂直入射至调制器表面时，在不同等离子体频率 ω_{p} 下，调制器对太赫兹波的透射系数(T)如图 3 所示。当 $\omega_{\mathrm{p}}=1.0\times10^{16}$ rad/s 时，调制器的透射系数为 0.579。随着等离子体频率 ω_{p} 的减小，调制器在 0.22 THz 处产生谐振，且谐振强度逐渐增大，透射系数逐渐减小。当 $\omega_{\mathrm{p}}=1.0\times10^{12}$ rad/s 时，调制器的透射系数趋于饱和，为 0.040。根据公式 $MD=(T_{\mathrm{off}}-T_{\mathrm{on}})/T_{\mathrm{off}}$ (T_{off} 对应 $\omega_{\mathrm{p}}=1.0\times10^{16}$ rad/s 时的透射系数，T_{on} 对应 $\omega_{\mathrm{p}}=1.0\times10^{12}$ rad/s 时的透射系数)计算出调制器在 0.22 THz 处的调制深度为 93%。

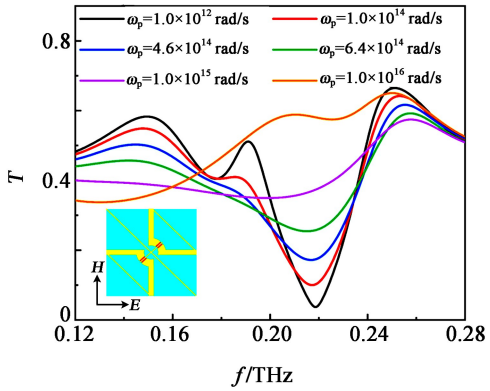


图 3 y 极化太赫兹波入射下调制器的透射系数曲线

当 x 极化方向的太赫兹波沿着 z 轴正方向垂直入射至调制器表面时，在不同等离子体频率 ω_{p} 下，调制器对太赫兹波的透射系数如图 4 所示。从图中可以看出，随着 ω_{p} 的减小，调制器同样在 0.22 THz 处产生谐振，且谐振强度逐渐增强，透射系数逐渐减小，最终在 $\omega_{\mathrm{p}}=1.0\times10^{12}$ rad/s 处稳定。通过上述公式计算出 0.22 THz 处的调制深度为 93%。

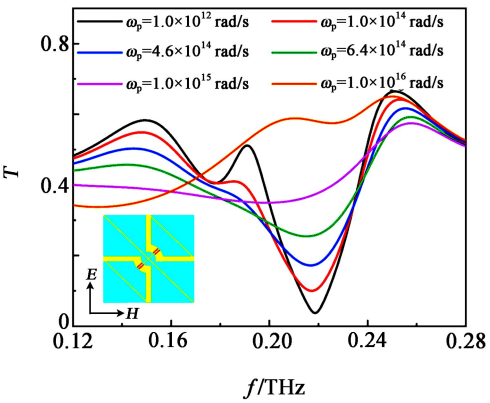
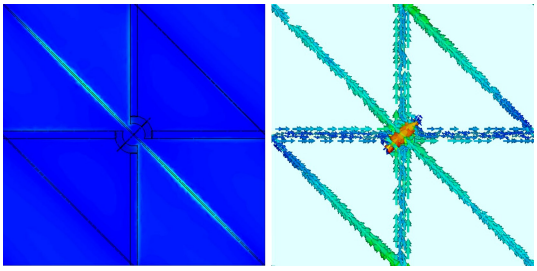


图 4 x 极化太赫兹波入射下调制器的透射系数曲线

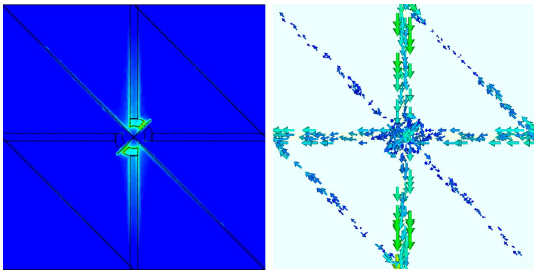
通过设计对称的超材料单元结构可实现极化不敏感的特性。通过分析图 3 和图 4 的透射系数曲线，发现：当入射太赫兹波的极化方向分别为 x 和 y 方向时，该调制器的谐振频率没有变化，且调制深度相同，这说明通过设计对称的超材料单元结构可以实现对 x 和 y 极化入射波极化不敏感的特性。

