

# 太赫兹波段一维金属线栅的偏振特性研究

刘立明 赵国忠 张杲辉 魏波 张盛博

(首都师范大学物理系太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京 100048)

**摘要** 基于时域有限差分法(FDTD)对一维金属线栅结构在 0.2~2.6 THz 波段的偏振特性进行了数值分析,研究了其结构参数如金属占空比、狭缝宽度以及线栅周期对相互垂直的两种偏振模式太赫兹波透射系数的影响。利用光刻和金属膜制备工艺,在 1 mm 厚的高阻硅衬底上淀积了 200 nm 厚的金膜,制成了一系列一维金属线栅结构。利用太赫兹时域光谱系统,实验测量了这些线栅结构的太赫兹透射特性,实验结果与模拟结果规律一致。结果表明:适当设计金属线栅周期,同时满足一定的金属占空比要求,其整体偏振和透射性能能够得到优化。金属线栅结构参数与其太赫兹偏振性能之间的关系为制造太赫兹偏振器提供了参考。

**关键词** 光栅;太赫兹;金属线栅;光刻;偏振

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0311001

## Polarization Characteristics of One-Dimensional Metallic Wire-Grating Polarizer in Terahertz Frequency Range

Liu Liming Zhao Guozhong Zhang Gaohui Wei Bo Zhang Shengbo

(Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

**Abstract** Based on the finite differential time domain (FDTD) method, numerical simulation of polarization characteristics of one-dimensional metallic wire-grating polarizer in the frequency range of 0.2~2.6 THz is carried out. The effects of structural parameters of metallic wire-grid polarizer such as metal duty cycle, the width of slit and the periodicity of wire-grating on the terahertz transmission at two kinds of polarization modes are investigated. With the technique of photolithography and the metal film deposition, a 200-nm-thick gold film is fabricated on a 1-mm-thick high-resistivity silicon substrate. A series of one-dimensional wire-gratings are formed on the silicon substrate. The transmission spectra of the wire-grating polarizer are measured by the terahertz time domain spectroscopy. The numerical simulations based on FDTD method show a good agreement with experimental results. The results show that it is possible to optimize the performance of one-dimensional wire-grating polarizer through reasonable design of structural parameters. This work provides a good reference for the manufacture of terahertz polarizer.

**Key words** gratings; terahertz; metallic wire-grating; lithography; polarization

**OCIS codes** 040.2235; 350.2770; 110.5220

## 1 引言

飞秒激光技术的发展为太赫兹脉冲的产生提供了稳定可靠的激发光源,使得太赫兹辐射的产生和应用得到了快速的发展。随着太赫兹光谱技术<sup>[1~4]</sup>和太赫兹成像技术<sup>[5~7]</sup>的发展,对太赫兹波段光学器件<sup>[8~10]</sup>的需求越来越迫切。太赫兹波段的偏振

器是应用最为广泛和重要的太赫兹光学器件之一。尽管微波波段无支撑金属线栅<sup>[11]</sup>的加工、制备工艺已经十分成熟,但对太赫兹波段来说,其消光比偏低,器件性能还不能满足应用需求,而且无基底支撑样品较易变形,因此近年来在太赫兹波段的高性能亚波长金属线栅偏振器主要是在对太赫兹高透射的

**收稿日期**: 2011-11-01; **收到修改稿日期**: 2011-12-22

**基金项目**: 国家自然科学基金(50971094)和北京市自然科学基金(1092007)资助课题。

**作者简介**: 刘立明(1987—),女,硕士研究生,主要从事太赫兹光谱方面的研究。E-mail: liuliming87@163.com

**导师简介**: 赵国忠(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事太赫兹光谱与成像、光电功能材料和光电子学等方面的研究。E-mail: guozhong-zhao@mail.cnu.edu.cn(通信联系人)

