

渐变结构仿表面等离子体太赫兹传输线研究

钟任斌, 周俊, 刘维浩, 刘盛纲

(电子科技大学太赫兹研究中心, 四川成都 610054)

摘要: 本文利用有限元方法对圆柱开槽仿表面等离子体太赫兹(Terahertz, THz)传输线进行了详细的数值模拟研究,提出了一种尺寸渐变的仿表面等离子体 THz 传输线结构,发现在金属线上沿轴向构造渐深渐宽槽有利于将场能量最大程度地限制在导体表面,且能够汇聚电磁波,使得传输线表面波在传输过程中得到增强. 研究结果将利于 THz 传输、近场成像、光谱和传感等应用.

关键词: 太赫兹; 仿表面等离子体; 传输线; 渐变结构

中图分类号: O44 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012) 09-1735-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.09.006

Study of Mimicking Surface Plasmon Terahertz Transmission Line with Gradually Changed Geometric Parameters

ZHONG Ren-bin, ZHOU Jun, LIU Wei-hao, LIU Sheng-gang

(Terahertz Science and Technology Research Center, University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract: Numerical study on cylindrical corrugated Mimicking Surface Plasmons (MSPs) Terahertz (THz) transmission line with and without gradually changed geometric parameters was carried out by means of the finite element method. The results show that the gradual increased size of corrugates both in depth and width will help the confinement of the electromagnetic energy transmission on the surface of the wire, and the structure also has the function of concentration the propagation wave, which brings forth enhancement of the surface plasmon wave during its transmission along the wire. The obtained results will favor the applications of THz transmission, near-field imaging, spectroscopy and sensing.

Key words: terahertz; mimicking surface plasmons; transmission line; gradually changed structure

1 引言

近年来,随着微加工技术的不断进步,表面等离子体波(Surface Plasmons)SPs 研究在光学研究领域引起了广泛关注^[1~12],SPs 特性及其应用得到很好的发展.SPs 是指在金属表面存在的自由振动的电子与电磁波相互作用产生的沿着金属表面传播的电子疏密波,是一种极化波.它沿导体表面传播,在垂直导体表面方向为指数衰减的凋落场,因此其电磁能量被约束在导体表面较小的范围内,具有很强的近场增强效应^[2].由于金属导体的固有等离子体频率很高,SPs 的频率范围通常在可见光和紫外波段,在光频段的应用较多^[1~6].

随着太赫兹(THz)科学技术的发展,人们希望借鉴光学和微波毫米波频段的技术实现低损耗的 THz 传输.文献[13,14]利用结构极其简单的光滑金属线获得了低

色散、低损耗的 THz 传输,由于大部分金属在 THz 频段都表现为良导体,其 SPs 场在径向分布范围很大,是一种弱传导波,因此光滑金属线上传输的表面波除了存在很大的弯曲损耗外,还易与周围环境中的金属产生耦合,不利于实际应用.

为了使 SPs 能应用到 THz 波段,人们研究了具有人工周期结构的金属波导,这种周期结构能有效支持并约束表面波传输模式,且场结构与实际金属中传播的 SPs 类似,所以也称为人工仿表面等离子体波(Mimicking Surface Plasmons)MSPs 结构^[15~17].MSPs 传输模式的频率仅由其金属结构特征决定,而与金属固有等离子体频率无关,可实现 THz 频段波传输.Stefan A. Maier 研究小组即利用时域有限差分法研究了在圆柱形 PEC 线上开小于波长尺度的环形槽的电磁传输特性,并在特定传输频率获得了较好的传输效果^[18].

本文利用有限元模拟软件 COMSOL Multiphysics, 计算并探讨了 PEC 圆柱形微结构传输线 MSPs 场在 THz 频段的分布情况及传输特性, 获得了具有良好传输和会聚特性的 THz 波传输结构. 研究表明在金属线上沿轴向刻渐深和渐宽槽结构能够有效改善电磁波的径向约束, 从而显著提高传输线表面电磁波的强度, 利于电磁能量的有效引导和传输.

2 仿表面等离子体 THz 传输线传输特性

仿表面等离子体圆柱开槽 THz 传输线模型结构如图 1 所示: 在半径为 R , 长为 L 的圆柱金属线的外表面垂直轴向均匀刻环形槽, 槽深 h , 槽宽 d , 结构周期 D . 仅考虑导线结构对表面等离子体波的影响, 可设传输线为 PEC 材料. $L = 2000\mu\text{m}$, $R = 100\mu\text{m}$, $d = 10\mu\text{m}$, $D = 50\mu\text{m}$, $h = 50\mu\text{m}$, 则导线刻槽处的内径 $r = R - h = 50\mu\text{m}$, 周围介质为空气.

