

# 基于双层金属光栅的高消光比高透过率 太赫兹偏振器

冀允允<sup>1,3</sup>, 范 飞<sup>1,2</sup>, 程洁嵘<sup>1,3</sup>, 王湘晖<sup>1</sup>, 常胜江<sup>1,2</sup>

(1. 南开大学现代光学研究所, 天津 300350; 2. 天津光电子传感器与传感网络技术重点实验室, 天津 300350;  
3. 天津微尺度光学信息技术科学重点实验室, 天津 300350)

**摘 要:** 本文设计了一种基于双层金属亚波长光栅的太赫兹偏振器, 其可以实现高透过率和良好消光比的特性. 该偏振器是通过微加工技术在薄石英衬底的上下表面上制备而成的. 实验和模拟结果均表明, 双层金属光栅具有与单层金属光栅相近的透过率、更高的偏振度和更高的消光比. 在 0.3~2.0 THz 的频率范围内, 测量的透过率在 83.4% 到 62.7% 之间, 偏振度大于 99.7%, 消光比大于 29 dB. 此外, 设计的两种双层金属光栅偏振器件成功地应用于太赫兹时域光谱 (TeraHertz Time Domain Spectroscopy, THz-TDS) 系统中, 获得了超过 96.2% 的偏振度和超过 17.1 dB 的消光比. 通过调整金属亚波长光栅的参数 (例如间距、线宽和金属膜厚度), 可以进一步提高透过率、偏振度和消光比等特性.

**关键词:** 太赫兹; 偏振器; 双层金属光栅; 亚波长; 消光比; 高透过率

**基金项目:** 国家自然科学基金 (No.61830112, No.61971242, No.62205160); 中央高校基本科研业务费专项资金 (No.63231159); 国家重点研发计划 (No.2017YFA0701000)

**中图分类号:** O436.3; TN91

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112(2023)10-2733-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.12263/DZXB.20230045

## Terahertz Polarizer with High Extinction Ratio and High Transmittance Based on Bilayer Metal Grating

Ji Yun-yun<sup>1,3</sup>, Fan Fei<sup>1,2</sup>, Cheng Jie-rong<sup>1,3</sup>, Wang Xiang-hui<sup>1</sup>, Chang Sheng-jiang<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300350, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Optoelectronic Sensor and Sensing Network Technology, Tianjin 300350, China;

3. Tianjin Key Laboratory of Micro-Scale Optical Information Science and Technology, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** A terahertz polarizer based on bilayer metal subwavelength-grating is designed to achieve high transmission and good extinction ratio. The polarizer is fabricated on the upper and lower surfaces of thin quartz substrate by micro-fabrication technique. Both experimental and simulation results show that the bilayer metal grating has similar transmittance, higher degree of polarization and extinction ratio than the single-layer metal grating. Measured transmittance is between 83.4% and 62.7% in the frequency range of 0.3~2.0 THz, and the degree of polarization and extinction ratio is more than 99.7% and more than 29 dB, respectively. In addition, the two designed bilayer metal gratings are successfully used in the terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) system, and the degree of polarization of more than 96.2% and the extinction ratio of more than 17.1 dB are obtained. The transmittance, degree of polarization and extinction ratio can be improved by further tuning the parameters (such as the pitch, line width, and metal film thickness) of the metal subwavelength-grating.

**Key words:** terahertz; polarizer; bilayer metal grating; subwavelength; extinction ratio; high transmittance

**Foundation Item(s):** National Natural Science Foundation of China (No.61830112, No.61971242, No.62205160); Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.63231159); National Key Research and Development Program of China (No.2017YFA0701000)

## 1 引言

太赫兹(TeraHertz, THz)波<sup>[1,2]</sup>通常指的是振荡频率范围位于0.1~10 THz(波长范围为0.03~3.00 mm)的电磁辐射,其介于微波和红外光之间,兼具微波和红外光波的性质,同时也具备其他波段所没有的独特性质. 早期,由于高能量THz源和高灵敏度THz探测器的缺乏,THz技术的发展长期处于停滞状态. 直到相关辐射源的日趋成熟和半导体技术的迅速发展,THz技术才得以在安检、成像、通信、雷达以及生物医学等领域应用<sup>[3-5]</sup>. 除了THz源和探测器,各种THz功能器件在THz技术及其应用系统的发展中也占据至关重要的地位,如THz开关<sup>[6]</sup>、调制器<sup>[7]</sup>、滤波器<sup>[8]</sup>、隔离器<sup>[9]</sup>、吸收器<sup>[10]</sup>、偏振器<sup>[11]</sup>等.