衬底(石英、高阻硅、聚乙烯等)上利用光刻工艺制作而成的。Yamada 等<sup>[12]</sup>在硅衬底上制成了铝的一维线栅结构,研究了布儒斯特角对线栅偏振特性的影响。随后,Ma 等<sup>[13]</sup>又在高密度聚乙烯衬底上制成了一维铝线栅,研究了其在 1~10 THz 频率范围内的偏振特性。最近,Chen 等<sup>[14]</sup>在高阻硅衬底上制成了金一维线栅结构,研究了其在 0.1~3.5 THz 范围内太赫兹波的透射特性。虽然有些样品取得了较为理想的偏振效果,然而对于表征一维线栅的结构参数如金属占空比、狭缝宽度以及线栅周期是如何影响其偏振性能的问题,没有人给出明确的结论。而目前国内研究过的金属线栅样品<sup>[15~19]</sup>其加工工艺都比较粗糙,精度不够,性能都不是很理想。本文利用光刻工艺,在硅衬底上制成了一系列一维金线栅,并通过数值模拟与实验测量的对比验证,系统研究了在 0.2~2.6 THz 范围内一维线栅各参数对偏振特性的影响,为进一步研制高性能的太赫兹偏振器提供参考。

## 2 数值模拟和样品设计

金属线栅结构如图 1 所示,用  $w$  表示金属的宽度,  $d$  表示狭缝的宽度,  $T$  表示线栅的周期,即  $T = w + d$ 。对于一维金属线栅而言,金属占空比,即金属宽度  $w$  与周期  $T$  的比值,同样是一个非常重要的参量,用  $\eta$  来表示,即  $\eta = w/T$ 。定义太赫兹波的电场  $E_{\text{THz}}$  方向和线栅结构的线长方向之间的夹角为  $\theta$ ,如图 1 所示,在本文中主要研究  $\theta$  为  $0^\circ$  和  $90^\circ$  这两种相互垂直的偏振模式太赫兹波的透射特性, $\theta$  为  $0^\circ$  时,记为  $T_{//}$  模式太赫兹波, $\theta$  为  $90^\circ$  时,记为  $T_{\perp}$  模式太赫兹波。

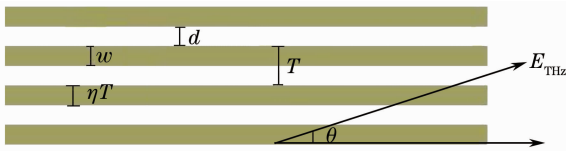


图 1 一维金属线栅结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of one-dimensional wire grating

利用基于时域有限差分法(FDTD)的 Concerto 6.0 电磁场模拟软件对一维金属线栅在 0.2~2.6 THz 范围内的偏振特性进行了数值模拟研究。由于金属的介电常数在太赫兹波段非常大,可以看做理想金属,因此在模拟过程中均采用理想金属材料<sup>[20]</sup>。以金属线宽  $10 \mu\text{m}$ ,狭缝宽度  $10 \mu\text{m}$ ,即金属占空比为 0.5,线栅周期  $20 \mu\text{m}$  的样品尺寸作为标准参数,在此基础上展开了 3 个系列的研究,依次得

到了金属占空比、狭缝宽度以及线栅周期对相互垂直的两种传输模式的太赫兹波透射特性的影响规律。所涉及到的样品参数如表 1 所示。

表 1 样品结构参数

Table 1 Parameters of samples

| Sample            | S  | A  | B  | C  | D  | E  | F  | G  |
|-------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| $w / \mu\text{m}$ | 10 | 6  | 14 | 10 | 10 | 10 | 5  | 15 |
| $d / \mu\text{m}$ | 10 | 14 | 6  | 5  | 20 | 30 | 5  | 15 |
| $T / \mu\text{m}$ | 20 | 20 | 20 | 15 | 30 | 40 | 10 | 30 |

首先,固定线栅周期  $T$  为  $20 \mu\text{m}$  不变,改变金属宽度  $w$ ,即改变金属占空比  $\eta$  依次为 0.3(A)、0.5(S)和 0.7(B),模拟结果如图 2(a)所示,即周期相同时,随着金属占空比的增大, $T_{\perp}$  模式的太赫兹透射系数越来越小,同时  $T_{//}$  模式的太赫兹透射系数也越来越小,且变化较为显著。其次,固定金属线的宽度  $w$  为  $10 \mu\text{m}$ ,然后改变狭缝宽度依次为  $5 \mu\text{m}$ (C)、 $10 \mu\text{m}$ (S)、 $20 \mu\text{m}$ (D)和  $30 \mu\text{m}$ (E),模拟结果如图 2(b)所示,即当线宽固定时,随着狭缝宽度的增大, $T_{\perp}$  模式的太赫兹透射系数越来越大, $T_{//}$  模式的太赫兹透射系数也越来越大,且影响较为显著;最后,固定金属的占空比  $\eta$  为 0.5 不变,改变线栅的周期  $T$  依次为  $10 \mu\text{m}$ (F)、 $20 \mu\text{m}$ (S)和  $30 \mu\text{m}$ (G),模拟结果如图 2(c)所示,即在占空比相同的情况下,周期越小,其  $T_{\perp}$  模式的太赫兹透射系数越大, $T_{//}$  模式的太赫兹透射系数越小。

