

doi: 10.3788/gzxb20164502.0224001

# 太赫兹波段表面等离子体波传播距离的调控

王文伯, 郭宝山

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300073)

**摘 要:**设计刻槽深度渐变的金属光栅, 利用截止频率控制太赫兹表面波的传播距离. 金属光栅刻槽深度在  $60\ \mu\text{m}$  时的截止频率为  $0.6\ \text{THz}$ ,  $120\ \mu\text{m}$  时的截止频率为  $1.1\ \text{THz}$ . 同时根据半导体材料 InSb 在太赫兹波段的色散特性、载流子浓度和迁移率的经验公式、光栅结构的等效介质理论设计了温控的半导体光栅. 在  $270\sim 300\ \text{K}$  温度范围内, 半导体光栅中表面波的传播距离和温度成正比,  $300\ \text{K}$  时传播距离为  $270\ \text{K}$  时的  $2\sim 3$  倍.

**关键词:**太赫兹; 表面等离子体激元; 时域有限差分法; 金属波导光栅; 半导体波导光栅

中图分类号: TN252

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)02-0224001-5

## Control of the Propagation Distance of Surface Plasmons Wave in Terahertz Spectrum

WANG Wen-bo, GUO Bao-shan

(School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300073, China)

**Abstract:** With the cutoff frequency of the surface wave in terahertz, the gradient depth of the metal grating was designed, and find that the cutoff frequency is  $0.6\ \text{THz}$  when the depth of the grating is  $60\ \mu\text{m}$  and  $1.1\ \text{THz}$  is nearly corresponding to the  $120\ \mu\text{m}$ . At the same time, the temperature controller semiconductor grating was designed. According to the dispersion characteristic of the semiconductor material (InSb) in terahertz region, the experience formula of the carrier concentration and mobility; equivalent medium theory of grating structure, it is shown that the propagation distance is proportion to the temperature in  $270\sim 300\ \text{K}$ , which the propagation distance in  $300\ \text{K}$  is  $2\sim 3$  times than the  $270\ \text{K}$ .

**Key words:** Terahertz; Surface plasmon polaritons; Finite-different time-domain; Metal gratings; Semiconductor grating

**OCIS Codes:** 240.6680; 040.2235; 050.2770

## 0 引言

太赫兹波是指频率介于  $0.1\sim 10\ \text{THz}$  之间的电磁波, 可应用于通信、成像、传感、环境监测、生物和医学工程等诸多领域, 有重要的研究价值<sup>[1-3]</sup>. 并且随着太赫兹技术的不断发展, 用于太赫兹波传播的波导系统也受到越来越多的关注, 而基于表面等离子体激元原理的波导光栅就是其中之一. 传统衍射理论表明, 透光率与小孔尺寸的大小成正比, 但当光束通过具有亚波长尺寸小孔的金属薄膜时, 透光率并不符合传统理论计算, 反而要大于小孔占金属薄膜的面积比<sup>[4]</sup>. 这种异

常透射的现象是由表面等离子体激元<sup>[5-6]</sup>引起, 它是光子与金属表面的自由电子相互作用而引起的一种电磁波模式, 局限于金属与介质的交界面附近, 沿着表面传播, 在垂直于介质表面的方向, 呈指数衰减, 是一种倏逝表面波, 满足麦克斯韦方程. 这种沿着表面传播的固有特性成为研究和设计亚波长尺寸光子器件的有效手段, 为光学系统的高度集成提供了可能. 近年来, 利用具有周期性结构的波导光栅实现对太赫兹波的调控已做出了大量的研究. 例如通过设计具有凹槽结构的金属腔, 可以对太赫兹波的透过频率进行调制<sup>[7]</sup>; 当光束非垂直入射到金属孔表面时, 可以得到两个不同频率

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No. 020-413332) 资助

第一作者: 王文伯 (1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为表面等离子体. Email: 1041591321@qq.com

导师 (通讯作者): 郭宝山 (1981-), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为表面等离子体. Email: gbs@tju.edu.cn

收稿日期: 2015-09-16; 录用日期: 2015-11-26

<http://www.photon.ac.cn>

的共振峰,并通过入射角度控制低频共振峰的共振频率<sup>[8]</sup>.通过在金属光栅刻槽中填充不同介质,可以有效增强对表面波的约束效果<sup>[9]</sup>.利用刻槽深度渐变的金属光栅可以对表面波进行陷波和减速,从而实现慢光效应<sup>[10]</sup>.以半导体为基底的波导光栅,可以对透射光束进行准直,并通过温度的变化改变光束的出射方向<sup>[11]</sup>.

