文章编号: 1672-2892(2011)03-0270-04

# THz 波段 Metamaterial 吸波材料研究现状

陈顺兵,张文涛,何晓阳,陈 琦

(中国工程物理研究院 电子工程研究所,四川 绵阳 621900)

摘 要: Metamaterial 是一种新型的人工电磁材料,用 Metamaterial 制作的吸波材料具有体积 小,重量轻,吸收效率高等特点。Metamaterial 吸收材料的响应频率取决于其几何结构,可以通过 缩比改变其工作频率。本文首先介绍了 Metamaterial 吸波材料的工作原理,并基于此原理介绍了 Metamaterial 吸波材料的设计方法,最后对国内外现有的 THz 波段的 Metamaterial 吸收材料的研究 进行了总结。

 关键词:
 太赫兹;
 Metamaterial 吸波材料;
 吸波材料

 中图分类号:
 TN911
 文献标识码:
 A

# Current status of THz band metamaterial absorbers

CHEN Shun-bing,ZHANG Wen-tao, HE Xiao-yang,CHEN Qi

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China)

**Abstract:** Metamaterial is a novel type of artificial electromagnetic material, and the absorbers made from metamaterial is small, light and can achieve near-unity absorption. The operational frequency of a absorber made from a given kind of metamaterial lies on its geometrical structure and can be geometrically scalable to other regimes of the electromagnetic spectra. In this paper, the work principle of the metamaterial absorber is introduced firstly, then its design method is presented. Lastly, the research status of THz band metamaterial absorber are summarized.

Key words: THz; metamaterial; absorber

近年来,太赫兹技术在太赫兹源、成像、安全检查等<sup>[1]</sup>方面发展迅速,但是基于太赫兹频段的吸波材料研究 却很少。Metamaterial是一种具有特殊电磁属性的人工复合材料,它一般由周期排列的单元构成。基于 Metamaterial 的各种结构已经被制作在微波<sup>[2]</sup>、毫米波<sup>[3]</sup>、太赫兹波<sup>[4]</sup>甚至近红外波段<sup>[5]</sup>。由于 Metamaterial 结构在谐振频率附 近有很大的损耗,从而可以制作成吸波材料。目前,对 Metamaterial 吸波材料的研究已经取得了一定的进展, Metamaterial 吸波材料在太赫兹波段展现出了巨大优势。Padilla W J 等人研制出一种电磁场垂直入射情况下吸收 率高达 40 dB 的 Metamaterial 吸波材料<sup>[6]</sup>。这种材料的相对带宽约为 4%,与此同时,其厚度仅为半个波长。Tao H 等人在入射角 0°~80°的范围内使吸波材料的吸收率<sup>[7]</sup>达到 20 dB 以上。Landy N I 等人对不同极化形式电磁波 入射情况进行了研究<sup>[8]</sup>,设计的人工电磁结构对任意极化形式的电磁波都实现了高吸收率,理论上这种结构可以 在中心频率处实现 95%的吸收率。爱荷华州立大学的 Bingnan Wang 等人用互补式结构同时实现了大角度入射和 极化不敏感的人工电磁结构吸波材料<sup>[9]</sup>。本文介绍了 Metamaterial 吸波材料的吸波原理以及一般的设计方法,并 对现有的太赫兹波段 Metamaterial 吸收材料的研究进行总结。

#### 1 Metamaterial 吸波材料原理

对于一种给定的吸波材料,其吸波特性由传输率 $T(\omega)$ 和反射率 $R(\omega)$ 决定,即吸收率 $A(\omega)$ 可由下式表示:  $A(\omega)=1-T(\omega)-R(\omega)$ (1)

考虑传输系数  $t(\omega)$ 和反射系数  $r(\omega)$ ,上式可以写成:

$$A(\omega) = 1 - \left| t(\omega) \right|^2 - \left| r(\omega) \right|^2$$
<sup>(2)</sup>

因此,当T = R = 0时,A = 1,实现对波的完美吸收。式中, $t(\omega)$ 由折射系数 $n(\omega) = n'(\omega) + jn''(\omega)$ 和阻抗  $Z(\omega) = Z'(\omega) + jZ''(\omega)$ 决定,其中:

$$n(\omega) = \sqrt{\varepsilon(\omega)\mu(\omega)}, Z(\omega) = \sqrt{\mu(\omega)/\varepsilon(\omega)}$$
(3)

对于一个厚度为d的介质板,有:

$$t = \left[\sin\left(nkd\right) - \frac{j}{2}\left(Z + \frac{1}{Z}\right)\cos\left(nkd\right)\right]^{-1} e^{-jkd}$$
(4)

式中 $k = \omega/c$ , c是真空中的光速。当Z趋近于1时,与自由空间实现阻抗匹配,反射率R下降为0,此时,传输率仅由折射系数决定,即:

$$t = \left[\cos(nkd) - j\sin(nkd)\right]^{-1} e^{-jkd} = e^{j(n-1)kd} = e^{j(n'-1)kd} e^{-n'kd}$$
(5)