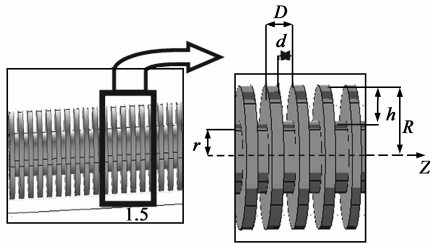


图1 均匀槽宽槽深环形槽圆柱传输线结构图

对于上述模型, 考虑低阶模式, 利用麦克斯韦方程组和槽内外边界条件可以得到均匀结构 MSPs 传输线的色散关系^[18]:

$$\sum_{n=-\infty}^{+\infty} S_n^2 \frac{g}{q_n} \frac{K_1(q_n R)}{K_0(q_n R)} \frac{N_0(gR) J_0(gR) - N_0(gR) J_0(gR)}{N_0(gR) J_1(gR) - N_1(gR) J_0(gR)} = 1 \quad (1)$$

其中 J_n , N_n 分别是 n ($n = 0, 1$) 阶 Bessel 和 Neumann 函数, K_n 是 n ($n = 0, 1$) 阶修正 Bessel 函数, $S_n = \sqrt{d/D} \text{sinc}(k_n d/2)$, $k_n = k + 2\pi n/D$, $q_n = \sqrt{k_n^2 - g^2}$, $g = \frac{\omega}{c}$, c 为光速. 文献[18]对该结构传输线色散特性的分析表明沿该开槽圆柱金属传输线传播的电磁波的相速度小于

光速, 是一种表面波.

我们在输入端激励功率相同、频率分别为 0.6THz 与 0.8THz 的 TM_{01} 波, 观测表面等离子体波沿该均匀 MSPs 结构(图 1)传输线的传输特性. 图 2(a)、(b) 为所得两种频率下 y - z 平面上的场强分布等位图. 可以看到, 电磁波在两种频率下均沿传输线稳定传输, 场主要局域在结构表面附近区域, 该结果与文献[18]的结果一致. 图 2(c) 为两种频率时在传输线轴向(z 轴)最后一个场周期中最大场值处的场径向分布, 可以看到在输入相同功率时, 该结构传输线场的径向约束性与频率有关, 频率越高, 线表面场强峰值就越高, 且场强随径向距离增大降低也越快, 即频率越高场越集中在传输线表面. 若进一步提高频率, 发现传输截止, 考虑为此频率接近或超过该结构的谐振频率, 因此该结构仅能够传输一定频率范围的表面波.

3 槽深和槽宽渐变对 THz 波传输特性的影响

本节将分别讨论沿波传播方向保持 MSPs 结构周期 D 不变, 但槽深渐变、槽宽渐变和槽深槽宽同时渐变的三种传输线结构(如图 3 所示)对其表面等离子体波传输的影响, 其中结构图 3(a) 为槽深保持恒定, 槽宽渐增, 图 3(b) 为槽宽保持恒定, 槽深渐增, 图 3 中(c) 为(a)与(b)的综合, 槽宽与槽深均渐增.

图 3(a) 结构中 d 由起始端的 $5\mu\text{m}$ 沿轴向逐渐递增至 $45\mu\text{m}$, 每两个周期增加 $2.5\mu\text{m}$, 其余部分按照 $45\mu\text{m}$ 均匀开槽. 在 0.6THz TM_{01} 模端口激励下, 我们获得了如图 4(a) 所示的具有很好的能量约束性的表面等离子体波传输. 电磁能量沿传输线表面传输, 且沿传输方向表面波逐渐向线表面聚拢, 图 4(b) 为传输线表面 ($R' = 105\mu\text{m}$) 处电场强度沿轴向分布图, 可以看出传输线表面电场沿传输方向逐渐增强, 也即传输能量逐渐集中到金属表面, 表现为场随槽宽增大而会聚. 相比均匀结构, 该结构的径向约束能力明显增强.

