

doi: 10.3788/gzxb20124104.0389

介质填充浅槽周期结构表面上的太赫兹 表面等离子体激元

张羊羊¹, 朱方明¹, 沈林放², 高振²

(1 杭州师范大学 信息科学与工程学院, 杭州 310036)

(2 浙江大学 信息与电子工程学系, 杭州 310027)

摘 要:通过在金属表面刻成浅的垂直凹槽,并在槽内填充不同的介质,对金属表面浅槽周期结构上传播的表面等离子体激元的色散特性与填充介质的关系进行了研究.研究表明通过在周期凹槽内填充介质可以有效降低人工表面等离子体激元的渐近频率,并增强金属表面对电磁场的约束.分析了太赫兹波段金属的吸收损耗对人工表面等离子体激元特性的影响,结果显示基于填充介质的浅槽周期表面结构可以获得长距离传输以及场的亚波长约束.通过对波传输的数值仿真,验证了该表面结构在太赫兹波段良好的导波能力.这种表面结构对太赫兹波段新型集成导波器件的设计具有参考价值.

关键词:表面等离子体激元; 太赫兹波; 波导; 亚波长约束

中图分类号: TN25

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)04-0389-5

0 引言

太赫兹(Terahertz, THz)波作为一种特殊波段的电磁波在成像、通信、传感、环境监测、生物和医学工程等领域有着潜在的重要应用^[1].随着太赫兹波源和检测技术的不断发展,研究并开发用于太赫兹波产生、传播、测量和处理的各种导波系统受到人们越来越多的关注.表面等离子体激元(Surface Plasmon Polaritons, SPPs),是在金属与介质(通常是空气)界面上的一种电子和光子的混合激发态, SPPs的场幅度在界面上有最大值,并在金属与介质内呈指数衰减.因此, SPPs是一种表面波,它的电磁场被约束在金属与介质界面的附近范围内^[2]. SPPs固有的二维空间(即表面)传播特性成为研究和设计亚波长尺寸的光子功能元器件的有效途径,并为光学系统的高度集成提供了可能性^[3-4].将表面等离子体激元的概念推广到太赫兹波段,有助于获得高度约束的太赫兹波信号的导波技术,并将太赫兹波器件的尺寸减小到亚波长量级以实现高度集成.由于金属的等离子体频率一般都在紫外波段,因此金属在太赫兹波段的介电系数的数值(或绝对值)与可见光波段相比非常大,金属表现为近似理想导体

(Perfect Electric Conductor, PEC),使得 SPPs在金属表面的场约束很差^[5-6],从而限制了其在太赫兹波段的应用.为解决这个问题, Pendry提出了一个金属人工表面和人工 SPPs(Spoof SPPs, SSPPs)的全新概念^[7].他们的研究表明,在金属表面挖周期分布的孔洞(孔洞的尺寸和深度都小于波长),不仅可以增强电磁波的渗透作用,还可以实现场的亚波长约束,而且结构表面层的等效等离子体频率仅与表面结构的几何参量有关^[8-9],从而为在金属平面上传播太赫兹波开辟了一条有效途径. SSPPs的存在在微波波段^[10]和太赫兹波段^[11]均获得了实验验证.

进一步的研究表明,在金属表面和金属线上刻一维周期分布的凹槽可以支持太赫兹波段 SSPPs的传播,并且 SSPPs的色散关系可以通过改变金属表面凹槽的周期结构进行任意调控,其场约束、损耗等也仅依赖于周期表面结构的几何参量^[12-15].研究还显示,金属表面周期凹槽结构所支持的人工等离子模式主要受刻槽深度的影响,而刻槽的宽度对 SSPPs的特性的影响很小^[16-17].然而实际应用中,周期凹槽的深度往往会受到金属表面厚度的限制.基于浅的周期凹槽结构,并在槽内填充介质,研究填充介质对 SSPPs的色散和特性的影响,将有助于设计

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 60971062)和浙江省钱江人才计划项目(No. 2011R10085)资助