基于前人对太赫兹波的调制研究工作,本文利用金属光栅和半导体光栅对太赫兹波段表面等离子体波的传播距离进行调制.

## 1 金属光栅

### 1.1 表面波的色散

对于金属光栅,其表面只存在 TM 方向的电磁波,并且,金属在太赫兹波段可以看作完美的导体,对表面波的约束只依赖于金属光栅的几何机构,从而得到近似的色散关系式<sup>[10]</sup>,即

$$k = \frac{\omega}{c} \sqrt{1 + \frac{\omega^2}{p^2} \tan^2 \left( \frac{\omega d}{c} \right)} \quad (1)$$

式中, $k$ 是波矢, $c$ 是真空中光速, $p$ 是光栅周期, $d$ 是刻槽深度, $\omega$ 是刻槽宽度, $\omega = 2\pi f$ , $f$ 是表面波频率.不同刻槽深度的一维光栅的色散关系式可以通过式(1)得到,计算结果见图1,其中曲线( $d = 60 \mu\text{m}$ ,  $120 \mu\text{m}$ )代表不同刻槽深度对应的色散曲线,直线代表真空中的情况,对应  $d = 0 \mu\text{m}$ .

由图1可以看出,对于  $d$  不为 0 的色散曲线,随着波矢的增加,频率逐渐趋近于一个极限值,即截止频率,该频率下对应的波矢为无穷大,即传播速度为 0.当频率不是很大时,不同  $d$  值的色散曲线基本重合,但是随着频率的增加,曲线之间开始出现分化.对于  $d = 60 \mu\text{m}$  的光栅,色散曲线的截止频率接近 1.1 THz,这就意味着,大于该频率的表面波在这一点都会被终止,而  $d = 120 \mu\text{m}$  的光栅,其截止频率减小到 0.6 THz.当  $d$  值在  $60 \mu\text{m}$  至  $120 \mu\text{m}$  的范围变化时,色散曲线介于

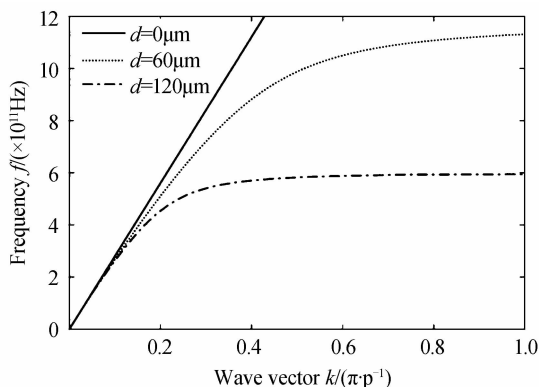


图1 不同光栅刻槽深度下的色散曲线

Fig. 1 Dispersion curves calculated for different grating depth



图2 光栅示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the grating

它们之间,不同频率的入射波被截止在与其对应的刻槽深度处,由此可通过变化的刻槽深度控制表面波的传播距离.光栅模型见图2,周期  $p$  和刻槽宽度  $w$  分别设为  $50 \mu\text{m}$  和  $25 \mu\text{m}$ ,等离子体波在光栅上表面传播.

### 1.2 FDTD 仿真结果

为了更直观地展示表面波的传播,本文采用 RSoft CAD 进行仿真,该软件通过时域有限差分法(Finite Difference Time Domain, FDTD)模拟表面波的分布情况,该方法是一种由麦克斯韦方程组对电磁场进行计算机模拟的数值分析方法.

