

# 太赫兹波吸收器和 HEMT 太赫兹探测器的相关性质及制备

李兆峰

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

**摘要:** 作者从事光子晶体, 超材料, 表面等离子激元, 纳米光学等方面的研究。本文简要介绍了作者三部分工作, 分别为: 利用半导体(如硅或者砷化镓)多层结构调控光学系统折射率的实部; 研究了金属微纳结构表面等离子激元增益-损耗杂化结构及其光谱性质在太赫兹波领域, 成功制备了集成光学陀螺 (RIOG) 中大尺寸波导谐振腔。

**关键词:** 太赫兹波;吸收器;探测器

## 1 专业技术成果介绍

### 1.1 利用半导体(如硅或者砷化镓)多层结构调控光学系统折射率的实部, 实现了 THz 频率范围内任意目标频率附近的阻抗匹配

基于阻抗匹配的结构实现了电磁波吸收器, 在阻抗匹配的频率附近可以实现超过 97% 的吸收效率,如图 1.1 所示。

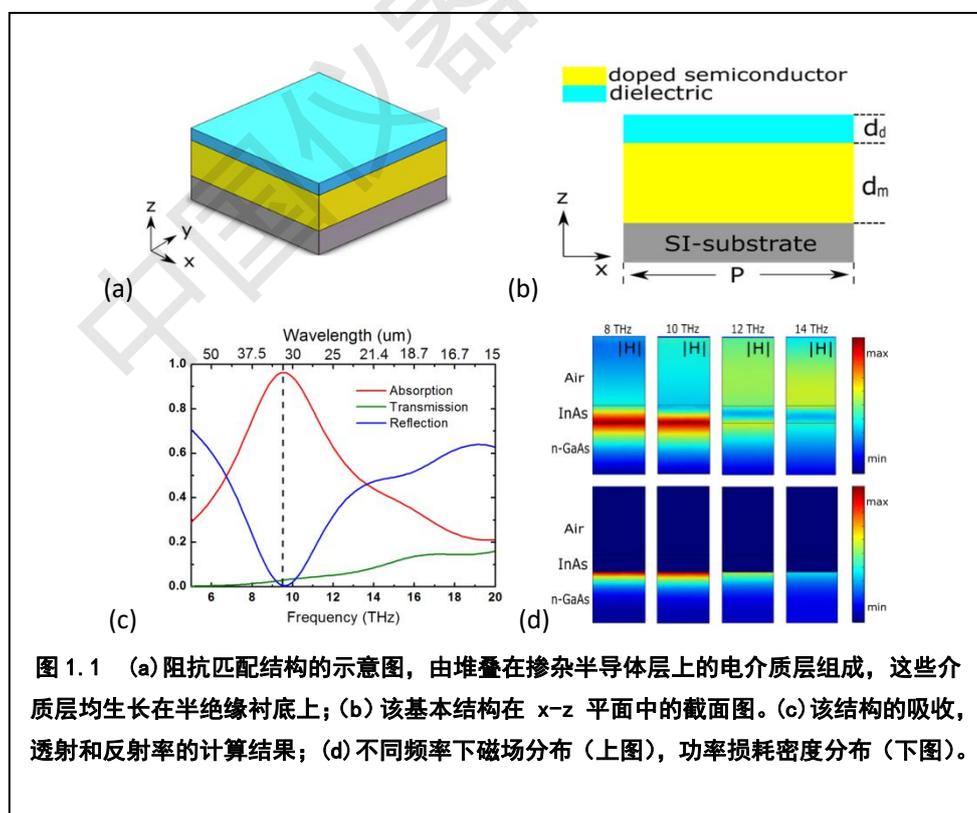


图 1.1 (a) 阻抗匹配结构的示意图, 由堆叠在掺杂半导体层上的电介质层组成, 这些介质层均生长在半绝缘衬底上; (b) 该基本结构在  $x-z$  平面中的截面图。(c) 该结构的吸收, 透射和反射率的计算结果; (d) 不同频率下磁场分布 (上图), 功率损耗密度分布 (下图)。