则:

$$T = |t|^2 = e^{-2n^*kd}$$
(6)

当折射系数虚部 n" 趋近于无穷大时,有:

$$\lim_{T \to \infty} T = 0 \tag{7}$$

由上面的分析得到,吸波材料要实现高吸收率,必须满足2个条件:

1) 吸波材料阻抗必须尽量与自由空间阻抗数相匹配,以便能够使入射的电磁波最大限度地进入材料内部,即Z趋近于1。则由式(3)要求 ε'=μ', ε"=μ";

吸波材料应该具备较大的电磁波衰减特性,以便使进入材料内部的电磁波最大限度地被损耗掉,即 n" 必须足够大。由式(3)得到: n"≈ε"=μ",即电磁本构参数的虚部必须足够大。

Metamaterial由于可以通过对几何结构的设计调节与频率相关的电磁本构参数 $\varepsilon(\omega)$ 和 $\mu(\omega)$ ,满足吸波材料设计的2个条件,从而可以制作成吸波材料。

典型的 Metamaterial 的相对磁导率和相对介电常数公式为:

$$\varepsilon(\omega), \mu(\omega) = \varepsilon_{\omega}, \mu_{\omega} + \frac{F_{\varepsilon,\mu}\omega^2}{\omega_{0\varepsilon,\mu}^2 - \omega^2 - j\gamma\omega}$$
(8)

式中:  $F(=\omega_p^2/\omega_0^2)$ 为谐振强度(Oscillator Strength),  $\omega_0$ 是谐振频率;  $\gamma$ 为衰减系数;  $\varepsilon_{\infty}, \mu_{\infty}$ 是高频对  $\varepsilon, \mu$  的贡献。 在谐振频率处, 假设阻抗匹配, 则  $\varepsilon(\omega_0)=\mu(\omega_0)$ , *n*"的最大值为:

$$n'' = \frac{F\omega_0}{\gamma} \tag{9}$$

因此,根据式(6),得到:

$$A(\omega_0) = 1 - e^{-2F\omega_0^2 d/\gamma c}$$
(10)

对于一般的情况,  $\mu_{\infty}$  ≠  $\epsilon_{\infty}$ , 则  $Z(\omega_0) = \sqrt{\mu / \epsilon \neq 1}$ , 且吸收率 A 也并不由 n'' 唯一确定。但是, 对于大的 n'',  $T(\omega_0)$  仍然很小,  $R(\omega_0)$ 能近似地写成:

$$R(\omega_0) = \left\lceil \frac{Z(\omega_0) - 1}{Z(\omega_0) + 1} \right\rceil^2 \tag{11}$$

由以上分析可知,为增大吸波材料的吸收率,应 当在考虑  $\gamma$  的情况下,尽可能增大谐振强度  $F_{\circ}F$  取决 于 Metamaterial 的几何结构、填充率(Filling Factor)以 及金属的电导率;  $\gamma$ 取决于金属和基底的损耗。

#### 2 Metamaterial 吸波材料设计方法

Metamaterial 吸波材料一般由改进的电谐振环





(Electric Ring Resonator, ERR)加截断线(Cut Wire, CW)单元周期排列组成。典型的单元结构如图 1 所示。

图 1 中的吸波材料单元能够吸收垂直入 射的电磁波,电磁场方向与介质板相对关系如 图 1(c)所示。单元包含 2 个独立的金属组件, 即介质板正面的电谐振环和背面的截断线。电 谐振环由 2 个背靠背的开路环谐振器组成,成 镜像对称形式。在谐振时,电谐振环能够耦合 入射的电场。同时,入射电磁波的磁场在电谐 振器等效电路的 2 个回路产生的电流方向相



Fig.2 Simulated current density and simulated absorptivity of the absobers 图 2 吸波单元电流分布及吸收效果仿真结果

反,电谐振器结构的总磁通量为零,由此抑制了结构的磁响应,从而使电谐振环结构在入射电磁场的作用下只有 电响应。背面的截断线位于电谐振环中心线的正下方,与电谐振环之间有一层介质。截断线与电谐振环中心线结 构能够耦合入射的磁场。通过改变电谐振环的几何形状及单元间距能够调节入射电磁场的电响应,从而改变介电 常数  $\varepsilon$ ;通过改变截断线的几何形状及截断线与电谐振环之间的距离能够调节磁响应,从而改变磁导率  $\mu$ 。这种 结构实现了对  $\varepsilon$  和  $\mu$  相互独立的调节,能够将特定频率的阻抗调节到近似与自由空间匹配,将反射减小到最小。 通过改变单元尺寸,就可以调节吸波材料的吸收频率。