图3为光栅 2D FDTD 的仿真结果.金属光栅总长度为  $5000 \mu\text{m}$ ,周期为  $50 \mu\text{m}$ ,起始刻槽深度  $60 \mu\text{m}$ ,终止刻槽深度  $120 \mu\text{m}$ ,中间部分呈线性变化,不断增加.仿真区域被完全匹配层(Perfectly Matched Layer, PML)包围,大小为  $5000 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$ ,格子单位  $\Delta x = 2 \mu\text{m}$ ,  $\Delta z = 2 \mu\text{m}$ ,仿真时间  $t_s = 23000 t_p$ ,  $t_p = 5000 \mu\text{m}/c$ .光栅中的 2D 电磁场分布如图3,四个不同频率的表面波被终止在四个不同的位置.频率为 0.6 THz 时,传播距离为  $4200 \mu\text{m}$ ,频率为 0.75 THz 时,传播距离为  $2200 \mu\text{m}$ ,频率为 0.8 THz 时,传播距离约为  $1700 \mu\text{m}$ ,而当频率为 1 THz 时,几乎不能传播.可见,传播距离

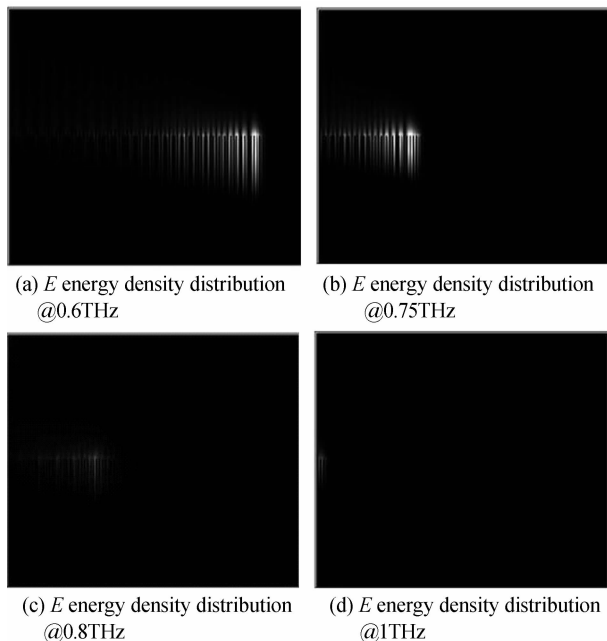


图3 电场能量密度分布随表面波频率的变化

Fig. 3 The change of electric filed energy density distribution with the frequency

受到刻槽深度的调控,可以通过设计光栅刻槽深度,使表面波停止于某一点.

## 2 半导体光栅

### 2.1 理论分析

以金属为基底的光栅,可以有效地控制表面波的传播.但是,金属结构的介电常量与几何形状难以改变,因此要实现传播距离的主动调控是很难的.另一方面,对于一些半导体材料来说,其在太赫兹波段内的介电常量与金属材料在可见光波段的介电常量相近<sup>[12]</sup>,不同的是,半导体材料的介电常量会受到外界环境的影响.本节研究温度变化对表面波传播距离的影响.

表面等离子体波的波矢为  $k = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_r \epsilon_1}{\epsilon_r + \epsilon_1}}$ . 其中,  $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$  为入射波波矢,  $\epsilon_1$  为空气的介电常量,近似为 1,  $\epsilon_r$  为介质的介电常量. 以本征碲化铟 (InSb) 材料为例,其在太赫兹波段内的介电性质与金属在可见光中的介电性质相似,近似满足 Drude 模型<sup>[13]</sup>,即

$$\epsilon_r(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \tau^{-2}} + \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega^2 + \tau^{-2})} \quad (2)$$

式中,  $\epsilon_\infty$  是高频介电常量,  $\omega_p = \sqrt{ne^2/\epsilon_0 m^*}$  是等离子体频率,  $\tau$  是碰撞弛豫时间,可通过  $\mu = \tau e/m^*$  得到,  $m^*$  为载流子的有效质量,而载流子浓度和迁移率随温度变化的经验公式<sup>[11]</sup> 分别为

$$n = 6.0 \times 10^{14} T^{3/2} e^{-0.29eV/2kT} \text{ (cm}^{-3}\text{)} \quad (3)$$

$$\mu = 77000 \left(\frac{T}{300}\right)^{-1.66} \text{ (cm}^2/\text{V} \cdot \text{s)} \quad (4)$$

另外,电子的有效质量为  $m^* = 0.014 m_0$ ,  $\epsilon_\infty$  为 15.7.

