

文章编号: 2095-4980(2014)05-0658-05

相位不连续超材料表面的研究进展

屈伟豪¹, 迟明黎², 吴勇², 田震^{1*}

(1. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院 太赫兹研究中心, 天津 300072;
2. 河北交通职业技术学院, 天津 300381)

摘要: 近年来, 超材料表面性能研究得到快速发展, 在电磁波亚波长操纵等领域展现了独特的应用前景。超材料表面通常由许多周期性排列的金属结构单元组成, 如果合适地设计结构单元的几何构型, 就能够按照意愿得到拥有特定光学性质的材料。对近期利用相位不连续超材料表面对电磁波进行操控的研究进展进行了综述, 包括: 利用相位不连续表面控制电磁波出射方向; 利用相位不连续表面结构合成圆偏振光; 相位不连续应用于隐身; 太赫兹波段相位不连续结构的应用; 最后对该研究领域的发展进行了展望。

关键词: 相位不连续; 超材料表面; 亚波长

中图分类号: TN0441.6, TN0436.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201405.0658

Progress on metasurface with phase discontinuities

QU Wei-hao¹, CHI Ming-li², WU Yong², TIAN Zhen^{1*}

(1. Center of Terahertz Waves, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Hebei Jiaotong Vocational & Technical College, Tianjin 300381, China)

Abstract: Recently, metasurface has developed rapidly, showing potential applications in the field such as Electro-Magnetic(EM) wave subwavelength manipulation. Metasurface which is made up of many periodical metallic unit cells can obtain many special optical properties at will if the structure of unit cell can be designed exactly. Recent progress on manipulation of the EM wave by metasurface with phase discontinuities is reviewed in this paper, including controlling the propagation direction of EM waves, synthesizing circular polarization of EM waves, cloaking, application of phase discontinuity structure in terahertz band. Finally, the further research in this field is prospected.

Key words: phase discontinuities; metasurface; subwavelength

在电磁波操控器件中, 超材料是很有潜力的候选之一。超材料通常由许多周期性排列的金属结构单元组成, 这些结构单元的尺寸一般处于亚波长范围。从宏观上看, 可以扮演普通光学介质中单个原子或原子团的作用, 调制相应波长的入射光波。如果合适地设计结构单元的几何构型, 就能够按照人们的意愿得到拥有特定光学性质的材料, 所以利用这些材料, 再通过恰当的设计, 就可以实现多种多样的功能, 如负折射率^[1]、隐身^[2]、超透镜^[3]、滤波^[4]、完美吸收^[5]、超大手征性改变^[6]、电磁诱导透明^[7]以及功能可主动控制^[8]等等, 它的出现, 为设计电磁空间和控制电磁波的传输提供了一种新的思路。

超材料一经提出就受到了国内外研究人员的广泛关注, 并对其各方面的性质进行了非常细致的研究, 许多上述功能都已实现, 为将来的发展奠定了基础。虽然如此, 超材料仍有很大的发展空间。例如最近美国哈佛大学提出的利用谐振引起的界面处的相位不连续, 可以实现不同于传统 Snell 定律所描述的异常的反射和透射现象^[9], 可以实现对电磁波出射方向和反射方向的任意控制以及对电磁波偏振的任意控制, 并利用该界面实现光学涡旋和空间光调制等。该相位不连续界面为电磁波的操控提供了一种潜在的新技术, 本文综述了近期利用相位不连续超材料表面对电磁波进行操控的研究进展。

收稿日期: 2014-05-27; 修回日期: 2014-08-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61107085); 光电信息技术教育重点实验室(天津大学)开放基金资助项目

*通信作者: 田震 email:tianzhen@tju.edu.cn

1 相位不连续的理论基础

理论推导发现，在界面处给电磁波引入不连续的相位变化可以帮助控制电磁波的特性。

如图 1 所示， $\phi(x)$ 为 2 种折射率不同的介质的界面处薄层的光波相位。2 束平行光分别在 x 和 $x+dx$ 处到达界面。 $\phi(x)$ 是关于位置 x 的线性函数。 θ_i 是入射角， θ_r 和 θ_t 为反射角和折射角。在 x 点的入射、反射、折射波可表示为： $E_{i1} = E_{o1} \exp[ik_i \sin \theta_i x]$ ， $E_{r1} = E_{o1} \exp[i(k_i \sin \theta_r x - \phi)]$ ， $E_{t1} = E_{o1} \exp[i(k_t \sin \theta_t x - \phi)]$ ； $x+dx$ 点处为： $E_{i2} = E_{o2} \exp[ik_i \sin \theta_i (x+dx)]$ ， $E_{r2} = E_{o2} \exp[i(k_i \sin \theta_r (x+dx) - \phi - d\phi)]$ ， $E_{t2} = E_{o2} \exp[i(k_t \sin \theta_t (x+dx) - \phi - d\phi)]$ 。根据边界条件， x 点处满足等式：