文献[19]指出利用光滑锥形铜线能在细端获得高于普通圆柱形铜线几倍的输出. 在不考虑耦合损耗的

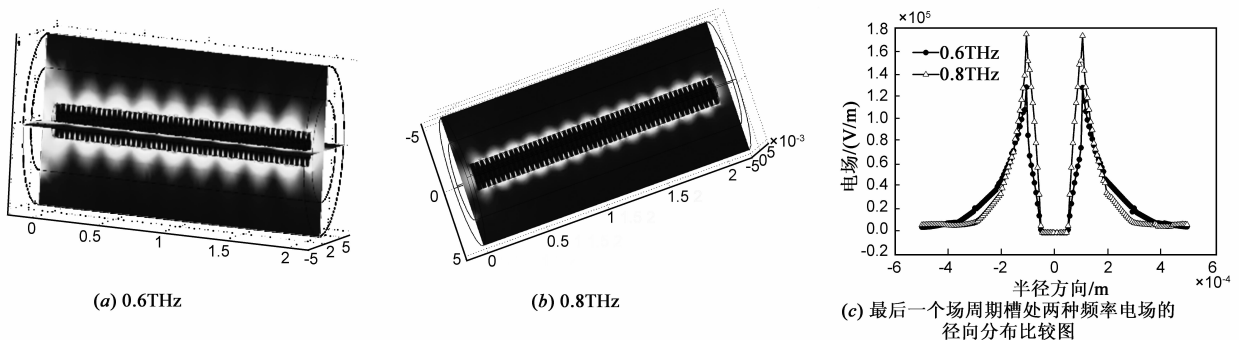


图2 相同功率, 不同频率 TM_{01} 模激励同一均匀槽宽槽深传输线的 y - z 平面场强分布等位图

情况下,我们用 0.6THz TM_{01} 模激励长 $L = 2000\mu\text{m}$, 初始半径 $R = 100\mu\text{m}$, 锥角为 2° 的圆柱 PEC 传输线, 如图 5 (a) 所示, 能量在传输线较细端会聚现象明显, 获得了汇聚传输. 但由于在传输线前端场的径向分布范围较大, 易产生辐射损耗, 因此不利于实际应用.

为了保持上述锥形线的汇聚特性并同时改善其前端径向场分布, 我们采用图 3 (b) 模型结构, 即沿传输轴线方向线外径不变 $R = 100\mu\text{m}$, $d = 10\mu\text{m}$, 内径从起始端 $r = 100\mu\text{m}$ 以椎体角 2° 沿轴线方向逐渐递减, 也即 h 逐渐递增. 在相同边界条件和 0.6THz TM_{01} 模初始激励下, 所得场强分布如图 5 (b) 所示, 可以看到该结构不仅能获得了末端场增强效果, 且能有效改善前端场的径向分布, 利于实际应用. 图 5 (c) 为光滑锥形线与渐深槽结构传输线前端电场径向分布比较图, 证明有槽时电场峰值位置更靠近传输线表面, 即前端场径向分布相对于光滑锥形线更加集中.

至此, 为同时获得良好的传输和会聚效果, 我们结合图 3 中 (a) 和 (b) 结构, 构造图 3 (c) 结构传输线, 即沿轴向同时逐渐增加开槽的深度和宽度 (线外径 $R = 100\mu\text{m}$, 内径从 $r = 100\mu\text{m}$ 逐渐变小, 椎体角为 2° , 槽宽由前端的 $d = 5\mu\text{m}$ 逐渐增大至 $45\mu\text{m}$,

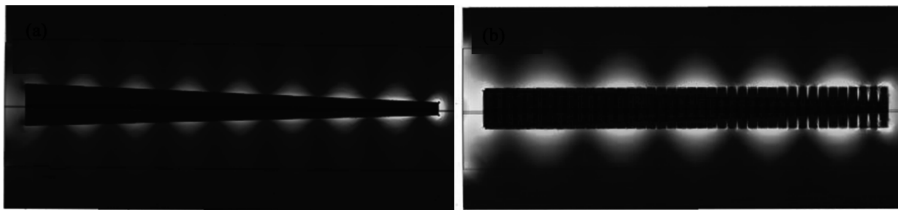


图5 (a) $L=2000\mu\text{m}$, $R=100\mu\text{m}$, 2° 光滑锥形PEC传输线结构; (b) 槽深渐增槽宽均匀的开槽PEC传输线结构在0.6THz M_{01} 模激励下的表面波传播的y-z平面场强分布等位图; (c) 光滑锥形线与槽深渐增线始端电场径向分布比较

