

亚波长分形结构太赫兹透射增强的机理研究^{*}

孟田华¹⁾²⁾ 赵国忠^{1)†} 张存林¹⁾

1) 首都师范大学物理系, 北京 100037)

2) 大同大学物电学院, 大同 037009)

(2007 年 8 月 30 日收到, 2007 年 12 月 11 日收到修改稿)

利用太赫兹时域光谱(terahertz time domain spectroscopy, 简称 THz-TDS)研究了亚波长金属分形结构在 THz 波段的透射增强特性. 分别从实验和理论两个方面, 研究了铜箔上各级分形结构 THz 透射增强现象的产生机理. 结果表明, 在低频区的透射增强主要是由低级分形线中电子运动的共振引起的, 而高频区的透射增强则主要由高级分形线中电子运动的共振引起的. 从而将这种透射增强效应归结为分形结构中电子的共振辐射, 即分形结构的局域共振效应.

关键词: 分形, 太赫兹, 透射, 共振峰

PACC: 7820P, 7840K, 9575F, 9580G

1. 引 言

近年来, 电磁波通过亚波长金属狭缝的透射增强特性受到了高度重视. 对于金属狭缝的透射增强, 已经报道的两种机理为: 1) 表面等离子体(SP)激发, Ebbesen 等人^[1-4]说明了电磁波通过具有周期性阵列的亚波长银膜孔的透射, 比传统衍射理论预言的高很多. 2) 法布里-珀罗(FP)干涉, Porto 等人^[5-8]说明了在金属狭缝内部的波导谐振模式. 在这两种情形下, 狭缝尺度与入射电磁波的波长接近. 在 SP 情况下, 小孔阵列周期与电磁波波长在同一数量级. FP 谐振要求至少缝的尺度可与相应波长比拟, 这样一个基本的 TEM 波传播模式^[9]才可以存在.

传统的光子带隙(PBG)材料是利用布拉格散射^[10-13]来创造禁带隙的. 布拉格机理的一个必然结果是, 一个光子晶体的厚度和侧向尺度是波长的几倍. 频率选择表面(FSS)能选择性地反射一个特定频率的电磁波, 这是由于许多周期阵列金属元素的固有谐振相互作用造成的^[14]. PBG 和 FSS 系统通常在一个单频范围起作用, 相应波长由周期排列的基本单元大小决定. 因此, 电磁波谱带隙可由布拉格散射或局域共振中的任意一种机理产生. 前者由 PBG 材料产生, 要求周期性且光子带隙材料的厚度或横向

尺寸是波长的几倍. 后者由 FSS 产生, 能从比相应波长小的非周期结构获得且通常在一个单频范围内起作用.

最近, 有报道采用新的方法可以构造丰富的局域激发结构和分形结构^[15, 16], 这为非周期结构的设计奠定了基础. Wen 等人^[17]研究了在很宽的微波频段, 一种金属 H 分形波片对电磁波的透射显示出多个通带和禁带, 这打破了在带隙频率和一般光子晶体带隙结构周期之间严格的关联性要求. 在 THz 频段, 光通过亚波长平面分形结构^[18]和非周期金属结构^[19], 其透射谱出现多个通带和禁带, 透过率亦有增强现象. 本文分别从实验和理论两个方面研究了亚波长金属分形结构在 THz 波段的透射机理, 得出了不同级分形线对透射增强的影响机理, 说明了分形结构的局域共振效应.

2. 样品制备及实验装置

分形样品如图 1(a)所示, 产生于一长为 b 的一级线, 在 xy 平面内令它平行于 y 轴, 第 $(k+1)$ 级结构包含 2^k 条线, 中点分别垂直连接到第 k 级线的端点. 当 k 为偶(奇)数时, 第 $(k+1)$ 级线的长度为第 k 级线的 $0.5(1)$ 倍. 级数 N 、一级线的长度 b 、加上线宽和厚度, 共同定义了分形结构, 简称为 H 分形

^{*} 国家自然科学基金项目(批准号:10474067)、北京市自然科学基金项目(批准号:4073030)和国家重点基础研究发展计划(973)项目(批准号:2007CB310408)资助的课题.

[†] 通讯联系人, E-mail: guozhong-zhao@mail.cnu.edu.cn

结构,其几何维数是 2.随着 N 的无限增大,该结构逐渐趋于一个 $2b \times 2b$ 的正方形空间填充曲线. H

分形阵列由每个单元都相同的单个分形结构组成,如图 1(b)所示.