$$\begin{cases} n_1 x \sin \theta_r = n_1 x \sin \theta_i + (c/2\pi f)\phi \\ n_1 x \sin \theta_t = n_1 x \sin \theta_i + (c/2\pi f)\phi \end{cases} \quad (1)$$

式中 n 为界面折射率。

$x+dx$ 处满足等式：

$$\begin{cases} n_1 (x+dx) \sin \theta_r = n_1 (x+dx) \sin \theta_i + (c/2\pi f)(\phi + d\phi) \\ n_1 (x+dx) \sin \theta_t = n_1 (x+dx) \sin \theta_i + (c/2\pi f)(\phi + d\phi) \end{cases} \quad (2)$$

联立两处等式，得到：

$$\begin{cases} n_1 \sin \theta_r = n_1 \sin \theta_i + (c/2\pi f)(d\phi/dx) \\ n_1 \sin \theta_t = n_1 \sin \theta_i + (c/2\pi f)(d\phi/dx) \end{cases} \quad (3)$$

由等式(3)可以看出，当光传播到两介质界面时，入射角 θ_i 一定，相位沿 x 轴的变化量($d\phi/dx$)可以影响出射光以及反射光的方向 θ_r, θ_t 。当入射光在沿界面处没有相位变化时，等式(3)符合斯涅耳定律。相位不连续的核心就是产生这样一个 $d\phi/dx$ 的相位梯度，通过人为调节梯度大小，改变电磁波的传输方向。

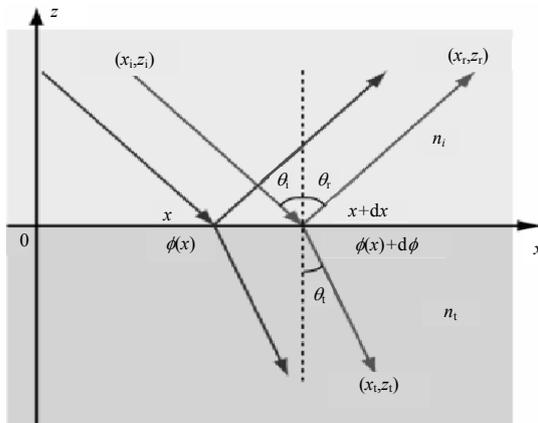


Fig.1 EM wave phase between the interface of two media with different refractive indexes
图 1 2 种折射率不同的介质的界面处的光波相位

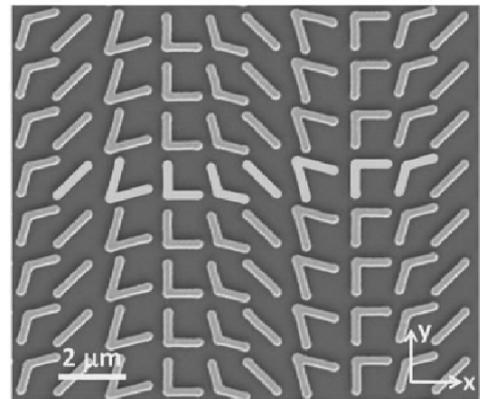


Fig.2 Structure design of V shaped phase discontinuities
图 2 V 字形相位不连续设计

2 相位不连续的实际应用与发展

2.1 控制出射电磁波方向

2011 年，哈佛大学的 Nanfang Yu 等人首次在 *SCIENCE* 上阐明了相位突变对于光线折反射定律的影响，并验证了 V 字形结构引入突变相位的可行性，在此基础上提出了连续 8 个 V 字结构为 1 个周期的超材料设计(如图 2 所示)。