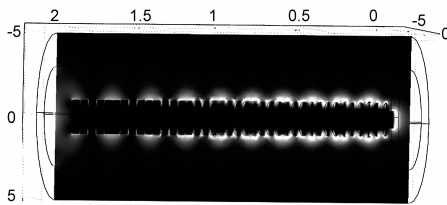


图6 槽深槽宽渐增时, 0.6THz TM_{01} 模激励下获得增强的会聚表面波传播

对于以上均匀槽宽槽深、渐宽槽宽均匀槽深以及渐宽槽宽渐深槽深三种结构, 我们对比测得了在 MSPs 传输线输出端一侧轴向约 $500\mu\text{m}$ 长度范围内, $y-z$ 纵截面上径向 $R' = 500\mu\text{m}$ 处电场幅值分布, 如图 7 (a), 我们可以看到对于均匀槽宽和槽深结构, 电场幅值沿 z 轴

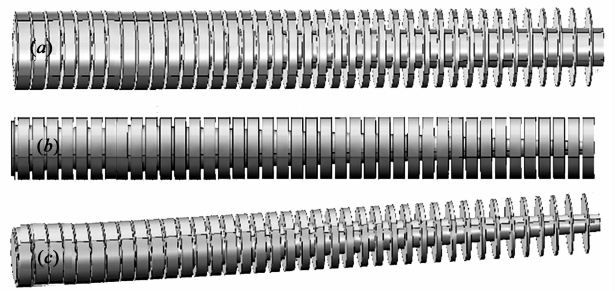
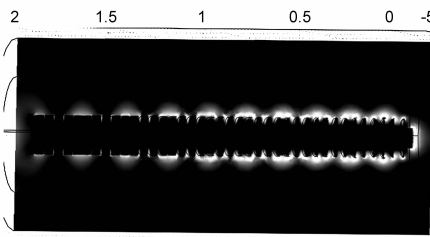
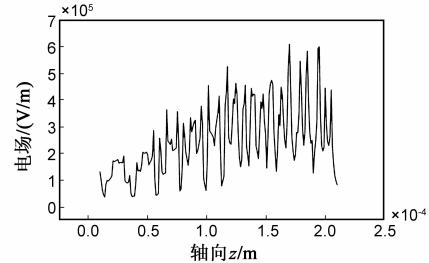


图3 渐变环形槽PEC传输线结构图; (a) 渐宽槽宽, 均匀槽深; (b) 渐深槽深, 均匀槽宽; (c) 渐宽渐深槽



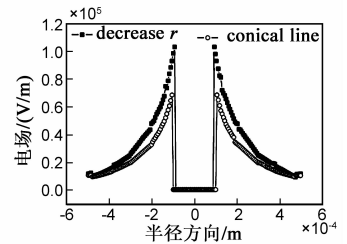
(a) y-z 平面上的场强分布等位图



(b) 在传输线表面 $R'=105\mu\text{m}$ 处表面波沿轴向电场强度分布

图4 槽宽渐增槽深均匀时, 在0.6THz TM_{01} 模激励下MSPs会聚表面波传输

每两个周期增加 $2.5\mu\text{m}$, 其余部分保持 $45\mu\text{m}$ 宽度不变, 同样 0.6THz TM_{01} 模输入, 模拟结果如图 6 所示, 获得了预期的传输汇聚效果.



均匀周期分布, 其幅值在 $2 \times 10^5 \text{V/m}$ 内周期变化, 表面等离子体波沿传输线表面稳定均匀传输; 当开槽结构周期不变, 槽宽沿 z 方向逐渐增加时, 相同条件下, 表面等离子体波场强沿传输方向在保持基本相同周期变化的同时, 电场幅值随槽宽增加而逐渐增强, 其最大值为 $6 \times 10^5 \text{V/m}$, 也即表面等离子体波能量更加集中在导体表面; 当槽宽和槽深同时逐渐增加时, 表面等离子体波在传输过程中随槽宽槽深增加而得到了进一步增强, 线末端幅值为 $8 \times 10^5 \text{V/m}$, 达均匀分布结构时幅值的 4 倍. 由于三种金属微结构传输线总输入能量一定, 可以判断这种增强不是总能量的增强, 而是由于结构的渐变使得表面等离子体波在传输过程中能量分布范围逐渐变小, 即能量更加集中在传输线表面, 从而表现

