

文章编号: 2095-4980(2024)04-0360-05

基于方形开口环的太赫兹偏振转换器设计

聂梦雪^{1,2}, 张天宇^{1,2}, 谢裴曜^{1,2}, 刘盛纲^{1,2}, 胡旻^{1,2}

(1. 电子科技大学 电子科学与工程学院, 四川 成都 611731; 2. 太赫兹技术教育部重点实验室, 四川 成都 611731)

摘要: 基于方形开口环与金属棒组合的超材料结构, 提出一种新型透射式太赫兹偏振转换器件。研究了基本结构单元的不同组合方式对偏振转换特性的影响, 并通过优化结构单元的相关参数, 提高了偏振转换功能的工作带宽。最终在 0.45~1.30 THz 范围内实现了高效的 X-Y 方向交叉极化偏振转换, 有望用于集成化太赫兹偏振转换器件的研究和应用中。

关键词: 太赫兹; 超材料; 偏振转换器

中图分类号: O436.3

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023391

Terahertz polarization converter design based on square SRR

NIE Mengxue^{1,2}, ZHANG Tianyu^{1,2}, XIE Peiyao^{1,2}, LIU Shenggang^{1,2}, HU Min^{1,2}

(1. School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China; 2. Key Laboratory of Terahertz Technology, Ministry of Education, Chengdu Sichuan 611731, China)

Abstract: A new type of transmissive terahertz polarization conversion device is proposed based on the metamaterial structure of the combination of square open ring and metal rod. Specifically, the influence of different combinations of basic structural elements on the polarization conversion characteristics is first studied. The working bandwidth of the polarization conversion function is improved by optimizing the relevant parameters of the structural units. Finally, the efficient X-Y cross-polarization conversion is realized in the range of 0.45~1.30 THz, which is expected to be used in the research and application of integrated terahertz polarization conversion devices.

Keywords: terahertz; metamaterial; polarization conversion devices

近年来, 太赫兹波越来越活跃在人们的视野中。太赫兹波处于微波与红外的过渡阶段, 频率为 0.1~10 THz, 对应的波长为 3 mm~30 μm , 在电磁波波谱上处于由宏观电子学向微观光子学的过渡区域。太赫兹波比微波具有更强的穿透性, 比红外具有更低的辐射性, 因此在无损检测、生物医学成像等多领域有重要的应用前景^[1-3]。超材料是 21 世纪以来出现的特种复合材料或结构, 是一种通过对材料关键物理尺寸进行有序结构设计, 使其获得常规材料不具备的超常物理性质的结构材料。超材料涉及众多学科领域, 是全球最前沿、最具有战略性意义的研究课题, 被美国《Science》列入本世纪前 10 年的 10 项重要科学进展之一, 《Materials Today》也称其为材料科学 50 年中的 10 项重要突破之一。随着超表面研究与加工技术的发展, 超材料在电磁波的传输、偏振转换和吸收等多个领域有着显著应用。超材料概念最初由 Veselago 于 1967 年提出, 他通过理论研究预测了一种具有负折射率的材料^[4], 但在当时, 由于实验条件限制等原因没有被研究与证实。30 年后, 英国物理学家 Pendry 提出了一种圆柱形金属阵列结构, 并通过实验测量观测到其产生负折射率的现象^[5], 证实了 Veselago 的观点; 后又设计了经典的具有负磁导率的开口谐振环模型^[6]。由于超材料所具有的特殊性质, 许多基于超材料的器件应运而生。超材料在太赫兹频段偏振转换器的应用最早可追溯至 2013 年, N K Grady 等^[7]设计了一种在太赫兹频段实现偏振转换的反射式超表面周期结构, 实现了在 0.8~1.8 THz 频段的偏振转换。2018 年, X Jing 等^[8]设计了一种双层超表面, 在 0.55~1.37 THz 的宽频段内实现了 99% 的透射极化转换效率, 并用局域偶极子共振效应和类 F-P 腔模型对其极化转换增强机理进行解释。2022 年, Y Zhang 等^[9]设计了一种多层复合结构超表面实现极化转换。该器件可视为一个偶极子谐振器模型, 实现了太赫兹频段超宽带透射式 X-Y 极化转换。最近, X Jiang 等^[10]将偏振转换超