## 3 实验测量与分析

### 3.1 样品制备

设计并加工了如表 1 所示的 8 个不同尺度的一维金属线栅结构。首先画出了样品掩模板图案,利用电子束曝光的方法,制备了光刻掩模板。然后通过光刻、金属淀积和剥离等工艺,制备了一系列金的一维线栅结构,具体过程如下:在 1 mm 厚的高阻硅抛光面上涂上一层均匀的光刻胶,将光刻胶烘干后放入光刻机内,在其上放置样品掩模板,然后曝光并显影、定影处理,留下线栅图案,把处理后带有光刻胶的硅片放置在蒸镀机中蒸镀上一层 200 nm 厚的金膜,蒸镀后带有线栅图案的硅片经过显影和定影,剥离掉没有线栅处的金膜,就制备成了实验样品。为了检查所制备的样品质量,在光学显微镜下观察并拍摄照片,图 3 为标准参数样品(S)的光学显微镜图,说明所制备的样品质量很好。

### 3.2 实验测量和实验结果

利用标准的太赫兹时域光谱系统(THz-

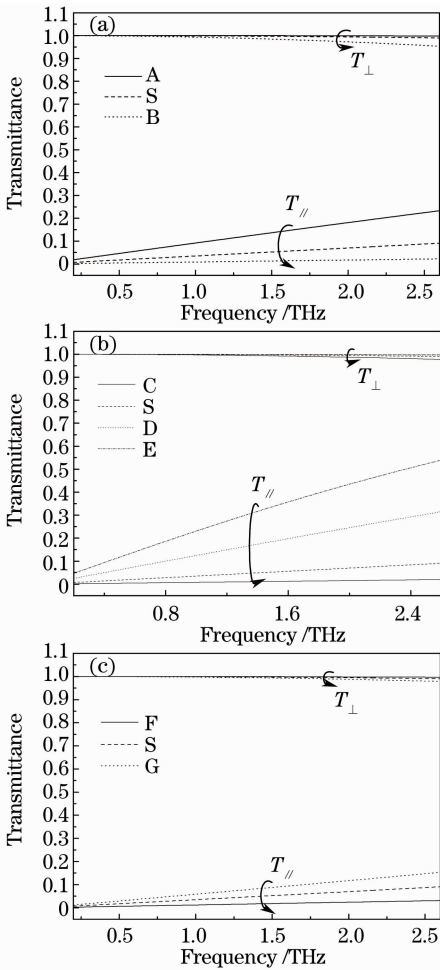


图2 不同尺度金属线栅的太赫兹透射模拟结果。(a)相同周期,不同金属占空比;(b)相同金属宽度,不同狭缝宽度;(c)相同金属占空比,不同线栅周期

Fig. 2 Simulation results of terahertz transmission spectra of different metallic wire-gratings. (a) Same periodicity and different duty cycles; (b) same width of metal stripe and different widths of slit; (c) same duty cycle and different periodicities

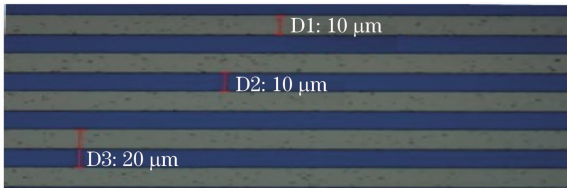


图3 标准参数样品(S)的光学显微镜图

Fig. 3 Optical micrograph of standard sample S

TDS)<sup>[21]</sup>对样品进行了测量。实验采用 Spectra-Physics公司的 Mai Tai 激光器,其脉宽约为100 fs,重复频率 82 MHz,实验时激光器中心波长为800 nm,平均输出功率为 1.02 W,实验过程中在装置的太赫兹光路部分加密封罩,并向罩子中充入氮

