

文章编号: 1672-2892(2011)03-0274-03

## 基于合成超构材料的太赫兹调制器设计

崔旭东, 吴卫东, 唐永建

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 为了研究利用新型器件提高辐射控制的能力, 利用合成超构材料演示了一种太赫兹有源调制器的设计。该结构采用三维设计, 除通过电压调节基底耗尽层载流子复合之外, 还通过悬臂结构调节该结构的等效电磁参数, 最终达到有效调节器件响应的目的。研究表明该器件能够实时、有效地对太赫兹辐射进行控制和操作。其对透射率的调制可达 75%, 频移 0.1 THz, 优于目前基于二维平面方法设计的太赫兹调制器件。

**关键词:** 超构材料; 有源调制器; 太赫兹辐射; 等效电磁参数

**中图分类号:** TN761

**文献标识码:** A

## A design of metamaterial-based THz modulator

CUI Xu-dong, WU Wei-dong, TANG Yong-jian

(Research Center for Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China)

**Abstract:** To improve the capability of radiation control with new devices, an active modulator at terahertz frequencies is designed with metamaterials. The structure under investigation is three dimensional. By adjusting the bias voltage applied on the substrate, the carrier recombination as well as the effective electromagnetic parameters are effectively altered, and the modulation of the structure is realized. The research shows that the modulator can control and operate THz radiation effectively and in real-time. The transmission modulation reaches 75% with the frequency shift more than 0.1 THz, which is better than that of structures with two dimensional designs, providing a novel way to construct new types of THz devices.

**Key words:** metamaterial; active modulators; THz radiation; effective electromagnetic parameters

受限于有效的太赫兹源和探测技术, 太赫兹研究在很长一段时间内都停滞不前。近年来随着材料科学、激光工程和纳米技术的快速发展, 太赫兹工程技术已取得长足进步, 成为目前的国际研究重点和热点<sup>[1]</sup>。太赫兹波具有特殊的穿透性, 能够穿透大部分非金属和非极性材料, 导致相对难于实现能够工作在该波段的太赫兹源、棱镜、探测器、开关、调制器等。因此, 目前太赫兹器件的设计主要受限于材料的选择。电磁合成超构材料的出现很有可能实现太赫兹应用技术, 尤其是太赫兹电磁波成像技术的突破。电磁合成超构材料是一种具有天然媒质所不具备的超常物理性质的人工复合结构<sup>[2]</sup>。通过在传统的媒质材料中嵌入某种几何结构的单元, 即可构造出自然媒质所不具有的新型电磁特性的人工材料。作为一种新的材料设计理念, 电磁合成超构材料的出现给人们在认知层面上带来了巨大的冲击, 即在不违背基本物理学规律的前提下, 人们可以通过人工获得与自然媒质迥异的超常物理性质的新媒质。采用新型电磁合成材料(也叫 metamaterial)可以实现采用自然材料未能得到的一些电磁现象, 如负折射率、逆多普勒效应、逆切伦科夫辐射等<sup>[2]</sup>。目前广泛研究的电磁合成超构材料包括左手材料、复合左/右手传输线、光子晶体、超磁性材料等, 与电磁光性质相关联, 为信息元件的新突破提供了一个新契机<sup>[2]</sup>。基于开口谐振环的周期结构可实现负的磁介常数<sup>[3]</sup>, 而基于单根导线的周期性电磁合成结构可实现负的电介常数<sup>[4]</sup>。通过将这 2 种结构优化组合, 科学家已经能够获得负折射率材料<sup>[5]</sup>。目前, 开口谐振环与导线组合形成的复合结构已广泛用于太赫兹器件的设计, 如波导、调制器、滤波器等。基于该复合结构的太赫兹调制器也基本可实现实时和动态调制, 但目前仅限于通过调节施加于半导体基底耗尽层的电压使载流子浓度发生变化, 来达到调制结构等效效应的目的, 其动态调制范围仍然不足<sup>[6]</sup>。如果能够实时改变复合结构的等效电磁参数, 则可进一步实现对参数的动态调制。这就需要有别于传统的二维设计理念。在本文中, 采用三维结构, 在原复合结构的基础之上增加