偏振是电磁波的基本特性. 偏振器也是THz波操控器件中不可或缺的组成部分. 常见的THz偏振片主要包括液晶偏振器、布儒斯特角型偏振器以及碳纳米管偏振器. 液晶偏振器<sup>[12]</sup>在0.2~1.0 THz范围能取得较好的偏振效果,但其存在工作频带窄、插入损耗大的缺点. 由布儒斯特角硅晶片堆叠制成的偏振器<sup>[13]</sup>具有0.46 dB的低插入损耗,其消光比为38 dB,但这种偏振器的体积庞大,限制了该器件的实际应用. 最近,科研人员利用超有序的碳纳米管薄膜制备出THz偏振器件<sup>[14]</sup>,其在0.4~2.2 THz范围内可达99.9%的偏振度和30 dB的消光比,但其加工工艺复杂、制备成本高,且其性能并没有优于其他方法. 此外,基于有序镍纳米线(Nickel nanoWire, NW)阵列堆叠的宽带THz偏振器在0.3~2.3 THz的频率范围内实现了46.6 dB的平均消光比<sup>[15]</sup>,层数的堆叠虽然能提高器件的消光比,但却引入了较大的插损.

金属线栅型偏振片分为独立式线栅结构和基于衬底的线栅结构,目前也已有商用的产品,其具有高透射率和高消光比的特性. 其中独立式线栅结构具有高透射率,但成本高、极易损坏. 相比之下,基于衬底的线栅偏振器更容易制造且不易破碎,具有更高的实用性. 利用干法刻蚀工艺在硅晶片制备的线栅偏振器虽然可以获得相对较高的消光比,但硅衬底的高反射率会引入较大的插入损耗,如Yamada等人<sup>[16]</sup>在0.5 THz下实现了35 dB的消光比,但偏振器的透射率仅约为50%. 为了改善偏振器的消光性能,可以通过制备双层或多层线栅结构的方法来实现<sup>[17,18]</sup>,但两层或多层结构的堆叠集成增大了加工难度、复杂性和成本. 为了降低插入损耗、提高透过率,将高折射率的硅衬底更换为低折射率的玻璃或聚合物的方法被提出<sup>[19,20]</sup>.

本文设计了一种基于玻璃衬底的双层金属线栅的THz偏振器,通过微纳加工工艺在玻璃衬底的上下表面制备出金属线栅结构,能在不增加制备工艺的复杂度

和难度的情况下,提高器件的性能. 相比单层金属线栅THz偏振器,双层金属线栅THz偏振器能在不降低透过率的情况下,提高器件的消光比和偏振度,其可在0.3~2.0 THz宽带范围内实现83.4%~62.7%的透过率、大于99.7%的偏振度和大于29 dB的消光比. 最后,我们也通过实验证明了本文设计的双层金属线栅偏振器可以用在本课题组的THz-TDS实验系统中.

## 2 双层金属光栅 THz 偏振器

### 2.1 双层金属光栅 THz 偏振器的制备

本文设计的THz偏振器是由双层金属光栅结构组成,如图1(a)所示,即在一个介质衬底的上下两个表面均镀上金属光栅结构,并且两层金属光栅的线栅方向相互平行,因此其只允许与线栅垂直方向的偏振光透过,与线栅平行方向的偏振光则被反射. 该结构可通过传统的微纳加工工艺进行制备,将两层200 nm的Ti/Au层溅射到一个300  $\mu\text{m}$ 的JGS1玻璃衬底的上下表面上,再利用光刻工艺对两层Ti/Au层进行刻蚀形成两种金属线栅结构,上下层金属光栅的周期和线宽分别为 $P_1, w_1, P_2, w_2$ ,图1(b)显示了上下层金属光栅的显微照片和相应的尺寸参数. 本文制备了3种金属光栅结构,其中G1和G2为双层金属光栅,G3为单层金属光栅,其相应的尺寸参数如表1所示.