第一作者:张羊羊(1987-),女,硕士研究生,主要研究方向为人工表面等离子体激元. Email: zhangyang_2022@163.com

导师(通讯作者):朱方明(1969-),女,副教授,主要研究方向为人工表面等离子体激元、集成波导等. Email: fzmzhu@hznu.edu.cn

收稿日期:2011-11-03; **修回日期:**2011-12-28

出基于浅的周期凹槽结构的等离子器件,因此具有十分重要的意义.本文通过在金属表面刻浅的垂直凹槽,并在槽内填充不同的介质,将对 SSPPs 的色散特性与填充介质的关系进行研究,在此基础上还将研究太赫兹波段金属的吸收损耗对 SSPPs 的性能的影响.基于所设计的金属表面周期结构,最后还将对 SSPPs 的导波特性和讨论.本研究工作对太赫兹波段新型亚波长波导器件的设计具有参考价值.

1 SSPPs 的色散关系

在光滑的金属表面刻有一维周期分布的垂直凹槽的表面结构如图 1(a)所示,其中,槽的宽度为 a ,槽的深度为 h ,槽阵列的周期长度为 d .为了研究浅的周期凹槽结构内填充介质的 SSPPs 的色散规律,本文首先对该表面结构的几何参量进行了设置:槽的宽度 $a=0.8d$,槽的深度 $h=0.5d$,其中槽阵列的周期 d 取为 $100\ \mu\text{m}$.值得一提的是,在这些参量下表面结构的刻槽深度的实际物理尺寸只有 $50\ \mu\text{m}$,利用传统的微细加工技术很容易加以实现.然后,在周期槽阵列内分别填入聚乙烯 (Polythene, $\epsilon_r=2.3$) 和硅 (Silicon, $\epsilon_r=11.7$).由于金属在微波和太赫兹波段可以被近似为理想导体,这里为简单起见,将金属材料视为理想导体.采用有限元法对该表面结构所支持的本征模式进行了求解,在金属为 PEC 的近似下,模式的物理量的大小都可以进行归一化,并且可以把周期 d 当作一个单位长度.仿真得到的

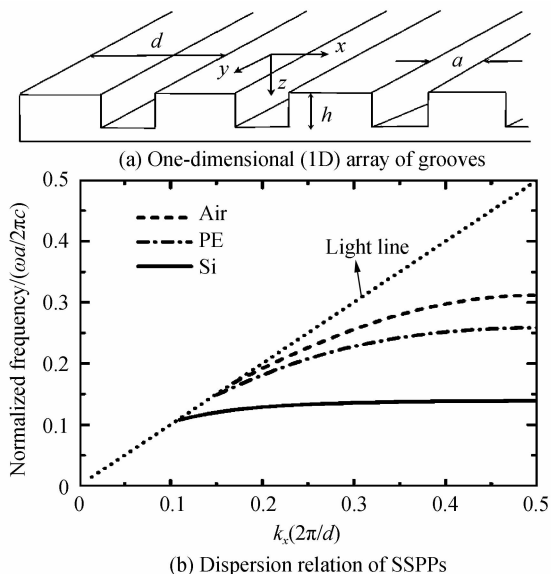


图 1 刻有一维周期垂直凹槽阵列的金属表面结构及金属表面周期刻槽内填入不同介质的 SSPPs 的色散关系
Fig. 1 Schematic of the one-dimensional (1D) array of grooves, and dispersion relation of SSPPs on the surface corrugated with an array of shallow grooves filled with different types of dielectrics

表面结构内填充不同介质所支持的基模的色散关系曲线如图 1(b)所示,其中横坐标为传播常量 $k_x(2\pi/d)$,纵坐标为归一化频率 $\omega d/2\pi c$.由于表面沿 x 方向呈周期性分布,因此 k_x 被限定在第一布里渊区,即 $k_x \leq \pi/d$.为便于比较,在该图中分别给出了周期凹槽内填充三种不同介质的 SSPPs 的色散曲线,即空气 (air, 虚线)、聚乙烯 (PE, 点划线) 和硅 (Si, 实线).

