

电磁 Metamaterials 调制器研究

殷 勇¹, 胡江川²

(1. 电子科技大学物理电子学院, 四川 成都 610054; 2. 成都精密光学工程研究中心, 四川 成都 610041)

摘 要:对电磁 Metamaterials 进行了介绍和研究,设计了一种工作在 360GHz 的电磁 Metamaterials。通过详细研究表明,其可以利用光电导效应制作出工作于 360GHz 的太赫兹调制器。并对采用该技术搭建 360GHz 高速无线通信系统的可行性进行了简要分析。本方法还可以应用到利用该材料的其他频段上,尤其是太赫兹频段上可以表现出其优势。

关键词:电磁 Metamaterials; 360GHz; 调制器

中图分类号: TN6

文献标识码: A

Study of Electromagnetic Metamaterials Modulator

YIN Yong¹, HU Jiang-chuan²

(1. School of Physical electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;

2. Chengdu Fine Optic Engineering Research Center, Chengdu 610041, China)

Abstract: This paper introduced and studies the electromagnetic metamaterials, and designed a kind of electromagnetic metamaterials operating in the 360GHz band. Detailed study shows that it can be used to fabricate a modulator at 360GHz. The possibility of utilizing this technology to construct high speed wireless communication system is also included and this method can also be used in other frequency bands especially at THz frequency range.

Key words: electromagnetic metamaterials; 360GHz; modulator

1 引 言

近年来关于电磁 Metamaterials(有译作超材料)的研究引起了学术界的广泛关注^[1],根据电磁 Metamaterials 的定义^[2],是指自然界通常不存在的,一般只能通过人工方法做出的具有特殊性质的等效均匀的电磁结构。其中提到的等效均匀,指的是结构的单元尺寸要远小于工作波长(至少要小于工作波长的四分之一)。在等效均匀的条件下,电磁 Metamaterials 在波的传播方向上可以看成是均匀的,其主要的电磁特性则是由每个单元格的特性决定的。从本质上讲, Metamaterials 更是一种新颖的

材料设计思想,这一思想的基础是通过在多种物理结构上的设计来突破某些表现自然规律的限制,从而获得超常的材料功能。迄今发展出的 Metamaterials 包括“左手材料”、光子晶体、“超磁性材料”等。Metamaterials 的设计思想昭示人们可以在不违背基

作者简介:殷 勇(1980 -),男,博士,讲师,近几年发表了论文 10 余篇,现主要从事特殊谐振系统的研究,基于真空电子学的电磁辐射源的研究,微波技术中的 EMC 研究以及太赫兹辐射源,太赫兹信号检测和太赫兹源的应用方面的研究。E-mail: yin. yong@ 163. com

收稿日期: 2008-06-02

本的物理学规律的前提下,人工获得与自然界中的物质具有迥然不同的超常物理性质的“新物质”,把功能材料的设计和开发带入一个崭新的天地。从物理上说,Metamaterials 的物理性质是在工作波长远大于其结构单元的尺寸时表现出来的,并且该特点主要是由其结构确定。

作为介于远红外与毫米波之间的太赫兹频段,近年来也得到了广泛的关注^[3]。太赫兹频段所对应的波长在 $3000\mu\text{m} \sim 30\mu\text{m}$ 之间,相应的频率为 $100\text{GHz} \sim 10\text{THz}$ 。目前工作在太赫兹频段的器件十分缺乏,这对太赫兹科学技术的广泛应用带来了很大的困难。而采用 Metamaterials 不失为一条较好的解决太赫兹器件缺乏的途径之一,以 300GHz 为例,其对应的波长是 $1000\mu\text{m}$,其设计结构单元的尺寸在 $100 \sim 250\mu\text{m}$,考虑到在该尺寸上加工设计的形状,其线宽在 $5\mu\text{m}$ 就能满足要求,这对于传统的光刻(Photolithography)技术来说,是可以做到的,并且随着光刻技术的加工线宽能力的提高,可设计的工作频率还可以进一步提高。