为近导线区场强增大。

图 7(b) 为测得的轴向固定槽中心点电场在 $x-y$ 平面上半径 $R' < 600\mu\text{m}$ 范围内的分布情况, 可以看出三种结构的电场幅值都是在导体外半径 $R = 100\mu\text{m}$ 附近获得最大值, 并随半径增大而迅速减小, 在 $500\mu\text{m}$ 处趋于零, 也

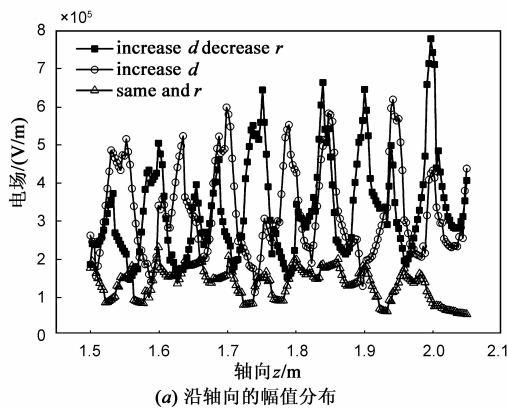
即场能量主要局域在 $500\mu\text{m}$ 范围内. 三种结构电场强度峰值点对应径向位置略有偏差, 其中槽宽渐增和槽深槽宽同时渐增结构的电场最大值处更加靠近传输线表面 $R = 100\mu\text{m}$ 处, 说明场更加局域在传输线表面; 场值随观测点远离轴心 (R' 增大) 而陡降趋于零值的变化速度的快慢也因结构不同而不同, 渐变结构较均匀结构下降更快, 且当槽深槽宽同时渐增时, 场在径向衰减最快, 也即对场的径向局域效果最好. 以上分析也进一步说明槽宽和槽深的渐变使得场更加汇聚于导线表面, 该结构有利于有效约束和传输 THz 波能量, 相对于弱导 THz 光滑金属线传输, 可有效减少导线弯曲损耗, 或者由于导线非均匀性和周边环境引起的辐射损耗, 能有效传输 THz 波. 且由于每种结构都存在截止频率, 还可用作滤波器, 通过设定结构参数选择所需频率. 利用其汇聚特性, 可将 THz 辐射汇聚成需要尺度, 利于 THz 近场成像, 光谱和传感等应用.

4 结论

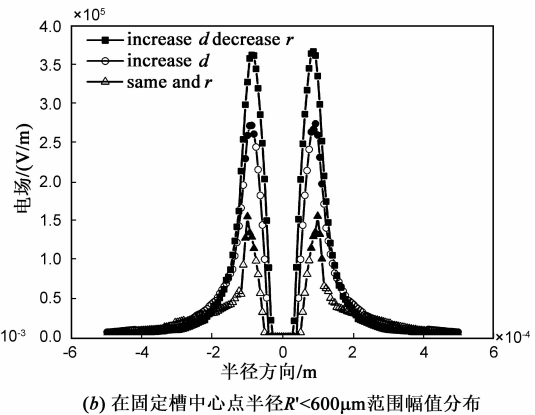
本文用有限元方法对圆柱开槽仿表面等离子体 THz 传输线进行了详细的数值模拟研究, 提出了一种尺寸渐变的仿表面等离子体 THz 传输线结构, 并对比分析了轴向和径向均匀变化结构与渐变结构时 THz 频段 MSPs 传输特性. 发现在金属线上沿轴向构造渐深渐宽槽将有利于将场能量最大程度地限制在导体表面, 且能够汇聚电磁波, 使得表面等离子体波在传输过程得到增强. 在相同激励和边界条件时, 渐变结构表面电场强度可达均匀结构的 4 倍. 研究结果将利于 THz 传输、近场成像、光谱和传感等应用.

参考文献

[1] WOOD R W. On a remarkable case of uneven distribution of light in a diffraction grating spectrum[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1902, 18(1): 269 - 275.