由于为非辐射模式,导波模式的色散带均位于光线(light line)以下,其中光线为电磁波在真空中的色散关系.由图 1(b)可以看出当在金属表面的周期凹槽中填充介电常量大于 1 的介质后,SSPPs 的色散曲线与填充介质为空气 ($\epsilon_r=1$) 时相比偏离光线的程度增加,渐近频率(对应 $k_x=\pi/d$) 变低,这意味着表面结构对场的约束增强.而当填充介质的介电常量 ϵ 越大,渐近频率就越低.当槽内所填充的介质为硅时,SSPPs 的色散曲线最低,从曲线偏离光线的程度可以看出场的约束最好(不过本文也注意到由于色散曲线变得平坦,也带来了工作带宽变窄的问题,需要加以合理的设计).由此可见,在槽内填充介质可以有效地降低 SSPPs 的渐近频率,增强表面结构对场的约束.图 2 分别给出了周期凹槽内填充不同介质时不同频率下一个周期单元内的磁场分布图.

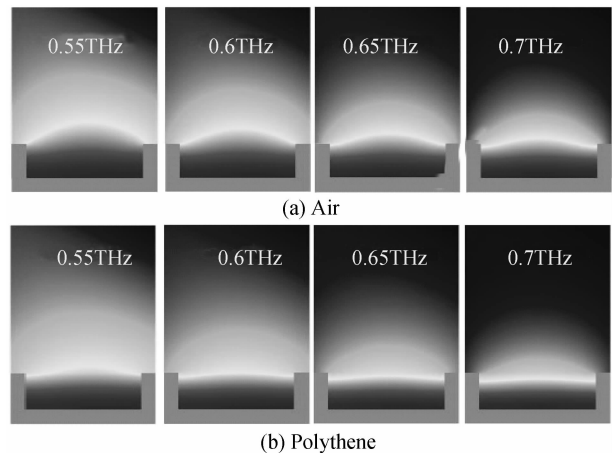


图 2 凹槽内填充介质分别为空气和聚乙烯的不同频率下周期单元内的磁场分布图

Fig. 2 Distribution of the magnetic field in a unit cell for grooves filled with air and polythene respectively for different frequencies

从图 2 中可以很明显的看出,随着频率的增大,SSPPs 的模斑逐渐减小,表明金属表面对场的约束越来越强.对同一频率下的磁场分布图进行比较可以发现,当槽内填充聚乙烯后,与填充的介质为空气时相比,模斑明显减小,表明金属表面对场的约束显著增大.由此可见,填充高介电常量的介质可以有效增强表面结构对 SSPPs 的场的约束.从该图中还可

以看出,在频率 $f=0.7$ THz (接近渐近频率)时,金属表面对场的约束效果最好.

2 SSPPs 的场约束

为了进一步分析周期凹槽内填充介质的金属表面结构对电磁场的约束能力,本文还引入了场衰减长度 δ_D ,即 SSPPs 扩展到空气敷层内的场强减小到位于金属表面处的场强的 $1/e$ 时离开金属表面的距离,其计算公式为 $\delta_D = 1/\sqrt{k_x^2 - \epsilon_0 k_0^2}$,其中 k_0 为真空波数, k_x 为传播常量^[17-18],而归一化衰减长度 δ_D/λ 反映了表面波场的约束程度.本文计算了周期凹槽内填充不同介质下的归一化衰减长度.由图 3 可知,归一化衰减长度密切依赖于频率.为了对填充不同介质的情况进行比较,对各表面结构取不同的周期长度,这样它们有重叠的工作频率区间,尤其在有效约束状态.为此,对填充介质空气、聚乙烯和硅三种情况,分别取周期为 $120.6 \mu\text{m}$ 、 $100 \mu\text{m}$ 和 $53.8 \mu\text{m}$,对三种情形保持结构形状不变,即都相应地取 $a=0.8d$, $h=0.5d$.图 3 给出了填充介质分别为空气、聚乙烯和硅情形下 SSPPs 的归一化衰减长度(δ_D/λ)与频率的关系曲线.