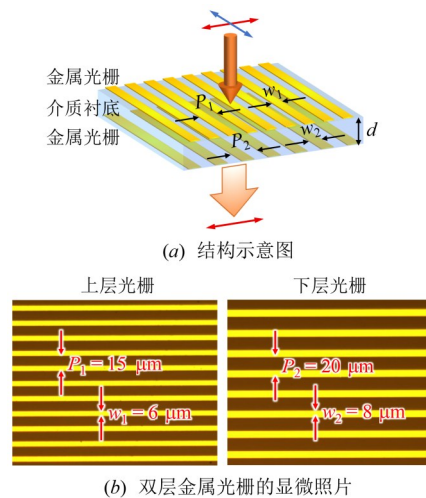


图1 双层THz偏振器的结构示意图和金属光栅的显微照片

表1 3种光栅结构的尺寸参数 单位: $\mu\text{m}$

光栅	$P_1$	$w_1$	$P_2$	$w_2$
G1	15	6	20	8
G2	15	6	15	6
G3	15	6	—	—

### 2.2 双层金属光栅 THz 偏振器的实验和仿真结果

本实验采用太赫兹时域光谱(TeraHertz Time Domain Spectroscopy, THz-TDS)系统对光栅样品进行实验

表征. 该系统将一束飞秒激光分成两束光: 泵浦光和探测光. 其中泵浦光经透镜聚焦至加有偏压的光电导天线上产生 THz 脉冲, THz 脉冲通过由 4 个离轴抛物面镜构成的共聚焦系统后, 聚焦在 ZnTe 晶体上, 并与另一束探测光会合, 样品被放置在第 2 个和第 3 个抛物面镜的焦点处. 如图 2(a) 所示, 一束  $y$  偏振方向的 THz 脉冲正入射进光栅样品, 再对出射的  $y$  偏振光进行探测. 通过将光栅样品从  $0^\circ$  (线栅方向与入射光偏振方向垂直) 旋转至  $90^\circ$  (线栅方向与入射光偏振方向平行), 可对不同角度下光栅样品的 THz 透射特性进行实验表征. 图 2(b) 所示为实验测量得到的时域脉冲信号: 空气参考和样品信号. 对于 3 种光栅结构, 随着光栅从  $0^\circ$  旋转至  $90^\circ$ , 其 THz 时域信号均逐渐减小, 表明光栅逐渐从透光方向旋转至消光方向, 且在消光方向 (即  $90^\circ$ ) 的时域信号都非常小. 然而, 通过比较不难发现 G1 和 G2 光栅在消光方向的时域脉冲信号明显比 G3 光栅更低, 预示着双层光栅的消光效果要优于单层光栅.

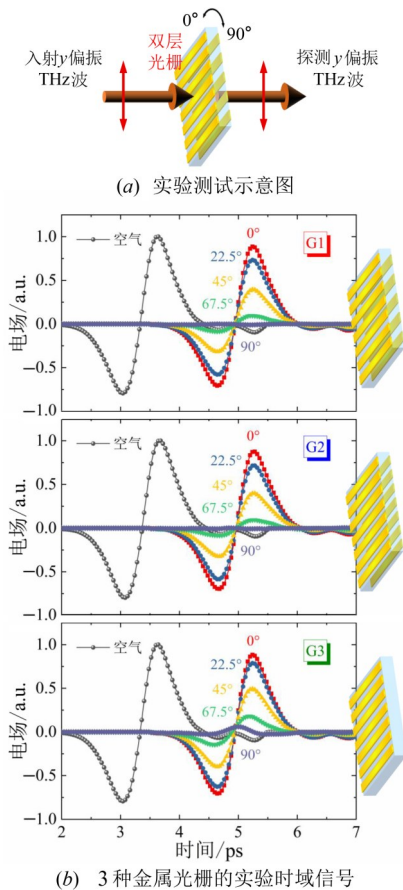


图 2 实验测试示意图及 3 种金属光栅的实验时域信号

为了更好地分析光栅样品的 THz 透射特性, 进一步将上述时域信号进行傅里叶变换, 得到频域下的 THz 电场强度  $E_{\text{ref}}(\omega)$  和  $E_{\text{sam}}(\omega)$ , 通过式 (1) 可求得被测样品

的 THz 透过率  $T(\omega)$ :

$$T(\omega) = \left( E_{\text{sam}}(\omega) / E_{\text{ref}}(\omega) \right)^2 \quad (1)$$

值得注意的是, 本文实验中只截取输出信号的主脉冲, 而忽略多次反射后再输出的次级脉冲信号, 因此经式 (1) 计算得到的透过率谱中不显示因法布里-珀罗干涉效应而产生的周期性波动. 并且为了与实验条件吻合, 后续的仿真中我们也只截取主脉冲信号.