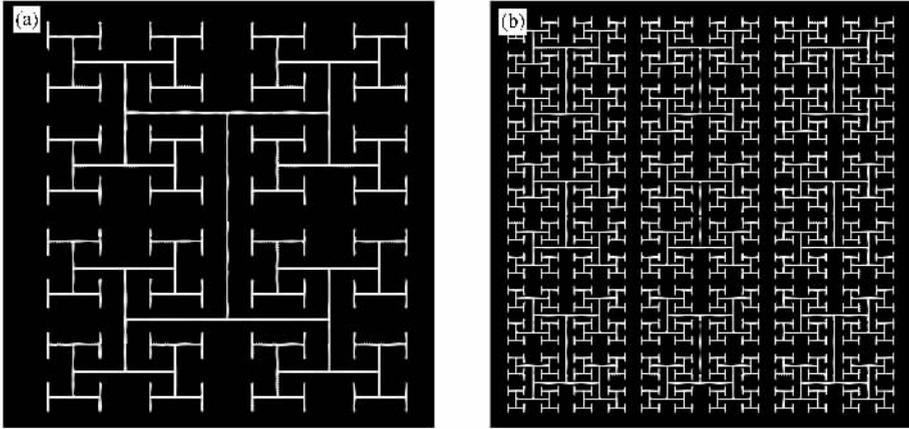


图 1 铜箔上 H 分形缝样品示意图 (a) 单个 7 级分形样品 (b) 7 级分形缝阵列样品

因为透过亚波长分形阵列狭缝比通过单个分形样品时的透射率高很多,又不影响透射峰的位置^[20].我们设计了一系列缺级和仅有单级分形线的分形狭缝阵列样品.样品是在厚度为 $50 \mu\text{m}$ 的铜箔上刻出一级分形线长为 1.66 mm ,缝宽 $40 \mu\text{m}$ 周期 4.5 mm 的 3×3 的分形阵列.通过分析它们的透射谱,我们研究了铜箔上分形结构对 THz 辐射透射增强的产生机理.

我们的 THz-TDS 实验装置如图 2 所示,实验时样品置于抛物面镜 $PM2$ 焦点处的样品架上,激光器产生的飞秒脉冲被分束镜(BS)分为两束,一束作为抽运光,以 45° 角照射在 100 取向的 InAs 晶体表面

上,产生光生载流子,在晶体表面引发超快光致丹倍尔电场,从而加速载流子运动并产生太赫兹辐射,然后经过两对表面镀金的离轴抛物面镜 $PM1-PM4$ 准直、聚焦,最后汇聚在 110 取向的 ZnTe 电光探测晶体上.另一束为探测光束,与载有样品信息的太赫兹波同时照在 ZnTe 电光晶体上,由于探测晶体的折射率椭球随着 THz 电场的变化而改变,这样透射探测光的偏振特性也随之变化.被调制的探测光经过四分之一波片(QWP)和渥拉斯顿棱镜(PBS)后,被分成偏振方向相互垂直的两束光,由差分探测器得到两个偏振分量的差分信号,再经过锁相放大器放大和计算机同步采集,得到 THz 辐射信号的信息.