通过在基本吸收器结构的顶部上添加图案化的立方体双层结构, 实现了宽带的电磁波吸

收器。宽带吸收器实现了从 8 THz 到 14 THz 范围内平均 95% 的吸收效率，如图 1.2 所示。所提出的阻抗匹配/太赫兹波吸收器结构与半导体技术兼容性好。可以在光学成像、消除光学组件中的反射等方向有重要的应用。

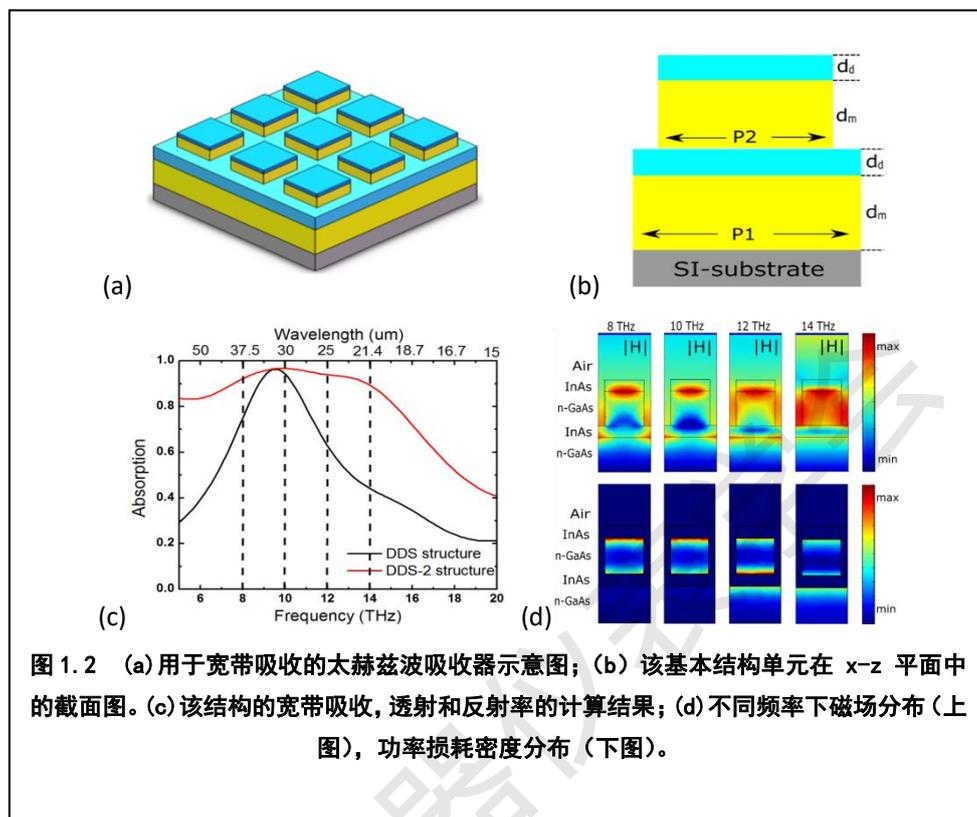


图 1.2 (a) 用于宽带吸收的太赫兹波吸收器示意图；(b) 该基本结构单元在  $x-z$  平面中的截面图。(c) 该结构的宽带吸收，透射和反射率的计算结果；(d) 不同频率下磁场分布（上图），功率损耗密度分布（下图）。