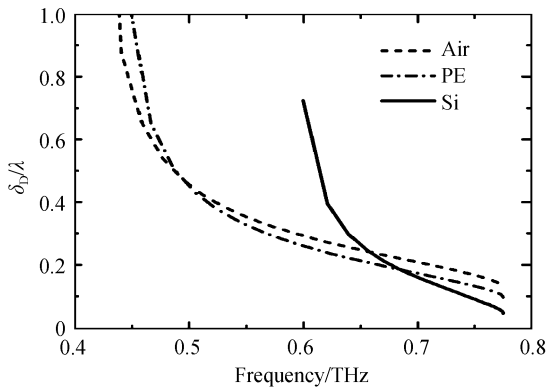


图 3 归一化的衰减长度和频率的关系(仿真计算时金属被视为理想导体)

Fig. 3 Normalized decay length versus frequency for the surface corrugated with shallow grooves filled with air, polythene and silicon respectively(the metal is modeled as PEC in the calculations)

从图 3 可以看出,衰减长度随着频率的增加而减小.这是因为越接近渐近频率,场的约束的效果越好,衰减长度越小.从图 3 还可以看到,在同一频率下,对于周期凹槽内填充不同的介质,随着所填充介质的介电常量的增大,衰减长度呈减小的趋势,表明金属表面对场的约束增强.如当 $f=0.6$ THz 时,填充介质为空气(air)的衰减长度 $\delta_D=0.29\lambda$,而填充介质为聚乙烯的衰减长度 $\delta_D=0.26\lambda$,由此可见槽内填入介质聚乙烯后,衰减长度呈减小的趋势,证明金属表面对场的约束增大.而当 $f=0.72$ THz 时,

填充介质硅的衰减长度最小,为 $\delta_D=0.13\lambda$,表明填充介质为硅的 SSPPs 模式的场约束最好.由此可见,通过在周期凹槽内填充介质,可以减小 SSPPs 的衰减长度,有效增强周期刻槽金属表面结构对场的约束.

以上的数值分析都是在金属是 PEC 的近似下进行的.由于 PEC 对电磁场没有任何损耗,PEC 表面周期结构上传播的 SSPPs 是无损的,即 SSPPs 的传输长度为无穷大.

3 实际金属表面结构上 SSPPs 损耗

以上的研究中,金属都是被视为理想导体.研究表明,在太赫兹波段人工表面等离子激元当受到强约束时实际存在着很大的损耗^[16-17].这里需要指出的是,在太赫兹波段,实际金属表面周期结构上 SSPPs 的色散和场约束,与 PEC 近似下的结果几乎是完全重合^[16-17].所以,前面获得的结果可应用于太赫兹波段的实际金属表面周期结构,除模式损耗外.现在,考虑位于太赫兹波段的实际金属表面结构,并研究由金属的有限电导率所引起的 SSPPs 的吸收损耗.本文所采用的金属设定为铜,其介电常量采用 drude 模型^[19]进行建模.利用微扰法^[20]来计算表面模式的衰减系数: $\text{Im}(k_x) = (P_d/P_0)/(2d)$,其中 P_d 为一个周期单元内损耗的功率, P_0 是时间平均功率流.于是模式的传播长度为 $L = 1/[2\text{Im}(k_x)] = (P_0/P_d)d$.图 4 给出了归一化的传输长度(L/λ)随频率变化的关系曲线,三种填充不同介质的表面结构的几何参量与图 3 中相同.

从图 4 可以看出,传播长度随着频率的增加而减小.这是由于当工作频率接近渐近频率时,场的约束增强,金属的吸收损耗增大,因而传播长度减小.

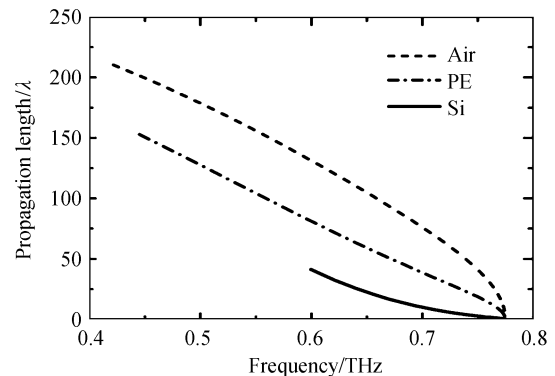


图 4 归一化的传播长度和频率的关系(仿真计算时金属被视为铜)