由此可见,介质的介电常量是一个复数,  $\epsilon = \epsilon_r + i\epsilon_i$ , 所以,波矢  $k$  也是一个复数,设  $k = k_r + ik_i$ , 可得,

$$k_r = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_r \epsilon_1}{\epsilon_r + \epsilon_1}}, k_i = k_0 \frac{\epsilon_i}{2\epsilon_r} \sqrt{\frac{\epsilon_r \epsilon_1}{\epsilon_r + \epsilon_1}} \quad [14]$$

. 表面波的传播距离由波矢的虚部  $k_i$  决定,定义,当光强减弱到初始值的  $1/e$  时,等离子体表面波通过的距离为表面波的传播距离  $L$ , 则  $L = \frac{1}{2k_i} = \lambda_0 \frac{\epsilon_r^2}{2\pi |\epsilon_i|} \sqrt{\frac{\epsilon_r + \epsilon_1}{\epsilon_r \epsilon_1}}$ , 由于在太

赫兹波段,  $|\epsilon_r| \gg |\epsilon_i| \approx 1$ , 所以有  $L \approx \lambda_0 \frac{\epsilon_r^2}{2\pi |\epsilon_i|} \propto$

$\frac{\epsilon_r^2}{|\epsilon_i|}$ . 通过与实际测得的数据相比较,发现 Drude 模型在 270K 到 300K 温度范围内符合较好,因此选取这段温度区间进行研究. 介电常量的实部和虚部随温度的变化可通过式(2)得到,进而可以求得温度变化对传播距离的影响. 从图 4 可以看出,  $\frac{\epsilon_r^2}{|\epsilon_i|}$  随着温度的升高而增加,即传播距离  $L$  随着温度的升高而增加.

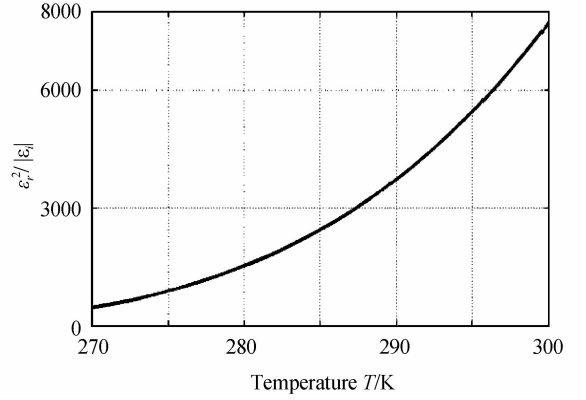
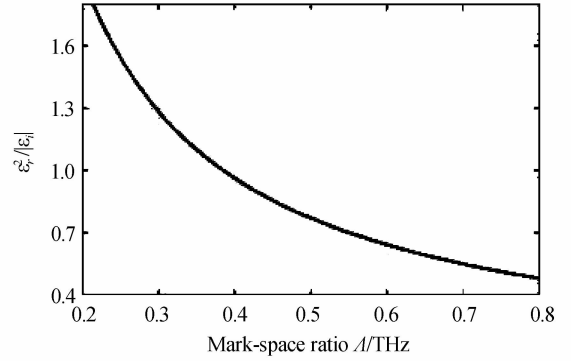


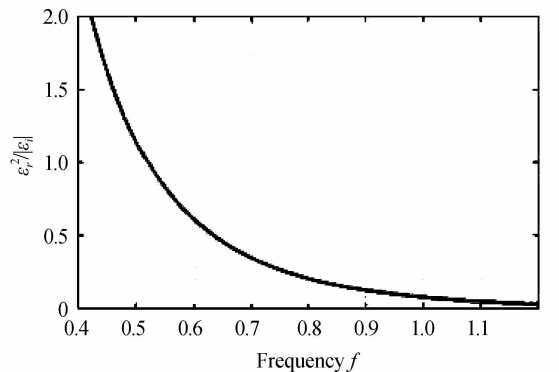
图 4 变量  $\frac{\epsilon_r^2}{|\epsilon_i|}$  随温度的变化曲线