如图 3(a) 所示, 当处在透光方向  $0^\circ$  时, 双层光栅 G1 在 0.3~2.0 THz 宽带范围内的透过率在 83.4% 到 62.7% 之间, 双层光栅 G2 的透过率在 81.3% 到 62.5% 之间, 单层光栅 G3 的透过率在 82.0% 到 60.7% 之间. 随着光栅样品从  $0^\circ$  旋转至  $90^\circ$ , 其透过率逐渐减小, 当处在消光方向  $90^\circ$  时, 3 种光栅在 0.3~2.0 THz 宽带范围内的透过率均接近于 0. 通过比较发现, 双层光栅 G1 和 G2 在保持透光方向较高透过率的前提下, 能更好地降低消光方向的透过率, 从而可以有效地提高器件的消光效果.

此外, 通过时域有限差分法 (Finite Difference Time Domain, FDTD) 对 3 种光栅进行了仿真计算, 在仿真区域的  $x$  和  $y$  边界设置周期性边界条件, 在传播方向 ( $z$  轴) 设置开放边界条件. 样品的玻璃衬底建模为折射率为  $n = 2$  的介电材料, 金属光栅建模为一个二维的完美电导体 (Perfect Electrical Conductor, PEC) 层. 一束  $y$  偏振的平面波源正入射进样品, 在样品之后放置一个场探测器, 通过计算即可得到相应的仿真透过率谱, 如图 3(b) 所示. 通过比较可以看出, 仿真结果与实验结果相符.

图 4 显示了 3 种样品光栅在 1.0 THz 频率的仿真电场分布图, 当入射 THz 波偏振方向与光栅透过方向平行 ( $0^\circ$ ) 时, 3 种样品光栅均能使大部分 THz 波透过, 且其透过的能量基本相等. 而当入射 THz 波偏振方向与光栅透过方向垂直 ( $90^\circ$ ) 时, 3 种样品光栅均极大地阻挡 THz 波透过 (即大部分 THz 波能量被反射了), 并且相比双层光栅 G1 和 G2, 单层光栅 G3 仍有部分 THz 波能透过, 这也将降低器件的消光比. 上述仿真结果也预示着双层光栅 G1 和 G2 在保持透光方向较高透过率的前提下, 能更有效地提高器件的消光性能, 与实验结果相吻合.

为了更好地分析 3 种样品光栅的消光特性, 进一步计算 3 种光栅的偏振度 (Degree Of Polarization, DOP) 和消光比 (Extinction Ratio, ER):

$$\text{偏振度 (DOP)} = \frac{T(0^\circ) - T(90^\circ)}{T(0^\circ) + T(90^\circ)} \quad (2)$$

$$\text{消光比 (ER)} = -10 \log(T(90^\circ) / T(0^\circ)) \quad (3)$$

其中,  $T(0^\circ)$  是入射 THz 波偏振方向与光栅透过方向平行时的透过率,  $T(90^\circ)$  是入射 THz 波偏振方向与光栅消光方向平行时的透过率. 图 5(a) 分别给出了 3 种光栅的实验偏振度和消光比. 双层光栅 G1 在 0.3~2.0 THz 宽带范围内实现了大于 99.7% 的偏振度和大于 29 dB 的