将太赫兹技术用于通信领域其优势是显而易见的。对于 60GHz 频带,其只能利用约 7GHz 的带宽。另一方面,以 $(300 \sim 500)\text{GHz}$ 的太赫兹波为利,其可以利用共 200GHz 的带宽,在这样大的带宽下,可利用更简单的调制方式实现大容量通信,还有可能降低制造成本。之所以采用电磁 Metamaterials 作为我们研究的重点,是因为其电磁特点主要是由其结构确定的,这种为我们利用该材料工作在 1THz 以上的频段提供了可能。考虑到太赫兹信号的大气衰减情况(如图1所示)以及国内加工的微细金属结

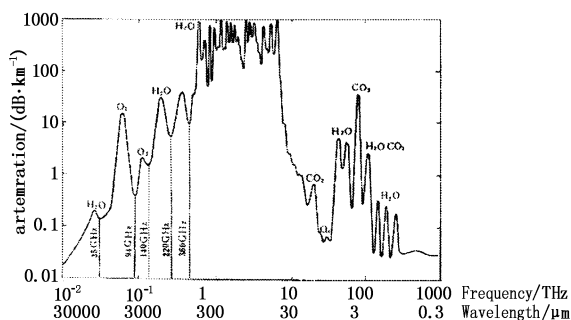


图1 电磁波在晴朗天气所受大气衰减与频率的关系

构的情况($5\mu\text{m}$ 线宽)拟采用 360GHz 作为我们研究的重点,但是并不妨碍将此技术应用到其他频率。在太赫兹频率的低端,可以最大程度地利用毫米波的诸多成熟技术,技术实现的难度相对较小,为以后比较快速地研制出实验系统降低一定的难度。另外,因为其可以实现高达 10Gb/s 的高速数据通信,能够用于实现地面短距离的高速无线通信,将有线的光纤无线化,其在家用高速无线通信网络和连排战术无线通信设备等高速短距离无线通信上有很好的应用前景。

本文通过对基于电磁 Metamaterials 的工作在 360GHz 的太赫兹调制器进行了详细研究,并对采用该技术搭建 360GHz 高速无线通信系统的构想做了简要介绍。

2 研究模型

采用电磁 Metamaterials 作为研究模型,整体结构及其结构单元如图2所示。样品的制备可以通过采用传统的光刻(Photolithography)技术和电子束沉积(electron-beam deposition, EBD)技术将 10nm 的钛(Titanium)接触层做在厚度为 $625\mu\text{m}$ 的半绝缘的砷化镓(semi-insulating gallium arsenide, SI-GaAs)上,再将 200nm 的金在接触层上做出所要的形状。线极化的平面电磁波垂直照射到由金属结构单元呈阵列结构排列而构成的电磁 Metamaterials 上,当电磁波的波长远大于金属结构的单元尺寸时,其满足等效均匀的条件,此时可将电磁 Metamaterials 在波的传播方向上可以看成是均匀的,其主要的电磁特性则是由每个单元格的特性决定的。

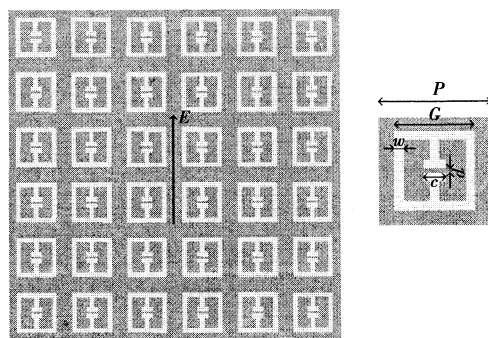


图2 电磁 Metamaterials 示意图

其中, P 为单元格的周期; G 为金属单元格的尺寸; w

为金属线宽; c 和 d 分别为电容区的长度和电容间的距离。适当调整上述参数可以得到在所需工作频率下具有极大吸收的电磁 Metamaterials。

3 理论研究

在等效均匀的条件下, 电磁 Metamaterials 的特性可以由等效的介电常数 ε 和磁导率 μ 来表示。为了设计出在所关心频段下有良好的响应的电磁 Metamaterials, 并对其相关特性进行详细的研究。采用 Smith^[4] 的方法。

折射率 n 与介电常数 ε 和磁导率 μ 的关系为:

$$n = \pm \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \frac{\mu}{\mu_0}} \quad (1)$$

其中, ε_0 为真空介电常数; μ_0 为真空磁导率。其中取正负号是为了保持上式的通用性。

对一厚度为 b 的介质, 其透射系数 t 同折射率 n 和波阻抗 z 的关系可以表示为:

$$t^{-1} = \left[\cos(nkb) - \frac{j}{2} \left(z - \frac{1}{z} \right) \sin(nkb) \right] e^{jkb} \quad (2)$$