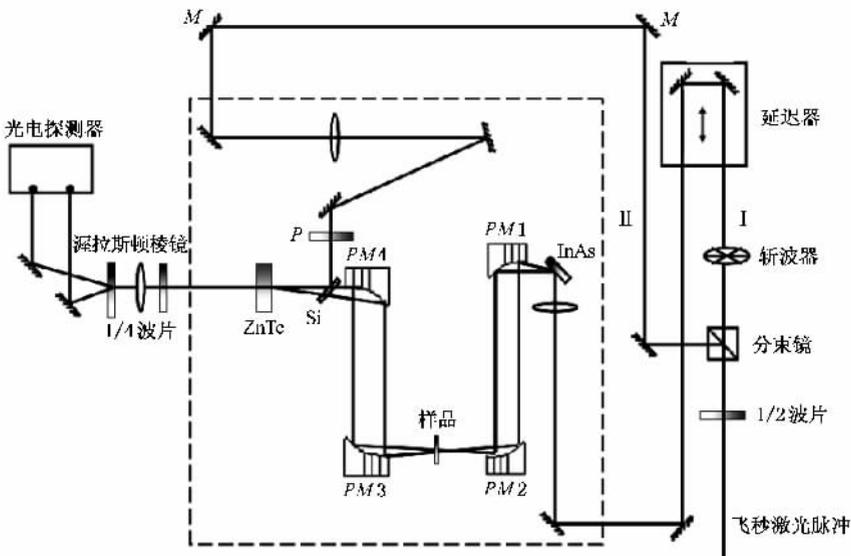


图 2 THz-TDS 实验装置示意图

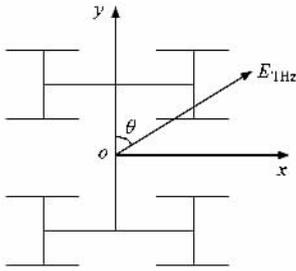


图 3 角 θ 的示意图

3. 数据处理与实验结果

THz-TDS 可以获取 THz 电场的时域波形,通过快速傅里叶变换把时域光谱变换到频域,得到

$$t = \frac{A_r(f)}{A_i(f)}, \quad (1)$$

利用(1)式就可以得到样品的透射系数谱.上式中 f 是 THz 电场的频率, A_r 是入射 THz 波的频域振幅, A_i 是透射 THz 波的频域振幅.实验中,我们定义 THz 波的偏振方向和 H 分形结构的一级线之间的夹角为 θ ,如图 3 所示.通过改变角度 θ ,我们获得了不同偏振状态下分形结构 THz 透射的频谱特性.

图 4 是由实验测得的完整 7 级分形结构的透射谱.其中方框连线表示当 θ 为 0° 时的透射谱,在 0.176 THz 处,有一个明显的透射峰.圆点连线表示当 θ 为 90° 时的透射谱,在 0.556 THz 处,有一个明显的透射峰.在高频区几乎看不到明显的透射峰.

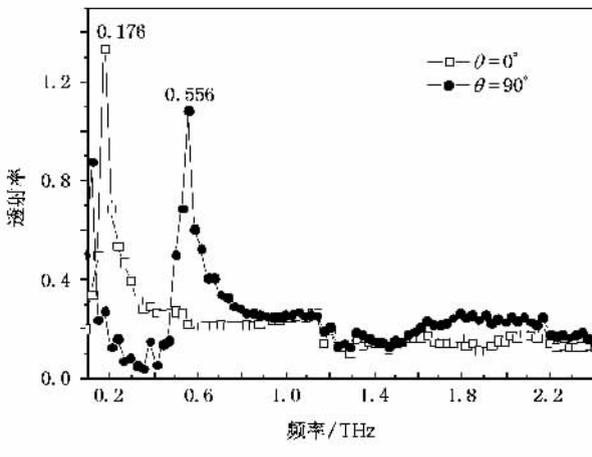


图 4 完整的 7 级分形样品的透射谱

图 5 是几个只有单个级数分形线结构的 THz 透射谱. $70i$ ($i = 1, 2, \dots, 7$) 表示完整 7 级分形结构中

仅保留第 i 级分形线的阵列样品.当 θ 为 0° 时, 705 在 0.293 THz 处出现了明显的透射峰, 707 在 0.586 THz 处出现了明显的透射峰.当 θ 为 90° 时, 706 在 0.322 THz 处出现了明显的透射峰.其余样品的透射率很低几乎观察不到.我们也仅研究了有 1, 3, 5 和 7 级分形线的一个分形结构,由图 5 可以看出,当 θ 为 0° 时,该分形结构在 0.293 和 0.556 THz 处出现了明显的透射峰.而当 θ 为 90° 时,该分形结构没有明显的透射峰.这表明,分形结构的共振透射峰起源于相应级分形线中的电子共振,高频峰位由高级线的共振透射引起,THz 波的偏振方向与分形线相垂直即 θ 为 90° 时,奇数级分形线中的电子无法振荡,故没有共振透射峰出现.