收稿日期: 2023-11-23; 修回日期: 2023-12-25

基金资助: 国家自然科学基金项目资助(61988102; 61921002; 62071108); 中央高校基金项目资助(ZYGX2020ZB007)

表面与各向异性液晶相结合，探究其独特的转换性能。目前的研究中，太赫兹频段的超材料偏振转换器大多局限于反射式超材料的设计，采用反射式结构实现偏振转换效果，并利用菲涅尔反射定律分析其机理。透射式偏振转换器多存在窄带、效率低或加工结构复杂等问题，在太赫兹频段可使用的透射式偏振片极少，因此透射式太赫兹偏振转换器稀缺是太赫兹器件领域亟待解决的问题。本文提出了一种新型超材料结构，基于方形开口环与金属棒状结构的组合进行结构设计，并通过探究不同组合方式之间的差异优化偏振转换性能，最后通过仿真实现了太赫兹频段高效、宽带的 X - Y 方向偏振转换。

1 太赫兹偏振转换器的设计与仿真

基于太赫兹超材料偏振转换器的研究现状以及本工作的研究目的，进行了基于 CST Microwave Studio 的超表面结构仿真。研究前期，利用电磁仿真软件对方形开口谐振环的特性进行仿真，包括谐振频点、 S 参数和极化转换效率等；其次，对金属棒状结构交织组成的对称十字结构进行仿真，证明此结构在太赫兹频段内具有偏振转换特性。基于对上述2种基本结构单元偏振转换特性的探究，发现当利用双方形开口谐振环组成 45° 对称结构时，单个谐振环几乎不具有的宽带偏振转换特性在太赫兹频段被大大增强；同时，十字交叉导线结构也在此频段具有优异的偏振转换性能。因此将具有 45° 对称性的双方形开口谐振环结构和十字结构进行结合，研究其相互作用对太赫兹频段偏振转换性能的影响，并通过调整参数和组合方式，优化其偏振转换性能。

以方形开口谐振环和金属棒状结构为基础单元进行设计，将其组合形成单元内 45° 对称的结构，初步设计结构A如图1所示，该结构由表层金属偏振转换层、中间介质层和底部金属光栅层构成。其中，单元周期长度 $P_x = P_y = 100 \mu\text{m}$ ，谐振环边长 $L = 35 \mu\text{m}$ ，开口宽度 $L_O = 6 \mu\text{m}$ ，线宽为 $2 \mu\text{m}$ ，结构中长导线长度 $L_1 = 88 \mu\text{m}$ ，宽度 $W_1 = 4 \mu\text{m}$ ，短导线长度 $L_2 = 10 \mu\text{m}$ ，宽度 $W_2 = 4 \mu\text{m}$ ，底层光栅宽度 $w = 12 \mu\text{m}$ ，光栅间距 $a = 20 \mu\text{m}$ 。顶层金属结构和底层金属结构厚度 $h_1 = 0.3 \mu\text{m}$ ，介质层厚度 $h = 50 \mu\text{m}$ 。其中，表面金属层采用金($\varepsilon = 4.56 \times 10^7 \text{ S/m}$, $\mu = 1$)材料，中间介质层采用聚酰亚胺($\varepsilon = 3.5 \text{ S/m}$, $\mu = 1$)，底层光栅采用金材料。

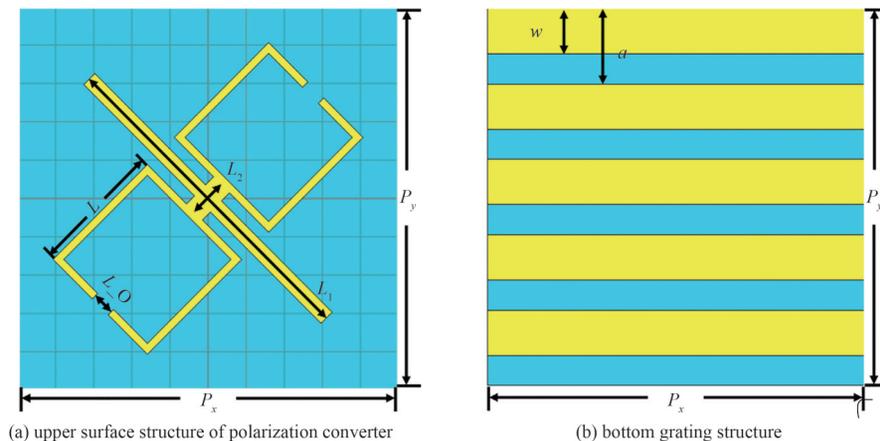


Fig.1 Structure diagram of terahertz transmissive polarization converter(structure A)