收稿日期: 2011-03-30; 修回日期: 2011-04-30

电介质悬臂设计。悬臂在外加偏置电压电场的作用下，与开口谐振环的裂口搭接，能够改变结构中最敏感的等效电容等参数，从而改变其谐振频率，达到调制的目的。

### 1 结构设计和模拟

为了测试前面所提到的思想，选用 1 个通用的复合结构，即开口谐振环结构与单根导线组合结构的变化结构<sup>[6]</sup> (材料采用 Au，图 1 灰色部分)，见图 1。该元件由 2 个单个开口谐振环组成，中间有 1 个分离的裂口。在该结构的等效 LRC 电路中，这 2 个环以及导线提供了等效的电感  $L$  和电阻  $R$ ，而该分离的裂口则提供了 1 个等效的电容  $C$ 。图 1 为 1 个用于计算和加工的周期单元。在实际制作中，金属部分会沉积至 1 种半导体基底(如 GaAs)之上，最后形成 1 个阵列。在该设计中，所有周期单元均与导线连接，因此整个结构阵列就像 1 个电压选通器<sup>[6]</sup>。改变选通器电压可控制带隙处基底的电导率，从而控制太赫兹波的透射。在加工制作完成基本合成结构之后，在该结构上再镀上 1 层约 100 nm 厚的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  覆盖层，之后进一步加工制作完成  $\text{Si}_3\text{N}_4$  微米丝悬臂，见图 1 该结构的侧视图。图 1 中深灰色部分为  $\text{Si}_3\text{N}_4$  微米丝悬臂，在未加偏压情况下悬臂位于金属结构的上方(此时称为调制器的 On 状态)；而在加电场或偏压情况下，微米丝悬臂弯曲下垂，与 GaAs 基底上的电容搭接(此时称为调制器的 Off 状态)。由于悬臂与裂口的搭接，合成结构的有效电容将被改变(因此等效电磁参数)，从而实现了对太赫兹波的实时调制。

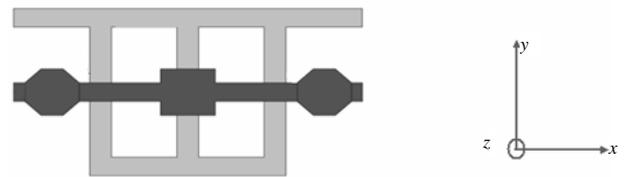
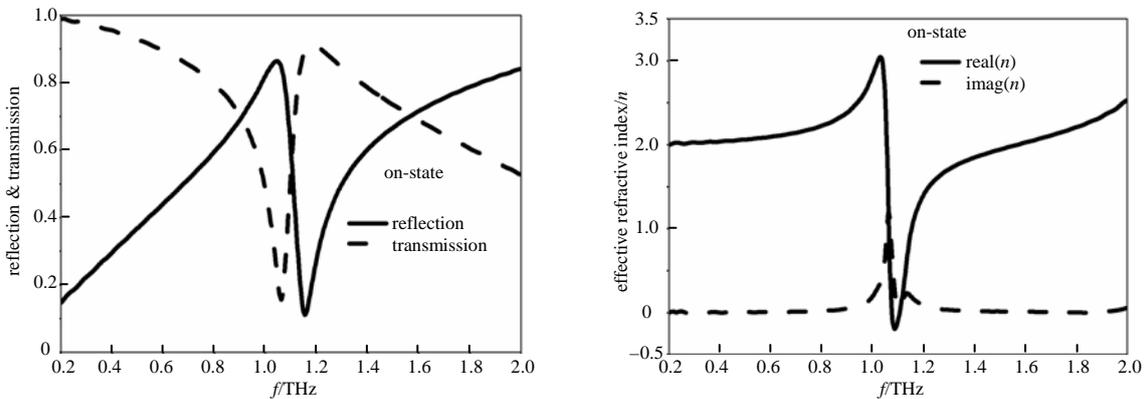