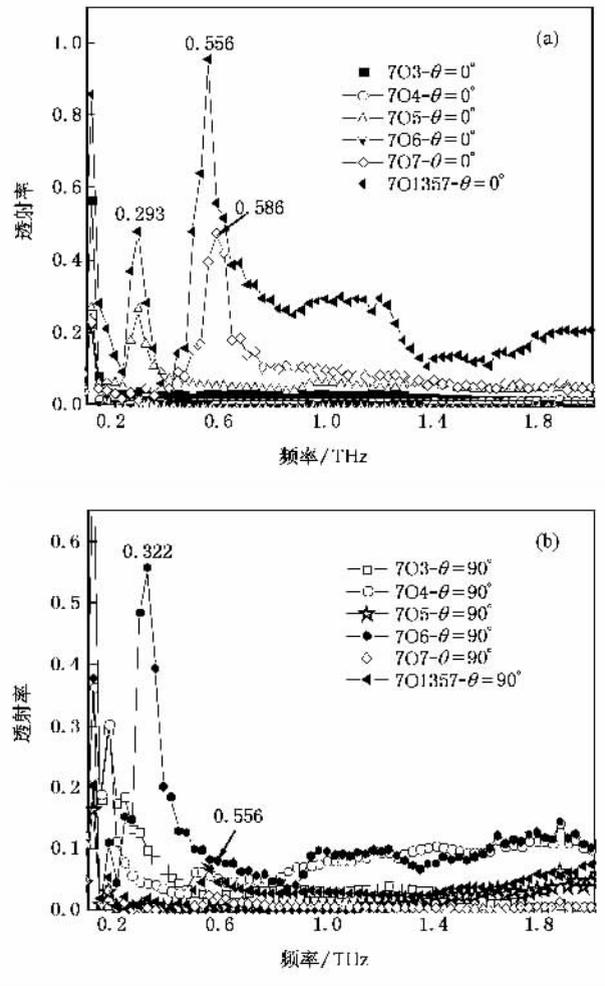


图 5 几个只有单个级数分形线结构的 THz 透射谱 (a) $\theta = 0^\circ$; (b) $\theta = 90^\circ$

图 6 是 7 个缺少某一级数分形线的分形结构的 THz 透射谱. $70i$ ($i = 1, 2, \dots, 7$) 表示完整 7 级分形结构中缺少第 i 级分形线的阵列样品.当 θ 为 0° 时,

7C1, 7C4, 7C6 在 0.586 THz 处出现共振峰, 7C2, 7C3, 7C5 在 0.556 THz 处出现共振峰, 7C6 在 0.293 THz 处出现了明显的透射峰. 当 θ 为 90° 时, 7C2, 7C4, 7C5 在 0.234 THz 附近出现透射峰, 7C7 在 0.322 THz 处有明显的透射峰.

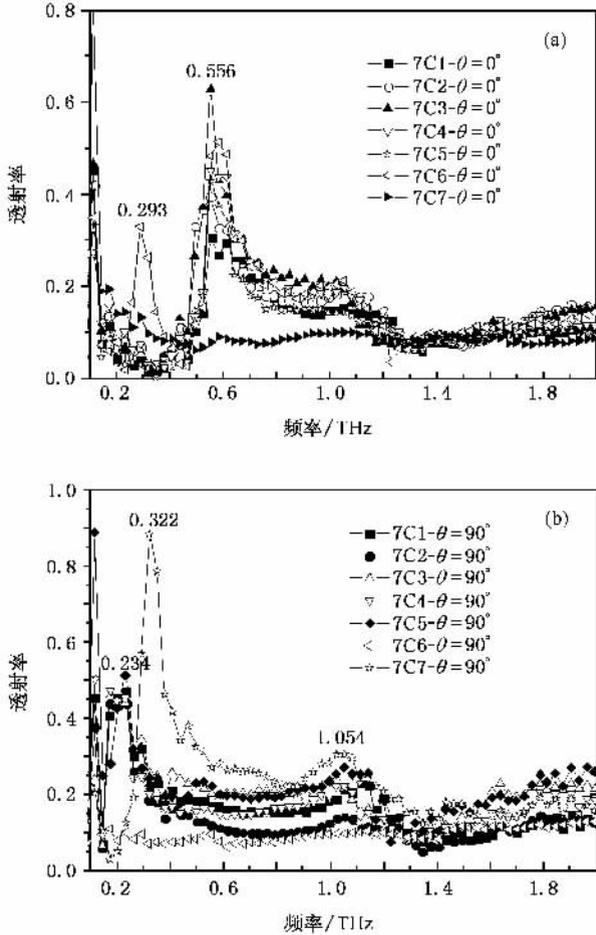


图6 几个缺少某一级数分形结构的 THz 透射谱 (a) $\theta = 0^\circ$; (b) $\theta = 90^\circ$

4. 理论分析和结果讨论

根据香港科技大学物理系温维佳研究小组对 H 分形结构在微波和红外频段的带隙特性研究所得的一系列研究结果^[17-21-26], 我们知道在共振频率处, 电磁场会在金属分形结构线上激发出瞬态电流, 此时电流振幅达到最大. 每当入射电磁波的频率接近此共振频率时, 与入射波相对应的电流位相就会发生 π 的跃变, 这就引起一个谐振. 此时透射率达到最大, 对应的频率即为共振频率. 根据 FDTD 模拟计算, N 级分形结构共振频率的经验公式为^[16]