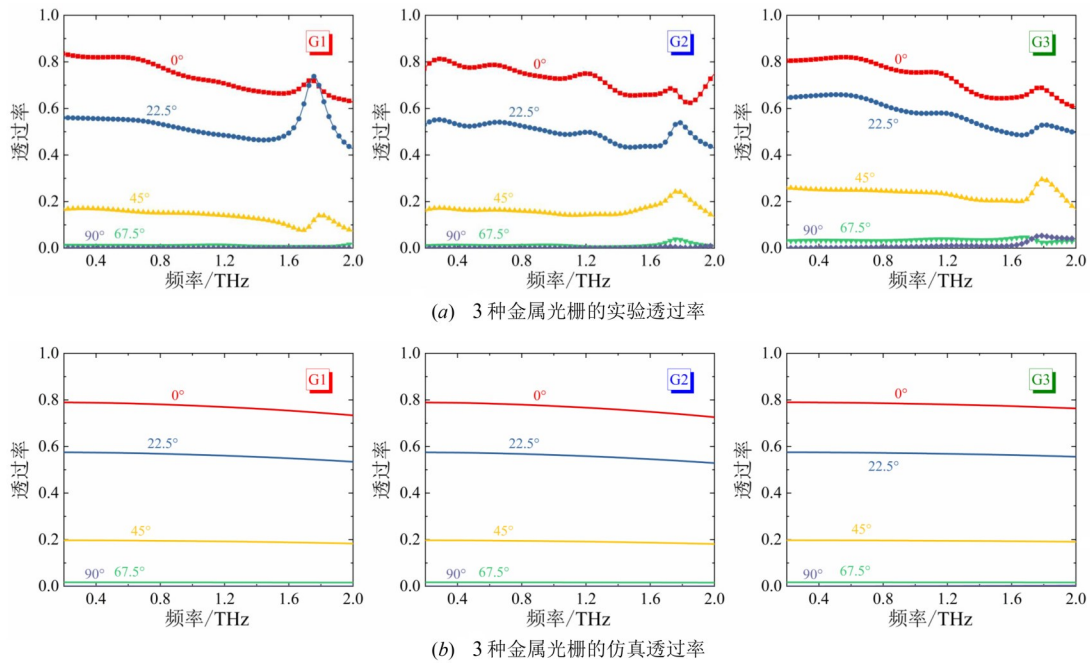


图3 3种金属光栅的实验透过率和仿真透过率

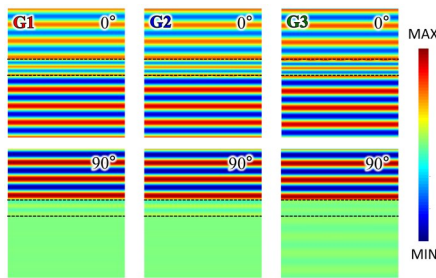


图4 3种金属光栅在1.0 THz频率位置的仿真电场分布图

消光比, 双层光栅 G2 在宽带范围内实现了大于 97.3% 的偏振度和大于 19.7 dB 的消光比, 而单层光栅 G3 在宽带范围内的偏振度和消光比则在 85.6% 和 11.1 dB 以上, 相比之下, 双层光栅 G1 和 G2 在宽带范围内的偏振度和消光比均高于单层光栅 G1, 表明双层光栅不仅具有较高的透过率还具有更好的消光特性. 图 5(b) 显示了 3 种金属光栅的仿真偏振度和消光比, 结果也显示双层光栅具有更高的偏振度和消

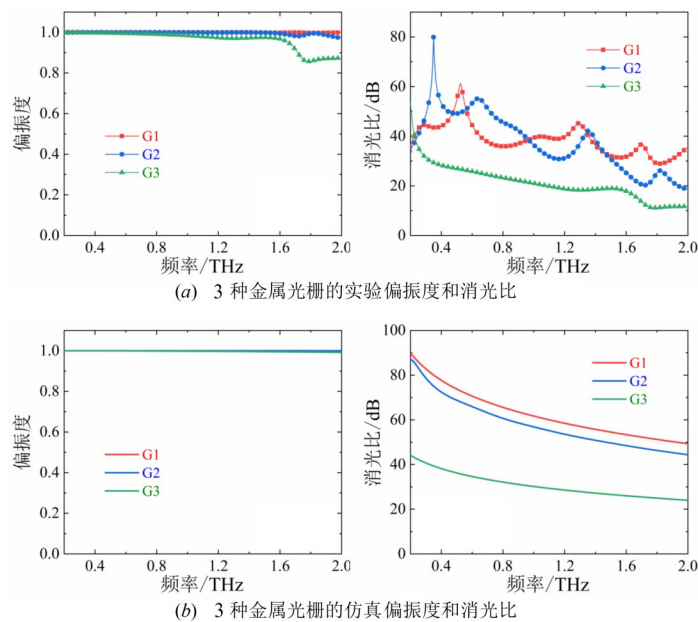
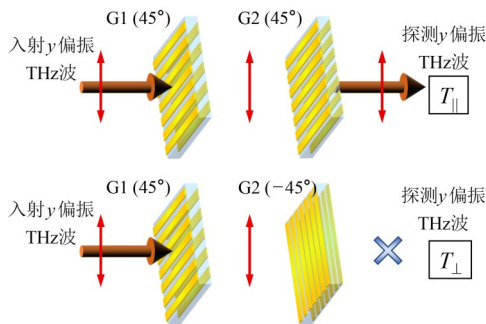