对集成天线的 GaN HEMT 场效应晶体管太赫兹波探测器中的衬底效应进行了全面的理论与模拟研究。随着衬底厚度的增加，天线辐射到空气中的能量与天线辐射出来的总能量之比  $R$  会出现一系列逐渐变小的峰值。研究表明，该能量占比  $R$  和平面天线的具体结构以及仿真中的天线源阻抗无关，而取决于衬底厚度，衬底的相对介电常数以及工作频率。另一方面，经过仿真计算的太赫兹响应度随衬底厚度的增加也会出现一系列的峰值，且这些峰值对应的衬底厚度与辐射能量占比  $R$  出现峰值的衬底厚度几乎相同，如图 1.3。由此，辐射能量占比  $R$  与探测器的响应度具有正相关性。因此，在太赫兹波探测器的设计中，我们可以根据该能量占比  $R$  的峰值来选择合适的衬底厚度，在兼顾芯片的机械稳定性和工艺可行性的同时以获得更好的天线性能以及更高的太赫兹响应度。

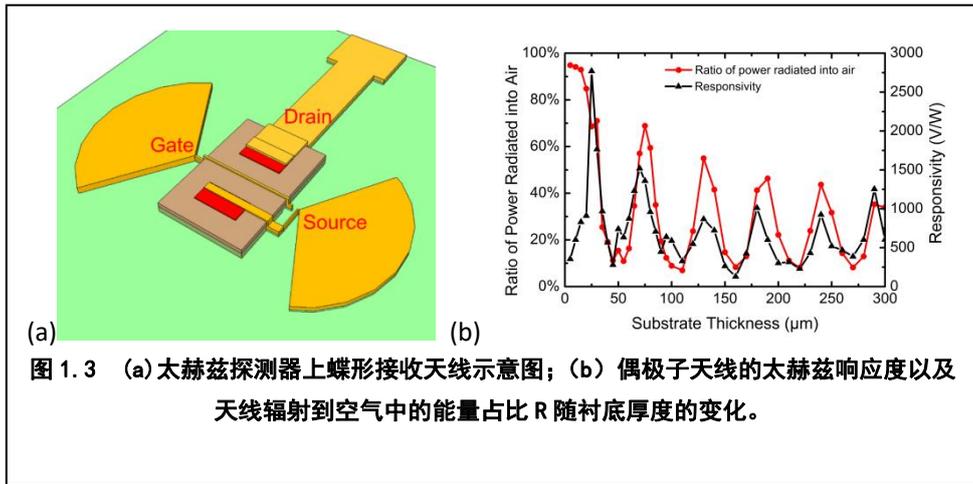


图 1.3 (a) 太赫兹探测器上蝶形接收天线示意图; (b) 偶极子天线的太赫兹响应度以及天线辐射到空气中的能量占比  $R$  随衬底厚度的变化。

在此基础上, 对太赫兹天线中心频率的标定进行了深入研究。提出了一种基于晶体管栅极边缘沟道中的电场增强来设计平面天线的方法, 该方法的有效性已经被实验初步证实, 为场效应晶体管太赫兹波探测器天线设计提供了新途径。针对 220GHz 的大气窗口, 重新设计了集成蝶形天线的太赫兹波探测器(如图 1.4 所示), 在 227GHz 取得 2029.6V/W 的最大响应度以及 62.15 pW/Hz<sup>1/2</sup> 的最小噪声等效功率。