$$f_i = c_0/\lambda_i = c_0/\sqrt{\bar{\epsilon}_r} \sum_{j=1}^{N+1-i} \alpha(j) b(i+j-1), \quad (2)$$

其中 f_i 为当 i 为奇数(偶数)时, 即 θ 为 0° (90°) 时的共振频率, c_0 为真空中的光速, $\bar{\epsilon}_r = (\epsilon_r + 1)/2$, ϵ_r 为衬底的相对介电常数. 本实验中样品无衬底即 $\epsilon_r = 1$, $\{\alpha(1) = \alpha(2) = 0.867, \alpha(3) = \alpha(4) = 1.234, \alpha(2i+1) = \alpha(2i+2) = 2\alpha(2i-1), i \geq 2\}$ 为设定的拟合经验参数, $b(i)$ 为第 i 级线的长度, 我们据此利用 Matlab 可以计算出共振频率.

图7是计算得到的完整7级分形结构和仅有某个级数分形线结构的所有共振频率位置. 可以看出, 7O1 仅有第1个共振峰, 7O2 有第1和第2两个共振峰等等, 即 $7O_i$ 引起第 $1, 2, \dots, i$ 个共振峰. 而且低级分形线引起的共振峰在低频区, 高级分形线引起高频共振. 7O5 和 7O6 的第一个共振频率为 0.293 THz, 7O 引起的第2和第3个共振频率均为 0.586 THz, 与实验结果相同. 7O6 引起的第2个共振频率 0.293 THz 与实验在 θ 为 90° 时测得 0.322 THz 有些出入, 这可能是由于高级分形线的不对称性而引起分形结构的自相似失效^[27-28].

此外, 对于仅有奇数级分形线的分形结构, 共振峰除第一个外, 其余均两两相同; 仅有偶数级数时, 峰位也是两两相同. 也就是说, 样品处于 $\theta = 0^\circ$ 和 $\theta = 90^\circ$ 时的共振频率相同, 且透射率一个高一个低. 例如图5中 7O7 在 0.586 THz 处对于 0° 和 90° 的实验结果就有这种明显的共振峰位重叠现象, 其他样品也有类似的现象, 这是由于我们的样品中相邻的奇数级和偶数级分形线就是两两长度相同, 所以在转过 90° 角度后等长的分形线自然会引入相同频率的共振峰, 另外, 由实验结果亦可看出, 0° 时出现共振峰的地方 90° 时的透射率很低, 这与上述的分析一致.

图8是由计算得到的完整7级分形结构和缺少某个级数分形线结构的所有共振频率位置. 与图7相比, 只有单独 i 级分形线的结构所引起的 i 个共振频率分别高于相对应的由缺少某级分形线的结构所引起的共振频率. 例如, 在图7中的第二个共振频率均大于 0.2 THz, 而图8中的均小于 0.2 THz, 其余也是这样的情况. 对应的物理机理是: 不同级数的分形线所引起的共振频率各不相同, 而且在这个共振频率处, 电流沿着高级分形线传播, 所以会在各级数高于此分形线且奇偶性不同的分形线中引起小于于此