这个设计可以通过调节周期长度大小控制出射电磁波的方向。该实验小组经过精心的设计安排，使图 2 中一个周期单元实现沿 x 轴 $0 \sim 2\pi$ 的相位变化。V 字的臂宽度 220 nm，厚度 50 nm，对称轴与 y 轴夹角 β 均为 45° ，入射光偏振方向 α (与 y 轴夹角)为 0° 。通过试验，调节臂的长度和两臂之间的张角大小，使通过 8 个 V 字单元的透过强度基本一致，此时的臂长分别为 0.75 μm , 1.35 μm , 1.13 μm , 0.94 μm , 0.75 μm , 1.35 μm , 1.13 μm , 0.94 μm ；夹角为

180°,60°,90°,120°,180°,60°,90°,120°。这个周期结构在入射波长为 $8\ \mu\text{m}$ 时,实现透过强度一致及相位沿 x 轴 $\pi/4$ 递增,由于 V 字尺寸比起入射波长要小得多,所以每个天线 45° 的相位变化从宏观上说可以看成是相位渐变的。根据理论计算,出射角度为 $\theta_i = \arcsin(\lambda_0 / \Gamma)$, λ_0 为入射波长, Γ 代表 8 个 V 字形缺口谐振环(Split Ring Resonator, SRR)组成的一个周期的长度。

2012 年, Xinjie Ni 在 *SCIENCE* 撰文利用类似的设计实现了 $1.0\ \mu\text{m}\sim 1.9\ \mu\text{m}$ 波长范围内的波前控制^[10]。这时 V 字形天线的臂宽为 40 nm, 厚为 30 nm(如图 3 所示)。2013 年, 南京大学 Bo O Zhu 等利用超材料二维阵列平面实现了 360° 反射相位主动调谐^[11]。

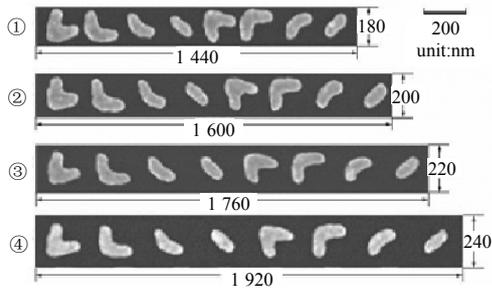


Fig.3 Structure design for $1.0\ \mu\text{m}\sim 1.9\ \mu\text{m}$
图 3 在 $1.0\ \mu\text{m}\sim 1.9\ \mu\text{m}$ 波段类似设计结构

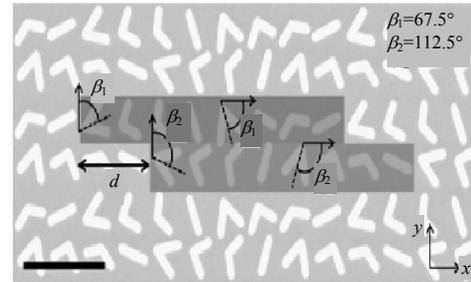


Fig.4 Schematic diagram of structure design
图 4 结构设计示意图

2.2 利用相位不连续结构合成圆偏光

同样是利用 V 字形结构, 已经可以把线偏光转变成圆偏光或者椭圆偏光, 还可以控制生成的圆偏光的出射方向。以 V 字形结构为基础的复合结构, 具体如图 4 所示^[12]。

上面矩形阴影部分 8 个组成单元 a, 下面矩形阴影部分 8 个组成单元 b, a 和 b 沿着 y 轴交替变化复合成一个周期性的单元结构。图 4 中, $\beta_1=67.5^\circ, \beta_2=112.5^\circ$, 从 a 和 b 出射的波的偏振方向相差 $2(\beta_1-\beta_2)=90^\circ$ 。值得注意的是, 2 个单元内的各自对应的 V 天线几何参数相同, 两单元的前 4 个 V 关于 x 轴对称, 后 4 个关于 y 轴对称, 这样保证了从 2 个单元出射的波的强度一致, 方向相同($\theta_i = \arcsin(\lambda_0 / \Gamma)$)。由于射入波的波长远大于每个单元的宽(沿 y 轴长度), 两单元出射波可以看成是重合的一束波, 这样出射波就是 2 个偏振方向相互垂直的波的合成。如果 2 个分量的波相位相差 2π 的整数倍, 出射光为线偏振。当相互垂直的两分量相位相差 $\pm\pi/2+2n\pi$ (n 为任意整数)时, 就会出射圆偏光。