气,保证相对湿度为 3.6%左右,环境温度为 295 K 左右,光谱系统有效频率范围为 0.2~2.6 THz。

实验中借助电动旋转装置,首先将样品固定在电动旋转台中心的样品架上,且使线栅方向平行于实验平台(平行于太赫兹电场)方向,并保证太赫兹脉冲垂直入射到样品上,进行扫描测量,以此作为  $T_{//}$  模式的太赫兹透射时域光谱,然后利用电动旋转台将样品旋转  $90^\circ$ ,此时线栅方向与太赫兹电场方向垂直,再次扫描测量,以此作为  $T_{\perp}$  模式的太赫兹透射时域光谱,由于样品以高阻硅作为衬底,因此以透过高阻硅片的太赫兹信号作为参考信号。对得到的太赫兹透射时域光谱做快速傅里叶变换便得到了对应的频域光谱,将样品的频域光谱与参考信号的频域光谱作比便得到了需要的透射谱。图4示出了实验结果,为了便于与数值模拟结果比较,依然将样品分为3个系列,将实验结果与模拟结果做了相同的分类比较。与图2对应,图4(a)示出了相同周期、不同金属占空比的样品透射谱;图4(b)为相同金属宽度、不同狭缝宽度的样品透射谱;图4(c)为相同金属占空比、不同线栅周期的样品透射谱。

### 3.3 结果分析和讨论

对比模拟结果图2和实验结果图4,不难发现,所有的金属线栅样品  $T_{\perp}$  模式的太赫兹透射系数都随着频率的增加呈减小趋势,而  $T_{//}$  模式的太赫兹透射系数则随着频率的增加而增大。此外,  $T_{\perp}$  模式的太赫兹透射系数实验结果较模拟结果偏高,甚至在低频处出现了透射系数大于1的情况,这里认为主要是由于透射系数是以硅衬底的透射信号作为参考的,太赫兹波在表面光滑的硅衬底上反射损耗较大,当在上面镀膜并刻有亚波长金属线栅结构后,会大大改变表面情况,亚波长金属线栅结构起到了增强透射的作用<sup>[22~26]</sup>。  $T_{//}$  模式的太赫兹透射系数实验结果同样较模拟结果高出许多,这里认为主要是由于数值模拟时采用的是理想金属,而实验中使用的金属材料为金,它在太赫兹波段的电导率并非无限大。另外,对于3个系列的研究,模拟结果与实验结果均出现了相同的变化规律,在同一频率下,  $T_{\perp}$  模式的太赫兹透射系数随着金属占空比的减小、狭缝宽度的增大或占空比相同时周期的减小而增大,但其影响较小,  $T_{//}$  波的透射系数则随着金属占空比的增大、狭缝宽度的减小或占空比相同时周期的减小而减小,且变化较为显著。这是由于当电场方向与金属导线方向垂直时,金属中电子受到约束,故结构参数的改变对  $T_{\perp}$  模式的太赫兹透射系数影响较

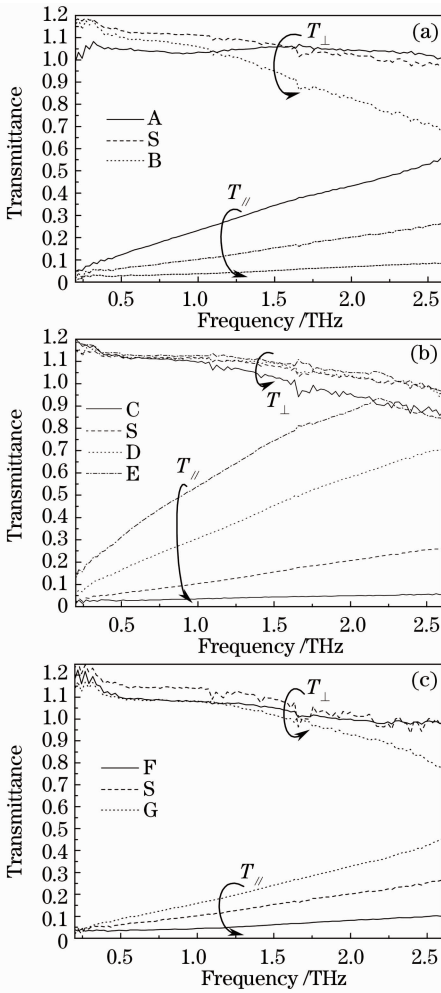


图 4 不同尺度金属线栅的太赫兹透射实验测量结果。  
 (a) 相同周期, 不同金属占空比; (b) 相同金属宽度, 不同狭缝宽度; (c) 相同金属占空比, 不同线栅周期  
 Fig. 4 Measurement results of terahertz transmission spectra of different metallic wire-gratings. (a) Same periodicity and different duty cycles; (b) same width of metal stripe and different widths of slit; (c) same duty cycle and different periodicities