图1 太赫兹透射式偏振转换器结构图(结构A)

对结构A进行太赫兹频段电磁性能的仿真，通过调整方形开口环的间距、线宽、开口宽度以及金属棒的长、宽等参数，使其实现在 $0.73 \sim 1.2 \text{ THz}$ 范围内的 X - Y 方向的偏振转换。通过计算得到结构A的偏振转换效率(Polarization Conversion Rate, PCR) $>99\%$ 。仿真结构A在 1.0 THz 和 0.65 THz 处的电场发现，在 1.0 THz 左右，方形开口环与导线在单元之间形成了局域场，如图2(a)所示，这种现象可用局域偶极子共振效应解释：原入射波中只存在 X 方向电场，局域偶极子共振在上层结构内与单元结构间产生偶极子场，对透射电场方向产生影响，使其出现 Y 方向的电场，从而实现 X - Y 方向的偏振转换。同时在 1.0 THz 频点处，此偏振转换结构上表面场沿 45° 方向(即平行于结构方向)呈现同相场增强的分布形式(即单元内与单元间场同相位)，从而在一定程度上影响了局域场强度，使偏振转换效率高，交叉极化分量强。对结构A在 0.65 THz 频点处的场分布进行仿真，发现此时局域场主要分布在 X 方向的单元间， Y 方向没有明显的局域场分布，因而表面金属层在此频点转换效率不高，导致PCR曲线在该频点存在明显的共振峰，如图2(b)所示。由上述结果可发现，此器件的偏振转换机理是由上层结构引起的，在后文中也将对此观点进行证实。

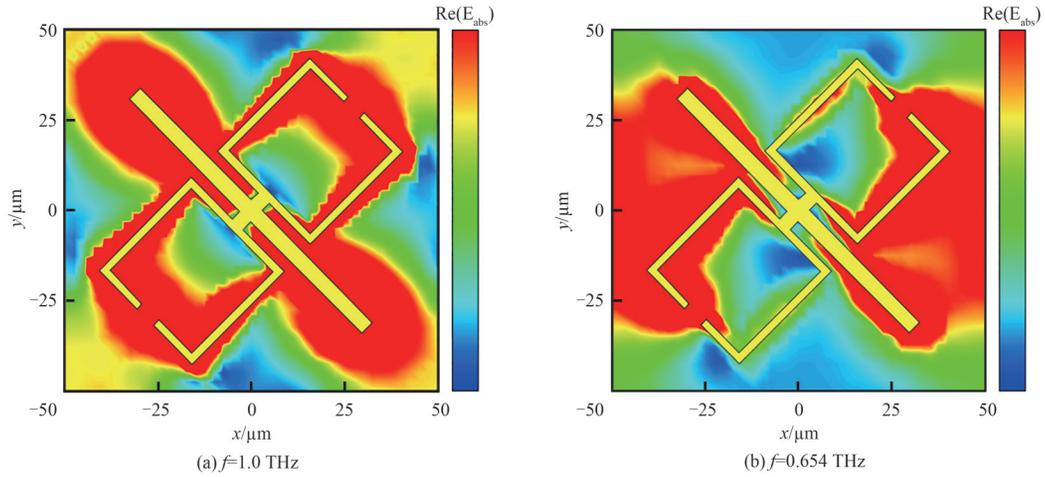


Fig.2 Electric field distribution of polarization converter
图2 偏振转换器电场分布图

2 太赫兹偏振转换器的讨论与优化

基于上文中偏振转换器的设计及仿真结果，对偏振转换器进行设计优化：改变方形开口环的开口方向，仍保持整体结构的 45° 对称性(结构B)，如图3(a)所示，基本参数设置与结构A一致。