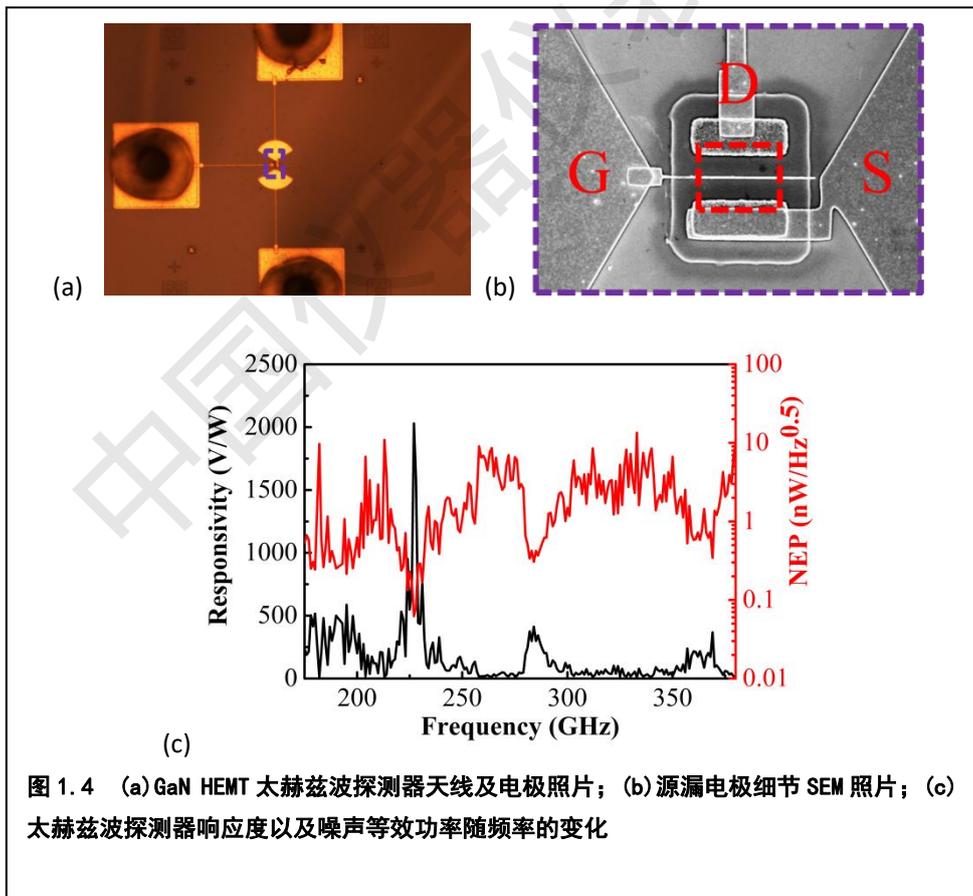
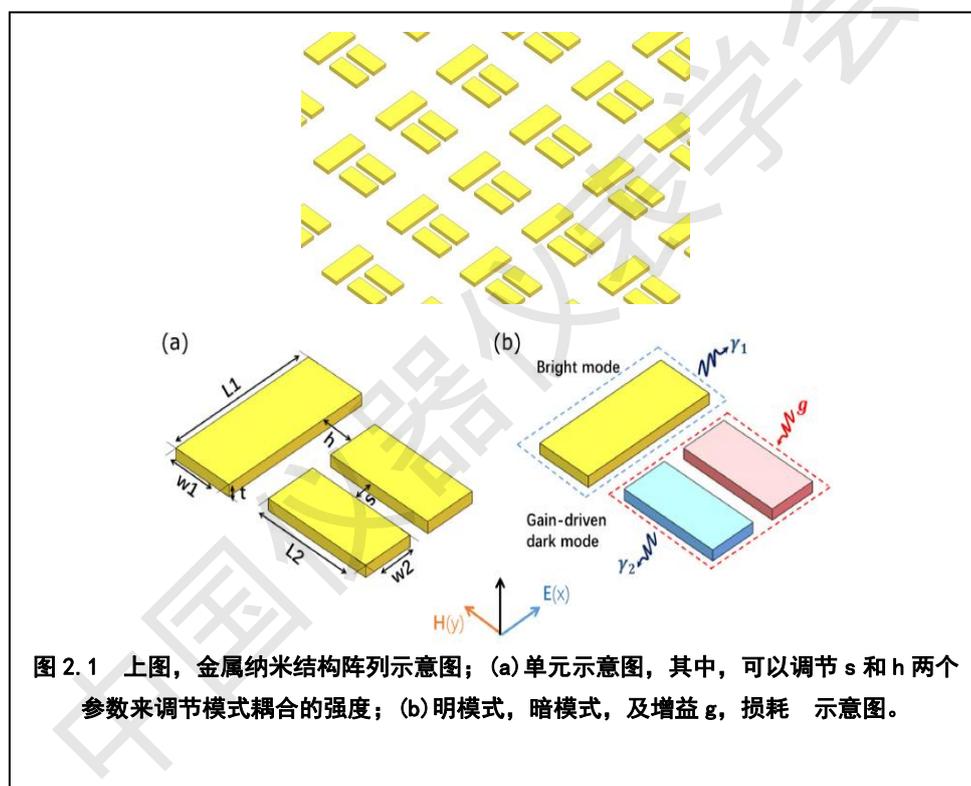