小; 而当电场方向与金属导线方向平行时, 引起了电子振荡, 形成表面等离子体波, 而不同频率的表面等离子体波所对应的共振频率不同, 故结构参数的改变对  $T_{//}$  模式的太赫兹透射系数影响较为显著。

对于一个理想的太赫兹偏振器件而言, 自然希望  $T_{\perp}$  模式的太赫兹波完全通过, 而  $T_{//}$  模式的太赫兹波完全被遮挡。为了更直观地表征这些样品在太赫兹波段的偏振特性, 定义偏振度  $P$  如下<sup>[27]</sup>:

$$P = (T_{T_{\perp}} - T_{T_{//}}) / (T_{T_{\perp}} + T_{T_{//}}), \quad (1)$$

式中  $T_{T_{\perp}}$ 、 $T_{T_{//}}$  分别对应  $T_{\perp}$  和  $T_{//}$  两种传输模式太赫兹波样品的透射系数。如果  $T_{\perp}$  模式和  $T_{//}$  模式的

太赫兹透射系数相等, 则  $P = 0$ , 偏振效果最差; 如果  $T_{\perp}$  模式的太赫兹波全部透过, 而  $T_{//}$  模式太赫兹波无透过, 则  $P = 1$ , 偏振效果最好。作出每个样品的偏振度图, 依然分为 3 个系列来对比研究, 图 5 示出了不同尺度金属线栅的偏振度图。线栅周期相同时, 如图 5(a) 所示, 金属占空比越大, 其偏振性能越好。当金属线宽固定时, 如图 5(b) 所示, 随着狭缝宽度的减小, 其偏振性能越来越好。当金属占空比相同时, 如图 5(c) 所示, 线栅周期越小, 其偏振性能越好。

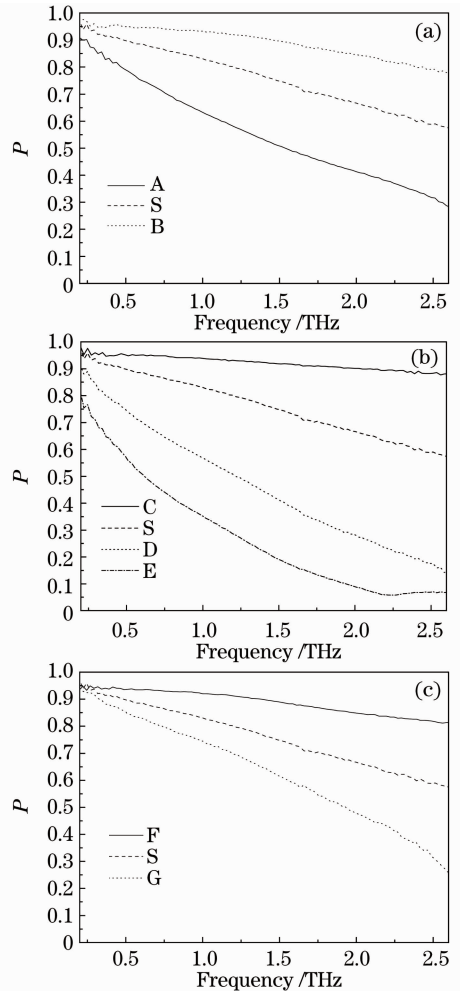


图 5 不同尺度金属线栅的偏振度特性。(a) 相同周期, 不同金属占空比; (b) 相同金属宽度, 不同狭缝宽度; (c) 相同金属占空比, 不同线栅周期  
 Fig. 5 Polarization characteristics of different metallic wire-gratings. (a) Same periodicity and different duty cycles; (b) same width of metal stripe and different width of slit; (c) same duty cycle and different periodicities