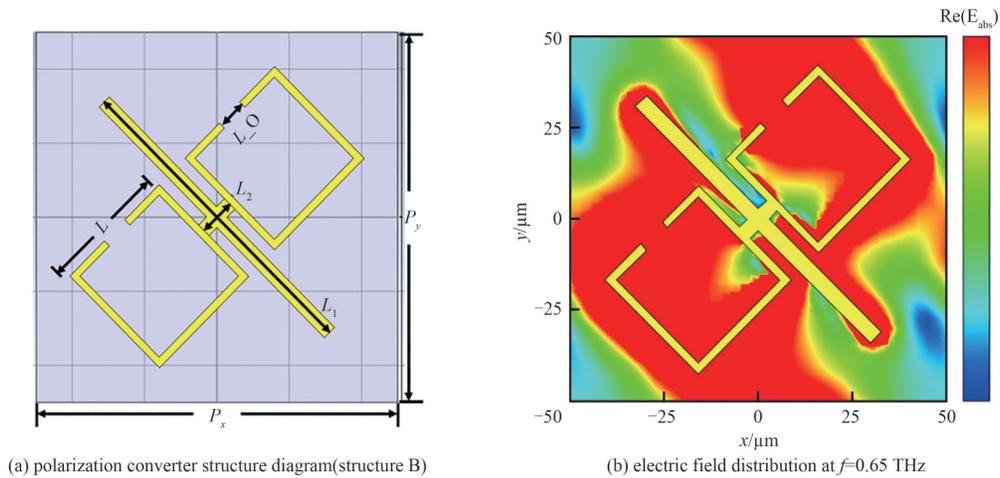


Fig.3 Optimized polarization converter structure and field distribution diagram
图3 优化后的偏振转换器结构及场分布图

在方形开口环开口方向更改后，发现结构B在太赫兹频段的偏振转换性能相比结构A存在明显差异。为探究组合结构变化引起偏振转换性能差异的原因，同样对结构B进行了电场仿真，结果如图3(b)所示。可以观察到，在0.65 THz频点处，整个结构可被视为一个类偶极子谐振器模型。这是由于在改变开口环开口方向后，开口环的场辐射方向发生了改变，与金属棒状偶极子谐振器方向一致。当入射波沿 X 方向入射时，由于结构整体的偶极子共振，产生了垂直于结构和平行于结构的电场(45° 方向)，因此透射场中存在 Y 方向分量。同样，通过观察场分布图可以直观地发现，在同样的电场量程下，结构B的场分布中沿 Y 向的场分量更强，使结构B交叉极化更高。结构B在0.45~1.3 THz范围内实现了 X - Y 方向偏振转换，转换效率 $PCR>99\%$ 。

由上述结果可知，开口环方向影响结构中电场的分布：结构A呈现局域偶极子共振场，且沿 45° 方向呈现同相场增强现象；结构B呈现类偶极子谐振器现象。不同的电场分布影响了组合结构偏振转换的机理，从而影响了其在太赫兹频段的偏振转换带宽和效率，如图4所示。结构A中，由于开口环方向向外，而方形开口环具有沿开口方向辐射电场的特性，因此在每个超表面结构单元间可以产生较强的局域偶极共振场，以及同相场的相互促进，从而实现偏振转换。同时由于背栅的存在，起到了抑制 X 方向场透射作用，使同极化分量的透过率为0；而 Y 方向场垂直于光栅，即交叉极化分量可以透过底部结构。通过仿真计算，结构A在0.73~1.2 THz范围内，实现了 X - Y 方向的偏振转换，偏振转换效率 $PCR>99\%$ ，交叉极化分量最高达到0.45，但在0.65 THz处存在偏振转

换性能缺陷。在结构 B 中，由于方形开口环的开口方向发生改变，2 个开口环的开口方向均沿 45° 对角线方向。通过电场仿真，发现结构 B 本身可被视为一个类偶极子谐振器模型，结构沿 45° 放置，实现了 X-Y 方向的偏振转换；同时，底部的金属背栅使结构 B 的同极化分量为 0，交叉极化分量最高也达到 0.45，偏振转换效率达到 99% 以上。结构 B 的转换效率和交叉极化分量与结构 A 差异不大，但与结构 A 相比，结构 B 在太赫兹频段的偏振转换带宽有了大幅度提升，由 0.73~1.2 THz 提升为 0.45~1.3 THz；同时，结构 B 还弥补了结构 A 在 0.65 THz 处的带宽缺陷。由此可见，结构 B 在偏振转换性能上有一定的提升。