而这 90° 的相位差则通过图中红绿单元沿 x 轴的平移量 d 引入。图 5 中 a 单元和 b 单元出射光的路程差为 $d\sin\theta_i$, 位相差为 $k_0 d\sin\theta_i=2\pi d/\Gamma$, 当 d 为 $\frac{\Gamma}{4}$ 时, 2 束偏振方向垂直的光相位正好相差了 $\pi/2$, 强度相同。当入射光垂直入射, 沿折射角 $\theta_i = \arcsin(\lambda_0 / \Gamma)$ 出射的非寻常光是圆偏光。考虑到寻常光依旧垂直出射, 圆偏光可以极大排除寻常光的干扰。改变 d 的大小, 引入不同的相位差, 例如 $d = \frac{\Gamma}{8}$ 或 $\frac{3\Gamma}{8}$ 时, 还可以出射椭圆偏光。

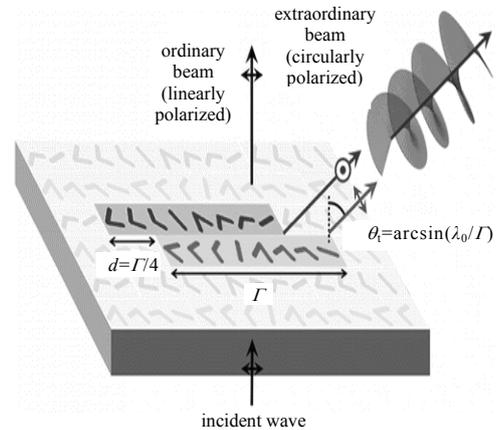


Fig.5 Principle of induced phase difference
图 5 相位差引入原理图

2.3 相位不连续应用于隐形

最近, 应用相位不连续已成功实现了在 10 GHz 处人工制造出一个隐身空间^[13]。这个隐身空间是由 2 块表面带有相位不连续设计结构的平板与地面构成的三角形空间, 如图 6 左上角。图中平板上层沿垂直方向被分成了 n 个大小相同距离相等的超材料结构。当电磁波垂直地面照射到平板上时, 正常反射波会与入射波形成大小为 2θ 的夹角(θ 为平板与地面的夹角), 而在平板的上表面引入相位的变化, 根据斯涅尔定律, 适当地引入特定的相位弥补打到不同位置电磁波的相位差, 就有可能实现反射波沿与地面垂直的方向反射回去, 就好像不存在这个三角形空间, 电磁波是直接打到地面被反射一样, 这样就人工地制造了隐形空间。这里的超材料单元是 H 形结构(如图 7 所示)。

2.4 相位不连续结构应用于太赫兹波

前文所提到的研究集中在微波段或者远红外波段。在太赫兹波段，天津大学的研究小组利用 C 字形 SRR 设计的相位不连续结构在 0.6 THz 处成功地控制了出射太赫兹波的方向^[14]。8 个 C 形 SRR 组成的周期单元如图 8 所示。