其中, k 为波数。

在采用了归一化的透射系数 $t' = \exp(jkb)t$ 以后, 可以将反射系数也表示如下:

$$\frac{r}{t'} = -\frac{j}{2} \left(z - \frac{1}{z} \right) \sin(nkb) \quad (3)$$

由以上两式可以确定出 n 和 z 与透射系数与反射系数的关系:

$$\begin{aligned} \cos(nkb) &= \frac{1}{2t'} [1 - (r^2 - t'^2)] \\ &= \operatorname{Re} \left(\frac{1}{t'} \right) - \frac{1}{2|t'|^2} (A_1 r + A_2 t') \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{和 } z = \pm \sqrt{\frac{1+r}{(1-r)^2 - t'^2}} \quad (5)$$

其中:

$A_1 = r^* t' + t' r^*$, $A_2 = 1 - |r|^2 - |t'|^2$, 打 * 表示对其求复共轭。

这样在已知透射系数与反射系数后也可以反推出其对应的介电常数和磁导率。

4 仿真研究

当工作频率为 360GHz (0.36THz) 时, 其对应的波长为 833 μm , 其单元周期在小于 200 μm 的情况

下就可以满足等效均匀的条件。在此条件下, 通过对单元格的周期和金属单元格的具体形状的优化可以得到在工作频率下具有很好吸收特性的电磁 Metamaterials。采用电磁模拟软件对所设计的电磁 Metamaterials 进行了详细模拟, 图 3 给出了其传输参数及其在最大吸收时的场分布图。可见, 这种电磁 Metamaterials 在一定频率下存在很尖锐的吸收峰, 这与一些原子材料的吸收光谱有一定的相似之处。图 3 的右边部分给出了在传输极小值处对应的电场与磁场分布图, 它们之间有 90° 的相差。

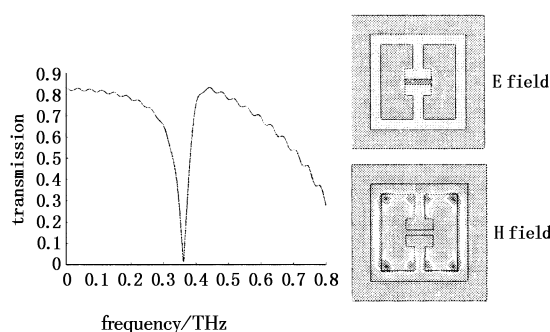


图3 电磁 Metamaterials 传输参数及其在最大吸收时的场分布图

通过研究发现, 在金属结构中电容区长度 c 对传输极小值的影响是可控的, 其为以后实际做器件给出一个很好的调节参数。图 4 给出电容区长度 c 与电磁 Metamaterials 的传输极小值的关系图, 可见传输极小值所对应的频率是随着电容区长度 c 的减小而增大的。