通过 CST 中的三维场监视器可得到调制器在 0.22 THz 处的电场和表面电流分布，如图 5 所示。对晶体管的栅极不施加偏压时，电场主要集中在倾

斜的金属杆上，开口处几乎没有电场分布。上下金属杆导通，表面电流均匀分布于金属杆上，开口处电流可以流过。造成这种现象的原因在于，当晶体管的栅极不施加偏压时，HEMT 中的二维电子气浓度高，开口处于连接状态，感应电流由下至上，在外场作用下没有发生振荡。当对晶体管的栅极施加偏压时，电场主要集中在开口处，开口处电流不能流过。造成这种现象的原因在于，当对晶体管的栅极施加偏压时，HEMT 中的二维电子气逐渐耗尽，开口断开，上下金属杆出现偶极子振荡[15]，在 0.22 THz 出现谐振频点。



（a）　未加电模式



（b）　加电模式

图 5　未加电与加电模式下，太赫兹调制器的电场和表面电流分布

3　结构参数变化对调制性能的影响

3.1　单元结构周期 p 对调制性能的影响

利用控制变量法，保持其他参数不变，研究单元结构周期 p 的改变对调制性能的影响。图 6 为调制器在单元结构周期 p 分别为 270，280，290 和 300 μm 时的透射系数仿真结果曲线。当对晶体管上的栅极不施加偏压时，调制器未产生谐振，其透射系数几乎不变；当对晶体管上的栅极施加偏压时，随着周期的增大，调制器的谐振频点发生红移。其原因在于，对晶体管上的栅极施加偏压，HEMT 沟道内的二维电子气被驱散开，源漏之间处于断开状态，此时上下金属杆产生谐振。对晶体管上的栅极不施加偏压，HEMT 沟道内的二维电子气浓度高，源漏之间处于导通状态，此时未产生谐振。

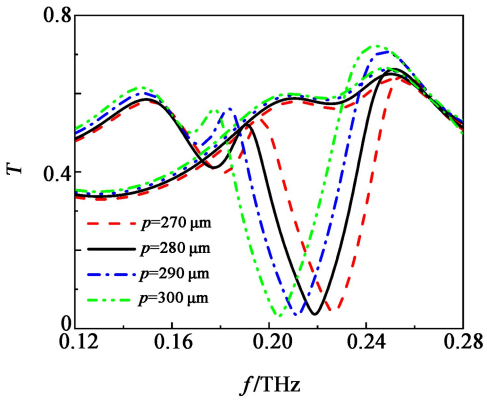


图 6　随单元结构周期 p 变化的太赫兹调制器透射系数仿真结果

利用公式 $f=(\sqrt{LC})^{-1}$ 和 $C=\varepsilon S/4\pi kd$ 计算单元结构的谐振频率，其中 C 为等效电容，L 为等效电感，d 为电容板间距，k 为静电力常量，S 为等效电容板的正对面积。可以看到，周期的增大会增加上下金属杆的长度，使得结构的等效电感 L 变大，导致谐振频率降低。

3.2　中间圆环开口大小 g 对调制性能的影响

保持其他参数不变，设置调制器单元结构中开口大小 g 分为 6，8，10 和 12 μm，太赫兹调制器透射系数曲线如图 7 所示。从图 7 可知，对晶体管上的栅极不施加偏压时，太赫兹调制器的透射系数几乎没有变化；对晶体管上的栅极施加偏压时，太赫兹调制器谐振频点蓝移。其原因在于，开口大小 g 的增加会减小结构的等效电容 C，进而造成谐振频率的增大。

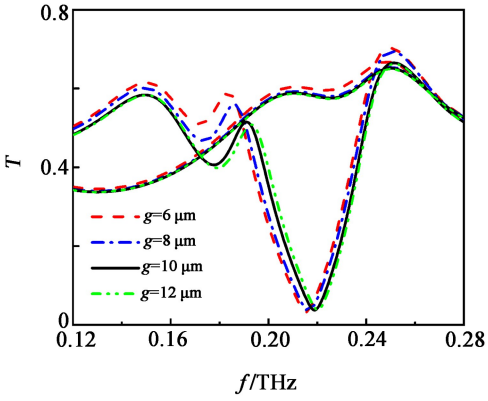


图 7　随开口大小 g 变化的太赫兹调制器透射系数仿真结果

3.3　中间圆环半径 r 对调制性能的影响

保持其他参数不变，设置单元结构中圆环半径 r 分别为 20，24，28 和 30 μm，在不同圆环半径 r 的情况下，太赫兹调制器的透射系数曲线如图 8 所示。

从图 8 可知，当对晶体管上的栅极不施加偏压时，随着单元结构中间圆环半径 r 的增加，调制器的透射曲线几乎不变；当对晶体管上的栅极施加偏压时，调制器的谐振频点发生蓝移。这是由于中间圆环半径的增大会增加上下金属杆间距，进而使得结构的等效电感 L 减小，最终导致器件的谐振频率增大。