Fig. 4 Curves of the variable  $\frac{\epsilon_r^2}{|\epsilon_i|}$  changing with the temperature

另外光栅占比  $\Lambda$ , 表面波频率  $f$ , 刻槽深度  $d$  等参量都会对表面波的传播距离产生影响. 已知表面波为 TM 偏振光,而对于 TM 偏振光,光栅结构的等效折射率<sup>[15]</sup> 近似为  $n_{TM} = \left[\frac{1-\Lambda}{n_1^2} + \frac{\Lambda}{n_2^2}\right]^{-1/2}$ ,  $n_2$  为光栅材料本身的折射率,  $n_1$  为光栅表面上部区域折射率,在真空



(a) Curves of the  $\frac{\epsilon_r^2}{|\epsilon_i|}$  changing with the  $\Lambda$



(b) Curves of the  $\frac{\epsilon_r^2}{|\epsilon_i|}$  changing with the  $f$

图 5  $\frac{\epsilon_r^2}{|\epsilon_i|}$  的变化曲线

Fig. 5 Variation curves of the  $\frac{\epsilon_r^2}{|\epsilon_i|}$

中,  $n_1 = 1$ . 由光栅等效折射率可推出其相应的  $\frac{\epsilon_r^2}{|\epsilon_i|}$  与占空比  $\Lambda$  的关系, 当表面波频率  $f$  为 1 THz, 温度  $T = 300$  K 时, 计算可得  $\frac{\epsilon_r^2}{|\epsilon_i|} \propto \frac{1}{\Lambda}$ , 如图 5(a), 即传播距离随着占空比的增大而减小. 同理, 根据 Drude 模型, 表面波频率  $f$  会影响光栅材料本身折射率  $n_2$ , 进而也会对光栅等效折射率产生影响. 当占空比  $\Lambda$  为 0.5, 温度  $T = 300$  K 时, 经计算可得  $\frac{\epsilon_r^2}{|\epsilon_i|} \propto \frac{1}{f}$ , 如图 5(b), 即表面波频率越大, 传播距离越小, 这与金属光栅的结果相同.

对于刻槽深度, 当  $d$  值过大和过小时都不利于表面波的传播. 当  $d$  值过小时, 光栅结构的作用就会减弱, 此时的光栅表面趋近于一个平板, 无法激发表面等离子体波, 传播距离不再受温度的调控, 而是趋于同一个定值. 而当  $d$  值过大时, 会增加表面波与光栅的作用, 进而增加损耗, 传播距离也会减小.

## 2.2 FDTD 仿真结果

金属光栅是利用刻槽深度的变化来控制表面波的传播. 本节中为了与其形成对比, 突出温度变化对表面波传播距离的调控, 选择单一刻槽深度的半导体光栅.

半导体光栅总长度为  $5\,000\ \mu\text{m}$ , 周期为  $50\ \mu\text{m}$ , 刻槽深度为  $30\ \mu\text{m}$ , 表面波频率为  $0.75\ \text{THz}$ , 温度在  $270\ \text{K}$  到  $300\ \text{K}$  之间变化. 仿真区域被完全匹配层包围, 大小为  $5\,000\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$ , 格子单位为  $\Delta x = 2\ \mu\text{m}$ ,  $\Delta z = 2\ \mu\text{m}$ , 仿真时间  $t_s = 23\,000 t_p$ ,  $t_p = 5\,000\ \mu\text{m}/c$ . 由图 6 可以看出, 随着温度的升高, 表面波的传播距离不断增大, 与之前理论结果相符.