Fig.1 Schematic drawing of the modulator structure  
图 1 调制器结构示意图

为了获得该结构的等效电磁参数，在模拟中假定电场沿着导线方向( $x$  方向)，而磁场方向与导线垂直( $y$  方向)。在模拟中，可引入垂直于  $x$  方向和  $y$  方向的 PEC 以及 PMC 边界条件，用于将该计算单元与其邻近的单元进行隔离，从而实现周期结构的模拟。实质上，该单元位于 1 个方形网格中，沿着  $x$  和  $y$  方向具有周期性，而在  $z$  方向只有 1 层，太赫兹波从  $z$  方向入射。因此，在该复合结构中沿着传播方向的相互作用并没有考虑进去。在这种情况下，可将该结构等效于 1 个波导模型，该复合结构置于波导中。这样，采用等效的波导波形，通过求解结构的  $S$  参数，即可反解出相关的等效电磁参数如等效波阻抗、等效电介和磁介常数、等效折射率等。在计算中，将反射波相位的参考平面选择为单元结构的第 1 面( $+z$  方向)。注意到沿着传播方向  $z$  的单元结构的厚度  $d$  被选择为该复合结构平板的等效厚度。

### 2 结果和讨论

采用文献[7]中参数抽取过程对上述复合结构的等效参数进行提取。为得到较为精确的结果，避免由于谐振腔效应和计算带来的误差，在提取过程中采用基于模式的参数估计方法<sup>[8]</sup>。在零偏压的情况下，抽取的该等效波导模型参数见图 2。可以看出，该结构只是在特定波长具有谐振，因而带宽很窄。从提取复合结构的等效折射率看，在约 0.8 THz~1.12 THz 范围，该结构呈现负折射率，中心频率位于 1.08 THz。因此，二维设计中通过加载偏压，可以对 1.08 THz 的太赫兹波的透射进行调制。在三维设计中，当调制器处于调制状态(Off 状态)时，由于悬臂与电容的搭接改变了结构的有效电容，中心频率向低频迁移约 0.1 THz，从而使谐振频率发生较大位移，见图 3。在二维平面设计中，通过改变基底载流子浓度达到这种较大的频率位移是相当困难的。



(a)  $S$  parameters of the effective waveguide model for the composite structure  
(b) effective refractive index  $n$  of the composite structure  
Fig.2 Results shown when the bias voltage is zero and the  $\text{Si}_3\text{N}_4$  cantilever is at on state

图 2 零偏压情况下， $\text{Si}_3\text{N}_4$  悬臂处于 On 状态下的计算结果

在偏压不为零的情况下,该调制器具有 2 种响应: a) 偏置电压调节基底耗尽层载流子复合,从而控制在带隙处基底的电导率。在这种情况下,频率的位移量不大,因为该调制量对中心频率的影响较小,只对透射波的振幅起到限幅作用。随着偏置电压的增大,负折射率范围略有展宽。 b) 与此同时,由于偏压的存在,悬臂在电场力作用下向基底弯曲,在电压达到一定程度时和  $\text{Si}_3\text{N}_4$  层搭接,此时调制器处于 Off 状态。随着等效电容的改变,中心频率位移,因此相应的调制深度增加。从目前模拟的结果来看,相比于二维设计的调制器,该三维结构的调制深度和频移都有所提高,分别达到了 75% 和 0.1 THz。