图5 3种金属光栅的实验和仿真偏振度和消光比

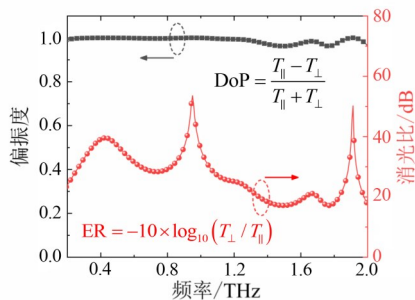
光比. 仿真结果和实验结果基本一致, 其数值上的差别主要是来源于仿真中的近似处理. 值得注意的是, 由于金属光栅结构属于亚波长结构器件, 入射 THz 波频率的增大会导致器件透过率的减小, 进而导致消光比的减小.

### 3 双层金属光栅在 THz-TDS 系统中的消光实验

上述设计并制备的双层金属光栅具有较高的透过率和较好的消光特性, 可以应用在本课题组自行搭建的 THz-TDS 测试系统中. 进一步将双层光栅 G1 和 G2 放置在上述的测试系统中, 并且对其 THz 传输特性进行了实验表征. 首先将光栅 G1 的透光方向固定在与  $y$  轴成  $45^\circ$  方向上, 随后将光栅 G2 从  $45^\circ$  方向旋转至  $-45^\circ$  方向, 其消光测试示意图如图 6(a) 所示. 当光栅 G1 和光栅 G2 的透过方向相互平行时, 此时在探测端有信号输出, 记为  $T_{\parallel}$ ; 当光栅 G1 和光栅 G2 的透过方向相互垂直时, 入射的 THz 信号则无法透过而无法在探测端探测到信号, 记为  $T_{\perp}$ . 通过实验测试和数据计算得到 2 个双层光栅在 THz-TDS 系统中的偏振度和消光比, 如图 6(b) 所示, 实验结果表明在  $0.3\sim 2.0$  THz 频率范围内的偏振度大于 96.2%, 其消光比大于 17.1 dB. 高偏振度和大消光比使该光栅组可以应用于实际的测试系统中.



(a) G1和G2光栅在THz-TDS系统中的消光测试示意图



(b) 实验测试结果

图6 G1和G2光栅在THz-TDS系统中的消光测试示意图与实验测试结果

### 4 结论

我们通过在薄石英衬底的上下表面加工制备金属线栅, 从而形成双层金属光栅 THz 偏振器, 以实现高透过率和高消光比的特性. 在  $0.3\sim 2.0$  THz 的宽频率范围内, 其透过率在 83.4% 到 62.7% 之间, 偏振度大于 99.7%, 消光比大于 29 dB. 并且, 将本文设计的双层金属光栅偏振器件成功地应用于 THz-TDS 系统中, 获得了大于 96.2% 的偏振度和大于 17.1 dB 的消光比. 本文设计的双层金属光栅 THz 偏振器具有高透过率、高偏振度和大消光比特性, 有望应用于实际的测试系统和其他技术应用中.

### 参考文献

- [1] SIRTORI C. Bridge for the terahertz gap[J]. Nature, 2002, 417(6885): 132-133.
- [2] TONOUCI M. Cutting-edge terahertz technology[J]. Nature Photonics, 2007, 1(2): 97-105.
- [3] YANG X A, ZHAO X A, YANG K, et al. Biomedical applications of terahertz spectroscopy and imaging[J]. Trends in Biotechnology, 2016, 34(10): 810-824.
- [4] NAGATSUMA T, DUCOURNAU G, RENAUD C C. Advances in terahertz communications accelerated by photonics[J]. Nature Photonics, 2016, 10(6): 371-379.
- [5] TABATA H. Application of terahertz wave technology in the biomedical field[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2015, 5(6): 1146-1153.
- [6] SHEN N H, MASSAOUTI M, GOKKAVAS M, et al. Optically implemented broadband blueshift switch in the terahertz regime[J]. Physical Review Letters, 2011, 106(3): 037403.
- [7] KIM T T, KIM H, KENNEY M, et al. Amplitude modulation of anomalously refracted terahertz waves with gated-graphene metasurfaces[J]. Advanced Optical Materials, 2018, 6(1): 1700507.
- [8] LI T F, FAN F, JI Y Y, et al. Terahertz tunable filter and modulator based on magneto plasmon in transverse magnetized InSb[J]. Optics Letters, 2020, 45(1): 1-4.
- [9] SHALABY M, PECCIANTI M, OZTURK Y, et al. A magnetic non-reciprocal isolator for broadband terahertz operation[J]. Nature Communications, 2013, 4: 1558.
- [10] XU S T, FAN F, CHENG J R, et al. Active terahertz shielding and absorption based on graphene foam modulated by electric and optical field excitation[J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(18): 1900555.
- [11] TAN Z Y, FAN F, ZHAO D, et al. Linear-polarized terahertz isolator by breaking the gyro-mirror symmetry in