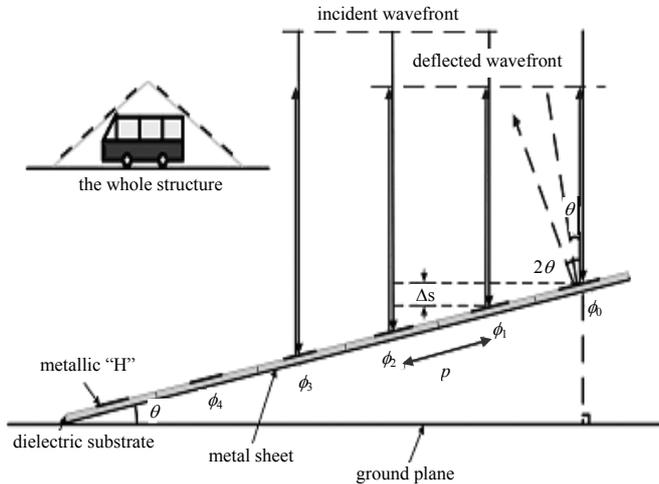


Fig.6 Schematic diagram of cloaking area
图 6 隐身空间示意图

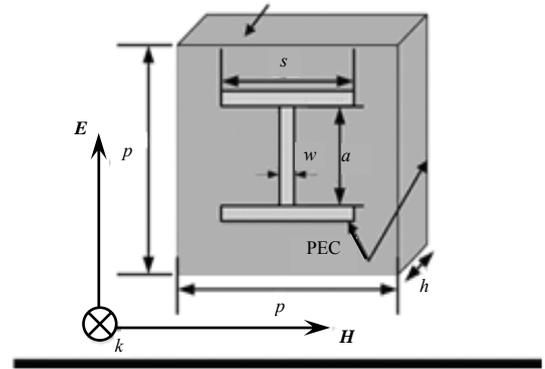


Fig.7 Unit cell of cloaking
图 7 隐身结构设计单元示意图

二维结构参数： r (外圆半径)依次是 $34.0\ \mu\text{m}, 32.3\ \mu\text{m}, 34.4\ \mu\text{m}, 29.8\ \mu\text{m}$ ；宽为 $5.0\ \mu\text{m}$ ，对称轴与 y 轴夹角为 45° ；张角 α 依次是 $11^\circ, 47^\circ, 117^\circ, 140^\circ$ ，后 4 个为前 4 个顺时针旋转 90° 得到。其中，SRR 用铝制成，厚度 $200\ \text{nm}$ ，铺在厚度为 $640\ \mu\text{m}$ 的硅片上。实验结果显示在 $0.4\ \text{THz} \sim 1\ \text{THz}$ 范围内，每个 C 形 SRR 都能保证在一定的透过率强度的基础上实现 45° 的相位递增。此设计还可用于太赫兹波聚焦。

在薄层前后加金属栅形结构可以提高某偏振方向出射光的强度^[15]，来控制光的性质。在此基础上，在天线结构薄层的光出射一侧加上另一材料的薄层和金属栅，使得非寻常光可以透过而寻常光被反射回去，被反射回去的光继续经过天线，当这部分光产生了偏振方向可以透过栅的非寻常光时，又会通过金属栅，这样出射的光只有一种偏振的非寻常光，依然可以利用相位梯度控制折射角 θ_0 。为了防止反射光对入射线偏光的影响，在天线薄层入射一侧同样加上相似薄层和金属栅，设计如图 9 所示。

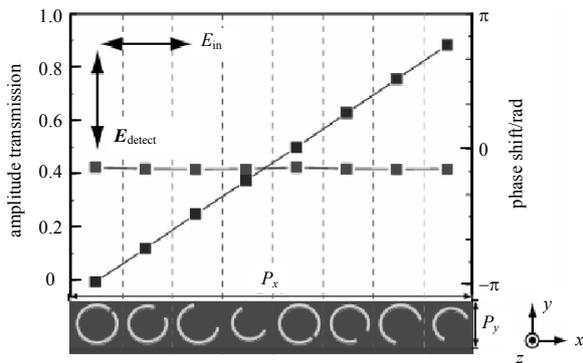


Fig.8 Design of phase discontinuities in terahertz region
图 8 太赫兹波段的相位不连续设计

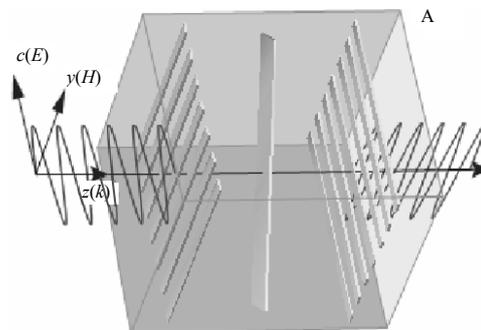


Fig.9 Design for enhancing terahertz transmission
图 9 增强太赫兹透射的设计

图 9 中间是金的 天线结构，厚度为 $200\ \text{nm}$ ，天线尺寸为 $68\ \mu\text{m} \times 68\ \mu\text{m}$ ，宽 $10\ \mu\text{m}$ ，长 $82\ \mu\text{m}$ 。而天线前后各有一层厚度为 $33\ \mu\text{m}$ 的聚酰亚胺，该材料介电常数 $\epsilon = 3(1 + 0.05i)$ 。 $33\ \mu\text{m}$ 材料层后是材质同样为金的栅形结构，厚度为 $200\ \text{nm}$ ，栅宽为 $4\ \mu\text{m}$ ，周期为 $10\ \mu\text{m}$ 。为了提高栅性能，栅层前后还附上一层 $4\ \mu\text{m}$ 的聚酰亚胺层。