值得注意的是,尽管由于开口谐振环和导线结合的复合结构设计只限于很窄的带宽范围和特定频率,通过优化结构参数,如开口谐振环的宽度和高度、导线的宽度、高折射率的覆盖层(如  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ),或者选择有效的、能够采用光、电、声、热等方式控制材料参数的基底和覆盖层,即可改变该调制器的操作频率和带宽。对于这种复合结构,由于与调制器响应最敏感的结构参数是裂口的宽度(对应等效电容),因此可以通过在裂口内装填一种折射率能够随着环境变化的材料(如前述的光、电、声、热敏材料等),从而能够更加有效地调制其等效电容达到调制器件的目的(注:这方面的工作目前已经完成)。为提高该结构的调制带宽,可以使用具有宽频响应的复合结构与目前的三维设计相结合,其出发点就是尽量避开上述复合结构的谐振区域,采用其非谐振区域,目前正在开展这方面的工作并且已经取得了重大进展。

### 3 结论

本文采用超构材料设计了用于太赫兹波调制的器件。采用三维设计构型,使太赫兹波动态调制成为可能。该设计的优点在于,除通过调节偏置电压调节基底耗尽层载流子复合之外,还可以调节该结构的等效电容,改变材料的等效电磁参数,最终达到有效调节器件响应的目的。从目前理论设计的结果看,该器件能够实时、有效地对太赫兹辐射进行控制和操作。其对透射率的调制高达 75%,频移 0.1 THz,优于采用二维方法设计的太赫兹调制器件。

#### 参考文献:

- [1] Yun-Shik Lee. Principles of Terahertz Science and Technology[M]. New York:Springer, 2008.
- [2] Krowne C M,Zhang Y. Physics of Negative Refraction and Negative Index Materials[M]. New York:Springer, 2007.
- [3] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena[J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 1999,47(11):2075-2084.
- [4] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, et al. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures[J]. Phys. Rev. Lett., 1996,76(25):4773-4776.
- [5] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity[J]. Phys. Rev. Lett., 2000,84(18):4184-4187.
- [6] Chen H T, Padilla W J, Zide J M O, et al. Active terahertz metamaterial devices[J]. Nature, 2006,440(7119):597-600.
- [7] Smith D R, Vier D C, Koschny Th, et al. Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials[J]. Phys. Rev. E., 2005,71(3):036617.
- [8] Cui X, Hafner Ch, Tavzarashvili K, et al. Parameters extraction from inhomogeneous metamaterials with model-based parameter estimation[C]// IEEE Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET 06). Kharkov Ukraine:[s.n.], 2006:421-423.

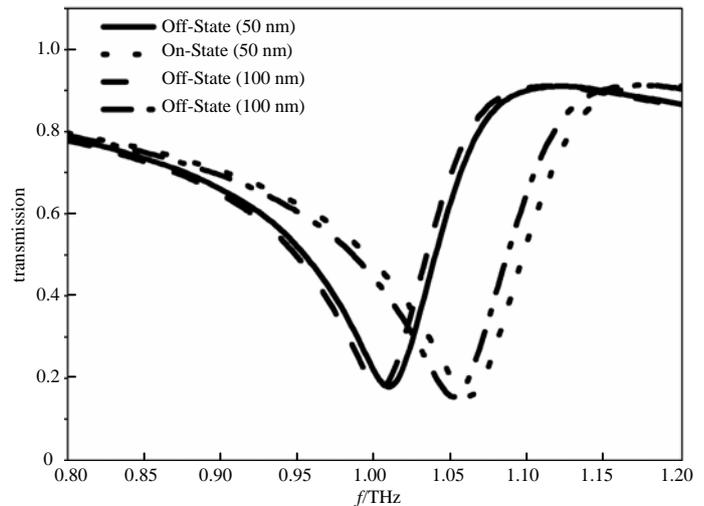


Fig.3 Transmission curves of the composite structure with  $\text{Si}_3\text{N}_4$  coating layers of different thickness when the modulator is at on and off-state

图3 调制器处于 On 和 Off 状态下,不同厚度  $\text{Si}_3\text{N}_4$  覆盖层复合结构的透射特性曲线