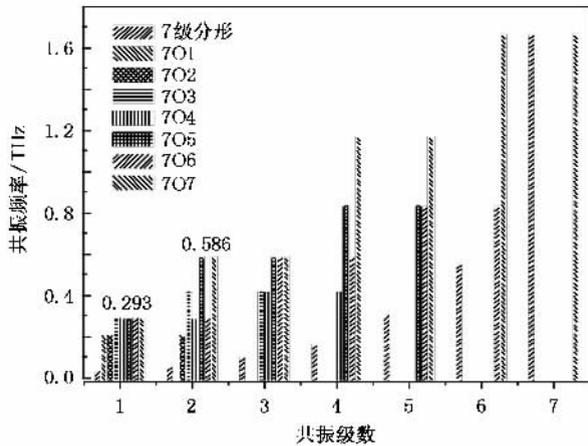


图 7 完整 7 级分形结构和仅有某个级数的分形结构的所有共振频率位置

共振频率的反位相共振,这样由多个分形级数所构成的仅缺少某级分形线的结构的透射率就是最终的叠加结果,而对于仅有单个级数分形线的结构则无此叠加抵消,最终就表现为所引起的 i 个共振频率分别高于相对应的由缺少某级分形线结构所引起的共振频率^[17-20].此外,与完整分形结构相比,缺少第 i 级的分形结构,就会影响前 i 个共振峰所对应的频率大小,而且此共振频率会向高频区移动,即出现蓝移现象.另外可以看出,7C1 和 7C2 的分形结构,只有第 2 个峰位不同;7C3 和 7C4 的结构,只有第 2 和第 4 个峰位不同.也就是说,缺少 $(2n - 1)$ 级和缺少 $2n$ 级的结构,只有第 $2, 4, \dots, (2n)$ 峰位不同.这也是由结构的对称性引起的,我们的实验样品相邻

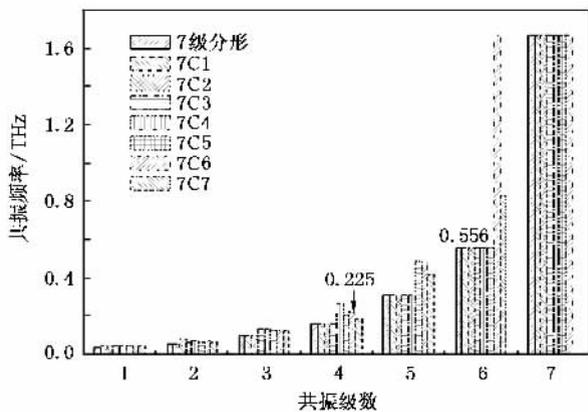


图 8 完整 7 级分形结构和缺少某个级数分形线结构的共振频率位置

两个级分形线的长度相等,在相互垂直的两个方向都会存在同一个频率的共振.

7C1, 7C2, 7C3, 7C4, 7C5 的第 6 个共振频率为 0.556 THz,这与实验结果相一致.7C6 的第 4 和第 5 个共振峰频率为 0.225 和 0.487 THz,与实验结果 0.293 和 0.585 THz 有一定的偏差,这可能是由于高级分形线的不对称性所引起的^[23, 24].

图 9 是完整 7 级分形结构的各级共振波长位置.可以看出,完整 7 级分形结构的低级共振波长几乎都比样品尺度 1.66 mm 大.这是因为低频共振主要由长的低级线引起,这样共振波长很容易就比分形的尺度大.由此可见,这种亚波长的共振,能够有效激发波长比样品横向尺度大许多的电磁波,这是产生亚波长共振透射的原因所在.

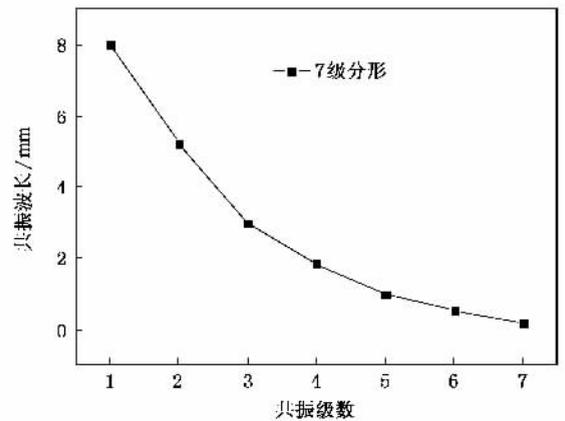


图 9 完整 7 级分形结构的所有共振波长位置

5. 结 论

从实验和理论两个方面分别分析了亚波长分形结构在 THz 频段的透射性质,认识到 THz 光透过亚波长的 H 分形结构发生的透射增强,主要是由结构本身的局域共振引起的.在低频区的透射增强主要是由低级分形线中电子运动的共振引起,而高频区的透射增强则主要由高级分形线中电子运动的共振引起.一定尺度的分形结构,决定了相应的共振峰频率位置.这样,就可以通过改变分形结构的形状和尺度来调节共振峰频率位置,从而满足实际的 THz 光子器件性能要求.