然而, 固定周期来增大金属占空比, 或者固定金属线宽度来减小狭缝宽度, 尽管会提高透射太赫兹

波的偏振度,但  $T_{\perp}$  模式太赫兹波的透射系数会减少,因此在实际应用中,适当选择线栅周期和金属占空比是十分必要的。比较 8 个样品,其中 C 样品偏振度最高,而且其  $T_{\perp}$  模式太赫兹透射系数在 0.2~2.6 THz 范围内均达到 85% 以上,且  $T_{\parallel}$  模式的太赫兹透射系数均在 6% 以下,偏振度达 0.88 以上,甚至在 2 THz 以前都达到了 0.9 以上,偏振性能优良,因此认为金属占空比 0.67 左右是一个较为合理的结构参数,在适当的金属占空比下,周期越小偏振性能越优良。相信随着光刻工艺精度的不断提高,将能以高质量加工出具有合理占空比以及更小线栅周期的金属线栅样品,制造高性能的太赫兹线栅偏振器将成为现实。

## 4 结 论

设计了一系列金属线栅结构,实现了太赫兹波段的偏振器件功能,并通过数值模拟研究以及实验验证分析,得出了一维线栅各参数对偏振特性的影响规律: $T_{\perp}$  模式的太赫兹透射系数随着金属占空比的减小、狭缝宽度的增大或占空比相同时周期的减小而逐渐增大;而  $T_{\parallel}$  模式的太赫兹透射系数则随着金属占空比的增大、狭缝宽度的减小或占空比相同时周期的减小而减小。从偏振度的角度考虑,一维金属线栅结构随着金属占空比的增大、狭缝宽度的减小或金属线栅周期的减小,其偏振度可以得到提高。因此,从总体上考虑实际的应用需求,适当设计金属线栅周期,同时满足合适的金属占空比,其整体偏振和透射性能可以得到优化。金属线栅结构参数与其太赫兹偏振性能之间的关系,为进一步制作实用的太赫兹偏振器提供了参考,对于实现太赫兹偏振器的设计和应用具有重要的意义。相信随着光刻工艺精度的不断提高,制造高性能的太赫兹线栅偏振器将成为现实。

## 参 考 文 献

- 1 Ajay Nahata, Aniruddha S. Weling, Tony F. Heinz. A wideband coherent terahertz spectroscopy system using optical rectification and electro-optic sampling[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69**(16): 2321~2323
- 2 Zhang Cunlin, Zhang Yan, Zhao Guozhong *et al.*. Terahertz Detection and Imaging[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. 64~69  
张存林,张岩,赵国忠等.太赫兹感测与成像[M].北京:国防工业出版社,2008.64~69
- 3 Zhang Liangliang, Zhong Hua, Deng Chao *et al.*. Terahertz wave reference-free spectroscopic analysis[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(s1): s111004  
张亮亮,钟华,邓朝等.太赫兹波不依赖参考信号光谱分析