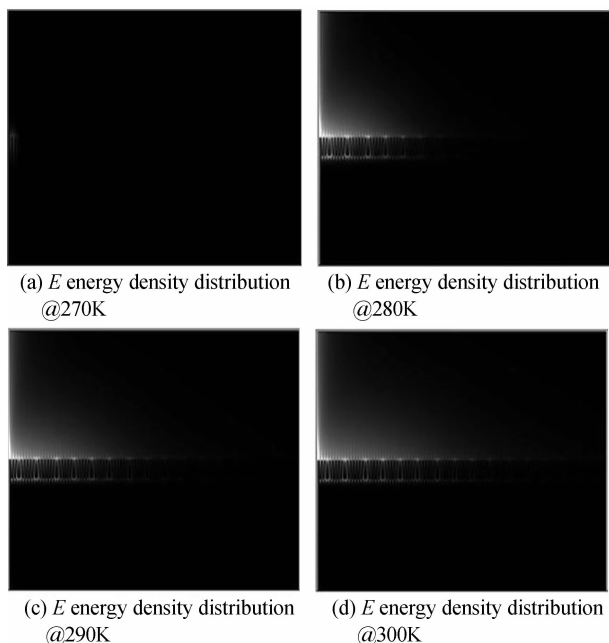
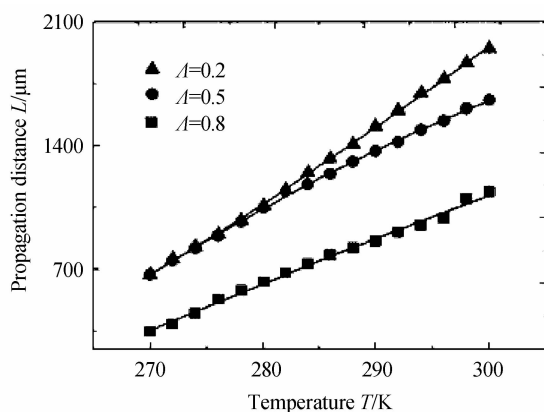
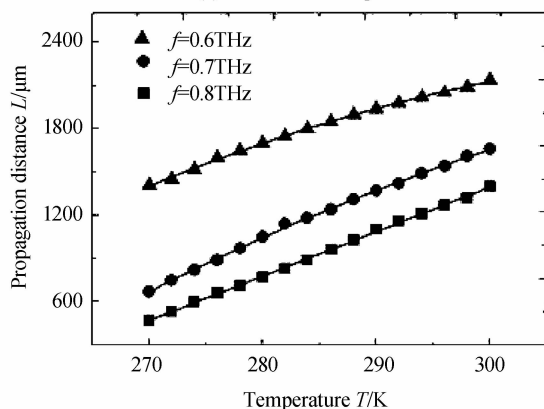


图 6 电场能量密度分布随温度的变化

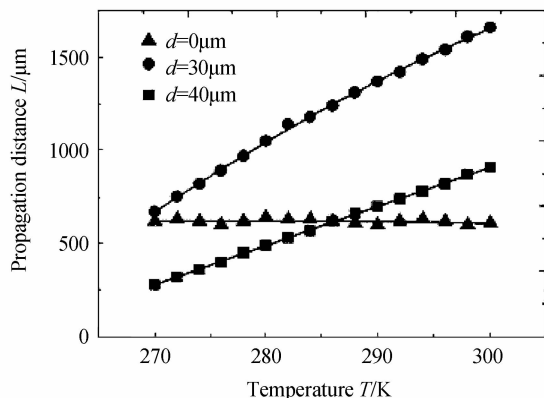
Fig. 6 The change of electric filed energy density distribution with temperature



(a) Different mark-space ratio



(b) Different frequency



(c) Different depth of grating

图 7 传播距离的变化

Fig. 7 Change of the propagation distance

## 3 结论

利用截止频率控制刻槽深度渐变的金属光栅中太赫兹表面波的传播距离. 金属光栅刻槽深度在  $60\ \mu\text{m}$  时的截止频率为  $0.6\ \text{THz}$ ,  $120\ \mu\text{m}$  时的截止频率为  $1.1\ \text{THz}$ . 通过温度变化控制半导体波导光栅离子体表面波的传播距离, 使得对表面波的主动调控成为可能. 在  $270 \sim 300\ \text{K}$  温度范围内, 表面波传播距离和温度成正比,  $300\ \text{K}$  时的传播距离为  $270\ \text{K}$  的时的  $2 \sim 3$  倍.