Fig. 4 Normalized propagation length versus frequency for the surface corrugated with shallow grooves filled with air, polythene and silicon respectively(the metal is considered to be Copper (Cu) in the calculations)

比较同一频率下凹槽内填充不同介质时 SSPPs 的传播长度,可以发现传播长度随着介电常量的增大而减小,这同样也是由于场约束增强的缘故.从图中可以看到,当频率 $f=0.55$ THz 时,填充介质为聚乙烯的 SSPPs 的传播长度 $L=100\lambda$.而当 $f=0.65$ THz 时,填充介质为聚乙烯的 SSPPs 的传播长度 $L=70\lambda$,填充介质为硅的传播长度 $L=20\lambda$.这表明周期凹槽内填充介质不但可以获得 SSPPs 的亚波长约束,而且还可以获得长距离传播.

4 SSPPs 导波特性的数值模拟

本文剩余部分以填充介质聚乙烯为例,对填充介质的一维周期刻槽表面结构的导波特性的分析.该表面结构所支持的 SSPPs 的色散关系如图 1(b)中所示.对于设定的 $a=0.8d$, $h=0.5d$, $d=100\mu\text{m}$ 的几何参量,SSPPs 的归一化的渐近频率 $\omega d/2\pi c=0.26$,从而得到所对应的渐近频率为 0.77 THz.图 5 给出了填充介质为聚乙烯的 SSPPs 在四种不同频率下的电场幅度值的分布.在仿真计算时金属被近似为理想导体.

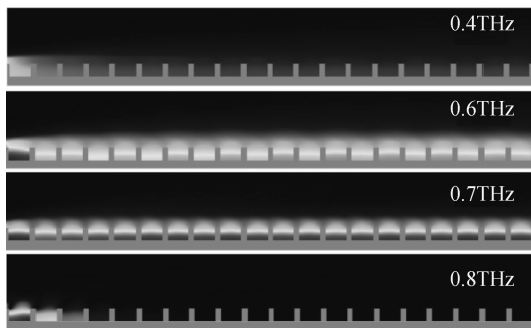


图 5 填充介质为聚乙烯的 SSPPs 的电场幅度值在四种不同频率时的分布图

Fig. 5 Spatial variation of the E field amplitude of the SSPPs on the surface corrugated with the grooves filled with PE for four different frequencies

从图 5 可以看到,当 $f=0.4$ THz 时,由于其工作频率低于金属表面结构上的 SSPPs 的截止频率(0.45 THz),SSPPs 无法被激发,此时该表面结构不导波.当 $f=0.6$ THz 和 $f=0.7$ THz 时,均位于工作频带内,太赫兹波可以沿着表面结构进行传播.且工作频率越高,场的约束越强,特别是当 $f=0.7$ THz(接近渐近频率 0.77 THz)时,电场被高度约束在金属表面.而当 $f=0.8$ THz 时,该表面结构也不导波,这是由于此时工作频率高于表面结构上的 SSPPs 的渐近频率,SSPPs 同样无法被激发.

5 结论

本文对填充介质的金属表面浅槽周期结构的 SPPs 的传播特性进行了研究,结果发现在周期凹槽

内填充介质对降低 SPPs 的渐近频率有着显著作用.对于浅的周期刻槽,通过在槽内填充介质仍可以获得高度的场约束.本文还考虑了由具有有限电导率的实际金属的吸收损耗所带来的 SSPPs 的衰减行为,研究显示基于填充介质的金属表面浅槽周期结构,在一定的频率范围 SSPPs 既可以获得亚波长约束同时又可以实现长距离传播.通过在周期凹槽内填充聚乙烯(作为例子),还在太赫兹波段验证了表面结构良好的导波能力.通过进一步改进设计(如在横向平面作截断),该表面结构可望被应用于具有亚波长约束的新型太赫兹导波器件的设计.