(a) 沿轴向的幅值分布



(b) 在固定槽中心点半径 $R' < 600\mu\text{m}$ 范围幅值分布

图7 在相同输入条件下, 均匀槽宽槽深、渐增槽宽, 渐增槽宽槽深结构测得电场

- [2] RAETHER H. Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings[M]. Berlin, Springer-Verlag: 1988. 1 - 24.
- [3] KITSON S C, BARMES W L, SAMBLES J R. A full photonic band gap for surface modes in the visible[J]. Physical Review Letters, 1996, 77(13): 2670 - 2673.
- [4] TAKAHARA J, YAMAGISHI S, TAKI H, et al. Guiding of a one-dimensional optical beam with nanometer diameter[J]. Optical Letters, 1997, 22(7): 475 - 477.
- [5] EBBESEN T W, LEZEC H J, GHAEMI H F, et al. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays[J]. Nature, 1998, 391: 667 - 669.
- [6] MARTIN-MORENO L, GARCIA-VIDAL F J, LEZEC H J, et al. Theory of extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays[J]. Physical Review Letters, 2001, 86(6): 1114 - 1117.
- [7] 徐长龙, 颜锦奎, 徐得名. 表面波吸收材料评估[J]. 电子学报, 1997, 25(6): 77 - 80.
XU Chang-long, YAN Jin-ku, XU De-ming. Evaluating of the surface wave absorbing material[J]. Acta Electronica Sinica, 1997, 25(6): 77 - 80. (in Chinese)
- [8] PILE D F P, GRAMOTNEV D K. Channel plasmon-polariton in a triangular groove on a metal surface[J]. Optical Letters, 2004, 29(10): 1069 - 1071.
- [9] VERONIS G, FAN S. Guided subwavelength plasmonic mode supported by a slot in a thin metal film[J]. Optical Letters, 2005, 30(24): 3359 - 3361.
- [10] JEON T-I, ZHANG J, GRISCHKOWSKY D. THz Sommerfeld wave propagation on a single metal wire[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(16): 161904(1 - 3).
- [11] JEON T-I, GRISCHKOWSKY D. THz Zenneck surface wave (THz surface plasmon) propagation on a metal sheet[J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(6): 061113(1 - 3).

- [12] YANG J, CAO Q, ZHOU C. Theory for terahertz plasmons of metallic nanowires with sub-skin-depth diameters[J]. Optics Express, 2010, 18(18): 18550 – 18557.
- [13] WANG K, MITTLEMAN D M. Metal wires for terahertz wave guiding[J]. Nature, 2004, 432: 376 – 379.
- [14] ASTLEY V, SCHEIMAN J, MENDIS R, et al. Bending and coupling losses in terahertz wire waveguides[J]. Optical Letters, 2010, 35(4): 553 – 555.
- [15] GARCIA-VIDAL F J, MARTIN-MORENO L, PENDRY J B. Surfaces with holes in them: new plasmonic metamaterials[J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2005, 7(2): S97 – S101.
- [16] PENDRY J B, MARTIN-MORENO L, GARCIA-VIDAL F J. Mimicking surface plasmons with structured surfaces[J]. Science, 2004, 305(5685): 847 – 848.
- [17] HIBBINS A P, EVANS B R, SAMBLES J Roy. Experimental verification of designer surface plasmons[J]. Science, 2005, 308(5722): 670 – 672.
- [18] MAIER S A, ANDREWS S R, MARTIN-MORENO L, et al. Terahertz surface plasmon-polariton propagation and focusing on periodically corrugated metal wires[J]. Physical Review Letters, 2006, 97(17): 176805(1 – 4).
- [19] LIANG H, RUAN S, ZHANG M. Terahertz surface wave propagation and focusing on conical metal wires[J]. Optics Express, 2008, 16(22): 18241 – 18248.

作者简介



钟任斌 女,出生于江西靖安,电子科技大学讲师,在职博士.研究方向:太赫兹源、太赫兹传输及相关功能器件.

E-mail: rbzhong@uestc.edu.cn



周俊 男,1980年出生于湖南湘潭,博士,电子科技大学讲师.研究方向:太赫兹源、太赫兹传输线和相关数值模拟方法研究.

E-mail: zhoujun123@uestc.edu.cn



刘盛纲 男,出生于安徽合肥,电子科技大学教授,博士生导师.1980年当选为院士,1990年被选为 IEEE Fellow,1991年被选为美国 MIT 电磁科学院院士.是 IRMMW-THz 国际委员成员,国际 K. J. BUTTON 奖国际奖励委员会成员, SICAST 国际委员会主席.研究领域包括:太赫兹科学技术、电子回旋脉塞、微波电子学、微波等离子体电子学、相对论等离子体电子学、自由电子激光与高功率微波等.

E-mail: liusg@uestc.edu.cn