图 1.4 (a) GaN HEMT 太赫兹波探测器天线及电极照片; (b) 源漏电极细节 SEM 照片; (c) 太赫兹波探测器响应度以及噪声等效功率随频率的变化

1.2 研究了金属微纳结构表面等离激元增益-损耗杂化结构及其光谱性质, 为等离激元纳米激光器的设计提供了新思路

纳米阵列结构中有与入射波电场方向平行的金属条偶极子，可被入射光激发，称为明模式。两条垂直于电场方向的金属条形成一个电四极子，可被近场耦合激发，称为暗模式。如图 2.1 所示。通过在电四极子里引入不同形式的增益，我们实现了高 Q 值的电磁感应透明，光谱奇点和增强的电磁感应吸收。如图 2.2，纳米天线模式的激发，激发态 1 对应明模式的激发，激发态 2 对应暗模式的激发。激发态 1 可以由 0 到 1 直接激发，0 到 1 到 2 到 1 间接激发，两种激发路径的相消干涉产生 Fano 共振线型，当  $\gamma = 0$ ，即两个激发态能量相同时，称为电磁诱导透明(EIT)效应。当引入的增益平衡了暗模式中的吸收损耗，可以得到完美的 EIT，如红色曲线所示。通过优化几何尺寸，减小明暗模式间的耦合强度，实现了超高 Q 值的 EIT，如蓝色曲线所示。