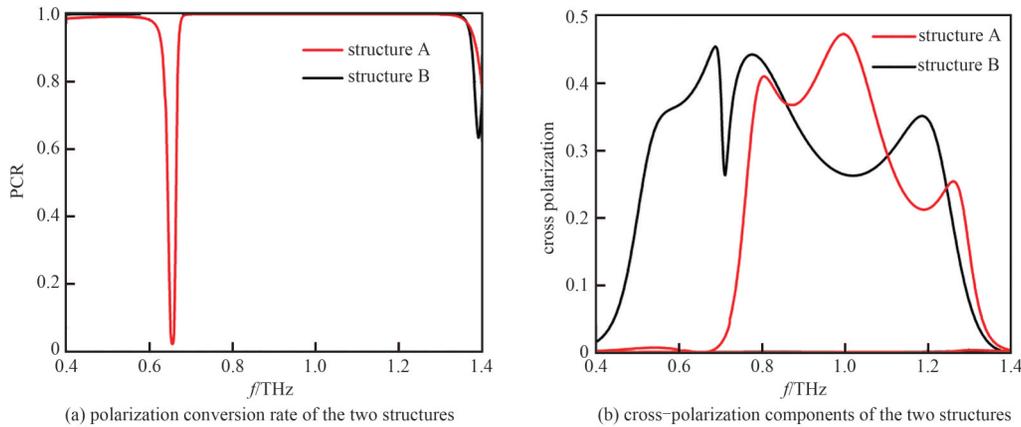


Fig.4 Performance parameters of polarization conversion devices
图4 偏振转换器件性能参数

为证明此结构产生的宽带偏振转换特性是由上层结构引起的，排除光栅对整体结构带宽的影响，本文基于结构 B 对其有无底部光栅的情况进行仿真。图 5(a) 中黑线所示，光栅本身并不具有偏振转换性，当入射场沿 X 方向时，其交叉极化分量(即 Y 方向)在 0.4~1.4 THz 范围内恒为 0。而无底部光栅的结构 B 在整体的偏振转换带宽上未受影响，在 0.45~1.3 THz 范围内仍存在较明显的交叉极化分量，见图 5(b) 红线，但交叉极化值与完整的结构相比，有一定程度的削弱，推测是由于表层结构和光栅的耦合导致^[8]，在此不做深入讨论。同时，本文也对结构中金属(金材料)更换为理想导体(Perfect Electric Conductor, PEC)的情况进行了讨论，见图 5(b)。将结构 B 中所有金属换为 PEC 后，整体的交叉极化分量有一定的提升，但偏振转换带宽未有明显变化。值得注意的是，将金换为 PEC 后，结构在 0.7 THz 附近的谐振峰加剧，这是由双方形开口环与十字棒状结构之间的耦合效应增强导致的。

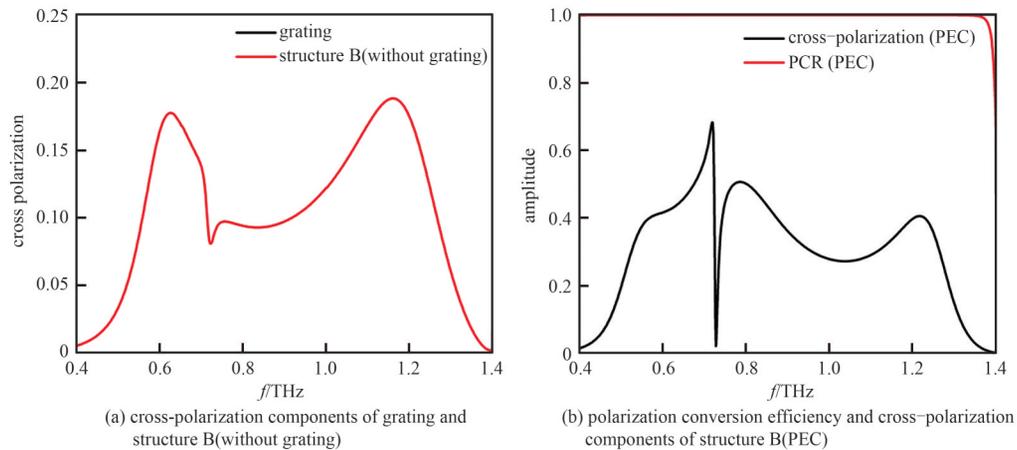


Fig.5 Discussion of polarization conversion performance under special circumstances
图5 特殊情况下的偏振转换性能讨论