参考文献

- [1] TONOUCI M. Cutting-edge terahertz technology [J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**(2): 97-105.
- [2] RAETHER H. Surface plasmons [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1988.
- [3] BARNES W L, DEREUX A, EBBESEN T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 824-830.
- [4] ZAYATS A V, SMOLYANINOV I I, MARADUDIN A A. Nano-optics of surface plasmon polaritons [J]. *Physics Reports*, 2005, **408**(3-4): 131-134.
- [5] OHARA J F, AVERITT R D, TAYLOR A J. Terahertz surface plasmon polariton coupling on metallic gratings[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(25): 6397-6402.
- [6] SAXLER J, RIVAS J G, JANKE C, et al. Time-domain measurements of surface plasmon polaritons in the terahertz frequency range [J]. *Physical Review B*, 2004, **69** (15): 155427.
- [7] PENDRY J B, MARTIN-MORENO L, GARCIA-VIDAL F J. Mimicking surface plasmons with structured surface [J]. *Science*, 2004, **305**(5685): 847-848.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] HIBBINS A P, EVANS B R, SAMBLES J R. Experimental verification of designer surface plasmons [J]. *Science*, 2005, **308**(5722): 670-672.
- [11] WILLIAMS C R, ANDREWS S R, MAIER S A, et al. Highly confined guiding of terahertz surface plasmon polaritons on structured metal surfaces [J]. *Nature Photonics*, 2008, **2**(3): 175-179.
- [12] FU Z, GAN Q Q, DING Y J, et al. From waveguiding to spatial localization of THz waves within a plasmonic metallic grating [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2008, **14**(2): 486-490.
- [13] WANG B W, LIU L, HE S L. Propagation loss of terahertz surface plasmon polaritons on a periodically structured Ag surface [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, **104**(10): 103531.
- [14] FERNANDEZ-DOMINGUEZ A I, MORENO E, MARTIN-MORENO L, et al. Guiding terahertz waves along subwavelength channels [J]. *Physical Review B*, 2009, **79** (23): 233104.

- [15] ZHANG X F, SHEN L F, WU J J, *et al.* Backward guiding of terahertz radiation in periodic dielectric waveguides[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2010, **24**(4): 557-564.
- [16] SHEN L F, CHEN X D, ZHONG Y, *et al.* Effect of absorption on terahertz surface plasmon polaritons propagating along periodically corrugated metal wires[J]. *Physical Review B*, 2008, **77**(7): 075408.
- [17] SHEN L F, CHEN X D, YANG T J. Terahertz surface plasmon polaritons on periodically corrugated metal surfaces [J]. *Optics Express*, 2008, **16**(5): 3326-3333.
- [18] KONG F M, LI K, WU B I, *et al.* Propagation properties of the SPP modes in nanoscale narrow metallic gap, channel, and hole geometries [J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2007, **76**: 449-466.
- [19] ORDAL M A, LONG L L, BELL R J, *et al.* Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and far infrared [J]. *Applied Optics*, 1983, **22**(7): 1099-1119.
- [20] KONG J A. *Electromagnetic wave theory*[M]. Cambridge, Massachusetts: EMW Publishing, 2005.

Terahertz Surface Plasmon Polaritons on Metal Surfaces Corrugated by Shallowly Dielectric-filled Grooves

ZHANG Yang-yang¹, ZHU Fang-ming¹, SHEN Lin-fang², GAO Zhen²

(1 *School of Information Science and Engineering, Hangzhou Normal University, Hangzhou 310036, China*)

(2 *Department of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

Abstract: Surface plasmon polaritons (SPPs) propagating along a metal surface corrugated with an array of shallow grooves filled with dielectric are studied analytically. It is shown that the asymptotic frequency of SPPs can be greatly decreased by stuffing the grooves with dielectric, and thus the fields exhibit much better confinement. In the THz frequency range, the influence of the absorption in real metal on the performance of spoof SPPs is also examined. The numerical calculations show that long propagation length and subwavelength field confinement are simultaneously available for spoof SPPs on the real surface corrugated with grooves stuffed by the dielectrics. The good guiding ability of the structured surface at THz frequencies is further verified by numerical simulations of wave transmission. The proposed structure may lead to a new design of devices for routing terahertz radiation in highly integrated circuits.

Key words: Surface Plasmon Polaritons (SPPs); Terahertz radiation; Waveguide; Subwavelength field confinement