- [J]. *中国激光*, 2011, **38**(s1): s111004
- 4 Zhu Dechong, Zhang Liangliang, Zhao Yaqin *et al.*. Terahertz broadband spectroscopic investigations of amino acid[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(s1): s111008  
祝德充,张亮亮,赵亚芹等.氨基酸的超宽带太赫兹光谱[J].*中国激光*, 2011, **38**(s1): s111008
- 5 D. M. Mittleman, M. Guptal, R. Neelamani *et al.*. Recent advances in terahertz imaging[J]. *Appl. Phys. B*, 1999, **68**(6): 1085~1094
- 6 Yang Kun, Zhao Guozhong, Liang Chengsen *et al.*. Comparison between pulsed terahertz imaging and continuous-wave terahertz imaging[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2853~2858  
杨昆,赵国忠,梁承森等.脉冲太赫兹波成像与连续波太赫兹成像特性的比较[J].*中国激光*, 2009, **36**(11): 2853~2858
- 7 Zhao Yaqin, Zhang Liangliang, Zhu Dechong *et al.*. Single-pixel terahertz imaging based on compressed sensing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(s1): s111003  
赵亚芹,张亮亮,祝德充等.基于压缩传感的单点太赫兹成像[J].*中国激光*, 2011, **38**(s1): s111003
- 8 Wei Bo, Zhao Guozhong, Liu Liming *et al.*. Terahertz transmission properties through asymmetrical cross metallic structures by the numerical simulation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(s1): s111007  
魏波,赵国忠,刘立明等.非对称十字形金属结构的太赫兹透射特性模拟研究[J].*中国激光*, 2011, **38**(s1): s111007
- 9 Wang Xiaoyan, Zhao Guozhong, Zhang Cunlin *et al.*. Investigation on terahertz transmission spectrum through sierpinski fractal structures on copper foils[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(s1): s100507  
王晓燕,赵国忠,张存林等.Sierpinski分形结构的太赫兹透射光谱特性研究[J].*光学学报*, 2011, **31**(s1): s100507
- 10 Liu Liming, Zhao Guozhong, Wei Bo *et al.*. Numerical simulation of filtering characteristics of two-dimensional metallic grid in terahertz band[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(s1): s111005  
刘立明,赵国忠,魏波等.二维金属线网格结构的太赫兹滤波特性仿真研究[J].*中国激光*, 2011, **38**(s1): s111005
- 11 A. E. Costley, K. H. Hursey, G. F. Neill *et al.*. Free-standing fine-wire grids: their manufacture, performance, and use at millimeter and submillimeter wavelengths[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, **67**(7): 979~981
- 12 Itsunari Yamada, Keisuke Takano, Masanori Hangyo *et al.*. Terahertz wire-grid polarizers with micrometer-pitch Al gratings[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(3): 274~276
- 13 Yong Ma, A. Khalid, Timothy D. Drysdale *et al.*. Direct fabrication of terahertz optical devices on low-absorption polymer substrates[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(10): 1555~1557
- 14 Z. C. Chen, M. H. Hong, T. C. Chong. Fabrication and characterization of broadband terahertz wire-grid polarizer[J]. *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials*, 2010, **19**(4): 827~833
- 15 Qirong Xing, Shuxin Li, Zhen Tian *et al.*. Enhanced zero-order transmission of terahertz radiation pulses through very deep metallic grating with subwavelength slits[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(4): 041107
- 16 Yuan Yuxia, Yuan Bin, Ding Pei *et al.*. Design of terahertz polarizers for different atmospheric windows[J]. *J. Zhengzhou University*, 2009, **41**(3): 54~58  
袁玉霞,袁斌,丁佩等.不同大气窗口太赫兹偏振器的仿真设计[J].*郑州大学学报*, 2009, **41**(3): 54~58
- 17 Chen Hua, Sun Yimin, Wang Li. Investigation of transmission resonances on the one-dimensional metallic cylindrical gratings in THz frequency range[J]. *Chinese Phys. B*, 2009, **18**(10): 4287~4291
- 18 Li Fangfang, Li Dong, Shu Shiwei *et al.*. Polarized terahertz

- wave transmission through wire gratings [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2010, **29**(6): 452~456  
 栗芳芳, 李 栋, 舒时伟等. 金属线栅结构中太赫兹波偏振特性的研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2010, **29**(6): 452~456
- 19 Lin Sun, Zhihui Lü, Wei Wu *et al.*. Double-grating polarizer for terahertz radiation with high extinction ratio[J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(11): 2066~2071
- 20 Dong Li, Shiwei Shu, Fangfang Li *et al.*. Anomalous transmission of terahertz wave through one-dimensional lamellar metallic grating [J]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**(10-11): 2415~2419
- 21 Wang He, Zhao Guozhong. Terahertz spectroscopic inspection of several kinds of plastic[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(7): 1185~1188  
 王 鹤, 赵国忠. 几种塑料的太赫兹光谱检测[J]. *光子学报*, 2010, **39**(7): 1185~1188
- 22 T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi *et al.*. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays[J]. *Nature*, 1998, **391**(6668): 667~669
- 23 J. Gómez Rivas, C. Schotsch, P. Haring Bolivar *et al.*. Enhanced transmission of THz radiation through subwavelength holes[J]. *Phys. Rev. B*, 2003, **68**(20): 201306
- 24 Jianguang Han, Xinchao Lu, Weili Zhang. Terahertz transmission in subwavelength holes of asymmetric metal-dielectric interfaces: the effect of a dielectric layer [J]. *J. Appl. Phys.*, 2008, **103**(3): 033108
- 25 T. H. Isaac, W. L. Barnes, E. Hendry. Surface-mode lifetime and the terahertz transmission of subwavelength hole arrays[J]. *Phy. Rev. B*, 2009, **80**(11): 115423
- 26 T. H. Isaac, J. Gómez Rivas, E. Hendry. Optical control over transmission of terahertz radiation through arrays of subwavelength holes of varying size[J]. *Phys. Rev. B*, 2009, **80**(19): 193412
- 27 Takashi Kondo, Takeshi Nagashima, Masanori Hangyo. Fabrication of wire-grid-type polarizers for THz region using a general-purpose color printer[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2003, **42**(4): 373~375

栏目编辑: 李文誌