3 结论

本文基于方形开口谐振环与金属棒状结合的超材料结构，提出了一种新型透射式太赫兹偏振转换器。主要研究了由 2 种基本结构的不同组合形式引起的偏振转换性能的差异，具体说，当谐振环开口方向不同时，会导致整体结构的偏振转换现象发生变化，从而影响器件的偏振转换效率与工作带宽。本文主要提出了 2 种超材料结构，通过优化其结构参数，结构 A 可以在 0.73~1.2 THz 范围内实现太赫兹交叉极化偏振转换，转化分量可达到入

射光的 45% 左右, 且偏振转换率 >99%; 结构 B 通过改变开口环开口方向, 在结构 A 的基础上显著提高了器件的工作带宽, 能够在 0.45~1.3 THz 范围内实现 X-Y 方向交叉极化偏振转换。

参考文献:

- [1] 刘盛纲, 钟任斌. 太赫兹科学技术及其应用的新发展[J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(5): 481-486. (LIU Shenggang, ZHONG Renbin. Recent development of terahertz science and technology and its applications[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009, 38(5): 481-486.) doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2009.05.001.
- [2] 许景周, 张希成. 太赫兹波科学技术及应用[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007. (XU Jingzhou, ZHANG Xicheng. Terahertz wave science, technology and applications[M]. Beijing: Peking University Press, 2007.)
- [3] 王忆锋, 毛京湘. 太赫兹技术的发展现状及应用前景分析[J]. 光电技术应用, 2008, 23(1): 1-4, 41. (WANG Yifeng, MAO Jingxiang. Analysis on development status of terahertz technology and application prospect[J]. Electro-Optic Technology Application, 2008, 23(1): 1-4, 41.) doi:10.3969/j.issn.1673-1255.2008.01.001.
- [4] VESELAGO V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. Soviet Physics Uspekhi, 1968, 10(4): 509. doi:10.1070/PU1968v010n04ABEH003699.
- [5] PENDRY J B, HOLDEN A J, STEWART W J, et al. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures[J]. Physical Review Letters, 1996, 76(25): 4773-4776. doi:10.1103/PhysRevLett.76.4773.
- [6] PENDRY J B, HOLDEN A J, ROBBINS D J, et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(11): 2075-2084. doi:10.1109/22.798002.
- [7] GRADY N K, HEYES J E, CHOWDHURY D R, et al. Terahertz metamaterials for linear polarization conversion and anomalous refraction[J]. Science, 2013, 640(6138): 1304-1307. doi:10.1126/science.12353.
- [8] JING Xufeng, GUI Xincui, ZHOU Pengwei, et al. Physical explanation of Fabry-Perot cavity for broadband bilayer metamaterials polarization converter[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(12): 2322-2327. doi:10.1109/JLT.2018.2808339.
- [9] ZHANG Yihao, LUAN Weimeng, YAN Xiaona, et al. Ultra-broadband asymmetric transmission and linear polarization conversion based on terahertz metamaterials[J]. Applied Physics B, 2022(128): 156. doi:10.1007/s00340-022-07871-2.
- [10] JIANG Xinhao, JI Yunyun, FAN Fei, et al. Terahertz polarization and chirality modulation induced by asymmetry inversion combining chiral metasurface and liquid crystal anisotropy[J]. Optics Letters, 2023, 48(7): 1682-1685. doi:10.1364/OL.482478.

作者简介:

聂梦雪(1999-), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为新型材料的太赫兹偏振转换特性. email: mengxue_nie@std.uestc.edu.cn.

张天宇(1996-), 男, 博士, 主要研究方向为新型材料与太赫兹波互作用研究和应用.

谢裴曜(1998-), 女, 在读博士研究生, 主要研究方向为新型二维材料与结构的太赫兹电磁特性.

刘盛纲(1933-), 男, 中国科学院院士, IEEE Life Fellow, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电子回旋脉塞、自由电子激光、微波电子学、微波等离子体电子学及太赫兹科学技术等.

胡旻(1981-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为新型太赫兹辐射源和太赫兹科学技术应用等.