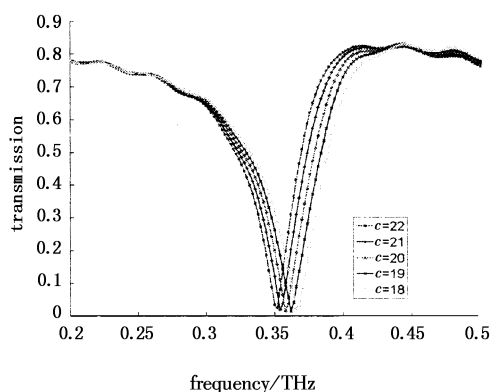


图4 电磁 Metamaterials 的传输极小值与电容区长度 c 的关系

5 电磁 Metamaterials 调制器

如果我们可以有效地将金属结构单元中与电磁波作用的主要部分——电容短路, 则可以有效地改

变电磁 Metamaterials 的物理特性,从而实现 360GHz 载波的调制。利用半导体材料的光电导效应^[5]可以实现对电容器的短路和开路的控制。对于半绝缘的砷化镓,其电阻率大于 $1 \times 10^7 \Omega/\text{cm}$ 。本文所研究的工作在 360GHz 的电磁 Metamaterials,其电容间的距离取 $4\mu\text{m}$,对应的电阻值为 4000Ω 。砷化镓的禁带宽度为 1.4eV ,相当于波长约 $0.9\mu\text{m}$ 的红外光。有文献报道,半导体材料 GaAs 在 $1.60\mu\text{m}$ 的波长下也具有光电导性质^[6]。基底材料在上述光电导特性正好可以利用目前成熟的自由空间光通信(FSO)加载信号后的输出光作为激发光源,这样可以很好地利用现有技术将信号加到电磁 Metamaterials 上。如果自由空间光通信加载信号后的输出光分为两种状态,当有信号光照射时,电容器短路或是具有一个很小的电阻;当没有信号光照射时,电容器开路或是具有一个很大的电阻值。上述特点可以起到调制太赫兹信号的目的。其开关响应时间很快,主要是其恢复时间较长,约 1ns 。Prasankumar^[7]等人采用特殊的半导体技术可以将其恢复时间缩短到 $1 \sim 10\text{ps}$,此技术需要进行专门的研究。

图 5 给出了金属结构单元中电容间隙部分的电阻为几个典型值时所对应的传输参数。可见在有激光照射的情况下,若能将原电阻值从 4000Ω 降低 90%,即到 400Ω 的情况下,其理想传输参数的改变量可达 0.35。如果电阻值的降低 99%,即到 40Ω 的情况下,则其理想传输参数的改变量接近 0.6。因此,其可能是一种很好的调制亚毫米波和太赫兹信号的手段之一。

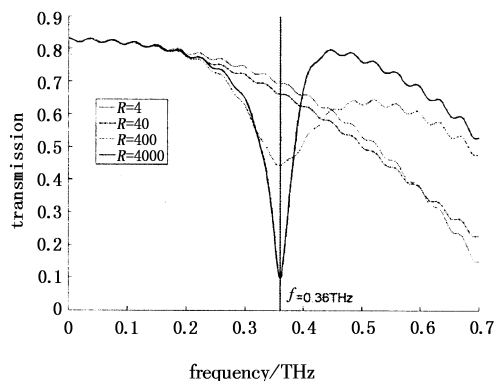


图5 电磁 Metamaterials 传输参数与电容间电阻 R 的关系

图 6 给出了如何将信号加到太赫兹波上的示意图,将带有信号的自由空间光通信激光器的输出端的激光照射到电磁 Metamaterials 上,其可以有效地改变太赫兹波在电磁 Metamaterials 中的传输特性,从而起到调制太赫兹波的目的。

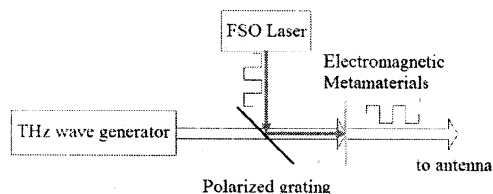


图6 电磁 Metamaterials 调制器工作原理图

6 结论

本文对一种电磁 Metamaterials 调制器进行了研究,通过理论与仿真分析提出了将信号加到太赫兹波上的方法,此法还可以应用到利用该材料的其他频段上,尤其是太赫兹频段上可以表现出其优势。

参考文献:

- [1] Chen H T, Padilla W J, Zide J M O, et al. Active terahertz metamaterial devices [J]. Nature, 2006, 44 (11): 597 - 600.
- [2] Caloz C, Itoh T. Electromagnetic metamaterials; Transmission line theory and microwave applications [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2002.
- [3] Siegel P H. Terahertz technology [J]. IEEE Trans. on Microwave theory and technology, 2002, 50(3): 910 - 928.
- [4] Smith D R, Schultz S, Markos P, et al. Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients [J]. Physical Review B, 2002, 65: 195104.
- [5] 刘恩科. 半导体物理学 [M]. 第4版. 北京: 电子工业出版社, 2003: 264 - 271.
- [6] Shu B H, Hou J, Lu Q S, et al. Experimental study of the interaction between laser and GaAs [J]. Infrared and Laser Engineering, 1999, 28(1): 40 - 42. (in Chinese)
- [7] Prasandumar R P, Scopatz A, Hilton D J, et al. Carrier dynamics in self-assembled ErAs nanolands embedded in GaAs measured by optical-pump terahertz-probe spectroscopy [J]. Appl. Phys. Lett., 2005, 85(20): 201107.