- cascaded magneto-optical metagrating[J]. *Nanophotonics*, 2021, 10(16): 4141-4148.
- [12] HSIEH C F, LAI Y C, PAN R P, et al. Polarizing terahertz waves with nematic liquid crystals[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(11): 1174-1176.
- [13] WOJDYLA A, GALLOT G. Brewster's angle silicon wafer terahertz linear polarizer[J]. *Optics Express*, 2011, 19(15): 14099-14107.
- [14] KYOUNG J, JANG E Y, LIMA M D, et al. A reel-wound carbon nanotube polarizer for terahertz frequencies[J]. *Nano Letters*, 2011, 11(10): 4227-4231.
- [15] XIANG W F, HUANG X W, LI D, et al. High extinction ratio terahertz broadband polarizer based on the aligned Ni nanowire arrays[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(7): 1978-1981.
- [16] YAMADA I, TAKANO K, HANGYO M, et al. Terahertz wire-grid polarizers with micrometer-pitch Al gratings[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(3): 274-276.
- [17] HUANG Z, PARROTT E P J, PARK H, et al. High extinction ratio and low transmission loss thin-film terahertz polarizer with a tunable bilayer metal wire-grid structure [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(4): 793-796.
- [18] KISHI Y, NAGAI M, YOUNG J C, et al. Terahertz laminated-structure polarizer with high extinction ratio and transmission power[J]. *Applied Physics Express*, 2015, 8(3): 032201.
- [19] FERRARO A, ZOGRAFOPOULOS D C, MISSORI M, et al. Flexible terahertz wire grid polarizer with high extinction ratio and low loss[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(9): 2009-2012.
- [20] CETNAR J S, VANGALA S, ZHANG W D, et al. High extinction ratio terahertz wire-grid polarizers with connecting bridges on quartz substrates[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(5): 955-958.

### 作者简介



冀允允 女, 2021年毕业于南开大学现代光学研究所。现任南开大学现代光学研究所讲师。主要研究方向为太赫兹液晶光子器件、新颖电磁超材料。中国电子学会会员编号: E190083706M。  
E-mail: jiyunyun@nankai.edu.cn



范飞 男, 2014年获南开大学光学工程博士学位。现任南开大学现代光学研究所教授。天津市青年人才托举工程、天津市创新人才推进计划青年科技优秀人才。主要研究方向为太赫兹光谱与传感技术、太赫兹微纳结构光子功能器件。中国电子学会会员编号: E190026122M。  
E-mail: fanfei@nankai.edu.cn



程洁 女, 2016年获波士顿东北大学博士学位。现任南开大学现代光学研究所教授。国家优秀自费留学生奖学金获得者、天津市创新人才推进计划青年科技优秀人才。主要研究方向为太赫兹光场调控技术、AI光学设计。中国电子学会会员编号: E190025317M。  
E-mail: chengjr@nankai.edu.cn



王湘晖 女, 2004年获南开大学光学工程博士学位。现任南开大学现代光学研究所教授。主要研究方向为非线性光学显微探测技术、太赫兹成像。  
E-mail: wangxianghui@nankai.edu.cn



常胜江(通讯作者) 男, 1996年获南开大学光学工程博士学位。1998—2000年, 应邀到香港城市大学电子工程系做博士后研究工作。现任南开大学现代光学研究所教授。主要研究方向为太赫兹科学技术、模式识别与图像处理。  
E-mail: sjchang@nankai.edu.cn