- [1] Martin-Moreno L , Garcia-Vidal H J , Lezec , Pellerin K M , Thio T , Pendry J B , Ebbesen TW 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 1114
- [2] Ebbesen T W , Lezec H J , Gaemi H F , Thio T , Wolff P A 1998 *Nature* **391** 667
- [3] Ghaemi H F , Thio Tineke , Grupp D E , Ebbesen T W , Lezec H J 1998 *Phys. Rev. B* **58** 6779
- [4] Barnes W L , Murray W A , Dintinger J , Devaux E , Ebbesen T W 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 107401
- [5] Porto J A , Garcia-Vidal H J , Pendry J B 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 2845
- [6] Takakura Y 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 5601
- [7] Yang F , Sambles J R 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 063901
- [8] Went H E , Hibbins A P , Sambles J R , Lawrence C R , Crick A P 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 2789
- [9] Popov E , Neviere M , Enoch S , Reinisch R 2000 *Phys. Rev. B* **62** 16100
- [10] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [11] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
- [12] McCalmont J S , Sigalas M , Tuttle G , Ho K M 1996 *Appl. Phys. Lett.* **68** 2759
- [13] Liu J T , Zhou Y S , Wang F H , Gu B Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1845 (in Chinese)[刘江涛、周云松、王福合、顾本源 2004 物理学报 **53** 1845]
- [14] Munk B A 2000 *Frequency Selective Surfaces Theory and Design* (New York : Wiley) p63—120
- [15] Zhu J M , Ma Z Y , Zheng C L 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3248 (in Chinese)[朱加民、马正义、郑春龙 2004 物理学报 **53** 3248]
- [16] Huang L , Sun J A , Dou F Q , Duan W S , Liu X X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 611 (in Chinese)[黄磊、孙建安、豆福全、段文山、刘兴霞 2007 物理学报 **56** 611]
- [17] Wen W J , Zhou L , Li J , Ge W K , Chan C T , Sheng P 2005 *Phys. Rev. Lett. B.* **89** 223901-1
- [18] Zhao G Z , Tian Y , Sun H Q , Zhang C L , Yang G Z 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 1456
- [19] Matsui T , Agrawal A , Nahata A , Vardeny V Z 2007 *Nature* **446** 517
- [20] Wen W J , Zhou L , Hou B , Chan C T , Sheng P 2005 *Rhys. Rev. B.* **72** 153406-1
- [21] Zhou L , Wen W J , Chan C T , Sheng P 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 1012
- [22] Wen W J , Zhou L , Li J , Ge W K , Chan C T , Sheng P 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 2106
- [23] Zhou L , Wen W J , Chan C T 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 3257
- [24] Zhou L , Chan C T , Sheng P 2004 *J. Phys. D : Appl. Phys.* **37** 368
- [25] Hou B , Xu G , Wen W J 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 3231
- [26] Hou B , Xu G , Wen W J , George K L 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 6125
- [27] Gaubert C , Chusseau L , Giani A , Gasquet D , Garet F , Aquistapace F , Duvillaret L , Coutza J L , Knap W 2004 *Phys. Stat. Sol. (c)* **1** 1439
- [28] Borja C , Puente C , Medina A 1998 *Electron. Lett.* **34** 1443

Study of enhanced transmission of terahertz radiation through subwavelength fractals structures^{*}

Meng Tian-Hua^{1,2)} Zhao Guo-Zhong^{1)†} Zhang Cun-Lin¹⁾

¹ *Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100037, China*

² *College of Physics and Electronics, Datong University, Datong 037009, China*

(Received 30 August 2007; revised manuscript received 11 December 2007)

Abstract

The enhanced transmission of terahertz radiation through the metal subwavelength fractal structures is studied by means of the terahertz time domain spectroscopy (THz-TDS). In view of experiment and theory, the physical mechanism of enhanced transmission of THz wave through each level of fractal lines on the copper film is studied. It is found that THz transmission enhancement in low frequency region mainly resulted from the electron resonance in low level lines, and that in high frequency region mainly resulted from the electron resonance in high level lines. Thus the transmission enhancement can be attributed to the electron resonant radiation in the fractal structure, namely the localized resonance efficiency of the fractal structure.

Keywords : fractal, terahertz, transmission, resonance peak

PACC : 7820P, 7840K, 9575F, 9580G

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10474067), the Natural Science Foundation of Beijing (Grant No. 4073030) and the National Basic Research Program of China (Grant No. 2007CB310408).

[†] Corresponding author. E-mail: guozhong-zhao@mail.cnu.edu.cn