## 参考文献

- [1] GUO Lan-tao, MU Kai-jun, DENG Chao, *et al.* Terahertz spectroscopy and imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(1): 51-56.  
郭兰涛, 牧凯军, 邓朝, 等. 太赫兹波谱与成像技术[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(1): 51-56.
- [2] HOU Hai-yan, FU Zhi-peng, LI Guang-da, *et al.* The application of THz technology in the area of biomedical engineering[J]. *Progress in Biomedical Engineering*, 2015, **36**(2): 99-103.  
侯海燕, 符志鹏, 李光大, 等. 太赫兹技术及其在生物医学工程中的应用[J]. 生物医学工程学进展, 2015, **36**(2): 99-103.
- [3] YAO Jian-quan, CHI Nan, YANG Peng-fei, *et al.* Study and outlook of terahertz communication technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, **36**(9): 2213-2233.  
姚建铨, 迟楠, 杨鹏飞, 等. 太赫兹通信技术的研究与展望[J]. 中国激光, 2009, **36**(9): 2213-2233.
- [4] EBBESEN T W, LEZEC H J, GHAEMI H F, *et al.* Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays[J]. *Nature*, 1998, **391**(11): 667-669.
- [5] CHEN Yong-yi, TONG Cun-zhu, QIN Li, *et al.* Progress in surface plasmon polariton nano-laser technologies and applications[J]. *Chinese Optics*, 2012, **5**(5): 453-463.  
陈泳屹, 佟存柱, 秦莉, 等. 表面等离子体激元纳米激光器技术及应用研究进展[J]. 中国光学, 2012, **5**(5): 453-463.
- [6] LEI Jian-guo, LIU Tian-hang, LIN Jing-quan, New applications of surface plasmon polaritons [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, **3**(5): 432-439.  
雷建国, 刘天航, 林景全, 等. 表面等离子体激元的若干新应用[J]. 中国光学与应用光学, 2010, **3**(5): 432-439.
- [7] CHEN Lin, Gao Chun-mei, ZANG Xiao-fei, *et al.* Observation of electromagnetically induced transparency-like transmission in terahertz asymmetric waveguide-cavities systems[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(9): 1379-1381.
- [8] CHEN Lin, ZHU Yi-ming, ZANG Xiao-fei, *et al.* Mode splitting transmission effect of surface wave excitation through a metal hole array[J]. *Light: Science & Applications*, 2013, **2**: 60-64.
- [9] ZHANG Yang-yang, ZHU Fang-ming, SHEN Lin-fang, *et al.* Terahertz surface plasmon polaritons on metal surface corrugated by shallowly dielectric-filled grooves [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(4): 389-393.  
张羊羊, 朱方明, 沈林放等. 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[J]. 光子学报, 2012, **41**(4): 389-393
- [10] GUO Bao-shan, SHI Wei. Real propagation speed of the ultraslow plasmonic THz waveguide[J]. *Applied Physics B*, 2013, **114**(4): 503-507.
- [11] HU Hai-feng, CAI Li-kang, BAI Wen-li, *et al.* Simulation research on the control of terahertz beam direction by surface plasmon[J]. *Acta Physics Sinica*, 2011, **60**(1): 014220.  
胡海峰, 蔡利康, 白文理, 等. 基于表面等离子体的太赫兹光束方向调控的模拟研究[J]. 物理学报, 2011, **60**(1): 014220.
- [12] GOMEZ R J, BOLIVAR P H, KURZ H. Thermal switching of the enhanced transmission of terahertz radiation through subwavelength apertures[J]. *Optics Letters*, 2004, **29**(14): 1680-1682.
- [13] GOMEZ R J, SCHOTSCH C, BOLIVAR P H, *et al.* Enhanced transmission of THz radiation through subwavelength holes [J]. *Physical Review B*, 2003, **68**(20): 201306.
- [14] LI Ji-jun, WU Yao-de, SONG Ming-yu. Research of basic characteristic of surface plasmons[J]. *Journal of Yangtze University*, 2007, **4**(4): 46-49.  
李继军, 吴耀德, 宋明玉. 表面等离子体激元基本特征研究[J]. 长江大学学报, 2007, **4**(4): 46-49.
- [15] MA Wei-tao, ZHOU Jun, HUANG Shui-ping, *et al.* Characteristic of subwavelength dielectric grating with metal layer and its sensing applications[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(9): 0905008.  
马伟涛, 周骏, 黄水平, 等. 金属膜衬底上亚波长介质光栅结构的特性及传感应用[J]. 中国激光, 2011, **38**(9): 0905008.