中间的天线结构使用上面提到的二维平面结构设计，就可以在实现非寻常光透过强度大幅增强的同时，人为地精确调控出射非寻常光的方向。

3 结论

从以上结果可以看到,天线结构对波的谐振响应是相位不连续的基础,但天线的谐振又会对透过的强度产生负向的影响。利用天线对不同谐振方向的波的不同模式的谐振以及同谐振方向不同级次的谐振,是控制电磁波性质的关键。大量研究集中在二维平面天线结构对电磁波的相位和偏振方向的影响,安排天线的分布,设计天线的几何尺寸,最终通过二维天线平面完成对出射光的控制。相信未来该技术在电磁波亚波长操控领域将会有更加广泛的应用。

参考文献:

- [1] Shelby R A,Smith D R,Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. Science, 2001,292(6):77-79.
- [2] LIANG Da-chuan,GU Jian-qiang,HAN Jia-guang,et al. Robust large dimension terahertz cloaking[J]. Advanced Materials, 2012,24(7):916-921.
- [3] FANG N,Lee H,SUN C,et al. Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens[J]. Science, 2005,308(22):534-537.
- [4] ZHANG Xue-qian,GU Jian-qiang,CAO Wei,et al. Bilayer-fish-scale ultrabroad terahertz bandpass filter[J]. Optics Letters, 2012,37(5):906-908.
- [5] HU Tao,Landy N I,Bingham C M,et al. A metamaterial absorber for the terahertz regime:design,fabrication and characterization[J]. Optics Express, 2008,16(10):7181-7188.
- [6] WANG Bing-nan,ZHOU Jiang-feng,Koschny T,et al. Chiral metamaterials:simulations and experiments[J]. Journal of Optics A:Pure and Applied Optics, 2009,11(11):114003-114012.
- [7] ZHANG Shuang,Genov D A,WANG Yuan,et al. Plasmon-induced transparency in metamaterials[J]. Physical Review Letters, 2008,101:04740101-04740104.
- [8] GU Jian-qiang,Singh R,LIU Xiao-jun,et al. Active control of electromagnetically induced transparency analogue in terahertz metamaterials[J]. Nature Communications, 2012,3:1151.
- [9] YU Nan-fang,Genevet P,Kats M A,et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. Science, 2011,334(6054):333-337.
- [10] NI X,Emami N K,Kildishev A V,et al. Broadband light bending with plasmonic nanoantennas[J]. Science, 2012,335(6067):427.
- [11] ZHU Bo O,ZHAO Jun-ming,FENG Yi-jun. Active impedance metasurface with full 360° reflection phase tuning[J]. Scientific Reports, 2013,3:3059.
- [12] YU N,Aieta F,Genevet P,et al. A broadband, background-free quarter-wave plate based on plasmonic metasurfaces[J]. Nano Letters, 2012,12(12):6328-6333.
- [13] ZHANG Jing,MEI Zhong-lei,ZHANG Wan-ru,et al. An ultrathin directional carpet cloak based on generalized Snell's law[J]. Applied Physics Letters, 2013,103(15):15111501-15111504.
- [14] ZHANG Xue-qian,TIAN Zhen,YUE Wei-shen,et al. Broadband terahertz wave deflection based on C-shape complex metamaterials with phase discontinuities[J]. Advanced Materials, 2013,25(33):4567-4572.
- [15] Grady N K,Heyes J E,Chowdhury D R,et al. Terahertz metamaterials for linear polarization conversion and anomalous refraction[J]. Science, 2013,340(6138):1304-1307.

作者简介:



屈韦豪(1992-),男,江苏省昆山市人,在读硕士研究生,主要研究方向为太赫兹技术、计算机科学.email:haddyclipk@gmail.com.

迟明黎(1981-),女,辽宁省大连市人,讲师,主要研究方向为太赫兹技术等.

吴勇(1981-),男,河北省沧州市人,讲师,研究方向为太赫兹技术海洋应用等.

田震(1981-),男,河北省吴桥县人,讲师,研究方向为太赫兹科学技术、微结构器件等.