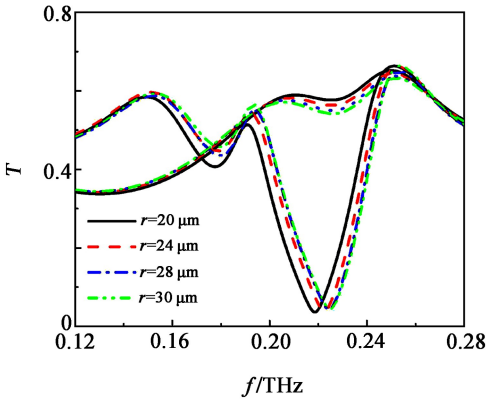


图 8 随中间圆环半径 r 变化的太赫兹调制器透射系数仿真结果

4 结论

本文设计了一款基于超材料的电控太赫兹调制器，将 HEMT 设计于超材料开口处，通过电压控制 HEMT 沟道中的二维电子气浓度，可以改变器件的谐振强度，进而实现对太赫兹波的调控。该调制器具有极化不敏感特性，使用灵活性强。仿真结果表明，当入射太赫兹波的极化方向分别为 x 和 y 方向时，太赫兹调制器在 0.22 THz 处的调制深度均为 93%。此外，该太赫兹调制器具有调制深度高、结构简单和易于加工等特点，在太赫兹通信领域具有广阔的应用前景。

参考文献：

[1] 张存林，牧凯军. 太赫兹波谱与成像[J]. 激光与光电子学进展，2010，47(2)：1-14.
Zhang Cunlin，Mu Kaijun. Terahertz spectroscopy and imaging [J]. Laser and Optoelectronics Progress，2010，47(2)：1-14.

[2] Siegel P H. Terahertz technology [J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech.，2002，50(3)：910-928.

[3] Schmuttenmaer C A. Exploring dynamics in the far-infrared with terahertz spectroscopy[J]. Chem. Rev.，2004，35(24)：1759-1780.

[4] Chen H T，Padilla W J，Cich M J，et al. A metamaterial solid-state terahertz phase modulator[J]. Nat. Photonics，2009，3(3)：148-151.

[5] Möller L，Federici J，Sinyukov A，et al. Data encoding on terahertz signals for communication and sensing[J]. Opt. Lett.，2008，33(4)：393-395.

[6] Chan W L，Chen H T，Taylor A J，et al. A spatial light modulator for terahertz beams[J]. Appl. Phys. Lett.，2009，94(21)：213511.

[7] 胡子轩，邓 琥，陈林宇. 基于 LabVIEW 的太赫兹二维扫描成像系统设计[J]. 传感器与微系统，2019，38(7)：108-110，114.
Hu Zixuan，Deng Hu，Chen Linyu. Design of terahertz two-dimensional scanning imaging system based on LabVIEW[J]. Transducer and Microsystem Technologies，2019，38(7)：108-110，114.

[8] Hashemi M R，Cakmakyapan S，Jarrahi M. Reconfigurable metamaterials for terahertz wave manipulation [J]. Rep. Prog. Phys.，2017，80(9)：094501.

[9] Smith D R，Pendry J B，Wiltshire M C K. Metamaterials and negative refractive index[J]. Science，2004，305(5685)：788-792.

[10] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. Phys. Rev. Lett.，2000，85(18)：3966-3969.

[11] Zhao G，Bi S，Niu M，et al. A zero refraction metamaterial and its application in electromagnetic stealth cloak [J]. Mater. Today Commun.，2019，21：100603.

[12] Chen H T，Padilla W J，Zide J M O，et al. Active terahertz metamaterial devices[J]. Nature，2006，444(7119)：597-600.

[13] Shrekenhamer D，Rout S，Strikwerda A C，et al. High speed terahertz modulation from metamaterials with embedded high electron mobility transistors [J]. Opt. Express，2011，19(10)：9968-9975.

[14] Zhang X，Xing Y，Zhang Q，et al. High speed terahertz modulator based on the single channel AlGaN/GaN high electron mobility transistor[J]. Solid-State Electron.，2018，146：9-12.

[15] Zhang Y，Qiao S，Liang S，et al. Gbps terahertz external modulator based on a composite metamaterial with a double-channel heterostructure[J]. Nano Lett.，2015，15(5)：3501-3506.

作者简介：

潘 武(1966—)，男，四川大英人，博士，教授，主要从事太赫兹技术、超介质材料及应用研究；

杨龙亮(1997—)，男，重庆潼南人，硕士研究生，研究方向为太赫兹调制器。