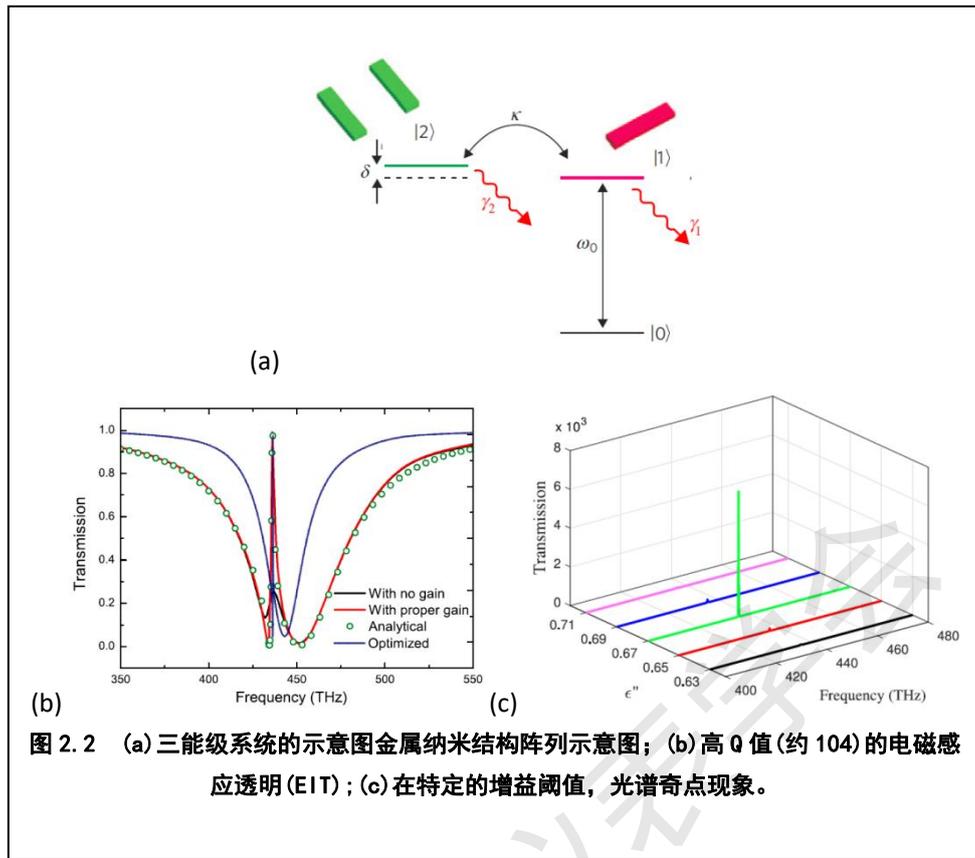


图 2.2 (a) 三能级系统的示意图金属纳米结构阵列示意图；(b) 高 Q 值 (约 104) 的电磁感应透明 (EIT)；(c) 在特定的增益阈值，光谱奇点现象。

当暗模式中的增益水平继续升高，到达某个增益阈值时，可以观察到系统的光谱奇点。我们利用耦合模理论，得到系统的散射矩阵  $H$ ，当  $H$  矩阵的本征值（频率）为实数时，该频率将发生和非厄密哈密顿量相关的光谱奇异性现象，在入射光保持一定的情况下，透射和反射系数趋向于极大值，即系统的光谱奇点，实际上就对应于激光。

### 1.3 成功制备了集成光学陀螺（RIOG）中大尺寸波导谐振腔，为谐振型光学陀螺的微型化打下了基础

研究制备了厘米量级大宽高比低损耗  $\text{Si}_3\text{N}_4$  波导微环谐振腔（如图 3.1 所示），成功制备出了半径 1.5cm 品质因数为  $6.7 \times 10^5$  的波导微环谐振腔，波导传输损耗约为 0.16dB/cm，其理论散粒噪声极限灵敏度为  $17.64^\circ/\text{h}$ （假设 PD 端接收的最大光功率为 1 mW，PD 量子效率为 0.9，检测带宽为 1Hz）。