采用基于时域有限差分法(Finite Difference Time Domain, FDTD)的 CST 微波工作室设计一个工作在太赫兹 波段的 Metamaterial 吸波材料。仿真时,设金属为有损耗的,电导率  $\sigma$ =1.0×10<sup>7</sup> S/m;底层衬底材料为砷化镓,相对介电常数 10.75,厚度 500 µm;电谐振环与截断线之间的介质板采用相对介电常数为:  $\epsilon$ =3.5+0.02j,厚度为: 8 µm 的介质。边界条件设置为: x 方向为理想电导体, y 方向为理想磁导体,从而形成图 1(c)所示的电磁波入射条件。经过优化设计后,结构的具体尺寸如图 1 所示:  $a_1$ =34 µm, $a_2$ =50 µm,G=t=3 µm,W=30 µm,H=48 µm,L=4 µm。分析入射端口和出射端口间的 S 参数就可以得到单元对电磁波的反射率、传输率和吸收率,其中反射系数为  $S_{11}$ ,

传输系数为  $S_{21}$ ,吸收率由  $A = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$ 确定。仿真结果如图 2 所示。图 2(a)和图 2(b)分别是电谐振环与截断线附近的电场分布;图 2(c)和图 2(d)是电谐振环和截断线表面的电流分布;图 2(e)是反射率、传输率和吸收率。由仿真结果可以看出,在整个仿真频段内传输率都比较低,反射率在 f=1.12 THz 下降到 2%,吸收率上升到 98%。

图 1 所示的结构形式对采用图 1(c)中极化方式的入射电磁波的吸收效果好。为了能吸收任意极化的电磁波,可以将电谐振环改进为双镜像对称的结构,如图 3(a)所示。仿真结果表明,改进后的结构对任意极化的入射电磁 波都有良好的吸收效果。图 3(b)是极化不敏感吸波单元吸收效果的仿真结果。



Metamaterial 吸波材料是基于电磁谐振原理的,因此带宽较窄。为拓展吸波频带,可以引入双频谐振的方式, 其设计思路如图 4 所示。首先设计 2 种不同的吸波单元,实现双频吸收;然后将 2 个谐振频率逐渐靠近,就可以 实现吸收频带的扩展。

同理,可以引入更多频率的谐振,实现吸收带宽的进一步扩展。



## 3 结论

近年来,太赫兹在成像技术、安全检查、医疗诊断以及环境监测等方面取得了一定进展,但现有的太赫兹系统的设备比较昂贵,信息处理过程也很复杂,有待进一步微型化和实用化。Metamaterial吸波材料由于体积小、重量轻、可缩比等特点,在太赫兹频段有光明的应用前景。虽然目前对 Metamaterial吸波材料的研究还处于起步阶段,还有许多问题有待解决,如扩展吸收频带带宽等,但一旦频带问题解决,Metamaterial吸波材料将凭借其优良的吸收特性以及小尺寸的优势,在各种类型的吸波材料中占据重要的地位。因此,开展基于 Metamaterial 的吸波材料研究,并进一步推动其在太赫兹领域的应用非常有意义。

#### 参考文献:

- [1] Borko H,Bernier C L. Indexing Concepts and Methods[M]. New York: Academic Press, 1978.
- [2] Yao Jianquan, Zhu Shuiquan, Hu Haifeng, et al. A Monte Carlo model of light propagation in nontransparent tissue[J]. Transactions of Tianjin University, 2004, 10(3):209-213.
- [3] Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\varepsilon$  and  $\mu$ [J]. Sov. Phys. Usp., 1968, 10(4):509-514.
- [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] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, et al. Low frequency plasmons in thin-wire structures [J]. Phys. J C, 1998,10(22):4785-4808.
- [6] Padilla W J,Landy N I,Sajuyigbe S, et al. Perfect Metamaterial Absorber[J]. Phys. Rev. Lett., 2008,20(7):4021-4024.
- [7] Tao H,Landy N I,Bingham C M,et al. Highly flexible wide angle of incidence terahertz metamaterial absorber:Design,fabrication and characterization[J]. Physical Review, 2008,78(24):1103-1108.
- [8] Landy N I, Bingham C M, Tyler T, et al. Design, theory, and measurement of a polarization-insensitive absorber for terahertz imaging [J]. Phys. Rev., 2009, 79(12):5104-5109.
- [9] Wang Bingnan, Thomas Koschny, Costas M. Wide-angle and polarization-independent chiral metamaterial absorber[J]. Physical Review, 2009,80(3):3108-3118.

## 作者简介:



**陈顺兵**(1986-),男,湖北利川人,在读硕 士研究生,主要从事天线技术、Metamaterial 结 构.email:lindan6812@126.com. **张文涛**(1984-),男,山西平遥人,研究实习员,硕士,主要从事天线技术.

**陈 琦**(1981-),男,重庆永川人,助理研究员,硕士,主要从事微波天线、Metamaterial结构.

何晓阳(1983-),男,湖北荆州人,在读博士研究生,主要从事微波天线设计、非谐振式Meta-material结构.