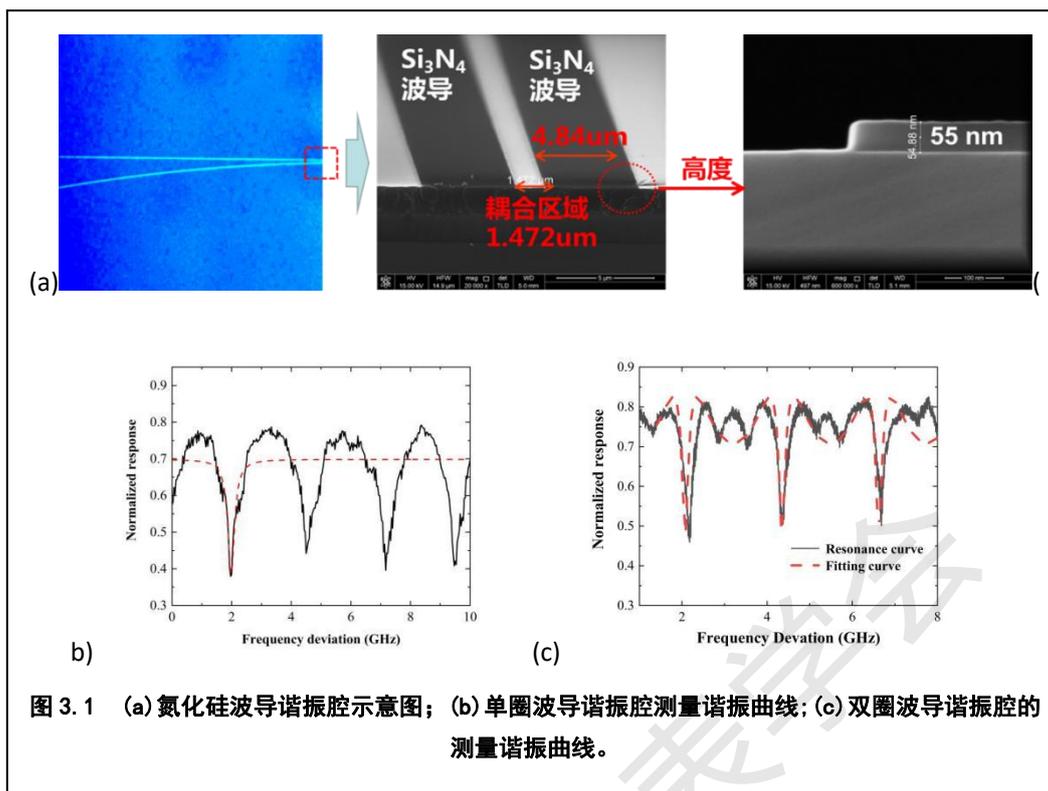


图 3.1 (a)氮化硅波导谐振腔示意图；(b)单圈波导谐振腔测量谐振曲线；(c)双圈波导谐振腔的测量谐振曲线。

## 2 专业技术人才介绍

### 2.1 个人简介

李兆峰，中国科学院半导体研究所研究员，博士生导师。1998 年和 2002 年，分别从清华大学材料科学与工程系本科及博士毕业。2015 年，入选中国科学院人才计划。先后在中科院上海微系统与信息技术研究所，土耳其 Bilkent 大学纳米研究中心，美国密苏里科技大学机械与航空工程系，从事光子晶体，超材料，表面等离激元，纳米光学等方面的研究。目前已经发表 60 多篇 SCI 论文，被引用超过 2000 次，申请专利 6 项。

### 2.2 专业技术研究方向

微纳光学与光电子学，表面等离激元 (Surface plasmon)，光子晶体，太赫兹波探测器，超材料 (Metamaterials) 等。

### 2.3 承担科技项目及代表论著

主持国家重点研发计划项目 1 项，中国科学院项目 2 项。参与国家重点研发计划项目 1 项。

代表论著：

- [1] Miao Chen, Liuwen Zeng, Xin Tong, Zhaofeng Li\*, Xiaodong Wang, and Fuhua Yang, Manipulating EIT and EIA Effects by Tuning the Gain Assisted Dark Mode, IEEE Journal Of

Selected Topics In Quantum Electronics, 2021,,27(1), 4600110-4600113.

- [2] Miao Chen, Zhaofeng Li\*, Xin Tong, Xiaodong Wang\*, and Fuhua Yang, Manipulating the critical gain level of spectral singularity in active hybridized metamaterials, Optics Express,2020, 28(12), 17966-17971.
- [3] Miao Chen , Wei Yan, Xin Tong, Liuwen Zeng, Zhaofeng Li\* , and Fuhua Yang , Metamaterials absorber based on doped semiconductor for THz and FIR frequency ranges , Journal of Optics,2019, 21(3), 35102-35108.
- [4] Xin Tong, Zhaofeng Li\*, Guowei Han, Nan Liu, Yan Su, Jin Ning\*, and Fuhua Yang\*, “Adaptive EKF Based on HMM Recognizer for Attitude Estimation Using MEMS MARG Sensors”, IEEE Sensors Journal,2018,18(8), 3299-3303.
- [5] Bowen Zhang, Wei Yan, Zhaofeng Li\*, Long Bai, and Fuhua Yang\*, “Analysis of Substrate Effect in Field Effect Transistor Terahertz Detectors”, IEEE Journal Of Selected Topics In Quantum Electronics,2017,23(4), 8500607-8500610.